



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Ingegneria Industriale DII

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

CARATTERIZZAZIONE TERMO-STRUTTURALE DI
MATERIALI CERAMICI PER APPLICAZIONI IN
FISICA E MEDICINA NUCLEARE

Relatore: Ch.mo Prof. Giovanni Meneghetti

Correlatori: Dott. Alberto Andrighetto¹

Dott. Mattia Manzolaro¹

Dott. Stefano Corradetti¹

Ing. Michele Ballan¹

¹*Istituto Nazionale di Fisica Nucleare*

Studente: Matteo Sturaro

Anno Accademico 2017/2018

Questo lavoro è dedicato a Stefano, Alessandra e Silvia, la mia famiglia, da sempre per me un fondamentale punto di riferimento ed un'indispensabile fonte di supporto. Grazie.

Desidero ringraziare tutti coloro che mi hanno accompagnato in questo percorso di studi e che mi sono stati accanto durante lo svolgimento di questo lavoro. Un grazie ai miei coinquilini, ai miei più cari amici e a tutte le persone a me vicine.

Uno speciale ringraziamento ai miei colleghi dell'INFN ed un sincero grazie a Mattia e a Michele per avermi seguito in modo professionale ed amichevole: durante tutti questi mesi hanno rappresentato per me un'importante guida dal punto di vista scientifico ed umano.

Ringrazio, infine, tutto il gruppo dell'EN-MME Mechanical Laboratory del CERN per avermi offerto l'opportunità di vivere un'importante esperienza di lavoro e di vita.

“If I have seen further it is by standing on the shoulders of Giants”

INTRODUZIONE

Dall'inizio del ventesimo secolo si è affermata la crescente importanza della fisica nucleare, aprendo la strada a nuovi campi di ricerca e portando alla creazione di nuove tecnologie. Molte di queste hanno trovato applicazione in un vasto numero di settori, come la medicina, l'industria e la fisica applicata, arrivando talvolta ad influenzare usi e costumi della società. Talvolta, la ricerca pone quesiti le cui risposte sembrano senza un pratico ed immediato utilizzo, ma ciò accade solo in apparenza. A tal proposito, si può citare la vicenda accaduta tra Michael Faraday ed il Primo Ministro inglese dell'epoca, Sir Robert Peel: quest'ultimo, in visita all'allora già famoso fisico, guardando ad una invenzione che sarebbe poi diventata l'attuale dinamo, chiese a cosa servisse e Faraday rispose: "Ancora non lo so, ma sono sicuro che il suo governo riuscirà a metterci una tassa sopra".

Nel corso degli anni, l'Europa ha assunto un ruolo fondamentale nell'ambito della ricerca nucleare, tanto che si sta pianificando la costruzione di una nuova generazione di infrastrutture per la produzione di fasci radioattivi, con lo scopo di esplorare la materia esotica e di fornire un valido strumento per applicazioni di tipo medico ed industriale. All'interno del programma partecipa attivamente, con il progetto SPES (*Selective Production of Exotic Species*), anche l'INFN (*Istituto Nazionale di Fisica Nucleare*); tale progetto, sviluppatosi presso i LNL (*Laboratori Nazionali di Legnaro*), prevede la costruzione di una *facility* per la produzione di fasci di ioni radioattivi ricchi di neutroni (*neutron-rich*) e di alta qualità, nel range di massa compreso tra 80 e 160 uma. La produzione di fasci di ioni radioattivi richiede l'impiego di tecnologie estremamente complesse ed innovative; come sarà descritto dettagliatamente in seguito, il progetto SPES prevede il bombardamento di un bersaglio (*target*) in carburo di uranio, attraverso l'utilizzo di un fascio protonico primario in modo da generare, tramite reazione nucleare, specie radioattive all'interno del target stesso. Tali isotopi vengono successivamente estratti, ionizzati, separati in massa ed accelerati come fascio di ioni radioattivi. Il bersaglio di produzione è posizionato all'interno di un dispositivo chiamato *camera target* collegata al sistema che comprende tutte le parti dell'acceleratore necessarie a trattare il fascio radioattivo prodotto, denominato *Front-End*. La camera target dovrà essere periodicamente sostituita e collocata, attraverso sistemi automatici, in un deposito temporaneo dove, con il tempo, il suo livello di radioattività diminuirà.

Solitamente, il target si presenta come un unico blocco cilindrico racchiuso all'interno di un contenitore in grafite; l'idea innovativa introdotta col progetto SPES consiste nella suddivisione del target in sette dischi opportunamente spazati. Ciò consente, a parità di volume, di aumentare la superficie di scambio termico radiativo tra il target e la scatola che lo contiene: tale particolare è di fondamentale importanza, in quanto permette al target di smaltire con maggiore efficienza la potenza termica derivante dal fascio protonico che lo investe (potenza stimata in circa 8 kW).

Lo studio della distribuzione di temperatura e delle deformazioni termiche presenti nei componenti che costituiscono il target, la linea di trasferimento, la sorgente di ionizzazione e l'elettrodo estrattore è assai complesso. Per tale motivo i Laboratori Nazionali di Legnaro hanno avviato delle strette collaborazioni con l'ENEA (*Energia Nucleare ed Energie Alternative*) di Bologna, i Dipartimenti di Ingegneria Meccanica e di Scienze Chimiche dell'Università degli Studi di Padova, il CERN (*Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire* - Svizzera) ed i Laboratori di Oak Ridge (*Stati Uniti*).

Il presente lavoro di tesi si inserisce nel progetto SPES come studio delle proprietà meccaniche e termiche dei materiali di primo interesse per la costruzione del target e di altri componenti della *facility*, tra i quali si afferma la grafite ed il carburo di silicio, con lo scopo di analizzare distribuzioni di temperatura e tensione che si possono instaurare in fase d'esercizio. Per perseguire tale scopo, sono stati utilizzati strumenti di natura sperimentale e software, i cui risultati sono stati messi in relazione al fine di determinare proprietà e distribuzioni cercate. In particolare, è stato utilizzato l'apparato sperimentale disponibile ai LNL per la riproduzione dei gradienti termici radiali a cui sono sottoposti i dischi, col fine di analizzare le temperature in gioco e di eseguire test di rottura dei dischi. Inoltre, è stato messo a punto un modello agli elementi finiti dell'apparato con l'obiettivo di determinare la conducibilità termica del materiale d'interesse, proprietà di prima importanza, ed analizzare i campi termico, elettrico e tensionale. Successive analisi al microscopio elettronico hanno permesso lo studio dei meccanismi di frattura del materiale costituente i dischi. Infine, è stato formulato un nuovo criterio di resistenza relativo a dischi sottoposti ad intensi gradienti termici.

L'ultima parte del presente lavoro è stata realizzata in collaborazione al CERN di Ginevra: presso l'EN-MME Mechanical Laboratory è stato possibile eseguire una campagna sperimentale di caratterizzazione termo-fisica e strutturale della grafite utilizzata per la costruzione di numerosi componenti all'interno della camera target e lungo la linea protonica.

Il presente elaborato è articolato in 6 capitoli, il cui contenuto è di seguito brevemente riassunto:

Capitolo 1 - Il progetto SPES ai Laboratori Nazionali di Legnaro

Nel corso di questo capitolo, dopo una breve introduzione alla fisica nucleare ed alla tecnica ISOL per la produzione di fasci di ioni radioattivi, si illustrano le caratteristiche del progetto SPES, in fase di sviluppo presso i Laboratori Nazionali di Legnaro. Infine, sono elencate le principali applicazioni dei fasci di ioni esotici nei campi della fisica e della medicina nucleare.

Capitolo 2 - Il target di produzione SPES

Nel corso di questo capitolo è illustrata l'area di produzione degli isotopi, cuore dell'intera facility SPES, con particolare attenzione al target. Successivamente, sono riportate le caratteristiche di un target per una facility di tipo ISOL, soffermandosi sulle proprietà del carburo di uranio e del carburo di silicio, materiali di primo utilizzo per il target SPES. Infine, è descritto il problema dei gradienti termici sui dischi target causato dall'interazione con il fascio protonico.

Capitolo 3 - Stima della conducibilità termica di materiali d'interesse per il target di produzione SPES

Nel corso di questo capitolo è descritto il dispositivo per la riproduzione di gradienti termici sui dischi presente presso il laboratorio Alte Temperature dei LNL. Successivamente, dopo aver presentato il modello numerico ad esso associato, è descritto il metodo della funzione ottima per la stima della conducibilità termica del materiale costituente i dischi. Infine, sono presentati i risultati relativi alla misura di questa proprietà per due differenti tipologie di grafite e di carburo di silicio.

Capitolo 4 - Test di rottura di dischi sottoposti ad elevati gradienti termici

Nel corso di questo capitolo è descritta la valutazione delle tensioni strutturali associate ai gradienti termici. Inizialmente è presentata una soluzione analitica del problema secondo Timoshenko, la quale suppone una distribuzione assialsimmetrica di temperatura e spessore del disco trascurabile. Successivamente sono esposti i test a rottura dei dischi in carburo di silicio Hexoloy® SA, illustrandone le modalità di rottura.

Capitolo 5 - Caratterizzazione termo-fisica e strutturale della grafite POCO EDM-3® realizzata presso il CERN

Nel corso di questo capitolo è esposta la caratterizzazione termo-fisica e strutturale della grafite POCO EDM-3® effettuata presso l'EN-MME Mechanical Laboratory del CERN di Ginevra. Tali rilevazioni sperimentali hanno permesso il calcolo della conducibilità termica attraverso la misurazione di diffusività termica, calore specifico, densità e coefficiente di dilatazione termica; infine, sono presentati i risultati dei test di rottura a flessione ed a compressione.

Capitolo 6 - Considerazione relative ad un nuovo criterio di resistenza per dischi sottoposti ad elevati gradienti termici

Nel corso di questo capitolo è valutata la possibilità di formulare un nuovo criterio di resistenza relativo a dischi soggetti ad intensi gradienti termici lungo la loro direzione radiale. L'obiettivo finale di questo capitolo è mettere in luce una linea guida per la valutazione dell'idoneità di un materiale ad essere impiegato come target.

INDICE

Capitolo 1 - Il progetto SPES ai Laboratori Nazionali di Legnaro

1.1 Introduzione.....	1
1.2 Le specie esotiche.....	2
1.3 La produzione di fasci ionici radioattivi.....	5
1.4 La facility SPES	7
1.4.1 L'acceleratore primario.....	9
1.4.2 Il Front-End	11
1.4.3 Il target di produzione ed il sistema di estrazione e di ionizzazione.....	12
1.4.4 Separatori magnetici e post-accelerazione.....	18
1.4.5 I sistemi di movimentazione.....	18
1.5 Le applicazioni dei fasci esotici.....	19
1.5.1 Fisica nucleare	19
1.5.2 Fisica dello stato solido.....	21
1.5.3 Medicina nucleare.....	22
1.5.4 Astrofisica.....	24
1.6 Conclusioni.....	24

Capitolo 2 - Il target di produzione SPES

2.1 Introduzione.....	25
2.2 L'area di produzione SPES.....	25
2.2.1 Il front-end [10]	26
2.2.2 L'unità target-ion source.....	28
2.2.3 Requisiti e prestazioni di un target ISOL.....	31
2.3 Materiali per target ISOL	35
2.3.1 Carburo di uranio.....	36
2.3.2 Carburo di silicio	39
2.3.3 Grafite.....	43
2.4 Il problema dei gradienti termici sui dischi target	45
2.5 Conclusioni.....	48

Capitolo 3 - Stima della conducibilità termica di materiali d'interesse per il target di produzione SPES

3.1 Introduzione.....	49
3.2 L'apparato sperimentale per la riproduzione dei gradienti termici sui dischi.....	50
3.2.1 La camera da vuoto.....	51

3.2.2 Il sistema riscaldante	53
3.2.3 Il sistema di supporto	55
3.2.4 Il sistema per il vuoto	56
3.2.5 Gli strumenti di misura.....	61
3.3 Conducibilità termica	63
3.3.1 Definizione	63
3.3.2 Principali metodi per la stima della conducibilità	64
3.3.3 Metodo della funzione ottima	66
3.4 Modellazione numerica	71
3.4.1 Basi teoriche per la costruzione del modello agli elementi finiti.....	71
3.4.2 Definizione del modello geometrico	73
3.4.3 Scelta dell'elemento e stesura della mesh	75
3.4.4 Condizioni al contorno e carichi elettro-termici	77
3.4.5 Lancio della soluzione.....	79
3.4.6 Analisi dei risultati	80
3.5 Misure sperimentali e confronto con i risultati numerici	80
3.5.1 Validazione del modello numerico.....	81
3.5.2 Metodo della funzione ottima applicato	84
3.6 Conclusioni	95

Capitolo 4 - Test di rottura di dischi sottoposti ad elevati gradienti termici

4.1 Introduzione	97
4.2 Stima analitica dello stato tensionale	97
4.3 Procedura sperimentale ed integrazione numerica	103
4.3.1 Processo logico.....	103
4.4 Test prototipo su un campione di Hexoloy® SiC SE.....	104
4.4.1 Analisi termica e strutturale.....	104
4.4.2 Analisi al microscopio elettronico	111
4.5 Test di rottura su dischi in Hexoloy® SiC SA	115
4.5.1 Primi test	115
4.5.2 Implementazione di schermi termici e prime rotture.....	116
4.5.3 Risultati dei test di rottura su dischi in Hexoloy® SiC SA.....	124
4.5.4 Analisi al microscopio elettronico	128
4.6 Test su dischi in grafite POCO EDM-3®	136
4.6.1 Test base.....	136
4.6.2 Test con dischi intagliati.....	137
4.7 Conclusioni	140

Capitolo 5 - Caratterizzazione termo-fisica e strutturale della grafite POCO EDM-3[®] realizzata presso il CERN

5.1 Introduzione.....	141
5.2 Determinazione della diffusività termica.....	141
5.2.1 Laser flash method per la determinazione della diffusività termica	141
5.2.2 Risultati.....	145
5.3 Determinazione del calore specifico.....	147
5.3.1 Differential Scanning Calorimetry per la determinazione del calore specifico	147
5.3.2 Risultati.....	150
5.4 Determinazione del coefficiente di dilatazione termica.....	151
5.4.1 Apparato sperimentale e procedura utilizzati.....	151
5.4.2 Risultati.....	154
5.5 Misurazione della densità	156
5.5.1 Apparato sperimentale e procedura utilizzati.....	156
5.5.2 Risultati.....	157
5.6 Determinazione della conducibilità termica	159
5.6.1 Procedura utilizzata	159
5.6.2 Risultati.....	159
5.7 Determinazione delle proprietà elastiche.....	161
5.7.1 L'impact excitation technique per la determinazione delle proprietà elastiche	161
5.7.2 Risultati.....	166
5.8 Determinazione della resistenza a flessione	169
5.8.1 Il metodo della flessione a 4 punti	169
5.8.2 Risultati.....	174
5.8.3 Stima del modulo di Young mediante prove di flessione a 4 punti	183
5.9 Test di resistenza a compressione.....	185
5.9.1 Apparato sperimentale e procedura utilizzati.....	185
5.9.2 Risultati.....	186
5.9.3 Stima del modulo di Young in compressione	195
5.10 Conclusioni.....	196

Capitolo 6 - Considerazione relative ad un nuovo criterio di resistenza per dischi sottoposti ad elevati gradienti termici

6.1 Introduzione.....	197
6.2 Legame tensione-differenza di temperatura massimi	199
6.3 Linee guida per l'applicazione del criterio	203
6.4 Conclusioni.....	206
Conclusioni.....	207

Appendice A - Studio elettro-termo-strutturale del crogiolo riscaldante

A.1 Introduzione	209
A.2 Studio elettro-termico numerico e validazione sperimentale	209
A.3 Studio strutturale	211
A.4 Taratura del nuovo set di crogioli.....	217
A.5 Conclusioni	221

Appendice B - An introduction to the Design Optimization in Ansys®

B.1 Introduction	223
B.2 The optimization problem	223
B.3 Example of design optimization	224

Appendice C - Studio del dispositivo per la riproduzione di intensi gradienti termici mediante Ansys® Workbench

C.1 Introduzione	233
C.2 Costruzione del modello elettro-termo-strutturale semplificato	233
C.2.1 Inserimento delle proprietà dei materiali	234
C.2.2 Inserimento delle geometrie.....	236
C.2.3 Assegnazione del materiale e creazione della mesh	239
C.2.4 Impostazione dell'analisi elettro-termica.....	243
C.2.5 Impostazione dell'analisi strutturale	245
C.3 Risultati numerici e confronto con i risultati sperimentali.....	247
C.3.1 Disco in grafite POCO EDM-3®	248
C.3.2 Disco in carburo di silicio Hexoloy® SA	249
C.4 Analisi strutturale dei componenti.....	250
C.4.1 Disco in grafite POCO EDM-3®	250
C.4.2 Disco in carburo di silicio Hexoloy® SA	252
C.4.3 Crogiolo riscaldante.....	253
C.5 Ottimizzazione in Ansys® Workbench	253
C.5.1 Metodo della mappatura del disco	253
C.5.2 Metodo della conducibilità termica costante al variare della temperatura	256
C.6 Conclusioni.....	257

Appendice D - Metodo della funzione ottima modificato

D.1 Introduzione	259
D.2 Modifica del metodo	259
D.3 Risultati	260
D.4 Conclusioni	268

Appendice E - APDL del modello numerico

E.1 Introduzione	269
E.2 APDL per la validazione delle proprietà del materiale	269
E.3 APDL per la determinazione della conducibilità termica	278
E.4 APDL per la valutazione delle tensioni strutturali	288

Appendice F - Macro dei materiali utilizzati

F.1 Introduzione	291
F.2 Macro della grafite POCO EDM-3®	291
F.3 Macro della grafite POCO EDM-3® CERN	295
F.4 Macro dell'acciaio AISI 304	299
F.5 Macro del rame	302
F.6 Macro del carburo di silicio Hexoloy® SA	305
F.7 Macro del carburo di silicio Hexoloy® SE	311
F.8 Macro della grafite POCO EDM-AF5®	314
F.9 Macro del tantalio	316
Bibliografia.....	323

CAPITOLO 1

Il progetto SPES ai Laboratori Nazionali di Legnaro

*“La scienza ci insegna a non trascurare niente,
a non disdegnare gli inizi modesti, in quanto
nel piccolo sono sempre presenti i principi del grande,
come nel grande è contenuto il piccolo.”*

Michael Faraday

1.1 Introduzione

L'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (*INFN*) è l'ente pubblico nazionale di ricerca, vigilato dal Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca (*MIUR*), dedicato allo studio dei costituenti fondamentali della materia e delle leggi che li governano. Svolge attività di ricerca, teorica e sperimentale, nei campi della fisica subnucleare, nucleare e astroparticellare. Le attività di ricerca dell'*INFN* si svolgono tutte in un ambito di sinergia internazionale ed in stretta collaborazione con il mondo universitario italiano, sulla base di consolidati e pluridecennali rapporti. La ricerca fondamentale in questi settori richiede l'uso di tecnologie e strumenti di ricerca d'avanguardia che l'*INFN* sviluppa sia nei propri laboratori sia in collaborazione con il mondo dell'industria.

L'*INFN* è stato istituito l'8 agosto 1951 da gruppi delle Università di Roma, Padova, Torino e Milano al fine di proseguire e sviluppare la tradizione scientifica iniziata negli anni '30 con le ricerche teoriche e sperimentali di fisica nucleare di Enrico Fermi e della sua scuola. Nella seconda metà degli anni '50, l'*INFN* ha progettato e costruito il primo acceleratore italiano, l'elettrosincrotrone realizzato a Frascati dove è nato anche il primo Laboratorio Nazionale dell'Istituto. Nello stesso periodo è iniziata la partecipazione dell'*INFN* alle attività di ricerca del CERN, il Centro Europeo di Ricerche Nucleari di Ginevra, per la costruzione e l'utilizzo di macchine acceleratrici sempre più potenti. Oggi l'ente conta circa 5000 scienziati il cui contributo è riconosciuto internazionalmente non solo nei vari laboratori europei, ma in numerosi centri di ricerca mondiali.

[1]

L'*INFN* ha un impatto significativo sulla società italiana. Le sue attività, infatti, hanno selezionato per decenni e continuano a selezionare, ricercatori e manager della ricerca di grande qualità. Non a caso, i quadri che provengono dall'*INFN* hanno diretto altri importanti centri di ricerca italiani e sono chiamati a dirigere strutture scientifiche di primo piano all'estero, dall'Europa agli Stati Uniti.

Un altro elemento di qualificazione è la formazione dei giovani: ogni anno partecipano all'attività dell'*INFN* un migliaio tra laureandi, dottorandi e borsisti. Una consistente percentuale di laureati in fisica svolge la propria tesi nell'ambito delle attività dell'Istituto. Con la nascita del Gran Sasso Science Institute, inoltre, si aprirà una scuola di alta formazione di carattere internazionale.

Esiste un impatto positivo anche sull'economia italiana, dovuto allo stretto lavoro di collaborazione che l'*INFN* realizza con le aziende hi-tech, soprattutto piccole e medie (*PMI*) e questo sia su progetti nazionali che, soprattutto, su grandi programmi internazionali. Particolarmente significativo è stato, per esempio, il contributo che le aziende italiane hanno dato alla costruzione delle componenti più tecnologicamente avanzate dell'acceleratore di particelle LHC del CERN di Ginevra.

Di grande rilevanza sono poi le ricadute sul piano medico-sanitario e tecnologico in generale delle tecnologie e del know-how sviluppati dall'*INFN* per costruire i propri esperimenti. Gli esempi sono molti: uno dei più importanti è rappresentato dallo sviluppo in Italia delle tecnologie per la cura dei tumori attraverso i protoni e gli ioni carbonio (adroterapia). L'*INFN* ha accumulato in questo campo più di dieci anni di esperienza diretta ai propri laboratori di Catania e ha realizzato la macchina per l'adroterapia del CNAO di Pavia. L'*INFN* inoltre è protagonista nazionale e internazionale della diffusione della GRID, la rete di supercalcolo, e dello sviluppo delle sue applicazioni ad altre discipline scientifiche, al commercio elettronico, alla cultura. Inoltre, l'istituto è impegnato con i propri strumenti nelle analisi e nello studio dei beni culturali e dell'ambiente.

L'*INFN* ha anche una forte vocazione alla diffusione della cultura scientifica. Partecipa a tutti i principali appuntamenti di divulgazione nazionale e organizza ogni anno diverse mostre e eventi, anche televisivi, in tutto il paese. [2]

L'attività dell'INFN si basa su due tipi di strutture di ricerca complementari: le Sezioni ed i Laboratori Nazionali. I quattro Laboratori Nazionali, con sede a Catania, Frascati, Legnaro e Gran Sasso, ospitano grandi apparecchiature e infrastrutture messe a disposizione della comunità scientifica nazionale ed internazionale. Le 20 Sezioni ed i 6 Gruppi collegati alle Sezioni o Laboratori hanno sede in altrettanti dipartimenti di fisica universitari e garantiscono la stretta connessione tra l'istituto e le Università. [3]

L'INFN è una importante realtà presente in 5 continenti e in oltre 30 paesi tra cui: Argentina, Armenia, Australia, Belgio, Brasile, Bulgaria, Canada, Corea del Sud, Cina, Croazia, Danimarca, Finlandia, Francia, Germania, Giappone, Grecia, India, Israele, Olanda, Polonia, Portogallo, Regno Unito, Romania, Russia, Repubblica Ceca, Repubblica Slovacca, Spagna, Slovenia, Svezia, Svizzera, Turchia, Ucraina, Ungheria, USA. [4]

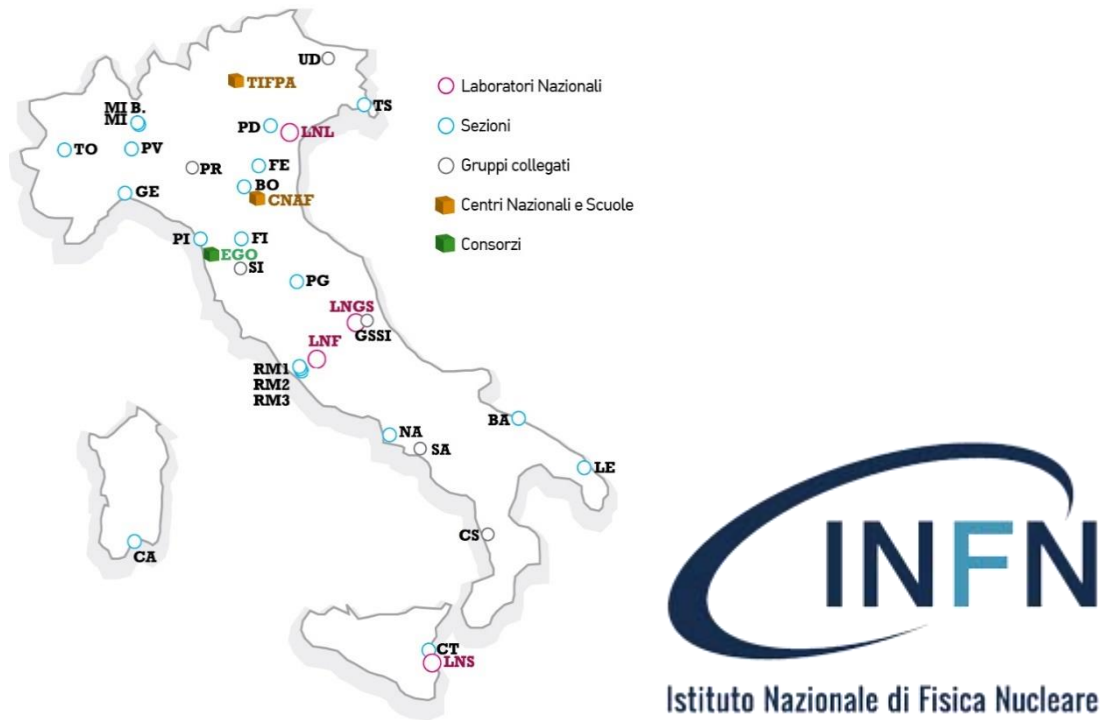


Figura 1.1: a sinistra è riportata una mappa rappresentante la dislocazione delle strutture dell'INFN; a destra il logo dell'Istituto.

1.2 Le specie esotiche

Le proprietà della materia sono strettamente influenzate dalle caratteristiche degli atomi che la costituiscono, dalle loro interazioni e dalla loro disposizione nello spazio: il livello atomico, quindi, costituisce la base fondamentale per poter studiare e comprendere la materia. In particolare, la massa dell'atomo si concentra per lo più nel nucleo (circa il 99,9% della massa totale), di conseguenza è quest'ultimo che ne determina le caratteristiche principali e l'elemento di appartenenza. Il nucleo è costituito da due tipi di particelle, i protoni ed i neutroni, i quali possono essere genericamente denominati con il termine *nucleoni*. Queste particelle sono dotate di massa molto simile tra loro ($1,673 \cdot 10^{-24}$ g per il protone e $1,675 \cdot 10^{-24}$ g per il neutrone), ma, tra le due, solo il protone è dotato di carica elettrica ($1,6 \cdot 10^{-19}$ C) in quanto i neutroni sono elettricamente neutri. Viene definito *numero di massa* il numero di nuclidi (cioè la somma del numero di protoni e del numero di neutroni indistintamente) all'interno del nucleo atomico e viene convenzionalmente rappresentato con $A=Z+N$, dove Z rappresenta il numero di protoni presenti (detto anche *numero di massa*), mentre N il numero di neutroni. Un elemento chimico è identificato in modo esclusivo dal numero di protoni presenti nel proprio nucleo, quindi due atomi aventi pari numero di protoni rappresentano atomi dello stesso elemento e ne caratterizzano quindi il suo collocamento all'interno della tavola periodica (Figura 1.2); al contrario, il numero di neutroni (N) può variare tra atomi dello stesso elemento.

The image shows a standard periodic table of elements. The elements are arranged in rows and columns. The Calcium (Ca) element is highlighted in yellow. Its atomic number (20) is in the top right corner, its symbol (Ca) is in the center, its atomic weight (40.078) is below the symbol, and its electron configuration (2-8-8-2) is at the bottom. To the right of the main table, there are two rows of Lanthanide and Actinide elements. A legend on the right side of the table identifies various groups: Altri non metalli (green), Metalli alcalini (orange), Metalli alcalino-terrosi (yellow), Gas nobili (light blue), Metalloidi (teal), Alogeni (cyan), Metalli di transizione (red), Metalli di post-transizione (grey), Lantanidi (pink), and Attinidi (purple).

Figura 1.2: tavola periodica degli elementi. Gli elementi sono ordinati secondo il loro numero atomico (collocato in alto a destra rispetto al simbolo dell'elemento), ma possono essere presenti ulteriori informazioni: nel caso del calcio, 40.078 rappresenta il peso atomico, mentre 2-8-8-2 rappresenta il numero di elettroni per livello energetico. Inoltre, dalla tavola periodica è possibile apprezzare la suddivisione in base al tipo di elemento (metalli alcalici, gas nobili, ecc.).

Nuclei aventi pari numero di protoni e diverso numero di neutroni sono detti isotopi e sono identificati attraverso il numero di massa. Un semplice esempio è rappresentato in Figura 1.3: in questo caso la presenza di un unico protone identifica l'elemento (idrogeno), mentre la presenza di un diverso numero di neutroni distingue i tre isotopi.

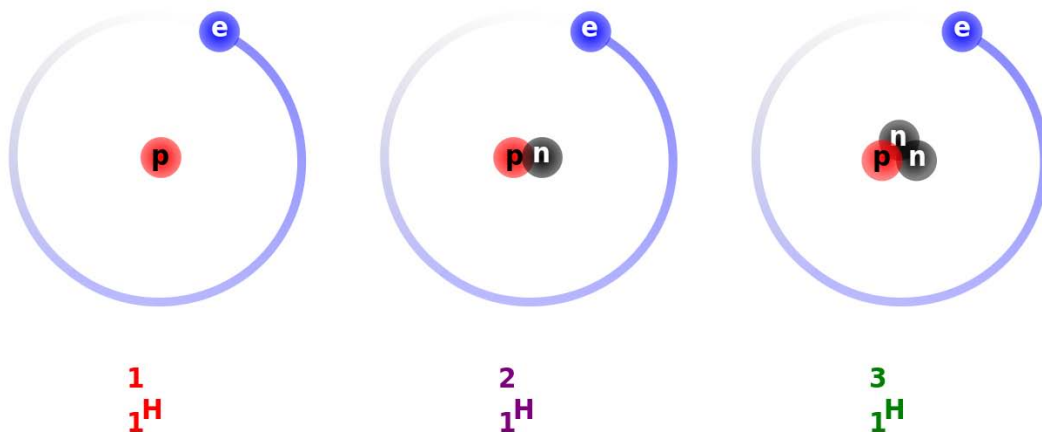


Figura 1.3: rappresentazione degli isotopi più comuni dell'idrogeno. A partire da sinistra si ha il prozio, privo di neutroni, il deuterio con un unico neutrone ed il trizio, avente due neutroni. Il prozio è l'isotopo che compone quasi tutto l'idrogeno presente in natura (99,985%).

Se in un nucleo sono presenti più protoni, essi tenderebbero a respingersi per azione della forza elettrostatica repulsiva che si instaura tra corpi elettricamente carichi dello stesso segno, con conseguente disintegrazione del nucleo. Per spiegare la stabilità del nucleo, è necessario introdurre una forza, detta *forza nucleare forte* (o *interazione forte*), la quale garantisce l'integrità atomica. Questa forza è definita *forte* perché risulta essere la maggiore tra le quattro forze fondamentali che permettono di descrivere i fenomeni fisici a tutte le scale di distanza e di energia. In particolare, il suo valore è circa 100 volte maggiore della forza elettromagnetica, 10^5

volte maggiore della forza nucleare debole e 10^{39} volte maggiore della gravità. Questo è dimostrativo dell'alto livello di energia necessario a separare un nucleo.

Un nucleo si dice *stabile* quando il suo numero di neutroni e protoni non varia nel tempo; viceversa, un nucleo che, nel tempo, perde o acquisisce nucleoni si dice *instabile*. La *radioattività* è l'emissione di particelle, oppure onde elettromagnetiche, da parte di un nucleo instabile. Durante questo processo i nuclei instabili si trasformano continuamente, fino a raggiungere una nuova condizione di stabilità che non necessariamente appartiene allo stesso elemento chimico. [5] Un nucleo radioattivo è anche chiamato *esotico*.

I nuclei stabili possiedono, approssimativamente, ugual numero di neutroni e di protoni. Il motivo fondamentale della maggiore stabilità dei nuclei con numero di protoni uguale al numero di neutroni è da ricercarsi nel fatto che l'interazione neutrone-protone è leggermente più intensa rispetto alle interazioni protone-protone e neutrone-neutrone. [6]

Tuttavia, laddove il numero di massa A risulta essere superiore a 40, la stabilità nucleare si sposta verso atomi con numero di neutroni superiore al numero di protoni: infatti, l'aggiunta di particelle a carica neutra non va ad alimentare la repulsione elettrostatica, ma consente un aumento del contributo relativo all'interazione nucleare. Inoltre, la presenza di interazioni elettrostatiche repulsive limita l'esistenza di atomi con elevato numero di massa e, perciò, di grandi dimensioni, a causa del corto raggio d'azione della forza nucleare forte. Tutte queste informazioni possono essere dedotte dalla *carta dei nuclidi* (Figura 1.4).

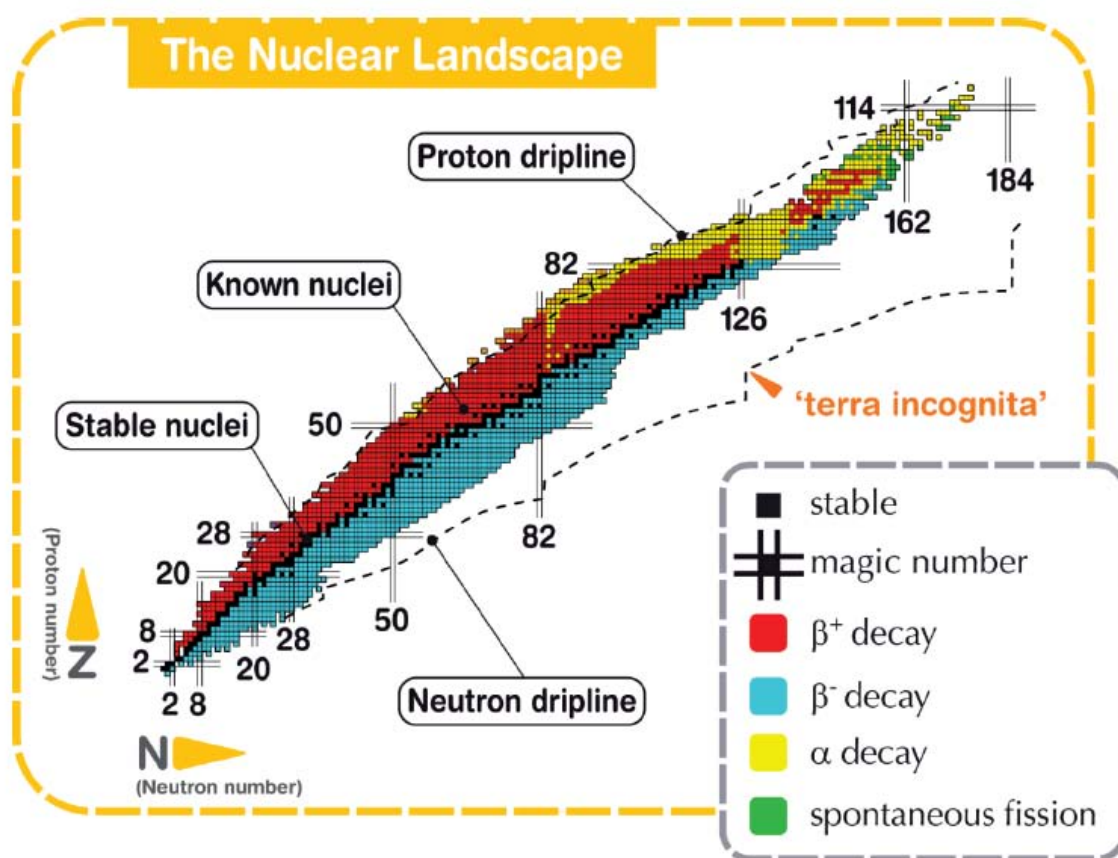


Figura 1.4: rappresentazione della carta dei nuclidi.

La carta dei nuclidi ha in ascissa il numero di neutroni N ed in ordinata il numero di protoni Z, consentendo così l'individuazione degli isotopi. In nero, come indicato dalla legenda, sono segnalati i nuclei stabili: come preannunciato, questi si dispongono su una retta inclinata di 45° , occupando quindi il luogo geometrico dei punti aventi $Z=N$, denominato *valle di stabilità*. Per nuclei aventi $Z \neq N$ (*proton-rich* o *neutron-rich* a seconda che ci sia un difetto o un eccesso di neutroni), si ha un decadimento con conseguente emissione di particelle o radiazioni elettromagnetiche. Si possono individuare 4 diversi tipi di decadimento [7]:

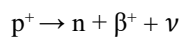
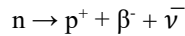
- Decadimento *alfa*: tipico di atomi con $Z > 83$, avviene per mezzo dell'emissione di una particella α . Tali particelle equivalgono ad un nucleo di 4He (2 protoni e 2 neutroni), pertanto il risultato è la diminuzione sia del numero di massa A, che del numero atomico Z secondo lo schema

$$Z_D = Z - 2$$

$$A_D = A - 2$$

in cui Z_D e A_D sono rispettivamente il numero atomico e il numero di massa dopo il decadimento.

- Decadimento *beta*, che si può manifestare secondo due schemi di reazione:



Nel primo caso si ha il decadimento β^- , caratteristico dei nuclidi rappresentati in blu nella carta dei nuclidi, cioè isotopi con un eccesso di neutroni e quindi al di sotto della valle di stabilità. L'emissione di particelle β^- comporta la perdita dei neutroni in eccesso, e quindi la tendenza ad avvicinarsi alla valle di stabilità. Il decadimento consiste nella trasformazione di un neutrone in un protone, accompagnato dalla perdita di una particella β^- (elettrone) e di un antineutrino in modo da garantire il bilanciamento della reazione in termini di carica e massa.

Il secondo schema di reazione invece è chiamato decadimento β^+ ed è tipico dei nuclei con eccesso di protoni e quindi al di sopra della valle di stabilità (in rosso in Figura 1.4). Tali nuclidi tendono a trasformare i protoni in neutroni per riacquisire stabilità, con emissione di un positrone (β^+) e di un neutrino.

- Fissione spontanea: avviene in alcuni nuclei molto pesanti (in verde in Figura 1.4) e consiste nella loro spontanea suddivisione in due diversi atomi.
- Emissione di raggi γ : è una forma di decadimento successiva o contemporanea a quelle elencate. Non provoca alcuna variazione a livello dell'elemento interessato, ma è legata ai figli dei nuclei instabili, caratterizzati da uno stato di eccitazione che provoca emissione di radiazione elettromagnetica ad alto contenuto energetico.

La carta dei nuclidi, inoltre, mette in evidenza i cosiddetti *numeri magici*, cioè quelle configurazioni nucleari in grado di rendere il nucleo particolarmente stabile. Alcuni numeri magici sono 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126 ed i nuclei aventi tale numero di nucleoni sono considerati particolarmente stabili. Tuttavia, esistono anche isotopi aventi sia il numero di protoni che il numero di neutroni pari ad uno dei numeri magici: questi nuclei sono detti *doppiamente magici* (quelli presenti in natura sono solo quattro: ^4He (2,2), ^{16}O (8,8), ^{40}Ca (20,20), ^{208}Pb (82,126).

Infine, la carta dei nuclidi fornisce informazioni relative ai confini di esistenza dei nuclei esotici: queste linee di confine, dette *driplines*, mettono in luce l'elevata quantità di specie esotiche ancora da produrre nelle varie *facilities* dislocate in tutto il mondo, soprattutto per quanto riguarda la regione relativa ai nuclei neutron-rich (i nuclei studiati, in termini di proprietà nucleari, fino ad oggi sono più di 3600, mentre si stima che i nuclei esotici possano essere fino a 6000). Lo studio dei nuclei instabili ha aperto nuovi campi di ricerca in fisica nucleare e ha portato ad importanti applicazioni in fisica dello stato solido, astrofisica ed in medicina nucleare grazie allo studio e alla produzione di radionuclidi per la terapia e la diagnosi.

1.3 La produzione di fasci ionici radioattivi

In chimica, si definisce *ione* un'entità molecolare elettricamente carica: in pratica, quando un atomo, o una molecola, o un gruppo di atomi legati tra loro cede o acquista uno o più elettroni. Quando le particelle cariche sono focalizzate in un fascio, questo fascio viene denominato *fascio ionico*. Infine, se il fascio è costituito da ioni esotici, tale fascio viene chiamato *fascio ionico radioattivo* (*RIB – Radioactive Ion Beams*).

Per la produzione e l'utilizzo pratico di ioni radioattivi, è necessaria la costruzione di sistemi acceleratori ed attrezzature capaci di garantire fasci ionici di elevata purezza, intensità ed energia. Numerose sono le *facilities* per la produzione di fasci radioattivi operanti sia in Europa che in altre parti del mondo; la maggior parte di esse sono basate sul metodo ISOL (*Isotope Separation On-Line*) che utilizza la separazione degli ioni in linea (Figura 1.5). [8]

I principali costituenti di tale tipologia di facility sono:

- L'acceleratore primario
- Il complesso target-sistema di estrazione e ionizzazione
- I separatori di massa ed isobari
- Il post acceleratore

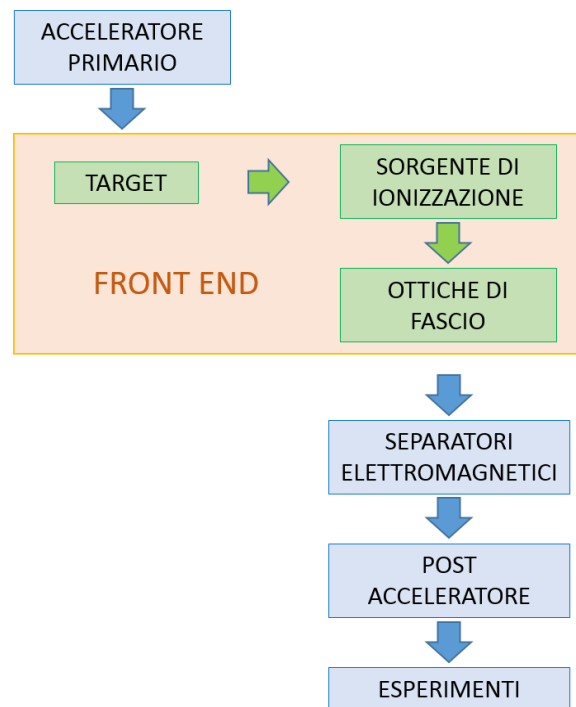


Figura 1.5: schema della configurazione di una facility di tipo ISOL.

Un fascio di particelle, proveniente dall’acceleratore primario ed avente l’energia desiderata, viene fatto collidere con un bersaglio (*target*) costituito da dischi di materiale fissile (UCx – carburi di uranio): da questa interazione hanno origine le reazioni nucleari (fissione, spallazione, frammentazione, ecc…) che portano alla produzione di isotopi radioattivi. Attraverso un opportuno sistema, i radioisotopi prodotti possono uscire dal target ed essere ionizzati: in questo modo, grazie alla carica acquisita, i radioisotopi potranno essere accelerati sfruttando una differenza di potenziale elettrico. Il primo stadio di accelerazione avviene nel *front-end* che attira gli ioni e li invia verso dei *separatori elettromagnetici* all’interno dei quali il fascio viene opportunamente focalizzato e selezionato in termini di massa. I separatori sono quindi necessari se si vuole ottenere un fascio chimicamente ed *isobaricamente* puro. Infine, gli ioni vengono post accelerati al livello di energia richiesto dal particolare esperimento.

L’intensità I del fascio radioattivo prodotto è descritta dall’equazione 1.1:

$$I = \sigma \cdot \Phi \cdot N \cdot \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 \cdot \varepsilon_3 \quad 1.1$$

in cui:

- σ è la sezione d’urto per le reazioni nucleari, ossia la probabilità che avvenga una certa reazione nucleare;
- Φ è l’intensità del fascio primario;
- N è lo spessore del target;
- ε_1 è l’efficienza di rilascio del target;
- ε_2 è l’efficienza di ionizzazione;
- ε_3 è l’efficienza del processo di estrazione e trasporto.

La tecnica ISOL, rispetto ad altre tecniche utilizzate per la produzione di fasci radioattivi, può vantare una migliore qualità ed una maggiore intensità del fascio prodotto grazie all’utilizzo di un fascio primario intenso e di un target avente un’elevata sezione d’urto. Di contro, questa tecnica è caratterizzata da un elevato *tempo di ritardo* a causa della lentezza dei processi di diffusione, effusione, ionizzazione ed estrazione dei nuclei esotici: in particolare, il metodo perde di efficacia quando il tempo di decadimento dei nuclidi è inferiore alla decada di millisecondi.

Di conseguenza, una corretta configurazione dell'apparato Front-End è fondamentale per il raggiungimento di un livello di efficienza elevato. Per quanto detto, gli obiettivi da perseguire durante il dimensionamento del complesso target-sistema di estrazione e ionizzazione sono la riduzione del tempo di ritardo e la massimizzazione della produzione senza provocare un calo della purezza del fascio. In tutto ciò, la temperatura d'esercizio gioca un ruolo cruciale: la separazione dei prodotti radioattivi del substrato del target e l'estrazione dei nuclei esotici sono processi fortemente dipendenti dalla temperatura ed, in particolare, all'aumentare del livello termico, la velocità di diffusione delle particelle aumenta. Chiaramente, più breve è la vita media degli atomi radioattivi (*emivita*), più rapido deve essere il tempo di rilascio e, conseguentemente, più alta è la temperatura alla quale il sistema deve essere mantenuto.

In ambito europeo, le opportunità scientifiche offerte dalla RIB ed i notevoli problemi tecnologici ad essi associati, hanno portato la comunità scientifica a proporre la costruzione di una rete di facilities complementari, definite di *intermedia generazione*, fondamentali per arrivare alla costruzione di una unica grande facility europea di tipo ISOL, chiamata EURISOL [9]: tale progetto rappresenta un'iniziativa che vede coinvolti i principali laboratori nucleari europei ed è dedicato allo studio ed alla progettazione di una struttura per la produzione di fasci radioattivi di qualità significativamente superiore a quella attualmente disponibile. In tale direzione sono orientati anche i Laboratori Nazionali di Legnaro, presso i quali è in corso la costruzione di una facility ISOL per la produzione di fasci di ioni esotici: il progetto SPES (*Selective Production of Exotic Species*). Tale progetto è coordinato a livello nazionale da INFN, ENEA (Bologna), Dipartimenti di Ingegneria Meccanica e di Scienze Chimiche dell'Università degli Studi di Padova e a livello internazionale prevede strette collaborazioni con CERN (Svizzera) ed i Laboratori di Oak Ridge (USA). [10]

1.4 La facility SPES

SPES (*Selective Production of Exotic Species*) è un progetto multidisciplinare il cui principale obiettivo è quello di creare un apparato sperimentale in grado di produrre fasci di ioni radioattivi per studi di fisica nucleare fondamentale e per lo studio di nuclei atomici instabili non presenti naturalmente, ma prodotti durante le fasi finali della vita delle stelle. In particolare, il progetto è basato sulla produzione di nuclei radioattivi neutron-rich attraverso fissione nucleare (con una resa massima di 10^{13} fissioni/secondo) indotta bombardando un target, realizzato in carburo di uranio, con un fascio di protoni di 40MeV a 200 μ A di corrente (per una potenza totale di 8kW). [11]



Figura 1.6: logo del team di lavoro del progetto SPES dei Laboratori Nazionali di Legnaro.

Al giorno d'oggi la maggior parte delle conoscenze relative alle proprietà nucleari deriva dallo studio dei nuclei localizzati nella valle di stabilità o da nuclei con una carenza di neutroni. Si ritiene che lo studio di nuclei atomici con un largo eccesso di neutroni o protoni possa consentire la scoperta di nuove proprietà della struttura nucleare.

Sono state previste quattro fasi per il progetto:

- *SPES- α* : già approvata e finanziata, questa fase prevede l'acquisizione, l'installazione e la messa in opera di un ciclotrone ad alte prestazioni con un'alta corrente in uscita (~ 0.7 mA) e ad alta energia (fino a 70 MeV), oltre all'infrastruttura per l'acceleratore e alle aree sperimentali. Il ciclotrone è provvisto di due porte di uscita per consentire la realizzazione della doppia missione del laboratorio: la ricerca di base e le applicazioni tecnologiche. Uno dei due fasci sarà dedicato alla facility di fisica nucleare, per la produzione di ioni ricchi di neutroni per collisione di protoni su un target di UCx, mentre il secondo sarà dedicato a studi di fisica applicata;
- *SPES- β* : prevede l'accelerazione di specie neutron-rich verso adatti target. Nelle collisioni verranno prodotti nuclei nuovi, con un largo eccesso di neutroni, simili a quelli generati nelle fasi terminali della vita delle stelle e che non sono presenti sulla Terra, a causa della loro brevissima vita. La ricerca in questo ambito rappresenta una nuova frontiera della fisica per estendere la conoscenza di nuclei in

condizioni estreme e per fornire informazioni di base nello studio dell'evoluzione stellare. Questa fase è stata approvata e parzialmente finanziata dal Governo italiano come progetto premiale dei LNL;

- *SPES- γ* : questa fase riguarda la produzione di radionuclidi di interesse medico mediante l'uso del ciclotrone *SPES- α* . L'obiettivo è la produzione di radiofarmaci innovativi (come quelli basati su Sr-82/Rb-82 e Ga-68/Ge-68) e di radionuclidi convenzionali con nuovi approcci basati sull'uso dell'acceleratore. Questa fase di SPES è stata finanziata dal Governo come progetto premiale LARAMED;
- *SPES- δ* : prevede lo sviluppo di un'intensa sorgente neutronica, dal ciclotrone e/o da un acceleratore lineare ad alta intensità basato sulla radio-frequency quadrupole technology (RFQ). Applicazioni della sorgente neutronica si estendono dall'astrofisica nucleare, alla caratterizzazione dei rifiuti nucleari o a trattamenti sperimentali di tumori. [12]



Figura 1.7: il quadrifoglio contenente le quattro fasi del progetto, simbolo di SPES.

L'infrastruttura del progetto SPES comprende l'edificio ed i dispositivi utili alla produzione del fascio di ioni esotici. In particolare, la produzione di radioisotopi neutron-rich avviene a seguito di fissioni di ^{238}U con una resa massima di 1013 fissioni/s con masse da 80 a 160 uma. La fissione è resa possibile dal bombardamento con un fascio protonico a 40 MeV, detto fascio primario, di un adeguato target costituito da sette dischi in carburo di uranio (UCx). Essendo il livello di radioattività stimato nel target di produzione molto elevato, si rende necessaria la progettazione di speciali infrastrutture in modo da garantire la sicurezza in termini di radioprotezione.

Nelle figure 1.8 e 1.9 è rappresentata la struttura dei laboratori esistenti, dove si distinguono il post acceleratore ALPI (*acceleratore LINAC superconduttore*), il CB (*Charge Breeder*) per aumentare lo stato di carica del fascio, l'HRMS (*High-Resolution Mass Separator*) per selezionare isobaricamente il fascio voluto ed il RFQ (*Radio-Frequency Quadrupole*) per la riaccelerazione. Essi sono collegati ed integrati al laboratorio SPES, che si inserisce quindi perfettamente nel complesso delle strutture esistenti dei Laboratori Nazionali di Legnaro.



Figura 1.8: a sinistra una vecchia foto aerea dei Laboratori Nazionali di Legnaro: nel riquadro è evidenziata l'area in cui è attualmente presente l'edificio SPES. A destra, una foto dell'edificio SPES in fase di costruzione.

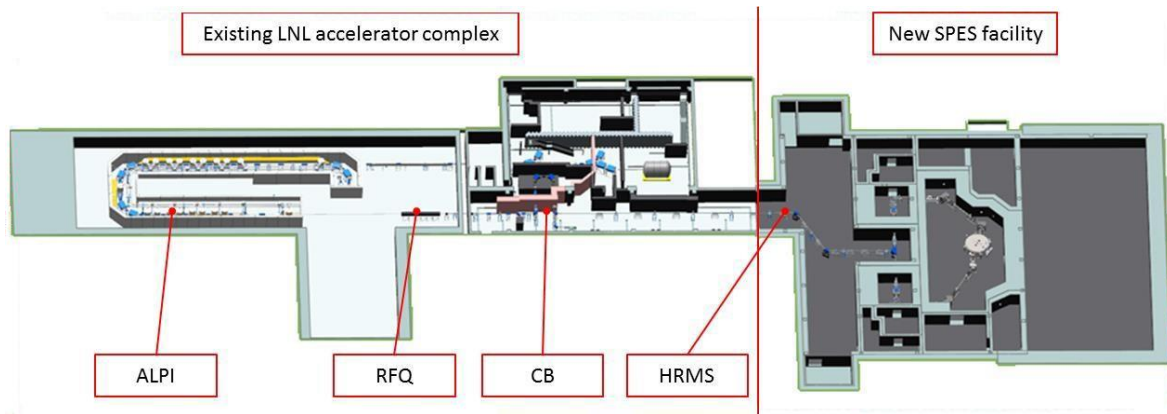


Figura 1.9: struttura dei laboratori esistenti: è evidente la perfetta integrazione di SPES.

In Figura 1.10 è rappresentato uno schema del layout del progetto. Di seguito, vengono illustrati i principali elementi che compongono la facility.

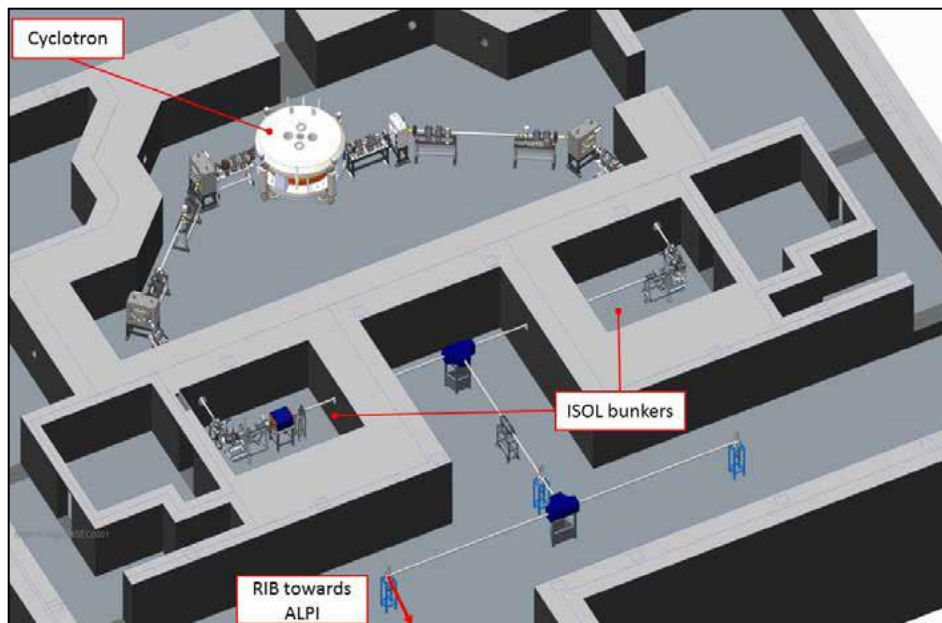


Figura 1.10: schema del layout del progetto SPES.

1.4.1 L'acceleratore primario

L'acceleratore primario ha la funzione di produrre un fascio protonico in grado di colpire il target di carburo uranio in cui avviene la reazione di fissione nucleare. L'acceleratore utilizzato per la facility SPES è un ciclotrone, una macchina in grado di accelerare fasci di particelle cariche utilizzando una corrente alternata ad alta frequenza ed alta tensione, in associazione con un campo magnetico ortogonale. In Figura 1.11 si riporta il principio di funzionamento di un ciclotrone: le particelle, all'interno di una camera da vuoto, percorrono una traiettoria a spirale a partire dal centro (*sorgente*); raggiunto il bordo esterno della macchina, il fascio fuoriesce ad alta velocità, prossima a quella della luce. Le particelle sono deviate da un campo magnetico costante e vengono mantenute in traiettorie circolari grazie alla *forza di Lorentz*; un campo elettrico alternato ad alta frequenza, generato da due elettrodi, conferisce un'accelerazione alle particelle ogni qualvolta esse passino nello spazio tra essi: l'accelerazione aumenta il raggio dell'orbita fintantoché il fascio non esce tangenzialmente dalla periferia del ciclotrone.

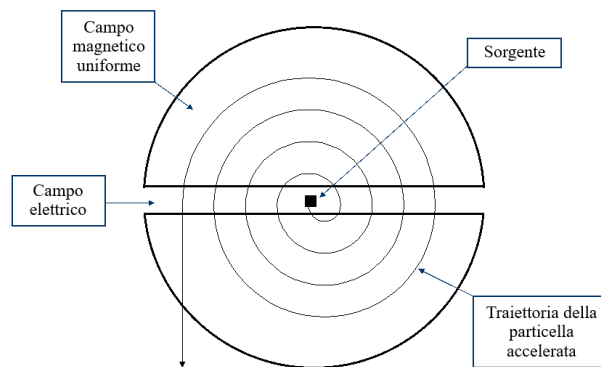


Figura 1.11 schema di funzionamento di un ciclotrone.

Il ciclotrone scelto per il progetto SPES è il BEST 70p (Figura 1.12) sviluppato dalla Best Cyclotron, il quale, come già detto, è in grado di fornire due fasci di protoni indipendenti fino a 70 MeV di energia ed aventi una corrente massima di 750 μA . L'installazione è avvenuta all'interno dell'edificio SPES durante maggio 2015. Tale dispositivo è in grado di garantire le performance richieste per la produzione di fasci di ioni esotici ed offre la possibilità di utilizzare una seconda linea di fascio in modo completamente indipendente. Il mercato offre oggi la possibilità di produrre, con la tecnologia del ciclotrone, fasci di intensità anche superiori alle richieste del progetto SPES.



Figura 1.12: fotografia del ciclotrone BEST 70p sviluppato dalla Best Cyclotron Systems, Inc. presente all'interno della facility SPES ai Laboratori Nazionali di Legnaro.



Figura 1.13: illustrazioni dei momenti di installazione del ciclotrone BEST 70p ai LNL. A destra è raffigurato l'edificio SPES, in fase di costruzione, al momento dell'arrivo dell'acceleratore primario.

1.4.2 Il Front-End

Con il termine *Front-End* si indica l'insieme dei diversi dispositivi che concorrono allo scopo di permettere la produzione ed il trasporto dei fasci di ioni radioattivi. Il Front-End del progetto SPES, rappresentato in Figura 1.14, si compone essenzialmente di due parti [13]:

- Il Front-End protonico (FEP), impropriamente detto canale protonico (il canale protonico, in realtà, corrisponde a tutto ciò che è compreso tra la sorgente di ioni, ovvero il ciclotrone, e il Front-End), che è la parte responsabile del trasporto del fascio protonico;
- Il Front-End radioattivo (FER), impropriamente detto canale radioattivo, che è responsabile del trasporto e dell'accelerazione del fascio radioattivo.

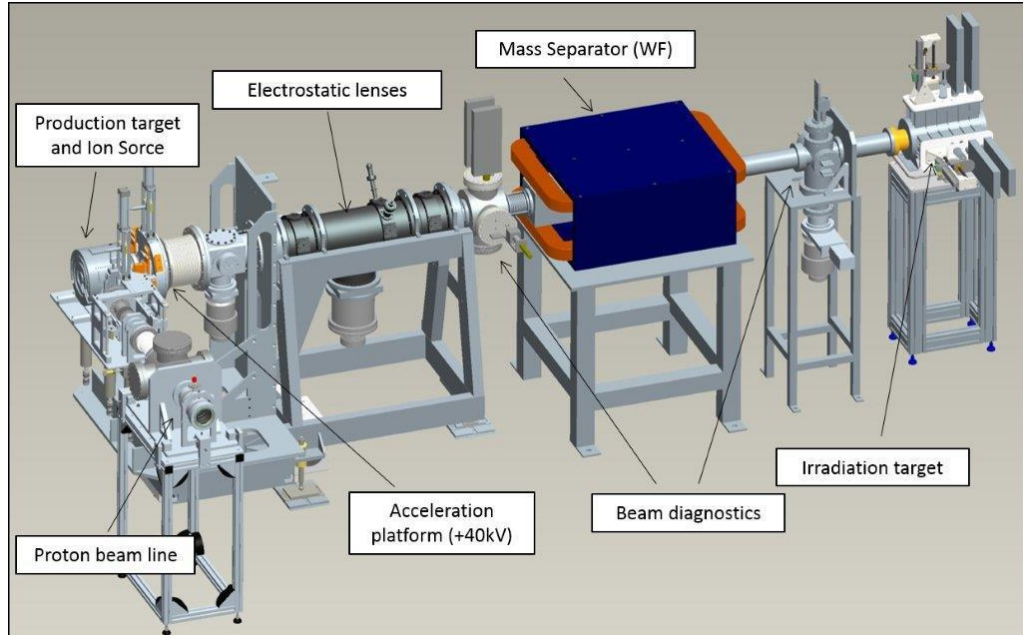


Figura 1.14: Front-End del progetto SPES. Il complesso presente a monte del target di produzione è definito protonico, mentre la parte a valle di quest'ultimo è denominata radioattiva. Come si può apprezzare, sono presenti numerosi altri componenti.

Il Front-End raccoglie anche tutti i dispositivi ausiliari necessari al funzionamento dell'intero sistema. A differenza di quanto avviene, ad esempio, per la camera target che viene periodicamente sostituita, l'insieme dei componenti del Front-End rimangono fissi all'interno del bunker e sono sottoposti soltanto alla manutenzione programmata. Le zone più prossime alla camera target, infatti, sono soggette ad un notevole

danneggiamento dovuto all'alta dose di radioattività assorbita e proveniente dal target, la quale cala, approssimativamente, con il quadrato della distanza dalla fonte irradiante.

Il Front-End svolge le seguenti funzioni:

- Garantisce sostegno e stabilità al canale protonico, alla camera target e agli apparati necessari al trasporto del fascio radioattivo;
- Permette la realizzazione di un grado di vuoto sufficientemente spinto da permettere il corretto funzionamento di tutti gli organi al suo interno e ad esso collegati;
- Provvede all'apporto di energia elettrica (per il funzionamento degli strumenti o per il riscaldamento di parti, ad esempio il blocco target) e di acqua (per il raffreddamento dei componenti);
- Consente un rapido accoppiamento con le parti che devono essere periodicamente rimosse e sostituite (ad esempio la camera target). [13]

L'alto livello di vuoto, dell'ordine di 10^{-5} mbar, facilita il cammino dei due fasci ed evita l'ossidazione dei componenti del target, aspetto di grande importanza dato che i componenti all'interno della camera target lavorano ad alte temperature.

Il vuoto si ottiene in due passaggi: inizialmente una serie di pompe volumetriche raggiungono livelli di pressione dell'ordine di 10^{-2} - 10^{-3} mbar e, successivamente, azionando delle pompe turbo-molecolari, si raggiungono le pressioni richieste in esercizio. Livelli di vuoto superiori a 10^{-5} - 10^{-6} mbar non sono raggiungibili per problemi di degassamento superficiale legati al materiale scelto per la costruzione del Front-End (alluminio), ma soprattutto per il rilascio di atomi da parte dei componenti all'interno della camera target sottoposti ad elevate temperature. L'alluminio è stato preferito all'acciaio poiché quest'ultimo ha la tendenza ad attivarsi in modo significativo e duraturo in presenza di radiazione neutronica.

1.4.3 Il target di produzione ed il sistema di estrazione e di ionizzazione

Sia il target di produzione dei radioisotopi, sia il sistema di estrazione e ionizzazione degli stessi, sono contenuti all'interno della camera target, la quale viene raffreddata mediante un opportuno circuito ad acqua a causa delle elevate temperature in gioco. Inoltre, all'interno della camera vengono mantenute condizioni di alto vuoto (con pressioni dell'ordine dei 10^{-6} mbar), condizione necessaria per aumentare il cammino libero medio delle particelle radioattive prodotte e per evitare l'ossidazione dei componenti presenti a causa delle elevate temperature a cui sono soggetti. In Figura 1.15 sono rappresentate una schematizzazione della camera target ed una foto del suo interno.

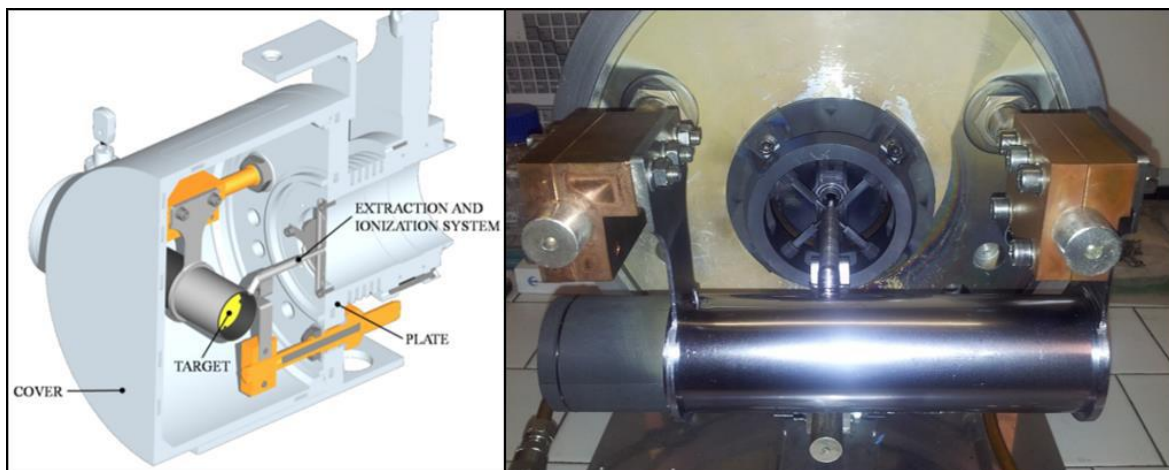


Figura 1.15: a sinistra è raffigurata la camera target, mentre a destra è riportata una foto del riscaldatore in tantalio contenente la target box in grafite, al cui interno sono posizionati i 7 dischi target in carburo di uranio.

Il target è composto da sette dischi coassiali in UCx, aventi diametro di 40 mm e spessore di circa 1 mm, opportunamente distanziati in direzione assiale, al fine di dissipare, attraverso radiazione termica, la potenza sviluppata dal fascio di protoni. Questa è la vera innovazione del progetto SPES: solitamente, in questo tipo di facility, il target è costituito da un unico cilindro in carburo di uranio, limitando però lo scambio termico con i componenti circostanti.

I dischi sono contenuti in un tubo di grafite (*graphite box*) avente un diametro esterno di 49 mm e lunghezza di 200 mm (Figura 1.16). Il fascio di protoni, prima di impattare contro i dischi, attraversa una finestra molto sottile in grafite: essa provoca una leggera attenuazione dell'intensità del fascio, comunque limitata grazie al ridotto spessore della finestra stessa, ma risulta di fondamentale importanza poiché consente di confinare la zona attiva, quindi evita la fuoriuscita delle specie radioattive, e di evitare un eccessivo raffreddamento del materiale fissile in corrispondenza dell'ingresso del fascio. Dopo aver investito la finestra di grafite e i dischi di UCx, il fascio primario va ad impattare su tre *dumper* e sul fondo scatola (*box base*); questi elementi provvedono sia all'assorbimento definitivo del fascio, per evitare l'attivazione della camera esterna, sia ad evitare la fuoriuscita di particelle dal lato posteriore del target.

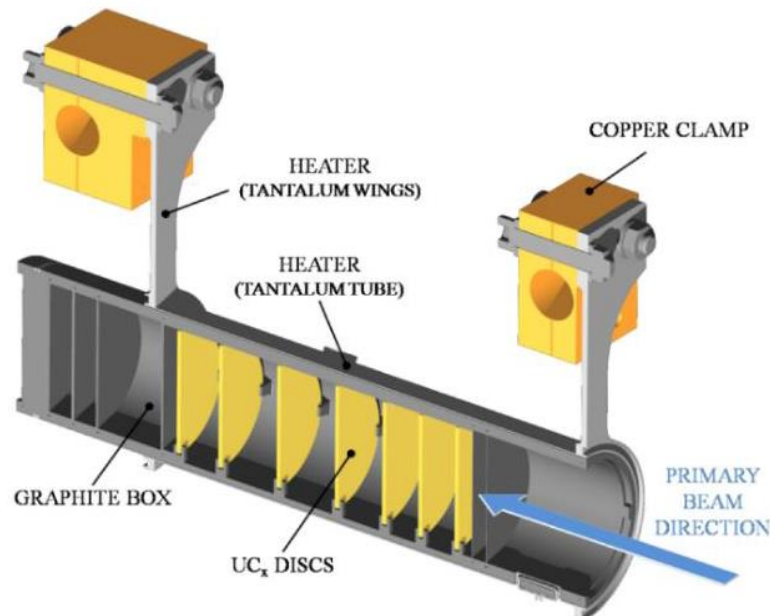


Figura 1.16: rappresentazione del sistema riscaldante del target. Si può notare la presenza del cilindro e delle ali in tantalio e dei morsetti in rame.

Per questioni legate all'estrazione dei prodotti di fissione, la box deve mantenere una temperatura attorno ai 2000°C. La potenza del fascio di protoni non risulta sufficiente a portare il target al livello di temperatura richiesto, pertanto si rende necessaria l'introduzione di un dispositivo indipendente con la funzione di riscaldare il target. Inoltre, il sistema di riscaldamento supplementare consentirebbe di evitare improvvisi sbalzi di temperatura molto pericolosi per l'integrità strutturale dei dischi. Il riscaldatore (*heater*) è composto da un tubo molto sottile in tantalio (*tantalum tube*) saldato ai suoi estremi a due ali (*tantalum wings*), sempre in tantalio, direttamente collegate a morsetti in rame (*copper clamps*); attraverso i morsetti è possibile far dissipare, per effetto Joule, il desiderato quantitativo di potenza al riscaldatore. La dissipazione di potenza, in aggiunta al calore sviluppato dalla fissione nucleare, fa in modo che la temperatura del sistema scatola-dischi sia mantenuta al valore di utilizzo desiderato. Il materiale scelto per il riscaldatore è il tantalio, in quanto altamente resistente alla corrosione, in grado di condurre energia elettrica e termica e di raggiungere temperature di esercizio molto elevate mantenendo caratteristiche meccaniche adatte allo scopo. Per contro, il tantalio risulta essere molto reattivo chimicamente con il carburo di uranio, pertanto si rende necessario l'utilizzo della box in grafite. È importante far notare che il fascio colpisce i dischi nella loro parte centrale, aumentando notevolmente la loro temperatura in quella zona, mentre risultano più freddi nella loro zona periferica, con il conseguente sviluppo di pericolosi gradienti termici radiali e lo sviluppo di stati tensionali indesiderati. Il sistema di riscaldamento risulta quindi necessario per riscaldare le zone di periferia dei dischi, in modo che i gradienti radiali di temperatura siano sotto controllo così da prevenire la rottura degli stessi.

Come già detto, il processo di fissione nucleare produce nuclei radioattivi aventi massa compresa tra gli 80 ed i 160 uma; per la produzione di un RIB, la specie esotica desiderata deve essere rilasciata dal target e ionizzata. Tale processo richiede del tempo e non può essere applicato ad isotopi aventi una vita media inferiore a poche decine di millisecondi.

Il processo di estrazione avviene mediante la linea di trasferimento (*transfer line*), attraverso la quale gli isotopi in uscita dal target vengono indirizzati verso la sorgente di ionizzazione (*ion source*) dove sono ionizzati positivamente. La *transfer line* è un tubo sottile di tantalio saldato al riscaldatore ad un'estremità e connesso

meccanicamente alla sorgente di ionizzazione all'estremità opposta (Figura 1.17). Come accade per il riscaldatore, anche il sistema linea di trasferimento-sorgente di ionizzazione viene riscaldato per effetto Joule; in questo modo la temperatura della sorgente arriva attorno a 2400°C.

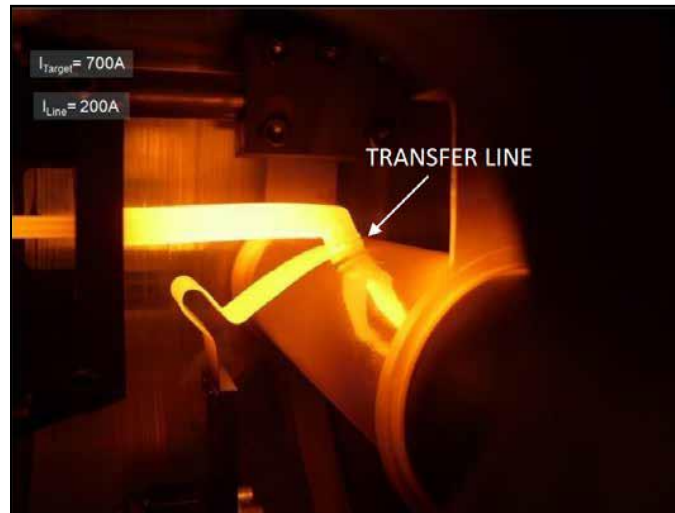


Figura 1.17: fotografia del target e della transfer line in esercizio.

Dopo essere stati estratti dal target, le specie radioattive necessitano di essere ionizzate per poi poter essere accelerate con l'utilizzo di un campo elettrico.

Di definisce *potenziale di ionizzazione* l'energia necessaria a portare un elettrone della sfera di valenza ad una distanza infinita dall'atomo. A seconda del potenziale di ionizzazione dell'elemento, possono esservi diversi metodi di ionizzazione. I metalli alcalini e alcalino-terrosi hanno bassi potenziali di ionizzazione, per cui per la loro ionizzazione è richiesto un basso livello energetico: in questo caso si può optare per l'uso di una sorgente di ionizzazione superficiale (*SIS – Surface Ionization Source*). In alternativa, altri tipi di sorgenti sono utilizzabili nel Front-End SPES: la sorgente di ionizzazione al plasma (*PIS – Plasma Ionization Source*), in grado di ionizzare elementi con alto potenziale di ionizzazione, ma senza selettività, e la sorgente di ionizzazione laser (*RILIS – Resonant Ionization Laser Ion Source*) in grado di ionizzare selettivamente elementi con medio potenziale di ionizzazione. In Figura 1.18 è rappresentata la tavola periodica in cui sono evidenziati i differenti meccanismi di ionizzazione a seconda dell'elemento. Gli elementi di transizione da $Z=40$ a $Z=45$ sono prodotti nel target, ma non estratti per la loro bassa volatilità. I vari meccanismi di ionizzazione verranno descritti in dettaglio successivamente.

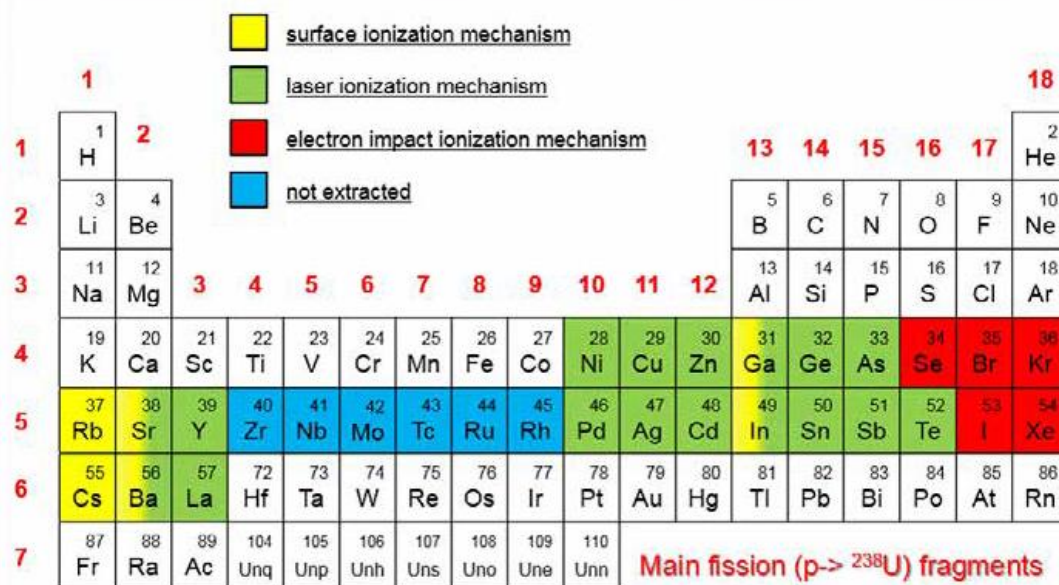


Figura 1.18: tavola periodica raffigurante i vari meccanismi di ionizzazioni in funzione dell'elemento.

In Figura 1.19 vengono illustrati i radionuclidi che verranno prodotti nel progetto SPES, dove la legenda si riferisce al numero di particelle prodotte per secondo.

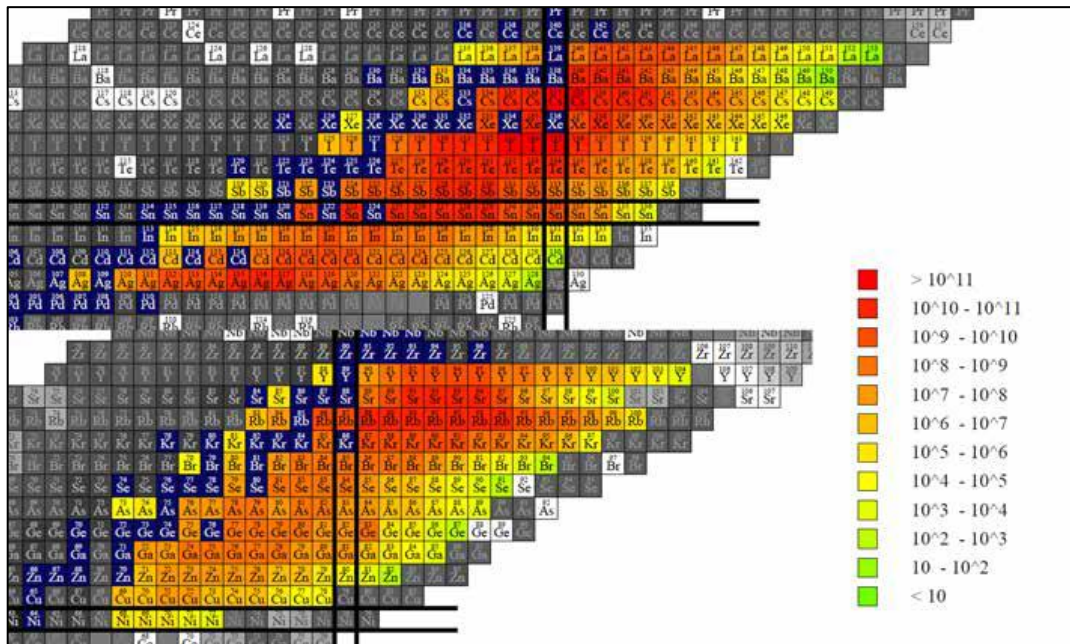


Figura 1.19: radionuclidi che verranno prodotti dal progetto SPES.

La camera target è collegata alla parte del Front-End denominata radioattiva: tra le due parti è presente una differenza di potenziale fino a 40 kV necessaria ad allontanare gli ioni radioattivi dal target di produzione. Il componente che accoglie gli ioni in uscita dalla sorgente di ionizzazione è un elettrodo realizzato in lega di titanio Ti6Al4V. Per la presenza di questa elevata differenza di potenziale elettrico, al fine di evitare il contatto diretto, è necessario interporre un isolante elettrico. In questo modo si forma il fascio di ioni radioattivi che verrà, dopo il passaggio attraverso i separatori elettromagnetici ed il post acceleratore, inviato alle sale sperimentali. In Figura 1.20 è rappresentato il sistema di ionizzazione ed estrazione.

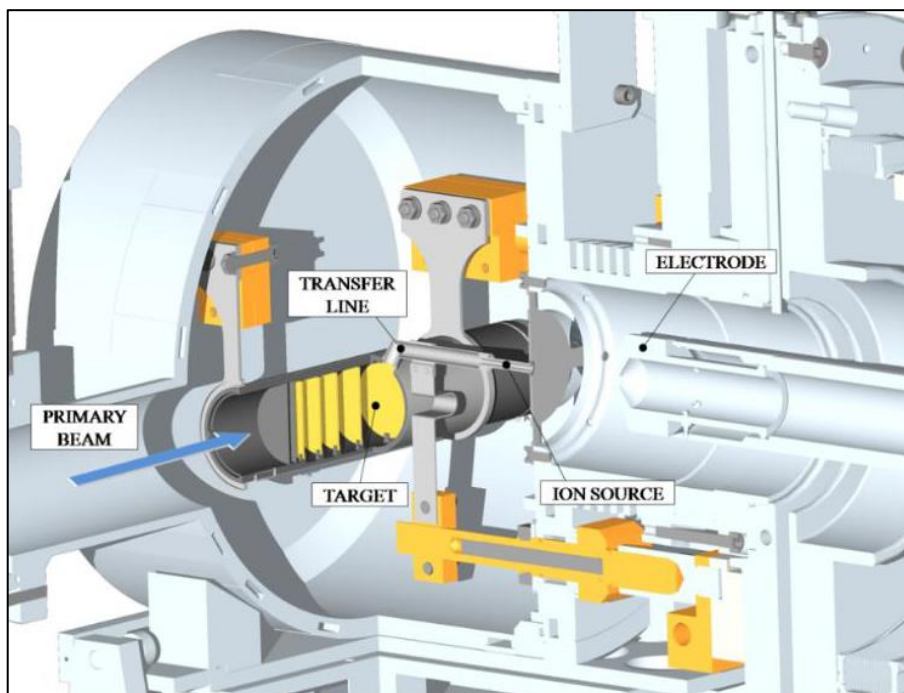


Figura 1.20: rappresentazione del sistema di ionizzazione e di estrazione.

I sistemi di ionizzazione SIS e RILIS fanno riferimento alla medesima architettura, frutto di una riprogettazione profonda della sorgente MK1 ISOLDE sviluppata al CERN (*Conseil Européen Pour la Recherche Nucléaire*) di Ginevra. Il componente principale di questa sorgente è la hot cavity: un piccolo tubo di tantalio o renio all'interno del quale avviene la ionizzazione. Quest'ultima è dotata di un opportuno invito conico e viene accoppiata per interferenza al foro centrale del supporto in tantalio. Le basse tolleranze costruttive impediscono qualsiasi movimento relativo tra i due componenti. D'altra parte, il collegamento con la linea di trasferimento avviene tramite un tappo (*bush*) in tantalio sul quale va in battuta la hot cavity. Le elevate temperature raggiunte dalla sorgente di ionizzazione in condizioni di utilizzo provocano la realizzazione di una saldatura tra i vari componenti. Il collegamento tra il supporto e la flangia principale avviene mediante viti e tra questi due componenti viene interposto uno schermo in tantalio fondamentale per il processo di estrazione del fascio di isotopi radioattivi.

Sorgenti di ionizzazione – *Surface Ion Source (SIS)*

In questa modalità di ionizzazione, l'impatto degli isotopi radioattivi provenienti dal target sulla superficie interna della hot cavity causa la ionizzazione. Tale procedimento è possibile se la minima energia necessaria per rimuovere un elettrone da una superficie (*funzione di lavoro*) è maggiore del potenziale di ionizzazione dell'isotopo. Nel caso in esame si riescono a produrre, con elevata efficienza, ioni positivi per elementi con potenziale di ionizzazione inferiore alla funzione di lavoro del renio, pari a circa 5 eV. L'elevata temperatura a cui si trova la sorgente di ionizzazione permette di avere un processo di ionizzazione efficiente e selettivo ma soltanto per gli elementi del primo e del secondo gruppo: è proprio questo lo svantaggio del metodo.

In ogni caso, si devono predisporre dei separatori elettromagnetici (*mass separator*) in grado di selezionare, in base alla massa, gli isotopi desiderati nel fascio. Nonostante questa operazione, la purezza del fascio non è comunque garantita, in quanto ci possono essere isotopi di diverse specie isobari, aventi pertanto lo stesso numero di massa A ma diverso numero atomico Z, come il ^{132}Cs e lo ^{132}Sn . Per dividere tali elementi sono necessari separatori isobari, che sono dispositivi molto complicati, costosi e poco affidabili, che comportano inoltre notevole una notevole riduzione dell'intensità del fascio. [14]

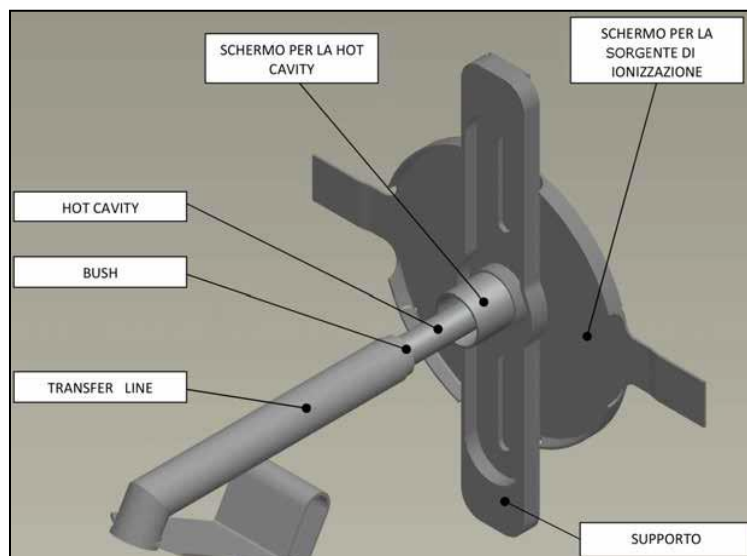


Figura 1.21: schema di funzionamento della modalità di ionizzazione SIS (*Surface Ion Source*).

Sorgenti di ionizzazione – *Resonant Ionization Laser Ion Source (RILIS)*

Il metodo RILIS è, ad oggi, il più potente strumento per la produzione di fasci di ioni radioattivi per le facilities di tipo ISOL, in quanto permette un processo di ionizzazione selettiva e garantisce la soppressione di contaminazioni indesiderate a livello della sorgente di ionizzazione. Il metodo RILIS utilizza la stessa architettura della tecnica SIS e prevede di proiettare un laser all'interno della hot cavity, come in Figura 1.22.

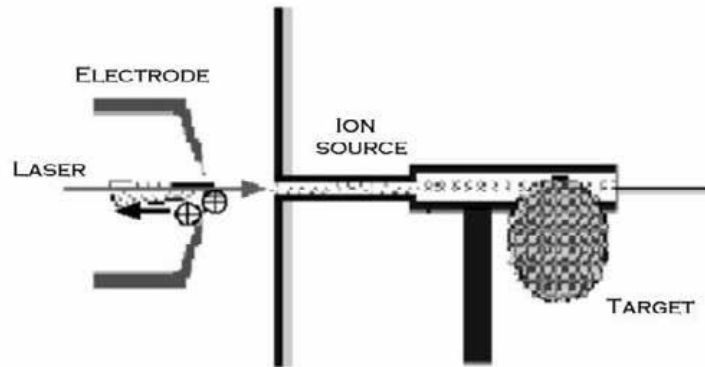


Figura 1.22: schema di funzionamento della modalità di ionizzazione RILIS.

Tale laser è composto dalla sovrapposizione di più raggi (due o tre a seconda dell'elemento chimico da ionizzare) aventi lunghezze d'onda differenti, corrispondenti a diversi valori energetici dei fotoni emessi (il valore energetico è dato dal prodotto tra la frequenza dell'onda e la costante di Planck). Esso irradia gli isotopi e fornisce loro l'energia necessaria per far compiere all'elettrone più esterno dei salti quantici verso orbitali ancor più lontani dal nucleo, fino alla separazione dell'atomo. In questo modo si ha formazione di uno ione positivo 1+.

La metodologia RILIS permette di acquisire soltanto ioni radioattivi della specie di interesse producendo un fascio nel quale le contaminazioni sono minime. A causa dell'architettura della sorgente, tuttavia, alcuni elementi (in particolare il cesio) vengono ionizzati per *strisciamento*, provocando così imperfezioni nel fascio. Per risolvere tale inconveniente, è possibile sostituire il materiale con cui è realizzata la hot cavity: utilizzando il niobio, la ionizzazione superficiale viene notevolmente attenuata.

Per avere un'efficienza di ionizzazione elevata, è di fondamentale importanza limitare e controllare il disallineamento della hot cavity causato dall'espansione termica. Se infatti questa si disallinea viene a ridursi la zona di azione del laser e, di conseguenza, diminuisce l'efficienza di ionizzazione, vedi Figura 1.23.

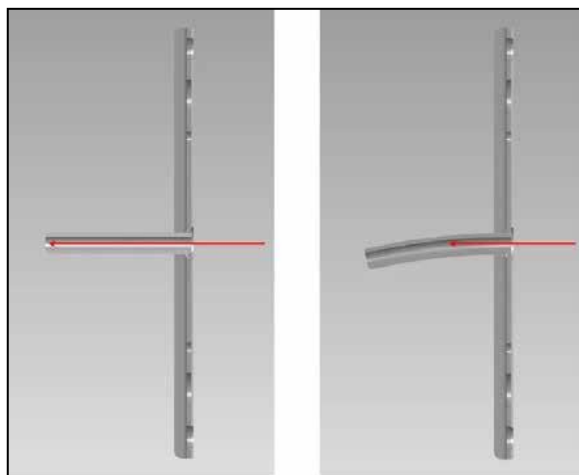


Figura 1.23: rappresentazione del disallineamento della hot cavity.

Sorgenti di Ionizzazione – Plasma Ion Source (PIS)

Con questo tipo di sorgente, gli atomi vengono ionizzati grazie all'impatto con elettroni accelerati per effetto termoionico. Il processo avviene in una struttura costituita da un catodo e da un anodo. Il catodo viene riscaldato grazie al passaggio di una corrente continua di, approssimativamente, 330-340 A e si porta ad alta temperatura. Questa conferisce agli elettroni un'energia superiore a quella di legame con l'atomo, tanto che si verifica l'emissione di elettroni da parte del catodo in una camera che funge da anodo. All'interno di questa camera, gli elettroni rilasciati dal catodo, accelerati da una differenza di potenziale di, tipicamente, 150V, vengono a contatto con gli atomi da ionizzare: l'impatto elettronico causa la perdita di un elettrone da parte degli atomi

dell'anodo (ioni positivi) creando quindi un plasma. In Figura 1.24 è rappresentato il principio di funzionamento della ionizzazione PIS.

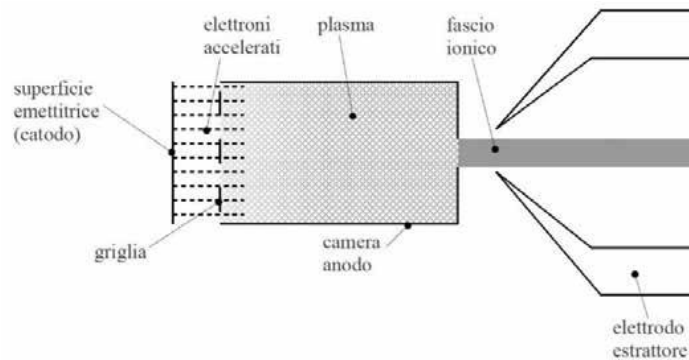


Figura 1.24: schema del funzionamento della modalità di ionizzazione PIS (Plasma Ion Source).

1.4.4 Separatori magnetici e post-accelerazione

Il fascio estratto dalla sorgente di ionizzazione è sottoposto ad una prima fase di purificazione nella quale, attraverso un separatore di massa (*mass separator*), viene intrappolata una grande quantità di contaminanti. Il separatore di massa è seguito da un separatore isobaro che permette la separazione di isotopi tra loro isobari, come il ^{132}Cs e lo ^{132}Sn .

A questo punto, il fascio radioattivo può essere direttamente convogliato alle sale sperimentali ed utilizzato in esperimenti che richiedono fasci radioattivi di bassissima energia, oppure essere post-accelerato. La post accelerazione viene ottimizzata mediante l'impiego di un *Charge Breeder*, un dispositivo in grado di incrementare la carica degli ioni prima dell'iniezione del fascio esotico all'interno PIAVE, che rappresenta il primo stadio di post accelerazione prima dell'ingresso in ALPI. Il complesso PIAVE-ALPI è da molti anni in funzione ai LNL, ma negli ultimi tempi è stato sottoposto ad un numero significativo di miglioramenti. In particolare, mentre prima consentiva la produzione di fasci ioni stabili, ora può essere impiegato come un acceleratore di RIB, dimostrando la qualità con la quale SPES si integra ai LNL.



Figura 1.25: post acceleratori già esistenti; Piave sulla sinistra ed Alpi sulla destra.

1.4.5 I sistemi di movimentazione

Data la necessità di sostituire periodicamente la camera target, con lo scopo di permettere il rinnovo del materiale fissile e di evitare l'eccessiva degradazione dei componenti di tenuta, e nota la necessità di escludere ogni intervento umano all'interno del bunker, sono in corso di progettazione dei sistemi di movimentazione con lo scopo di completare queste operazioni in maniera completamente automatica.

Le fasi necessarie alla movimentazione della camera sono:

- Deposito della nuova camera target sulla tavola di ammaraggio (*coupling table*), cioè la struttura sopra la quale è appoggiato il dispositivo contenente il bersaglio di produzione;

- Movimentazione della camera quando è posizionata sulla tavola di ammaraggio;
- Prelievo della camera irradiata e deposizione all'interno del sarcofago, cioè un componente progettato per contenere la camera irradiata una volta rimossa dal Front-End;
- Stoccaggio del sarcofago contenente la camera irradiata.

Le fasi di prelievo e deposito relative alla coupling table sono gestite da due sistemi automatici, in fase di progettazione, denominati SMO (*Sistema di Movimentazione Orizzontale*) ed SMV (*Sistema di Movimentazione Verticale*). Il sistema di movimentazione verticale sarà utilizzato al solo scopo di raggiungere il bunker dal primo piano dell'edificio SPES, mentre il sistema di movimentazione orizzontale raggiunge la zona di produzione partendo dalla zona fredda, quindi sullo stesso piano del bunker (piano interrato). Il sistema di movimentazione verticale agirà solo in caso di emergenza o di rottura di quello orizzontale. Entrambi i sistemi si avvalgono del sistema di movimentazione posto sulla tavola di ammaraggio. Le movimentazioni della camera sulla tavola di ammaraggio sono gestite dal corrispondente sistema di movimentazione pneumatico. Per quanto riguarda lo stoccaggio del sarcofago (contenente la camera irradiata), è in fase di progetto un nuovo sistema di movimentazione interno al magazzino temporaneo (*temporary storage*). In Figura 1.26 è riportato uno schema dei sistemi di movimentazione di SPES.

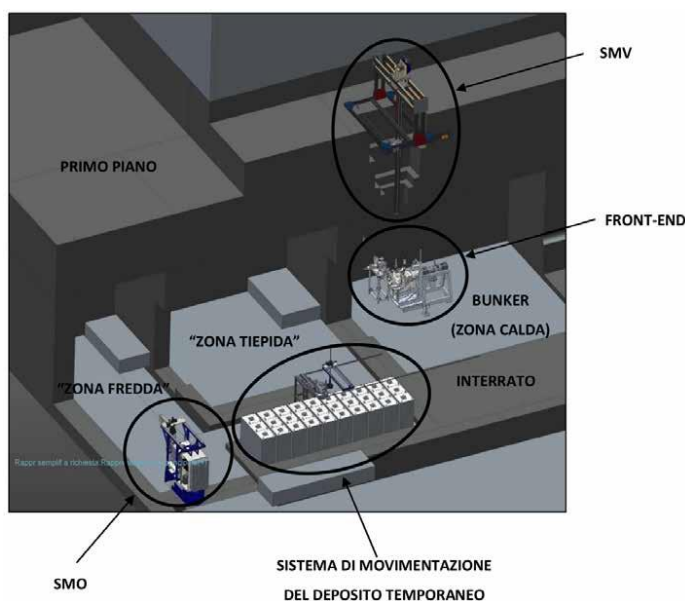


Figura 1.26: sistemi di movimentazione all'interno dell'edificio SPES.

1.5 Le applicazioni dei fasci esotici

Come già preannunciato, nel corso degli ultimi anni i fasci esotici hanno suscitato interesse grazie alle loro possibili numerose applicazioni, non solo nel mondo della fisica nucleare, ma anche nel campo della fisica dello stato solido, della medicina e dell'astrofisica. Nei prossimi paragrafi verranno brevemente illustrate le applicazioni nei vari ambiti di ricerca.

1.5.1 Fisica nucleare

Molteplici sono le applicazioni dei fasci esotici in fisica nucleare. Di seguito ne vengono elencate alcune.

Miglioramento del modello standard

L'attuale modello su cui è basata l'attuale fisica nucleare comprende tre delle quattro interazioni fondamentali: l'interazione nucleare forte, l'interazione nucleare debole e l'interazione elettromagnetica; il modello descrive la funzione e le proprietà di tutte le particelle, note ed osservate, che costituiscono la materia. Sebbene tale modello abbia avuto un notevole successo, è stato costruito facendo uso di alcune assunzioni ad hoc non ancora pienamente verificate. Per chiarire l'origine e confermare la validità di tali assunzioni, sono stati ideati complessi esperimenti di fisica nucleare, suggeriti da convincenti basi di natura teorica. La messa in opera di tali procedure sperimentali comporterebbe la precisa misurazione di proprietà relative al decadimento di alcuni

isotopi che possono essere ricavate utilizzando i fasci radioattivi prodotti nelle facilities come sorgente pura di ioni.

Studio della struttura di nuclei complessi

I nucleoni, costituenti fondamentali del nucleo atomico, sono a loro volta costituiti da subparticelle, i *quark*. Esse esercitano un'azione fisica che va oltre i nucleoni nei quali sono confinate. In particolare, si osserva che tale interazione si manifesta in maniera diversa tra nucleoni liberi e nucleoni appartenenti allo stesso nucleo, in quanto risulta essere influenzata dalla densità di protoni e neutroni associata al particolare tipo di nucleo. Attualmente, non è stata ancora formulata un'equazione in grado di descrivere in maniera generale l'entità delle interazioni nucleari per tutti i tipi di nuclei, in quanto calcoli di natura quantomeccanica sono applicabili solamente ai nuclei più leggeri [14]. L'obiettivo di ricerca nell'ambito della fisica nucleare è, quindi, la formulazione di una trattazione generale in grado di:

- Determinare l'effettiva interazione tra particelle nucleari;
- Eliminare le incongruenze presenti nell'attuale modello;
- Essere applicabile anche ai nuclei esotici, dove il rapporto protoni/neutroni è elevato.

A tale proposito, i fasci di ioni radioattivi possono fornire un fondamentale contributo.

Misure della dimensione del nucleo: i nuclei halo

Il numero di massa A esprime il numero di nucleoni, cioè la somma del numero di protoni e di neutroni presenti in un nucleo atomico. Conseguentemente, è intuibile che la dimensione del nucleo sia direttamente correlata al numero di massa. La correlazione è espressa dalla 1.2.

$$R = R_0 \cdot A^{1/3} \quad 1.2$$

In questa espressione, R è il raggio del nucleo, A è il numero di massa ed R_0 rappresenta una costante pari a 1.2 fermi ($1 \text{ fermi} = 10^{-15} \text{ m}$).

Tuttavia, in particolari condizioni lontane dalla stabilità, si possono incontrare notevoli deviazioni dalla legge appena riportata, in quanto le interazioni tra i nucleoni possono diventare così piccole da non garantire la formazione di un nucleo sotto forma di aggregato. Il risultato di tale fenomeno è la formazione di nuclei ad anello, detti nuclei *halo*. Nuclei di questo tipo presentano una diversa distribuzione di neutroni: in particolare, si tratta di nuclei con sovrabbondanza di neutroni rispetto al corrispondente isotopo stabile, inoltre, uno o due di questi neutroni risente di una debole interazione con il nucleo, e vi orbitano intorno rimanendo quindi separati da esso (neutroni di valenza).

In Figura 1.27 è riportato un esempio di nucleo halo. L'isotopo ^{11}Li , il cui nucleo presenta due neutroni di valenza, possiede una dimensione media del nucleo paragonabile a quella dell'isotopo ^{48}Ca ; se, però, si considera anche l'alone racchiuso dalle orbite dei due neutroni di valenza, le dimensioni diventano confrontabili con quelle del nucleo molto più massivo dell'isotopo ^{208}Pb .

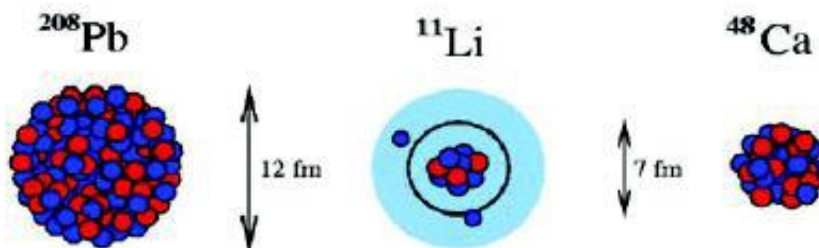


Figura 1.27: esempio di nucleo halo.

Il nucleo ^{11}Li è un sistema a tre corpi (i due neutroni ed il core) è rappresenta un esempio naturale di *sistema borromeico*. In topologia, si definisce sistema borromeico un sistema costituito da tre anelli inscindibilmente legati tra loro in maniera tale che la soppressione di uno di essi comporti la separazione degli altri due (Figura 1.28).

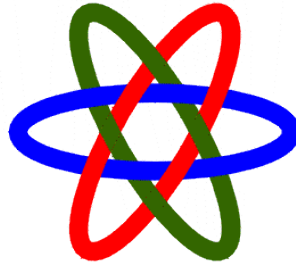


Figura 1.28: rappresentazione di anelli borromeici.

I nuclei ad anello sono anche detti borromeici, in quanto, se il costituente di uno degli anelli viene rimosso, l'intero sistema diventa immediatamente instabile ed i due anelli rimanenti si separano e si allontanano facilmente. Attualmente è possibile determinare la distribuzione dei protoni con esperimenti di spettroscopia atomica mediante l'utilizzo di fasci radioattivi di bassa energia e luce laser collineata. Se si cerca invece di determinare la distribuzione di tutti i nucleoni è necessario disporre di fasci ad alta energia, come quelli prodotti nelle facilities.

Produzione di elementi superpesanti

Sono circa 90 elementi gli elementi disponibili in natura, dall'idrogeno all'uranio. Negli ultimi anni, grazie a reazioni di fusione nucleare, è stato possibile sintetizzare elementi con elevato numero di massa, estendendo di fatto il numero dei costituenti della tavola periodica fino ad elementi con numero atomico pari a 112, prospettando una futura estensione a 116 [10]. In particolare, partendo da osservazioni preliminari, si ritiene che questi elementi, detti *superpesanti*, in cui la repulsione coulombiana assume valori elevati, riescano a formarsi intorno alla cosiddetta *isola di stabilità*, una configurazione formata da 114 protoni e 184 neutroni, che sembra garantire la stabilità del nucleo. Le tecnologie più recenti mettono a disposizione fasci intensi, costituiti da nuclei instabili neutron-rich. Se questi vengono accoppiati a target stabili, anch'essi ricchi di neutroni, potrebbero crearsi le condizioni adatte per approfondire tale fenomeno e aprire definitivamente la strada ad uno studio più accurato di questo ramo della fisica nucleare.

1.5.2 Fisica dello stato solido

La tecnica del *Radio Tracer Diffusion*, ideata agli inizi del ventesimo secolo, consente di impiantare dei nuclei radioattivi in un sistema solido con lo scopo di studiarne il decadimento grazie alla rilevazione delle particelle e delle radiazioni gamma emesse. Inoltre, con questa tecnica è possibile rilevare il segnale di pochissimi atomi, pertanto risulta particolarmente utile per lo studio dei processi di diffusione all'interno dei sistemi solidi. Il sistema ospitante può essere drogato con radioisotopi sonda sia per diffusione mediante reazione nucleare, sia per impianto ionico. La scelta dello specifico isotopo radioattivo da utilizzare nello specifico esperimento viene effettuata in base sia alle caratteristiche chimico-fisiche sia alle proprietà nucleari di quest'ultimo. [15]

L'utilizzo della tecnica *Radio Tracer Diffusion* consente di:

- Osservare, tramite i prodotti del decadimento, le interazioni tra l'atomo sonda e la struttura del reticolo cristallino che lo circonda;
- Ricavare informazioni riguardanti il campo elettrico e magnetico all'interno del reticolo cristallino;
- Studiare i processi diffusivi e le interazioni tra gli atomi sonda;
- Evidenziare la presenza, la distribuzione e la tipologia dei difetti nel reticolo cristallino.

Drogaggio dei semiconduttori

Per poter sviluppare semiconduttori di piccole dimensioni, è necessario disporre del miglior controllo possibile sui difetti che governano tali proprietà, cioè sia sulle caratteristiche intrinseche (vacanze, difetti interstiziali) sia su quelle estrinseche (droganti, impurità atomiche) del reticolo cristallino. Per questo motivo, sia la ricerca di base che quella applicata stanno concentrando i propri sforzi nello studio dei difetti e dell'attivazione elettrica dei droganti in diversi tipi di semiconduttori.

Analogamente agli isotopi droganti stabili, anche quelli radioattivi possono alterare le proprietà elettriche ed ottiche dei semiconduttori nei quali vengono inseriti. Queste caratteristiche sono influenzate dalle loro proprietà chimiche e dalla posizione in cui vengono inseriti nel reticolo. Oltre alla tipologia di semiconduttore,

le proprietà ottiche ed elettroniche sono sensibilmente influenzate anche dalle dimensioni. È stato dimostrato infatti che nel caso di conduttori particolarmente piccoli, tali proprietà possono essere alterate in maniera significativa se vi è un difetto con concentrazione inferiore a 10^{12} atomi/cm³. Per avere quindi un controllo affidabile delle prestazioni di semiconduttori di questo tipo, è indispensabile poter disporre di tecniche sperimentali con elevata sensibilità sia dal punto di vista chimico, sia da quello della concentrazione dei difetti. Per decenni, la tecnica più utilizzata per la rilevazione delle impurezze è stata il *channeling*: tale procedura consiste nell'indirizzare un fascio di ioni attraverso le righe atomiche dei cristalli o lungo i piani del cristallo; tuttavia non è possibile determinare concentrazioni di difetti inferiori a 10^{18} atomi/cm³. La sensibilità subisce un notevole miglioramento se all'interno del reticolo cristallino sono impiantate impurezze radioattive che emettono particelle cariche (*emission channeling*, Figura 1.29). Misurando l'emissione lungo direzioni diverse, è possibile determinare la posizione nel reticolo cristallino dell'atomo emittente con un'accuratezza di pochi decimi di Å.

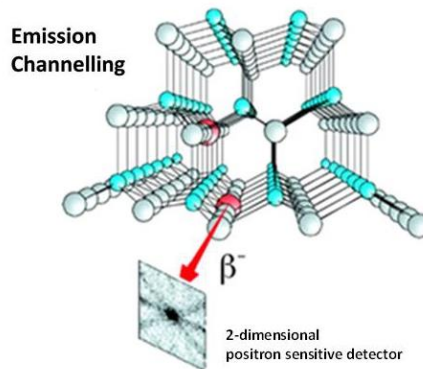


Figura 1.29: rappresentazione della tecnica Emission Channelling.

1.5.3 Medicina nucleare

I fasci di ioni radioattivi possono avere interessanti applicazioni mediche sia nel campo della diagnosi, sia nel campo del trattamento di patologie tumorali. Di seguito sono illustrate le principali applicazioni in campo medico che attualmente sono state prese in considerazione.

La tomografia ad emissione positronica

L'antimateria, costituente la parte di materia fatta da antiparticelle, cioè quelle particelle aventi massa uguale a quelle delle corrispondenti particelle costituenti la materia ordinaria, ma caratteristiche opposte, quali la carica, è generalmente utilizzata per lo studio dell'interazione tra particelle elementari. Tuttavia, l'antimateria presenta anche un'importante applicazione tecnologica: la tomografia ad emissione positronica (PET – *Positron Emission Tomography*). Si tratta di una tecnica di medicina nucleare e diagnostica medica che sfrutta l'emissione positronica per monitorare il funzionamento degli organi interni dei pazienti, creando mappe tridimensionali ad alta risoluzione della parte del corpo che si vuole osservare.



Figura 1.30: macchinario di diagnosi che sfrutta l'emissione positronica.

La tecnica PET prevede, generalmente, un'iniezione per via endovenosa di alcuni isotopi traccianti a vita breve, legati ad una molecola metabolicamente attiva, come uno zucchero. Dopo un certo arco temporale, nel quale la molecola contenente il tracciante ha avuto modo di diffondersi nel corpo legandosi alle cellule, con una certa concentrazione, nei vari tessuti oggetto di diagnosi, il soggetto viene posizionato all'interno di uno scanner. L'isotopo, avente vita media breve, decade emettendo un positrone, cioè un'antiparticella corrispondente all'elettrone, avente quindi carica positiva. Dopo un percorso breve, di al massimo pochi millimetri, il positrone si annichila con un elettrone, emettendo due fotoni con energia paragonabile a quella della radiazione gamma. I fotoni sono emessi lungo la medesima direzione, ma con versi opposti (sfasati quindi di 180°), e rilevati dal dispositivo di scansione mediante particolari tubi fotomoltiplicatori. Il principio fondamentale su cui si basa l'efficacia della tecnica è la rilevazione simultanea di coppie di fotoni: coppie di fotoni che non arrivano al rivelatore in un intervallo di tempo sufficientemente ristretto, considerato di pochi nanosecondi, non vengono presi in considerazione. Misurando la posizione in cui ciascun fotone colpisce il rivelatore (ciascuna coppia identifica una retta) è possibile determinare la posizione del corpo da cui sono stati emessi (teoricamente due coppie di fotoni identificano due rette tra loro incidenti nel punto di emissione), permettendo quindi di monitorare l'attività degli organi osservati.

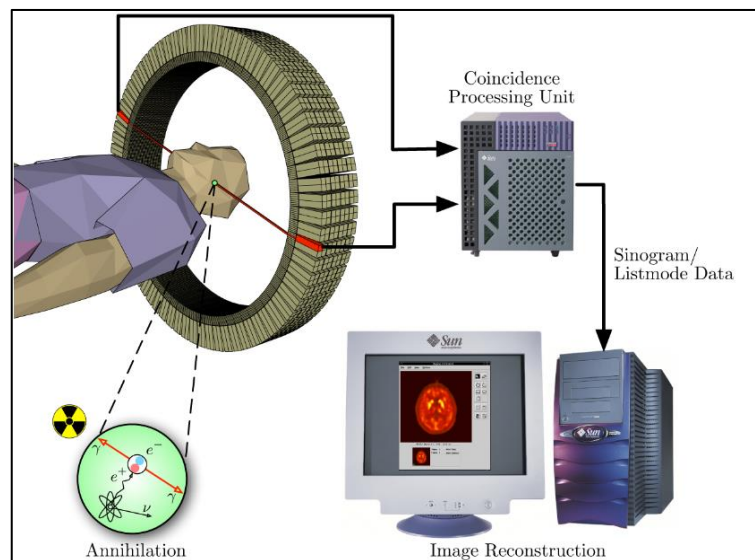


Figura 1.31: schema del processo di funzionamento della tomografia ad emissione di positroni.

Lo scanner (Figura 1.31) utilizza l'emissione di fotoni per determinare la densità dell'isotopo nei tessuti analizzati. La mappa risultante rappresenta i tessuti in cui la molecola tracciante si è concentrata maggiormente e viene letta e interpretata da uno specialista in medicina nucleare o in radiologia al fine di effettuare una diagnosi e stabilire il trattamento adeguato per l'eventuale patologia o anomalia riscontrata. Molto spesso i risultati ottenuti dalla tomografia ad emissione di positroni sono integrati e confrontati con gli esiti di una risonanza magnetica nucleare (RMN), ottenendo così una mappatura completa dei tessuti analizzati, comprendente informazioni sia morfologiche ed anatomiche, sia metaboliche.

Mentre diagnosi effettuate con i metodi di scansione come la RMN e la TAC, che permettono di identificare alterazioni morfologiche e anatomiche dei tessuti organici, le scansioni PET sono in grado di mostrare eventuali variazioni a livello biologico molecolare grazie all'utilizzo di marcatori che presentano diversa velocità di assorbimento a seconda del tessuto interessato. Questo tipo di alterazioni in genere precedono quelle morfologiche, pertanto permettono di diagnosticare con maggiore anticipo eventuali anomalie. Inoltre, con una scansione di tipo PET si può determinare, con una certa precisione, il cambio di afflusso sanguigno nei vari tessuti attraverso la determinazione di concentrazione dell'emissione positronica.

I radionuclidi più utilizzati nella scansione PET sono isotopi a breve emivita, come ^{11}C (~20 min), ^{13}N (~10 min), ^{15}O (~2 min), ^{18}F (~110 min). Per via del loro basso tempo di dimezzamento, i radioisotopi devono essere prodotti in prossimità dello scansionatore PET.

La produzione di radiofarmaci

Nell'ambito del progetto SPES, è in fase di studio la possibilità di produrre radioisotopi utili ad applicazioni di medicina nucleare. In tale ambito la ricerca è molto viva e, nell'ottica di una collaborazione tra i laboratori di fisica nucleare e gli ospedali, si stanno studiando i possibili radiofarmaci producibili. Saranno prodotti soprattutto radioisotopi *neutron-rich β -emitters*, dalle applicazioni in campo terapeutico molto promettenti. Ciò

che rende questo studio significativo è la possibilità di produrre radiofarmaci ad altissima purezza, privi di contaminanti. Attualmente sono state condotte con successo alcune sperimentazioni pilota con ^{89}Sr , ^{90}Y , $^{125/131}\text{I}$, i radioisotopi più promettenti, per la verifica della realizzabilità del progetto. Il ramo del progetto SPES relativo allo studio ed alla produzione di radiofarmaci è denominato ISOLPHARM.

1.5.4 Astrofisica

L'astrofisica nucleare è fondamentale per la comprensione delle strutture, dell'evoluzione, delle dinamiche e della composizione dell'universo e dei suoi costituenti.

Nelle stelle avvengono reazioni nucleari che liberano grandi quantità di energia e che coinvolgono nuclei stabili ed instabili. Tali reazioni possono essere costanti nel tempo, permettendo quindi alla stella di continuare a brillare per miliardi di anni prima di esaurire il carburante nucleare, oppure liberare un'enorme quantità di energia in un unico evento esplosivo distruggendo di fatto la stella in pochi istanti.

Nelle differenti fasi della vita di una stella vengono sintetizzati nuovi elementi chimici, sia attraverso reazioni di nucleosintesi, che seguono strettamente la valle di stabilità, sia attraverso processi non ancora identificati, dal momento che si svolgono in un territorio ancora sconosciuto.

Per sviluppare un modello che descriva il processo di nucleosintesi, è necessario valutare le rese delle reazioni nucleari dei principali cicli astrofisici e le caratteristiche di decadimento dei nuclei tuttora sconosciuti. Queste essenziali informazioni includono i tempi di vita, le masse ed i principali canali di decadimento di un numero di nuclei chiave lontani dalla stabilità. Le reazioni nucleari coinvolgenti nuclei instabili possono essere misurate unicamente con un fascio radioattivo: per tale motivo si prevede che la nuova generazione di facilities risulterà di fondamentale importanza per la comprensione della sintesi elementare nell'universo.

1.6 Conclusioni

L'importanza assunta negli anni dai fasci radioattivi, sia per la ricerca teorica che applicata, ha spinto la comunità scientifica internazionale a costruire numerose facilities per la loro produzione: il progetto SPES ai Laboratori Nazionali di Legnaro rientra nell'ambito della realizzazione di una facility europea di tipo ISOL ad alte prestazioni (progetto EURISOL). La realizzazione operativa di tale progetto prevede l'allestimento di una facility "intermedia" in grado di ottenere 10^{13} fissioni/s in un target costituito da 7 dischi in carburo di uranio bombardati da un fascio protonico di 40 MeV a 0,2 mA.

Come detto precedentemente, una corretta configurazione di tutti gli apparati e strumenti costituenti la facility è fondamentale per il raggiungimento di un livello di efficienza elevato, quindi deve essere fatta un'intensa e precisa attività di progettazione. In quest'ottica, risulta di vitale importanza la conoscenza delle proprietà meccaniche e termiche dei materiali di interesse per la costruzione di ogni componente, in modo da garantire integrità strutturale ed elevati rendimenti. Tra tutte, la camera target costituisce sicuramente una delle parti più importanti dell'intera facility. Tra i materiali di interesse della camera si distinguono la grafite, utilizzata per la costruzione della box contenente i dischi target, la finestra ed i dumper, ed il carburo di silicio, materiale che verrà utilizzato come primo bersaglio di produzione. Quindi, con lo scopo di analizzare distribuzioni di temperatura e tensione che si possono instaurare in fase d'esercizio, è necessario utilizzare strumenti di natura sperimentale e software, i cui risultati sono messi in relazione al fine di determinare proprietà e distribuzioni cercate.

CAPITOLO 2

Il target di produzione SPES

“Il metodo della scienza è razionale: è il migliore che abbiamo. Perciò è razionale accettare i suoi risultati; ma non nel senso di confidare ciecamente in essi: non sappiamo mai in anticipo dove potremmo essere piantati in asso.”

Karl Popper

2.1 Introduzione

SPES è una facility in via di costruzione che prevede di produrre fasci di ioni radioattivi neutron-rich; i nuclei esotici sono frutto di fissioni derivanti dalla collisione di protoni con nuclei di ^{238}U . Un fascio protonico, di intensità $200\ \mu\text{A}$, viene estratto ed accelerato ad energia $40\ \text{MeV}$ da un ciclotrone ed impatta su un target costituito da sette dischi in carburo di uranio (UC_x) del diametro di $40\ \text{mm}$, ospitati in un cilindro di grafite a sua volta inserito in un riscaldatore cilindrico in tantalio.

L'edificio SPES presente ai Laboratori Nazionali di Legnaro è stato ultimato: si prevede, quindi, che tutti i componenti della facility che sono stati progettati e costruiti in appositi laboratori siano collocati all'interno del nuovo edificio in vista dei primi collaudi. In questa fase iniziale, i dischi utilizzati saranno costruiti in carburo di silicio: trattandosi di un materiale non fissile, si verrà a generare un livello di radioattività più contenuto, limitando quindi i problemi di radioprotezione che potrebbero compromettere le possibilità di intervento tecnico. Inoltre, per limitare i problemi di gestione del fascio e dei sistemi costituenti le linee, il fascio iniziale avrà un'energia pari a $40\ \text{MeV}$ e corrente fino a $20\ \mu\text{A}$ ed impatterà su dischi SiC dal diametro di $13\ \text{mm}$. Nella seconda fase di collaudo della facility SPES, si inizierà ad utilizzare un target fissile (carburo di uranio), mantenendo inalterate le caratteristiche del fascio ($40\ \text{MeV}$ e $20\ \mu\text{A}$). Infine, terminata la fase di collaudo, verrà implementata la configurazione finale *full scale*, in cui dischi di carburo di uranio da $40\ \text{mm}$ verranno investiti da un fascio protonico con energia di $40\ \text{MeV}$ e corrente di $200\ \mu\text{A}$.

Come già dichiarato, il carburo di silicio sarà il primo materiale impiegato per i target *low scale* da usare in fase di test dell'intero sistema; in realtà, anche dopo l'implementazione del target UC_x con dischi da $40\ \text{mm}$, potrebbe essere utilizzato ancora in versione *full scale* a seconda dei fasci RIB richiesti dalla comunità degli utenti sperimentali. In particolare, il carburo di silicio risulta essere molto utile per la produzione di isotopi neutron-poor, come ^{26}Al , ^{21}Na , ^{22}Na , ^7Be , di elevato interesse nel campo della fisica nucleare teorica ed applicata.

2.2 L'area di produzione SPES

Nel contesto del progetto SPES, l'area di produzione (Figura 2.1) rappresenta il nucleo dell'intera facility, in quanto costituisce il centro di produzione degli isotopi radioattivi, cioè dove il fascio di protoni (*PPB – Primary Proton Beam*) viene convertito in un fascio di ioni radioattivo (*RIB – Radioactive Ion Beam*). Da un punto di vista funzionale, si possono identificare due costituenti fondamentali dell'area di produzione. La prima è l'unità TIS (*target-ion source*), comprensiva del blocco target, della sorgente di ionizzazione (*ion-source*) e della camera da vuoto; l'intero sistema viene cambiato ad ogni irraggiamento e costituisce la parte mobile dell'area di produzione. Il secondo è il front-end, il quale comprende tutti i componenti atti a garantire le ottimali condizioni di operatività del target e della sorgente, permettendo la produzione ed il trasporto dei fasci di ioni radioattivi.

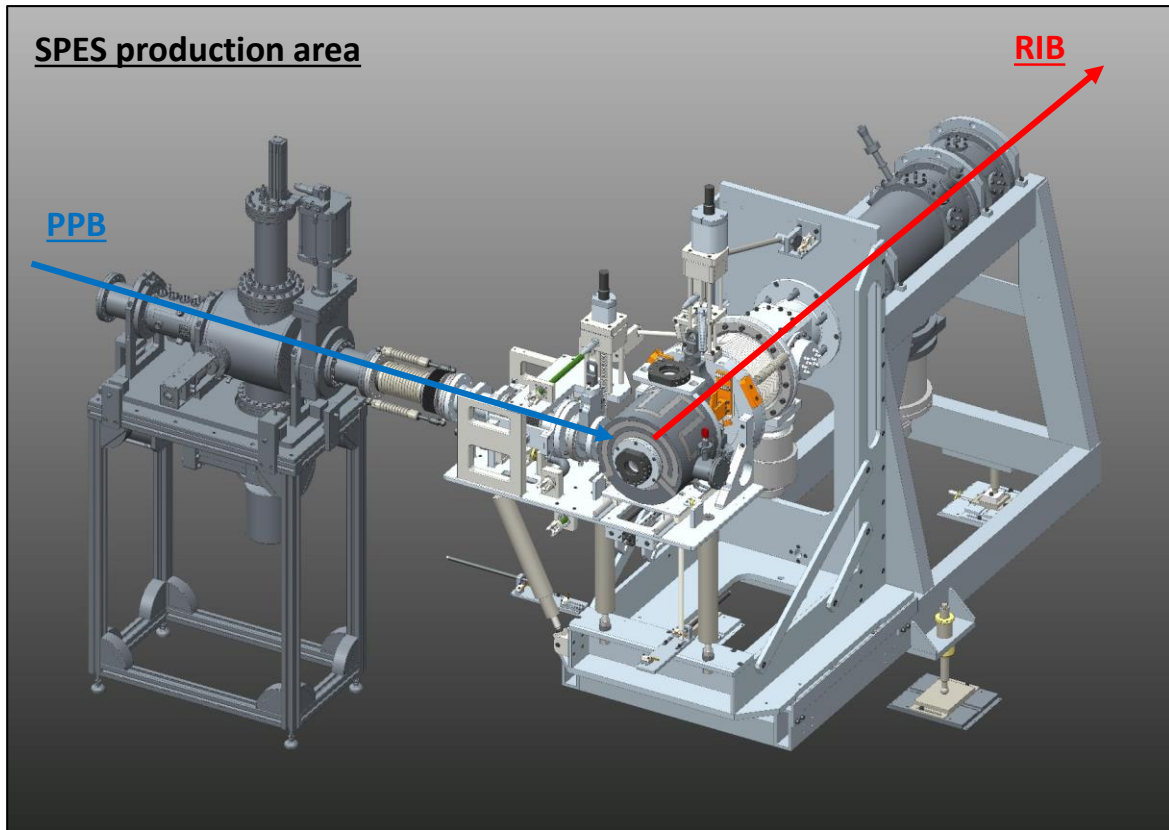


Figura 2.1: rappresentazione dell'area di produzione SPES.

2.2.1 Il front-end [10]

Il front end è un assieme complesso progettato sulla base dell'esperienza pregressa in altre facilities di tipo ISOL europee. Le complessità di questo assieme derivano dalla necessità di ottenere un'elevata resistenza, per l'intera durata dell'esperimento, in ambiente radioattivo, senza subire danneggiamenti tali da comprometterne il funzionamento e limitando, in numero ed entità, gli interventi di manutenzione.

Le sue principali funzioni sono:

- assicurare il sostegno meccanico ed il corretto posizionamento della camera da vuoto contenente il target e la sorgente di ionizzazione;
- fornire, per mezzo degli impianti ausiliari installati nel front-end, il corretto valore di alto vuoto alla camera, l'alimentazione elettrica per il riscaldamento del target e della sorgente e l'acqua di raffreddamento per i circuiti posti nella camera;
- permettere l'ingresso e la focalizzazione del fascio primario in direzione del target di produzione;
- provvedere all'estrazione del fascio secondario radioattivo dal sistema target-ion source ed indirizzarlo alle parti successive della facility;
- mantenere in stato di alto vuoto il canale radioattivo ed il canale protonico.

L'architettura generale del macro-componente può essere schematizzata in due grandi canali tenuti in alto vuoto (10^{-6} mbar) e perpendicolari tra loro: il canale del fascio primario protonico (PPB) e il canale del fascio secondario di ioni radioattivi (RIB). All'intersezione di questi due canali è prevista la sede della camera da vuoto contenente il sistema target-ion source (TIS), progettata per poter garantire una gestione automatizzata della sostituzione al termine del periodo di utilizzo.

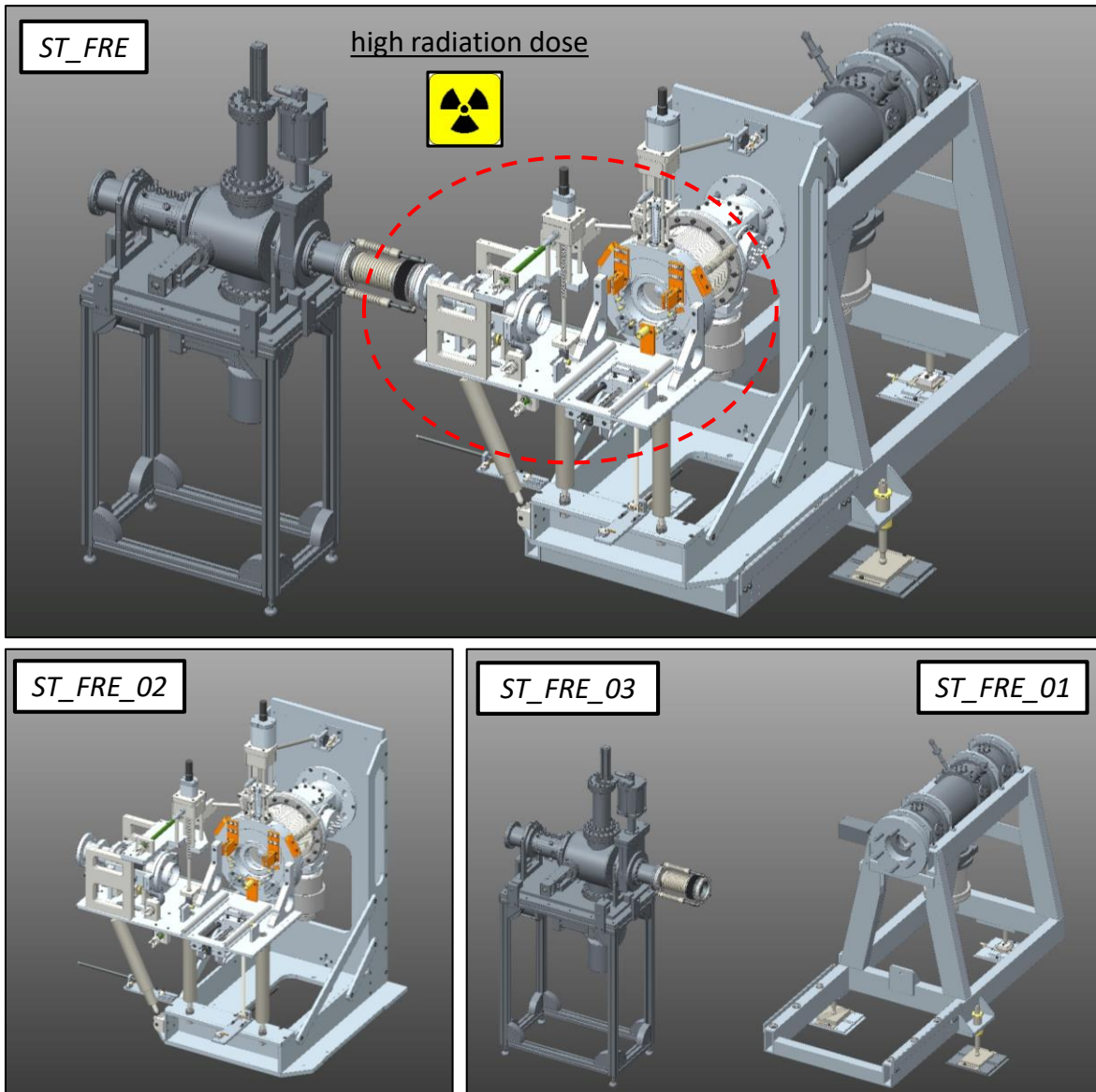


Figura 2.2: i sottoassiemi generali del front end, suddivisi in parte removibile (ST_FRE_02) e parte fissa (ST_FRE_01 e ST_FRE_03).

Con lo scopo di facilitare le operazioni di manutenzione, il front end è stato suddiviso in due parti: una parte fissa (sottoassiemi ST_FRE_01 e ST_FRE_03) ed una parte removibile (ST_FRE_02), illustrati in Figura 2.2. La parte removibile rappresenta la porzione del front-end maggiormente esposta ad un'elevata quantità di radiazioni e quindi tende a manifestare nel corso del tempo un progressivo danneggiamento. Per questo motivo è stata progettata in modo da essere rimossa con relativa facilità dopo un periodo di utilizzo previsto di sette anni, in modo da essere sostituita con una nuova. La parte fissa, essendo interessata da un'esposizione alle radiazioni molto inferiore, non dovrebbe manifestare, durante l'intera vita della facility, un danneggiamento tale da comprometterne il funzionamento e, perciò, necessitare di essere sostituita.

Il front-end rappresenta un macro-componente di elevata complessità, sia per le dimensioni importanti, sia per la presenza di un elevato numero di sottoassiemi: per un approfondimento delle due parti che costituiscono il front-end, si rimanda ai testi dedicati [10].

2.2.2 L'unità target-ion source

L'unità target-ion source è costituita da tre componenti: il blocco target, la sorgente di ionizzazione e la camera da vuoto: in Figura 2.3 è riportata una rappresentazione di tale sistema.

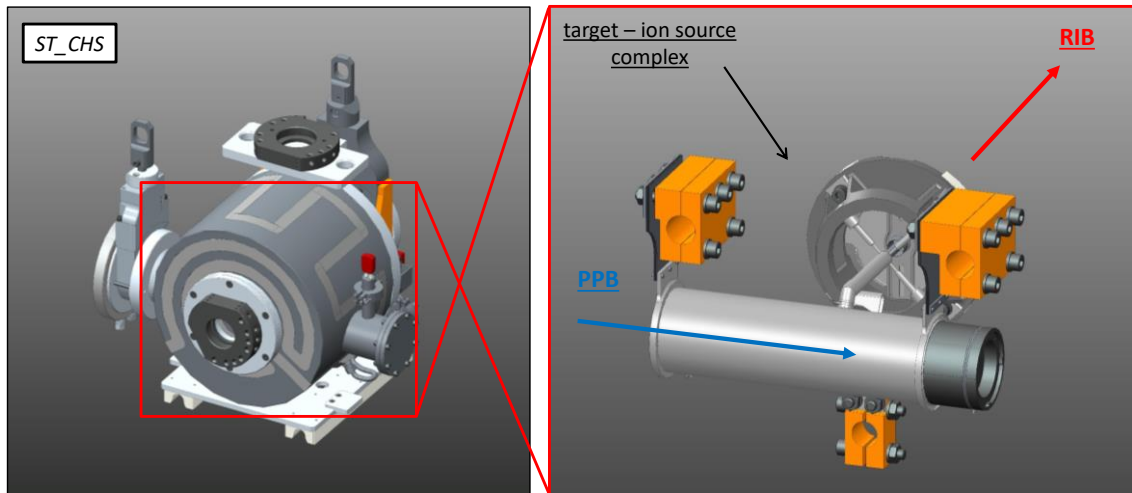


Figura 2.3: rappresentazione della camera da vuoto e del complesso target-ion source in essa inserito.

La funzione della camera da vuoto è quella di contenere e sostenere il target di produzione e la sorgente di ionizzazione in un ambiente in alto vuoto (dell'ordine di grandezza di 10^{-6} mbar). La camera, inoltre, deve consentire l'ingresso della corrente di riscaldamento del target e della sorgente; infine deve consentire l'asportazione, per mezzo dell'acqua di raffreddamento, della potenza termica prodotta. Il corretto funzionamento della camera è di vitale importanza perché in essa è contenuto il cuore dell'intera facility.

Poiché il target deve essere investito dal fascio primario e il fascio di ioni radioattivi deve essere estratto attraverso la sorgente di ionizzazione, la camera deve garantire che i componenti al suo interno siano correttamente orientati ed allineati e deve presentare aperture in corrispondenza degli ingressi e uscite dei fasci. La camera è stata pensata per essere facilmente rimovibile dal sistema automatico di movimentazione dopo i 15 giorni previsti di operatività. Per la realizzazione di questo macro-componente sono state utilizzate leghe di alluminio, preferibili rispetto all'acciaio per la loro maggiore tendenza a perdere radioattività: ciò si traduce in un'attivazione meno problematica del materiale in ambiente radioattivo.

In Figura 2.4 sono riportati i principali sottoassiemi che compongono il macro-componente camera da vuoto. Il componente ST_CHS_01 costituisce il piatto che garantisce il sostegno meccanico dell'intera camera, del target e della sorgente. In particolare, tale componente presenta l'apertura per l'uscita del fascio radioattivo, la cui chiusura in fase di rimozione è garantita dalla presenza della valvola da vuoto posta sul retro. La temperatura del piatto è tenuta ad un livello sufficientemente basso da un circuito di raffreddamento ad acqua. Sul piatto sono fissati anche i puntali per il sostegno e l'alimentazione della sorgente di ionizzazione (ST_CHS_02) e del target (ST_CHS_03 e ST_CHS_04), realizzati in rame. Tali componenti devono essere attraversati da elevate correnti per garantire un sufficiente riscaldamento del target e della sorgente (per effetto Joule), portando il campo di temperatura di quest'ultimi attorno ai 2000°C . Dal momento che il materiale (rame) che costituisce i puntali non è in grado di resistere a contatto con elementi a temperature così elevate è necessario prevedere all'interno di ciascuno un circuito di raffreddamento. L'acqua che alimenta i tre circuiti di raffreddamento dei puntali è prelevata deviandola da quello del piatto.

Completa il macro-componente camera il sotto-assieme coperchio (ST_CHS_05), che identifica il volume tenuto in alto vuoto per il buon funzionamento del target e della sorgente. Attraverso le pareti del coperchio è dissipata una grande porzione dell'energia termica generata al suo interno, per tale motivo anche questo componente è raffreddato per mezzo di un circuito indipendente. Il raffreddamento garantisce che i componenti non raggiungano temperature troppo elevate, con conseguente danneggiamento degli organi di tenuta e il rischio di rilascio di contaminanti radioattivi nell'ambiente esterno. Per un approfondimento delle parti che costituiscono la camera, fare riferimento ai testi dedicati [10].

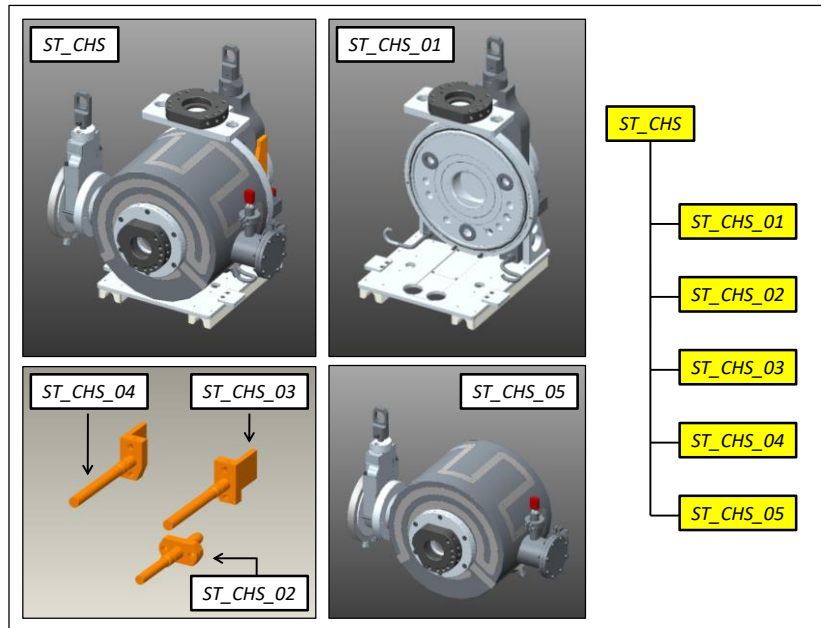


Figura 2.4: il macro-componente camera da vuoto.

Il target di produzione rappresenta il fulcro dell'intera facility, in quanto sede della produzione di isotopi radioattivi. Il design attuale del target comprende tre diversi sottoassiemi: il target (*ST_TBS_01*), il riscaldatore (*ST_TBS_02*) e la linea di trasferimento (*ST_TBS_03*), rappresentati in Figura 2.5.

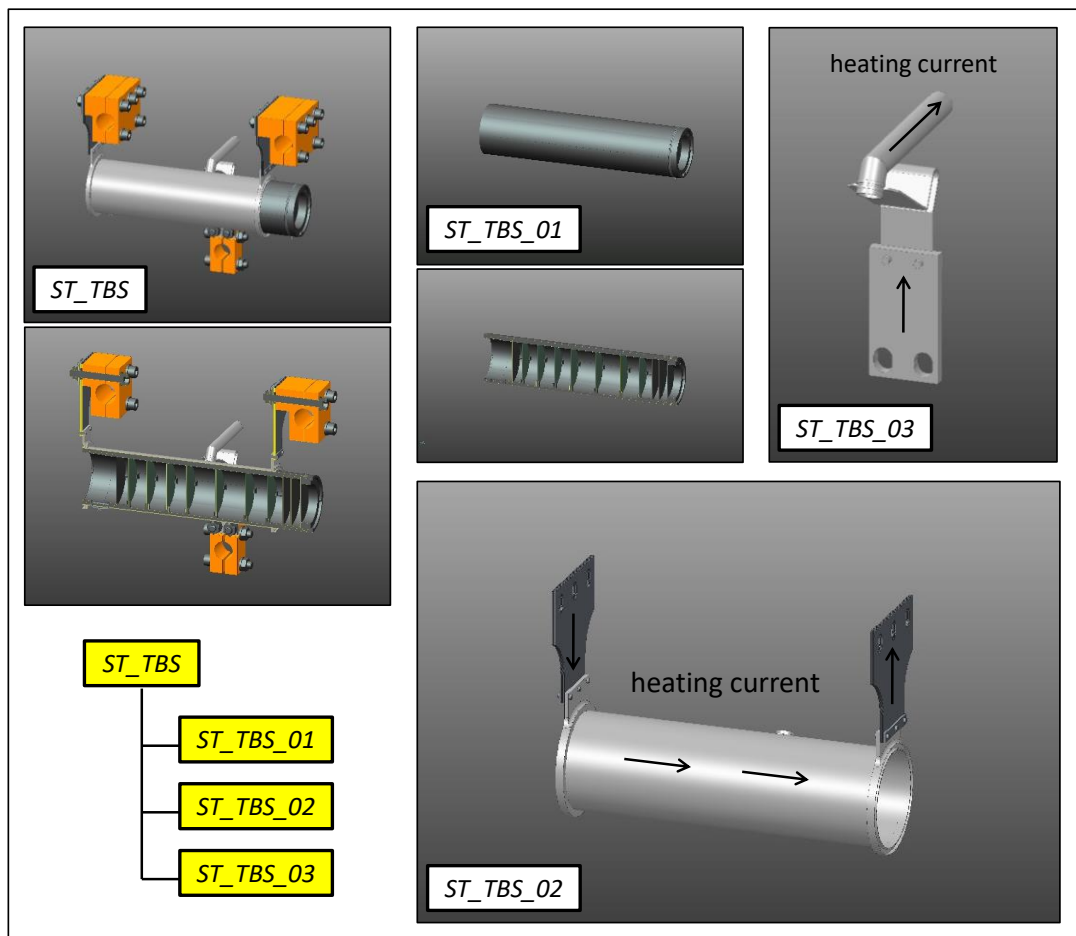


Figura 2.5: rappresentazione del target di produzione (*ST_TBS*) e dei suoi sottoassiemi.

Il target (ST_TBS_01), il sottoassieme principale del macro-componente, è costituito da un corpo cavo cilindrico in grafite (*graphite box*) di diametro esterno 49 mm, lungo circa 200 mm e di spessore mediamente pari a 2 mm, realizzato per mezzo di due gusci semicilindrici. Il materiale utilizzato è la grafite EDM-3[®] dell'azienda POCO. Al suo interno, opportunamente spazati, sono alloggiati sette dischi coassiali di materiale fissile (carburo di uranio) di diametro 40 mm e spessore circa 1 mm, che in fase di operazione raggiungono temperature comprese tra i 2000°C e i 2200°C. La spaziatura assiale dei dischi è variabile e dipende dalla deposizione di potenza del fascio sui dischi stessi: essa è variabile lungo l'asse, pertanto dove risulta maggiore, i dischi sono più spazati e viceversa, al fine di garantire la maggiore uniformità termica possibile. Le estremità della box sono chiuse con dischi di grafite (la medesima della box) in modo da isolare il volume dove sono collocati i dischi; ciò comporta un duplice beneficio: da un lato si evita l'eccessiva diffusione degli isotopi all'interno della camera, dall'altro si contiene la dispersione del calore, permettendo il mantenimento delle temperature elevate desiderate senza aumentare la potenza termica spesa per ottenerle. Il disco posto in corrispondenza dell'ingresso del fascio protonico è caratterizzato da uno spessore molto sottile (0.2 mm), in quanto si vuole minimizzare la dissipazione di potenza del fascio. In posizione diametralmente opposta, nella zona di *dumper*, il blocco target è chiuso con tre dischi in grafite in successione, di spessore rispettivamente 0.8 mm, 0.8 mm e 1 mm. Tali componenti sono stati dimensionati e distanziati in maniera opportuna per garantire il completo assorbimento della corrente residua del fascio dopo che ha impattato i sette dischi target. L'unica apertura della box del target è un foro di diametro 10 mm attraverso il quale gli isotopi prodotti possono uscire per mezzo di meccanismi diffusivi ed essere convogliati, attraverso la linea di trasferimento, in direzione della sorgente di ionizzazione.

Il target è posto all'interno del riscaldatore (ST_TBS_02), che consiste in un tubo in tantalio di spessore sottile (0.2 mm), alle cui estremità sono saldate due ali, anch'esse in tantalio. Le due ali sono fissate ai puntali di alimentazione del riscaldatore per mezzo di opportuni morsetti in rame. Il riscaldatore da un lato garantisce il corretto posizionamento del blocco target all'interno della camera da vuoto e ne fornisce il sostegno meccanico, dall'altro, attraverso la generazione di calore per effetto Joule (corrente di riscaldatore pari a 1300 A), viene utilizzato per portare il target a temperatura elevata (circa 2000°C), in assenza del carico termico derivante dal fascio primario. Quando il fascio primario viene incrementato fino alla potenza massima, la corrente del riscaldatore viene ridotta gradualmente.

Un aspetto critico è rappresentato dalle ali, che avendo spessore complessivo di 2 mm sono molto più rigide del tubo del riscaldatore. In particolare, nel caso di alte correnti e, conseguentemente di alte temperature, nel tubo in tantalio insorgono tensioni di compressione in quanto la rigidità delle ali non consente di assecondare l'espansione termica; possono quindi verificarsi deformazioni locali tali da provocare l'incollaggio della box del target al riscaldatore. Questo problema ha influenza sull'operatività del sistema in quanto nei punti dove si hanno delle microsaldature tra tantalio e grafite hanno luogo dei contatti elettrici. Parte della corrente elettrica del riscaldatore può quindi fluire attraverso la box in grafite, diminuendo di fatto la capacità del sistema di raggiungere le alte temperature richieste. Questo problema si risolve utilizzando ali formate da un pacchetto di lamierini di spessore 0.1 mm anziché massive: tale aumento di flessibilità risulta essere sufficiente a garantire l'assecondamento dell'espansione termica del tubo.

Il macro-componente target è completato dal sottoassieme linea di trasferimento (ST_TBS_03) che ha la duplice funzione di dirigere la diffusione degli isotopi generati nel target verso la sorgente di ionizzazione e al contempo fornirvi l'alimentazione elettrica necessaria per un funzionamento efficiente. La linea di trasferimento consiste in un tubo in tantalio di diametro esterno 8.8 mm e spessore 0.4 mm ed è unito per mezzo di una saldatura circonferenziale al riscaldatore all'altezza del foro sul target per l'uscita degli isotopi. L'alimentazione elettrica è garantita da una connessione elettrica in tantalio, collegata al puntale di alimentazione della sorgente per mezzo di un morsetto in rame. Tali componenti sono dimensionati per poter sopportare una corrente di oltre 350 A, necessaria per portare la linea di trasferimento e la sorgente alla temperatura di lavoro di oltre 2000°C.

Infine, è importante sottolineare la presenza di un'altra tipologia di target, utilizzato per effettuare i primi test e verificare il corretto funzionamento dell'intero sistema, di dimensioni inferiori. Questo target si differenzia dal precedente per il diametro dei dischi (13 mm) e per la presenza di una seconda finestra in grafite, utilizzata per garantire il mantenimento dei radioisotopi all'interno del target qualora una delle due finestre dovesse rompersi.

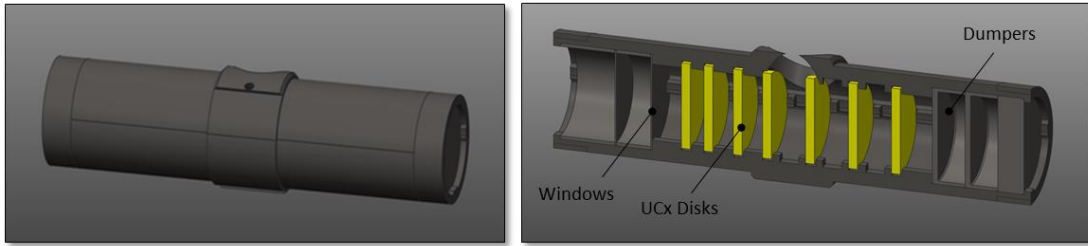


Figura 2.6: raffigurazione del target con dischi da 13 mm. A sinistra è rappresentata la graphite box, a destra una sezione contenente i 7 dischi in carburo di uranio, i dumpers e le finestre.

A completare l'unità target-ion source c'è il sistema di ionizzazione, descritto in dettaglio nel corso del capitolo 1 nelle sue tre diverse forme: sorgente di ionizzazione superficiale, sorgente di ionizzazione laser e sorgente di ionizzazione al plasma.

2.2.3 Requisiti e prestazioni di un target ISOL

Gli isotopi generati all'interno di un target di una facility di tipo ISOL sono ottenuti attraverso reazioni nucleari generate dall'impatto di un fascio primario contro un bersaglio: è immediato concludere che le specie prodotte e la loro abbondanza dipende sia dalle caratteristiche del fascio, sia dalle caratteristiche del target.

L'intensità degli isotopi prodotti può essere espressa utilizzando l'espressione 2.1

$$I_{produzione} = \Phi \cdot \sigma \cdot N_{target} \quad 2.1$$

in cui Φ rappresenta l'intensità del fascio primario (solitamente in mA o μ A), σ la sezione d'impatto del fascio col target (solitamente in cm^2 o in barns, $1 \text{ barn} = 10^{-24} \text{ cm}^2$) e N_{target} il numero di atomi target per unità di area (solitamente espresso come atomi/ cm^2). In Figura 2.7 sono messi in evidenza i prodotti del target SPES in carburo di uranio, con un tasso di fissioni pari a 10^{13} fissioni/s.

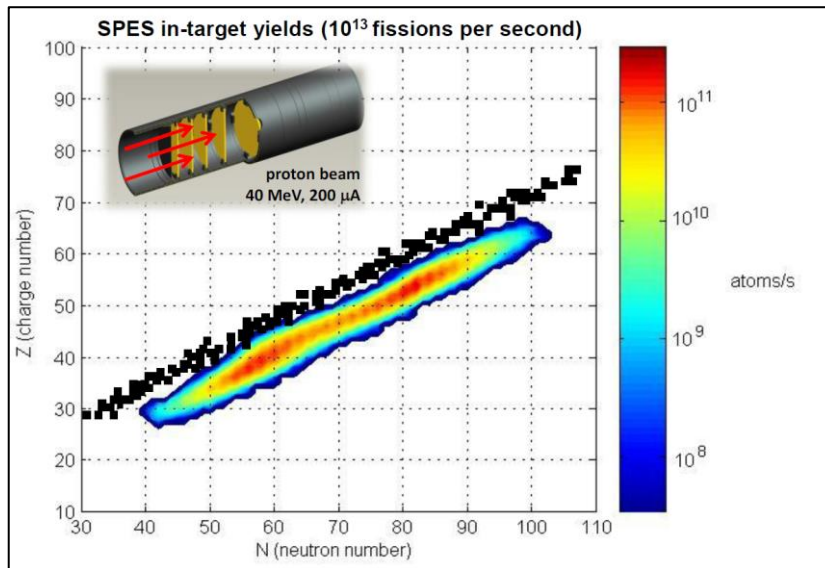


Figura 2.7: produzione di isotopi all'interno del target.

In generale, esistono quattro tipologie di reazioni nucleari che possono avvenire nel momento in cui il fascio primario investe il target:

- **Fissione.** È il processo attraverso il quale il nucleo di un elemento chimico pesante decade in frammenti di minori dimensioni, ovvero in nuclei di atomi aventi numero atomico inferiore, con emissione di una grande quantità di energia sotto forma di particelle e di radiazione elettromagnetica. Per esempio, in Figura 2.8 un nucleo di uranio ^{235}U è bombardato da un neutrone e produce un nucleo di kripton ^{92}Kr ed un nucleo di bario ^{141}Ba , liberando tre neutroni ed un'elevata quantità di energia.

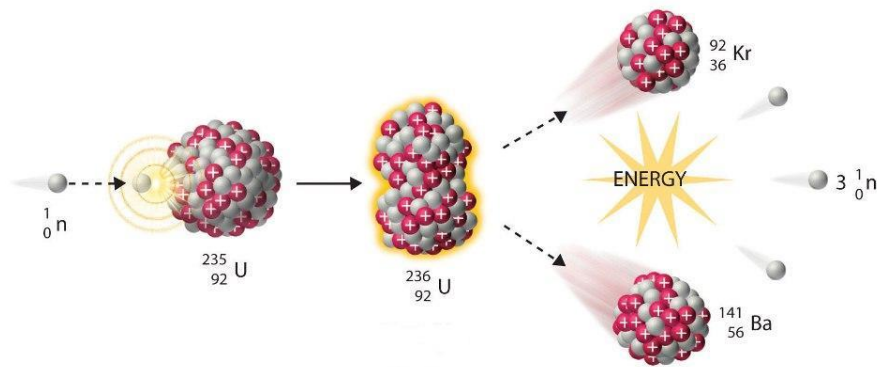


Figura 2.8: processo di fissione di un nucleo di uranio ^{235}U .

- *Spallazione.* In questo tipo di reazione un alto numero di protoni, neutroni e particella α sono ablati dai nuclei target, formando nuovi nuclei con massa simile a quelli di origine. Per esempio, un fascio di protoni avente energia pari ad 1 GeV che impatta su un target di ^{238}U produce ^{200}Fr (francio), ablando 5 protoni e 23 neutroni. Questo particolare meccanismo viene utilizzato qualora si vogliono produrre isotopi proton-rich (*neutron-poor*);
- *Frammentazione.* Questa tipologia di reazione avviene qualora un fascio protonico ad alta energia viene fatto impattare con un target, producendo i cosiddetti *proiettili di frammentazione* che vengono a loro volta fatti impattare su un target stabile ^{12}C per esempio. Questa tipologia di reazione è utilizzata per la produzione di isotopi il cui tempo di dimezzamento è molto breve (^{11}Li per esempio, la cui emivita è pari a circa 8.6 ms);
- *Reazione diretta.* È una tipologia di reazione nucleare che non prevede l'utilizzo di materiale fissile, quindi il numero di isotopi che si possono produrre è molto limitato se confrontata con le tre tipologie di reazione descritte precedentemente.

Indipendentemente dalla tipologia di reazione coinvolta, non appena un radionuclide è stato prodotto all'interno del target, comincia a muoversi con direzione e velocità dipendente sia dalla microstruttura del target, sia dalla temperatura alla quale si trova il sistema; questo processo è denominato *diffusione*. Allo stesso tempo, gli isotopi prodotti cominciano a decadere, ognuno col proprio tempo di decadimento caratteristico (si ricorda che viene definito *tempo di dimezzamento* o *emivita* τ di un isotopo radioattivo il tempo occorrente affinché la metà degli atomi di un campione puro dell'isotopo considerato decadano in un altro elemento: più breve è l'emivita, meno è stabile l'isotopo. Si evidenzia che il tempo di dimezzamento è una costante per ogni isotopo e varia da frazioni di secondo per i più instabili, fino a miliardi di anni per quelli che sono leggermente instabili). Inoltre, dopo aver attraversato il target, gli isotopi cominciano a diffondersi nel volume in cui sono racchiusi fintantoché non raggiungono la sorgente di ionizzazione direttamente connessa al target; questo processo è denominato *effusione*.

Tutti i processi che avvengono tra la generazione degli isotopi all'interno del target ed il loro effettivo utilizzo sono caratterizzati da un rendimento, a rappresentare una perdita di efficienza: per questo motivo, l'ottimizzazione del target è molto importante al fine di evitare la perdita di una grande frazione di isotopi a causa del loro decadimento prima di poter raggiungere le sale sperimentali.

Da un punto di vista generale, l'equazione 2.1 deve essere corretta tenendo conto dell'efficienza. Pertanto, l'intensità finale del fascio RIB risulta essere:

$$I = I_{\text{produzione}} \cdot \varepsilon = \Phi \cdot \sigma \cdot N_{\text{target}} \cdot \varepsilon \quad 2.2$$

in cui ε rappresenta l'efficienza dell'intero processo ISOL, tenendo conto, quindi, le efficienze di ogni singolo step di produzione e manipolazione degli isotopi. ε può quindi essere calcolata come il prodotto delle varie efficienze:

$$\varepsilon = \varepsilon_{\text{ritardo}} \cdot \varepsilon_{\text{ionizzazione}} \cdot \varepsilon_{\text{trasporto}} \cdot \varepsilon_{\text{raffreddamento}} \cdot \varepsilon_{\text{breeding}} \cdot \varepsilon_{\text{post-accelerazione}} \quad 2.3$$

in cui:

- $\epsilon_{ritardo}$ è relativa alla probabilità di sopravvivenza contro il decadimento radioattivo durante il tempo necessario all'estrazione ed alla ionizzazione. È il contributo di efficienza legato ai processi di diffusione ed effusione e rappresenta la perdita più gravosa dell'intero processo;
- $\epsilon_{ionizzazione}$ rappresenta l'efficienza della sorgente di ionizzazione ed è quindi legata ai meccanismi messi in gioco per ionizzare l'isotopo considerato;
- $\epsilon_{trasporto} \cdot \epsilon_{raffreddamento} \cdot \epsilon_{breeding} \cdot \epsilon_{post-accelerazione}$ sono quattro inefficienze relative alla movimentazione ed al gruppo di trasformazioni che avvengono dopo il sistema target-ion source e possono essere quindi raggruppate in un'unica efficienza *post-target* ($\epsilon_{post-target}$).

Se si considera la corrente di ioni come una funzione del tempo e considerando l'efficienza post-target, l'equazione 2.2 diventa:

$$i(t) = \Phi \cdot \sigma \cdot N_{target} \cdot \epsilon_{ionizzazione} \cdot \epsilon_{post-target} \cdot p(t) \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad 2.4$$

in cui $p(t)$ è la *funzione di rilascio* e rappresenta la probabilità che un atomo generato all'istante $t=0$ sia rilasciato dalla sorgente di ionizzazione ed $e^{-\lambda \cdot t}$ il contributo di decadimento per gli isotopi radioattivi, con λ *costante di decadimento* (si ricorda la relazione col tempo di dimezzamento $\lambda = \ln 2 / \tau$).

$p(t)$ è il termine legato ai processi di diffusione ed effusione ed in letteratura sono presenti approcci per descriverlo correttamente nel dettaglio [16] [17] [18]. Sotto opportune condizioni [19], la probabilità $p(t)$ è data dalla convoluzione delle probabilità di diffusione e di effusione:

$$p(t) = \int_0^t p_D(\tau) \cdot p_E(t - \tau) \quad 2.5$$

in cui si suppone che le particelle diffondono dentro al materiale target in un intervallo temporale da 0 a τ ed effondono nell'ambiente circostante in un intervallo che va da τ a t .

Come già anticipato, l'efficienza di rilascio degli isotopi da parte del materiale target dipende dalle caratteristiche del materiale stesso, dalla sua microstruttura e dai parametri dell'intero sistema. In particolare, l'efficienza di rilascio aumenta [19]:

- riducendo la dimensione della granulometria del materiale target;
- lavorando alla più elevata temperatura possibile;
- scegliendo un materiale avente una bassa densità;
- scegliendo un materiale dotato di una bassa entalpia di assorbimento;
- riducendo il numero delle collisioni progettando accuratamente tutto il sistema;
- scegliendo un materiale con sufficiente densità di nuclei target;
- scegliendo un materiale dotato di elevata emissività;
- massimizzando la produzione all'interno del target selezionando un materiale la cui interazione tra i propri nuclei ed il fascio primario abbia un'elevata sezione trasversale per quella reazione desiderata;
- evitando la presenza di impurità aventi massa simile ai nuclei target, in quanto potrebbero avere un'elevata potenza frenante del fascio senza contribuire al rilascio degli isotopi interessati.

La scelta della dimensione ottimale del grano è strettamente correlata al processo di sinterizzazione, il quale può causare crescita del grano e riduzione della dimensione delle porosità. Questi due fenomeni hanno l'effetto di diminuire il processo di diffusione e quindi l'efficienza di rilascio, rallentando perciò l'intero processo: per questa ragione, le dimensioni iniziali del grano hanno un effetto marcato sulla sinterizzazione, quindi polveri di dimensioni sub-micrometriche non sono mai utilizzate per la produzione di target.

Per velocizzare la diffusione degli isotopi all'interno del target, la temperatura deve essere mantenuta la più alta possibile: per ogni materiale target, utilizzato in alto vuoto, la temperatura limite superiore non è semplicemente determinata dalla temperatura di fusione, ma più comunemente in termini della pressione di vapore. Un materiale con elevata pressione di vapore alla temperatura d'esercizio può avere un effetto negativo sul funzionamento della sorgente di ionizzazione a causa della presenza di specie non desiderate nel volume di ionizzazione; inoltre, il materiale del target è a contatto con altri, provocando dissociazioni termiche e reazioni chimiche che limitano la temperatura massima del target a causa la formazione di specie volatili.

Le proprietà termiche e fisico-chimiche di un materiale sono fondamentali per comprendere la sua usabilità come target a veloce rilascio; è particolarmente importante il paragone tra queste proprietà e quelle degli isotopi generati: dovrebbero essere idealmente molto differenti, con lo scopo di limitare l'interazione isotopo-superficie e l'assorbimento durante il processo di rilascio. La proprietà termiche da prendere in considerazione sono l'emissività e la conducibilità, in quanto determinano la capacità del target di dissipare la potenza depositata dal fascio primario e dal sistema di riscaldamento utilizzato per mantenerlo alle alte temperature. Figura 2.9 mette in evidenza l'influenza della temperatura del target sul rilascio.

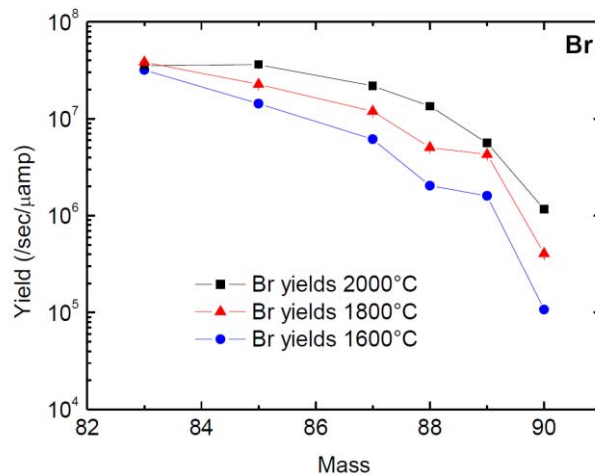


Figura 2.9: l'importanza della temperatura nella produzione di isotopi: yields di isotopi di bromo ottenuti bombardando un carburo di uranio con protoni, mantenendo la temperatura del target a tre diversi valori.

La densità di un materiale per la produzione di target rappresenta una proprietà fondamentale: una bassa densità comporta un miglior rilascio degli isotopi prodotti durante la fissione. Ciò è direttamente collegato alla presenza di porosità, le quali consentono la rapida fuoriuscita dell'isotopo dal materiale fissile, requisito fondamentale specialmente per quanto riguarda i materiali a breve emivita, i quali, nel caso di materiale ad elevata densità, finirebbero per decadere all'interno del target, senza poter essere successivamente estratti, ionizzati ed inviati alle sale sperimentali. Inoltre, non solo la quantità delle porosità è importante, ma anche come le porosità sono distribuite all'interno del materiale: uno studio accurato su dei target di CaO al CERN [20], ha dimostrato come un accurato posizionamento delle porosità, lavorando sulla nanostruttura del materiale, porti incrementi di ordine di grandezza in rilascio.

In Figura 2.10 sono illustrati i diversi percorsi che un isotopo radioattivo può seguire all'interno del disco target: è evidente che la migliore condizione è quella in cui esso segua il canale generato da porosità interconnesse, permettendo il rapido raggiungimento della superficie esterna del target.

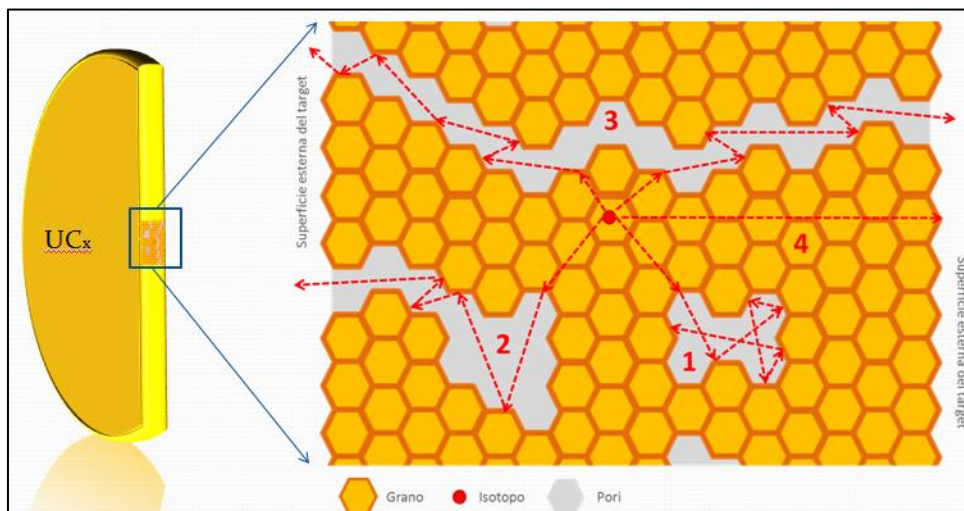


Figura 2.10: rilascio di un isotopo all'interno del materiale target (UCx): le frecce indicano le quattro possibili strade che un isotopo può seguire per fuoriuscire dal carburo di uranio.

2.3 Materiali per target ISOL

Come menzionato precedentemente, la scelta del materiale adeguato per la costruzione di un target ISOL è strettamente correlata al tipo di processo che avviene all'interazione con il fascio primario.

Nel caso della produzione di isotopi neutron-rich, esiste un singolo materiale che può fornire lo spettro desiderato di isotopi; d'altro canto, per la produzione di isotopi proton-rich, la maggior parte delle volte un singolo target può produrre uno spettro limitato di specie. Nel seguente paragrafo si vuole fornire una veloce panoramica delle classi di materiali che possono essere utilizzati come target.

Materiali per target ISOL - Ossidi

I target di ossido sono solitamente costituiti da polveri sinterizzate, fibre o film depositati su substrati permeabili [21]. Per il loro utilizzo, bisogna prestare particolare attenzione alle loro interazioni con altri componenti del target (che sono solitamente costituiti di grafite e tantalio), limitando le superfici di contatto in quanto possono avvenire alcune tipologie di reazioni. Per questa ragione, quando si utilizzano ossidi, si impiegano rivestimenti di tungsteno o renio sulle parti in tantalio. Per esempio, la temperatura massima d'esercizio dell'allumina (Al_2O_3) alla pressione di circa $2.5 \cdot 10^{-4}$ bar è 1900 °C e questa si mantiene se in contatto con del tungsteno, ma se entra in contatto con del tantalio, la temperatura cala a circa 1630 °C. Il calo è ancora più evidente se il target di allumina è posto a contatto con la grafite, raggiungendo temperature massime di operatività di circa 1060 °C. Come regola generale, ossidi metallici non possono essere messi a contatto con grafite ad alte temperature a causa delle reazioni di ossidoriduzione che portano alla formazione di metalli puri o di carburi di metalli, rilasciando elevati quantità di CO. Gli ossidi più comuni utilizzati per target ISOL sono HfO_2 , ZrO_2 , Al_2O_3 , CaO e MgO [22]. Questi sono maggiormente utilizzati per la produzione di isotopi proton-rich come Ar o F.

Rispetto ai carburi, gli ossidi possono essere prodotti con un elevato grado di purezza e garantiscono un breve tempo di ritardo tra il bombardamento del fascio primario ed il massimo rilascio. Comunque, il rilascio delle specie è più lento rispetto ai carburi, quindi non ha effetti negativi sugli isotopi a breve emivita

Materiali per target ISOL - Boruri

In passato sono stati fatti numerosi tentativi di produzione di target ISOL mediante l'utilizzo di boruri, ma la maggior parte dei refrattari prodotti hanno mostrato elevati tempi di rilascio. In alcuni casi, come per il CaB_6 [22], il rilascio è veloce, ma la quantità di impurità contenute nel materiale è troppo elevata, causa di malfunzionamenti della sorgente di ioni.

Materiali per target ISOL - Solfiti

Solo alcuni solfiti sono sufficientemente refrattari per essere utilizzati come target ISOL. In particolare, il CeS è stato utilizzato per la produzione di isotopi proton-rich come ^{33}Cl e ^{29}P , molto utilizzati in esperimenti di astrofisica, ma presenta una limitata temperatura di esercizio quando a contatto con la grafite (1800 °C).

Materiali per target ISOL - Metalli puri

I metalli sono stati utilizzati in modo estensivo per la produzione di target ISOL, specialmente per il processo di spallazione, sia formati da sinterizzazione di polveri, sia sotto forma di film sottili.

I metalli più utilizzati appartengono ai gruppi 4 e 5 della tavola periodica, in quanto posseggono temperature limite d'esercizio molto elevate e garantiscono un rapido rilascio degli isotopi. Particolarmente interessante è il caso del target RIST, sviluppato e testato ad ISOLDE, costituito da 3600 dischi di tantalio dallo spessore di 25 μm , con un foro al centro; questa tipologia di target ha mostrato di possedere una buona efficienza di rilascio per gli isotopi a breve emivita. [23]

Sono stati anche testati target di metalli liquidi a HRIBF [24]: in particolare, è stata ultimata la produzione di isotopi di gallio e di arsenico utilizzando germanio liquido, mentre isotopi di rame sono stati ottenuti a partire da nickel liquido. Questi tipi di target offrono una velocità di diffusione che risulta essere ordini di grandezza maggiore rispetto a quelle presenti in target solidi, ma la progettazione e la gestione di metalli liquidi richiede particolari attenzioni. Infatti, tali materiali non saranno utilizzati nel progetto SPES per motivi di sicurezza, a causa dell'aumento del rischio di contaminazione.

Materiali per target ISOL - Carburi

Sin dagli anni '70, la ricerca sui materiali per target ISOL si è focalizzata sui carburi e numerosi test hanno dimostrato la loro capacità di rapido rilascio degli isotopi a breve emivita [25]. Oggigiorno, i carburi di uranio sono i target più utilizzati nelle facility di tipo ISOL, in quanto combinano un vasto spettro di isotopi prodotti dalla fissione dell'uranio alle eccellenti proprietà termiche che permettono l'uso in condizioni estreme per

ottimizzare la diffusione degli isotopi. Per ottenere un rilascio più rapido, spesso il materiale consiste in una dispersione di carburo in una matrice in eccesso di carbonio.

Un maggiore approfondimento su tale famiglia di materiali è fornito nei paragrafi successivi.

2.3.1 Carburo di uranio

Il carburo di uranio è uno dei materiali fissili più utilizzati e trova impiego nei più svariati settori della tecnologia moderna. Di seguito vengono descritte le sue principali caratteristiche.

Il monocarburo di uranio (UC) possiede una struttura cubica a facce centrate, con a_0 pari a 4.96 Å; questa è la fase più stabile da temperatura ambiente fino a 2500 °C. Le sue proprietà sono state studiate approfonditamente a causa del suo impiego come combustibile nucleare grazie alle sue proprietà, come l'elevata densità dell'uranio, alto punto di fusione e conducibilità termica.

Il sesquicarburo di uranio (U_2C_3) è una struttura cubica a corpo centrato, con a_0 pari a 8.1 Å, metastabile a basse temperature in cui UC+C sono le fasi stabili. La sua finestra di stabilità va da una temperatura di approssimativamente 900 °C fino a 1820 °C, alla quale si decompone in UC ed UC_2 .

Il dicarburo di uranio (UC_2) è stabile ad alte temperature: si forma a circa 1480 °C e fonde a circa 2430 °C. In questo range di esistenza, si osservano due differenti tipologie di UC_2 : la forma cubica ad alta temperatura (β - UC_2) e la forma tetragonale a bassa temperatura (α - UC_2).

In Tabella 2.1 sono riassunte alcune proprietà dei tre carburi di uranio illustrati precedentemente.

	UC	U_2C_3	UC_2
Densità teorica [g/cm ³]	13.63	12.70	11.28
Densità dell'uranio [g/cm ³]	12.97	11.81	10.25
Temperatura di fusione [°C]	2507	1820	2427
Struttura cristallina	CFC	CCC	β : CFC α : tetragonale
Costante di reticolo	$a_0=4.96$ Å	$a_0=8.10$ Å	β : $a_0=5.49$ Å α : $a_0=4.96$ Å; $c=5.99$ Å

Tabella 2.1: proprietà di tre tipologie di carburo di uranio.

Le proprietà termiche sono molto importanti per determinare il comportamento del target in carburo di uranio durante l'esercizio. Di seguito sono riportate alcune proprietà di particolare interesse:

- **Conducibilità termica.** In letteratura sono disponibili molti dati relativi alla conducibilità termica di diversi carburi di uranio. Il più importante contributo nel campo della ricerca è da attribuire a R. De Coninck, il quale ha ottenuto i valori di conducibilità termica per il monocarburo, il sesquicarburo ed il dicarburo, eseguendo anche misure di diffusività termica con la tecnica laser-flash [26]. Più recentemente, sono state fatte ulteriori misurazioni di conducibilità termica nel campo della ricerca della facility ISOL [27]. In Tabella 2.2 sono riportate la diffusività termica e la conducibilità di tre carburi di uranio accanto alla temperatura alla quale sono state ottenute.

	Diffusività termica [m ² /s]	Conducibilità termica [W/m·K]
UC	$5.7 \cdot 10^{-6} \div 6.1 \cdot 10^{-6}$ (1000÷2000 °C)	20÷25 (1000÷2200 °C)
UC_2	$3.8 \cdot 10^{-6}$ (600÷2060 °C)	13÷20 (600÷2060 °C), $\rho=99.5\%$ 5÷8 (1500÷1880 °C), $\rho=44\%$
U_2C_3	$3.2 \cdot 10^{-6}$ (790÷1790 °C)	11÷16 (790÷1790 °C)

Tabella 2.2: diffusività e conducibilità termica per tre tipologie di carburi di uranio. Per l' UC_2 la conducibilità termica è riportata distinguendo i valori di densità (espressa in percentuale della densità teorica).

- *Coefficiente di dilatazione termica.* In letteratura [28], [29] sono presenti alcune misure sul coefficiente di dilatazione termica delle varie tipologie di carburo di uranio; in Tabella 2.3 sono presenti i valori medi.

	Coefficiente di dilatazione termica [$^{\circ}\text{C}^{-1}$]
UC	$1.2 \cdot 10^{-5}$ (20÷1000 $^{\circ}\text{C}$)
UC ₂	β : $2.5 \cdot 10^{-5}$ (1765÷2300 $^{\circ}\text{C}$) α : $1.8 \cdot 10^{-5}$ (1000÷1765 $^{\circ}\text{C}$)
U ₂ C ₃	$1.2 \cdot 10^{-5}$ (20÷1700 $^{\circ}\text{C}$)

Tabella 2.3: valore medio del coefficiente di dilatazione termica per tre tipologie di carburo di uranio.

- *Pressione di vapore.* Si ricorda che la pressione di vapore di una sostanza è la pressione esercitata dal vapore della sostanza sulla fase condensata della stessa sostanza quando tali fasi sono in condizioni di vapore saturo; dal punto di vista fisico, la pressione di vapore può essere interpretata come il risultato della tendenza di una particolare sostanza a passare dalla fase condensata alla fase gassosa. Questa proprietà è estremamente importante per la determinazione della possibilità di usare il target in un ambiente di alto vuoto. Figura 2.11 mostra la pressione di vapore dell'uranio in funzione di diverse composizioni del carburo di uranio.

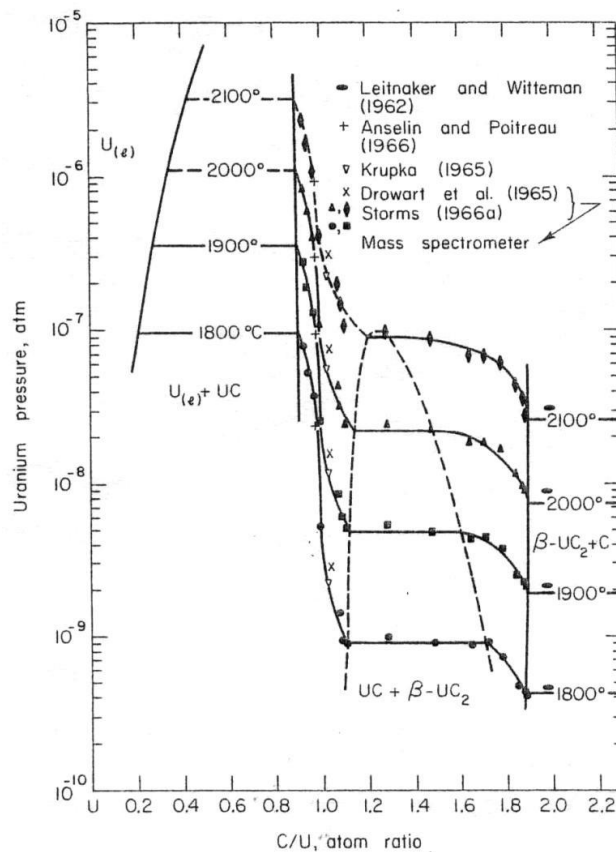


Figura 2.11: pressione di vapore dell'uranio in funzione di diverse composizioni del relativo carburo.

Anche la reattività chimica dei carburi deve essere presa in considerazione: sebbene questi materiali siano utilizzati all'interno di camere in alto vuoto, sono preparati in ambienti in cui è difficile ottenere la perfetta

assenza di ossigeno e azoto. La presenza di queste impurità nel carburo di uranio può deformare la geometria della cella elementare, ma può avere anche un effetto stabilizzante a temperatura ambiente. Per approfondire questa tematica, si rimanda ai testi dedicati [19].

Il carburo di uranio che verrà utilizzato nella facility SPES verrà prodotto partendo da diossido di uranio, UO_2 , e grafite; la polvere di UO_2 (granulometria media $<300 \mu m$) sarà comprata dall'azienda CERAC Inc. e la grafite (dimensione della polvere $<45 \mu m$) dalla Sigma-Aldrich. Entrambe le polveri saranno utilizzate come ricevute, sotto un'atmosfera inerte garantita dalla *glove box* rappresentata in Figura 2.12. Le polveri saranno manualmente mescolate in un mortaio di agata, in accordo con la stechiometria della seguente reazione:



La quantità UC_x è definita dalla seguente relazione:

$$UC_x = UC_2 + 2C + \text{quantità minori di UC} \quad 2.6$$

Dopo un'accurata pressatura ed un adeguato trattamento termico, si otterranno i dischi target desiderati (per approfondimenti, vedere i testi dedicati [19])



Figura 2.12: glove box utilizzata per lavorare ed immagazzinare i composti di uranio.

In passato sono stati effettuati alcuni test con questa tipologia di carburo di uranio presso la facility HRIBF degli Oak Ridge National Laboratory (ORNL) [19]. I dischi, di circa 12.50 mm di diametro, sono stati irraggiati con un fascio di protoni di 50 nA e 40 MeV, mantenendo la temperatura del target a 2000 °C; gli isotopi ottenuti sono riportati in Figura 2.13.

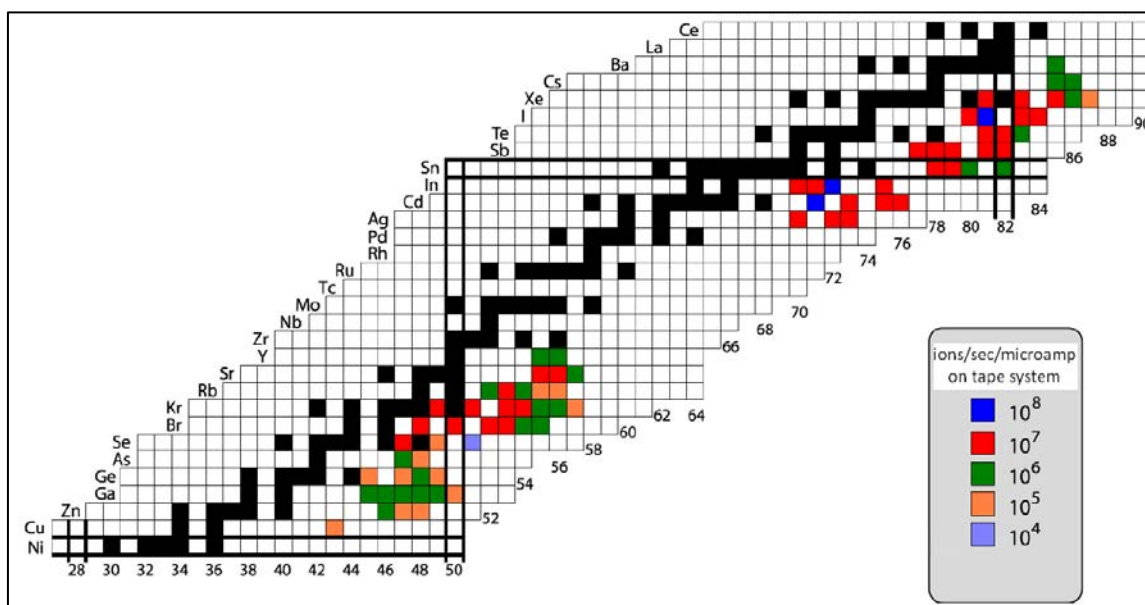


Figura 2.13: isotopi radioattivi ottenuti con il target in UC_x presso i Laboratori Nazionali di Oak Ridge.

Lo spettro degli isotopi ottenibili ed estraibili si suddivide in due zone: una regione a bassa massa (dal Ni all'Y) ed una regione a massa elevata (dall'Ag al La), in quanto i metalli intermedi, nella zona dal Zr al Pd sono troppo refrattari per essere estratti dal target. È importante sottolineare che questi test hanno portato alla conferma che la geometria totalmente innovativa del target SPES è in grado di produrre e rilasciare rapidamente i prodotti di fissione.



Figura 2.14: i 7 dischi in carburo di uranio all'interno di un primo prototipo di graphite box dopo il test online agli ORNL.

2.3.2 Carburo di silicio

Il carburo di silicio, chiamato anche *carborundum*, è un materiale composto da silicio e carbonio legati insieme a formare un materiale ceramico. Viene ottenuto generalmente per sintesi, ma esiste anche in natura sotto forma del rarissimo materiale *moissanite*. Il materiale è stato prodotto per la prima volta nel 1893 dallo statunitense Edward Goodrich Acheson, con lo scopo di utilizzare il SiC come abrasivo in applicazioni industriali.

Oggi, il carburo di silicio trova impiego nei più svariati campi della tecnologia: è un intrinseco semiconduttore, pertanto trova largo utilizzo nell'industria elettronica, un materiale strutturale, infatti viene impiegato per la costruzione di turbine a gas, un ottimo abrasivo grazie alla sua notevole durezza, infatti fa parte dei materiali utilizzati per la costruzione di utensili da taglio. Inoltre, trova numerose applicazioni nel settore nucleare, grazie alla sua elevata resistenza in ambienti ostili (per acidità e temperatura), automobilistico e nell'industria in generale.

Il carburo di silicio esiste in oltre 250 forme cristalline [30]. Il polimorfismo del SiC è caratterizzato da un'ampia famiglia di strutture cristalline simili denominate *politipi*: queste rappresentano variazioni dello stesso composto chimico, identico in due dimensioni e differente nella terza; pertanto possono essere visti come strati impilati l'uno sull'altro.

Il carburo di silicio nella forma α (α -SiC) è la versione più comune: essa è formata a temperature maggiori di 1700 °C ed ha una struttura cristallina esagonale; la forma β si forma a temperature inferiori di 1700 °C ed ha una struttura cristallina cubica (Figura 2.15).

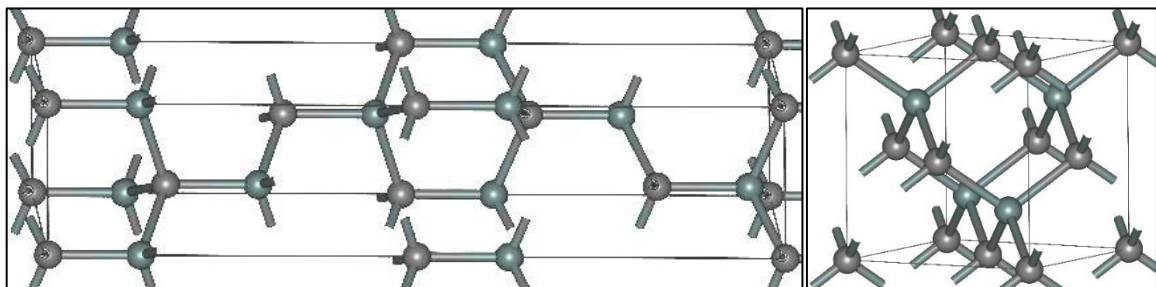


Figura 2.15: rappresentazione della struttura cristallina del carburo di silicio tipo alfa (sinistra) e di tipo beta (destra).

I candidati iniziali per la produzione dei dischi target per il progetto SPES sono tre diversi carburi di silicio, tutti nella forma cristallina alfa e tutti prodotti dalla compagnia francese Saint-Gobain. Questi SiC, denominati sotto il marchio registrato Hexoloy[®], sono carburi di silicio in forma alfa sinterizzati a partire da polveri: questo processo lega le polveri creando un materiale autolegante dotato di estrema durezza e leggerezza.

I tre carburi di silicio inizialmente presi in considerazione sono:

- Hexoloy[®] SiC SA. È un carburo di silicio sinterizzato in forma alfa e con una densità maggiore del 98%. È dotato di una struttura granulare molto fine (4-10 μm) che gli conferisce eccezionali doti di resistenza all'abrasione; inoltre, non contiene silicio libero, il quale lo rende eccezionalmente resistente da attacchi chimici sia in ambienti ossidanti, sia in ambienti riducenti [31];
- Hexoloy[®] SiC SE. È un carburo di silicio che offre un'eccellente alternativa ai metalli, superleghe o altri ceramici per applicazioni nella chimica di processo, forni ad elevata temperatura e numerosi altri impieghi in cui gli ambienti d'esercizio sono particolarmente severi. Il carburo di silicio Hexoloy SE è caratterizzato da un'ampia gamma di proprietà eccezionali, tra le quali: durezza estrema, elevata resistenza meccanica, resistenza alla corrosione, stabilità alle alte temperature ed alta conducibilità termica. Questo carburo di silicio è prodotto da sinterizzazione di polveri submicrometriche, utilizzando un processo di estrusione proprietario. Il processo di sinterizzazione produce una granulometria fine (<10 μm), il cui risultato è un SiC con una densità del 95%, per un materiale dotato del 50% in più di durezza rispetto al carburo di tungsteno [32];
- Hexoloy[®] SiC SP. È un carburo di silicio in forma alfa progettato appositamente per ottenere ottime performance in applicazioni in cui sono coinvolti i contatti striscianti, come guarnizioni e cuscinetti. Questo materiale incrementa le già ottime performance lubrificanti del carburo di silicio SA attraverso l'aggiunta di porosità sferiche; questi pori sono separati, non interconnessi e regolarmente dispersi nella matrice in tutto il materiale. Le porosità sferiche agiscono come un serbatoio di lubrificante che aiuta la ritenzione di un film fluido alle interfacce di superfici striscianti. Questo particolare meccanismo di lubrificazione permette al SiC SP di essere utilizzato in numerose applicazioni [33].

Le proprietà note di questi tre carburi di silicio sono riassunte in Tabella 2.4. Come si può notare, molte delle proprietà determinanti per lo studio dei dischi target non sono note, o lo sono a temperatura ambiente. Tra queste, una delle più importanti è la conducibilità termica: Saint-Gobain fornisce alcuni valori, tutti al di sotto della temperatura di 400 °C, ampiamente inferiori alla temperatura di funzionamento del target. In letteratura è disponibile un datasheet accurato del solo carburo di silicio Hexoloy[®] SiC SA [34], la cui curva di conducibilità è riportata in Figura 2.16. Per quanto riguarda le altre due tipologie di SiC, la conducibilità termica sarà stimata col *metodo della funzione ottima*, metodologia utilizzata ai Laboratori Nazionali di Legnaro.

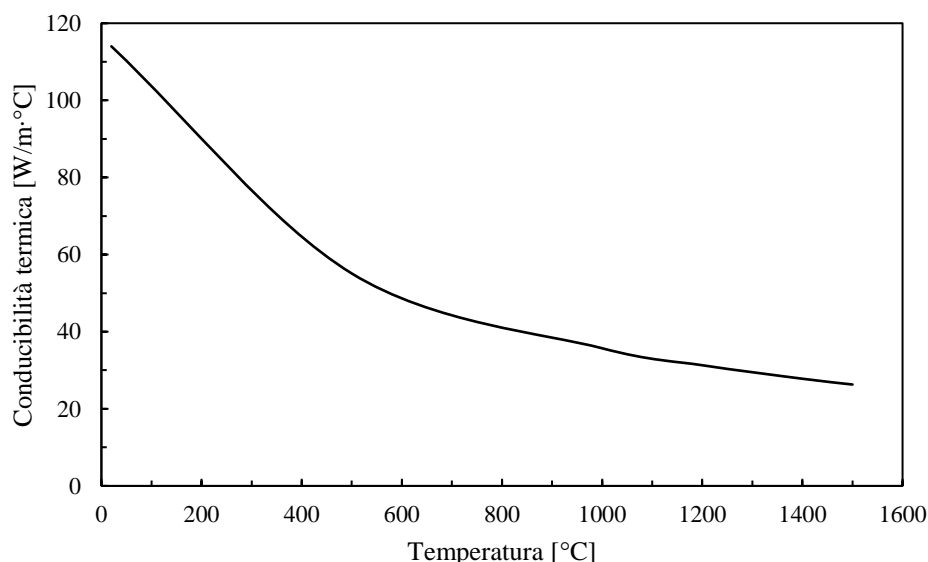


Figura 2.16: conducibilità termica del carburo di silicio Hexoloy[®] SiC SA.

	Hexoloy® SiC SA	Hexoloy® SiC SP	Hexoloy® SiC SE
Dimensione del grano [μm]	4-10	4-10	4-10
Densità [g/cm^3]	3.1	3.04	3.05
Durezza (Knoop - carico 0.1 kg) [kg/mm^2]	2800	2800	2800
Resistenza a flessione 4pt @RT [MPa]	380	240	280
Resistenza a compressione @RT [MPa]	3900	-	-
Modulo elastico @RT [GPa]	430	400	420
Modulo di Weibull	10	19	10
Coefficiente di Poisson	0.14	0.14	0.14
Resistenza alla frattura [$\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$]	4.6	4.3	4.6
Coefficiente di espansione termica da @RT a @700 °C [$10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$]	4.02	4.2	4.02
Calore specifico medio [$\text{J}/\text{g}\cdot\text{mK}$]	0.67	0.59	0.67
Conducibilità termica [$\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$]			
@RT	125.6	110	157.3
@100 °C	-	-	-
@200 °C	102.6	-	107.2
@400 °C	77.5	-	77.3
Porosità apparente [%]	<2.0%	-	5-10%
Resistività elettrica [$\text{ohm}\cdot\text{cm}$] @RT	10^2 - 10^8	-	10^2 - 10^8
@1000 °C	0.01-0.2	-	0.01-0.2

Tabella 2.4: principali proprietà dei carburi di silicio candidati per la produzione dei dischi target.

A causa del vuoto presente in letteratura relativo alla caratterizzazione dei tre materiali, si è deciso di scegliere per il target SPES quello più conosciuto [34] e di più ampio utilizzo, nonché il più alto resistenziale (secondo quanto dichiarato dall'azienda fornitrice). Pertanto, il carburo di silicio Hexoloy® SA, di utilizzo nell'aviazione, nel settore delle armi, dell'automotive e di molti altri beni di consumo, trova spazio anche nell'ambito della fisica nucleare, in cui è protagonista per la produzione dei primi isotopi esotici nel contesto del progetto SPES. Il carburo di silicio scelto risulta essere il più denso (Tabella 2.1) e ciò potrebbe risultare sfavorevole per la fuoriuscita degli isotopi dal target, rischiando di ridurre notevolmente le quantità prodotte; in realtà, come si vedrà a breve, gli isotopi d'interesse per la ricerca sono caratterizzati da tempi di dimezzamento elevati, pertanto, anche nel caso in cui la fuoriuscita sia ostacolata dalla maggiore densità del materiale, ciò non costituisce un problema in quanto le perdite di quantità sono considerate accettabili.

In Figura 2.17 è riportato lo *spettro* dei nuclidi prodotti dalla collisione di un fascio protonico con un target in carburo di silicio. Come si può notare, vengono prodotti principalmente isotopi del fosforo, del silicio, dell'alluminio, dell'azoto, del carbonio, del boro, del berilio e dell'idrogeno.

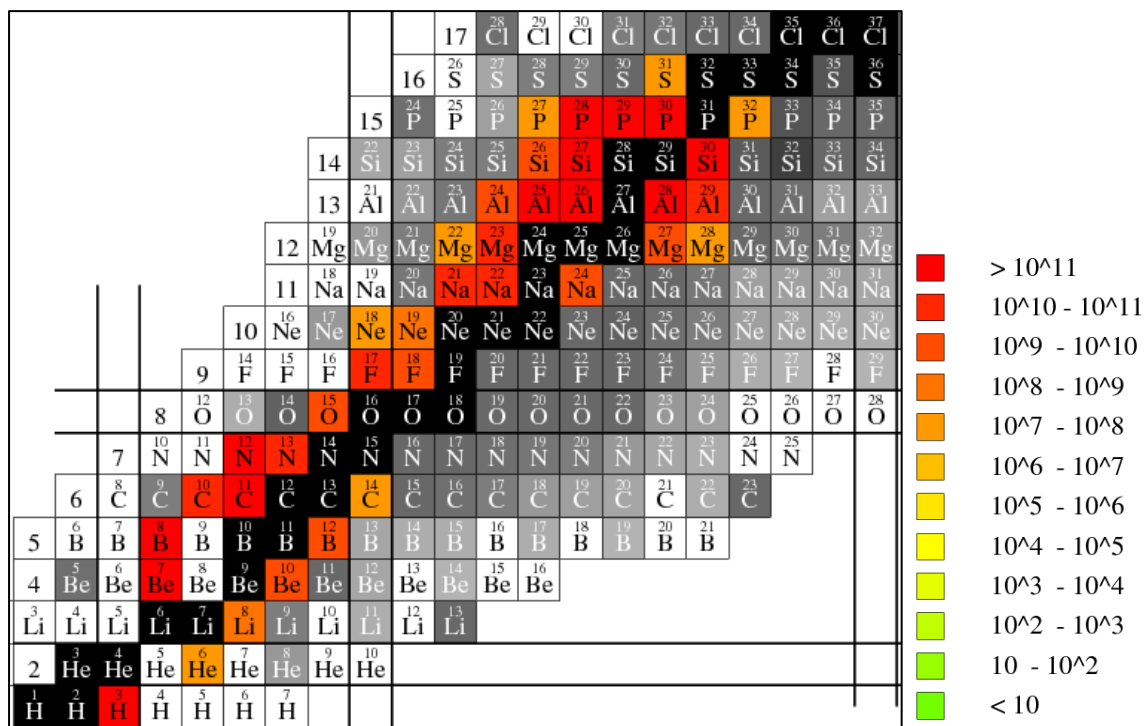


Figura 2.17: isotopi prodotti con il target in SiC (scala in nuclidi/s).

Dato questo spettro di isotopi prodotti, solamente alcuni sono estraibili dal target utilizzando la sorgente di ionizzazione superficiale. In Figura 2.18 è riportata la mappa di quanto costituisce il fascio RIB in uscita dal target: tra i principali, si evidenziano ^{26}Al , ^{21}Na , ^{22}Na , ^7Be : il primo e l'ultimo risultano essere di particolare interesse nell'ambito della ricerca in fisica nucleare ed in astrofisica.

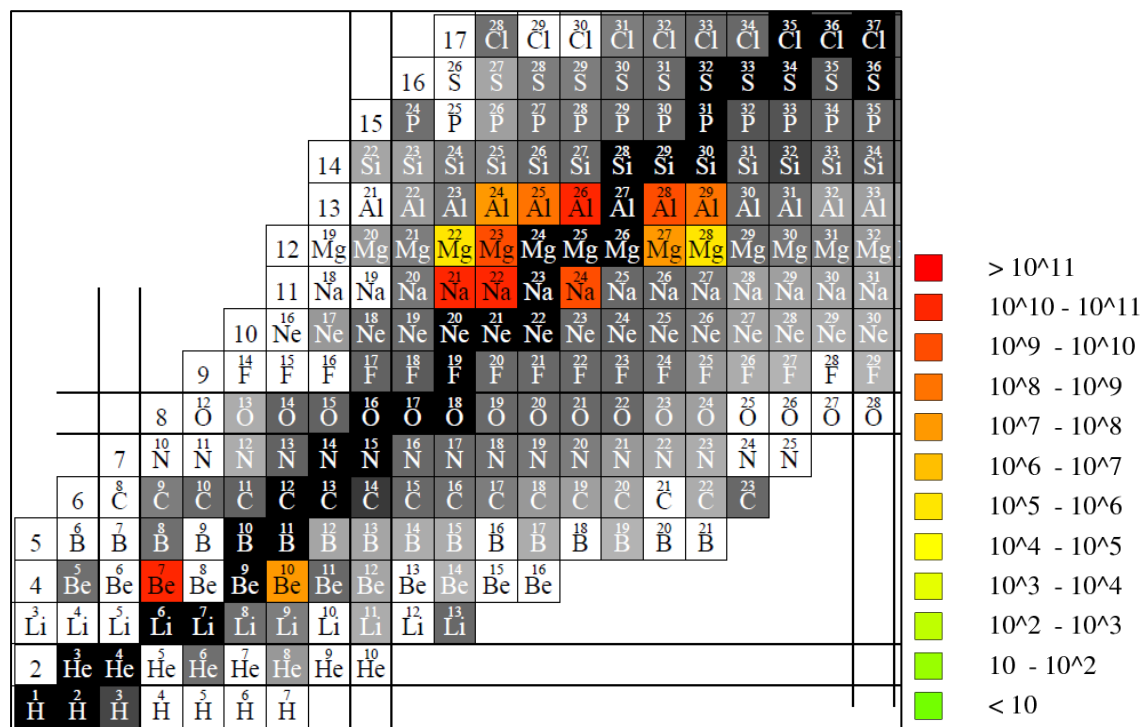


Figura 2.18: isotopi estraibili con il target in SiC (scala in nuclidi/s).

L' ^{26}Al , nella sua versione metastabile, ha un tempo di dimezzamento di circa 6 secondi, mentre il ^7Be ha un'emivita pari a 53 giorni circa. Entrambi seguono il meccanismo di decadimento denominato *electron*

capture (ϵ), molto simile al decadimento β^+ , in cui l'assorbimento di un elettrone nelle vicinanze permette la trasformazione di un protone in un neutrone, con l'emissione di un neutrino elettronico, secondo lo schema $p + e^- \rightarrow n + \nu_e$.

Come già anticipato, i tempi di decadimento degli isotopi d'interesse sono dell'ordine del secondo o del mese, pertanto la densità non risulta essere un ostacolo nell'ottenimento di elevati livelli di produzione.

2.3.3 Grafite

La grafite è un minerale che rappresenta uno degli stati allotropici del carbonio. Essa consiste in layer di atomi di carbonio disposti esagonalmente [35]: in Figura 2.19 è rappresentata la struttura a strati. All'interno di ogni strato, gli atomi sono collegati tra loro da forti legami covalenti, mentre gli strati sono tenuti reciprocamente uniti da deboli legami di van der Waals; questa tipologia di struttura conferisce alla grafite proprietà di tenerezza (grado 1 di durezza sulla scala di Mohs) ed untuosità al tatto; inoltre la sfaldabilità è elevata.

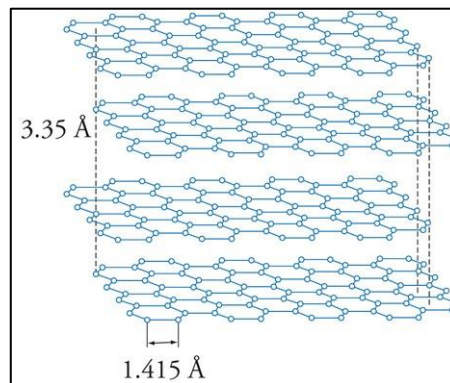


Figura 2.19: struttura a layer della grafite.

La grafite è dotata di una buona conducibilità termica ed elettrica, ma presenta delle anisotropie: all'interno dei piani queste due risultano di entità differente rispetto a quelle che avvengono in direzione ortogonale ai piani stessi.

Nel progetto SPES, la grafite assume ruoli fondamentali in più parti della linea: in particolare, è il materiale che compone la box in cui sono contenuti i dischi target ed i dischi che fungono da finestra e da dumper per il fascio protonico primario. La grafite è stata scelta, in particolare, per la sua elevata temperatura di fusione (oltre 3000 °C) e per la sua stabilità chimica nei confronti dei dischi, anche a temperature molto elevate.

La grafite scelta per la realizzazione dei componenti all'interno del progetto SPES è la grafite EDM-3® dell'azienda POCO: è una grafite isotropica, con granulometria ultrafine, che offre un'elevata resistenza meccanica in combinazione con un'elevata lavorabilità alle macchine utensili, fino a spessori molto piccoli. In Tabella 2.5 sono riassunte alcune proprietà meccaniche della grafite in questione [36]:

	Grafite POCO EDM-3®
Dimensione media particella	<5 µm
Resistenza a flessione	100 MPa
Resistenza a compressione	125 MPa
Durezza	73 Shore
Resistività elettrica	15.6 µΩ·m

Tabella 2.5: proprietà della grafite POCO EDM-3®.

In realtà, tutte le proprietà della grafite, elettriche, termiche e strutturali, sono fortemente variabili con la temperatura. In particolare, la resistività elettrica ha un andamento variabile con la temperatura, non monotono, Figura 2.20, mentre la conducibilità termica cala all'aumentare della temperatura, Figura 2.21.

Per quanto riguarda le proprietà meccaniche, in letteratura non sono presenti datasheet particolarmente accurati, ma l'azienda garantisce che la temperatura ambiente risulta essere la temperatura di lavoro più sfavorevole per questa tipologia di grafite: infatti, la resistenza a trazione, flessione e compressione aumentano all'aumentare della temperatura, fino alla massima temperatura d'esercizio garantita attorno ai 2500 °C. In Tabella 2.6 si riportano alcuni valori indicativi [36].

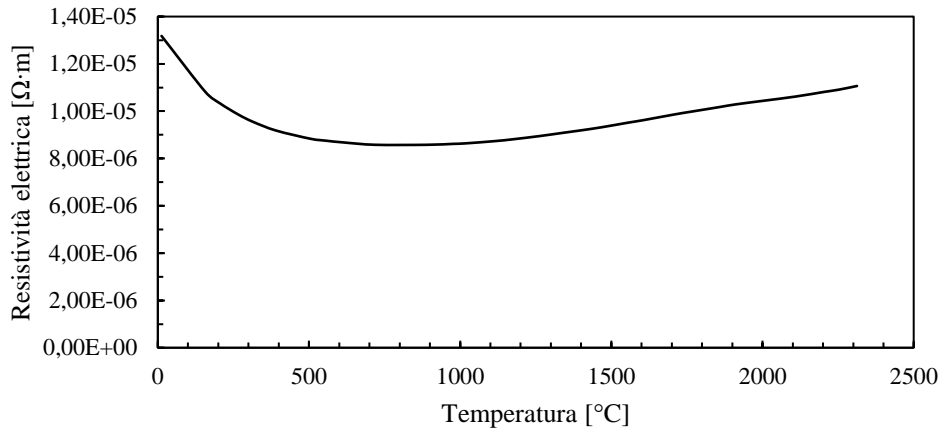


Figura 2.20: resistività elettrica della grafite POCO EDM-3® in funzione della temperatura.

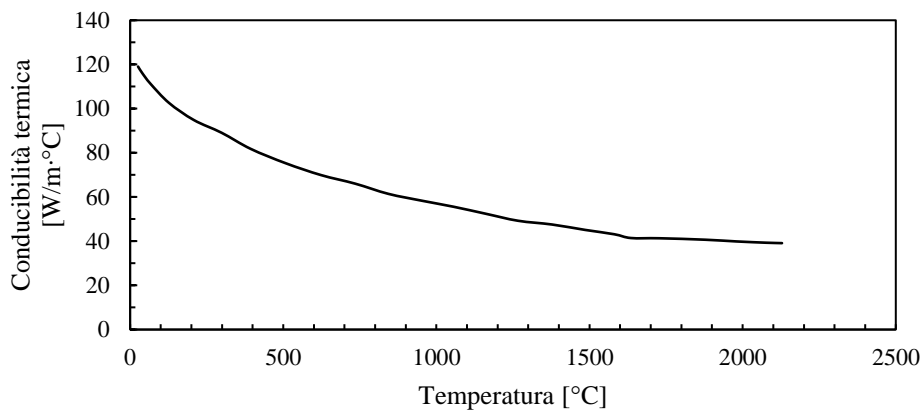


Figura 2.21: conducibilità termica della grafite POCO EDM-3® in funzione della temperatura.

	20 °C	2500 °C
Resistenza a trazione	60 MPa	130 MPa
Resistenza a flessione	100 MPa	Incremento massimo del 50%
Resistenza a compressione	125 MPa	Incremento massimo del 50%
Modulo elastico	10300 MPa	Incremento massimo del 25%
Coefficiente di Poisson	-	-

Tabella 2.6: principali proprietà meccaniche della grafite POCO EDM-3® al variare della temperatura. Come si nota, non sono disponibili indicazioni precise del comportamento ad elevate temperature.

2.4 Il problema dei gradienti termici sui dischi target

Durante il funzionamento, il fascio protonico colpisce i dischi, innalzando notevolmente il loro livello di temperatura in corrispondenza della zona centrale: il risultato è la presenza di forti gradienti termici in direzione radiale. Inoltre, la presenza del riscaldatore in tantalio, oltre ad innalzare la temperatura dell'intero sistema, compete alla riduzione di tali gradienti, non riuscendo comunque ad influenzarli sensibilmente. A titolo d'esempio, si riporta il plot di temperatura dei 7 dischi in carburo di uranio, diametro 40 mm, investiti da un fascio protonico avente energia pari a 40 MeV e corrente di 200 μA , per una potenza totale pari a 8 kW (Figura 2.22).

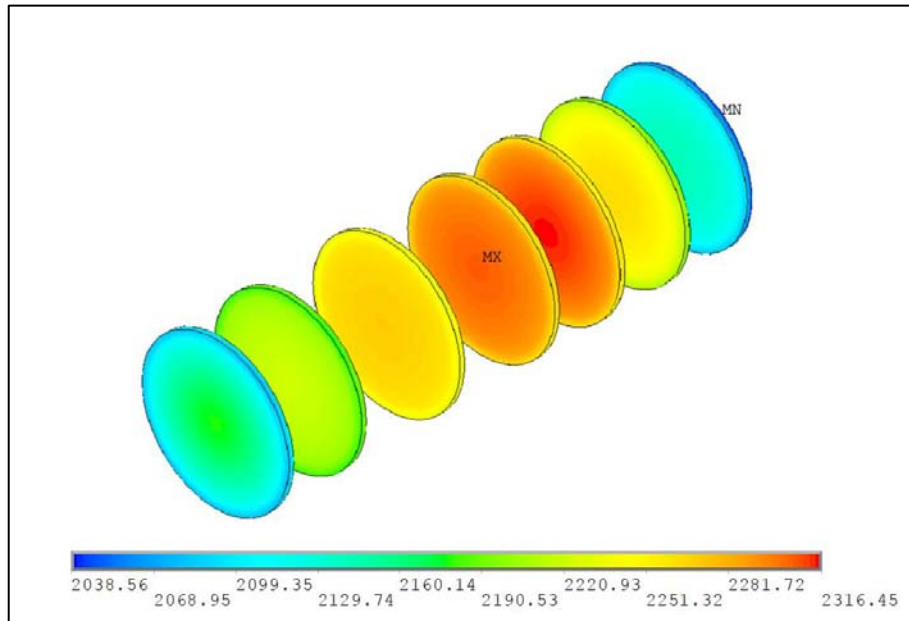


Figura 2.22: plot termico dei dischi in carburo di uranio soggetti ad un fascio protonico di 8 kW. È possibile notare la presenza di gradienti termici radiali.

Per comprendere al meglio il modo in cui il fascio interagisce con i dischi, è necessario descrivere le caratteristiche del fascio e delle modalità con le quali viene erogato. I parametri necessari alla descrizione del fascio protonico primario sono 3:

- **Energia di fascio.** Rappresenta l'energia cinetica dei protoni costituenti il fascio e si misura in MeV (si ricorda che 1 eV rappresenta l'energia guadagnata da un elettrone che si muove tra due punti sottoposti a differenza di potenziale elettrostatico di 1 V - $1 \text{ eV} = 1.602176565 \cdot 10^{-19} \text{ J}$). Più alta è l'energia, più alta è la potenza depositata sul target: nel caso di SPES, l'energia del fascio è sempre pari a 40 MeV;
- **Corrente di fascio.** Rappresenta la quantità di carica elettrica che attraversa una determinata superficie nell'unità di tempo e si misura in μA (si ricorda che 1 A equivale al passaggio, attraverso la data superficie, di 1 C in 1 s). Più alta è la corrente, più alta è la potenza depositata sul target: nel caso di SPES, la corrente di fascio varia da 20 μA per il target di *bassa potenza* (800 W) a 200 μA per il target di *alta potenza* (8000 W);
- **Sigma di fascio.** Rappresenta la dispersione dei protoni nel piano dei dischi e si misura in mm. In particolare, facendo riferimento a Figura 2.23 si suppone che il fascio sia rappresentabile attraverso uno spot di dimensioni finite e che la distribuzione di protoni sia gaussiana. La σ rappresenta la dimensione all'interno della quale è racchiuso il 34% dei protoni del fascio; pertanto, all'aumentare di questo parametro, diminuisce la concentrazione del fascio primario. Per il progetto SPES, la σ di fascio è pari a 5 mm per il target da 13 mm e da 7 mm per il target da 40 mm.

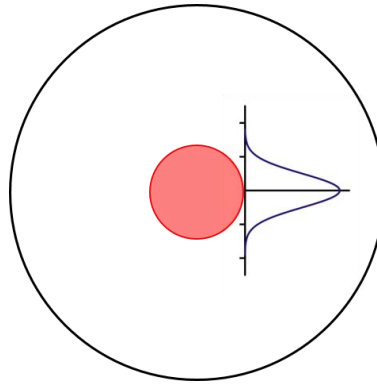


Figura 2.23: rappresentazione della distribuzione del fascio di protoni sul piano del disco target.

Quando i protoni del fascio colpiscono il target, rilasciano la loro energia cinetica sugli atomi del materiale costituente il bersaglio: questa energia depositata può essere pensata come una generazione interna di potenza che avviene nei dischi e dipende dall'energia del fascio e dalla sua composizione. Esistono diversi codici in grado di calcolare, attraverso il metodo di Monte Carlo, la deposizione di potenza sul target al variare dei tre parametri precedentemente menzionati: in Figura 2.24 sono riportati i risultati della deposizione sui 7 dischi effettuata utilizzando tre diversi codici di calcolo [37].

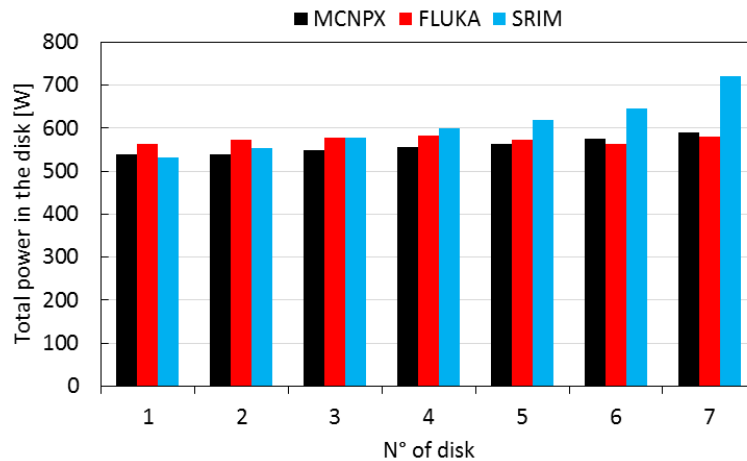


Figura 2.24: potenza totale rilasciata su ognuno dei 7 dischi target calcolata mediante l'utilizzo di tre diversi codici Monte Carlo.

Un ulteriore aspetto da tenere in considerazione è il *wobbling* (Figura 2.25) sul target di alta potenza, in cui un fascio di 8 kW investe i dischi target, agisce un particolare sistema, denominato *wobbler* e posizionato tra il front-end ed il ciclotrone, in grado di far muovere il fascio su una circonferenza (raggio 11 mm) con una certa frequenza (100 Hz), in modo che l'area di intersezione tra il fascio ed il target vari nel tempo. Questa modalità di interazione fascio-target permette di diminuire di circa il 50% il picco di potenza depositata al centro del target, con conseguente diminuzione dei gradienti termici radiali e degli stress termici associati [37].

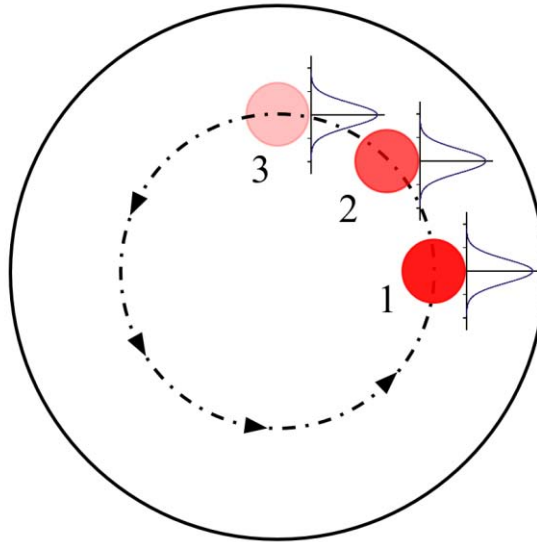


Figura 2.25: rappresentazione del wobbling del fascio protonico. La numerazione indica la successione delle posizioni occupate dal fascio.

A valle di queste considerazioni, si deduce che uno degli aspetti da tenere in considerazione nella scelta del materiale adatto alla produzione di un target ISOL è la sua resistenza ai gradienti termici. Ciò si traduce in proprietà ben precise del materiale:

- elevati valori di *conducibilità termica*. La conduzione è la modalità di scambio termico che determina la distribuzione di temperatura sul disco, pertanto, più alta è la conducibilità termica del materiale costituente i dischi target, minore è l'entità del gradiente termico;
- bassi valori del *coefficiente di dilatazione termica*. Qualunque materiale, sottoposto ad una variazione di temperatura, subisce una deformazione secondo l'equazione

$$\frac{\Delta L}{L_0} = \varepsilon = \alpha \cdot \Delta T \quad 2.7$$

in cui ε rappresenta la deformazione, ovvero la variazione di lunghezza ΔL rapportata alla lunghezza iniziale L_0 , α il coefficiente di dilatazione termica e ΔT la variazione di temperatura rispetto alla temperatura in cui si registra la lunghezza iniziale L_0 . Ora, se si suppone che il disco sia sottoposto a gradienti termici, dalla 2.7 è evidente che la zona del disco a temperatura maggiore tende a dilatare di più rispetto a quella a temperatura inferiore, provocando quindi delle dilatazioni differenziali che inducono pericolosi stati di tensione. Inoltre, in generale, il coefficiente di dilatazione α è variabile con la temperatura, pertanto se quest'ultimo cresce all'aumentare della temperatura, il fenomeno delle dilatazioni differenziali risulta accentuato. Se α fosse nullo, il materiale risulterebbe insensibile alle dilatazioni provocate da differenze di temperatura;

- basso valore del *modulo elastico*. Il modulo elastico è la costante, caratteristica del materiale, che ha la funzione di *convertire* le dilatazioni in tensioni. Nel caso di deformazione puramente monoassiale, l'equazione che regola tale principio fisico è

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad 2.8$$

in cui σ rappresenta la tensione, E il modulo elastico ed ε la dilatazione termica. Dalla 2.8 si ricava immediatamente che minore è il valore del modulo elastico, minore è il valore della tensione associata alla dilatazione termica;

- elevati valori della *tensione di rottura*. Sopra è appena stata definita la tensione associata ad una dilatazione termica: tale tensione è da confrontare con la tensione che porta a rottura il materiale (σ_R). Se risulta verificato che

$$\sigma < \sigma_R \quad 2.9$$

allora il materiale che costituisce il target non giunge a rottura. È deducibile, quindi, che un'elevata tensione di rottura conferisce al materiale un'alta resistenza ai gradienti termici.

2.5 Conclusioni

Nel corso di questo capitolo è stata descritta nel dettaglio l'area di produzione SPES: essa rappresenta il cuore dell'intera facility ed il suo ottimale funzionamento è fondamentale per la generazione di fasci di ioni radioattivi di elevata intensità e purezza. Per garantire elevati rendimenti di produzione, nel corso degli anni è stata effettuata un'intensa attività di progettazione, che, come punto cardine, prevedere la conoscenza delle proprietà termiche, meccaniche e microstrutturali dei materiali costituenti il target. Tra queste, la conducibilità termica gioca un ruolo fondamentale, in quanto determina la distribuzione di temperatura sui dischi e, conseguentemente, l'entità dei gradienti termici dovuti all'impatto con il fascio protonico. In letteratura non sono presenti curve di conducibilità complete per i materiali costituenti i dischi target, quindi si rende necessario l'utilizzo di un metodo per la stima di tale proprietà. Per raggiungere questo obiettivo, è indispensabile l'utilizzo degli apparati sperimentali e numerici disponibili presso i Laboratori Nazionali di Legnaro dell'INFN; inoltre, dopo aver ricavato la conducibilità termica dei materiali d'interesse, è necessario effettuare dei test a rottura per determinare il livello di resistenza ai gradienti termici.

CAPITOLO 3

Stima della conducibilità termica di materiali d'interesse per il target di produzione SPES

“È per mezzo di esperimenti fini, ragionati e seguiti, che si forza la natura per scoprirne il segreto.”

Georges Louis Lecler de Buffon

3.1 Introduzione

In Figura 3.1 è riportata la geometria semplificata del target: durante il funzionamento, i sette dischi in UC_x sono colpiti da un fascio di protoni della potenza di 8 kW in corrispondenza del loro centro, innalzando la loro temperatura fino a 2000 °C, con forti gradienti termici lungo la loro direzione radiale. I suddetti gradienti sono in grado di causare la rottura dei dischi, pertanto le tensioni di origine termo-strutturale associate devono essere opportunamente valutate.

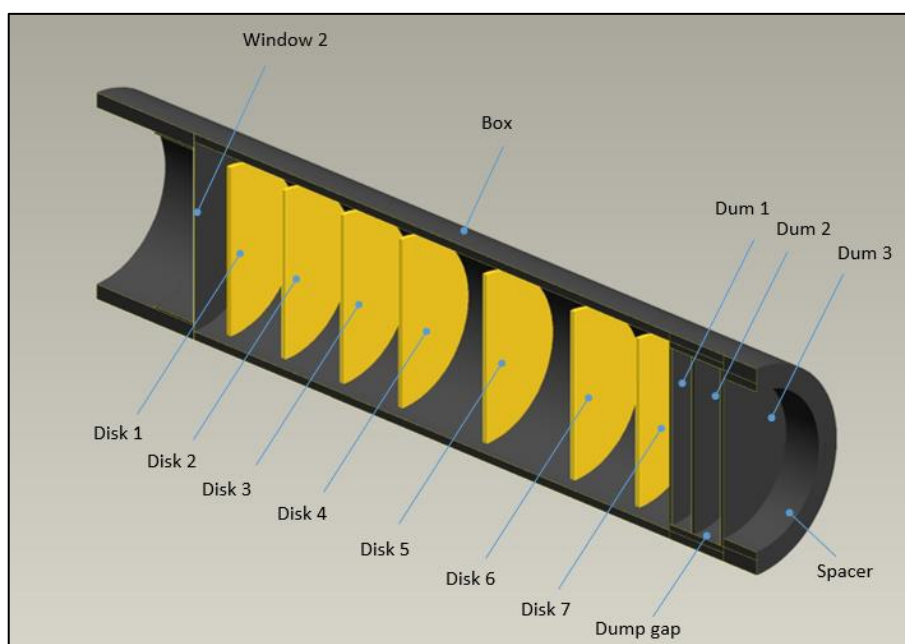


Figura 3.1: rappresentazione del target di produzione SPES.

È importante fare delle considerazioni relative alle modalità di scambio termico che hanno luogo all'interno del target:

- Conduzione: tra i dischi in carburo d'uranio ed il supporto in grafite nel quale sono contenuti, il contatto è minimo; inoltre, si può assumere che zone a contatto siano a temperature molto simili tra loro, limitando al minimo il flusso termico scambiato. Pertanto, lo scambio termico attraverso il meccanismo della conduzione può essere, con ottima approssimazione, trascurato;
- Convezione: come già anticipato, all'interno del target avvengono numerose fissioni nucleari (con una densità temporale dell'ordine di 10^9 fissioni/s) provocate dall'impatto tra i protoni provenienti dal ciclotrone ed i nuclei di uranio: gli isotopi prodotti vengono estratti dal target, ionizzati ed accelerati.

Detto ciò, è facilmente comprensibile come la presenza di altre particelle risulti di ostacolo al processo, in quanto all'interno delle sorgenti di ionizzazione le molecole d'aria entrerebbero in competizione con gli isotopi d'interesse e provocherebbero un calo d'efficienza delle sorgenti; inoltre, la presenza di ossigeno provocherebbe delle reazioni chimiche indesiderate e favorite dall'alta temperatura. Infine, la presenza di molecole d'aria provocherebbe scattering dei protoni, diminuendo il tasso di produzione. Per tutti questi motivi, il target (in generale, tutta la camera) viene posta in alto vuoto. Il livello di vuoto raggiunto è dell'ordine di 10^{-6} mbar, quindi lo scambio termico attraverso il meccanismo della convezione può essere considerato inesistente;

- Irraggiamento: questo meccanismo di scambio termico, che avviene attraverso la propagazione di onde elettromagnetiche, è l'unico modo con cui avviene trasferimento di calore.

Ciò premesso, si può dichiarare che i dischi sono in grado di dissipare energia con l'ambiente esterno solo attraverso irraggiamento. Al contrario, lo scambio termico interno a ciascun disco è governato dalla conduzione, pertanto la conducibilità termica del materiale costituente i dischi gioca un ruolo fondamentale nella distribuzione di temperatura sul disco, determinando quindi l'entità del gradiente termico che si instaura in direzione radiale. [6]

Per alcuni materiali la conducibilità termica è nota, mentre per altri non lo è; inoltre, la conducibilità termica, in generale, è funzione della temperatura, quindi è necessario valutarla fino alle temperature d'esercizio del target, per assicurare la conoscenza dell'intera mappa termica dei componenti. Per raggiungere tale scopo, durante questo lavoro di tesi è stato utilizzato l'apparato sperimentale presente ai Laboratori Nazionali di Legnaro in grado di riprodurre i gradienti termici presenti sui dischi target: tale apparato sperimentale, con l'appoggio di un software agli elementi finiti, permette la stima della conducibilità termica del materiale di cui è costituito il provino. Inoltre, permette di portare a rottura i dischi, ricavando il gradiente termico massimo che si può instaurare sui dischi necessario a garantire l'integrità del target.

3.2 L'apparato sperimentale per la riproduzione dei gradienti termici sui dischi

In Figura 3.2 è riportata una rappresentazione del dispositivo presente ai Laboratori Nazionali di Legnaro, in particolare presso il laboratorio alte temperature nel *main building*, per la riproduzione dei gradienti termici che caratterizzano il target di produzione SPES.

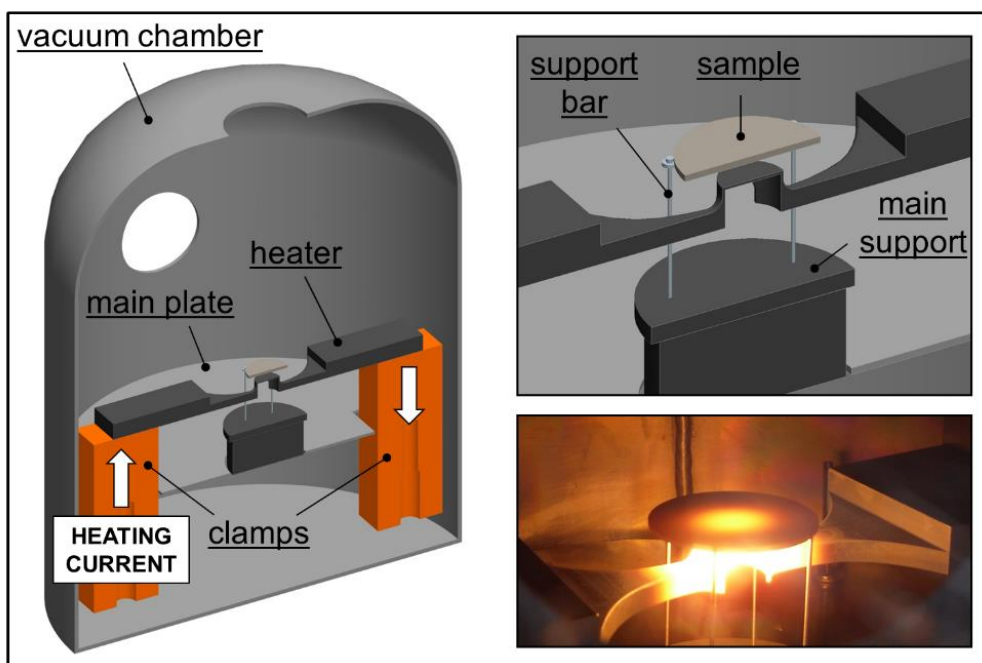


Figura 3.2: rappresentazione del dispositivo per la riproduzione dei forti gradienti termici sui dischi.

L'apparato sperimentale prevede l'utilizzo di un crogiolo (*heater*) percorso da una corrente (*heating current*) fornita da due morsetti (*clamps*); il crogiolo si riscalda per effetto Joule e, grazie alla sua particolare geometria, è in grado di generare uno spot circolare ad altissima temperatura, al di sopra del quale è posizionato il disco (*sample*) oggetto dello studio.

Lo scambio termico tra crogiolo e disco avviene per irraggiamento, in quanto entrambi sono collocati all'interno di una campana (*vacuum chamber*) nella quale viene realizzato un vuoto spinto e, per questo motivo, lo scambio termico attraverso il meccanismo della convezione può essere considerato del tutto assente. Inoltre, in Figura 3.2 è possibile notare qualitativamente la presenza di un gradiente di temperatura radiale che si forma sul disco, causa della nascita di stati di deformazione e di tensione che potrebbero portare a rottura il disco stesso.

L'apparato sperimentale è suddivisibile in più sottoassiemi, la cui perfetta interazione è necessaria per garantire il corretto funzionamento del sistema:

- Camera da vuoto: è il sottoassemblaggio che consente di isolare la zona riscaldata dall'ambiente esterno;
- Sistema riscaldatore: è il sottoassemblaggio che garantisce il corretto riscaldamento del sistema;
- Sistema di supporto: è il sottoassemblaggio che permette il corretto posizionamento del disco;
- Sistema per il vuoto: è il sottoassemblaggio che crea e mantiene il vuoto all'interno della camera;
- Strumenti di misura: è il sottoassemblaggio che garantisce il monitoraggio dei parametri di controllo del sistema.

È importante far notare che l'impostazione dell'apparato sperimentale deve essere la più accurata possibile, in modo da garantire elevati standard di qualità dei risultati ottenuti. Inoltre, è fondamentale garantire la sicurezza dell'intero sistema, ponendo quindi particolare attenzione al corretto funzionamento di ogni suo componente. Di seguito, vengono descritti nel dettaglio i sottoassiemi precedentemente elencati.

3.2.1 La camera da vuoto

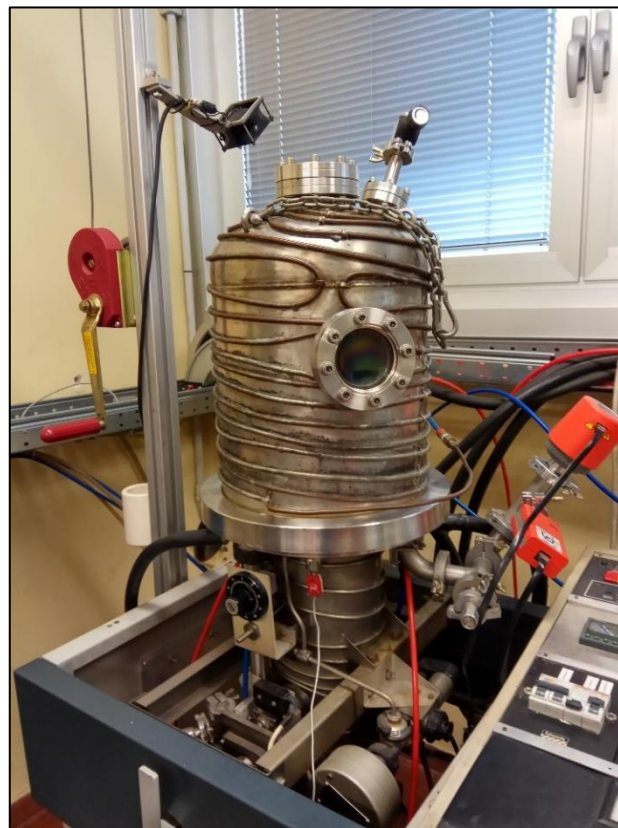


Figura 3.3: camera per il vuoto. Si nota la serpentina del circuito di raffreddamento che la percorre.

In Figura 3.3 è riportata una foto della camera da vuoto del sistema. Essa è costituita da una campana appoggiata ad una piastra, entrambe in acciaio inox ed in grado di isolare il sistema riscaldante dall'ambiente esterno. Il vuoto, dell'ordine dei 10^{-6} mbar, è necessario per evitare reazioni chimiche indesiderate (ad esempio l'ossidazione dovuta all'ossigeno presente nell'aria) che sarebbero altrimenti favorite dalle elevate temperature degli elementi interni; inoltre, il vuoto è la condizione che è presente all'interno del target di produzione di

radioisotopi, pertanto, per replicare al meglio le condizioni di lavoro di quest'ultimo, sono necessari livelli di pressione molto bassi.

Come rappresentato in Figura 3.3, la camera è dotata di due *finestre* in vetro borosilicato: queste finestre, fornite dall'azienda *MDC Vacuum*, sono dotate di un'elevata trasparenza, cioè hanno un elevato potere antiriflettente su un'ampia gamma di frequenze (780-1064 nm); questo perché le finestre servono per permettere la misura di temperature con elevata precisione, senza che l'onda rilevata dal pirometro perda di energia perché attenuata dalla finestra. In particolare, la finestra superiore serve per accogliere un pirometro bicolore ad infrarossi (Figura 3.4), mentre la finestra anteriore per permettere di osservare l'interno della camera.



Figura 3.4: finestra in cordial presente sulla campana. A sinistra la finestra che permette al pirometro di rilevare le temperature all'interno della camera.

L'involucro esterno della camera presenta una serpentina di rame all'interno della quale scorre una portata d'acqua fornita da un sistema di pompe: tale sistema si rende necessario per mantenere la temperatura della camera a livelli moderati. La portata d'acqua (pari a circa 400 l/h) è raffreddata attraverso un *chiller* posto all'esterno dell'edificio. Il controllo della presenza di un'adeguata portata all'interno del circuito è effettuato dall'operatore attraverso il galleggiante in Figura 3.5.

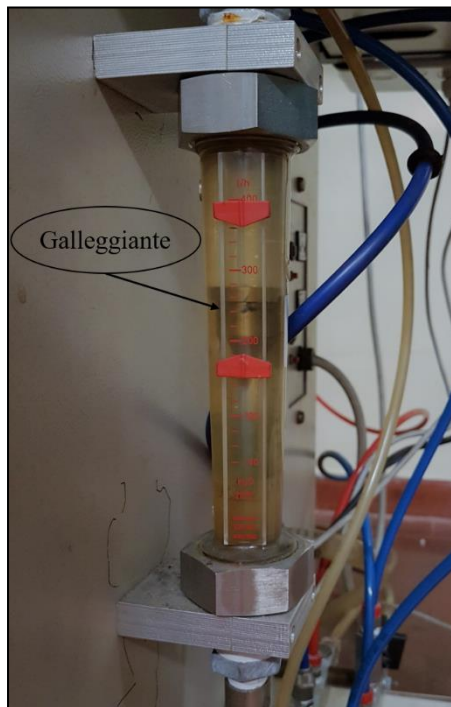


Figura 3.5: galleggiante di controllo della portata dell'acqua di raffreddamento. Per il corretto funzionamento del sistema, il galleggiante deve rimanere all'interno del range in figura.

3.2.2 Il sistema riscaldante

Il sistema riscaldatore è il sottoinsieme che si occupa di fornire e gestire la potenza riscaldante necessaria ad indurre un gradiente termico sul disco.

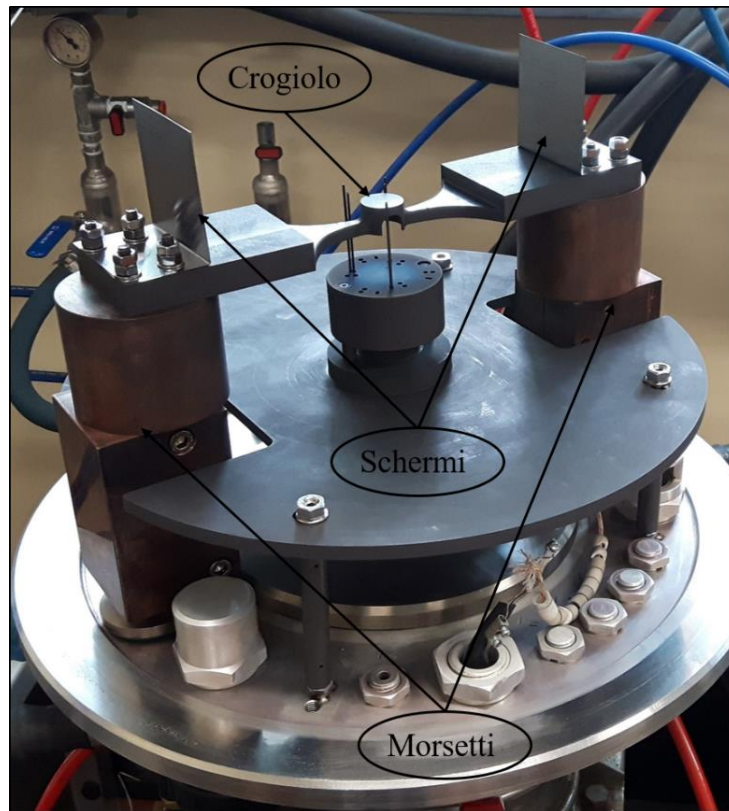


Figura 3.6: struttura dell'apparato interno alla camera.

In Figura 3.6 è rappresentata la struttura dell'apparato riscaldatore. Esso è costituito da:

- un crogiolo in grafite EDM-3[®] dell'azienda POCO, vincolato alle due estremità e percorso da corrente. Grazie alla sua particolare geometria, il crogiolo è in grado di generare uno spot a temperatura elevata e pressoché uniforme;
- due morsetti in rame, cablati al sistema di alimentazione esterno e necessari a fornire la corrente riscaldante al crogiolo;
- due schermi in tantalio, metallo refrattario e dotato di bassissima emissività. Sono posti agli estremi del crogiolo per schermare e riflettere parte della potenza riscaldante.

Affianco al forno, è presente il rack (Figura 3.7) contenente l'alimentatore ed il PCL (*Programmable Logic Controller*) di controllo. L'alimentatore (LAMDA ESS POWER SUPPLY) è in grado di fornire una differenza di potenziale di 10 V ed una corrente di alimentazione massima di 1000 A, per una totale potenza di 10 kW.



Figura 3.7: rack presente alla destra del forno. La parte in alto è costituita dal PLC di controllo, all'interno del quale è presente una scheda di memoria nella quale vengono caricate le rampe di comando e vengono salvati i dati in output, mentre nella parte bassa è presente l'alimentatore.

L'alimentatore può essere controllato in *manuale* se l'operatore controlla la potenza riscaldante agendo sui trimmer di corrente e tensione, oppure in *automatico*, se la potenza riscaldante è controllata dal computer collocato in laboratorio. In quest'ultimo caso, l'operatore deve inserire all'interno di una scheda di memoria due *rampe*, una di salita ed una di discesa; ogni rampa è costituita da un file di testo contenente una colonna con i valori di tempo, una colonna con i valori di tensione ed una con i valori di corrente, come in Figura 3.8. Il controllo avviene imponendo la tensione al massimo valore disponibile (10 V) ed imponendo il valore di corrente desiderato (*controllo in corrente*). Durante il presente lavoro di tesi sono state utilizzate rampe di carico a step di 5 A fino al valore desiderato, ciascuno della durata di 870 s: il tempo così elevato permette al sistema di stabilizzarsi e di evitare sbalzi termici che potrebbero provocare danni indesiderati. Infine, la scheda di memoria è inserita all'interno del PLC. A sua volta, il PLC è controllato da un software, *Labview*, sviluppato all'interno dei LNL per il progetto SPES, attraverso il quale è possibile monitorare i vari parametri del sistema (temperature, pressioni, ecc.); il tutto è scritto in un file di output che il programma genera all'interno della scheda di memoria. Alla fine di ogni prova sperimentale, l'operatore, dopo aver opportunamente spento il sistema, provvederà ad estrarre la scheda di memoria dal PLC ed a collegarla ad un computer per l'elaborazione dei dati. Una schermata del software è riportata in Figura 3.8.

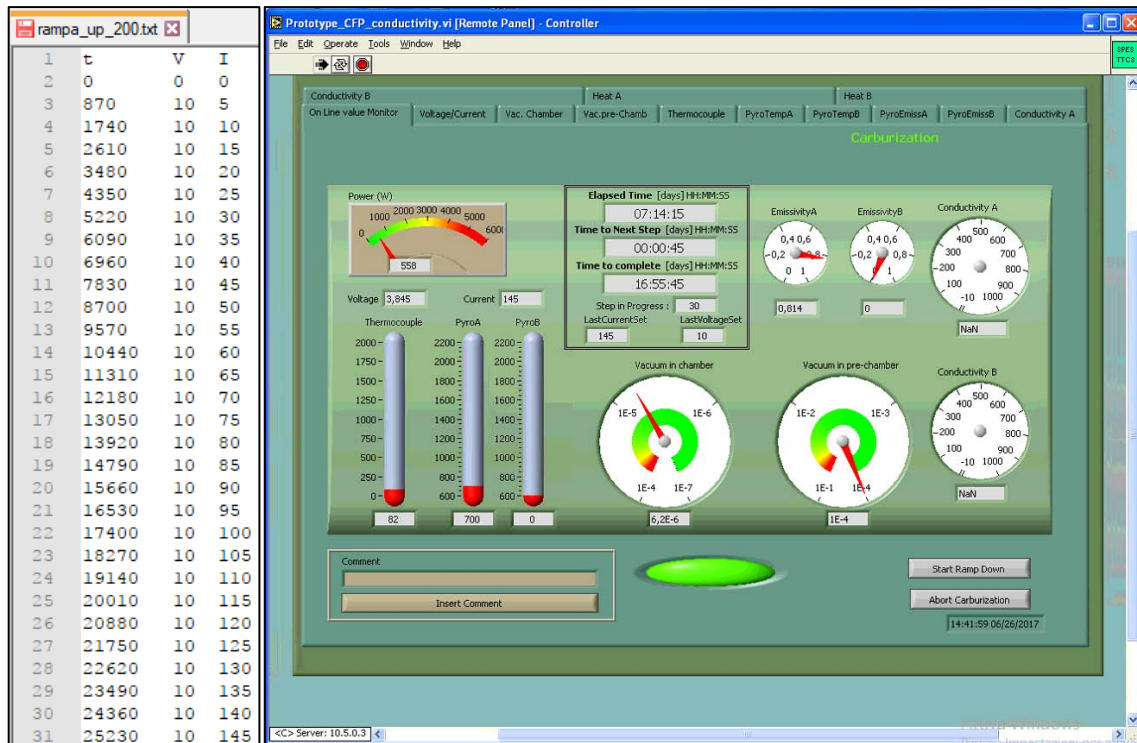


Figura 3.8: a sinistra un esempio di rampa di carico per controllare la potenza riscaldante. A destra una schermata del software Labview con cui si monitorano i principali parametri di controllo.

Per evitare pericolosi surriscaldamenti, il circuito di alimentazione è provvisto di un sistema di raffreddamento ad acqua in grado di asportare elevate quantità di calore dai morsetti in rame. Inoltre, il sistema è provvisto di numerosi sistemi di sicurezza, tra i quali il controllo della velocità di riscaldamento e l'interruzione dell'alimentazione qualora i livelli di vuoto scendessero al di sotto di valori critici; infine, se la campana non è presente, il sistema non fa partire l'alimentazione.

3.2.3 Il sistema di supporto

Per sistema di supporto si intende l'insieme dei componenti che permettono il corretto posizionamento del disco all'interno del sistema. Esso è costituito da più componenti:

- astine in tungsteno: sono sei in totale, di cui tre per sostenere il disco e tre per garantirne il centraggio;
- base, costruita in grafite POCO EDM-3[®], permette il corretto posizionamento delle astine in tungsteno. I fori presenti permettono di collocare il disco in posizione corretta; inoltre, l'altezza della base è regolata da una vite;
- cilindro, in grafite POCO EDM-3[®], necessario per sostenere il complesso base-vite;
- piastra, in grafite POCO EDM-3[®], funge da schermo per i componenti al di sotto della stessa;
- vite, in grafite POCO EDM-3[®], serve per regolare l'altezza della base e, quindi, la distanza del disco dal crogiolo.

In Figura 3.9 sono riportati i componenti che costituiscono il sistema di supporto.

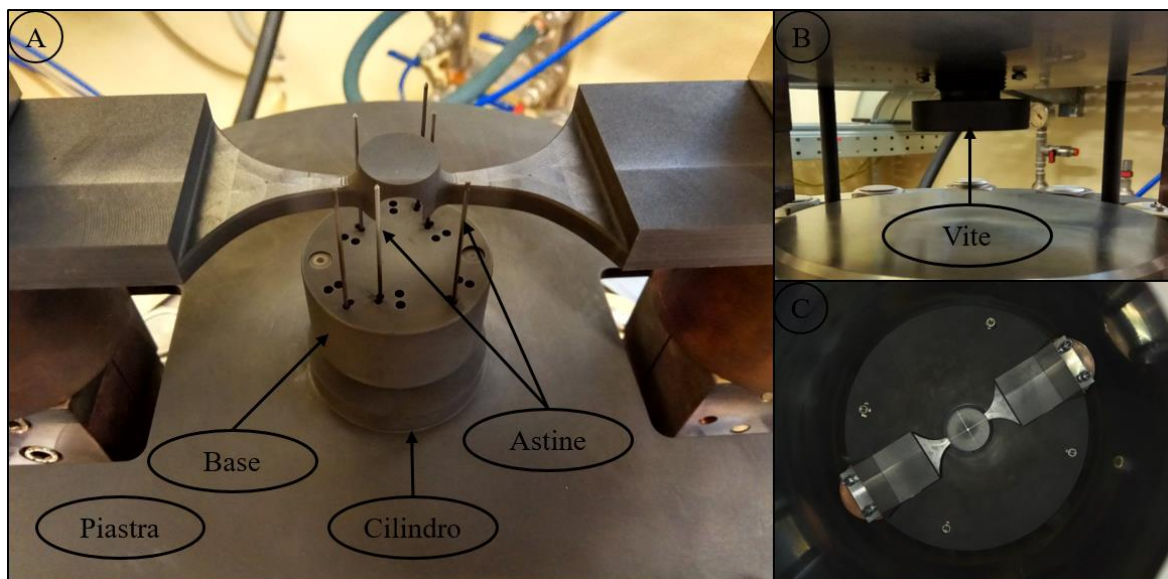


Figura 3.9: rappresentazione del sistema di supporto del disco. In A ed in B sono mostrati i componenti; in C è riportata una foto del sistema disco-crogiolo dall'alto, a dimostrazione della bontà del sistema di posizionamento.

3.2.4 Il sistema per il vuoto

Il sistema per il vuoto è il sottoassieme del forno che si occupa di produrre e mantenere un livello di vuoto nella camera sufficientemente alto ad evitare reazioni chimiche indesiderate.

In generale, un sistema da vuoto è costituito da 4 tipi di componenti: la camera da vuoto, dove si eseguono le operazioni e le sperimentazioni desiderate, l'impianto di pompaggio, necessario ad eliminare il gas dalla camera, l'apparato di misura del grado di vuoto (vacuometri, manometri ecc.) ed, infine, un complesso di giunti, valvole e condotti, che richiedono l'uso di particolari guarnizioni e materiali da vuoto.

Per *grado di vuoto* si intende la rarefazione ottenuta nel recipiente da evacuare, che viene misurata dalla pressione assoluta dei gas residui presenti internamente. Figura 3.10 riporta la classificazione dei gradi di vuoto utilizzati nella pratica tecnica. [38]

<i>Grado di vuoto</i>	<i>Pressione (mbar)</i>	<i>Densità di particelle (molecole/cm³)</i>	<i>Cammino libero medio (cm)</i>
<i>Pressione atmosferica</i>	10^3	$2.5 \cdot 10^{19}$	$6.6 \cdot 10^{-6}$
<i>Vuoto grossolano</i>	1	$3.2 \cdot 10^{16}$	$5 \cdot 10^{-3}$
<i>Medio vuoto</i>	10^{-3}	$3.2 \cdot 10^{13}$	5
<i>Alto vuoto</i>	10^{-6}	$3.2 \cdot 10^{10}$	$5 \cdot 10^3$
<i>Altissimo vuoto</i>	10^{-8}	$3.2 \cdot 10^8$	$5 \cdot 10^5$
<i>Ultra vuoto</i>	10^{-13}	$3.2 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^{10}$

Figura 3.10: classificazione dei gradi di vuoto utilizzati nella pratica tecnica. [2]

Per generare e mantenere il vuoto, è necessario utilizzare dei dispositivi meccanici in grado di asportare dalla camera il gas contenuto attraverso delle condutture; tali dispositivi si chiamano *pompe da vuoto*. I sistemi da vuoto che devono operare in condizioni di alto vuoto sono dotati di più pompe da vuoto; ogni pompa infatti viene impiegata in uno specifico campo di pressioni. I vuoti più spinti sono perciò raggiungibili solo attraverso un'opportuna combinazione di pompe, ciascuna delle quali provvede a ridurre la pressione nel sistema da vuoto a livelli sempre più bassi. Partendo dalla pressione atmosferica, è necessaria una prima pompa per realizzare

un vuoto grossolano preliminare (denominato *prevuoto*, attorno a $10^{-2} \div 10^{-3}$ mbar); l'altra pompa, o le altre pompe, il cui funzionamento è legato alla presenza del vuoto preliminare, hanno invece il compito di raggiungere il vuoto finale o *limite*.

Lo svuotamento del sistema da vuoto rappresenta l'operazione di eliminazione delle molecole di gas presenti nel sistema nella fase gassosa, eseguita attraverso una pompa da vuoto; ciò può avvenire o espellendo le molecole verso l'atmosfera esterna oppure fissandole ed accumulandole nella pompa stessa. L'operazione di svuotamento di un sistema da vuoto viene spesso indicato più semplicemente con il termine di *pompaggio*.

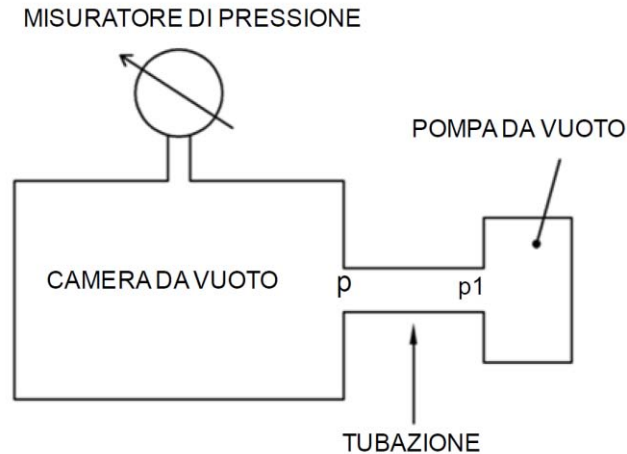


Figura 3.11: schema generale di un sistema da vuoto.

Esistono fondamentalmente due tipologie di pompe:

- pompe a spostamento che utilizzano un meccanismo meccanico per espandere ciclicamente una cavità, permettendo al gas di fuoriuscire dalla camera da vuoto; una volta aspirato il gas, la cavità viene sigillata, il gas compresso ed espulso verso l'atmosfera esterna. Tipi di pompe a spostamento sono le pompe a palette, le pompe a lobi e le pompe a membrana;
- pompe a trasferimento di quantità di moto che utilizzano getti (*jet*) di fluidi densi o lame rotanti ad elevata velocità in modo da imprimere un grande impulso alle molecole di gas e quindi di spingerle nella direzione voluta. Tipi di pompe come queste sono le pompe diffusive, le pompe ad intrappolamento e le pompe turbomolecolari.

L'apparato sperimentale utilizzato durante questo lavoro di tesi è dotato di un sistema di pompaggio costituito da una pompa rotativa a palette per il basso vuoto e da una pompa diffusiva per l'alto vuoto, secondo lo schema di Figura 3.12.

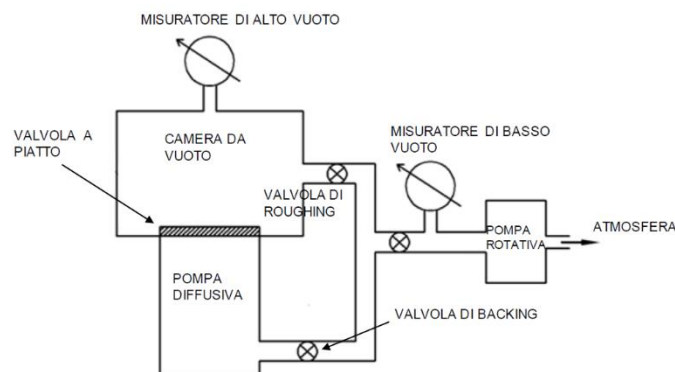


Figura 3.12: schematizzazione del sistema per il vuoto dell'apparato sperimentale.

La pompa rotativa funziona dalla pressione atmosferica e, mediante il risucchio dell'aria, crea un prevuoto all'interno della camera: le pressioni raggiungibili sono dell'ordine dei 10^{-3} mbar, con una velocità di

pompaggio di circa 200 m³/h. In Figura 3.13 è riportato lo schema di funzionamento di questa tipologia di pompa.

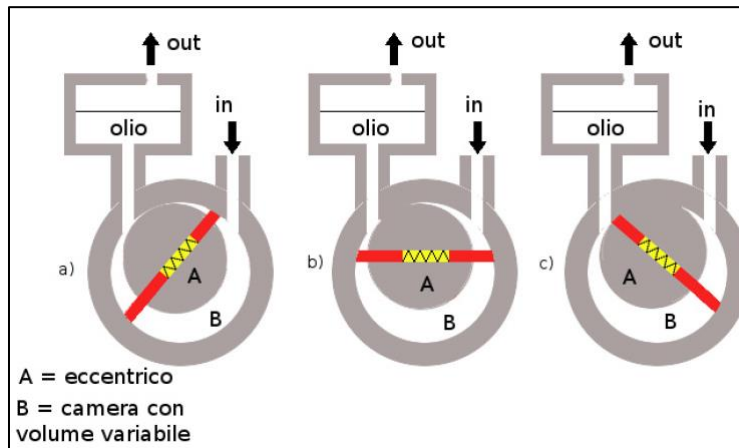


Figura 3.13: ciclo di funzionamento di una pompa a palette. In a) si ha la creazione di un vano d'entrata a bassa pressione nel quale in fluido arriva dalla camera da vuoti; in b) si ha la separazione del vano dalla camera; in c) si ha l'espulsione del fluido contenuto nel vano in un ambiente esterno alla pompa.

Per ottenere livelli di vuoto maggiori, è necessario l'utilizzo di una pompa diffusiva, in grado di portare il vuoto da 10⁻³ mbar a 10⁻⁶ - 10⁻⁷ mbar. Tale tipologia di pompa è costituita da un riscaldatore all'interno del quale è presente dell'olio; l'olio viene riscaldato per effetto Joule fino all'evaporazione, quindi sale lungo il condotto fino ad incontrare un ugello convergente-divergente che ne aumenta la velocità (supersonica). Il gas da pompare, che penetra nella pompa attraverso l'imboccatura, viene così trascinato e compresso dai vapori verso la parte inferiore della pompa dove è disposta l'apertura di scarico collegata ad una pompa preliminare che provvede a trasferire il gas nell'atmosfera esterna. I vapori di gas che lasciano l'ugello ed urtano le pareti della pompa vengono condensati per effetto del raffreddamento delle pareti della pompa, ottenuto, per esempio, mediante una camicia a circolazione d'acqua. I vapori condensati scivolano verso il fondo della pompa dove avviene di nuovo il riscaldamento e ricomincia così il ciclo. [39]. In Figura 3.14 è riportato lo schema di funzionamento di una pompa diffusiva multistadio, dotata cioè di più ugelli.

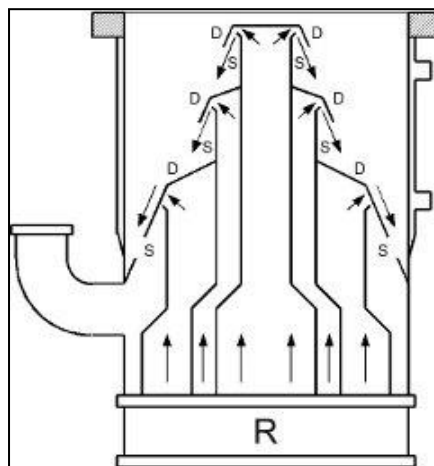


Figura 3.14: schema di funzionamento di una pompa diffusiva multistadio.

In Figura 3.15 sono riportate le foto della pompa a palette e della pompa diffusiva che generano il vuoto nell'apparato sperimentale presente nel laboratorio alte temperature.

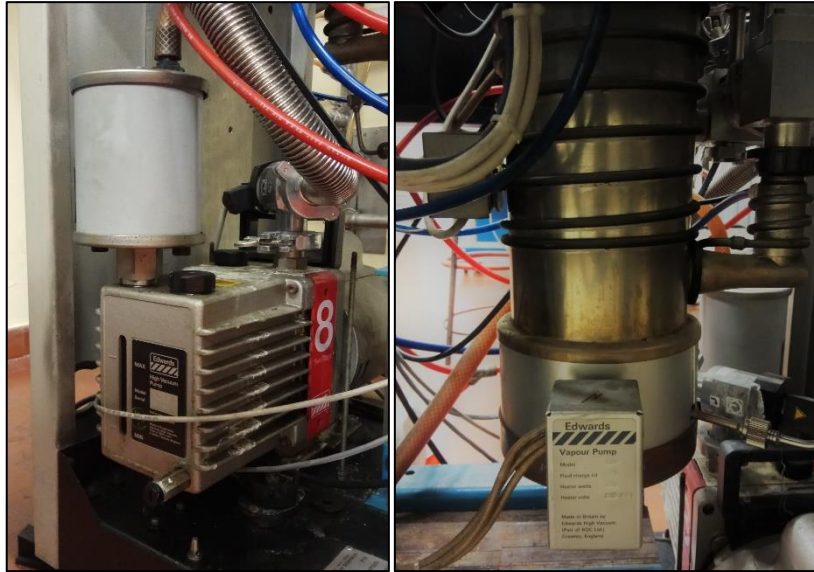


Figura 3.15: a sinistra è riportata la pompa a palette, a destra la pompa diffusiva utilizzate nel laboratorio alte temperature.

Infine, è di rilevante importanza descrivere il complesso di valvole che mettono in comunicazione tra loro i diversi ambienti, come illustrato in Figura 3.12. Esistono 4 valvole:

- valvola di backing: mette in comunicazione la pompa rotativa con la pompa diffusiva: il fine è quello di creare un prevuoto sufficiente a rendere efficiente l'impiego della pompa diffusiva stessa. La valvola è collocata all'esterno della camera (Figura 3.16).
- valvola di roughing: mette in comunicazione le due pompe alla camera. Il suo azionamento avviene con motore rotativo funzionante, pertanto è utile ad ottenere un prevuoto nella camera (10^{-4} mbar). La valvola è collocata all'esterno della camera (Figura 3.16).

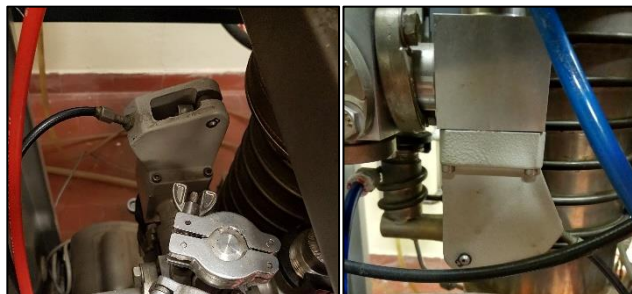


Figura 3.16: valvola di backing (sinistra) e di roughing (destra).

- valvola a piatto: mette in comunicazione la pompa diffusiva con la camera. È una valvola di dimensioni elevate, realizzata in acciaio inox, che si trova all'interno della camera, opportunamente schermata dalla piastra in grafite (Figura 3.17). Nel momento in cui viene azionata, nella camera deve essere già presente un prevuoto; il vuoto finale è attorno a 10^{-6} mbar.

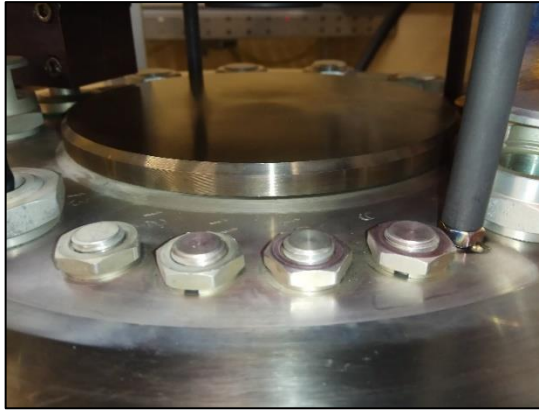


Figura 3.17: valvola a piatto che mette in comunicazione la pompa diffusiva con la camera.

- valvole di rientro: valvole che mettono in comunicazione la camera con l'ambiente esterno. L'apertura di tali valvole consente il rientro in aria della camera in maniera più o meno rapida (esiste una valvola per il rientro rapido e la valvola per il rientro lento). L'esistenza di tali valvole consente il graduale rientro in atmosfera, in quanto elevati gradienti di pressione potrebbero compromettere l'integrità strutturale dei componenti del forno (Figura 3.18).



Figura 3.18: valvola di rientro graduale (sinistra) e rapido (destra).

Ogni valvola è comandata attraverso una leva posta a bordo del forno (Figura 3.19).



Figura 3.19: leva di comando delle valvole.

3.2.5 Gli strumenti di misura

Per la misura ed il controllo dei parametri del sistema, vengono utilizzati più strumenti di misura.

Strumenti di misura - *Pirometri*

Per la misura della temperatura, vengono utilizzati due pirometri bicolore nel campo degli infrarossi *Ircon Modeline® 5 Series 5R Sensor*: si tratta di strumenti in grado di effettuare misure senza contatto, in cui la temperatura viene monitorata in modo continuo da un sensore sensibile all'energia irradiata dagli oggetti nel campo degli infrarossi.

I pirometri utilizzati impiegano due sensori sensibili all'intensità della radiazione elettromagnetica che li investe su due range di lunghezze d'onda differenti nel campo dell'infrarosso ($0.8 \div 1.05 \mu\text{m}$ e $1.0 \div 1.1 \mu\text{m}$); questi range sono sufficientemente piccoli da poter essere considerati come frequenze singole.

I pirometri sono dotati di due modalità di misura:

- one-colour mode: in questa modalità, il pirometro necessita di conoscere il valore di *emissività* del materiale per poter fornire il suo valore di temperatura (si ricorda che l'emissività di un materiale è la frazione di energia irraggiata da quel materiale rispetto all'energia irraggiata da un corpo nero alla stessa temperatura; l'emissività è funzione della temperatura, della lunghezza d'onda e dell'angolo di emissione);
- two-colour mode: in questa modalità, il pirometro è in grado di fornire il valore di temperatura del materiale senza conoscerne l'emissività. Di contro, in questa modalità, il pirometro necessita in input un parametro, denominato *E-slope*, indicante il rapporto tra i valori di emissività del materiale in corrispondenza delle due lunghezze d'onda in cui il pirometro lavora: nel caso di corpi grigi, quali grafite e carburi in generale, la cui emissività è indipendente dalla frequenza, il parametro E-slope assume valore unitario, mentre nel caso di metalli non ossidati, come il tantalio, in cui l'emissività dipende dalla lunghezza d'onda, il parametro E-slope assume il valore di 1.06.

Durante le prove sperimentali, si procede nel seguente modo: si imposta il pirometro in modalità *bicromatica* e si definisce il valore di E-slope in funzione del materiale di cui è costituito il misurando; così facendo, il pirometro restituisce il valore di temperatura del componente. Successivamente, il pirometro esegue lo switch alla modalità *monocromatica* in cui varia l'emissività fintantoché non ritrova il valore di temperatura misurato nella modalità a due colori, determinando così univocamente il valore di emissività del materiale a quella temperatura.

I pirometri impiegati nel presente lavoro di tesi sono due, uno di bassa temperatura (*LT - Low Temperature*) ed uno di alta temperatura (*HT - High Temperature*). Come intuibile, l'utilizzo di uno o dell'altro è dipendente dal range di temperature all'interno del quale si vogliono effettuare le misure: il pirometro LT ha un range di funzionamento tra i 600 °C ed i 1400 °C, mentre il pirometro HT tra i 1000 °C ed i 3000 °C.

Le operazioni di misura mediante l'utilizzo dei pirometri sono possibili grazie all'utilizzo della finestra in cordial, come già spiegato precedentemente (Figura 3.4). I pirometri vengono collegati al PLC grazie all'utilizzo di un cavo a fibra ottica (Figura 3.20): le misure di temperatura ed emissività vengono salvate con la frequenza di un minuto nel file di output all'interno della scheda di memoria.

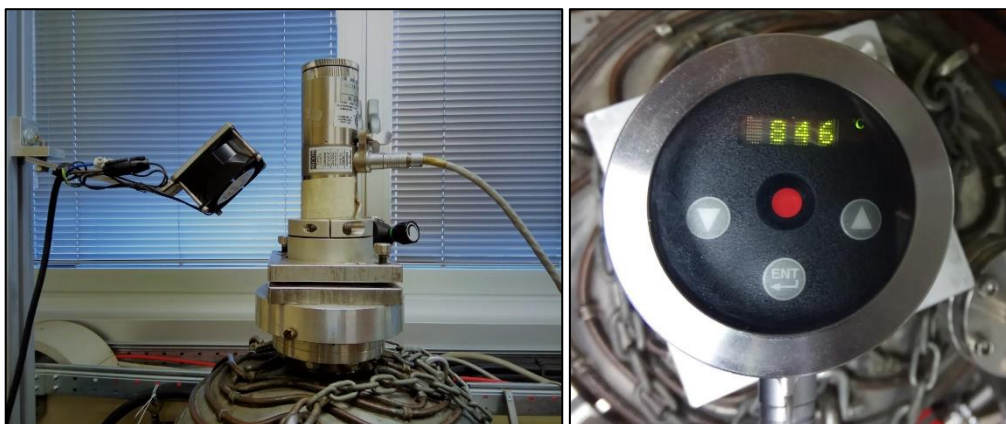


Figura 3.20: uno dei due pirometri utilizzati per le misure di temperature all'interno della camera. A sinistra la modalità di montaggio ed il cablaggio al PLC con un cavo a fibra ottica; a destra il display del pirometro durante una misura.

Due importanti elementi da tenere in considerazione quando si utilizza un pirometro sono la *risoluzione ottica* e la *focalizzazione* dello strumento. Il sensore ottico del pirometro è sensibile alla radiazione termica degli oggetti nell'area individuata dal *cono di visione* (Figura 3.21): il diametro del cono di visione in corrispondenza della superficie dell'oggetto da misurare determina l'area all'interno della quale viene effettuata la misura di temperatura: il valore di temperatura in output è la media integrale delle temperature misurate all'interno di quell'area. Il posizionamento corretto del pirometro avviene se l'area di misura è disposta sulla superficie da misurare e si dice che il pirometro è *a fuoco*. Nelle condizioni in cui si sono effettuate le misurazioni, il diametro dell'area di misura è di 4 mm.

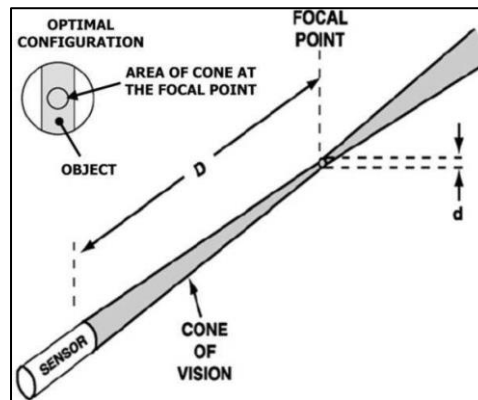


Figura 3.21: cono di visione ed area di misura di un pirometro.

Strumenti di misura - Vacuometri

Per il monitoraggio della pressione all'interno della camera da vuoto e nei condotti che collegano le pompe a quest'ultima e le pompe tra loro, è necessario l'utilizzo di alcuni vacuometri.

In particolare, per garantire il prevuoto alla pompa diffusiva, è necessario misurare la pressione attraverso un vacuometro collegato al condotto posto tra le due pompe: tale misuratore è denominato *APGX*. Per il controllo della pressione all'interno della camera, invece, sono necessari due diversi vacuometri, uno per il basso vuoto, denominato *APGM*, ed uno per l'alto vuoto, denominato *AIMS*, entrambi posizionati in corrispondenza di condotti esterni alla camera ed aventi la medesima pressione di quest'ultima. I vacuometri sono collegati al PLC attraverso dei cavi ethernet. In sono riportati i vacuometri descritti ed il monitor sul quale è possibile leggere le pressioni desiderate.

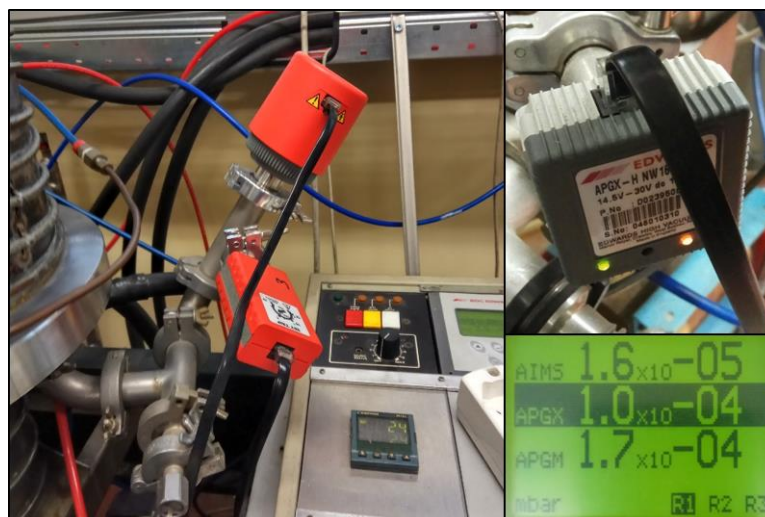


Figura 3.22: vacuometri utilizzati per la misura di pressioni nel forno. A sinistra sono riportati i sensori *AIMS* (in alto) ed *APGM* (in basso); in alto a destra è riportato *APGX*, mentre in basso a sinistra il display sul quale visualizzare i valori misurati.

3.3 Conducibilità termica

La conducibilità termica è una delle proprietà termiche più importanti dei materiali d'impiego nel progetto SPES. Infatti, dato qualunque componente riscaldato in una qualunque sua zona, ci sarà un'altra zona dello stesso oggetto che sarà ad una temperatura minore: ci sarà, quindi, un gradiente termico.

È noto che un qualunque oggetto riscaldato, dilata e, come è possibile intuire, la dilatazione è dipendente dalla temperatura.

Se è presente un gradiente termico, una parte del componente tenderà a dilatarsi più di un'altra, inducendo stati tensionali che possono compromettere l'integrità dell'oggetto, pertanto è necessario valutarli: più la conducibilità termica di un materiale è elevata, più il campo termico tenderà ad essere omogeneo, attenuando i gradienti e le tensioni associate.

3.3.1 Definizione

Per conduzione termica si intende la trasmissione di calore che avviene in un mezzo solido, liquido o aeriforme dalle zone a temperatura maggiore a zone a temperatura minore.

L'equazione generale che regola la trasmissione di calore per conduzione è espressa dal *postulato di Fourier*: dato un campo di temperature $T(x,y,z)$ nello spazio, la *densità di corrente termica* è data da:

$$\frac{\delta Q}{\delta t} = -\lambda_{\mu\nu} \nabla T \quad 3.1$$

dove $\lambda_{\mu\nu}$ rappresenta il tensore della conducibilità termica, mentre ∇T rappresenta il gradiente di temperatura. Nel caso più semplice illustrato in Figura 3.23 in cui vi sono due superfici S distanti L a differenti temperature (T_1 e T_2 rispettivamente, con $T_1 > T_2$), il calore trasferito nell'unità di tempo $\dot{Q} = Q/t$ [W/s] è direttamente proporzionale alla superficie e alla differenza di temperatura ed inversamente proporzionale allo spessore. In formule:

$$\dot{Q} = \lambda \frac{\Delta T \cdot S}{L} \quad 3.2$$

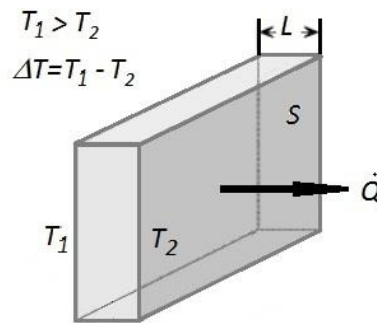


Figura 3.23: trasmissione di calore interna ad un solido.

Ciò premesso, si definisce *conducibilità termica* o *conduttività termica* di un materiale, normalmente indicata con la lettera greca λ , il rapporto tra il flusso di calore, cioè la quantità di calore Q trasferita nell'unità di tempo attraverso una superficie S di spessore L , ed il gradiente termico ΔT che l'ha provocato. In formule:

$$\lambda = \frac{\dot{Q} \cdot \Delta x}{A \cdot \Delta T} \left[\frac{W}{m \cdot K} \right] \quad 3.3$$

In generale, si può affermare che la conducibilità termica nei solidi è maggiore che nei liquidi. Addirittura, nei gas la conducibilità termica può essere quattro ordini di grandezza inferiore rispetto ad un materiale solido: ciò è dovuto all'elevata spaziatura intramolecolare che si ritrova nello stato aeriforme, mentre risulta essere di gran lunga inferiore nei solidi (i liquidi rappresentano uno stadio intermedio).

La maggior parte dei solidi è costituita da una disposizione ordinata e periodica di atomi, detta *reticolo*, all'interno del quale *nubi* di elettroni sono in grado di muoversi liberamente. In un mezzo solido, il trasporto di energia termica è distinguibile in due contributi: la migrazione di elettroni liberi e la propagazione di onde vibrazionali del reticolo. Se ne deduce che la conducibilità termica può essere espressa come somma di due contributi:

$$\lambda = \lambda_e + \lambda_f \quad 3.4$$

in cui il termine λ_e rappresenta la quotaparte relativa alla migrazione di elettroni liberi, mentre λ_f rappresenta l'aliquota relativa ai *fononi*, cioè ai quanti di vibrazione del reticolo.

In prima approssimazione, si può dire che λ_e è inversamente proporzionale alla resistività elettrica ρ_e : per i metalli puri, dotati di bassa resistività elettrica, λ_e risulta molto maggiore di λ_f , perciò quest'ultimo può essere tranquillamente trascurato. Al contrario, per le leghe, dotate di valori maggiori di ρ_e , il contributo relativo ai fononi non risulta più trascurabile. Per i solidi non metallici, invece, la conducibilità è determinata principalmente dal contributo di λ_f ; a tal proposito, è possibile affermare che una regolarità del reticolo cristallino determini elevati valori di conducibilità: il quarzo, dotato di sistema cristallino *trigonale*, ha λ maggiore del vetro, dotato di struttura amorfa.

Per comprendere quanto sia importante la regolarità della disposizione degli atomi, e quindi il contributo di λ_f su λ_e , si osservi che il diamante è dotato di conducibilità termica di gran lunga superiore (1600 W/m·K) rispetto ad un ottimo conduttore come l'alluminio (300 W/m·K).

Inoltre, la conducibilità termica di un materiale è variabile con la temperatura. In Figura 3.24 sono illustrati alcuni esempi.

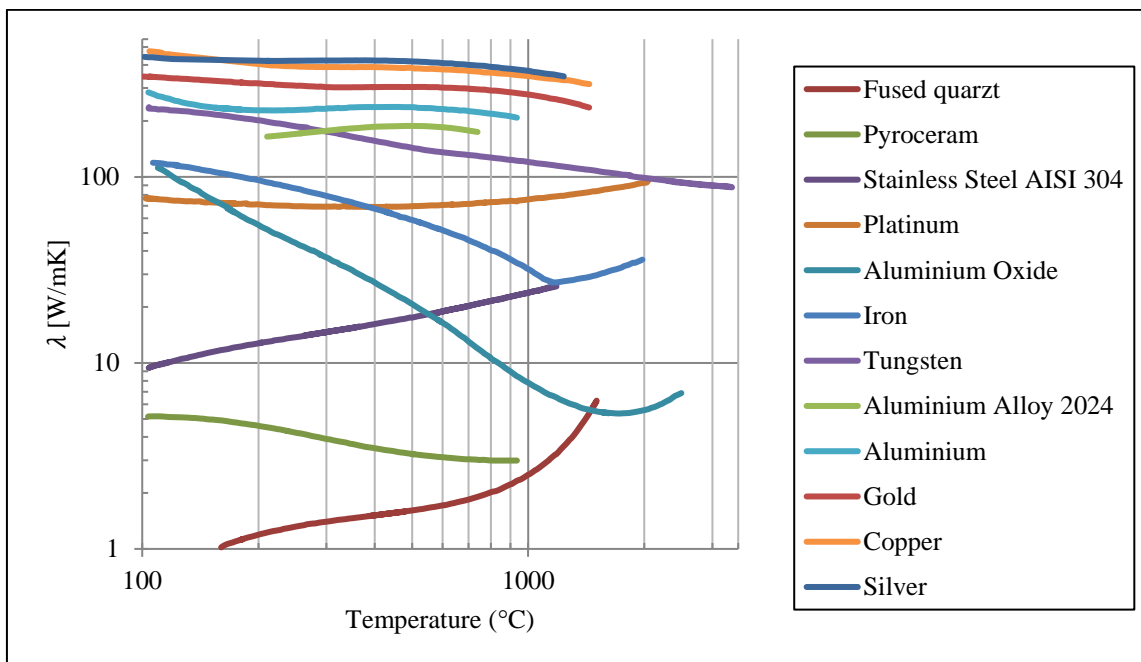


Figura 3.24: conducibilità termica di vari materiali solidi. [40]

È possibile suddividere i materiali in due macrofamiglie a seconda della loro conducibilità termica: materiali *conduttori*, dotati di elevata conducibilità termica, e materiali *isolanti*, dotati di bassi valori di conducibilità ($\lambda < 1$ W/m·K).

I materiali d'interesse per il progetto SPES trattati in questo lavoro di testi sono grafite e carburo di silicio, entrambi buoni conduttori termici.

3.3.2 Principali metodi per la stima della conducibilità

La caratterizzazione termica dei materiali richiede la conoscenza, oltre alla conducibilità termica, anche della *densità* ρ , cioè del rapporto tra la massa di un oggetto ed il volume occupato, e del *calore specifico* c , cioè la

quantità di calore necessaria ad innalzare di 1 K 1 kg di quel materiale. Queste tre proprietà sono tra loro legate a formare la *diffusività termica*, secondo la relazione:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \left[\frac{m^2}{s} \right] \quad 3.5$$

La diffusività termica è una caratteristica intrinseca di un materiale in quanto dipende esclusivamente dalle sue proprietà. Essa rappresenta l'attitudine di un materiale alla propagazione di un campo termico in condizioni non stazionarie. In queste condizioni, affinché il materiale trasmetta in modo efficace l'onda termica, non è solo necessario che sia altamente conduttivo, ma deve anche essere dotato di bassa densità e basso calore specifico, in modo tale che il calore ricevuto da ogni elemento finito che lo costituisce non rimanga immagazzinato all'interno dell'elemento stesso, ma si trasformi in una variazione di temperatura, in modo tale che l'elemento preso in considerazione si alzi in temperatura, attivando un nuovo gradiente termico con l'elemento che lo succede ed incentivando la propagazione del calore.

In regime stazionario (*steady-state*), invece, l'unica proprietà che determina il campo termico di un componente è la conducibilità del materiale di cui è costituito. Infatti, il calore specifico e la densità determinano solamente il tempo che esso impiega a raggiungere la mappa termica definitiva, non i valori della stessa.

In letteratura sono presenti numerosi metodi per la determinazione della conducibilità termica di un materiale. In generale, i metodi per la determinazione di una proprietà possono essere suddivisi secondo tre classificazioni:

- Metodi diretti ed inversa, a seconda che la proprietà sia un dato misurato direttamente durante l'esperimento oppure sia ricavata mediante opportune metodologie collegate ad altri parametri o proprietà misurati;
- Metodi assoluti o comparativi, a seconda che vengano utilizzati o meno degli standard di riferimento;
- Metodi stazionari o transitori, a seconda del regime termico presente. Nei metodi stazionari, la proprietà ricercata è misurata in un regime di scambio termico costante, mentre nei transitori viene valutata in condizioni variabili nel tempo.

È importante sottolineare che la misura di conducibilità termica può variare a seconda del metodo utilizzato; inoltre, le fonti di incertezza sono sempre molte e spesso non completamente note. Pertanto, ogni qualvolta si esegue una misura di conducibilità termica, in realtà se ne esegue solo una stima: la bontà di questa stima sarà correlata alla bravura dello sperimentatore nell'individuare tutte le possibili fonti di incertezza cercando di eliminarle o perlomeno di limitarle, valutandone adeguatamente gli effetti.

L'*ASTM* (*American Society for Testing Materials*) è un ente internazionale che si occupa della standardizzazione dei metodi utilizzati per la stima delle proprietà dei materiali. Una delle metodologie previste dall'*ASTM* per la stima della conducibilità termica è denominata *ASTM C 177-97*: essa consiste nella creazione di un flusso termico unidirezionale passante attraverso il campione da caratterizzare posto tra alcune piastre spesse (schema a *sandwich*). Il campione consiste in due parti uguali con elevato rapporto area/superficie e, secondo la norma, non deve possedere una conduttanza termica superiore a 16 W/m²K, rientrando perciò nella categoria dei materiali termicamente isolanti. Il campione deve essere costituito in materiale isotropo, in quanto si vogliono evitare effetti locali che cambino la direzione del flusso di calore. In Figura 3.25 viene mostrata la disposizione dei componenti:

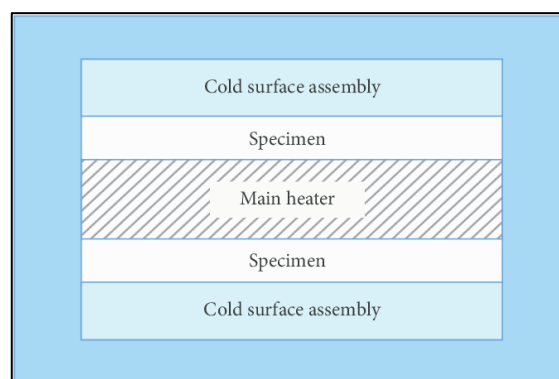


Figura 3.25: illustrazione della disposizione dei componenti utilizzati nella determinazione della conducibilità termica del provino secondo la normativa ASTM C 177-97.

Il metodo prevede il riscaldamento, per effetto Joule, della piastra centrale (*main heater*); i due campioni, di forma discoidale e dotati di stesse dimensioni e massa, vengono posti a contatto col riscaldatore: la conducibilità termica ottenuta sarà la media delle conducibilità dei due provini. Alle estremità opposte vengono collocate delle piastre fredde (*cold surface assembly*) per direzionare il flusso termico. Il tutto viene posto in atmosfera controllata, in modo da limitare al minimo lo scambio termico per convezione. La misura della temperatura del provino avviene attraverso termocoppie ancorate al provino: attraverso la legge di Fourier, si determina la conducibilità termica incognita. Questo metodo rientra nei metodi diretti, assoluti e stazionari.

3.3.3 Metodo della funzione ottima

Nel corso degli anni, ai Laboratori Nazionali di Legnaro sono stati sviluppati diversi metodi per la stima della conducibilità termica dei materiali: tra gli altri, è importante citare il *metodo del gradiente* ed il *metodo della funzione ottima*. Il primo è stato ampiamente utilizzato [38], [41], mentre il secondo è un'evoluzione del primo, pertanto solo quest'ultimo è stato utilizzato nel corso del presente lavoro di tesi.

Entrambi i metodi utilizzano l'apparato presente ai LNL, rappresentato in Figura 3.26 e descritto precedentemente.



Figura 3.26: apparato sperimentale dei Laboratori Nazionali di Legnaro utilizzato per la determinazione della conducibilità termica di un materiale.

In breve, si ricorda che il sistema è formato da un riscaldatore ohmico (*crogiolo*) in grado di irraggiare un provino di forma discoidale costituito di materiale di conducibilità termica ignota. Come è possibile apprezzare in Figura 3.27, sul provino si forma un gradiente termico radiale: il centro risulta essere più caldo della periferia. È facilmente deducibile come la conducibilità termica giochi un ruolo fondamentale sulla distribuzione di temperatura che si instaura sul disco: minore è la conducibilità termica del materiale del provino, maggiore è il gradiente termico. Il metodo della funzione ottima sfrutta l'entità del gradiente per stimare la *curva di conducibilità*, cioè il grafico della conducibilità termica in funzione della temperatura.

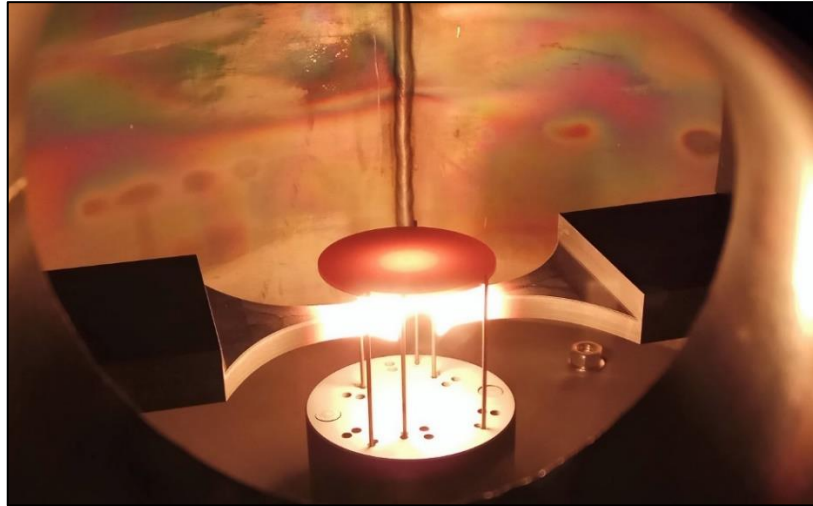


Figura 3.27: gradiente termico radiale che si sviluppa sul provino discoidale a causa della presenza del riscaldatore ohmico.

In accoppiata con l'apparato sperimentale illustrato, si utilizza un modello agli elementi finiti: ipotesi fondamentale del metodo è che vi sia una corretta calibrazione del modello numerico, cioè che quest'ultimo rispecchi, con buona approssimazione, la realtà sperimentale.

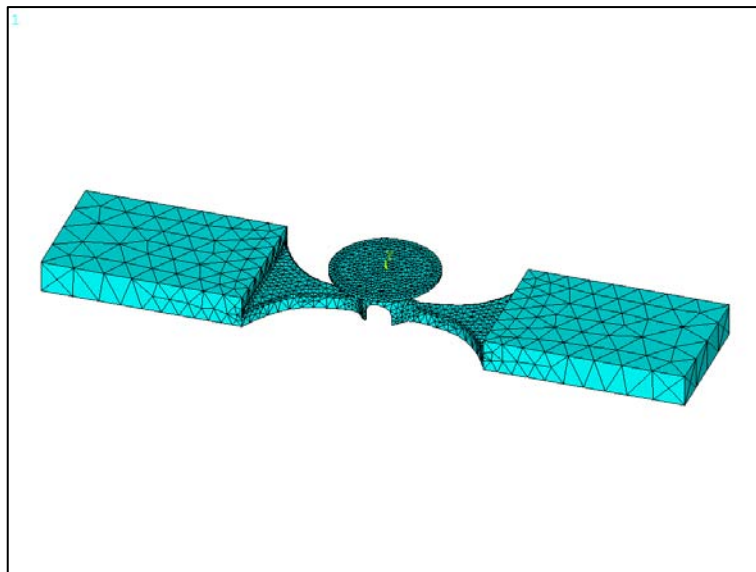


Figura 3.28: raffigurazione semplificata del modello agli elementi finiti utilizzato.

Il primo step del metodo consiste nell'esecuzione di prove sperimentali nelle quali si acquisiscono i valori di temperatura sul disco: per ogni valore di corrente riscaldante che attraversa il crogiolo, si misura la temperatura del disco in corrispondenza del suo centro e della sua periferia in direzione ortogonale al crogiolo, in quanto in questa direzione si verifica il massimo gradiente, ed in corrispondenza della superficie superiore del disco, in quanto solamente lì è possibile effettuare la misurazione sperimentale (Figura 3.29). Più avanti si dimostrerà che tale gradiente non è il massimo che si verifica sul disco.

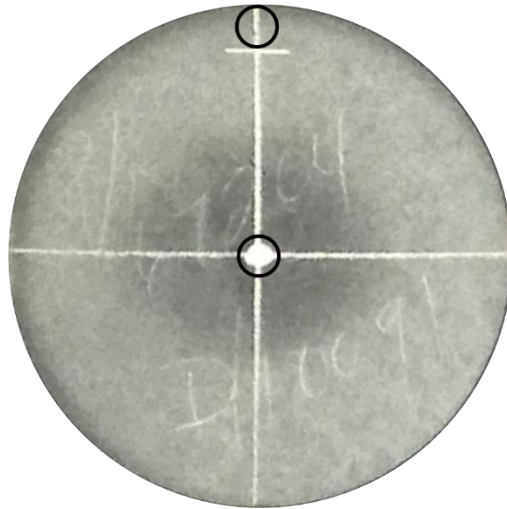


Figura 3.29: rappresentazione dei punti di acquisizione delle temperature.

In questa maniera, si può definire il gradiente termico presente sul disco come

$$\Delta T = T_{centro} - T_{periferia} \quad 3.6$$

Un tipico andamento delle temperature è riportato in Figura 3.30. Ovviamente, la temperatura in centro è sempre maggiore della temperatura in periferia e questa differenza aumenta con la corrente riscaldante.

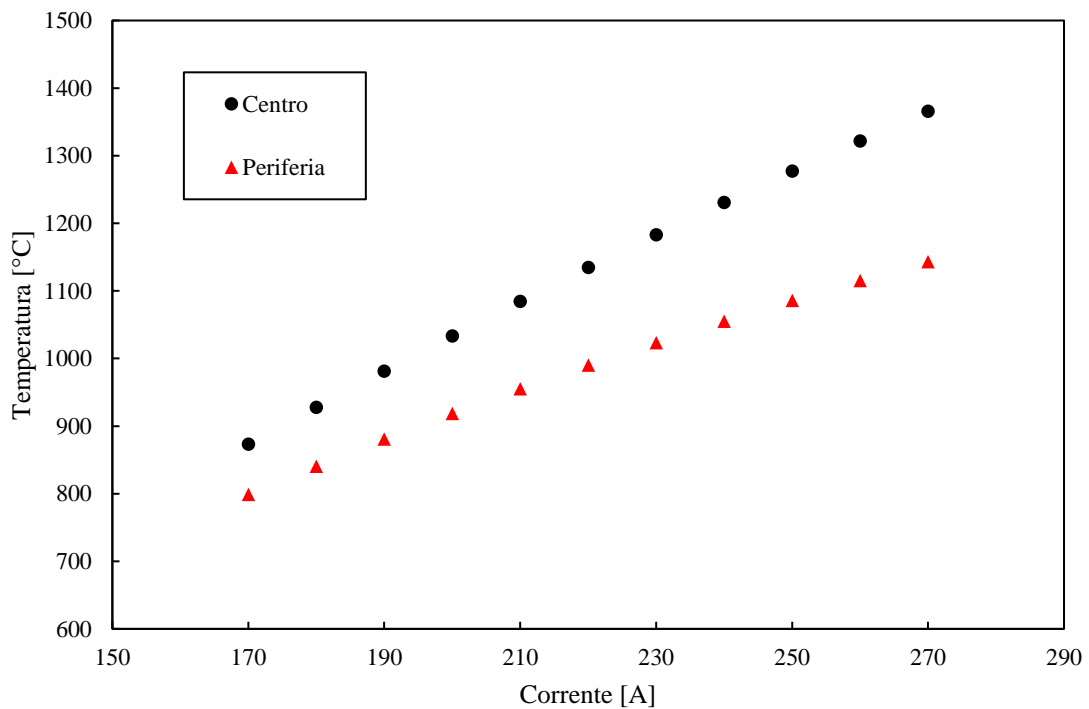


Figura 3.30: tipico andamento delle temperature in centro ed in periferia del disco al variare della corrente riscaldante.

Il passo successivo prevede l'utilizzo dell'analisi numerica; in particolare, durante questo lavoro di tesi è stato utilizzato il pacchetto *Mechanical APDL 16.2* del software di calcolo *Ansys®*. Una tipica mappa termica del disco ottenuta attraverso l'utilizzo di tale software è riportata in Figura 3.31.

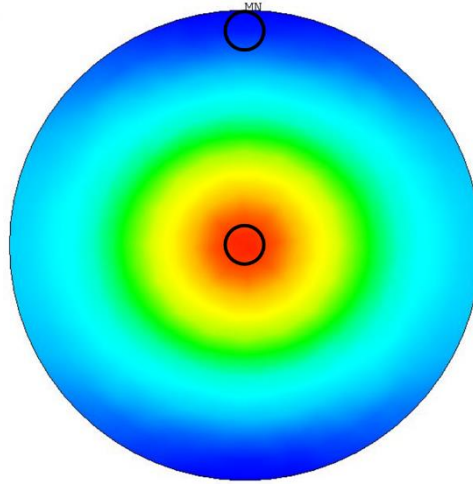


Figura 3.31: mappa termica della superficie superiore del disco ottenuta con l'utilizzo di Ansys®. Vengono anche riportate le posizioni in cui sono rilevate le temperature. Rilevante è la quasi assialsimmetria del campo di temperatura dovuta alla presenza del crogiolo.

La fase numerica consiste nell'introdurre i dati sperimentali nella simulazione: quest'ultima, attraverso un processo iterativo, cambia i valori di conducibilità termica del disco in modo tale da rendere coincidenti i valori di temperature numeriche con quelle sperimentali inserite.

Il problema numerico, posto in questi termini, richiede l'utilizzo del *tool di ottimizzazione* interno ad Ansys®: questo risulta disponibile solamente attraverso l'utilizzo del linguaggio *APDL (Ansys Program Design Language)*, in quanto non più presente nella *GUI (Graphical User Interface)*.

In generale, un problema di ottimizzazione è costituito da:

- variabili di design: quantità indipendenti che vengono variate per ottenere il design ottimale;
- variabili obiettivo: quantità dipendenti che si cerca di ottimizzare;
- variabili di stato: quantità che vincolano il design.

Ogni set di valori assegnato alle variabili determina una particolare configurazione del sistema. Per ogni set viene calcolato il valore della variabile obiettivo: il set di valori che restituisce il valore della variabile obiettivo il più alto o il più basso possibile, rappresenta il set che ottimizza il design. Se questo set rispetta anche i vincoli rappresentati dalle variabili di stato, il set è chiamato *fattibile*.

Nel caso specifico, la funzione obiettivo è definibile prendendo spunto dalla tecnica dei minimi quadrati, cioè

$$RQ = \sum_{i=l_{min}}^{l_{max}} (TCS_i - TCN_i)^2 + (TPS_i - TPN_i)^2 \quad 3.7$$

in cui TCS_i e TPS_i sono, rispettivamente, le temperature sperimentali misurate in corrispondenza del centro e della periferia del disco, mentre TCN_i e TPN_i sono le corrispondenti temperature numeriche. Per ottenere una conducibilità termica corretta, è necessario ricavare il minimo della variabile RQ .

Per la corretta definizione della funzione di design, si fa ricorso alla possibilità presente in Ansys® che consiste nel definire la proprietà di un materiale come funzione polinomiale (fino al quarto ordine) della temperatura, pertanto facendo ricorso ai termini C_i :

$$\lambda(T) = C_0 + C_1 \cdot T + C_2 \cdot T^2 + C_3 \cdot T^3 + C_4 \cdot T^4 = \sum_{i=0}^4 C_i \cdot T^i \quad 3.8$$

Le costanti C_0, C_1, C_2, C_3, C_4 , sono cambiate ad ogni iterazione per rendere RQ minimo e consentono di determinare la curva di conducibilità del materiale secondo la 3.8.

Lo schema che viene seguito durante il processo iterativo è rappresentato in Figura 3.32.

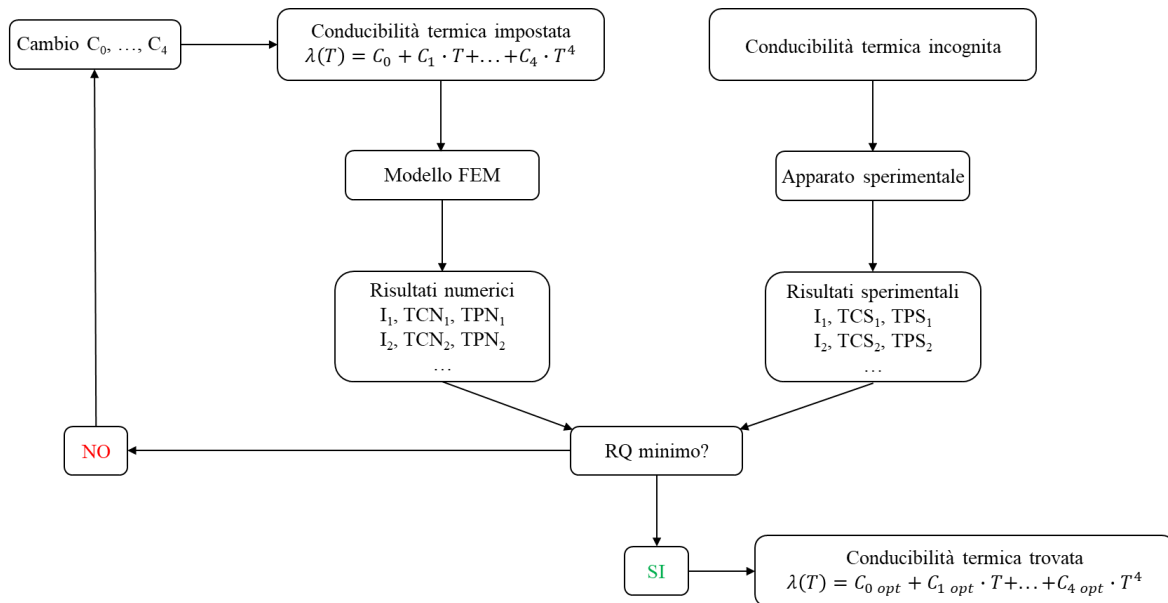


Figura 3.32: schema a blocchi relativo al metodo della funzione ottima applicato alla ricerca della conducibilità termica di un materiale.

Lo schema riporta il processo iterativo che viene seguito. Il tempo totale della simulazione dipende dal numero delle iterazioni e dal numero di correnti assegnate: assegnato un numero medio di correnti pari a 10, ciascuna iterazione ha una durata di circa 45' (computer con Windows 10 Enterprise, CPU Intel® Xeon® E5-1607 0 @ 3.00 GHz, RAM 32 GB), quindi si comprende quanto sia elevata la complessità computazionale del modello. Per impostare il modello numerico in grado di risolvere il problema, sono necessari più passaggi. In particolare, il tool di ottimizzazione di Ansys® richiede:

- un modello parametrico: è il modello numerico del sistema che si vuole ottimizzare. Deve essere definito parametricamente in modo da poter definire correttamente le variabili;
- un file di analisi: un file contenente la completa sequenza di analisi (*preprocessing*, *soluzione* e *postprocessing*);
- un file di loop: un file di ottimizzazione creato automaticamente attraverso il file di analisi. L'ottimizzatore interno utilizza il file di loop per eseguire le iterazioni;
- un database di ottimizzazione: file in cui sono presenti le definizioni delle variabili, dei parametri, tutte le specifiche per l'ottimizzazione ed i vari set di design.

Per comprendere al meglio come impostare il problema, di seguito vengono illustrati i principali comandi utilizzati, in sequenza, per la costruzione dell'apdl presente in appendice.

- **dim* e **vread*: sono comandi necessari per introdurre in Ansys® il file delle temperature sperimentali. Il primo crea una table dalle corrette dimensioni, il secondo permette di scrivere all'interno della table appena creata i valori di corrente e temperatura;
- *lambdamin*: è un parametro, definito come il valore del polinomio $\lambda(T)$ valutato alla massima temperatura disponibile, che serve a garantire che il valore di conducibilità termica a quella temperatura non sia negativo;
- */prep7*: è un comando necessario per entrare nell'ambiente del preprocessore, all'interno del quale si definisce l'intero modello parametrico. Quest'ultimo verrà illustrato in dettaglio nel successivo paragrafo;
- */solu*: è un comando necessario per entrare nell'ambiente del solutore, all'interno del quale si può impostare il tipo di analisi e lanciare la soluzione;
- */post1*: è un comando necessario per entrare nell'ambiente del postprocessore, all'interno del quale è possibile prelevare i risultati della soluzione per una successiva elaborazione;

- */opt*: è un comando necessario per entrare nell'ambiente di ottimizzazione di Ansys®, nel quale è possibile definire le variabili e lanciare l'algoritmo ottimizzatore;
- *opclr*: è un comando necessario alla pulizia del database di ottimizzazione, qualora fosse stata eseguita qualche iterazione precedentemente;
- *opanl*: è un comando necessario alla definizione del fine di analisi necessario all'ottimizzatore per comprendere qual è il modello parametrico da iterare;
- *opvar*: è un comando necessario alla definizione delle variabili di design (dv), di stato (sv) e obiettivo (obj);
- *optype*: è un comando necessario alla definizione della tipologia di metodo utilizzato per la ricerca dei massimi/minimi nel dominio di design. In questo lavoro di tesi, sono state utilizzate due metodologie: *run* che prevede una singola iterazione (utile per comprendere la posizione nel dominio di design per un dato set di valori dei parametri) e *first*, che utilizza il first order method, ampiamente utilizzato in letteratura;
- *opexe*: è un comando necessario all'avvio dell'algoritmo di ottimizzazione.

3.4 Modellazione numerica

Come precedentemente evidenziato, il metodo della funzione ottima richiede un modello numerico che rispecchi, con un certo grado di approssimazione, la realtà sperimentale.

Il modello numerico non è solamente utile per la determinazione della conducibilità termica attraverso il metodo utilizzato in questo lavoro di tesi, ma fornisce anche un potente strumento in grado di fornire stime previsionali sul comportamento del sistema. Nello specifico, con un modello numerico accuratamente calibrato, si è in grado di prevedere l'entità del gradiente termico che si instaura, fissata una certa configurazione del sistema, al momento della rottura del disco, consentendo di comprendere quale sia il gradiente di rottura del disco, informazione di notevole importanza nell'ambito dello studio del target SPES.

3.4.1 Basi teoriche per la costruzione del modello agli elementi finiti

L'obiettivo ultimo del modello FEM è la valutazione della corretta distribuzione di temperatura presente sugli organi costituenti l'apparato sperimentale; pertanto, ciò che è richiesto è la risoluzione di un problema termico, cercando di tenere in considerazione tutti i possibili contributi che sono coinvolti nello scambio termico. Dal momento che nel problema termico è coinvolta anche una generazione interna di calore per effetto Joule, al problema termico si aggiunge anche un problema elettrico. Inoltre, le proprietà elettriche sono strettamente dipendenti dalla temperatura, pertanto è necessario un procedimento iterativo in cui le soluzioni del problema termico sono input del problema elettrico, con lo scopo finale di arrivare ad una soluzione a convergenza.

In fase di operazione, l'apparato sperimentale è tenuto in stato di alto vuoto (circa 10^{-6} mbar); ne consegue che il meccanismo di scambio termico per convezione è nullo, in quanto c'è la totale assenza di fluido all'interno della camera. Pertanto, gli unici due meccanismi di scambio termico possibili sono la conduzione e l'irraggiamento: la conduzione ha luogo solamente in presenza di continuità di materiale o nei casi in cui ci siano delle superfici adese, mentre l'irraggiamento avviene tra superfici che non sono a contatto.

Un problema numerico che coinvolga conduzione ed irraggiamento viene solitamente risolto con metodi sequenziali basati su equazioni iterative sulla diffusione del calore e sulla radiazione termica. La soluzione del problema di diffusione termica costituisce le condizioni al contorno per la radiazione termica, mentre i risultati delle equazioni che determinano i flussi termici irraggiati forniscono le condizioni iniziali per la conduzione nella successiva iterazione [10]. In Figura 3.33 è rappresentato uno schema del fenomeno dello scambio termico descritto: la conduzione ha luogo attraverso la regione solida indicata con D, mentre l'irraggiamento riguarda le superfici formanti l'enclosure, cioè l'insieme delle superfici tra le quali può aver luogo scambio termico per irraggiamento, indicata con S_{enc} .

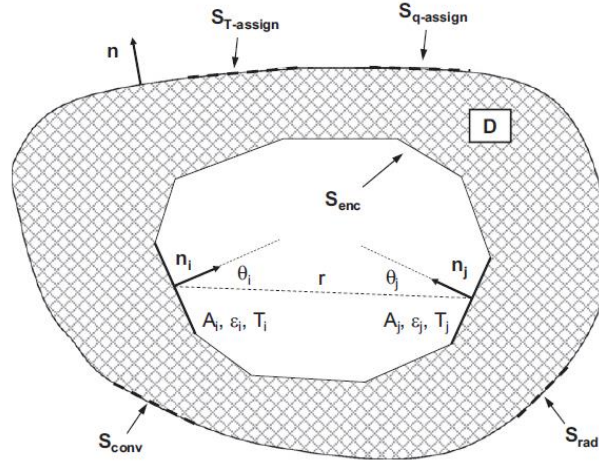


Figura 3.33: rappresentazione schematica di un problema di scambio termico attraverso meccanismi di conduzione ed irraggiamento accoppiati.

Il meccanismo di scambio termico è regolato attraverso l'equazione 3.9 scritta in coordinate cartesiane:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + h = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad 3.9$$

In tale equazione la funzione $T(x,y,z,t)$ esprime il campo di temperatura in funzione della posizione cartesiana (x,y,z) e del tempo (t) , il parametro λ esprime la conducibilità termica del materiale, ρ la densità, c il calore specifico ed h la generazione volumetrica interna di calore. Per ottenere una soluzione valida, necessario definire le condizioni iniziali e le condizioni al contorno. Le condizioni iniziali fissano il campo di temperatura all'interno del volume solido D al tempo iniziale:

$$T(x, y, z, 0) = T_i(x, y, z) \quad \forall (x, y, z) \in D \quad 3.10$$

Le condizioni al contorno descrivono lo status della superficie S che confina il volume D e possono essere generalmente espresse nella forma indicata nelle relazioni 3.11, 3.12 e 3.13.

$$T(x, y, z, t) = T_{assign}(x, y, z, t) \quad \forall (x, y, z) \in S_{T-assign} \quad 3.11$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial n}(x, y, z, t) = q_{assign} + q_{conv} + q_{rad} \quad \forall (x, y, z) \in (S_{q-assign} \cup S_{conv} \cup S_{rad}) \quad 3.12$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial n}(x, y, z, t) = q_{enc} \quad \forall (x, y, z) \in S_{enc} \quad 3.13$$

L'equazione 3.11 rappresenta eventuali vincoli espliciti di temperatura, mentre le equazioni 3.12 e 3.13 sono state scritte in relazione alla normale n alla superficie S (dove $S = S_{T-assign} \cup S_{q-assign} \cup S_{conv} \cup S_{rad} \cup S_{enc}$). I termini q_{assign} , q_{conv} , q_{rad} , q_{enc} assumono valori positivi quando il flusso termico ha direzione concorde alla normale n . Tra questi q_{conv} e q_{rad} indicano rispettivamente i flussi termici scambiati verso l'ambiente esterno attraverso i meccanismi di convezione e radiazione nelle porzioni di superficie S_{conv} e S_{rad} . Tali flussi sono esprimibili mediante le relazioni

$$q_{conv} = \alpha(T - T_C) \quad 3.14$$

$$q_{rad} = \varepsilon \cdot \sigma(T^4 - T_r^4) \quad 3.15$$

in cui α indica il coefficiente di scambio termico convettivo, T_C la temperatura del fluido che circonda la superficie dove ha luogo lo scambio termico, ε è l'emissività emisferica totale della superficie supposta grigia, σ è la costante di Stefan-Boltzmann e T_r la temperatura ambientale o la temperatura di una superficie isoterma molto più grande di S che la racchiude completamente.

Le condizioni al contorno sulle superfici A_i appartenenti all'enclosure S_{enc} sono fissate dall'equazione 3.13, nella quale q_{enc} rappresenta il calore irradiato attraverso la superficie A_i . Dal momento che l'interno dell'enclosure S_{enc} si ipotizza in vuoto, è evidente che la 3.13 rappresenta lo scambio termico totale, non essendo possibile il meccanismo della convezione a causa della totale assenza di fluido in grado di scambiare calore. Inoltre, si ricava che in fase di equilibrio termico il calore trasmesso per radiazione è uguale al flusso termico conduttivo attraverso la superficie S_{enc} all'interno del volume D .

La soluzione del problema radiativo, come ad esempio il calcolo di q_{enc} , è ottenuta considerando l'espressione (3.16), nella quale si assume che le N aree coinvolte nello scambio radiativo siano grigie e diffuse e che inoltre siano interessate da un campo di temperatura e un flusso termico uscente uniforme.

$$\sum_{i=1}^N \left[\frac{\delta_{ji}}{\varepsilon_i} - F_{j-i} \left(\frac{1 - \varepsilon_i}{\varepsilon_i} \right) \right] q_{enc,i} = \sum_{i=1}^N (\delta_{ji} - F_{j-i}) \sigma T_i^4 \quad 3.16$$

In tale formulazione, il simbolo δ_{ji} rappresenta l'operatore *delta di Kronecker* (pari a 1 se $i=j$, altrimenti 0), ε_i è l'emissività emisferica totale della superficie i -esima, F_{j-i} rappresenta il fattore di vista tra la superficie j -esima e la superficie i -esima, $q_{enc,i}$ è il flusso termico netto scambiato per radiazione dall'area i -esima, σ è la costante di Stefan-Boltzmann e T_i rappresenta la temperatura assoluta (in K) della superficie i -esima. Il fattore di vista F_{j-i} indica la frazione di energia radiante che, uscente dalla superficie j -esima, impatta direttamente la superficie i -esima ed è espresso dalla relazione

$$F_{j-i} = \frac{1}{A_j} \int_{A_j} \int_{A_i} \frac{\cos\theta_j \cos\theta_i}{\pi r^2} dA_i dA_j \quad 3.17$$

Le quantità geometriche espresse nella (3.17) fanno riferimento a Figura 3.33.

Come già evidenziato, il problema elettrico è complementare al problema termico, in quanto il primo fornisce il carico al secondo derivante dal riscaldamento per effetto Joule. Il campo *densità di corrente elettrica* $j(x,y,z)$ dipende dal gradiente del potenziale $V(x,y,z)$ secondo la relazione di Ohm

$$j = -\frac{1}{\rho(T)} \nabla V \quad 3.18$$

in cui ρ rappresenta la resistività del materiale che è, in generale, funzione della temperatura.

Inoltre, in condizioni stazionarie, dal momento che le condizioni per la validità del teorema della continuità di j sono verificate, è possibile scrivere la relazione

$$\nabla \cdot j = 0 \quad 3.19$$

In accordo con quanto enunciato in relazione all'effetto Joule, è possibile scrivere la relazione 3.20 tra il calore dissipato per unità di volume del materiale ed il campo di corrente j .

$$h = -\nabla V \cdot j \quad 3.20$$

3.4.2 Definizione del modello geometrico

L'obiettivo dello studio è valutare i valori di temperatura che competono al disco, al fine di ricavare la conducibilità termica del materiale che lo costituisce e comprendere l'entità dei gradienti termici che esso è in grado di sopportare prima di giungere a rottura. In Figura 3.34 è riportata una raffigurazione del sistema utilizzato per la riproduzione dei gradienti termici sui dischi, comprensivo di tutti i componenti:

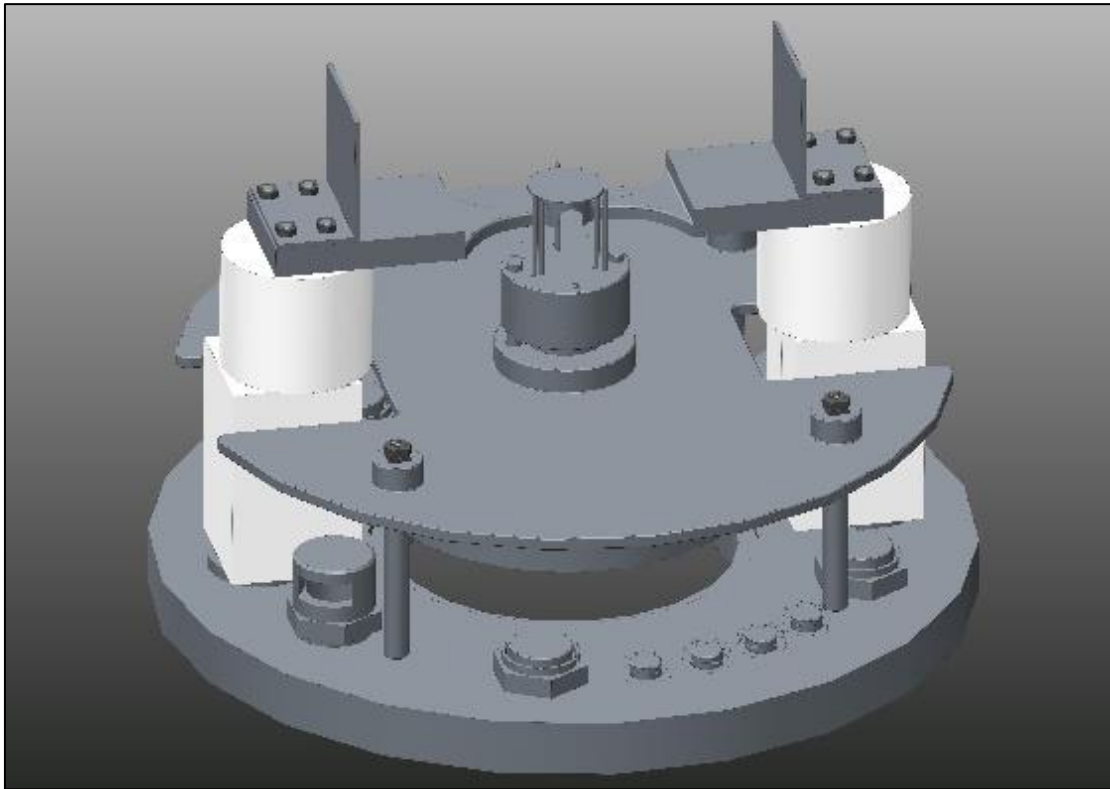


Figura 3.34: rappresentazione grafica del sistema su cui realizzare il modello ad elementi finiti. Il sistema in figura è stato privato della campana che lo contiene per permettere la completa visualizzazione dei componenti all'interno.

Per la realizzazione di un valido modello numerico che rappresenti fedelmente la realtà, è necessario comprendere quali siano i componenti fondamentali, trascurando quelli non significativi per la tipologia di analisi.

Pertanto, data la geometria complessa e la vastità del sistema, si è reso necessario introdurre delle semplificazioni per rendere i tempi di calcolo ragionevoli: tali semplificazioni però devono garantire che la rappresentatività del modello non sia compromessa. Sono quindi state rimosse tutte quelle caratteristiche accessorie che, dal punto di vista di un'analisi elettrotermica accoppiata, non hanno influenza significativa nel campo di temperatura o di tensione. Questo significa che non sono state considerate tutte quelle features di accoppiamento tra i vari componenti, quali viti, dadi ed appositi smussi e raccordi. Inoltre, non sono stati considerati tutti gli organi di tenuta, di fondamentale importanza per garantire lo stato di alto vuoto del sistema, ma del tutto ininfluenti per lo studio in oggetto, e gli strumenti di misura ed i canali di collegamento con le pompe, in quanto anche questi ininfluenti ai fini della presente analisi. Infine, è importante sottolineare che il sistema di astine in tungsteno per il sostegno del disco e che gli schermi in tantalio avvitati al crogiolo non sono stati implementati nel modello semplificato, in quanto, sulla base di esperienze pregresse [42], sono risultati del tutto ininfluenti per i risultati dell'analisi elettrotermica in oggetto. In Figura 3.35 è riportata una rappresentazione della geometria semplificata utilizzata per il modello numerico.

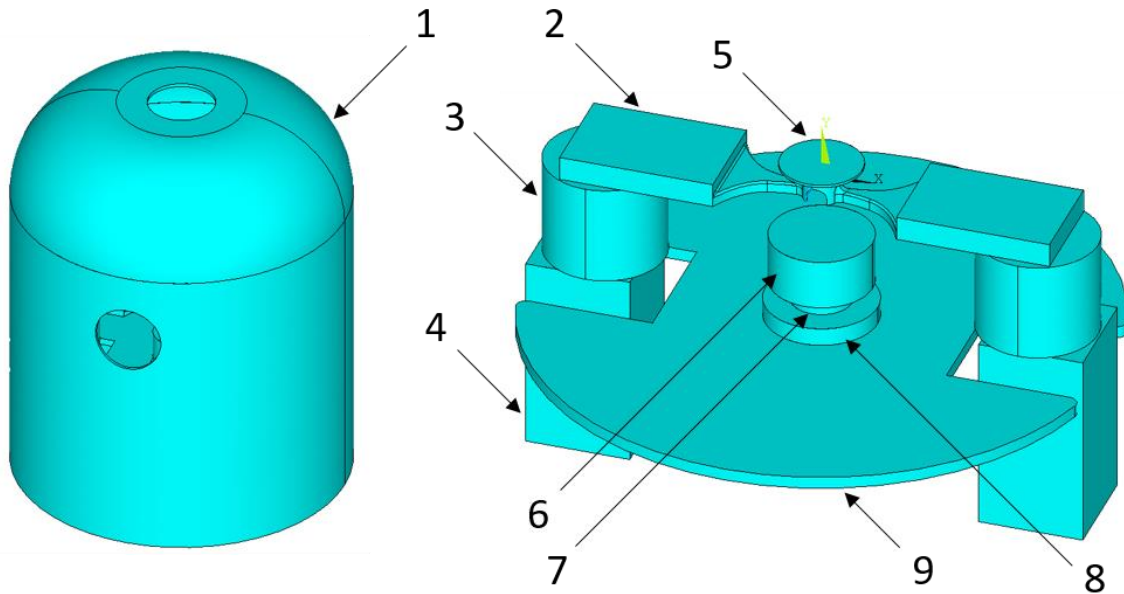


Figura 3.35: raffigurazione del modello numerico semplificato utilizzato per lo studio agli elementi finiti.

Dopo aver definito la geometria del modello, il passo successivo consiste nell'importazione dei volumi nel software FEM; questo è possibile salvando il modello in formato di interscambio IGES (*Initial Graphics Exchange Specification*). Dopo l'importazione dei volumi, risulta di fondamentale importanza eseguire il *vglue* dei componenti (Figura 3.36), attraverso il quale le aree a contatto di volumi adiacenti vengono cancellate e sostituite da un'unica area di interfaccia. In questo modo, i nodi della mesh (che deve essere stesa a valle del *vglue*) sono condivisi dai due volumi a contatto, garantendo la continuità. Un errore in questa fase può essere critico: se infatti non venisse eseguito il *vglue* di due volumi di uno stesso corpo, questi non sarebbero in contatto termico diretto e le aree di interfaccia scambierebbero calore per irraggiamento con fattori di vista unitari. Inoltre, se i volumi in considerazione fossero oggetto di passaggio di corrente, il circuito risulterebbe interrotto. È bene precisare che dopo l'operazione di *vglue* i volumi risultano accoppiati in modo perfetto, come se fossero saldati, indipendentemente dal materiale di cui sono composti.

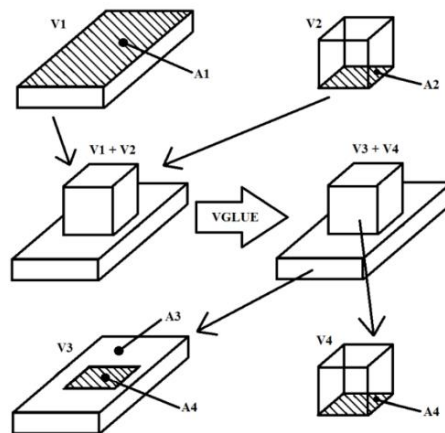


Figura 3.36: schematizzazione dell'operazione *vglue* dopo l'importazione dei volumi.

3.4.3 Scelta dell'elemento e stesura della mesh

La scelta del tipo di elemento è un passo fondamentale per la realizzazione di un modello numerico, in quanto deve rispecchiare lo scopo dell'analisi che si vuole effettuare. Le tipologie di elemento che è possibile utilizzare si differenziano in base ad alcune caratteristiche:

- il numero di dimensioni prevalenti: esistono elementi monodimensionali (1D), come aste e travi, bidimensionali (2D), come gli elementi shell, e tridimensionali (3D), i brick.
- il numero di nodi per elemento: elementi con molti nodi per elemento vanno a convergenza con mesh meno fitta;
- il tipo di analisi che è possibile effettuare: alcuni elementi sono dedicati ad un solo tipo di analisi, ad esempio strutturale o termica, altri consentono analisi accoppiate in cui entrano in gioco più campi fisici. Questa caratteristica è legata al numero e al tipo di gradi di libertà per nodo.

Nel presente studio, è necessario simulare il comportamento elettro-termico di un assieme molto complesso, quindi sono stati utilizzati gli elementi SOLID90 e SOLID226, entrambi elementi brick da 20 nodi, ma dotati di differenti gradi di libertà nodali (Figura 3.37). Nei volumi non soggetti al passaggio di corrente, cioè quelli in cui non è necessario l'utilizzo del grado di libertà relativo alla tensione elettrica, come la campana, il disco, la piastra, la base, la vite ed il cilindro sopra la piastra, è utilizzato l'elemento SOLID90, ovvero il brick da 20 nodi dotato di un solo grado di libertà nodale, la temperatura. Con questo elemento è possibile simulare lo scambio termico conduttivo, convettivo e radiativo. Nei volumi soggetti al passaggio di corrente, invece, come il crogiolo, gli elettrodi ed i due cilindri in rame, è utilizzato l'elemento SOLID226, brick a 20 nodi avente gradi di libertà la temperatura e la tensione elettrica.

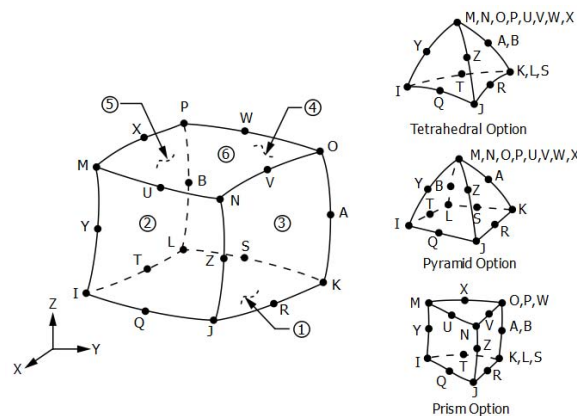


Figura 3.37: rappresentazione dell'elemento brick a 20 nodi che caratterizza gli elementi SOLID90 e SOLID226 presenti all'interno della libreria di Ansys®.

La stesura della mesh consiste nella discretizzazione della geometria in nodi ed elementi e costituisce un passaggio molto importante da cui dipende la validità del modello. La dimensione dell'elemento con cui viene suddiviso un volume o una superficie caratterizza l'approssimazione della soluzione: una mesh fitta, ovvero dotata di elementi di piccole dimensioni e molti nodi, fornisce risultati meno approssimati rispetto ad una mesh più rada; di contro, appesantisce il modello allungando i tempi di calcolo. Per questo motivo, è opportuno utilizzare mesh fitte solo sui volumi o sulle aree critiche per l'analisi. Nel presente caso, in cui sono coinvolte analisi elettro-termiche accoppiate, è necessario stendere mesh fitte laddove ci si aspetta forti variazioni di temperatura e mesh rade dove si prevede che la temperatura sia omogenea o sia caratterizzata da variazioni contenute. Per garantire l'utilizzo di elementi di dimensione sufficientemente piccola che sia in grado di fornire risultati sufficientemente accurati senza appesantire troppo il modello, è necessario effettuare un'analisi di convergenza per ogni volume discretizzato. Tale analisi consiste nel risolvere il modello con infittimenti progressivi della mesh del volume considerato monitorando l'andamento del massimo valore del parametro interessante per l'analisi, ad esempio la temperatura massima in un'analisi termica. Diagrammando i risultati ottenuti in funzione di un parametro geometrico rappresentativo del grado di infittimento, è possibile tracciare una curva in cui si evidenzia una fase iniziale di salita seguita da un plateau. È essenziale impostare la dimensione di elemento la più grande possibile, che consenta però di essere a convergenza, ovvero alla destra del ginocchio nel diagramma considerato. Nella Tabella 3.1 sono riportate le dimensioni di elemento utilizzate per i vari volumi del modello; è da sottolineare che la scelta è stata presa facendo riferimento ad una precedente tesi svolta presso LNL, nella quale è stato effettuato il relativo studio di convergenza del modello [42]. Per la stesura della mesh, è necessario definire le proprietà dei materiali dei componenti presenti. Per tale scopo, sono state costruite delle *macro*, cioè dei file di testo contenenti le proprietà d'interesse al variare della temperatura: queste macro vengono richiamate nell'apdl semplicemente riportando il nome del file. Le macro dei materiali utilizzati sono riportate in appendice.

Numero	Nome	Materiale	Tipo di elemento	Dimensione elemento
1	Campana	AISI 304	SOLID90	0.02
2	Crogiolo	Grafite POCO EDM-3®	SOLID226	0.0025
3	Cilindro in rame	Rame	SOLID226	0.012
4	Elettrodo	Rame	SOLID226	0.008
5	Disco	Carburo di silicio Grafite	SOLID90	0.002
6	Base	Grafite POCO EDM-3®	SOLID226	0.012
7	Vite	Grafite POCO EDM-3®	SOLID90	0.012
8	Cilindro sopra la piastra	Grafite POCO EDM-3®	SOLID90	0.012
9	Piastra	Grafite POCO EDM-3®	SOLID90	0.012

Tabella 3.1: componenti costituenti il forno di prova (la numerazione fa riferimento a Figura 3.35).

In Figura 3.38 è riportato il risultato della meshatura.

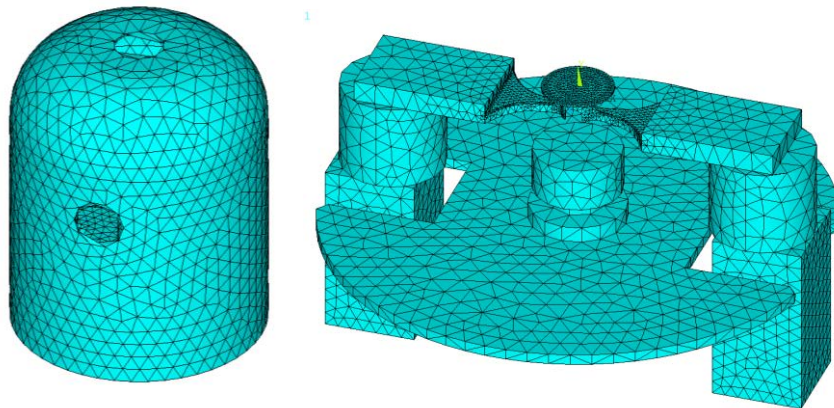


Figura 3.38: risultato della meshatura.

3.4.4 Condizioni al contorno e carichi elettro-termici

Un passo fondamentale durante l'impostazione di un modello è la definizione dei carichi agenti e delle condizioni al contorno da imporre ai gradi di libertà nodali. Di seguito sono elencati tutti i carichi termici ed elettrici e le condizioni al contorno utilizzate.

- Temperatura iniziale di tutti i nodi pari alla temperatura ambiente (20 °C).
- Temperatura di tutti i nodi presenti sulla superficie esterna della campana costante e pari a 18 °C (Figura 3.39). Questo vincolo è dovuto alla presenza di un canale di raffreddamento avvolto attorno alla campana, all'interno del quale scorre acqua in grado di asportare il calore prodotto dai componenti riscaldanti e mantenerla, pertanto, ad una temperatura sufficientemente bassa.

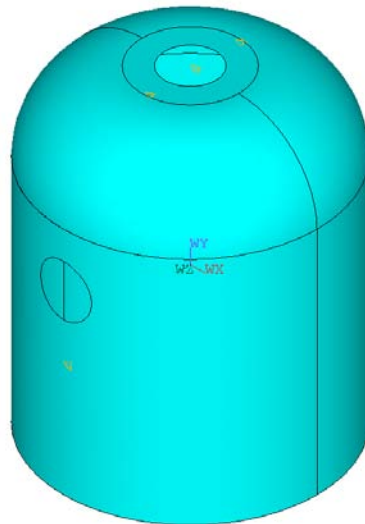


Figura 3.39: vincolo di temperatura imposto sulle superfici esterne della campana.

- Temperatura di tutti i nodi presenti sulle superfici interne dei canali di raffreddamento degli elettrodi costante e pari a 18 °C (Figura 3.40). Questo vincolo è dovuto alla presenza del raffreddamento interno degli elettrodi per mezzo di acqua prelevata dal circuito raffreddante la campana.

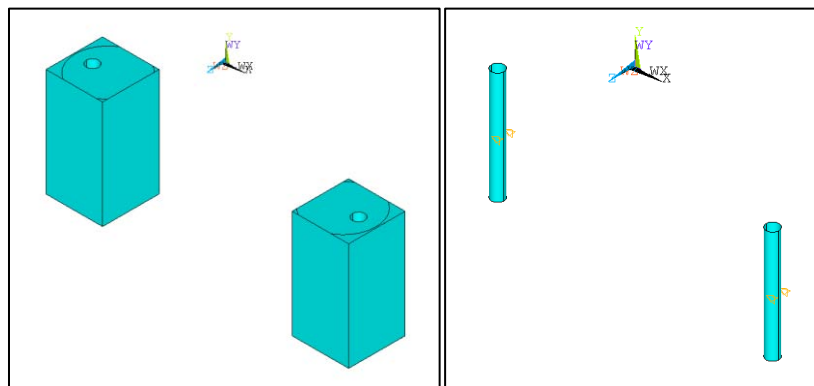


Figura 3.40: rappresentazione del vincolo di temperatura riferito alle superfici interne di raffreddamento degli elettrodi. A sinistra i due elettrodi, a destra la rappresentazione dei canali di raffreddamento con il relativo vincolo.

- Carico di irraggiamento su tutte le superfici tra cui avviene scambio termico per irraggiamento (Figura 3.41). Ogni superficie è caratterizzata da un proprio valore di emissività: l'andamento di tale proprietà al variare della temperatura è tabulato all'interno delle macro di ciascun materiale.

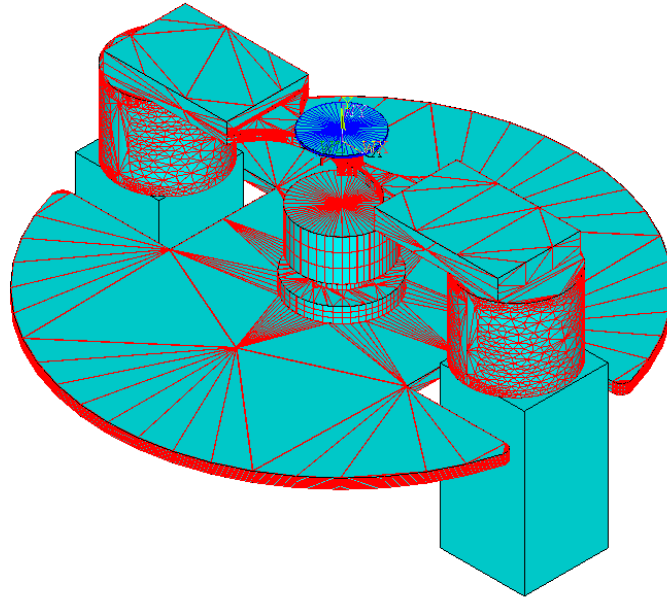


Figura 3.41: carico di irraggiamento sulle superfici irraggianti. Si evidenzia che anche le superfici interne della campana, qui non riportate, irradiano.

- Vincolo di tensione nulla sulla superficie inferiore dell'elettrodo di destra e carico di corrente sulla superficie inferiore dell'elettrodo di sinistra. In questo modo, i due elettrodi, i due cilindri in rame ed il crogiolo sono percorsi da correnti, i cui valori sono stabiliti da un ciclo DO in termini di corrente minima, corrente massima ed incremento.

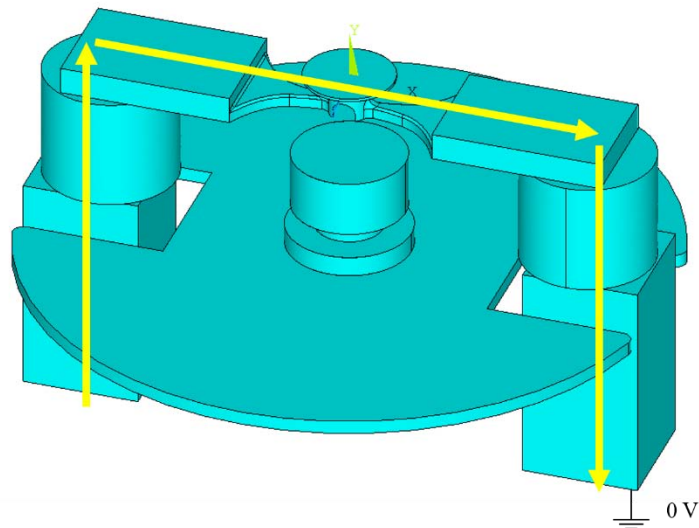


Figura 3.42: circuito elettrico della corrente riscaldante. L'area inferiore dell'elettrodo di destra è posta a 0 V, mentre l'area inferiore dell'elettrodo di sinistra è l'origine del carico di corrente.

3.4.5 Lancio della soluzione

Dopo aver definito la geometria del modello, steso la mesh, definito le condizioni al contorno e applicato i carichi, è possibile passare alla soluzione. Esistono due modalità di risoluzione: *steady state* e *transient*. Nel primo caso il software genera la soluzione con l'utilizzo di un modello in regime stazionario, mentre nel secondo caso vengono considerate anche le fasi transitorie. Risulta evidente che nella seconda modalità i tempi di calcolo sono notevolmente più lunghi, ma si hanno molte più informazioni a disposizione; inoltre, è possibile

conoscere l'evoluzione temporale di tutti i parametri del sistema. Vista la natura variabile del carico elettrico applicato al modello, nel presente caso viene utilizzata la modalità di soluzione *transient*, che risulta inoltre particolarmente indicata nel caso in cui si utilizzi il *Radiosity Solver Method*, poiché ne facilita la convergenza. In questa fase è necessario fornire al programma di calcolo le impostazioni relative al Radiosity Solver, al time stepping, ecc. Tutte queste informazioni sono contenute nell'apdl in appendice.

3.4.6 Analisi dei risultati

La fase finale di uno studio agli elementi finiti è costituita dall'analisi dei risultati. In particolare, Ansys® è in grado di *plottare* i risultati a video mediante l'utilizzo di un'ampia gamma cromatica che rispecchia i valori assunti dai parametri in analisi. A titolo d'esempio, si riporta in Figura 3.43 il plot termico del disco ed il plot di tensione elettrica del crogiolo. Come già illustrato, il pirometro misura la temperatura media di uno spot circolare di diametro 4 mm, pertanto è necessario eseguire tale operazione anche nella fase di postprocessing del modello, al fine di poter confrontare al meglio i risultati. Per fare ciò, il software agli elementi finiti mette a disposizione dei comandi appositi per generare dei *path*; tali comandi sono illustrati nel dettaglio in corrispondenza dell'appendice dedicata.

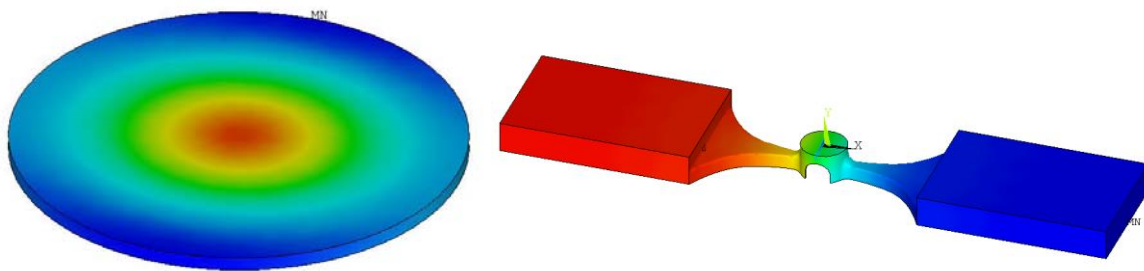


Figura 3.43: a sinistra un plot di temperatura del disco, a destra un plot di tensione elettrica del crogiolo. Si può notare la non perfetta assialsimmetria del campo termico sul disco: il gradiente massimo si verifica in direzione ortogonale al crogiolo.

In verità, il gradiente che si instaura sul disco risulta essere differente da quello misurato dal pirometro: quest'ultimo effettua la media integrale in uno spot circolare di dimensione finita (in centro ed in periferia in direzione ortogonale al crogiolo), pertanto diverso dai valori puntuali di temperatura. Inoltre, la temperatura che l'apparato sperimentale è in grado di rilevare è situata in corrispondenza della superficie superiore del disco, mentre il gradiente massimo si verifica sulla superficie opposta. È chiaro che, sperimentalmente, non è possibile valutare l'entità puntuale di tale gradiente, ma il software agli elementi finiti utilizzato è in grado di risolvere tale problematica.

3.5 Misure sperimentali e confronto con i risultati numerici

Nel presente lavoro di tesi, le prove sperimentali sono eseguite aumentando progressivamente la corrente elettrica che percorre il riscaldatore che, per effetto Joule, la dissipa aumentando la propria temperatura; il disco, posto al di sopra della sommità centrale del crogiolo, viene irraggiato e riscaldato secondo le leggi che governano lo scambio di calore per irraggiamento. In Figura 3.44 è mostrato l'andamento della corrente riscaldante durante una prova: essa viene aumentata, con step di 5 A ciascuno, fino al raggiungimento della massima corrente desiderata, per poi diminuire con step di medesima ampiezza. La permanenza a ciascun valore di corrente è determinata sulla base di precedenti studi [42] e corrisponde ad un tempo di 870 s (14,5 minuti): tale valore è tarato per permettere al sistema di raggiungere un equilibrio elettrotermico stabile senza subire brusche variazioni che lo potrebbero danneggiare.

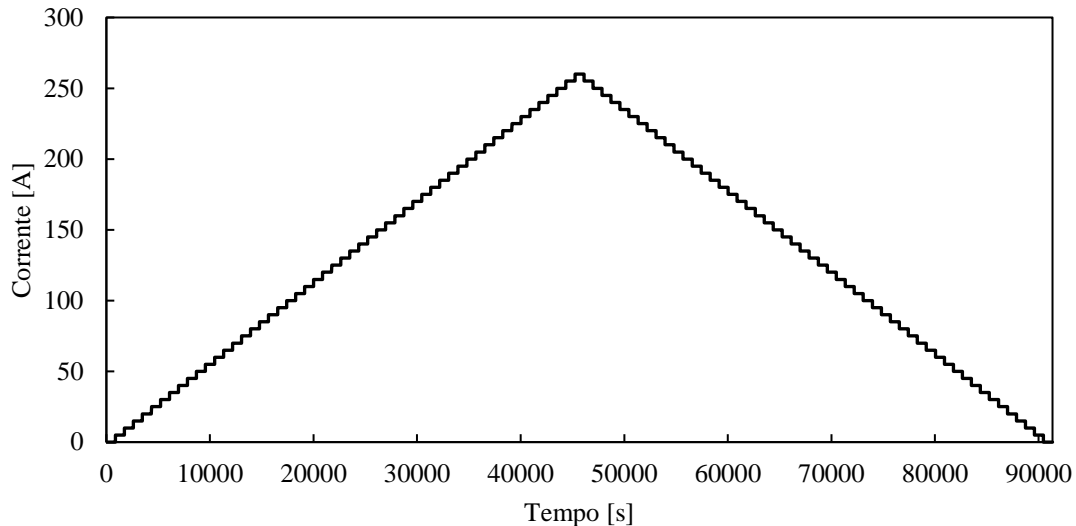


Figura 3.44: andamento della corrente riscaldante durante una prova sperimentale.

Prima di avviare il riscaldamento, è necessario disporre correttamente il pirometro di misura che, durante ciascuna prova, monitora la temperatura del disco in corrispondenza del suo centro o della sua periferia in direzione ortogonale al crogiolo (Figura 3.45). Il pirometro acquisisce la temperatura della zona selezionata con una frequenza di un dato/minuto, pertanto, durante ogni singolo step di corrente, si acquisiscono 14 valori di temperatura che, successivamente, devono essere filtrati e mediati per ottenere un valore significativo. Eseguendo, durante ogni singola prova, una rampa di riscaldamento ed una di raffreddamento, in cui, rispettivamente, la corrente aumenta e diminuisce, si acquisiscono, per ogni valore di corrente, due serie di valori che, mediate, forniscono il corretto valore di temperatura.

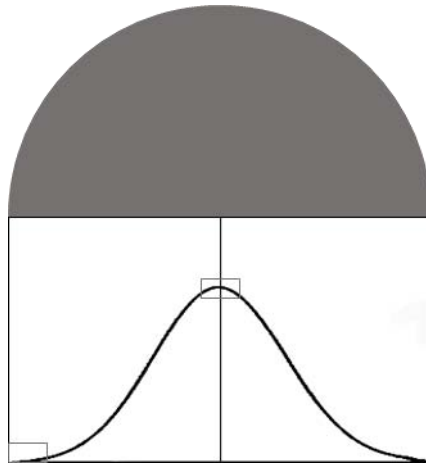


Figura 3.45: distribuzione di temperatura radiale sul disco. All'interno dei tre riquadri sono riportati i valori di temperatura con i quali il pirometro esegue la media.

3.5.1 Validazione del modello numerico

Dopo la costruzione del modello numerico, è necessario eseguire alcune prove sperimentali necessarie alla sua validazione. Un processo di validazione di un modello numerico consiste nella rilevazione sperimentale di alcuni parametri d'interesse e nel loro confronto con gli stessi parametri calcolati col modello numerico: se essi coincidono, entro un certo valore relativo, la validazione si può considerare andata a buon fine.

Nel presente lavoro di tesi, la validazione numerica è stata eseguita monitorando le temperature in centro ed in periferia di un disco costruito con un materiale di proprietà nota, la grafite EDM-AF5[®] dell'azienda POCO. Pertanto, sono state eseguite delle prove a diverse distanze disco-crogiolo (1 mm, 2.5 mm e 5 mm), registrando le temperature per ogni valore di corrente. Dal confronto con i risultati ottenuti dal modello numerico, si può

considerare il modello validato. Per le distanze di 1 mm e 2,5 mm, le temperature sperimentali e numeriche differiscono per un valore percentuale inferiore ad 1, mentre per la distanza disco-crogiolo pari a 5 mm, tali scostamenti aumentano. Questa evidenza potrebbe essere imputabile all'ipotesi semplificativa con cui lavora il codice di calcolo, assumendo l'emissività di un corpo come emisferica globale, cioè mediata per tutte le lunghezze d'onda e per tutte le direzioni dell'angolo solido (si ricorda che, in realtà, l'emissività è dipendente, oltre che dalla temperatura, dalla frequenza e dalla direzione). Nell'ipotesi di corpo grigio, è corretto assumere emissività indipendente dalla lunghezza d'onda, ma non considerare l'uguaglianza in tutto l'angolo solido. A valle di questa considerazione, si può pensare che l'ipotesi di emissività emisferica globale sia valida con distanze crogiolo-disco piccole, mentre diventi forte per distanze maggiori. Come esempio, in Figura 3.46 si riporta il grafico relativo alla distanza di 2.5 mm.

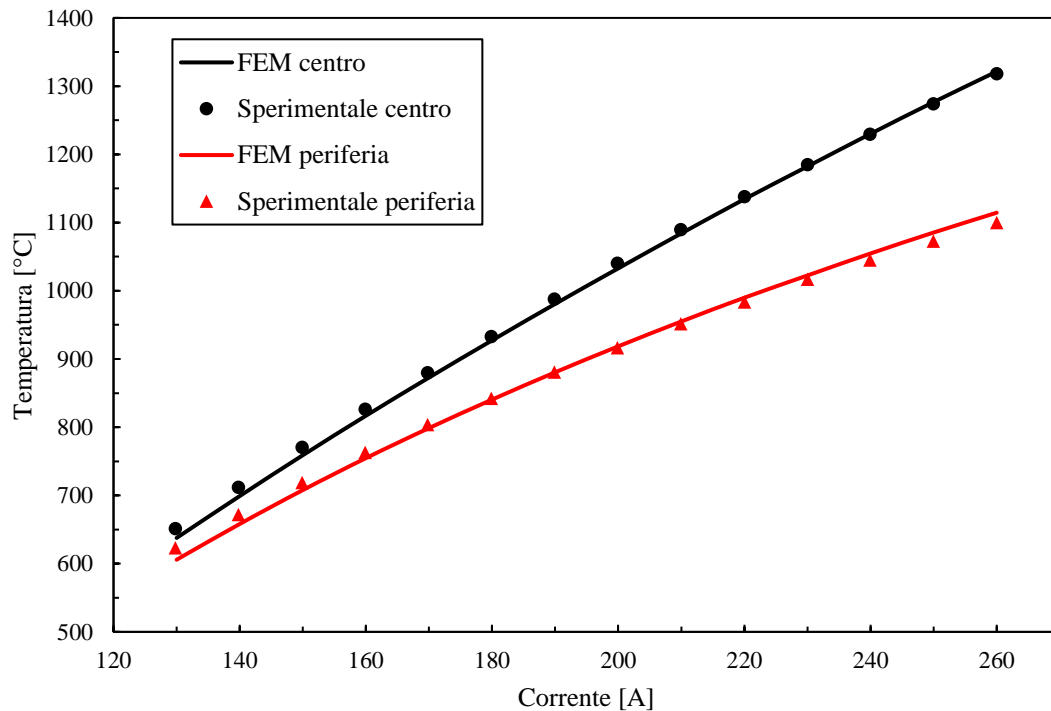


Figura 3.46: confronto tra temperature sperimentali e numeriche per un disco (diametro 30 mm, spessore 1.3 mm) in grafite POCO EDM-AF5®, posto ad una distanza di 2.5 mm dal crogiolo ed utilizzato per validare il modello numerico.

Come precedentemente descritto, l'effettivo gradiente massimo si riscontra mediante l'analisi delle temperature puntuali in corrispondenza della superficie inferiore del disco in direzione ortogonale al crogiolo. A titolo d'esempio, in Figura 3.47 sono riportati i path di temperatura radiali ottenuti dal modello numerico ed eseguiti in corrispondenza della superficie superiore ed inferiore del disco, in direzione parallela ed ortogonale al crogiolo.

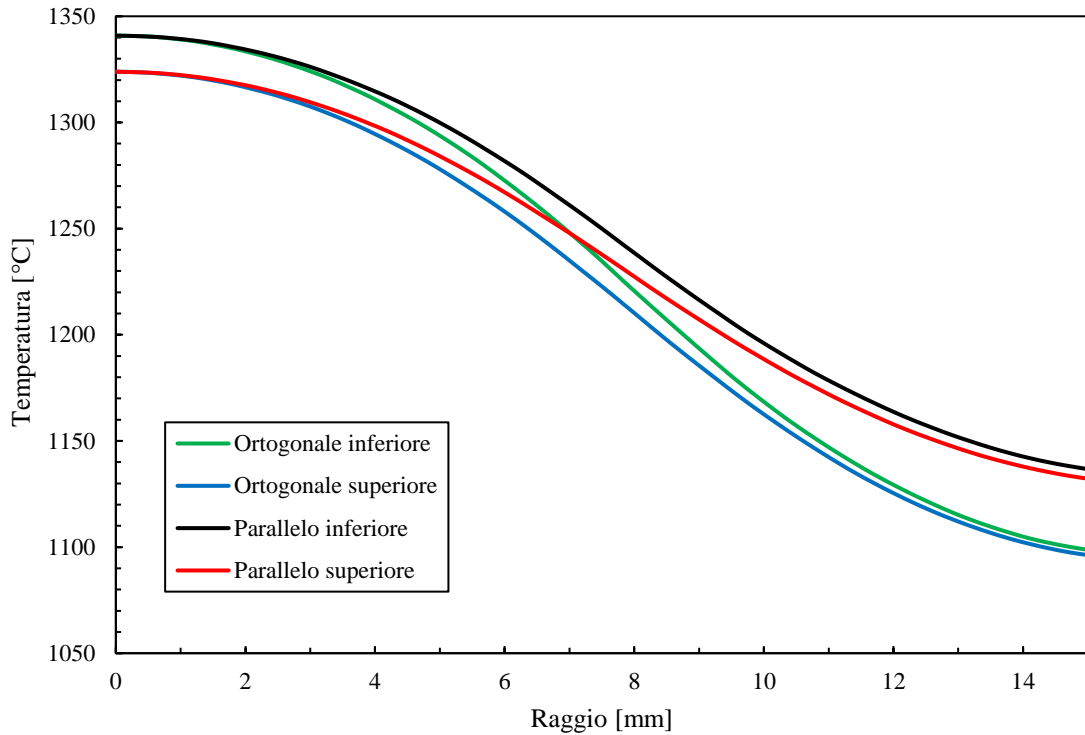


Figura 3.47: path di temperatura radiali per il disco lungo differenti direzioni.

Come aspettato, il gradiente di maggiore entità si verifica in corrispondenza della superficie inferiore del disco ed in direzione ortogonale al crogiolo. Non è possibile prelevarli sperimentalmente, ma il calcolo FEM aiuta: in Tabella 3.2 sono riassunti i gradienti trovati nel medesimo disco:

	T massima [°C]	T minima [°C]	Gradiente [°C]
Spot	1321	1114	207
Ortagonale superiore	1324	1096	228
Ortagonale inferiore	1341	1099	242
Parallelo superiore	1324	1132	192
Parallelo inferiore	1341	1137	204

Tabella 3.2: confronto tra i diversi gradienti presenti sul disco.

È interessante notare che il gradiente stimato con gli spot pirometrici è inferiore rispetto a quello massimo calcolato di 35 °C (una sottostima corrispondente a circa 14%). È importante essere consapevoli di quanto avviene, ma al fine della validazione del modello numerico si continua a considerare il gradiente ottenuto mediante l'utilizzo degli spot.

Successivamente alla validazione del modello numerico per garantire che esso sia in grado di rappresentare correttamente la realtà, è necessario eseguire ulteriori prove sperimentali, con altri materiali d'interesse, al fine di verificare l'esattezza delle loro proprietà e l'affidabilità delle fonti da cui sono state prelevate. In particolare, sono stati utilizzati dischi in carburo di silicio di tipo Hexoloy® SA ed in grafite POCO EDM-3®, i cui datasheet sono stati ricavati da studi presenti in letteratura [34] [43]. A titolo d'esempio, si riporta il confronto delle temperature numeriche e sperimentali per il carburo di silicio in oggetto per una distanza disco-crogiolo pari ad 1 mm (Figura 3.48).

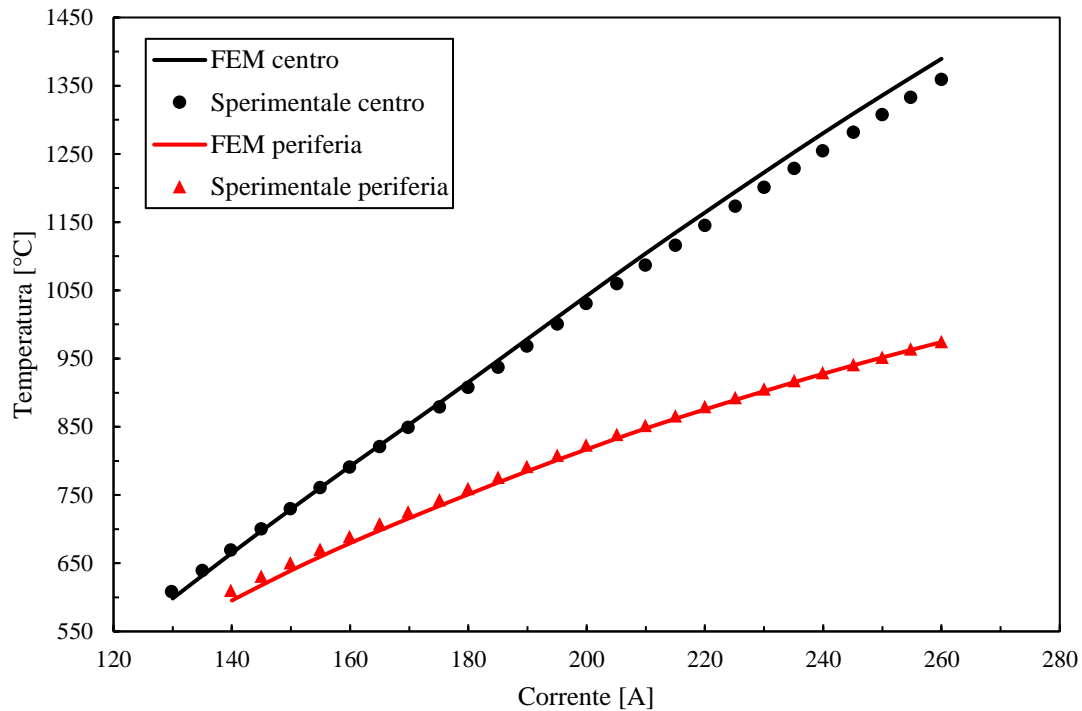


Figura 3.48: confronto tra temperature sperimentali e numeriche per un disco (diametro 40 mm, spessore 1.3 mm) in carburo di silicio Hexoloy® SA, posto ad una distanza di 1 mm dal crogiolo ed utilizzato per validare le proprietà trovate in letteratura.

3.5.2 Metodo della funzione ottima applicato

Come descritto precedentemente, il metodo della funzione ottima permette di stimare la conducibilità termica di un materiale sfruttando strumenti di tipo sperimentale e numerico. In primo luogo, è necessario effettuare delle misure di temperatura sul disco; in secondo luogo, è necessario utilizzare tali temperature come input dell'algoritmo di calcolo.

L'algoritmo sfruttato per trovare il minimo della funzione di conducibilità risulta essere di elevata laboriosità computazionale; inoltre, all'interno del codice è presente il modello numerico dell'apparato sperimentale, di altrettanta complessità. La scrittura di un codice e la sua esattezza è funzione della bravura di colui che lo progetta: nonostante gli importanti riferimenti a disposizione [44] [42], è molto facile commettere errori che possano compromettere i risultati finali. Nel caso in cui il risultato finale sia incognito, come la conducibilità termica di un materiale non ancora caratterizzato, è molto difficile, se non impossibile, che il programmatore si accorga dei *bug* presenti nel codice. Pertanto, dopo aver costruito l'intero modello, è necessario validarlo. A tal fine, è indispensabile utilizzare un materiale di conducibilità termica nota, eseguire delle misure di temperature sul disco e ricavare la conducibilità mediante il metodo della funzione ottima. Dal confronto tra la conducibilità termica da datasheet e quella ricavata dal modello numerico, si verifica l'esattezza dell'algoritmo. Per mettere in pratica quanto appena descritto, è stata utilizzata la grafite POCO EDM-AF5®: dopo aver eseguito alcune prove sperimentali, è stata stimata la conducibilità termica mediante l'utilizzo di una funzione lineare del tipo

$$\lambda(T) = C_0 + C_1 \cdot T \quad 3.21$$

Quanto ottenuto è riportato in Figura 3.49. È da sottolineare che le misure sperimentali sono state effettuate in un campo di temperatura compreso tra i 600 °C ed i 1300 °C, pertanto l'approssimazione lineare è valida solo all'interno di questo intervallo (al di fuori è necessario eseguire estrapolazioni che potrebbero portare a notevoli errori d'approssimazione).

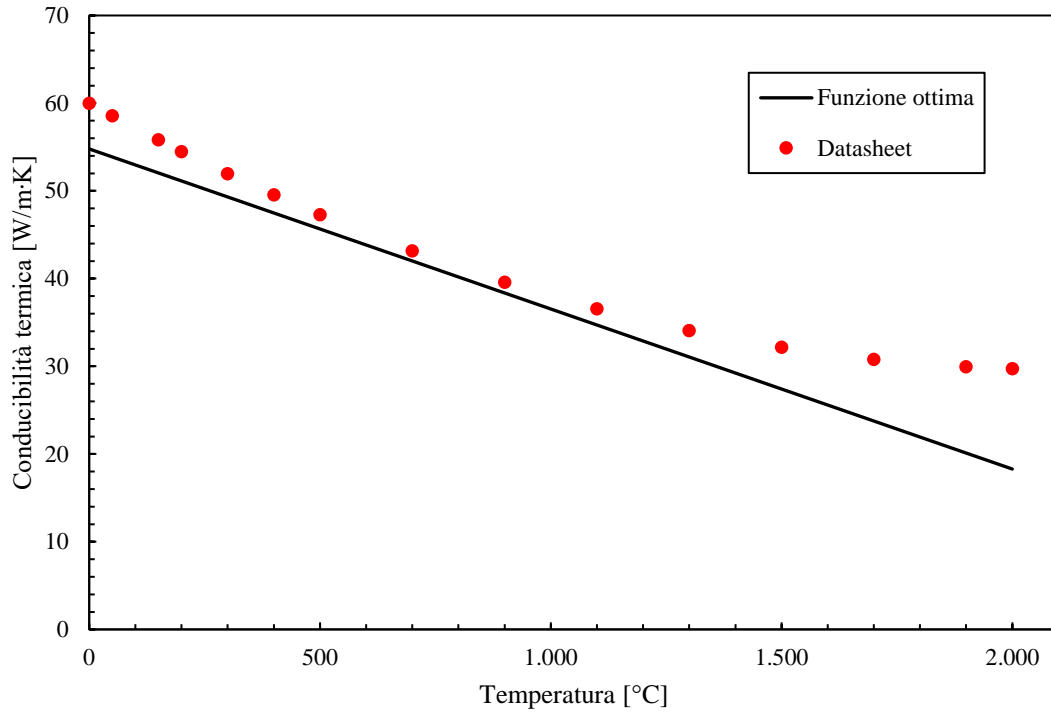


Figura 3.49: stima della conducibilità termica della grafite POCO EDM-AF5® mediante l'applicazione del metodo della funzione ottima con una relazione lineare.

C_0	54,782698
C_1	0,0182476
RQ	1988.001

Tabella 3.3: parametri di output del metodo della funzione ottima applicato al caso di Figura 3.49.

In Figura 3.50 ed in Figura 3.51 sono riportati gli andamenti delle costanti del polinomio e del residuo RQ in funzione del numero dell'iterazione. In totale sono state effettuate 30 iterazioni.

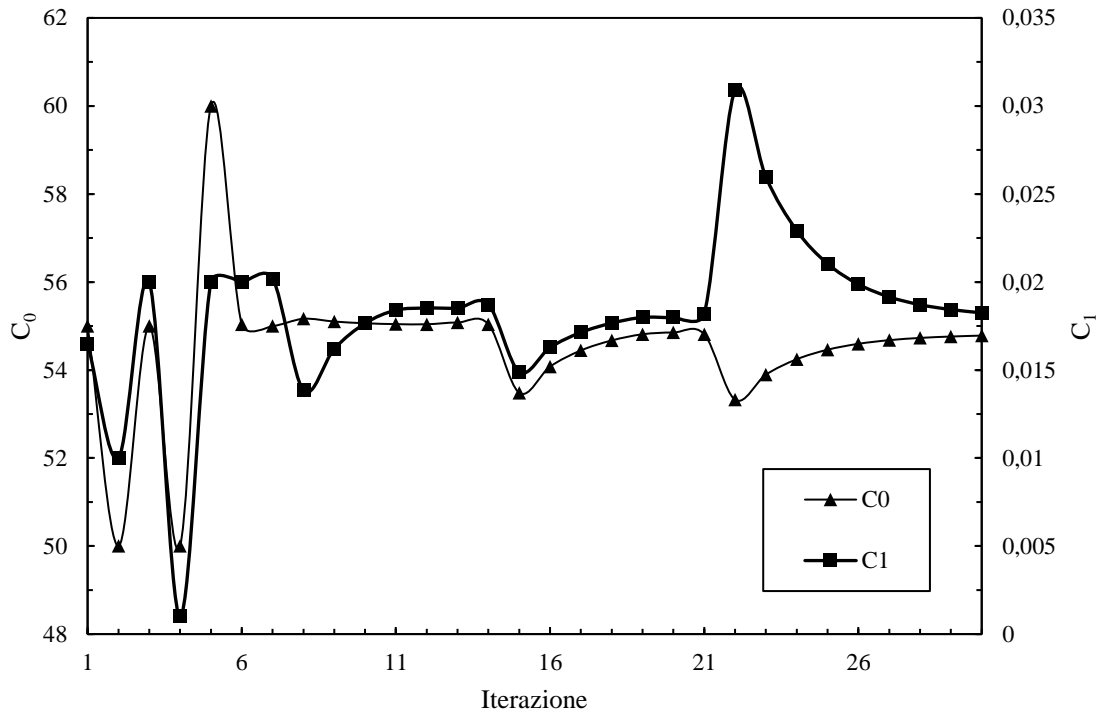


Figura 3.50: andamento delle costanti del polinomio in funzione del numero dell'iterazione.

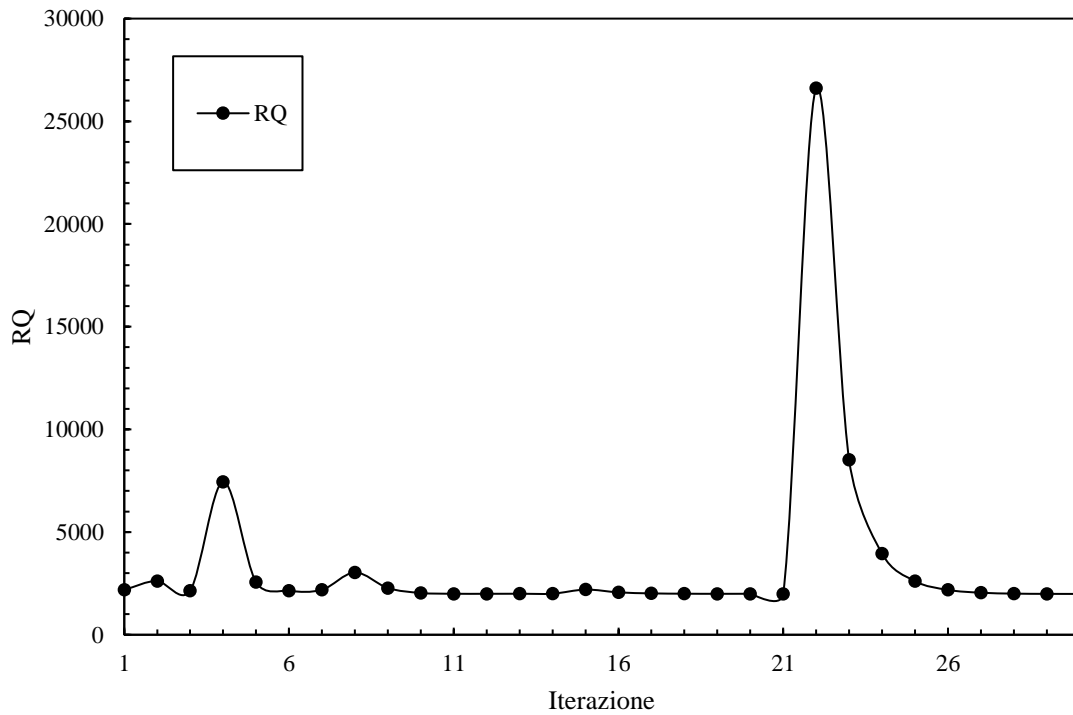


Figura 3.51: andamento del residuo RQ in funzione del numero dell'iterazione.

Come si evince da Figura 3.49, l'approssimazione di una conducibilità termica lineare con la temperatura è grossolana, anche se limitata al campo di temperature in esame. A valle di questa considerazione, è comprensibile l'utilità dell'introduzione di un modello di secondo grado del tipo:

$$\lambda(T) = C_0 + C_1 \cdot T + C_2 \cdot T^2 \quad 3.22$$

L'utilizzo di un modello quadratico introduce un'incognita in più rispetto al modello del secondo ordine, pertanto può risultare di più difficile convergenza. In Figura 3.52 è riportata la curva di conducibilità ottenuta: è evidente la sua validità all'interno del campo di temperature considerato (600 °C - 1300 °C), ma anche una possibile estrapolazione a temperature inferiori o superiori può garantire approssimazioni contenute.

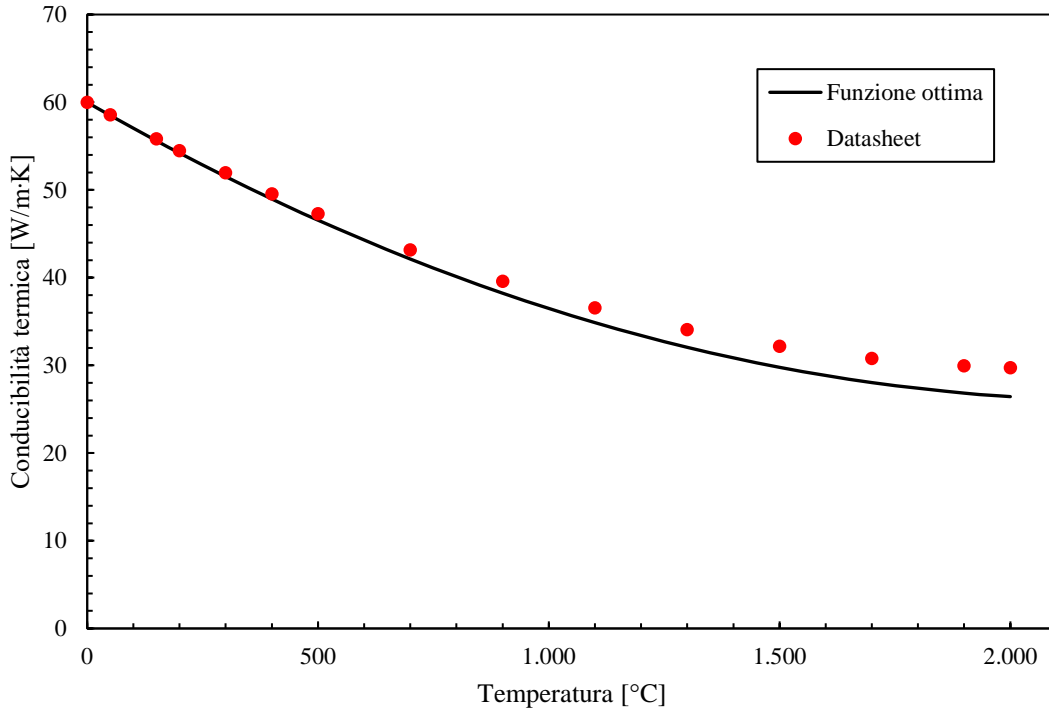


Figura 3.52: stima della conducibilità termica della grafite POCO EDM-AF5® mediante l'applicazione del metodo della funzione ottima con una relazione quadratica.

C_0	59,98663
C_1	0,030433
C_2	6,7E-06
RQ	1357,518

Tabella 3.4: parametri di output del metodo della funzione ottima applicato al caso di Figura 3.52

In Figura 3.53 ed in Figura 3.54 sono riportati gli andamenti delle costanti del polinomio e del residuo RQ in funzione del numero dell'iterazione. In totale sono state effettuate 34 iterazioni.

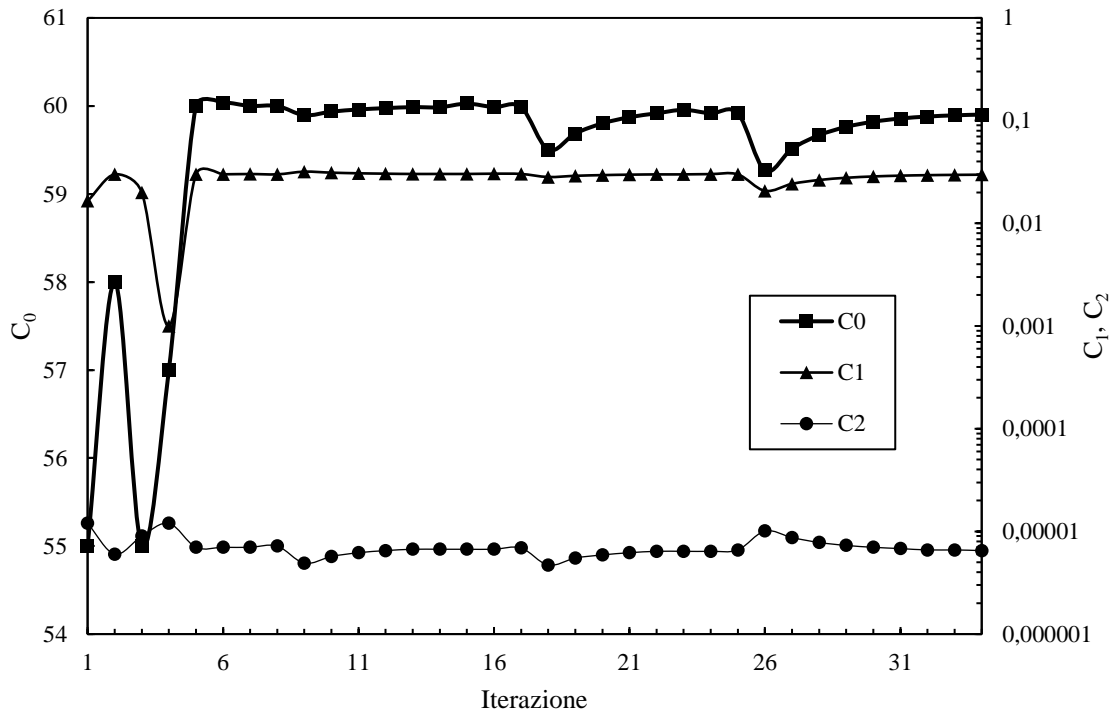


Figura 3.53: andamento delle costanti del polinomio in funzione del numero dell'iterazione.

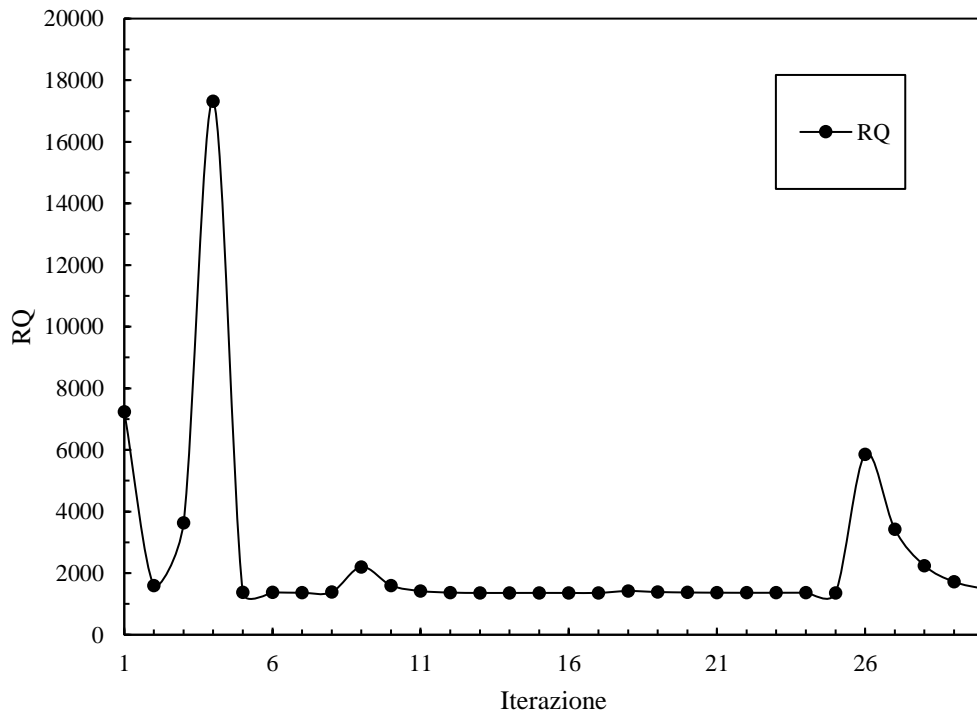


Figura 3.54: andamento del residuo RQ in funzione del numero dell'iterazione.

Dopo aver validato il l'algoritmo di ottimizzazione mediante l'utilizzo di un materiale la cui conducibilità termica è nota con un elevato grado di sicurezza, si è deciso di stimare la conducibilità termica dei due materiali d'interesse per il progetto, il SiC Hexoloy® SA e la grafite POCO EDM-3®, confrontandola con quanto reperibile in letteratura. L'algoritmo utilizzato sfrutta le temperature sperimentali in centro ed in periferia e la

funzione di conducibilità utilizza un polinomio di secondo grado. I risultati sono riportati in Figura 3.55 ed in Figura 3.58.

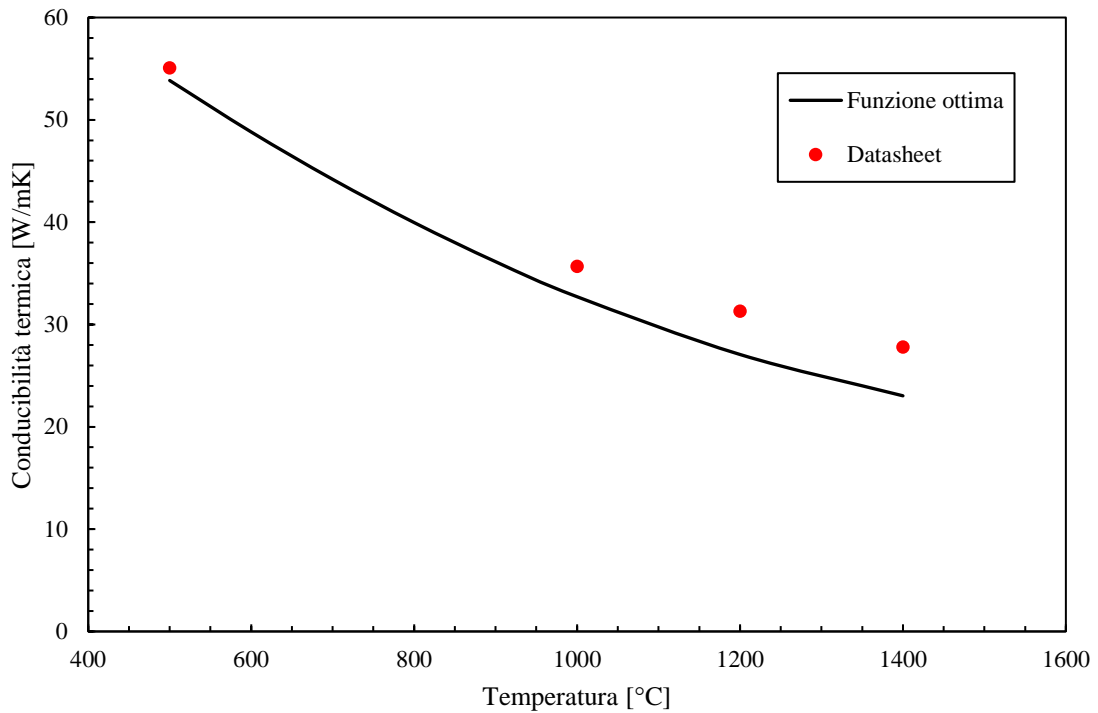


Figura 3.55: stima della conducibilità termica del carburo di silicio Hexoloy® SA mediante l'applicazione del metodo della funzione ottima con una relazione quadratica.

C_0	85,00158
C_1	0,072348
C_2	2,10E-05
RQ	7017

Tabella 3.5: parametri di output del metodo della funzione ottima applicato al caso di Figura 3.55.

In Figura 3.56 ed in Figura 3.57 sono riportati gli andamenti delle costanti del polinomio e del residuo RQ in funzione del numero dell'iterazione. In totale sono state effettuate 52 iterazioni.

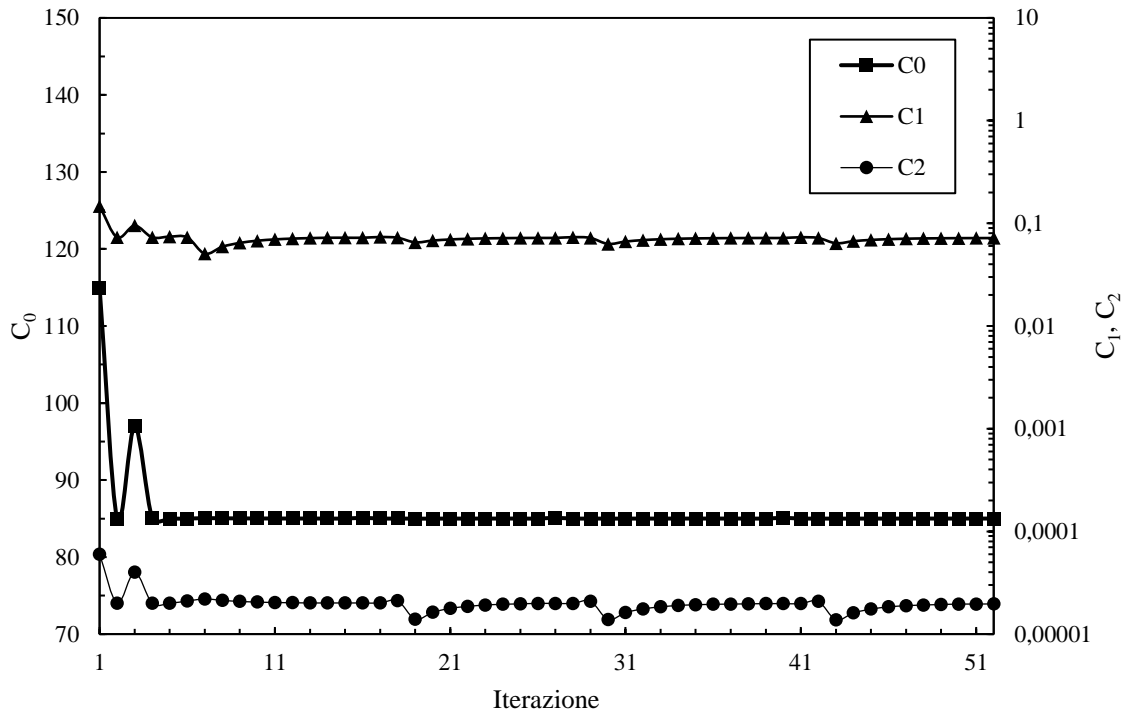


Figura 3.56: andamento delle costanti del polinomio in funzione del numero dell'iterazione (Hexoloy® SA).

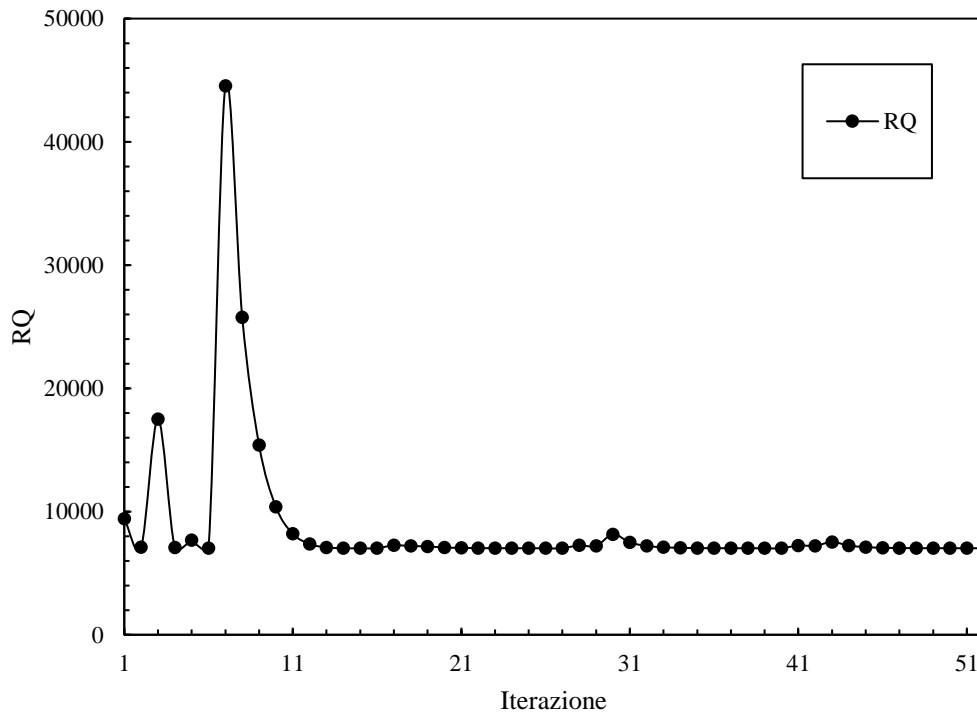


Figura 3.57: andamento del residuo RQ in funzione del numero dell'iterazione (Hexoloy® SA).

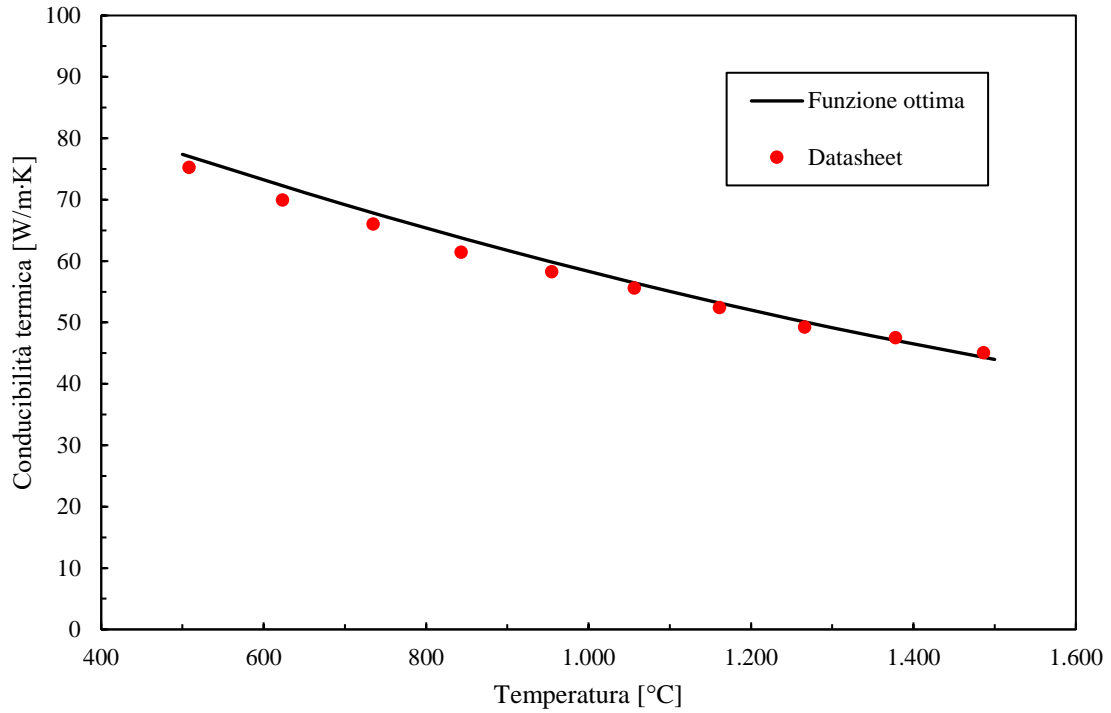


Figura 3.58: stima della conducibilità termica della grafite POCO EDM-3® mediante l'applicazione del metodo della funzione ottima con una relazione quadratica.

C_0	101,1712830
C_1	0,0523279
C_2	9,47E-06
RQ	8253

Figura 3.59: parametri di output del metodo della funzione ottima applicato al caso di Figura 3.58

In Figura 3.60 ed in Figura 3.61 sono riportati gli andamenti delle costanti del polinomio e del residuo RQ in funzione del numero dell'iterazione. In totale sono state effettuate 75 iterazioni.

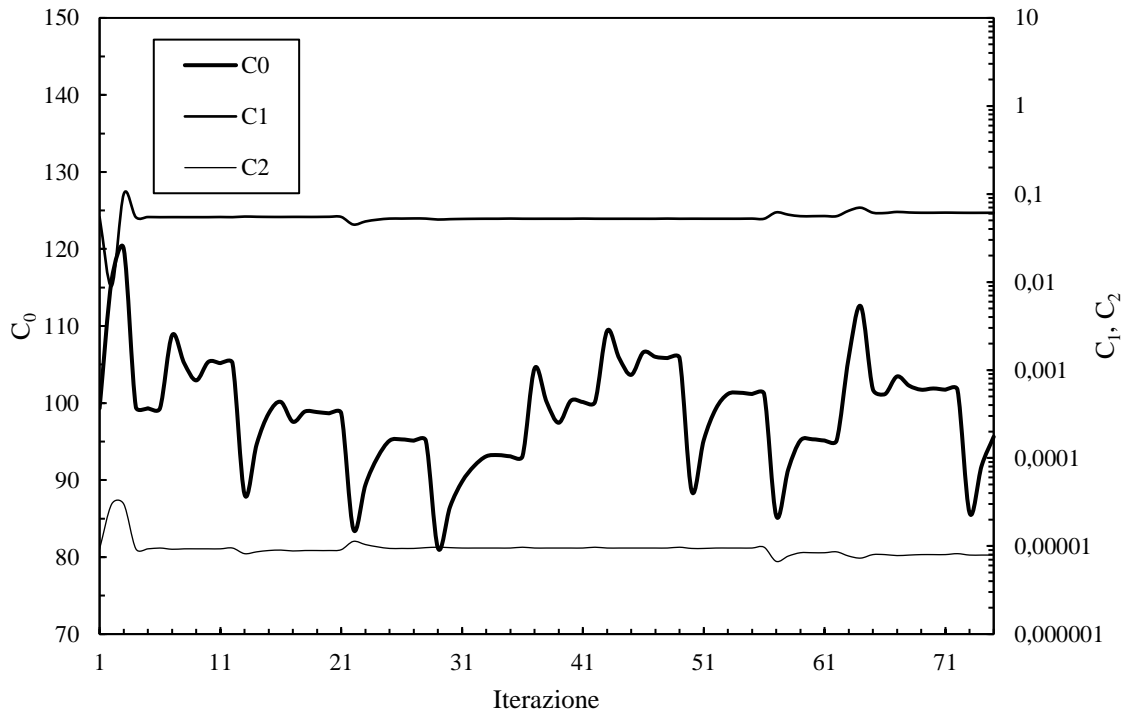


Figura 3.60: andamento delle costanti del polinomio in funzione del numero dell'iterazione (POCO EDM-3®).

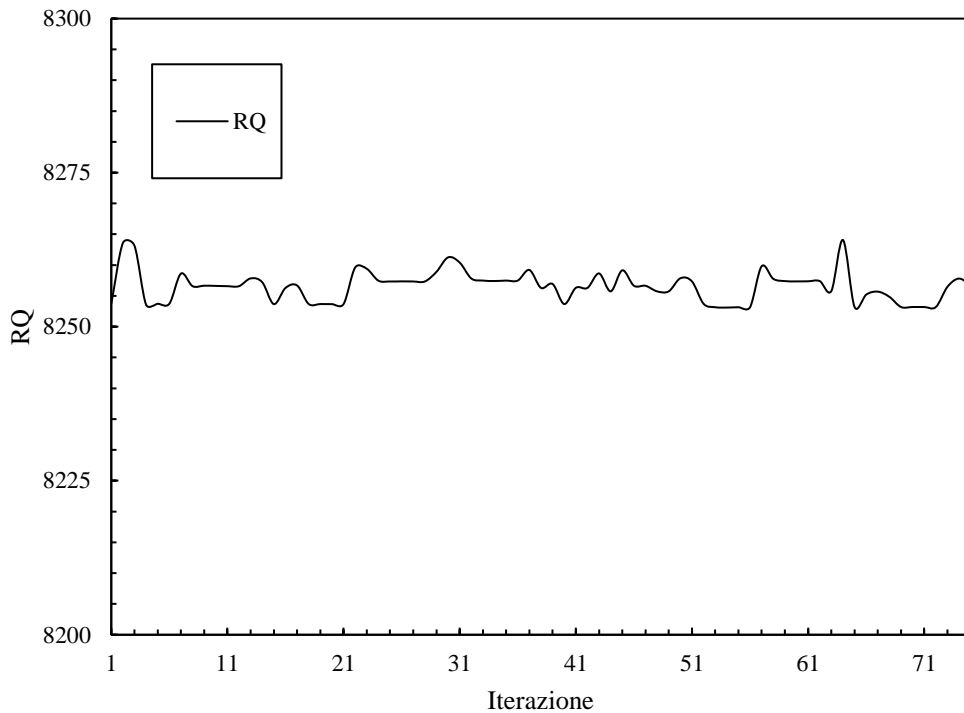


Figura 3.61: andamento del residuo RQ in funzione del numero dell'iterazione (POCO EDM-3®).

Le conducibilità termiche ottenute per i due materiali mediante il metodo della funzione ottima sono compatibili con quanto presente in letteratura con scostamenti inferiori al 1% per la grafite POCO EDM-3®, mentre attorno al 10% per il SiC SA. I valori dei residui RQ sono più elevati rispetto a quanto ottenuto con la grafite POCO EDM-AF5®; inoltre la curva di conducibilità si può considerare valida solamente all'interno del

campo di temperature misurato ($600\text{ °C} < T < 1400\text{ °C}$), in quanto estrapolazioni al di fuori di tale intervallo possono comportare gravi approssimazioni.

Un ulteriore passo può consistere nell'estensione del metodo a materiali con conducibilità termica ignota: è proprio il caso del carburo di uranio che, una volta sinterizzato in dischi, dovrà essere testato e caratterizzato. Data la momentanea impossibilità di effettuare misure di conducibilità sul carburo di uranio, è stato scelto di utilizzare un carburo di silicio disponibile presso i LNL, l'Hexoloy® SiC SE, non ancora caratterizzato se non a temperature basse (inferiori a 400 °C).

In Figura 3.62 è riportata la curva di conducibilità del carburo di silicio in esame, ricavata utilizzando il metodo della funzione ottima con un modello quadratico, i cui valori delle costanti sono riportati in Tabella 3.6.

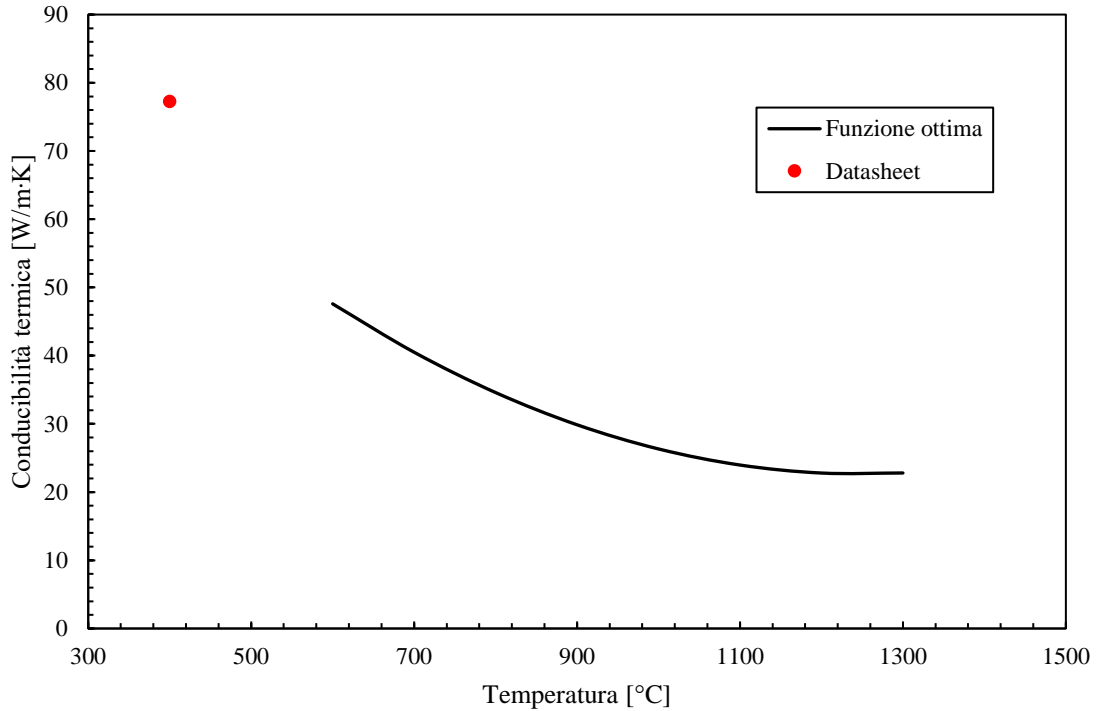


Figura 3.62: curva di conducibilità del carburo di silicio Hexoloy® SE ricavata mediante l'applicazione del metodo della funzione ottima utilizzando una funzione di secondo grado.

C_0	114,991378
C_1	0,147831
C_2	0,000059
RQ	19758

Tabella 3.6: parametri di output del metodo della funzione ottima applicato al caso di Figura 3.62

In Figura 3.60 ed in Figura 3.64 sono riportati gli andamenti delle costanti del polinomio e del residuo RQ in funzione del numero dell'iterazione. In totale sono state effettuate 49 iterazioni.

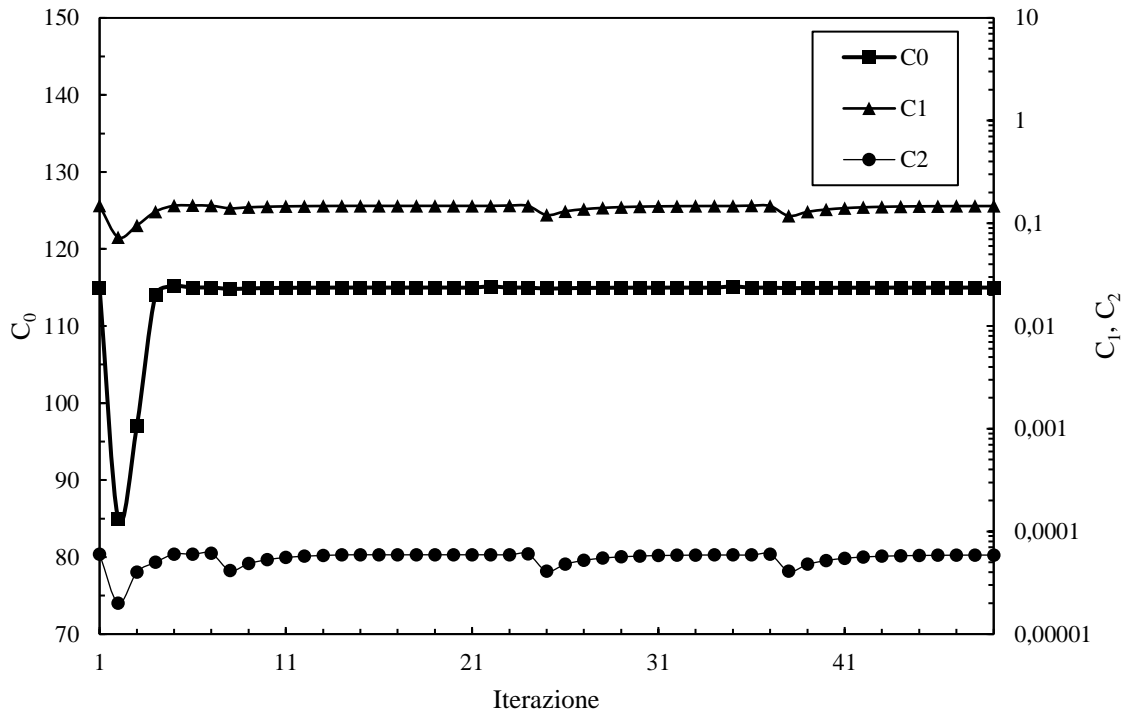


Figura 3.63: andamento delle costanti del polinomio in funzione del numero dell'iterazione.

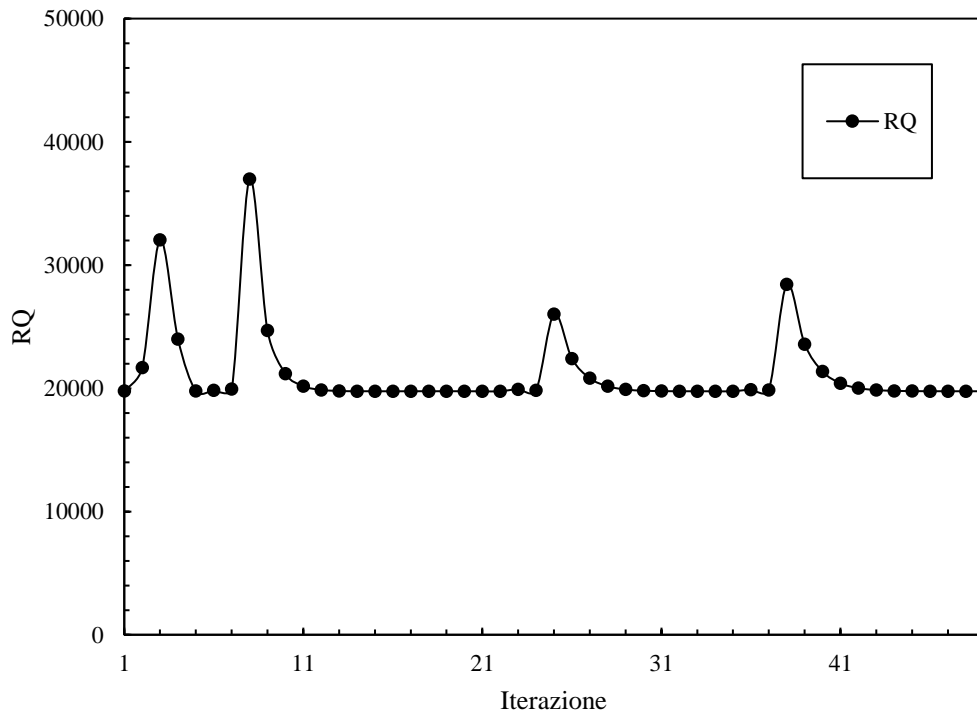


Figura 3.64: andamento del residuo RQ in funzione del numero dell'iterazione.

Data l'impossibilità di validare la curva di conducibilità utilizzando studi presenti in letteratura, è necessario confrontare le temperature sperimentali con le temperature del modello numerico, all'interno del quale è inserita una macro contenente i valori di conducibilità appena ricavati col metodo della funzione ottima. In Figura 3.65 è riportato tale confronto: non esiste una perfetta concordanza tra i valori numerici e sperimentali, in particolar modo in corrispondenza della periferia del disco, ma gli andamenti delle temperature sono

rispettati, pertanto si può concludere che il metodo è utilizzabile per la stima della conducibilità termica di un materiale.

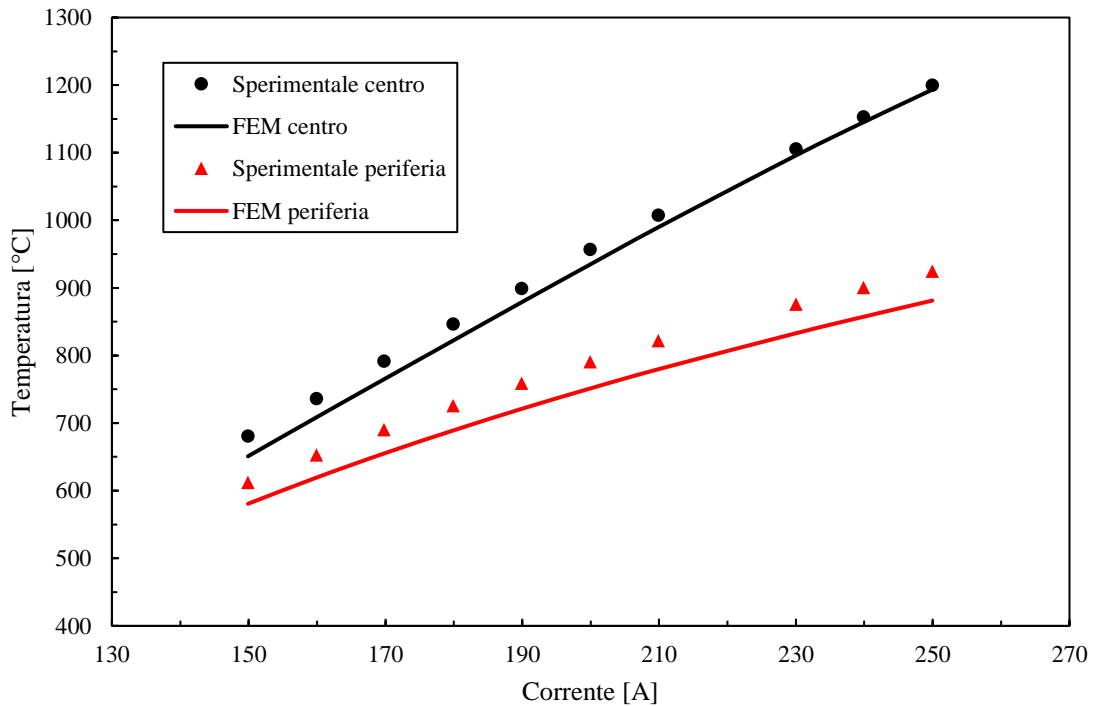


Figura 3.65: confronto tra le temperature sperimentali e le temperature numeriche ottenute con l'utilizzo della conducibilità termica stimata attraverso il metodo della funzione ottima.

3.6 Conclusioni

La conducibilità termica di un materiale gioca un ruolo importante nello studio dei componenti presenti nel progetto SPES; in particolare, la conoscenza della distribuzione di temperatura sul target è fondamentale per la determinazione delle tensioni a cui è soggetto. Per lo studio dei gradienti termici radiali sui dischi, è stato utilizzato l'apparato sperimentale presente in laboratorio alte temperature ai LNL, in grado di rilevare le temperature su diverse zone del disco. In parallelo, è stato sviluppato un modello numerico in grado di rispecchiare la realtà sperimentale ed utile per la determinazione, attraverso il metodo della funzione ottima, della conducibilità termica di materiali non caratterizzati. Per la validazione del modello numerico e del metodo, è stata utilizzata una grafite le cui proprietà sono ben note (grafite POCO EDM-AF5[®]) e, successivamente, è stato utilizzato il modello per validare le proprietà della grafite POCO EDM-3[®], ampiamente utilizzata per la costruzione di componenti nel target e lungo la linea, e del carburo di silicio Hexoloy[®] SA, candidato alla costruzione dei dischi target. Successivamente, è stato utilizzato il metodo della funzione ottima per stimare la conducibilità termica del carburo di silicio Hexoloy[®] SE, materiale non ancora caratterizzato ad alte temperature.

CAPITOLO 4

Test di rottura di dischi sottoposti ad elevati gradienti termici

“Cogli un fiore sulla Terra
e sposterai la stella più lontana.”

Paul Dirac

4.1 Introduzione

Come già ampiamente discusso, i gradienti termici e le tensioni ad essi dovute sono di notevole pericolo per l'integrità dei dischi target e dei componenti che li circondano: qualora si verificasse una rottura, l'intero target sarebbe compromesso. Pertanto, la determinazione dell'entità delle tensioni termiche che i dischi sono in grado di sopportare risulta essere di notevole importanza. Per eseguire questa tipologia di studio, durante il presente lavoro di tesi è stato utilizzato l'apparato sperimentale per la riproduzione dei gradienti termici ampiamente illustrato nel corso del capitolo 3.

4.2 Stima analitica dello stato tensionale

Le tensioni strutturali di derivazione termica si generano qualora un oggetto, caratterizzato dal proprio coefficiente di dilatazione termica e soggetto a variazioni di temperatura, è impedito a dilatarsi o a contrarsi a causa di vincoli *esterni e/o interni*. Gli stress termici dovuti a vincoli esterni si generano qualora un corpo, vincolato iperstaticamente alla temperatura T, subisce variazioni di temperatura uniformi ΔT . Gli stress termici dovuti, invece, a vincoli interni sopraggiungono nei casi in cui il materiale è costituito da più fasi caratterizzate da valori differenti del coefficiente di dilatazione termica, oppure quando il materiale, monofasico, presenta un coefficiente di dilatazione termica *anisotropo* (variante, cioè, con la direzione); ancora, quando, in seguito ad un elevato flusso termico e ad un valore relativamente basso di conducibilità termica, si generano elevati gradienti di temperatura. In questo ultimo caso, che è quello che si verifica nel caso dei dischi target di SPES, il singolo strato di materiale viene ad essere ostacolato dallo strato adiacente (a diversa temperatura) nella fase di libera deformazione (dilatazione o contrazione a seconda della positività o negatività del coefficiente di dilatazione termica, rispettivamente), manifestando l'insorgenza di tensioni interne. [6]

Prima di effettuare calcoli di tipo numerico, è interessante ottenere una stima analitica dello stato tensionale che si sviluppa su un disco sottoposto ad un gradiente termico. Un metodo che permette di effettuare questo tipo di stima è denominato *strain suppression method* [45], [46]. È importante precisare che il suddetto metodo è in grado di descrivere stress termici derivanti da condizioni di vincolo esterno e da variazioni di temperatura uniformi, quindi non completamente aderente al caso dei dischi target, ma fornisce comunque una stima dello stato tensionale in gioco.

Si considera un parallelepipedo costituito da un materiale omogeneo, isotropo e lineare elastico, con spigoli paralleli agli assi coordinati x, y, z del sistema di riferimento adottato con origine in O. Applicando una tensione σ_x , è possibile esprimere la deformazione in direzione x mediante la relazione

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} \quad 4.1$$

in cui E rappresenta il modulo elastico del materiale. L'estensione in direzione x è compensata da una contrazione nelle direzioni y e z; in particolare, indicando con ν il coefficiente di Poisson del materiale, le componenti di deformazione nelle suddette direzioni possono essere espresse secondo la relazione:

$$\varepsilon_y = \varepsilon_z = -\nu \cdot \frac{\sigma_x}{E} \quad 4.2$$

Se all'elemento in questione vengono applicate in contemporanea le componenti di tensione σ_x , σ_y e σ_z , le corrispondenti componenti di deformazione diventano:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} \cdot [\sigma_x - \nu \cdot (\sigma_y + \sigma_z)] \quad 4.3$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} \cdot [\sigma_y - \nu \cdot (\sigma_x + \sigma_z)]$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} \cdot [\sigma_z - \nu \cdot (\sigma_x + \sigma_y)]$$

Se ora si considera ε come una deformazione di tipo termoelastico, formata da una componente associata allo stato di tensione e da una correlata alla dilatazione termica, è possibile scrivere:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} \cdot [\sigma_x - \nu \cdot (\sigma_y + \sigma_z)] + \alpha \cdot \Delta T \quad 4.4$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} \cdot [\sigma_y - \nu \cdot (\sigma_x + \sigma_z)] + \alpha \cdot \Delta T$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} \cdot [\sigma_z - \nu \cdot (\sigma_x + \sigma_y)] + \alpha \cdot \Delta T$$

in cui α rappresenta il coefficiente di dilatazione termica e ΔT la variazione di temperatura, considerata uniforme in tutto il corpo, rispetto ad un valore iniziale adottato come riferimento.

L'*ipotesi fondamentale* su cui si basa l'intero metodo consiste nel considerare nulle tutte le componenti di deformazione ($\varepsilon_x = \varepsilon_y = \varepsilon_z = 0$). Pertanto, sommando membro a membro le equazioni 4.4 e considerando l'ipotesi suddetta, è possibile ricavare l'espressione della tensione media come:

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z}{3} = -\frac{E \cdot \alpha \cdot \Delta T}{(1 - 2\nu)} \quad 4.5$$

È facile dimostrare che nel caso a due dimensioni e ad una dimensione, l'espressione assume, rispettivamente, la forma

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} = -\frac{E \cdot \alpha \cdot \Delta T}{(1 - 2\nu)} \quad 4.6$$

$$\bar{\sigma} = \sigma_x = -E \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad 4.7$$

Il caso monodimensionale è particolarmente intuitivo e adatto alla comprensione del problema. Si consideri una barra soggetta ad un vincolo in direzione assiale, riscaldata uniformemente di un valore ΔT rispetto alla temperatura iniziale: in questa condizioni, essa subisce una dilatazione termica libera pari a $\alpha \cdot \Delta T$. Per riportarla alle dimensioni originarie, sarà necessario applicare uno sforzo monoassiale σ tale da ottenere una deformazione uguale e contraria: tale sforzo corrisponde esattamente a quello di compressione che si genererebbe all'interno della barretta qualora quest'ultima fosse vincolata in modo rigido agli estremi (Figura 4.1).

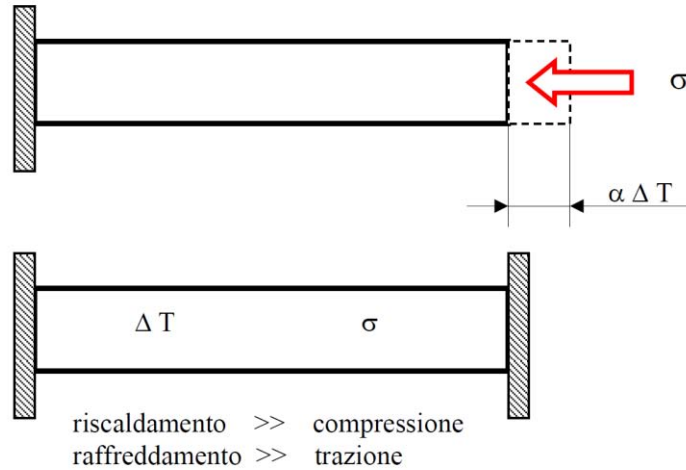


Figura 4.1: schematizzazione del caso monodimensionale.

Nel caso del target SPES, associando a ΔT la massima differenza di temperatura rilevata per il disco più sollecitato in direzione radiale e ricordando le proprietà termomeccaniche del carburo di uranio ($E=176 \text{ GPa}$, $\nu=0.269$, $\alpha=12.4 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}$, $\Delta T=283 \text{ }^\circ\text{C}$), è possibile calcolare i valori delle tensioni medie nei tre casi [6]:

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z}{3} = -\frac{E \cdot \alpha \cdot \Delta T}{(1 - 2\nu)} = 1337 \text{ MPa} \quad 4.8$$

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} = -\frac{E \cdot \alpha \cdot \Delta T}{(1 - 2\nu)} = 844 \text{ MPa}$$

$$\bar{\sigma} = \sigma_x = -E \cdot \alpha \cdot \Delta T = 617 \text{ MPa}$$

Come ci si poteva aspettare, il valore di tensione scende sensibilmente passando dalla formulazione 3D a quella monodimensionale, a causa della diminuzione delle condizioni di vincolo relative alla deformazione termica. Le informazioni provenienti da questo tipo di approccio risultano utili per conferire, in breve tempo, un ordine di grandezza al problema, ma non sono sufficienti a fornire un solido appoggio all'analisi FEM ed al monitoraggio degli stress termici; pertanto, occorre sviluppare un modello analitico più accurato.

In letteratura, per la valutazione degli stress termici, sono presenti dei modelli analitici in grado di considerare contemporaneamente sia gli effetti del gradiente radiale, sia gli effetti di una distribuzione di temperatura variabile in direzione assiale [46]. In questa sede, per non appesantire troppo la trattazione analitica, si è scelto di considerare un modello piano che permetta di apprezzare gli effetti sugli stress di una distribuzione di temperatura variabile in direzione radiale.

Si considera un disco di raggio R e di spessore s molto piccolo, vincolato in modo isostatico e sottoposto ad una distribuzione di temperatura assialsimmetrica con valore massimo al centro e minimo in periferia; viene trascurato il gradiente di temperatura in direzione assiale. In tali condizioni, è possibile applicare le ipotesi di stato piano di tensione, per le quali solo le componenti σ_r e σ_θ (radiale e tangenziale rispettivamente) sono diverse da zero ($\sigma_z=0$); si ipotizza inoltre che le componenti di tensione e di deformazione non subiscano variazioni lungo lo spessore. Infine, si considera il materiale come omogeneo, isotropo ed a comportamento elastico lineare.

Ciò premesso, si prende in considerazione una porzione infinitesima di disco racchiusa da due superfici cilindriche di raggio r e $r+dr$ e da due piani radiali spazati tra loro di un angolo $d\theta$ (Figura 4.2).

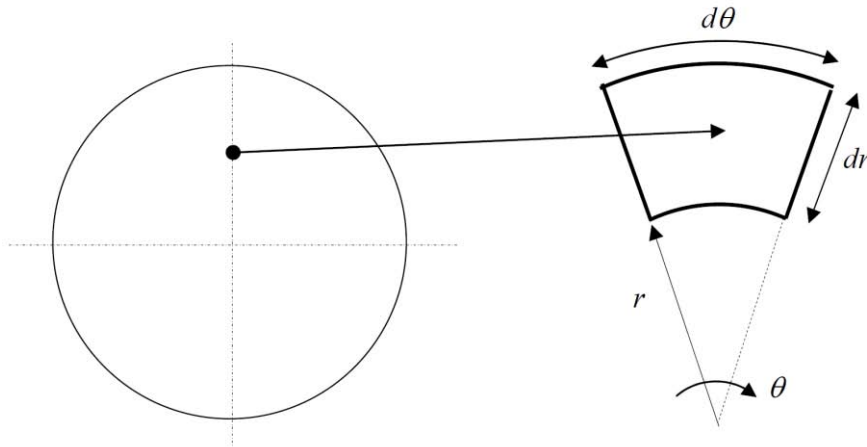


Figura 4.2: elemento di dimensione infinitesima di interesse per lo studio dello stato tensionale.

Se ε_r e ε_θ sono le componenti di deformazione dovute agli stress ed alle dilatazioni termiche, è possibile scrivere la legge di Hook in coordinate polari:

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E} \cdot [\sigma_r - \nu \cdot \sigma_\theta] + \alpha \cdot \Delta T \quad 4.9$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{1}{E} \cdot [\sigma_\theta - \nu \cdot \sigma_r] + \alpha \cdot \Delta T$$

Volendo isolare la componente di deformazione dovuta al solo stato di stress, le equazioni 4.9 possono essere riscritte:

$$\varepsilon_r - \alpha \cdot \Delta T = \frac{1}{E} \cdot [\sigma_r - \nu \cdot \sigma_\theta] \quad 4.10$$

$$\varepsilon_\theta - \alpha \cdot \Delta T = \frac{1}{E} \cdot [\sigma_\theta - \nu \cdot \sigma_r]$$

da cui è possibile ricavare le componenti di tensione radiale e tangenziale:

$$\sigma_r = \frac{E}{(1 - \nu^2)} \cdot [\varepsilon_r + \nu \cdot \varepsilon_\theta - (1 + \nu)\alpha \cdot \Delta T] \quad 4.11$$

$$\sigma_\theta = \frac{E}{(1 - \nu^2)} \cdot [\varepsilon_\theta + \nu \cdot \varepsilon_r - (1 + \nu)\alpha \cdot \Delta T]$$

Per scrivere le componenti di deformazione in funzione dello spostamento radiale u , si scelgono due punti arbitrari in direzione radiale, come in Figura 4.3:

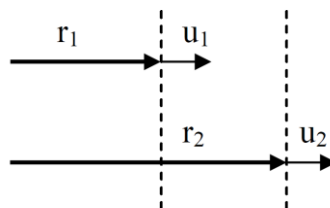


Figura 4.3: punti di riferimento per la determinazione della deformazione radiale.

Ricordando che la deformazione è definita come il rapporto tra la variazione di lunghezza e la lunghezza iniziale, si possono scrivere le seguenti relazioni:

$$\varepsilon_r = \frac{(r_2 + u_2) - (r_1 + u_1) - (r_2 - r_1)}{(r_2 - r_1)} = \frac{u_2 + u_1}{r_2 - r_1} = \frac{du}{dr} \quad 4.12$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{2\pi \cdot (r + u) - 2\pi \cdot r}{2\pi \cdot r} = \frac{u}{r}$$

Ora, senza ripercorrere la dimostrazione che porta alla sua determinazione, si ricorda l'equazione di equilibrio in direzione radiale scritta in coordinate polari:

$$\frac{\delta\sigma_r}{\delta r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\delta\tau_{r\theta}}{\delta\theta} = 0 \quad 4.13$$

Per l'assialsimmetria del problema, l'ultima componente dell'espressione, cioè quella che esprime la componente di taglio, è uguale a zero. Pertanto, si ottiene l'espressione

$$\frac{\delta\sigma_r}{\delta r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad 4.14$$

Ora, sostituendo le equazioni 4.12 nelle 4.11, si ottiene:

$$\sigma_r = \frac{E}{(1-\nu^2)} \cdot \left[\frac{du}{dr} + \nu \cdot \frac{u}{r} - (1+\nu)\alpha \cdot \Delta T \right] \quad 4.15$$

$$\sigma_\theta = \frac{E}{(1-\nu^2)} \cdot \left[\frac{u}{r} + \nu \cdot \frac{du}{dr} - (1+\nu)\alpha \cdot \Delta T \right]$$

che, inserite all'interno dell'equazione di equilibrio, forniscono l'espressione

$$\frac{d^2u}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{du}{dr} - \frac{1}{r^2} \cdot u = (1+\nu) \cdot \alpha \cdot \frac{dT}{dr} \quad 4.16$$

Una volta integrata, l'espressione della funzione $u(r)$ permetterà di definire le componenti di deformazione tramite le 4.12 e le componenti di tensione attraverso le equazioni 9. Si procede, quindi, alla dimostrazione per ottenere la soluzione in modo esatto.

Riscrivendo l'equazione 4.16, si ottiene:

$$\frac{d}{dr} \left[\frac{1}{r} \cdot \frac{d(r \cdot u)}{dr} \right] = (1+\nu) \cdot \alpha \cdot \frac{dT}{dr} \quad 4.17$$

Integrando una volta rispetto ad r si ottiene:

$$\frac{d(r \cdot u)}{dr} = r \cdot (1+\nu) \cdot \alpha \cdot T + C_1 \cdot r \quad 4.18$$

che integrata un'altra volta diventa:

$$u = (1+\nu) \cdot \alpha \cdot \frac{1}{r} \cdot \int_0^r (T \cdot r) dr + C_1 \cdot r + \frac{C_2}{r} \quad 4.19$$

Sostituendo quest'ultima espressione all'interno delle equazioni 4.15, è possibile riscrivere le componenti di tensione radiale e tangenziale come:

$$\begin{aligned}\sigma_r &= -\alpha \cdot E \cdot \frac{1}{r^2} \cdot \int_0^r (T \cdot r) dr + \frac{E}{(1-\nu^2)} \cdot \left[C_1 \cdot (1+\nu) - C_2 \cdot (1-\nu) \cdot \frac{1}{r^2} \right] \\ \sigma_\theta &= \alpha \cdot E \cdot \frac{1}{r^2} \cdot \int_0^r (T \cdot r) dr - \alpha \cdot E \cdot T + \frac{E}{(1-\nu^2)} \cdot \left[C_1 \cdot (1+\nu) - C_2 \cdot (1-\nu) \cdot \frac{1}{r^2} \right]\end{aligned}\quad 4.20$$

Le costanti di integrazione C_1 e C_2 possono essere facilmente determinate imponendo le condizioni al contorno:

- $u=0$ per $r=0$
- $\sigma_r=0$ per $r=R$ (con R raggio esterno del disco)

imponendo la prima condizione al contorno alla 4.19 ed osservando che vale

$$\lim_{r \rightarrow 0} \frac{1}{r} \cdot \int_0^r (T \cdot r) dr = 0 \quad 4.21$$

si può immediatamente determinare che $C_2=0$.

Dalla seconda condizione al contorno si può ricavare l'espressione di C_1 :

$$C_1 = (1-\nu) \cdot \frac{\alpha}{R^2} \cdot \int_0^R (T \cdot r) dr \quad 4.22$$

A questo punto, le espressioni finali per le componenti di stress diventano:

$$\sigma_r = \alpha \cdot E \cdot \left(\frac{1}{R^2} \cdot \int_0^R (T \cdot r) dr - \frac{1}{r^2} \cdot \int_0^r (T \cdot r) dr \right) \quad 4.23a$$

$$\sigma_\theta = \alpha \cdot E \cdot \left(-T + \frac{1}{R^2} \cdot \int_0^R (T \cdot r) dr + \frac{1}{r^2} \cdot \int_0^r (T \cdot r) dr \right) \quad 4.23b$$

È importante sottolineare che le componenti σ_r e σ_θ assumono valori finiti per $r=0$, visto che vale:

$$\lim_{r \rightarrow 0} \frac{1}{r^2} \cdot \int_0^r (T \cdot r) dr = \frac{1}{2} \cdot T_0 \quad 4.24$$

con T_0 la temperatura al centro del disco.

A titolo d'esempio, focalizzandosi sullo studio della distribuzione radiale di temperatura presente sui dischi in carburo di uranio, ampiamente analizzata nel corso di lavori precedenti [6], si può determinare un'espressione polinomiale in grado di descrivere interpolare correttamente l'andamento di temperatura in oggetto:

$$T(r) = -0.0552 \cdot r^4 - 0.8227 \cdot r^3 - 8.0318 \cdot r^2 + 2435.3 \cdot r \quad 4.25$$

Sostituendo l'espressione 4.25 all'interno del generico integrale $\int_0^r (T \cdot r) dr$, si ottiene:

$$\int_0^r (T \cdot r) dr = \int_0^r [-0.0552 \cdot r^5 - 0.8227 \cdot r^4 - 8.0318 \cdot r^3 + 2435.3 \cdot r^2] dr \quad 4.26$$

che risolto analiticamente fornisce la seguente espressione

$$\int_0^r (T \cdot r) dr = -0.0552 \cdot \frac{r^6}{6} - 0.8227 \cdot \frac{r^5}{5} - 8.0318 \cdot \frac{r^4}{4} + 2435.3 \cdot \frac{r^3}{3} \quad 4.27$$

A questo punto, è possibile determinare la distribuzione delle tensioni σ_r e σ_θ mediante l'utilizzo delle equazioni 4.23. Il calcolo, però, prevede la conoscenza delle proprietà del materiale (modulo elastico e coefficiente di dilatazione termica) che, in generale, sono anch'esse funzione della temperatura; ciò complica notevolmente il calcolo delle tensioni, pertanto è opportuno affiancare un'analisi agli elementi finiti al puro calcolo analitico, sebbene quest'ultimo fornisca un'ottima approssimazione.

4.3 Procedura sperimentale ed integrazione numerica

La tensione, intesa come misura delle forze di contatto esercitate tra le parti interne di un corpo continuo, rappresenta un concetto fisico non direttamente misurabile. A tal proposito, per poter stimare lo stato di tensione a cui è sottoposto un corpo, è necessario eseguire dei calcoli, talvolta piuttosto complessi, mediante il metodo degli elementi finiti: è il caso di questo lavoro di tesi.

4.3.1 Processo logico

Come detto, il calcolo agli elementi finiti risulta indispensabile al fine di determinare correttamente lo stato tensionale di un componente, come un disco target, soggetto ad un campo termico. Pertanto, il primo step logico del processo di determinazione delle tensioni risulta essere la validazione del modello numerico basandosi sulla corrispondenza delle temperature numeriche e sperimentali: questo passaggio è già stato ampiamente discusso nel corso del capitolo precedente, perciò si può ritenere il modello validato.

Il passaggio successivo consiste nell'esecuzione delle prove di rottura: si posiziona il disco sopra al crogiolo e si fornisce la corrente riscaldante necessaria alla formazione di un gradiente termico sul disco definito *critico*, cioè in grado di portare a rottura il disco. Non sapendo a priori quale sia la corrente che provoca la rottura, è necessario che il crogiolo venga riscaldato con step di corrente via via maggiori; per fare ciò, sono state utilizzate delle rampe di riscaldamento con step di 5 A e della durata di 4 minuti a step, come riportato in Figura 4.4. Nel caso riportato, la corrente massima è di 270 A e la durata dell'intero test è di circa 7 ore.

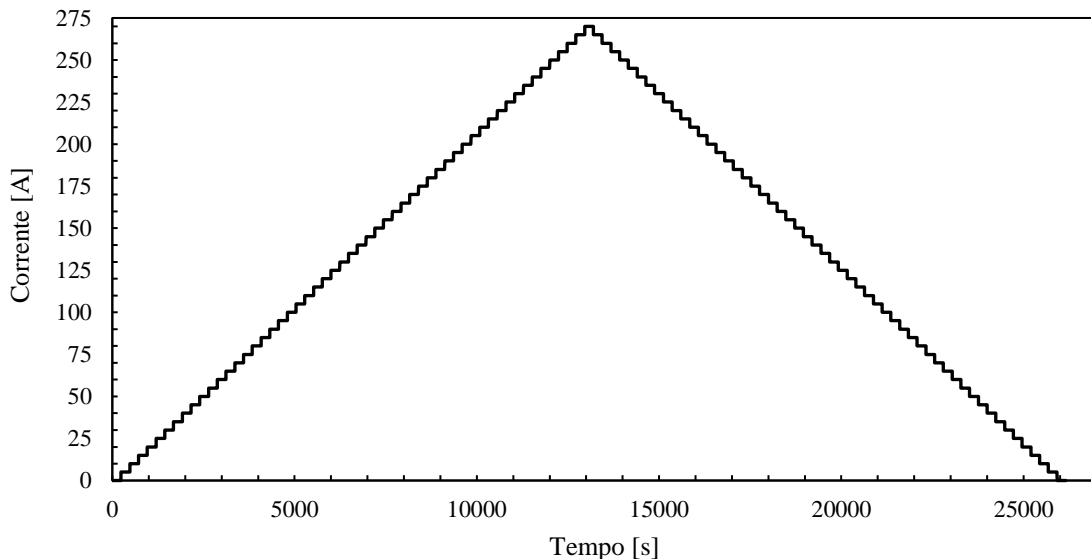


Figura 4.4: carico di corrente nel tempo utilizzato per eseguire i test a rottura dei dischi.

Una volta registrata la corrente di rottura (il file di testo in output dal PLC fornisce la temperatura misurata dal pirometro in funzione della corrente riscaldante: laddove si presenta una discontinuità di temperatura, significa che il pirometro è passato a misurare la temperatura sul crogiolo, quindi che il disco è giunto a rottura), si imposta la medesima corrente riscaldante nell'ambiente di Ansys® e si analizza la mappa termica e lo stato tensionale che persistono sul materiale in quelle condizioni.

4.4 Test prototipo su un campione di Hexoloy® SiC SE

L'apparato sperimentale presente nel laboratorio alte temperature dei Laboratori Nazionali di Legnaro permette la produzione di elevati gradienti termici sui dischi, comparabili a quelli che si verificano durante il funzionamento del target SPES. In passato, tale apparato è stato utilizzato per misure di conducibilità ed emissività con i metodi esposti nel precedente capitolo; l'intenzione, con questo lavoro di tesi, è quella di condurre a rottura i dischi per poter determinare il massimo gradiente che questi ultimi sono in grado di sopportare.

Dato che tale studio non è mai stato preso in carico, pertanto si tratta di una volontà del tutto nuova, è necessario verificare che l'apparato sperimentale sia del tutto in grado di condurre a rottura i dischi. Per l'esecuzione dei primi test che possano permettere di condurre le prime analisi ed effettuare le prime considerazioni, non è stato utilizzato il carburo di silicio Hexoloy® SA, il SiC che sarà utilizzato come primo target SPES, ma un altro carburo di silicio, l'Hexoloy® SE, disponibile in presso i LNL.

In primo luogo, un disco del suddetto materiale, di diametro 40 mm e spessore unitario, è stato posto a 5 mm dal crogiolo ed utilizzato per la determinazione della conducibilità termica, come mostrato nel capitolo precedente; in seguito, il medesimo disco è stato posizionato a 2,5 mm dal crogiolo e condotto a rottura. In Figura 4.5 è riportata una fotografia del disco ricostruito.

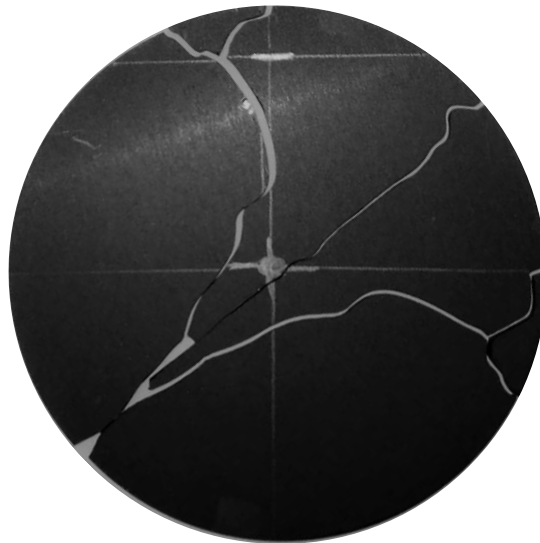


Figura 4.5: foto del campione in carburo di silicio condotto a rottura attraverso intensi gradienti termici.

Sul disco sono state tracciate delle linee in modo da poter ricostruire le condizioni di rottura: con riferimento a Figura 4.5, la linea orizzontale rappresenta la direzione del crogiolo, mentre quella verticale corrisponde alla direzione ortogonale a quest'ultimo. Risulta interessante analizzare il percorso di rottura: le linee di frattura risultano simmetriche rispetto ad una bisettrice (inclinata di 45° in figura), formando un path che si può considerare a fontana.

4.4.1 Analisi termica e strutturale

Per analizzare l'evoluzione della frattura, è interessante analizzare il campo termico e tensionale valutato con un'analisi agli elementi finiti: la distribuzione di temperatura è stata valutata grazie alla conducibilità termica ottenuta col metodo della funzione ottima, mentre la distribuzione di tensione è ottenuta assumendo il coefficiente di dilatazione termica e le proprietà elastiche del materiale. In Figura 4.6 è riportato il plot termico corrispondente alle condizioni di rottura, mentre in Figura 4.7 è riportato il path radiale di temperatura in direzione ortogonale al crogiolo e sulla superficie inferiore del disco, in quanto, come già evidenziato nel corso del capitolo 3, è in questa posizione che si instaura la differenza di temperatura di maggiore entità. Inoltre, nel corso del capitolo 3, è stato mostrato come l'effetto dello spessore e della presenza delle estremità riscaldanti del crogiolo siano pressoché trascurabili sull'assialsimmetria della distribuzione.

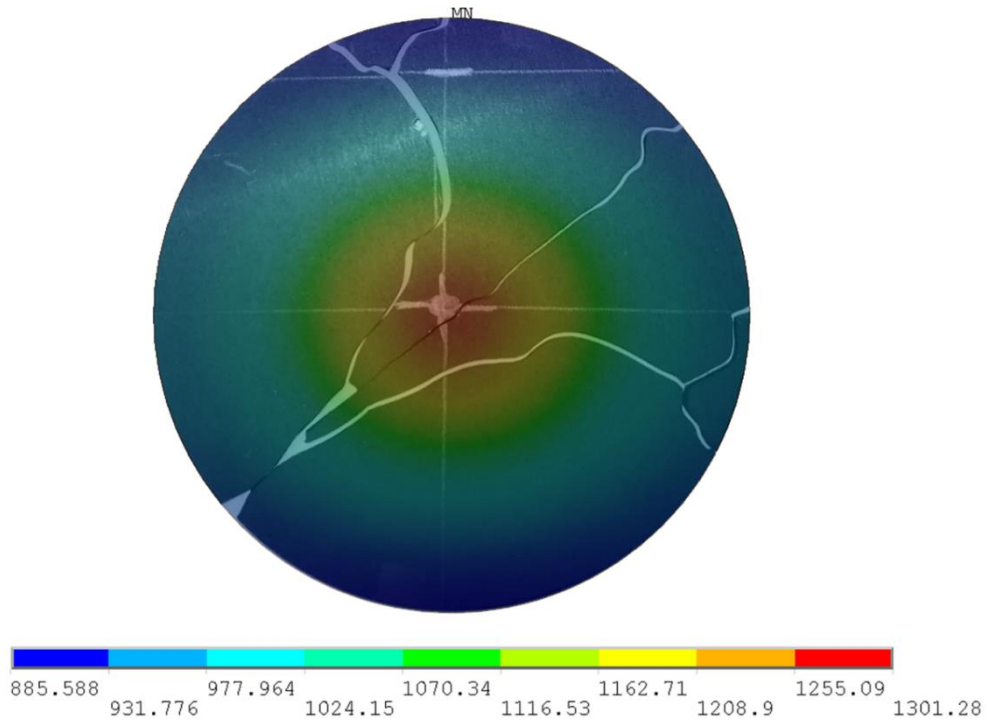


Figura 4.6: campo termico del campione SiC sovrapposto alla ricostruzione della rottura.

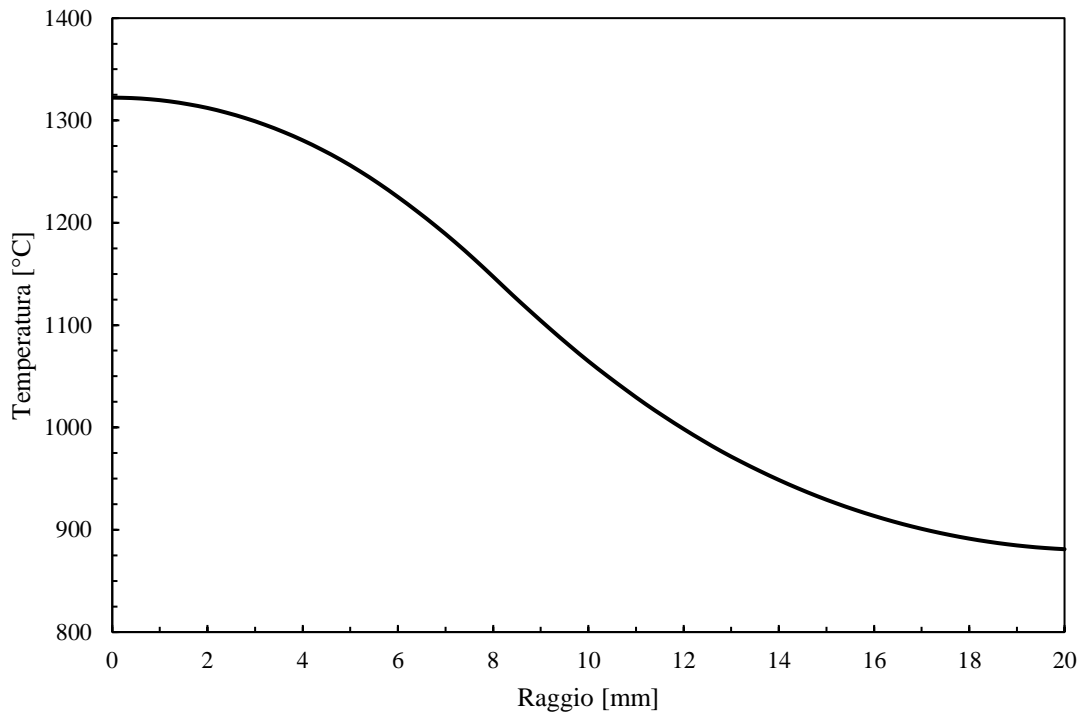


Figura 4.7: path radiale di temperatura lungo la direzione ortogonale del crogiolo ed in corrispondenza della superficie inferiore del disco.

In Figura 4.8, Figura 4.9 e Figura 4.10 sono riportati, rispettivamente, i plot di prima, seconda e terza tensione principale sovrapposti alla ricostruzione del disco fratturato.

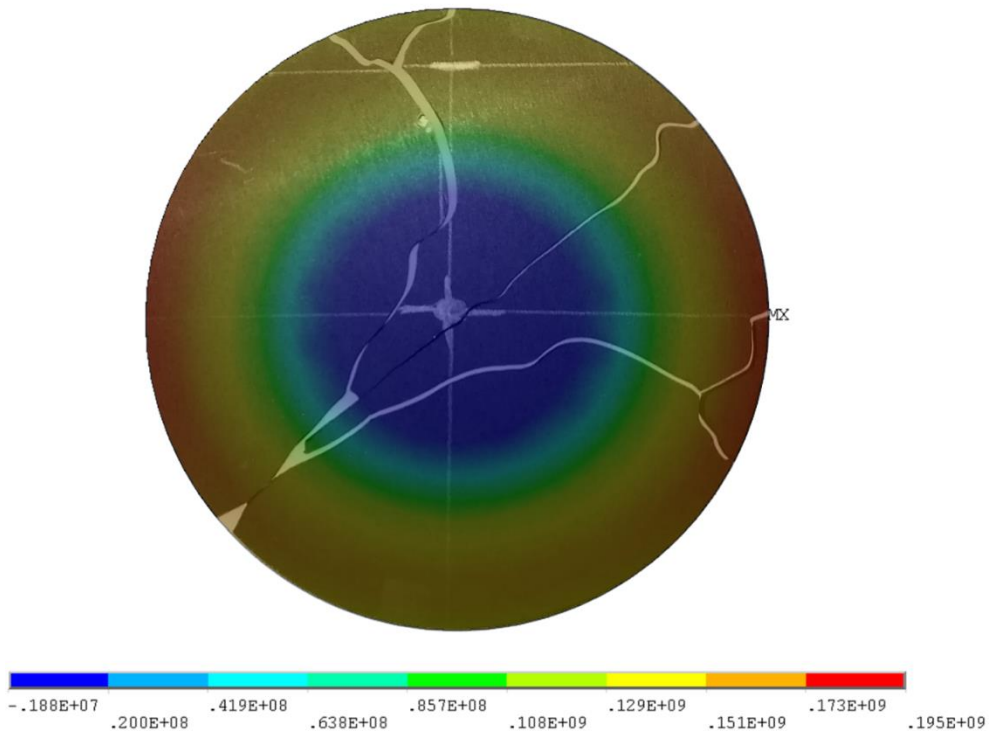


Figura 4.8: plot della prima tensione principale del campione SiC sovrapposto alla ricostruzione della rottura.

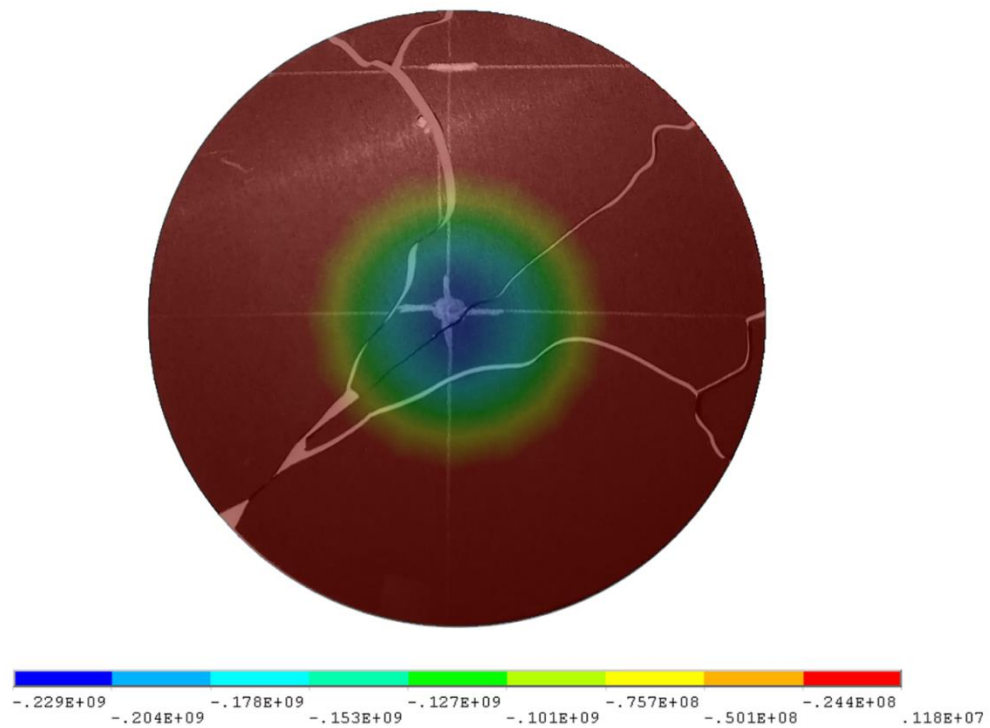


Figura 4.9: plot della seconda tensione principale del campione SiC sovrapposto alla ricostruzione della rottura.

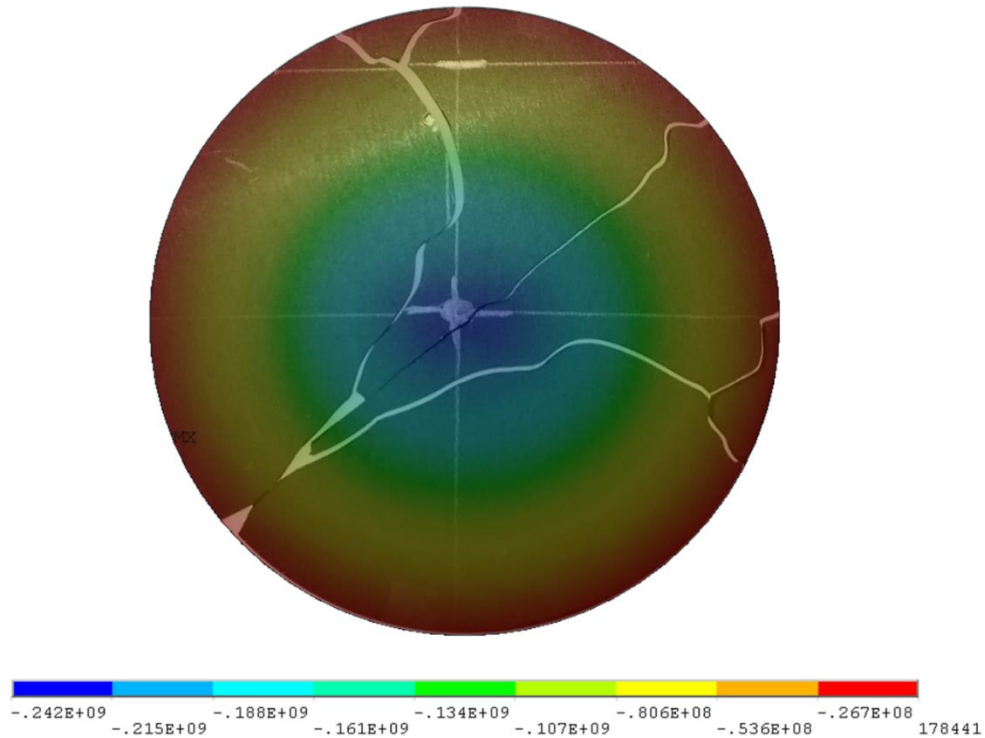


Figura 4.10: plot della terza tensione principale del campione SiC sovrapposto alla ricostruzione della rottura.

In Figura 4.11, Figura 4.12 e Figura 4.13 sono riportati i path radiali di, rispettivamente, prima, seconda e terza tensione principale effettuati in direzione parallela ed ortogonale del crogiolo ed in corrispondenza della faccia superiore ed inferiore del disco. In particolare, gli acronimi presenti all'interno delle legende significano:

- PSOT: path effettuato in direzione parallela al crogiolo ed in corrispondenza della faccia inferiore del disco;
- OSOP: path effettuato in direzione ortogonale al crogiolo ed in corrispondenza della faccia superiore del disco;
- PSOP: path effettuato in direzione parallela al crogiolo ed in corrispondenza della faccia superiore del disco;
- OSOT: path effettuato in direzione ortogonale al crogiolo ed in corrispondenza della faccia inferiore del disco.

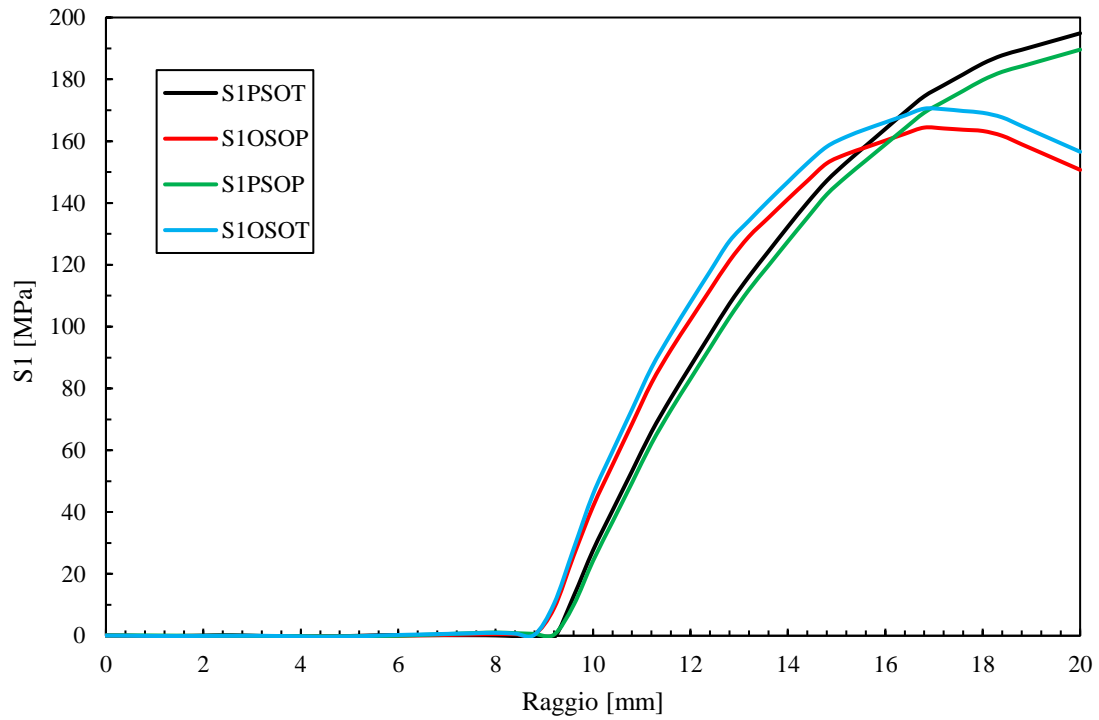


Figura 4.11: prima tensione principale in funzione del raggio (path effettuato in direzione ortogonale e parallelo al crogiolo, in corrispondenza della superficie superiore ed inferiore del disco).

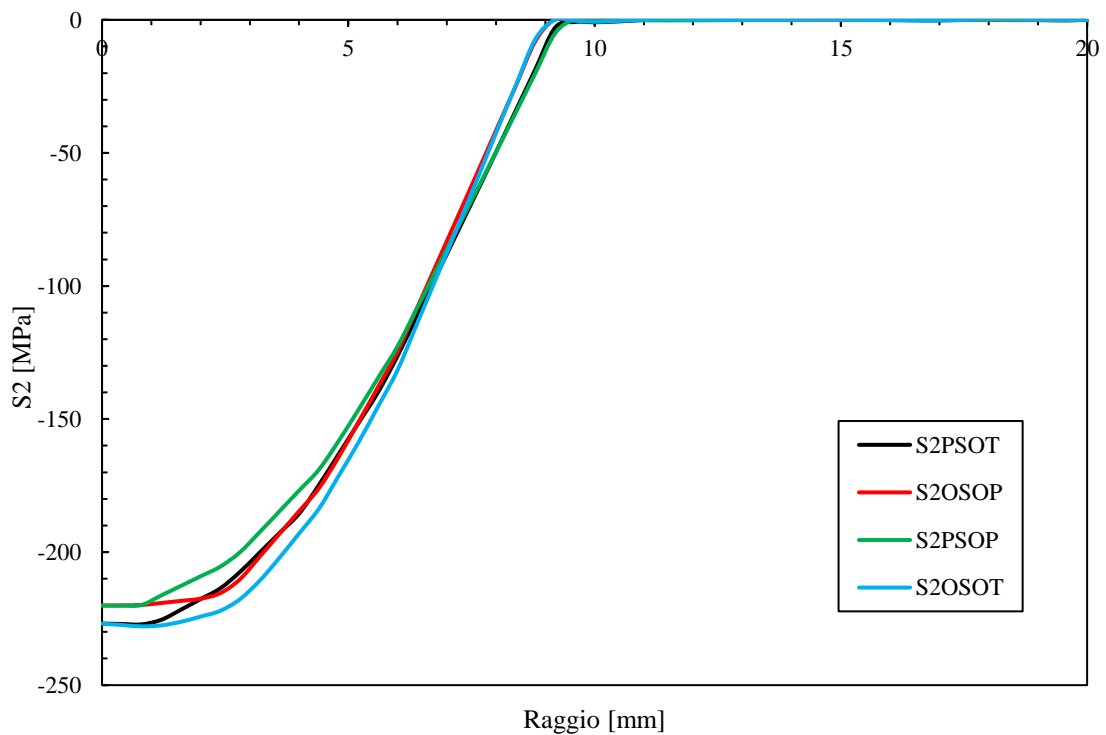


Figura 4.12: seconda tensione principale in funzione del raggio (path effettuato in direzione ortogonale e parallelo al crogiolo, in corrispondenza della superficie superiore ed inferiore del disco).

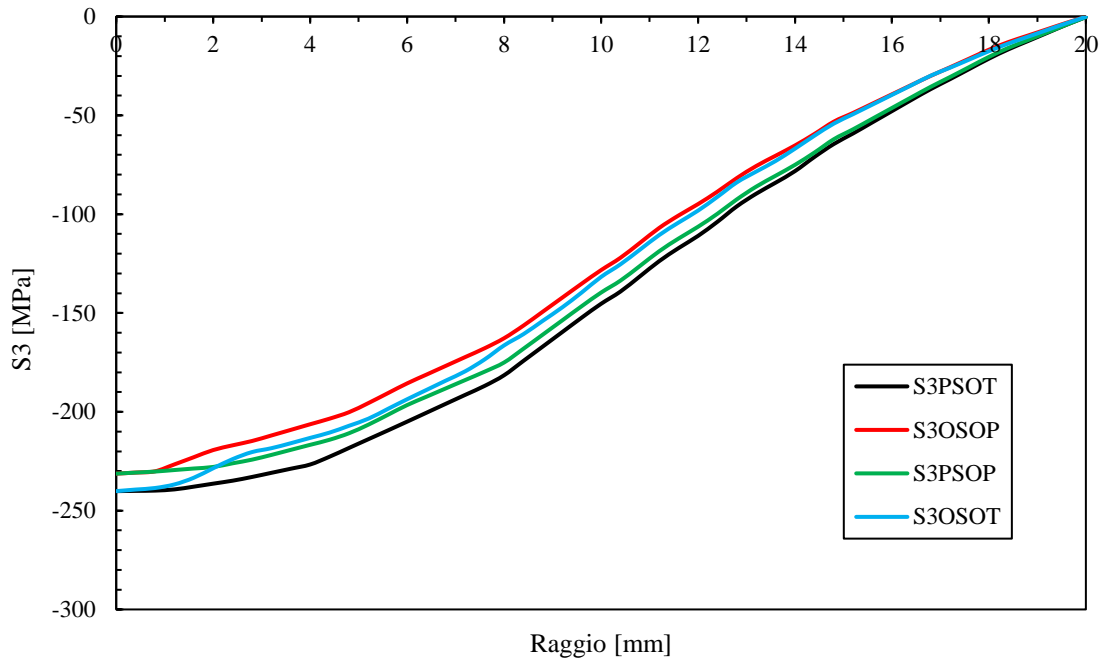


Figura 4.13: terza tensione principale in funzione del raggio (path effettuato in direzione ortogonale e parallelo al crogiolo, in corrispondenza della superficie superiore ed inferiore del disco).

Dai plot e dai path precedenti, si deduce che:

- la prima tensione principale non è mai negativa, risultando nulla dal centro fino a metà raggio e positiva da metà raggio fino in corrispondenza della periferia. Il valore massimo della tensione è raggiunto in corrispondenza della faccia inferiore del disco e lungo la direzione parallela al crogiolo; inoltre, lungo questa direzione l'andamento è monotono. Al contrario, lungo la direzione ortogonale al crogiolo, la tensione raggiunge il suo massimo prima della periferia del disco; questo comportamento non perfettamente assialsimmetrico è dovuto alla presenza delle estremità del crogiolo riscaldante. Infatti, effettuando un path circolare in corrispondenza della periferia del disco, si ottiene un andamento sinusoidale, con una variazione massima attorno al 20 % (Figura 4.14). Invece, per quanto riguarda l'effetto dello spessore, questo si può ritenere trascurabile;

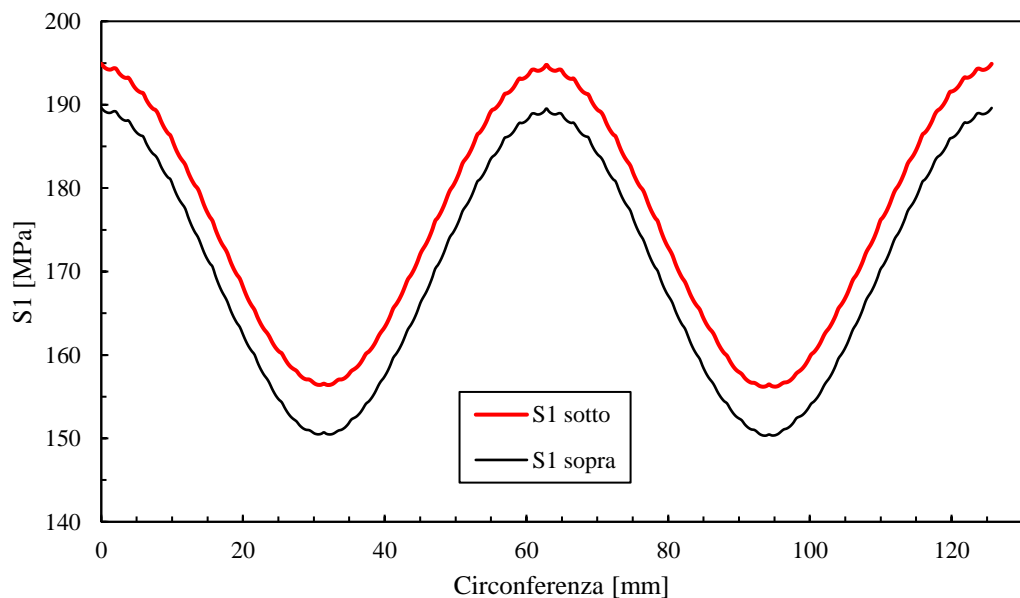


Figura 4.14: andamento della prima tensione principale lungo la periferia del disco. Le variazioni sono causate dalla presenza delle estremità del crogiolo riscaldante.

- la seconda tensione principale risulta avere un comportamento simmetrico rispetto alla prima tensione principale, rimanendo negativa e crescente dal centro fino a metà raggio, per poi diventare nulla da quest'ultimo punto fino alla periferia del disco. In questo caso gli effetti di bordo dovuti alla presenza del crogiolo e l'effetto dello spessore sono del tutto trascurabili;
- la terza tensione principale rimane sempre negativa con un andamento monotono crescente dal centro alla periferia del disco. Da notare che, in modulo, il valore massimo in compressione è maggiore del valore ottenuto in trazione. Anche qui, gli effetti di bordo dovuti al crogiolo e gli effetti dovuti allo spessore sono trascurabili.

Figura 4.8 risulta particolarmente utile per studiare le cause della frattura: data la forma *a fontana*, è possibile ipotizzare che l'innesco sia avvenuto in corrispondenza della zona in cui i percorsi di cricca si suddividono, pertanto nella zona del disco in cui la prima tensione principale risulta massima, cioè lungo la periferia del disco stesso. Altre rotture involontarie verificatesi in passato durante misure di conducibilità termica (Figura 4.15) mostrano path di rottura analoghi a quello ottenuto e mostrato in Figura 4.5.

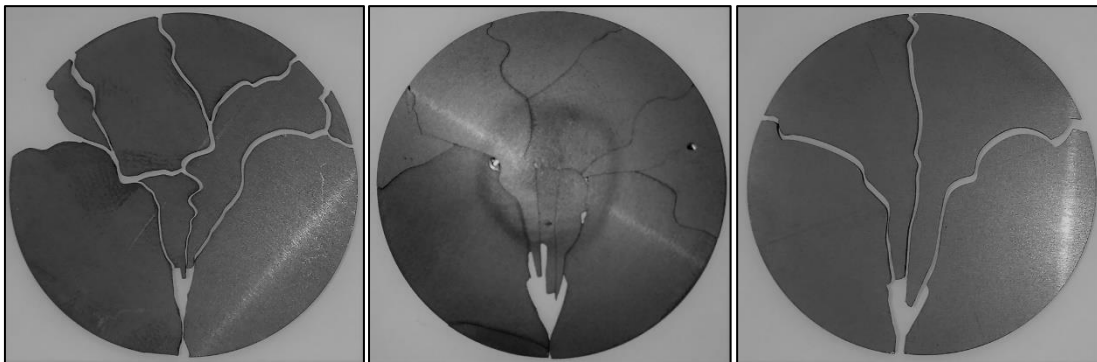


Figura 4.15: fotografie di dischi in carburo di silicio rotti in passato durante prove sperimentali atte alla determinazione della conducibilità termica.

Tipicamente, nei materiali fragili la rottura avviene per l'improvvisa propagazione di una frattura in un piano ortogonale alla tensione normale nel momento in cui quest'ultima raggiunge il valore critico [47]. Un criterio di resistenza ampiamente utilizzato per i materiali a comportamento fragile è il *Criterio di Rankine* [47], secondo il quale la condizione di rottura del materiale viene raggiunta qualora la tensione normale massima o minima raggiunge valori limite (σ_R^+ e σ_R^-) a trazione o a compressione. Per un materiale avente resistenza a trazione sensibilmente inferiore a quella di compressione, come nel caso del carburo di silicio, il dominio di resistenza, nel piano delle tensioni principali, è rappresentato da un quadrato asimmetrico rispetto all'origine (Figura 4.16).

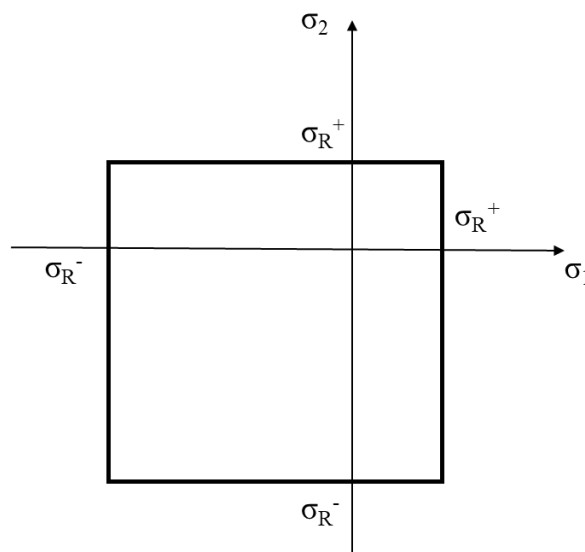


Figura 4.16: dominio del criterio di Rankine nel piano delle tensioni principali.

Il criterio di Rankine non è l'unico criterio di resistenza utilizzato per i materiali fragili, ma noto il percorso di frattura (Figura 4.16) e assodato che la cricca parte laddove la prima tensione principale è massima, si può ipotizzare che tale criterio di resistenza possa essere adottato in questo contesto.

4.4.2 Analisi al microscopio elettronico

Con lo scopo di studiare nel dettaglio la frattura, è stato realizzato un FEG (*Field Emission Gun*) presso i laboratori della sede di Vicenza dell'Università degli Studi di Padova. Tale analisi ha permesso di indagare la superficie di cricca di uno dei pezzi in cui il disco è suddiviso, percorrendo la superficie ed esaminandola in diverse zone. In Figura 4.17 sono mostrate le zone in cui la superficie del componente è stata indagata: secondo quanto precedentemente ipotizzato, la zona D risulta essere in prossimità dell'innescò della cricca, mentre le altre zone (A, B, C, E) risultano essere lontane. La zona C può essere ritenuta interessante in quanto in periferia (prima tensione principale massima).

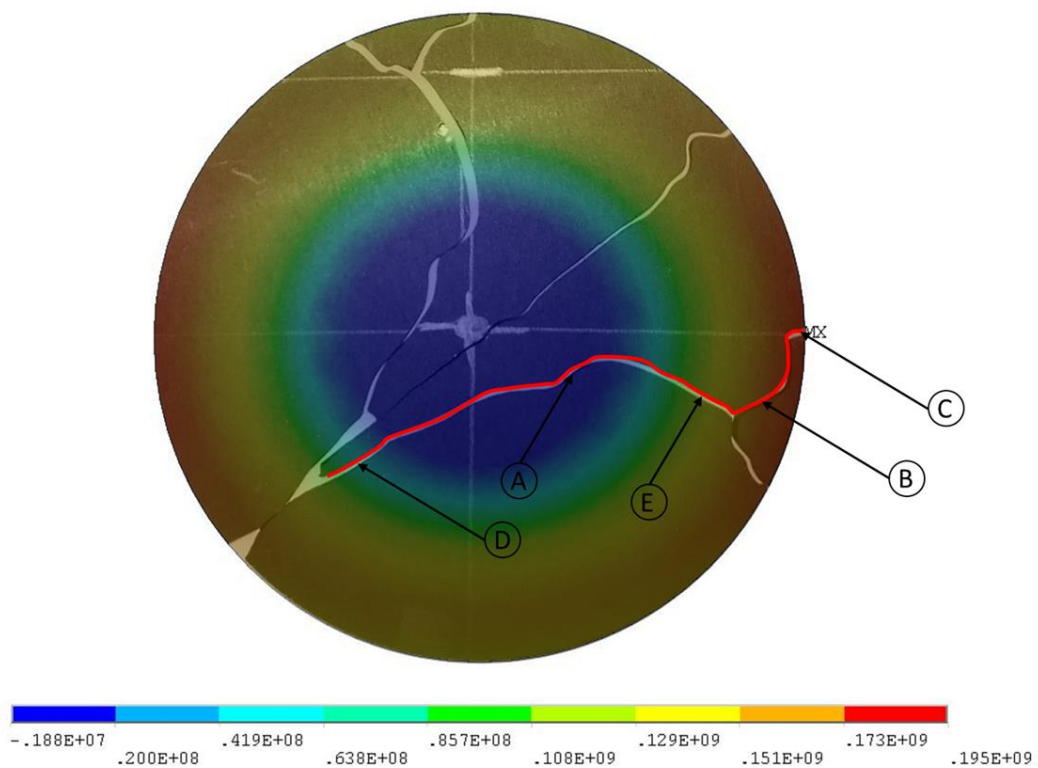


Figura 4.17: legenda delle diverse posizioni in cui è stata analizzata la superficie di frattura.

Le seguenti figure mostrano i risultati delle misure effettuate.

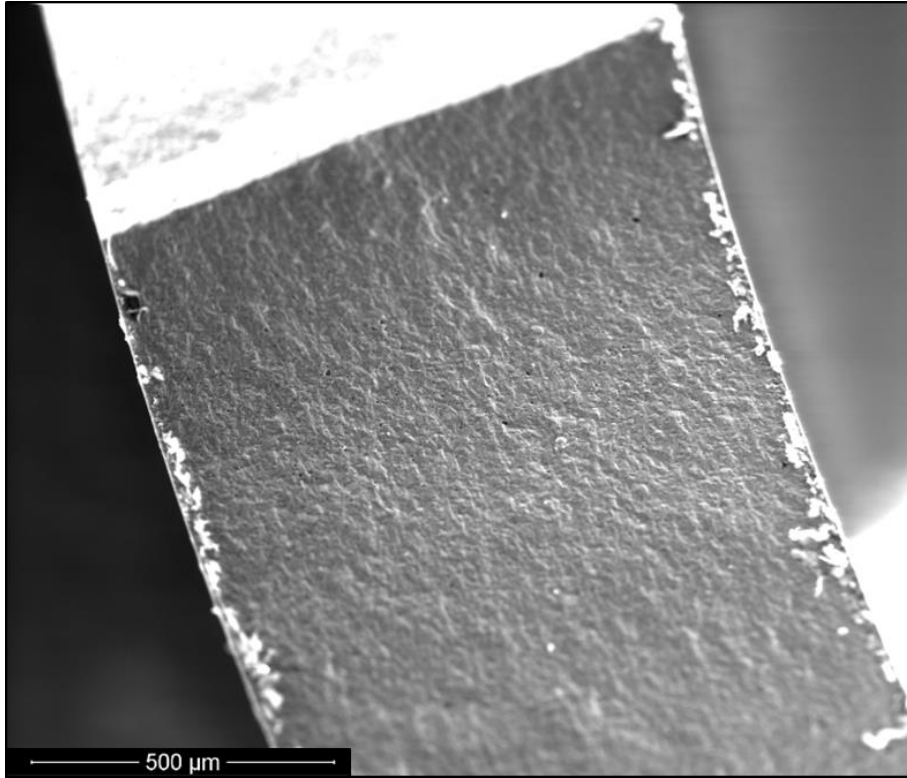


Figura 4.18: superficie di frattura in corrispondenza della zona C. La superficie risulta essere liscia e priva di rugosità (200x).

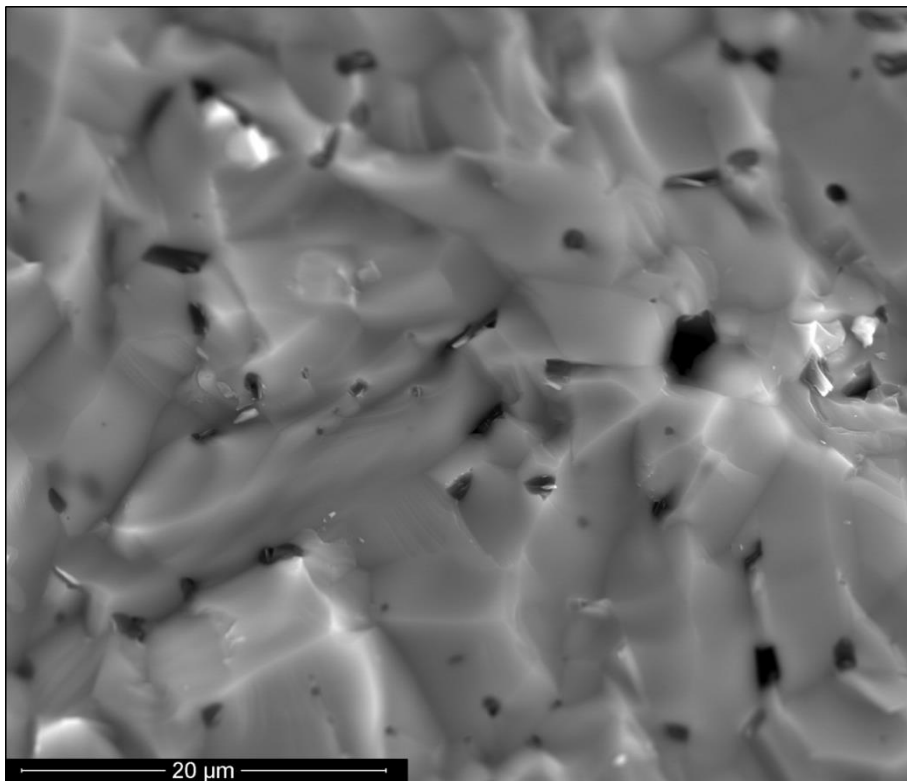


Figura 4.19: superficie di frattura in corrispondenza della zona C (6000 x).

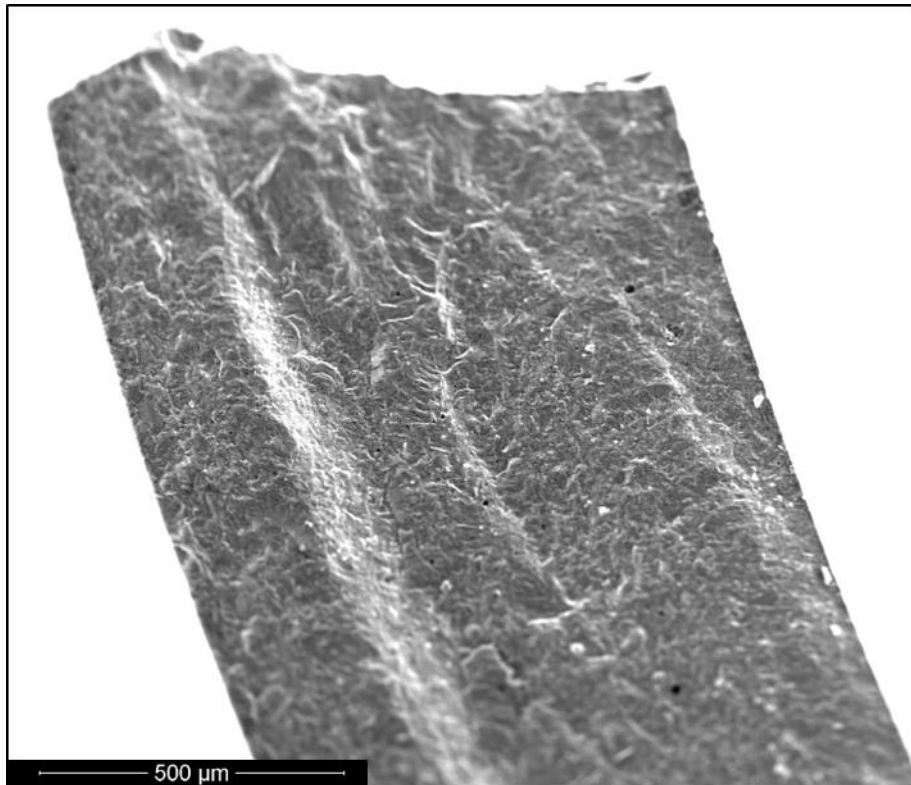


Figura 4.20: superficie di frattura in corrispondenza della zona D. La superficie risulta essere rugosa ed ondulata (200x).

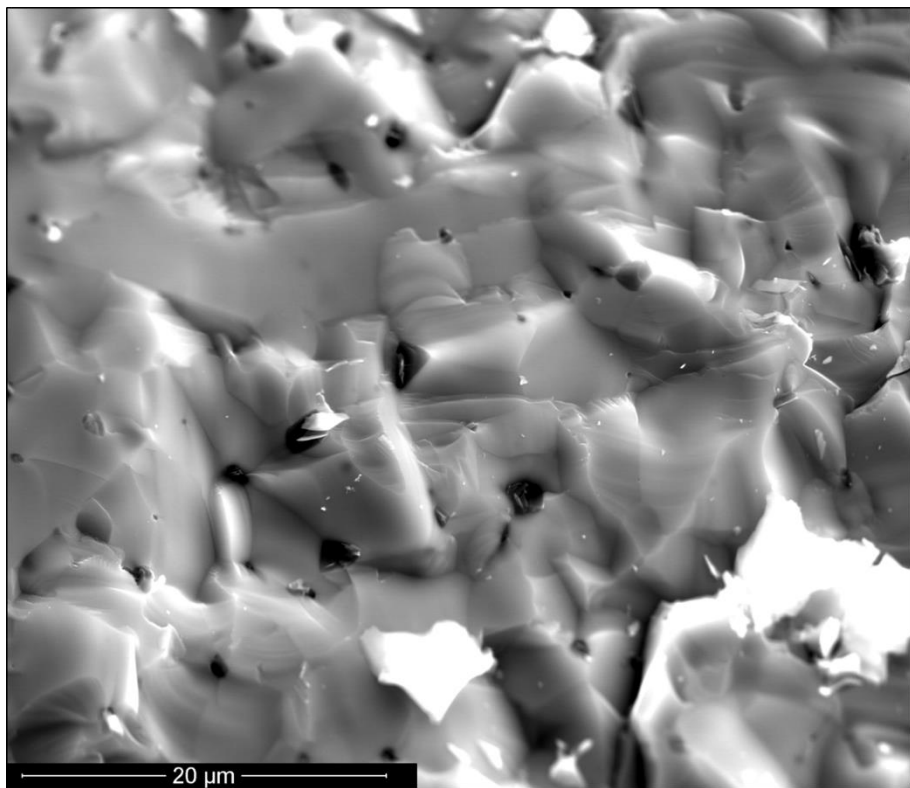


Figura 4.21: superficie di frattura in corrispondenza della zona D (6000 x).

La prima evidenza è stata che la superficie di frattura in corrispondenza delle zone A, B, C, E è uguale in morfologia; pertanto, per non appesantire la trattazione, è stato deciso di riportare soltanto immagini relative

alla zona C, a testimonianza di quanto notato in tutte le zone elencate. Diversa è risultata la morfologia macroscopica della zona D.

Osservando a bassi ingrandimenti il campione, la zona nelle vicinanze del punto di innesco (Figura 4.20) è caratterizzata da una superficie rugosa ed ondulata, mentre le zone lontano dal punto di innesco sono risultate lisce e piatte. Si potrebbe supporre che una superficie di frattura di questa tipologia sia imputabile a:

- Deformazione plastica del materiale in corrispondenza della zona di innesco. Nel momento in cui la cricca raggiunge dimensioni critiche, la frattura avviene alla velocità del suono in modo fragile;
- Creep del materiale in corrispondenza della zona maggiormente sollecitata;
- Diverse modalità di frattura. Figura 4.22 illustra il meccanismo di frattura intergranulare, in cui la cricca passa sempre a bordo grano, e transgranulare, in cui la cricca attraversa i grani;

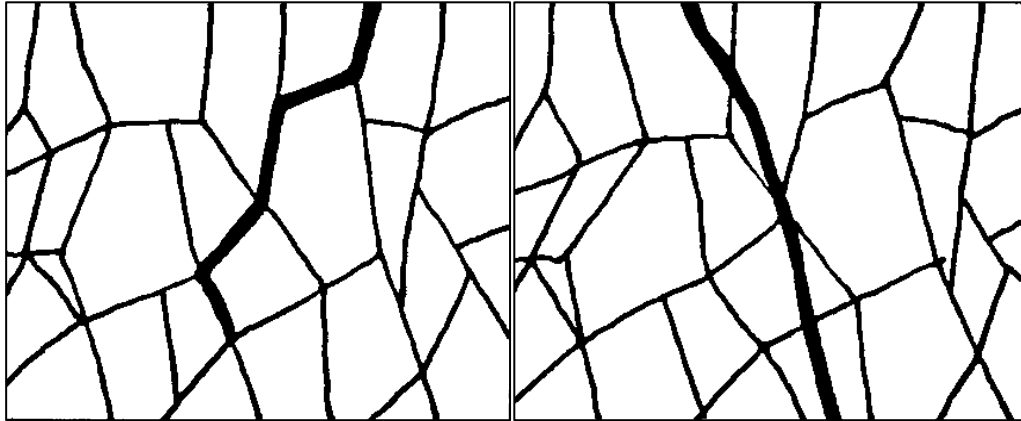


Figura 4.22: rappresentazione delle due principali modalità di frattura. A sinistra è rappresentata la frattura intergranulare, mentre a destra la frattura transgranulare.

- Diverse velocità di propagazione della cricca. Nella zona di innesco, la cricca procede con velocità inferiore rispetto al resto delle superfici.

La prima ipotesi può essere studiata analizzando le due tipologie di superfici ad alti ingrandimenti (Figura 4.19 e Figura 4.21): la morfologia del grano non sembra presentare differenze tra le due zone. Inoltre, i grani non risultano essere particolarmente deformati; pertanto, l'ipotesi relativa alla presenza di deformazione plastica è da escludere. L'ipotesi che considera la presenza di creep può essere valutata analizzando la combinazione di temperatura-tensione-tempo a cui il disco è stato soggetto: durante il test di rottura, la tensione aumenta progressivamente con la corrente riscaldante (e quindi del gradiente termico che si instaura sul disco), raggiungendo alti livelli solamente negli istanti prossimi alla rottura. Inoltre, la prova ha durata pari a circa un paio d'ore, perciò un intervallo temporale estremamente breve. Infine, la temperatura in corrispondenza della periferia del disco è di circa 900 °C, molto bassa rispetto alle temperature alle quali il SiC è in grado di resistere. Ciò premesso, è possibile escludere anche l'ipotesi del creep. Per le stesse ragioni per le quali è stata scartata l'ipotesi della plasticità, è possibile scartare anche l'ipotesi della diversa modalità di frattura: osservando la morfologia dei grani, non è possibile fare distinzioni tra le due zone. Inoltre, non è nemmeno possibile dichiarare se la frattura è di tipo intergranulare o transgranulare, in quanto nel primo caso i grani sono ben evidenti, mentre nel secondo i grani non sono distinguibili. Per questo genere di morfologia, è possibile ipotizzare una frattura di tipo misto, nella quale entrambi i meccanismi sono presenti. Pertanto, l'ultima ipotesi, cioè quella relativa alle diverse velocità di propagazione della cricca, può essere ritenuta accettabile: nella zona prossima all'innesco della cricca, quest'ultima procede più lentamente rispetto alle altre zone.

4.5 Test di rottura su dischi in Hexoloy® SiC SA

Come descritto nel corso del capitolo 2, il carburo di silicio Hexoloy® SA è il materiale che sarà impiegato come primo target di produzione di radioisotopi. Al fine di comprendere la resistenza di tale materiale ai gradienti termici, sono stati condotti dei test a rottura utilizzando in dispositivo presente nel laboratorio alte temperature.

4.5.1 Primi test

Per i dischi in carburo di silicio Hexoloy® SiC SA si è proceduto come già descritto per i dischi in Hexoloy® SiC SE: questi sono stati posizionati sul crogiolo ad una distanza tale da permetterne la stima della conducibilità termica mediante analisi inversa e poi avvicinati per condurli a rottura. I primi test sono stati effettuati utilizzando dischi aventi diametro di 40 mm e spessore 1,3 mm: questi sono stati posizionati ad 1 mm dalla sommità del crogiolo (la minima distanza controllabile accuratamente) e riscaldandoli fino a 270 A. A tale valore di corrente, è stata ottenuta la mappa termica riportata in Figura 4.23.

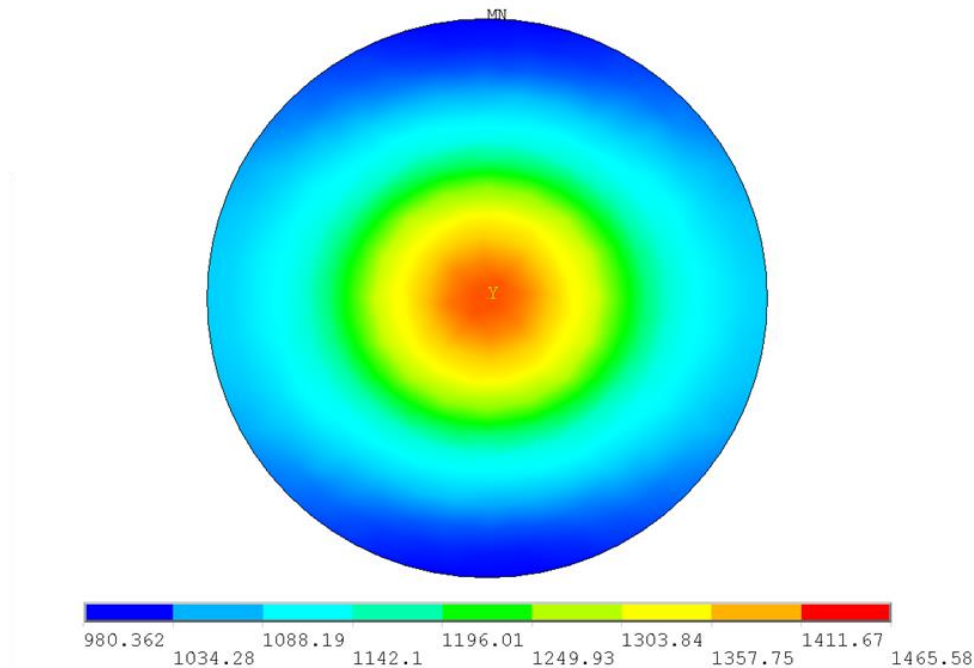


Figura 4.23: plot di temperatura di un disco in carburo di silicio Hexoloy® SA di diametro 40 mm, spessore 1,3 mm, posto ad una distanza dal crogiolo di 1 mm con corrente riscaldante pari a 270 A.

Note le proprietà elastiche ed il coefficiente di dilatazione termica di questo materiale, è possibile effettuare l'analisi strutturale, imponendo come carico la distribuzione di temperatura precedentemente ottenuta. In Figura 4.24 è riportato il plot relativo alla prima tensione principale del disco.

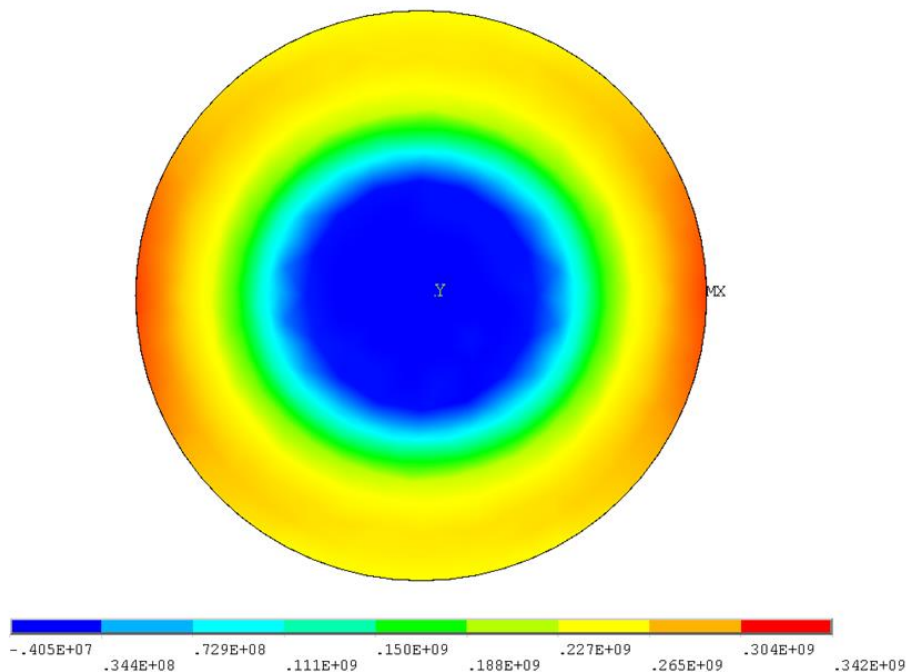


Figura 4.24: plot relativo alla prima tensione principale di un disco in carburo di silicio Hexoloy® SA di diametro 40 mm, spessore 1,3 mm, posto ad una distanza dal crogiolo di 1 mm con corrente riscaldante pari a 270 A.

La prima tensione principale massima è di circa 350 MPa: tale stato di tensione non è stato sufficiente a portare a rottura il disco.

Al fine di aumentare il gradiente termico, quindi di aumentare la tensione che ne deriva, non potendo più aumentare la corrente riscaldante (al fine di garantire l'integrità del sistema), si è deciso di rendere il sistema più *efficiente* mediante l'implementazione di schermi termici.

4.5.2 Implementazione di schermi termici e prime rotture

Come precedentemente illustrato, la potenza termica irraggiata dal crogiolo non è sufficiente a produrre un gradiente termico tale da generare una tensione in grado di portare a rottura il disco. Se si analizza lo scambio termico del disco con il sistema in cui è inserito, si può facilmente notare che la sua faccia superiore irraggia verso l'ambiente una notevole quantità di calore. Ciò rende, di fatto, il sistema poco efficiente: parte della potenza termica prodotta dal crogiolo ed assorbita dal disco viene successivamente irraggiata dal disco stesso verso l'esterno, diminuendo il gradiente termico a cui è soggetto.

Quindi, l'idea è quella di implementare uno schermo termico, da posizionare al di sopra della faccia superiore del disco, che rifletta la quantità di calore emessa da quest'ultimo. Al fine di rendere questo processo il più efficiente possibile, è necessario l'utilizzo di un materiale con bassa emissività.

A valle di tutte queste considerazioni, è stata studiata una soluzione che prevede l'utilizzo di un disco in tantalio, avente un foro centrale di 5 mm per permettere al pirometro di acquisire la temperatura del disco, da collocare al di sopra del disco in carburo di silicio. Per il sostenimento dello schermo, è stato deciso di utilizzare un filo di tantalio, in modo che il contatto sia idealmente una linea e che, quindi, il calore scambiato per conduzione sia trascurabile rispetto a quello scambiato per irraggiamento tra schermo e disco. Il risultato di tale soluzione è rappresentato in Figura 4.25.



Figura 4.25: prima versione dello schermo in tantalio.

Per il dimensionamento dello schermo termico, sono stati studiati spessore del filo e diametro e spessore dello schermo in grado di massimizzare gradiente termico e tensioni associate. Quindi, fissati lo spessore del disco e del filo sulla base delle disponibilità dei semilavorati, si è deciso di far variare il diametro dello schermo. Lo studio è stato condotto mediante analisi numerica: in Figura 4.26 ed in Figura 4.27 sono riportate alcune rappresentazioni del modello agli elementi finiti utilizzato. Come si può notare, non è stato modellato il filo di sostegno, ritenendo valida l'ipotesi relativa al calore scambiato per conduzione.

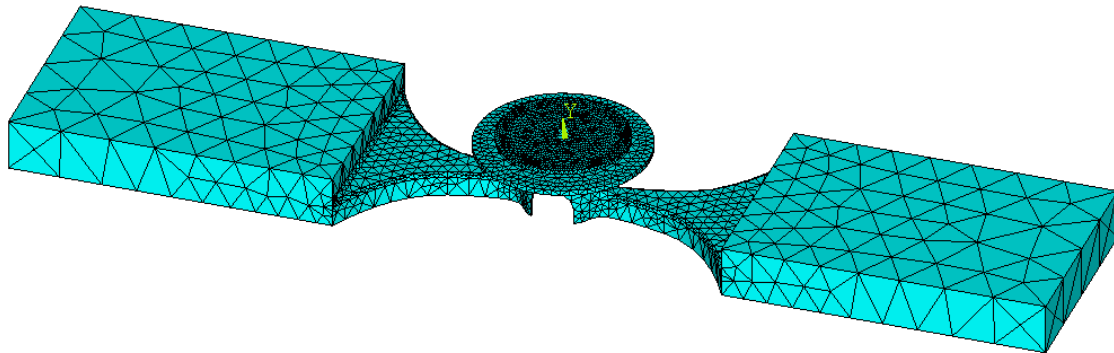


Figura 4.26: rappresentazione del modello del sistema crogiolo-disco-schermo utilizzato.

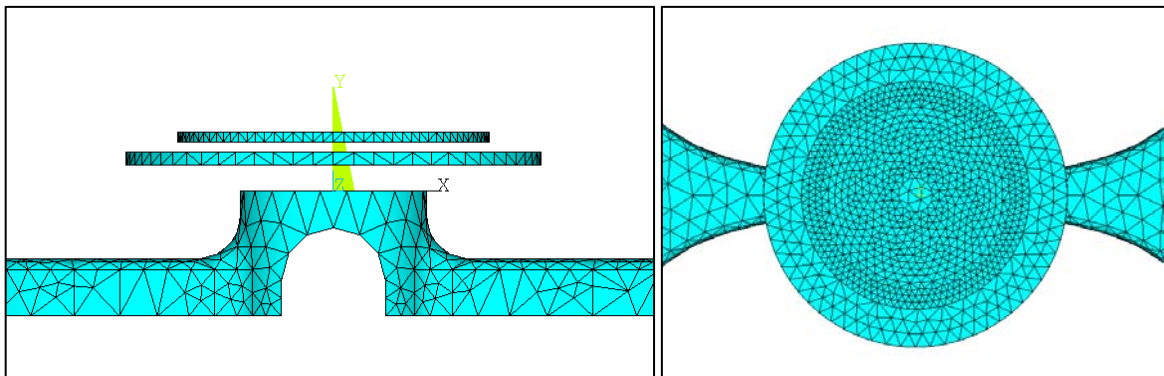


Figura 4.27: rappresentazione del modello del sistema crogiolo-disco-schermo utilizzato.

In Tabella 4.1 sono riportati i risultati delle diverse soluzioni adottando uno spessore del disco pari a 0,5 mm ed un diametro del filo pari a 0,5 mm; in Tabella 4.2 sono riportati i risultati delle diverse soluzioni adottando uno spessore del disco pari a 0,5 mm ed un diametro del filo pari a 1 mm. I risultati sono riportati utilizzando 260 A di corrente riscaldante.

Diametro schermo [mm]	Differenza di temperatura [°C]	Temperatura media [°C]	Prima tensione principale massima [MPa]	Temperatura massima del crogiolo [°C]
18	565	1271	391	2047
22	580	1295	419	2050
26	584	1316	441	2054
28	582	1327	449	2055
30	579	1337	455	2057
32	572	1350	457	2059
36	551	1376	447	2062
40	521	1405	413	2066

Tabella 4.1: soluzioni studiate per lo schermo. Diametro del filo pari a 0,5 mm e spessore del disco 0,5 mm.

Diametro schermo [mm]	Differenza di temperatura [°C]	Temperatura media [°C]	Prima tensione principale massima [MPa]	Temperatura massima del crogiolo [°C]
18	558	1267	385	2046
22	573	1290	411	2049
26	577	1311	433	2053
28	576	1322	441	2054
30	573	1333	446	2056
32	568	1345	448	2058
36	549	1370	440	2061
40	525	1393	416	2064

Tabella 4.2: soluzioni studiate per lo schermo. Diametro del filo pari a 1 mm e spessore del disco 0,5 mm.

Come è evidente, il diametro del filo risulta essere ininfluenza sui risultati, quindi, per comodità, è stato deciso di utilizzare il filo avente diametro di 1 mm. Le tabelle indicano lo schermo migliore per un disco in SiC SA di diametro 40 mm, lo schermo cioè che massimizza la tensione. Alla fine è stato scelto un disco dal diametro di 30 mm per semplicità costruttiva, in grado di garantire un incremento in termini di gradiente e di tensione massima pari ad un centinaio di MPa e di °C.

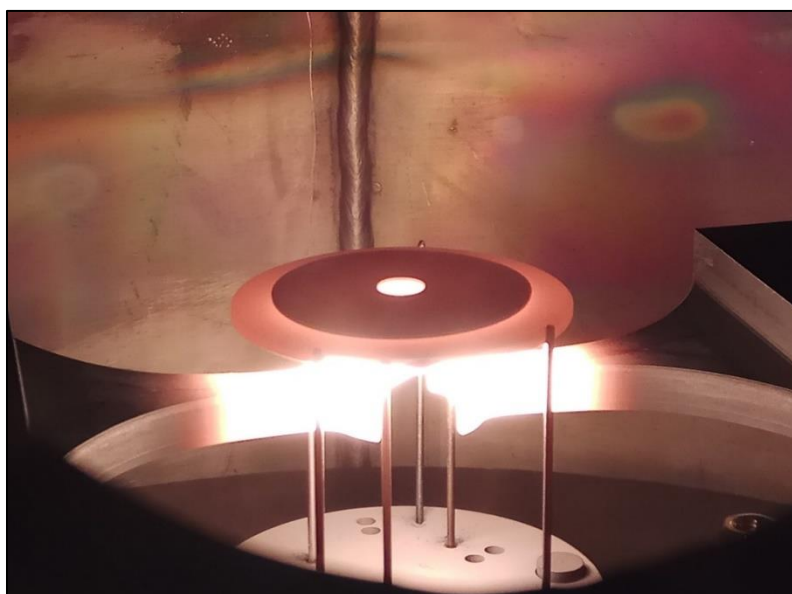


Figura 4.28: fotografia del sistema crogiolo-disco-schermo in funzione.

Grazie all'utilizzo di questa soluzione (in Figura 4.28 è riportata una fotografia del sistema) è stato possibile condurre a rottura due dischi dal diametro di 40 mm e spessore 1,3 mm (Figura 4.29).

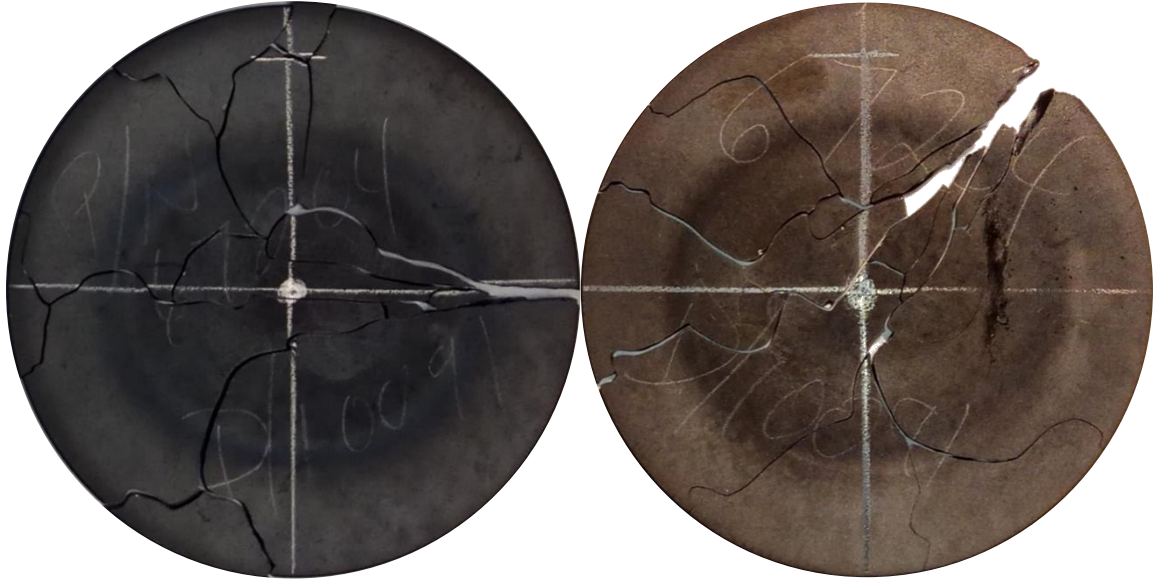


Figura 4.29: foto dei due dischi condotti a rottura grazie all'implementazione dello schermo termico in tantalio.

Com'è possibile visualizzare, i path di frattura, in entrambi i casi, seguono il modello a fontana ritrovato anche nelle precedenti rotture. Anche con il carburo di silicio Hexoloy® SA, è possibile ipotizzare che il punto di innesco della frattura sia in corrispondenza della periferia del disco, cioè punto in cui la prima tensione principale è massima.

In Figura 4.30 ed in Figura 4.31 si riportano i plot di temperatura e prima tensione principale relativi alle condizioni di rottura.

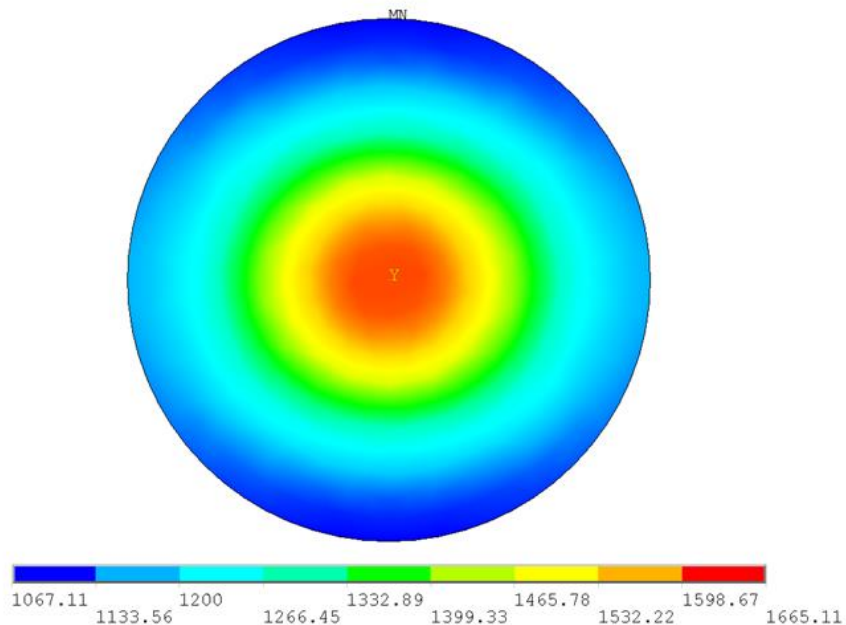


Figura 4.30: plot di temperatura di un disco in carburo di silicio Hexoloy® SA di diametro 40 mm, spessore 1,3 mm, posto ad una distanza dal crogiolo di 1 mm con corrente riscaldante pari a 270 A utilizzando uno schermo in tantalio come sopra dimensionato.

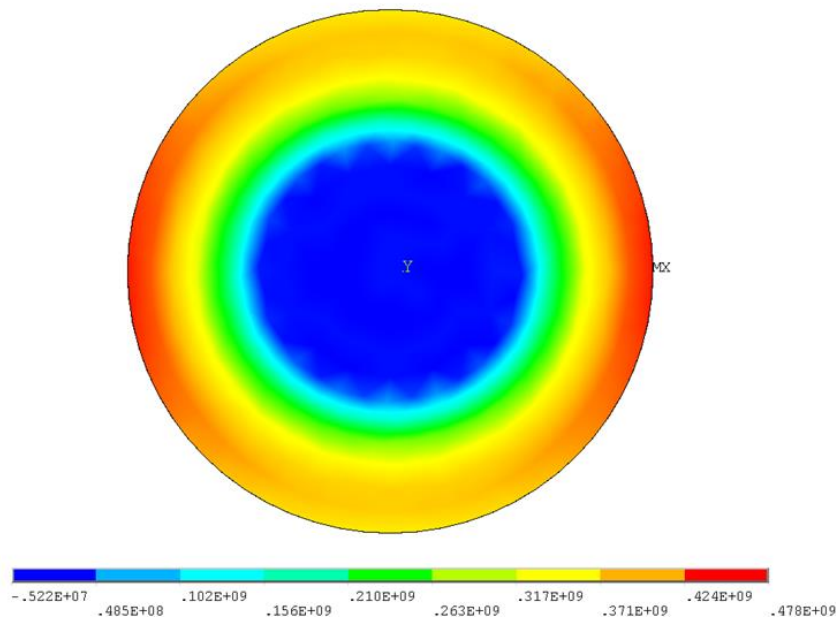


Figura 4.31: plot relativo alla prima tensione principale di un disco in carburo di silicio Hexoloy® SA di diametro 40 mm, spessore 1,3 mm, posto ad una distanza dal crogiolo di 1 mm con corrente riscaldante pari a 270 A utilizzando uno schermo in tantalio come sopra dimensionato.

In Figura 4.32 sono riportati gli andamenti delle temperature numeriche e sperimentali in corrispondenza del centro e della periferia del disco per uno dei due casi di rottura. Come è possibile visualizzare, le temperature acquisite in periferia corrispondono a quelle calcolate attraverso il modello agli elementi finiti, mentre per quanto riguarda il centro del disco, si sono verificati scostamenti di 60-70 °C. Pertanto, utilizzare il modello agli elementi finiti per determinare il gradiente termico di rottura, significa sovrastimare la resistenza del materiale. Inoltre, le due prove non si sono dimostrate ripetibili, in quanto, a parità di corrente, le temperature acquisite sono risultate diverse.

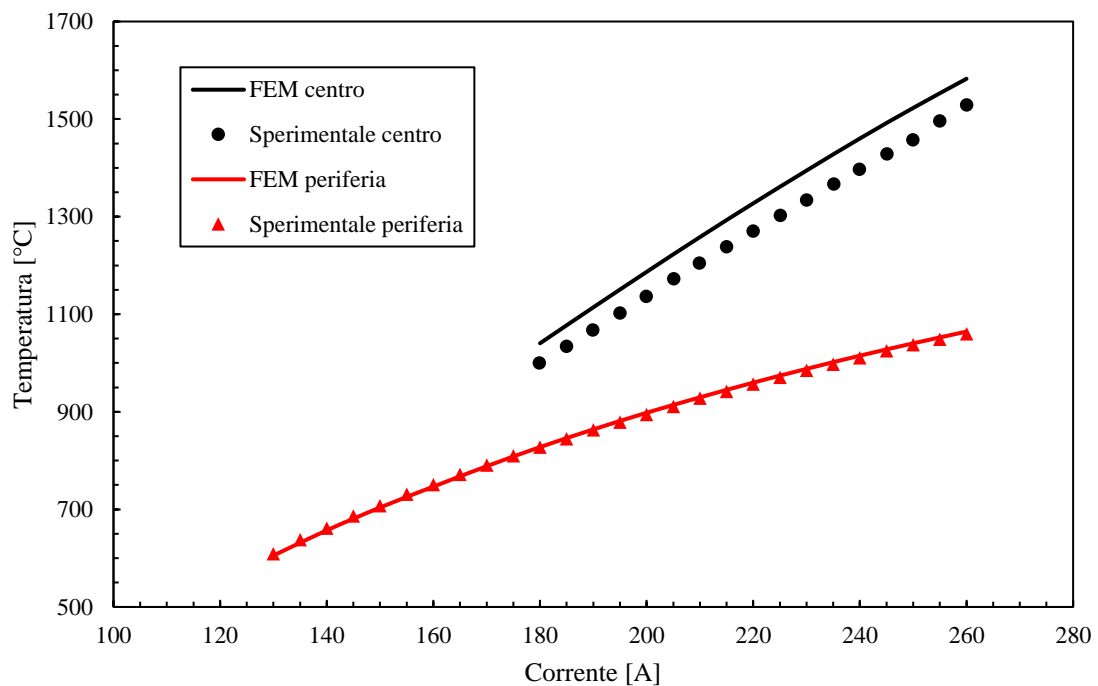


Figura 4.32: temperature numeriche e sperimentali in corrispondenza del centro e della periferia del disco ricavate utilizzando la prima versione dello schermo in tantalio.

Per giustificare i risultati ottenuti, è possibile effettuare alcune considerazioni:

- l'emissività dello schermo in tantalio non è compatibile con quella dichiarata da datasheet, in quanto lo schermo non è stato lucidato;
- il filo di supporto funge da schermo termico, allontanando la realtà sperimentale dal modello numerico;
- il filo di supporto conduce;
- a valle del degasaggio effettuato (portando il tantalio ad oltre 2000 °C), è stata riscontrata una deformazione plastica dello schermo che gli ha conferito una curvatura.

Allo scopo di apportare delle migliorie relative allo schermo in tantalio, è stato costruito quanto illustrato in Figura 4.33. Per evitare l'utilizzo del filo, sono stati utilizzati dei supporti integrati che rispettassero la condizione di distanza di 1 mm tra schermo e disco. Inoltre, lo schermo non è stato degasato, ma solo lavato mediante l'utilizzo di una lavatrice ad ultrasuoni. Le dimensioni dello schermo sono le stesse di quello precedente.

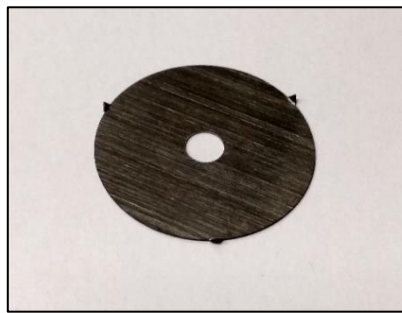


Figura 4.33: seconda versione dello schermo in tantalio.

Mediante l'utilizzo di questo schermo, è stato condotto a rottura un disco (diametro 40 mm, spessore 1,3 mm) la cui rottura è ricostruita in Figura 4.34.



Figura 4.34: foto del disco condotto a rottura grazie all'implementazione della seconda versione dello schermo termico in tantalio.

In Figura 4.35 è riportato il confronto tra le temperature numeriche e sperimentali in corrispondenza del centro del disco.

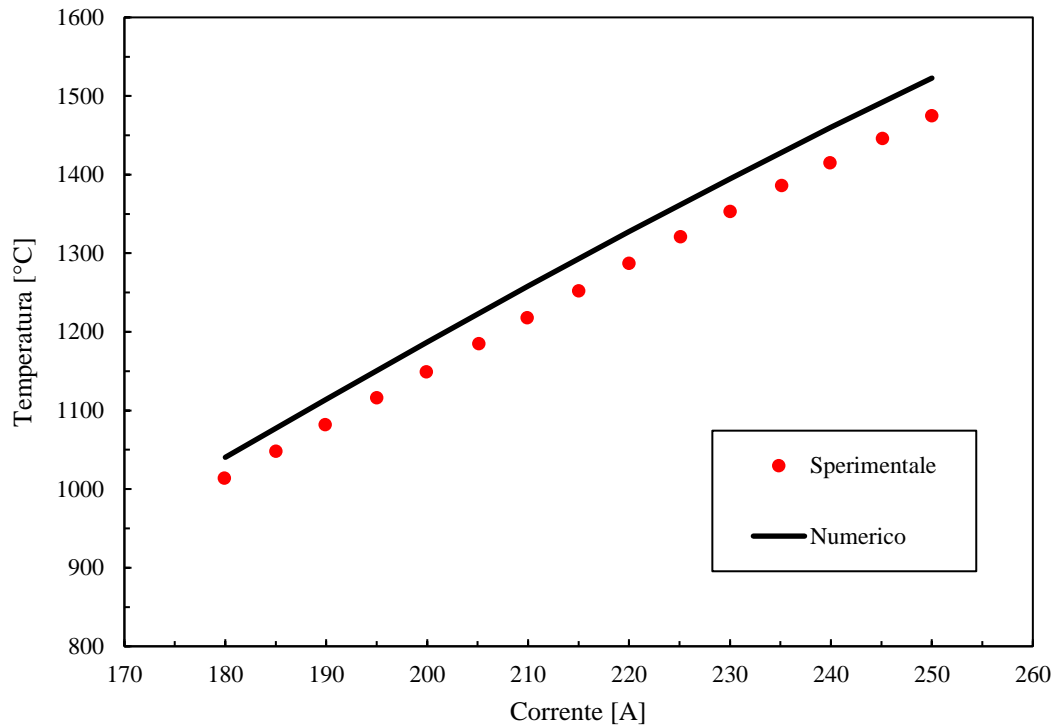


Figura 4.35: temperature numeriche e sperimentali in corrispondenza del centro del disco ricavate utilizzando la seconda versione dello schermo in tantalio.

Com'è possibile visualizzare, nonostante le migliorie apportate, le temperature sperimentali non coincidono con quelle numeriche: questo probabilmente a causa dei valori di emissività reali diversi da quelli da datasheet. Anche in questo caso, l'utilizzo del modello agli elementi finiti per determinare il gradiente termico di rottura, porta ad una sovrastima della resistenza del materiale.

Per risolvere il problema relativo all'emissività (si ricorda che il tantalio non è un corpo grigio, pertanto l'emissività risulta essere di difficile misurazione), si ricorre ad uno schermo termico analogo a quello precedentemente sviluppato, ma costruito in grafite POCO EDM-3[®]. Eseguendo il dimensionamento come precedentemente descritto (Tabella 4.2), risulta che le dimensioni dello schermo termico sono invariate rispetto a quelle trovate per lo schermo in tantalio. Il risultato è riportato in Figura 4.36.



Figura 4.36: schermo termico in grafite POCO EDM-3[®].

In Figura 4.37 ed in Figura 4.38 sono riportati i plot relativi al campo di temperatura ed alla prima tensione principale per un disco di diametro 40 mm, spessore 1,3 mm, distante dal crogiolo 1 mm e corrente riscaldante pari a 270 A ottenuti mediante l'utilizzo dello schermo termico in grafite.

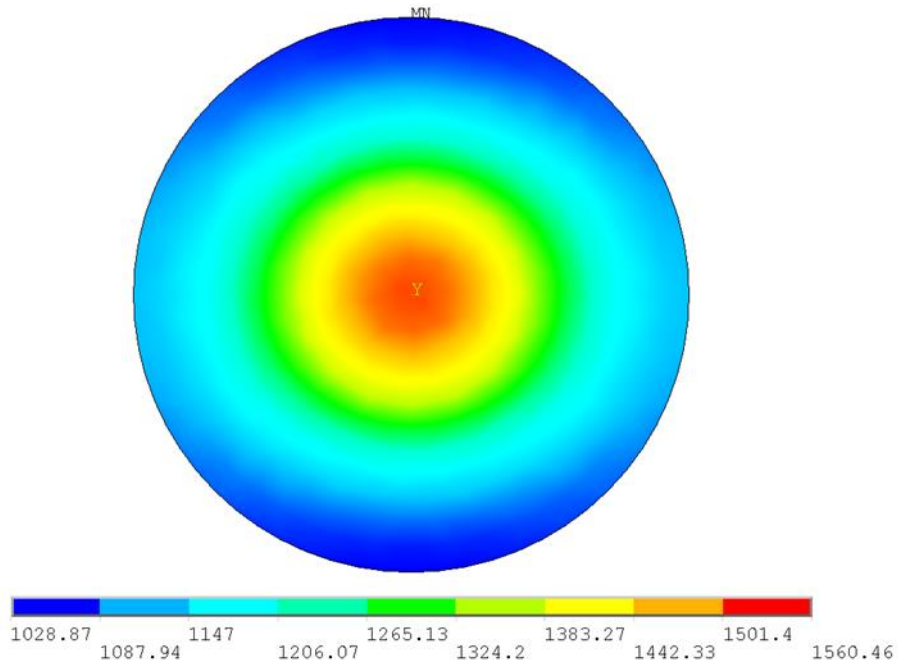


Figura 4.37: plot termico ottenuto mediante l'utilizzo dello schermo termico in grafite (stesse condizioni dei casi precedenti).

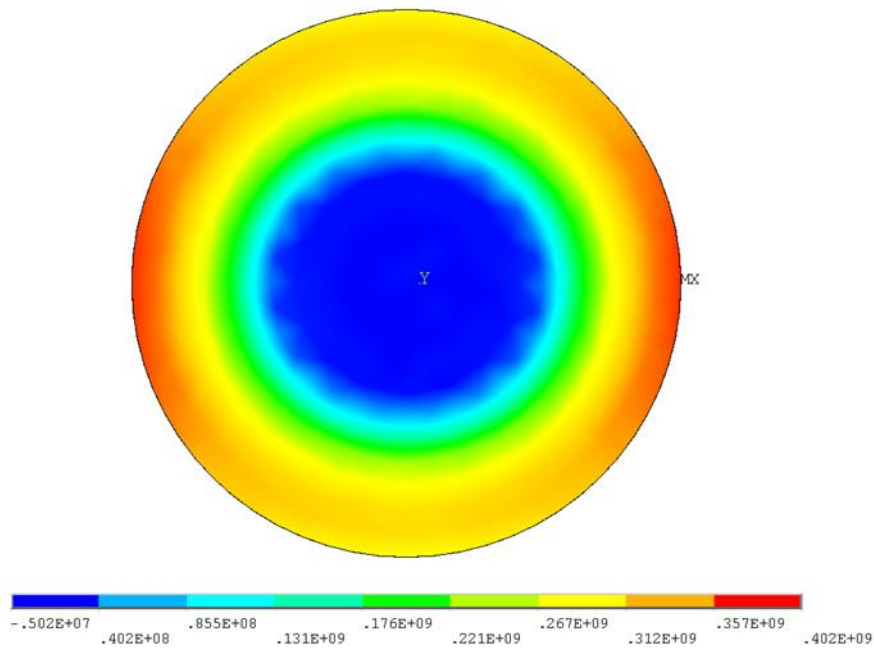


Figura 4.38: plot relativo alla prima tensione principale ottenuto mediante l'utilizzo dello schermo termico in grafite (stesse condizioni dei casi precedenti).

Com'è possibile visualizzare, il gradiente termico e lo stato tensionale associato sono inferiori rispetto a quelli ottenuti numericamente mediante l'utilizzo dello stesso schermo termico in tantalio, però, come illustrato in Figura 4.39, le temperature numeriche coincidono con quelle sperimentali. Questo perché l'emissività della grafite è molto superiore rispetto a quella del tantalio (circa 0,7 contro 0,1), ma è nota e corretta, pertanto l'utilizzo del modello numerico porta ad una stima corretta del gradiente termico di rottura.

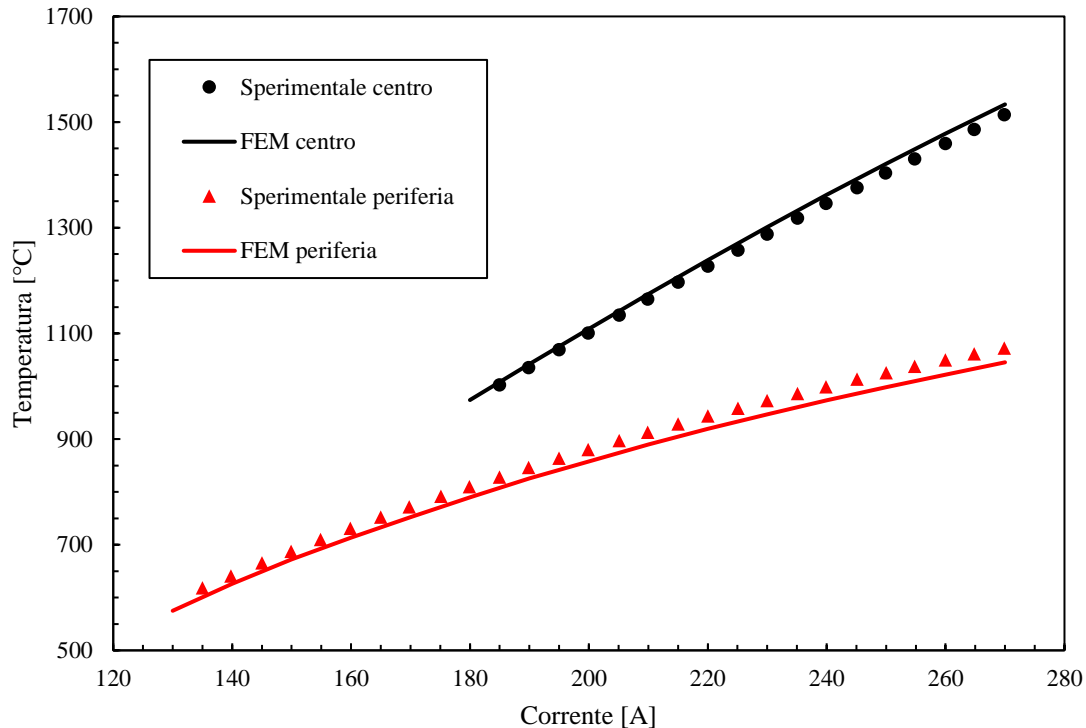


Figura 4.39: temperature numeriche e sperimentali in corrispondenza del centro e della periferia del disco ricavate utilizzando lo schermo in grafite POCO EDM-3®.

A valle dei risultati ottenuti, è stato deciso di utilizzare lo schermo termico in grafite. Per condurre a rottura anche dischi di diametro 30 mm, è stato eseguito il dimensionamento dello schermo termico seguendo le modalità illustrate precedentemente. Il diametro dello schermo che massimizza il gradiente e la tensione associata è pari a 22 mm.

I risultati relativi ai test di rottura condotti sui dischi in Hexoloy® SiC SA sono riportati all'interno del paragrafo dedicato.

Infine sono state provate altre soluzioni per rendere più efficiente il sistema (aumentare il gradiente a parità di corrente) come schermature sulle ali del crogiolo o collimatori. La trattazione viene trascurata, citando solo che non funzionano bene (gradiente inferiore e /o temperatura del crogiolo troppo elevata).

4.5.3 Risultati dei test di rottura su dischi in Hexoloy® SiC SA

L'utilizzo dello schermo termico in grafite ha permesso di condurre a rottura dei dischi di carburo di silicio Hexoloy® SiC SA, il materiale utilizzato per il target, al fine di studiarne il comportamento quando soggetti ad intensi gradienti di temperatura. In Figura 4.40 è riportata un'immagine del sistema utilizzato per portare a rottura i dischi.



Figura 4.40: rappresentazione dello schermo termico in grafite posizionato sopra al disco SiC.

I dischi a disposizione hanno diametro pari a 30 e 40 mm: nel contesto, di questo paragrafo, si riportano i soli risultati relativi ai dischi da 40 mm, aventi diametro pari al target di alta potenza di SPES. Per la trattazione delle rotture relative ai dischi da 30 mm si rimanda al capitolo 6.

I dischi sono condotti a rottura mediante stress indotti da elevati gradienti termici; tali gradienti termici possono instaurarsi a diverse temperature medie. Per esempio, un gradiente di 500 °C può svilupparsi tra 1500 °C e 1000 °C (temperatura media pari a 1250 °C), oppure tra 1700 °C e 1200 °C (temperatura media pari a 1450 °C). Per indagare il comportamento del materiale a differenti temperature medie, sono stati utilizzati dischi aventi diversi spessori: aumentando lo spessore del disco, diminuisce la sua resistenza termica, pertanto è necessario aumentare la potenza da fornirgli per raggiungere un determinato gradiente. Quindi, ciò che ci si aspetta è che, a parità di differenza di temperatura che porta a rottura, i dischi di spessore maggiore cedono a temperature medie maggiori. Gli spessori utilizzati sono 0.5 mm, 0.6 mm, 0.8 mm, 1 mm, 1.2 mm e 1.3 mm. Per poter aumentare il campo di analisi in termini di temperatura media, sono state condotte rotture a diverse distanze disco-crogiolo: aumentando la distanza, il fattore di vista per lo scambio radiativo aumenta, pertanto il disco risulta mediamente più caldo. Questo accorgimento funziona solo con dischi di spessore basso, in quanto i dischi di spessore più grande necessitano di essere posizionati più vicini al crogiolo per garantire la produzione di gradienti termici sufficientemente elevati. Infine, un altro fattore di influenza della temperatura media è relativo alla presenza dello schermo termico in grafite: anche in questo caso, l'espedito è attuabile solo con dischi di basso spessore.

Come già descritto precedentemente, il metodo utilizzato consiste nella rilevazione sperimentale della corrente di rottura e, successivamente, mediante il modello FEM opportunamente tarato, nell'indagine del campo di temperatura e di tensione nel momento della rottura. I due principali parametri che sono stati analizzati alla rottura sono:

- La differenza di temperatura massima, che si instaura in corrispondenza della faccia inferiore del disco, in direzione ortogonale al crogiolo;
- La prima tensione principale massima, che si instaura in corrispondenza della faccia inferiore del disco, in direzione parallela al crogiolo.

La differenza di temperatura, associata ad una temperatura media (calcolata come la media aritmetica della massima differenza di temperatura), è indice degli intensi gradienti che si instaurano sul disco, mentre la prima tensione principale massima è indice della resistenza a trazione del materiale.

In Tabella 4.3 sono riassunte tutte le rotture condotte sui dischi da 40 mm; sono indicate le condizioni sperimentali utilizzate ed i risultati ottenuti relativamente ai parametri d'interesse.

Numero test	Spessore del disco [mm]	Distanza dal crogiolo [mm]	Utilizzo schermo termico	Differenza di temperatura [°C]	Temperatura media [°C]	Prima tensione principale massima [MPa]
1	0,5	1	Si	509	1076	357
2	0,5	1	Si	523	1102	371
3	0,5	1	Si	523	1102	371
4	0,5	1	Si	517	1099	373
5	0,5	2,5	Si	474	1096	339
6	0,5	2,5	No	539	1156	369
7	0,6	1	Si	524	1140	381
8	0,6	1	Si	543	1163	400
9	0,6	1	Si	543	1163	400
10	0,6	2,5	Si	530	1196	392
11	0,6	2,5	No	583	1243	410
12	0,8	1	Si	460	1130	331
13	0,8	1	Si	481	1153	350
14	0,8	1	No	564	1228	402
15	1	1	Si	430	1143	311
16	1	1	Si	541	1166	327
17	1	1	Si	532	1256	400
18	1	1	Si	552	1277	418
19	1	1	Si	532	1256	400
20	1	1	No	540	1245	385
21	1,2	1	Si	528	1289	401
22	1,2	1	Si	615	1386	481
23	1,2	1	Si	564	1329	434
24	1,2	1	Si	545	1309	417
25	1,3	1	Si	531	1295	402

Tabella 4.3: riepilogo delle rotture effettuate sui dischi in Hexoloy® SiC SA con diametro 40 mm.

Come già detto, è interessante mettere in evidenza la prima tensione principale in funzione della temperatura media del disco. In realtà, siccome la frattura parte dalla periferia, sarebbe bene utilizzare la temperatura minima del disco come variabile indipendente; così facendo, però, ci si allontana dal concetto di gradiente termico, quindi dalla realtà sperimentale; pertanto, si preferisce mantenere la temperatura media rappresentativa del gradiente in atto. In Figura 4.41 è riportato il grafico di quanto appena descritto relativo a tutti i casi di Tabella 4.3.

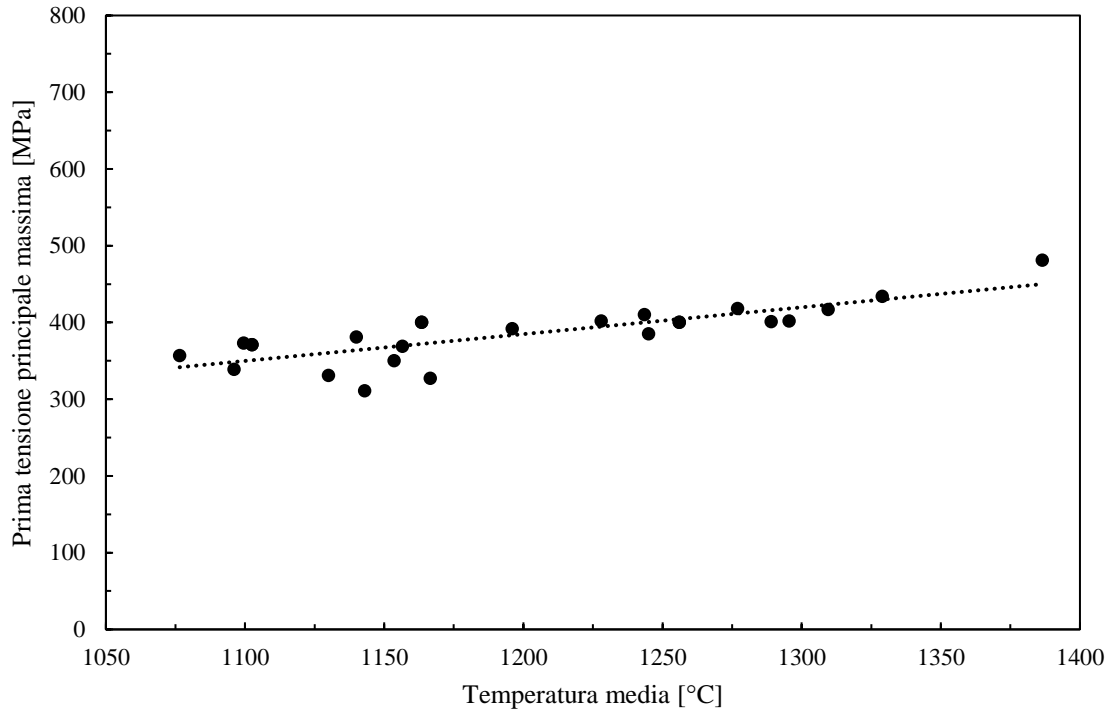


Figura 4.41: rappresentazione della prima tensione principale massima in funzione della temperatura media (i punti sono a rottura).

Com'è possibile apprezzare, la tensione di rottura media risulta essere pari a circa 390 MPa nel range di temperatura media che va da 1050 °C a 1350 °C. Inoltre, è possibile evidenziare un incremento lineare della resistenza con la temperatura. A supporto di questi risultati, si riporta un grafico disponibile in letteratura [48] in cui è plottata la tensione di trazione di rottura in funzione della temperatura per un carburo di silicio in forma alfa (Figura 4.42).

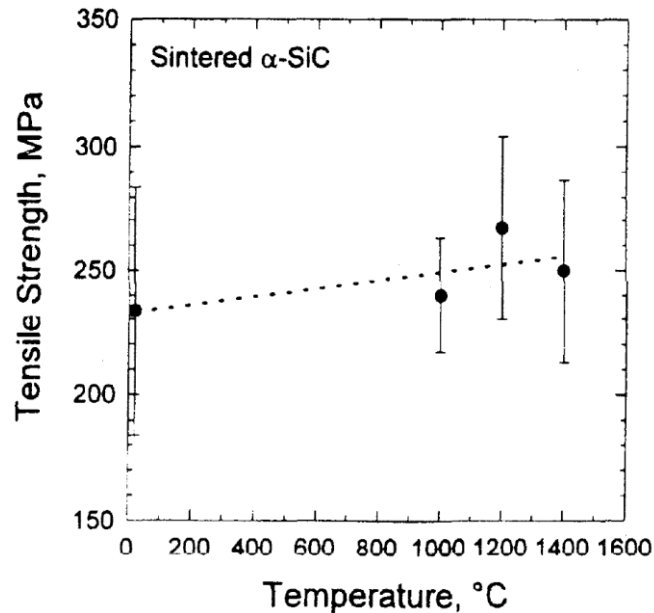


Figura 4.42: tensione di trazione a rottura in funzione della temperatura [48].

Com'è possibile apprezzare, l'andamento della resistenza a trazione, carico analogo a quello del presente caso di studio, è linearmente crescente con la temperatura (sebbene il grafico di Figura 4.42 non risulti essere particolarmente preciso), pertanto in accordo con quanto evidenziato in Figura 4.41.

Infine, si riporta il grafico relativo alla differenza di temperatura a rottura in funzione della temperatura media per tutti i casi di Tabella 4.3.

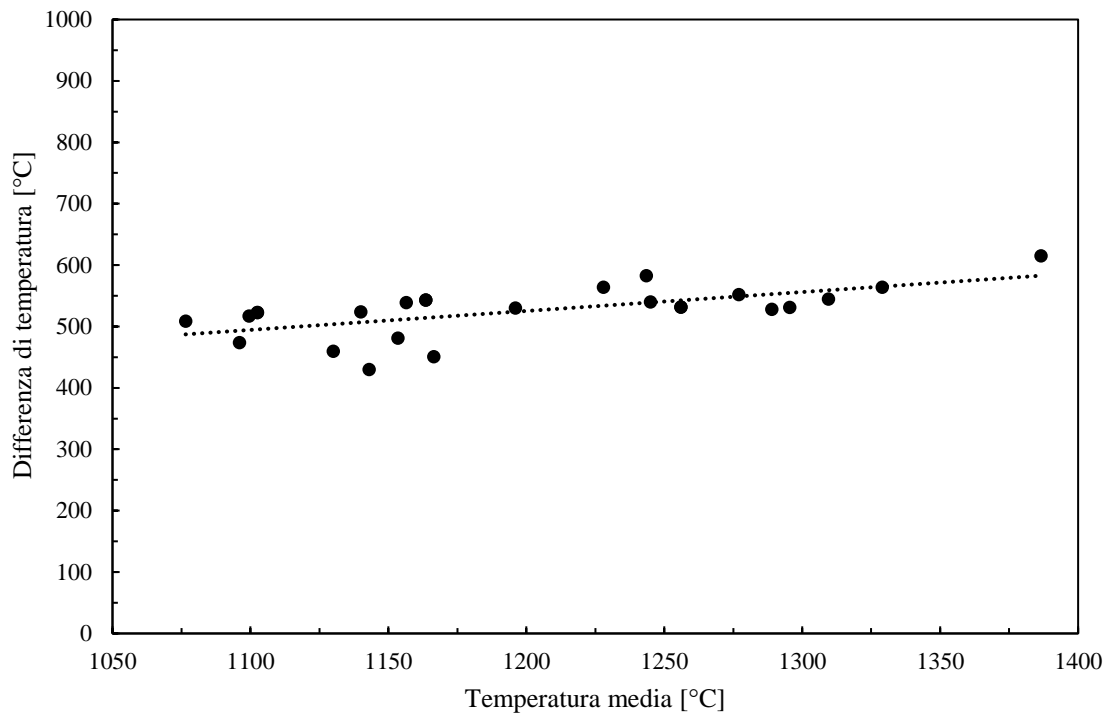


Figura 4.43: rappresentazione della differenza di temperatura massima in funzione della temperatura media (i punti sono a rottura).

Anche la differenza di temperatura a rottura presenta un andamento crescente con la temperatura in un range compreso tra 1050 °C e 1350 °C. Il valore medio della differenza di temperatura massima che i dischi sono in grado di sopportare risulta essere pari a circa 520 °C.

I dati di resistenza sono stati ottenuti fino ad una temperatura media di circa 1350 °C, quindi la temperatura massima ottenuta è di circa 1700 °C. In realtà, il target del progetto SPES lavorerà attorno a 2000 °C, pertanto rimane un intervallo di temperatura di circa 300 °C all'interno del quale non si è a conoscenza del comportamento strutturale del materiale. L'azienda produttrice (Saint-Gobain), però, garantisce elevate prestazioni meccaniche in atmosfera inerte fino a 2000 °C [49]; inoltre, i materiali Hexoloy® sono sinterizzati a circa 2150 °C, pertanto è possibile garantire integrità e resistenza meccanica fino a tali valori di temperatura. Relativamente al target SPES di bassa potenza, è possibile riprendere lo studio riguardante le analisi termomeccaniche effettuate sui dischi [50]. Tale lavoro riporta una tensione massima di circa 105 MPa, pertanto risulta verificato con un coefficiente di sicurezza di circa 4.

4.5.4 Analisi al microscopio elettronico

Con lo scopo di studiare nel dettaglio la frattura, sono state realizzate delle analisi SEM (*Scanning Electron Microscope*) presso i Laboratori Nazionali di Legnaro. Tali analisi hanno permesso di indagare le superfici di frattura dei pezzi in cui i dischi si sono suddivisi. Le immagini che seguono sono state ottenute da diversi campioni condotti a rottura con le diverse tipologie di schermo termico.

Le analisi preliminari effettuate sul disco in Hexoloy® SiC SE hanno permesso di evidenziare due diverse morfologie di superficie di frattura: una, frastagliata ed ondulata, in corrispondenza della zona di innesco della cricca ed una liscia e piatta che caratterizza tutte le altre superfici. Figura 4.41 mette in evidenza le due tipologie di superficie descritte.

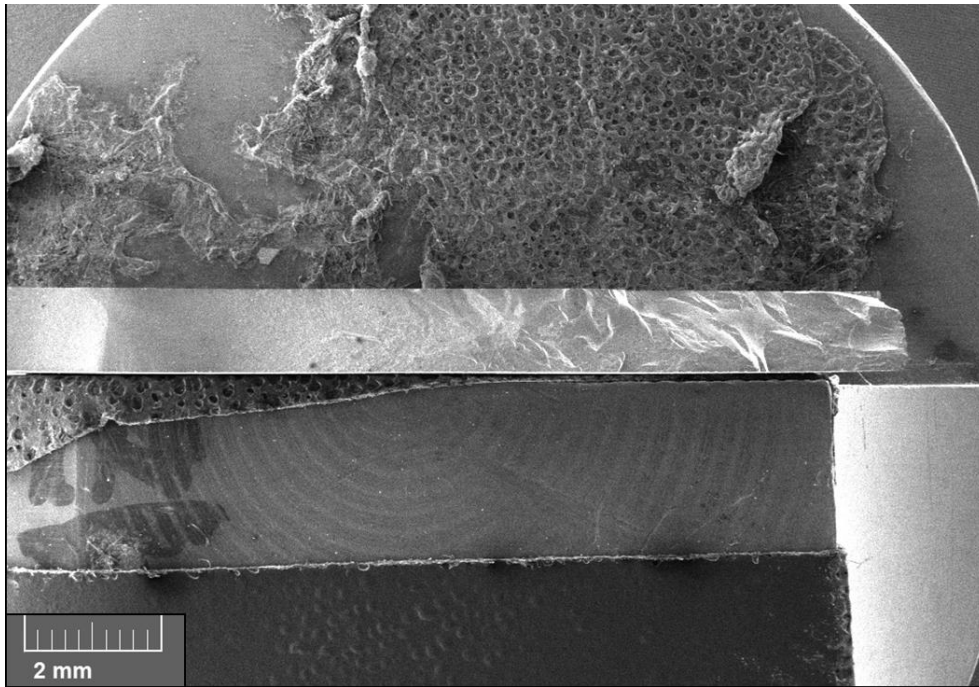


Figura 4.44: immagine SEM relativa alla zona di innesco della cricca. Le due tipologie di morfologia superficiale sono facilmente distinguibili.

Come effettuato precedentemente per il disco in Hexoloy® SiC SE, sono state formulate diverse ipotesi per spiegare questi due diversi comportamenti. Andando ad analizzare separatamente la superficie ondulata (Figura 4.42 e Figura 4.43) e la superficie liscia (Figura 4.44 e Figura 4.45), si nota che la differenza è solo macroscopica, in quanto la morfologia del grano è apparentemente simile. Quindi, non si può affermare che vi siano gli estremi per dichiarare un comportamento plastico, né tantomeno esistono le condizioni necessarie a distinguere il tipo di frattura (transgranulare o intergranulare, Figura 4.22). Anche in questo caso, l'ipotesi più probabile è che vi siano due differenti velocità di propagazione della cricca.

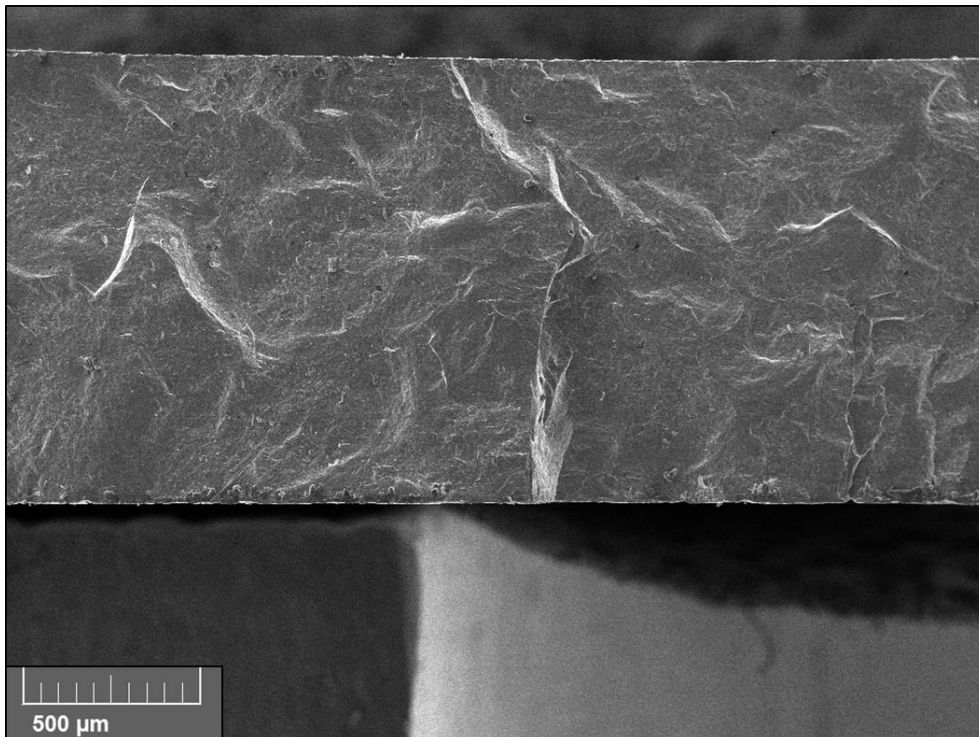


Figura 4.45: immagine SEM relativa alla zona frastagliata (100x).

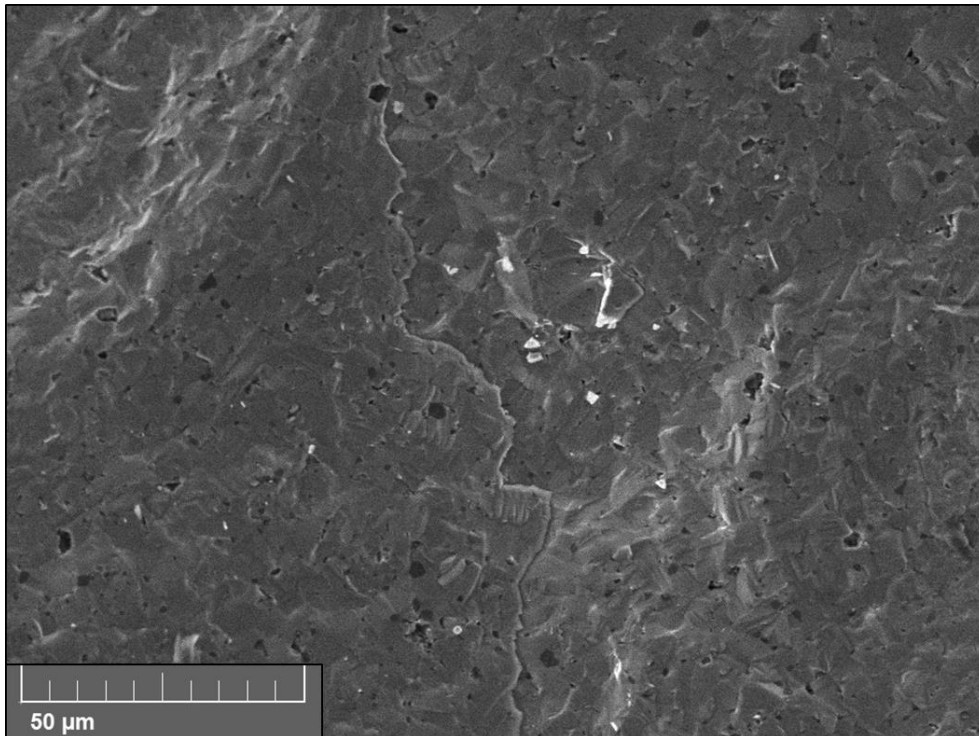


Figura 4.46: immagine SEM relativa alla morfologia del grano in corrispondenza della superficie ondulata (1600x).

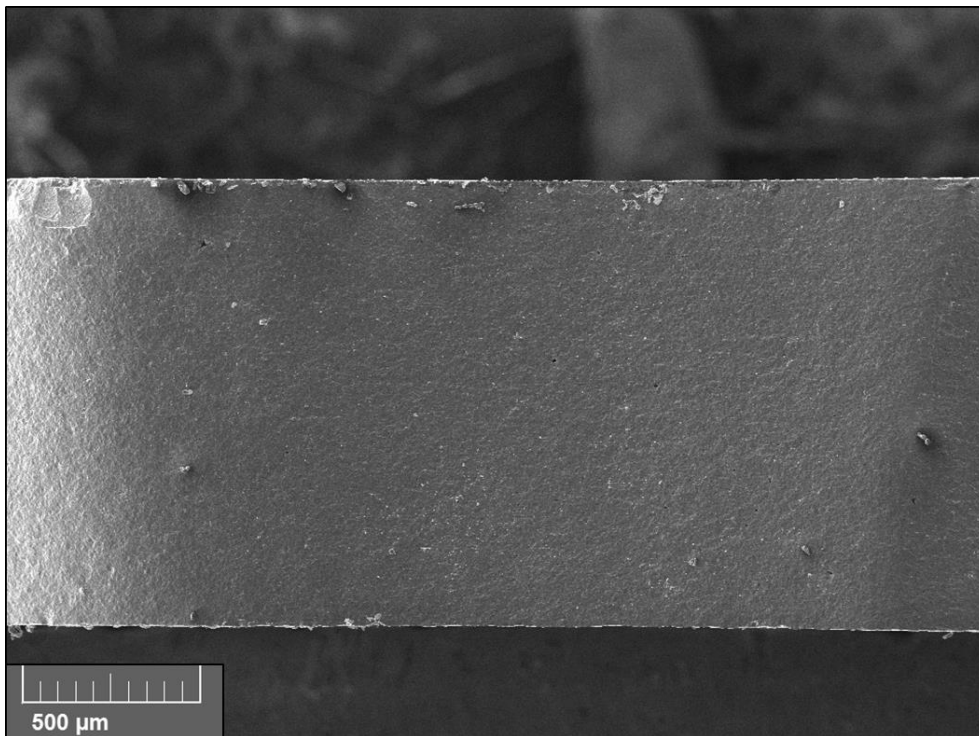


Figura 4.47: immagine SEM relativa alla zona liscia (100x).

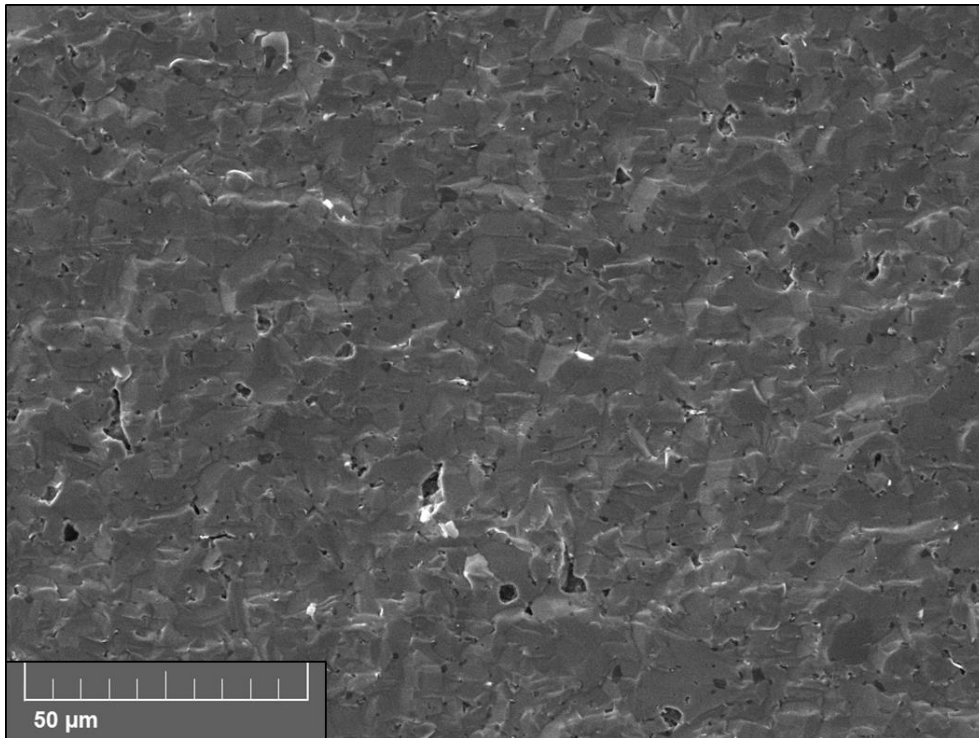


Figura 4.48: immagine SEM relativa alla morfologia del grano in corrispondenza della superficie liscia (1600x).

Come è possibile vedere analizzando i dischi ricostruiti, la posizione dell'innesco della frattura sembra essere arbitraria: avviene sempre a partire dalla circonferenza esterna, posizione in cui la prima tensione principale risulta massima, ma mai dallo stesso punto.

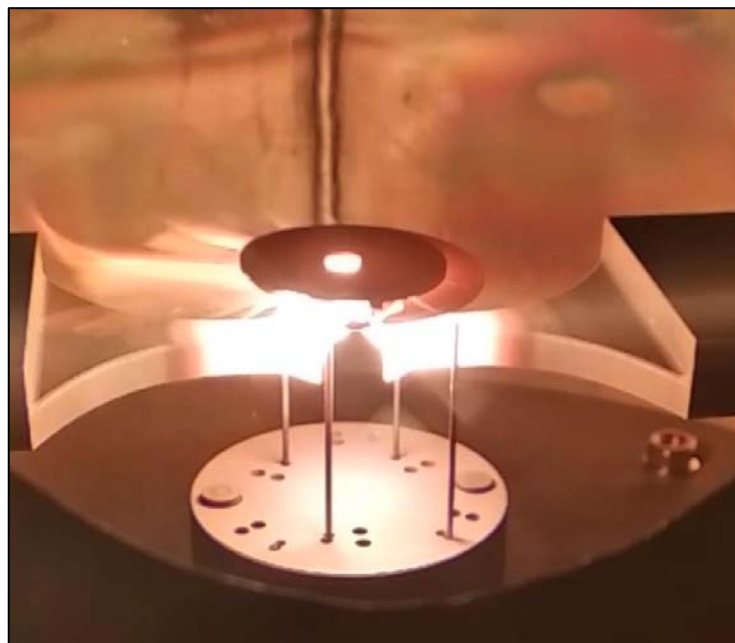


Figura 4.49: immagine relativa al momento della rottura di un disco. È possibile visualizzare che solo la parte destra è intatta.

Il motivo di questo comportamento è da imputare alla presenza di difetti all'interno del disco: per esempio, in Figura 4.46 e Figura 4.47 sono riportate due immagini SEM di due lembi adiacenti dello stesso disco in corrispondenza della zona di innesco della cricca. La presenza di una porosità è evidente.

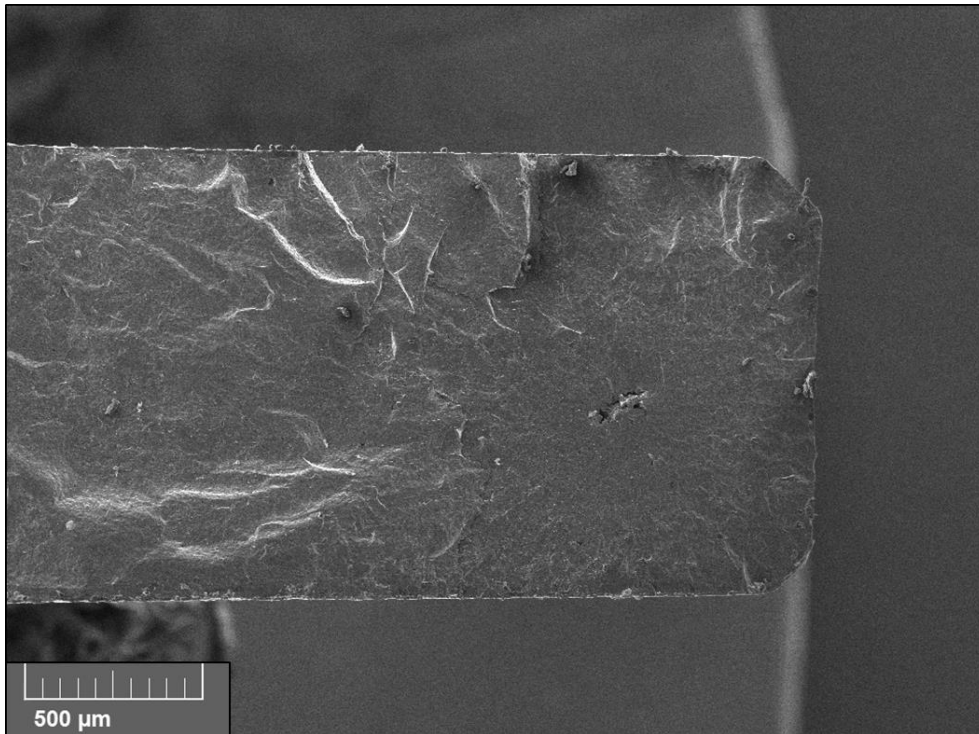


Figura 4.50: immagine SEM relativa ad un difetto rilevato in corrispondenza dell'innescò della cricca (100x).

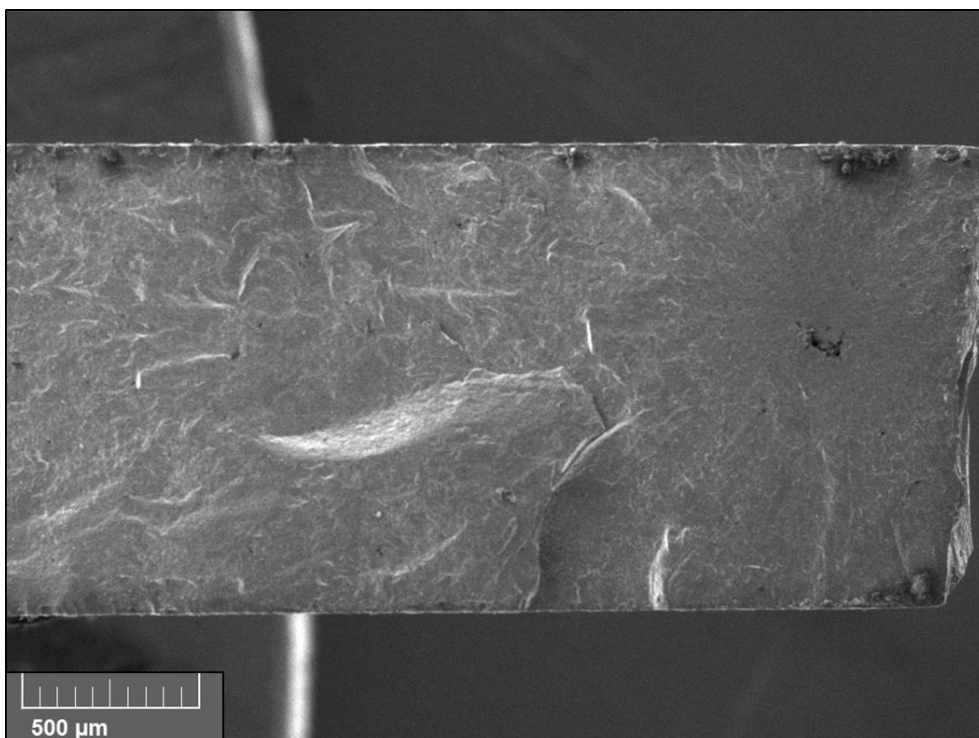


Figura 4.51: immagine SEM relativa ad un difetto rilevato in corrispondenza dell'innescò della cricca (100x).

È plausibile ipotizzare che, in corrispondenza dell'interfaccia tra la porosità ed il materiale, vi sia stata una concentrazione delle tensioni che ha portato il disco a rottura. Chiaramente, la posizione del difetto che causa la rottura è imprevedibile, pertanto si giustifica l'arbitrarietà della posizione di innescò.

Un'altra tipologia di difetto riscontrata nel materiale è illustrata in Figura 4.48 e Figura 4.49: la prima ipotesi è che si tratti di un'inclusione che ha impedito la corretta sinterizzazione del materiale durante il processo produttivo.

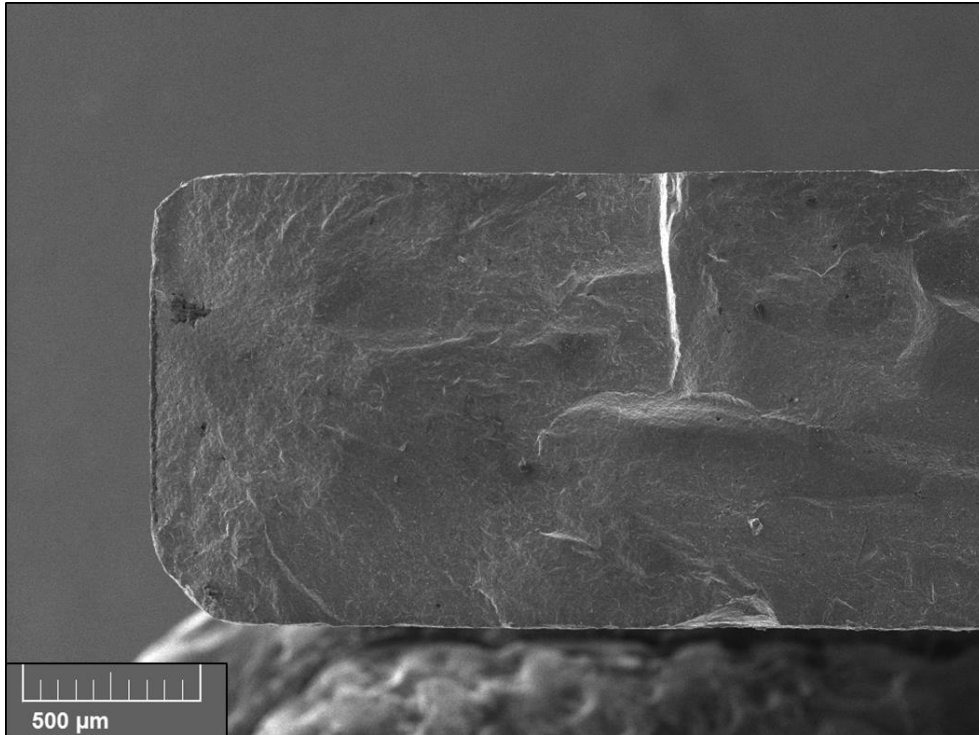


Figura 4.52: immagine SEM relativa ad un difetto rilevato in corrispondenza dell'innesco della cricca (100x).

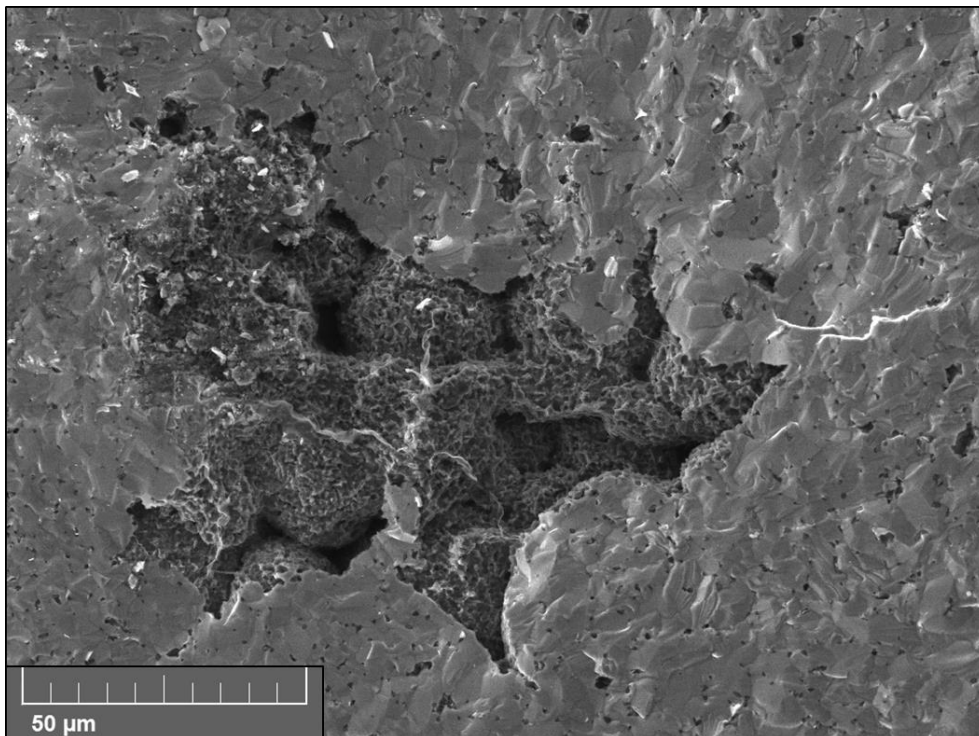


Figura 4.53: immagine SEM relativa all'inclusione presente nella matrice SiC (1600x).

Per approfondire questo aspetto, è stata condotta un'analisi EDS (mediante il SEM disponibile ai Laboratori Nazionali di Legnaro): questo tipo di indagine permette di analizzare il tipo di elemento chimico presente in un determinato punto del materiale misurando l'energia dei raggi X che esso emette quando colpito da un elettrone. L'energia di questa radiazione è caratteristica dell'elemento chimico: contando il numero di raggi X emessi per un determinato valore di energia, si ottiene una stima qualitativa della quantità di elemento presente.

In Figura 4.50 è riportato un grafico il cui asse delle ascisse rappresenta l'energia della radiazione emessa, mentre l'asse delle ordinate rappresenta il numero di conteggi (quest'ultimo è espresso utilizzando un'unità arbitraria, in quanto non rappresentativo di una grandezza fisica definita).

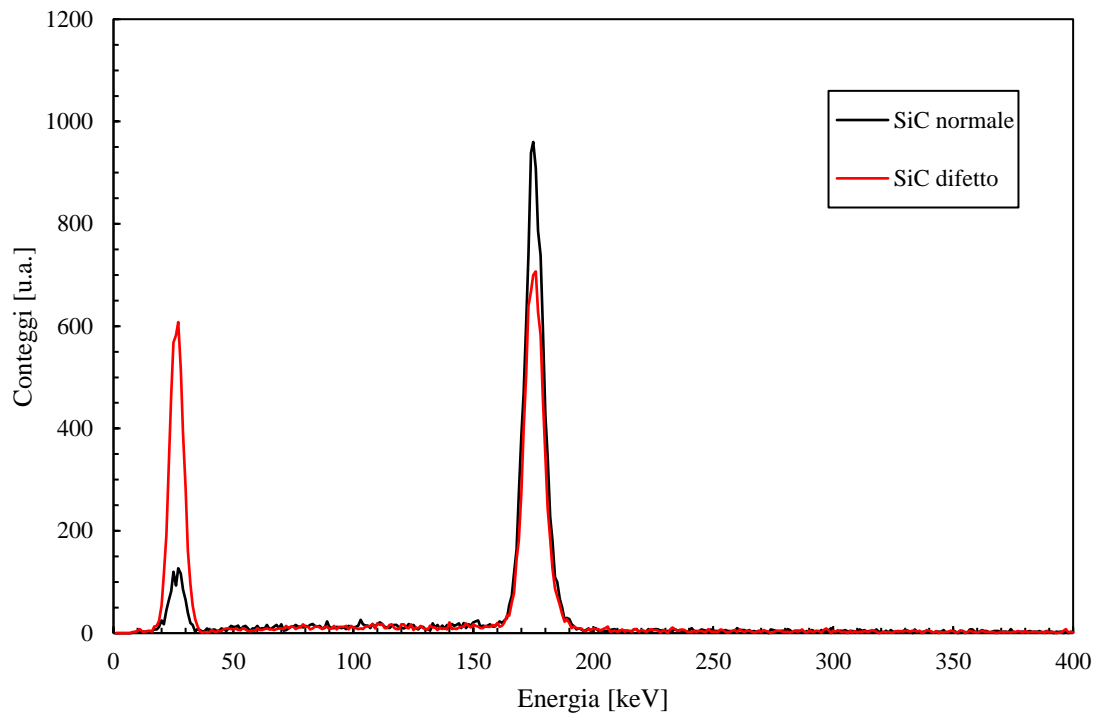


Figura 4.54: risultati dell'analisi EDS in corrispondenza della matrice SiC e dell'inclusione. È evidente l'elevata quantità di carbonio presente nel difetto.

L'analisi EDS è stata condotta in corrispondenza della matrice SiC (linea nera) ed in corrispondenza del difetto (linea rossa). In entrambi i casi, sono evidenti due picchi: quello a più bassa energia (circa 30 keV) è relativo all'elemento chimico carbonio, mentre quello a più alta energia (circa 175 keV) è relativo al silicio. Ciò che si nota è l'elevato numero di conteggi di carbonio in corrispondenza del difetto, mentre la presenza di silicio, in questo punto, risulta più contenuta rispetto alla matrice SiC: ciò è dovuto al fatto che, probabilmente, l'inclusione è costituita da polveri di carbonio che non sono state sinterizzate durante il processo produttivo. Anche in questo caso, l'interfaccia tra difetto e matrice SiC ha provocato una concentrazione delle tensioni che ha portato il disco a rottura. Inoltre, è possibile mettere in luce un ulteriore aspetto: in letteratura sono presenti degli studi relativi alla propagazione subcritica delle cricche (*SCG, Subcritical Crack Growth*) nel carburo di silicio [51], cioè all'accrescimento della cricca, a partire da difetti preesistenti, fino alla condizione di criticità alla quale la cricca propaga istantaneamente. L'area in cui avviene l'accrescimento subcritico è caratterizzata da una zona, attorno al difetto, la cui morfologia risulta piatta: in Figura 4.48 è possibile apprezzare quanto descritto. Inoltre, analizzando l'immagine, è possibile stimare la lunghezza critica della cricca per il livello di tensione a cui il disco era soggetto misurando l'ampiezza della zona di accrescimento subcritico; tale lunghezza critica è di circa 500 μm .

Per completezza, si riportano altre immagini realizzate al SEM relative a difetti presenti nella matrice SiC: in Figura 4.51 è riportata una porosità evidenziata lungo una delle superfici di frattura, mentre in Figura 4.52 è riportata un'immagine di una porosità posizionata lungo la periferia esterna del disco. Infine, in Figura 4.53 si mette in luce la rugosità del bordo del disco: ogni difetto di questo genere, interno o esterno al disco, rappresenta un punto di concentrazione delle tensioni, quindi un possibile punto di innesco della cricca.

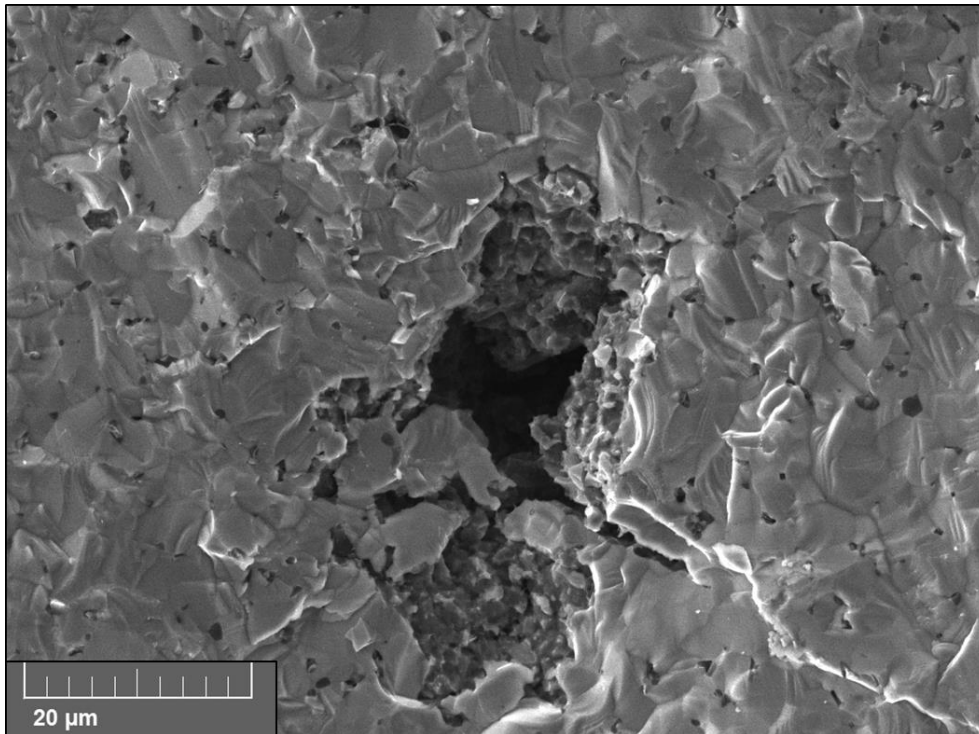


Figura 4.55: immagine SEM relativa ad una porosità nella matrice SiC (3200x).

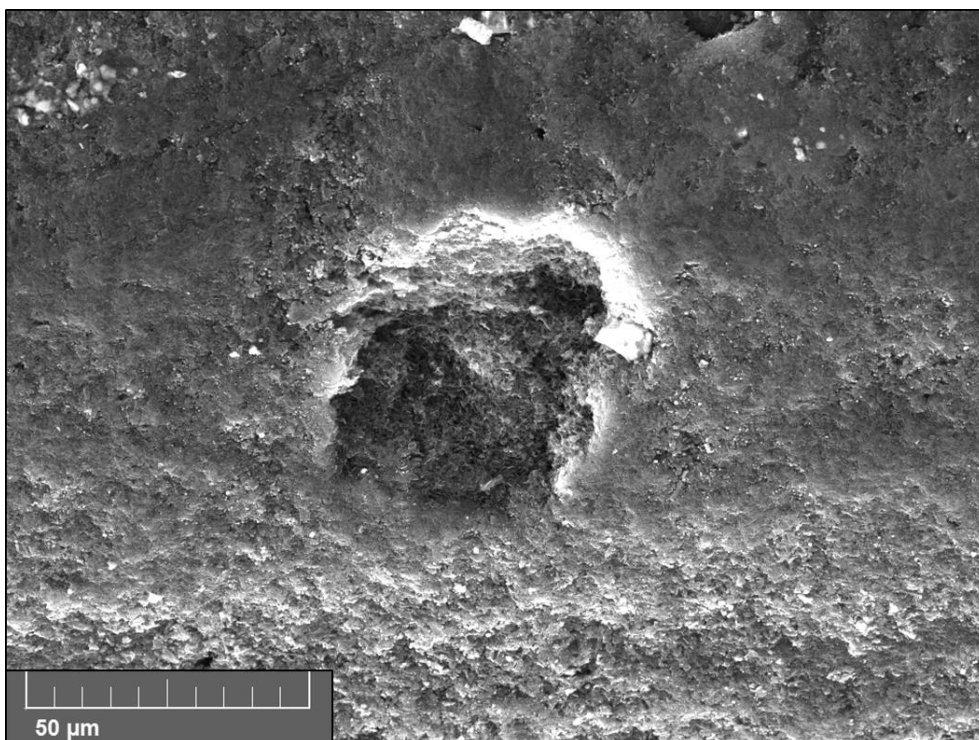


Figura 4.56: immagine SEM relativa ad un difetto presente in corrispondenza del bordo del disco (1600x).

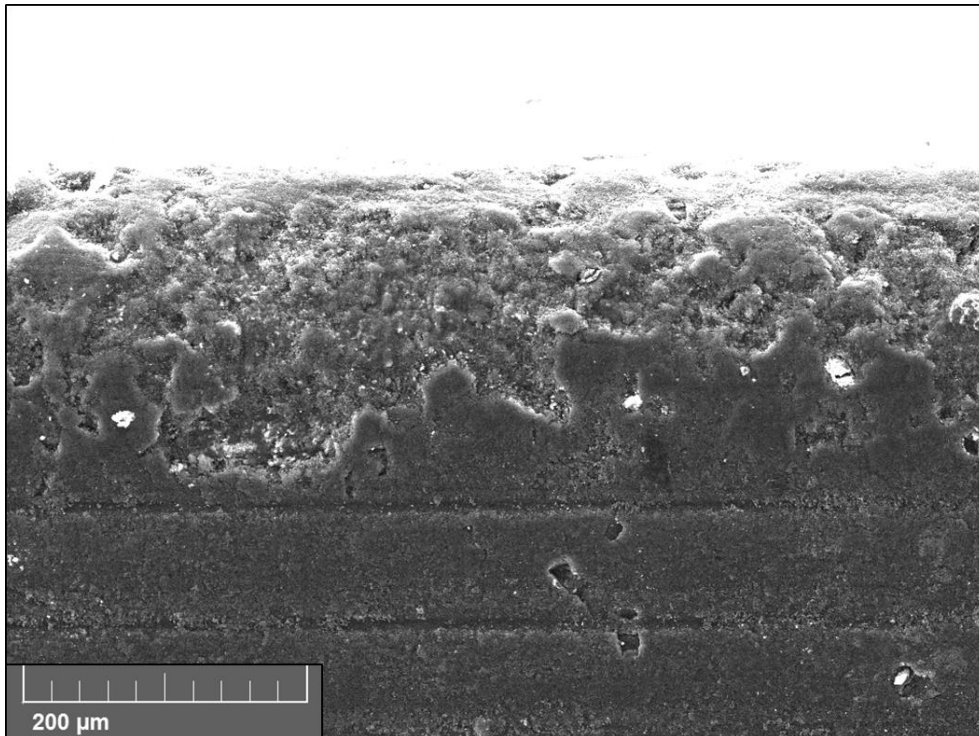


Figura 4.57: immagine SEM relativa alla superficie in corrispondenza del bordo esterno del disco (400x).

A valle di queste evidenze sperimentali, è chiaro che la frattura è governata dalla presenza dei difetti. Nell'ipotesi in cui la frattura non preveda alcun tipo di plasticità, come in questo caso, è possibile applicare la *meccanica della frattura lineare elastica*: essa prevede che lo stato tensionale all'apice di una cricca sia esprimibile attraverso il *fattore di intensificazione delle tensioni K*, funzione della geometria del corpo e della cricca e del tipo di sollecitazione. Se K raggiunge il valore K_C definito *limite*, la cricca propaga. Il valore K_C si può ottenere a partire da considerazioni legate alle dimensioni del difetto ed allo stato tensionale presente, quindi conducendo a rottura dischi contenenti difetti e misurando la loro dimensione, si può ottenere una stima di questo parametro. Il presente lavoro di tesi non prevede questo tipo di studio, proponendolo, pertanto, come sviluppo futuro.

4.6 Test su dischi in grafite POCO EDM-3®

La grafite POCO EDM-3® è uno dei materiali più utilizzati per la costruzione di componenti all'interno del target e lungo la linea protonica. In particolare, è utilizzato per la costruzione dei dischi, disposti parallelamente ai dischi target, necessari a contenere le specie esotiche all'interno della box ed a fermare il fascio protonico una volta che ha attraversato tutti i dischi target (rispettivamente target windows e target dumpers). Da questo punto di vista, è necessario stimare i gradienti termici che i dischi sono in grado di sopportare, in quanto la loro rottura comporterebbe la fuoriuscita dei radioisotopi ed il danneggiamento della camera da vuoto nel caso in cui il fascio di protoni la colpisse.

4.6.1 Test base

Durante i primi test, è stato utilizzato l'apparato sperimentale per la riproduzione dei gradienti termici nel tentativo di portare a rottura i dischi in grafite POCO EDM-3®. Queste prove di rottura non sono andate a buon fine, in quanto la grafite è dotata di un modulo elastico notevolmente basso (11 GPa circa a temperatura ambiente), pertanto non sviluppa livelli di tensione tali da portarla a rottura. A titolo d'esempio, si riporta il plot termico e della prima tensione principale di un disco di diametro 40 e spessore 1,3 mm, posizionato ad un 1 mm dal crogiolo e riscaldato a 270 A (Figura 4.54).

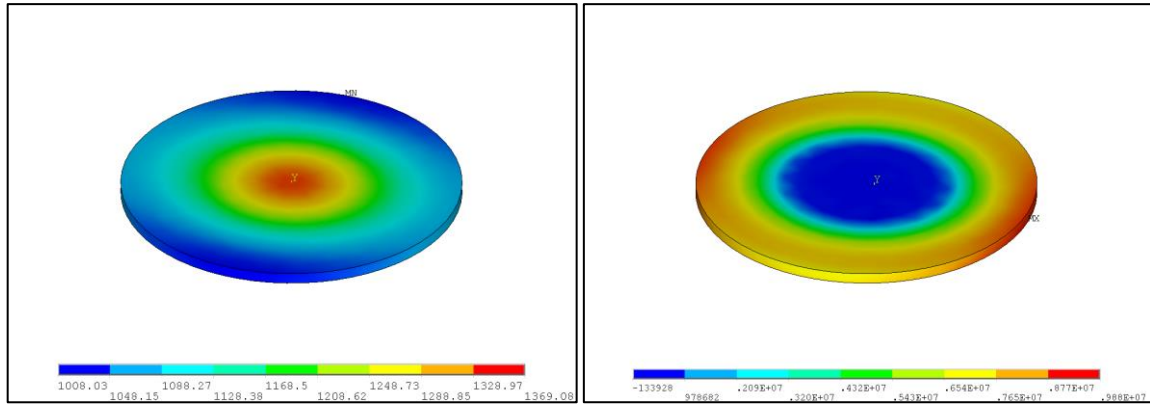


Figura 4.58: plot termico (a sinistra) e della prima tensione principale di un disco in grafite POCO EDM-3[®] avente diametro 40 mm, spesso 1,3 mm, posto ad 1 mm dal crogiolo e riscaldato con una corrente di 270 A.

Come si può notare, la prima tensione principale, quella che si ritiene sia responsabile della frattura di un materiale fragile, è di circa 10 MPa (con un gradiente di circa 360 °C a temperatura media di circa 1200 °C), cioè un ordine di grandezza inferiore alla tensione che porterebbe a rottura questa tipologia di grafite.

È da sottolineare il fatto che il modulo elastico è noto solo a temperatura ambiente. La ditta produttrice del materiale indica che il modulo elastico aumenta con la temperatura, ma non è in grado di fornire risultati più accurati, pertanto non si possono eseguire simulazioni più accurate. Si è però consci del fatto che l'aumento del modulo elastico si ripercuote in un aumento di tensione, quindi i 10 MPa sono rappresentativi di una sottostima di tale parametro.

Comunque, alla luce di questi risultati, si è pensato che tentare di incrementare i gradienti termici mediante l'utilizzo di uno schermo (come nel caso delle rotture del SiC SA) non portasse a risultati differenti, pertanto si è deciso di eseguire degli intagli radiali sui dischi, al fine di incrementare il livello di tensione a cui sono soggetti.

4.6.2 Test con dischi intagliati

Come già anticipato, data la natura della grafite nel tollerare elevati gradienti termici, è stato deciso di introdurre dei difetti, mediante lavorazione meccanica sui dischi, consistenti in intagli radiali.

Per la definizione della geometria dell'intaglio, è necessario considerare due parametri: la lunghezza e la larghezza (quest'ultima può essere considerata come due volte il valore del raggio), come in Figura 4.55.

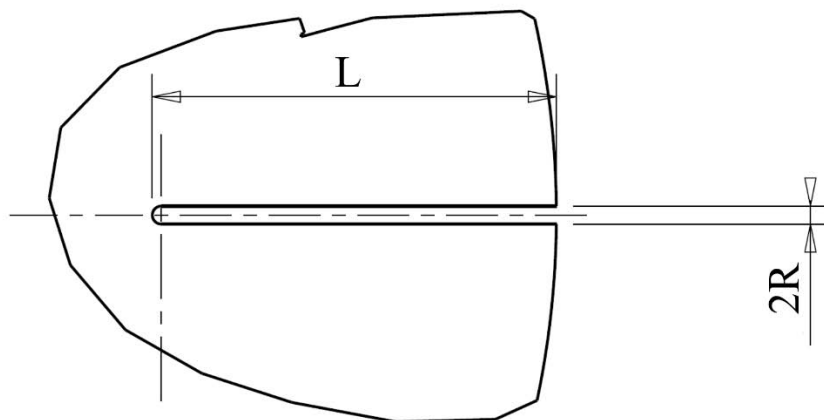


Figura 4.59: rappresentazione dei parametri che governano la geometria dell'intaglio sui dischi in grafite.

Lo stato dell'arte è in grado di fornire un'informazione relativa al raggio dell'intaglio da utilizzare: è noto che la tensione massima di picco aumenta al diminuire del valore del raggio, pertanto è stato scelto il valore minimo che è possibile realizzare presso le officine dei Laboratori di Legnaro. La tecnologia di produzione dell'intaglio è l'elettroerosione a filo, pertanto il raggio minimo corrisponde al diametro del filo più sottile disponibile;

inoltre, è necessario maggiorare, anche leggermente, il valore di tale raggio, per permette la realizzazione di un apice avente circonferenza regolare. A valle di queste considerazioni, è stato scelto un raggio di 0.5 mm. A questo punto è necessario definire la lunghezza dell'intaglio ottimale: sono state quindi eseguite differenti simulazioni agli elementi finiti allo scopo di trovare la lunghezza dell'intaglio che massimizza la tensione al suo apice. Il risultato è riportato in Figura 4.56, nel caso di un disco di spessore 0.5 mm (il più sottile producibile) e corrente riscaldante pari a 260 A, distanza 1 mm dal crogiolo.

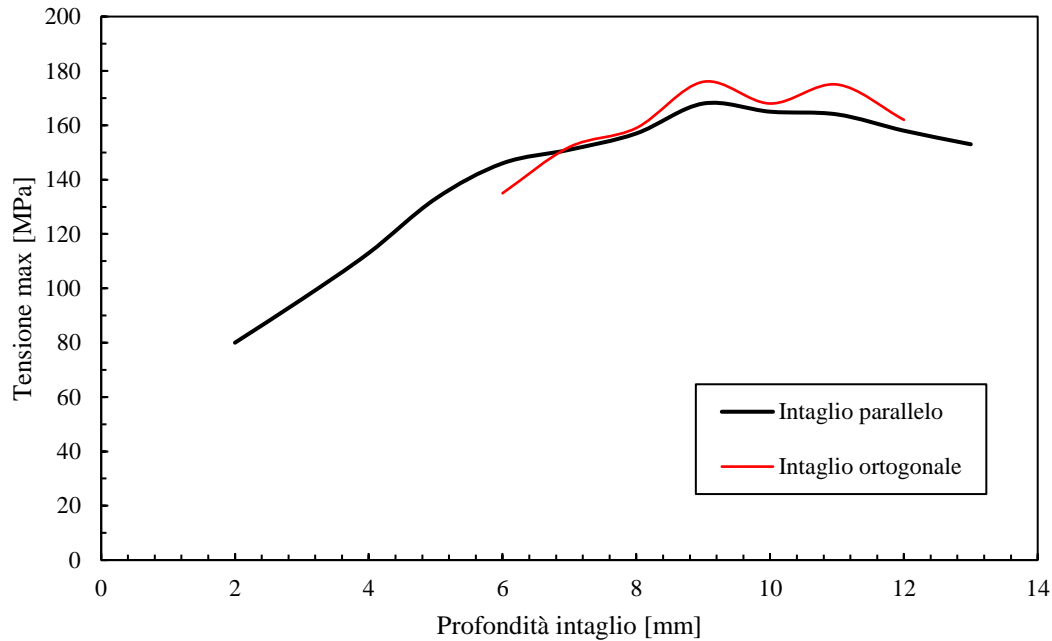


Figura 4.60: tensione massima all'apice dell'intaglio nei due casi in cui l'intaglio sia disposto parallelamente o ortogonalmente alla direzione del crogiolo.

Come riportato, la lunghezza dell'intaglio che massimizza la tensione al suo apice risulta pari a 9 mm; inoltre, disponendo l'intaglio ortogonalmente al crogiolo, il livello di tensione risulta essere maggiore; questo a causa della non perfetta assialsimmetria del problema. In entrambi i casi, comunque, la tensione è amplificata di un fattore 16-18. Si ripresenta anche qui il problema del modulo elastico costante con la temperatura con le medesime considerazioni effettuate poc'anzi.

In Figura 4.57 si riporta una raffigurazione della mesh utilizzata per lo studio del campo tensionale all'apice dell'intaglio.

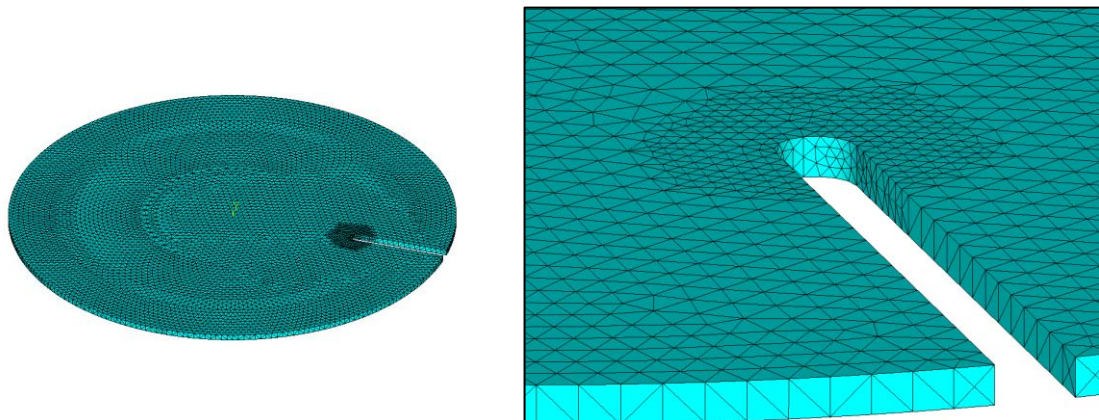


Figura 4.61: raffigurazione della mesh utilizzata per il calcolo della tensione all'apice dell'intaglio.

Sono stati quindi effettuati dei test, sottoponendo il disco (diametro 40 mm, spessore 0,5 mm, distanza dal crogiolo 1 mm) ad elevati gradienti termici, dapprima con l'intaglio parallelo e, successivamente, con l'intaglio ortogonale al crogiolo (Figura 4.58).

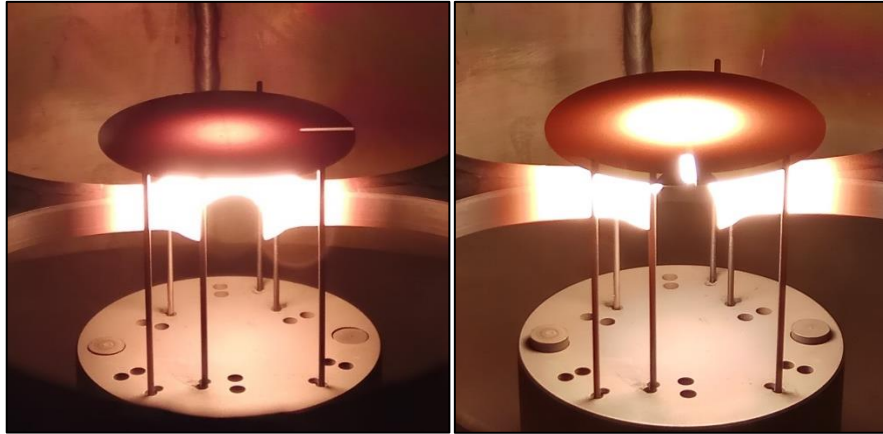


Figura 4.62: gradiente termico sul disco con intaglio parallelo ed ortogonale alla direzione del crogiolo.

In Figura 4.59 è riportato l'andamento delle temperature in corrispondenza del centro e della periferia del disco disposto con l'intaglio ortogonalmente alla direzione del crogiolo: è interessante notare che la corrispondenza tra temperature numeriche e sperimentali è elevata (<4%) ed il gradiente termico che si è instaurato è risultato pari a circa 560 °C. Nonostante ciò, in nessuno dei due casi è sopraggiunta la rottura. In Figura 4.60 è riportata un'immagine ottenuta al microscopio elettronico dell'apice dell'intaglio: non è possibile visualizzare alcun segno di danneggiamento.

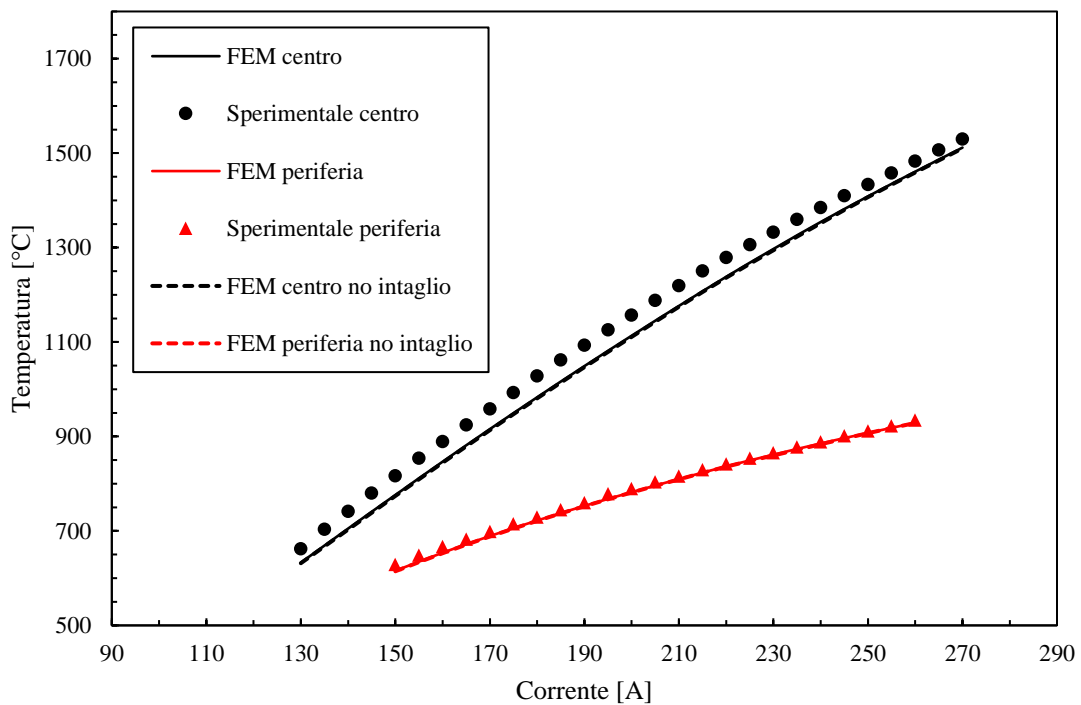


Figura 4.63: temperature sperimentali e numeriche in corrispondenza del centro e della periferia di un disco in grafite POCO EDM-3[®], diametro 40 mm, spessore 0,5 mm, con un intaglio di raggio 0,5 e di lunghezza pari a 9 mm, disposto ad 1 mm ed ortogonalmente al crogiolo. Sono presenti anche le temperature FEM di un disco di pari geometria senza intaglio (le curve numeriche sono sovrapposte.)

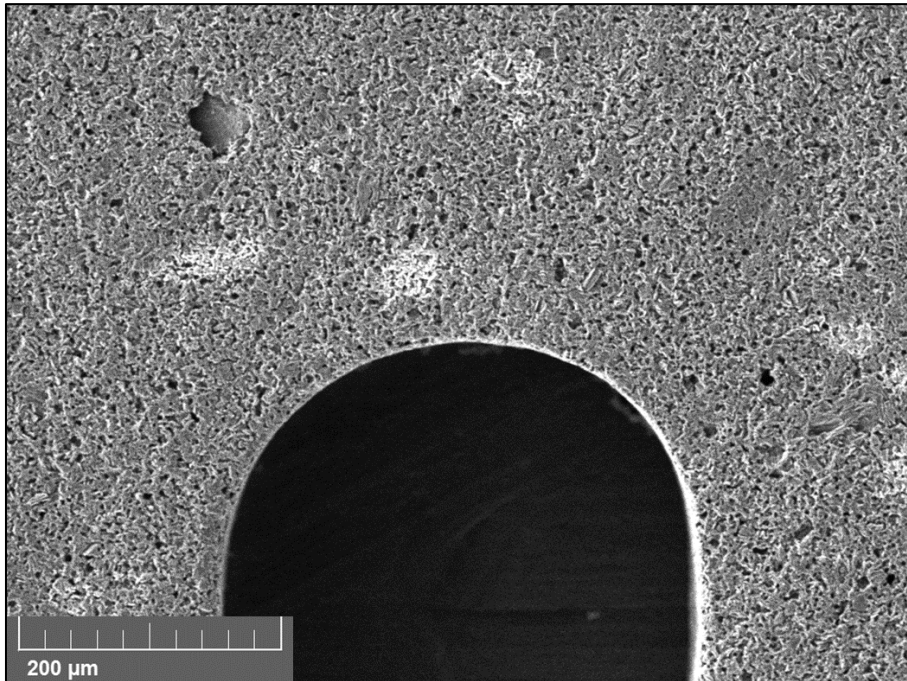


Figura 4.64: immagine SEM dell'apice dell'intaglio. Non sono presenti segni di danneggiamento.

È interessante notare che il campo termico di un disco di pari geometria privo dell'intaglio non risulta essere differente (Figura 4.59), quindi si può affermare che la presenza dell'intaglio perturba solo il campo di tensioni, concentrandolo all'apice dell'intaglio stesso.

Infine, è stato eseguito un ulteriore test utilizzando la prima versione dello schermo in tantalio: nemmeno in questo caso il disco in grafite è giunto a rottura.

A valle di questi test, si può affermare che non si è stati in grado di determinare il limite di resistenza di questa tipologia di grafite ai gradienti termici, ma sicuramente si è stati in grado di comprenderne l'estrema resistenza. Ulteriori test su proprietà termo-fisiche e strutturali sono stati svolti presso l'EN-MME Mechanical Laboratory del CERN, pertanto si rimanda al capitolo dedicato.

4.7 Conclusioni

Nel corso del presente capitolo è stato effettuato uno studio relativo all'entità delle tensioni di origine termica che i dischi sono in grado di sopportare quando sottoposti ad elevati gradienti radiali. Per eseguire i test a rottura, è stato utilizzato il dispositivo descritto nel corso del capitolo 3.

In primo luogo è stato svolto un test prototipo su un disco in carburo di silicio Hexoloy® SiC SE, al fine di avere una visione d'insieme della rottura: è stato trovato che il percorso di cricca è sempre il medesimo (a fontana) e che la zona di innesco della cricca, in periferia ed in corrispondenza del massimo della prima tensione principale, è caratterizzata da una superficie morfologicamente diversa a causa di una diversa velocità di propagazione della cricca. Grazie a queste osservazioni sperimentali, è stato possibile ipotizzare la validità del criterio di Rankine, pertanto il disco è portato a rottura a causa della tensione tangenziale in periferia.

I successivi test di rottura sul carburo di silicio Hexoloy® SiC SA, materiale di primo interesse per il target SPES, sono stati condotti dopo lo sviluppo di schermi termici in grado di incrementare l'entità del gradiente sul disco. Dopo aver effettuato numerose rotture al fine di analizzare il comportamento del materiale a diverse temperature medie, è stata trovata una tensione media di rottura pari a circa 390 MPa, mentre la differenza di temperatura media si attesta attorno ai 520 °C (in un intervallo di temperature media compreso tra 1050 °C e 1350 °C). Numerose analisi SEM hanno portato alle medesime conclusioni illustrate precedentemente; inoltre, è stato verificato che la zona di innesco della cricca è arbitrario e causato dalla presenza di difetti, aprendo la strada ad un approccio legato alla meccanica della frattura.

Infine, sono stati condotti dei test su dischi in grafite POCO EDM-3® intagliati, ma non è stata ottenuta alcuna rottura.

CAPITOLO 5

Caratterizzazione termo-fisica e strutturale della grafite POCO EDM-3[®] realizzata presso il CERN

“Un esperimento è una domanda che la scienza pone alla natura ed una misurazione è la registrazione della risposta della natura.”

Max Planck

5.1 Introduzione

Durante le fasi di progettazione di un componente, il progettista deve essere a conoscenza delle proprietà del materiale che utilizza. Se un componente è sottoposto a delle sollecitazioni meccaniche, è necessario conoscere la tensione che lo porta a rottura; se un componente è coinvolto in campi fisici elettrici e termici, è necessario essere a conoscenza delle sue proprietà termo-elettriche.

Nell'ambito del progetto SPES, i materiali utilizzati lavorano in condizioni estreme: alti livelli di stress strutturali, elevati valori di corrente elettrica ed altissime temperature. In queste condizioni, è necessario essere a conoscenza dei valori delle proprietà dei materiali utilizzati. In particolare, la grafite POCO EDM-3[®] è ampiamente utilizzata per la costruzione di svariati componenti: la box contenente i 7 dischi target, le finestre ed i dumper del fascio, il collimatore interno alla camera, la faraday cup ed i collimatori sulla linea protonica ed i componenti delle sorgenti superficiali ed al plasma.

Nell'ambito di questo lavoro di tesi, presso l'EN-MME Mechanical Laboratory del CERN di Ginevra, è stato possibile effettuare la misura delle proprietà fisiche e strutturali di maggiore interesse per la grafite in esame.

5.2 Determinazione della diffusività termica

La *diffusività termica* α (o *coefficiente di diffusione del calore*) è definita come il rapporto tra la conducibilità termica λ ed il prodotto tra la densità ρ ed il calore specifico c_p del corpo oggetto dello studio:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \quad 5.1$$

Come si può dedurre, la diffusività termica è una caratteristica intrinseca del materiale di cui un corpo è costituito, in quanto dipende da sole proprietà relative al materiale stesso. Questa proprietà risulta particolarmente utile per descrivere la propagazione di un campo termico in condizioni non stazionarie.

In tali condizioni, infatti, affinché il materiale trasmetta efficacemente l'onda termica, non è sufficiente che esso sia molto conduttivo, ma è anche necessario che sia poco massivo e con basso calore specifico. Se queste caratteristiche sono soddisfatte, il materiale è in grado di trasmettere adeguatamente un flusso termico causato da un gradiente di temperatura; inoltre, il calore ricevuto ad ogni strato elementare in cui è possibile suddividere il corpo non viene immagazzinato all'interno dello strato stesso, ma si concretizza in una variazione di temperatura dello strato che attiva un nuovo gradiente termico tra lo strato in questione e quello successivo

5.2.1 Laser flash method per la determinazione della diffusività termica

La *laser flash* è una metodologia utilizzata per la misura della diffusività termica di un materiale proposto nel 1961 da Cowan [52]. In particolare, il metodo utilizza un provino sottile di piccole dimensioni, montato in vuoto e riscaldato, da un lato, attraverso un fascio elettronico ad elevata energia o da una sorgente termica radiativa, in modo da portarlo uniformemente alla temperatura alla quale si vuole effettuare la misura. Successivamente, il fascio di energia è modulato, sinusoidalmente o mediante l'utilizzo di un'onda quadra, per

ottenere variazioni di temperatura sulle facce del provino. Le fluttuazioni di radiazione termica da parte del materiale sono osservate dal punto di vista fotoelettrico ed utilizzate per dedurre la diffusività. In Figura 5.1 è riportata una rappresentazione del principio di funzionamento.

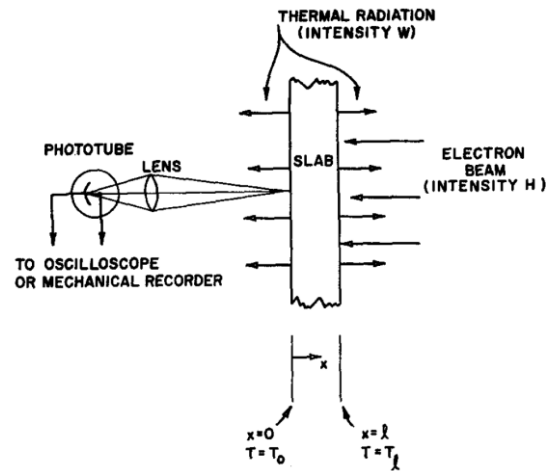


Figura 5.1: principio di funzionamento del laser flash method.

Uno dei vincoli da rispettare per garantire il corretto utilizzo del laser flash con il fascio di elettroni è la trascurabilità (<1%) della potenza generata per effetto Joule all'interno del provino, pari a $i^2 \cdot R$ rispetto alla potenza del fascio, pari a $V \cdot i$. Ciò si traduce in un vincolo relativo alla resistività elettrica del materiale di cui è costituito il provino:

$$\rho < \begin{cases} 5000 \text{ ohm} \cdot \text{cm}, & T = 1000 \text{ K} \\ 300 \text{ ohm} \cdot \text{cm}, & T = 2000 \text{ K} \\ 60 \text{ ohm} \cdot \text{cm}, & T = 3000 \text{ K} \end{cases} \quad 5.2$$

Per i materiali d'interesse, questo non risulta essere un vincolo troppo restrittivo, in quanto non sono isolanti. Ovviamente questo problema non si presenta qualora si utilizzi un forno elettrico ad arco per riscaldare il provino; di contro, il fascio elettronico è di più facile controllo e modulazione.

In questo paragrafo è stato solo descritto il principio fisico; la trattazione matematica per ricavare la diffusività termica è stata descritta dall'autore e viene qui trascurata, rimandando la lettura all'articolo originale [52].

L'apparato sperimentale utilizzato presso l'EN-MME Mechanical Laboratory è rappresentato in Figura 5.2.

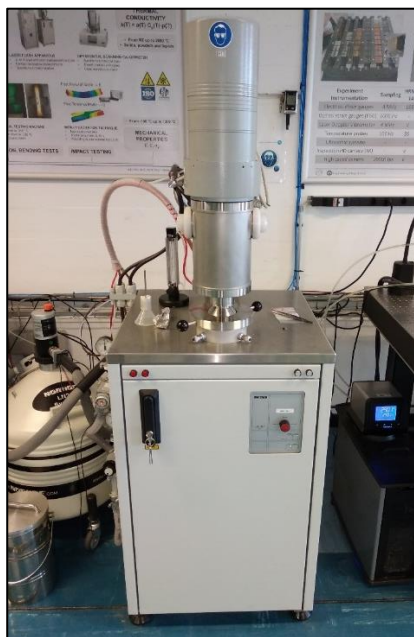


Figura 5.2: dispositivo per la misura della diffusività termica presso l'EN-MME Mechanical Laboratory.

Il dispositivo è suddivisibile in tre diverse zone:

- la zona situata più in basso, che costituisce il rack ed integra la fonte del fascio laser;
- la zona centrale, che costituisce il setup per il sostegno ed il riscaldamento del provino. Si tratta di un cilindro cavo in grafite (cavo per permettere il passaggio del laser) che culmina con una base per l'inserimento del provino. Connesso al cilindro, è disposta una termocoppia che permette di effettuare il controllo della temperatura del provino durante il test. Il tutto è inserito all'interno di un riscaldatore ohmico che permette di portare il provino alla temperatura richiesta. L'ambiente è completamente isolato dall'esterno ed all'interno è insufflato argon per garantire un'atmosfera inerte ed evitare la combustione del dispositivo (contiene componenti in grafite);

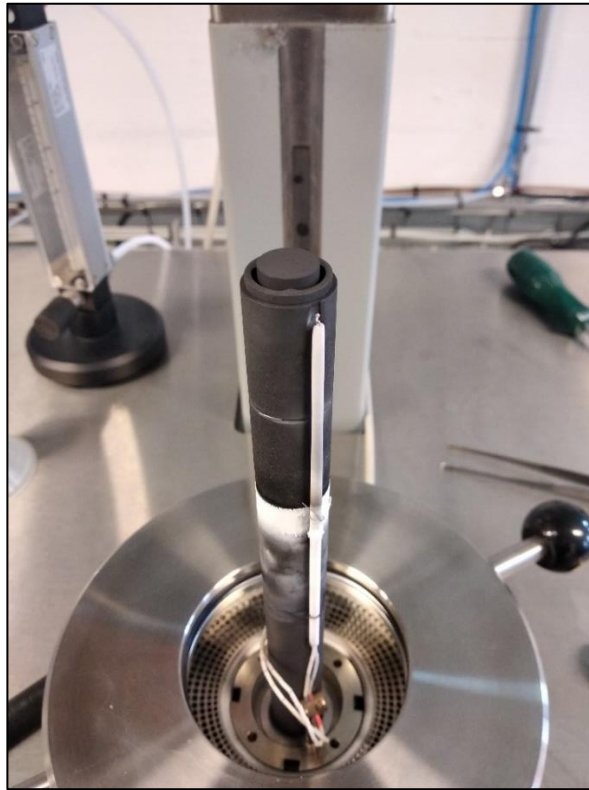


Figura 5.3: setup per il sostegno del provino. È presente una termocoppia che permette di controllare la temperatura alla quale si sta effettuando la misura.

- la zona situata più in alto, che costituisce il dispositivo per la misura della temperatura della faccia opposta del provino.

Ogni misura di diffusività termica è effettuata portando il provino alla temperatura alla quale si desidera effettuare la misura secondo il ciclo termico riportato in Figura 5.4.

Num	Mode	°C	K/min	pts/min	hh:mm	STC
● ---	Initial	27.0				0
➡ 1	Isothermal	27.0		50.00	00:10	0
↗ 2	Dynamic	1950.0	5.00	50.00	06:25	0
↘ 3	Dynamic	27.0	5.00	50.00	06:25	0
➡ 4	Isothermal	27.0		50.00	00:10	0
⊕ 5	Emergency	2100.0				

Figura 5.4: rampa di riscaldamento e di raffreddamento utilizzata per la determinazione della diffusività termica.

Dopodiché, il laser esercita un impulso della durata di circa mezzo millisecondo che innesca una variazione di temperatura sul provino, stimabile attorno ad $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Figura 5.5). Tale variazione di temperatura è percepita dal pirometro sulla faccia opposta del provino e viene trasformata in un segnale elettrico; tale segnale elettrico in uscita è elaborato dal software che lo interpola (Figura 5.6).

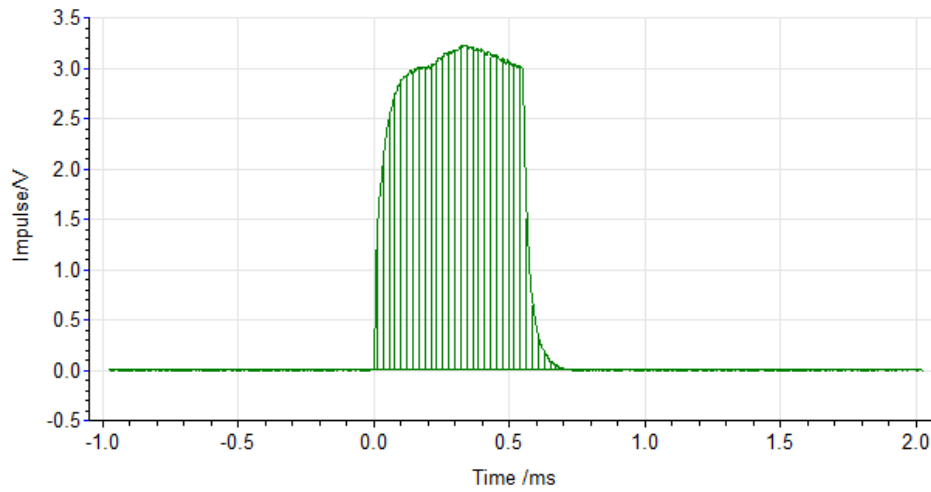


Figura 5.5: impulso esercitato della sorgente laser [V] in funzione del tempo [ms].

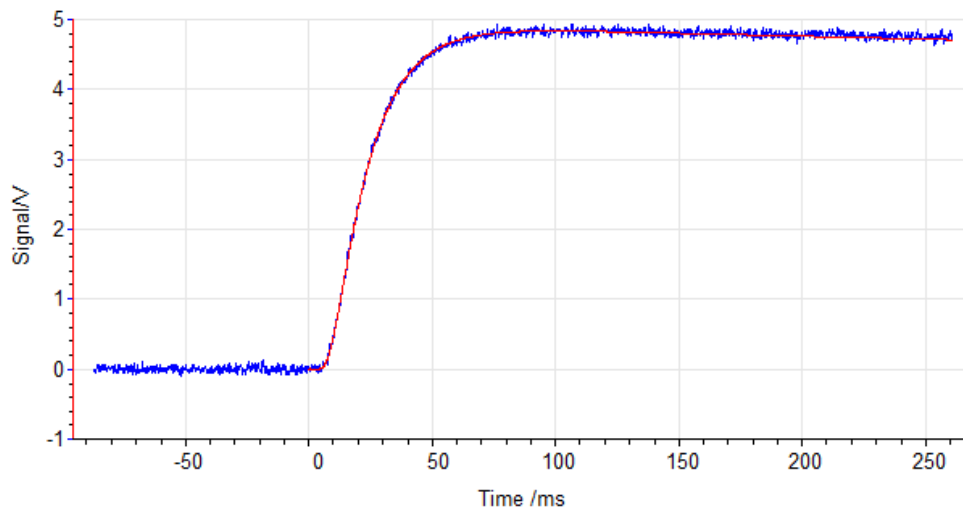


Figura 5.6: segnale elettrico in uscita dal pirometro [V] in funzione del tempo [ms]. Il plateau iniziale rappresenta la situazione prima dell'impulso, mentre il plateau finale rappresenta la situazione dopo l'impulso. La parte verticale, invece, rappresenta il momento in cui l'impulso laser è applicato.

Il metodo fornisce una correlazione utile al calcolo della diffusività termica. Tale correlazione necessita della conoscenza dello spessore d del provino e del tempo al quale si verifica la metà del massimo segnale in uscita dal pirometro ($t_{1/2}$), come in Figura 5.7.

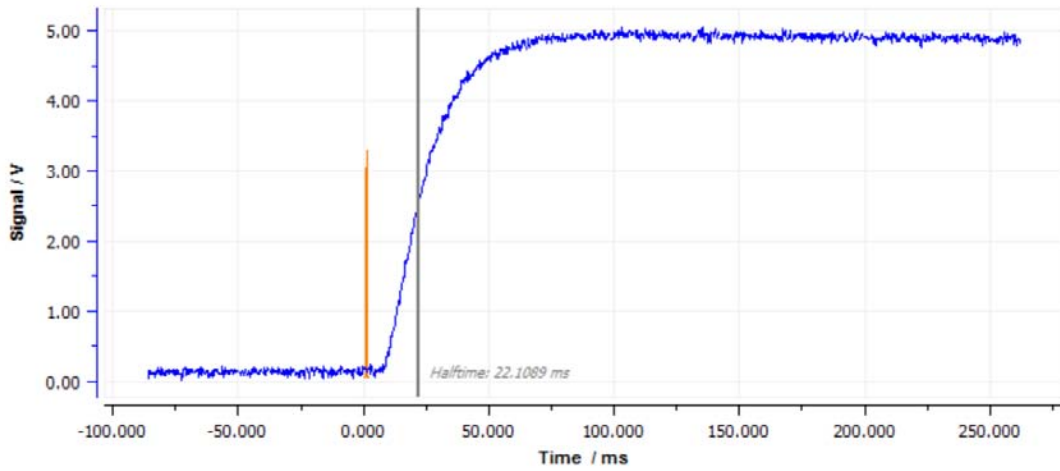


Figura 5.7: halftime richiesto per il calcolo della diffusività termica.

Quindi, per il calcolo della diffusività termica, è utilizzata la seguente formula [53]:

$$a(T) = 0.138 \frac{d^2}{t_{1/2}} \quad 5.3$$

Per ogni valore di temperatura alla quale si decide di effettuare la misura, il sistema effettua cinque diverse misurazioni (Figura 5.8); quindi sono necessari cinque diversi impulsi laser, cinque diverse misure da parte del pirometro e cinque diverse interpolazioni da parte del software.

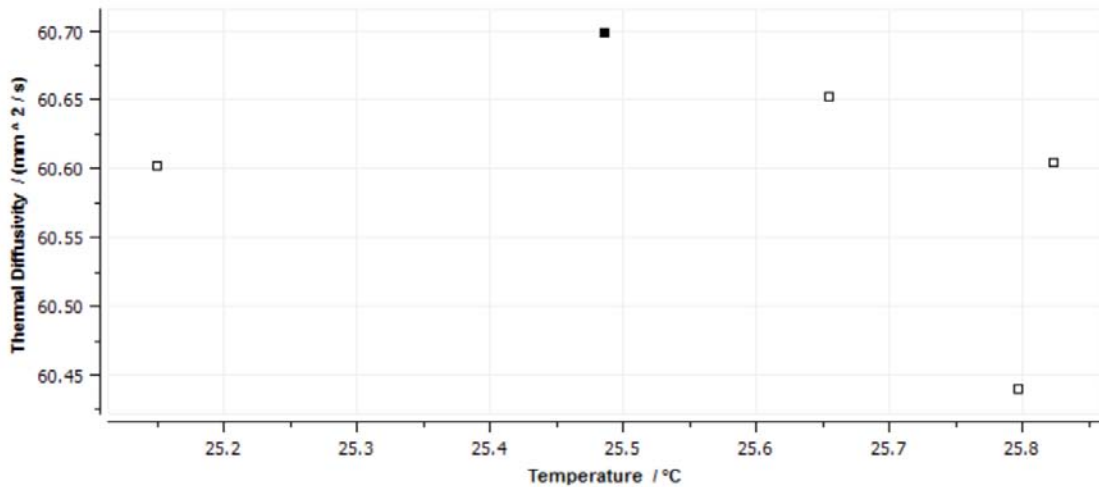


Figura 5.8: cinque diverse misurazioni per il medesimo valore di temperatura (in questo caso si tratta della temperatura ambiente). Il punto di misura più scuro è relativo all'ultima misura effettuata.

Le misure sono state effettuate su 3 provini (di forma cilindrica con diametro nominale pari a 12,7 mm e spessore nominale pari 3 mm) da temperatura ambiente fino a 2000 °C.

5.2.2 Risultati

Il software permette il calcolo diretto della diffusività termica, previa introduzione dello spessore del provino. La curva della proprietà ricercata in funzione della temperatura è mostrata a display (Figura 5.9) ed i dati possono essere esportati per le successive rielaborazioni.

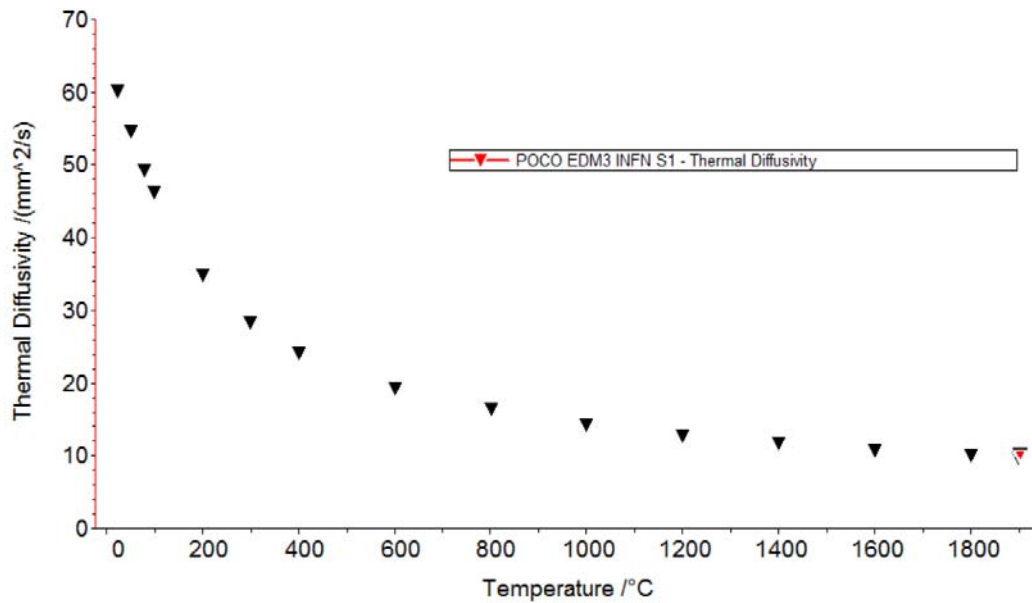


Figura 5.9: risultato della misura di diffusività termica mostrata a display dal software (in questo caso si tratta del primo provino misurato – S1).

Effettuando la media delle misure dei tre provini, si ottiene l’andamento di Figura 5.10.

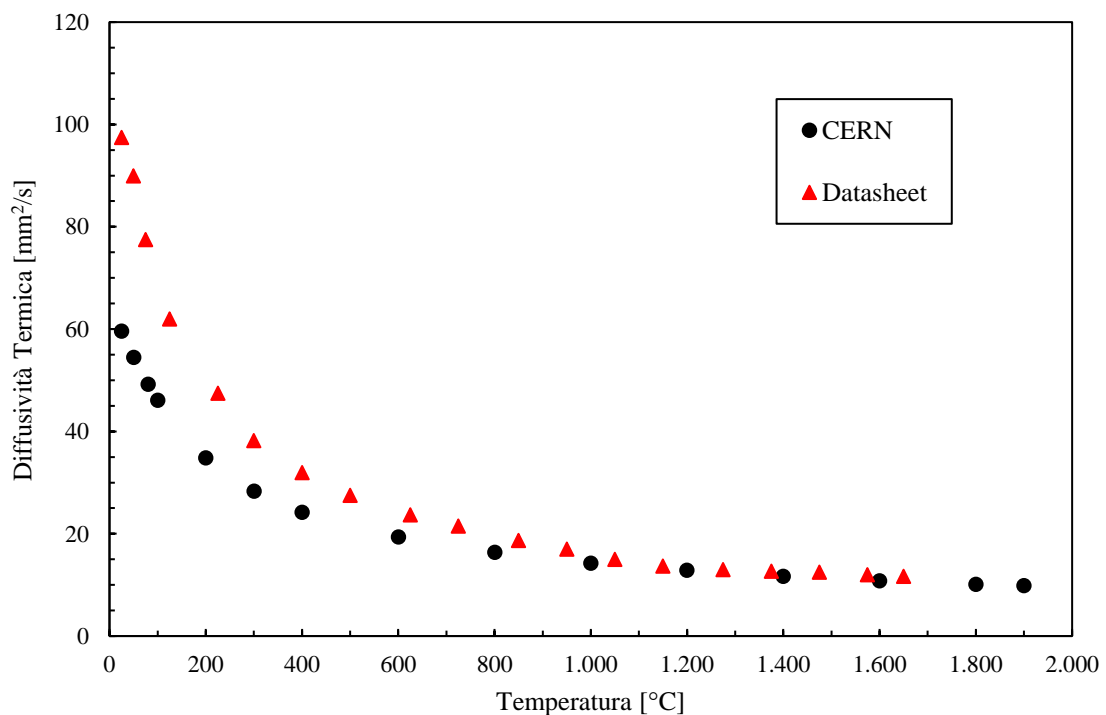


Figura 5.10: risultato delle misure di diffusività termica della grafite POCO EDM-3[®] confrontate con quanto dichiarato dal datasheet dell’azienda.

La diffusività termica diminuisce con l’aumentare della temperatura con un andamento non lineare, diminuendo velocemente a bassi valori di temperatura (inferiori ai 600 °C) per poi rimanere pressoché costante fino a temperature elevate (2000 °C).

Confrontando la curva ottenuta con quanto dichiarato dal datasheet dell’azienda, si nota una grande differenza a temperatura ambiente (40%) che diminuisce con l’aumentare della temperatura, fino ad assumere valori identici attorno a 1400 °C.

5.3 Determinazione del calore specifico

Il calore specifico, di una sostanza è definito come la quantità di calore necessaria per innalzare, o diminuire, la temperatura di una unità di massa di 1 K. In particolare, il calore specifico può essere considerato diverso a seconda della trasformazione fisica a cui la sostanza è sottoposta ed, in particolare, alla grandezza fisica che viene conservata durante la trasformazione. Se la grandezza che viene conservata è la pressione, il calore specifico si definisce *a pressione costante* e viene indicato con il simbolo c_p , mentre se la grandezza è il volume, il calore specifico è denominato *a volume costante* e viene indicato col simbolo c_v . Per una sostanza solida, il rapporto tra il primo ed il secondo è circa pari ad 1.05. Nel contesto di questo lavoro di tesi, verrà considerato il calore specifico valutato a pressione costante

5.3.1 Differential Scanning Calorimetry per la determinazione del calore specifico

La DSC è una tecnica termoanalitica in cui si misura la differenza di calore richiesto per aumentare la temperatura di due provini, di cui uno di riferimento. Noto il calore specifico del provino di riferimento, è immediatamente noto anche il calore specifico del provino test. In generale, la temperatura è mantenuta uguale tra i due provini ed aumentata nel corso della prova per poter permettere la valutazione del calore specifico del provino in oggetto a differenti valori di temperatura.

L'apparato sperimentale utilizzato presso l'EN-MME Mechanical Laboratory è rappresentato in Figura 5.11.

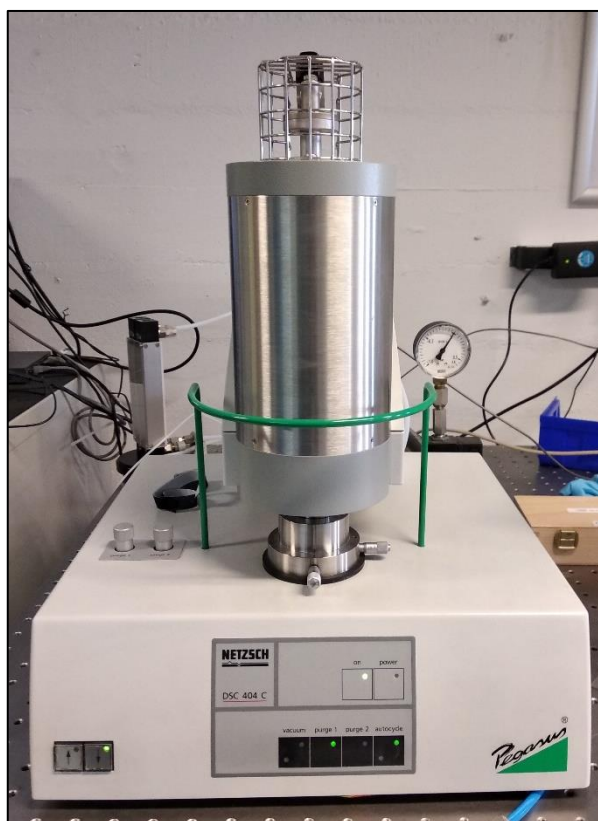


Figura 5.11: apparato sperimentale presente presso l'EN-MME Mechanical Laboratory utilizzato per la determinazione del calore specifico.

L'apparato è costituito da un sostegno al termine del quale sono presenti due crogioli in grado di ospitare i campioni, aventi diametro nominale pari a 5 mm e spessore nominale unitario (Figura 5.12).

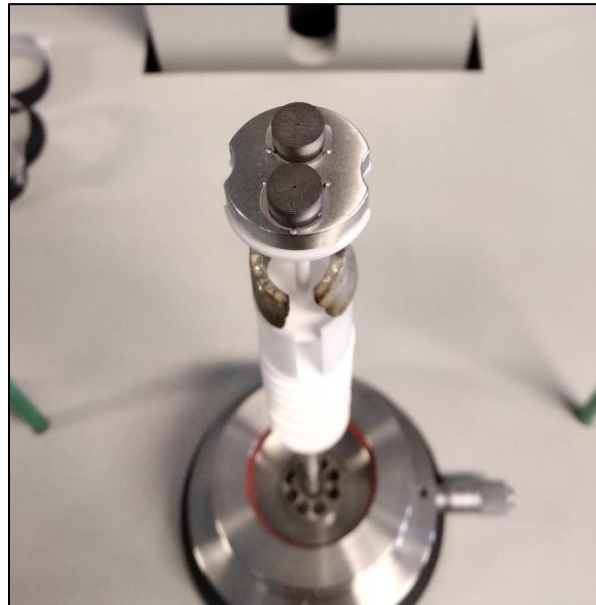


Figura 5.12: posizionamento di due provini all'interno dei due crogioli.

L'intero sistema è posizionato all'interno di un riscaldatore, in grado di portare la temperatura, controllata da una termocoppia, ad una temperatura massima di 1200 °C (il ciclo termico utilizzato è riportato in Figura 5.13); l'atmosfera è inerte grazie ad un flusso continuo di argon.

Num	Mode	°C	K/min	pts/min	hh:mm	STC	P1	P2
● ---	Initial	27.0				0	1	0
➡ 1	Isothermal	27.0		25.00	00:05	0	1	0
➡ 2	Dynamic	1100.0	20.00	200.00	00:54	0	1	0
➡ 3	Isothermal	1100.0		25.00	00:05	0	1	0
⊕ 4	Emergency	1200.0					1	0

Figura 5.13: rampa di riscaldamento e raffreddamento utilizzata per la determinazione del calore specifico.

Per comprendere al meglio in funzionamento del sistema, è utile fare riferimento allo schema di Figura 5.14.

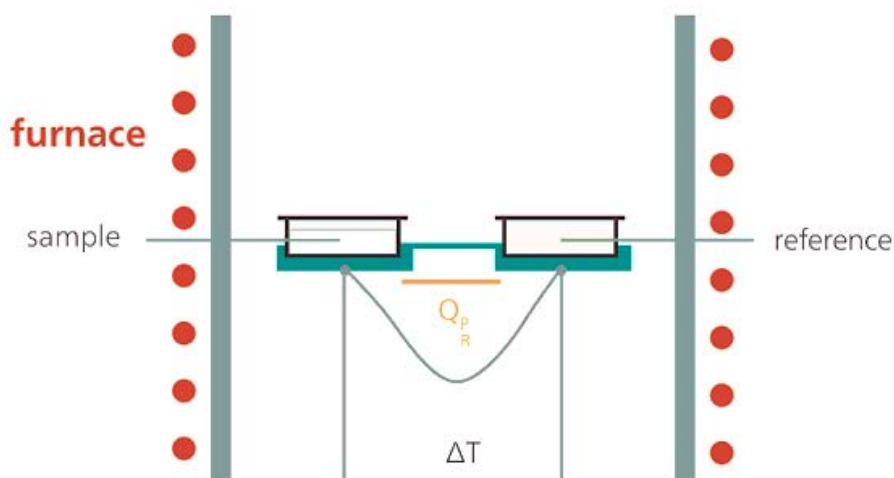


Figura 5.14: principio di funzionamento del DSC per la determinazione del calore specifico di un materiale.

Oltre alla termocoppia che controlla la temperatura ambientale, vi sono altre due termocoppie a contatto con i due provini e collegate in serie, pertanto in grado di misurare la differenza di temperatura tra questi due. Il segnale in output da questa termocoppia differenziale è in μV ed è espresso in funzione del tempo, come mostrato in Figura 5.15. All'interno dello stesso grafico è possibile plottare l'andamento della temperatura dell'ambiente in funzione del tempo.

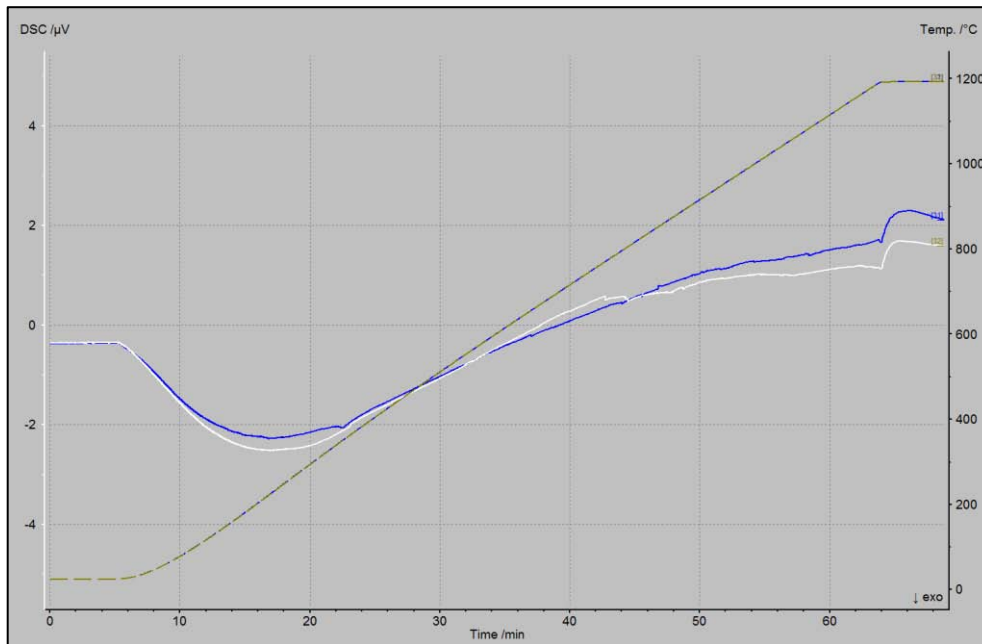


Figura 5.15: rappresentazione del segnale in output dalla termocoppia differenziale (in blu ed in bianco relative a due misurazioni diverse) e dalla termocoppia ambientale (verde).

Le fasi di misurazione per la determinazione del calore specifico del materiale sono tre (coerentemente con la normativa [54]):

- Misurazione della curva di correzione dell'apparato mediante l'utilizzo contemporaneo di due provini di riferimento identici in massa ed in calore specifico. Teoricamente, il segnale in uscita dalla termocoppia differenziale dovrebbe essere una retta orizzontale, ma in realtà risulta quanto mostrato in Figura 5.15. Le curve in blu ed in bianco sono due curve di correzione ottenute durante due differenti prove, mentre in verde è riportato l'andamento della temperatura. Questo segnale è denominato DSC_C (correction) e deve essere misurato tre volte.
- Misurazione della curva del segnale di output utilizzando un provino di riferimento all'interno di un crogiolo, mentre l'altro crogiolo rimane vuoto. Questo segnale è denominato DSC_R (reference) e deve essere misurato tre volte.
- Misurazione della curva del segnale di output utilizzando un provino del materiale in oggetto all'interno di un crogiolo, mentre l'altro crogiolo rimane vuoto. Questo segnale è denominato DSC_S (sample) e deve essere misurato su tre provini diversi, tre volte per ogni provino.

Senza l'utilizzo della correzione, il rapporto tra il segnale del provino di riferimento ed il provino del materiale in oggetto è proporzionale al rapporto tra le proprietà dei due materiale mediante la relazione:

$$\frac{DSC_R}{DSC_S} = \frac{Cp_R \cdot m_R}{Cp_S \cdot m_S} \quad 5.4$$

dalla quale è facilmente ricavabile il calore specifico del materiale oggetto dello studio per ogni valore di temperatura alla quale sono presenti i segnali.

Mediante l'utilizzo della correzione ed esplicitando l'incognita ricercata, la relazione precedente diventa:

$$Cp_S = \frac{DSC_S - DSC_C}{DSC_R - DSC_C} \cdot \frac{m_R}{m_S} \cdot Cp_R \quad 5.5$$

5.3.2 Risultati

Il software è in grado di gestire tutti i segnali riportati in 5.5, pertanto è in grado di fornire direttamente la curva del calore specifico in funzione della temperatura. Il risultato fornito dal software è rappresentato in Figura 5.16.

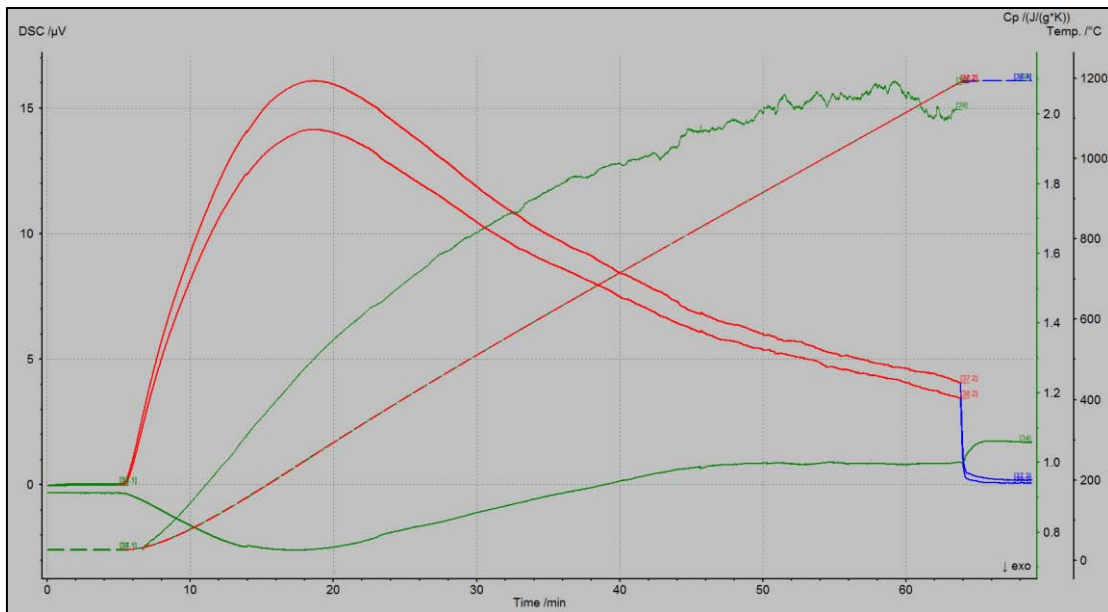


Figura 5.16: risultato fornito dal software relativamente alla misura di un provino. La curva verde in alto rappresenta il valore del calore specifico; la curva rossa tratteggiata rappresenta l'andamento della temperatura; la curva verde in basso rappresenta la correzione dello strumento; le due curve rosse rappresentano la misura effettuata sul provino in oggetto (sotto) e quella su provino di riferimento (sopra).

Come si può apprezzare, i calcoli descritti precedentemente sono effettuati in maniera automatica dal software. In Figura 5.17 sono riportati i risultati del calore specifico misurato come media dei risultati ottenuti su due provini diversi (tre prove per ogni provino).

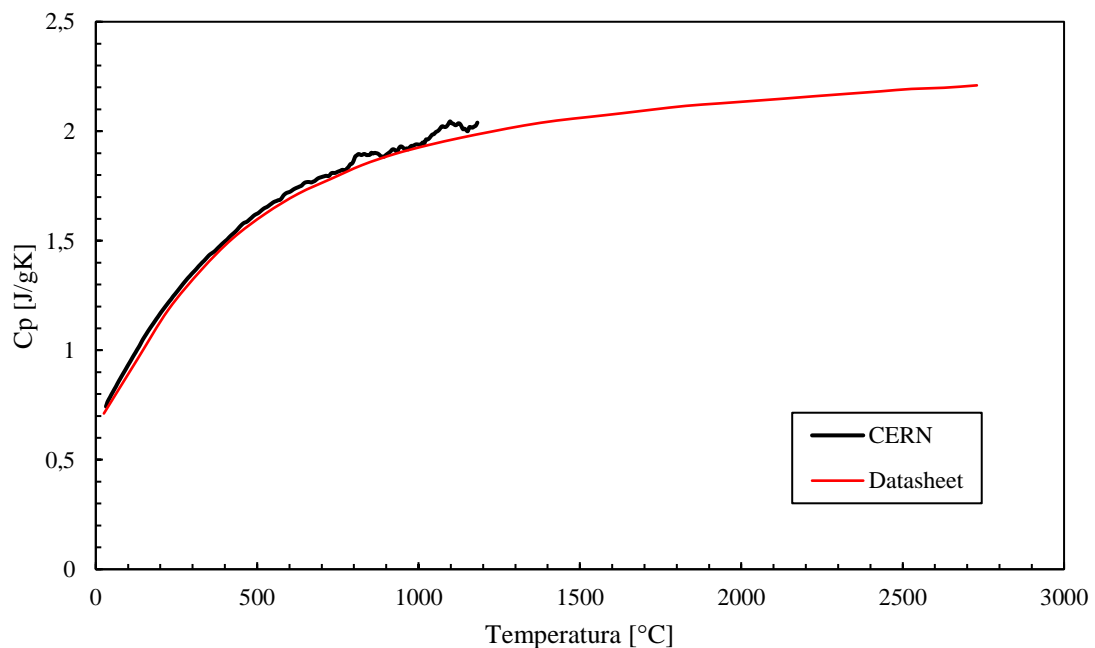


Figura 5.17: risultato delle misure del calore specifico della grafite POCO EDM-3[®] confrontate con quanto dichiarato dal datasheet dell'azienda

Come si può notare, per temperature maggiori ai 700 °C la curva del calore specifico è affetta da rumore: questo perché, nonostante sia presente un flusso continuo di argon all'interno della camera di misura, è stata riscontrata presenza di ossigeno che provoca la combustione della grafite. Siccome il calore specifico è una proprietà intrinseca dei cristalli di grafite, la densità non ha alcuna influenza (infatti è stato verificato che il calore specifico misurato presso l'EN-MME Mechanical Laboratory è identico a quello dichiarato dall'azienda fornitrice, nonostante le densità discordanti), pertanto si ritiene valido il calore specifico da datasheet (presente fino a circa 2700 °C).

5.4 Determinazione del coefficiente di dilatazione termica

Il coefficiente di dilatazione termica è una proprietà di fondamentale importanza in quanto di collegamento tra il campo fisico termico ed il campo fisico delle tensioni strutturali. Esso esprime la variazione di lunghezza rispetto alla lunghezza iniziale rapportata alla variazione di temperatura rispetto alla temperatura di riferimento alla quale è stata misurata la lunghezza iniziale. In formule:

$$CTE(T) = \frac{(L(T) - L_0) / L_0}{T - T_0} \quad 5.6$$

Maggiore è il coefficiente di dilatazione termica di un materiale, maggiori saranno le sue deformazioni quando subisce una variazione termica.

5.4.1 Apparato sperimentale e procedura utilizzati

La metodologia utilizzata, coerente con la normativa [55], permette di determinare l'espansione termica lineare di un solido rigido mediante l'utilizzo di un dilatometro. Questa metodologia è applicabile in ogni range di temperatura all'interno della quale il dispositivo può lavorare. La definizione di *solido rigido* sta a significare che, sotto i livelli di temperatura e di stress durante le fasi di test, il creep e la velocità di deformazione elastica devono essere trascurabili e non influenzare le misurazioni.

L'apparato sperimentale utilizzato presso l'EN-MME Mechanical Laboratory è rappresentato in Figura 5.18.

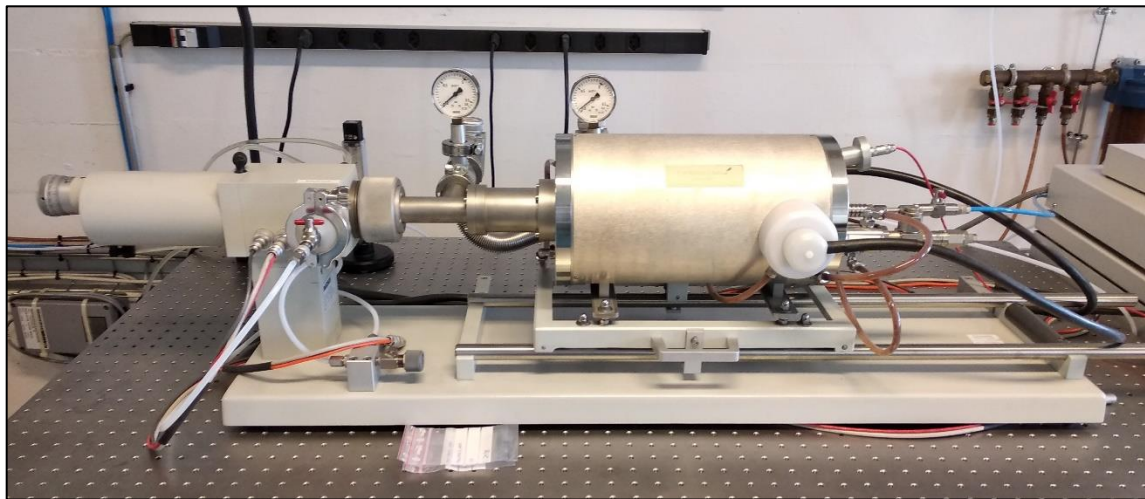


Figura 5.18: fotografia dell'apparato sperimentale presente presso l'EN-MME Mechanical Laboratory per la misura del coefficiente di dilatazione termica.

Esso è costituito da un supporto all'interno del quale è posizionato un provino di forma cilindrica (Figura 5.19).

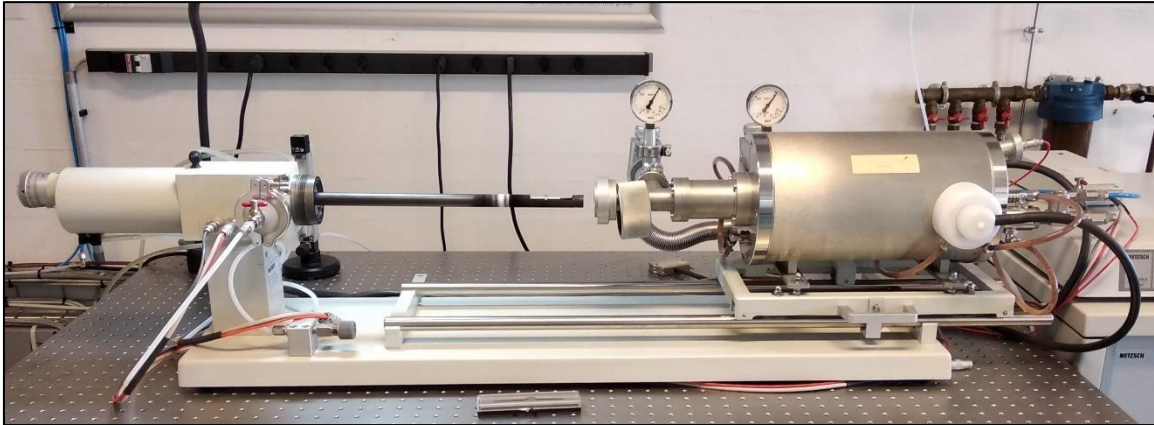


Figura 5.19: dispositivo per la misura del coefficiente di dilatazione termica aperto. In mezzeria è possibile identificare la zona di posizionamento del provino (ingrandita in Figura 5.20).

Il supporto è successivamente inserito all'interno di un riscaldatore in grado di portare il sistema alla temperatura alla quale si vuole effettuare la misura; quest'ultima è controllata da una termocoppia posizionata in prossimità del provino (Figura 5.20). L'intero sistema è immerso in un'atmosfera inerte di elio.

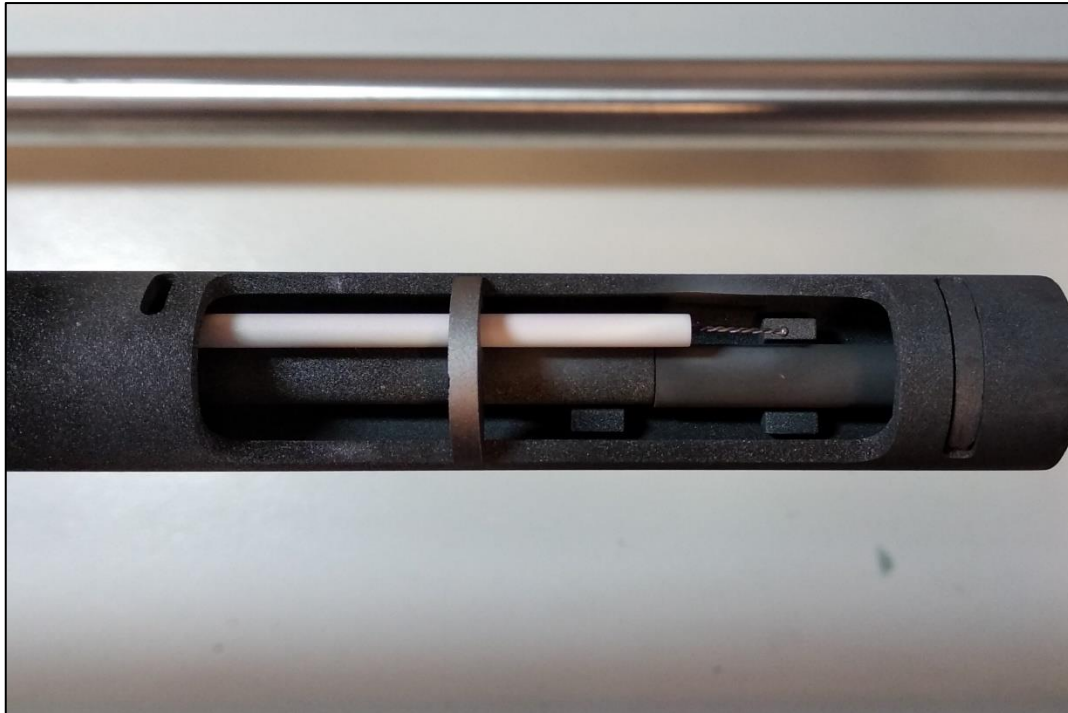


Figura 5.20: sistema di sostenimento del provino costituito da un cilindro cavo in grafite all'interno del quale è posizionato il provino (sulla destra), l'asta (sulla sinistra), a contatto col provino, per il trasferimento dello spostamento all'elemento sensibile e la termocoppia per la misura della temperatura.

Il coefficiente di espansione termica è valutato misurando espansione e contrazione del provino soggetto a riscaldamento o a raffreddamento da una temperatura di riferimento ($25\text{ }^{\circ}\text{C}$) a $1950\text{ }^{\circ}\text{C}$: il ciclo termico utilizzato è riportato in Figura 5.21.

Num	Mode	°C	K/min	pts/min	hh:mm	STC
● ---	Initial	27.0				0
➡ 1	Isothermal	27.0		50.00	00:10	0
➡ 2	Dynamic	1950.0	5.00	50.00	06:25	0
➡ 3	Dynamic	27.0	5.00	50.00	06:25	0
➡ 4	Isothermal	27.0		50.00	00:10	0
⊕ 5	Emergency	2100.0				

Figura 5.21: rampa di riscaldamento e di raffreddamento utilizzate per la misura del coefficiente di dilatazione termica.

Gli spostamenti dovuti alla variazione di temperatura sono registrati da un dilatometro lineare ad induzione: questi spostamenti rappresentano il contributo di spostamento del provino e dell'intero sistema. È necessario, quindi, effettuare delle misure preliminari con un provino avente coefficiente di dilatazione termica ben noto, al fine di determinare la curva di calibrazione del sistema.

Il software di controllo è in grado di fornire direttamente i valori di spostamento in funzione della temperatura. In particolare, fornisce la variazione percentuale di lunghezza rispetto alla lunghezza iniziale del provino:

$$\Delta L \% = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot 100 \quad 5.7$$

Questi risultati sono disponibili sia per il provino di riferimento, sia per il provino oggetto della misura. Una volta nota la curva di $\Delta L\%$ in funzione della temperatura per il provino di riferimento (dalla media di tre misure, Figura 5.22), può essere utilizzata per determinare il contributo di spostamento del sistema. Una volta nota la curva di $\Delta L\%$ in funzione della temperatura per il materiale oggetto della misura (dalla media di tre misure con tre provini diversi), si può applicare la correzione precedentemente determinata per ottenere la curva $\Delta L\%$ ricercata. Come è possibile vedere nell'esempio di Figura 5.22, la curva ottenuta durante il riscaldamento risulta diversa dalla curva durante il raffreddamento. Quella da tenere in considerazione, per motivi di qualità del segnale grezzo, è la curva durante il raffreddamento.

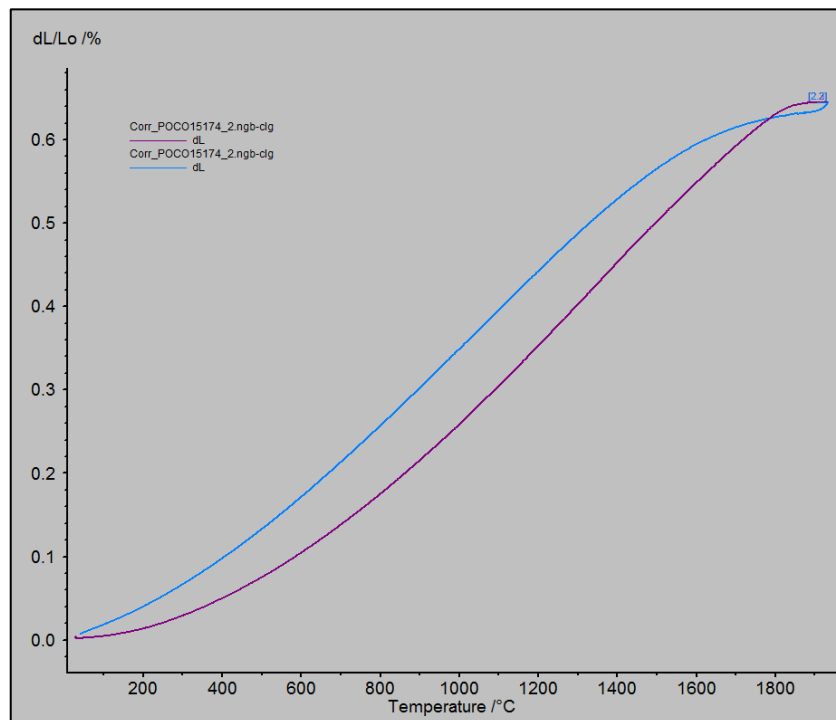


Figura 5.22: curva dell'allungamento percentuale (in questo caso normalizzato rispetto alla lunghezza iniziale) in funzione della temperatura per una prova con il provino di riferimento durante il riscaldamento (curva viola) ed il raffreddamento (curva azzurra).

Il coefficiente di dilatazione termica è definito come in 5.6, pertanto, è necessario dividere la variazione di lunghezza trovata precedentemente per l'incremento di temperatura rispetto alla temperatura di riferimento. Il software è in grado di effettuare questi calcoli in modo automatico, pertanto fornisce direttamente il grafico del coefficiente di dilatazione termica in funzione della temperatura.

5.4.2 Risultati

I provini utilizzati per queste misurazioni sono dei cilindri con diametro nominale pari a 6 mm e lunghezza nominale pari a 25 mm. Sono state effettuate tre misurazioni, una per ogni provino.

Il software effettua i calcoli precedentemente descritti autonomamente, riportando a display un diagramma come quello riportato in Figura 5.23.

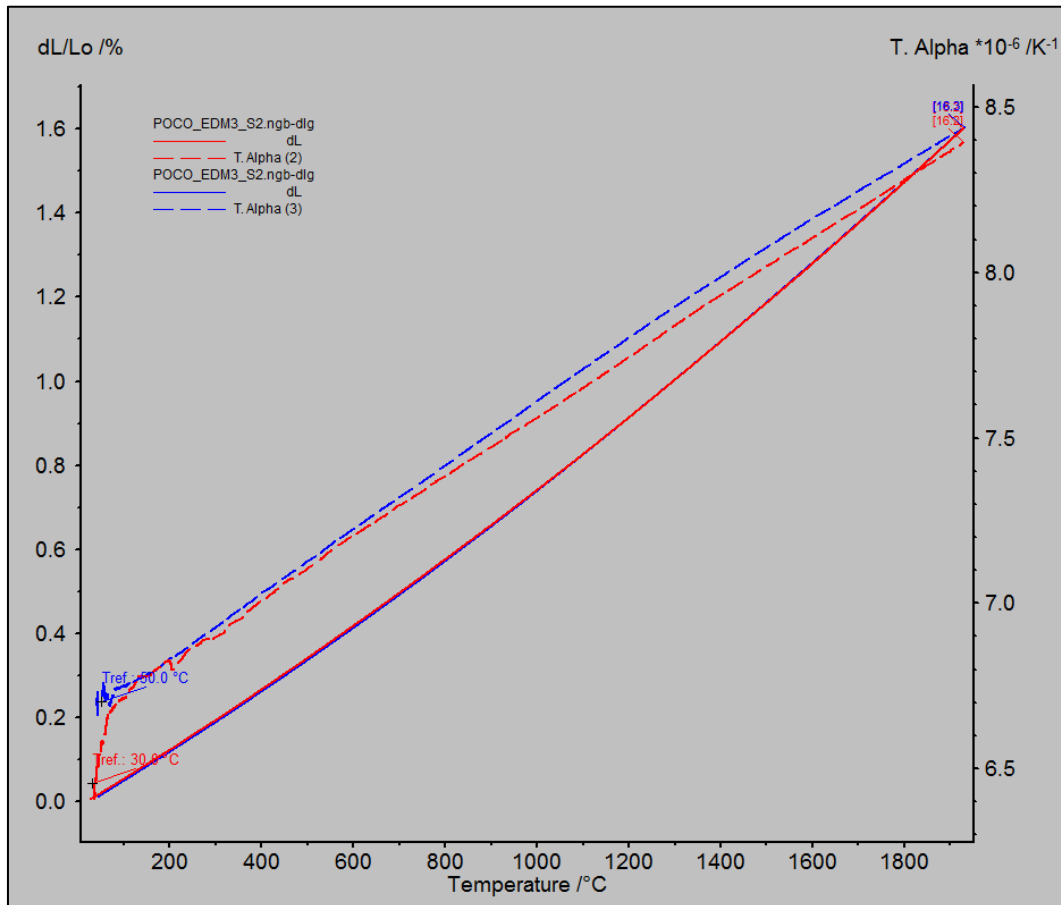


Figura 5.23: risultato visualizzato a display (in questo caso si tratta del secondo provino). Le curve continue rappresentano la dilatazione specifica percentuale (in rosso durante la fase di riscaldamento ed in blu durante quella di raffreddamento). Le curve tratteggiate rappresentano il CTE durante il riscaldamento (rosso) ed il raffreddamento (blu).

Il risultato relativo alla dilatazione relativa percentuale e del coefficiente di espansione termica, calcolato come media delle misure effettuate sui tre provini, durante le fasi di riscaldamento e di raffreddamento, è riportato in Figura 5.24.

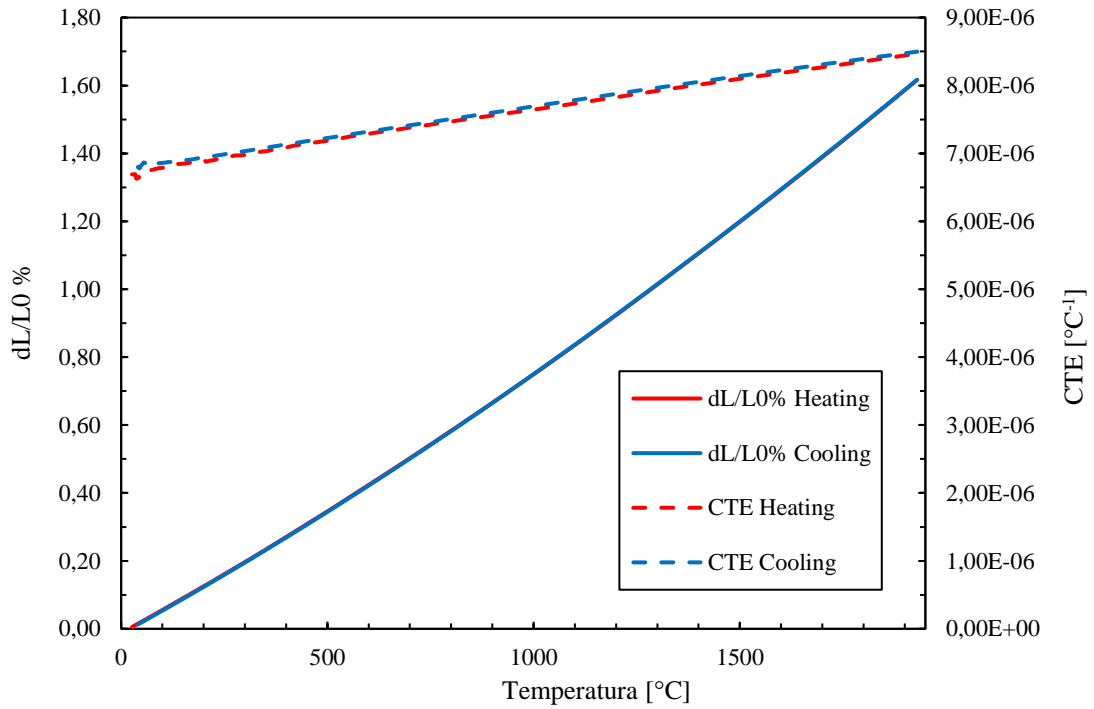


Figura 5.24: risultato relativo alla dilatazione relativa percentuale e al coefficiente di espansione termica durante le fasi di riscaldamento e di raffreddamento calcolato come media delle misure effettuate sui tre provini.

Come si può notare, le curve sono sovrapposte, indice che il comportamento del materiale è simmetrico durante il riscaldamento ed il raffreddamento. In Figura 5.25 è riportato il risultato delle misurazioni del coefficiente di dilatazione termica ottenuto presso l'EN-MME Mechanical Laboratory del CERN, confrontato con quello fornito dal datasheet del produttore. Come si apprezza, il valore ottenuto è inferiore di circa $0.5 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ per ogni valore di temperatura rispetto a quanto dichiarato.

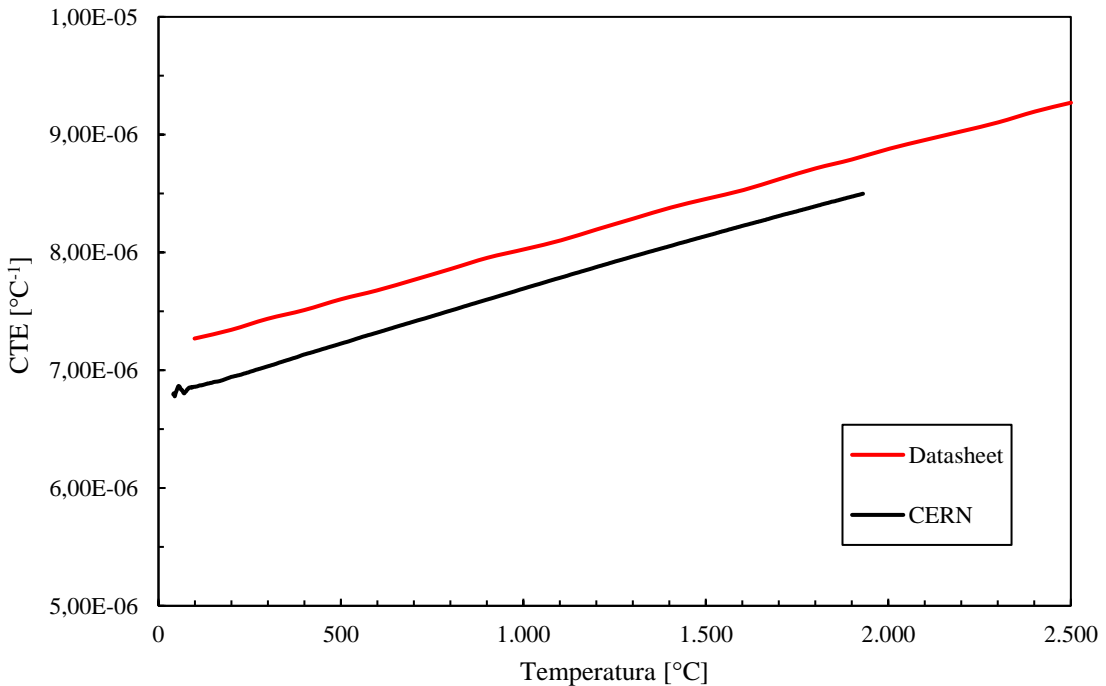


Figura 5.25: confronto tra il coefficiente di espansione termica ottenuto tramite le misure effettuate presso l'EN-MME Mechanical Laboratory del CERN e quello fornito dal datasheet del produttore.

5.5 Misurazione della densità

La densità di una sostanza è il rapporto tra la sua massa ed il suo volume. In formule:

$$\rho(T) = \frac{m}{V} \quad 5.8$$

Da questa proprietà dipendono proprietà termiche ed elettriche, come conducibilità e resistività, in quanto, se un materiale risulta più poroso di un altro, la sua conducibilità termica diminuisce e la sua resistività elettrica aumenta. La densità, inoltre, risulta un parametro fondamentale per il calcolo della conducibilità termica a partire dalle misure di diffusività.

5.5.1 Apparato sperimentale e procedura utilizzati

L'apparato sperimentale utilizzato per la misura di densità presso l'EN-MME Mechanical Laboratory è una bilancia idrostatica (Figura 5.26).

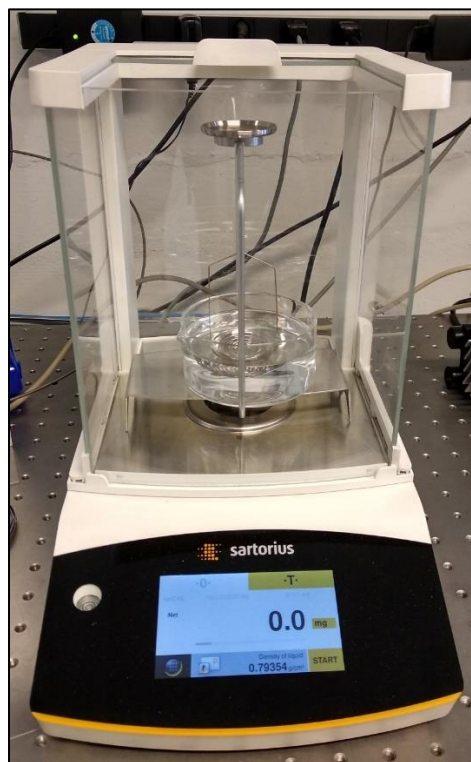


Figura 5.26: bilancia idrostatica utilizzata per la misura di densità.

La valutazione della densità è effettuata mediante la misura della massa di un provino in aria ed in etanolo. Si utilizza etanolo in quanto, grazie alla sua bassa tensione superficiale, non forma bolle sulla superficie del provino che potrebbero causare incertezza sulla misura; inoltre, l'etanolo evapora dal provino qualora quest'ultimo venga messo in forno.

Sfruttando il principio di Archimede, secondo cui *un corpo immerso in un fluido riceve una spinta dal basso verso l'alto pari al peso del volume di fluido spostato*, è possibile calcolare la spinta S come

$$S = V \cdot g \cdot \rho_E = (m_A - m_E) \cdot g \quad 5.9$$

in cui V rappresenta il volume del campione, g l'accelerazione di gravità, ρ_E la densità dell'etanolo, m la massa relativa alle misurazioni in aria (pedice A) ed in etanolo (pedice E).

Dalla precedente relazione, si può facilmente ricavare la densità del corpo:

$$\rho = \frac{m_A}{m_A - m_E} \cdot \rho_E \quad 5.10$$

Il dispositivo è dotato di un software che, previo inserimento del valore di densità dell'etanolo, è in grado di fornire immediatamente il valore di densità desiderato.

Questa metodologia è in grado di fornire il valore di densità a temperatura ambiente. Per i valori a temperatura elevata, si possono sfruttare le misure precedentemente eseguite relative al coefficiente di dilatazione termica. Noto il coefficiente di dilatazione termica ad una certa temperatura, è possibile calcolare la variazione di lunghezza a cui è soggetto il provino, pertanto è possibile ricalcolarne la densità

5.5.2 Risultati

Come già descritto, il processo di misura della densità del materiale mediante l'utilizzo della bilancia idrostatica prevede di:

- Misurare la massa del provino in aria;
- Misurare la massa del provino immerso nell'etanolo;
- Calcolo automatico della densità attraverso la relazione 5.10.

In realtà, la misura della massa del provino in etanolo è fonte di incertezza, in quanto le porosità aperte del materiale assorbono il liquido, causando un aumento della densità finale. Per correggere questa fonte di incertezza, è stata utilizzata la massa segnata dalla bilancia nell'istante immediatamente successivo a quello in cui il provino è immerso nell'etanolo. La densità calcolata dalla bilancia, invece, utilizza la massa del provino in etanolo una volta che questa è diventata stabile, cioè quando tutti i pori aperti del provino sono stati riempiti. Per la misura della densità, sono stati utilizzati i medesimi provini utilizzati per il calcolo della diffusività termica con il Laser Flash, quindi cilindri di diametro nominale pari a 12.7 mm e spessore 3 mm. I risultati sono riportati in Tabella 5.1.

Provino	Massa in aria [mg]	Massa in etanolo iniziale [mg]	Massa in etanolo finale [mg]	Densità calcolata [g/cm ³]	Densità software [g/cm ³]
1	652,9	360,7	374,2	1,773	1,859
2	650,8	360,3	374	1,778	1,866
3	654,8	361,6	374,3	1,772	1,852

Tabella 5.1: risultati relativi ai valori delle masse e delle densità per i tre provini utilizzati.

I risultati ottenuti con questa metodologia di misura risultano ripetibili. Come ci si aspettava, la densità calcolata utilizzando la massa del provino appena immerso nel liquido risulta inferiore rispetto a quella misurata dalla bilancia. La densità, da datasheet, risulta pari a 1.81 g/cm³, quindi intermedia tra le due misure effettuate. Si ritiene, comunque, che a causa della modalità con la quale la misura è stata effettuata, la densità calcolata e pari ad 1.77 g/cm³ sia più accurata dell'altra; pertanto, il materiale risulta meno denso, quindi più poroso, di quanto dichiarato.

Un secondo modo di procedere per la misura della densità risulta essere attraverso il calcolo del rapporto tra il volume del corpo e la sua massa. In Tabella 5.2 sono riportati i risultati relativi a questo approccio.

Provino	Massa in aria [mg]	Diametro [mm]	Spessore [mm]	Volume [mm ³]	Densità [g/cm ³]
1	653.3	12.70	2.99	378.76	1.725
2	650,4	12.69	2.98	376.90	1.726
3	655.1	12.70	2.99	378.76	1.729

Tabella 5.2: risultati relativi a masse e volumi dei tre provini utilizzati e delle relative densità.

La media delle misure con questo approccio risulta essere 1.72 g/cm³, quindi inferiore a quelle calcolate precedentemente. Data l'incertezza relativa al metodo con il quale sono state effettuate le precedenti misurazioni, si ritiene che quest'ultimo risultato sia la stima migliore della densità del materiale.

Per quanto riguarda l'estensione della densità a valori di temperatura elevati, è possibile utilizzare i risultati ottenuti dalle misurazioni del coefficiente di dilatazione termica. La densità, a temperatura ambiente, è valutata come il rapporto tra la massa del campione ed il suo volume a temperatura ambiente. Nel caso di un provino di forma cilindrica, come quelli utilizzati per le misurazioni dilatometriche, la densità è data da:

$$\rho_0 = \frac{m}{V_0} = \frac{m}{\pi \cdot \frac{D^2}{4} \cdot L_0} \quad 5.11$$

Ad una temperatura maggiore, la lunghezza del provino varia, mentre la sua massa ed il suo diametro possono essere considerati costanti ed uguali per ogni valore di temperatura. Pertanto, la densità può essere ottenuta mediante la seguente espressione:

$$\rho(T) = \frac{m}{V(T)} = \frac{m}{\pi \cdot \frac{D^2}{4} \cdot L(T)} \quad 5.12$$

in cui L(T) è la lunghezza del provino ad una certa temperatura T e T₀ è la temperatura alla quale è stata misurata la lunghezza iniziale L₀. L(T) può essere calcolata mediante l'espressione

$$L(T) = L_0 + \alpha \cdot (T - T_0) \quad 5.13$$

in cui α rappresenta il coefficiente di dilatazione termica ad una certa temperatura.

Eseguendo il rapporto tra la 5.11 e la 5.12 è possibile ricavare la densità ad una certa temperatura come nella 5.14:

$$\rho(T) = \frac{L_0}{L(T)} \cdot \rho_0 \quad 5.14$$

In Figura 5.27 sono riportati gli andamenti della lunghezza del provino L(T) e della densità come funzioni della temperatura.

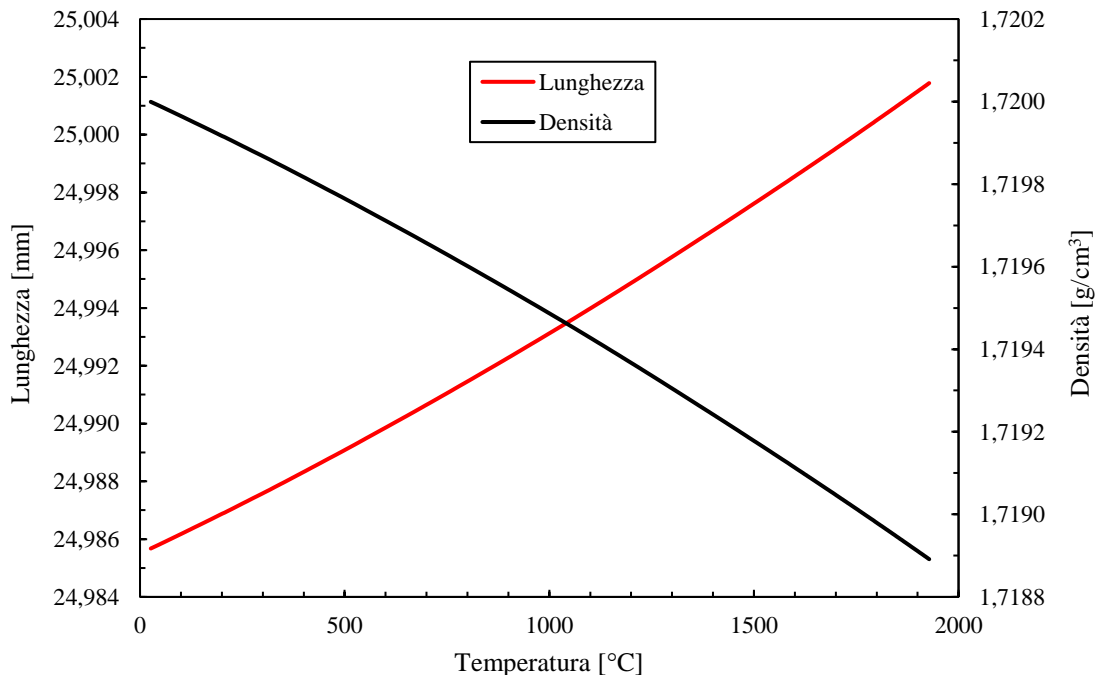


Figura 5.27: risultato della determinazione della densità al variare della temperatura mediante l'utilizzo dei dati ottenuti dalle misure di dilatazione termica.

Come si può apprezzare, la densità non subisce grandi variazioni con l'aumentare della temperatura, rimanendo approssimativamente costante e pari a 1.72 g/cm³.

5.6 Determinazione della conducibilità termica

Come già ampiamente descritto, nell'ambito della progettazione di componenti ad alta temperatura, la conducibilità termica costituisce una proprietà fondamentale, in quanto contribuisce alla determinazione del campo termico all'interno di un corpo e alla trasmissione di calore tra corpi diversi. La sua importanza è inoltre legata agli stati di tensione che si possono generare in presenza di gradienti termici, in quando questi ultimi, in regime stazionario, sono governati dalla conducibilità termica del materiale.

La strumentazione disponibile presso l'EN-MME Mechanical Laboratory del CERN non prevede la misura diretta della conducibilità termica, ma prevede il suo calcolo attraverso la determinazione di altre proprietà termo-fisiche.

5.6.1 Procedura utilizzata

Il calcolo della conducibilità termica può essere eseguito a partire dalle proprietà precedentemente determinate; in particolare, la conducibilità termica è il prodotto della diffusività termica, del calore specifico e della densità. In generale, le tre proprietà sono funzione della temperatura, pertanto lo è anche la conducibilità termica. In formule, il procedimento utilizzato è il seguente:

$$\lambda(T) = a(T) \cdot c_p(T) \cdot \rho(T) \quad 5.15$$

5.6.2 Risultati

Come spiegato, per determinare la conducibilità termica è necessario eseguire il prodotto di:

- diffusività termica: questa è stata misurata da temperatura ambiente fino a 1900 °C;
- calore specifico: questo è stato misurato da temperatura ambiente fino a 1200 °C. Essendo una proprietà intrinseca dei cristalli di grafite, quindi indipendente dalla densità, è stata utilizzata la curva fornita dal datasheet dell'azienda;
- densità: questa è stata misurata a temperatura ambiente ed estrapolata fino a 1900 °C grazie ai risultati ottenuti dalle misure di dilatomètria.

Dalla moltiplicazione di queste tre proprietà, si ottiene la curva di conducibilità termica in funzione della temperatura. In Figura 5.28 è riportato quanto ottenuto.

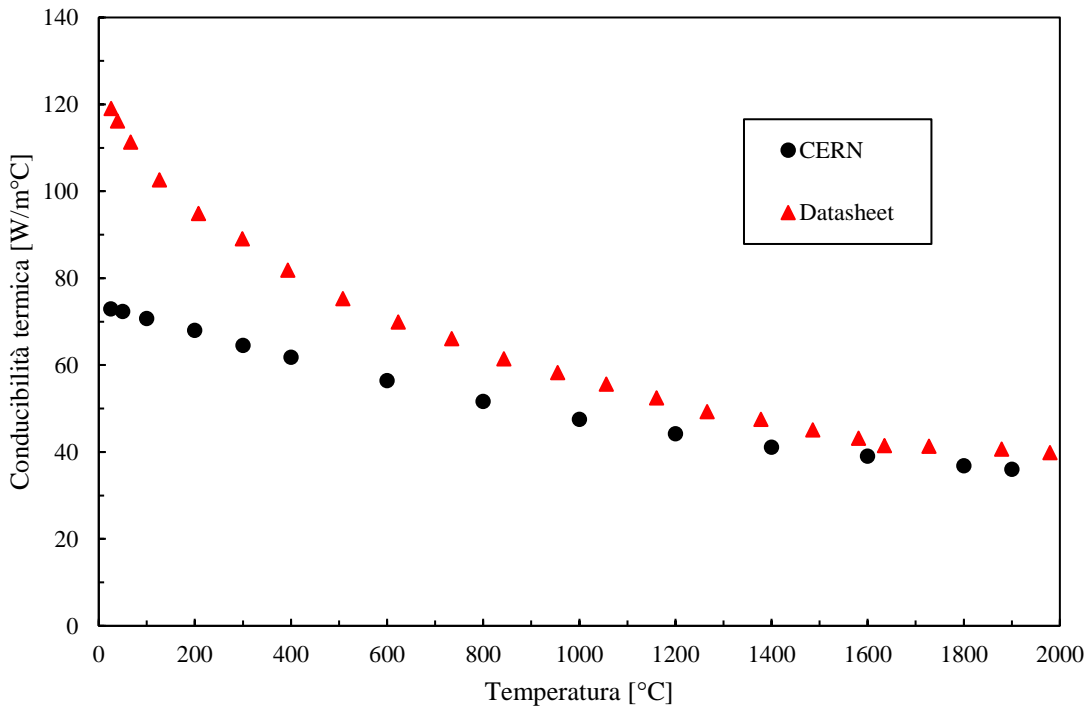


Figura 5.28: risultato delle misure di conducibilità termica della grafite POCO EDM-3[®] confrontate con quanto dichiarato dal datasheet dell'azienda.

Come evidente, la conducibilità termica risulta essere notevolmente differente a basse temperature (circa 45 W/m°C a 25 °C) rispetto a quanto dichiarato da datasheet. Questa differenza si attenua con l'aumentare della temperatura, fino a diventare trascurabile sopra i 1500 °C.

Questo fenomeno è spiegabile mediante uno studio effettuato sull'influenza della porosità sulla conducibilità termica [56]. In particolare, si evidenzia che quest'ultima è esprimibile come somma di tre diversi contributi:

$$\lambda = (1 - \xi)\lambda_m + \xi\lambda_g + \lambda_r \quad 5.16$$

in cui ξ rappresenta la porosità e λ_m , λ_g , e λ_r rappresentano, rispettivamente, i contributi di conducibilità dovuti al materiale in sé, al gas presente all'interno delle porosità e al trasferimento di calore tra le superfici interne di un poro. In condizioni di alto vuoto, il secondo contributo risulta essere nullo. Alle basse temperature, il calore scambiato per irraggiamento è trascurabile rispetto al calore scambiato per conduzione interna, pertanto il primo contributo risulta essere predominante rispetto al terzo; al contrario, alle alte temperature, il terzo assume un ruolo importante nella determinazione della conducibilità termica totale.

Da questa deduzione, si può comprendere come la densità abbia un effetto sulla conducibilità termica gravoso alle basse temperature e trascurabile alle alte, quindi si giustifica quanto evidenziato in Figura 5.28.

Per completezza, in Figura 5.29 si riporta il confronto tra la conducibilità termica della grafite POCO EDM-3[®] ottenuta con il metodo appena descritto e la medesima proprietà ottenuta con il metodo della funzione ottima dei LNL.

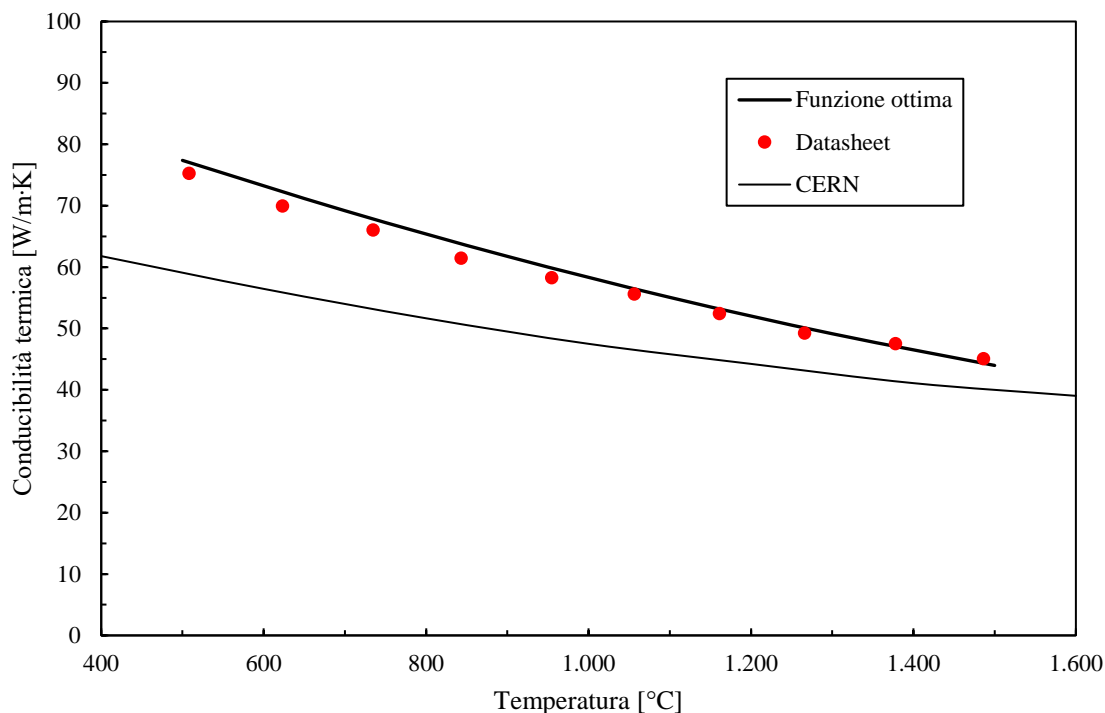


Figura 5.29: confronto dei valori di conducibilità termica della grafite POCO EDM-3[®] ottenuti con diverse metodi di misura.

Come è possibile notare, il metodo della funzione ottima è più aderente ai valori da datasheet, sovrastimando quindi la conducibilità termica misurata presso l'EN-MME Mechanical Laboratory e ritenuta corretta.

5.7 Determinazione delle proprietà elastiche

Le proprietà elastiche di un materiale sono fondamentali per la conversione delle deformazioni in tensioni. Più alte sono le proprietà elastiche, più alte sono le tensioni che si vengono a generare nel materiale. Di fondamentale determinazione sono il modulo di Young, il coefficiente di Poisson ed il modulo di taglio.

5.7.1 L'impact excitation technique per la determinazione delle proprietà elastiche

Questa metodologia è in grado di stimare le proprietà elastiche di materiali ceramici avanzati a temperatura ambiente. Questi materiali possiedono specifiche frequenze di risonanza determinate dalle proprietà elastiche, dalla massa e dalla geometria del componente, pertanto le proprietà elastiche del materiale possono essere stimate a partire dalla conoscenza delle frequenze di risonanza, della massa e della geometria. Il modulo di Young è determinato utilizzando la frequenza di risonanza del primo modo di vibrare flessionale, il modulo elastico di taglio è determinato utilizzando la frequenza fondamentale di risonanza torsionale ed il coefficiente di Poisson è calcolato a partire da questi due.

La normativa di riferimento utilizzata durante le prove è l'ASTM C1259-01. Questa metodologia misura la frequenza fondamentale di risonanza di un provino di geometria nota, eccitandolo meccanicamente con un singolo colpo, mediante l'utilizzo di un martelletto. Un trasduttore (un accelerometro o un microfono, per esempio) riceve le vibrazioni meccaniche e le traduce in un segnale elettrico. Il supporto del provino, la posizione dell'impulso ed il punto di acquisizione delle vibrazioni sono selezionati appositamente per misurare uno specifico modo di vibrare. Il segnale è analizzato e la frequenza fondamentale di risonanza viene isolata; questa, insieme alla massa ed alle dimensioni del provino sono utilizzate per il calcolo del modulo di Young, del modulo di taglio e del coefficiente di Poisson. [57]

L'apparato sperimentale presente presso l'EN-MME Mechanical Laboratory è rappresentato in Figura 5.30. Esso è costituito da due supporti principali collegati tra loro tramite una serie di fili in materiale polimerico aventi la funzione di sostenere il provino. Al di sopra del provino è posizionato, grazie all'apposito sostegno, il microfono, necessario all'acquisizione dell'emissione acustica causata dalla vibrazione del provino. Infine,

è presente il martelletto (Figura 5.30): tale strumento, costituito da un manico in materiale flessibile e da una punta in acciaio, è utilizzato per indurre in eccitazione il provino.

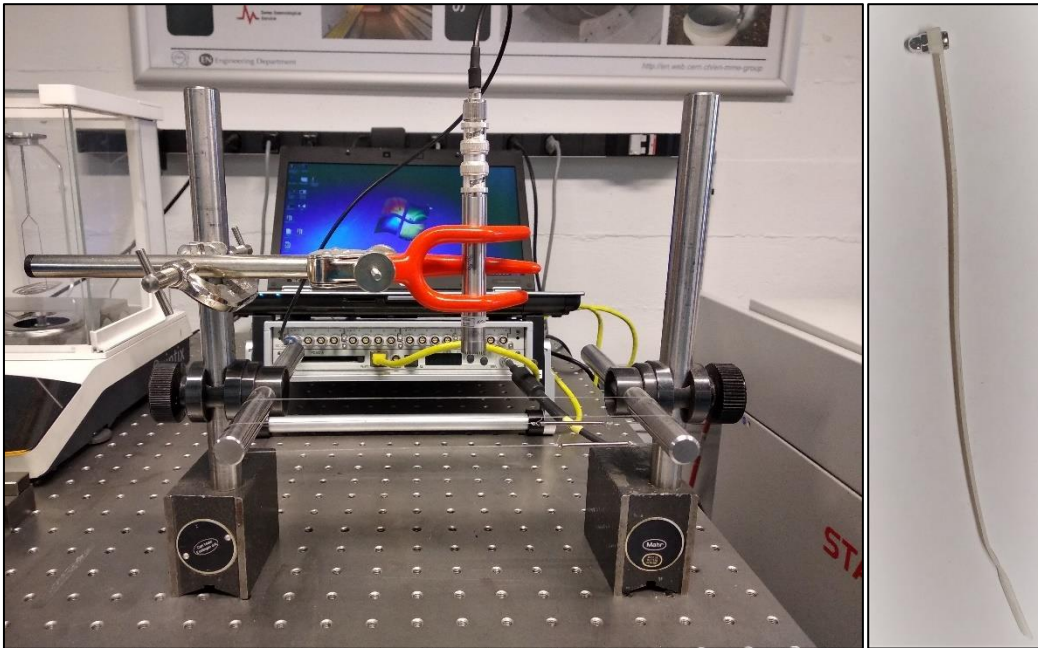


Figura 5.30: a sinistra una fotografia dell'apparato sperimentale utilizzato presso l'EN-MME Mechanical Laboratory del CERN; a destra il martelletto con punta in acciaio utilizzato per l'applicazione dell'impulso eccitante.

L'esecuzione della prova sperimentale relativa alla determinazione del modulo elastico prevede la sistemazione del provino, costituito da una barra a sezione rettangolare, il posizionamento del microfono trasduttore ed il luogo dell'impatto come in Figura 5.31. L'eccitazione del provino è effettuata con un impulso che ne induce una vibrazione di tipo flessionale.

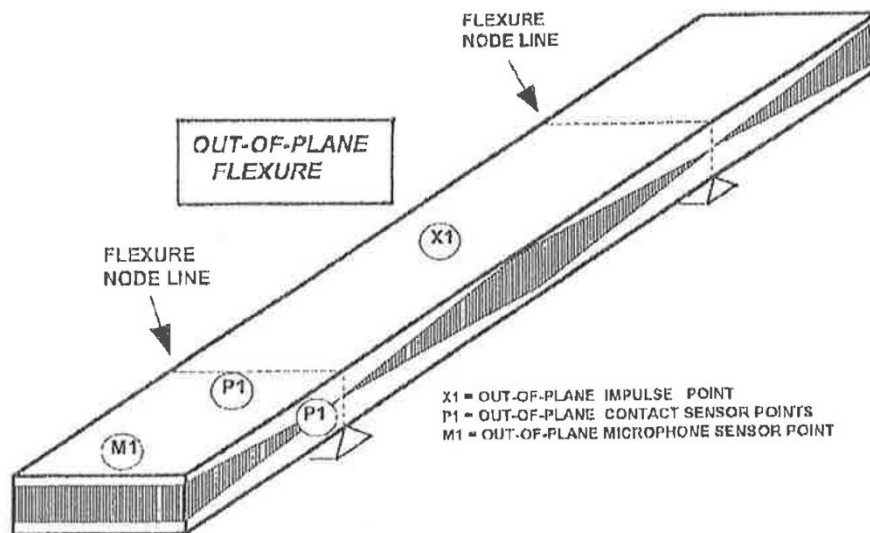


Figura 5.31: provino di sezione rettangolare utilizzato per la determinazione della frequenza di risonanza fondamentale a flessione. In figura è riportata la distribuzione del momento flettente durante la prova.

Il provino viene posizionato su due appoggi costituiti da due fili in materiale polimerico posizionati ad una distanza pari a 0.223 volte la lunghezza del provino (coincidente con la posizione dei nodi del primo modo di vibrare) ed il microfono posizionato in corrispondenza di una delle due estremità (M1 in Figura 5.31) sufficientemente vicino da cogliere la vibrazione desiderata, ma sufficientemente lontano da evitare il suo

disturbo. Il provino viene colpito in corrispondenza del suo centro o in corrispondenza dell'estremità opposta a quella di posizionamento del microfono, cioè in corrispondenza di un antinodo (un antinodo è un punto in cui lo spostamento della barretta vibrante risulta massimo). Il risultato è rappresentato in Figura 5.32.

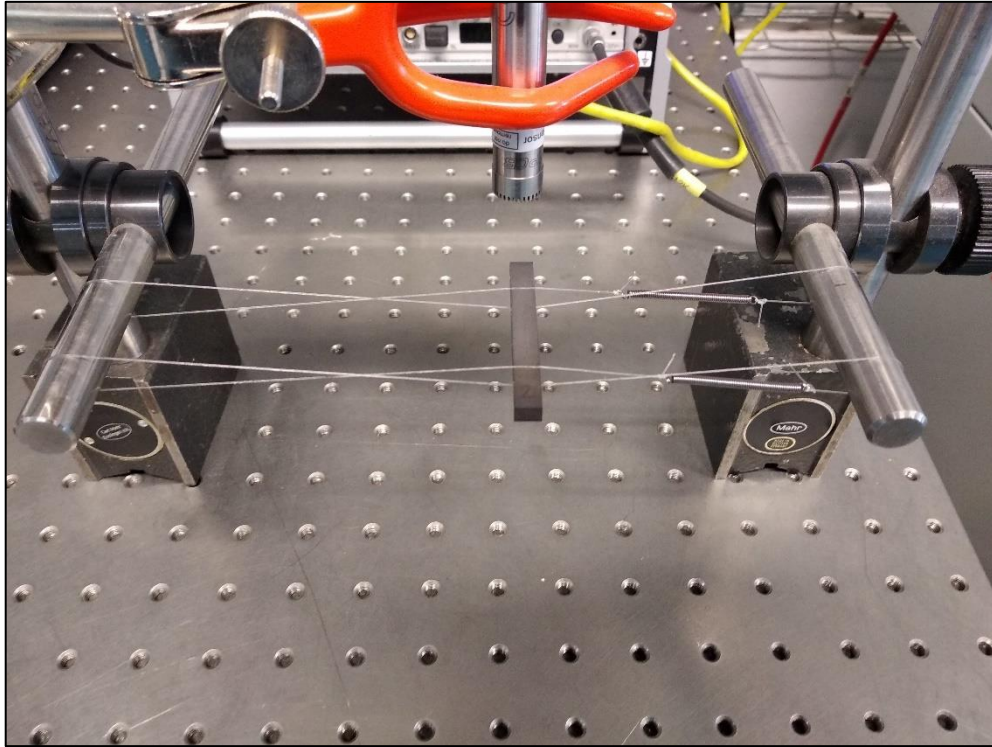


Figura 5.32: posizionamento del provino per la determinazione della frequenza di risonanza flessionale.

Per quanto riguarda la misura del modulo di taglio, l'eccitazione da fornire ed il posizionamento del provino risultano differenti. In particolare (Figura 5.33), per ottenere il primo modo di vibrare, il provino deve essere sostenuto lungo la sua lunghezza ed in corrispondenza della sua mezzeria. La posizione del punto di eccitazione deve essere in corrispondenza della cosiddetta *flexure node line*, in modo tale da evitare l'eccitamento delle frequenze caratteristiche del modo di vibrare flessionale. Il posizionamento del microfono, anche in questo caso, risulta ottimale laddove lo spostamento risulti maggiore (Figura 5.33).

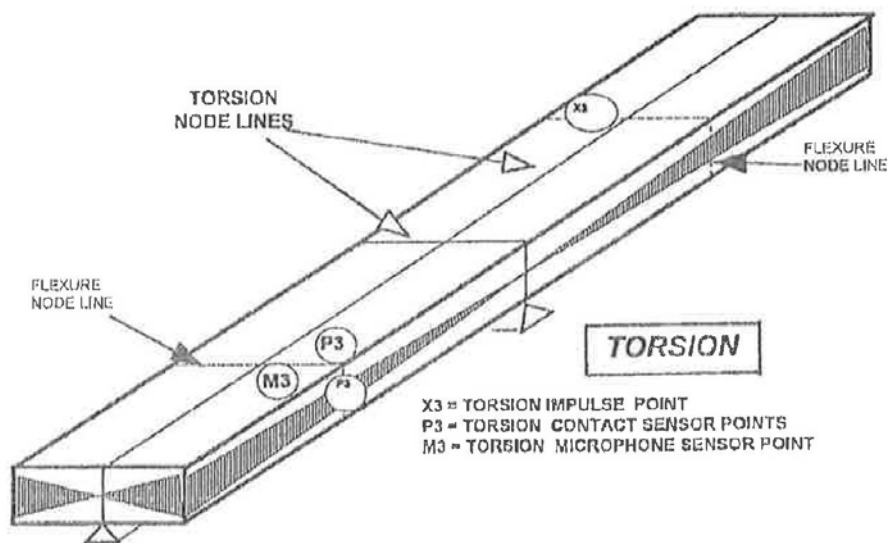


Figura 5.33: provino di sezione rettangolare utilizzato per la determinazione della frequenza di risonanza fondamentale a torsione. In figura è riportata la distribuzione del momento flettente durante la prova.

Per l'eccitazione delle frequenze torsionali, il provino è stato sistemato come in Figura 5.34.

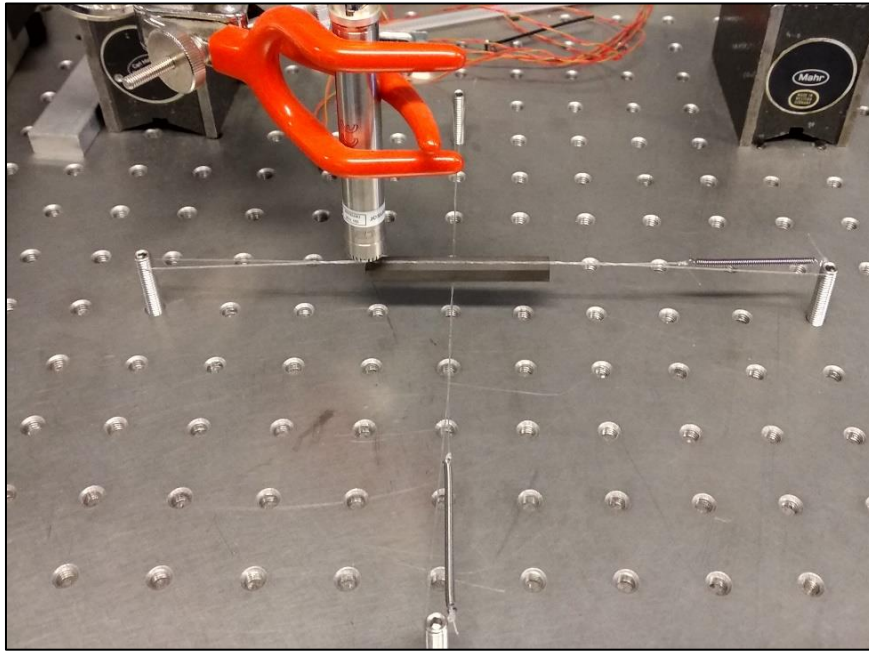


Figura 5.34 posizionamento del provino per la determinazione della frequenza di risonanza torsionale.

In realtà, il sistema di vincoli di Figura 5.34 e l'eccitazione fornita consentono di determinare sia i picchi in corrispondenza delle frequenze di risonanza relative ai modi torsionali, sia quelle relative alle frequenze di risonanza flessionali; questo perché l'impulso ed il sistema di vincoli sono affetti da imperfezioni, pertanto si eccitano sempre diversi modi di vibrare.

Come già anticipato, il modulo di Young è funzione del valore della frequenza fondamentale di risonanza flessionale, della massa del componente e della sua geometria. La normativa [57] fornisce l'equazione empirica per la determinazione del modulo di Young nel caso in cui il provino sia costituito da una barretta di sezione rettangolare:

$$E = 0.9465 \cdot \frac{m \cdot f_f^2}{b} \cdot \frac{L^3}{t^3} \cdot T_1 \quad 5.17$$

In cui:

- E rappresenta il modulo di Young [Pa];
- m rappresenta la massa del provino [g];
- b rappresenta la larghezza della barra [mm];
- L rappresenta la lunghezza della barra [mm];
- t rappresenta lo spessore della barra [mm];
- f_f rappresenta la frequenza fondamentale di risonanza in flessione [Hz];
- T_1 rappresenta il fattore di correzione della frequenza fondamentale di risonanza in flessione introdotto per tenere in considerazione lo spessore, finito, della barra. Se il rapporto L/t è maggiore o uguale a 20, l'espressione di T_1 risulta essere $T_1 = 1 + 6.585 \cdot (t/L)^2$.

Per quanto riguarda la determinazione del modulo di taglio, la normativa fornisce una correlazione empirica (la seguente è per un provino di sezione rettangolare; la normativa fornisce anche quello per un provino di sezione cilindrica).

$$G = \frac{4Lmf_t^2}{bt} \cdot \left[\frac{B}{1+A} \right] \quad 5.18$$

In cui:

- G rappresenta il modulo elastico [Pa];
- F_t la frequenza di risonanza fondamentale a torsione [Hz];
- B rappresenta un parametro contenente i rapporti tra diverse dimensioni del provino e vale

$$B = \frac{\frac{b}{t} + \frac{t}{b}}{4 \left(\frac{t}{b}\right) - 2.52 \left(\frac{t}{b}\right)^2 + 0.21 \left(\frac{t}{b}\right)^6}$$

- A rappresenta una correlazione empirica di fattori che dipendono dal rapporto larghezza su spessore del provino. Questo fattore ha un'influenza sui risultati attorno al 2% e può essere omesso qualora la precisione richiesta sia inferiore a questo valore. In ogni caso, si riporta la formulazione.

$$A = \frac{0.5062 - 0.8776 \left(\frac{b}{t}\right) + 0.3504 \left(\frac{b}{t}\right)^2 - 0.0078 \left(\frac{b}{t}\right)^3}{12.03 \left(\frac{b}{t}\right) + 9.892 \left(\frac{b}{t}\right)^2}$$

Per materiali isotropi, il coefficiente di Poisson è correlato al modulo elastico longitudinale E ed al modulo elastico tangenziale G attraverso la relazione

$$\nu = \frac{E}{2G} - 1 \quad 5.19$$

Pertanto, attraverso la relazione precedente, si può anche ottenere una stima del coefficiente di Poisson.

Il segnale acquisito dal microfono è analizzato da un elaboratore che ne esegue la *Fast Fourier Transform*. Il *data logger* è direttamente collegato ad un computer che ne elabora il segnale: in Figura 5.35 è riportata la schermata dello strumento che evidenzia le frequenze di risonanza cercate.

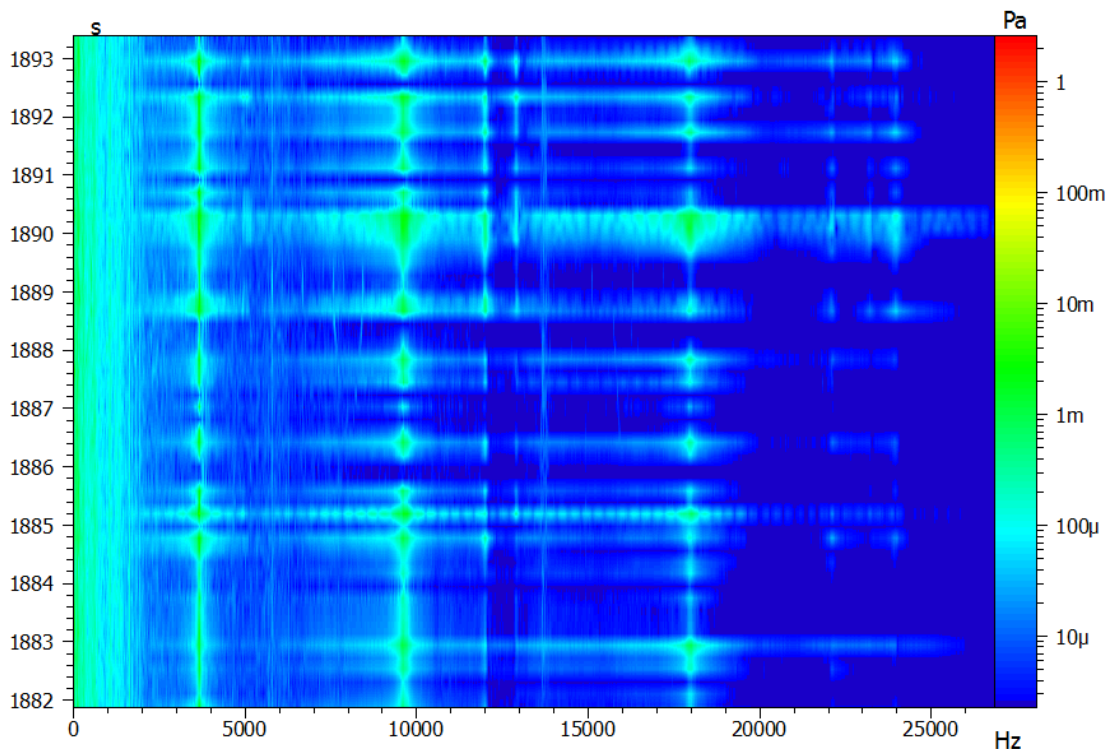


Figura 5.35: trasformata di Fourier effettuata dall'elaboratore. L'asse verticale a sinistra è relativo al tempo [s], quello a destra la pressione esercitata durante l'impulso [Pa] e l'asse orizzontale la frequenza [Hz]. È possibile visualizzare la presenza di alcune frequenze di risonanza.

5.7.2 Risultati

Come già evidenziato, dopo aver posizionato correttamente il provino ed averlo eccitato, a display è visualizzata una schermata come quella in Figura 5.35 in cui sono evidenziate le frequenze di risonanza cercate. Lo step successivo consiste nella lettura del valore delle frequenze in corrispondenza dell'asse delle ascisse, inserire i valori ottenuti all'interno delle formule ed ottenere una stima dei moduli elastici cercati.

Per la verifica dell'esattezza delle frequenze scelte per il calcolo delle proprietà elastiche, è possibile effettuare un'analisi modale con Ansys® Workbench: tale strumento è in grado di fornire il modo di vibrare relativo alla frequenza selezionata. Questo procedimento, però, necessita dell'inserimento delle dimensioni, della densità e delle proprietà elastiche del materiale. Per queste ultime, lo stato dell'arte fornisce un modulo di Young per grafiti POCO circa pari a 12 GPa, mentre il coefficiente di Poisson prossimo a 0.20. Inserendo questi valori, risulta che le frequenze misurate sperimentalmente sono relative a:

- 3650 Hz – primo modo flessionale fuori dal piano (Figura 5.36);

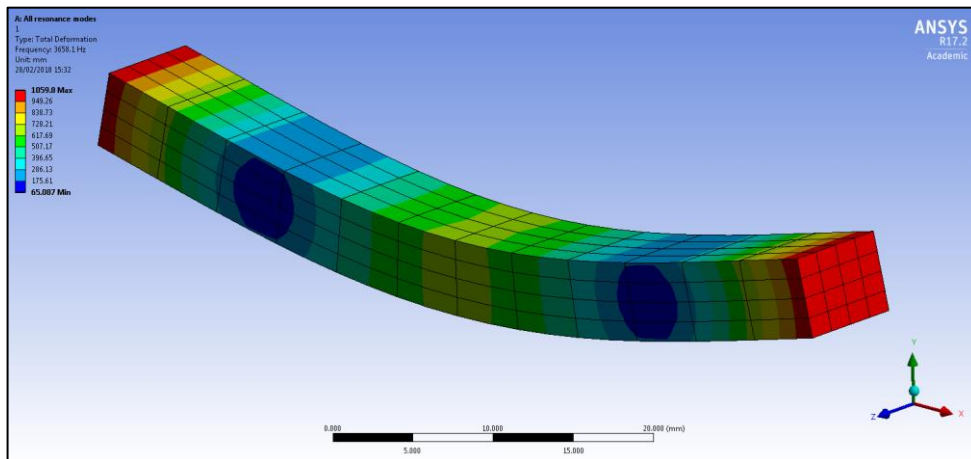


Figura 5.36: primo modo di vibrare flessionale fuori dal piano.

- 9500 Hz – secondo modo flessionale fuori dal piano (Figura 5.37);

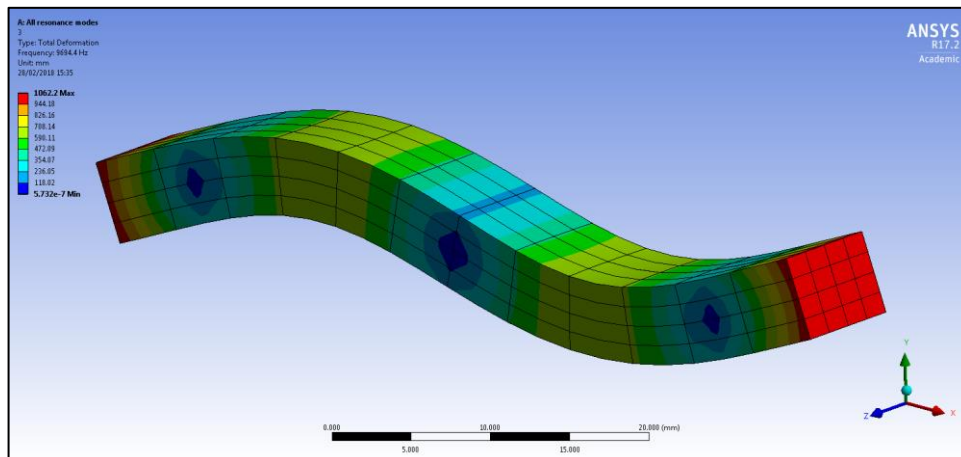


Figura 5.37: secondo modo di vibrare flessionale fuori dal piano.

- 12000 Hz – primo modo torsionale (Figura 5.38);

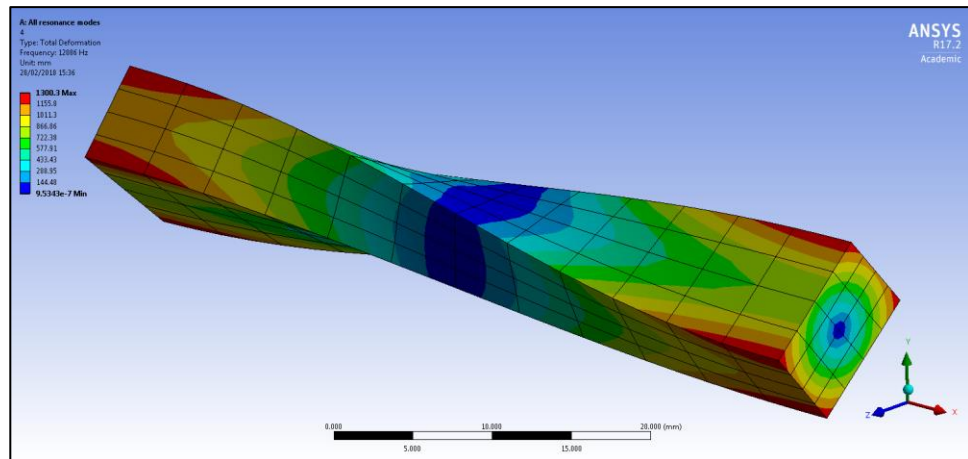


Figura 5.38: primo modo di vibrare torsionale.

- 12950 Hz – secondo modo flessionale nel piano (Figura 5.39);

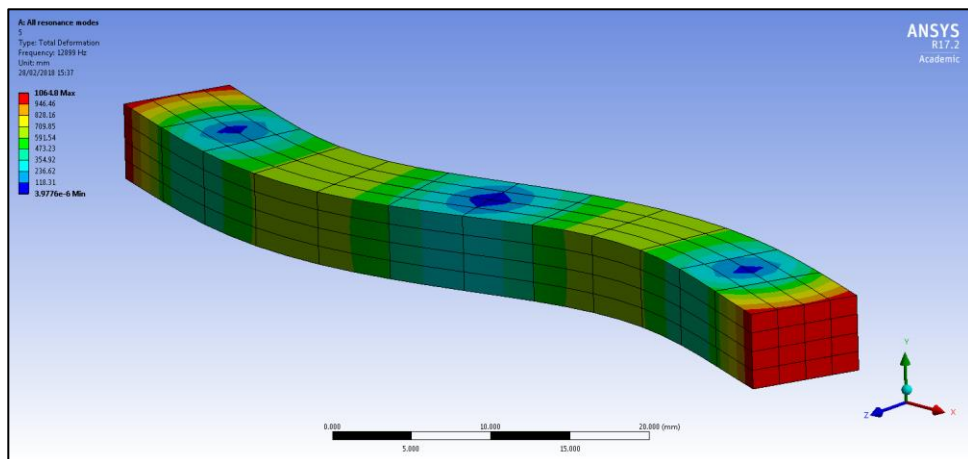


Figura 5.39: secondo modo di vibrare flessionale nel piano.

- 18000 Hz – terzo modo flessionale fuori dal piano (Figura 5.40).

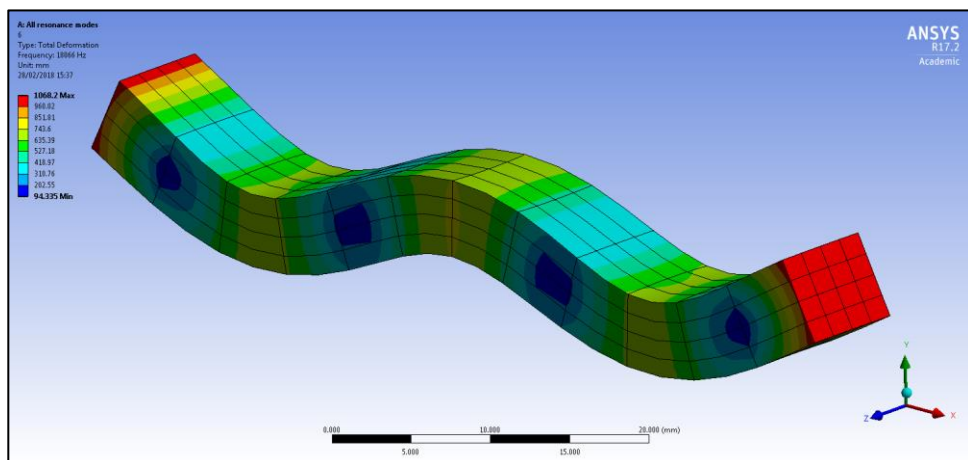


Figura 5.40: terzo modo di vibrare flessionale fuori dal piano.

Una volta ottenute queste informazioni, è possibile calcolare le proprietà elastiche secondo le equazioni fornite dalla normativa: in Tabella 5.3 sono riportati i risultati di quanto ottenuto.

Provino	Massa [mg]	Lungh. [mm]	Largh. [mm]	Spess. [mm]	Freq. Flex. [kHz]	Freq. Tors. [kHz]	E [GPa]	G [GPa]	ν [-]
1	3,554	59,99	6,98	4,95	3,632	11,992	11,824	4,721	0,25
2	3,572	59,98	6,95	4,98	3,672	12,177	11,981	4,852	0,23
3	3,561	59,98	6,95	4,97	3,672	12,138	12,013	4,822	0,24
4	3,555	59,99	6,97	4,94	3,599	12,065	11,700	4,799	0,22
5	3,579	59,98	6,97	4,97	3,672	12,065	12,042	4,784	0,26
Media	3,565	59,98	6,96	4,96	3,649	12,087	11,912	4,795	0,24

Tabella 5.3: risultati relativi alle misure effettuate per la determinazione delle proprietà elastiche.

Il modulo di Young, calcolato con questo metodo, risulta essere pari a 11.9 GPa, mentre il modulo di taglio pari a 4.8 GPa. Da questi due il coefficiente di Poisson, secondo la relazione 5.19, risulta pari a 0.25.

In realtà, la serie di provini utilizzati per la determinazione delle proprietà elastiche sono i medesimi utilizzati per l'esecuzione delle prove a flessione, pertanto aventi dimensioni circa pari a 60x7x5 mm. La geometria dei provini non è totalmente in accordo con quanto dichiarato dalla normativa [57], pertanto i risultati ottenuti mediante le equazioni adeguatamente tarate necessitano di una correzione a posteriori. Per effettuare questa tipologia di correzione, è possibile utilizzare il tool di ottimizzazione interno ad Ansys® Workbench connesso con un'analisi modale analoga a quella precedentemente effettuata: tale strumento è in grado di determinare con esattezza i valori del modulo di Young e del coefficiente di Poisson previa introduzione delle frequenze misurate sperimentalmente. Il tool, così, esegue vari step di iterazione in cui cambia i valori delle due proprietà elastiche cercate fintantoché i modi di vibrare desiderati non avvengono alle frequenze precedentemente misurate. In questa maniera, è possibile determinare con maggior accuratezza i valori delle proprietà elastiche. In Tabella 5.4 sono riassunte le frequenze ottenute con l'ottimizzazione ed i relativi scostamenti dalle frequenze misurate, mentre in sono riportati i valori delle proprietà elastiche calcolate.

Modo di vibrare	Frequenza Calcolata [Hz]	Frequenza misurata [Hz]	Scostamento [%]
1° Flessionale fuori piano	3658	3649	0.24
2° Flessionale fuori piano	9694	9706	0.16
1° Torsionale	12086	12087	0.01
2° Flessionale nel piano	12899	12947	0.37
3° Flessionale nel piano	18065	18042	0.13

Tabella 5.4: risultati delle frequenze trovate con l'ottimizzatore di Ansys®.

Modulo di Young [GPa]	Modulo di taglio [GPa]	Coefficiente di Poisson [-]	Bulk Modulus [GPa]
12.00	4.78	0.25	8.20

Tabella 5.5: risultati delle proprietà elastiche ottenute. È inserito anche il valore del modulo di compressibilità, calcolato come $K = \frac{E}{3 \cdot (1 - 2\nu)}$.

Come è possibile notare, il valore del modulo di Young risulta variato di poco rispetto alla formula suggerita dalla normativa [57]; per quanto riguarda il coefficiente di Poisson, invece, si ha una variazione di circa un 30%, quindi assolutamente non trascurabile. Ciò a dimostrazione dell'importanza di utilizzare la correzione dei risultati ottenuti con la normativa mediante l'utilizzo del tool di ottimizzazione.

5.8 Determinazione della resistenza a flessione

I test di rottura di materiali sono da sempre utilizzati per la determinazione delle proprietà strutturali, così da permettere un corretto dimensionamento dei componenti meccanici fabbricati con questi materiali.

Per gli acciai (o per i metalli in generale) è usuale effettuare dei test di rottura a trazione, per poi poter correlare la tensione di rottura ottenuta con una tensione equivalente figlia dello stato di tensione presente nel componente.

Per quanto riguarda altre tipologie di materiali, come i materiali ceramici, la prova di trazione è di difficile esecuzione a causa della loro bassa tolleranza alle sollecitazioni di flessione, che si traducono in elevate difficoltà pratiche nell'allineamento della macchina di prova. Pertanto, l'esperienza mostra che, per la determinazione delle proprietà strutturali di tali materiali, è ampiamente utilizzata la prova a flessione.

5.8.1 Il metodo della flessione a 4 punti

I test a flessione per i materiali a comportamento fragile possono essere condotti mediante due diversi approcci: test a flessione a 3 punti e a 4 punti. In Figura 5.41 sono mostrate queste due diverse modalità: entrambe consistono nell'appoggiare il provino su due rulli e nell'esercitare una forza nel mezzo. Il metodo della flessione a 3 punti prevede di concentrare il carico in corrispondenza della mezzeria del provino, mentre il metodo della flessione a 4 punti prevede la suddivisione del carico in due punti.

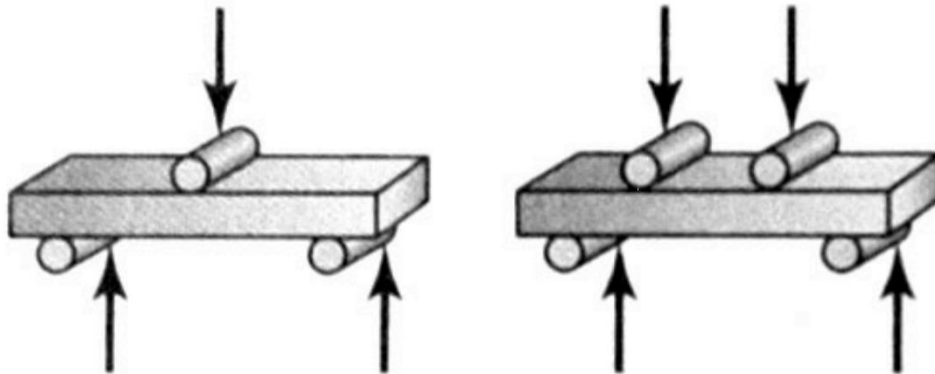


Figura 5.41: modalità di test a flessione a 3 punti (a sinistra) e a 4 punti (a destra).

La distribuzione del momento flettente risultante sul provino nei due casi è rappresentata in Figura 5.42.

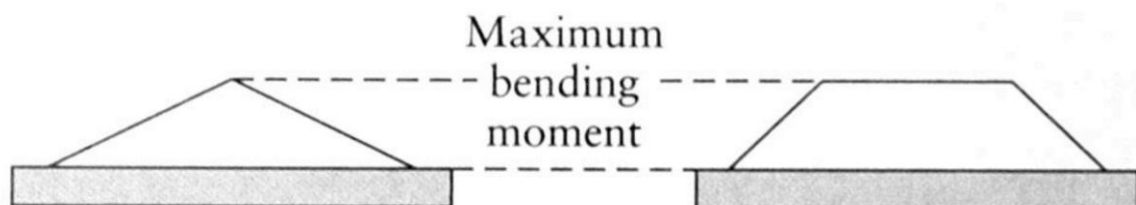


Figura 5.42: distribuzione del momento flettente risultante sul provino nel caso di flessione a 3 punti (a sinistra) e a 4 punti (a destra). Il diagramma del momento è tracciato dalla parte delle fibre compresse.

Come evidenziato, in una prova di flessione a 4 punti, una parte consistente del provino è sottoposta al carico massimo, mentre nella flessione a 3 punti solo un punto. Questo è il motivo principale per cui la prova di

flessione a 4 punti fornisce migliori risultati statistici e, nonostante sia di più difficile implementazione per via delle difficoltà di allineamento, è quella maggiormente utilizzata.

L'apparato sperimentale utilizzato presso l'EN-MME Mechanical Laboratory è rappresentato in Figura 5.43.

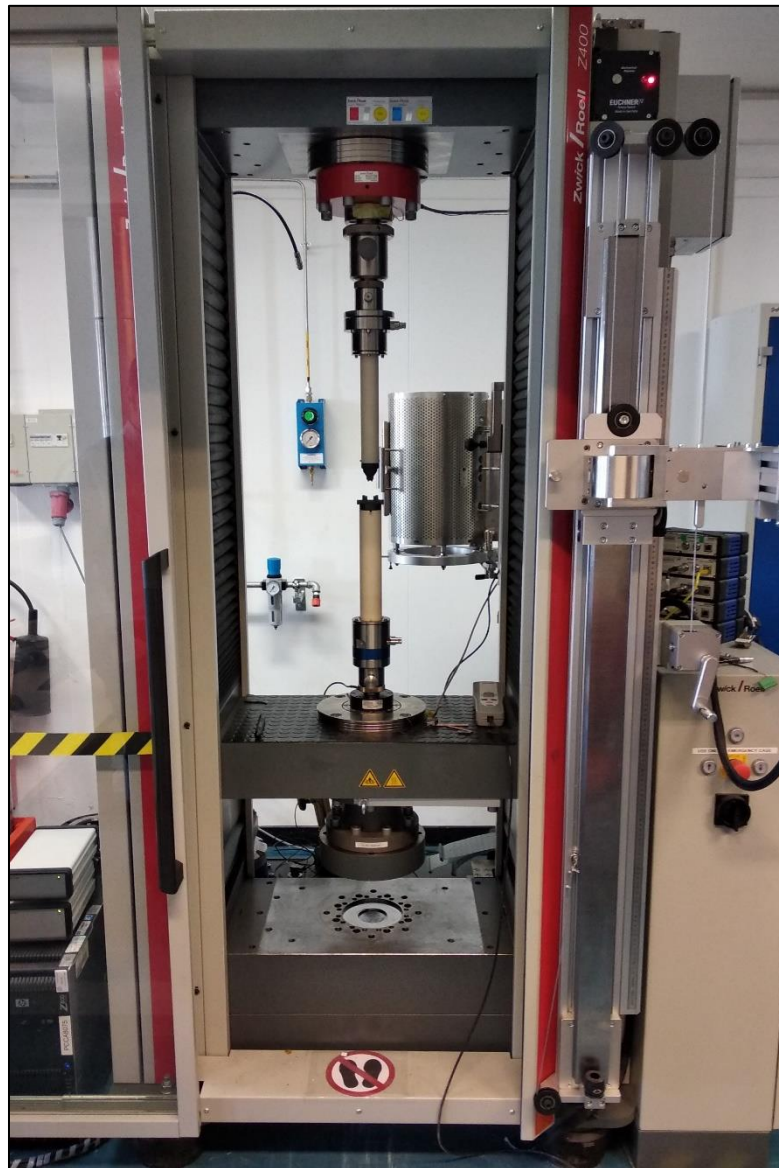


Figura 5.43: apparato sperimentale utilizzato presso l'EN-MME Mechanical Laboratory per la prova di flessione a 4 punti. Il setup cambia leggermente per le prove eseguite e temperatura ambiente.

Il macchinario presenta due ganasce, una fissa (superiore) ed una mobile (inferiore). Tra le due ganasce è presente un sistema di sostegno costituito da due cilindri di allumina al termine dei quali è presente il dispositivo, in carburo di silicio, per il posizionamento del provino (Figura 5.44). La distanza tra i due rulli superiori è di 20 mm, mentre quella tra i due rulli inferiori è di 40 mm; le dimensioni nominali del provino sono 60x7x5 mm.

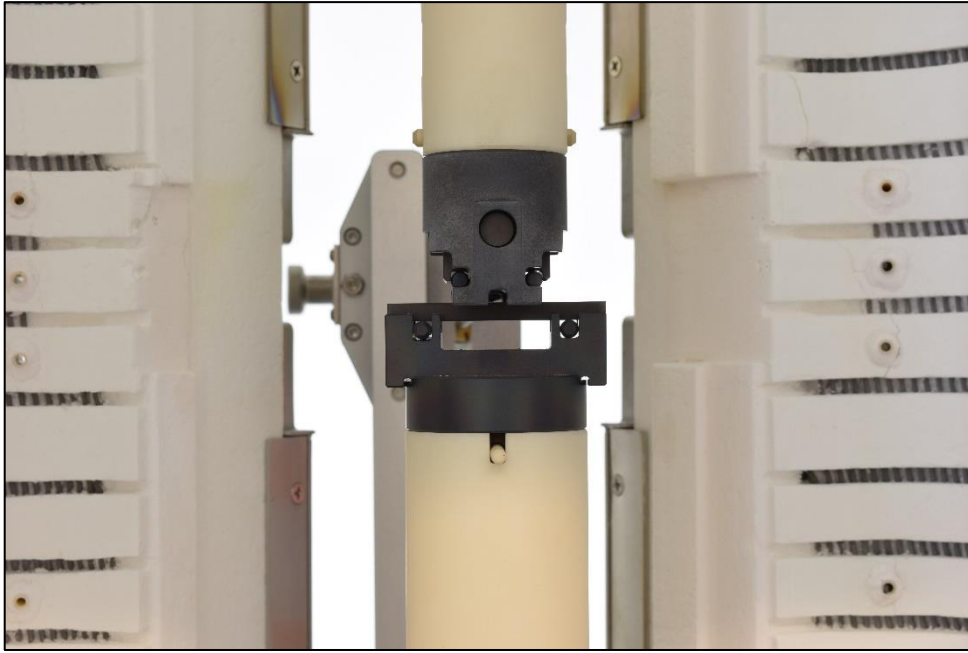


Figura 5.44: sistema di sostegno del provino in carburo di silicio. Sono visibili i quattro rulli utilizzati per le prove di flessione a 4 punti.

Per le prove effettuate ad alta temperatura, è disponibile un riscaldatore ohmico costituito da una camera, rivestita internamente di allumina porosa, in cui è possibile racchiudere il provino e tutto il sistema di sostegno (Figura 5.45). La corrente riscaldante è fornita da un alimentatore collocato in prossimità alla macchina di prova e la temperatura del provino è controllata da una termocoppia posta a contatto col provino stesso. Il riscaldatore è in grado di innalzare la temperatura del provino fino a 1200 °C, ma, essendo in aria, è stato possibile effettuare le prove fino a 400 °C a causa della forte ossidazione sui provini in grafite che avviene in presenza di ossigeno.

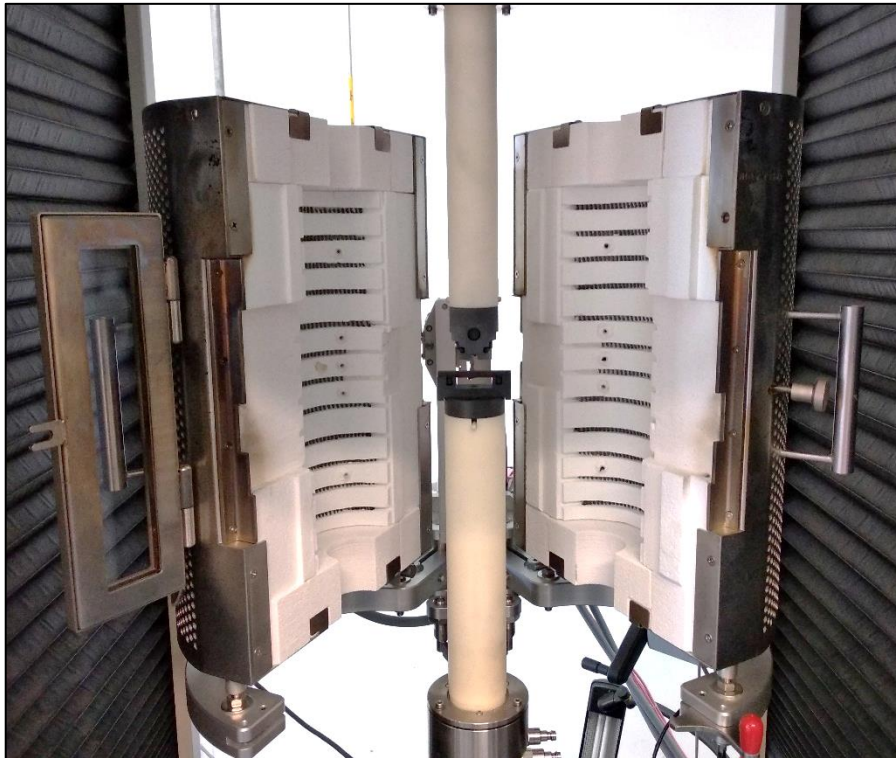


Figura 5.45: dispositivo utilizzato per il riscaldamento del provino.

Per le prove effettuate a temperatura ambiente, invece, è stato utilizzato un altro setup (Figura 5.46): esso è costituito da componenti in acciaio inossidabile ed in carburo di silicio, ma non è adatto ad andare a temperature elevate. La distanza tra i due rulli superiori risulta, anche qui, 20 mm, mentre la distanza tra i due rulli inferiori risulta 40 mm. Le prove sono state effettuate seguendo la normativa [58].

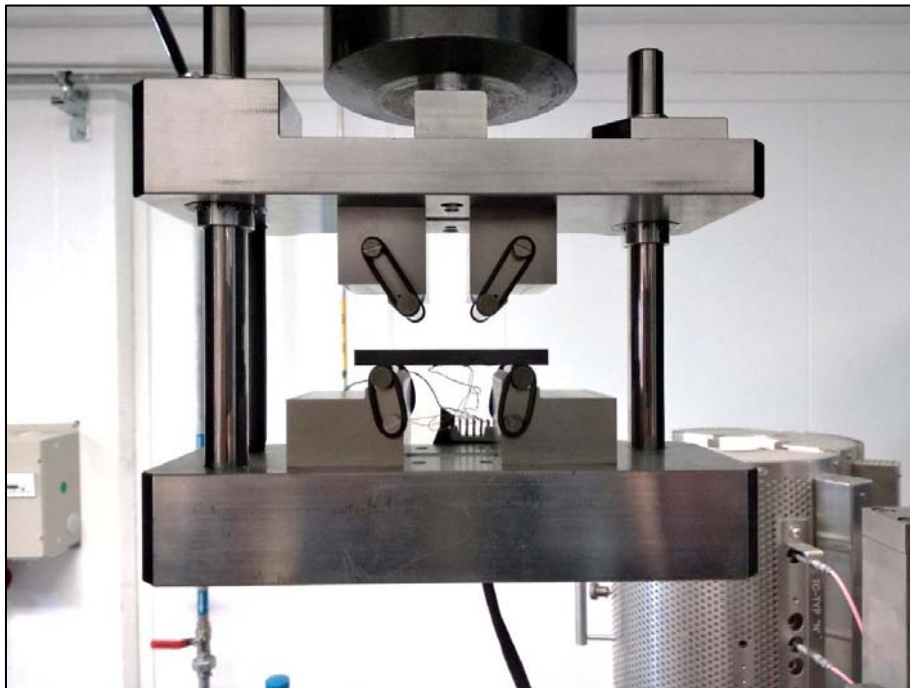


Figura 5.46: setup utilizzato per le prove di flessione a 4 punti effettuate a temperatura ambiente.

Durante una singola prova, è necessario misurare la forza impiegata e lo spostamento del provino. Per quanto riguarda la forza, il macchinario è dotato di una cella di carico: inserendo all'interno del software le dimensioni del provino, esso fornisce direttamente la forza applicata al provino in MPa. Relativamente allo spostamento del provino, invece, il macchinario è dotato di un sensore di spostamento in grado di misurare il moto della ganascia inferiore. Questo moto, però, non costituisce il solo spostamento dovuto al moto del provino, ma anche di tutti i componenti che sono interposti tra ganascia superiore ed inferiore, portando ad una notevole sovrastima dello spostamento del provino. Per evitare di commettere questo errore, è disponibile l'utilizzo di un sensore di spostamento laser (Laser Extensometer, Figura 5.47)



Figura 5.47: laser extensometer utilizzato per la misura degli spostamenti del provino.

Per la misura degli spostamenti del provino, il laser è gestito da un software che permette il monitoraggio dello spostamento di tre punti: per le prove a flessione effettuate a temperatura ambiente, il setup utilizzato (Figura 5.46) permette di controllare lo spostamento della zona centrale e delle due zone periferiche del provino, determinando quindi lo spostamento relativo (Figura 5.48).

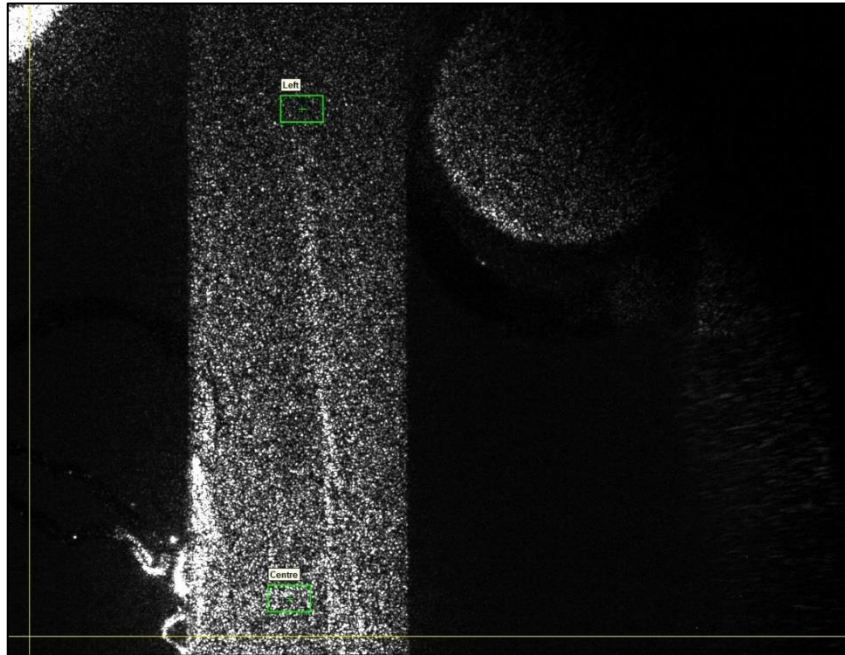


Figura 5.48: posizionamento delle finestre di controllo dell'estensimetro laser per la determinazione dello spostamento nelle prove a flessione effettuate a temperatura ambiente.

Per quanto riguarda le prove effettuate ad alte temperature, il setup utilizzato (Figura 5.44) non permette il monitoraggio della parte periferica del provino, in quanto coperta dal sostegno. Pertanto, è stato deciso di posizionare le finestre di controllo laterali in corrispondenza dei due rulli superiori (Figura 5.49): si ritiene che, per i bassi livelli di forza in gioco, non sia un'approssimazione che possa introdurre gravi errori sui risultati ottenuti.

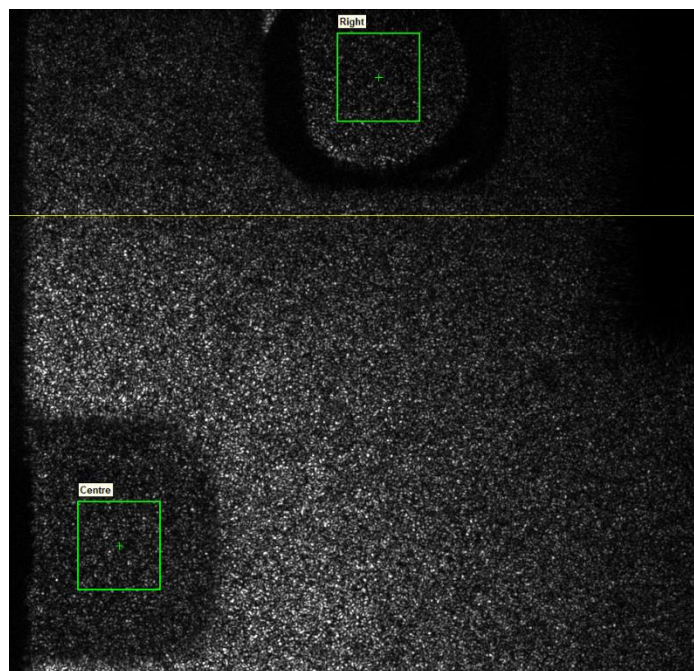


Figura 5.49: posizionamento delle finestre di controllo dell'estensimetro laser per la determinazione dello spostamento nelle prove a flessione effettuate ad alta temperatura.

Come già indicato, il software fornisce in tempo reale i valori di tensione e deformazione in base alla forza misurata dalla cella di carico ed allo spostamento misurato dall'estensimetro laser. Le formule utilizzate dal software sono

$$\sigma = \frac{3}{4} \cdot \frac{F \cdot l}{b \cdot t^2} \qquad \varepsilon = \frac{400 \cdot t}{l_1} \cdot \delta \qquad 5.21 - 5.22$$

in cui F è la forza misurata dalla cella di carico, l è la distanza tra i due rulli inferiori (40 mm), b è la larghezza del provino (7 mm), t è il suo spessore (5 mm), l₁ è la distanza tra i due rulli superiori (20 mm) e δ è lo spostamento misurato dall'estensimetro laser.

Per la misura della deformazione a temperatura ambiente sono stati utilizzati degli estensimetri (R=120 Ω, k=1.92) applicati in corrispondenza della mezzeria della faccia inferiore del provino (Figura 5.50); lo schema utilizzato è ad ¼ di ponte. Anche qui, il software è in grado di fornire direttamente lo strain senza rielaborazioni del dato grezzo da parte dell'operatore.

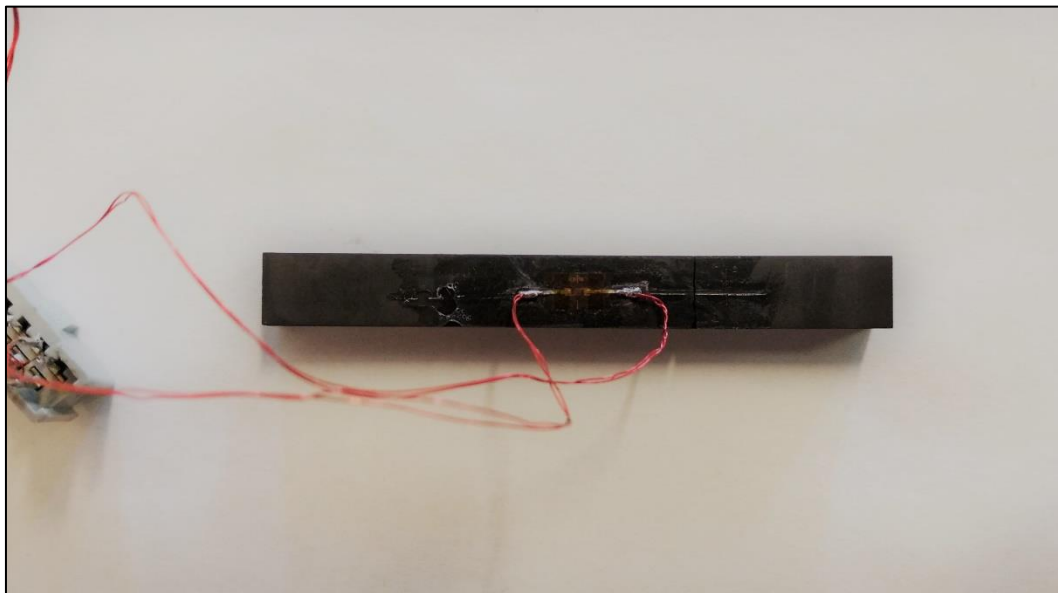


Figura 5.50: fotografia di uno dei provini a cui è stato applicato un estensimetro.

5.8.2 Risultati

Tutte le curve tensione-deformazione riportate in questo paragrafo sono state ottenute a partire dal dato grezzo mediante un'operazione di filtro del tipo *media mobile*, al fine di ridurre il rumore presente.

In Figura 5.51 sono presenti le curve stress-strain per i 5 provini condotti a rottura a temperatura ambiente ed in Tabella 5.6 sono presenti i valori di tensione e deformazione a rottura degli stessi.

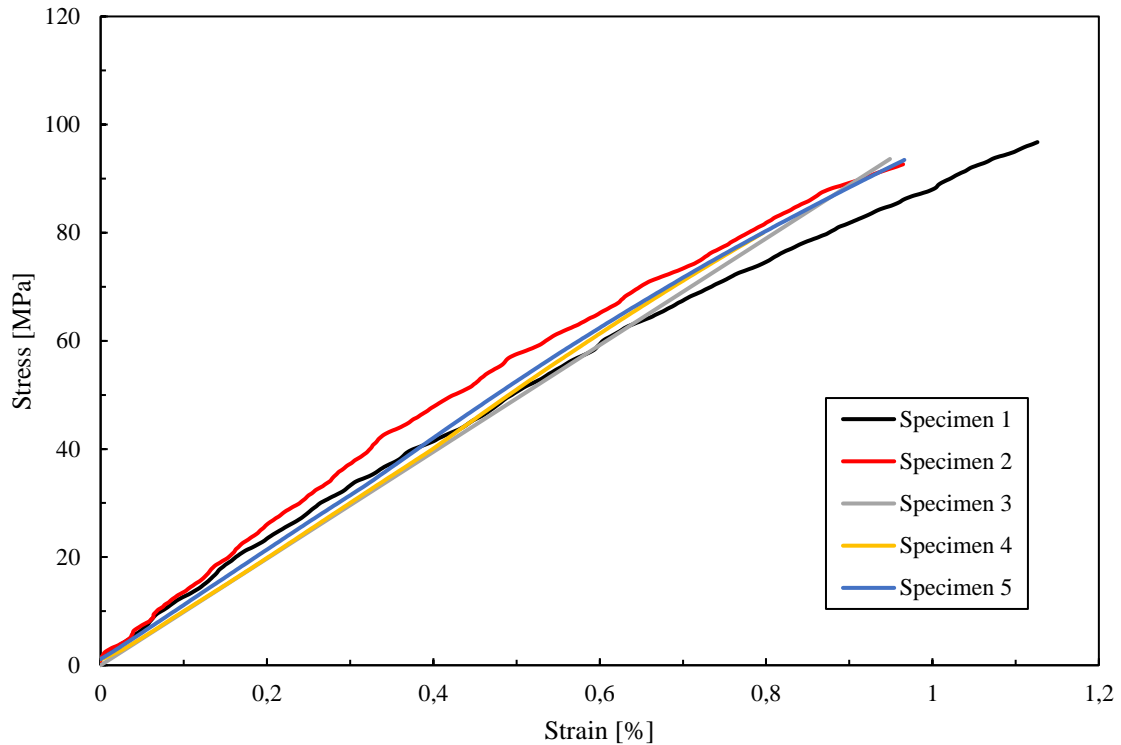


Figura 5.51: curve stress-strain di flessione ottenute a temperatura ambiente (deformazioni calcolate con estensimetro laser).

Provino [N]	Stress alla frattura [MPa]	Strain alla frattura [%]
1	96,98	1,13
2	92,91	0,96
3	93,64	0,95
4	79,99	0,79
5	93,47	0,95
Media	91,40	0,96
Deviazione Standard	2,87	0,11

Tabella 5.6: tensione e deformazione a rottura per i 5 provini condotti a rottura a temperatura ambiente.

Dall'analisi dei risultati è possibile affermare che le prove sono ripetibili sia in termini di tensione che di deformazione a rottura, attestandosi attorno a 90 MPa e ad 1% rispettivamente. Il comportamento del materiale è fragile, mostrando una curva pressoché lineare e priva di plasticizzazione.

In Figura 5.52 sono riportate le curve stress-strain ottenute con l'applicazione degli estensimetri sui provini 3-4-5. Com'è evidente, la tensione a rottura è la medesima (infatti la cella di carico utilizzata per la determinazione della forza è la stessa nei due casi), ma lo strain è inferiore rispetto a quello calcolato mediante l'estensimetro laser.

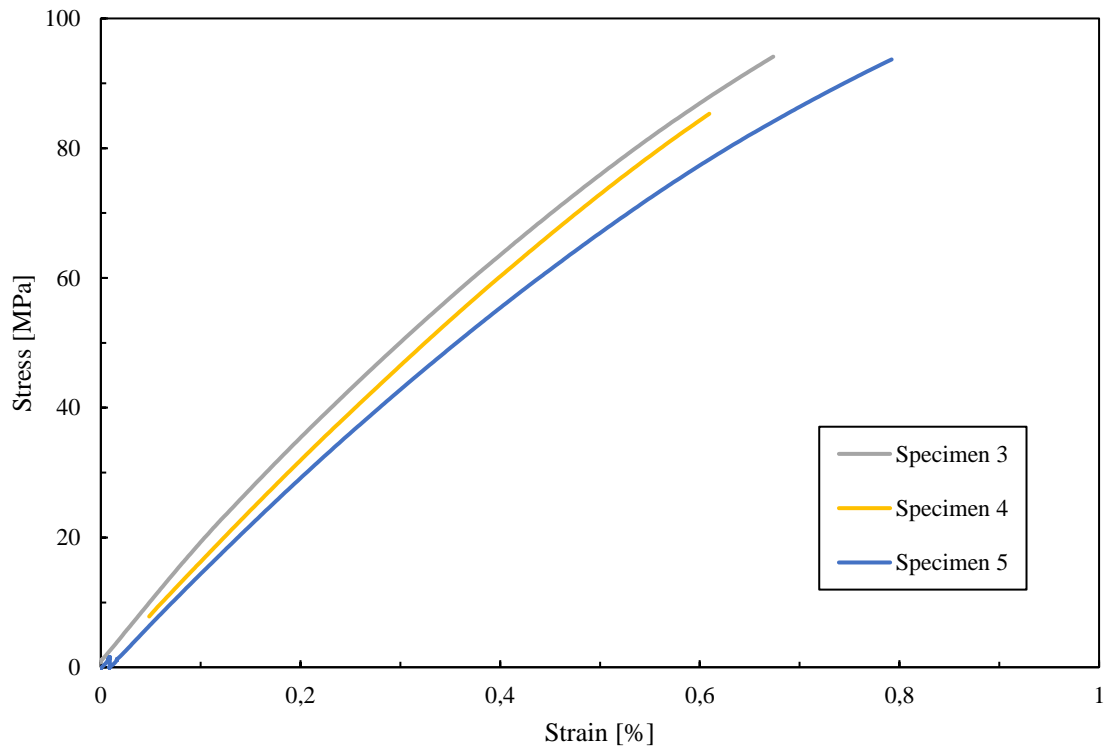


Figura 5.52: curve stress-strain di flessione ottenute a temperatura ambiente (deformazioni calcolate con estensimetri incollati sul provino).

In Figura 5.53, in Figura 5.54 ed in Figura 5.55 sono riportate delle immagini scattate al SEM relative alla superficie di frattura di uno dei provini utilizzati per i test di flessione condotti a temperatura ambiente.

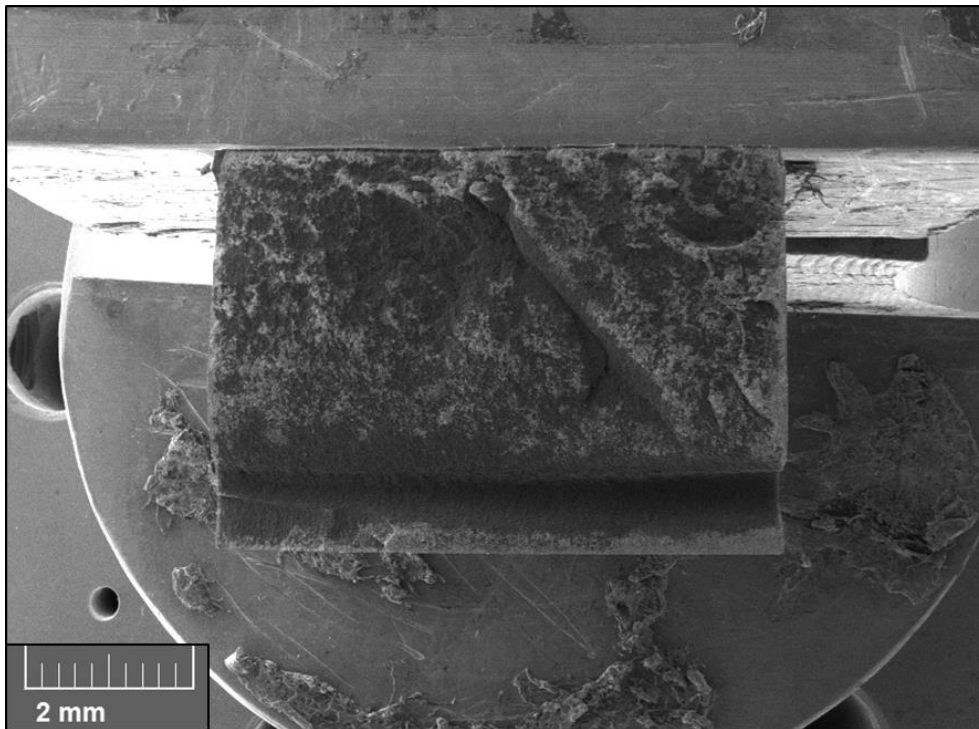


Figura 5.53: immagine SEM della sezione di frattura di uno dei provini utilizzati per i test a temperatura ambiente (20x).

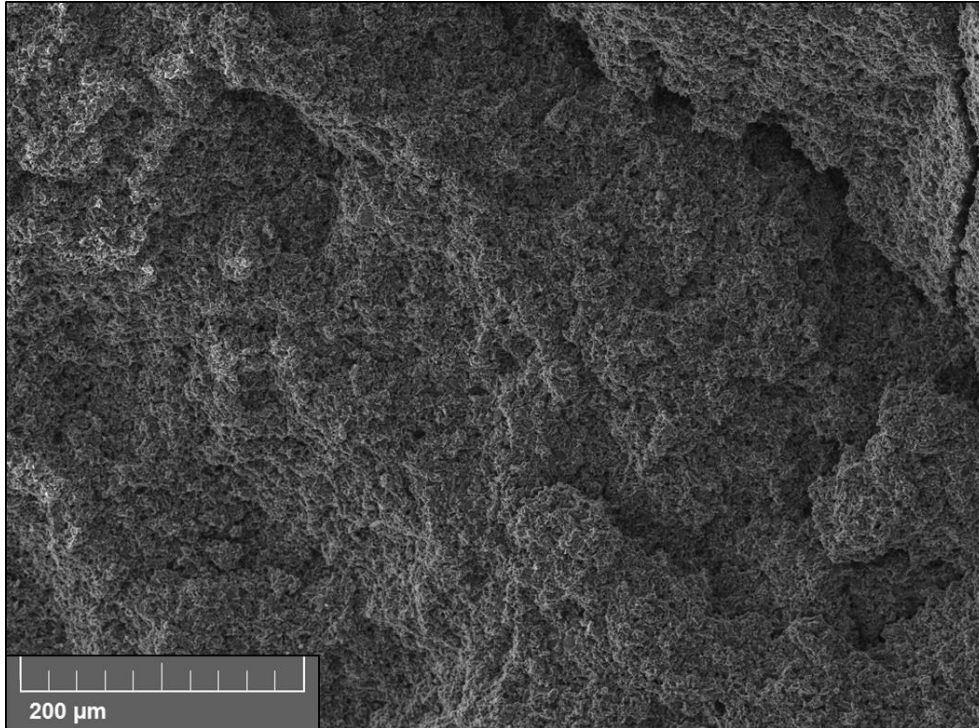


Figura 5.54: immagine SEM della sezione di frattura di uno dei provini utilizzati per i test a temperatura ambiente (400x).

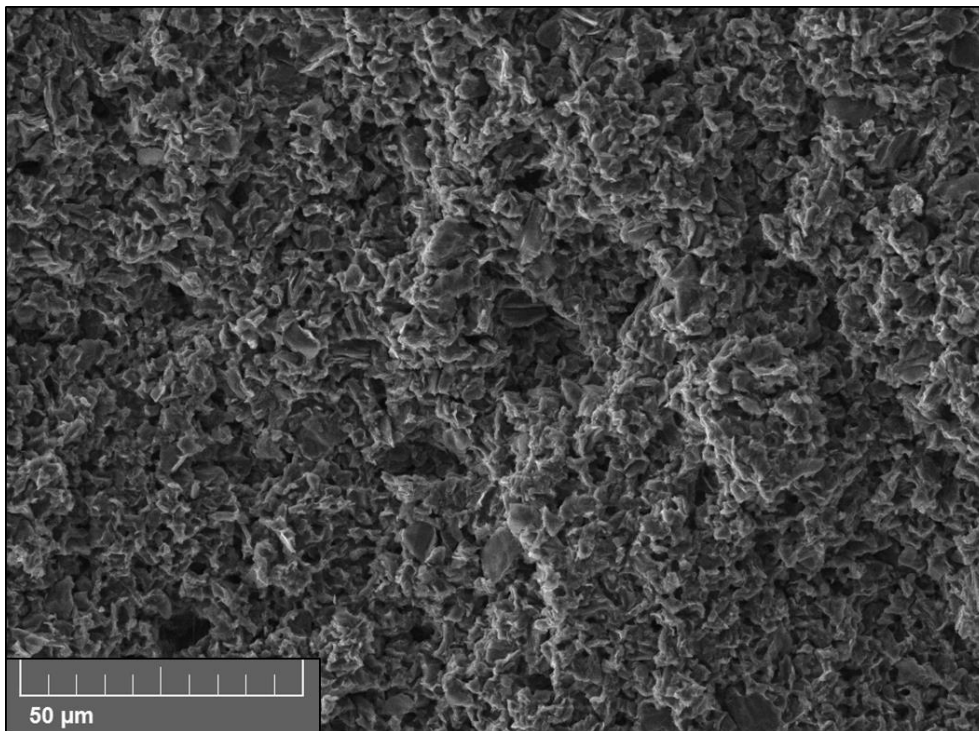


Figura 5.55: immagine SEM della sezione di frattura di uno dei provini utilizzati per i test a temperatura ambiente (1600x).

Le immagini ottenute al microscopio elettronico confermano la fragilità della frattura, in quanto i grani cristallini non presentano segni di deformazione plastica. Risulta difficile individuare la zona di inizio della frattura, ma in Figura 5.53 è possibile individuare una cricca che potrebbe rappresentare il difetto critico.

In Figura 5.56 sono presenti le curve stress-strain per i 4 provini condotti a rottura ad una temperatura di 200 °C ed in Tabella 5.6 sono presenti i valori di tensione e deformazione a rottura degli stessi.

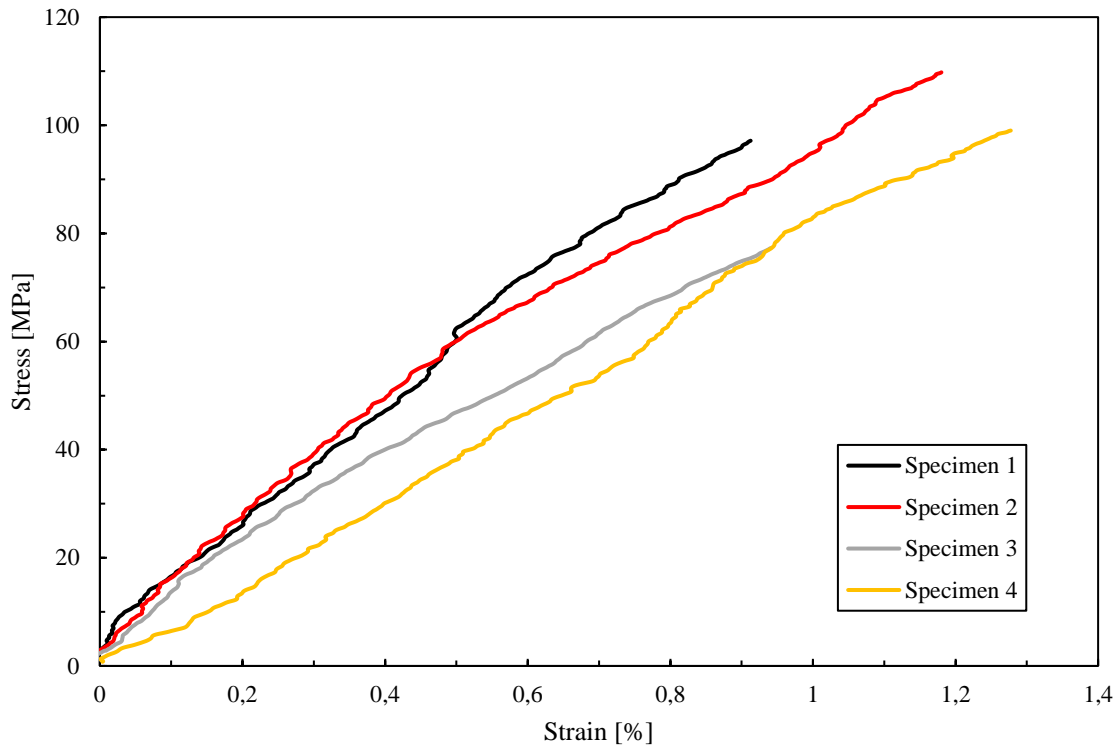


Figura 5.56: curve stress-strain di flessione ottenute a 200 °C (deformazioni calcolate con estensimetro laser).

Provino [N]	Stress alla frattura [MPa]	Strain alla frattura [%]
1	97,33	0,91
2	109,96	1,18
3	77,56	0,94
4	99,22	1,28
Media	96,02	1,08
Deviazione Standard	13,51	0,18

Tabella 5.7: tensione e deformazione a rottura per i 4 provini condotti a rottura a 200 °C.

Dall'analisi dei risultati è possibile affermare che le prove non godono di una elevata ripetibilità sia in termini di tensione che di deformazione a rottura; tale variabilità nei risultati può essere causata dalla presenza di difetti di dimensioni più o meno grandi in corrispondenza della zona sollecitata. La tensione media e la deformazione a rottura si attestano attorno a 95 MPa ed a 1% rispettivamente. Il comportamento del materiale è fragile, mostrando una curva pressoché lineare e priva di plasticizzazione.

In Figura 5.57, in Figura 5.58 ed in Figura 5.59 sono riportate delle immagini scattate al SEM relative alla superficie di frattura di uno dei provini utilizzati per i test di flessione condotti a 200 °C.

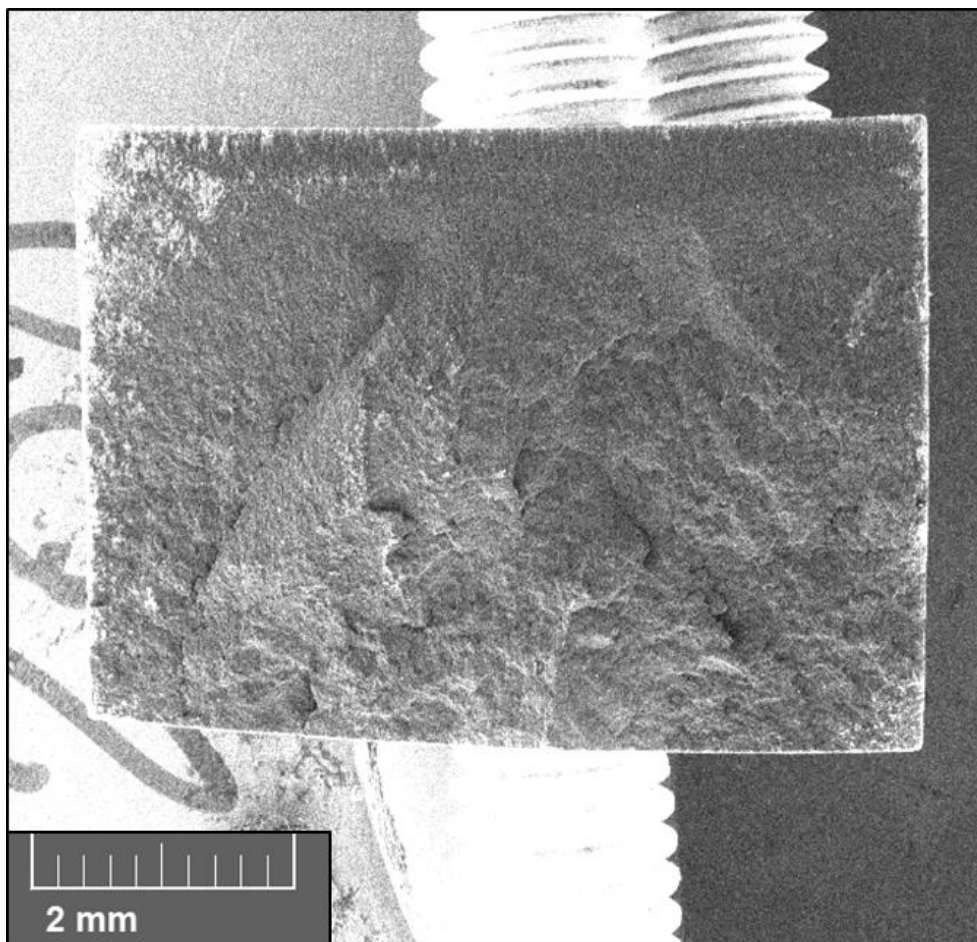


Figura 5.57: immagine SEM della sezione di frattura di uno dei provini utilizzati per i test a 200 °C (24x).

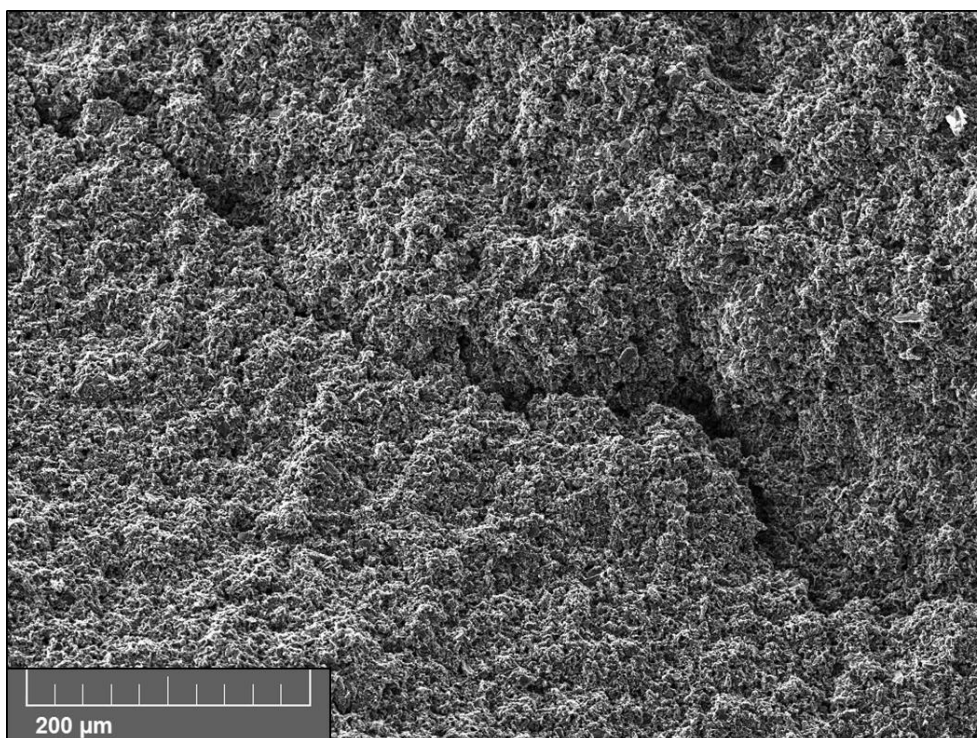


Figura 5.58: immagine SEM della sezione di frattura di uno dei provini utilizzati per i test a 200 °C (400x).

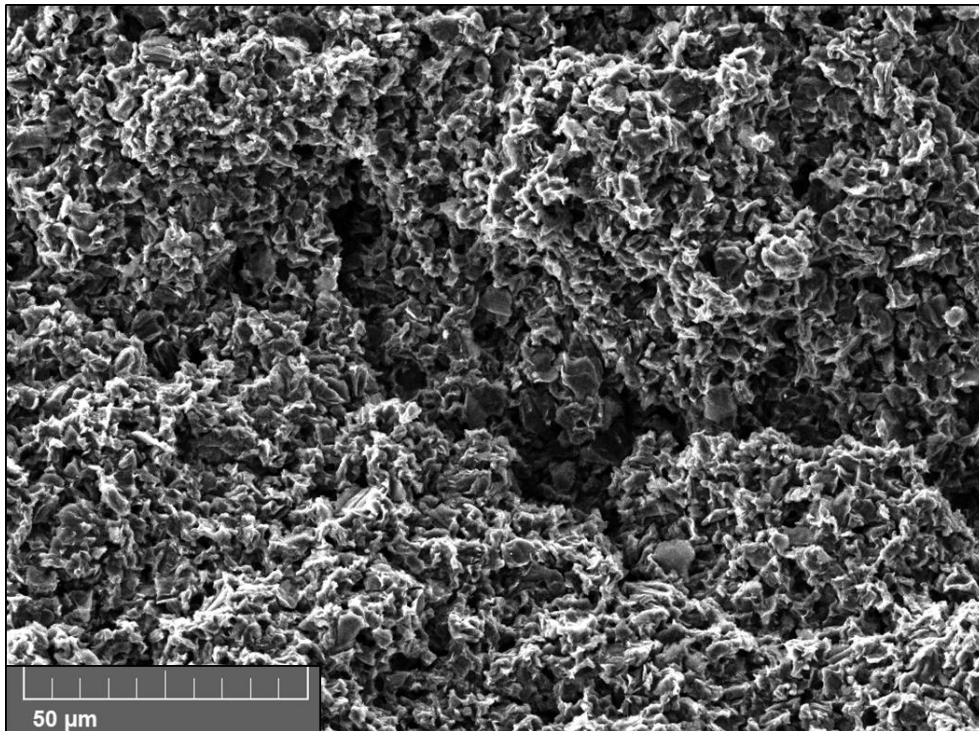


Figura 5.59: immagine SEM della sezione di frattura di uno dei provini utilizzati per i test a 200 °C (1600x).

Anche in questo caso, le immagini ottenute al SEM confermano la tipologia di frattura (fragile). Non è possibile individuare la zona di innesco della frattura, ma sono presenti numerose cricche (di cui una riportata in Figura 5.58).

In Figura 5.51 sono presenti le curve stress-strain per i 4 provini condotti a rottura ad una temperatura di 400 °C ed in Tabella 5.8 sono presenti i valori di tensione e deformazione a rottura degli stessi.

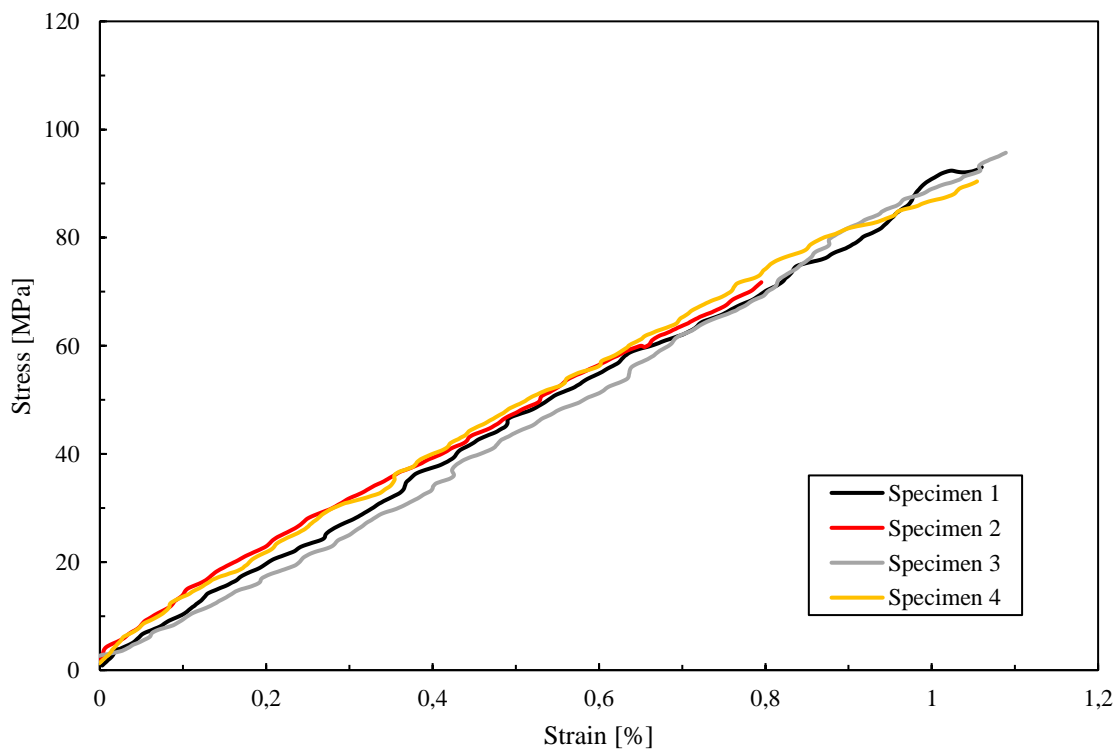


Figura 5.60: curve stress-strain di flessione ottenute a 400 °C (deformazioni calcolate con estensimetro laser).

Provino [N]	Stress alla frattura [MPa]	Strain alla frattura [%]
1	93,21	1,06
2	72,02	0,80
3	95,88	1,09
4	90,70	1,05
Average	87,95	1,00
StD	10,83	0,14

Tabella 5.8: tensione e deformazione a rottura per i 4 provini condotti a rottura a 400 °C.

Dall'analisi dei risultati è possibile affermare che le prove sono ripetibili sia in termini di tensione che di deformazione a rottura. La tensione media e la deformazione a rottura si attestano attorno a 90 MPa ed a 1% rispettivamente. Il comportamento del materiale è fragile, mostrando una curva pressoché lineare e priva di plasticizzazione.

In Figura 5.61, in Figura 5.62 ed in Figura 5.63 Figura 5.62 sono riportate delle immagini scattate al SEM relative alla superficie di frattura di uno dei provini utilizzati per i test di flessione condotti a 400 °C.

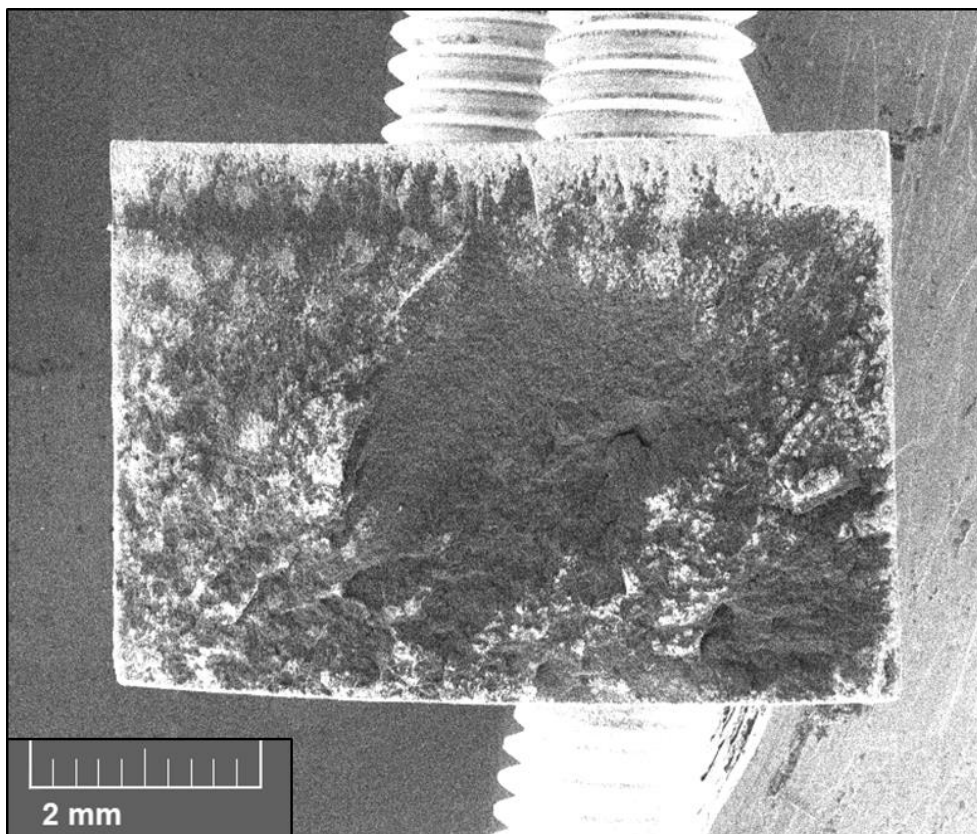


Figura 5.61: immagine SEM della sezione di frattura di uno dei provini utilizzati per i test a 400 °C (24x).

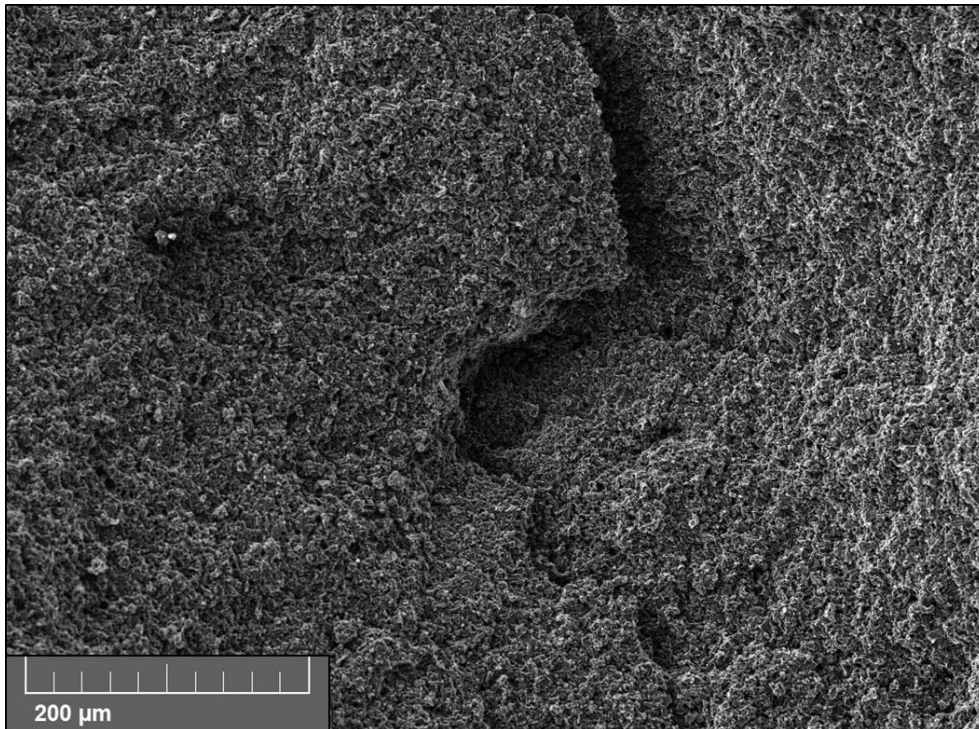


Figura 5.62: immagine SEM della sezione di frattura di uno dei provini utilizzati per i test a 400 °C (400x).

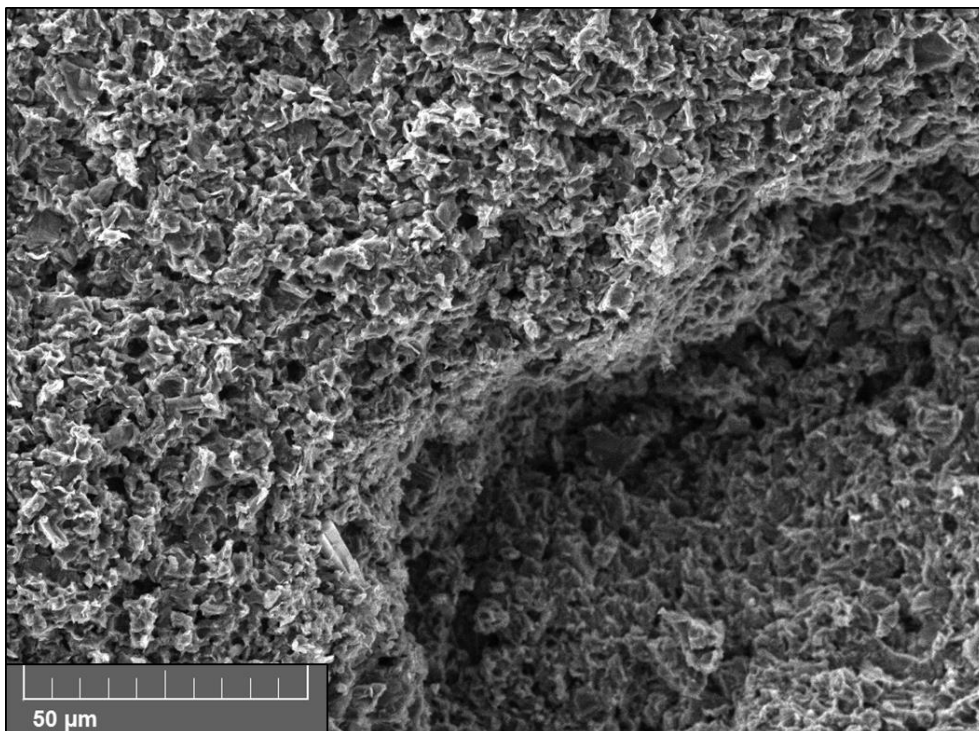


Figura 5.63: immagine SEM della sezione di frattura di uno dei provini utilizzati per i test a 400 °C (1600x).

Anche in quest'ultimo caso, la superficie di frattura non presenta segni di plasticità. Al centro di Figura 5.61 è presente un difetto che potrebbe aver originato la rottura del provino (anche se si trova in prossimità dell'asse neutro di flessione); in Figura 5.63 è presente un ingrandimento di tale difetto.

Da questa prima analisi dei risultati, la tensione e la deformazione a rottura non sembrano essere influenzate dalla temperatura di prova, anche se il numero ristretto di prove effettuate non consente di sostenere completamente questa ipotesi. La morfologia dei grani individuata mediante analisi effettuate al microscopio elettronico consente di confermare la fragilità della frattura; questa morfologia non sembra variare

all'aumentare della temperatura. Inoltre, non sempre è chiaramente individuabile il difetto dal quale si innesca la cricca.

In questo caso non è possibile effettuare un paragone con la resistenza dichiarata da datasheet, in quanto non è presente un dato per la grafite POCO EDM-3®. La casa produttrice fornisce, però, la resistenza flessionale, a temperatura ambiente, in funzione della densità apparente, riportata in Figura 5.64.

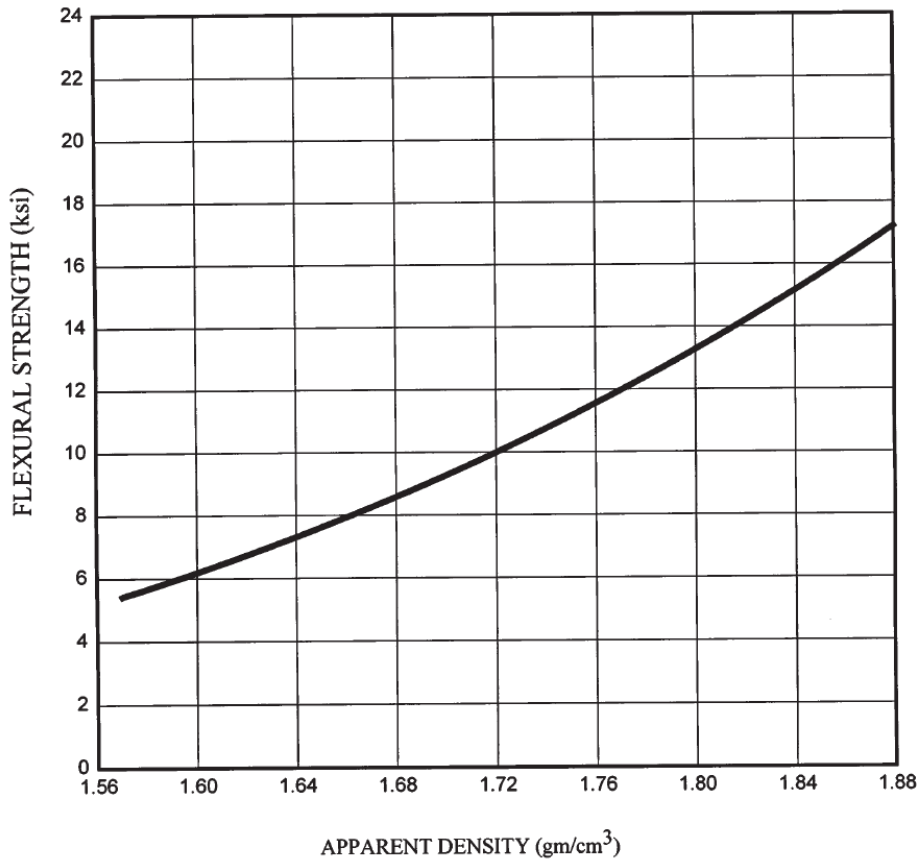


Figura 5.64: resistenza a flessione in funzione della densità apparente (si ricorda che 1 ksi è pari a 6,9 MPa).

Per una densità di 1.72 g/cm³, la resistenza dichiarata è circa pari a 70 MPa, mentre per un valore di densità di 1.81 g/cm³, la resistenza arriva a circa 93 MPa, valore molto vicino a quelli trovati. Inoltre, l'azienda produttrice dichiara un aumento della resistenza a flessione di circa 20% - 50% quando la temperatura aumenta fino a 2500 °C dove la resistenza cala drasticamente.

5.8.3 Stima del modulo di Young mediante prove di flessione a 4 punti

Il modulo di Young di un materiale è una grandezza che esprime il rapporto tra la tensione e la deformazione di un materiale, durante una prova di carico, nelle condizioni in cui il materiale abbia un comportamento elastico.

Nel caso di un materiale che plasticizza, come un acciaio, la curva stress-strain ottenuta mediante una prova di trazione evidenzia un tratto lineare elastico ben definito (Figura 5.65), pertanto il calcolo del modulo di Young è semplice e privo di ambiguità, in quanto rappresenta la pendenza del tratto rettilineo iniziale.

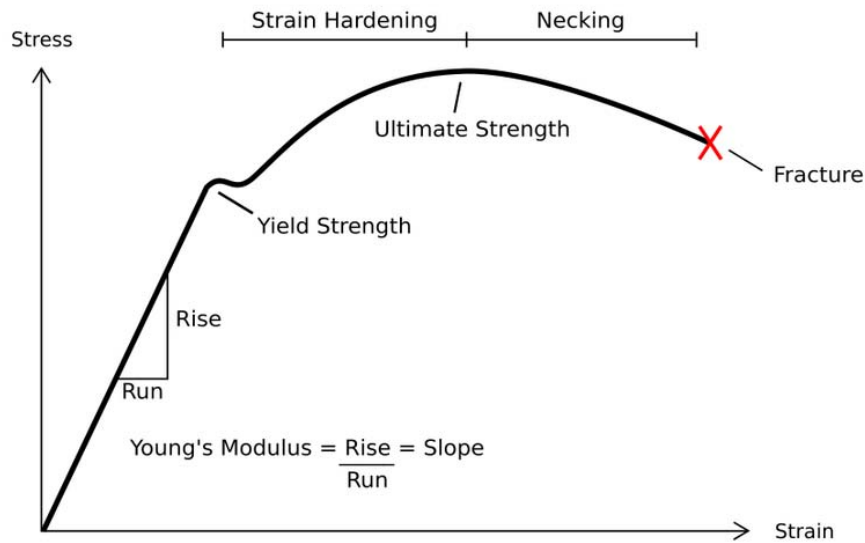


Figura 5.65: curva stress-strain tipica per un acciaio. Il tratto lineare elastico è evidente.

Per quanto riguarda un materiale fragile, la sua curva stress-strain non sempre è rettilinea, ma spesso presenta un comportamento elastico non lineare, quindi si possono presentare diverse modalità per il calcolo del modulo elastico. Nel presente lavoro di tesi, è stato deciso di calcolare il modulo di Young come la pendenza del tratto di curva da 0 MPa a 20 MPa, in quanto si ritiene possa essere la migliore approssimazione possibile del tratto lineare elastico che si vuole considerare. In Figura 5.66 è riportata la retta, avente pendenza pari al tratto di curva considerato, utilizzata per il calcolo del modulo di Young, confrontata con la curva stress-strain misurata.

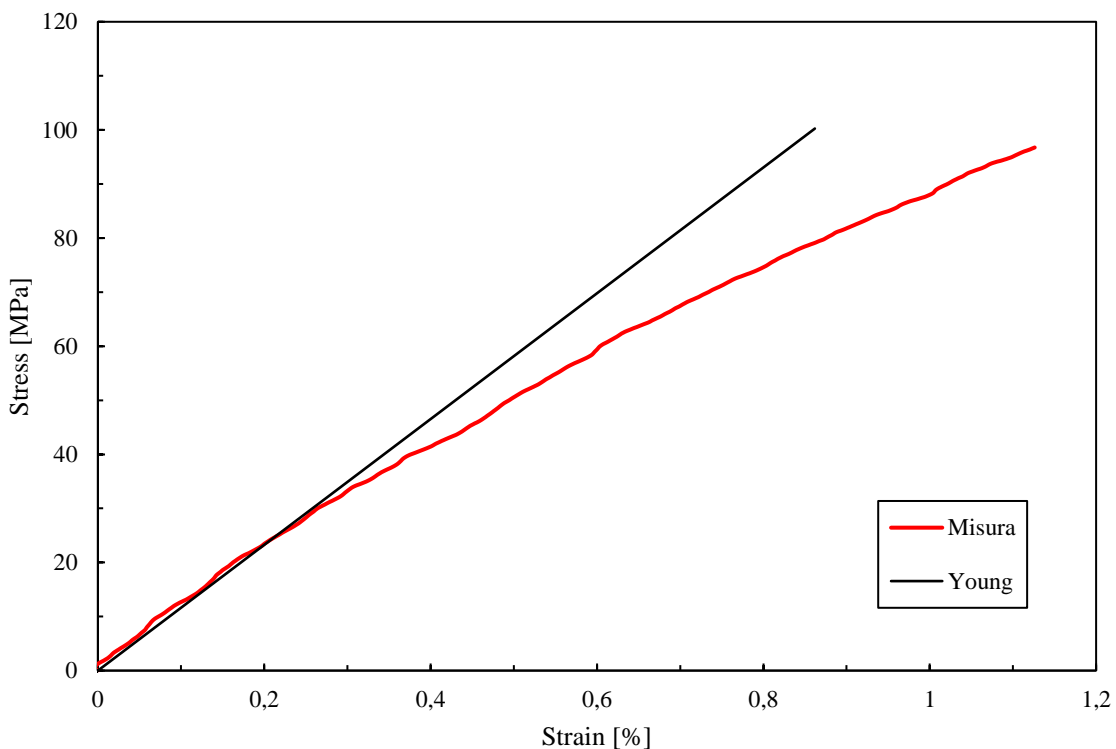


Figura 5.66: rappresentazione della retta avente pendenza pari al tratto di curva compresa tra 0 MPa e 20 MPa utilizzata per il calcolo del modulo di Young.

In Tabella 5.9 sono riportati i risultati ottenuti utilizzando questo tipo di approccio.

Temperatura	Modulo di Young @R [GPa]	Modulo di Young @200 °C [GPa]	Modulo di Young @400 °C [GPa]
Provino 1	11,63 GPa	13,35 GPa	9,39 GPa
Provino 2	12,49 GPa	13,45 GPa	11,43 GPa
Provino 3	9,87 GPa	11,98 GPa	7,51 GPa
Provino 4	9,68 GPa	6,66 GPa	10,31 GPa
Provino 5	10,26 GPa	-	-
Media	10,79 GPa	11,36 GPa	9,66 GPa
Deviazione Standard	0,60 GPa	3,20 GPa	1,66 GPa

Tabella 5.9: valori del modulo elastico trovati come pendenza del tratto di curva tra 0 MPa e 20 MPa.

Come si vede, i valori ottenuti sono ripetibili (tranne qualche outlier) e compatibili con quanto ottenuto mediante l'impact excitation technique. Il numero ristretto di prove effettuate non consente di definire con certezza l'effetto della temperatura; studi effettuati in passato [59] su altre tipologie di grafiti POCO (che possono essere considerate simili a queste), mostrano una costanza del modulo elastico fino a temperature pari a 500 °C – 600 °C (intorno ai 1000 °C si mostra un aumento, al massimo, del 5-10 %).

I moduli elastici ottenuti con questa metodologia vengono definiti *statici*. I moduli elastici ottenuti mediante altre tecniche che prevedono l'utilizzo di carichi dinamici (come l'impact excitation technique) vengono definiti *dinamici*. Studi relativi all'argomento [60] dichiarano una differenza tra i moduli elastici ottenuti con le due diverse tecniche dello 0.5%, inferiore all'incertezza con cui gli stessi vengono determinati. Pertanto, nonostante le diverse tecniche adottate per la loro misurazione, si possono definire coincidenti.

5.9 Test di resistenza a compressione

In generale, il comportamento di un materiale non è simmetrico a trazione ed a compressione, pertanto le prove di compressione sono molto importanti per determinare la sua resistenza quando sollecitato attraverso carichi di questo genere.

5.9.1 Apparato sperimentale e procedura utilizzati

L'apparato sperimentale utilizzato è il medesimo dei test a flessione (Figura 5.43). Ovviamente, cambia il sostegno del provino: in Figura 5.67 è rappresentato il dispositivo in carburo di silicio utilizzato durante le prove di compressione.

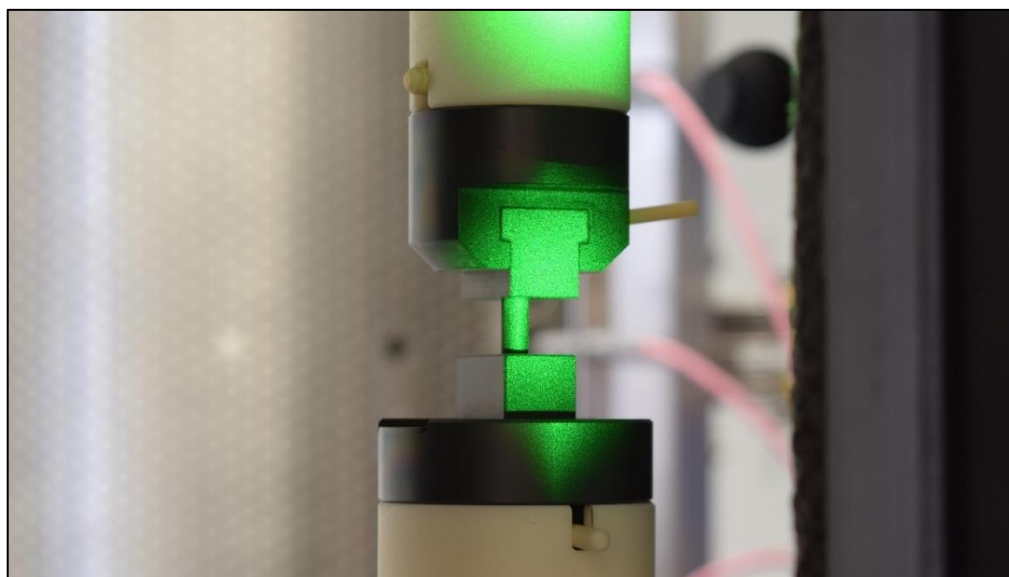


Figura 5.67: dispositivo per il sostegno del provino utilizzato durante le prove di compressione.

Il riscaldatore è il medesimo utilizzato durante le prove di flessione: come già spiegato, sono state effettuate prova a temperatura ambiente, a 200 °C e a 400 °C in quanto, oltre tali valori di temperatura, si induce la combustione della grafite.

Per la misura della forza è stata utilizzata la cella di carico presente all'interno della macchina, mentre per la misura degli spostamenti è stato utilizzato l'estensimetro laser (in Figura 5.67 è possibile vedere il laser puntato sul provino e sul supporto, mentre in Figura 5.68 è possibile apprezzare il posizionamento delle finestre che il software utilizza per il calcolo).

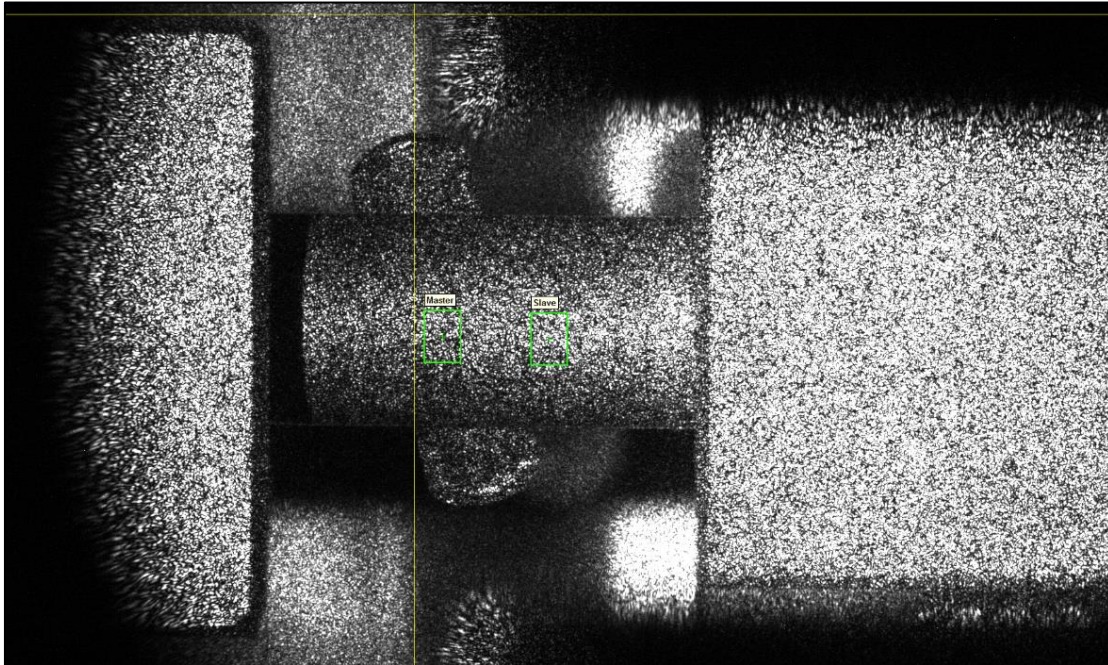


Figura 5.68: posizionamento delle finestre di controllo dell'estensimetro laser per la determinazione dello spostamento nelle prove a compressione. È possibile visualizzare il provino (in posizione orizzontale) ed i due punzoni in carburo di silicio.

Per il calcolo delle tensioni e delle deformazioni in gioco, il software utilizza le seguenti relazioni:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad \varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad 5.22 - 5.23$$

in cui F è la forza misurata dalla cella di carico, A_0 ed L_0 sono rispettivamente l'area e la lunghezza iniziale del provino e ΔL la variazione di lunghezza. Le prove sono state effettuate seguendo la normativa [61].

5.9.2 Risultati

Tutte le curve tensione-deformazione riportate in questo paragrafo sono state ottenute a partire dal dato grezzo mediante un'operazione di filtro del tipo *media mobile*, al fine di ridurre il rumore presente.

In Figura 5.69 sono presenti le curve stress-strain per i 3 provini condotti a rottura a temperatura ambiente ed in Tabella 5.6 sono presenti i valori di tensione e deformazione a rottura degli stessi

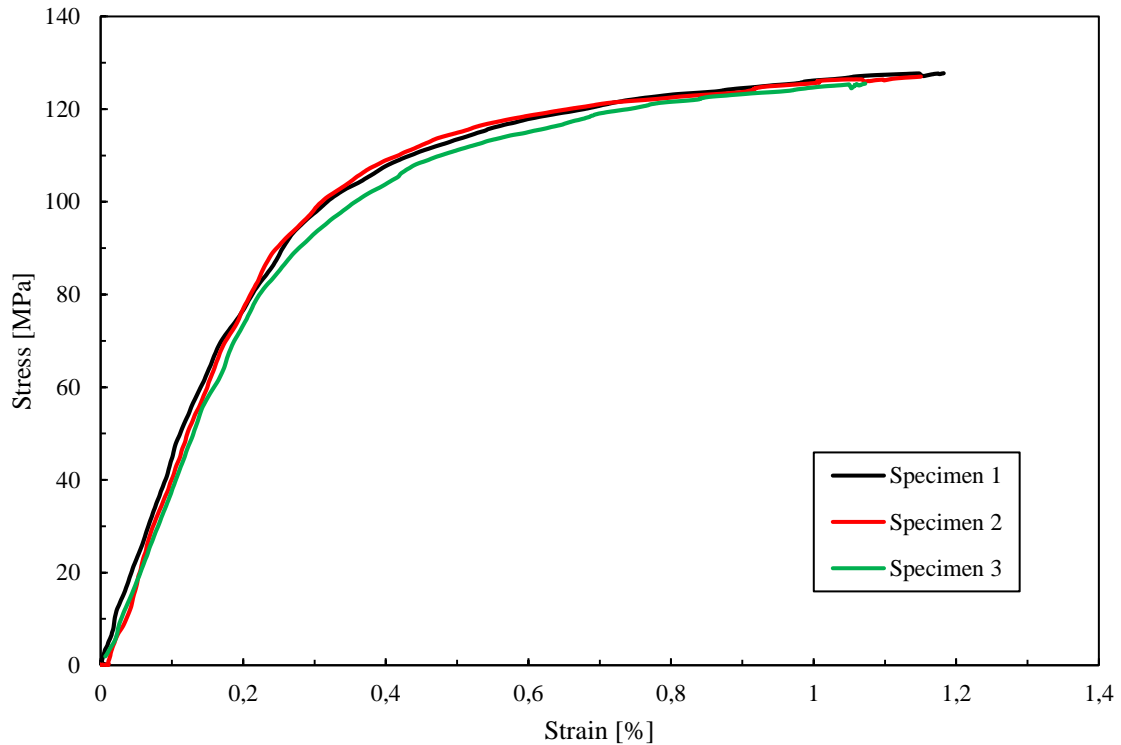


Figura 5.69: curve stress-strain di compressione ottenute a temperatura ambiente (deformazioni calcolate con estensimetro laser).

Provino [N]	Stress alla frattura [MPa]	Strain alla frattura [%]
1	127,75	1,18
2	127,02	1,15
3	125,50	1,07
Media	126,76	1,14
Deviazione Standard	1,15	0,06

Tabella 5.10: tensione e deformazione a rottura per i 3 provini condotti a rottura a temperatura ambiente.

Dall'analisi dei risultati è possibile affermare che le prove sono ripetibili sia in termini di tensione che di deformazione a rottura, attestandosi attorno a 125 MPa e ad 1,15% rispettivamente. La curva può essere separata in tre parti: la prima, fino a circa 80 MPa, caratterizzata da una elasticità lineare, la terza, da circa 110 MPa fino a rottura, caratterizzata da una tensione pressoché costante e da elevate deformazioni, e la seconda parte di transizione. Questo comportamento è giustificabile ipotizzando un cedimento del materiale che aumenta durante il test, provocando grandi deformazioni senza l'impiego di elevati livelli di tensione.

In Figura 5.70, in Figura 5.71 ed in Figura 5.72 sono riportate delle immagini scattate al SEM relative alla superficie di frattura di uno dei provini utilizzati per i test di compressione condotti a temperatura ambiente.

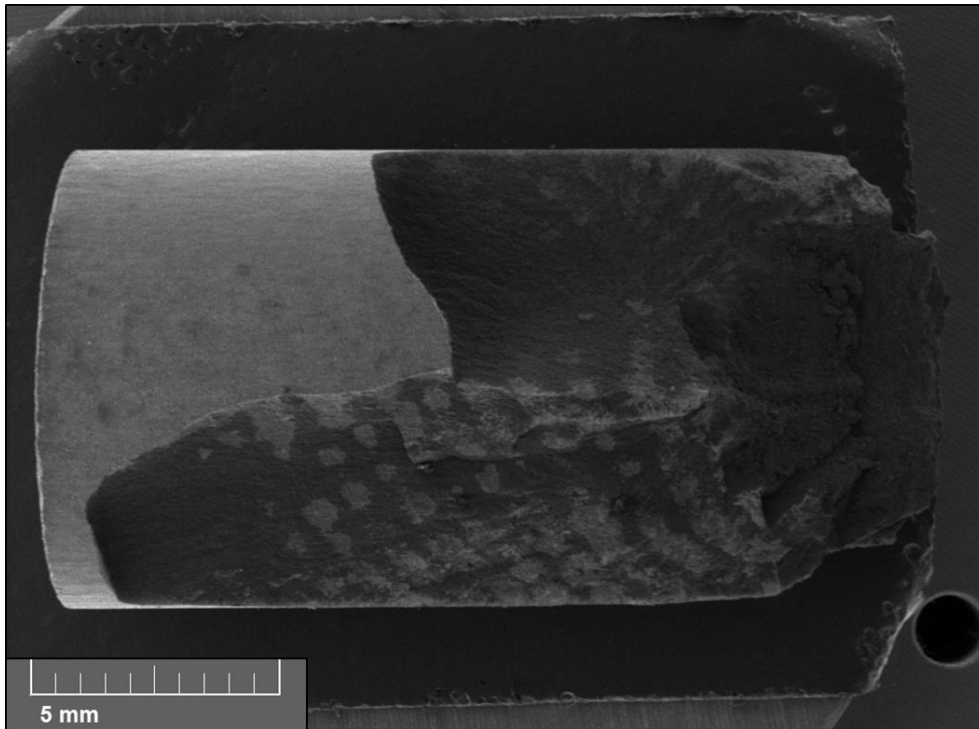


Figura 5.70: immagine SEM della sezione di frattura di uno dei provini utilizzati per i test a temperatura ambiente (14x).

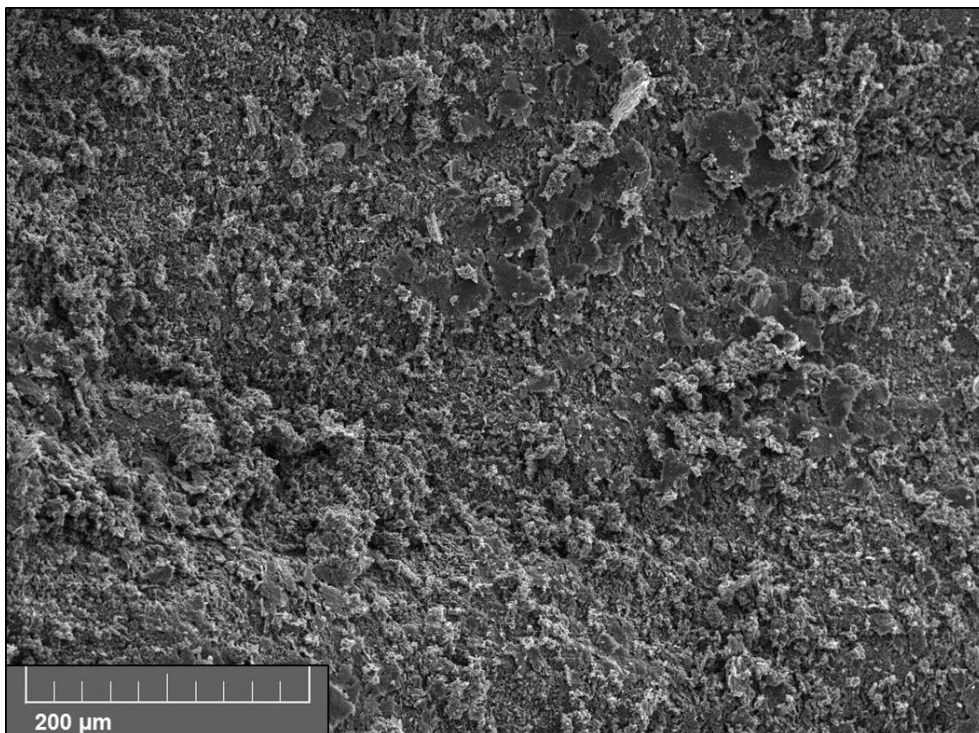


Figura 5.71: immagine SEM della sezione di frattura di uno dei provini utilizzati per i test a temperatura ambiente (400x).

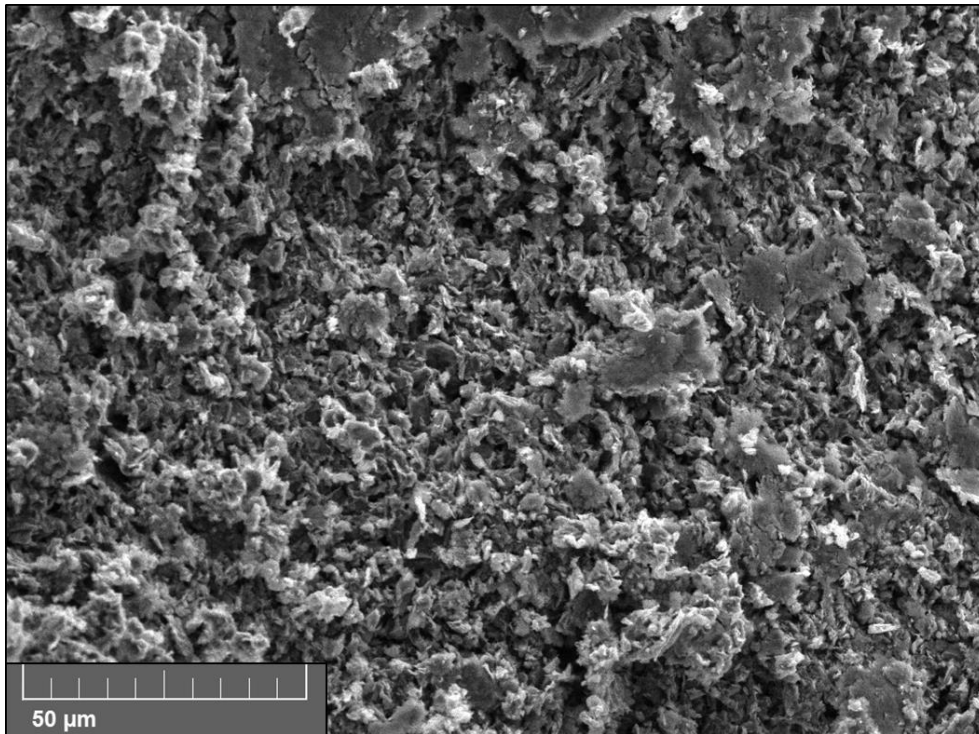


Figura 5.72: immagine SEM della sezione di frattura di uno dei provini utilizzati per i test a temperatura ambiente (1600x).

Le immagini ottenute al SEM permettono di evidenziare una grana cristallina molto simile a quella che si è descritta nel paragrafo relativo alle prove di flessione, pertanto si può ritenere la frattura di tipo fragile. In Figura 5.73 sono presenti le curve stress-strain per i 4 provini condotti a rottura ad una temperatura di 200 °C ed in Tabella 5.11 sono presenti i valori di tensione e deformazione a rottura degli stessi.

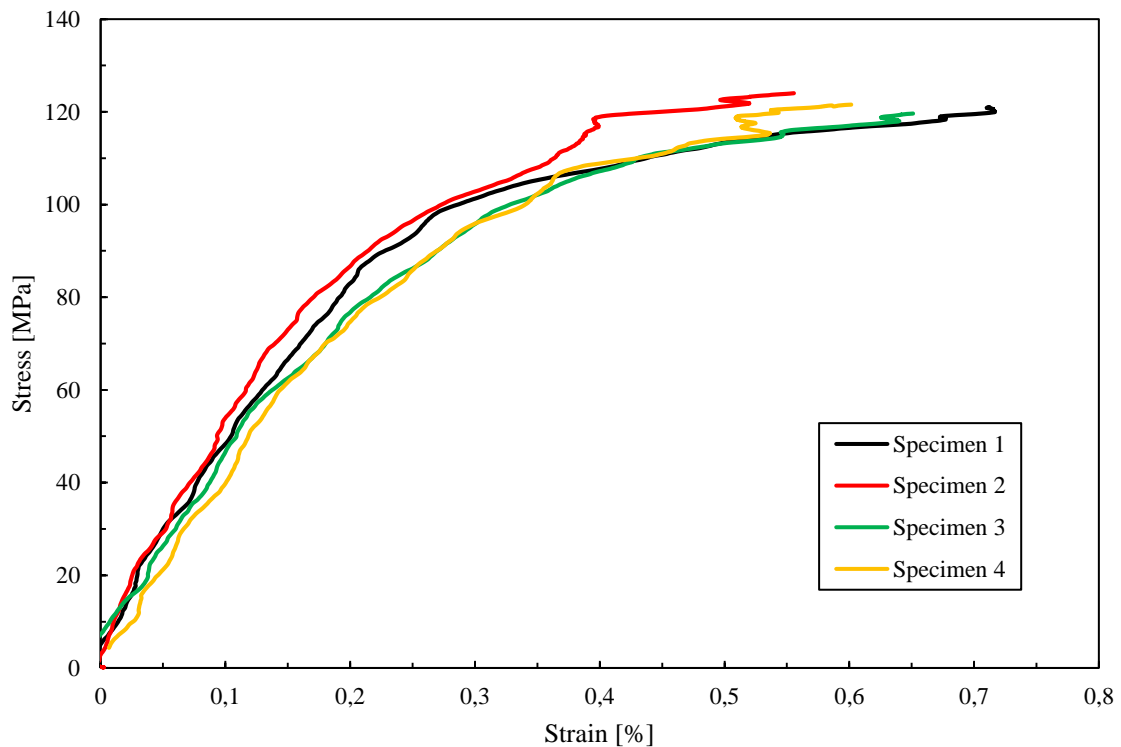


Figura 5.73: curve stress-strain di compressione ottenute a 200 °C (deformazioni calcolate con estensimetro laser).

Provino [N]	Stress alla frattura [MPa]	Strain alla frattura [%]
1	121,02	0,71
2	124,02	0,56
3	119,63	0,65
4	121,55	0,60
Media	121,56	0,64
Deviazione Standard	1,83	0,07

Tabella 5.11: tensione e deformazione a rottura per i 4 provini condotti a rottura a 200 °C.

Dall'analisi dei risultati è possibile affermare che le prove sono ripetibili sia in termini di tensione che di deformazione a rottura, attestandosi attorno a 120 MPa ed a 0,65% rispettivamente. È importante notare che la tensione di rottura non varia rispetto alle prove condotte a temperatura ambiente, mentre lo strain a frattura risulta quasi dimezzato.

In Figura 5.74, in Figura 5.75 ed in Figura 5.76 sono riportate delle immagini scattate al SEM relative alla superficie di frattura di uno dei provini utilizzati per i test di compressione condotti a 200 °C.

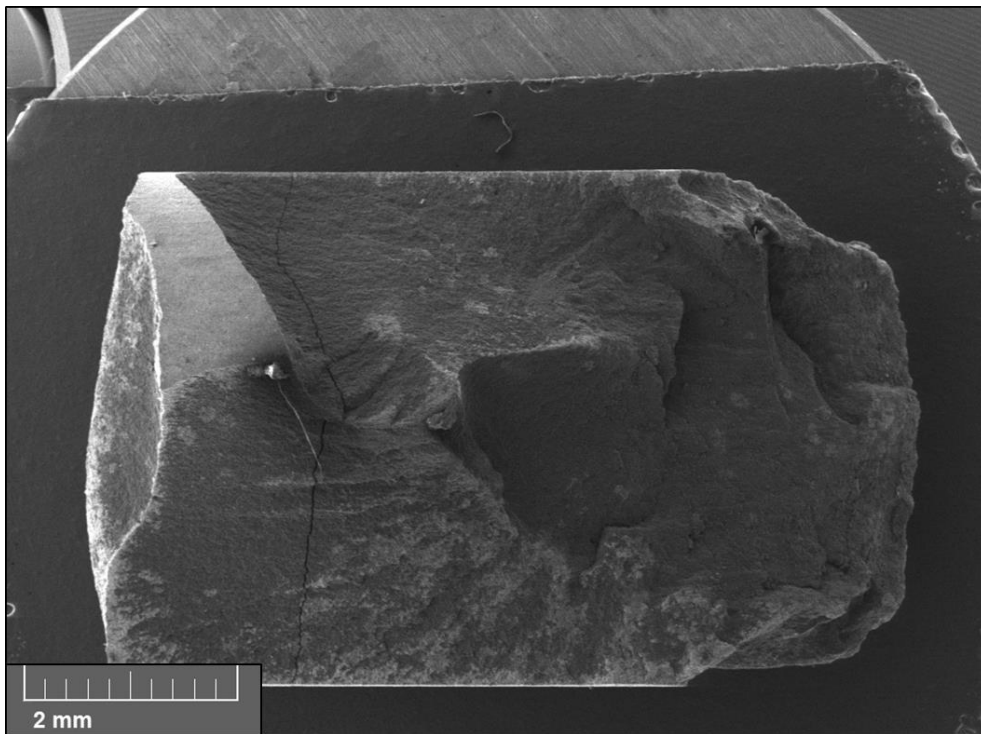


Figura 5.74: immagine SEM della sezione di frattura di uno dei provini utilizzati per i test a 200 °C (20x).

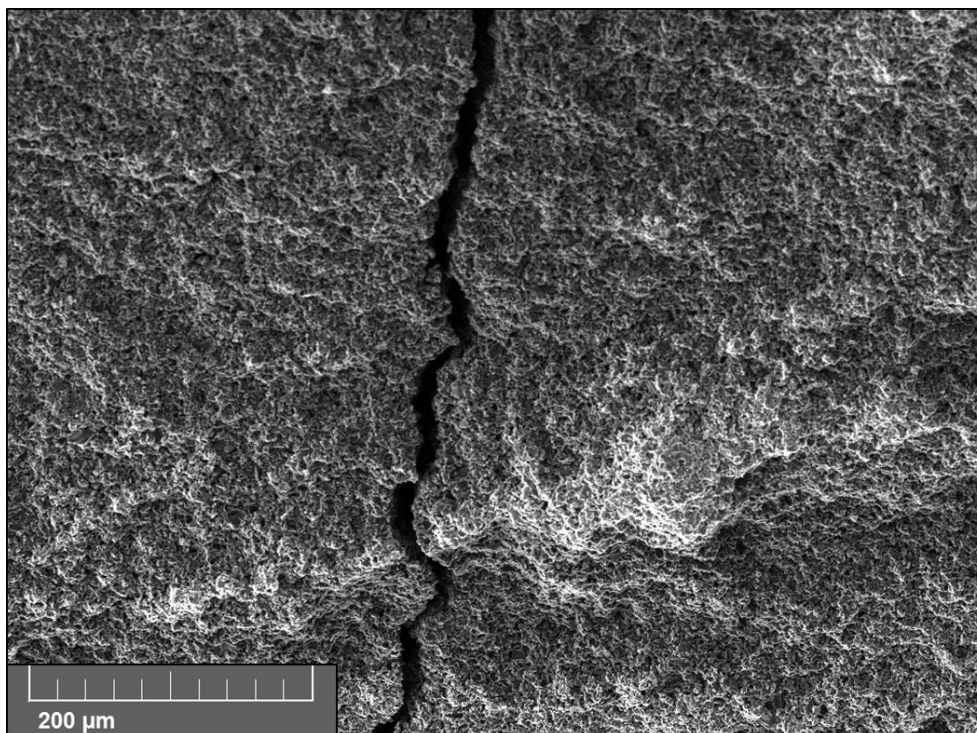


Figura 5.75: immagine SEM della sezione di frattura di uno dei provini utilizzati per i test a 200 °C (400x).

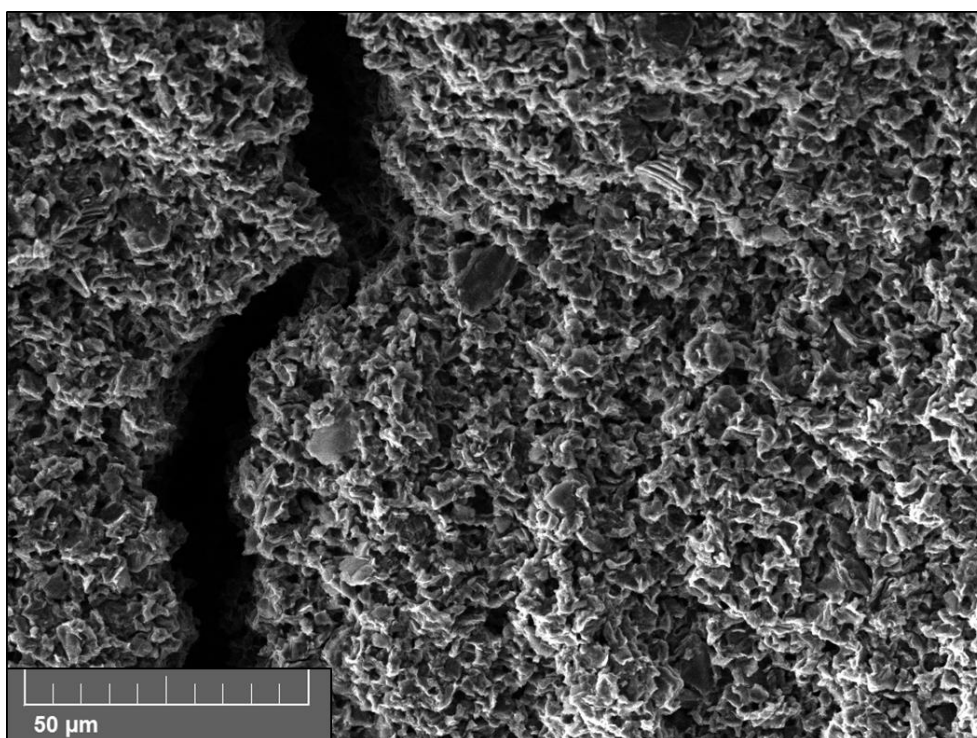


Figura 5.76: immagine SEM della sezione di frattura di uno dei provini utilizzati per i test a 200 °C (1600x).

Anche in questo caso, le immagini SEM consentono di evidenziare una grana cristallina non deformata, sinonimo di una frattura di tipo fragile; inoltre, è stato possibile mettere in evidenza una profonda cricca. In Figura 5.77 sono presenti le curve stress-strain per i 4 provini condotti a rottura ad una temperatura di 200 °C ed in Tabella 5.12 sono presenti i valori di tensione e deformazione a rottura degli stessi.

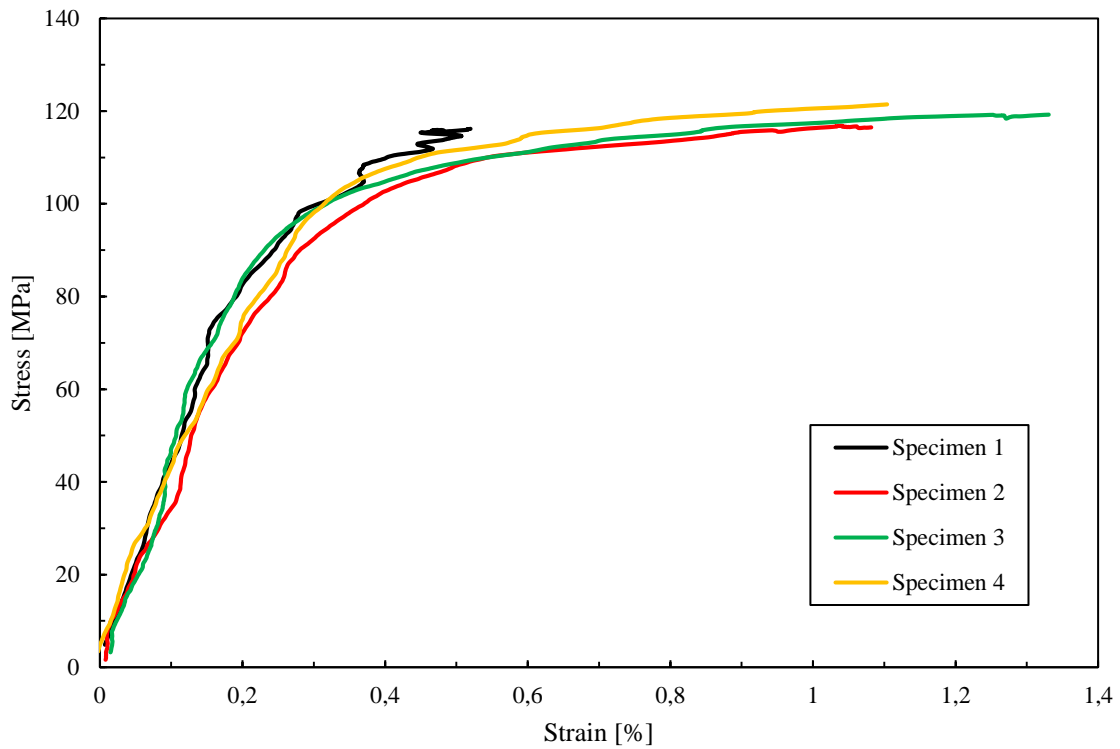


Figura 5.77: curve stress-strain di compressione ottenute a 400 °C (deformazioni calcolate con estensimetro laser).

Provino [N]	Stress alla frattura [MPa]	Strain alla frattura [%]
1	116,18	0,52
2	116,84	1,08
3	119,25	1,33
4	121,46	1,10
Media	117,42	0,98
Deviazione Standard	2,41	0,35

Tabella 5.12: tensione e deformazione a rottura per i 4 provini condotti a rottura a 400 °C.

Dall'analisi dei risultati è possibile affermare che le prove sono ripetibili in termini di tensione a rottura, attestandosi attorno a 120 MPa, ma non in termini di deformazione a rottura, misurando un valore medio pari all'1%.

In Figura 5.78, in Figura 5.79 ed in Figura 5.80 sono riportate delle immagini scattate al SEM relative alla superficie di frattura di uno dei provini utilizzati per i test di compressione condotti a 400 °C.

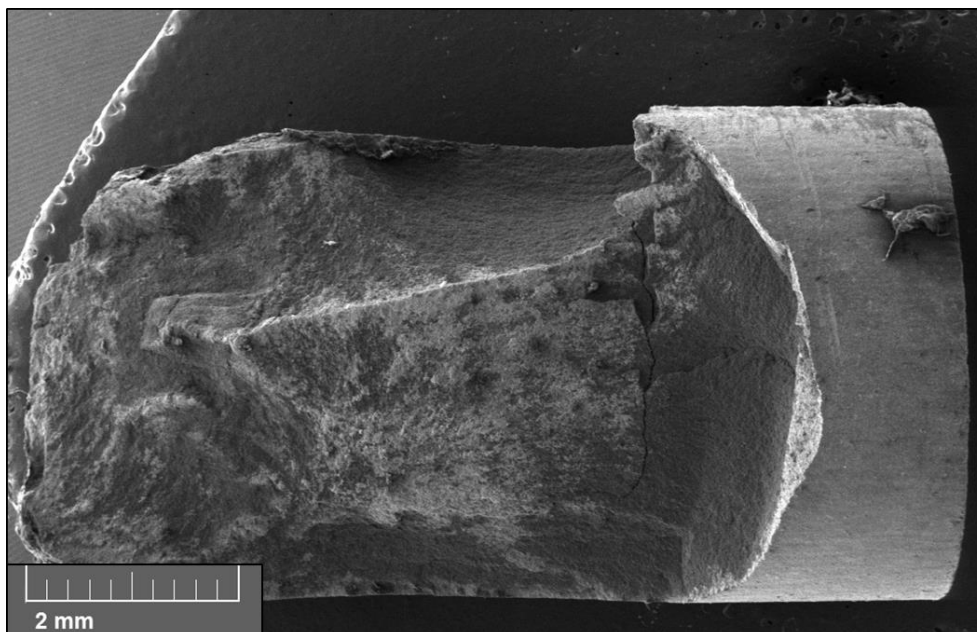


Figura 5.78: immagine SEM della sezione di frattura di uno dei provini utilizzati per i test a 400 °C (30x).

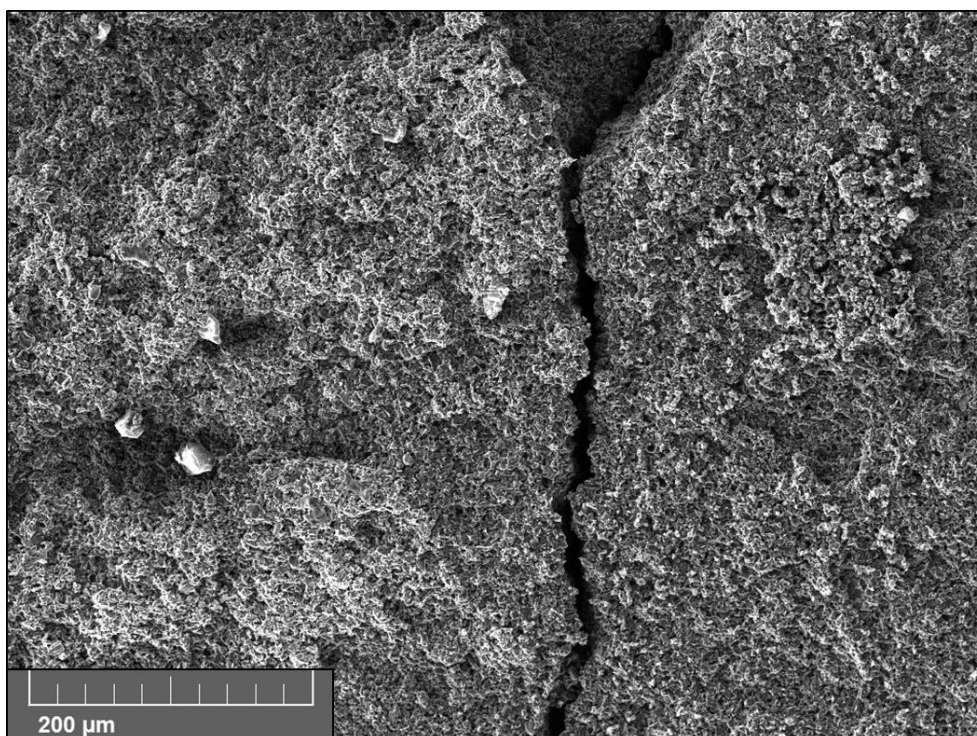


Figura 5.79: immagine SEM della sezione di frattura di uno dei provini utilizzati per i test a 400 °C (400x).

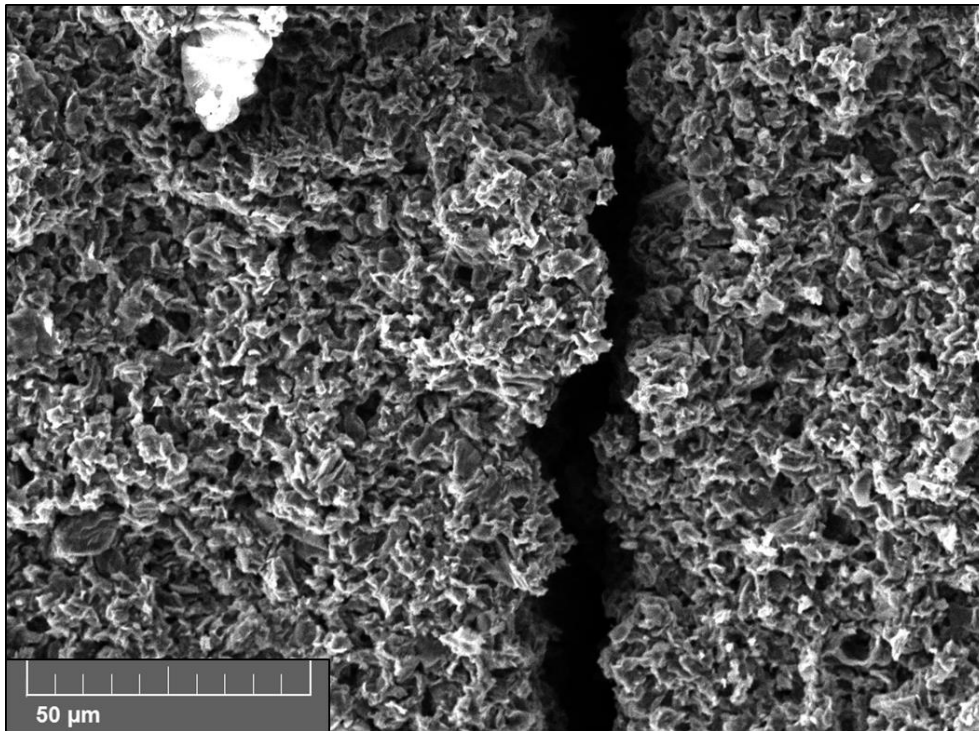


Figura 5.80: immagine SEM della sezione di frattura di uno dei provini utilizzati per i test a 400 °C (1600x).

Anche in questo caso, le immagini SEM consentono di evidenziare una grana cristallina non deformata, sinonimo di una frattura di tipo fragile; inoltre, è stato possibile mettere in evidenza una profonda cricca. Da questa prima analisi dei risultati, la tensione e la deformazione a rottura non sembrano essere influenzate dalla temperatura di prova, anche se il numero ristretto di prove effettuate non consente di sostenere completamente questa ipotesi. La morfologia della frattura è risultata la stessa ad ogni temperatura investigata, sia dal punto di vista macroscopico, sia dal punto di vista microscopico, evidenziando una insensibilità del materiale alla temperatura.

Anche in questo caso non è possibile effettuare un paragone con quanto dichiarato da datasheet, in quanto non è presente un dato per la grafite POCO EDM-3[®]. La casa produttrice fornisce, però, la resistenza a compressione, a temperatura ambiente, in funzione della densità apparente, riportata in Figura 5.81.

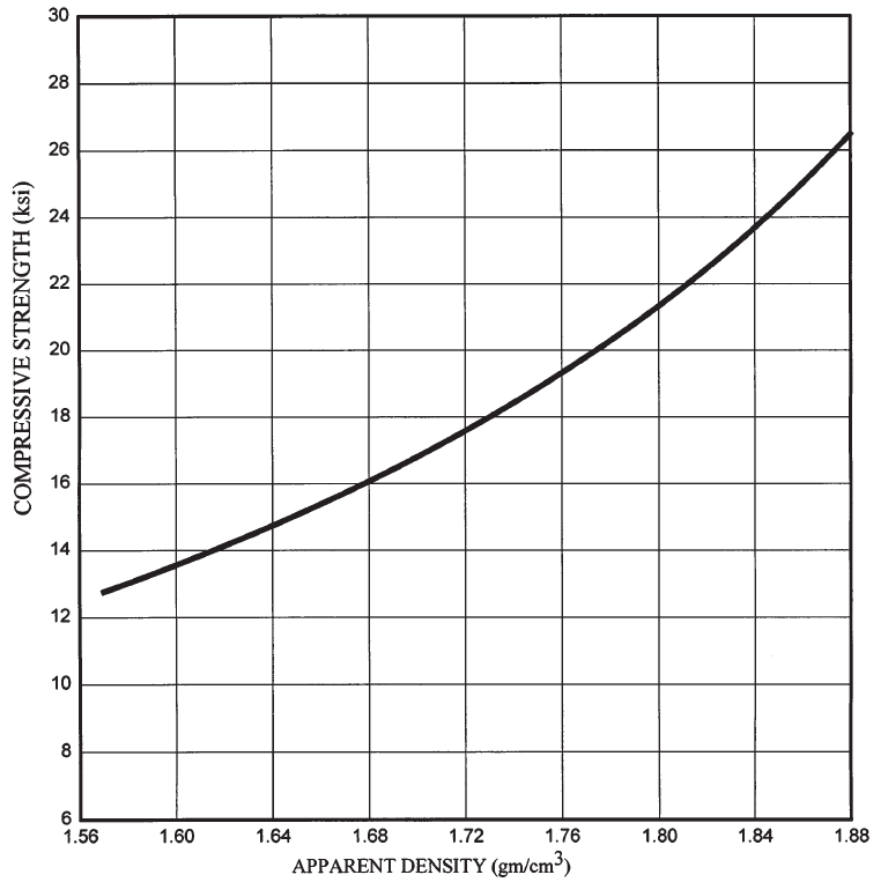


Figura 5.81: resistenza a compressione in funzione della densità apparente (si ricorda che 1 ksi è pari a 6,9 MPa).

Per una densità di 1.72 g/cm³, la resistenza dichiarata è circa pari a 120 MPa, mentre per un valore di densità di 1.81 g/cm³, la resistenza arriva a circa 150 MPa. In questo caso, il valore di resistenza misurato corrisponde a quello dichiarato per il valore di densità misurato. Inoltre, l'azienda produttrice dichiara un aumento della resistenza a flessione di circa 15% - 50% quando la temperatura aumenta fino a 2500 °C dove la resistenza cala drasticamente.

5.9.3 Stima del modulo di Young in compressione

La stima del modulo di Young a compressione è stata effettuata utilizzando il medesimo criterio adottato per la stima del modulo di Young utilizzando le prove a flessione: è la pendenza del tratto di curva compresa tra 0 MPa e 20 MPa.

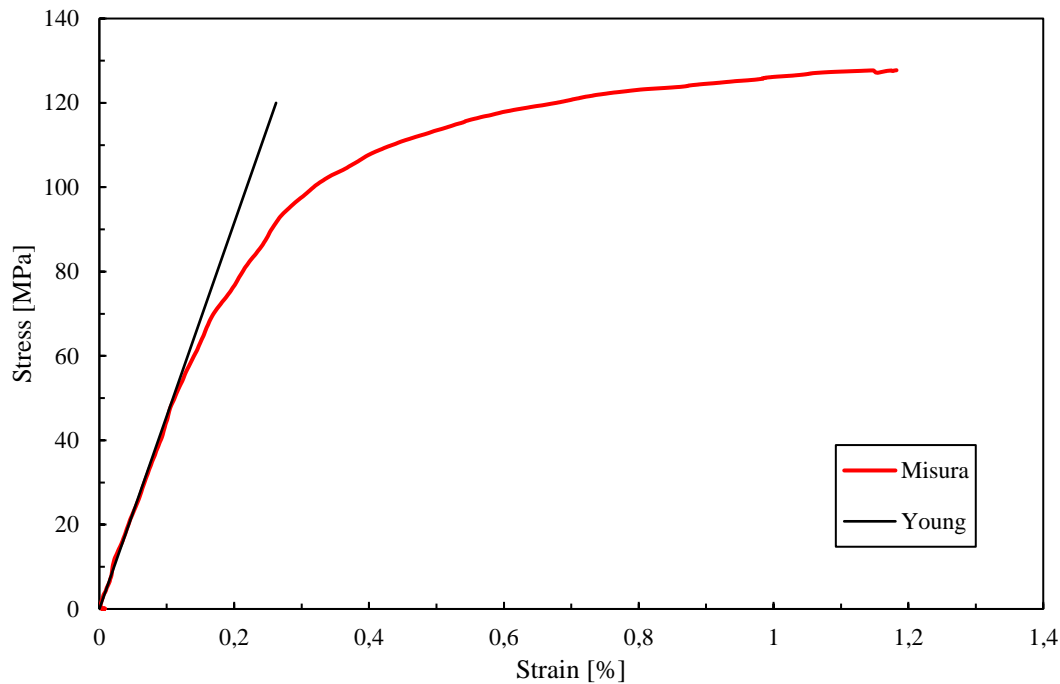


Figura 5.82: rappresentazione della retta avente pendenza pari al tratto di curva compresa tra 0 MPa e 20 MPa utilizzata per il calcolo del modulo di Young a compressione.

In Tabella 5.13 sono riportati i risultati ottenuti utilizzando questo tipo di approccio.

Temperatura	Modulo di Young @RT [GPa]	Modulo di Young @200 °C [GPa]	Modulo di Young @400 °C [GPa]
Provino 1	45,78	46,24	44,48
Provino 2	42,04	54,99	31,78
Provino 3	39,39	38,31	39,79
Provino 4	-	40,49	39,34
Media	42,41	46,51	38,68
Deviazione Standard	3,21	7,45	5,25

Tabella 5.13: valori del modulo elastico trovati come pendenza del tratto di curva tra 0 MPa e 20 MPa

Come si vede, i valori ottenuti sono ripetibili (tranne qualche outlier). Confrontato col modulo elastico ottenuto a trazione, il modulo a compressione risulta essere circa 4 volte.

5.10 Conclusioni

Per il corretto studio dei componenti, la conoscenza delle proprietà termo-fisiche e strutturali di un materiale risulta fondamentale: solo in questo modo si è in grado di determinare campi termici, elettrici e di stress. Come già anticipato, nell'ambito del progetto SPES, la grafite POCO EDM-3[®] è ampiamente utilizzata per la costruzione di numerosi componenti. Grazie agli strumenti di misura presenti presso l'EN-MME Mechanical Laboratory del CERN di Ginevra, è stato possibile ottenere le proprietà ricercate.

Per quanto riguarda le proprietà termiche, sono stati ottenuti risultati da temperatura ambiente fino a circa 2000 °C; questi sono sensibilmente differenti rispetto a quanto dichiarato dal produttore [62], in quanto la grafite risulta essere più porosa di quella dichiarata. Ne consegue che tutte le proprietà influenzate dalla densità sono cambiate.

Relativamente alle proprietà strutturali, sono state effettuate le misure da temperatura ambiente fino a 400 °C a causa dell'ossidazione del materiale in presenza di ossigeno. Dalle misure effettuate, sembra che la temperatura non influenzi il comportamento a flessione ed a compressione, la cui resistenza si attesta a circa 90 MPa e 120 MPa rispettivamente.

CAPITOLO 6

Considerazioni relative ad un nuovo criterio di resistenza per dischi sottoposti ad elevati gradienti termici

“Il gran obiettivo della scienza è di coprire il più gran numero di fatti empirici con deduzioni logiche tratte dal minor numero di ipotesi o assiomi.”

Albert Einstein

6.1 Introduzione

Nel corso del capitolo 2 sono state descritte le caratteristiche di un materiale per target di una facility di tipo ISOL: questa famiglia di materiali, per la maggior parte carburi o ossidi [63], sono raramente prodotti commerciali studiati e caratterizzati a livello termo-fisico e strutturale.

A tal proposito, si richiama la glove box presente ai Laboratori Nazionali di Legnaro (Figura 6.1), all'interno della quale viene prodotto il carburo di uranio UC_x che verrà poi pressato e sinterizzato sotto forma di dischi.



Figura 6.1: glove box presente ai Laboratori Nazionali di Legnaro utilizzata per la produzione di UC_x .

Insieme a tale materiale, molti altri sono di possibile interesse per la produzione dei dischi target del progetto SPES, in quanto da questi è possibile ottenere fasci esotici interessanti per la ricerca in fisica ed in medicina nucleare. Tra questi è possibile citare il carburo di titanio (TiC), il germaniuro di zirconio (GeZr) ed il carburo di zirconio (ZrC) per la produzione, rispettivamente, di scandio (^{43}Sc , ^{44}Sc , ^{47}Sc), di rame (^{64}Cu , ^{67}Cu) e di stronzio (^{85}Sr). I processi di produzione di dischi in questi materiali sono in fase di sviluppo avanzato [64], [42], [65], ma le loro proprietà termo-fisiche non sono ancora state misurate, pertanto, non si è a conoscenza del loro comportamento durante l'interazione col fascio protonico.

Le proprietà termiche necessarie alla determinazione del campo termico su un disco in regime stazionario sono la conducibilità termica e l'emissività: una volta note queste due proprietà, è possibile conoscere l'entità del gradiente termico a cui il disco è soggetto. Per determinare lo stato tensionale dovuto a tali gradienti, è necessario conoscere altre tre proprietà del materiale in oggetto: il coefficiente di dilatazione termica, che fa da ponte tra il campo fisico termico ed il campo fisico strutturale, e le proprietà elastiche (in particolare, il modulo di Young ed il coefficiente di Poisson), per convertire le dilatazioni in tensioni.

Qualora si sia a conoscenza di tutte queste proprietà, è possibile effettuare dei test a rottura al fine di determinare la massima tensione che il disco, di un determinato materiale, è in grado di sopportare, esattamente come effettuato nel corso del capitolo 4 per il carburo di silicio. Successivamente, mediante simulazioni di tipo numerico (Fluka ed Ansys®) si è in grado di determinare il gradiente termico e lo stato tensionale provocato

dalla deposizione di potenza del fascio protonico. Se si verifica che la tensione raggiunta durante l'esercizio è maggiore di quella limite determinata sperimentalmente, il disco giunge a rottura. Pertanto, la condizione da garantire per tutti i dischi target è la seguente:

$$\sigma_E < \sigma_L \quad 6.1$$

Qualora non si sia a conoscenza di tutte le proprietà, o solamente di una parte di esse, non è possibile determinare gli stati tensionali presenti. Inoltre, spesse volte, la determinazione di alcune proprietà porta inevitabilmente all'introduzione di errori dovuti all'incertezza con la quale queste vengono misurate. Pertanto, ciò che è lecito chiedersi è: è possibile utilizzare un criterio di resistenza alternativo a quello esplicitato in 6.1? Per rispondere a tale domanda, risulta interessante notare quanto già messo in evidenza nel corso del capitolo 4: gli andamenti della prima tensione principale e della differenza di temperatura a rottura (Figura 6.2) in funzione della temperatura media è il medesimo.

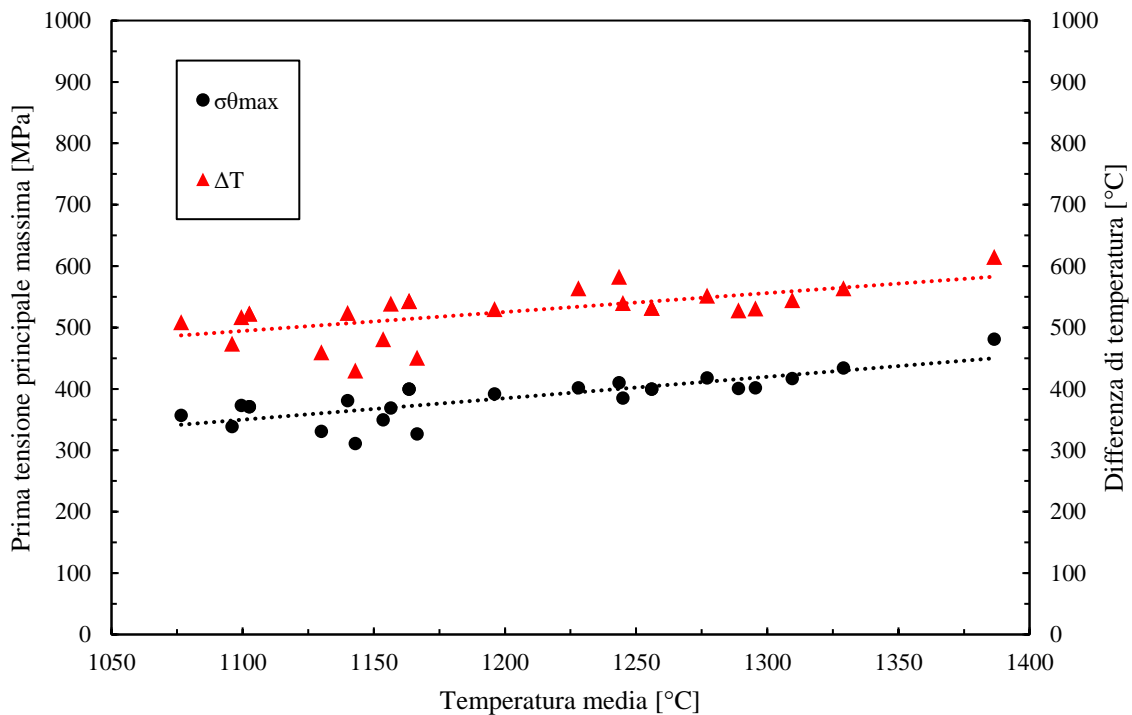


Figura 6.2: rappresentazione della prima tensione principale massima e della differenza di temperatura massima in funzione della temperatura media (i punti sono a rottura).

A questo punto, è possibile ipotizzare l'utilizzo della differenza di temperatura ΔT come criterio di rottura da seguire. Pertanto, la relazione 6.1 diventa:

$$\Delta T_E < \Delta T_L \quad 6.2$$

Per poter utilizzare questo criterio, non è necessario essere a conoscenza delle proprietà elastiche e del coefficiente di dilatazione termica del materiale. Inoltre, conducibilità ed emissività sono determinabili presso i Laboratori Nazionali di Legnaro mediante gli strumenti illustrati nel corso del capitolo 3. Infine, lavorando con il semplice campo termico, vi è un evidente risparmio dal punto di vista computazionale, mantenendo un livello inferiore di incertezza dei risultati.

Prima di affermare che questo criterio sia potenzialmente utilizzabile, è necessario effettuare alcune considerazioni.

6.2 Legame tensione-differenza di temperatura massimi

Il modello analitico ricavato nella prima parte del capitolo 4 consente di determinare lo stato di tensione per un disco soggetto ad un gradiente termico in direzione radiale, con temperatura massima in centro e temperatura minima in periferia. Il modello prevede le ipotesi di seguito elencate:

- spessore del disco molto piccolo;
- disco vincolato isostaticamente;
- distribuzione di temperatura assialsimmetrica;
- gradiente termico in direzione assiale trascurabile;
- componenti di tensione e deformazione invarianti lungo lo spessore;
- materiale omogeneo, isotropo e lineare elastico;
- modulo di Young E e coefficiente di espansione termica α costanti con la temperatura α (viene ragionevolmente considerato un valore medio sull'intero campo termico presente nel disco)

Queste ipotesi, valide per la realtà sperimentale, permettono di arrivare alla definizione delle componenti di tensione radiale e tangenziale:

$$\sigma_r = \alpha \cdot E \cdot \left(\frac{1}{R^2} \cdot \int_0^R (T \cdot r) dr - \frac{1}{r^2} \cdot \int_0^r (T \cdot r) dr \right) \quad 6.3a$$

$$\sigma_\theta = \alpha \cdot E \cdot \left(-T + \frac{1}{R^2} \cdot \int_0^R (T \cdot r) dr + \frac{1}{r^2} \cdot \int_0^r (T \cdot r) dr \right) \quad 6.3b$$

in cui R rappresenta il raggio del disco ed r la coordinata radiale.

Supponendo, ad esempio, una distribuzione lineare di temperatura del tipo (Figura 6.3)

$$T(r) = T_p + \Delta T - \tau \cdot r \quad 6.4$$

con T_p temperatura in corrispondenza della periferia del disco, ΔT differenza di temperatura tra centro e periferia e τ pari a $\Delta T/R$, è possibile calcolare i valori di σ_r e σ_θ risolvendo le espressioni 6.3a e 6.3b; ciò che si ottiene è riportato di seguito (Figura 6.3):

$$\sigma_r(r) = \frac{\alpha \cdot E}{3} \cdot \Delta T \cdot \frac{(r - R)}{R} \quad 6.5a$$

$$\sigma_\theta(r) = \frac{\alpha \cdot E}{3} \cdot \Delta T \cdot \frac{(2r - R)}{R} \quad 6.5b$$

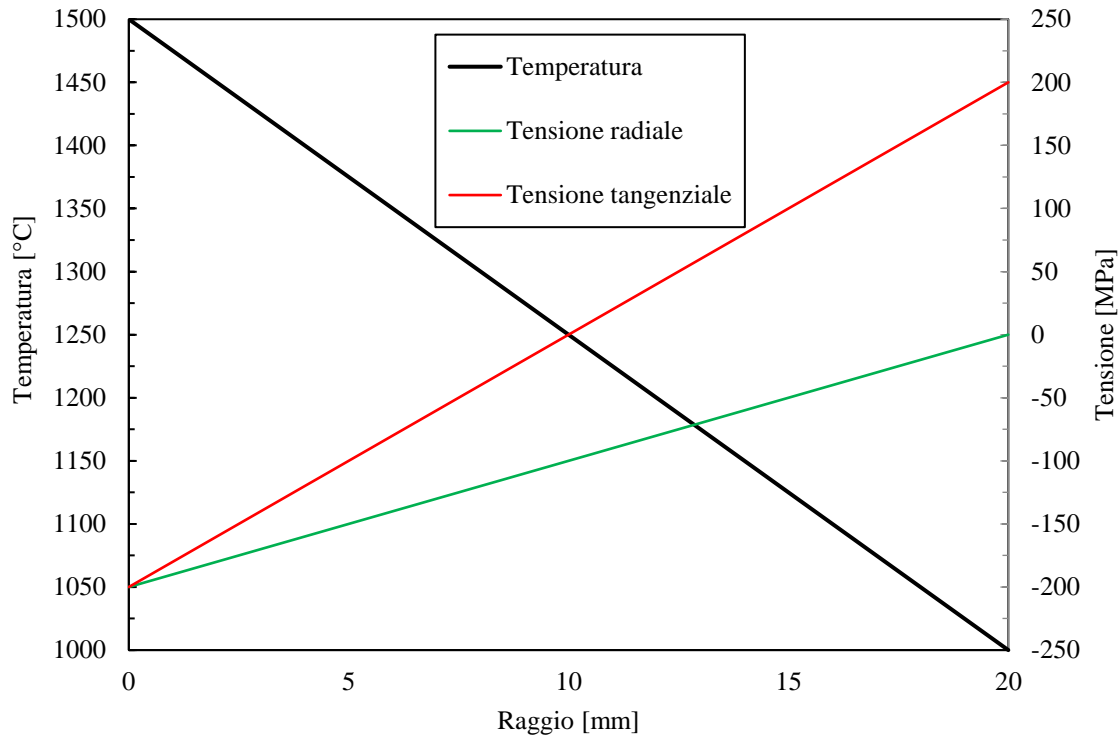


Figura 6.3: distribuzione radiale della temperatura e delle due tensioni presenti.

Supponendo ora una distribuzione quadratica della temperatura del tipo:

$$T(r) = -a \cdot r^2 + T_p + \Delta T \quad 6.6$$

con T_p e ΔT definiti come sopra ed a pari a $\Delta T/R^2$, è possibile ottenere i valori delle due tensioni risolvendo le equazioni 6.3a e 6.3b, ottenendo:

$$\sigma_r(r) = \frac{\alpha \cdot E}{4} \cdot \Delta T \cdot \frac{(r^2 - R^2)}{R^2} \quad 6.7a$$

$$\sigma_\theta = \frac{\alpha \cdot E}{4} \cdot \Delta T \cdot \frac{(3r^2 - R^2)}{R^2} \quad 6.7b$$

A questo punto è necessario supporre che la prima tensione principale massima sia responsabile della rottura del disco. Allora, dalle espressioni 6.5b e 6.7b, ponendo $r=R$, si possono ottenere i valori della tensione σ_θ massima nei due casi sopra esposti.

T(r) lineare $\sigma_{\theta max} = \frac{\alpha \cdot E}{3} \cdot \Delta T \quad 6.8a$

T(r) quadratica $\sigma_{\theta max} = \frac{\alpha \cdot E}{2} \cdot \Delta T \quad 6.8b$

In generale, si può visualizzare la prima tensione principale massima come il prodotto:

$$\sigma_{\theta max} = cost \cdot (\alpha \cdot E) \cdot \Delta T \quad 6.9$$

in cui $cost$ è una costante che dipende dalla forma del profilo di temperatura, il prodotto $\alpha \cdot E$ dipende dalla temperatura media alla quale si trova il disco e ΔT è la differenza di temperatura tra centro e periferia del disco. Andando a plottare la relazione 6.9 in un grafico in cui $\sigma_{\theta max}$ è funzione del ΔT , si ottiene un fascio di rette la cui pendenza aumenta all'aumentare del prodotto $cost \cdot (\alpha \cdot E)$, come in Figura 6.4.

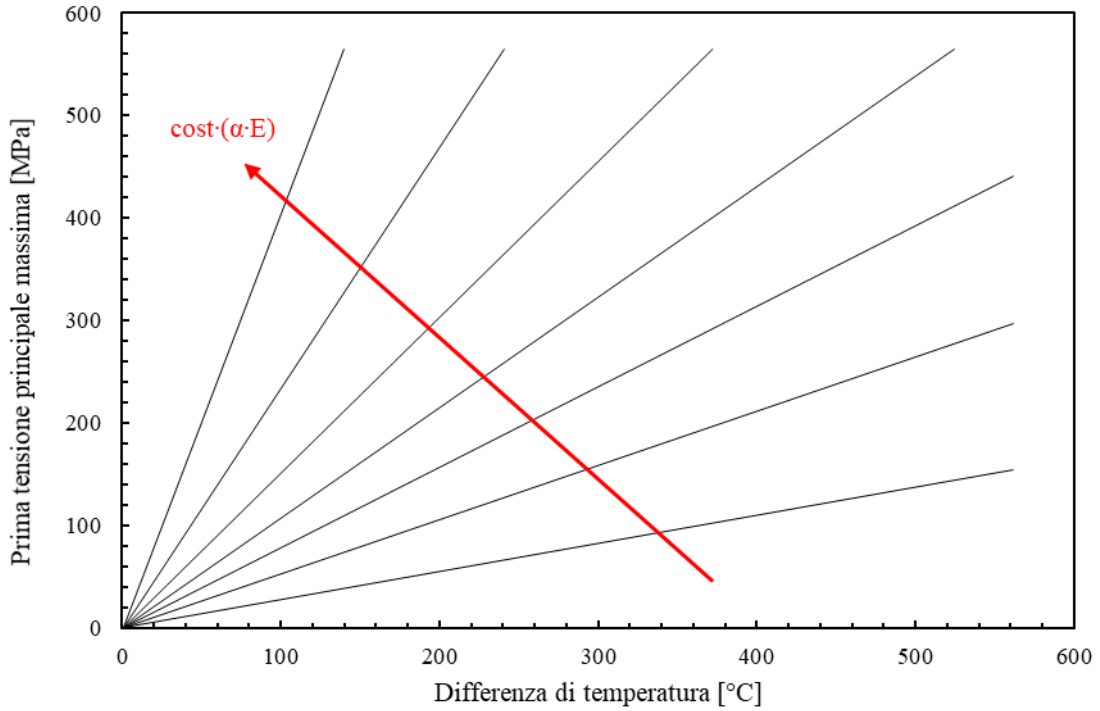


Figura 6.4: fascio di rette di $\sigma_{\theta_{max}}$ in funzione del ΔT , parametriche in $cost \cdot (\alpha \cdot E)$.

Fissato un gradiente termico, se questo si verifica a diverse temperature medie, significa che il prodotto $cost \cdot (\alpha \cdot E)$ varia. Il risultato è che si intercettano diverse rette e, ad ognuna di queste, corrisponde un valore diverso di tensione.

Plottando in un grafico di questo tipo i dati a rottura riportati in Figura 6.2, si ottiene il risultato riportato in Figura 6.5.

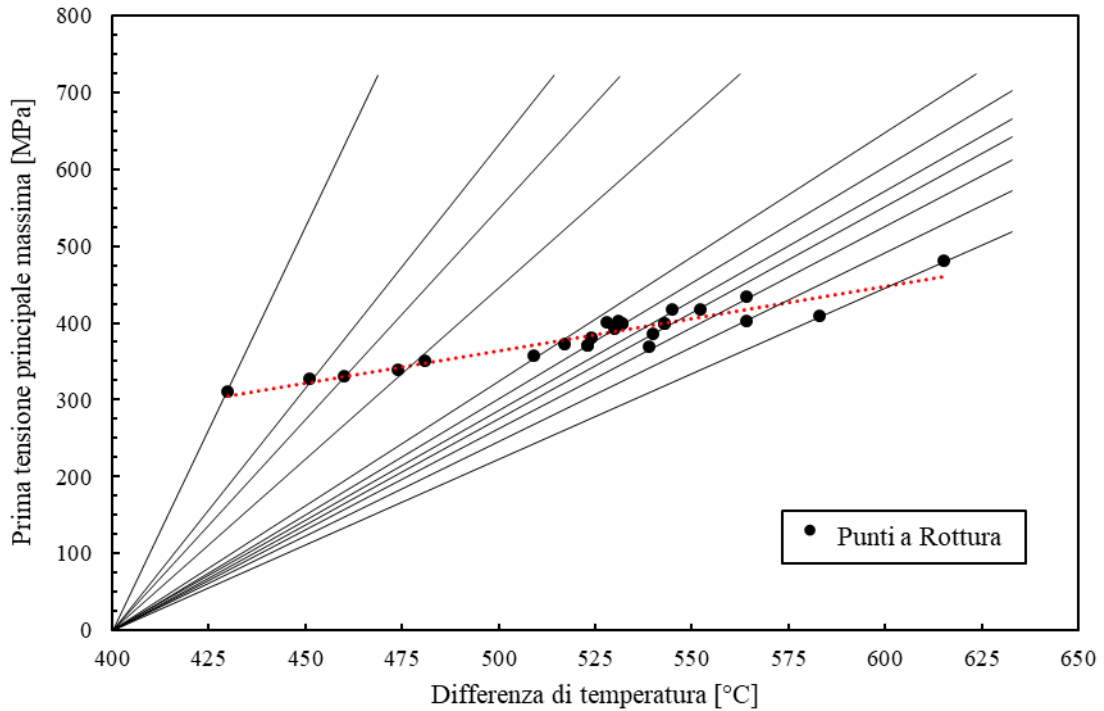


Figura 6.5: risultati sperimentali a rottura plottati sul piano $\sigma_{\theta_{max}}$ vs ΔT .

Ciò che si nota è che esiste una relazione di tipo lineare che lega prima tensione principale massima e differenza di temperatura a rottura. Un tale risultato è in grado di giustificare l'adozione del ΔT come criterio di rottura nelle ipotesi precedentemente enunciate.

Per analizzare l'influenza della distribuzione di temperatura sulla relazione $\sigma_{\theta_{max}}$ vs ΔT , cioè il parametro *cost*, sono state effettuate tre rotture di dischi aventi diametro 30 mm (Figura 6.6). Com'è evidente, i punti da 30 mm (due sono sovrapposti), si discostano dalla linearità delle rotture trovate a 40 mm. In realtà, effettuando una normalizzazione della differenza di temperatura rispetto al raggio, le rotture condotte a diametri diversi giacciono sulla stessa retta.

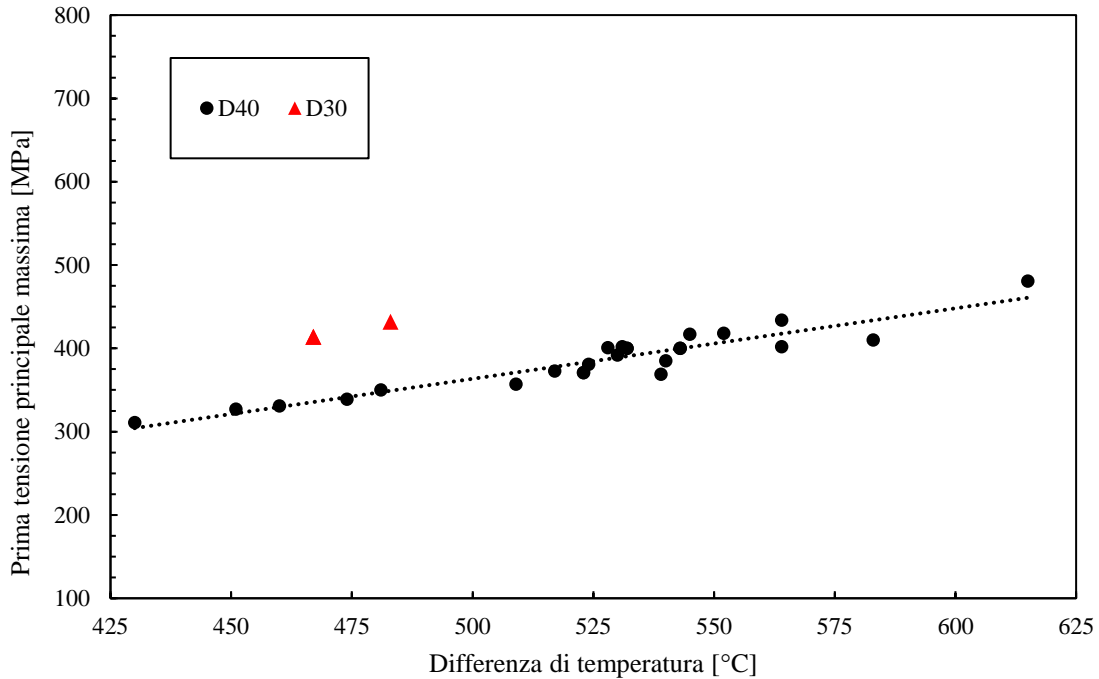


Figura 6.6: punti a rottura per i dischi da 40 e da 30 mm.

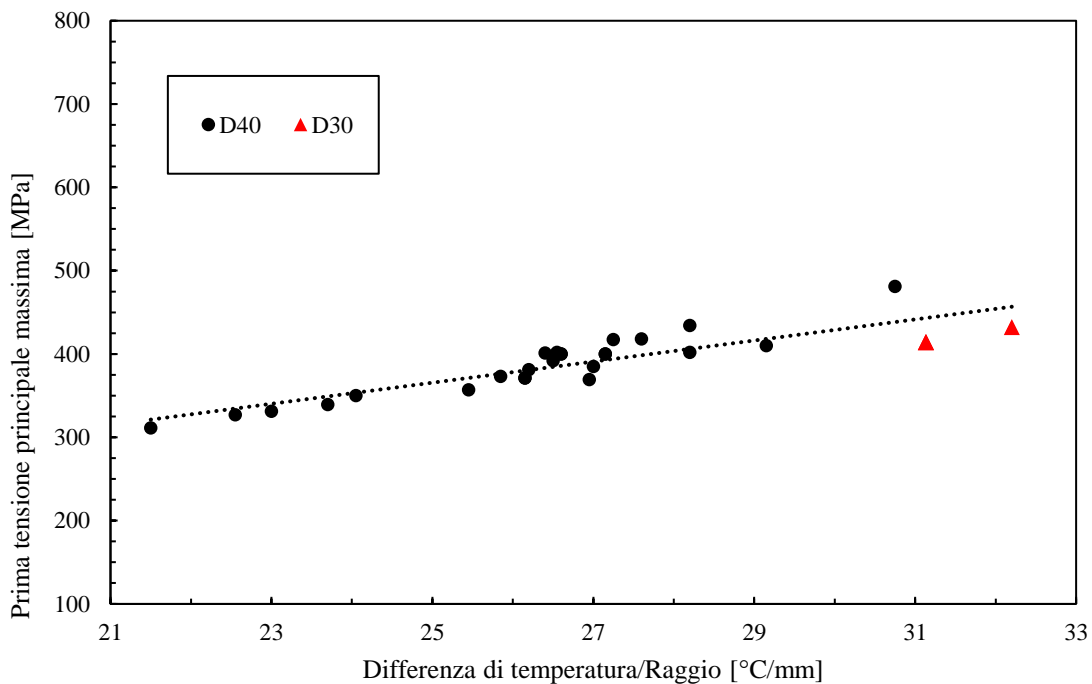


Figura 6.7: normalizzazione dell'asse delle ascisse rispetto al raggio del disco.

È ragionevole supporre quindi che all'interno della costante *cost*, dipendente dalla forma della distribuzione di temperatura radiale, vi sia una dipendenza dal raggio. Questa rimane un'ipotesi, in quanto nel contesto del presente lavoro di tesi non è stato svolto alcun passaggio analitico in grado esplicitare tale dipendenza; inoltre, i dati a rottura per il diametro 30 mm risultano insufficienti in numero per poter permettere di dichiarare un'evidenza sperimentale. Questo primo risultato, però, fornisce uno spunto per possibili sviluppi futuri.

6.3 Linee guida per l'applicazione del criterio

Utilizzare la differenza di temperatura come parametro di valutazione, invece delle tensioni strutturali, per garantire l'integrità dei dischi durante l'esercizio, permette di bypassare la conoscenza delle proprietà elastiche e del coefficiente di dilatazione termica del materiale. In questo modo, le uniche due proprietà necessarie alla conoscenza del ΔT sono la conducibilità termica e l'emissività. Queste due proprietà sono misurabili, rispettivamente, mediante il metodo della funzione ottima e mediante l'utilizzo di un pirometro bicolore, esattamente come descritto nel corso del capitolo 3.

Questo criterio, quindi, permette di eseguire dei test *passa-non passa* su qualunque materiale d'interesse progettato e prodotto all'interno dei Laboratori Nazionali di Legnaro o acquistato da fornitori esterni.

La linea guida da seguire ogni qualvolta si manifesta la necessità di testare un nuovo materiale consiste in diversi passaggi:

- all'interno del Laboratorio di Chimica dei LNL avviene la produzione dei dischi target del materiale d'interesse, con l'obiettivo di produrre dischi di spessore diverso, al fine di indagare il comportamento del materiale a diverse temperature medie. In alternativa, i dischi possono essere acquistati da fornitori esterni;
- mediante l'utilizzo del dispositivo presente all'interno del Laboratorio Alte Temperature dei LNL, avviene la caratterizzazione termica del materiale. Tale step consente di ottenere una stima della conducibilità termica e dell'emissività del materiale attraverso i metodi descritti nel corso del capitolo 3;
- ottenendo una stima di tali proprietà, è possibile ricavare un modello elettro-termico dell'apparato sperimentale. Tale modello, validato mediante l'utilizzo di un materiale aventi proprietà note, permette di ricavare il campo termico del disco;
- utilizzando nuovamente il medesimo dispositivo sperimentale, si conduce a rottura il disco mediante le modalità descritte nel corso del capitolo 4. Grazie all'utilizzo del modello numerico validato sperimentalmente, è possibile ottenere la differenza di temperatura ΔT_L (*limite*) che ha portato a rottura il disco ad una determinata temperatura media;
- per mezzo del codice Monte Carlo FLUKA, si è in grado di ottenere la distribuzione della deposizione di potenza data dall'interazione tra fascio protonico e nuclei del materiale target. Tale deposizione di potenza può essere simulata come una generazione interna di calore in Ansys®: tale carico termico provoca un ΔT_E (*esercizio*) ad una certa temperatura media;
- si esegue il confronto tra il ΔT_L ed il ΔT_E (a parità di temperatura media) e si verifica che la condizione $\Delta T_L > \Delta T_E$ sia rispettata. Se così avviene, si evita la rottura dei dischi;
- se la condizione $\Delta T_L > \Delta T_E$ non è rispettata, si agisce sui parametri del fascio primario, i quali, come descritto nel corso del capitolo 2, consistono in energia, corrente e il profilo gaussiano del fascio (identificato dallo scarto quadratico medio sigma). Alternativamente, è possibile agire su frequenza e raggio di wobbling;
- infine, se la regolazione dei parametri del fascio proveniente dal ciclotrone non è sufficiente a garantire l'integrità dei dischi target secondo il criterio adottato, è necessario prendere in considerazione la riprogettazione del materiale target, sia in termini di costituenti primari, sia in termini di processo produttivo.

Al fine di illustrare la variabilità della distribuzione di temperatura con le grandezze descritte, si riporta il caso dei 13 dischi target in carburo di silicio degli iThemba LABS in Sudafrica. Nei due casi di Figura 6.8 e Figura 6.9 sono stati variati il raggio di wobbling e la sigma di fascio.

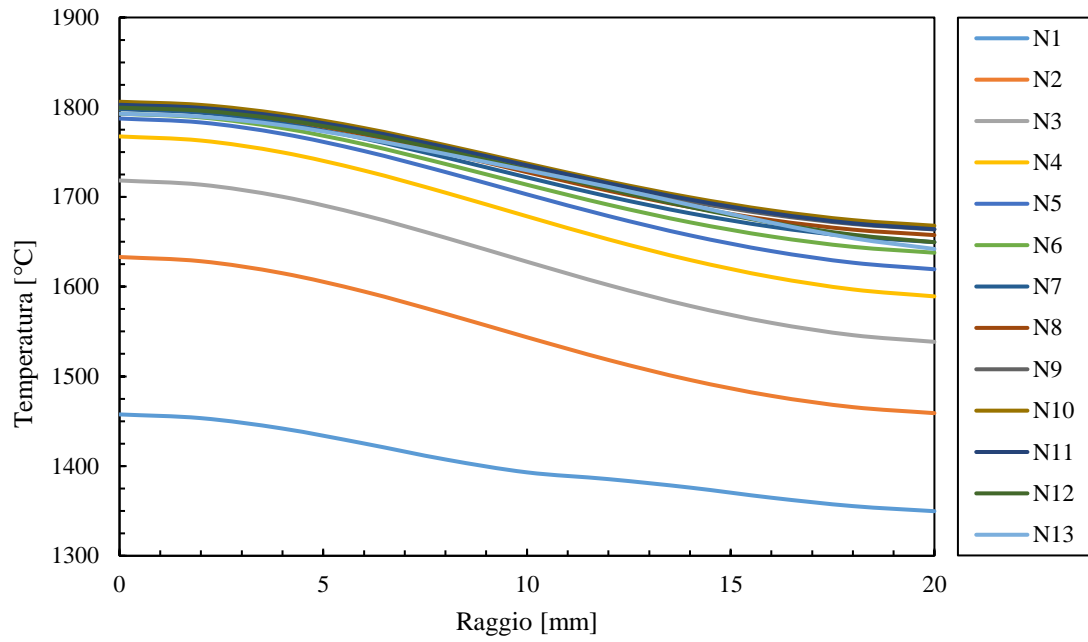


Figura 6.8: distribuzione di temperatura radiale sui 13 dischi target in SiC degli iThemba LABS. In questo caso il raggio di wobbling è pari a 5 mm e la sigma di fascio è pari a 6,11 mm.

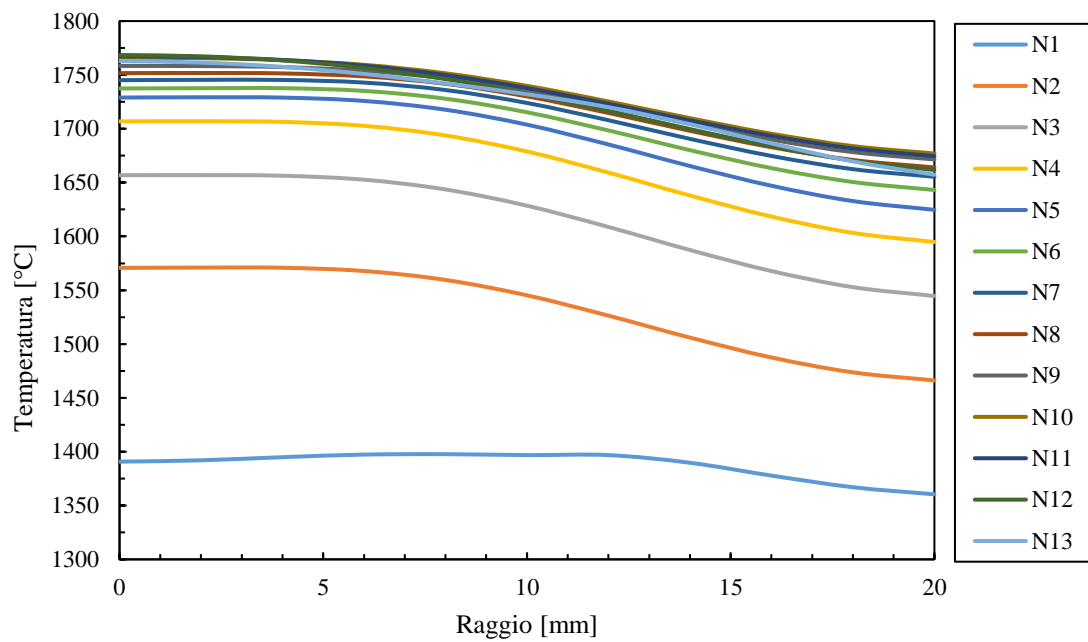


Figura 6.9: distribuzione di temperatura radiale sui 13 dischi target in SiC degli iThemba LABS. In questo caso il raggio di wobbling è pari a 9 mm e la sigma di fascio è pari a 4,7 mm.

Oltre alle temperature assolute, è interessante evidenziare la variazione del ΔT radiale sui dischi dal primo al secondo caso:

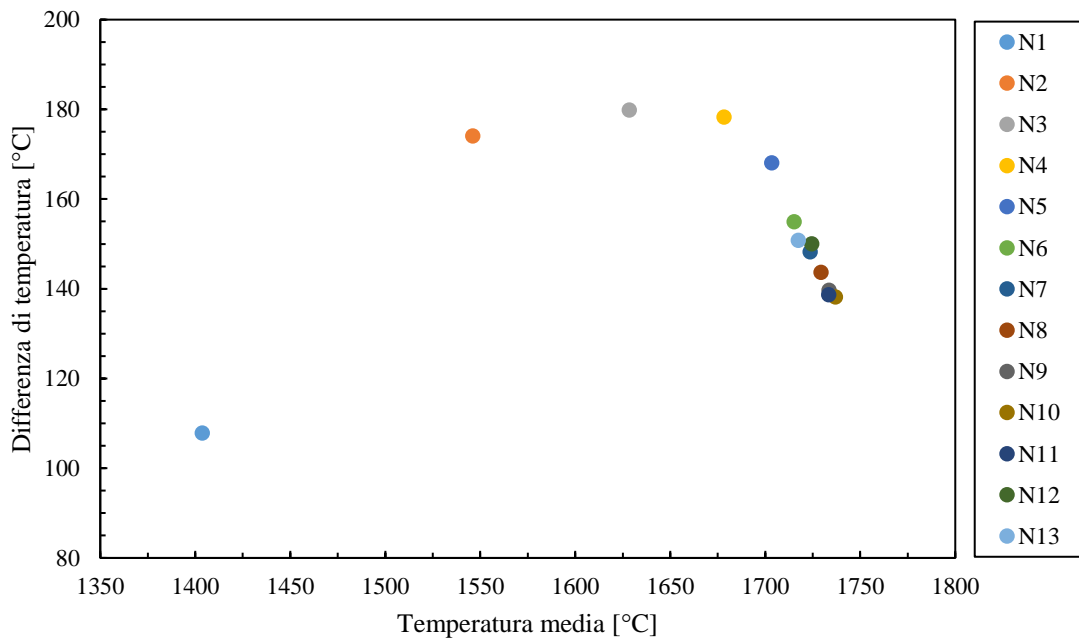


Figura 6.10: differenza di temperatura radiale sui 13 dischi target in SiC degli iThemba LABS. In questo caso il raggio di wobbling è pari a 5 mm e la sigma di fascio è pari a 6,11 mm.

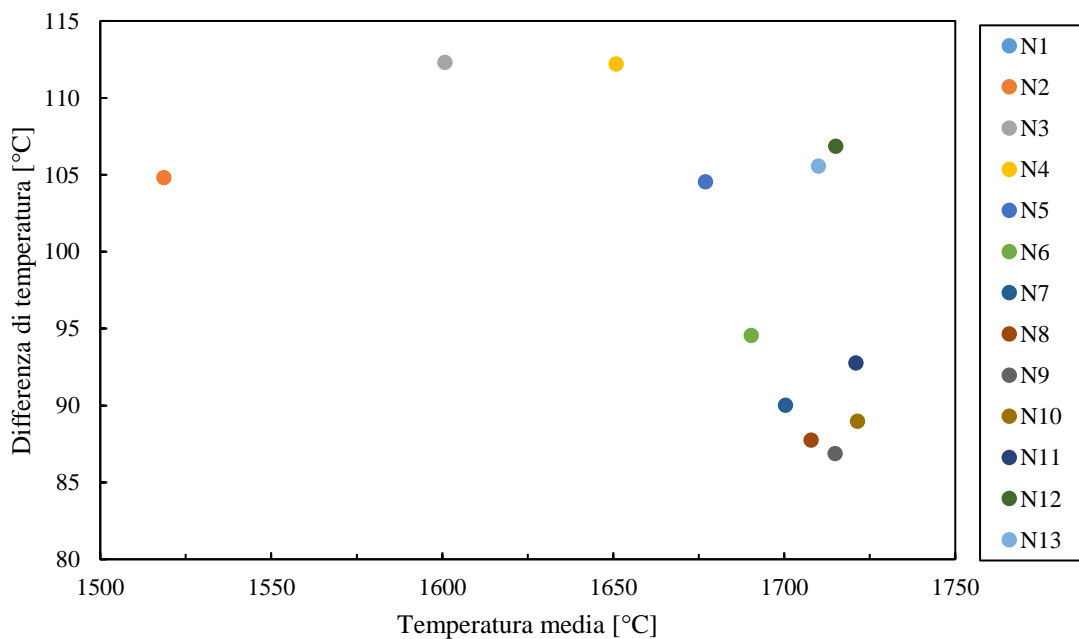


Figura 6.11: differenza di temperatura radiale sui 13 dischi target in SiC degli iThemba LABS. In questo caso il raggio di wobbling è pari a 9 mm e la sigma di fascio è pari a 4,7 mm.

Com'è possibile notare, nel primo caso il ΔT massimo in fase di esercizio è pari a 180 °C, mentre nel secondo caso è pari a circa 112 °C. A seconda del ΔT_L per quella tipologia di carburo di silicio, è possibile scegliere quale delle due configurazioni risulta più idonea per preservare l'integrità del target.

Lo strumento esposto in questo capitolo risulta molto utile e potente, permettendo di comprendere, anche in tempi ristretti, se un materiale può essere idoneo per essere impiegato come materiale target, o se sono necessari ulteriori sviluppi per incrementarne la resistenza meccanica. Figura 6.12 riporta la flowchart guida riassuntiva per l'applicazione del metodo.

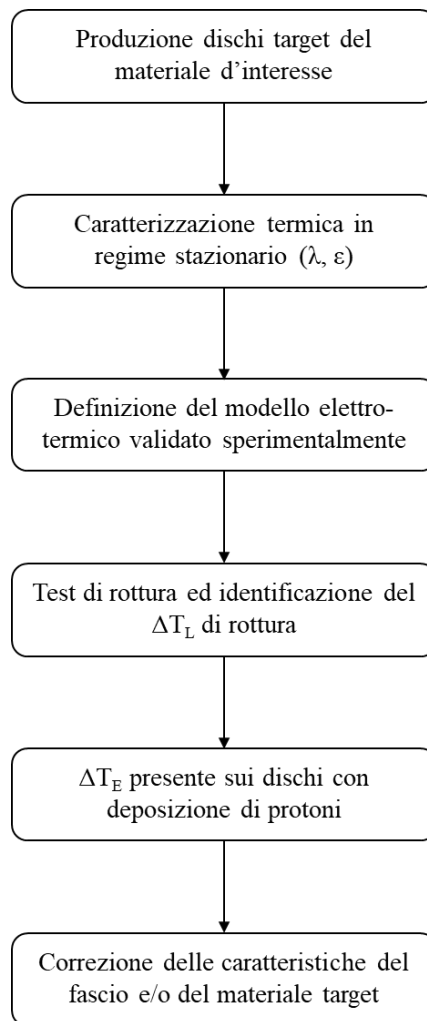


Figura 6.12: flowchart relativa al metodo sopra illustrato.

6.4 Conclusioni

Nel corso del presente capitolo è stata valutata la possibilità di formulare un nuovo criterio di resistenza per dischi sottoposti a gradienti di temperatura lungo la loro direzione radiale.

A partire da evidenze sperimentali ottenute nel corso del capitolo 4, è stato affrontato un approccio analitico in grado di mettere in relazione la prima tensione principale massima alla differenza di temperatura su un disco in regime stazionario. Considerazioni di tipo empirico hanno permesso di stabilire la corrispondenza lineare tra le due quantità valutate a rottura, suggerendo la possibilità di utilizzare il secondo come parametro di valutazione finale.

Infine, grazie a quanto precedentemente emerso, è stato descritto un metodo in grado di prevedere la resistenza dei dischi target in fase d'esercizio a partire da test a rottura effettuati presso i LNL. Tale metodo prevede la conoscenza delle sole proprietà termiche (conducibilità ed emissività) necessarie a definire un campo termico in regime stazionario e misurabili mediante gli approcci descritti nel corso del capitolo 3. Questo comporta un notevole vantaggio in termini di tempi e di accuratezza, in quanto il criterio di resistenza è basato sulla condizione $\Delta T_L > \Delta T_E$, evitando la valutazione dello stato tensionale, il quale necessita della conoscenza delle proprietà elastiche e del coefficiente di dilatazione termica del materiale.

CONCLUSIONI

Il progetto SPES dei Laboratori Nazionali di Legnaro dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare ha come obiettivo la costruzione di una facility di tipo ISOL per la produzione di fasci di ioni radioattivi. Tali ioni sono generati dall'interazione di un fascio protonico ad alta energia con un target in carburo di uranio. Altre tipologie di materiali saranno utilizzate sia inizialmente per testare la facility, sia successivamente per la produzione di specie esotiche di interesse per la fisica e per la medicina nucleare.

La maggior parte dei componenti che costituiscono l'intera facility sono soggetti a condizioni estreme di utilizzo: in queste condizioni, il progettista necessita di essere a conoscenza di tutte le proprietà termo-fisiche e strutturali dei materiali in gioco. In particolare, il target di produzione è costituito da 7 dischi coassiali: il fascio di protoni impatta i dischi in corrispondenza del loro centro, innalzando il loro livello di temperatura e generando forti gradienti termici in direzione radiale. Tali gradienti possono rivelarsi particolarmente pericolosi, in quanto possono portare a rottura, pertanto le tensioni termiche ad essi associate devono essere accuratamente valutate. Inoltre, la corretta progettazione di molti componenti presenti lungo la linea protonica, la linea radioattiva ed interni alla camera target risulta di determinante importanza al fine di garantire elevati livelli di rendimento e soprattutto sicurezza dell'intera facility.

Il presente lavoro di tesi si inserisce nel contesto del progetto SPES con l'obiettivo di studiare i gradienti termici che caratterizzano i dischi target e di comprendere la resistenza limite del materiale in oggetto, il carburo di silicio Hexoloy® SA, il primo utilizzato in fase di test dell'intera facility. Inoltre, questo lavoro ha l'obiettivo di caratterizzare la grafite POCO EDM-3® dal punto di vista termo-fisico e strutturale, al fine di garantire la corretta progettazione di tutti i componenti con essa fabbricati.

Al fine di studiare la problematica che caratterizza i dischi target, è stato utilizzato l'apparato sperimentale presente all'interno del Laboratorio Alte Temperature dei LNL, consistente in un riscaldatore ohmico in grado di generare intensi gradienti termici sui dischi. La procedura sperimentale prevede l'incremento, per step finiti, della corrente riscaldante e la misura della temperatura sul disco in corrispondenza del suo centro e della sua periferia. Inoltre, grazie al pirometro utilizzato, è stata misurata l'emissività del materiale del disco. Assieme a tale dispositivo, è stato sviluppato un modello agli elementi finiti in grado di rappresentare correttamente la realtà sperimentale. Il suddetto modello è stato validato utilizzando un materiale avente proprietà note (grafite POCO EDM-AF5®) e, successivamente, sono state validate le proprietà trovate in letteratura per la grafite POCO EDM-3® e per il carburo di silicio Hexoloy® SA. Mediante l'utilizzo combinato dell'apparato sperimentale e del relativo modello fem, è stato sviluppato un metodo per la determinazione della conducibilità termica del materiale del disco. Tale tipo di analisi, definita inversa, prevede la misurazione delle temperature in centro ed in periferia del disco per ogni valore di corrente riscaldante; il passo successivo consiste nell'inserimento delle temperature sperimentali all'interno del software Ansys® e nella variazione della conducibilità termica del materiale del disco fintantoché le temperature numeriche non coincidono con quelle ottenute sperimentalmente. La definizione della conducibilità termica in Ansys® è data come una funzione di secondo grado rispetto alla temperatura, pertanto il software varia, ad ogni iterazione, i coefficienti del polinomio di $\lambda(T)$. Questo metodo di misura della conducibilità termica, definito *metodo della funzione ottima*, è stato validato mediante l'utilizzo di un materiale con conducibilità termica nota (grafite POCO EDM-AF5®) e, successivamente, è stato verificato il funzionamento dell'algoritmo con la grafite POCO EDM-3® e per il carburo di silicio Hexoloy® SA. Infine, è stata stimata la conducibilità termica del carburo di silicio Hexoloy® SE, del quale, in letteratura, non è reperibile alcun dato.

Per determinare la resistenza ai gradienti termici dei materiali d'interesse, sono stati eseguiti dei test a rottura mediante l'utilizzo del dispositivo presente nel Laboratorio Alte Temperature. In primo luogo, è stato effettuato un test prototipo sull'Hexoloy® SiC SE, al fine di ottenere una stima delle modalità di rottura. È stato visto che il path di frattura segue un percorso *a fontana*, analogo a quelli verificatisi in passato; inoltre, la posizione del punto di innesco della cricca è situato in corrispondenza della periferia del disco. Grazie a queste osservazioni, rafforzate da analisi FEG effettuate presso i laboratori della sede di Vicenza dell'Università degli Studi di Padova, è stato possibile affermare che la prima tensione principale massima è la causa della frattura del disco e che, pertanto, il criterio di Rankine è adatto per la valutazione del cedimento in questo contesto. Successivamente, dopo aver studiato la possibilità di adottare degli schermi termici, sono stati effettuati dei test a rottura sull'Hexoloy® SiC SA. Mediante l'utilizzo di diversi spessori e variando parametri come distanza disco-crogiolo, è stato possibile ottenere numerose rotture a temperature medie differenti. Tale accorgimento ha permesso di evidenziare un andamento crescente della prima tensione principale massima ($\sigma_{\theta_{max}}$) e della differenza di temperatura (ΔT) a rottura in funzione della temperatura media (quest'ultima valutata in un

intervallo tra 1050 °C e 1350 °C). Mediamente, la prima si attesta attorno a 390 MPa, mentre la seconda si attesta attorno ai 520 °C. Analisi SEM effettuate presso i LNL hanno evidenziato, come nel caso precedente, la presenza di due diverse velocità di propagazione della cricca, una che caratterizza la morfologia della superficie in prossimità dell'innesco della cricca ed una che caratterizza tutte le restanti zone di frattura. Infine, è stato verificato che la zona di innesco della cricca è arbitrario e causato dalla presenza di difetti come porosità o inclusioni, aprendo la strada ad un approccio legato alla meccanica della frattura.

A valle dei numerosi test effettuati e grazie alle precedenti considerazioni sugli andamenti della $\sigma_{\theta_{max}}$ e del ΔT a rottura, è stato possibile ricavare analiticamente una relazione tra le due grandezze. Empiricamente, è stato verificato che tale relazione correla linearmente la $\sigma_{\theta_{max}}$ ed il ΔT a rottura, dimostrando la possibilità di utilizzare quest'ultimo come criterio di resistenza per i dischi target. Tale approccio risulta essere particolarmente vantaggioso in quanto permette di bypassare la verifica strutturale sulle tensioni, la quale prevede la conoscenza delle proprietà elastiche e del coefficiente di dilatazione termica del materiale. Invece, le uniche proprietà necessarie per la verifica con questo approccio risultano essere la conducibilità termica e l'emissività, proprietà termiche in grado di essere misurate mediante gli approcci precedentemente esposti. Così, è stata sviluppata una linea guida in grado di determinare la possibilità utilizzare come target un materiale, sia esso studiato e prodotto internamente ai LNL, o acquistato da fornitori esterni.

L'ultima parte del presente lavoro di tesi è stata svolta presso l'EN-MME Mechanical Laboratory del CERN di Ginevra, allo scopo di caratterizzare la grafite POCO EDM-3[®] dal punto di vista termo-fisico e strutturale. In primo luogo, sono state misurate proprietà come diffusività termica, calore specifico, densità e coefficiente di dilatazione termica, al fine di calcolare la conducibilità termica del materiale. Quest'ultima è risultata sensibilmente differente rispetto a quella dichiarata dal produttore e la causa è da ricercare nei differenti valori di densità rilevati. Inoltre, sono state effettuate delle prove a flessione e a compressione da temperatura ambiente a 400 °C, rilevando un'insensibilità del materiale a tali variazioni di temperatura; i valori di resistenza ultimi, pertanto, si assestano attorno a 90 MPa e 120 MPa rispettivamente.

Per il prossimo futuro è previsto un approfondimento dell'algoritmo che porta alla stima della conducibilità termica, al fine di determinare il livello di incertezza che lo caratterizza. Per quanto riguarda le prove di rottura effettuate, è previsto un upgrade dell'apparato sperimentale in modo da estendere il livello di temperatura massima raggiunta. Relativamente al criterio di rottura proposto, è previsto uno studio atto alla determinazione dell'influenza del raggio dei dischi sulle distribuzioni tensionali e di temperatura, con lo scopo di estendere il metodo a diverse geometrie. Inoltre, rimane aperto l'approccio legato alla meccanica della frattura, il quale ha come obiettivo quello di determinare il K_C del materiale a partire dall'analisi dei difetti. Infine, sarà possibile estendere quanto presentato ad altri materiale impiegati per il target, tra i quali spicca il carburo di uranio.

APPENDICE A

Studio elettro-termo-strutturale del crogiolo riscaldante

A.1 Introduzione

Nel corso del capitolo 3 è stato ampiamente presentato l'apparato sperimentale utilizzato per la riproduzione di gradienti termici radiali sui dischi: come già descritto, il dispositivo è dotato di un riscaldatore ohmico, denominato *crogiolo*, la cui funzione è il riscaldamento del disco posto al di sopra di esso. La forma del crogiolo, ampiamente studiata in passato presso i LNL [41], permette di concentrare la generazione termica in corrispondenza della sua zona centrale, ottenendo una superficie circolare di diametro 18 mm a temperatura pressoché costante. La temperatura massima raggiunta cresce all'aumentare della corrente percorsa, fino a superare i 2000 °C: tale valore è indicativo delle severe condizioni di esercizio a cui il crogiolo è sottoposto, pertanto è necessario l'utilizzo di un materiale in grado di sopportarle. L'ultima famiglia di crogioli sviluppata è stata realizzata presso le officine interne dei LNL utilizzando la grafite EDM-3® dell'azienda POCO, la medesima utilizzata per la costruzione di alcuni componenti del target SPES e dell'intera linea di produzione. Nonostante le elevate proprietà meccaniche di tale materiale, specialmente alle elevate temperature, durante l'utilizzo del forno si sono verificate alcune rotture del crogiolo, invalidando le prove in corso e rendendo l'intero macchinario non disponibile alla realizzazione di ulteriori test.

All'interno della presente appendice è stato condotto uno studio relativo alle condizioni elettro-termiche a cui il crogiolo è soggetto, confrontando i risultati del modello numerico agli elementi finiti con i dati sperimentali, ed alle modalità che lo portano a rottura.

A.2 Studio elettro-termico numerico e validazione sperimentale

Come precedentemente illustrato, il crogiolo è percorso da corrente: la sua forma permette di sviluppare una zona centrale ad altissima temperatura, mantenendo le sue estremità, calettate ai morsetti in rame, a livelli di temperatura di gran lunga inferiori (Figura A.1).

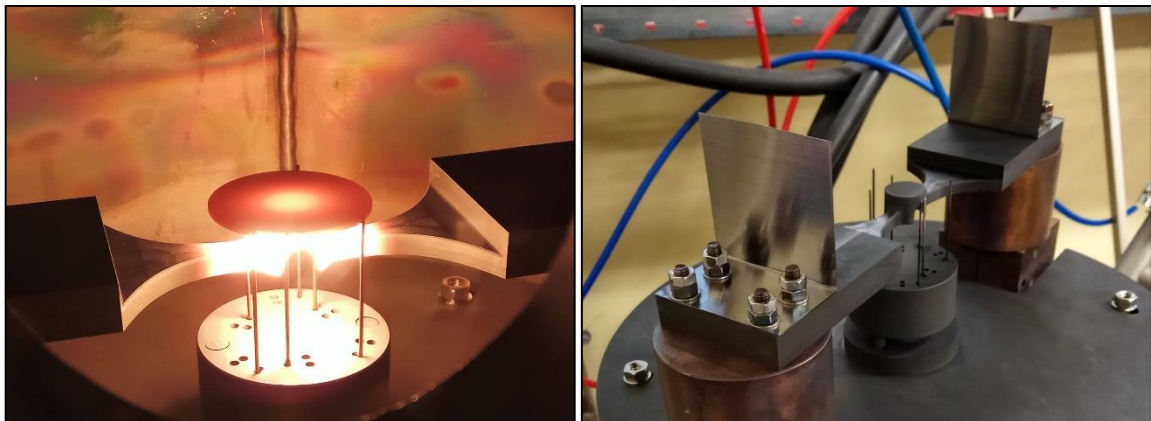


Figura A.1: a sinistra il crogiolo in funzione (si nota la presenza di elevate temperature in corrispondenza della sola zona centrale); a destra il sistema di collegamento a bulloni tra il crogiolo ed i morsetti in rame (in secondo piano è possibile visualizzare la zona circolare in cui si forma lo spot a temperatura costante elevatissima).

Il crogiolo viene alimentato mediante corrente elettrica utilizzando un alimentatore comandato da un PLC: il software di controllo del PLC imposta una corrente riscaldante e l'alimentatore, a seconda della resistenza del circuito elettrico, fornisce la differenza di potenziale necessaria ai capi del crogiolo.

Ciò premesso, è possibile verificare che il modello numerico elettro-termico sia in grado di rispecchiare correttamente la realtà sperimentale. Per verificare ciò, è necessario effettuare una rampa di corrente in salita ed una in discesa, alimentando il crogiolo con step di corrente di 5 A fino a raggiungere la corrente di 250 A.

Parallelamente, è necessario risolvere il modello elettro-termico dell'apparato sperimentale, ampiamente descritto durante lo svolgimento del capitolo 3. È importante dichiarare che, in questo caso, il disco di prova risulta assente: l'oggetto dello studio è il crogiolo, pertanto, per permettere la rilevazione delle temperature, è necessario evitare di introdurre il disco nel sistema.

I risultati numerici e sperimentali che sono stati messi a confronto sono la differenza di potenziale che l'alimentatore applica ai capi del crogiolo e la massima temperatura che il crogiolo è in grado di sviluppare; questi due parametri si ritengono significativi della corrispondenza numerico-sperimentale e possono essere considerati sufficienti per valutarne l'efficacia. Inoltre, è fondamentale che sia i risultati elettrici, sia i risultati termici siano congruenti, in quanto le proprietà termiche ed elettriche del materiale sono fortemente dipendenti dalla temperatura.

I risultati elettrici sono riportati in Figura A.2: la corrispondenza tra risultati numerici e sperimentali è elevata, con errori relativi sempre inferiori al 2%, pertanto il modello si può considerare accurato.

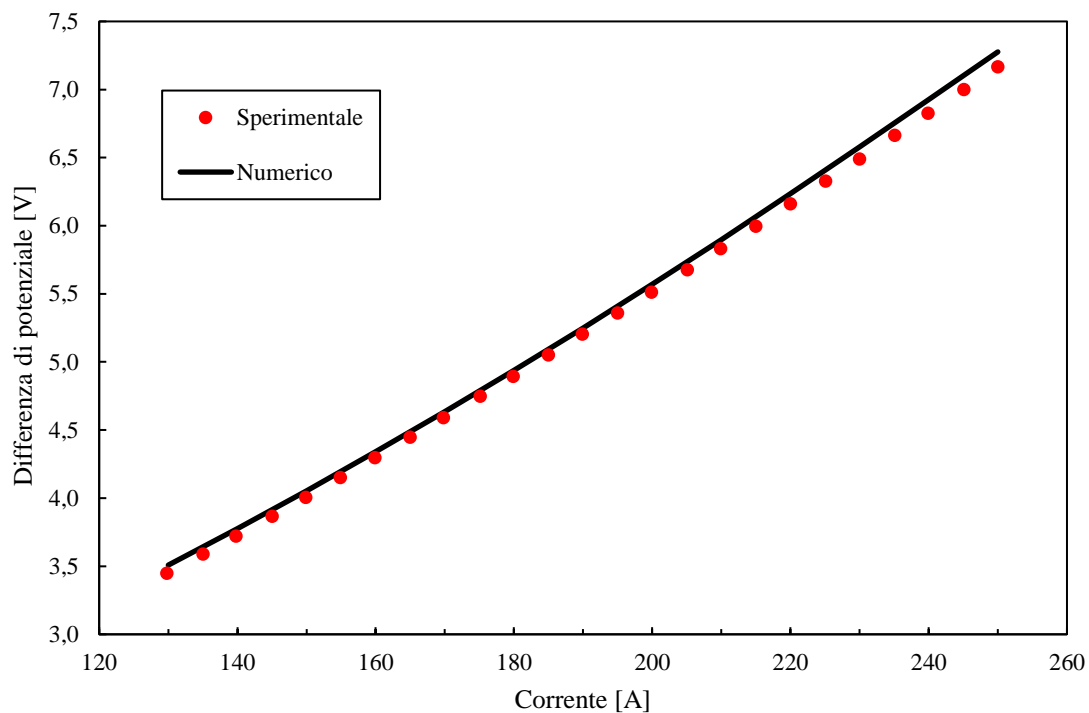


Figura A.2: andamento sperimentale e numerico della differenza di potenziale applicata dall'alimentatore in funzione della corrente riscaldante impostata.

I risultati di temperatura sono riportati in Figura A.3: anche in questo caso, la corrispondenza tra risultati numerici e sperimentali risulta essere elevata; infatti, l'errore relativo è sempre inferiore all'1%.

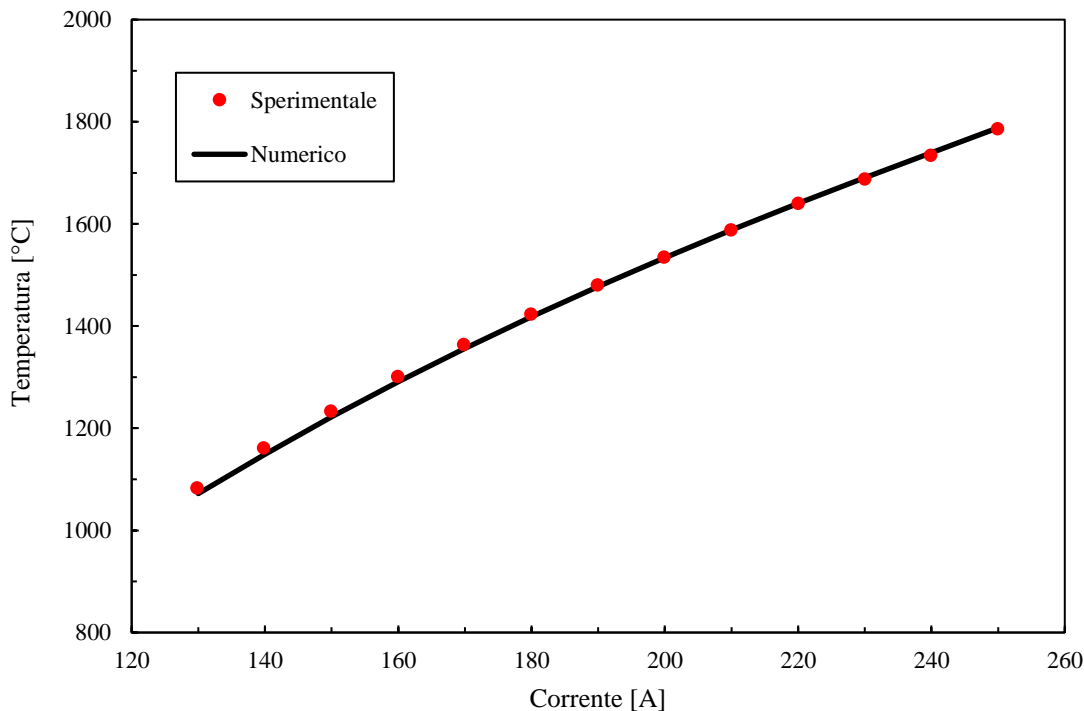


Figura A.3: andamento sperimentale e numerico della temperatura in corrispondenza della sommità del crogiolo in funzione della corrente riscaldante impostata.

A valle di quanto ottenuto, si può affermare che il modello numerico risponde accuratamente all’evidenza sperimentale, pertanto, si può procedere alla valutazione delle tensioni strutturali a cui il crogiolo è soggetto.

A.3 Studio strutturale

Il modello numerico costruito, del quale sono stati riportati i risultati, è stato costruito mediante l’utilizzo dell’elemento SOLID226: è un elemento tridimensionale dotato di 20 nodi, i cui gradi di libertà sono definibili specificando una particolare combinazione numerica all’interno delle *keyoption* dell’elemento. In Figura A.4 sono specificati i valori delle *keyoption* per differenti campi fisici: qualora di voglia assegnare la temperatura come unico grado di libertà, è necessario specificare il valore 10 come *keyoption*. Nel caso in cui si voglia effettuare un’analisi accoppiata, è necessario effettuare la somma delle *keyoption* per ciascun campo: per un’analisi elettro-termica, per esempio, è necessario impostare 110.

Field	Field Key
Structural	1
Thermal	10
Electric Conduction	100
Electrostatic	1000
Diffusion	100000

Figura A.4: *keyoption* relative ai diversi campi fisici.

Nel caso in cui si voglia effettuare un’analisi strutturale di un componente in cui è necessario anche il grado di libertà termico ed elettrico, come nel caso del crogiolo, la *keyoption* da utilizzare risulta essere 111. In questo caso, si va ad impostare un’analisi accoppiata molto complessa, dove i tre campi fisici interagiscono: in

sostanza, l'ottenimento di una soluzione consistente richiede elevatissimi tempi di calcolo. La mesh effettuata con questa tipologia di elemento è riportata in Figura A.5.

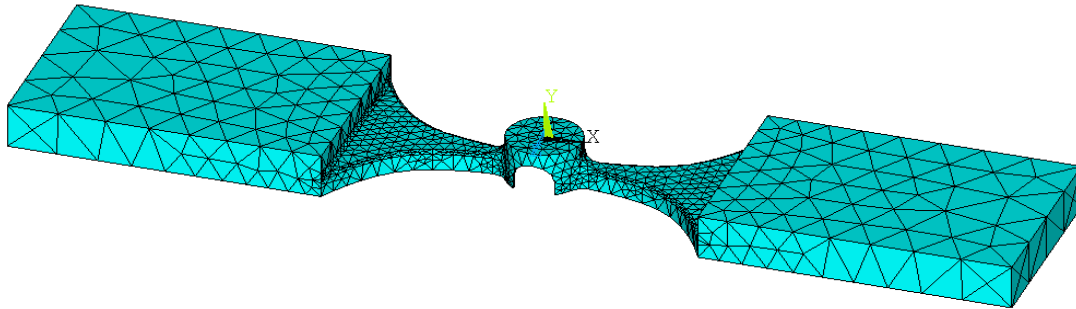


Figura A.5: mesh del crogiolo utilizzata con l'elemento SOLID226.

Pertanto, per effettuare un'analisi strutturale preliminare, è stata utilizzata un'altra tecnica, consistente in due step consecutivi:

1. Mediante l'utilizzo di un elemento (SOLID69) con gradi di libertà elettro-termici, si effettua lo studio del crogiolo in questi due campi fisici;
2. Successivamente, attraverso il comando APDL *ETCHG*, si convertono i gradi di libertà elettro-termici in strutturali: si ottiene così un secondo modello a cui vengono applicati i carichi termici ricavati dall'analisi precedente.

Così facendo, i tempi di calcolo vengono notevolmente ridotti; d'altro canto, a causa dell'utilizzo di una tipologia differente di elemento, è necessario ridefinire la mesh e ristudiare la validità del modello mediante i confronti con i risultati sperimentali. In Figura A.6 si riporta la mesh utilizzata con il SOLID69: questo elemento è dotato di 8 nodi, pertanto necessita di una mesh più fitta per poter descrivere adeguatamente il sistema.

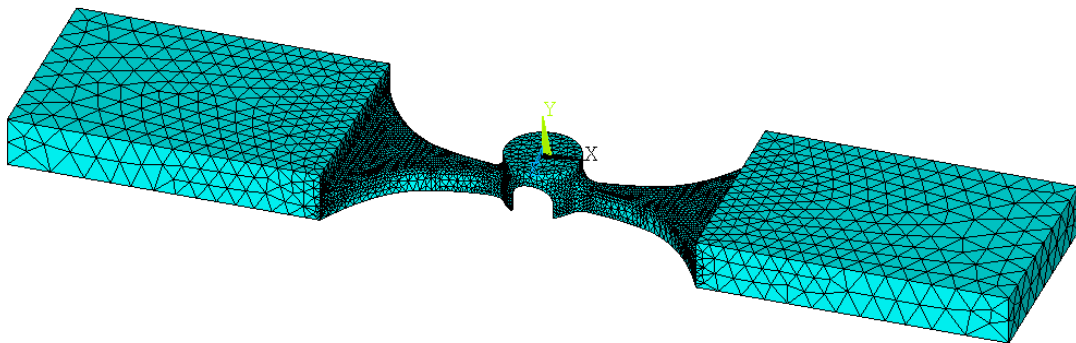


Figura A.6: mesh del crogiolo utilizzata con l'elemento SOLID69.

In Figura A.8 e Figura A.8 è riportata la validazione sperimentale del modello numerico; il modello risulta accurato, sia per le tensioni applicate al crogiolo, sia per le temperature, con uno scostamento medio inferiore all'1%.

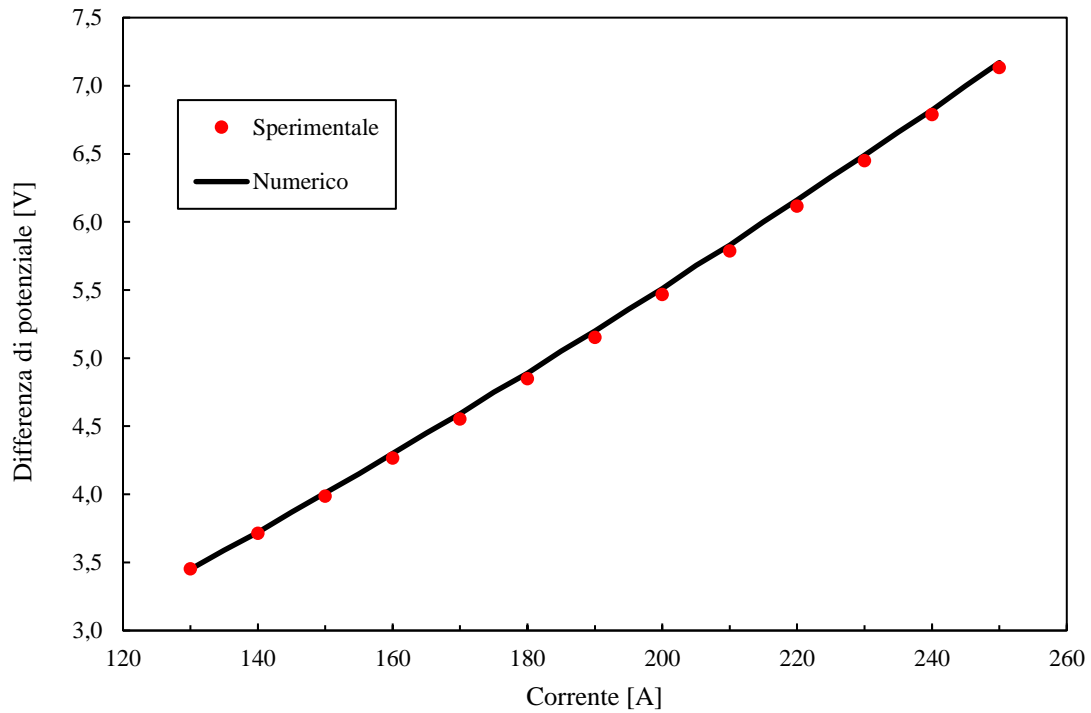


Figura A.7: andamento sperimentale e numerico della differenza di potenziale applicata dall'alimentatore in funzione della corrente riscaldante impostata.

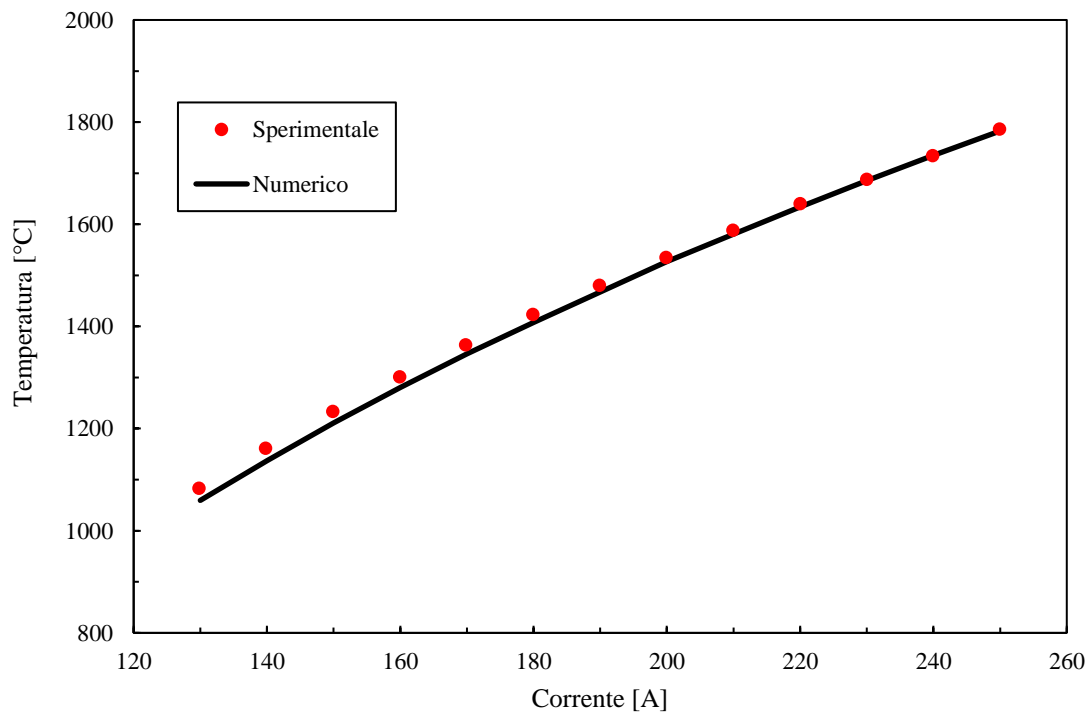


Figura A.8: andamento sperimentale e numerico della temperatura in corrispondenza della sommità del crogiolo in funzione della corrente riscaldante impostata.

Dopo aver verificato la validità del modello impostato utilizzando l'elemento SOLID69, si è proceduto alla valutazione delle tensioni strutturali di cui il crogiolo deve farsi carico durante l'esercizio.

In primo luogo, si applica il campo di temperatura al crogiolo e lo si utilizza come uno carico a cui è soggetto. In secondo luogo, bisogna vincolare gli spostamenti del crogiolo. Come rappresentato in Figura A.1, il crogiolo è vincolato ai morsetti in rame attraverso otto collegamenti bullonati: per semplicità di rappresentazione, è stato scelto di modellare questi collegamenti mediante l'utilizzo di incastrati applicati alle superfici più esterne del crogiolo, come rappresentato in Figura A.9.

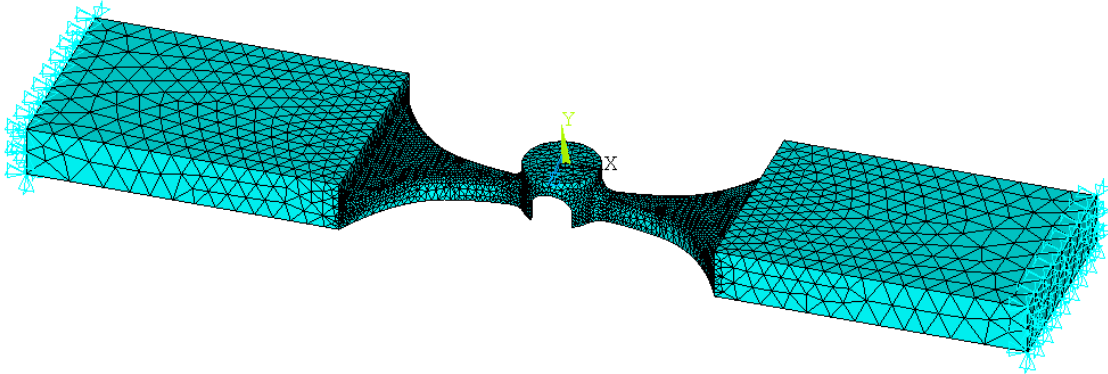


Figura A.9: modalità di vincolo applicata al crogiolo consistente nell'incastrato delle due aree di estremità.

Per verificare la rappresentatività dei vincoli applicati, è stato deciso di analizzare un secondo caso in cui sono vincolate anche le aree superiori ed inferiori delle ali del crogiolo, allo scopo di simulare la presenza delle viti (Figura A.10). La realtà sperimentale è intermedia tra le due modalità di vincolo, ma, se le due configurazioni forniscono risultati tra loro simili, anche il caso reale sarà caratterizzato da risultati simili.

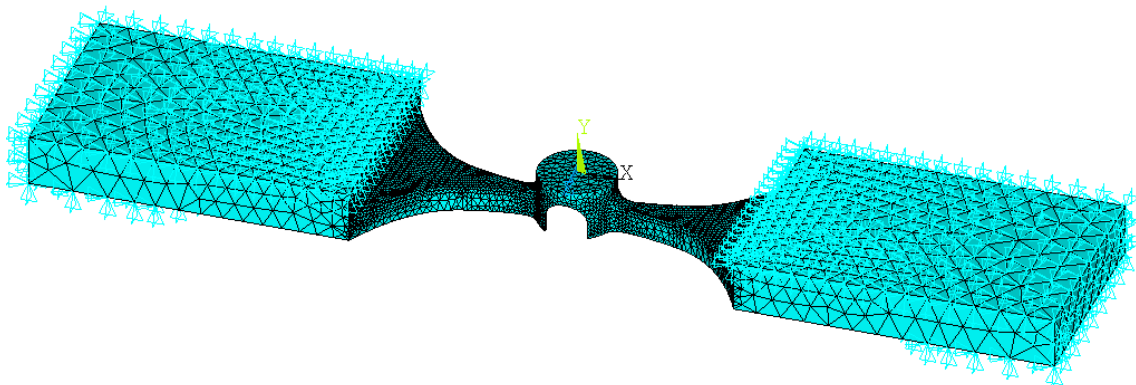


Figura A.10: modalità di vincolo applicata al crogiolo consistente nell'incastrato delle due aree di estremità e delle aree superiore ed inferiore delle ali.

In prima approssimazione, si può pensare che la modalità di vincolo ideale sia una soluzione intermedia tra le due proposte.

Dopo aver impostato il modello, si lancia la soluzione e si passa all'analisi dei risultati.

Per i materiali ceramici quali la grafite, si può pensare ad un criterio di resistenza che tenga in considerazione le tensioni principali massima e minima e che la rottura avvenga qualora una delle due superi la tensione di rottura a trazione o a compressione del materiale. In formule:

$$\sigma_1 > \sigma_{Rt} \quad \text{oppure} \quad |\sigma_3| > |\sigma_{Rc}| \quad (\text{A.1})$$

Per quanto riguarda la grafite con la quale è costruito il crogiolo, si ha a disposizione la curva della tensione di rottura a trazione in funzione della temperatura; per la tensione di rottura a compressione, invece, la letteratura

non fornisce alcuna indicazione. Si decide così di analizzare entrambe le tensioni al variare della corrente, per determinare quale delle due possa essere indicativa della possibile rottura del crogiolo (Tabella A.1).

Vincoli caso 1			Vincoli caso 2		
Corrente [A]	σ_1 [MPa]	σ_3 [MPa]	Corrente [A]	σ_1 [MPa]	σ_3 [MPa]
130	20	-88	130	19	-85
140	22	-97	140	21	-93
150	25	-106	150	23	-102
160	27	-116	160	26	-111
170	29	-125	170	28	-120
180	31	-134	180	30	-129
190	34	-143	190	32	-138
200	36	-153	200	35	-146
210	38	-162	210	37	-155
220	41	-171	220	39	-164
230	44	-181	230	42	-173
240	47	-190	240	45	-182
250	50	-199	250	48	-191
260	53	-209	260	51	-200

Tabella A.1: tensioni principali massima e minima al variare della corrente riscaldante.

Come evidenziato in Tabella A.1, la tensione di compressione, in modulo, risulta essere sempre superiore a quella di trazione; inoltre, la casistica in cui sono stati utilizzati vincoli del primo tipo è la più critica. Pertanto, in vista di una presente analisi e di una futura riprogettazione del crogiolo, si considera la tensione di compressione trovata vincolando il crogiolo mediante le sole aree esterne, in quanto a favore di sicurezza.

Le tensioni riportate in tabella, sono frutto di un modello numerico all'interno del quale sono riportate le proprietà elastiche del materiale: esse sono note (e con un elevato grado di incertezza) solo a temperatura ambiente. Ansys®, in mancanza di un'indicazione specifica relativa alle proprietà ad elevate temperature, considera la proprietà costante, anche se è evidente che ciò allontana il modello dalla realtà che si prende in carico di rappresentare. Ciò premesso, è possibile affermare che i risultati di tensione ottenuti siano affetti da un elevato grado di incertezza relativo all'assenza in letteratura della conoscenza delle proprietà elastiche (modulo di Young e coefficiente di Poisson) del materiale alle temperature di interesse.

In Figura A.11 si riporta una rappresentazione indicativa della deformazione che subisce il crogiolo a causa della dilatazione termica; in Figura A.12 ed in Figura A.13 si evidenziano le due zone in cui si realizzano le tensioni massima e minima riportate in tabella.

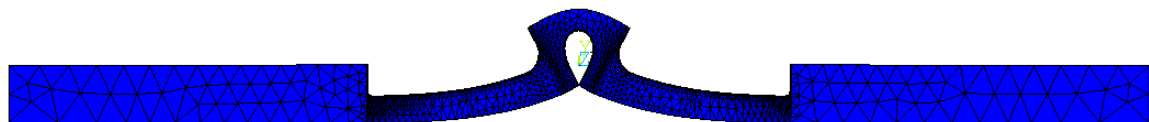


Figura A.11: deformazione a cui è soggetto il crogiolo durante il riscaldamento (deformazione amplificata).

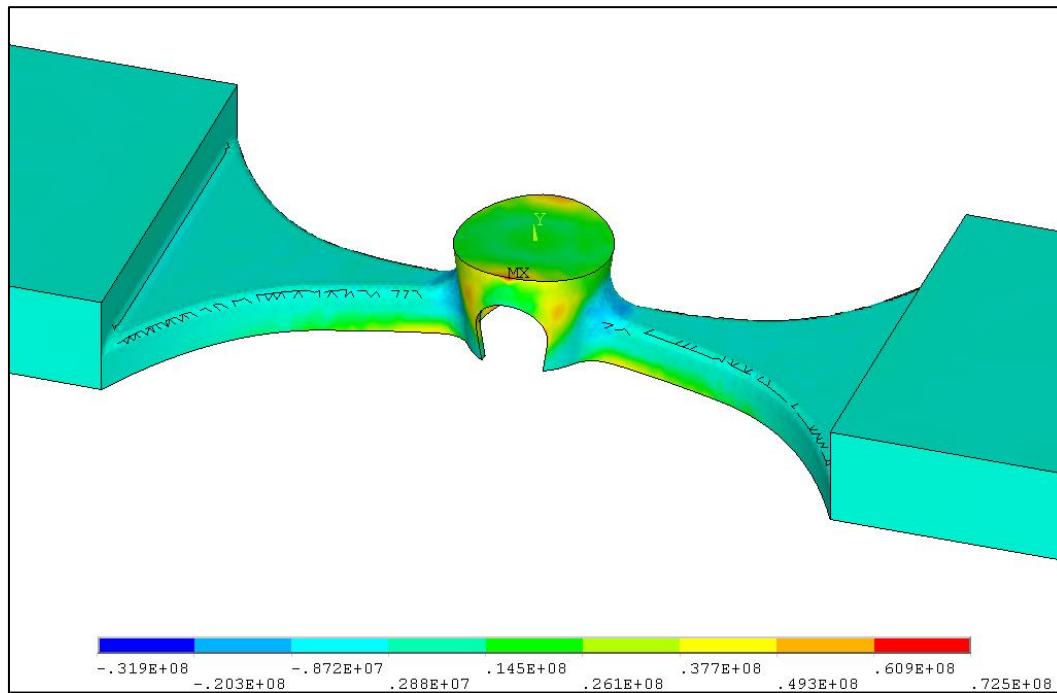


Figura A.12: plot della prima tensione principale presente sul crogiolo. La scala presente non è corrispondente allo stato tensionale effettivamente presente a causa di un problema di rappresentazione di Ansys®.

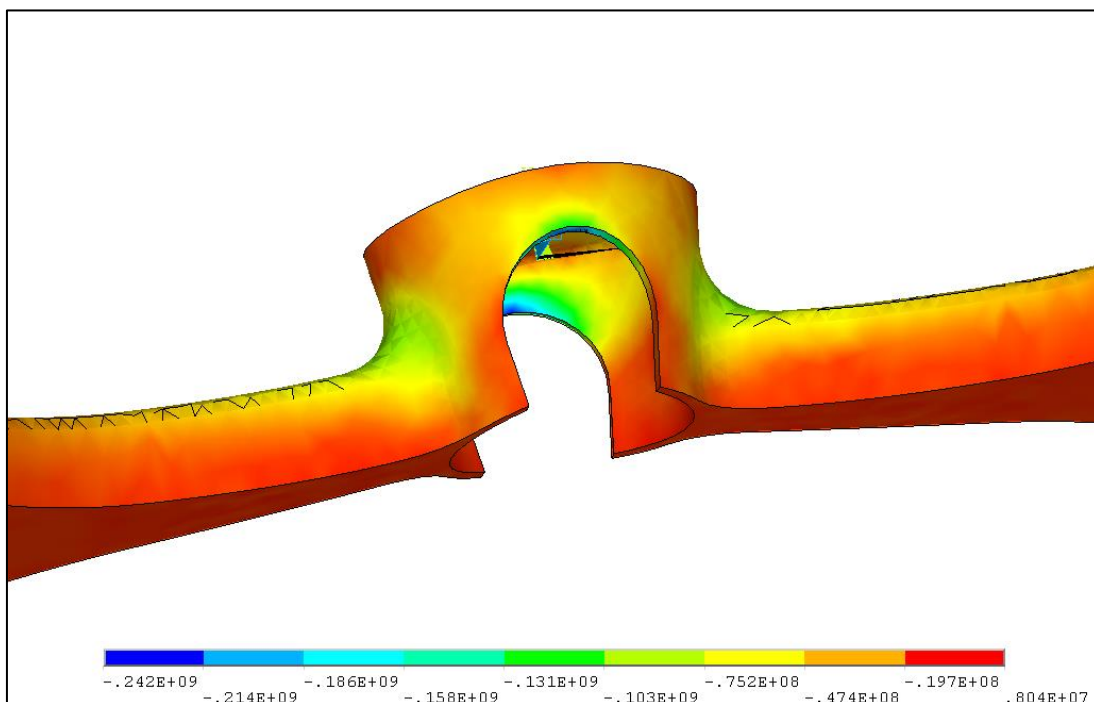


Figura A.13: plot della terza tensione principale presente sul crogiolo. La scala presente non è corrispondente allo stato tensionale effettivamente presente a causa di un problema di rappresentazione di Ansys®.

In passato sono avvenute numerose rotture del crogiolo. In particolare, si vuole riportare l'ultima, verificatasi nel corso del 2018 (Figura A.14).

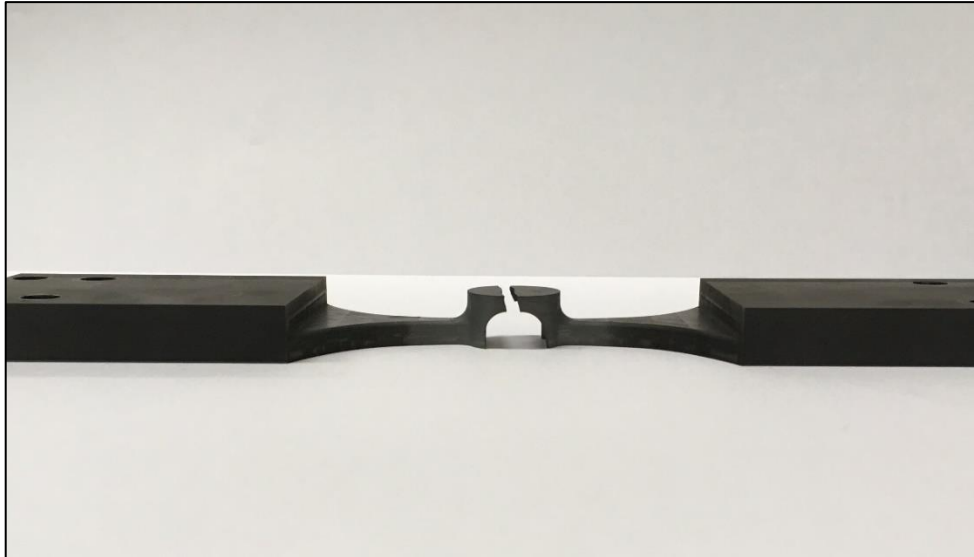


Figura A.14: fotografia della rottura del crogiolo. È possibile ipotizzare che la cricca sia innescata in corrispondenza del punto in cui la terza tensione principale è massima.

Come si può notare, la cricca ha portato alla rottura del crogiolo esattamente in corrispondenza della mezzeria. Data l'elevata intensità della tensione di compressione presente in quella zona, si può ipotizzare che questa sia la responsabile della rottura del crogiolo, ma non si può escludere a priori che la tensione di trazione sia anch'essa concorrente alla frattura (presumibilmente a causa della presenza di un difetto non visibile ad occhio nudo).

A.4 Taratura del nuovo set di crogioli

I risultati precedentemente ottenuti sono frutto di misure sperimentali effettuate su un set di crogioli prodotti presso le officine meccaniche interne ai Laboratori a partire da semilavorati in grafite EDM-3[®], mentre le simulazioni numeriche sono state condotte utilizzando le proprietà da datasheet dichiarate dal produttore.

Come precedentemente evidenziato, i crogioli sono soggetti a rottura, pertanto vanno periodicamente fabbricati: il fornitore esterno (Eurografite Srl), nel corso dei mesi di gennaio e febbraio 2018, ha prodotti due batch di crogioli, di cui uno utilizzando dei semilavorati acquistati dai LNL (diversi da quelli utilizzati per le produzioni precedenti) ed uno utilizzando dei semilavorati acquistati dal fornitore stesso. Effettuando delle misure di densità sulle due serie di crogioli prodotte, questa risulta essere coerente con quanto misurato presso l'EN-MME Mechanical Laboratory del CERN di Ginevra e non con quanto dichiarato dal produttore. Ciò fa ipotizzare che, nel corso del tempo, il produttore stesso abbia cambiato modalità di fabbricazione della grafite in questione, con conseguente variazione delle proprietà d'interesse. Per far fronte a questa problematica, sono state applicate delle correzioni alle simulazioni numeriche a livello delle proprietà del materiale, sfruttando quanto illustrato nel corso del capitolo 5.

L'unica proprietà non misurata risulta essere la resistività elettrica. La casa produttrice mette a disposizione un grafico (Figura A.15) in cui mette in relazione la resistività elettrica a temperatura ambiente con la densità apparente. La resistività elettrica diminuisce con l'aumento della densità e la correlazione è pressoché lineare.

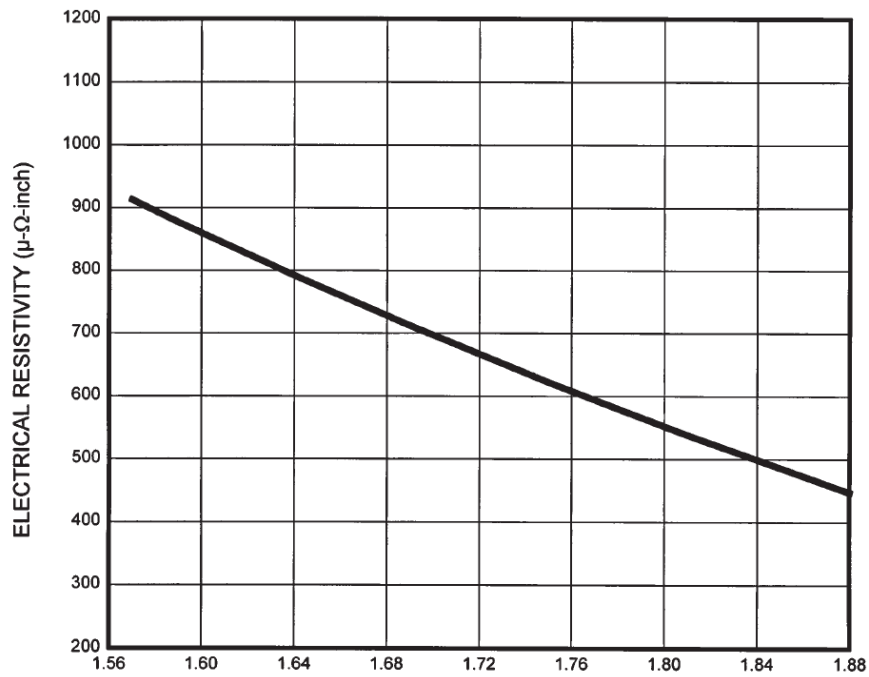


Figura A.15: resistività elettrica in funzione della densità apparente [g/cm³].

Dal grafico è possibile ricavare il valore di resistività elettrica a temperatura ambiente per la grafite desiderata. Per poter ricavare i valori di resistività alle alte temperature, è possibile far ricorso al grafico di Figura A.16, in cui la casa produttrice mette a disposizione la resistività elettrica in funzione della temperatura per le grafiti POCO EDM-2® e POCO EDM-3®.

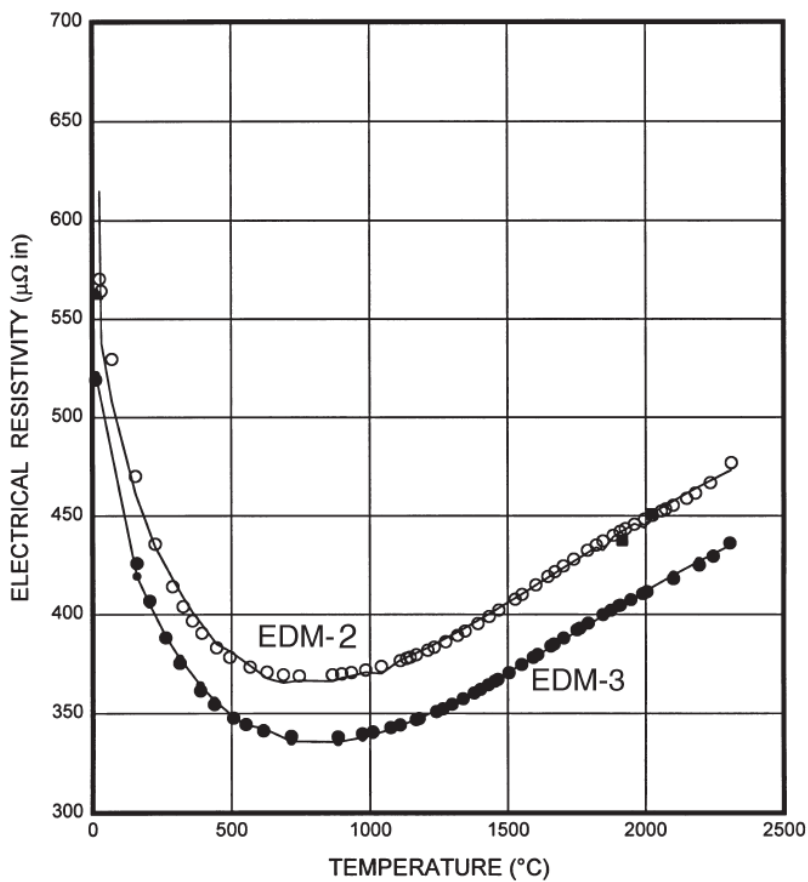


Figura A.16: resistività elettrica in funzione della temperatura per due diversi gradi di EDM®.

Noti i valori di densità dell'EDM-2® (1,74 g/cm³) e dell'EDM-3® (1,81 g/cm³) dichiarati [66], è possibile ricavare i valori di resistività elettrica per qualsivoglia valore di densità, assumendo che vi sia una correlazione lineare, simile a quella di Figura A.15, tra resistività elettrica e densità per qualsiasi valore di temperatura. Con questa ipotesi, è possibile ricavare un grafico di resistività in funzione della densità e parametrico nella temperatura (Figura A.17). Per punti, il procedimento è il seguente:

- Dal grafico di Figura A.16 si ricavano i valori di resistività elettrica delle due grafiti per diversi valori di temperatura;
- Si suppone una correlazione di tipo lineare tra resistività e densità per tutti i valori di temperatura, come in Figura A.15;
- Note le relazioni lineari, si ricava il valore di resistività per la densità e la temperatura d'interesse.

In Figura A.17 sono riportate le correlazioni lineari sopra indicate. I punti in corrispondenza di densità pari a 1,81 g/cm³ e 1,74 g/cm³ sono ricavati dal grafico di Figura A.16, mentre i punti in corrispondenza di densità pari a 1,72 g/cm³ sono stati estrapolati.

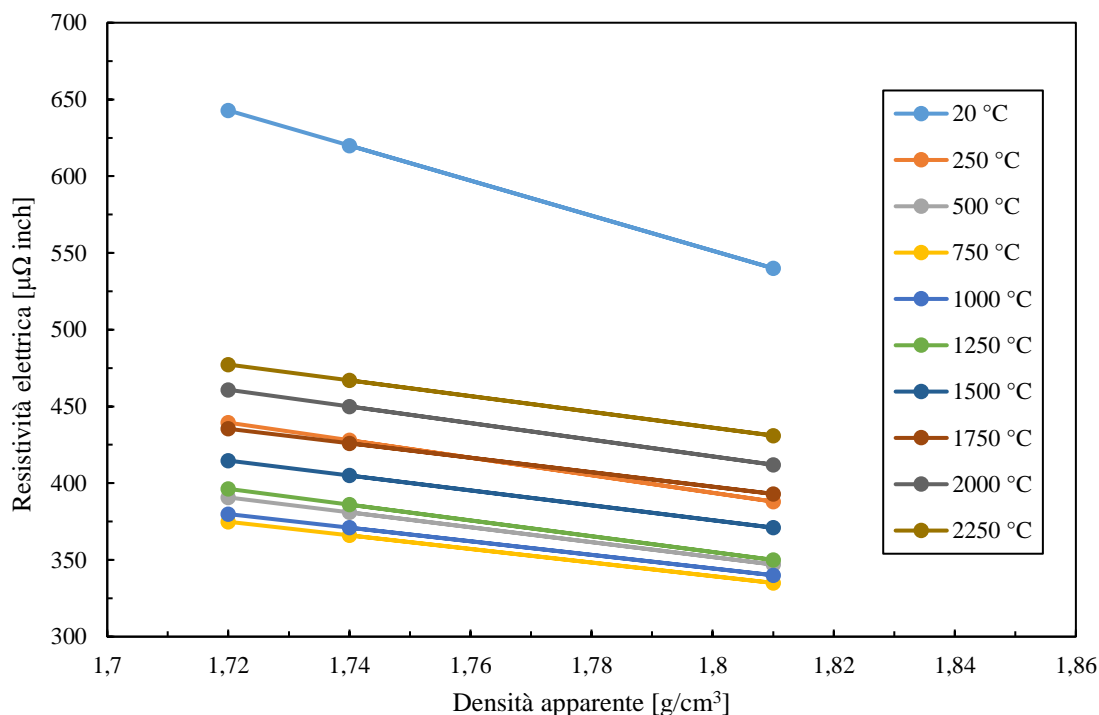


Figura A.17: relazioni lineare che collegano resistività elettrica a densità per diversi valori di temperatura.

In Figura A.18 si riporta il grafico della resistività elettrica in funzione della temperatura ottenuta con il procedimento sopra esposto.

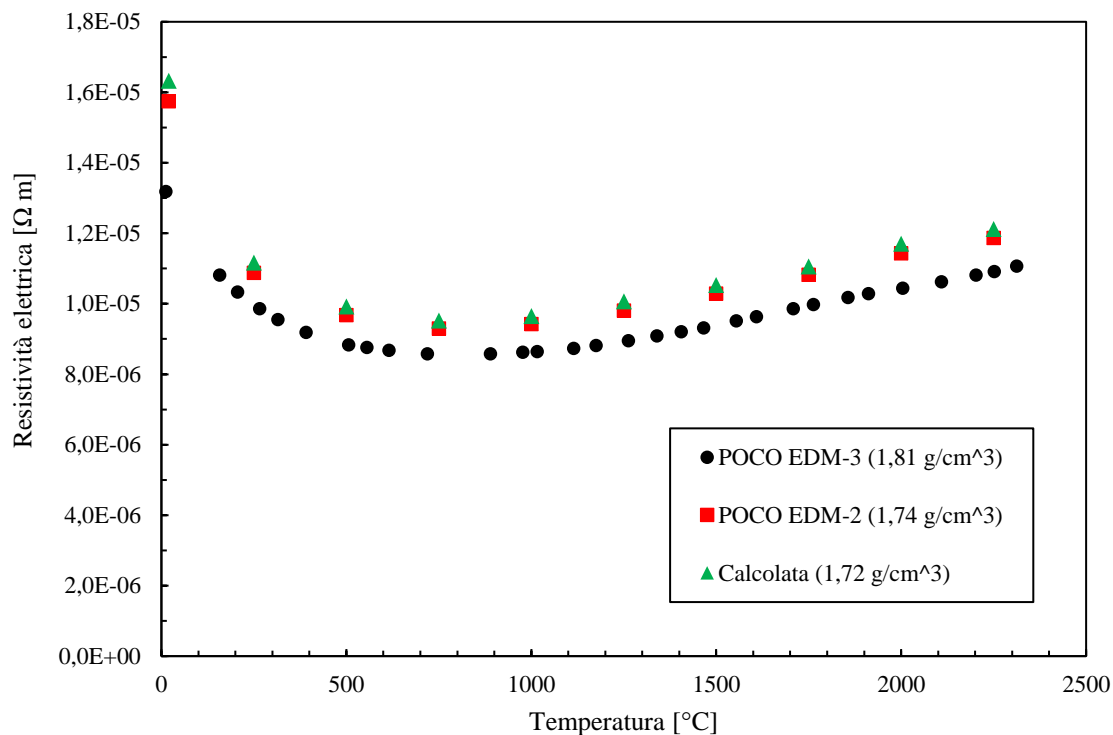


Figura A.18: resistività elettrica in funzione della temperatura ottenuta mediante il procedimento sopra esposto.

Pertanto, dopo aver modificato le proprietà della grafite POCO EDM-3[®], si confrontano i risultati delle simulazioni con le misure sperimentali effettuate su tensioni elettrica e temperatura massima sui crogioli del nuovo set, al fine di verificare l'esattezza delle proprietà ottenute (Figura A.19 e Figura A.20).

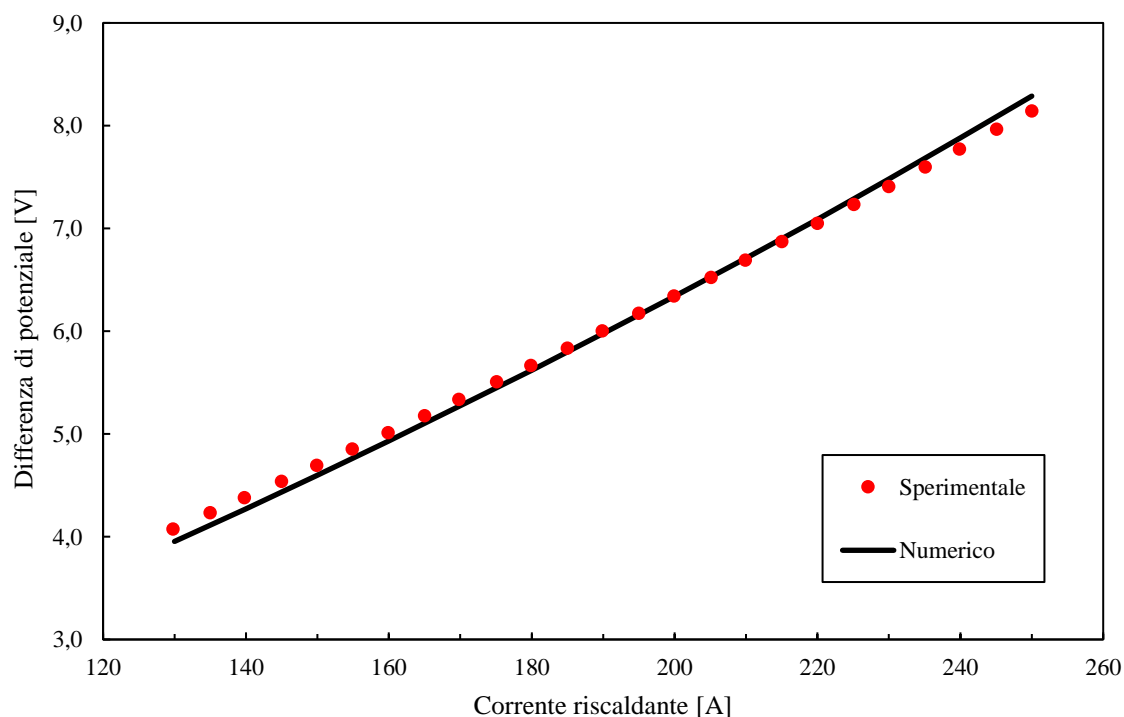


Figura A.19: andamento sperimentale e numerico della differenza di potenziale applicata dall'alimentatore in funzione della corrente riscaldante impostata.

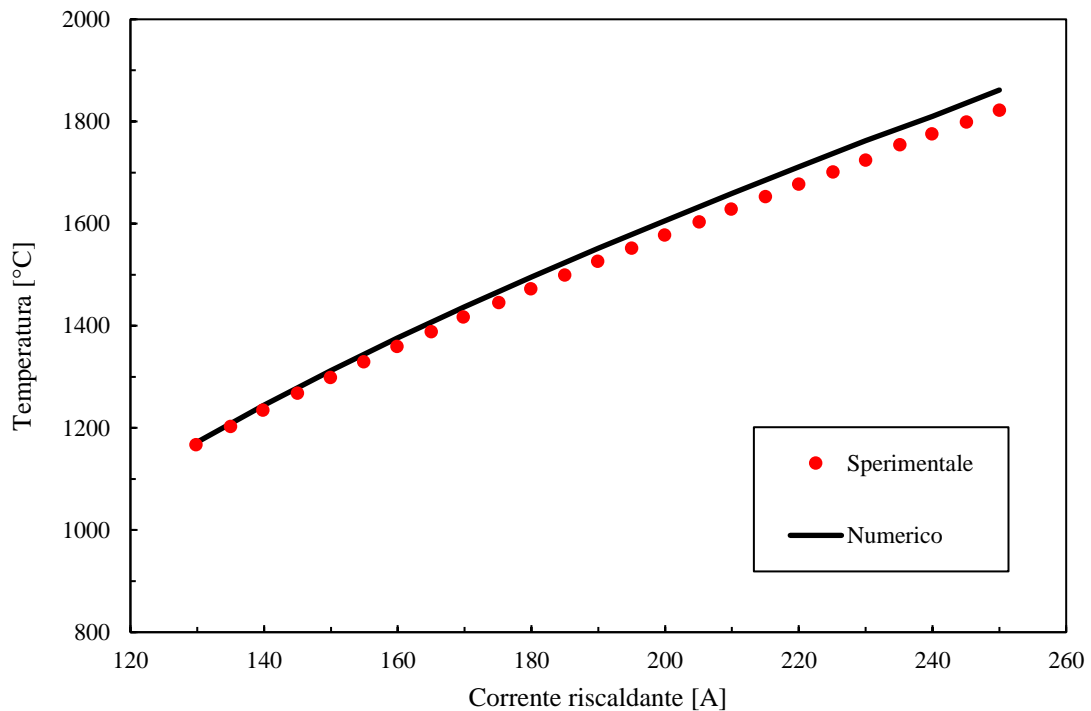


Figura A.20: andamento sperimentale e numerico della temperatura in corrispondenza della sommità del crogiolo in funzione della corrente riscaldante impostata.

A.5 Conclusioni

Durante questa parte del lavoro di tesi è stato descritto il crogiolo ed è stato creato un modello numerico in grado di rappresentare correttamente la realtà sperimentale nei campi fisici elettrico, termico e strutturale. È stato validato il modello misurando la tensione elettrica applicata dall'alimentatore e la temperatura massima in corrispondenza del centro dello spot circolare a temperatura massima.

Sono state effettuate delle analisi strutturali per sgrossare il problema della rottura dei crogioli, tenendo sempre ben presente l'elevato quantitativo di incertezza di cui il risultato è affetto. Per valutare l'incertezza, si potrebbe eseguire un'analisi di sensitività: si fanno variare le proprietà del materiale fonte di incertezza (modulo di Young e coefficiente di Poisson) e si misura la variabilità del risultato finale (tensioni principali). Una volta note le tensioni in gioco, è ipotizzabile sviluppare una futura famiglia di crogioli in grado di resistere a correnti riscaldanti maggiori. In alternativa, è possibile pensare ad una modifica alla condizione di vincolo del crogiolo, garantendo un grado di libertà traslazionale che permetta la libera deformazione.

Infine, con lo scopo di risolvere la problematica della variazione di densità della grafite, è stata ottenuta la resistività elettrica a partire dai dati disponibili. Questo, insieme alle misure effettuate presso l'EN-MME Mechanical Laboratory del CERN di Ginevra, ha permesso di riconvalidare il modello numerico.

APPENDICE B

An introduction to the Design Optimization in Ansys®

B.1 Introduction

The design problem is one of the most common engineering issues. Usually, a mechanical design problem involves constraints connected to the stress field, related to the used materials and required for the piece structural integrity, and connected to the displacement field, required, for instance, in order to guarantee the right matching between two gears.

Sometimes, an engineer has to solve a design problem involving not only constraints, but also some optimization requirements, such as i.e. the minimization of the mass or the volume.

In case of simple components, the engineer should be able to easily handle the problem with an analytical approach; however, if the structure is particularly complicated, a more sophisticated tool is required.

B.2 The optimization problem

In general, an optimization problem is made of:

- design variables: independent quantities, varied to achieve the optimum design;
- objective variables: dependent variable that you are attempting to optimize;
- state variables: design constraint quantities.

Every set of values assigned to the variables determines a particular configuration of the system. For each set, the value of the objective variable is calculated: the set of values that maximises or minimizes a value of the objective function, represents the set of values that optimizes the design. If this set also respect the design constraints, the set is called *feasible*.

In this context, the Ansys® design optimization tool is useful. This tool requires:

- a parametrical model: it's the numerical model of the structure to be optimized. It must be defined in a parametric way, in order to allow the definition of the design, objective and state variables;
- an analysis file: an Ansys® input file containing a complete analysis sequence (preprocessing, solution and postprocessing);
- a loop file: an optimization file (named *Jobname.loop*), created automatically through the analysis file. The design optimizer uses the loop file to perform analysis loops;
- an optimization database: a data file where are progressively written all the produced optimization variable definitions, parameters, optimization specification and accumulated design sets. This file is called *Jobname.opt*.

The following figure illustrates the information flow through an optimization process:

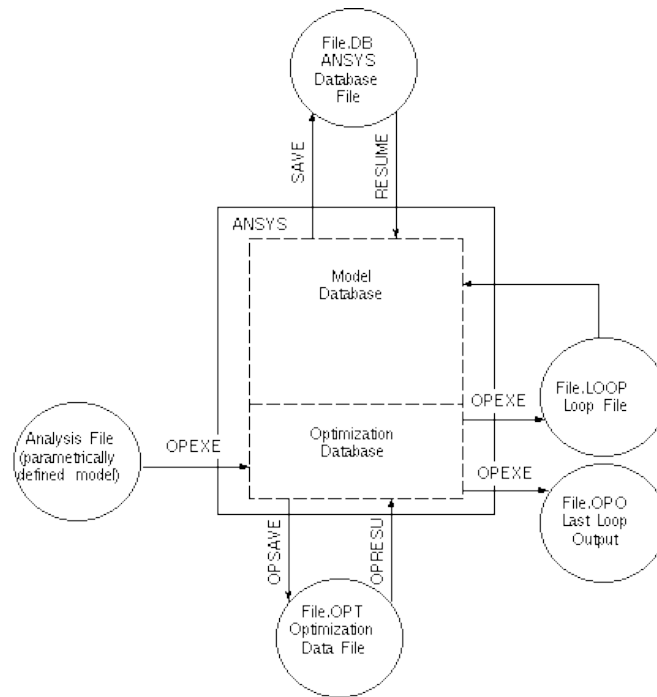


Figure B.1: information flow through an optimization process.

B.3 Example of design optimization

In order to clarify the implementation of the Ansys® design optimization tool, a simple example is shown, where:

- the parametric model is a cylindrical beam supported at its extremities and loaded with a vertical force in the middle;
- the objective is to find the beam diameter that minimizes the beam mass, with constraints on the maximum stress and maximum displacement allowed.

The design variable is the beam diameter D , the objective variable is the beam mass and the state variables are the maximum stress and the maximum displacement.

The analytical solution is now presented:

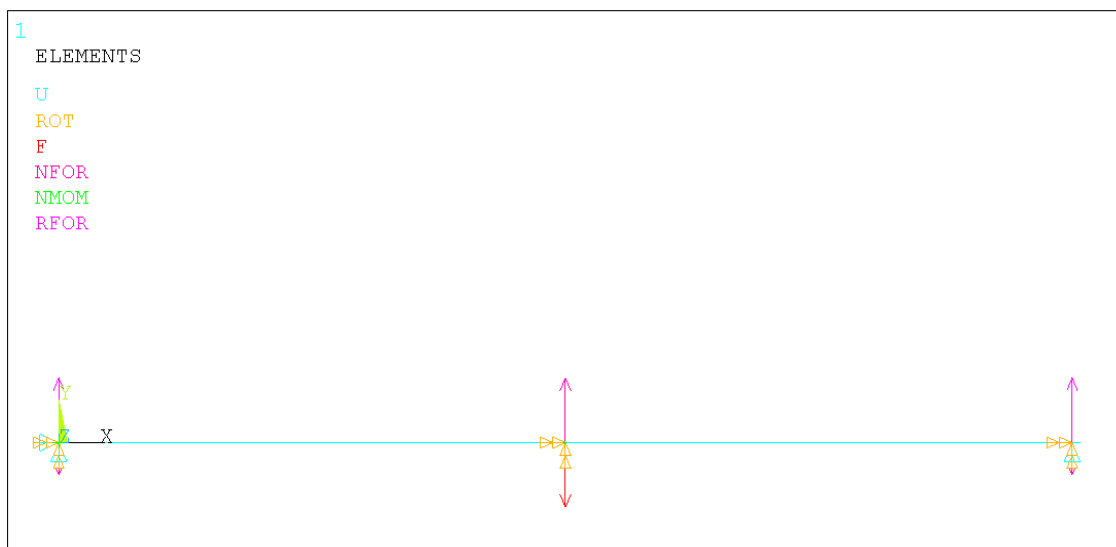


Figure B.2: representation of the numerical model in Ansys.

Data:

Load	10000 N
Beam length	2000 mm
Bending moment	5000000 Nmm
Young modulus	206000 MPa
Material density	7.80E-06 kg/mm ³
Moment of inertia	$I = \pi \cdot \frac{D^2}{64} \text{ mm}^4$
Maximum stress	$\sigma = \frac{M}{I} \cdot \frac{D}{2} \text{ MPa}$
Maximum displacement	$f = \frac{F \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot I} \text{ mm}$
Mass	$M = \pi \cdot \frac{D^2}{4} \cdot L \cdot \rho \text{ kg}$

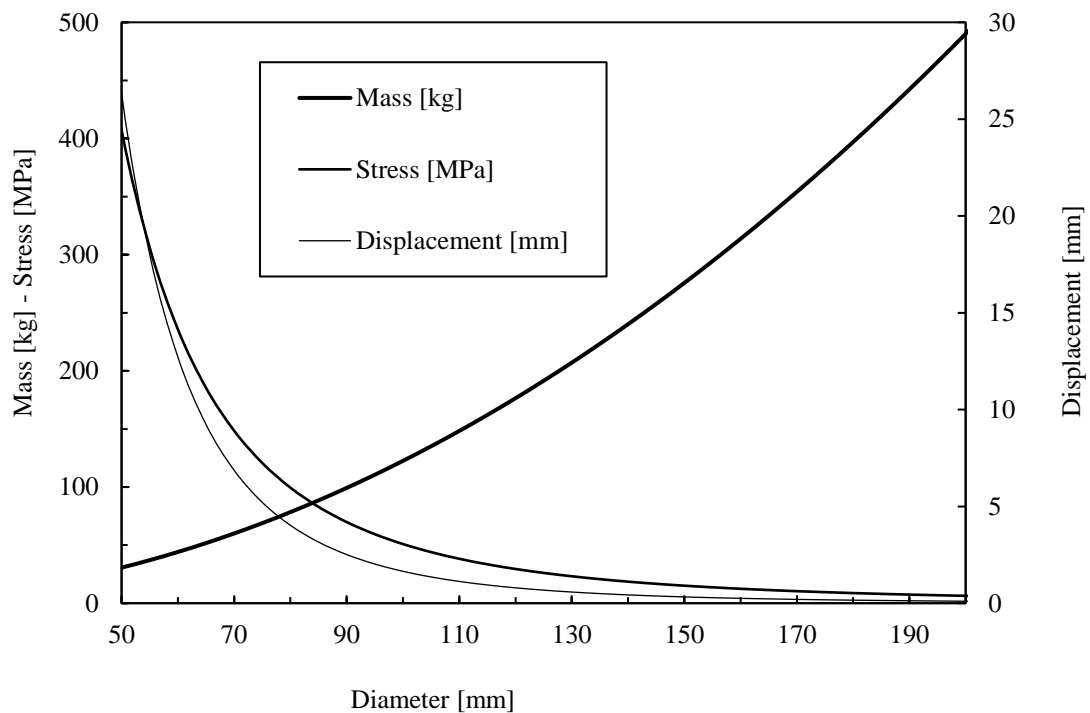


Figure B.3: problem variables as a function of the beam diameter.

With constraints of 145 MPa for the stress and 6 mm for the displacement, attempting to solve the problem graphically, you obtain a value of about 72 mm.

Indeed:

Moment of inertia	$I = \pi \cdot \frac{D^2}{64} = 1319167,32 \text{ mm}^4$
Maximum stress	$\sigma = \frac{M}{I} \cdot \frac{D}{2} = 136,45 \text{ MPa}$
Maximum displacement	$f = \frac{F \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot I} = 6,13 \text{ mm}$
Mass	$\pi \cdot \frac{D^2}{4} \cdot L \cdot \rho = 63,52 \text{ Kg}$

The numerical solution using the Ansys® design optimization tool is now presented.

Note: in recent Ansys® versions, the menu related to the design optimization has been removed, so the access to this tool is only available through the APDL language.

An APDL file built for an optimization process must follow these steps:

- the analysis file creation (*CREATE);
- the parameters definition and the output file writing (*CFOPEN);
- the numerical model bulding (/PREP7);
- the solution launch (/SOL);
- the postprocessing management (/POST1);
- the variables and the parameters definition (/OPT).

For first, the analysis file generation is required:

```
*CREATE,OptFun,mac
```

This command writes on the file Optfun.mac all the rows that follow the *CREATE command until the *EXIT command is met.

Then, enter into the preprocessor and define the iteration number:

```
/PREP7  
N=N+1
```

In order to allow the optimization tool to understand the problem variables, a parametrical model definition is required. The following commands define some needful parameters:

Defines the beam lenght [mm]:
L=2000

Defines the load value [N]:
LOAD=10000

Defines the material young's modulus [MPa]:
YOUNG_M=206000

Defines the material Poisson's coefficient [-]:
POISSON_C=0.3

Defines the material admissible stress [MPa]:
SADM=145

Defines the maximum admissible displacement [mm]:
DADM=6

Defines the beam transversal area:
AREA=ACOS(-1)*D**2/4

Defines the beam momentum of inertia:
IZZ=ACOS(-1)*D**4/64

Defines the height of the beam:
TOTAL_HEIGHT=D

Defines the beam mass:
MASS=ACOS(-1)*D**2/4*L*7800E-9

In order to export the data, the creation of a text file (*OPTIMIZATIONSTATE.txt*) is a good solution.

Open (or create) the required file:

```
*CFOPEN,OPTIMIZATIONSTATE,txt,,APPEND
```

Writes a blank character in order to space loops:

```
*VWRITE,' '
```

Writes 1 string character:

```
(A1)
```

Writes the iteration number:

```
*VWRITE,'N',N
```

Writes 8 string character, 4 spaces at the end; real number in 12 positions with 7 decimal positions:

```
(A8,4X,F12.7)
```

Writes the beam diameter with the format explained above:

```
*VWRITE,'D',D,'mm'
```

```
(A8,4X,F12.7,2x,A2)
```

Writes the beam mass with the format explained above:

```
*VWRITE,'MASS',MASS,'kg'
```

```
(A8,4x,F12.7,2x,A2)
```

Closes the file:

```
*CFCLOS
```

Then, the parametrical definition of the numerical model using the parameters defined above is required:

Adds the beam188 element and gives it the sectional and material properties:

```
ET,1,BEAM188
```

```
KEYOPT,1,2,1
```

```
KEYOPT,1,3,3
```

```
SECTYPE,1,BEAM,ASEC,CIRCLE
```

```
SECDATA,AREA,1,,IZZ,,1,,,,,TOTAL_HEIGHT
```

```
MP,EX,1,YOUNG_M
```

```
MP,PRXY,1,POISSON_C
```

Defines nodes, elements, displacements and loads:

```
N,1,0,0,0
```

```
N,2,1000,0,0
```

```
N,3,2000,0,0
```

```
E,1,2
```

```
E,2,3
```

```
D,1,UX,0
```

```
D,1,UY,0
```

```
D,3,UY,0
```

```
D,ALL,UZ,0
```

```
D,ALL,ROTX,0
```

```
D,ALL,ROTY,0
```

```
F,2,FY,-LOAD
```

Exits the preprocessor:

```
FINISH
```

For launching the solution, the solution menu needs to be entered and the SOLVE command to be used:

```
/SOL
```

```
SOLVE
```


Appendice B

FINISH

Now, the postprocessing phase has to be started and here the parameters required from the optimization tool are extrapolated:

Enter the postprocessor menu:

```
/POST1
```

Sorts nodes based on UY into descending order using absolute values

```
NSORT,U,Y,0,1
```

Gets the maximum deformation (DMAX):

```
*GET,DMAX,SORT,0,MAX
```

Creates an element table called SMAX with bending stress on the -y side of the beam:

```
ETABLE,SMAX,SMISC,33
```

Sorts the element table SMAX into descending order using absolute values:

```
ESORT,ETAB,SMAX,0,1
```

Gets the maximum stress (SMAX)

```
*GET,SMAX,SORT,0,MAX
```

Exits the postprocessor menu:

```
FINISH
```

Writes new results into the OPTIMIZATIONSTATE.txt file and saves all the results:

```
*CFOPEN,OPTIMIZATIONSTATE,txt,,APPEND
```

```
*VWRITE,'SMAX',SMAX,'MPa'
```

```
(A8,4x,F12.7,2x,A3)
```

```
*VWRITE,'DMAX',DMAX,'mm'
```

```
(A8,4x,F12.7,2x,A2)
```

```
*CFCLOS
```

```
SAVE
```

*Closes the macro file opened with the *CREATE command:*

```
*END
```

Now, the optimization phase needs to be started. Initially, enter inside the optimization menu:

```
/OPT
```

define the initial iteration number:

```
N=0
```

and define the analysis file to be used for the optimization looping:

```
OPANL,Optfun,mac
```

Then, the declaration of the variables has to be done. The OPVAR command specifies the variables as follow:

```
OPVAR, Name, Type, MIN, MAX, TOLER
```

- Name: parameter name;
- Type: design variable (DV), state variable (SV) or objective variable (OBJ);
- MIN: minimum value for this parameter. For Type=DV, MIN must be greater than 0.0 and defaults to 0.001*MAX; for Type=SV, there will be no lower limit if MIN is left blank, but if MIN=0.0, the lower limit is zero. MIN is ignored for Type=OBJ;

- MAX: maximum value for this parameter. Required for Type=DV and ignored for Type=OBJ. For Type=SV, there will be no upper limit if MAX is left blank, but if MAX=0.0, the upper limit is zero;
- TOLER: for Type=DV and OBJ, acceptable change between loops for convergence; defaults to 0.01*(current value) for OBJ and 0.01*(MAX-MIN) for DV. For Type=SV, defines feasibility tolerance. For double-sided SV limits (MAX and MIN specified), the default is 0.01*(MAX-MIN). For a single-sided SV limit (MAX or MIN specified), the default is 0.01*(specified limit) or, if the absolute value of the limit is < 1, the default is 0.01*(current SV value).

So, in this case:

```
OPVAR,D,DV,5,300,0.2
OPVAR,SMAX,SV,,SADM,0.1
OPVAR,DMAX,SV,-DADM,,0.05
OPVAR,MASS,OBJ,0,,0.1
```

Now it's useful to set a good starting point for the optimization process. In order to get this point, *Single loops run* can be done. For every single run, the attempt value of the dependent variable D has to be specified.

In order to perform the optimization, the commands OPTYPE and OPEXE has to be used. The specifications are as follow:

- OPTYPE: specifies the optimization method to be used (SUBP for the subproblem approximation method, FIRST for the first order optimization method, RAND to perform random iterations, RUN to perform a single optimization run, SWEEP to perform global sweeps through global design space);
- OPEXE: initiates the optimization looping using the method specified by the OPTYPE command.

So, the commands used to perform single loops run are the following:

```
D=100
OPTYPE,RUN
OPEXE
```

```
D=25
OPTYPE,RUN
OPEXE
```

```
D=200
OPTYPE,RUN
OPEXE
```

Now, the real optimization can be started, but the analysis file and the variables have to be specified again:

```
OPANL,OptFun,mac
OPVAR,D,DV,5,300,0.2
OPVAR,SMAX,SV,,SADM,0.1
OPVAR,DMAX,SV,-DADM,,0.05
OPVAR,MASS,OBJ,0,,0.1
```

In this exercise, we can use the subproblem approximation method, specifying 30 as the maximum number of iterations using the command OPSUBP:

```
OPTYPE,SUBP
OPSUBP,30
OPEXE
```

Finally, the command FINISH has to be used to exit the optimization menu:

```
FINISH
```

In order to close the Ansys® window and save everything, you can use:

Appendice B

/EXIT,ALL

The results of the optimization looping are written into the *OPTIMIZATIONSTATE.txt* file. The solution with the minimum mass is the best solution. The best feasible design can also be found into the file *Jobname.opt*.

N 15.0000000
D 72.3586541 mm
MASS 64.1498197 kg
SMAX 134.4307647 MPa
DMAX -6.0277963 mm

N	D	MASS	SMAX	DMAX
1	100,00	122,52	50,93	-1,66
2	25,00	7,66	3259,49	-422,07
3	200,00	490,09	6,37	-0,11
4	99,05	120,21	52,41	-1,72
5	98,40	118,63	53,45	-1,77
6	97,92	117,47	54,25	-1,80
7	97,53	116,54	54,90	-1,83
8	97,16	115,67	55,52	-1,86
9	96,82	114,86	56,11	-1,88
10	90,94	101,33	67,72	-2,42
11	83,49	85,40	87,52	-3,40
12	75,74	70,29	117,21	-5,02
13	72,73	64,82	132,36	-5,90
14	72,39	64,21	134,25	-6,02
15	72,36	64,15	134,43	-6,03

Table B.1: values of the variables at each calculation step.

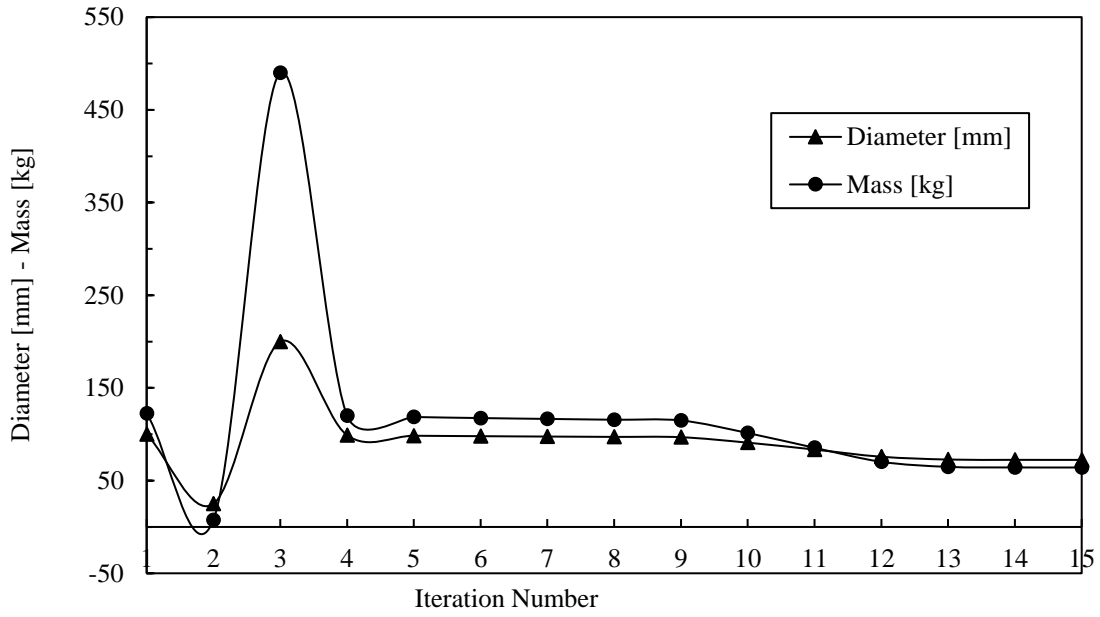


Figure B.4: values of the diameter and the mass at each calculation step.

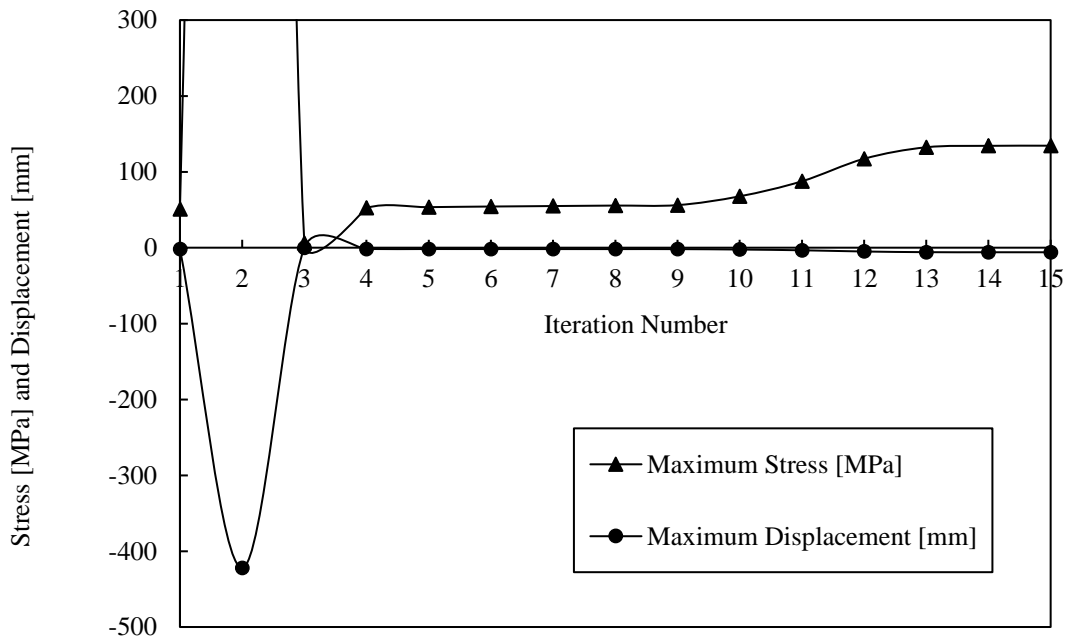


Figure B.5: values of the maximum stress and the maximum displacement at each calculation step.

APPENDICE C

Studio del dispositivo per la riproduzione di intensi gradienti termici mediante Ansys® Workbench

C.1 Introduzione

L'analisi numerica agli elementi finiti rappresenta uno strumento potente e flessibile che permette di assistere il progettista nello svolgimento delle sue mansioni. Il mercato dei software mette in campo numerose soluzioni, ognuna particolarmente indicata per determinate tipologie di analisi: analisi strutturale, analisi fluidodinamica, analisi modale, analisi di processo e così via.

Nel contesto di questo lavoro di tesi, è stato utilizzato il pacchetto Mechanical APDL appartenente al software Ansys®: tale strumento è stato in grado di riprodurre la realtà sperimentale e, attraverso un complesso algoritmo di ottimizzazione, in grado di stimare la conducibilità termica dei materiali costituenti i dischi di prova. La famiglia di prodotti di Ansys® offre numerose altre possibilità di studio, ognuna a sé stante. Nel corso degli ultimi anni, è stata sviluppata un'interfaccia in grado di collegare tutti gli ambienti di simulazione, unendo la possibilità di svolgere analisi di una certa complessità alla facilità d'utilizzo: Ansys® Workbench. La realtà industriale e della ricerca si sta muovendo a favore di questa piattaforma: gli stessi sviluppatori, nel corso degli anni, hanno trasportato la possibilità di eseguire alcune particolari funzionalità dagli strumenti classici a Workbench. Lo strumento *Design Optimization*, che permette di interagire con gli algoritmi di ottimizzazione interni ad Ansys®, è stato eliminato dall'interfaccia grafica del Mechanical APDL (e del relativo Help, permettendone l'utilizzo solo tramite script) ed implementato in Workbench; ciò è significativo della spinta che i creatori stanno dando in favore di quest'ultimo.

A valle di queste considerazioni, si può facilmente comprendere come nasca la necessità di trasferire il know-how tecnico dalle interfacce classiche a Workbench, sempre di più largo impiego. A tal proposito, dalla collaborazione tra l'Università degli Studi di Padova e l'INFN di Legnaro, nell'ambito del corso di Calcolo e Progetto di Sistemi Meccanici tenuto dal Prof. Giovanni Meneghetti, è nata la possibilità di affrontare lo studio dell'apparato sperimentale per la riproduzione di forti gradienti termici mediante l'utilizzo di Ansys® Workbench. Lo studio è stato condotto da un gruppo di tre ottimi studenti e supervisionato dall'autore e dai correlatori della presente tesi ed ha lo scopo principale di trasferire quanto presente in APDL in Workbench, descrivendo accuratamente i passi da seguire.



Figura C.1: logo di Ansys® rappresentante la necessità di passare dall'APDL all'ambiente Workbench.

C.2 Costruzione del modello elettro-termo-strutturale semplificato

Il primo step del lavoro è consistito nella creazione del modello numerico dell'apparato sperimentale. Poiché lo strumento numerico è totalmente nuovo e non si è a conoscenza di molte sue funzioni, è stato deciso, come primo approccio, di costruire un modello numerico semplificato, costituito, cioè, dal solo sistema disco-crogiolo.

C.2.1 Inserimento delle proprietà dei materiali

Per prima cosa, è necessario introdurre le proprietà dei materiali necessarie allo svolgimento delle simulazioni. Per fare ciò, nella sezione *Engineering Data* è possibile scegliere un materiale tra quelli più comuni già presenti nella libreria di Workbench, oppure esiste la possibilità di creare un nuovo materiale inserendo le proprietà di cui si necessita.

Una volta scelta la tipologia di analisi che si intende effettuare, si esegue un doppio clic sulla sezione *Engineering Data*: il materiale scelto di default dal programma è lo *Structural Steel*; per eliminarlo, basta cliccare col tasto destro e selezionare *Delete* (Figura C.2).

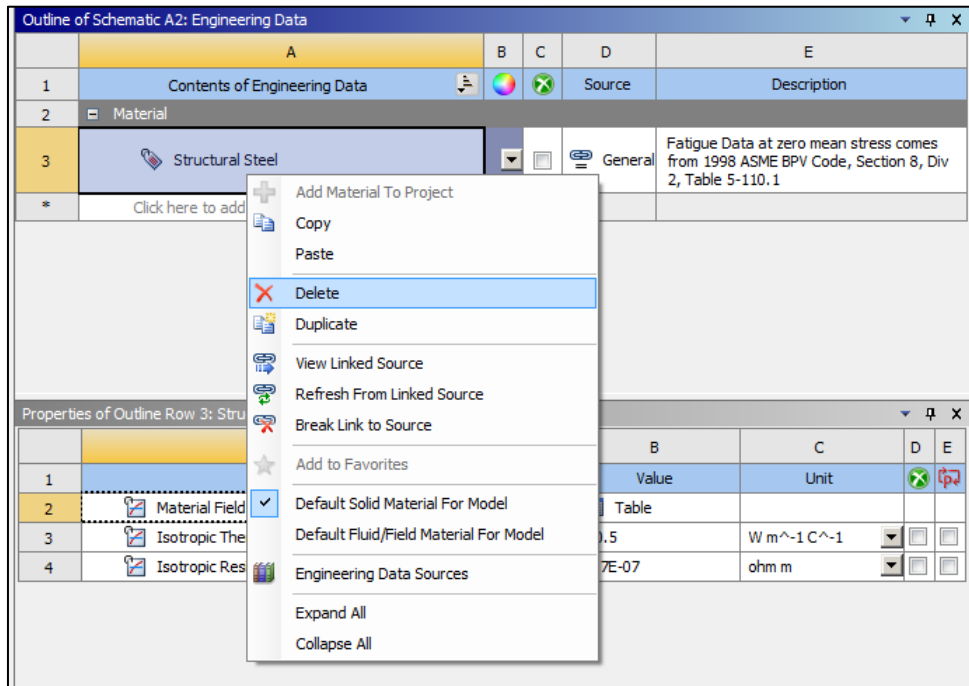


Figura C.2: screenshot relativo alla possibilità di eliminare il materiale esistente.

Per la creazione di un nuovo materiale, è sufficiente inserire il nome di quest'ultimo all'interno della sezione vuota e premere invio. Successivamente, è necessario definire le proprietà del materiale relative al campo fisico di appartenenza alla tipologia di analisi precedentemente inserita. Per fare ciò, con il materiale ancora selezionato, eseguire doppio clic sulle proprietà desiderata all'interno del *Toolbox* laterale: queste compariranno all'interno della *Properties of Outline* (Figura C.3).

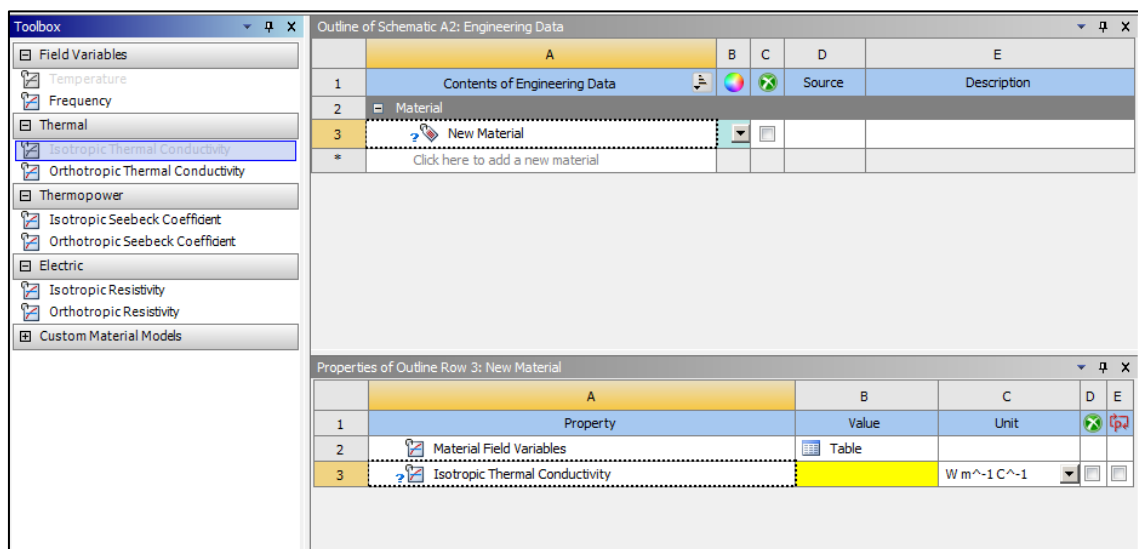


Figura C.3: creazione di un nuovo materiale ed impostazione delle relative proprietà.

I valori delle proprietà vanno inseriti all'interno della *Table of Properties*, una tabella in cui si esprime la proprietà in funzione della temperatura (in generale, in funzione di una variabile indipendente che è possibile definire). Una volta scelta anche l'unità di misura, la proprietà verrà diagrammata nella *Chart of Properties* (un esempio è riportato in Figura C.4).

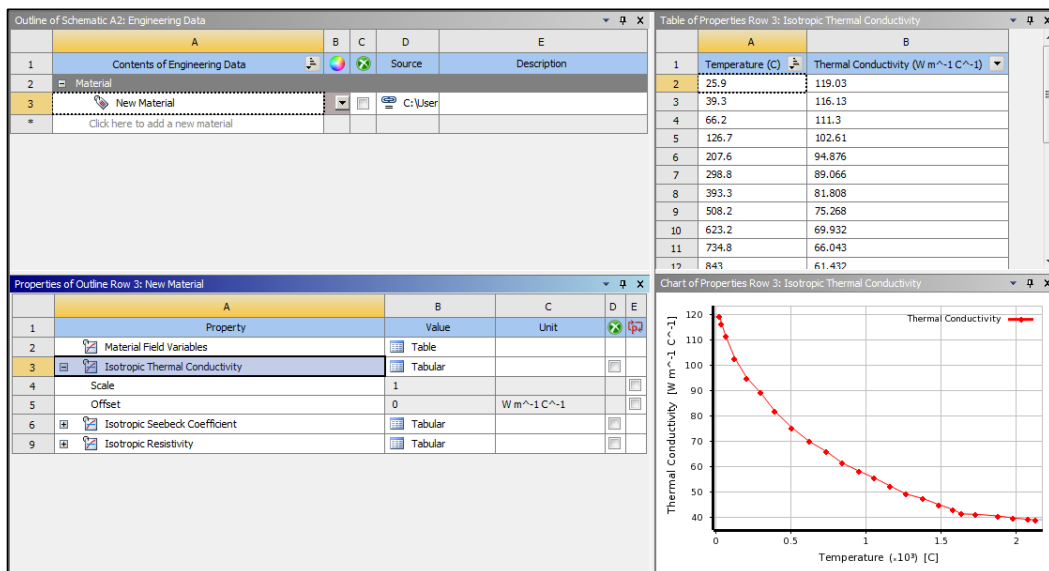


Figura C.4: raffigurazione conclusiva del processo di inserimento di una proprietà del materiale (la conducibilità termica in questo caso).

Spesse volte, lo stesso materiale viene utilizzato per lo svolgimento di numerose analisi, anche per progetti di diversa tipologia. Si rende pertanto necessaria l'esportazione della banca dati del materiale, in modo da poter essere utilizzato in altri contesti. Workbench fornisce la possibilità di esportare un file, in formato *xml*, selezionando il materiale all'interno delle Engineering Data e seguendo il percorso *File > Import/Export > Engineering Data*. Così facendo, si genera un file xml contenente tutte le proprietà che è possibile richiamare in qualsiasi altro modello.

Nel caso in cui si debbano eseguire più analisi in serie tra loro, pertinenti a campi fisici diversi, è consigliabile utilizzare gli strumenti a *blocco*, presente all'interno della tendina a sinistra della schermata principale (*Project Schematic*), *Engineering Data* o *Mechanical Model* (uno alternativo all'altro; nel secondo è anche possibile inserire la geometria e creare il modello separatamente all'analisi). L'utilizzo è consigliato in quanto, se si inseriscono le proprietà direttamente all'interno dell'Engineering Data dell'analisi, è possibile inserire le sole proprietà pertinenti al campo fisico dell'analisi. In Figura C.5 è riportato un esempio di uno schema a blocchi di analisi relative a diversi campi fisici che condividono i medesimi Engineering Data.

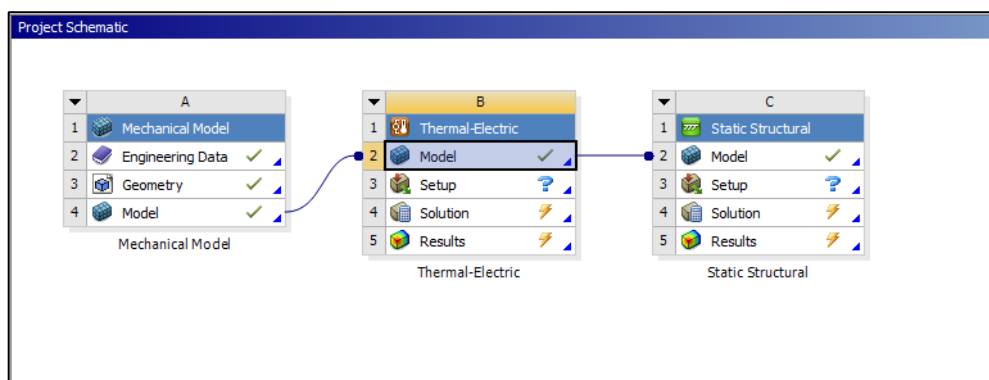


Figura C.5: schema a blocchi di analisi di diverso tipo in cui esiste una condivisione degli Engineering Data.

La presenza del *tic* verde affianco alla sezione ne indica il corretto inserimento.

I materiali oggetto di questo studio sono stati la grafite POCO EDM-3® ed il carburo di silicio Hexoloy® SiC SA. Il primo è utilizzato per la realizzazione del crogiolo e di alcuni dischi, mentre il secondo solo per i dischi.

L'analisi termo-elettrica richiede di specificare due proprietà del materiale, cioè la resistività elettrica e la conducibilità termica (l'emissività sarà specificata in seguito); non è richiesto il calore specifico in quanto l'analisi è di tipo stazionario. I valori delle due proprietà per entrambi i materiali sono stati reperiti in letteratura e vengono riportati in corrispondenza dell'Appendice relativa come funzione della temperatura.

C.2.2 Inserimento delle geometrie

Una volta completata la procedura per la scelta o la definizione del materiale, è necessario passare alla creazione della geometria sulla quale poi verrà stesa la mesh. Cliccando col tasto destro sulla cella *Geometry* (Figura C.6), si nota che il software permette di operare con due diversi modellatori: il *DesignModeler* e lo *SpaceClaim*; entrambe le soluzioni integrano un CAD in grado di creare, importare e modificare una qualsiasi geometria. In questo lavoro, è stato utilizzato il primo, ma tutte le successive operazioni possono essere eseguite anche con il secondo.

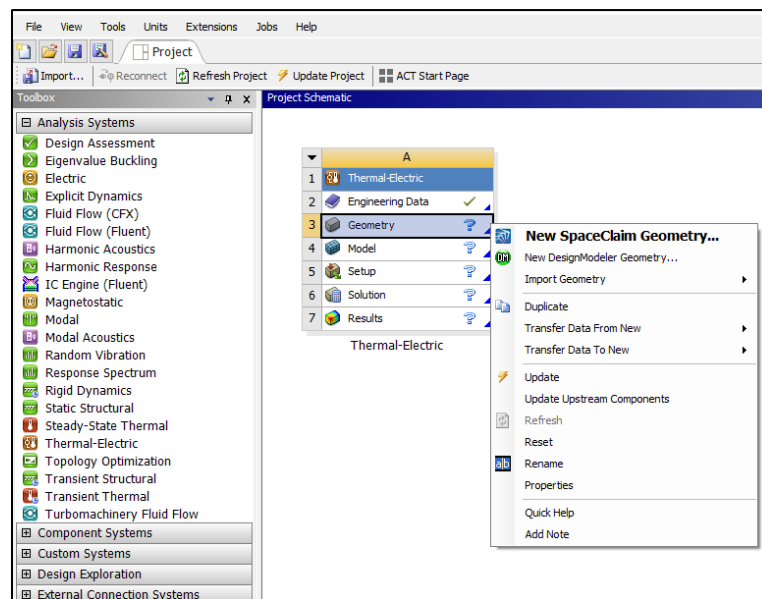


Figura C.6: avvio del CAD per l'inserimento della geometria.

Una volta avviato il DesignModeler, è possibile creare la geometria. Per prima cosa, è necessario impostare l'unità di misura in mm: *Barra dei menù > Units > Millimeter*. Si può procedere quindi con l'importazione della geometria del crogiolo, precedentemente creata, attraverso il percorso *File > Import External Geometry File....* Dopo aver eseguito ogni azione, è necessario cliccare sul tasto *Generate*.

Dopo queste operazioni, nell'area *Graphics* è apparsa la geometria importata. Dato che la mesh che si stenderà successivamente non avrà dimensione di elemento costante, è necessario suddividere il componente in più parti, in modo tale da poter discriminare la dimensione media da assegnare a ciascuna zona a seconda dell'infittimento desiderato. Nel presente caso, è opportuno suddividere la geometria in cinque diverse parti, due corrispondenti alle parti prismatiche del crogiolo, due alle parti di raccordo ed una alla parte centrale a più alta temperatura. Per suddividere la geometria, è necessario creare dei piani: per crearli è essenziale selezione i vertici per cui si vuole farlo passare. In Figura C.7 è riportato un esempio di creazione di un piano passante per tre punti.

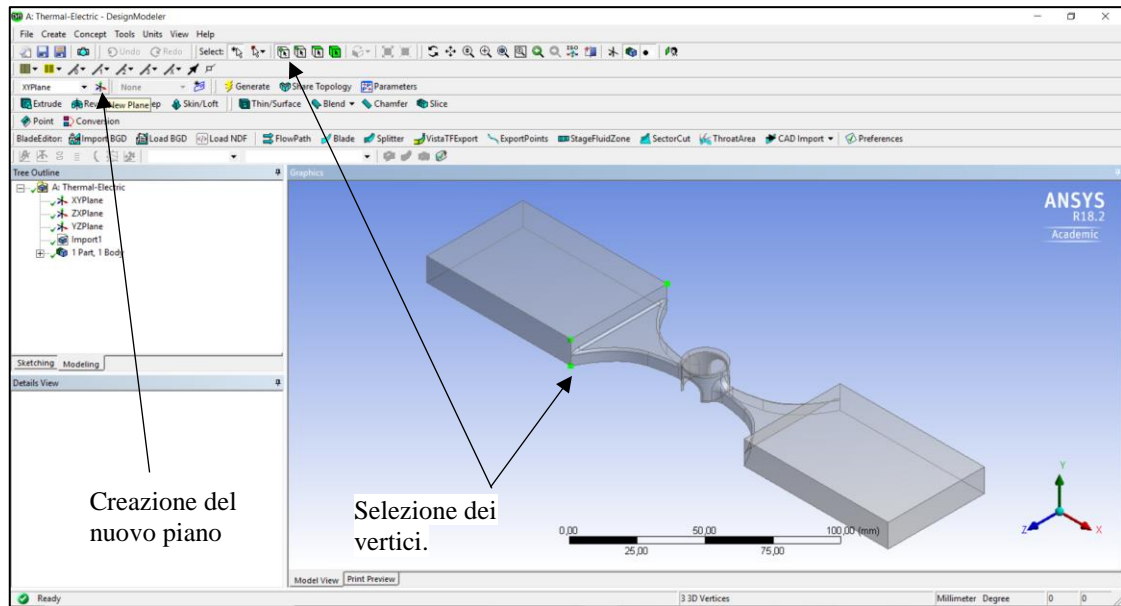


Figura C.7: selezione dei vertici e creazione di uno dei piani necessario alla suddivisione della geometria.

Successivamente, nel riquadro *Details View*, impostare: *Transform 1 > Offset Z* e *FD1, Value 1 > 6 mm*. In questo modo, dopo aver cliccato *Generate*, sarà creato il piano desiderato. Infine, attraverso il percorso *Barra dei menù > Create > Slice* è possibile suddividere la geometria; cliccare *Apply* e successivamente *Generate* per completare il processo.

Si procede in maniera analoga per le altre parti, ottenendo nel *Tree Outline* la dicitura *5 Parts, 5 Bodies*. In Figura C.8 è riportata la suddivisione finale in cui ogni parte è caratterizzata da un diverso colore.

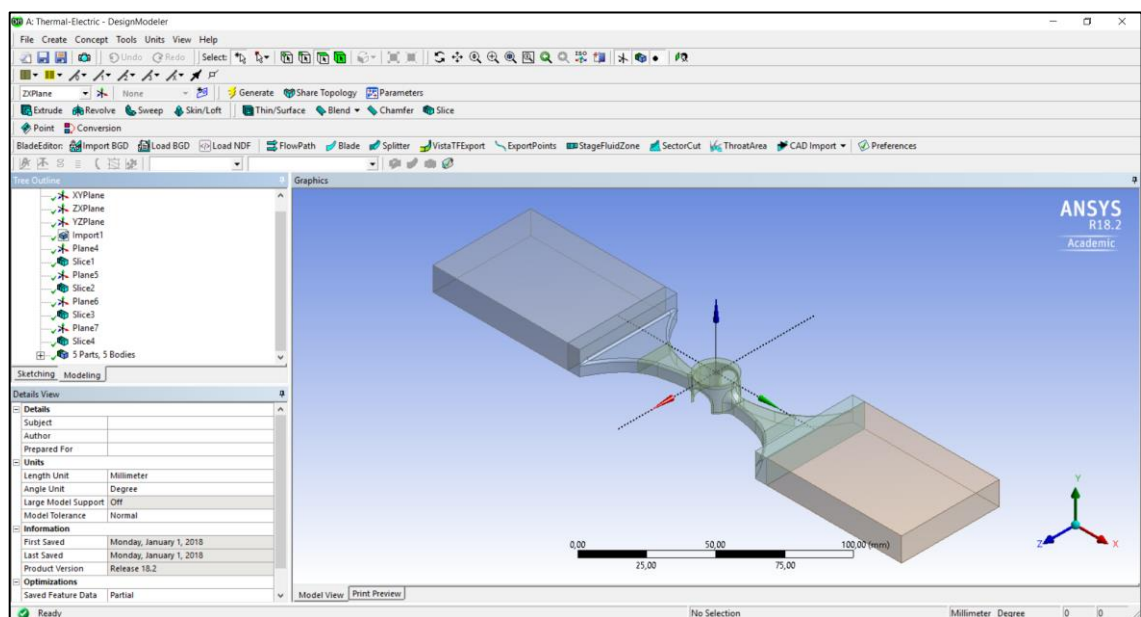


Figura C.8: risultato della suddivisione del crocholo.

Ora le 5 parti create risultano tra loro separate e non appartenenti ad un unico solido, pertanto non condivideranno i nodi della mesh come un solido continuo. Per risolvere questa situazione, è necessario espandere la dicitura *5 Parts, 5 Bodies*, selezionare le cinque parti, cliccare il tasto destro e selezionare *Form New Part* (Figura C.9). Dopo questa operazione, la dicitura diventerà *1 Parts, 5 Bodies*.

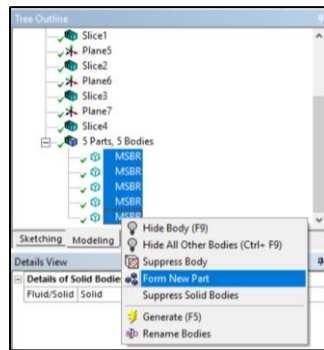


Figura C.9: unione delle cinque parti in un unico solido continuo.

Il passo successivo prevede la creazione del disco. Per tale oggetto non è necessario importare una geometria dedicata, ma è sufficiente crearla all'interno del modellatore. Il primo step prevede la creazione di un piano, al di sopra dello spot centrale del crogiolo, in corrispondenza del quale si andrà a creare lo schizzo del disco e la successiva estrusione. Per la creazione del piano si procede selezionando dal *Tree Outline* il piano ZX, si clicca su *New Plane* e si impone un offset lungo Z della quota necessaria, ad esempio 1 mm, e poi si clicca *Generate*. Si seleziona quindi il piano appena creato e poi si clicca su *New sketch*. Sopra al riquadro *Detail View*, si seleziona *Sketching* per poter accedere alla finestra *Sketching Tollboxes* dal quale è possibile scegliere la tipologia di geometria da generare. Si sceglie *Circle* e si sposta il cursore in corrispondenza dell'origine del piano aspettando che appaia la lettera P indicante l'esatto posizionamento sull'origine. Ora è possibile tracciare una circonferenza di diametro a piacere. Dopo questi passaggi, si ottiene quanto mostrato in Figura C.10.

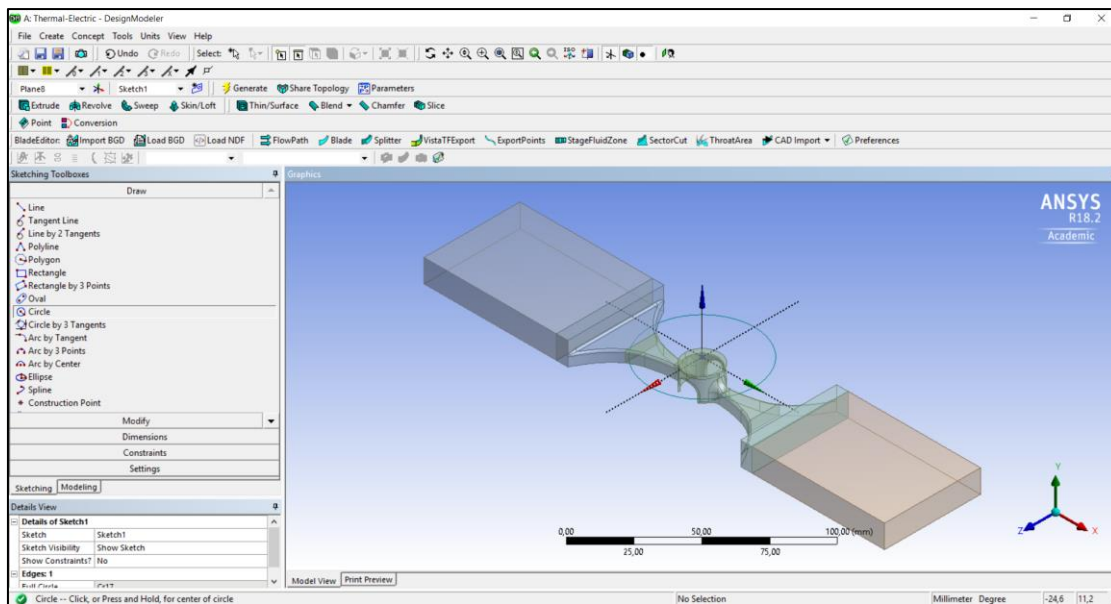


Figura C.10: creazione della circonferenza base del disco.

Espandendo il menù *Dimensions* è possibile controllare il raggio della circonferenza attraverso il comando *Radius*. Dopo aver cliccato su *Generate*, è possibile estrudere la circonferenza creata attraverso il comando *Extrude*.

Ora che la geometria è stata completamente definita, è possibile chiudere l'ambiente di modellazione e passare alla stesura della mesh.

C.2.3 Assegnazione del materiale e creazione della mesh

Dopo aver definito completamente la geometria, è necessario stendere la mesh. Per poter stendere la mesh è prima indispensabile assegnare ad ogni corpo un materiale. Dall'*Outline*, seguire il percorso *Geometry > crogiolo > parte sx* (una delle parti in cui il crogiolo è stato precedentemente suddiviso). Ora, nel riquadro *Details*, selezionare *Material > Assignment > EDM-3* (Figura C.11).

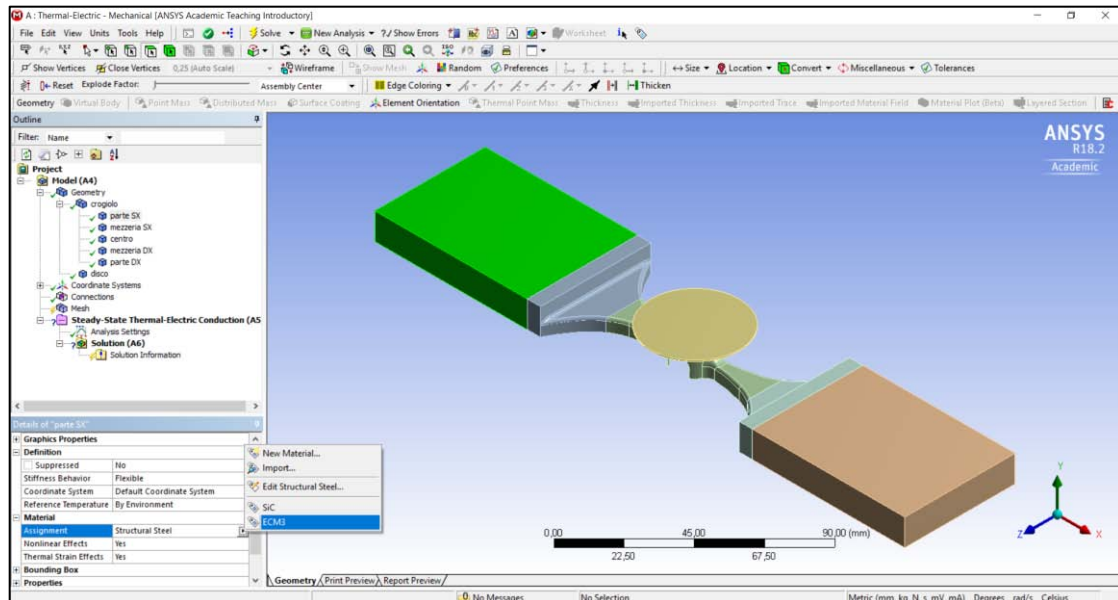


Figura C.11: assegnazione del materiale di una delle parti in cui è stato suddiviso il crogiolo.

Ripetendo l'operazione per ogni parte del crogiolo e per il disco, si completa l'assegnazione dei materiali a tutta la geometria.

A questo punto, si può procedere con l'assegnazione della mesh. Dal riquadro *Outline* fare clic su *Mesh*. Nel riquadro *Details* espandere la cella *Sizing* e impostare *Uniform* come *Size Function*. Tornare al riquadro *Outline* e fare clic con il tasto destro su *Mesh*, quindi *Insert Size*. Questo comando permette di definire la dimensione dell'elemento e può agire, in base alla selezione, sul corpo interno e quindi come *global size*, oppure su una linea e quindi come *line size*, oppure su una faccia. Selezionare le due parti intermedie del crogiolo e cliccare *Apply*. Di fatto si va ad applicare una *Body Size*. Nel riquadro *Details* impostare 4 mm nella cella *Element Size*, *Uniform* nella cella *Size Function* e *Soft* nella finestra *Behavior*. Queste due funzioni permettono di estendere in modo uniforme la dimensione su tutto il volume, ma di passare in modo graduale dalla dimensione di un elemento di un corpo adiacente a quella impostata per il corpo selezionato. A questo punto, è necessario suddividere gli spigoli dei due parallelepipedi in modo opportuno per ottenere un infittimento graduale verso il centro del crogiolo. Per fare ciò, cliccare con il tasto destro su *Mesh > Insert > Size*; selezionare i 4 lati lunghi di ogni parallelepipedo e cliccare *Apply*. In *Details* impostare *Element Size* 6 mm ed attivare la cella *Bias Type* scegliendo l'opzione che consente di infittire in direzione del crogiolo. Impostare *Bias Factor* su 1,5. Si suddividono anche gli spigoli delle facce dei parallelepipedi rivolte verso il centro. Per prima si inserisce una *Size*, poi si selezionano gli spigoli e si imposta *Element Size* su 4 mm. A questo punto la suddivisione è corrispondente a quella di Figura C.12

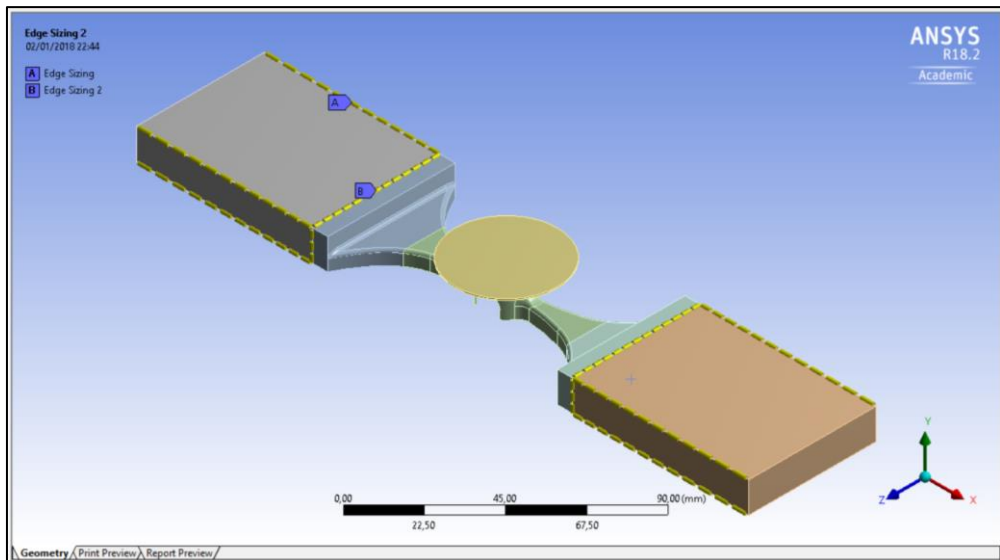


Figura C.12: sizing delle varie parti del crogiolo.

Si passa ora a definire la parte centrale inserendo una nuova *Sizing* selezionando il volume centrale e impostando *Element Size* pari a 2.5 mm. Si crea un ulteriore infittimento inserendo ancora una *Sizing* e selezionando le superfici di raccordo mostrate in blu in Figura C.13 con *Element Size* pari 1,5mm.

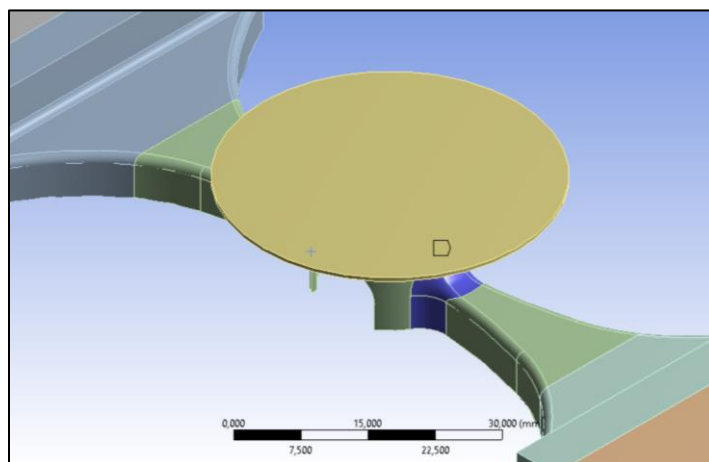


Figura C.13: sizing delle superfici di raccordo.

Si infittisce ulteriormente in corrispondenza della zona centrale del crogiolo selezionando la superficie esterna ed interna del cilindro imponendo *Element Size* pari a 1 mm, come in Figura C.14.

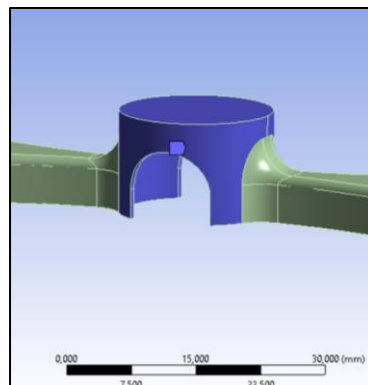


Figura C.14: sizing in corrispondenza della parte centrale del crogiolo.

Come ultimo passo non resta che definire la dimensione degli elementi del disco inserendo ancora *Sizing* con tasto destro su *Mesh*, selezionando il disco ed imponendo *Element Size* pari a 1,5 mm.

Si può ora creare la mesh facendo clic col tasto destro su *Mesh*, quindi *Generate Mesh*. Il risultato di tutto il processo è riportato in Figura C.15 ed in Figura C.16.

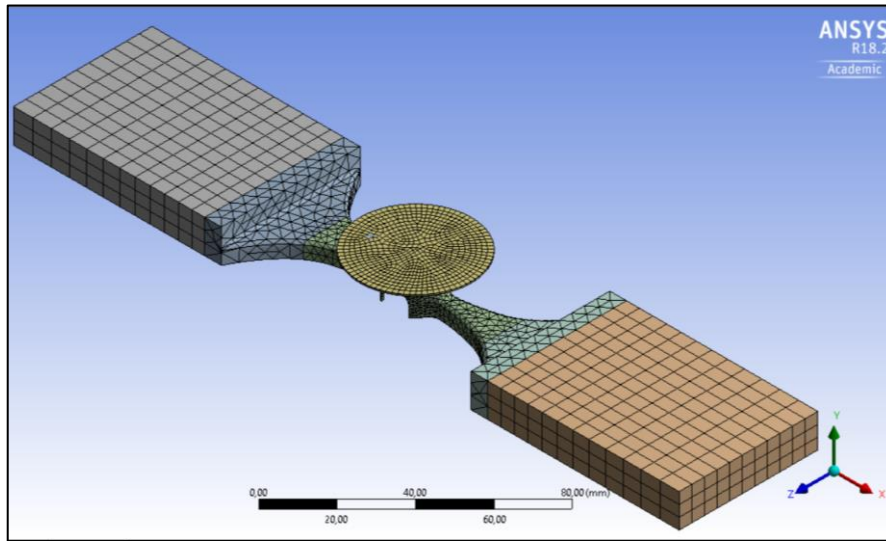


Figura C.15: mesh completa.

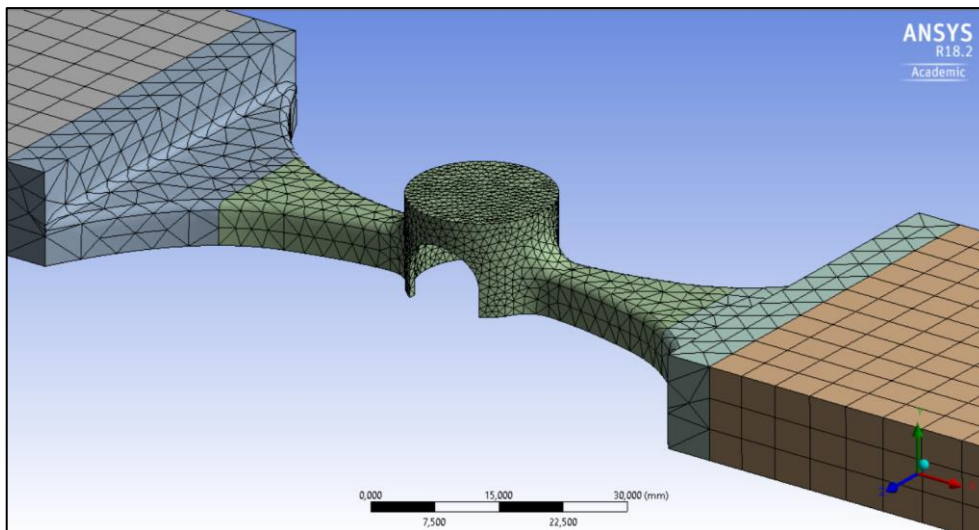


Figura C.16: dettaglio della mesh in corrispondenza della parte centrale del crogiolo.

Workbench offre un interessante strumento per indagare la qualità generale della mesh. Prima tra tutti è la possibilità di visualizzare la qualità degli elementi in termini di regolarità di forma seguendo il percorso: *Mesh* > *Details* > *Display Style: Element Quality*. Il risultato è riportato in Figura C.17.

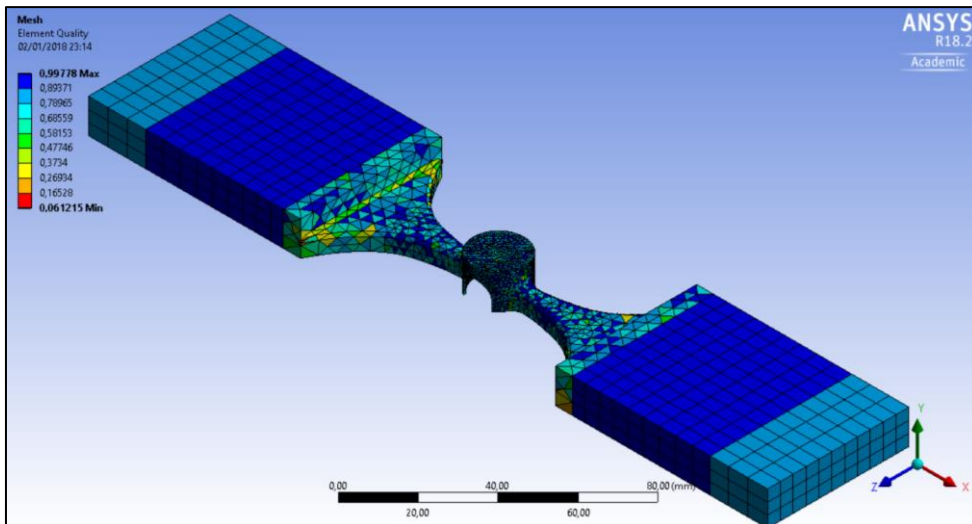


Figura C.17: risultato del controllo della qualità della mesh.

La scala di valutazione va da un minimo di 0 (bassa qualità, evidenziati col colore rosso) ad un massimo di 1 (alta qualità, evidenziati col colore blu). Nelle zone di maggiore interesse, gli elementi risultano di buona qualità, pertanto ci si può ritenere soddisfatti.

Interessante risulta essere la possibilità di sezionare la geometria per analizzare la forma degli elementi interni al volume (Figura C.18). Per fare ciò, è necessario cliccare su *New Section Plane* e tracciare una linea a piacere.

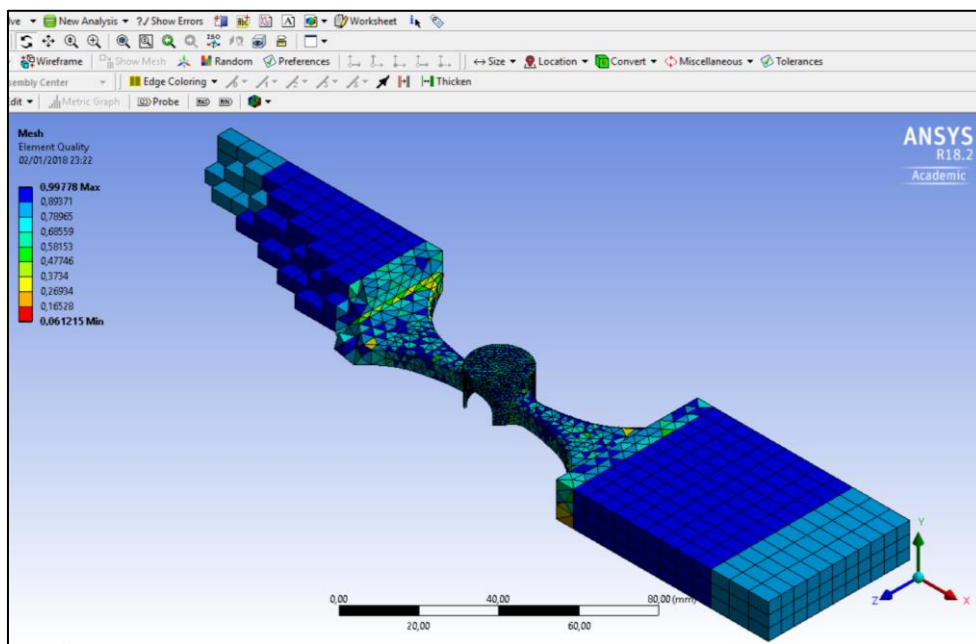


Figura C.18: sezione della geometria per poter analizzare la qualità degli elementi interni.

A differenza del software APDL, in cui per poter procedere con l'analisi è necessario impostare il tipo di elemento che si vuole utilizzare, in Workbench questa scelta è presa autonomamente dal software. Questo criterio può risultare vantaggioso in quanto velocizza la fase di *pre-processing* ed ottimizza la scelta degli elementi in base all'analisi da svolgere, soprattutto per utenti con poca esperienza, ma non permette un controllo diretto sull'analisi. È tuttavia possibile impostare manualmente gli elementi che si desidera utilizzare agendo sulla *Command*, la quale rappresenta un'interfaccia all'apparenza simile all'APDL, ma con un linguaggio differente. La scelta può essere effettuata selezionando il corpo da definire, clic con il tasto destro e scegliendo l'opzione *Command*. Successivamente, è sufficiente digitare nella finestra di dialogo la stringa: *ET,MATID,XXXXXX* (i nomi degli elementi sono i medesimi del linguaggio APDL).

Nel presente lavoro, si è lasciato che il software decida quali elementi utilizzare, in maniera da avere i migliori risultati nel minor tempo di calcolo possibile, per poi controllare la scelta fatta nella fase di *post-processing*. La definizione dell'elemento non viene fatta durante la fase di *meshing*, ma all'interno del solutore, per cui è necessario attendere la soluzione per verificare nella sottocartella *Solution Information* la scelta effettuata. Nel presente caso, gli elementi scelti autonomamente dal software sono stati:

- SOLID226: è un elemento *Brick* a 20 nodi (Figura C.19) che supporta analisi accoppiate Elettro-Termiche-Strutturali. Questo elemento è impiegato nella realizzazione della parte *mapped* del crogiolo;

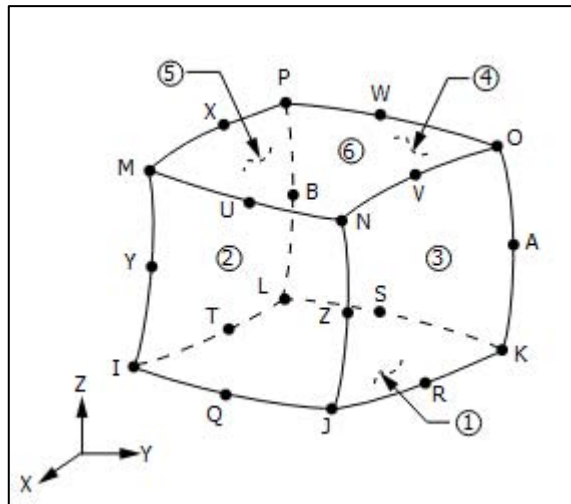


Figura C.19: elemento SOLID226.

- SOLID227: è un elemento tetragonale a 10 nodi (figura 1.27) e, come il SOLID226, supporta analisi accoppiate Elettro-Termiche-Strutturali. La restante parte del crogiolo e il disco sono realizzati con questa tipologia di elemento.

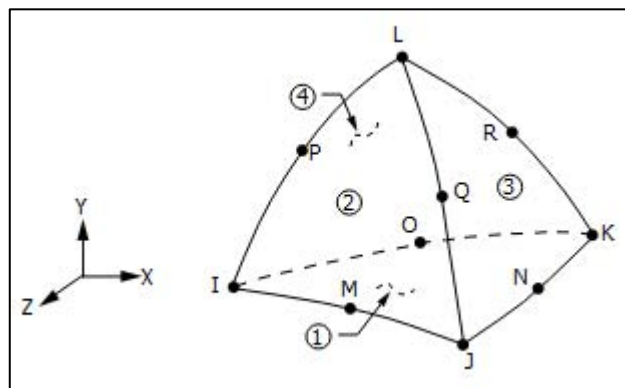


Figura C.20: elemento SOLID227.

- SURF252: è un elemento planare a 4 nodi. Viene spalmato su tutta la superficie esterna del modello esattamente al di sopra degli elementi solidi. Questo non ha gradi di libertà nodali e viene utilizzato solamente dal *Radiosity Solver* per analizzare lo scambio termico dovuto all'irraggiamento.

C.2.4 Impostazione dell'analisi elettro-termica

Una volta stesa la mesh, si possono impostare carichi e vincoli necessari per completare l'analisi. Come primo step, è necessario stabilire la temperatura ambientale: clic su *Steady-State Thermal-Electric Conduction* dal riquadro *Outline* e nel riquadro *Details* assegnare *Environment Temperature* pari a 50 °C. Il presente tipo di analisi prevede, come condizione di carico, il passaggio di una corrente variabile den tempo, al fine di riscaldare la parte centrale del crogiolo che andrà ad irraggiare il disco. Il primo step da effettuare è

la definizione del numero di step di corrente e quindi gli step di analisi. In questo caso, con corrente variabile da 130 A a 260 A con step di 10 A, sono necessari 14 step da 1500 secondi ciascuno, tranne il primo di 3000 s (tempo necessario ad assicurare al sistema di raggiungere l'equilibrio). Tuttavia, Workbench non permette di impostare il carico a gradino, pertanto è necessario definire degli step intermedi molto brevi, della durata di 1 s, nei quali la corrente aumenta di 10 A. Per impostare quanto descritto, selezionare *Outline > Analysis Settings*. Nel riquadro *Tabular Data* in basso a destra, si inseriscono gli step desiderati, come in Figura C.21.

Tabular Data		
	Steps	End Time [s]
1	1	3000,
2	2	4500,
3	3	4501,
4	4	6000,
5	5	6001,
6	6	7500,
7	7	7501,
8	8	9000,
9	9	9001,
10	10	10500,
11	11	10501,

Figura C.21: definizione degli step di corrente.

La prima condizione al contorno consiste nell'impostare una temperatura di 100 °C alle estremità delle ali del crogiolo (per via del raffreddamento interno ai morsetti in rame a cui è collegato): cliccare su *Steady-State Thermal-Electric Conduction* col tasto destro, quindi *Insert Temperature*. Selezionare le due estremità e dare *Apply*. In *Tabular Data* assegnare il valore di 100 °C al primo step ed automaticamente verrà assegnato a tutti i successivi.

La seconda condizione al contorno che si impone è una tensione di 0 V sulla faccia esterna dell'ala di destra del crogiolo. Sempre con tasto destro su *Steady-State Thermal-Electric Conduction*, *Insert Voltage*, selezionare la faccia e dare il valore di 0 V per ogni step. Affinché l'analisi possa funzionare, Workbench richiede che anche il disco sia vincolato, per cui è necessario imporre una tensione di 0 V anche ad una superficie a piacere del disco. Essendo il disco non contatto con il crogiolo, non vi sarà quindi alcun passaggio di corrente.

Si definisce ora il carico di corrente per ogni step. Ancora tasto destro su *Steady-State Thermal-Electric Conduction*, *Insert Current*, selezionare la faccia esterna dell'ala di sinistra del crogiolo e cliccare *Apply*. Per ogni step si assegna il valore opportuno di corrente avendo cura di ottenere un andamento a gradino nel grafico centrale.

Si deve ora impostare la modalità di scambio termico tra i due elementi, che in questo caso è l'irraggiamento. Fare quindi clic col tasto destro su *Steady-State Thermal-Electric Conduction*, *Insert Radiation* e selezionare tutte le superfici del crogiolo eccetto le due estreme dei parallelepipedi che nella realtà sono oscurate. Una volta cliccato *Apply* andare nel riquadro *Details* ed imporre *Correlation > Surface to Surface* e poi *Emissivity > Tabular Data*. Quest'ultimo comando permette di definire l'emissività in funzione della temperatura all'interno del riquadro *Tabular Data*.

Effettuare nuovamente la procedura selezionando tutte le superfici del disco e facendo attenzione che in entrambi i casi in *Details* compaia *Enclosure 1*: ciò significa che i due corpi scambiano calore attraverso irraggiamento. In Figura C.22 è rappresentato il modello completo di tutte le condizioni di vincolo e di carico.

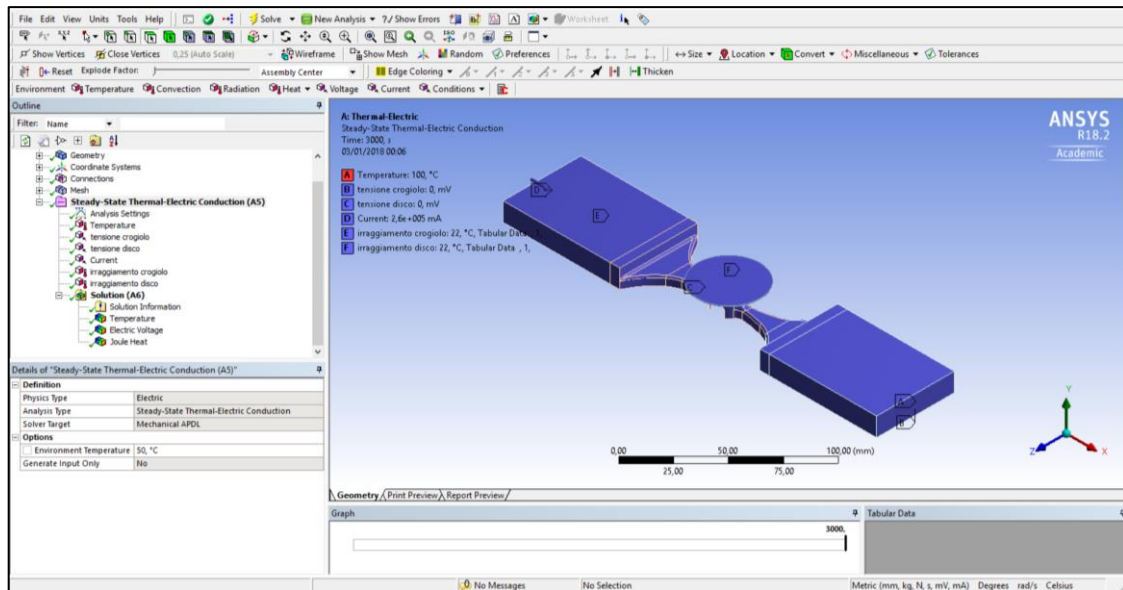


Figura C.22: modello elettro-termico completo di tutte le condizioni di vincolo e di carico.

Prima di lanciare la soluzione è opportuno definire alcune grandezze da valutare, come temperatura e tensione elettrica. È sufficiente fare clic col tasto destro su *Solution* nel riquadro *Outline*, quindi *Insert* e scegliere la grandezza desiderata. Si è ora pronti a risolvere il modello: tasto destro su *Solution* > *Solve*. Terminata l'analisi, è possibile controllare i risultati cliccando su ognuno di essi in *Outline*. A titolo d'esempio, si riporta una schermata rappresentante la visualizzazione della soluzione desiderata (Figura C.23).

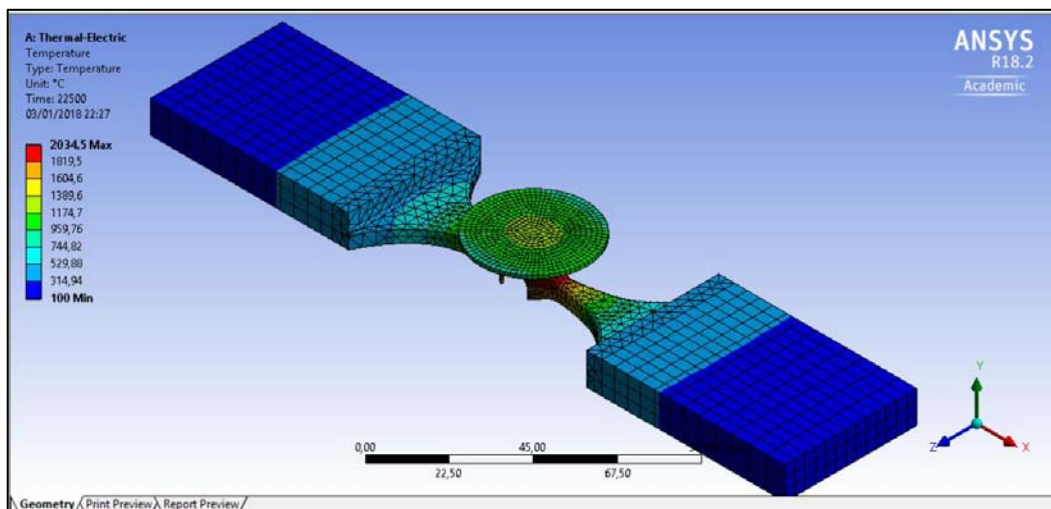


Figura C.23: rappresentazione del plot di temperatura ottenuto.

C.2.5 Impostazione dell'analisi strutturale

Dopo aver risolto l'analisi termo-elettrica, si procede con l'analisi strutturale utilizzando come unico carico il campo di temperatura di disco e crogiolo, in modo da indurre una deformazione termica e studiarne gli effetti. L'impostazione della nuova analisi e l'importazione dei carichi è un'operazione semplice ed eseguibile dalla finestra iniziale *Project Schematic*. Dalla *Toolbox* di sinistra cliccare su *Static Structural*, mantenere la selezione e trascinarla dall'alto verso il basso su tutte le celle della precedente analisi termo-elettrica fino a che tutte le celle condivisibili assumono una cornice rossa. È possibile quindi rilasciare la selezione. La finestra della nuova analisi apparirà alla destra della precedente collegata a questa da stringhe blu come mostrato in Figura C.24.

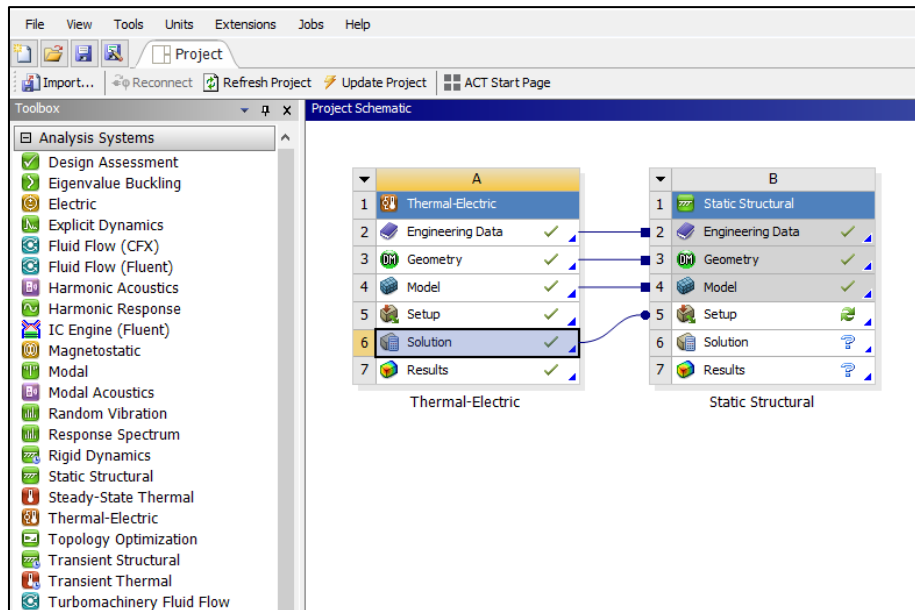


Figura C.24: creazione dell'analisi strutturale e collegamento con l'analisi precedente.

Le prime tre celle sono collegate tra loro da una stringa che termina con un quadrato: questo significa che i dati sono stati condivisi. La cella *Solution* è invece collegata alla cella *Setup* da una stringa terminante con un cerchio che indica il trasferimento dei dati, cioè la soluzione della prima viene impiegata come dato di input per la seconda.

La cella *Setup* presenta il simbolo che richiede un aggiornamento poiché è necessario definire gli step di analisi e vincolare opportunamente tutti i corpi. Eseguire quindi doppio clic sulla cella *Setup* dell'analisi *Strutturale* per procedere. La finestra che appare è la stessa su cui si ha agito per l'analisi termo-elettrica, ma in *Outline* è apparsa la voce che indica la presenza dell'analisi strutturale.

Come prima cosa, cliccare su *Static Structural* in *Outline* e definire nella finestra sottostante una temperatura ambiente pari a 50 °C come fatto in precedenza. In *Analysis Setting* impostare lo stesso numero di step utilizzati nell'analisi precedente; per fare ciò, è sufficiente copiare la tabella recuperabile poco sopra dalle impostazioni dell'analisi termo-elettrica e incollarla in *Tabular Data* tante volte quanti sono gli step. Terminata l'operazione, espandere il menù *Imported Load* in *Outline* e selezionare *Imported Body Temperature*. Nella finestra *Details*, alla voce *Source Time*, impostare *All* per importare tutti i dati creati nella analisi precedente (Figura C.25). Notare infatti che nelle finestre a destra viene messo in evidenza come ad ogni step venga importato il relativo campo di temperatura. Tornare quindi in *Outline*, tasto destro su *Imported Body Temperature* > *Import Load*.

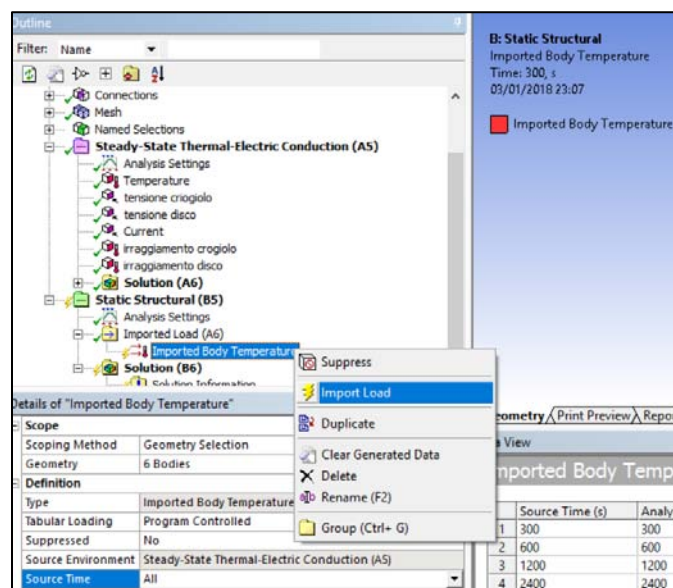


Figura C.25: importazione dei carichi termici nel modello strutturale.

È necessario vincolare meccanicamente i due corpi: per quanto riguarda il crogiolo, si impedisce lo spostamento lungo ogni direzione di entrambe le facce esterne, mentre il disco deve essere vincolato isostaticamente. Per vincolare il crogiolo fare clic col tasto destro su *Static Structural* > *Insert* > *Fixed Support*. Selezionare quindi le due facce esterne del crogiolo e cliccare *Apply*. In questo modo tutti gli spostamenti dei nodi appartenenti alle facce sono stati bloccati. Per vincolare il disco in 3 dei suoi nodi la procedura è invece più complessa. Per prima cosa è necessario creare delle *Named Selection*, ossia eseguire la selezione del nodo di nostro interesse e assegnargli un nome. Per fare ciò, selezionare il primo nodo (si sceglie quello sulla superficie inferiore del disco e all'estremo Z+), fare clic col tasto destro sopra la selezione e scegliere *Create Named Selection* e nominare il nodo come Z+. Ripetere la procedura per il nodo all'estremo Z- e quello all'estremo X+. Le selezioni effettuate sono riportate in Figura C.26.

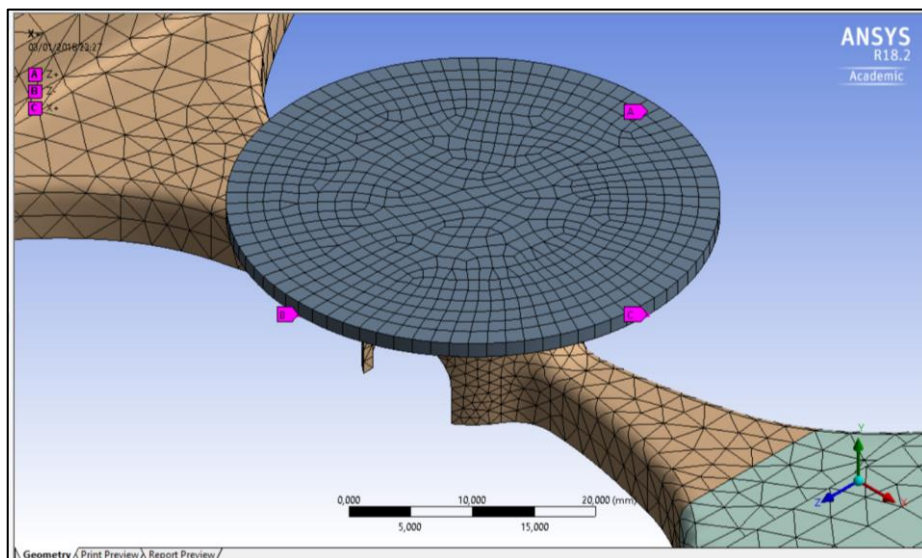


Figura C.26: sistema di selezioni effettuate sul disco per garantirne l'isostaticità.

Procedere con tasto destro su *Static Structural* in *Outline* > *Insert* > *Nodal Displacement*. Nel riquadro *Details* selezionare la *Named Selection* Z+ ed impedire gli spostamenti lungo X e lungo Y. Ripetere la procedura per il nodo Z-, mentre per il nodo X+ è necessario impedire gli spostamenti lungo Y e Z. A questo punto il disco risulta isostaticamente vincolato ed è possibile lanciare l'analisi attraverso *Solution* > *Solve*.

È possibile, a posteriori, inserire la grandezza che si vuole analizzare, ad esempio la deformazione oppure la tensione, come già visto nell'analisi precedente e poi cliccare col tasto destro su *Solution* e quindi *Evaluate All*.

C.3 Risultati numerici e confronto con i risultati sperimentali

Per la validazione di un modello numerico, è necessario confrontare i risultati da esso forniti con i risultati sperimentali ottenuti come descritto nel corso del Capitolo 3. Come già anticipato, il pirometro esegue la misura di temperatura mediando i valori interni ad una zona circolare di diametro 4 mm. Questa modalità di acquisizione fornisce una temperatura in corrispondenza del centro del disco molto simile a quella massima effettiva, ma in periferia il gradiente di temperatura all'interno della zona di acquisizione non risulta trascurabile. Per il confronto numerico-sperimentale mediante l'utilizzo del Mechanical APDL, è possibile eseguire la media integrale nello spot del pirometro, esattamente come accade sperimentalmente; per quanto riguarda l'utilizzo di Workbench, non sembra possibile eseguire la stessa operazione, ma è solo possibile prelevare le temperature nodali. A valle di questa considerazione, per il confronto numerico-sperimentale necessario alla validazione del modello, è stato deciso di assumere come temperatura centrale del disco la massima presente sulla sua faccia superiore, mentre come temperatura in periferia la minima sulla medesima superficie: quest'ultima è poi confrontata col 98% della temperatura sperimentale.

C.3.1 Disco in grafite POCO EDM-3®

In primo luogo, si analizza il confronto numerico-sperimentale di un disco fabbricato in grafite POCO EDM-3®. In Figura C.27 ed in Figura C.28 sono riportati i confronti per il medesimo disco di diametro 40 mm e spessore 0,5 mm posto a due differenti distanze disco-crogiolo. La differenza percentuale massima è sempre inferiore al 5%, stabilendosi mediamente attorno al 2-3 %, pertanto si può definire il modello correttamente funzionante con questo materiale.

DATI SPERIMENTALI				DATI FEM			
I [A]	T minima [°C]	98% T minima	T centro [°C]	I [A]	T minima [°C]	T centro [°C]	Δ%
				130	531.06	628.73	
				140	572.33	693.71	
145	602	589.96	743.72	150	609.85	756.75	2.8%
150	619.5	607.11	778.82	160	644.74	818.94	3.4%
160	655.5	642.39	848	170	677.42	880.44	3.6%
170	689	675.22	913	180	708.07	940.63	3.7%
180	721	706.58	977	190	737.05	999.84	4.5%
190	752	736.96	1047	200	764.48	1057.8	4.1%
200	782.5	766.85	1103	210	790.64	1114.8	4.0%
210	810.5	794.29	1161.25	220	815.4	1170.5	3.7%
220	837	820.26	1215	230	839.34	1225.1	3.3%
230	862	844.76	1267	240	862.05	1278.4	2.8%
240	886	868.28	1315.5	250	883.43	1328.7	2.6%
250	910	891.8	1364	260	903.63	1376.2	
255	921	902.58	1388				

Figura C.27: confronto tra temperature sperimentali e numeriche di un disco in grafite POCO EDM-3® (diametro 40 mm e spessore 0.5 mm) posto ad una distanza di 2.5 mm dal crogiolo.

DATI SPERIMENTALI				DATI FEM			
I [A]	T minima [°C]	98%T minima [°C]	T centro [°C]	I [A]	T minima [°C]	T centro [°C]	Δ%
				130	546.74	662.83	
				140	587.06	731.24	
150	629	616.42	817	150	624.57	799.11	2.2%
155	649	636.02	854				
160	667	653.66	889.5	160	659.38	866.37	2.6%
165	683	669.34	925				
170	699	685.02	958.5	170	691.64	932.09	2.8%
175	715	700.7	993.5				
180	729.5	714.91	1028	180	721.9	996.74	3.0%
185	745	730.1	1061				
190	760	744.8	1095	190	750.3	1060.1	3.2%
195	779	763.42	1127				
200	789.5	773.71	1157	200	777.09	1122.1	3.0%
205	804	787.92	1188				
210	816.5	800.17	1218	210	802.39	1183.1	2.9%
215	829.5	812.91	1247				
220	842	825.16	1274.5	220	826.32	1242.1	2.5%
225	854	836.92	1302				
230	866	848.68	1327.5	230	849.05	1299.3	2.1%
235	878	860.44	1355				
240	889	871.22	1379	240	870.78	1354.6	1.8%
245	901.5	883.47	1410				
250	912	893.76	1433.5	250	891.43	1407.6	1.8%
255	923	904.54	1458				
260	935	916.3	1483.5	260	910.96	1458.5	1.7%

Figura C.28: confronto tra temperature sperimentali e numeriche di un disco in grafite POCO EDM-3® (diametro 40 mm e spessore 0.5 mm) posto ad una distanza di 1 mm dal crogiolo.

C.3.2 Disco in carburo di silicio Hexoloy® SA

In secondo luogo, si analizza il confronto numerico-sperimentale di un disco fabbricato in carburo di silicio Hexoloy® SA. In Figura C.29, in Figura C.30 ed in Figura C.31 Figura C.28 sono riportati i confronti per il medesimo disco di diametro 40 mm e spessore 1,3 mm posto a tre distanze disco-crogiolo. La differenza percentuale massima è sempre inferiore al 3%, stabilendosi mediamente attorno ad 1-2 %, pertanto si può definire il modello correttamente funzionante anche per questo materiale.

DATI SPERIMENTALI				DATI FEM				
I [A]	T minima [°C]	98% T minima [°C]	T centro [°C]	I [A]	T minima [°C]	T centro [°C]	Δ %	
				130	517.53	550.57		
145	609.62	597.43	644.89	140	559.89	601.93		
150	628.14	615.58	669.96	150	600.87	653.91	2.4%	
160	666.13	652.81	721.61	160	638.19	704.12	2.2%	
170	702.36	688.31	772.07	170	673.28	753.57	2.2%	
180	738.25	723.49	822.29	180	705.96	801.21	2.4%	
190	772.50	757.05	873.04	190	737.04	848.6	2.6%	
200	805.90	789.78	924.54	200	767.38	896.18	2.8%	
210	837.14	820.40	974.71	210	796.82	944.01	2.9%	
220	865.93	848.61	1024.71	220	824.74	991.42	2.8%	
				230	851.19	1037.9		
				240	876.42	1083.3		
				250	900.57	1127.9		
				260	923.47	1171.1		

Figura C.29: confronto tra temperature sperimentali e numeriche di un disco in carburo di silicio Hexoloy® SA (diametro 40 mm e spessore 1.3 mm) posto ad una distanza di 5 mm dal crogiolo.

DATI SPERIMENTALI				DATI FEM				
I [A]	T minima [°C]	98% T minima [°C]	T centro [°C]	I [A]	T minima [°C]	T centro [°C]	Δ %	
				130	545.19	593.24		
139.80	601.59	589.56	653.32	140	589.7	651.85	0.2%	
149.90	641.82	628.99	711.54	150	630.09	709.01	0.4%	
159.90	681.07	667.45	770.07	160	667.43	765.28	0.6%	
169.81	717.46	703.11	825.71	170	701.62	819.48	0.8%	
179.90	752.43	737.38	881.50	180	733.86	873.75	0.9%	
189.90	786.07	770.35	940.04	190	765.49	929.11	1.2%	
199.90	817.93	801.57	996.89	200	795.49	984.45	1.2%	
209.90	847.50	830.55	1054.14	210	824.06	1039.9	1.4%	
220.00	875.75	858.24	1109.75	220	850.94	1093.9	1.4%	
230.00	902.07	884.03	1163.07	230	876.32	1146.6	1.4%	
239.90	926.96	908.42	1215.32	240	900.35	1198.4	1.4%	
249.96	950.04	931.04	1267.04	250	923.15	1249.1	1.4%	
260.00	974.00	954.52	1318.50	260	944.84	1298	1.6%	

Figura C.30: confronto tra temperature sperimentali e numeriche di un disco in carburo di silicio Hexoloy® SA (diametro 40 mm e spessore 1.3 mm) posto ad una distanza di 2.5 mm dal crogiolo.

DATI SPERIMENTALI				DATI FEM				
I [A]	T minima [°C]	98%T minima [°C]	T centro [°C]	I [A]	T minima [°C]	T centro [°C]		Δ %
				130	565.5	624.38		
139.80	610.36	598.15	669.13	140	610.3	686.89		2.6%
149.90	650.68	637.66	730.10	150	650.54	747.88		2.4%
159.90	689.21	675.43	790.79	160	687.31	807.09		2.0%
169.80	725.11	710.61	849.13	170	721.26	865.61		1.9%
179.90	759.57	744.38	907.62	180	754.08	925.49		1.9%
189.90	791.96	776.12	968.38	190	785.72	986.06		1.8%
199.90	823.43	806.96	1030.56	200	815.4	1046.5		1.5%
209.90	852.07	835.03	1087.15	210	843.37	1106		1.7%
220.00	879.61	862.02	1145.17	220	869.29	1163.8		1.6%
230.00	905.46	887.35	1200.90	230	893.81	1220.4		1.6%
239.90	929.11	910.53	1254.75	240	917.25	1276.1		1.7%
249.94	951.93	932.89	1307.38	250	939.06	1329.9		1.7%
260.00	975.00	955.50	1359.00	260	959.78	1382		1.7%

Figura C.31: confronto tra temperature sperimentali e numeriche di un disco in carburo di silicio Hexoloy® SA (diametro 40 mm e spessore 1.3 mm) posto ad una distanza di 1 mm dal crogiolo.

C.4 Analisi strutturale dei componenti

Le tensioni interne che si generano nel disco e nel crogiolo a seguito delle sollecitazioni termiche possono portare il sistema a rottura. L'analisi strutturale consente quindi di prevedere l'andamento delle tensioni e i valori di picco al fine di progettare adeguatamente la struttura. Questa viene eseguita importando i risultati dell'analisi termo-elettrica come dati di input in uno studio strutturale statico.

Lo studio si basa sui soli casi più critici corrispondenti a quelli che prevedono una minima distanza disco-crogiolo per entrambi i materiali e il valore massimo di corrente applicata, pari a 260 A. Nel caso di disco in grafite lo spessore considerato è di 0,5 mm, mentre per il disco in SiC è di 1,3mm.

Le proprietà dei materiali necessarie alla trattazione sono il coefficiente di dilatazione termica, il modulo elastico ed il coefficiente di Poisson, riportati per entrambi i materiali nell'appendice dedicata.

C.4.1 Disco in grafite POCO EDM-3®

Per quanto riguarda il disco in grafite POCO EDM-3®, le tensioni maggiori si registrano sulla faccia inferiore, cioè quella rivolta al crogiolo e che sperimenta le temperature più alte. In Figura C.32 ed in Figura C.33 sono riportati gli andamenti delle tre tensioni principali lungo il diametro parallelo ed ortogonale alla direzione del crogiolo.

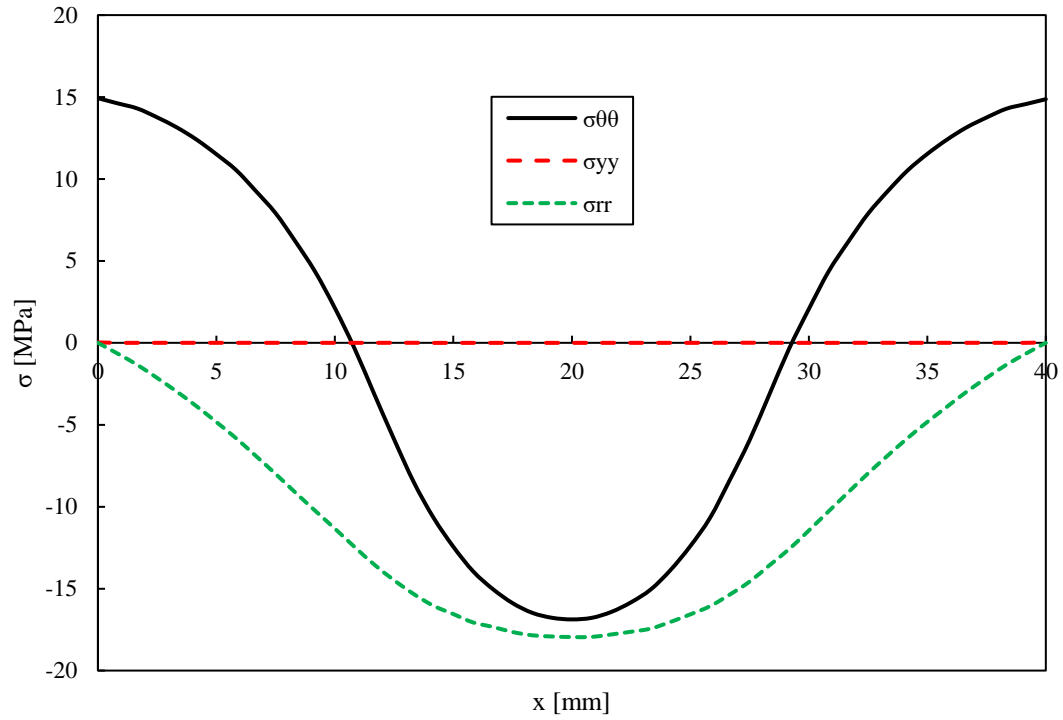


Figura C.32: path diametrale parallelo alla direzione del crogiolo che evidenzia la tensione radiale, tangenziale ed assiale.

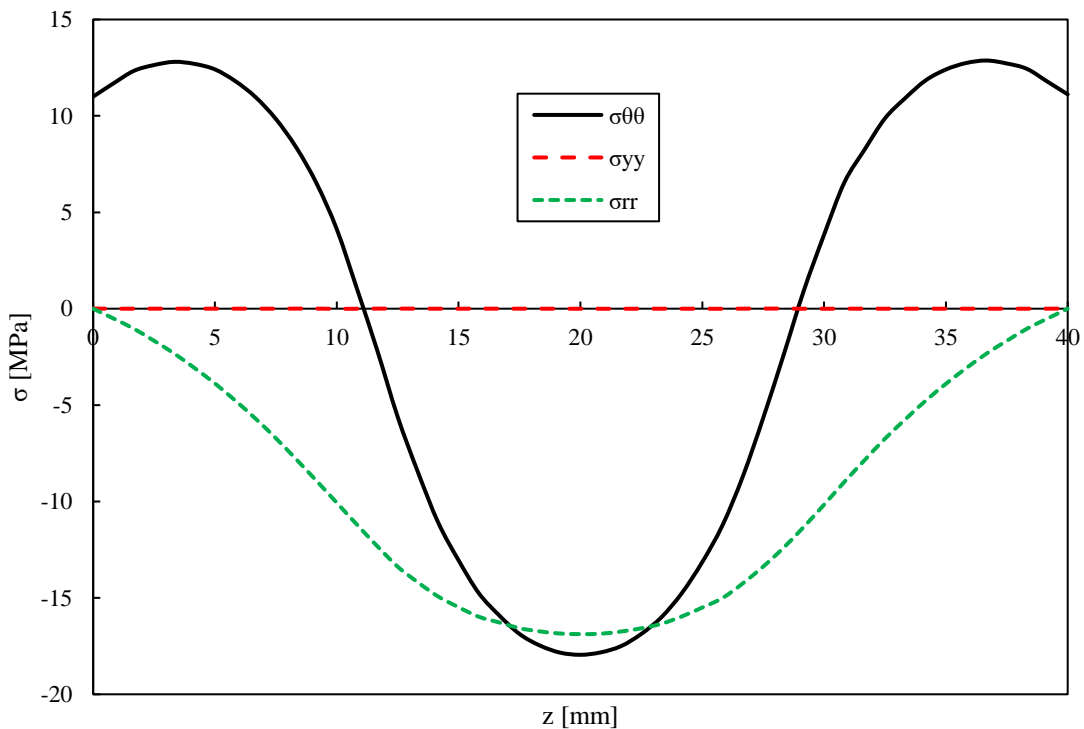


Figura C.33: path diametrale ortogonale alla direzione del crogiolo che evidenzia la tensione radiale, tangenziale ed assiale.

Il valore di picco è raggiunto in corrispondenza dell'estremità del diametro parallelo alla direzione del crogiolo e risulta circa 15 MPa.

C.4.2 Disco in carburo di silicio Hexoloy® SA

Per quanto riguarda il disco in carburo di silicio Hexoloy® SA, come per il disco in grafite precedentemente analizzato, le tensioni maggiori si registrano sulla faccia inferiore. In Figura C.32 ed in Figura C.33 sono riportati gli andamenti delle tre tensioni principali lungo il diametro parallelo ed ortogonale alla direzione del crogiolo.

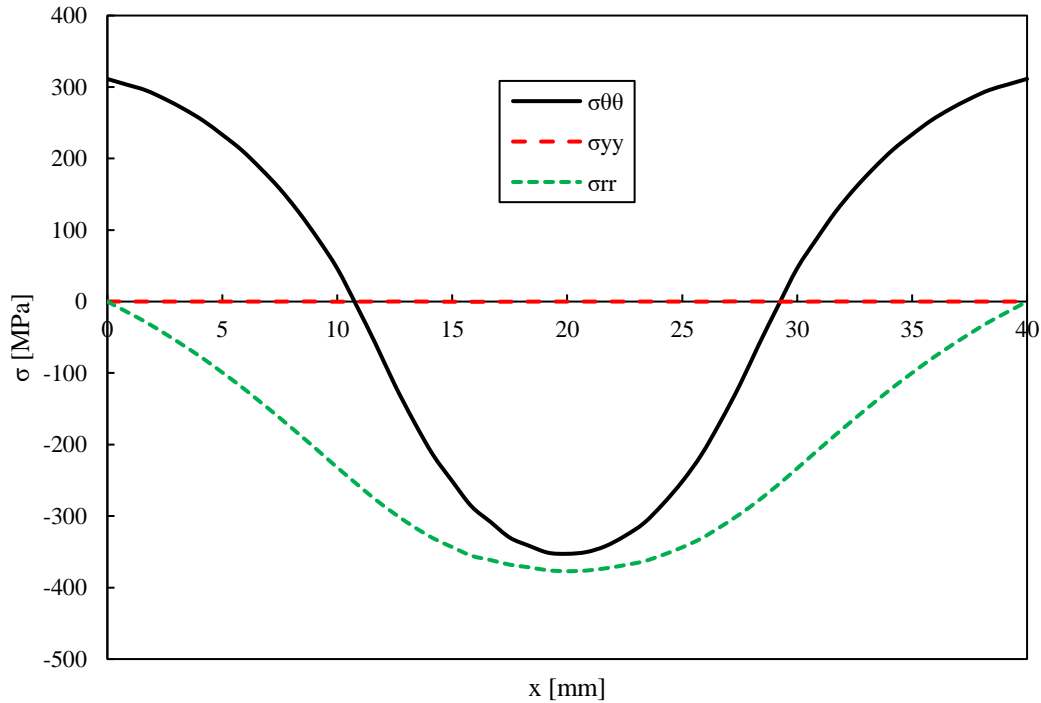


Figura C.34: path diametricale parallelo alla direzione del crogiolo che evidenzia la tensione radiale, tangenziale ed assiale.

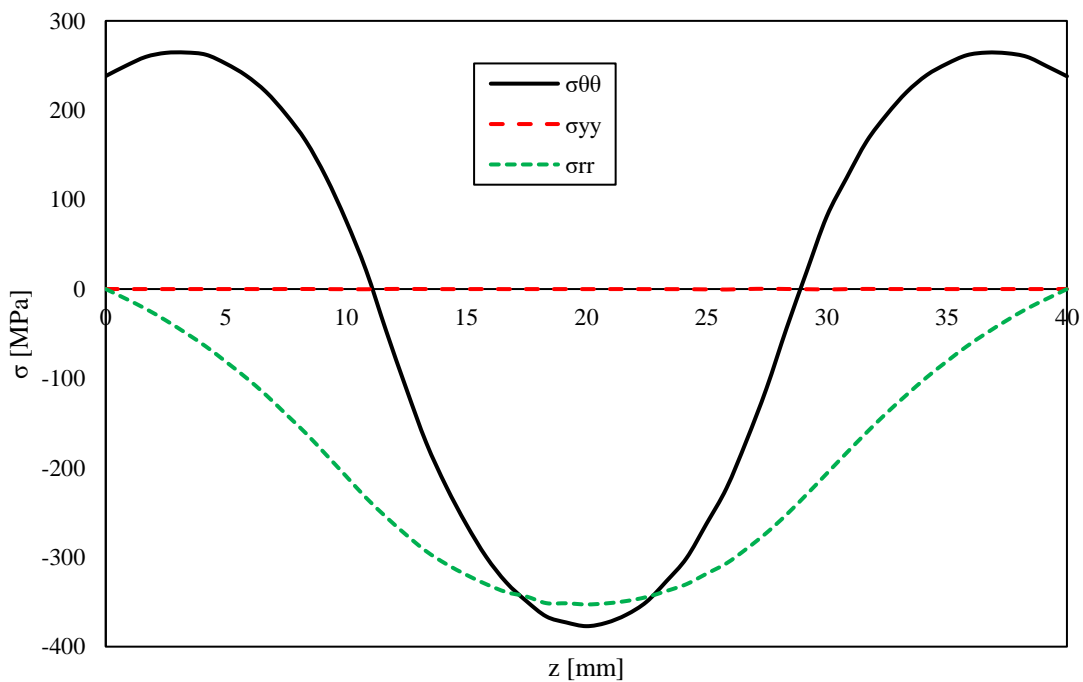


Figura C.35: path diametricale ortogonale alla direzione del crogiolo che evidenzia la tensione radiale, tangenziale ed assiale.

Anche in questo caso, il valore di picco è raggiunto in corrispondenza dell'estremità del diametro parallelo alla direzione del crogiolo e risulta circa 310 MPa. I valori di tensione estremamente più elevati rispetto a quelli trovati con la grafite sono dovuti al valore del modulo elastico risultante circa 40 volte maggiore nel caso del SiC.

C.4.3 Crogiolo riscaldante

Una volta analizzata la distribuzione di temperatura e tensione sui dischi, è necessario eseguire uno studio sul crogiolo, in modo tale da poter mettere in evidenza le criticità che lo caratterizza. In Figura C.36 è riportata una rappresentazione del crogiolo sezionato. Come si può notare, si verifica uno stato di compressione che supera i 200 MPa in corrispondenza dell'apice dell'intaglio circolare. Tale stato di tensione è stato evidenziato anche nell'appendice dedicata allo studio del crogiolo.

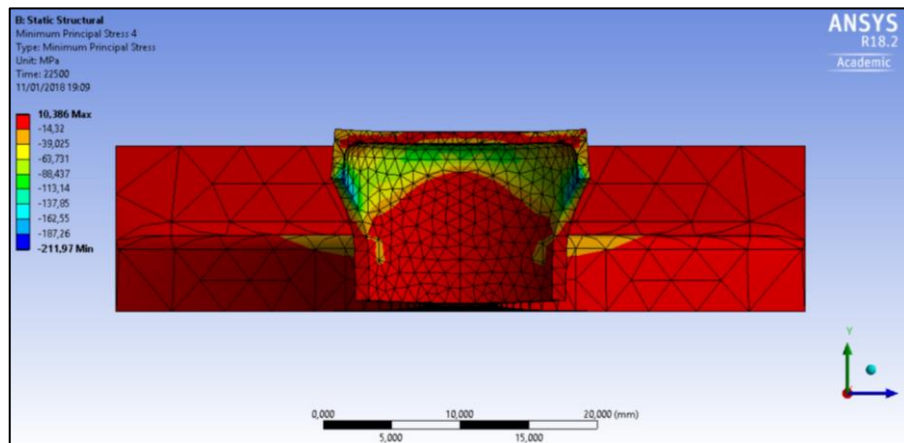


Figura C.36: sezione di mezzeria del crogiolo che mette in evidenza lo stato di compressione critico.

C.5 Ottimizzazione in Ansys® Workbench

Gli algoritmi di ottimizzazione interni ad Ansys® sono già stati ampiamente usati per la stima della conducibilità termica di un materiale. Nel corso del capitolo 3 è stato descritto l'utilizzo del metodo della funzione ottima con il software Mechanical APDL; lo scopo di questa ultima parte consiste nell'impostazione di questa metodologia in Ansys® Workbench.

In Ansys workbench è possibile definire delle grandezze parametriche (geometriche, proprietà del materiale, ecc.) e definirle come *variabili* oppure *obiettivo*. Il programma utilizza, successivamente, degli algoritmi di ottimizzazione i quali fanno cambiare i valori delle variabili entro un certo range finché gli obiettivi non vengono soddisfatti. Nel caso della parametrizzazione di una proprietà del materiale, come la conducibilità termica, si ha a disposizione due possibilità:

- Se la proprietà è indipendente dalla temperatura (o da altre variabili), a questa verrà associato un singolo valore e tale valore viene impostato come parametro;
- Se la proprietà è definita in funzione della temperatura, la funzione può essere parametrizzata solamente per le opzioni di *scale* ed *offset*, cioè viene traslata rigidamente fino alla convergenza degli obiettivi. È necessario, quindi, conoscere preventivamente la forma della funzione.

Data la limitatezza, sono stati sviluppati due metodi di ottimizzazione che portano alla stima della conducibilità termica a partire dalle temperature sperimentali.

C.5.1 Metodo della mappatura del disco

Nel caso di proprietà dipendente dalla temperatura, non è possibile impostare un ciclo di ottimizzazione che permetta di far variare tutti i punti della curva, cioè di cambiarne la forma, ma è possibile solamente traslarla rigidamente. Nel caso in cui la forma della funzione non sia nota, questo metodo non può essere implementato.

Per aggirare tale limite, è stata pensata la seguente soluzione: il disco viene suddiviso in più parti in contatto tra loro (ad esempio anelli concentrici) e viene assegnata, ad ognuna di queste, un materiale dotato della propria conducibilità termica (Figura C.37). Tale proprietà deve essere indipendente dalla temperatura, pertanto può essere posta come parametro.

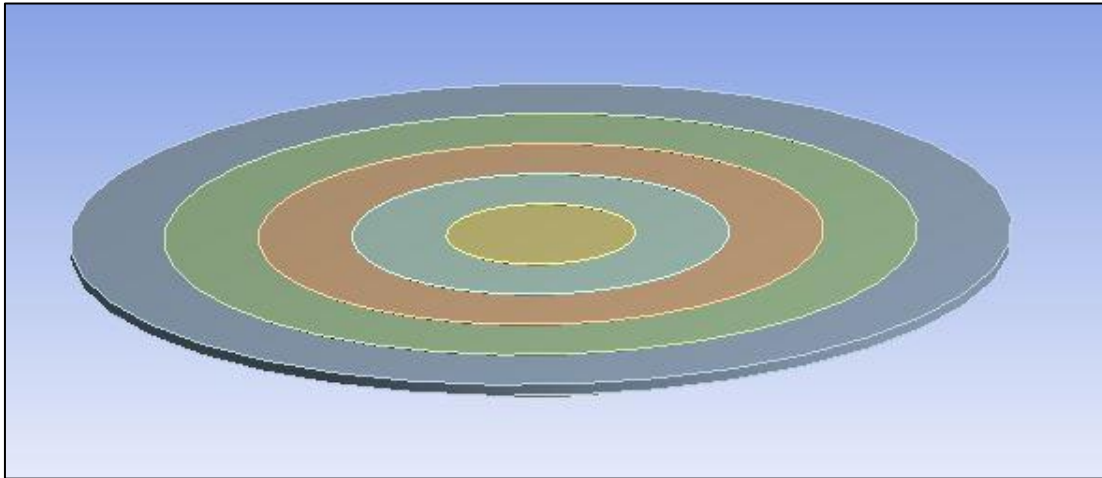


Figura C.37: suddivisione del disco in anelli concentrici, ognuno dotato di conducibilità termica differente.

Per ogni suddivisione, viene assegnata una temperatura sperimentale.

L'ottimizzazione consisterà nel ricercare il valore ottimale della conducibilità termica di ogni anello affinché vengano soddisfatti gli obiettivi di temperatura impostati. Come risultato, si otterrà una serie di set di conducibilità che soddisfano gli obiettivi di temperatura imposti; è possibile, inoltre, impostare il ciclo di ottimizzazione affinché tali obiettivi siano raggiunti con una certa tolleranza (ad esempio +/- 10 °C) e che i valori delle conducibilità siano correlati tra loro da un'ipotesi di monotonia, cioè imponendo che la conducibilità decresca all'aumentare della temperatura. La suddivisione del disco in anelli permette di trovare un valore di conducibilità per ogni settore: ogni valore calcolato sarà il valore di conducibilità alla temperatura media dell'anello di appartenenza.

Il metodo presenta dei vantaggi e degli svantaggi:

- + Elimina il problema della parametrizzazione di una proprietà funzione della temperatura;
- + Calcola la conducibilità termica del materiale considerando la presenza di zone a temperatura diversa in contatto tra loro, riproducendo la presenza del gradiente termico radiale;
- + Permette di impostare un unico ciclo di ottimizzazione per stimare la conducibilità termica al variare della temperatura;
- + Tempi di calcolo ridotti.
- Necessita della mappatura sperimentale della temperatura del disco: ciò comporta un notevole numero di misurazioni ed un aumento del rischio di errore;
- Approssimazione dell'anello a temperatura costante, cosa che non rispecchia la realtà del fenomeno;
- La suddivisione del disco in più parti richiede più tempo al CAD.

La validità di questo metodo è stata testata su un modello geometrico semplice composto da due dischi in grafite POCO EDM-3[®] che scambiano calore per irraggiamento tra loro. Il modello è stato prima risolto in modo diretto, ossia, noto il valore della conducibilità termica al variare della temperatura, se ne sono ricavate le temperature superficiali. Il disco superiore è stato suddiviso in 5 anelli di larghezza 4mm. Ad ogni anello è stato poi associato un proprio materiale dotato di un valore unico di conducibilità (valore iniziale pari a 50 W/m°C uguale per tutti). Il ciclo di ottimizzazione è stato impostato ponendo come obiettivo le 5 temperature misurate con una tolleranza di +/- 5°C. I valori della conducibilità di ogni anello sono invece stati fatti variare tra 40 e 120 W/m°C, cioè nel campo noto per l'EDM-3[®]. Sono inoltre stati imposti i vincoli per cui $\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3 > \lambda_4 > \lambda_5$. In Figura C.38 ed in Figura C.39 sono riportati gli screenshot di quanto impostato nell'ambiente Workbench.

	A	B	C	D	E	F	G
1	Name	Parameter	Objective		Constraint		
2			Type	Target	Type	Lower Bound	Upper Bound
3	Seek P6 = 848,73 C; 843 C <= P6 <= 853 C	P6 - Temperature 2 Maximum	Seek Target	848,73	Lower Bound <= Values <= Upper Bound	843	853
4	Seek P7 = 931,64 C; 926 C <= P7 <= 936 C	P7 - Temperature 3 Maximum	Seek Target	931,64	Lower Bound <= Values <= Upper Bound	926	936
5	Seek P8 = 1110,7 C; 1105 C <= P8 <= 1115 C	P8 - Temperature 4 Maximum	Seek Target	1110,7	Lower Bound <= Values <= Upper Bound	1105	1115
6	Seek P9 = 1301,2 C; 1296 C <= P9 <= 1306 C	P9 - Temperature 5 Maximum	Seek Target	1301,2	Lower Bound <= Values <= Upper Bound	1296	1306
7	Seek P10 = 1408,8 C; 1403 C <= P10 <= 1413 C	P10 - Temperature 6 Maximum	Seek Target	1408,8	Lower Bound <= Values <= Upper Bound	1403	1413

Figura C.38: screenshot rappresentante gli obiettivi.

	A	B	C	D
1	Input Parameters			
2	Name	Lower Bound	Upper Bound	
3	P1 - Thermal Conductivity (W m ⁻¹ C ⁻¹)	40	120	
4	P2 - Thermal Conductivity (W m ⁻¹ C ⁻¹)	40	120	
5	P3 - Thermal Conductivity (W m ⁻¹ C ⁻¹)	40	120	
6	P4 - Thermal Conductivity (W m ⁻¹ C ⁻¹)	40	120	
7	P5 - Thermal Conductivity (W m ⁻¹ C ⁻¹)	40	120	
8	Parameter Relationships			
9	Name	Left Expression	Operator	Right Expression
10	P1 >= P2	P1	>=	P2
11	P2 >= P3	P2	>=	P3
12	P3 >= P4	P3	>=	P4
13	P4 >= P5	P4	>=	P5

Figura C.39: screenshot rappresentante i limiti delle variabili.

In Figura C.40 sono riportati i risultati dell'ottimizzazione. Le colonne rappresentano i vari set di soluzione, mentre le righe rappresentano i valori di conducibilità termica per ogni settore del disco.

	Candidate Point 1	Candidate Point 2	Candidate Point 3	Candidate Point 4	Candidate Point 5	Candidate Point 6	Candidate Point 7	Candidate Point 8
P1 - Thermal Conductivity (W m ⁻¹ C ⁻¹)	69,778	71,57	79,336	69,315	71,074	79,336	75,111	74,955
P2 - Thermal Conductivity (W m ⁻¹ C ⁻¹)	63,052	62,525	60,312	63,437	62,926	60,312	62,289	62,898
P3 - Thermal Conductivity (W m ⁻¹ C ⁻¹)	57,493	55,78	57,271	57,494	58,006	57,567	57,643	57,493
P4 - Thermal Conductivity (W m ⁻¹ C ⁻¹)	48,316	48,303	47,749	48,761	48,791	47,517	48,722	48,761
P5 - Thermal Conductivity (W m ⁻¹ C ⁻¹)	42,352	42,331	42,487	40,109	40,892	42,487	40,051	40,028

Figura C.40: risultati dell'ottimizzazione.

Dopo aver lanciato il primo ciclo di ottimizzazione, è possibile restringere il campo di variabilità dei parametri e rilanciare l'ottimizzazione. In Figura C.41 è riportato il risultato finale del processo.

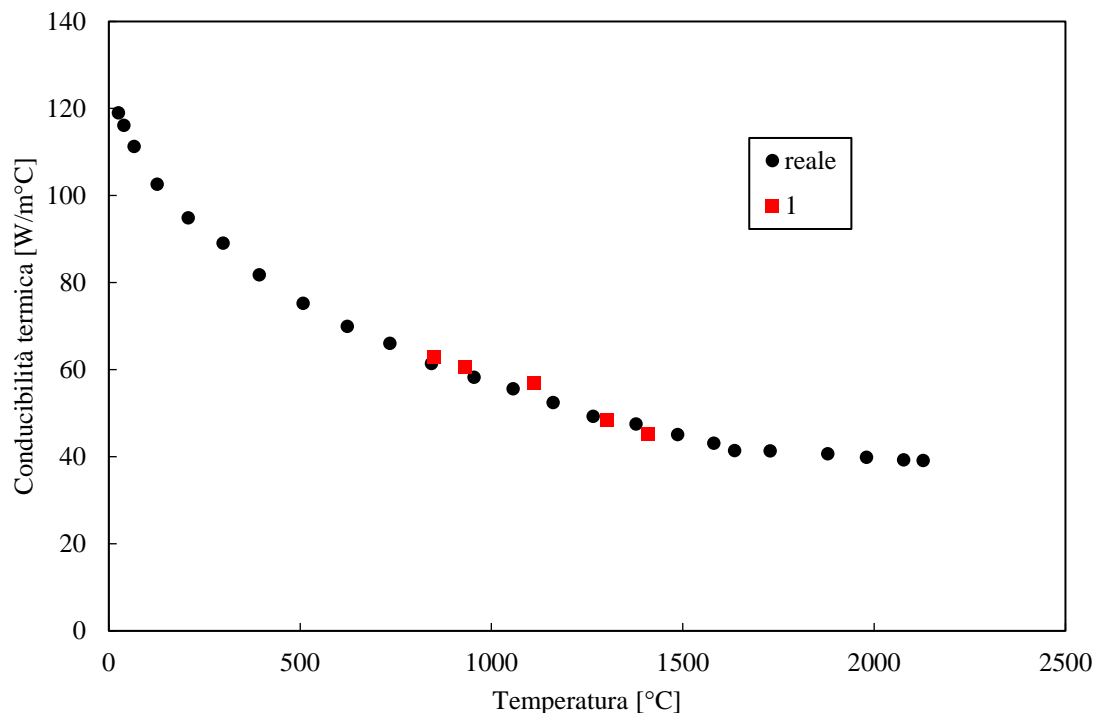


Figura C.41: risultato finale dell'ottimizzazione confrontato con la conducibilità termica da datasheet.

Il risultato finale del processo di ottimizzazione risulta aderente con la conducibilità termica da datasheet, pertanto si può considerare il metodo, entro certi limiti, adeguato per sgrossare il problema della stima della conducibilità termica.

C.5.2 Metodo della conducibilità termica costante al variare della temperatura

Il secondo metodo utilizzato per la stima della conducibilità termica di un materiale mediante ottimizzazione in Workbench consiste nell'assegnare al materiale un valore iniziale di conducibilità termica costante al variare della temperatura e renderlo un parametro. Si avvia quindi l'ottimizzazione imponendo come obiettivo un certo valore di temperatura, nota dai dati sperimentali, in una precisa zona del disco. Nel nostro caso specifico la temperatura è nota nella zona centrale del disco e nella zona periferica più fredda.

Si procede assegnando la temperatura obiettivo una alla volta e lanciando l'analisi. Così procedendo, è necessario imporre l'ipotesi che il valore di conducibilità trovata sia il valore della conducibilità termica a quella temperatura; l'analisi deve quindi essere lanciata per ogni dato sperimentale.

Il metodo presenta dei vantaggi e degli svantaggi:

- + Geometria di maggiore semplicità rispetto al metodo precedente;
- + Sono sufficienti le misure sperimentali in corrispondenza di centro e periferia del disco;
- + L'interpolazione dei risultati offre una curva conducibilità-temperatura prossima a quella reale;
- È necessario iterare l'analisi tante volte quanti sono i dati sperimentali;
- I valori della conducibilità termica che si ottengono per una determinata temperatura sono diversi se ricavati al centro o alla periferia del disco, perciò l'incertezza sui risultati è elevata;
- Per quanto detto al punto precedente, l'ipotesi su cui si basa il metodo non viene rispettata;
- Richiede poco tempo di calcolo, ma è necessario aggiornare continuamente i dati.

Per testare l'affidabilità del metodo, il sistema disco-crogiolo è stato risolto in modo diretto, ossia nota la conducibilità termica al variare della temperatura, per ogni step di corrente e si sono ricavati i valori della temperatura nodale al centro del disco e all'estremo più freddo. Si è poi creato un nuovo sistema assegnando al disco un materiale la cui conducibilità termica è indipendente dalla temperatura ed è stata lanciata

l'ottimizzazione per ogni valore di temperatura obiettivo facendo variare la conducibilità termica tra 30 e 120 W/m°C. I risultati sono riportati Figura C.42.

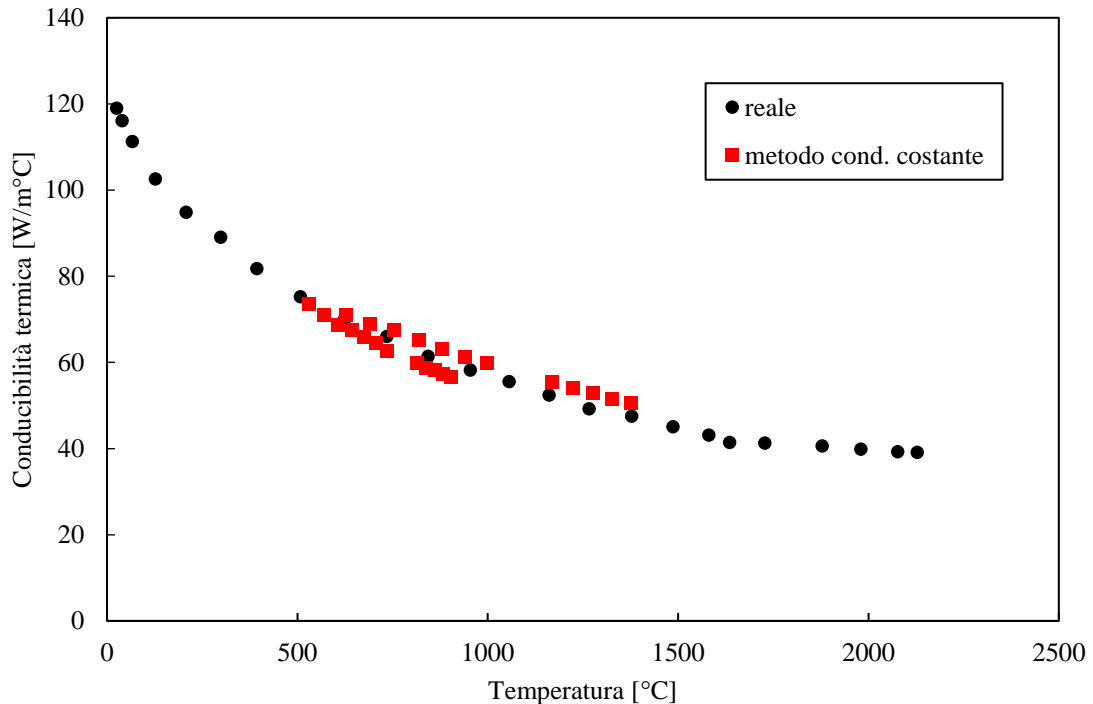


Figura C.42: risultato dell'ottimizzazione col metodo della conducibilità costante.

Il grafico mostra come la serie ottenuta con il metodo diverga in due andamenti separati, prova del fatto che l'ipotesi iniziale non viene rispettata. Tuttavia, la media approssima in modo soddisfacente la curva reale, probabilmente frutto di un caso fortuito.

C.6 Conclusioni

Durante il presente lavoro, che ha visto una collaborazione tra Università degli Studi di Padova ed i Laboratori Nazionali di Legnaro dell'INFN, è stato costruito il modello numerico di un apparato per la riproduzione di forti gradienti termici sui dischi target mediante l'utilizzo di Ansys® Workbench.

I risultati delle analisi elettro-termiche rispecchiano fedelmente la realtà sperimentale. Per quanto riguarda le temperature, il massimo scostamento che si riscontra tra i dati ottenuti tra i modelli FEM e i rilevamenti attraverso pirometro differiscono di 47°C, che corrispondono ad un errore relativo del 4,7 %.

Le analisi strutturali, invece, non possono essere confrontate con dati sperimentali in quanto in letteratura non esistono studi che trattano la resistenza dei materiali studiati ad alte temperature (come quelle che sono effettivamente soggetti i target); anzi, saranno proprio i modelli FEM che, aiutati da prove che portano a rottura i dischi, forniscono una stima delle tensioni di rottura degli stessi. Tuttavia, la bontà del modello strutturale può essere fatta confrontandola con una già esistente analisi APDL. Da questa, i modelli creati con Workbench differiscono di circa 10 MPa. Date queste evidenze numeriche, si può quindi affermare che il modello sia validato e quindi è possibile utilizzarlo per la fase successiva di ottimizzazione.

Durante lo svolgimento di questo progetto, si è notato che l'ottimizzazione in Ansys Workbench è molto agevolata se si desidera effettuare un'ottimizzazione volta, per esempio, alla determinazione di una misura geometrica affinché certe condizioni siano verificate. Contrariamente, l'ottimizzazione per analisi inversa non ha una facile implementazione: si è dovuto infatti mettere in gioco delle ipotesi per poter eseguire il processo di determinazione della conducibilità termica. In conclusione, sono stati sviluppati due metodi in grado di fornire una stima della conducibilità termica.

APPENDICE D

Metodo della funzione ottima modificato

D.1 Introduzione

Il metodo della funzione ottima, come già ampiamente descritto nel corso del capitolo 3, è un metodo che permette di stimare la conducibilità termica del materiale di un disco sottoposto a gradienti termici mediante l'utilizzo del tool di ottimizzazione interno ad Ansys®. Il metodo prevede l'acquisizione delle temperature in corrispondenza del centro e della periferia del disco e, col FEM, di far variare la conducibilità termica del disco fintantoché le temperature numeriche sono il più vicino possibile a quelle misurate sperimentalmente.

D.2 Modifica del metodo

Il metodo prevede la misura, per ogni valore di corrente, delle temperature in centro ed in periferia del disco nella direzione dove il gradiente risulta massimo. Una possibile modifica al metodo consiste nell'aggiunta di un punto, intermedio tra i due (Figura D.1), in modo da fissare il campo di temperatura nella direzione radiale del disco.

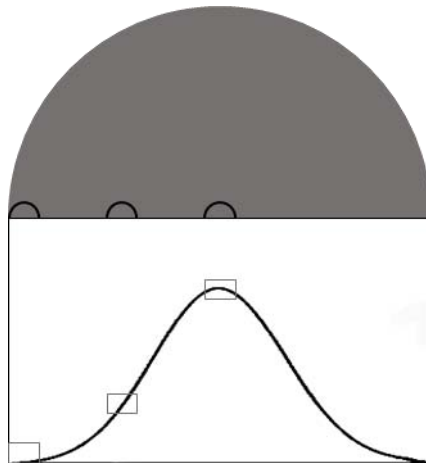


Figura D.1: rappresentazione del punto intermedio di misura.

L'introduzione di questo punto presenta due svantaggi: in primo luogo è necessario effettuare una misura di temperatura in più, oltre a quelle da eseguire in corrispondenza di centro e periferia; in secondo luogo, questa misura deve essere effettuata con particolare precisione, in quanto lo spot all'interno del quale il pirometro esegue la misura presenta una curva di temperatura molto più pendente rispetto alla zona centrale e periferica in cui la temperatura è piuttosto *piatta* (questo particolare è apprezzabile osservando Figura D.2).

Aggiungendo un punto, la funzione obiettivo RQ diventa:

$$RQ = \sum_{i=I_{min}}^{I_{max}} (TCS_i - TCN_i)^2 + (TMS_i - TMN_i)^2 + (TPS_i - TPN_i)^2 \quad D.1$$

Lo schema iterativo che porta alla stima della conducibilità termica rimane il medesimo, con la differenza che si aggiungono le misure sperimentali da effettuare in corrispondenza del punto in mezzeria (Figura D.2).

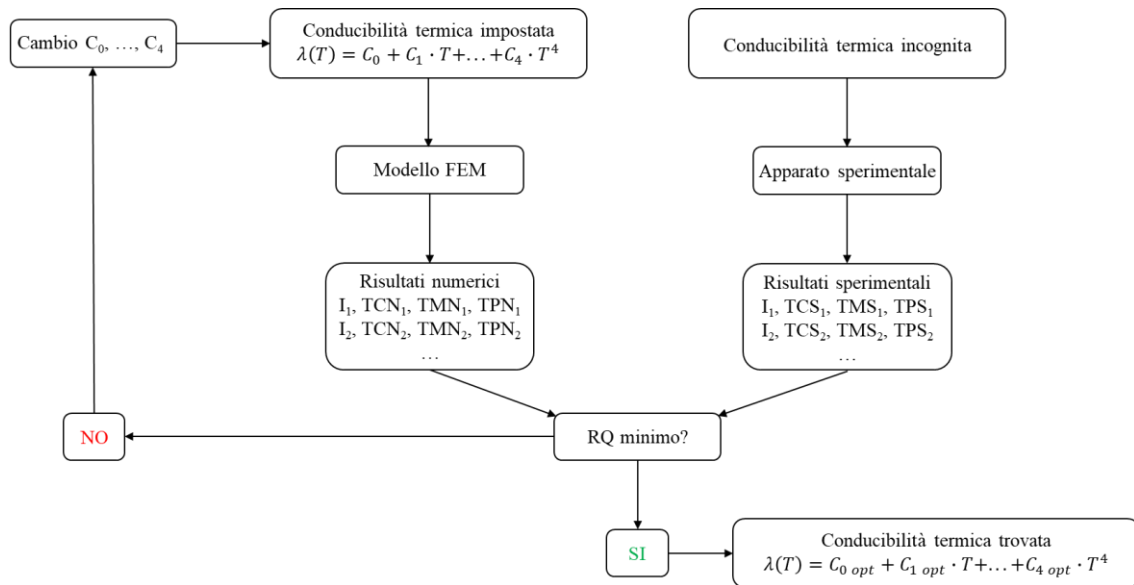


Figura D.2: schema a blocchi relativo al metodo della funzione ottima applicato alla ricerca della conducibilità termica di un materiale

D.3 Risultati

Il metodo proposto è equivalente al precedente descritto nel corso del capitolo 3. Di seguito si presentano i risultati ottenuti utilizzando un'espressione di secondo grado di conducibilità termica in funzione della temperatura. In particolare, in Figura D.3 è rappresentato il risultato relativo alla grafite POCO EDM-AF5[®] utilizzata per validare il modello numerico e l'algoritmo di ottimizzazione.

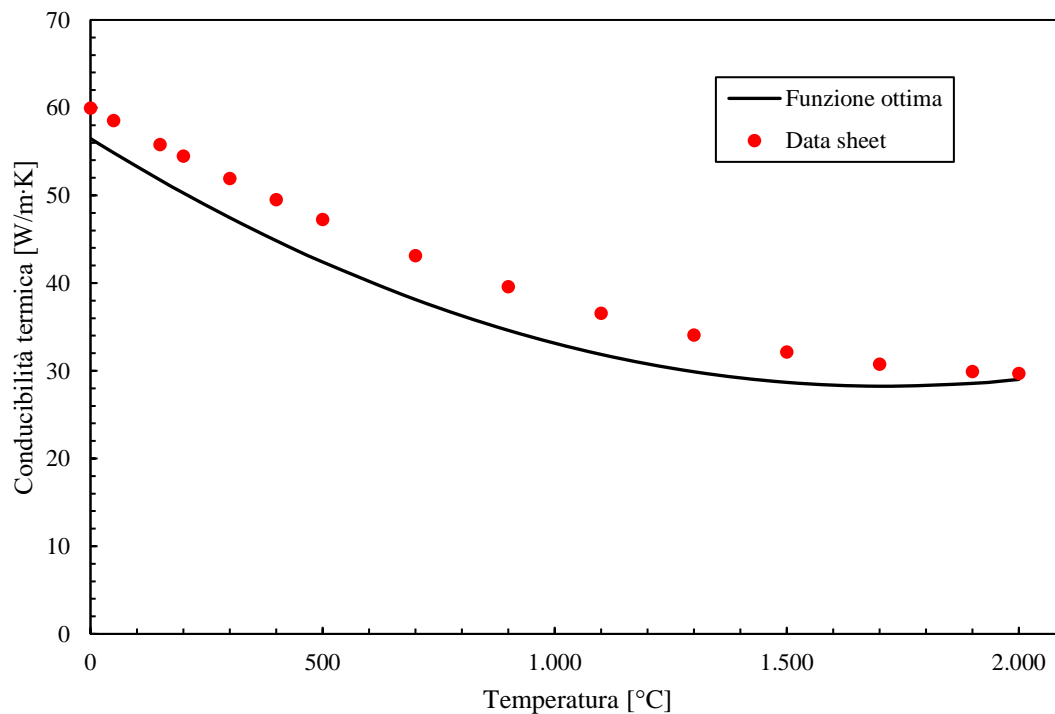


Figura D.3: stima della conducibilità termica della grafite POCO EDM-AF5[®] mediante l'applicazione del metodo della funzione ottima con una relazione quadratica.

C_0	56,4756269
C_1	0,0329307
C_2	9,6E-06
RQ	11436

Tabella D.1: parametri di output del metodo della funzione ottima applicato al caso di Figura D.3.

In Figura D.4 ed in Figura D.5 sono riportati gli andamenti delle costanti del polinomio e del residuo RQ in funzione del numero dell'iterazione. In totale sono state effettuate 27 iterazioni.

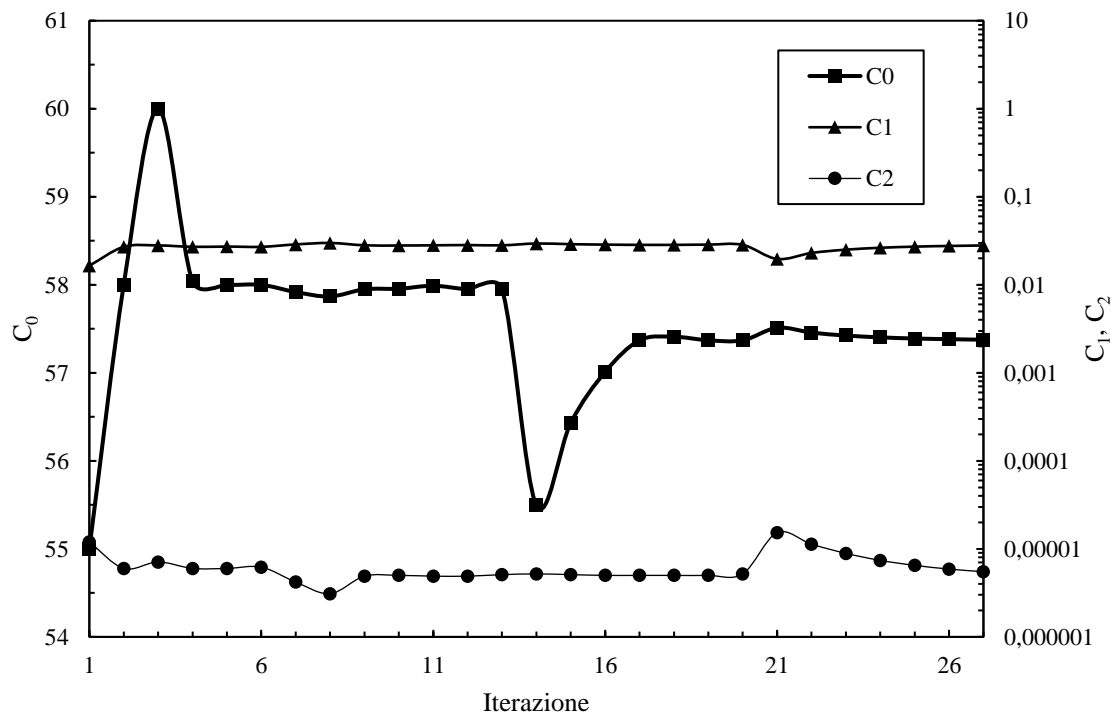


Figura D.4: andamento delle costanti del polinomio in funzione del numero dell'iterazione.

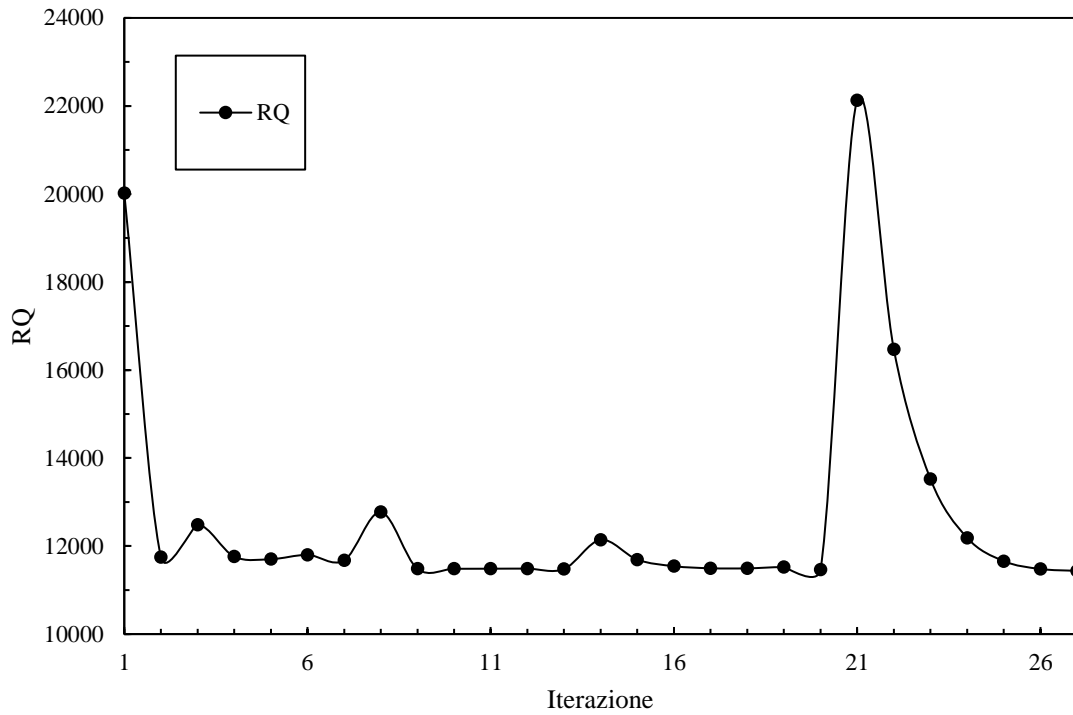


Figura D.5: andamento del residuo RQ in funzione del numero dell'iterazione.

Di seguito, si riportano i risultati relativi alla grafite POCO EDM-3[®] ed al SiC Hexoloy[®] SA, due materiali di cui si è studiata la conducibilità termica nel corso del capitolo 3.

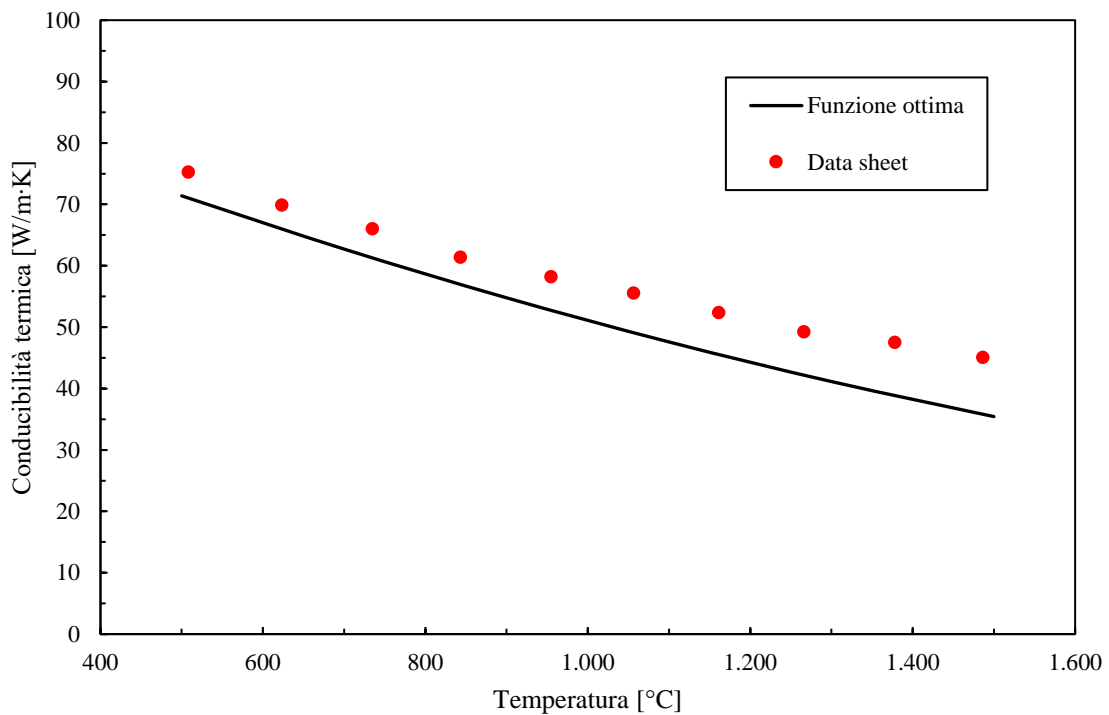


Figura D.6: stima della conducibilità termica della grafite POCO EDM-3[®] mediante l'applicazione del metodo della funzione ottima con una relazione quadratica.

C_0	96,3214905
C_1	0,054508388
C_2	9,28E-06
RQ	21929

Tabella D.2: parametri di output del metodo della funzione ottima applicato al caso di Figura D.6.

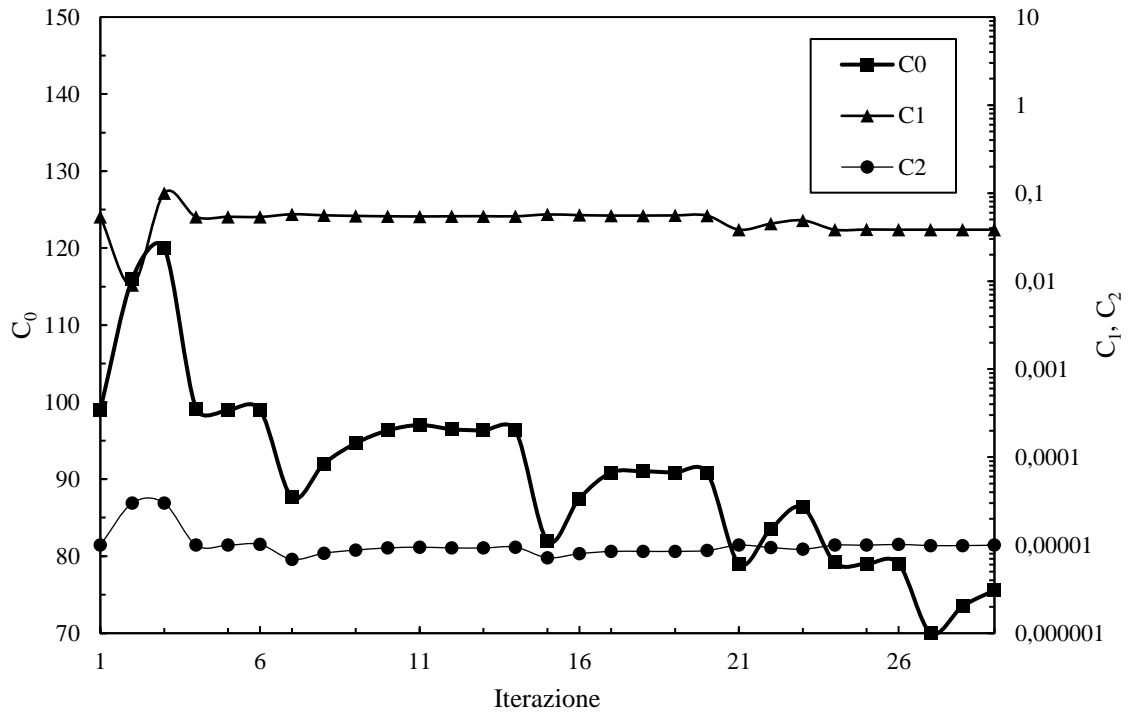


Figura D.7: andamento delle costanti del polinomio in funzione del numero dell'iterazione (grafite POCO EDM-3®).

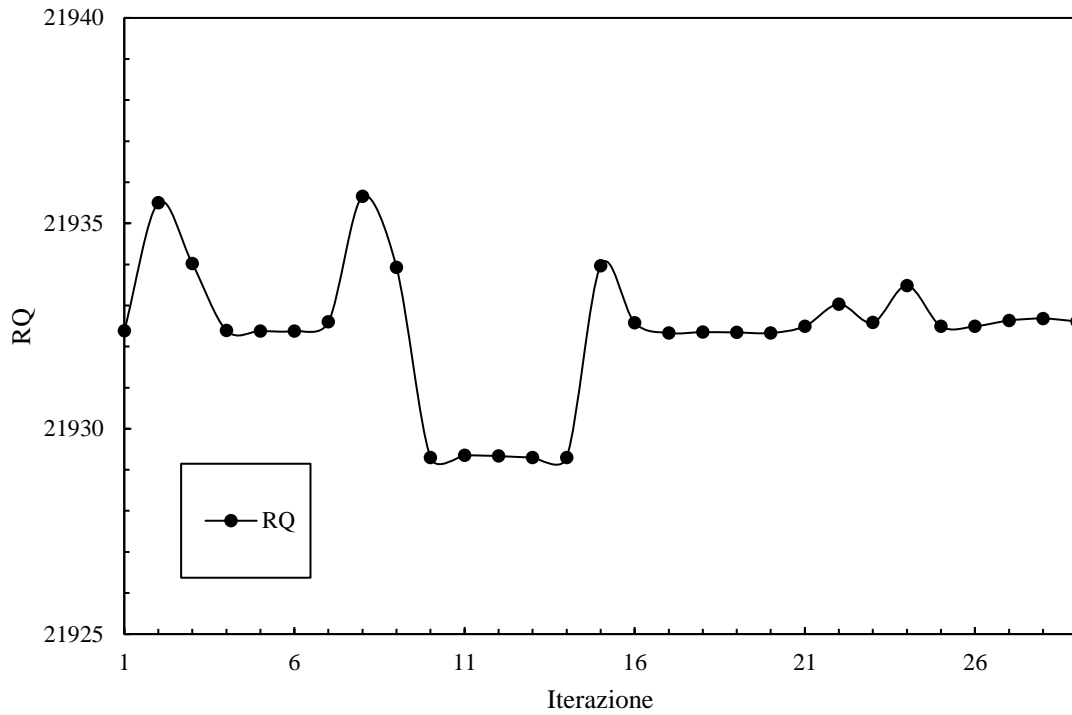


Figura D.8: andamento del residuo RQ in funzione del numero dell'iterazione (grafite POCO EDM-3®).

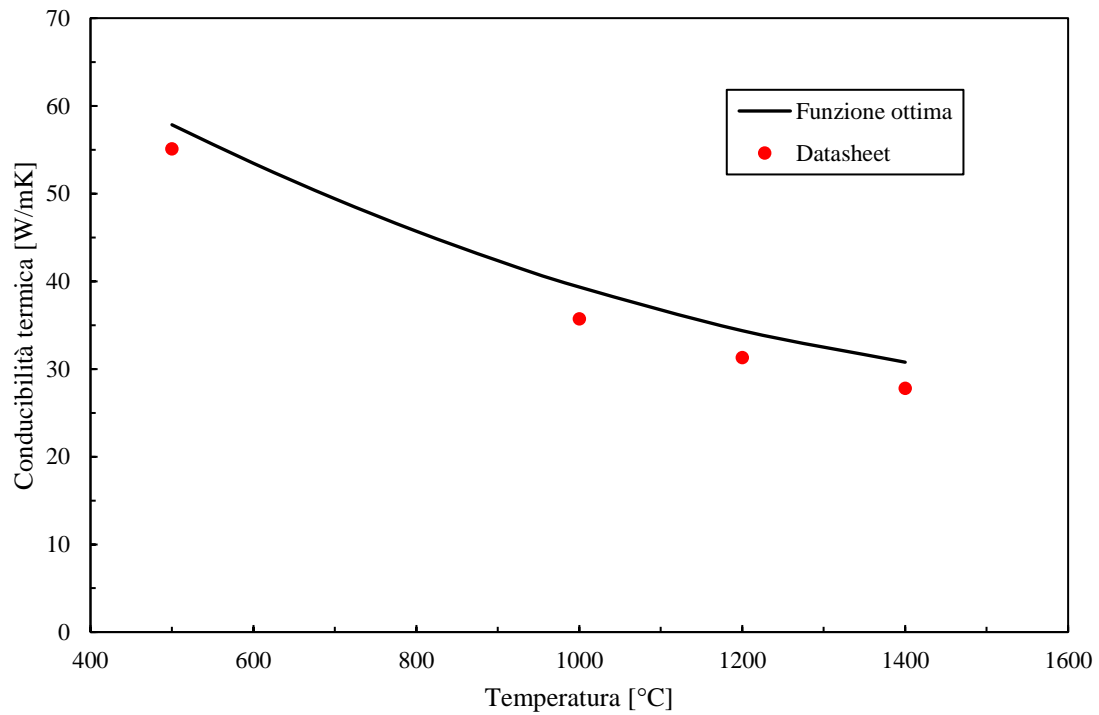


Figura D.9: stima della conducibilità termica del SiC Hexoloy® SA mediante l'applicazione del metodo della funzione ottima con una relazione quadratica.

C_0	84,9920789
C_1	0,0629498
C_2	1,73E-05
RQ	2678

Tabella D.3: parametri di output del metodo della funzione ottima applicato al caso di Figura D.9.

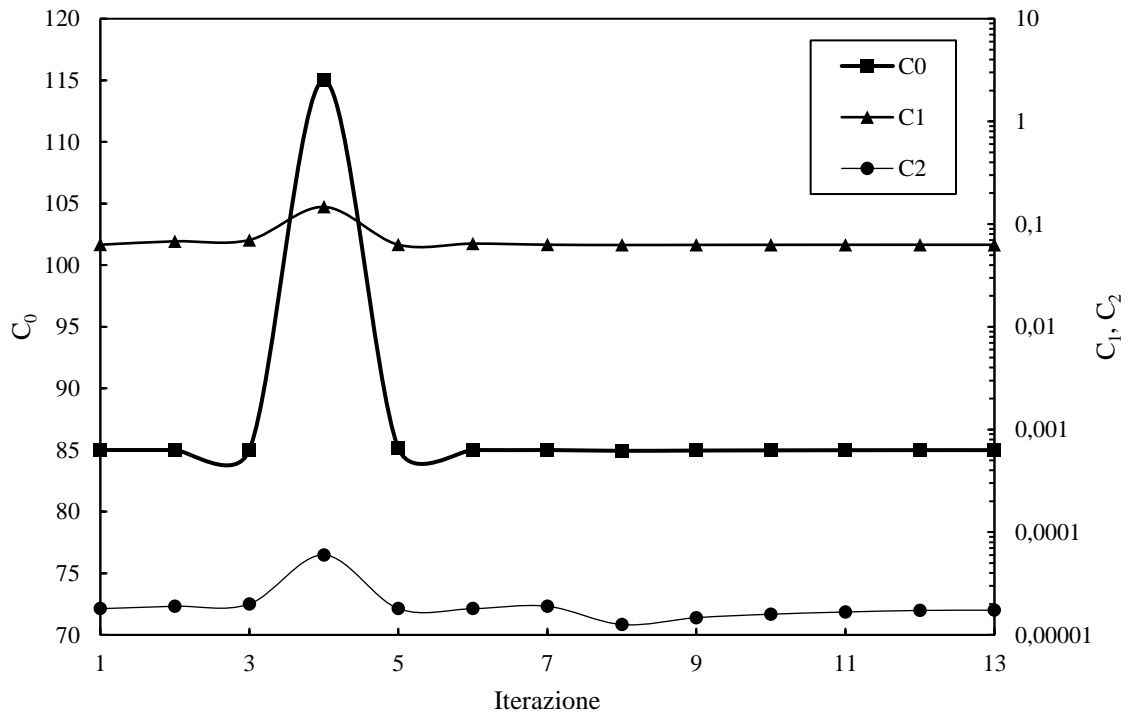


Figura D.10: andamento delle costanti del polinomio in funzione del numero dell'iterazione (SiC Hexoloy® SA).

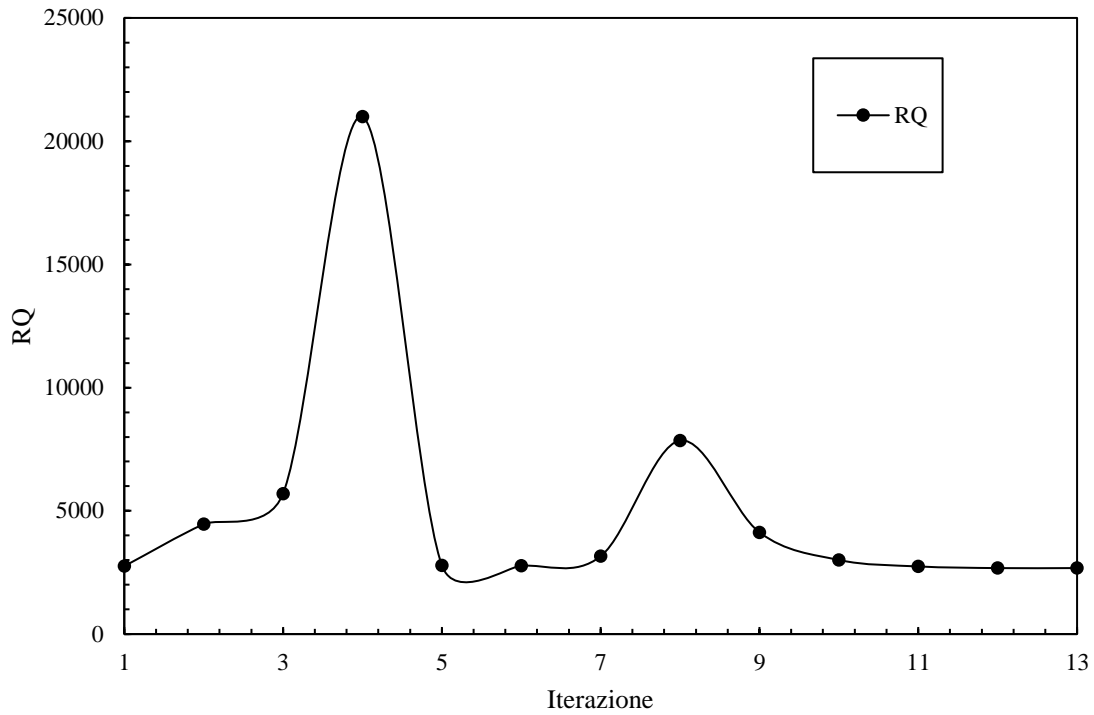


Figura D.11: andamento del residuo RQ in funzione del numero dell'iterazione (SiC Hexoloy® SA).

Infine, come svolto nel corso del capitolo 3, il metodo è stato applicato anche con un materiale avente conducibilità termica ignota, il SiC Hexoloy® SE. Le figure successive mostrano i risultati ottenuti.

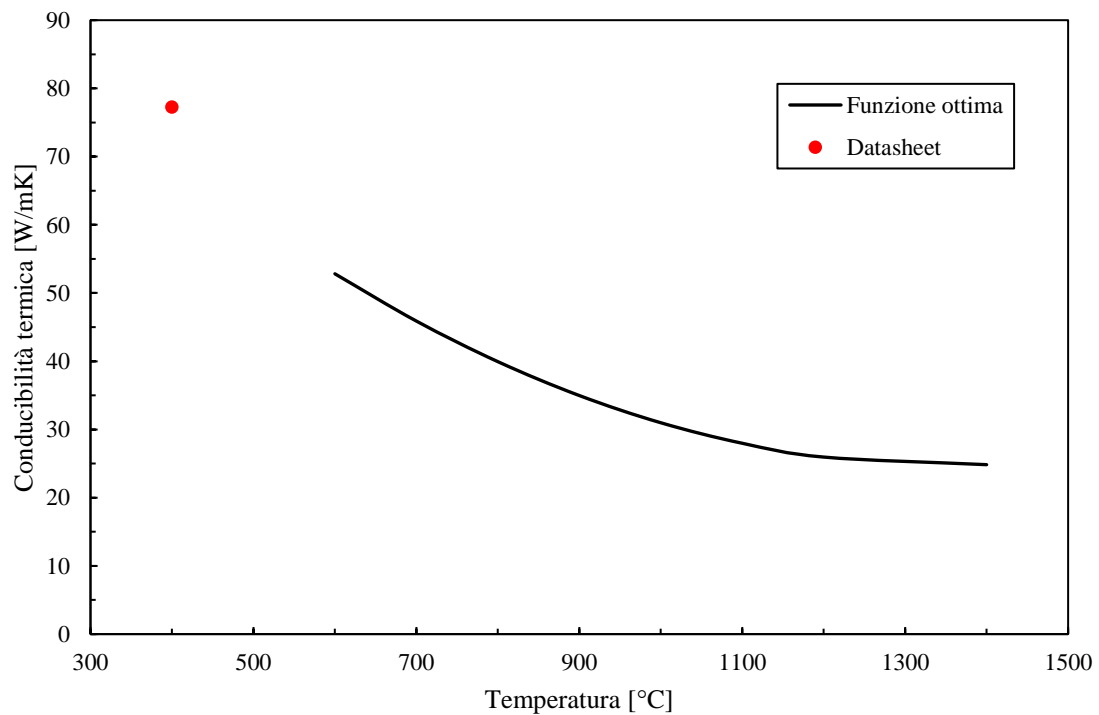


Figura D.12: stima della conducibilità termica del SiC Hexoloy® SE mediante l'applicazione del metodo della funzione ottima con una relazione quadratica.

C_0	114,978414
C_1	0,133009347
C_2	4,9E-05
RQ	29042

Tabella D.4: parametri di output del metodo della funzione ottima applicato al caso di Figura D.12.

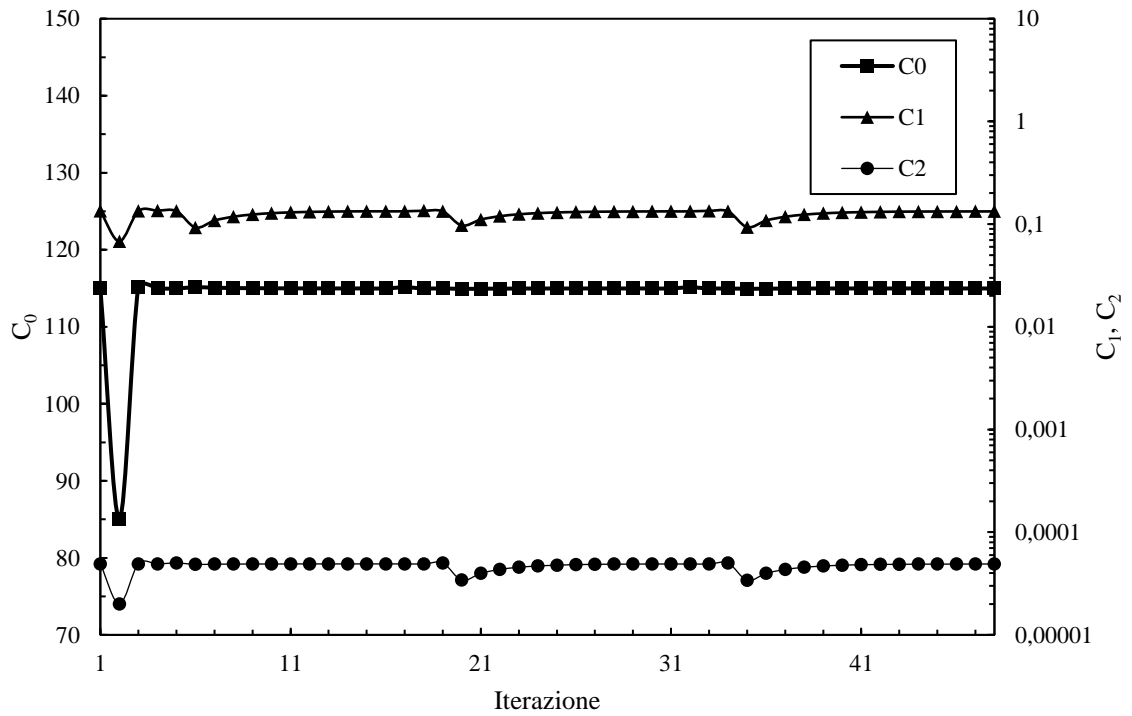


Figura D.13: andamento delle costanti del polinomio in funzione del numero dell'iterazione.

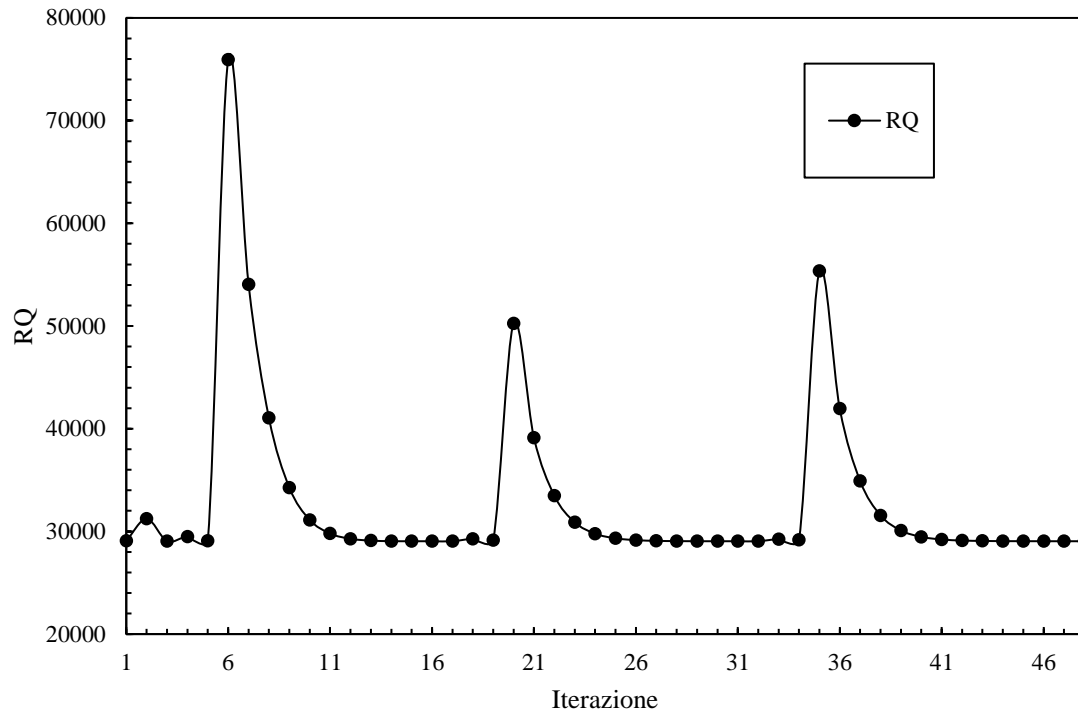


Figura D.14: andamento del residuo RQ in funzione del numero dell'iterazione.

D.4 Conclusioni

Il metodo della funzione ottima modificato prevede l'introduzione di un punto in corrispondenza della metà del raggio del disco (tra centro e periferia) in modo da fornire un ulteriore vincolo al processo di ottimizzazione. Confrontando i risultati ottenuti col metodo della funzione ottima modificato con quelli presentati nel corso del capitolo 3, si evince che i valori dei residui RQ sono sempre maggiori nel primo caso e, in particolare, la stima della conducibilità termica non risulta più precisa (nei casi in cui il materiale abbia conducibilità nota). Inoltre, il metodo modificato necessita di una misura sperimentale in più: questa misura è effettuata in un punto in cui vi è un significativo gradiente del campo di temperatura, pertanto la misura richiede notevole precisione nella sistemazione del pirometro. A valle di queste considerazioni, si può concludere che il metodo che utilizza due punti di misura, uno in centro ed uno in periferia del disco, sia migliore rispetto a quello descritto nella presente appendice.

APPENDICE E

APDL del modello numerico

E.1 Introduzione

Il modello numerico descritto nel corso del capitolo 3 è stato utilizzato per la validazione delle proprietà trovate in letteratura dei materiali d'interesse, per la stima della loro conducibilità termica mediante il metodo della funzione ottima e per ricostruire le condizioni di rottura ottenute sperimentalmente. Le analisi numeriche effettuate sono frutto della scrittura di un programma APDL, successivamente dato in input ad ansys che provvede alla risoluzione. Questo rappresenta una valida alternativa all'utilizzo diretto della GUI e, talvolta, l'unico modo per accedere a determinate funzioni. Durante questo lavoro di tesi ne sono stati sviluppati di diverse tipologie, a seconda delle dimensioni del disco, della sua distanza dal crogiolo riscaldante e dal materiale di cui è costituito, dai valori della corrente riscaldante e così via.

Nel corso della presente appendice, si riporta un esempio di APDL utilizzato per la validazione delle proprietà, un esempio di APDL utilizzato per la stima della conducibilità termica mediante analisi inversa ed un esempio di APDL per la valutazione delle tensioni strutturali frutto dei gradienti termici in gioco. In realtà, come già illustrato nel corso dei precedenti capitoli, sono state effettuate analisi anche sul solo crogiolo riscaldante e su dischi intagliati radialmente: questi APDL vengono tralasciati per evitare di appesantire la trattazione.

E.2 APDL per la validazione delle proprietà del materiale

Di seguito viene presentato un esempio di APDL utilizzato per la validazione delle proprietà del materiale di cui è costituito il disco.

```
!-----  
  
!Versione 1.0 (Sett. 2017) by  
!Ing. Matteo Sturaro  
!Istituto Nazionale di Fisica Nucleare  
!Laboratori di Legnaro  
!Viale dell'Universita' n. 2; 35020 Legnaro (PD) - Italy  
!e-mail: matteo.sturaro@lnl.infn.it  
  
!-----  
  
/PREP7  
  
!-----  
  
!Definizione degli elementi  
ET,1,SOLID226,110  
ET,2,SOLID90  
  
!Definizione dei materiali presenti  
M27INOX  
M71DISCO  
M10C_EDM3  
M28Cu  
  
FINISH  
  
!-----
```


Appendice E

!Emissività delle superfici interne della camera, misura del 2012
EMISCAMERA=0.73

!-----

!Dimensione del disco
DIAM=0.03
DEPHT=0.0013

!Coordinate in [m] per lo spostamento del disco dalla posizione di default
!Default: X=0m; Y=0.005m; Z=0
XOFFSET=0
YOFFSET=0
ZOFFSET=0

!-----

!Importazione dei file .igs
/AUX15

!Opzioni importazione .igs
IOPTN,IGES,SMOOTH
IOPTN,MERGE,YES
IOPTN,SOLID,YES
IOPTN,SMALL,YES
IOPTN,GTOLER,0.00001

!importazione .igs
IGESIN,'crogiolo','igs',''
VPLOT
IGESIN,'cilindro_rame','igs',''
VPLOT
IGESIN,'cilindro_rame_cpy_1','igs',''
VPLOT
IGESIN,'elettrodo','igs',''
VPLOT
IGESIN,'elettrodo_cpy_1','igs',''
VPLOT
IGESIN,'piastra_v2','igs',''
VPLOT
IGESIN,'campana','igs',''
VPLOT

FINISH

!-----

!Generazione dei volumi mancanti
WPSTYLE,,,,,,,,1

/PREP7

!Creazione disco
WPRO,,-90.000000,
WPOFFS,0,0,5+YOFFSET*1000
CYL4,0,0,DIAM*1000/2,,,,DEPHT*1000
APLOT
WPCSYS,-1

!Creazione della base

```
WPRO,,-90.000000,
WPOFFS,0,0,-58+YOFFSET*1000
CYL4,0,0,50/2,,,,,25
APLOT
WPCSYS,-1
```

```
!Creazione elemento cilindrico centro piastra
WPRO,,-90.000000,
WPOFFS,0,0,-77
CYL4,0,0,55/2,,,,,9
APLOT
WPCSYS,-1
```

```
!Creazione vite altezza cilindro dipende dalla posizione del disco
WPRO,,-90.000000,
WPOFFS,0,0,-68
CYL4,0,0,30/2, , , 10+YOffset*1000
APLOT
WPCSYS,-1
```

```
ALLSEL,ALL
VPLOT
```

```
FINISH
```

```
!-----
```

```
!Scala dei volumi creati
/PREP7
```

```
VLSCALE,ALL,,0.001,0.001,0.001,,0,1
```

```
FINISH
```

```
!-----
```

```
!Unione volumi e compattazione numerazione
```

```
/PREP7
VGLUE,1,2,3,4,5
VPLOT
NUMCMP,VOLU
NUMCMP,AREA
NUMCMP,LINE
```

```
VGLUE,1,4,5,6
VPLOT
NUMCMP,VOLU
NUMCMP,AREA
NUMCMP,LINE
FINISH
```

```
!-----
```

```
!Mesh dei volumi con elementi solidi
/PREP7
```

```
!MESH disco - volume 2
ESIZE,DEFA
```

Appendice E

```
DESIZE,DEFA  
TYPE,2  
MAT,DISCO  
MSHAPE,1,3D  
MSHKEY,0  
VSEL,S,,,2  
ASLV,S  
AESIZE,ALL,0.002  
VMESH,2  
ALLSEL,ALL
```

```
!MESH Crogiolo - volume 8  
DIMEL=0.0025  
ANGEL=DIMEL*360/(ACOS(-1)*0.018)  
ESIZE,DEFA  
DESIZE,DEFA  
TYPE,1  
MAT,C_EDM3  
MSHAPE,1,3D  
MSHKEY,0  
DESIZE,1,1,9999,ANGEL,ANGEL,DIMEL,1,1,4,  
VMESH,8
```

```
FR=0.60
```

```
!MESH della piastra - volume 11  
ESIZE,DEFA  
DESIZE,DEFA  
TYPE,2  
MAT,C_EDM3  
MSHAPE,1,3D  
MSHKEY,0  
ESIZE,0.020*FR  
VMESH,11
```

```
!MESH base - volume 9  
ESIZE,DEFA  
DESIZE,DEFA  
TYPE,2  
MAT,C_EDM3  
MSHAPE,1,3D  
MSHKEY,0  
ESIZE,0.020*FR  
VMESH,9
```

```
!MESH vite - volume 3  
ESIZE,DEFA  
DESIZE,DEFA  
TYPE,2  
MAT,C_EDM3  
MSHAPE,1,3D  
MSHKEY,0  
ESIZE,0.020*FR  
VSWEEP,3
```

```
!MESH cilindro sopra piastra - volume 10  
ESIZE,DEFA  
DESIZE,DEFA  
TYPE,2  
MAT,C_EDM3
```

```
MSHAPE,1,3D
MSHKEY,0
ESIZE,0.020*FR
VMESH,10
```

```
!MESH cilindro_rame - volume 4, 5
ESIZE,DEFA
DESIZE,DEFA
TYPE,1
MAT,Cu
MSHAPE,1,3D
MSHKEY,0
ESIZE,0.012
VMESH,4,5
```

```
!MESH elettrodo - volume 6, 7
ESIZE,DEFA
DESIZE,DEFA
TYPE,1
MAT,Cu
MSHAPE,1,3D
MSHKEY,0
ESIZE,0.008
VMESH,6,7
```

```
!Mesh campana - volume 1
TYPE,2
MAT,INOX
MSHAPE,1,3D
MSHKEY,0
ESIZE,0.020
VMESH,1
```

!-----

!Vincoli e carichi

```
!Condizione iniziale di temperatura per tutti i nodi
ALLSEL,ALL
TUNIF,20
```

```
!Superfici raffreddate
!Superfici esterne della campana
ASEL,S,AREA,,36,41,1
DA,ALL,TEMP,18
ALLSEL,ALL
```

```
!Superfici interne degli elettrodi
ASEL,S,AREA,,10,11,1
ASEL,A,AREA,,14,15,1
DA,ALL,TEMP,18
ALLSEL,ALL
```

```
!Elementi irraggianti
!Superfici interne della campana
ASEL,S,AREA,,98,103,1
SFA,ALL,,RDSF,EMISCAMERA,1
APLOT
ALLSEL,ALL
```

Appendice E

!Superfici della piastra

VSEL,S,VOLU,,11
ASLV,S
ASEL,U,AREA,,16
SFA,ALL,,RDSF,-C_EDM3,1
APLOT
ALLSEL,ALL

!Superfici del cilindro sopra la piastra

VSEL,S,VOLU,,10
ASLV,S
ASEL,U,AREA,,16
ASEL,U,AREA,,19
SFA,ALL,,RDSF,-C_EDM3,1
APLOT
ALLSEL,ALL

!Superfici della vite

VSEL,S,VOLU,,3
ASLV,S
ASEL,U,AREA,,20
ASEL,U,AREA,,19
SFA,ALL,,RDSF,-C_EDM3,1
APLOT
ALLSEL,ALL

!Superfici della base

VSEL,S,VOLU,,9
ASLV,S
ASEL,U,AREA,,20
SFA,ALL,,RDSF,-C_EDM3,1
APLOT
ALLSEL,ALL

!Superfici del disco

VSEL,S,VOLU,,2
ASLV,S
SFA,ALL,,RDSF,-DISCO,1
APLOT
ALLSEL,ALL

!Superfici del crogiolo

VSEL,S,VOLU,,8
ASLV,S
ASEL,U,AREA,,119
ASEL,U,AREA,,110
SFA,ALL,,RDSF,-C_EDM3,1
APLOT
ALLSEL,ALL
APLOT

!Superfici del cilindro in rame

VSEL,S,VOLU,,4,5,1
ASLV,S
ASEL,U,AREA,,119
ASEL,U,AREA,,110
ASEL,U,AREA,,114
ASEL,U,AREA,,123
ASEL,U,AREA,,107
ASEL,U,AREA,,115

```

SFA,ALL,,RDSF,-C_EDM3,1
APLOT
ALLSEL,ALL
APLOT

!Tensione e corrente
!Tensione
ASEL,S,AREA,,13
DA,ALL,VOLT,0

!Corrente
ASEL,S,AREA,,8
NSLA,S,1
CP,1,VOLT,ALL
NI=NDNEXT(0)

!Definizione del vettore corrente come funzione del tempo
IMIN=130
IMAX=260
IINC=10
TST_MAIN=3000
TST_INC=1500

NSTEP=(IMAX-IMIN)/IINC+1
TIME_TOT=(TST_MAIN+TST_INC*(NSTEP-1))

*DIM,I_HEAT,TABLE,(NSTEP*2),1,1,TIME

*SET,I_HEAT(1,0),0
*SET,I_HEAT(1,1),IMIN
*SET,I_HEAT(2,0),TST_MAIN
*SET,I_HEAT(2,1),IMIN

KA=1
KB=1

*DO,I,1,(NSTEP-1),1

*SET,I_HEAT((2+KA),0),(TST_MAIN+(KB-1)*TST_INC+1)
*SET,I_HEAT((2+KA),1),(IMIN+KB*IINC)

*SET,I_HEAT((2+KA+1),0),(TST_MAIN+KB*TST_INC)
*SET,I_HEAT((2+KA+1),1),(IMIN+KB*IINC)

KA=KA+2
KB=KB+1

*ENDDO

F,NI,AMPS,%I_HEAT%

ALLSEL,ALL

!-----

!Opzioni Radiosity Solver

!Definizione della temperatura dello spazio (open enclosure)
SPCTEMP,1,25

```

Appendice E

```
!Definizione delle opzioni per la soluzione
STEF,5.67e-8
RADOPT,,0.0001,0,20000,0.1,0.1
TOFFST,273.15
```

```
!Definire opzioni view factor
HEMIOPT,100
VFOPT,OFF
```

```
FINISH
```

```
!-----
```

```
!Solutore
/SOLU
```

```
SOLCONTROL,ON
ANTYPE,TRANS
AUTOTS,ON
KBC,1
DELTIM,0.0001,0.00005,100
OUTRES,NSOL,,ALL
TIME,TIME_TOT
SOLVE
SAVE,,,,ALL
```

```
FINISH
```

```
!-----
```

```
!Scrittura in un file esterno tensione
*CFOPEN,CORR_VOLT,TXT,,APPEND
VWRITE,I [A],V [V]
(4X,A8,4X,A8)
*CFCLOS
```

```
!-----
```

```
!Postprocessing tensione
K_POST=0
BACK_TIME=200

*DO,I,1,NSTEP,1
/POST1
SET,,,,(TST_MAIN+(TST_INC*K_POST)-BACK_TIME)
ALLSEL,ALL
```

```
EL_CURRENT=IMIN+K_POST*IINC
```

```
NSORT,VOLT,,1
*GET,VMAX,SORT,0,MAX
```

```
ALLSEL,ALL
```

```
!-----
```

```
!Scrittura in un file esterno tensione
*CFOPEN,CORR_VOLT,TXT,,APPEND
*VWRITE,EL_CURRENT,VMAX
```



```
(4X,F8.0,4X,F8.4)
*CFCLOS

!-----

ALLSEL,ALL

K_POST=K_POST+1

FINISH

*ENDDO

!-----

!Scrittura in un file esterno temperatura

*CFOPEN,RisultatiDisco,txt,,APPEND
*VWRITE,'I [A]', 'Tc [°C]', 'Tm [°C]', 'Tp [°C]'
(4x,A8,4x,A8,4x,A8,4x,A8)
*CFCLOS

!-----

!Postprocessing temperatura
K_POST=0
BACK_TIME=200

*DO,I,1,NSTEP,1
/POST1
SET,,,,(TST_MAIN+(TST_INC*K_POST)-BACK_TIME)
ALLSEL,ALL

EL_CURRENT=IMIN+K_POST*IINC
PATH,T_C,2,6,20
PPATH,1,,XOFFSET,DEPHT+0.005+YOFFSET,ZOFFSET-0.002
PPATH,2,,XOFFSET,DEPHT+0.005+YOFFSET,ZOFFSET+0.002
PDEF,T_C,TEMP
PCALC,INTG,INT_T_C,T_C,S,0.004**(-1),
*GET,TCD,PATH,0,MAX,INT_T_C

PATH,T_P,2,6,20
PPATH,1,,XOFFSET,DEPHT+0.005+YOFFSET,ZOFFSET+DIAM/2-0.004
PPATH,2,,XOFFSET,DEPHT+0.005+YOFFSET,ZOFFSET+DIAM/2
PDEF,T_P,TEMP
PCALC,INTG,INT_T_P,T_P,S,0.004**(-1),
*GET,TPD,PATH,0,MAX,INT_T_P

PATH,T_M,2,6,20
PPATH,1,,XOFFSET,DEPHT+0.005+YOFFSET,ZOFFSET+DIAM/4-0.002
PPATH,2,,XOFFSET,DEPHT+0.005+YOFFSET,ZOFFSET+DIAM/4+0.002
PDEF,T_M,TEMP
PCALC,INTG,INT_T_M,T_M,S,0.004**(-1),
*GET,TMD,PATH,0,MAX,INT_T_M

ALLSEL,ALL

!-----

!Scrittura in un file esterno temperatura
```

```
*CFOPEN,RisultatiDisco,txt,,APPEND
*VWRITE,eI_current,TCD,TMD,TPD
(4x,F8.0,4x,F8.3,4x,F8.3,4x,F8.3)
*CFCLOS
```

!-----

```
ALLSEL,ALL
FINISH
K_POST=K_POST+1
*ENDDO
```

!-----

E.3 APDL per la determinazione della conducibilità termica

Di seguito viene presentato un esempio di APDL utilizzato per la determinazione della conducibilità termica del materiale di cui è costituito il disco mediante l'utilizzo del tool di ottimizzazione interno ad Ansys®.

!-----

```
!Versione 1.13 (Nov. 2017) by
!Ing. Matteo Sturaro
!Istituto Nazionale di Fisica Nucleare
!Laboratori di Legnaro
!Viale dell'Universita' n. 2; 35020 Legnaro (PD) - Italy
!e-mail: matteo.sturaro@lnl.infn.it
```

!-----

```
!Creazione del file .mac e definizione del numero di iterazione
*CREATE,OPTFUN,MAC,
/PREP7
N=N+1
```

!-----

```
!Inserimento temperature sperimentali
ROW=8
COLUMN=3
*DIM,TSper,ARRAY,ROW,COLUMN,,TCROG,TEMP
*VREAD,TSper(1,1),TSperimentali,txt,,JIK,COLUMN,ROW,1,1
(F12.7,4x,F12.7,4x,F12.7)
```

!-----

```
!Definizione dei parametri di ottimizzazione
LAMBDA MIN=C0-C1*TSper(ROW,COLUMN)+C2*(TSper(ROW,COLUMN))**2
*CFOPEN,OPTIMIZATIONSTATE,txt,,APPEND
*VWRITE,'n',n
(A8,9x,F12.7)
*VWRITE,'C0',C0
(A8,9x,F12.7)
*VWRITE,'C1',C1
(A8,9x,F12.7)
*VWRITE,'C2',C2
(A8,9x,F12.7)
*VWRITE,'lamb min',LAMBDA MIN
(A8,9x,F12.7)
```

*CFCLOS

!-----

!Definizione degli elementi

ET,1,SOLID226,110

ET,2,SOLID90

M27INOX

!-----

!Definizione dei materiali presenti

M28Cu

M10C_EDM3

M71DISCO

FINISH

!-----

!Emissività della superficie interna della camera (misura del 2012)

EMISCAMERA=0.73

!-----

!Dimensione del disco

Diam=0.03

Depth=0.0013

!-----

!Coordinate in [m] per spostamento del disco dalla posizione di default (Y=0.005m)

XOffset=0

YOffset=-0.0025

ZOffset=0

!-----

!Importazione dei file.igs

/AUX15

!opzioni importazione .igs

IOPTN,IGES,SMOOTH

IOPTN,MERGE,YES

IOPTN,SOLID,YES

IOPTN,SMALL,YES

IOPTN,GTOLER,0.00001

!importazione .igs

IGESIN,'crogiolo','igs',''

VPLOT

IGESIN,'cilindro_rame','igs',''

VPLOT

IGESIN,'cilindro_rame_cpy_1','igs',''

VPLOT

IGESIN,'elettrodo','igs',''

VPLOT

IGESIN,'elettrodo_cpy_1','igs',''

VPLOT

IGESIN,'piastra_v2','igs',''

VPLOT

Appendice E

```
IGESIN,'campana','igs',''  
VPLOT  
FINISH
```

```
VPLOT  
FINISH
```

!-----

```
!Generazione dei volumi mancanti  
WPSTYLE,,,,,,,,,1
```

```
/PREP7
```

```
!Creazione disco  
WPRO,,-90.000000,  
WPOFFS,0,0,5+YOffset*1000  
CYL4,0,0,Diam*1000/2,,,,Depht*1000  
APLOT  
WPCSYS,-1
```

```
!Creazione della base  
WPRO,,-90.000000,  
WPOFFS,0,0,-58+YOffset*1000  
CYL4,0,0,50/2,,,,,25  
APLOT  
WPCSYS,-1
```

```
!Creazione elemento cilindrico centro piastra  
WPRO,,-90.000000,  
WPOFFS,0,0,-77  
CYL4,0,0,55/2,,,,,9  
APLOT  
WPCSYS,-1
```

```
!Creazione vite altezza cilindro dipende dalla posizione del disco  
WPRO,,-90.000000,  
WPOFFS,0,0,-68  
CYL4,0,0,30/2, , ,10+YOffset*1000  
APLOT  
WPCSYS,-1
```

```
ALLSEL,ALL  
VPLOT
```

```
FINISH
```

!-----

```
!Scala dei volumi creati  
/PREP7  
VLSCALE,ALL,,0.001,0.001,0.001,,0,1
```

```
FINISH
```

!-----

```
!Unione volumi e compattazione numerazione
```

```
/PREP7
```

VGLUE,1,2,3,4,5
 VPLOT
 NUMCMP,VOLU
 NUMCMP,AREA
 NUMCMP,LINE

VGLUE,1,4,5,6
 VPLOT
 NUMCMP,VOLU
 NUMCMP,AREA
 NUMCMP,LINE
 FINISH

!-----

!Mesh dei volumi con elementi solidi
 /PREP7

!MESH disco - volume 2
 ESIZE,DEFA
 DESIZE,DEFA
 TYPE,2
 MAT,DISCO
 MSHAPE,1,3D
 MSHKEY,0
 VSEL,S,,,2
 ASLV,S
 AESIZE,ALL,0.002
 VMESH,2
 ALLSEL,ALL

!MESH Crogiolo - volume 8
 DIMEL=0.0025
 ANGEL=DIMEL*360/(ACOS(-1)*0.018)
 ESIZE,DEFA
 DESIZE,DEFA
 TYPE,1
 MAT,C_EDM3
 MSHAPE,1,3D
 MSHKEY,0
 DESIZE,1,1,9999,ANGEL,ANGEL,DIMEL,1,1,4,
 VMESH,8

FR=0.60

!MESH della piastra - volume 11
 ESIZE,DEFA
 DESIZE,DEFA
 TYPE,2
 MAT,C_EDM3
 MSHAPE,1,3D
 MSHKEY,0
 ESIZE,0.020*FR
 VMESH,11

!MESH base - volume 9
 ESIZE,DEFA
 DESIZE,DEFA
 TYPE,2
 MAT,C_EDM3

Appendice E

```
MSHAPE,1,3D  
MSHKEY,0  
ESIZE,0.020*FR  
VMESH,9
```

```
!MESH vite - volume 3  
ESIZE,DEFA  
DESIZE,DEFA  
TYPE,2  
MAT,C_EDM3  
MSHAPE,1,3D  
MSHKEY,0  
ESIZE,0.020*FR  
VSWEEP,3
```

```
!MESH cilindro sopra piastra - volume 10  
ESIZE,DEFA  
DESIZE,DEFA  
TYPE,2  
MAT,C_EDM3  
MSHAPE,1,3D  
MSHKEY,0  
ESIZE,0.020*FR  
VMESH,10
```

```
!MESH cilindro_rame - volume 4, 5  
ESIZE,DEFA  
DESIZE,DEFA  
TYPE,1  
MAT,Cu  
MSHAPE,1,3D  
MSHKEY,0  
ESIZE,0.012  
VMESH,4,5
```

```
!MESH elettrodo - volume 6, 7  
ESIZE,DEFA  
DESIZE,DEFA  
TYPE,1  
MAT,Cu  
MSHAPE,1,3D  
MSHKEY,0  
ESIZE,0.008  
VMESH,6,7
```

```
!Mesh campana - volume 1  
TYPE,2  
MAT,INOX  
MSHAPE,1,3D  
MSHKEY,0  
ESIZE,0.020  
VMESH,1
```

!-----

!Vincoli e carichi

```
!Condizione iniziale di temperatura per tutti i nodi  
ALLSEL,ALL  
TUNIF,20
```

```
!Superfici raffreddate
!Superfici esterne della campana
ASEL,S,AREA,,36,41,1
DA,ALL,TEMP,18
ALLSEL,ALL
```

```
!Superfici interne degli elettrodi
ASEL,S,AREA,,10,11,1
ASEL,A,AREA,,14,15,1
DA,ALL,TEMP,18
ALLSEL,ALL
```

```
!Elementi irraggianti
!Superfici interne della campana
ASEL,S,AREA,,98,103,1
SFA,ALL,,RDSF,EMISCAMERA,1
APLOT
ALLSEL,ALL
```

```
!Superfici della piastra
VSEL,S,VOLU,,11
ASLV,S
ASEL,U,AREA,,16
SFA,ALL,,RDSF,-C_EDM3,1
APLOT
ALLSEL,ALL
```

```
!Superfici del cilindro sopra la piastra
VSEL,S,VOLU,,10
ASLV,S
ASEL,U,AREA,,16
ASEL,U,AREA,,19
SFA,ALL,,RDSF,-C_EDM3,1
APLOT
ALLSEL,ALL
```

```
!Superfici della vite
VSEL,S,VOLU,,3
ASLV,S
ASEL,U,AREA,,20
ASEL,U,AREA,,19
SFA,ALL,,RDSF,-C_EDM3,1
APLOT
ALLSEL,ALL
```

```
!Superfici della base
VSEL,S,VOLU,,9
ASLV,S
ASEL,U,AREA,,20
SFA,ALL,,RDSF,-C_EDM3,1
APLOT
ALLSEL,ALL
```

```
!Superfici del disco
VSEL,S,VOLU,,2
ASLV,S
SFA,ALL,,RDSF,-DISCO,1
APLOT
ALLSEL,ALL
```


Appendice E

```
!Superfici del crogiolo
VSEL,S,VOLU,,8
ASLV,S
ASEL,U,AREA,,119
ASEL,U,AREA,,110
SFA,ALL,,RDSF,-C_EDM3,1
APLOT
ALLSEL,ALL
APLOT
```

```
!Superfici del cilindro in rame
VSEL,S,VOLU,,4,5,1
ASLV,S
ASEL,U,AREA,,119
ASEL,U,AREA,,110
ASEL,U,AREA,,114
ASEL,U,AREA,,123
ASEL,U,AREA,,107
ASEL,U,AREA,,115
SFA,ALL,,RDSF,-C_EDM3,1
APLOT
ALLSEL,ALL
APLOT
```

!-----

!Opzioni Radiosity Solver

```
!Definizione della temperatura dello spazio (open enclosure)
SPCTEMP,1,25
```

```
!Definizione delle opzioni per la soluzione
STEF,5.67e-8
RADOPT,,0.0001,0,20000,0.1,0.1
TOFFST,273.15
```

```
!Definire opzioni view factor
HEMIOPT,100
VFOPT,OFF
```

FINISH

!-----

!Tensione e corrente

```
/PREP7
```

```
!Tensione
ASEL,S,AREA,,13
DA,ALL,VOLT,0
```

```
!Corrente
ASEL,S,AREA,,8
NSLA,S,1
CP,1,VOLT,ALL
NI=NDNEXT(0)
```

```
*DIM,CORRENTE,TABLE,(2*ROW+1),1,1,TIME
```

```

CORRENTE(1,0)=0
CORRENTE(1,1)=0
K=0
*DO,I,3,(2*ROW+1),2
K=K+1
CORRENTE(I,0)=K*3000
CORRENTE(I-1,0)=K*3000-2999
CORRENTE(I,1)=TSPER(K,1)
CORRENTE(I-1,1)=TSPER(K,1)
*ENDDO
F,NI,AMPS,%CORRENTE%

```

```

ALLSEL,ALL
MPTGEN,1,45,0,50
MP,KXX,DISCO,C0,-C1,C2
VPLT
*DO,I,1,ROW,1
TIME,I*3000
LSWRITE,I
*ENDDO
SAVE,,,,ALL
FINISH

```

!-----

!Solutore

```

/SOLU
ANTYPE,TRANS
OUTRES,NSOL,ALL
SOLCONTROL,ON
AUTOTS,ON
DELTIM,0.05,0.05,500
*GET,TINIZIO,ACTIVE,0,TIME,CPU
LSSOLVE,1,ROW,1
*GET,TFINE,ACTIVE,0,TIME,CPU
FINISH

```

!-----

!Postprocessing

```

/POST1
ALLSEL,ALL
*DIM,TNUM,ARRAY,ROW,COLUMN,,CURRENT,TEMP
*DO,I,1,ROW,1
SET,I,LAST,1
PATH,T_PER,2,6,20
PPATH,1,,XOFFSET,DEPHT+0.005+YOFFSET,ZOFFSET+DIAM/2-0.004
PPATH,2,,XOFFSET,DEPHT+0.005+YOFFSET,ZOFFSET+DIAM/2
PDEF,T_PER,TEMP
PCALC,INTG,INT_T_PER,T_PER,S,0.004**(-1),
*GET,TPN,PATH,0,MAX,INT_T_PER
PATH,T_CEN,2,6,20
PPATH,1,,XOFFSET,DEPHT+0.005+YOFFSET,ZOFFSET-0.002
PPATH,2,,XOFFSET,DEPHT+0.005+YOFFSET,ZOFFSET+0.002
PDEF,T_CEN,TEMP
PCALC,INTG,INT_T_CEN,T_CEN,S,0.004**(-1),
*GET,TCN,PATH,0,MAX,INT_T_CEN
ALLSEL,ALL

```

Appendice E

```
TNUM(I,1)=TSPER(I,1)
TNUM(I,2)=TPN
TNUM(I,3)=TCN
*ENDDO
```

```
RQ=0
*DO,I,1,ROW,1
*DO,J,2,COLUMN,1
RQ=RQ+(TNUM(I,J)-TSPER(I,J))*2
*ENDDO
*ENDDO
FINISH
```

!-----

!Scrittura dei risultati in un file esterno

```
*CFOPEN,TNUMERICHE,TXT,,APPEND
*VWRITE,' '
(A8)
*VWRITE,'N',N
(A8,9X,F12.7)
*VWRITE,I[A]','TPN','TCN'
(A8,8X,A8,8X,A8)
*VWRITE,TNUM(1,1),TNUM(1,2),TNUM(1,3)
(F12.7,4X,F12.7,4X,F12.7)
*CFCLOS
*CFOPEN,OPTIMIZATIONSTATE,TXT,,APPEND
*VWRITE,'RQ',RQ
(A8,9X,F12.3)
*VWRITE,'TEMPO ','LAVORO ','CPU SEC',(TFINE-TINIZIO)
(A6,A7,A7,F8.2)
*VWRITE,' '
(A8)
*CFCLOS
SAVE
*END
```

!-----

!Ottimizzazione

```
/OPT
N=0
OPCLR
OPANL,OPTFUN,MAC
OPVAR,C0,DV,50,70,0.5
OPVAR,C1,DV,0,0.1,0.002
OPVAR,C2,DV,0,0.0001,0.0000002
OPVAR,LAMBDA MIN,SV,0,70,2
OPVAR,RQ,OBJ,0,,
OPPRNT,ON
OPKEEP,ON
OPLOOP,,IGNORE,ALL

*CFOPEN,OPTIMIZATIONSTATE,TXT,,APPEND
*VWRITE,'SINGLE L','OOP RUN'
(A8,A8)
*CFCLOS
C0=55
```

```

C1=0.0165
C2=0.000012
OPTYPE,RUN
OPEXE

*CFOPEN,OPTIMIZATIONSTATE,TXT,,APPEND
*VWRITE,'SINGLE L','OOP RUN'
(A8,A8)
*CFCLOS
C0=58
C1=0.03
C2=0.000006
OPEXE

*CFOPEN,OPTIMIZATIONSTATE,TXT,,APPEND
*VWRITE,'SINGLE L','OOP RUN'
(A8,A8)
*CFCLOS
C0=55
C1=0.02
C2=0.000009
OPEXE

*CFOPEN,OPTIMIZATIONSTATE,TXT,,APPEND
*VWRITE,'SINGLE L','OOP RUN'
(A8,A8)
*CFCLOS
C0=57
C1=0.001
C2=0.000012
OPEXE

*CFOPEN,OPTIMIZATIONSTATE,TXT,,APPEND
*VWRITE,'SINGLE L','OOP RUN'
(A8,A8)
*CFCLOS
C0=60
C1=0.03
C2=0.000007
OPEXE

*CFOPEN,OPTIMIZATIONSTATE,TXT,,APPEND
*VWRITE,'FIRST'
(A8)
*CFCLOS
OPSAVE
OPLIST,ALL,,,1
OPRESU,,,
OPSEL,-1

OPANL,OPTFUN,MAC

OPVAR,C0,DV,50,70,0.5
OPVAR,C1,DV,0,0.1,0.002
OPVAR,C2,DV,0,0.0001,0.0000002
OPVAR,LAMBDA MIN,SV,0,70,2
OPVAR,RQ,OBJ,0,,

OPPRNT,ON
OPKEEP,ON

```

```
OPLOOP,,IGNORE,ALL
OPTYPE,FIRST
OPFRST,,50
STATUS
OPEXE
OPSAVE
OPLIST,ALL,,1
OPSEL,1
```

```
PLVAROPT,C0
PLVAROPT,C1
PLVAROPT,RQ
FINISH
```

!-----

E.4 APDL per la valutazione delle tensioni strutturali

Di seguito viene presentato un esempio di APDL utilizzato per la determinazione delle tensioni strutturali sul disco causate dai gradienti termici ai quali è sottoposto.

!-----

```
!Version 1.0 (Sept. 2017) by
!Ing. Matteo Sturaro
!Istituto Nazionale di Fisica Nucleare
!Laboratori di Legnaro
!Viale dell'Universita' n. 2; 35020 Legnaro (PD) - Italy
!e-mail: matteo.sturaro@lnl.infn.it
```

!-----

!Scrittura in un file esterno

```
*CFOPEN,STRESSDISCO,TXT,,APPEND
*VWRITE,'TIME','CORRENTE','STRESS1'
(4X,A4,4X,A8,A12)
```

!-----

!Risultati analisi termica

```
/POST1
*DO,TIME,2500,22000,1500
```

```
N=((TIME-2500)/1500)
I_INIZIALE=130
I=I_INIZIALE+N*10
```

```
SET,NEAR,,0,TIME
FINISH
```

!-----

!Conversione in elementi strutturali

```
/PREP7
LSCLEAR,ALL
ETCHG,TTS
```

```
LDREAD,TEMP,,TIME,0,FILE,RST
FINISH
```

```
/FILENAME,STRUTTURALE_%I%
```

```
/PREP7
VSEL,S,VOLU,,2
VSEL,INVE
VCLEAR,ALL
VDELE,ALL,,1
ALLSEL,ALL
```

```
!-----
```

```
!Vincoli
```

```
DK,105,UX,0
DK,105,UY,0
DK,105,UZ,0
DK,120,UZ,0
DK,120,UY,0
DK,122,UY,0
FINISH
```

```
!-----
```

```
!Lancio della soluzione
```

```
/SOLU
TREF,20
ANTYPE,STATIC
TIME,1
SOLVE
FINISH
```

```
!-----
```

```
!Postprocessing
```

```
/POST1
NSORT,S,1,1,1
*GET,STRESS1PA,SORT,0,MAX
*SET,STRESS1,STRESS1PA*1E-6
FINISH
```

```
!-----
```

```
!Scrittura dei risultati in un file esterno
```

```
*CFOPEN,stressdisco,TXT,,APPEND
*VWRITE,TIME,I,STRESS1
(F8.1,,4X,F5.1,4X,F10.3)
*CFCLOS
```

```
SAVE,,,ALL
```

```
*ENDDO
```

```
FINISH
```

Appendice E

/EXIT,ALL

!-----

APPENDICE F

Macro dei materiali utilizzati

F.1 Introduzione

Ogni modello numerico è sviluppato con lo scopo di rappresentare il più correttamente possibile la realtà sperimentale. A tal fine, ad ogni oggetto modellato viene assegnato il materiale di cui il corrispondente oggetto reale è costituito. Le proprietà che vengono assegnate a tali materiali vengono raccolte in *macro*, cioè in file di testo richiamabili attraverso un comando APDL. Nella presente appendice, si riportano le macro dei materiali utilizzati per lo sviluppo del modello numerico descritto nel corso del capitolo 3.

F.2 Macro della grafite POCO EDM-3®

```
!-----  
!EDM-3 graphite  
!Composition: isotropic ultrafine grain graphite
```

```
!-----  
!Version 1.0 (May 2015) by  
!Fabio D'Agostini  
!University of Padova  
!Master's Thesis Work at INFN - LNL  
!-----  
!  
!Ver. 1.0 - May 2015  
!-----
```

```
/PREP7  
!  
C_EDM3=10  
MPDELE,all,C_EDM3  
!
```

```
!-----  
!ELECTRICAL RESISTIVITY  
!  
!NOTE 1 - Data are taken from:  
!Properties and Characteristics of Graphite for the EDM Industry, Poco Graphite, Decatur, 2002.  
!  
!NOTE 2 - The S.I. system of units is used.  
!-----
```

```
!Temperature table [°C]  
MPTEMP ! erase previous table  
MPTEMP, 1, 12.4, 157.5, 206.2,  
MPTEMP, 4, 265.9, 314.9, 391.2,  
MPTEMP, 7, 440.3, 555.1, 615.4,  
MPTEMP, 10, 719.4, 889.4, 977.1,  
MPTEMP, 13, 1015.5, 1114.3, 1174.7,  
MPTEMP, 16, 1262.6, 1339.5, 1405.5,  
MPTEMP, 19, 1465.9, 1553.9, 1608.8,  
MPTEMP, 22, 1707.8, 1762.8, 1856.2,
```


MPTEMP, 25, 1911.2, 2004.6, 2109.0,
 MPTEMP, 28, 2202.4, 2251.9, 2312.4,

!Electrical resistivity table [ohm m]

MPDATA,RSVX , C_EDM3 , 1, 1.318E-05, 1.081E-05, 1.032E-05,
 MPDATA,RSVX , C_EDM3 , 4, 9.861E-06, 9.550E-06, 9.181E-06,
 MPDATA,RSVX , C_EDM3 , 7, 9.006E-06, 8.754E-06, 8.676E-06,
 MPDATA,RSVX , C_EDM3 , 10, 8.579E-06, 8.579E-06, 8.618E-06,
 MPDATA,RSVX , C_EDM3 , 13, 8.638E-06, 8.735E-06, 8.812E-06,
 MPDATA,RSVX , C_EDM3 , 16, 8.948E-06, 9.084E-06, 9.206E-06,
 MPDATA,RSVX , C_EDM3 , 19, 9.317E-06, 9.511E-06, 9.627E-06,
 MPDATA,RSVX , C_EDM3 , 22, 9.860E-06, 9.977E-06, 1.017E-05,
 MPDATA,RSVX , C_EDM3 , 25, 1.029E-05, 1.044E-05, 1.062E-05,
 MPDATA,RSVX , C_EDM3 , 28, 1.081E-05, 1.091E-05, 1.106E-05,

!-----

!THERMAL CONDUCTIVITY

!

!NOTE 1 - Data are taken from:

!Properties and Characteristics of Graphite for the EDM Industry, Poco Graphite, Decatur, 2002.

!

!NOTE 2 - Data are valid for all POCO "Ultrafine" graphite (average grain size <=5µm).

!

!NOTE 3 - Above 1653.1°C data refer to POCO AXM-5Q (average grain size =5µm) and are taken from:

!Taylor, R. E., & Groot, H. Thermophysical Properties of POCO Graphite.(West Lafayette, Indiana: Purdue University, July 1978. [NTIS No.ADA060419]), p.16.

!

!NOTE 4 - The S.I. system of units is used.

!

!-----

!Temperature table [°C]

MPTEMP ! erase previous table

MPTEMP, 1, 25.9, 39.3, 66.2,
 MPTEMP, 4, 126.7, 207.6, 298.8,
 MPTEMP, 7, 393.3, 508.2, 623.2,
 MPTEMP, 10, 734.8, 843.0, 954.7,
 MPTEMP, 13, 1056.3, 1161.2, 1266.1,
 MPTEMP, 16, 1377.8, 1486.2, 1581.0,
 MPTEMP, 19, 1635.1, 1728.0, 1878.6,
 MPTEMP, 22, 1979.8, 2076.9, 2128.5,

!Thermal Conductivity table [W/m°C]

MPDATA,KXX , C_EDM3 , 1, 119.027, 116.132, 111.304,
 MPDATA,KXX , C_EDM3 , 4, 102.611, 94.876, 89.066,
 MPDATA,KXX , C_EDM3 , 7, 81.808, 75.268, 69.932,
 MPDATA,KXX , C_EDM3 , 10, 66.043, 61.432, 58.266,
 MPDATA,KXX , C_EDM3 , 13, 55.584, 52.4203, 49.256,
 MPDATA,KXX , C_EDM3 , 16, 47.536, 45.094, 43.137,
 MPDATA,KXX , C_EDM3 , 19, 41.434, 41.32, 40.66,
 MPDATA,KXX , C_EDM3 , 22, 39.88, 39.31, 39.12,

!-----

!EMISSIVITY (hemispherical total emittance)

!

!NOTE 1 - Data are taken from:

!Properties and Characteristics of Graphite for the EDM Industry, Poco Graphite, Decatur, 2002.

!

!NOTE 2 - the S.I. system of units is used.

!

!-----

!Temperature table [°C]

MPTEMP ! erase previous table

MPTEMP,	1,	1426.85,	1526.85,	1626.85,
MPTEMP,	4,	1726.85,	1826.85,	1926.85,
MPTEMP,	7,	2026.85,	2126.85,	2226.85,
MPTEMP,	10,	2326.85,	2426.85,	2526.85,
MPTEMP,	13,	2626.85,		

!Emissivity table [-]

MPDATA,EMIS , C_EDM3	,	1,	0.833,	0.835,	0.837,
MPDATA,EMIS , C_EDM3	,	4,	0.840,	0.842,	0.844,
MPDATA,EMIS , C_EDM3	,	7,	0.846,	0.849,	0.851,
MPDATA,EMIS , C_EDM3	,	10,	0.853,	0.856,	0.858,
MPDATA,EMIS , C_EDM3	,	13,	0.86,		

!-----

!DENSITY

!

!NOTE 1 - Data are taken from:

!Properties and Characteristics of Graphite for the EDM Industry, Poco Graphite, Decatur, 2002.

!

!NOTE 2 - The S.I. system of units is used.

!-----

!Temperature table [°C]

MPTEMP ! erase previous table

MPTEMP, 1, 20,

!Density table [kg/m³]

MPDATA,DENS , C_EDM3 , 1, 1810,

!-----

!SPECIFIC HEAT

!

!NOTE 1 - Data are taken from:

!Properties and Characteristics of Graphite for the EDM Industry, Poco Graphite, Decatur, 2002.

!

!NOTE 2 - the S.I. system of units is used.

!-----

MPTEMP ! erase previous table

MPTEMP,	1,	25.1,	128.0,	224.8,
MPTEMP,	4,	327.2,	423.5,	525.6,
MPTEMP,	7,	627.5,	729.3,	825.1,
MPTEMP,	10,	926.8,	1028.4,	1130.0,
MPTEMP,	13,	1225.6,	1327.2,	1428.7,
MPTEMP,	16,	1530.2,	1631.7,	1727.2,
MPTEMP,	19,	1828.7,	1930.2,	2031.6,
MPTEMP,	22,	2133.1,	2228.6,	2330.0,
MPTEMP,	25,	2431.5,	2527.0,	2628.4,
MPTEMP,	28,	2729.9,		

!Specific heat table [J/kg°C]

MPDATA,C , C_EDM3 , 1, 711.332, 956.655, 1184.858,

MPDATA,C , C_EDM3	, 4,	1367.325,	1509.815,	1623.712,
MPDATA,C , C_EDM3	, 7,	1714.752,	1782.936,	1845.428,
MPDATA,C , C_EDM3	, 10,	1896.469,	1936.082,	1969.980,
MPDATA,C , C_EDM3	, 13,	1998.188,	2026.373,	2048.842,
MPDATA,C , C_EDM3	, 16,	2065.599,	2082.355,	2099.134,
MPDATA,C , C_EDM3	, 19,	2115.890,	2126.933,	2137.975,
MPDATA,C , C_EDM3	, 22,	2149.017,	2160.082,	2171.124,
MPDATA,C , C_EDM3	, 25,	2182.166,	2193.230,	2198.558,
MPDATA,C , C_EDM3	, 28,	2209.600,		

!-----

!COEFFICIENT OF THERMAL EXPANSION

!

!NOTE 1 - Data are taken from:

!Properties and Characteristics of Graphite for the EDM Industry, Poco Graphite, Decatur, 2002.

!

!NOTE 2 - The S.I. system of units is used.

!-----

!Temperature table [°C]

MPTEMP ! erase previous table

MPTEMP,	1,	100,	200,	300,
MPTEMP,	4,	400,	500,	600,
MPTEMP,	7,	700,	800,	901,
MPTEMP,	10,	1000,	1100,	1200,
MPTEMP,	13,	1300,	1400,	1500,
MPTEMP,	16,	1600,	1700,	1800,
MPTEMP,	19,	1900,	2000,	2100,
MPTEMP,	22,	2200,	2300,	2400,
MPTEMP,	25,	2500,		

!Secant coefficient of thermal expansion [1/°C]

MPDATA,ALPX , C_EDM3	, 1,	7.27E-06,	7.34E-06,	7.44E-06,
MPDATA,ALPX , C_EDM3	, 4,	7.51E-06,	7.60E-06,	7.68E-06,
MPDATA,ALPX , C_EDM3	, 7,	7.77E-06,	7.86E-06,	7.95E-06,
MPDATA,ALPX , C_EDM3	, 10,	8.03E-06,	8.10E-06,	8.20E-06,
MPDATA,ALPX , C_EDM3	, 13,	8.29E-06,	8.38E-06,	8.46E-06,
MPDATA,ALPX , C_EDM3	, 16,	8.53E-06,	8.62E-06,	8.71E-06,
MPDATA,ALPX , C_EDM3	, 19,	8.79E-06,	8.88E-06,	8.96E-06,
MPDATA,ALPX , C_EDM3	, 22,	9.03E-06,	9.10E-06,	9.20E-06,
MPDATA,ALPX , C_EDM3	, 25,	9.27E-06,		

!-----

!ELASTIC MODULUS

!

!NOTE 1 - Data are taken from:

!Properties and Characteristics of Graphite for the EDM Industry, Poco Graphite, Decatur, 2002.

!

!NOTE 2 - The S.I. system of units is used.

!-----

!Temperature table [°C]

MPTEMP ! erase previous table

MPTEMP,	1,	20.,
---------	----	------

!Elastic modulus [Pa]

MPDATA,EX , C_EDM3	, 1,	1.03E+10,
--------------------	------	-----------

```

!-----
!POISSON'S RATIO
!
!NOTE 1 - Data are taken from:
!Seisson, Gabriel, et al. "Dynamic cratering of graphite: Experimental results and simulations." International
Journal of Impact Engineering 63 (2014): 18-28.
!
!-----

```

```

!Temperature table [°C]
MPTEMP ! erase previous table
MPTEMP,      1,      20.,

!Poisson's ratio [-]
MPDATA,PRXY , C_EDM3  , 1,  3.0E-01,

```

F.3 Macro della grafite POCO EDM-3® CERN

```

!-----
!
!EDM-3 graphite
!Composition: isotropic ultrafine grain graphite
!
!-----
!
!Version 2.2 (Mar. 2018) by
!Eng. Matteo Sturaro
!Istituto Nazionale di Fisica Nucleare
!Laboratori di Legnaro
!Viale dell'Universita' n. 2; 35020 Legnaro (PD) - Italy
!e-mail: matteo.sturaro@lnl.infn.it
!
!-----

```

```

/PREP7
!
C_EDM3=10
MPDELE,all,C_EDM3
!

```

```

!-----
!ELECTRICAL RESISTIVITY
!
!NOTE 1 - Data are taken from:
!Properties and Characteristics of Graphite for the EDM Industry, Poco Graphite, Decatur, 2002.
!Data extrapolated from EDM-3 and adapted to the correct density value
!
!NOTE 2 - The S.I. system of units is used.
!-----

```

```

!Temperature table [°C]
MPTEMP ! erase previous table
MPTEMP,      1,      20,      250,      500,
MPTEMP,      4,      750,      1000,      1250,
MPTEMP,      7,      1500,      1750,      2000,
MPTEMP,     10,      2250,

```

!Electrical resistivity table [ohm m]

MPDATA,RSVX , C_EDM3 , 1, 1.633E-05, 1.116E-05, 9.924E-06,
 MPDATA,RSVX , C_EDM3 , 4, 9.521E-06, 9.648E-06, 1.006E-05,
 MPDATA,RSVX , C_EDM3 , 7, 1.053E-05, 1.106E-05, 1.171E-05,
 MPDATA,RSVX , C_EDM3 , 10, 1.212E-05,

!-----

!THERMAL DIFFUSIVITY

!

!NOTE 1 - Data are taken from:

!Matteo Sturaro's measurements @CERN (February 2017), Laser Flash method

!NOTE 2 - The S.I. system of units is used.

!

!-----

!Temperature table [°C]

MPTEMP ! erase previous table

MPTEMP, 1, 25, 50, 100,
 MPTEMP, 4, 200, 300, 400,
 MPTEMP, 7, 600, 800, 1000,
 MPTEMP, 10, 1200, 1400, 1600,
 MPTEMP, 13, 1800, 1900,

!Thermal diffusivity table [W/m°C]

MPDATA,KXX , C_EDM3 , 1, 5.966E-05, 5.452E-05, 4.611E-05,
 MPDATA,KXX , C_EDM3 , 4, 3.482E-05, 2.832E-05, 2.422E-05,
 MPDATA,KXX , C_EDM3 , 7, 1.937E-05, 1.642E-05, 1.427E-05,
 MPDATA,KXX , C_EDM3 , 10, 1.288E-05, 1.170E-05, 1.084E-05,
 MPDATA,KXX , C_EDM3 , 13, 1.015E-05, 9.870E-06,

!-----

!THERMAL CONDUCTIVITY

!

!NOTE 1 - Data are taken from:

!Matteo Sturaro's measurements @CERN (February 2017), Laser Flash method

!NOTE 2 - The S.I. system of units is used.

!

!-----

!Temperature table [°C]

MPTEMP ! erase previous table

MPTEMP, 1, 25, 50, 100,
 MPTEMP, 4, 200, 300, 400,
 MPTEMP, 7, 600, 800, 1000,
 MPTEMP, 10, 1200, 1400, 1600,
 MPTEMP, 13, 1800, 1900,

!Thermal conductivity table [W/m°C]

MPDATA,KXX , C_EDM3 , 1, 72.96, 72.33, 70.69,
 MPDATA,KXX , C_EDM3 , 4, 67.97, 64.53, 61.78,
 MPDATA,KXX , C_EDM3 , 7, 56.45, 51.66, 47.50,
 MPDATA,KXX , C_EDM3 , 10, 44.23, 41.09, 39.02,
 MPDATA,KXX , C_EDM3 , 13, 36.84, 35.99,

```

!-----
!EMISSIVITY (hemispherical total emittance)
!
!NOTE 1 - Data are taken from:
!Properties and Characteristics of Graphite for the EDM Industry, Poco Graphite, Decatur, 2002.
!
!NOTE 2 - the S.I. system of units is used.
!
!-----

```

```

!Temperature table [°C]
MPTEMP ! erase previous table
MPTEMP, 1, 1426.85, 1526.85, 1626.85,
MPTEMP, 4, 1726.85, 1826.85, 1926.85,
MPTEMP, 7, 2026.85, 2126.85, 2226.85,
MPTEMP, 10, 2326.85, 2426.85, 2526.85,
MPTEMP, 13, 2626.85,

```

```

!Emissivity table [-]
MPDATA,EMIS , C_EDM3 , 1, 0.833, 0.835, 0.837,
MPDATA,EMIS , C_EDM3 , 4, 0.840, 0.842, 0.844,
MPDATA,EMIS , C_EDM3 , 7, 0.846, 0.849, 0.851,
MPDATA,EMIS , C_EDM3 , 10, 0.853, 0.856, 0.858,
MPDATA,EMIS , C_EDM3 , 13, 0.86,

```

```

!-----
!DENSITY
!
!NOTE 1 - Data are taken from:
!Matteo Sturaro's measurements @CERN (February 2017)
!
!NOTE 2 - The S.I. system of units is used.
!-----

```

```

!Temperature table [°C]
MPTEMP ! erase previous table
MPTEMP, 1, 20,

```

```

!Density table [kg/m^3]
MPDATA,DENS , C_EDM3 , 1, 1720,

```

```

!-----
!SPECIFIC HEAT
!
!NOTE 1 - Data are taken from:
! Properties and Characteristics of Graphite for the EDM Industry, Poco Graphite, Decatur,
2002.
!
!NOTE 2 - the S.I. system of units is used.
!-----

```

```

MPTEMP ! erase previous table
MPTEMP, 1, 25.1, 128.0, 224.8,
MPTEMP, 4, 327.2, 423.5, 525.6,
MPTEMP, 7, 627.5, 729.3, 825.1,
MPTEMP, 10, 926.8, 1028.4, 1130.0,
MPTEMP, 13, 1225.6, 1327.2, 1428.7,
MPTEMP, 16, 1530.2, 1631.7, 1727.2,

```

Appendice F

MPTEMP,	19,	1828.7,	1930.2,	2031.6,
MPTEMP,	22,	2133.1,	2228.6,	2330.0,
MPTEMP,	25,	2431.5,	2527.0,	2628.4,
MPTEMP,	28,	2729.9,		

!Specific heat table [J/kg°C]

MPDATA,C , C_EDM3	, 1,	711.332,	956.655,	1184.858,
MPDATA,C , C_EDM3	, 4,	1367.325,	1509.815,	1623.712,
MPDATA,C , C_EDM3	, 7,	1714.752,	1782.936,	1845.428,
MPDATA,C , C_EDM3	, 10,	1896.469,	1936.082,	1969.980,
MPDATA,C , C_EDM3	, 13,	1998.188,	2026.373,	2048.842,
MPDATA,C , C_EDM3	, 16,	2065.599,	2082.355,	2099.134,
MPDATA,C , C_EDM3	, 19,	2115.890,	2126.933,	2137.975,
MPDATA,C , C_EDM3	, 22,	2149.017,	2160.082,	2171.124,
MPDATA,C , C_EDM3	, 25,	2182.166,	2193.230,	2198.558,
MPDATA,C , C_EDM3	, 28,	2209.600,		

!-----

!COEFFICIENT OF THERMAL EXPANSION

!

!NOTE 1 - Data are taken from:

!Matteo Sturaro's measurements @CERN (February 2017)

!

!NOTE 2 - The S.I. system of units is used.

!-----

!Temperature table [°C]

MPTEMP ! erase previous table

MPTEMP,	1,	40,	100,	200,
MPTEMP,	4,	400,	600,	800,
MPTEMP,	7,	1000,	1200,	1400,
MPTEMP,	10,	1600,	1800,	1928,

!Secant coefficient of thermal expansion [1/°C]

MPDATA,ALPX , C_EDM3	, 1,	6.80E-06,	6.86E-06,	6.94E-06,
MPDATA,ALPX , C_EDM3	, 4,	7.13E-06,	7.32E-06,	7.51E-06,
MPDATA,ALPX , C_EDM3	, 7,	7.69E-06,	7.88E-06,	8.05E-06,
MPDATA,ALPX , C_EDM3	, 10,	8.23E-06,	8.39E-06,	8.50E-06,

!-----

!ELASTIC MODULUS

!

!NOTE 1 - Data are taken from:

!Matteo Sturaro's measurements @CERN (February 2017), Impact Excitation Technique

!

!NOTE 2 - The S.I. system of units is used.

!-----

!Temperature table [°C]

MPTEMP ! erase previous table

MPTEMP,	1,	20.,
---------	----	------

!Elastic modulus [Pa]

MPDATA,EX , C_EDM3	, 1,	1.20E+10,
--------------------	------	-----------

!-----

!POISSON'S RATIO

```

!
!NOTE 1 - Data are taken from:
!Matteo Sturaro's measurements @CERN (February 2017), Impact Excitation Technique
!
!-----

!Temperature table [°C]
MPTEMP ! erase previous table
MPTEMP, 1, 20.,

!Poisson's ratio [-]
MPDATA,PRXY , C_EDM3 , 1, 2.5E-01,

```

F.4 Macro dell'acciaio AISI 304

```

!-----
!Stainless Steel AISI 304
!-----
!create by
!Nicola Baccini
!University of Padova
!Phone: +39 3289455733
!e-mail: nicola.baccini@yahoo.it
!-----
!
!Ver. 1.0 - 21 Sept 2009
!-----

!PREP7
INOX=27

!-----
!ELECTRICAL RESISTIVITY
!Composition: 73.9 Fe, 18 Cr, 8 Ni, 0.1 C (wt%)
!Note: Allegheny Ludlum Corp.
!Reference: Allegheny Ludlum Corp., product data sheet and A.F. Clark, G.E. Childs
!           and G.H. Wallace, Cryogenics, v10, p295 (1970)
!-----

!Temperature table [°C]
MPTEMP !erase previous table
MPTEMP, 1, 0, 100, 200,
MPTEMP, 4, 300, 400, 500,
MPTEMP, 7, 600, 700, 800,
MPTEMP, 10, 900,

!Electrical resistivity table [ohm m]
MPDATA,RSVX,INOX, 1, 7.0073E-07, 7.7612E-07, 8.4801E-07,
MPDATA,RSVX,INOX, 4, 9.1640E-07, 9.8129E-07, 1.0427E-06,
MPDATA,RSVX,INOX, 7, 1.1006E-06, 1.1549E-06, 1.2058E-06,
MPDATA,RSVX,INOX, 10, 1.2531E-06,

!-----
!THERMAL CONDUCTIVITY
!Composition: 73.9 Fe, 18 Cr, 8 Ni, 0.1 C (wt%)
!Note: 10% error below 100K, 5% at 300-800K, 10% above 1400K; Allegheny Ludlum Corp.
!Reference: Thermophysical Properties of Matter, v1, Y.S. Touloukian, R.W. Powell,

```


! C.Y. Ho & P.G. Klemens, 1970, IFI/Plenum, NY, NY

!-----

!Temperature table [°C]

MPTEMP !erase previous table

MPTEMP,	1,	0,	100,	200,
MPTEMP,	4,	300,	400,	500,
MPTEMP,	7,	600,	700,	800,
MPTEMP,	10,	900,	1000,	1100,
MPTEMP,	13,	1200,	1300,	

!Thermal conductivity table [W/m°C]

MPDATA,KXX,INOX,	1,	1.4735E+01,	1.6489E+01,	1.7968E+01,
MPDATA,KXX,INOX,	4,	1.9412E+01,	2.0827E+01,	2.2220E+01,
MPDATA,KXX,INOX,	7,	2.3597E+01,	2.4965E+01,	2.6331E+01,
MPDATA,KXX,INOX,	10,	2.7701E+01,	2.9080E+01,	3.0477E+01,
MPDATA,KXX,INOX,	13,	3.1897E+01,	3.3347E+01,	

!-----

!HEMISPHERICAL TOTAL EMISSIVITY

!Composition: 73.9 Fe, 18 Cr, 8 Ni, 0.1 C (wt%)

!Reference: C.R. Roger, S.H. Yen and K.G. Ramanathan, J Optical Soc of Amer., vol 10, p1384 (1979)

!Temperature table [°C]

MPTEMP !erase previous table

MPTEMP,	1,	70,	100,	200,
MPTEMP,	4,	300,	400,	500,
MPTEMP,	7,	600,	700,	800,

!Emissivity table

MPDATA,EMIS,INOX,	1,	1.0500E-01,	1.1001E-01,	1.2589E-01,
MPDATA,EMIS,INOX,	4,	1.4049E-01,	1.5380E-01,	1.6582E-01,
MPDATA,EMIS,INOX,	7,	1.7656E-01,	1.8602E-01,	1.9420E-01,

!-----

!DENSITY

!Composition: 73.9 Fe, 18 Cr, 8 Ni, 0.1 C (wt%)

!Note: Allegheny Ludlum Corp

!Reference: calculated from the linear expansion

!-----

!Temperature table [°C]

MPTEMP !erase previous table

MPTEMP,	1,	0,	100,	200,
MPTEMP,	4,	300,	400,	500,
MPTEMP,	7,	600,	700,	800,
MPTEMP,	10,	900,	1000,	1100,

!Density table [Kg/m^3]

MPDATA,DENS,INOX,	1,	7.8667E+03,	7.8310E+03,	7.7923E+03,
MPDATA,DENS,INOX,	4,	7.7509E+03,	7.7075E+03,	7.6624E+03,
MPDATA,DENS,INOX,	7,	7.6161E+03,	7.5690E+03,	7.5215E+03,
MPDATA,DENS,INOX,	10,	7.4742E+03,	7.4275E+03,	7.3817E+03,

!-----

!SPECIFIC HEAT

!Composition: 73.9 Fe, 18 Cr, 8 Ni, 0.1 C (wt%)

!Note: mill annealed; below 300K 5% error; data above 300K was multiplied by 1.5
 ! to match the low temperature data; Allegheny Ludlum Corp.
 !Reference: below 300K: NIST Cryogenic Technologies Group, Bolder CO; above 300K:
 ! Venturi, R. and Seibel, R.D., DRI Rept. 1023, p1-31, 1959
 !-----

!Temperature table [°C]
 MPTEMP, 1, 0, 100, 200,
 MPTEMP, 4, 300, 400, 500,
 MPTEMP, 7, 600, 700, 800,
 MPTEMP, 10, 900, 1000,

!Specific Heat table
 MPDATA,C,INOX, 1, 4.6781E+02, 4.7751E+02, 4.8851E+02,
 MPDATA,C,INOX, 4, 5.0226E+02, 5.1822E+02, 5.3586E+02,
 MPDATA,C,INOX, 7, 5.5466E+02, 5.7407E+02, 5.9357E+02,
 MPDATA,C,INOX, 10, 6.1262E+02, 6.3070E+02,

!-----
 !COEFFICIENT OF THERMAL EXPANSION
 !Composition: 73.9 Fe, 18 Cr, 8 Ni, 0.1 C (wt%)
 !Note: this data is representative of well annealed stainless steels; 301, 302, 304,
 ! 316, 321, 347, 18Cr-10Ni austenite; 7% error; Allegheny Ludlum Corp.
 !Reference: Thermophysical Properties of Matter, v12, Y.S. Touloukian, R.K. Kirby,
 ! R.E. Taylor & P.D. Desai, 1975, IFI/Plenum, NY, NY
 !-----

!Temperature table [°C]
 MPTEMP !erase previous table
 MPTEMP, 1, 0, 100, 200,
 MPTEMP, 4, 300, 400, 500,
 MPTEMP, 7, 600, 700, 800,
 MPTEMP, 10, 900, 1000, 1100,

!Coefficient of thermal expansion table
 MPDATA,ALPX,INOX, 1, 1.4436E-05, 1.5916E-05, 1.7210E-05,
 MPDATA,ALPX,INOX, 4, 1.8323E-05, 1.9259E-05, 2.0019E-05,
 MPDATA,ALPX,INOX, 7, 2.0610E-05, 2.1033E-05, 2.1293E-05,
 MPDATA,ALPX,INOX, 10, 2.1394E-05, 2.1400E-05, 2.1400E-05,

!-----
 !ELASTIC MODULUS
 !Composition: 73.9 Fe, 18 Cr, 8 Ni, 0.1 C (wt%)
 !Note: dynamic method; Allegheny Ludlum Corp.
 !Reference: above 295K: S.S. Lee, U-S. Min, B. Ahn and S.H. Yoo, J. Materials Science, v33, p687 (1998)
 ! below 295K: H.M. Ledbetter, J. of Applied Physics, vol 52 no. 3, March (1981);
 !-----

!Temperature table [°C]
 MPTEMP !erase previous table
 MPTEMP, 1, 0, 100, 200,
 MPTEMP, 4, 300, 400, 500,
 MPTEMP, 7, 600, 700, 800,
 MPTEMP, 10, 900,

!Elastic modulus table
 MPDATA,EX,INOX, 1, 1.9984E+11, 1.9098E+11, 1.8205E+11,
 MPDATA,EX,INOX, 4, 1.7313E+11, 1.6420E+11, 1.5528E+11,

MPDATA,EX,INOX, 7, 1.4635E+11, 1.3743E+11, 1.2850E+11,
 MPDATA,EX,INOX, 10, 1.1959E+11,

!-----

!POISSON'S RATIO

!Composition: 73.9 Fe, 18 Cr, 8 Ni, 0.1 C (wt%)

!Note: calculated from E and G; errors may be large; Allegheny Ludlum Corp.

!Reference: see E and G

!-----

!Temperature table [°C]

MPTEMP !erase previous table
 MPTEMP, 1, 0, 100, 200,
 MPTEMP, 4, 300, 400, 500,
 MPTEMP, 7, 600, 700, 800,
 MPTEMP, 10, 900,

! Poisson's ratio table

MPDATA,PRXY,INOX, 1, 2.8834E-01, 2.9593E-01, 3.0416E-01,
 MPDATA,PRXY,INOX, 4, 3.1238E-01, 3.2061E-01, 3.2883E-01,
 MPDATA,PRXY,INOX, 7, 3.3705E-01, 3.4528E-01, 3.5350E-01,
 MPDATA,PRXY,INOX, 10, 3.6171E-01,

F.5 Macro del rame

!-----

!Copper

!Composition: purity 99.9% or higher

!-----

!Version 1.0 (Mar 08) by

!Ing. Mattia Manzolaro

!Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

!Laboratori di Legnaro

!Viale dell'Universita' n. 2; 35020 Legnaro (PD) - Italy

!Phone: +39 049 8068423

!fax: +39 049 641925

!e-mail: Mattia.Manzolaro@Inl.infn.it

!-----

!

!Ver. 1.0 - 01 Apr 08

!-----

/prep7

Cu=28

!-----

!ELECTRICAL RESISTIVITY

!

!NOTE 1 - Data are taken from:

!R.A. Matula, J. Phys. Chem. Ref. Data, vol 8, no. 4, p 1147 (1979).

!

!NOTE 3 - the S.I. system of units is used.

!-----

!Temperature table [°C]

MPTEMP ! erase previous table

```

MPTEMP, 1, 0., 100., 200.,
MPTEMP, 4, 300., 400., 500.,
MPTEMP, 7, 600., 700., 800.,
MPTEMP, 10, 900., 1000., 1085.,

```

!Electrical resistivity table [ohm m]

```

MPDATA,RSVX , Cu , 1, 1.5327E-08, 2.2139E-08, 2.9003E-08,
MPDATA,RSVX , Cu , 4, 3.5980E-08, 4.3132E-08, 5.0520E-08,
MPDATA,RSVX , Cu , 7, 5.8206E-08, 6.6251E-08, 7.4717E-08,
MPDATA,RSVX , Cu , 10, 8.3666E-08, 9.3160E-08, 1.0169E-07,

```

!-----

!THERMAL CONDUCTIVITY

!

!NOTE 1 - Data are taken from:

!Thermophysical Properties of Matter, v1, Y.S. Touloukian, R.W. Powell,

!C.Y. Ho & P.G. Klemens, 1970, IFI/Plenum, NY, NY.

!

!NOTE 2 - thermal conductivity is strongly dependent on impurities.

!

!NOTE 3 - error is 3% near RT, 3-5% at others.

!

!NOTE 4 - the S.I. system of units is used.

!-----

!Temperature table [°C]

MPTEMP ! erase previous table

```

MPTEMP, 1, 0., 100., 200.,
MPTEMP, 4, 300., 400., 500.,
MPTEMP, 7, 600., 700., 800.,
MPTEMP, 10, 900., 1000., 1083.,

```

!Thermal conductivity table [W/m°C]

```

MPDATA,KXX , Cu , 1, 4.0253E+02, 3.9389E+02, 3.8911E+02,
MPDATA,KXX , Cu , 4, 3.8393E+02, 3.7835E+02, 3.7237E+02,
MPDATA,KXX , Cu , 7, 3.6598E+02, 3.5920E+02, 3.5201E+02,
MPDATA,KXX , Cu , 10, 3.4442E+02, 3.3643E+02, 3.2950E+02,

```

!-----

!EMISSIVITY (hemispherical total emissivity)

!

!NOTE 1 - Data are taken from:

!Thermophysical Properties of Matter, v7, Y.S. Touloukian & D.P. DeWitt,

!1970, IFI/Plenum, NY, NY.

!

!NOTE 2 - polished.

!-----

!Temperature table [°C]

MPTEMP ! erase previous table

```

MPTEMP, 1, 0, 100, 200,
MPTEMP, 4, 300, 400, 500,
MPTEMP, 7, 600, 700, 800,
MPTEMP, 10, 900,

```

!Emissivity table [-]

```

MPDATA,EMIS , Cu , 1, 2.9484E-02, 3.0726E-02, 3.1491E-02,
MPDATA,EMIS , Cu , 4, 3.2118E-02, 3.2949E-02, 3.4322E-02,

```

MPDATA,EMIS , Cu , 7, 3.6578E-02, 4.0057E-02, 4.5099E-02,
 MPDATA,EMIS , Cu , 10, 5.2044E-02,

!-----

!DENSITY

!

!NOTE 1 - Data are calculated from the linear expansion.

!

!NOTE 2 - the S.I. system of units is used.

!-----

!Temperature table [°C]

MPTEMP ! erase previous table

MPTEMP,	1,	0.,	100.,	200.,
MPTEMP,	4,	300.,	400.,	500.,
MPTEMP,	7,	600.,	700.,	800.,
MPTEMP,	10,	900.,	1000.,	

!Density table [kg/m³]

MPDATA,DENS , Cu , 1,	8.9659E+03,	8.9226E+03,	8.8768E+03,
MPDATA,DENS , Cu , 4,	8.8288E+03,	8.7787E+03,	8.7265E+03,
MPDATA,DENS , Cu , 7,	8.6723E+03,	8.6163E+03,	8.5586E+03,
MPDATA,DENS , Cu , 10,	8.4991E+03,	8.4382E+03,	

!-----

!SPECIFIC HEAT

!

!NOTE 1 - Data are taken from:

!G.K. White and S.J. Collocott, J. Phys. Chem. Ref. Data, vol 13, no 4, p1251 (1984)

!

!NOTE 2 - error less than 2%

!

!NOTE 3 - the S.I. system of units is used.

!-----

MPTEMP ! erase previous table

MPTEMP,	1,	0.,	100.,	200.,
MPTEMP,	4,	300.,	400.,	500.,
MPTEMP,	7,	600.,	700.,	800.,
MPTEMP,	10,	900.,	1000.,	1027.,

!Specific heat table [J/kg°C]

MPDATA,C , Cu , 1,	3.7967E+02,	3.9238E+02,	4.0332E+02,
MPDATA,C , Cu , 4,	4.1285E+02,	4.2123E+02,	4.2899E+02,
MPDATA,C , Cu , 7,	4.3691E+02,	4.4607E+02,	4.5781E+02,
MPDATA,C , Cu , 10,	4.7376E+02,	4.9580E+02,	5.0303E+02,

!-----

!COEFFICIENT OF THERMAL EXPANSION

!

!NOTE 1 - Data are taken from:

!Thermophysical Properties of Matter, v12, Y.S. Touloukian, R.K. Kirby,

!R.E. Taylor & P.D. Desai, 1975, IFI/Plenum, NY, NY.

!

!NOTE 2 - 3% error.

!

!NOTE 3 - the S.I. system of units is used.

```

!-----
!Temperature table [°C]
MPTEMP ! erase previous table
MPTEMP, 1, 0., 100., 200.,
MPTEMP, 4, 300., 400., 500.,
MPTEMP, 7, 600., 700., 800.,
MPTEMP, 10, 900., 1000., 1027.,

!Secant coefficient of thermal expansion [1/°C]
MPDATA,ALPX , Cu , 1, 1.6312E-05, 1.7368E-05, 1.8131E-05,
MPDATA,ALPX , Cu , 4, 1.8737E-05, 1.9283E-05, 2.0036E-05,
MPDATA,ALPX , Cu , 7, 2.1019E-05, 2.2150E-05, 2.3343E-05,
MPDATA,ALPX , Cu , 10, 2.4515E-05, 2.5582E-05, 2.5840E-05,

```

```

!-----
!ELASTIC MODULUS
!
!NOTE 1 - Data are taken from:
!N.J. Simon, E.S. Drexler, R.P. Reed, NIST Monograph 177, Properties
!of Copper and Copper Alloys at Cryogenic Temperatures (1992).
!
!NOTE 2 - annealed; 2% error.
!
!NOTE 2 - the S.I. system of units is used.
!-----

```

```

!Temperature table [°C]
MPTEMP ! erase previous table
MPTEMP, 1, 20.,

!Elastic modulus [Pa]
MPDATA,EX , Cu , 1, 1.2632E+11,

```

```

!-----
!POISSON'S RATIO
!
!NOTE 1 - Data are taken from:
!calculated from Elastic modulus and Shear modulus: errors may be large.
!
!-----

```

```

!Temperature table [°C]
MPTEMP ! erase previous table
MPTEMP, 1, 20.,

!Poisson's ratio [-]
MPDATA,PRXY , Cu , 1, 3.3507E-01,

```

F.6 Macro del carburo di silicio Hexoloy® SA

```

!-----
!
!SiC Silicon Carbide Hexoloy SA
!
!-----
!
```

!Version 1.1 (Oct. 17) by
!Ing. Matteo Sturaro
!Istituto Nazionale di Fisica Nucleare
!Laboratori di Legnaro
!Viale dell'Universita' n. 2; 35020 Legnaro (PD) - Italy
!e-mail: matteo.sturaro@lnl.infn.it
!
!-----

/PREP7

SiC=33 !Material number in the ANSYS library
MPDELE,all,SiC

!-----
!
!ELECTRICAL RESISTIVITY
!
!NOTE 1 - Data are taken from:
!Saint-Gobain Ceramics, Structural Ceramics,
!Typical Physical Properties (Sept. 2017).
!
!NOTE 2 - Dependent upon dopants which will decrease electrical resistivity.
!
!NOTE 3 - The S.I. system of units is used.
!
!NOTE 4 - Range of variation @RT : 1 - 1E6.
!
!NOTE 5 - Range of variation @1000°C : 1E-04 - 2E-03.
!
!-----

!Temperature table [°C]
MPTEMP ! erase previous table
MPTEMP, 1, 20., 1000.,

!Electrical resistivity table [ohm m]
MPDATA,RSVX ,SiC , 1, 1000, 1.0E-01,

!-----
!
!THERMAL CONDUCTIVITY
!
!NOTE 1 - Data are taken from:
!R.G. Munro, Material Properties of a Sintered alfa-SiC
!American Institute of Physics and American Chemical Society
!J. Phys. Chem. Ref. Data, Vol.26, No.5, (1997).
!
!NOTE 2 - 8% error.
!
!NOTE 3 - The S.I. system of units is used.
!
!-----

!Temperature table [°C]
MPTEMP ! erase previous table
MPTEMP, 1, 20., 500., 1000.,
MPTEMP, 4, 1200., 1400., 1500.,

!Thermal conductivity table [W/m°C]
 MPDATA,KXX , SiC , 1, 11.4E+01, 5.51E+01, 3.57E+01,
 MPDATA,KXX , SiC , 4, 3.13E+01, 2.78E+01, 2.63E+01,

!-----
 !
 !EMISSION (hemispherical total emissivity)
 !
 !NOTE 1 - Data are taken from:
 !Matteo Sturaro measurements (Sept. 2017)
 !with a dual-frequency pyrometer (LT).
 !
 !NOTE 2 - SiC as fired (unpolished).
 !
 !-----

!Temperature table [°C]
 MPTEMP ! erase previous table
 MPTEMP, 1, 600, 750, 1300,
 MPTEMP, 4, 1500,

!Emissivity table [-]
 MPDATA,EMIS , SiC , 1, 0.66, 0.72, 0.73,
 MPDATA,EMIS , SiC , 4, 0.73,

!-----
 !
 !DENSITY
 !
 !NOTE 1 - Data are taken from:
 !R.G. Munro, Material Properties of a Sintered alfa-SiC
 !American Institute of Physics and American Chemical Society
 !J. Phys. Chem. Ref. Data, Vol.26, No.5, (1997).
 !
 !NOTE 2 - 1% error.
 !
 !NOTE 3 - The S.I. system of units is used.
 !
 !-----

!Temperature table [°C]
 MPTEMP ! erase previous table
 MPTEMP, 1, 20., 500., 1000.,
 MPTEMP, 4, 1200., 1400., 1500.,

!Density table [kg/m³]
 MPDATA,DENS , SiC , 1, 3.16E+03, 3.14E+03, 3.11E+03,
 MPDATA,DENS , SiC , 1, 3.10E+03, 3.09E+03, 3.08E+03,

!-----
 !
 !SPECIFIC HEAT
 !
 !NOTE 1 - Data are taken from:
 !R.G. Munro, Material Properties of a Sintered alfa-SiC
 !American Institute of Physics and American Chemical Society
 !J. Phys. Chem. Ref. Data, Vol.26, No.5, (1997).

!
 !NOTE 2 - 5% error.
 !
 !NOTE 3 - The S.I. system of units is used.
 !
 !-----

!Temperature table [°C]
 MPTEMP ! erase previous table
 MPTEMP, 1, 20., 500., 1000.,
 MPTEMP, 4, 1200., 1400., 1500.,

!Specific heat table [J/kg°C]
 MPDATA,C , SiC , 1, 715, 1086, 1240,
 MPDATA,C , SiC , 4, 1282, 1318, 1336,

!-----
 !
 !THERMAL DIFFUSIVITY
 !
 !NOTE 1 - Data are taken from:
 !R.G. Munro, Material Properties of a Sintered alfa-SiC
 !American Institute of Physics and American Chemical Society
 !J. Phys. Chem. Ref. Data, Vol.26, No.5, (1997).
 !
 !NOTE 2 - 12% error.
 !
 !NOTE 3 - The S.I. system of units is used.
 !
 !-----

!Temperature table [°C]
 MPTEMP ! erase previous table
 MPTEMP, 1, 20., 500., 1000.,
 MPTEMP, 4, 1200., 1400., 1500.,

!Thermal diffusivity table [m²/s]
 MPDATA, DXX, SiC, 1, 5.0E-05, 1.6E-05, 9.2E-06,
 MPDATA, DXX, SiC, 4, 7.9E-06, 6.8E-06, 6.4E-06,

!-----
 !
 !COEFFICIENT OF THERMAL EXPANSION
 !
 !NOTE 1 - Data are taken from:
 !R.G. Munro, Material Properties of a Sintered alfa-SiC
 !American Institute of Physics and American Chemical Society
 !J. Phys. Chem. Ref. Data, Vol.26, No.5, (1997).
 !
 !NOTE 2 - 10% error.
 !
 !NOTE 3 - The S.I. system of units is used.
 !
 !-----

!Temperature table [°C]
 MPTEMP ! erase previous table
 MPTEMP, 1, 20., 500., 1000.,

MPTEMP, 4, 1200., 1400., 1500.,

!Secant coefficient of thermal expansion table [1/°C]

MPDATA,ALPX , SiC , 1, 1.1E-06, 4.4E-06, 5.0E-06,

MPDATA,ALPX , SiC , 4, 5.2E-06, 5.4E-06, 5.5E-06,

!-----

!

!FRICTION COEFFICIENT

!

!NOTE 1 - Data are taken from:

!R.G. Munro, Material Properties of a Sintered alfa-SiC

!American Institute of Physics and American Chemical Society

!J. Phys. Chem. Ref. Data, Vol.26, No.5, (1997).

!

!NOTE 2 - Measures at 0.2 m/s, 5 N.

!

!NOTE 3 - 21% error.

!

!NOTE 4 - The S.I. system of units is used.

!

!-----

!Temperature table [°C]

MPTEMP ! erase previous table

MPTEMP, 1, 20., 500., 1000.,

!Friction coefficient table [-]

MPDATA,MU , SiC , 1, 7E-01, 4E-01, 4E-01,

!-----

!

!ELASTIC MODULUS

!

!NOTE 1 - Data are taken from:

!R.G. Munro, Material Properties of a Sintered alfa-SiC

!American Institute of Physics and American Chemical Society

!J. Phys. Chem. Ref. Data, Vol.26, No.5, (1997).

!

!NOTE 2 - 3% error.

!

!NOTE 3 - the S.I. system of units is used.

!

!-----

!Temperature table [°C]

MPTEMP ! erase previous table

MPTEMP, 1, 20., 500., 1000.,

MPTEMP, 4, 1200., 1400., 1500.,

!Elastic modulus table [Pa]

MPDATA,EX , SiC , 1, 4.15E+11, 4.04E+11, 3.92E+11,

MPDATA,EX , SiC , 4, 3.87E+11, 3.83E+11, 3.80E+11,

!-----

!

!SHEAR MODULUS

!
 !NOTE 1 - Data are taken from:
 !R.G. Munro, Material Properties of a Sintered alfa-SiC
 !American Institute of Physics and American Chemical Society
 !J. Phys. Chem. Ref. Data, Vol.26, No.5, (1997).
 !
 !NOTE 2 - 3% error.
 !
 !NOTE 3 - The S.I. system of units is used.
 !
 !-----

!Temperature table [°C]
 MPTEMP ! erase previous table
 MPTEMP, 1, 20., 500., 1000.,
 MPTEMP, 4, 1200., 1400., 1500.,

!Elastic modulus table [Pa]
 MPDATA,GXY , SiC , 1, 1.79E+11, 1.74E+11, 1.69E+11,
 MPDATA,GXY , SiC , 4, 1.67E+11, 1.66E+11, 1.65E+11,

!-----
 !
 !POISSON'S RATIO
 !
 !NOTE 1 - Data are taken from:
 !R.G. Munro, Material Properties of a Sintered alfa-SiC
 !American Institute of Physics and American Chemical Society
 !J. Phys. Chem. Ref. Data, Vol.26, No.5, (1997).
 !
 !NOTE 2 - 25% error.
 !
 !-----

!Temperature table [°C]
 MPTEMP ! erase previous table
 MPTEMP, 1, 20.,

!Poisson's ratio table [-]
 MPDATA,PRXY , SiC , 1, 1.60E-01,

!-----
 !
 !SONIC VELOCITY
 !
 !NOTE 1 - Data are taken from:
 !R.G. Munro, Material Properties of a Sintered alfa-SiC
 !American Institute of Physics and American Chemical Society
 !J. Phys. Chem. Ref. Data, Vol.26, No.5, (1997).
 !
 !NOTE 2 - Longitudinal speed of sound
 !
 !NOTE 3 - 2% error.
 !
 !NOTE 4 - The S.I. system of units is used.
 !
 !-----

```

!Temperature table [°C]
MPTEMP ! erase previous table
MPTEMP, 1, 20., 500., 1000.,
MPTEMP, 4, 1200., 1400., 1500.,

!Sonic velocity table [m/s]
MPDATA,SONC , SiC , 1, 1.182E-02, 1.169E-02, 1.157E-02,
MPDATA,SONC , SiC , 1, 1.152E-02, 1.147E-02, 1.144E-02,

```

F.7 Macro del carburo di silicio Hexoloy® SE

```

!-----
!
!SiC Silicon Carbide Hexoloy SE
!
!-----
!
!Version 1.2 (Nov. 17) by
!Dott. Matteo Sturaro
!Istituto Nazionale di Fisica Nucleare
!Laboratori di Legnaro
!Viale dell'Universita' n. 2; 35020 Legnaro (PD) - Italy
!e-mail: matteo.sturaro@lnl.infn.it
!
!-----

```

/prep7

```

SiC=33      !Material number in the ANSYS library
MPDELE,all,SiC

```

```

!-----
!
!ELECTRICAL RESISTIVITY
!
!NOTE 1 - Data are taken from:
!Saint-Gobain Ceramics, Structural Ceramics,
!Typical Physical Properties (Sept. 2017).
!
!NOTE 2 - The S.I. system of units is used.
!
!NOTE 3 - Range of variation @RT : 1 - 1E6.
!
!NOTE 4 - Range of variation @1000°C : 1E-04 - 2E-03.
!
!-----

```

```

!Temperature table [°C]
MPTEMP ! erase previous table
MPTEMP, 1, 20., 1000.,

!Electrical resistivity table [ohm m]
MPDATA,RSVX , SiC , 1, 1000, 1.0E-01,

```

```

!-----
!
!THERMAL CONDUCTIVITY

```

!
 !NOTE 1 - Data are taken from:
 !Inverse analysis method with optimization in Ansys
 !
 !NOTE 2 - The S.I. system of units is used.
 !
 !-----

!Temperature table [°C]
 MPTEMP ! erase previous table
 MPTEMP, 1, 20., 200., 400.,
 MPTEMP, 4, 600., 700., 800.,
 MPTEMP, 7, 900., 1000., 1100.,
 MPTEMP, 10, 1200.,

!Thermal conductivity table [W/m°C]
 MPDATA,KXX , SiC , 1, 11.2E+01, 8.78E+01, 6.53E+01,
 MPDATA,KXX , SiC , 4, 4.76E+01, 4.05E+01, 3.46E+01,
 MPDATA,KXX , SiC , 7, 2.99E+01, 2.63E+01, 2.39E+01,
 MPDATA,KXX , SiC , 10, 2.28E+01,

!-----
 !
 !EMISSION (hemispherical total emissivity)
 !
 !NOTE 1 - Data are taken from:
 !Matteo Sturaro measurements (Sept. 2017)
 !with a dual-frequency pyrometer (LT).
 !
 !NOTE 2 - SiC as fired (unpolished).
 !
 !-----

!Temperature table [°C]
 MPTEMP ! erase previous table
 MPTEMP, 1, 600, 750, 1300,
 MPTEMP, 4, 1500,

!Emissivity table [-]
 MPDATA,EMIS , SiC , 1, 0.66, 0.72, 0.73,
 MPDATA,EMIS , SiC , 4, 0.73,

!-----
 !
 !DENSITY
 !
 !NOTE 1 - Data are taken from:
 !Saint-Gobain Ceramics, Structural Ceramics,
 !Typical Physical Properties (Sept. 2017).
 !
 !NOTE 2 - The S.I. system of units is used.
 !
 !-----

!Temperature table [°C]
 MPTEMP ! erase previous table
 MPTEMP, 1, 20.,

!Density table [kg/m³]
 MPDATA,DENS , SiC , 1, 3.05E+03,

!-----
 !
 !SPECIFIC HEAT
 !
 !NOTE 1 - Data are taken from:
 !UCAR Data Sheet (file "UCAR_vol.2.pdf")
 !
 !NOTE 2 - The S.I. system of units is used.
 !
 !-----

MPTEMP ! erase previous table
 MPTEMP, 1, 0., 500., 1000.,
 MPTEMP, 4, 1500., 2000., 2500.,

!Specific heat table [J/kg°C]
 MPDATA,C , SiC , 1, 600, 1550, 1800,
 MPDATA,C , SiC , 4, 1900, 2000, 2000,

!-----
 !
 !COEFFICIENT OF THERMAL EXPANSION
 !
 !NOTE 1 - Data are taken from:
 !Saint-Gobain Ceramics, Structural Ceramics,
 !Typical Physical Properties (Sept. 2017).
 !
 !NOTE 2 - The S.I. system of units is used.
 !
 !-----

!Temperature table [°C]
 MPTEMP ! erase previous table
 MPTEMP, 1, 20., 700.,
 !Secant coefficient of thermal expansion table [1/°C]
 MPDATA,ALPX , SiC , 1, 4.02E-06, 4.02E-06,

!-----
 !
 !ELASTIC MODULUS
 !
 !NOTE 1 - Data are taken from:
 !R.G. Munro, Material Properties of a Sintered alfa-SiC
 !American Institute of Physics and American Chemical Society
 !J. Phys. Chem. Ref. Data, Vol.26, No.5, (1997).
 !
 !NOTE 2 - 3% error.
 !
 !NOTE 3 - the S.I. system of units is used.
 !
 !-----

```
!Temperature table [°C]
MPTEMP ! erase previous table
MPTEMP, 1, 20., 500., 1000.,
MPTEMP, 4, 1200., 1400., 1500.,
```

```
!Elastic modulus table [Pa]
MPDATA,EX , SiC , 1, 4.15E+11, 4.04E+11, 3.92E+11,
MPDATA,EX , SiC , 4, 3.87E+11, 3.83E+11, 3.80E+11,
```

```
!-----
!  
!POISSON'S RATIO  
!  
!NOTE 1 - Data are taken from:  
!R.G. Munro, Material Properties of a Sintered alfa-SiC  
!American Institute of Physics and American Chemical Society  
!J. Phys. Chem. Ref. Data, Vol.26, No.5, (1997).  
!  
!NOTE 2 - 25% error.  
!  
!-----
```

```
!Temperature table [°C]
MPTEMP ! erase previous table
MPTEMP, 1, 20.,
```

```
!Poisson's ratio table [-]
MPDATA,PRXY , SiC , 1, 1.40E-01,
```

F.8 Macro della grafite POCO EDM-AF5®

```
/PREP7
```

```
DISCO=71
```

```
!-----
!  
!THERMAL CONDUCTIVITY  
!  
!NOTE 1 - Data are taken from: DATASHEET Grafite POCO_EDM_AF5  
!  
!NOTE 2 - thermal conductivity is strongly dependent on impurities.  
!  
!NOTE 3 - the S.I. system of units is used.  
!-----
```

```
!Temperature table [°C]
MPTEMP ! erase previous table
MPTEMP, 1, 0., 50., 150.,
MPTEMP, 4, 200., 300., 400.,
MPTEMP, 7, 500., 700., 900.,
MPTEMP, 10, 1100., 1300., 1500.,
MPTEMP, 13, 1700., 1900., 2000.,
```

```
!Thermal conductivity table [W/m*K]
MPDATA,KXX,DISCO, 1, 59.97352664, 58.54967566, 55.80468377,
MPDATA,KXX,DISCO, 4, 54.48354286, 51.94397112, 49.54134614,
```

MPDATA,KXX,DISCO,	7,	47.27566792,	43.15515177,	39.58242268,
MPDATA,KXX,DISCO,	10,	36.55748063,	34.08032564,	32.15095769,
MPDATA,KXX,DISCO,	13,	30.7693768,	29.93558296,	29.72410618,

!-----
!EMISSIVITY (hemispherical total emissivity)
!
!NOTE 1 - Data are taken from:
!
!S.Corradetti Emissivity measurements (03/2014)
!
!NOTE 2 - Grafite POCO_EDM_AF5
!
!-----

MP,EMIS,DISCO,0.79

!-----
!DENSITY
!
!NOTE 1 - UCAR "Technical Data Sheet: 31": Grade ATJ Isomolded Graphite.
!
!NOTE 2 - the S.I. system of units is used.
!-----

!Temperature table [°C]
MPTEMP ! erase previous table
MPTEMP, 1, 20.,

!Density table [kg/m³]
MPDATA,DENS , DISCO , 1, 1.76E+03,

!-----
!SPECIFIC HEAT
!
!NOTE 1 - Data are taken from:
!UCAR Data Sheet (file "UCAR_vol.2.pdf")
!-----

MPTEMP ! erase previous table
MPTEMP, 1, 0., 500., 1000.,
MPTEMP, 4, 1500., 2000., 2500.,

!Specific heat table [J/kg°C]
MPDATA,C , DISCO , 1, 600, 1550, 1800,
MPDATA,C , DISCO , 4, 1900, 2000, 2000,

!-----
!COEFFICIENT OF THERMAL EXPANSION
!
!NOTE 1 - Data are taken from:
!Thermophysical Properties of Matter, v13, Y.S. Touloukian, R.K.
!Kirby, R.E. Taylor & T.Y.R. Lee, 1977, IFI/Plenum, NY, NY.
!
!NOTE 2 - Orientation: with grain
!
!NOTE 3 - 10% error; National Carbon Co..

!
 !NOTE 4 - the S.I. system of units is used.
 !-----

!Temperature table [°C]
 MPTEMP ! erase previous table
 MPTEMP, 1, 20., 100., 500.,
 MPTEMP, 4, 1000., 1500., 1600.,
 MPTEMP, 7, 1700., 1800., 1900.,
 MPTEMP, 10, 2000., 2100., 2200.,
 MPTEMP, 13, 2300., 2400., 2500.,
 MPTEMP, 16, 2600., 2700., 2800.,

!Secant coefficient of thermal expansion [1/°C]
 MPDATA,ALPX , DISCO , 1, 2.2162E-06, 2.4088E-06, 3.2597E-06,
 MPDATA,ALPX , DISCO , 4, 4.1250E-06, 4.8376E-06, 4.9649E-06,
 MPDATA,ALPX , DISCO , 7, 5.0872E-06, 5.2044E-06, 5.3162E-06,
 MPDATA,ALPX , DISCO , 10, 5.4224E-06, 5.5227E-06, 5.6165E-06,
 MPDATA,ALPX , DISCO , 13, 5.7034E-06, 5.7828E-06, 5.8539E-06,
 MPDATA,ALPX , DISCO , 16, 5.9159E-06, 5.9681E-06, 6.0096E-06,

!-----
 !ELASTIC MODULUS
 !
 !NOTE 1 - Data are taken from:
 !UCAR "Tecnical Data Sheet: 31": Grade ATJ Isomolded Graphite
 !
 !NOTE 2 - the S.I. system of units is used.
 !-----

!Temperature table [°C]
 MPTEMP ! erase previous table
 MPTEMP, 1, 20.,

!Elastic modulus [Pa]
 MPDATA,EX , DISCO , 1, 9.8E+09,

!-----
 !POISSON'S RATIO
 !
 !NOTE 1 - No data available:
 !To perform thermo-structural analysis we assign the "reasonable" value of 0.3.
 !
 !-----

!Temperature table [°C]
 MPTEMP ! erase previous table
 MPTEMP, 1, 20.,

!Poisson's ratio [-]
 MPDATA,PRXY , DISCO , 1, 3.0E-01,

F.9 Macro del tantalio

!-----
 !Tantalum
 !Composition: purity 99.9% or higher

```
!-----
!Version 1.0 (Mar 08) by
!Ing. Mattia Manzolaro
!Istituto Nazionale di Fisica Nucleare
!Laboratori di Legnaro
!Viale dell'Universita' n. 2; 35020 Legnaro (PD) - Italy
!Phone: +39 049 8068423
!fax: +39 049 641925
!e-mail: Mattia.Manzolaro@lnl.infn.it
!-----
```

```
!
!Ver. 1.0 - 19 Mar 08
!-----
```

```
/prep7
```

```
Ta=26
MPDELE,all,Ta
```

```
!-----
!ELECTRICAL RESISTIVITY
!
!NOTE 1 - Data are taken from:
!P.D. Desai, T.K. Chu, H.M. James and C.Y. Ho, J. Phys. Ref. Data,
!vol 13, no. 4, p1069 (1984).
!
!NOTE 2 - data below 60K is for Ta with a residual resistivity of 0.1 x 10E-8 ohm-m;
!not corrected for thermal expansion; 2% error.
!
!NOTE 3 - the S.I. system of units is used.
!-----
```

```
!Temperature table [°C]
```

```
MPTEMP ! erase previous table
```

```
MPTEMP, 1, 0., 100., 200.,
MPTEMP, 4, 300., 400., 500.,
MPTEMP, 7, 600., 700., 800.,
MPTEMP, 10, 900., 1000., 1100.,
MPTEMP, 13, 1200., 1300., 1400.,
MPTEMP, 16, 1500., 1600., 1700.,
MPTEMP, 19, 1800., 1900., 2000.,
MPTEMP, 22, 2100., 2200., 2300.,
MPTEMP, 25, 2400., 2500., 2600.,
```

```
!Electrical resistivity table [ohm m]
```

```
MPDATA,RSVX , Ta , 1, 1.2237E-07, 1.7023E-07, 2.1664E-07,
MPDATA,RSVX , Ta , 4, 2.6165E-07, 3.0533E-07, 3.4774E-07,
MPDATA,RSVX , Ta , 7, 3.8895E-07, 4.2902E-07, 4.6802E-07,
MPDATA,RSVX , Ta , 10, 5.0601E-07, 5.4305E-07, 5.7922E-07,
MPDATA,RSVX , Ta , 13, 6.1458E-07, 6.4918E-07, 6.8311E-07,
MPDATA,RSVX , Ta , 16, 7.1641E-07, 7.4916E-07, 7.8142E-07,
MPDATA,RSVX , Ta , 19, 8.1326E-07, 8.4474E-07, 8.7592E-07,
MPDATA,RSVX , Ta , 22, 9.0687E-07, 9.3766E-07, 9.6835E-07,
MPDATA,RSVX , Ta , 25, 9.9900E-07, 1.0297E-06, 1.0605E-06,
```

```
!-----
!THERMAL CONDUCTIVITY
!
```

!NOTE 1 - Data are taken from:

!Thermophysical Properties of Matter, v1, Y.S. Touloukian, R.W. Powell,
!C.Y. Ho & P.G. Klemens, 1970, IFI/Plenum, NY, NY.

!

!NOTE 2 - thermal conductivity is strongly dependent on impurities.

!

!NOTE 3 - error is 5% near RT, 5-10% at others.

!

!NOTE 4 - the S.I. system of units is used.

!-----

!Temperature table [°C]

MPTEMP ! erase previous table

MPTEMP,	1,	0.,	100.,	200.,
MPTEMP,	4,	300.,	400.,	500.,
MPTEMP,	7,	600.,	700.,	800.,
MPTEMP,	10,	900.,	1000.,	1100.,
MPTEMP,	13,	1200.,	1300.,	1400.,
MPTEMP,	16,	1500.,	1600.,	1700.,
MPTEMP,	19,	1800.,	1900.,	2000.,
MPTEMP,	22,	2100.,	2200.,	2300.,
MPTEMP,	25,	2400.,	2500.,	2600.,

!Thermal conductivity table [W/m°C]

MPDATA,KXX , Ta	, 1,	5.7415E+01,	5.7703E+01,	5.8047E+01,
MPDATA,KXX , Ta	, 4,	5.8503E+01,	5.8887E+01,	5.9279E+01,
MPDATA,KXX , Ta	, 7,	5.9677E+01,	6.0080E+01,	6.0485E+01,
MPDATA,KXX , Ta	, 10,	6.0891E+01,	6.1297E+01,	6.1701E+01,
MPDATA,KXX , Ta	, 13,	6.2100E+01,	6.2494E+01,	6.2880E+01,
MPDATA,KXX , Ta	, 16,	6.3258E+01,	6.3624E+01,	6.3978E+01,
MPDATA,KXX , Ta	, 19,	6.4318E+01,	6.4642E+01,	6.4948E+01,
MPDATA,KXX , Ta	, 22,	6.5235E+01,	6.5501E+01,	6.5745E+01,
MPDATA,KXX , Ta	, 25,	6.5964E+01,	6.6157E+01,	6.6322E+01,

!-----

!EMISSIVITY (hemispherical total emissivity)

!

!NOTE 1 - Data are taken from:

!Thermophysical Properties of Matter, v7, Y.S. Touloukian & D.P. DeWitt,
!1970, IFI/Plenum, NY, NY.

!

!NOTE 2 - polished; 10% error.

!-----

!Temperature table [°C]

MPTEMP ! erase previous table

MPTEMP,	1,	727.,	800.,	900.,
MPTEMP,	4,	1000.,	1100.,	1200.,
MPTEMP,	7,	1300.,	1400.,	1500.,
MPTEMP,	10,	1600.,	1700.,	1800.,
MPTEMP,	13,	1900.,	2000.,	2100.,
MPTEMP,	16,	2200.,	2300.,	2400.,
MPTEMP,	19,	2500.,	2600.,	

!Emissivity table [-]

MPDATA,EMIS , Ta	, 1,	1.0811E-01,	1.1867E-01,	1.3273E-01,
MPDATA,EMIS , Ta	, 4,	1.4634E-01,	1.5952E-01,	1.7225E-01,
MPDATA,EMIS , Ta	, 7,	1.8455E-01,	1.9640E-01,	2.0782E-01,
MPDATA,EMIS , Ta	, 10,	2.1879E-01,	2.2932E-01,	2.3942E-01,

MPDATA,EMIS , Ta , 13, 2.4907E-01, 2.5828E-01, 2.6705E-01,
 MPDATA,EMIS , Ta , 16, 2.7538E-01, 2.8328E-01, 2.9073E-01,
 MPDATA,EMIS , Ta , 19, 2.9774E-01, 3.0431E-01,

!-----
 !DENSITY
 !
 !NOTE 1 - Data are calculated from the linear expansion.
 !
 !NOTE 2 - the S.I. system of units is used.
 !-----

!Temperature table [°C]

MPTEMP ! erase previous table

MPTEMP, 1, 0., 100., 200.,
 MPTEMP, 4, 300., 400., 500.,
 MPTEMP, 7, 600., 700., 800.,
 MPTEMP, 10, 900., 1000., 1100.,
 MPTEMP, 13, 1200., 1300., 1400.,
 MPTEMP, 16, 1500., 1600., 1700.,
 MPTEMP, 19, 1800., 1900., 2000.,
 MPTEMP, 22, 2100., 2200., 2300.,
 MPTEMP, 25, 2400., 2500., 2600.,

!Density table [kg/m³]

MPDATA,DENS , Ta , 1, 1.6606E+04, 1.6574E+04, 1.6542E+04,
 MPDATA,DENS , Ta , 4, 1.6509E+04, 1.6475E+04, 1.6441E+04,
 MPDATA,DENS , Ta , 7, 1.6406E+04, 1.6371E+04, 1.6336E+04,
 MPDATA,DENS , Ta , 10, 1.6300E+04, 1.6264E+04, 1.6227E+04,
 MPDATA,DENS , Ta , 13, 1.6190E+04, 1.6152E+04, 1.6113E+04,
 MPDATA,DENS , Ta , 16, 1.6072E+04, 1.6031E+04, 1.5987E+04,
 MPDATA,DENS , Ta , 19, 1.5942E+04, 1.5894E+04, 1.5843E+04,
 MPDATA,DENS , Ta , 22, 1.5789E+04, 1.5731E+04, 1.5668E+04,
 MPDATA,DENS , Ta , 25, 1.5601E+04, 1.5528E+04, 1.5448E+04,

!-----
 !SPECIFIC HEAT
 !
 !NOTE 1 - Data are taken from:
 !I. Barin, Thermochemical Data of Pure Substances, pub. VCH, Weinheim (1993)
 !
 !NOTE 2 - the S.I. system of units is used.
 !-----

MPTEMP ! erase previous table

MPTEMP, 1, 20., 100., 200.,
 MPTEMP, 4, 300., 400., 500.,
 MPTEMP, 7, 600., 700., 800.,
 MPTEMP, 10, 900., 1000., 1100.,
 MPTEMP, 13, 1200., 1300., 1400.,
 MPTEMP, 16, 1500., 1600., 1700.,
 MPTEMP, 19, 1800., 1900., 2000.,
 MPTEMP, 22, 2100., 2200., 2300.,
 MPTEMP, 25, 2400., 2500., 2600.,

!Specific heat table [J/kg°C]

MPDATA,C , Ta , 1, 1.4046E+02, 1.4229E+02, 1.4429E+02,
 MPDATA,C , Ta , 4, 1.4603E+02, 1.4759E+02, 1.4902E+02,

MPDATA,C , Ta , 7, 1.5039E+02, 1.5174E+02, 1.5312E+02,
 MPDATA,C , Ta , 10, 1.5457E+02, 1.5613E+02, 1.5782E+02,
 MPDATA,C , Ta , 13, 1.5967E+02, 1.6169E+02, 1.6388E+02,
 MPDATA,C , Ta , 16, 1.6627E+02, 1.6883E+02, 1.7157E+02,
 MPDATA,C , Ta , 19, 1.7448E+02, 1.7753E+02, 1.8070E+02,
 MPDATA,C , Ta , 22, 1.8416E+02, 1.8836E+02, 1.9285E+02,
 MPDATA,C , Ta , 25, 1.9751E+02, 2.0257E+02, 2.0853E+02,

!-----

!COEFFICIENT OF THERMAL EXPANSION

!

!NOTE 1 - Data are taken from:

!Thermophysical Properties of Matter, v12, Y.S. Touloukian, R.K. Kirby,

! R.E. Taylor & P.D. Desai, 1975, IFI/Plenum, NY, NY.

!

!NOTE 2 - 3% error below 1100K, 5% from 1100-2100K, 10% above 2100K.

!

!NOTE 3 - the S.I. system of units is used.

!-----

!Temperature table [°C]

MPTEMP ! erase previous table

MPTEMP, 1, 0., 100., 200.,
 MPTEMP, 4, 300., 400., 500.,
 MPTEMP, 7, 600., 700., 800.,
 MPTEMP, 10, 900., 1000., 1100.,
 MPTEMP, 13, 1200., 1300., 1400.,
 MPTEMP, 16, 1500., 1600., 1700.,
 MPTEMP, 19, 1800., 1900., 2000.,
 MPTEMP, 22, 2100., 2200., 2300.,
 MPTEMP, 25, 2400., 2500., 2600.,

!Secant coefficient of thermal expansion [1/°C]

MPDATA,ALPX , Ta , 1, 6.2542E-06, 6.5206E-06, 6.7324E-06,
 MPDATA,ALPX , Ta , 4, 6.8984E-06, 7.0274E-06, 7.1281E-06,
 MPDATA,ALPX , Ta , 7, 7.2093E-06, 7.2797E-06, 7.3481E-06,
 MPDATA,ALPX , Ta , 10, 7.4233E-06, 7.5140E-06, 7.6289E-06,
 MPDATA,ALPX , Ta , 13, 7.7769E-06, 7.9666E-06, 8.2069E-06,
 MPDATA,ALPX , Ta , 16, 8.5065E-06, 8.8741E-06, 9.3186E-06,
 MPDATA,ALPX , Ta , 19, 9.8486E-06, 1.0473E-05, 1.1200E-05,
 MPDATA,ALPX , Ta , 22, 1.2040E-05, 1.2999E-05, 1.4089E-05,
 MPDATA,ALPX , Ta , 25, 1.5316E-05, 1.6690E-05, 1.8220E-05,

!-----

!ELASTIC MODULUS

!

!NOTE 1 - Data are taken from:

!R. Farraro and R.B. McLellan, Metall. Trans., vol 10A, p1699, (1979);

!above 2100K P.E. Armstrong and H.L. Brown, Trans. AIME, v230, p962 (1964).

!

!NOTE 2 - fully annealed; 3% error.

!

!NOTE 2 - the S.I. system of units is used.

!-----

!Temperature table [°C]

MPTEMP ! erase previous table

MPTEMP, 1, 0., 100., 200.,

```

MPTEMP, 4, 300., 400., 500.,
MPTEMP, 7, 600., 700., 800.,
MPTEMP, 10, 900., 1000., 1100.,
MPTEMP, 13, 1200., 1300., 1400.,
MPTEMP, 16, 1500., 1600., 1700.,
MPTEMP, 19, 1800., 1900., 2000.,
MPTEMP, 22, 2100., 2200., 2300.,
MPTEMP, 25, 2400.,

```

!Elastic modulus [Pa]

```

MPDATA,EX , Ta , 1, 1.8328E+11, 1.8220E+11, 1.7904E+11,
MPDATA,EX , Ta , 4, 1.7240E+11, 1.6647E+11, 1.6216E+11,
MPDATA,EX , Ta , 7, 1.5946E+11, 1.5813E+11, 1.5689E+11,
MPDATA,EX , Ta , 10, 1.5563E+11, 1.5434E+11, 1.5302E+11,
MPDATA,EX , Ta , 13, 1.5167E+11, 1.5030E+11, 1.4890E+11,
MPDATA,EX , Ta , 16, 1.4890E+11, 1.4602E+11, 1.4453E+11,
MPDATA,EX , Ta , 19, 1.4302E+11, 1.3980E+11, 1.3472E+11,
MPDATA,EX , Ta , 22, 1.3472E+11, 1.2030E+11, 1.1097E+11,
MPDATA,EX , Ta , 25, 1.0024E+11,

```

!-----

!POISSON'S RATIO

!

!NOTE 1 - Data are taken from:

!calculated from Elastic modulus and Shear modulus: errors may be large.

!

!NOTE 2 - values above 600°C are kept constant to match the temperature table

!used for the Elastic Modulus (this is a constraint imposed by ANSYS)

!

!-----

!Temperature table [°C]

MPTEMP ! erase previous table

```

MPTEMP, 1, 0., 100., 200.,
MPTEMP, 4, 300., 400., 500.,
MPTEMP, 7, 600., 700., 800.,
MPTEMP, 10, 900., 1000., 1100.,
MPTEMP, 13, 1200., 1300., 1400.,
MPTEMP, 16, 1500., 1600., 1700.,
MPTEMP, 19, 1800., 1900., 2000.,
MPTEMP, 22, 2100., 2200., 2300.,
MPTEMP, 25, 2400.,

```

!Poisson's ratio [-]

```

MPDATA,PRXY , Ta , 1, 2.7745E-01, 2.7760E-01, 2.7778E-01,
MPDATA,PRXY , Ta , 4, 2.7797E-01, 2.7816E-01, 2.7835E-01,
MPDATA,PRXY , Ta , 7, 2.7853E-01, 2.7868E-01, 2.7868E-01,
MPDATA,PRXY , Ta , 10, 2.7868E-01, 2.7868E-01, 2.7868E-01,
MPDATA,PRXY , Ta , 13, 2.7868E-01, 2.7868E-01, 2.7868E-01,
MPDATA,PRXY , Ta , 16, 2.7868E-01, 2.7868E-01, 2.7868E-01,
MPDATA,PRXY , Ta , 19, 2.7868E-01, 2.7868E-01, 2.7868E-01,
MPDATA,PRXY , Ta , 22, 2.7868E-01, 2.7868E-01, 2.7868E-01,
MPDATA,PRXY , Ta , 25, 2.7868E-01,

```


BIBLIOGRAFIA

- [1] INFN, «INFN - La missione e le sue origini,» [Online]. Available: <http://home.infn.it/it/istituto/la-missione-e-le-sue-origini>.
- [2] INFN, «L'INFN e la società italiana,» [Online]. Available: <http://home.infn.it/it/istituto/l-infn-e-la-societa-italiana>.
- [3] INFN, «INFN - Le strutture sul territorio,» [Online]. Available: <http://home.infn.it/it/la-struttura/le-strutture-sul-territorio>.
- [4] INFN, «INFN - L'INFN nel mondo,» [Online]. Available: <http://home.infn.it/it/istituto/l-infn-nel-mondo>.
- [5] A. Minini, «La stabilità del nucleo atomico,» [Online]. Available: http://www.andreaminini.org/fisica/atomo/stabilita-nucleo-atomico#il_significato_di_nucleo_stabile.
- [6] M. Manzolaro, Analisi termica e strutturale del bersaglio diretto per la produzione di fasci radioattivi per il progetto SPES, Tesi di Laurea in Ingegneria Meccanica, Università degli Studi di Padova, 2007.
- [7] F. Borgna, Potenzialità della tecnologia Isotope Separation On-Line (ISOL) per la realizzazione di un radiofarmaco a base di ^{89}Sr e preliminare sviluppo tecnologico della forma farmaceutica, Tesi di Laurea in Farmacia, Università degli Studi di Padova, 2014.
- [8] M. Lindroos, Review of ISOL-type radioactive beam facilities, EPAC, 2004.
- [9] Ganil, «Ganil - Spiral2 - EURISOL,» [Online]. Available: <http://www.ganil-spiral2.eu/eurisol>.
- [10] M. Ballan, Progettazione e test di componenti e sistemi per l'operazione e la sicurezza del sistema target-sorgente del progetto SPES, Tesi di Laurea in Ingegneria Meccanica, Università degli Studi di Padova, 2014.
- [11] A. Andrighetto, The SPES Project at LNL, AIP (American Institute of Physics), 2009.
- [12] M. Agostini, Progettazione del sistema di controllo del deposito temporaneo dell'ambito del progetto SPES, Tesi di Laurea in Ingegneria Meccatronica, Università degli Studi di Padova, 2016.
- [13] E. Boratto, Progettazione ed ingegnerizzazione del Front-End protonico del progetto SPES, Tesi di Laurea in Ingegneria Meccanica, Università degli Studi di Padova, 2015.
- [14] L. Martin, Progettazione meccanica delle box di diagnostica del Front-End del progetto SPES, Tesi di Laurea in Ingegneria Meccanica, Università degli Studi di Padova, 2015.
- [15] M. Deicher, Radioactive isotopes in solid state physics, Europhysics News, Vol 33 No 3, 2002.
- [16] L. Winsberg, Nuclear Instruments and Methods 95, 19-22, 1971.
- [17] R. Kirchner, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 70, 186-199, 1992.
- [18] M. Portillo, J. Nolen, I. Gomes, V. Pantaleev, D. Fedorov, A. Barzakh, V. Beznosjuk, F. Moroz, S. Orlov e Y. Volkov, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 194, 2002, pp. 192-206.

- [19] S. Corradetti, Produzione e caratterizzazione di carburi porosi per il progetto SPES, Tesi di Laurea in Scienza ed Ingegneria dei Materiali, Università degli Studi di Padova, 2009.
- [20] J. Ramos, A. Gottberg, T. Mendoca, C. Seiffert, A. Senos, H. Fynbo, O. Tengblad, J. Briz, M. Lund, G. Koldste, M. Carmona-Gallardo, V. Pesudo e T. Stora, Intense 31-35Ar beams produced with a nanostructured CaO target at ISOLDE, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 2014.
- [21] G. Alton, J. Bilheux e A. McMillan, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research a 521, 2004, pp. 108-125.
- [22] H. Ravn, T. Bjornstad, P. Hoff, O. Jonsson, E. Kugler, S. Sundell, B. Vosicki e ISOLDE collaboration, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 26, 1987, pp. 183-189.
- [23] B. Mustapha e J. Nolen, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 204, 2003, pp. 286-292.
- [24] D. Stracener, G. Aton, R. Auble, J. Beene, P. Mueller e J. Bilheux, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2004, pp. 126-135.
- [25] L. Carraz, I. Haldorsen, H. Ravn, M. Skatestad e L. Westgaard, Nuclear Instruments and Methods 148, 217-230, 1978.
- [26] R. Cowan, Journal of Nuclear Physics 32, 1961, pp. 1363-1369.
- [27] J. Green, T. Burtseva, J. Neubauer, J. Nolen, A. Villari e I. Gomes, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 241, 986-990, 2005.
- [28] A. Bowman, G. Arnold, W. Witteman e T. Wallace, Journal of Nuclear Materials 19, 111-112, 1966.
- [29] R. Mendez-Penalosa e R. Taylor, Journal of the American Ceramic Society 47, 1964, pp. 101-102.
- [30] R. Cheung, Silicon carbide microelectromechanical systems for harsh environments, Imperial College Press, 2006.
- [31] Saint-Gobain high-performance refractories, «Hexoloy® SA SiC Material,» [Online]. Available: <https://www.refractories.saint-gobain.com/hexoloy/sa-grade>.
- [32] Saint-Gobain high-performance refractories, «Hexoloy® SE SiC Material,» [Online]. Available: <https://www.refractories.saint-gobain.com/hexoloy/se-grade>.
- [33] Saint-Gobain high-performance refractories, «Hexoloy® SP SiC Material,» [Online]. Available: <https://www.refractories.saint-gobain.com/hexoloy/sp-grade>.
- [34] R. Munro, Material Properties of a Sintered alpha-SiC, National Institute of Standards and Technology, 1997.
- [35] IUPAC, «IUPAC Gold Book,» [Online]. Available: <http://goldbook.iupac.org/html/G/G02684.html>.
- [36] POCO GRAPHITE, Properties and Characteristics of Graphite for the EDM Industry, 2002.
- [37] A. Monetti, Design and development of the target-ion source system for the SPES project, Tesi di Dottorato di ricerca in ingegneria industriale, Università degli Studi di Padova, 2017.
- [38] E. Barban, Determinazione della conducibilità termica su materiali costituenti il bersaglio diretto SPES, progettazione e realizzazione di un apparato per misure di temperatura pirometriche tramite fibra ottica, Tesi di Laurea in Ingegneria Aerospaziale, Università degli Studi di Padova, 2011.

- [39] A. C. Bruno Ferrario, *Introduzione alla tecnologia del vuoto*, Patron Editore - Bologna.
- [40] F. P. Incropera, D. P. DeWitt, T. L. Bergman e A. S. Lavine, *Foundamentals of Heat and Mass Transfer*, Sixth Edition, 2006.
- [41] N. De Ieso, *Progettazione e test di un dispositivo per la produzione di gradienti termici radiali su dischi bersaglio per il progetto SPES*, Tesi di Laurea in Ingegneria Meccanica, Università degli Studi di Padova, 2010.
- [42] P. Todesco, *Sviluppo di un set-up sperimentale per la misura della conducibilità termica di carburi di titanio per applicazioni in fisica e medicina nucleare.*, Tesi di Laurea in Ingegneria dell'innovazione del prodotto, Università degli Studi di Padova, 2017.
- [43] POCO GRAPHITE, *Properties and Characteristics of Graphite for the EDM Industry*, 2002.
- [44] L. Ferrari, *Determinazione della conducibilità termica di materiali destinati alla produzione del bersaglio diretto SPES*, Tesi di Laurea in Ingegneria Meccanica, Università degli Studi di Padova, 2012.
- [45] S. Timoshenko e J. Goodier, *Theory of elasticity*, McGraw Hill, 1970.
- [46] A. Andrighetto, C. Antonucci, S. Cevolani e C. Petrovich, *ENEA contribution to the design of the thin target for the SPES project*, FIS-P815-020 (ENEA), 2006.
- [47] G. Petrucci, *Criteri di Resistenza*, *Lezioni di Costruzioni di Macchine*, Università degli Studi di Palermo.
- [48] R. Munro, *Material Properties of a Sintered alpha SiC*, National Institute of Standards and Technology, 1997.
- [49] Ceramic Industry, «RAT - Sintered Alpha SiC Refractories,» [Online]. Available: <https://www.ceramicindustry.com/articles/83478-rat-sintered-alpha-sic-refractories>.
- [50] A. Mario, *Progettazione termo-strutturale, ingegnerizzazione e test ad alta temperatura del target diretto SPES per fasci di protoni da 40 MeV e fino a 20 microA di intensità*, Tesi Magistrale in Ingegneria Meccanica, Università degli studi di Padova, 2017.
- [51] R. Govila, *Phenomenology of fracture in sintered alpha silicon carbide*, Michigan, USA: *Journal of Materials Science* 19, 2111-2120, 1984.
- [52] R. D. Cowan, *Proposed Method of Measuring Thermal Diffusivity at High Temperatures*, *Journal of Applied Physics*, Vol. 32, 7, 1363-1370, 1961, pp. 1363-.
- [53] ASTM, *Standard Practice for Thermal Diffusivity by the Flash Method*, ASTM E2585-09, 2009.
- [54] ASTM, *Standard Test Method for Determining Specific Heat Capacity by Differential Scanning Calorimetry*, ASTM Standards E1269-11, 2011.
- [55] ASTM, *Standard Test Method for Linear Thermal Expansion of Solid Materials With a Push-Rod Dilatometer*, ASTM Standards E228-11, 2011.
- [56] A. Kan, L. Kang, C. Wang e D. Cao, *A simple and effective model for prediction of effective thermal conductivity of vacuum insulation panels*, *Future Cities and Environment*, 2015.
- [57] ASTM, *Standard Test Method for Dynamic Young' Modulus, Shear Modulus and Poisson's Ratio for Advanced Ceramics by Impulse Excitation of Vibration*, ASTM Standards C1259-01, 2001.

- [58] ASTM, Standard Test Method for Flexural Strength of Advanced Ceramics at Ambient Temperature, ASTM C1161-02c, 2002.
- [59] G. Electric, Elastic Properties of Three Grades of Fine Grained Graphite to 2000 °C, Pleasanton, California: NASA, 1970.
- [60] J. D. Lord e R. Morrell, Measurements Good Practice Guide No. 98, Elastic Modulus Measurement, National Physical Laboratory.
- [61] ASTM, Standard Test Method for Compressive Strength of Carbon and Graphite, ASTM C695-15, 2015.
- [62] I. POCO Graphite, Properties and Characteristics of Graphite for the EDM Industry, POCO Graphite, 2002.
- [63] P. Hoff, O. Jonsson, E. Kugler e H. Ravn, Release of nuclear reaction products from refractory compounds, CERN, Geneva, Switzerland: Nuclear Instruments and Methods in Physics Research 221, 313-329, 1983.
- [64] A. Giroto, Development of porous refractory targets for nuclear physics and medical applications, Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria dei Materiali, Università degli Studi di Padova, 2017.
- [65] F. Gobbo D'incà, Target ceramici porosi per la produzione di fasci radioattivi per fisica e medicina nucleare, Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria dei Materiali, Università degli Studi di Padova, 2018.
- [66] EDM Parts, «Sinkers/RAM.POCO Graphite,» [Online]. Available: http://www.edmparts.com/sinker/doc_sinker_poco.htm.

*One, remember to look up at the stars
and not down at your feet.*

*Two, never give up work. Work gives you meaning
and purpose and life is empty without it.*

*Three, if you are lucky enough to find love, remember
it is there and don't throw it away.*

Stephen Hawking

