



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

Progettazione di un'attrezzatura per macchine di prova per test di
componenti ad altissima temperatura in alto vuoto

Relatore: Prof. GIOVANNI MENEGHETTI

Correlatori: Ing. Alberto Monetti

Ing. Lisa Centofante

Laureando: ANDREA COLLINA

Matricola: 1242410

ANNO ACCADEMICO 2021-2022

Alla mia famiglia
Al mio migliore amico Giovanni

INDICE

INTRODUZIONE	1
CAPITOLO 1.....	3
Il progetto SPES a Laboratori Nazionali di Legnaro: produzione ed utilizzo di fasci di ioni esotici.....	3
1.1	Introduzione..... 3
1.2	Il progetto SPES ai Laboratori Nazionali di Legnaro 4
1.3	Configurazione dell'apparato del progetto SPES ai LNL..... 6
1.3.1	L'acceleratore primario 8
1.3.2	Il target di produzione di radioisotopi, il sistema di estrazione e ionizzazione 9
1.3.3	Separatori magnetici e post accelerazione 14
1.3.4	Il Front End (FE) 15
1.3.5	Manutenzione programmata della linea..... 17
1.4	Le possibili applicazioni dei fasci esotici 18
1.4.1	Applicazioni in fisica nucleare 19
1.4.2	Applicazioni nella fisica dello stato solido 20
1.4.3	Applicazioni in medicina nucleare 21
1.4.4	Applicazioni in astrofisica 23
1.5	Conclusioni..... 23
CAPITOLO 2.....	25
Macchine di prova ad elevata temperatura: approfondimento sul sistema di riscaldamento e sulla messa in vuoto.....	25
2.1	Introduzione..... 25
2.2	Panoramica sulle macchine di prova ad elevata temperatura 25
2.2.1	ZwickRoell 25
2.2.2	Cermac..... 27
2.2.3	MTS..... 28
2.3	Introduzione alla soluzione per prove ad alta temperatura ai LNL..... 30
2.3.1	Inserimento dell'attrezzatura nella macchina di prova Mini Bionix 858..... 30
2.3.2	Test in condizione di alto vuoto..... 32
2.3.3	Sistema di riscaldamento dei provini..... 32
2.3.3.1	Riscaldamento per effetto Joule..... 32
CAPITOLO 3.....	35
Progettazione termica del sistema per prove ad alta temperatura in alto vuoto	35
3.1	Introduzione..... 35
3.2	Dimensionamento dei provini per i test ad alta temperatura in alto vuoto 35
3.3	Modifica della filosofia di progettazione del sistema di riscaldamento per alte temperature e alto vuoto..... 38
3.4	Dimensionamento degli alberi in acciaio e in tantalio..... 41
3.5	Sistema di raffreddamento nel sistema per test ad alta temperatura in alto vuoto 45
3.5.1	Stima dei coefficienti di scambio termico per convezione forzata 45
3.5.2	Raffreddamento ad aria vs raffreddamento ad acqua..... 46
3.5.3	Configurazione del sistema di raffreddamento 48

CAPITOLO 4.....	51
Test sperimentali sul sistema per prove ad alta temperatura dei LNL	51
4.1	Introduzione..... 51
4.2	Apparato per i test sperimentali sul sistema per prove ad alta temperatura dei LNL 52
4.3	Progettazione dei nuovi componenti per i test sperimentali presso i LNL 53
4.3.1	Provini per i test sperimentali presso i LNL 55
4.3.2	Alberi in tantalio riprogettati per i test sperimentali presso i LNL 56
4.3.3	Alberi in acciaio riprogettati per i test sperimentali presso i LNL..... 57
4.4	Elementi della camera da vuoto..... 58
4.5	Sistema di alimentazione 61
4.6	Sistema di movimentazione..... 62
4.7	Misurazione di temperatura durante i test ai LNL..... 63
4.7.1	Pirometro 63
4.7.2	Termocoppie..... 64
4.8	Risultati delle analisi FEM 65
4.9	Procedura per i test 68
4.10	Risultati sperimentali..... 70
4.10.1	Provini in acciaio aisi 304..... 70
4.10.1.1	Test in aria a temperatura ambiente..... 70
4.10.1.2	Test in vuoto a 750 °C 72
4.10.2	Provini in tantalio 76
4.10.3	Provini in molibdeno 79
4.11	Conclusioni..... 82
CAPITOLO 5.....	86
Progettazione Meccanica del sistema per test ad alta temperatura in alto vuoto.....	86
5.1	Introduzione..... 86
5.2	Sistema di riscaldamento per test a trazione e a compressione ad alte temperature e in alto vuoto . 86
5.3	Provino 88
5.4	Alberi in tantalio..... 89
5.5	Alberi in acciaio 90
5.5.1	Albero inferiore fisso in acciaio 92
5.5.2	Albero superiore mobile in acciaio 93
5.6	Afferraggi 94
5.7	Camera..... 95
5.7.1	Corpo della camera..... 96
5.7.2	Sportelli 97
5.8	Isolamento elettrico del sistema di riscaldamento per test ad elevata temperatura in alto vuoto... 100
5.8.1	Disco e anello isolanti in P.E.T.P. + P.T.F.E..... 101
5.8.2	Boccola in P.E.T.P. + P.T.F.E. 102
5.9	Verifiche statiche e a fatica degli alberi e dei collegamenti bullonati 103
5.9.1	Verifica di afferraggi, alberi in tantalio e alberi in acciaio 106
5.9.2	Verifica dei collegamenti bullonati..... 110
5.9.3	Verifica degli elementi con funzione di isolanti elettrici..... 112
5.9.4	Conclusioni sulle verifiche statiche e a fatica..... 114
CAPITOLO 6.....	116
Conclusioni e sviluppi futuri.....	116

BIBLIOGRAFIA	118
APPENDICE A	120
Codici APDL utilizzati	120
APPENDICE B	128
Integrazione macro aisi 304L	128

INTRODUZIONE

La fisica nucleare è quella branca della fisica che studia il nucleo atomico nei suoi costituenti (protoni e neutroni) e le loro interazioni. A sua volta questa si divide in:

- fisica della struttura nucleare che si occupa delle teorie riguardanti la formazione, la coesione e le proprietà statiche misurabili dei nuclei;
- fisica delle reazioni nucleari che indaga i processi di interazione tra i nuclei che portano alla formazione di altri nuclei.

Nel corso degli anni l'Europa si è messa sempre più in evidenza nel campo della ricerca nucleare e sta pianificando la costruzione di una nuova generazione di facilities per la produzione di fasci radioattivi. Lo scopo è quello di esplorare la materia esotica e di fornire un valido strumento per nuove applicazioni tecnologiche in ambito nucleare, medico, ma anche in materia di astrofisica e di fisica nucleare.

All'interno del programma europeo partecipa attivamente, con il progetto SPES (*Selective Production of Exotic Species*), anche l'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN) presso i Laboratori Nazionali di Legnaro (LNL). Questo progetto mira a fornire la strumentazione necessaria per la ricerca di base in fisica e astrofisica nucleare, producendo fasci di nuclei altamente instabili e creando al contempo infrastrutture e mezzi per attività applicative [1]. Grande attenzione è data alla produzione di nuclei radioattivi ricchi di neutroni con massa nell'intervallo 80-160 basato sulla tecnica ISOL. L'impianto del fascio radioattivo si basa sulla tecnica ISOL che nel nostro caso specifico è composta dal fascio primario che è fornito da un ciclotrone BEST ad alte prestazioni con alta corrente di uscita (~ 1 mA) e alta energia fino a 70 MeV. Il ciclotrone ha due porte di uscita: una dedicata alla produzione di fasci di ioni radioattivi e l'altra alle applicazioni.

Il fascio protonico in uscita dal ciclotrone va a collidere con dei bersagli presenti nella camera target. La reazione di fissione nucleare genera quindi calore tale da far evaporare gli atomi dal target per portarli alla sorgente di ionizzazione tramite un moto casuale. In questo modo i componenti della camera target si trovano ad operare a temperature molto elevate (superiori ai 2000 °C).

L'obiettivo di questo lavoro di tesi è quello di realizzare un sistema in grado di ampliare la caratterizzazione dei materiali impiegati nella camera target del progetto SPES andando ad effettuare prove di trazione e compressione dei provini ad alte temperature (maggiori di 2000 °C) e in alto vuoto. La progettazione di questo sistema si è basata su analisi elettrotermiche ed analisi strutturali. Entrambe effettuate tramite codice di calcolo ad Elementi Finiti (FEM) ANSYS. Tutto questo affiancato dalla modellazione tridimensionale dei componenti tramite il software CREO PARAMETRICS.

In particolare il lavoro di tesi è articolato in 5 capitoli:

1. Nel primo capitolo sono introdotti i nuclei esotici e la produzione di fasci radioattivi attraverso il metodo ISOL. Vengono esposti il progetto SPES dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN), descrivendo alcune caratteristiche della *facility*. Nelle conclusioni sono poi presentate le principali applicazioni dei fasci di ioni nei campi della fisica nucleare, della scienza dei materiali, dell'astrofisica e della medicina.
2. Nel secondo capitolo sono presentate le principali soluzioni in commercio per quanto riguarda i test su provini ad elevata temperatura. Successivamente sono stati esposti i vincoli di progetto di questo lavoro di tesi andando ad approfondire quelli più rilevanti: l'inserimento del sistema nella macchina di prova MTS Mini Bionix disponibile presso i laboratori dell'Università di Padova, la modalità di riscaldamento dei provini e la tematica delle prove in condizioni di alto vuoto.
3. Nel terzo capitolo ci si concentra sulla progettazione termica del sistema di test ad alta temperatura e in alto vuoto a partire dal dimensionamento dei provini. Successivamente viene definita la modalità di immissione della corrente per scaldare i provini per effetto Joule, andando poi a dimensionare gli alberi del sistema. Infine si procederà con la simulazione del circuito di raffreddamento andandolo poi a riportare nel modello CAD 3D.
4. Nel capitolo quattro sono riportati i dettagli dei test sperimentali effettuati ai Laboratori Nazionali di Legnaro (LNL). Per validare i risultati derivanti dalle analisi termiche si è deciso di effettuare delle prove utilizzando il sistema per test a compressione ad alta temperatura e alto vuoto disponibile in

Laboratorio. Dopo aver riportato le caratteristiche dell'apparato e aver descritto i componenti riprogettati per effettuare prove a trazione saranno esposti i risultati dei test.

5. Nel capitolo cinque è riportata la progettazione meccanica del sistema di test ad alta temperatura in alto vuoto. Sono descritti nel dettaglio tutti i componenti facenti parte il sistema, spiegandone la funzione e gli aspetti peculiari. Laddove necessario sono presentate le verifiche strutturali statiche e a fatica svolte.

CAPITOLO 1

Il progetto SPES a Laboratori Nazionali di Legnaro: produzione ed utilizzo di fasci di ioni esotici

1.1 Introduzione

La materia è definita come entità provvista di una propria consistenza fisica, dotata di peso e di inerzia, capace di adeguarsi a una forma. Attualmente, quando si parla di studio della “struttura della materia” si indica quel settore della ricerca fisica che si occupa delle proprietà della materia nelle sue diverse forme di aggregazione (gassosa, liquida, solida). La fisica nucleare è quel ramo della fisica che si occupa dell’indagine sulla natura intima della materia, è rivolta quindi ai suoi costituenti più semplici, cioè le particelle elementari, ovvero gli atomi, e alle loro interazioni fondamentali.

Questi atomi possono aggregarsi tra loro formando corpi più complessi chiamati molecole, le quali corrispondono a diverse sostanze con determinate proprietà fisico-chimiche. Ogni atomo è costituito da un denso nucleo formato da neutroni (elettricamente neutri) e protoni (carichi positivamente). Nello specifico, i protoni hanno una massa pari a $1,6726 \cdot 10^{-27}$ e una carica elettrica positiva pari a $1,6022 \cdot 10^{-19}$ C, mentre i neutroni hanno una massa pari a $1,6749 \cdot 10^{-27}$ e una carica elettrica nulla. La maggior parte della massa di un atomo è contenuta proprio nel nucleo, che è circondato da uno spazio extranucleare, molto più ampio, contenente gli elettroni carichi negativamente (carica uguale e opposta rispetto ai protoni) ma aventi una massa 1800 volte inferiore a quella di protoni e neutroni.

La presenza di una forza di attrazione molto intensa, detta interazione forte, garantisce la stabilità del nucleo: tale forza bilancia la repulsione elettronica tra i protoni. La fisica nucleare è la branca della fisica che si occupa dello studio del nucleo atomico nei suoi costituenti e nelle loro interazioni. La carta dei nuclidi (Figura 1.1) individua e classifica i nuclei in base al numero di neutroni (N) e protoni (Z).

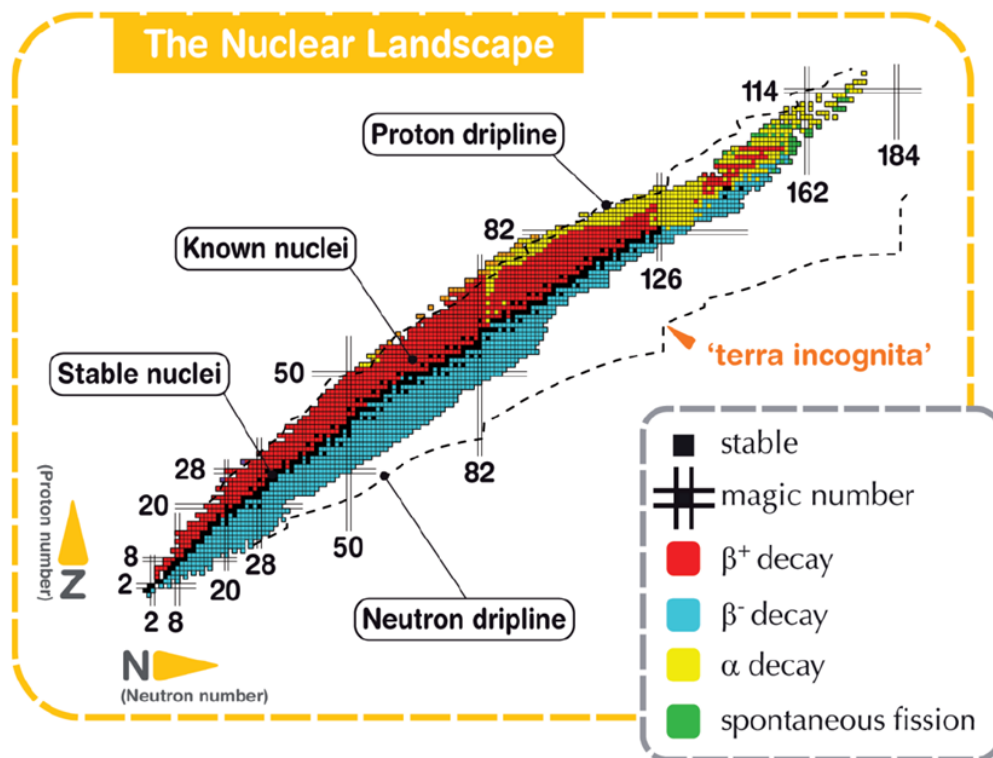


Figura 1.1 La carta dei nuclidi [2].

In Figura 1.1 l'ascissa rappresenta il numero di neutroni (N) mentre l'ordinata rappresenta il numero di protoni (Z). Si ricorda inoltre che un elemento chimico è univocamente identificato dal numero di protoni (Z) dell'atomo. Il numero di neutroni (N) può variare da particella a particella sebbene l'elemento sia lo stesso. La somma di protoni e neutroni costituisce il numero di massa che viene indicato con $A = Z + N$. Due atomi con stesso numero atomico Z ma diverso numero di massa A sono detti isotopi dello stesso elemento.

I nuclei che possiedono, approssimativamente, ugual numero di neutroni e protoni sono detti stabili e nella carta dei nuclidi rappresentano la "valle di stabilità", rappresentata dai quadretti neri. Questa zona segue la bisettrice del grafico per bassi numeri atomici. All'aumentare del numero di massa A aumenta il numero di protoni e quindi le forze repulsive all'interno dell'atomo, la stabilità in questi casi si ottiene quindi per un numero di neutroni maggiore di quello dei protoni. Questo impedisce l'aumento delle forze repulsive.

Analizzando la carta dei nuclidi si noteranno, inoltre, vari nuclei instabili, chiamati comunemente "esotici". Con il termine instabile si definisce un nucleo che va incontro ad un decadimento emettendo diversi tipi di particelle o radiazioni elettromagnetiche.

I decadimenti più comuni sono:

- Decadimento α : avviene nel caso di atomi con $Z > 83$. Il nucleo emette una particella 'alfa', composta da due protoni e due neutroni, equivalente quindi ad un nucleo di ${}^4\text{He}$.
- Decadimento β^- : caratteristico dei nuclei che si trovano al di sotto della valle di stabilità e caratterizzati da un eccesso di neutroni. Il decadimento consiste nella trasformazione di un neutrone in protone con perdita di una particella β^- (elettrone) e di un antineutrino.
- Decadimento β^+ : tipico dei nuclei poveri di neutroni che si trovano al di sopra della valle di stabilità. I nuclei tendono a trasformare i protoni in neutroni, con emissione di un positrone (β^+) e di un neutrino.
- Fissione spontanea: riguarda nuclei molto pesanti che naturalmente tendono a dividersi per formare due diversi atomi.
- Emissione di raggi γ : non si tratta di un decadimento come quelli precedentemente descritti, in quanto non avviene alcun cambiamento nucleare in seguito alla loro emissione. Sono emessi durante o subito dopo un decadimento nucleare, a causa dello stato di eccitazione dei nuclei neoformati, chiamati nuclei figli.

Lo studio dei nuclei instabili, ed in particolare dei nuclei esotici, ha aperto nuovi campi di ricerca in fisica nucleare ed ha suggerito promettenti applicazioni in fisica dello stato solido ed in medicina. Per l'utilizzo pratico e la produzione di ioni radioattivi di questo tipo, è necessaria la costruzione di sistemi acceleratori ed attrezzature capaci di garantire fasci ionici (RIB, *Radioactive Ion Beams*) di elevata purezza, intensità ed energia. Sono numerose le *facilities* per la produzione di fasci radioattivi operanti in varie parti del mondo: la maggior parte di queste sono basate sul metodo ISOL.

1.2 Il progetto SPES ai Laboratori Nazionali di Legnaro

Lo studio dei nuclei esotici ha permesso di confermare precedenti ipotesi, oltre ad aver aperto nuovi fronti per lo studio della fisica nucleare. La ricerca sui nuclei instabili ha dimostrato di aver promettenti applicazioni in diversi ambiti quali l'astrofisica, la fisica delle particelle e nella medicina.

Per la produzione di ioni radioattivi sono necessari apparati, detti *facilities*, in grado di produrre fasci detti RIB, *Radioactive Ion Beams*, di elevata purezza, energia ed intensità. La maggior parte delle *facilities* operanti in Europa e nel mondo sono basate sulla tecnica ISOL (*Isotope Separation On-Line*), una tecnica nata circa sessant'anni fa a Copenaghen.

Nella Figura 1.2 si rappresenta lo schema degli apparati principali della tecnica ISOL basata sulla separazione degli isotopi in linea.

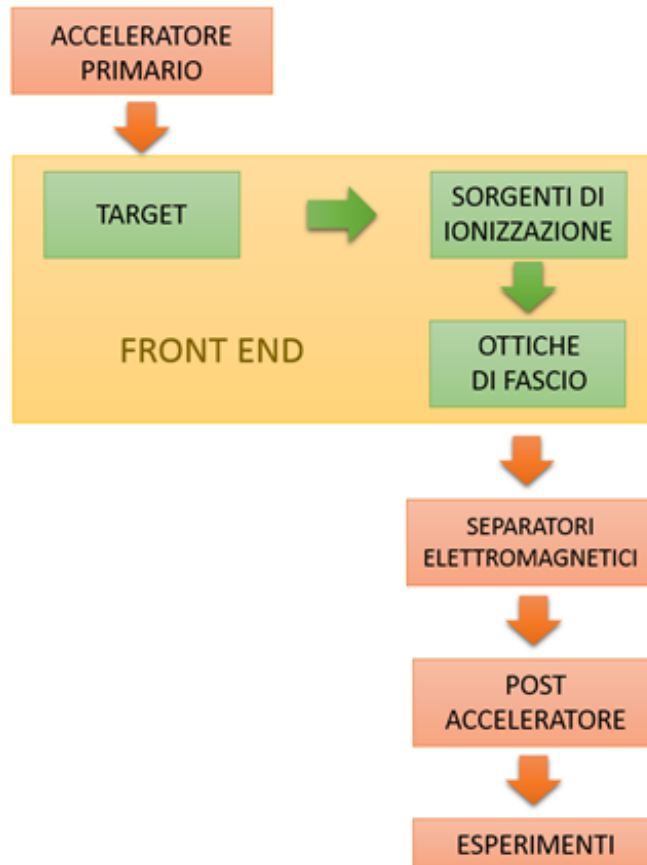


Figura 1.2: Schema della facility della tecnica ISOL

Quindi per ottenere un fascio di ioni radioattivi con delle caratteristiche ben definite sono necessari più sistemi e stadi. Nella prima fase è prevista l'accelerazione di un fascio di particelle, in particolare ioni o protoni. L'acceleratore è accoppiato ad una sorgente ionica che introduce ioni a bassa energia (fino a qualche decina di keV) al suo interno. In uscita le particelle sono dotate di un'energia fino a 1 GeV e il fascio misura alcuni mA di corrente. Il fascio viene fatto collidere con il bersaglio (target) costituito da materiale fissile. Dall'impatto scaturiscono isotopi radioattivi. Uno dei principali vantaggi di target sottili è l'ampia sezione trasversale totale disponibile per la produzione di ioni. Le tre principali reazioni nucleari responsabili della produzione di isotopi radioattivi sono la fissione, la spallazione e la frammentazione.

A questo punto gli isotopi entrano nella sorgente di ionizzazione, nella quale vengono ionizzati. Questo processo risulta essere molto vantaggioso perché consente di trasportare ed accelerare le particelle cariche con maggiore facilità, per esempio con un semplice campo elettrico, dando origine ad un fascio di particelle radioattive (RIB). Successivamente, grazie a dei separatori di massa ed isobari (che permettono di separare gli isotopi con lo stesso A ma diverso Z), si riescono ad intrappolare gli inquinanti contenuti nel flusso di particelle. Infine, se è necessario, il fascio viene post accelerato fino ad un valore utile per i test che devono essere eseguiti nelle sale sperimentali.

L'intensità del fascio prodotto dopo questo processo può essere descritta dall'equazione:

$$I = \sigma \cdot \Phi \cdot N \cdot \epsilon_1 \cdot \epsilon_2 \cdot \epsilon_3$$

in cui:

- N è lo spessore dei dischi del target
- N è lo spessore dei dischi del target
- Φ è l'intensità del fascio
- σ è la "sezione d'urto" per le reazioni nucleari, corrisponde alla probabilità che avvenga un tipo di reazione nucleare
- ϵ_1 , ϵ_2 , ϵ_3 i primi due corrispondono all'efficienza di rilascio del target di ionizzazione ed ϵ_3 indica l'efficienza del processo di estrazione e trasporto.

Con la tecnica ISOL si sono evidenziate alcune problematiche. La più evidente riguarda il ritardo temporale tra l'inizio del processo e l'estrazione dei nuclei instabili, ossia ciò che rappresenta la fase finale della produzione dei radioisotopi. La separazione di quest'ultimi dal substrato del target è un processo fortemente dipendente dalla temperatura: maggiore è il livello termico più la diffusione delle particelle è accelerata. Per questo motivo il metodo perde la sua efficacia quando il tempo di decadimento degli atomi esotici è inferiore alla decina di millisecondi. Si possono così riassumere gli obiettivi alla base della progettazione del target e dei sistemi di estrazione:

- riduzione del tempo di ritardo
- massimizzazione della produzione senza inquinare il fascio

Mentre i principali vantaggi della tecnica ISOL sono:

- maggiore quantità di ioni radioattivi grazie all'adozione di un target spesso (N) e un fascio primario intenso, aumentando così la probabilità di interazioni nucleari
- elevata qualità del fascio radioattivo, ossia riduzione di inquinanti

All'interno dell'Unione Europea le opportunità tecnico-scientifiche offerte dai RIB hanno guidato la comunità scientifica nella costruzione di una rete di facilities complementari (dette di generazione intermedia) necessarie per giungere alla costruzione di una grande facility di tipo ISOL, che si chiamerà EUROISOL. Il progetto è molto complesso e quindi sono stati coinvolti i principali Laboratori europei. Anche i Laboratori Nazionali di Legnaro (LNL) partecipano: è in corso la costruzione di un complesso basato sulla tecnica ISOL per la produzione di fasci di ioni esotici. Il progetto è chiamato SPES. In Italia l'iniziativa è coordinata e supportata dall'INFN, dall'ENEA (Bologna), dai Dipartimenti di Ingegneria Meccanica e di Scienze di Unipd e ci sono strette collaborazioni con il CERN (Svizzera) e i Laboratori di Oak Ridge (USA).

L'obiettivo del progetto SPES (Selective Production of Exotic Species) è quello di creare un apparato sperimentale per la produzione di fasci di ioni radioattivi detti RIB, prodotti nella fase terminale della vita delle stelle. Ad oggi le conoscenze sulle proprietà dell'atomo derivano dall'analisi del comportamento dei nuclei che si trovano nella valle di stabilità o da nuclei con carenza di neutroni. Il progetto SPES sarà articolato in quattro fasi:

- SPES- α : è prevista l'installazione di un ciclotrone che può fornire un'energia fino a 70 MeV e una corrente di circa 0,7 mA. Il ciclotrone sarà dotato di due uscite: un primo fascio sarà utilizzato per la facility di fisica nucleare, ossia si produrranno ioni ricchi di neutroni in seguito alla collisione di protoni su target di UCx. Il secondo sarà dedicato a ricerche di fisica applicata.
- SPES- β : in questa fase è prevista l'accelerazione di nuclei ricchi di neutroni su target specifici. Nelle collisioni saranno prodotti nuclei nuovi, con un forte eccesso di neutroni. Saranno simili a quelli prodotti nelle fasi terminali della vita delle stelle e non presenti sulla Terra perché caratterizzati da un'emivita brevissima. È un campo ancora inesplorato dalla fisica moderna ma fondamentale per conoscere i fenomeni alla base dell'evoluzione stellare.
- SPES- γ : la fase γ sarà dedicata alla produzione di radionuclidi per interesse medico mediante l'uso del ciclotrone installato nella fase α . L'obiettivo finale sarà quello di produrre radiofarmaci innovativi e di radionuclidi tradizionali ma con approcci nuovi, basati sull'uso dell'acceleratore.
- SPES- δ : prevede la costruzione di un'intensa sorgente neutronica. Le applicazioni saranno molteplici, dall'astrofisica nucleare, al trattamento di rifiuti nucleari a trattamenti sperimentali di tumori.

1.3 Configurazione dell'apparato del progetto SPES ai LNL

L'obiettivo del progetto SPES- β sarà quello di produrre specie neutron-rich attraverso reazioni di fissione nucleare assicurando una resa massima di 1013 fissioni/s. La fissione degli atomi si ottiene a seguito del bombardamento con un fascio protonico dotato di un'energia fino a 70 MeV, detto fascio primario, con un target in carburo di uranio (UCx). Il target è costituito da sette dischi disposti in sequenza. Poiché in seguito al processo di fissione nucleare viene generato un campo misto di radiazioni, il bersaglio viene installato all'interno di un bunker in calcestruzzo armato, appositamente progettato e costruito rispettando le norme di radioprotezione.

Nella Figura 1.3 si mostra il layout della facility SPES integrata con le strutture già esistenti ai Laboratori Nazionali di Legnaro (Figura 1.4). A valle dei nuovi laboratori saranno sfruttati i complessi delle strutture già

funzionanti, per esempio l'HRMS (High-Resolution Mass Separator) utile per selezionare isobaricamente il fascio voluto, il RFQ (Radio-Frequency Quadrupole) per ri-accelerare il fascio, il CB (Charge Breeder) necessario per aumentare la carica del fascio e infine il post acceleratore ALPI (ossia un acceleratore LINAC superconduttore).

La facility del progetto SPES è costituita da una serie di importanti elementi che è necessario descrivere brevemente per comprendere al meglio il funzionamento dell'intero esperimento.

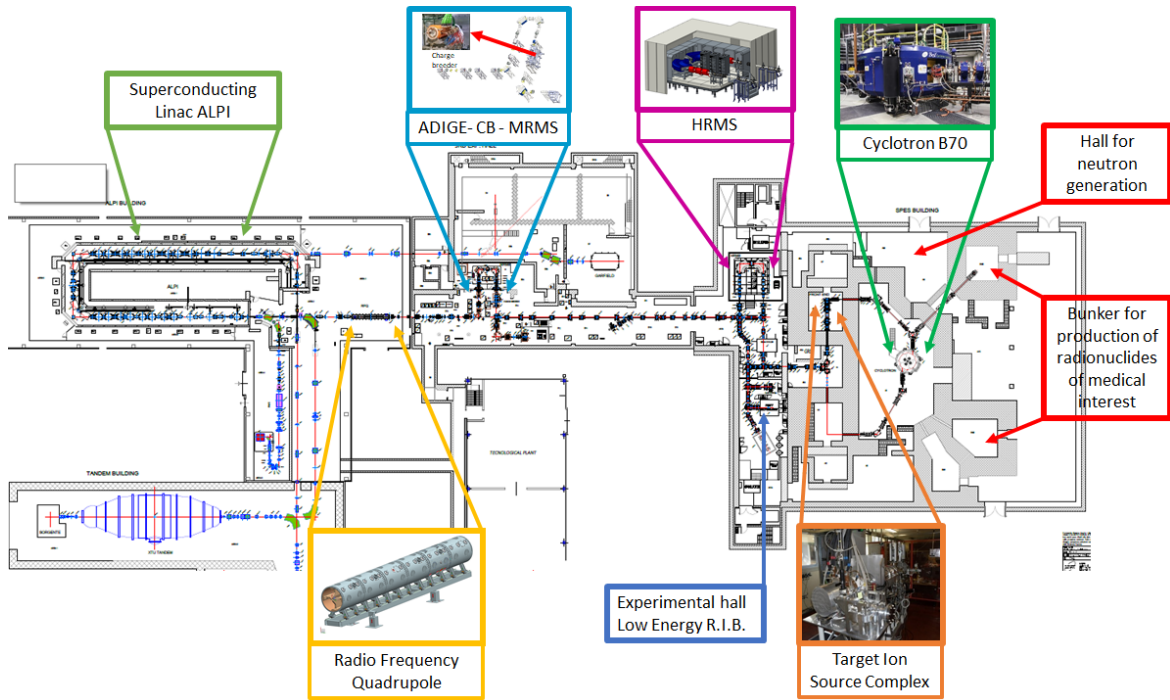


Figura 1.3: La facility SPES integrata con altri acceleratori presenti a L.N.L. [3]



Figura 1.4: Laboratori Nazionali di Legnaro e edificio SPES

1.3.1 L'acceleratore primario

L'acceleratore del progetto SPES ha la funzione di produrre un fascio protonico che colpisce il target in carburo di uranio. La struttura adottata è circolare, in particolare si tratta del ciclotrone "BEST 70p", fornito dalla "Best Cyclotron" come si mostra in Figura 1.5.

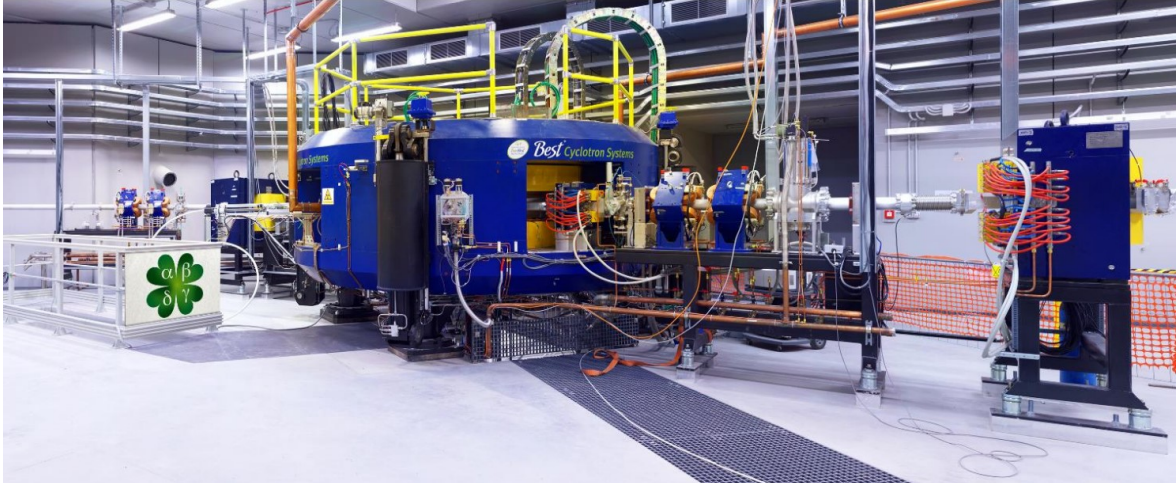


Figura 1.5: Ciclotrone BEST 70p installato nel laboratorio SPES.

Questo modello è in grado di produrre fasci di protoni caratterizzati da un'energia fino a 70 MeV e una corrente massima di 750 μ A. Inoltre si ha la possibilità di fornire due linee di fasci di protoni in maniera totalmente indipendente (Figura 1.8).

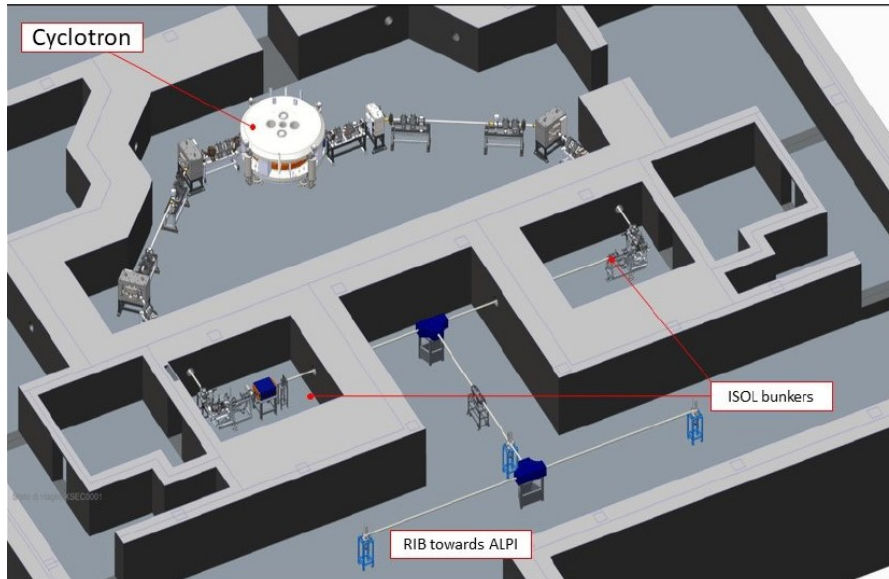


Figura 1.6: Bunker del progetto SPES.

Il principio di funzionamento del ciclotrone si basa sull'azione di un campo magnetico ed uno elettrico. Gli ioni, provenienti dalla sorgente di ionizzazione, vengono introdotti nel campo magnetico; sono per questo soggetti all'azione della forza di Lorentz che li fa deviare secondo una traiettoria circolare all'interno di due camere di metallo semicircolari. Per cui quando gli ioni sono all'interno delle due "semicamere" seguono una traiettoria circolare, mentre quando si trovano nel gap tra i due elettrodi semicircolari essi vengono accelerati dal campo elettrico, incrementando la loro energia cinetica ogni volta che passano lo attraversano. Accelerando, il raggio dell'orbita aumenta fino a quando il fascio fuoriesce dal ciclotrone in maniera tangenziale.

1.3.2 Il target di produzione di radioisotopi, il sistema di estrazione e ionizzazione

Nella Figura 1.7 è mostrata la configurazione della camera dove vengono prodotti i radioisotopi. All'interno dell'involucro cilindrico (camera target) è contenuto anche il sistema di estrazione e ionizzazione dei nuclidi instabili. La camera è soggetta a potenze termo-strutturali ingenti e per controllarne i carichi termici è raffreddata mediante un canale in cui scorre acqua. Inoltre, per via delle elevate temperature che favoriscono l'ossidazione dei materiali metallici, all'interno della camera sono mantenute condizioni di alto vuoto (le pressioni sono nell'ordine di 10^{-6} mbar). Questa condizione favorisce anche un aumento in termini di emivita per i radionuclidi. La camera è realizzata in lega di alluminio perché è un materiale che si attiva in maniera contenuta, cioè è poco sensibile all'induzione secondaria di radioattività. La tenuta del vuoto all'interno della camera è garantita da un O-ring e la copertura cilindrica è delimitata da una flangia (plate) e un coperchio (cover) entrambi in alluminio.

Il target è rappresentato da sette dischi coassiali in carburo di uranio (UC_x) ed è in grado di generare più di mille fissioni al secondo. I dischi hanno un diametro di 40 mm e un 1 mm di spessore, sono opportunamente distanziati per dissipare la maggior quantità possibile di calore generato dalla fissione per mezzo della radiazione termica. I dischi sono sostenuti da un tubo in grafite (box) lungo 200 mm e con un diametro di 49 mm, come mostrato in Figura 1.8.

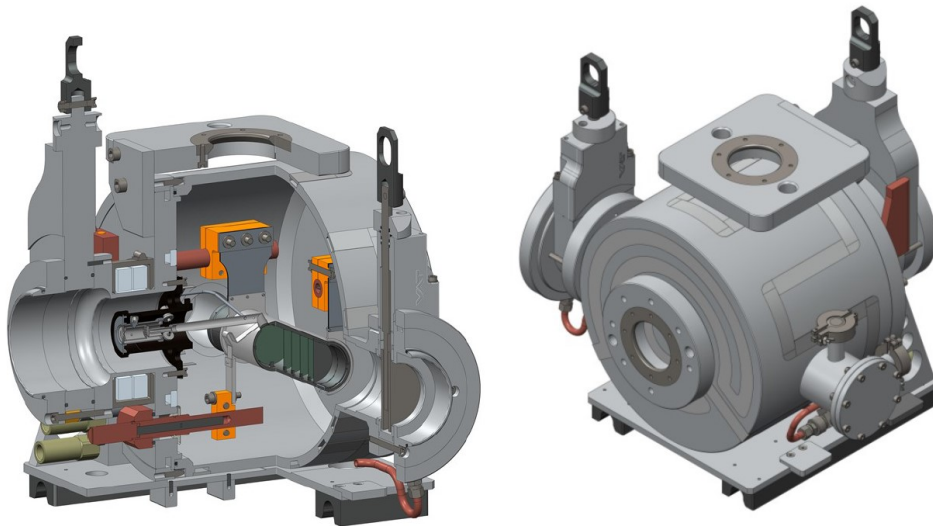


Figura 1.7: Camera target: a destra si mostra il modello completo mentre a sinistra una sua sezione.

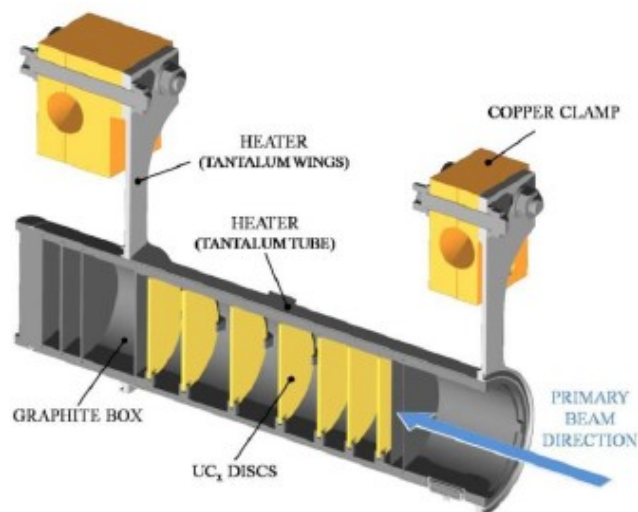


Figura 1.8: Sezione del target per produzione di radioisotopi [4].

Prima che il fascio di protoni entri in contatto con i dischi di uranio, esso attraversa due sottili strati di grafite, detti windows. Lo spessore è molto ridotto quindi l'energia del fascio non è attenuata ma sono necessari per schermare la zona attiva dove vengono prodotti i radioisotopi e a garantire una temperatura sufficientemente alta del materiale fissile in prossimità dell'ingresso del fascio. Il fascio protonico attraversa le finestre in grafite e i sette dischi di uranio e infine impatta su tre dumper e la base del cilindro (box base). In questo modo si impedisce che le particelle escano dal lato posteriore del target, evitando l'attivazione della camera esterna.

Per aumentare la diffusione delle particelle prodotte dalla fissione è necessario mantenere un livello termico elevato, con una temperatura media di 2000 °C. La potenza del fascio di protoni non è sufficiente per garantire un livello termico così elevato. Per questo è stato introdotto un riscaldatore (heater) composto da un tubo in tantalio che avvolge la box in grafite. Alle sue estremità sono saldate due ali (wings) che permettono di collegare i morsetti in rame (clamps). Attraverso il passaggio di corrente elettrica l'heater si scalda per effetto Joule; la potenza elettrica dissipata aggiunta al calore sviluppato dalle reazioni nucleari garantiscono che i dischi e la scatola siano mantenute alla temperatura desiderata. L'heater permette di evitare improvvisi sbalzi di temperatura che possono indurre pericolosi stress termici e compromettere l'integrità strutturale dei dischi.

Nel momento in cui il fascio di protoni collide con i dischi di carburo di uranio si crea una "nube" di radioisotopi aventi una massa compresa tra gli 80 ed i 160 uma. Per realizzare un fascio di ioni radioattivi (RIB), la specie esotica desiderata deve essere ionizzata ed estratta dal target. È un processo che richiede del tempo e non è particolarmente efficiente per radioisotopi che hanno una emivita inferiore a qualche decina di millisecondi.

L'estrazione degli isotopi avviene grazie alla linea di trasferimento (transfer line): gli atomi in uscita dal target vengono convogliati verso la sorgente di ionizzazione (ion source) e vengono ionizzati positivamente (carica +1). Attualmente la linea di trasferimento è rappresentata da un sottile tubo in tantalio, saldato all'heater da un'estremità e fissato meccanicamente alla sorgente di ionizzazione nell'altra. Essendo connesse al riscaldatore anche il complesso transfer line – ion source vengono riscaldati per effetto Joule raggiungendo temperature di 2400 °C.

La sorgente di ionizzazione è utile per poter accelerare i nuclei radioattivi adoperando una semplice differenza di potenziale. Si definisce potenziale di ionizzazione l'energia necessaria per portare un elettrone di valenza a distanza infinita dall'atomo. A seconda dell'energia richiesta dall'atomo possono essere adottati diversi metodi. In generale i metalli alcalini o alcalino-terrosi hanno piccoli potenziali di ionizzazione. Spesso per questo tipo di metalli si usano sorgenti di ionizzazione superficiale (SIS – Surface Ionization Source). Nel front-end possono essere adottati anche altri tipi di sorgenti, per esempio quella al plasma (PIS – Plasma Ionization Source), capace di ionizzare atomi con alte energie di ionizzazione. Esiste anche la sorgente di ionizzazione laser (RILIS – Resonant Ionization Laser Ion Source), atta a ionizzare in maniera selettiva gli elementi con potenziali medi. Nella Figura 1.9 si riporta un breve riassunto dei metodi utilizzati in funzione dell'elemento chimico. Gli elementi evidenziati in blu non sono estratti nel target perché sono notevolmente volatili.

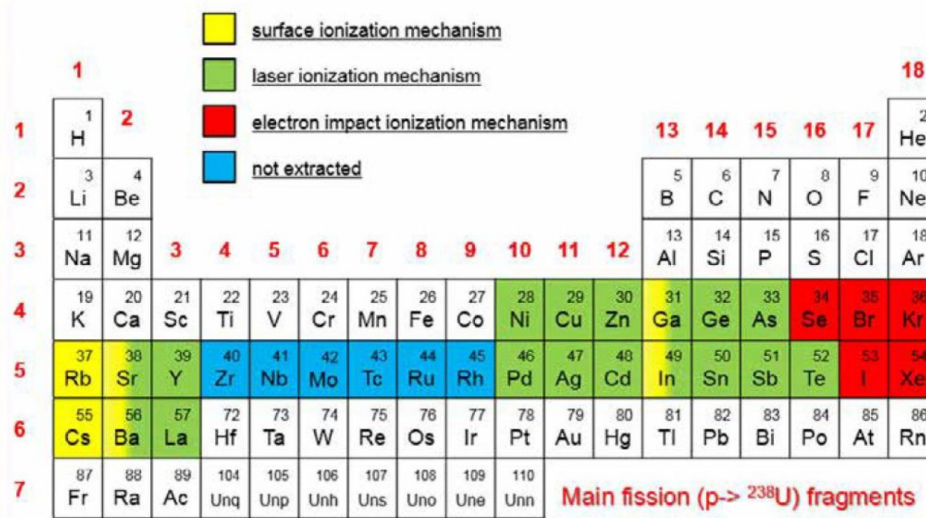


Figura 1.9: Metodi di ionizzazione per gli elementi della tavola periodica [4].

Nel progetto SPES si produrranno i radioisotopi evidenziati in Figura 1.10, la legenda riporta il numero di particelle prodotte per secondo.

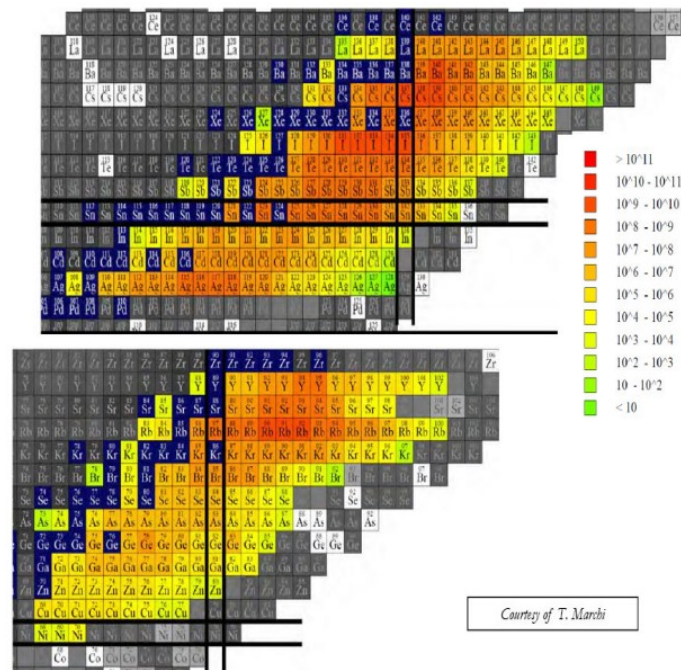


Figura 1.10: Radioisotopi che produrrà il progetto SPES.

Il progetto SPES prevede l'impiego di diverse sorgenti di ionizzazione basate su metodi differenti. La scelta del metodo di ionizzazione appropriato è legata al potenziale di ionizzazione, ovvero all'energia che si rende necessaria per "strappare" un elettrone all'atomo e portarlo ad una distanza infinita dalla sfera di valenza.

Le sorgenti di ionizzazione SIS e LIS sono rappresentate da un'unica architettura che deriva dalla riprogettazione della sorgente "MK1 ISOLDE" del C.E.R.N. a Ginevra (si veda in Figura 1.11). Il cuore di questa tecnologia è la hot cavity cioè un piccolo tubo in tantalio o renio in cui avviene la ionizzazione. Questo condotto è dotato di un invito conico ed è fissato mediante un accoppiamento per interferenza al foro centrale del supporto in tantalio, assicurato dalle strette tolleranze dimensionali. Le alte temperature raggiunte causano una saldatura tra i componenti metallici.

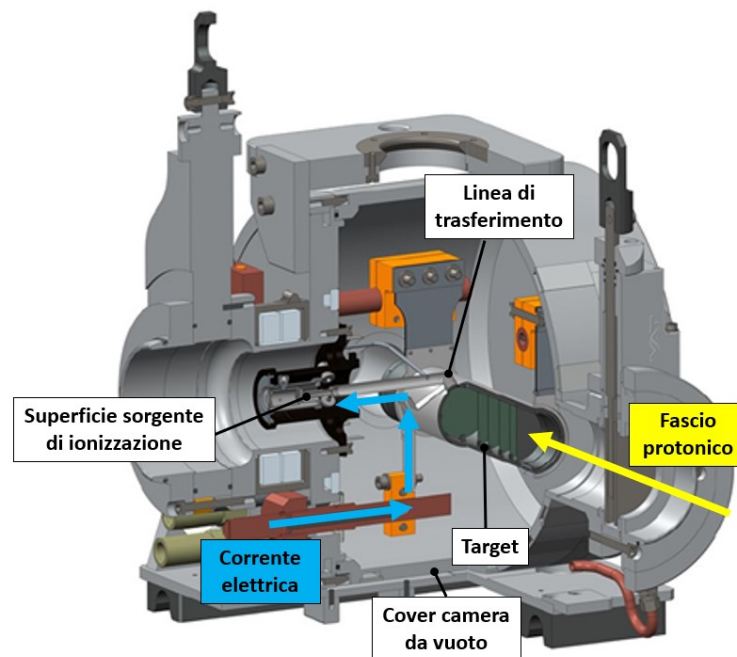


Figura 1.11: Configurazione del sistema di estrazione e ionizzazione nella facility SPES.

Le sorgenti di ionizzazione sono:

1. Surface Ion Source (SIS)

In questo primo modo la ionizzazione avviene in seguito all'impatto dei radioisotopi provenienti dal target sulla superficie interna della hot cavity (Figura 1.12). Questa procedura è realizzabile solo se la minima energia per estrarre un elettrone da un metallo è maggiore dell'energia di ionizzazione dell'isotopo. Nella facility in esame si possono produrre ioni positivi per atomi che hanno potenziale di ionizzazione minore della funzione di lavoro del renio (5 eV). La sorgente di ionizzazione è mantenuta ad alte temperature così si riesce ad ottenere un processo efficiente e selettivo ma solo per elementi del primo o secondo gruppo della tavola periodica. Questo rappresenta lo svantaggio principale del metodo.

Sono inoltre necessari separatori elettromagnetici che consentono di selezionare gli isotopi di interesse del fascio, in base alla massa (mass separator). Tuttavia, il fascio, anche a valle di questi dispositivi selettivi, non è totalmente puro, infatti possono essere presenti isotopi isobari (caratterizzati per avere lo stesso numero di massa A ma diverso numero atomico Z, per esempio ^{132}Sn e ^{132}Cs) sebbene appartengano a specie diverse. Per separare gli isotopi isobari si rende quindi necessario l'impiego di separatori isobari, i quali oltre ad essere complicati e costosi non assicurano una separazione minuziosa e riducono notevolmente l'intensità del fascio radioattivo.

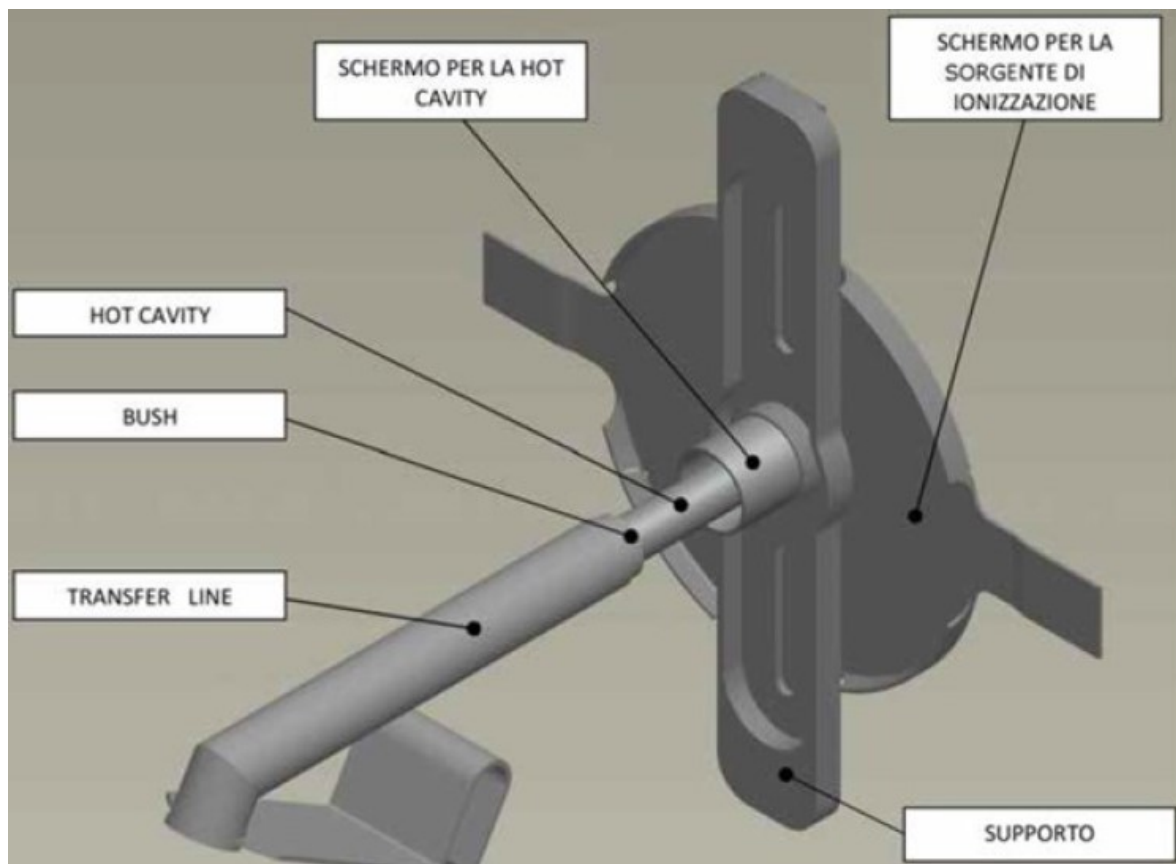


Figura 1.12: Sorgente di ionizzazione superficiale (SIS).

2. Resonant Ionization Laser Ion Source (RILIS)

La sorgente RILIS è basata sull'impiego di tecnologie laser per ionizzare gli isotopi radioattivi conferendo loro una carica +1 (Figura 1.13). Attraverso fasci laser si va a irraggiare gli isotopi in modo da fornire l'energia necessaria per eccitare l'atomo fino a "strappare" un elettrone allontanandolo dalla propria nuvola elettronica. I fasci laser possono avere lunghezze d'onda e frequenze differenti in modo da poter ionizzare gli isotopi in modo selettivo. Infatti ogni isotopo necessita di energie di ionizzazione differenti. In tal modo viene meno la necessità di impiegare separatori isobari che introducono varie problematiche come sopra descritte. La sorgente RILIS presenta una geometria simile alla geometria della sorgente SIS, con la differenza che ora all'interno della hot cavity viene proiettato il fascio laser.

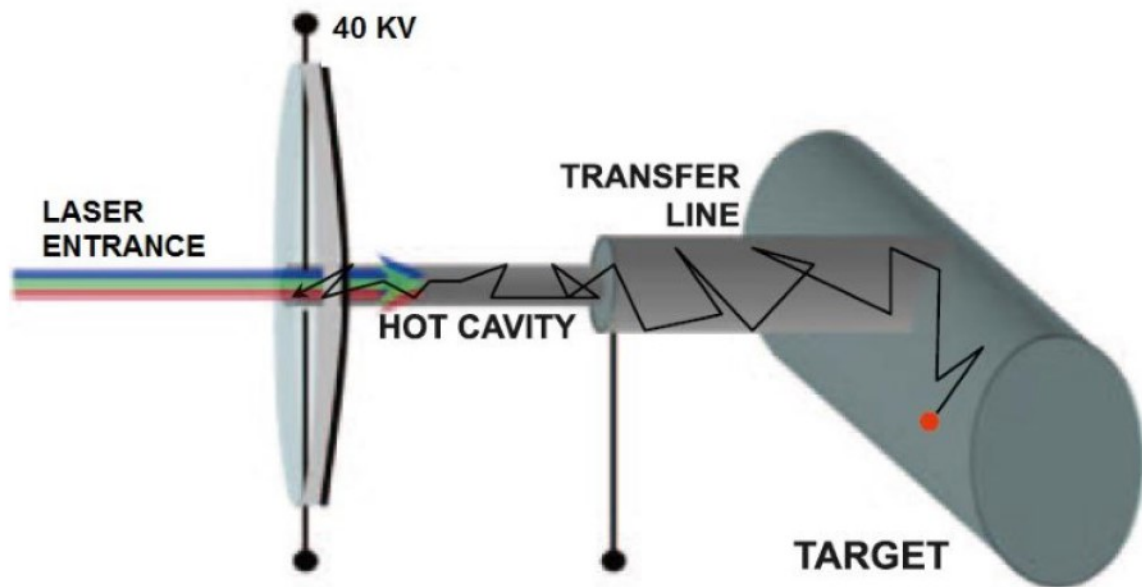


Figura 1.13: Principio di funzionamento del metodo RILIS.

Le contaminazioni con altre specie chimiche sono minime, infatti, si è in grado di produrre ioni radioattivi degli elementi di interesse senza altri inquinanti.

Spesso alcuni elementi (per esempio il cesio) sono ionizzati per strisciamento con la parete interna, provocando difetti nelle caratteristiche del fascio. Per ridurre questo fenomeno è consigliabile realizzare la hot cavity in niobio.

L'espansione termica dei materiali del sistema descritto può provocare disallineamenti del canale di ionizzazione. Nel caso in cui ci siano eccessivi sfasamenti il laser riduce la sua zona di azione diminuendo l'efficienza del processo ionizzante (Figura 1.14).

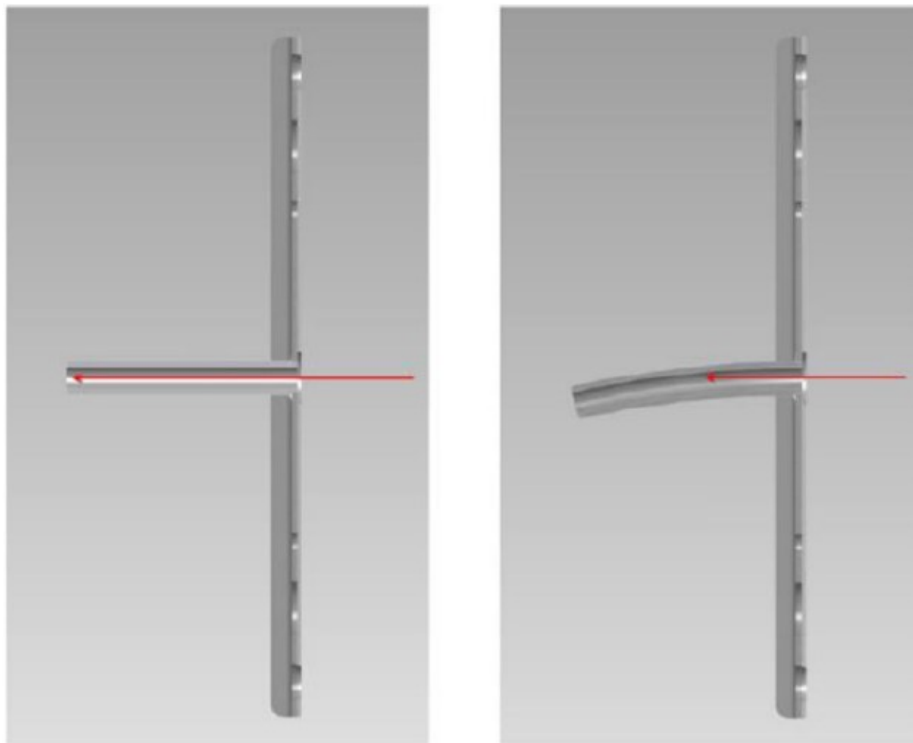


Figura 1.14: Disallineamento della hot cavity.

3. Plasma Ion Source (PIS)

Questo terzo metodo prevede la ionizzazione degli atomi in seguito all'impatto con elettroni accelerati per effetto termo-ionico. In questo caso sono necessari un catodo e un anodo come si mostra in Figura 1.14.

Attraverso il catodo passa una corrente elettrica continua di intensità 330-340 A la quale lo riscalda per effetto Joule. L'alta temperatura favorisce l'emissione degli elettroni da parte del catodo (superficie emettitrice) verso una camera che rappresenta l'anodo: infatti gli elettroni sono eccitati e acquistano un'energia superiore a quella di legame con il nucleo dell'atomo. All'interno dell'anodo gli elettroni vengono accelerati da una differenza di potenziale di circa 150 V ed urtano i radioisotopi: l'impatto provoca la perdita di un elettrone degli atomi dell'anodo (cioè ioni positivi) creando un plasma. Nella facility ISOLDE del C.E.R.N. si usa una sorgente di ionizzazione FEBIAD chiamata MK5. Per il progetto SPES è stato realizzato un prototipo simile a quella di Ginevra. Mediante sorgente PIS è possibile ionizzare tutti gli elementi, tuttavia nel complesso risulta avere un'efficienza di ionizzazione inferiore rispetto alle altre sorgenti.

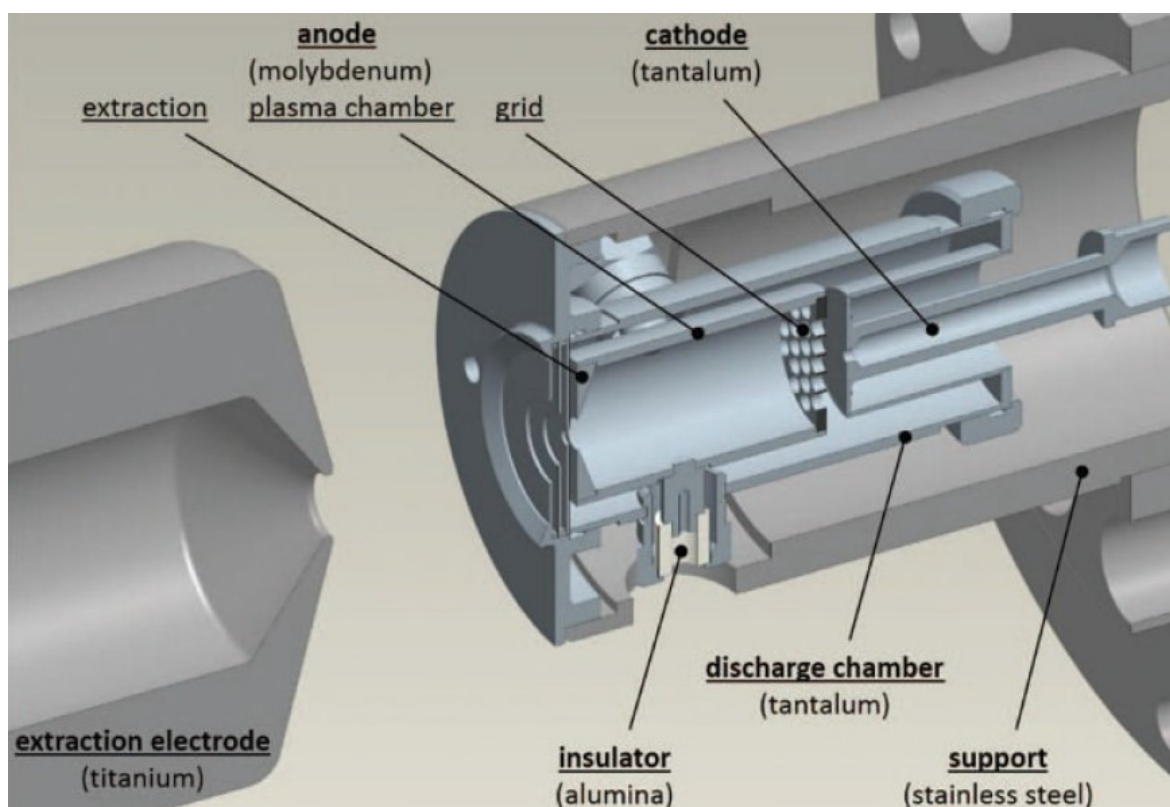


Figura 1.15: Schema della sorgente di ionizzazione PIS.

L'elettrodo estrattore ha il compito di estrarre dalla sorgente di ionizzazione il fascio.

1.3.3 Separatori magnetici e post accelerazione

A valle del processo di ionizzazione il fascio è sottoposto ad una purificazione preliminare grazie ad un separatore di massa. Questo dispositivo intrappola gli inquinanti cioè gli atomi che non sono d'interesse. La risoluzione del separatore di massa è pari circa a 150 (cioè $M/\Delta M$, dove M rappresenta la massa dell'isotopo). Successivamente si ha un secondo stadio di purificazione, compiuto da un separatore isobaro che permette di selezionare gli isotopi isobari.

Concluso quest'ultimo processo il fascio radioattivo è pronto per essere convogliato alle sale sperimentali (per esperimenti a bassissima energia) o post accelerato. Per rendere più efficace la post accelerazione si utilizza un Charge Breeder, ossia un dispositivo capace di aumentare la carica degli ioni prima

dell'immissione del fascio radioattivo in un RFQ, il quale rappresenta il primo stadio di aumento dell'energia prima di entrare nell'acceleratore lineare "ALPI". Con la Figura 1.16 si ha lo schema completo dell'intero funzionamento della facility SPES.

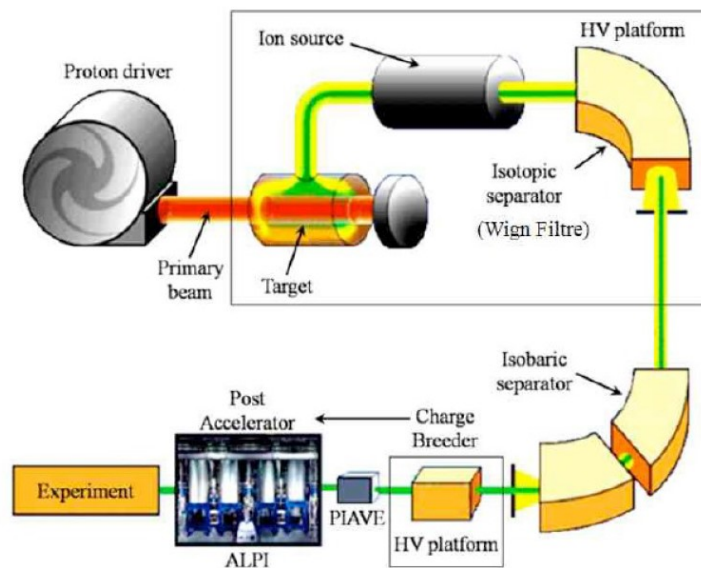


Figura 1.16: Schema completo della facility SPES.

1.3.4 Il Front End (FE)

Il termine Front-End indica l'insieme dei diversi sistemi e dispositivi che cooperano per ottenere la produzione ed il trasporto dei fasci radioattivi. Pompe volumetriche e turbo-molecolari fanno parte del Front-End e grazie alla loro reciproca cooperazione assicurano pressioni dell'ordine di 10^{-6} mbar (Figura 1.17). Pressioni estremamente ridotte facilitano il cammino dei due fasci ed evitano l'ossidazione dei materiali.



Figura 1.17: A sinistra una pompa rotativa di tipo Scroll (pressioni fino a $10^{-2} \div 10^{-3}$ mbar) e a destra una turbo-molecolare (si raggiungono pressioni fino a $10^{-5} \div 10^{-6}$ mbar).

Il Front-End della facility SPES è composto principalmente da due sistemi (Figura 1.18 e pianta della facility in Figura 1.19):

- Il Front-End protonico (FEP) che rappresenta i dispositivi responsabili del controllo e del trasporto del fascio protonico, fino all'ingresso della camera target.
- Il Front-End radioattivo (FER) responsabile del trasporto e della post accelerazione del fascio a valle del target.

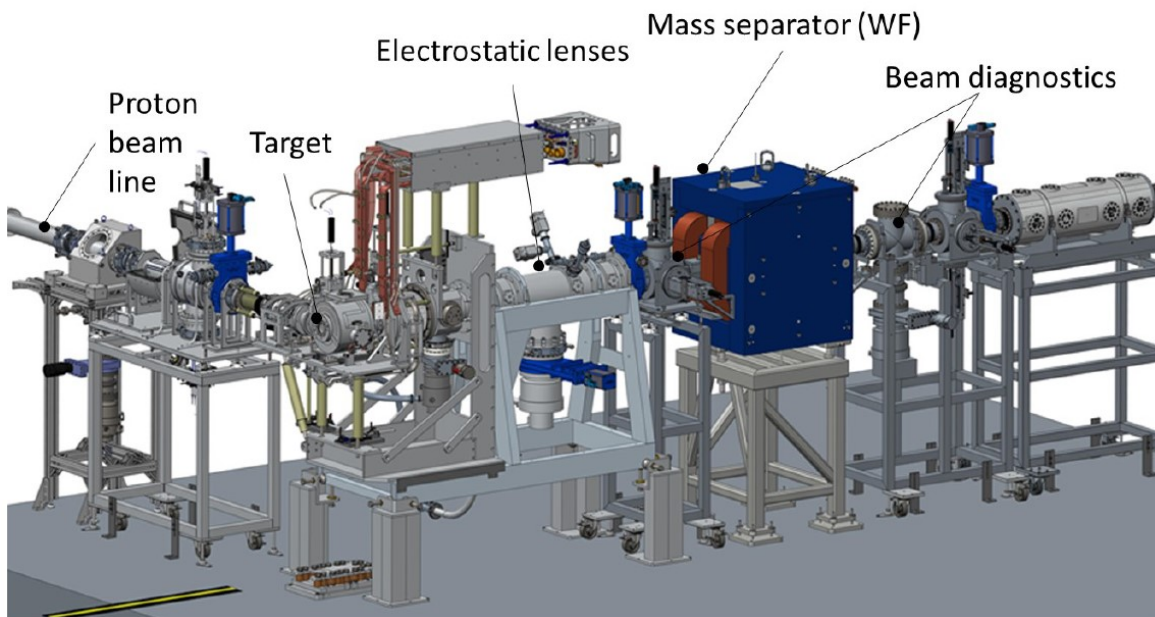


Figura 1.18: Rappresentazione del Front-End del progetto SPES.

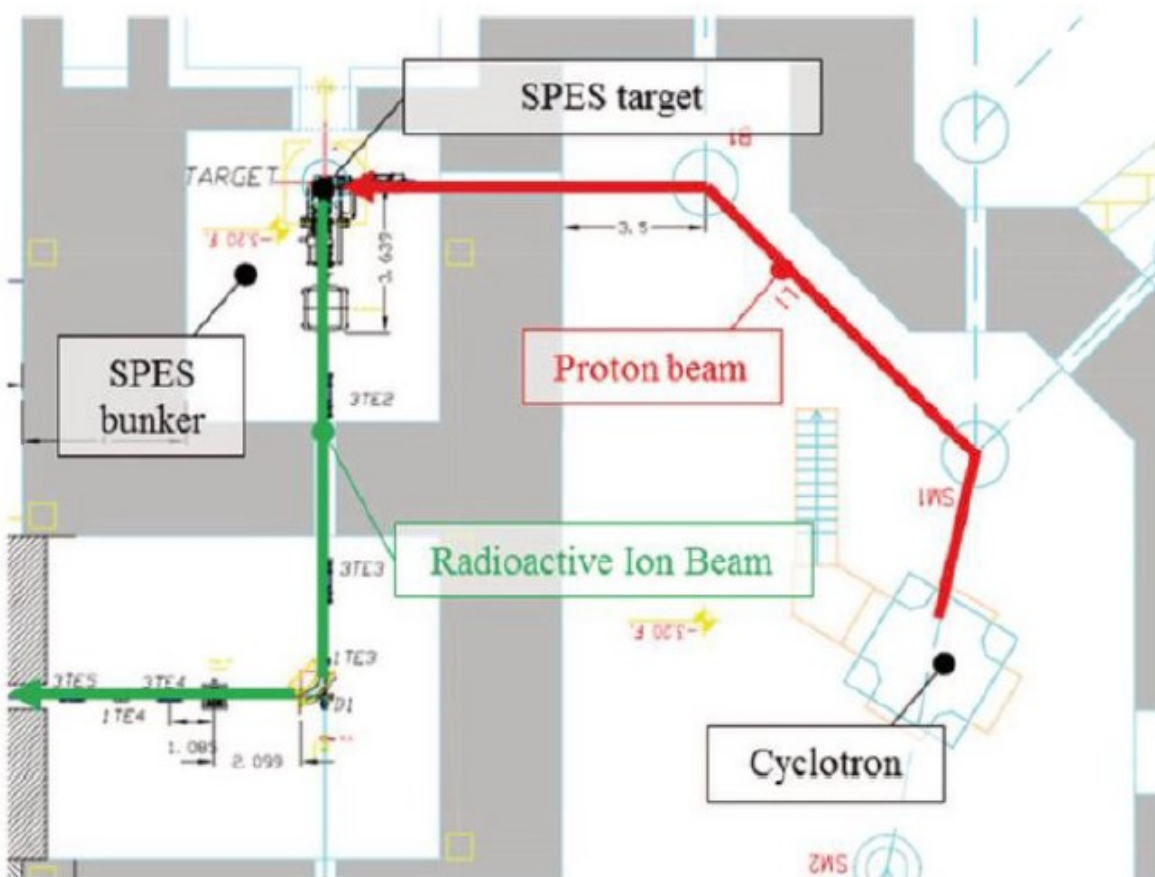


Figura 1.19: Schema della facility SPES con evidenziati i due Front-End.

Per quanto riguarda il Front-End protonico è fondamentale prevedere degli elementi di diagnostica al fine di avere un controllo corretto delle caratteristiche del fascio. Nella Figura 1.20 si mostra uno schema semplificato dei dispositivi che lo compongono.

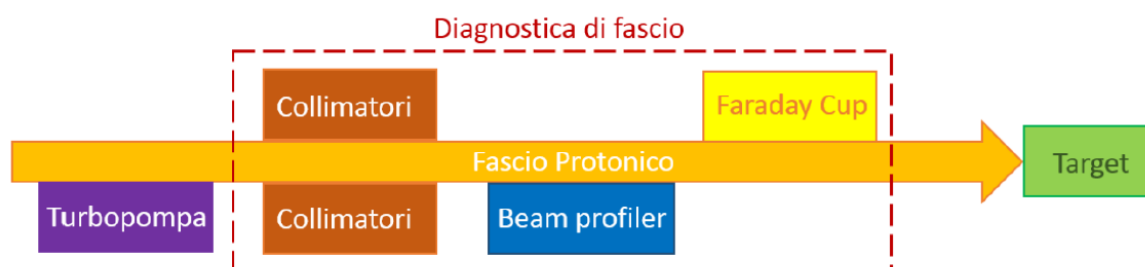


Figura 1.20: Schema a blocchi del Front-End protonico.

La diagnostica del fascio è composta principalmente da tre elementi. La direzione del fascio è controllata dai collimatori che correggono eventuali disallineamenti e sono fondamentali per determinare la dimensione del fascio. La loro funzione è fermare le particelle esterne del fascio, così controlla la sua forma. Successivamente è previsto un beam profiler, essenziale per valutare il profilo dell'intensità del fascio. L'ultimo elemento è rappresentato dalla Faraday Cup, utile per misurare l'intensità del fascio protonico. La diagnostica del fascio è composta da dispositivi che sono sempre utilizzati per impostare il sistema prima che il fascio investa e irraggi il target.

Il Front-End radioattivo ospita la camera target e la sorgente di ionizzazione, ovvero fornisce la potenza elettrica ed i segnali necessari al sistema. Infine, estrae e trasporta il fascio radioattivo ionizzato. I sottosistemi di cui è composto si possono vedere in Figura 1.21.

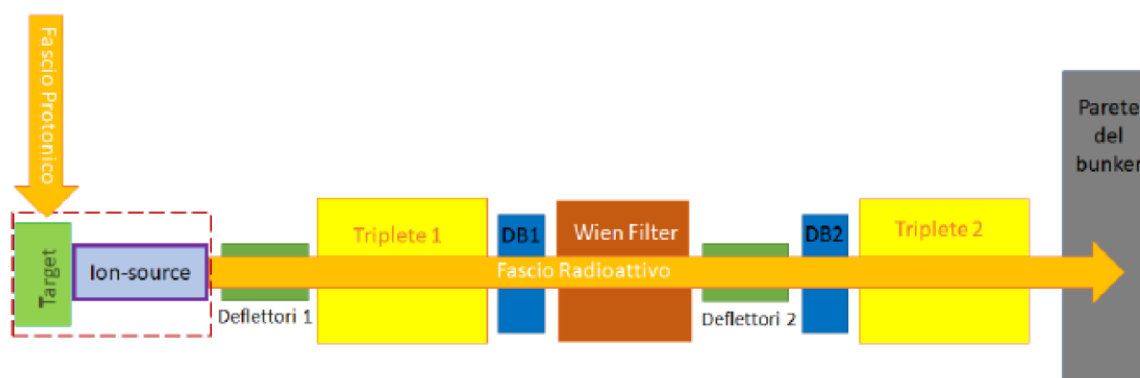


Figura 1.21: Schema a blocchi del Front-End radioattivo.

Sicuramente le condizioni operative dei dispositivi sono meno critiche rispetto a quello protonico, sia da un punto di vista termico che quello strutturale, tuttavia il numero e la complessità dei dispositivi sono elevati. Gli apparati principali sono:

- I deflettori: sono utilizzati per correggere i disallineamenti del fascio che possono essere causati da imprecisioni durante i processi di produzione e assemblaggio dei componenti.
- I tripletti: dispositivi costituiti da tre quadripoli. Questo apparato serve per il trasporto e per il controllo della dimensione del fascio. La facility SPES ne prevede due, il primo ha il compito di fornire il fascio in maniera corretta al Wien Filter mentre il secondo trasporta il fascio all'esterno del bunker.
- Il Wien Filter: questo filtro viene utilizzato come separatore di massa, ovvero viene impiegato per separare tra loro i vari isotopi in base alla massa. Il dispositivo possiede una risoluzione $M/\Delta M$ pari a 300 (M rappresenta la massa del particolare isotopo).

1.3.5 Manutenzione programmata della linea

Tutti i sistemi meccanici del Front-End non vengono sostituiti ma sono sottoposti ad una manutenzione programmata, eseguita all'interno delle sale del bunker SPES. Tuttavia, i componenti più vicini alla camera target sono investiti da elevate dosi di radiazioni prodotte dalla fissione atomica degli atomi dei dischi di UCx e per questo il danneggiamento dei materiali è più severo, costringendo i tecnici a dover sostituire i

componenti periodicamente. Per esempio, si stima che la camera target debba essere sostituita ogni 15 giorni di lavoro. È fondamentale escludere ogni tipo di intervento umano nel bunker perché risulterebbe pericoloso a causa dell'attivazione radioattiva dei materiali. Per questo motivo sono stati progettati sistemi meccanici e di movimentazione in grado di svolgere le operazioni in maniera totalmente automatizzata.

Per la sostituzione della camera target sono stati ideati quattro fasi di movimentazione che possono essere così riassunte:

- Posa della nuova camera target sulla tavola di ammaraggio (coupling table) che è il supporto dove si appoggia il dispositivo che accoglie il bersaglio di produzione;
- Movimentazione della camera dopo che è stata posizionata sulla tavola di ammaraggio;
- Prelievo della camera da sostituire e alloggiamento all'interno di un sarcofago (cioè un'urna progettata per contenere la camera target quando viene rimossa dalla linea);
- Stoccaggio del sarcofago della camera target sostituita.

La movimentazione (deposito e prelievo) della camera target sulla coupling table è controllata da due sistemi elettromeccanici pneumatici (Figura 1.22): il primo si occupa della movimentazione orizzontale (SMO) mentre il secondo di quella verticale (SMV). Per lo stoccaggio del sarcofago si sta sviluppando un sistema di trasferimento interno al magazzino temporaneo detto temporary storage.

Il sistema SMO raggiunge la camera target partendo dalla cosiddetta zona fredda, sullo stesso piano del bunker. Viceversa, il sistema di movimentazione verticale raggiunge il bunker partendo dal primo piano del complesso SPES. Quest'ultimo verrà attivato qualora ci fossero emergenze o il sistema di movimentazione orizzontale fosse danneggiato.

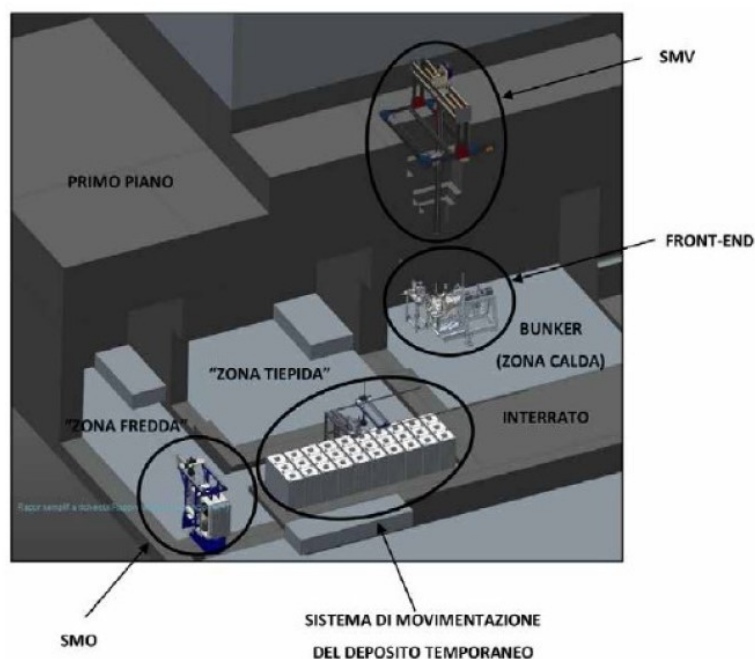


Figura 1.22: I due sistemi di movimentazione SMO e SMV.

1.4 Le possibili applicazioni dei fasci esotici

I fasci di ioni esotici non hanno una valenza limitata solo alla fisica nucleare e fisica allo stato solido bensì trovano applicazioni in molti altri ambiti diversi. Essi infatti risultano uno strumento utile se non indispensabile per effettuare studi avanzati in diverse discipline e per sviluppare nuove tecnologie all'avanguardia. Si procede quindi a descrivere in modo sintetico i vari campi di applicazione che spaziano dall'astrofisica alla medicina.

1.4.1 Applicazioni in fisica nucleare

Perfezionamento e consolidazione del Modello Standard (MS)

La moderna fisica nucleare si basa sul modello standard. Ad oggi il modello standard include tre delle quattro interazioni fondamentali, ossia l'interazione nucleare forte, la forza elettromagnetica e l'interazione nucleare debole. Per energie attorno ai 100 GeV queste due ultime interazioni sono simili e per questo sono identificate come interazione elettrodebole. Il modello standard descrive le funzioni e le proprietà di tutte le particelle (ad oggi conosciute) che compongono la materia. Tuttavia, alla base della teoria sviluppata nel Novecento, vi sono delle assunzioni ad hoc non ancora pienamente verificare. Nel passato sono stati ideati complessi esperimenti di fisica nucleare per confermare le assunzioni e pervenire così all'unione di tutte le forze fondamentali. Questi esperimenti, particolarmente complicati, prevedono di misurare alcune specifiche proprietà riguardanti il decadimento di alcuni nuclei atomici. È per questo che le rilevazioni possono essere effettuate utilizzando i fasci esotici prodotti dalle facilities come quella del progetto SPES.

Studio della struttura dei nuclei complessi

I nuclei complessi sono composti da molti nucleoni (protoni e neutroni). Questi ultimi sono costituiti a loro volta da sub-particelle che prendono il nome di quark. I quark oltre a prendere parte alle interazioni che avvengono all'interno del nucleo di appartenenza, interagiscono con quark appartenenti ad altri nuclei. Si è osservato che nucleoni appartenenti allo stesso nucleo hanno un'interazione diversa da quella che si ha tra due nucleoni liberi, in quanto la densità di neutroni e protoni all'interno del nucleo ha un effetto rilevante. Al momento non esiste un'unica formula generale che permetta di calcolare le interazioni nucleari per ogni tipo di nucleo conosciuto, ma possono essere svolti calcoli quantomeccanici solo per i nuclei più leggeri. L'obiettivo della fisica nucleare è quello di giungere ad una trattazione unitaria capace di:

- Permettere di quantificare l'interazione tra subparticelle
- Risolvere le incongruenze presenti attualmente nel Modello
- Essere in grado di spiegare anche i nuclei esotici, cioè quelli con il rapporto protoni/neutroni elevato

Anche per questo obiettivo i fasci di radioisotopi rappresentano un contributo prezioso.

Misure delle dimensioni dei nuclei

Maggiore è il numero di nucleoni in un atomo, ossia il numero di massa A , più grande è la sua dimensione. La correlazione può essere espressa con la formula (1.2):

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

dove R rappresenta il raggio del nucleo, R_0 esprime una costante pari a 1.2 fermi (dove 1 fermi = 10⁻¹⁵m) e A è il numero di massa. Se ci si pone in condizione instabili, si possono riscontrare sensibili variazioni dalla legge perché le interazioni nucleoniche sono così ridotte da non garantire la formazione di un nucleo compatto. Si possono creare nuclei atomici con una forma ad anello e sono detti nuclei "halo". I nuclei Halo sono isotopi caratterizzati da una sovrabbondanza di neutroni rispetto all'isotopo stabile. Uno o più neutroni sovrabbondanti, poiché sono caratterizzati da una debole interazione con il nucleo, non si uniscono a formare un unico aggregato ma orbitano attorno al nucleo presente. Tali neutroni prendono il nome di neutroni di valenza.

L'isotopo ¹¹Li è un esempio di nucleo "halo", infatti ha due neutroni di valenza. La dimensione del nucleo è paragonabile a quella dell'isotopo ⁴⁸Ca. Se si considera anche l'alone che racchiude le orbite dei due neutroni le dimensioni sono paragonabili a quelle di un atomo molto più massivo, per esempio l'isotopo ²⁴⁸Pb

Il nucleo dell'isotopo del Litio è un sistema a tre corpi formato da 2 neutroni e il core. È un esempio naturale di un sistema borromeico, cioè topologicamente un sistema costituito da 3 anelli inscindibili: la soppressione di uno comporta la separazione degli altri anelli. Nel caso si rimuova una delle tre parti, il sistema diventa instabile e gli altri due anelli si allontanano facilmente.

Per determinare la distribuzione dei protoni nel nucleo di un atomo sono necessari fasci radioattivi a bassa energia accoppiati a fonti di luce laser collineata. Per conoscere la posizione dei neutroni è più complicato, sono necessari fasci ad alta energia, come quelli previsti nel progetto SPES.

Produzione di elementi superpesanti

In natura si conoscono circa 90 elementi chimici, che vanno dall'idrogeno all'uranio. Con le reazioni di fusione nucleare si è potuto estendere la Tavola Periodica fino ad elementi con numero atomico Z pari a 112 e ci si aspetta che nei prossimi anni si possa estenderli fino a 116: si tratta di elementi con alti numeri di massa. Con gli studi degli ultimi decenni si ritiene che questi elementi "super-pesanti" si formino in prossimità dell'isola di stabilità (Figura 1.23).

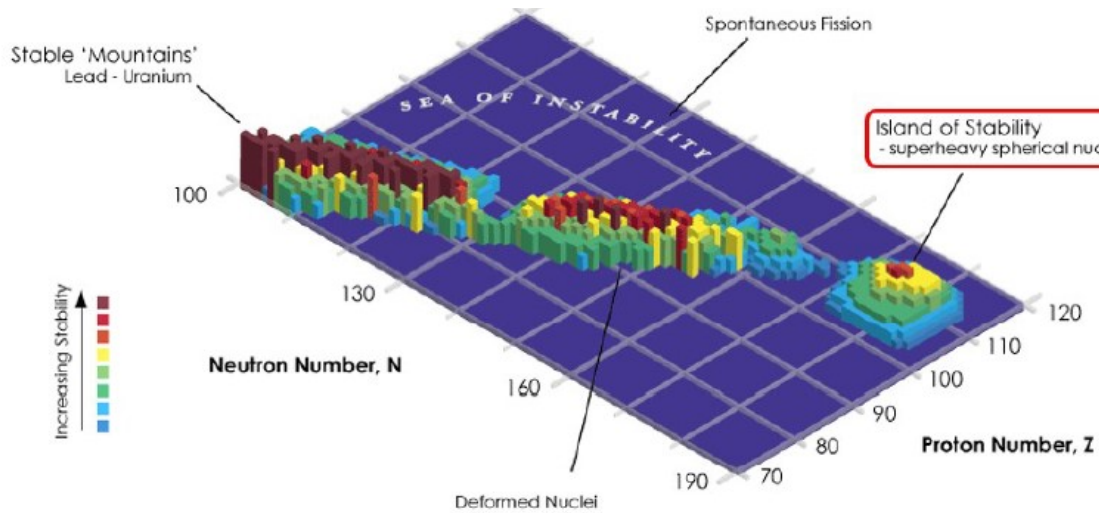


Figura 1.23: Carta dei nuclidi con l'isola di stabilità.

Le recenti tecnologie consentono di avere fasci di alta potenza, formati da nuclei instabili ricchi di neutroni (n-rich). Investendo un target di nuclei stabili con questi fasci altamente ricchi di neutroni, potrebbero crearsi le condizioni adatte per approfondire il fenomeno e studiare accuratamente questa nuova realtà.

1.4.2 Applicazioni nella fisica dello stato solido

Nel 1920 è stata ideata la tecnica Radio Tracer Diffusion. Con questa tecnica si intende l'inserimento di nuclei radioattivi all'interno di un sistema solido. Tali nuclei radioattivi durante il naturale decadimento emettono particelle e radiazioni gamma che vengono sfruttate per studiare il sistema solido con un'elevata accuratezza dato che è possibile registrare le emissioni di pochissimi atomi. In particolare si riesce a studiare i meccanismi di diffusione che avvengono all'interno del sistema solido. Il sistema ospitante può essere drogato con nuclei radioattivi attraverso diffusione da reazione nucleare oppure attraverso impianto ionico. Il radioisotopo che viene impiantato nella matrice è scelto in base alle proprietà chimico-fisiche del sistema ospitante e in base alla tipologia di esperimento che si vuole condurre.

La tecnica Radio Tracer Diffusion permette di:

- studiare il reticolo cristallino della matrice attraverso i prodotti del decadimento dei radionuclidi impiantati all'interno;
- misurare i campi elettrici e magnetici all'interno del sistema ospitante;
- studiare la diffusione degli atomi all'interno della matrice solida;
- rilevare i difetti, le vacanze all'interno del reticolo cristallino.,

Drogaggio dei semiconduttori

Da decenni si sta assistendo alla progressiva riduzione delle dimensioni dei semiconduttori, ma per realizzare semiconduttori miniaturizzati è necessario avere un controllo completo dei difetti contenuti all'interno del reticolo cristallino del semiconduttore. I difetti possono essere divisi in intrinseci (difetti interstiziali, vacanze) e in estrinseci (impurità, presenza di elementi estranei, droganti). Una concentrazione inferiore a

10^{12} atomi/cm³ riduce notevolmente le caratteristiche desiderate nel semiconduttore quali proprietà ottiche ed elettroniche. Risulta quindi importante tenere sotto controllo i difetti. I semiconduttori vengono normalmente drogati con elementi stabili, ma se si usano isotopi radioattivi è possibile eseguire esperimenti mirati all'individuazione e misurazione dei difetti. La tecnica usata da decenni è il channeling che consiste nel far passare un fascio di ioni attraverso i canali tra i piani atomici. Tuttavia tale metodologia riesce ad individuare una concentrazione di difetti dell'ordine dei 10^{18} atomi/cm³, ma si è già detto che una concentrazione pari a 10^{12} atomi/cm³ si rivela eccessiva. Risulta quindi necessario far ricorso ad un'altra tecnica, chiamata emission channeling (Figura 1.24) che consiste nell'inserire all'interno del reticolo degli isotopi radioattivi. I radioisotopi decadendo emettono particelle radioattive e raggi gamma lungo direzioni diverse permettendo la determinazione della loro posizione all'interno del reticolo cristallino con una imprecisione di pochi decimi di Angstrom.

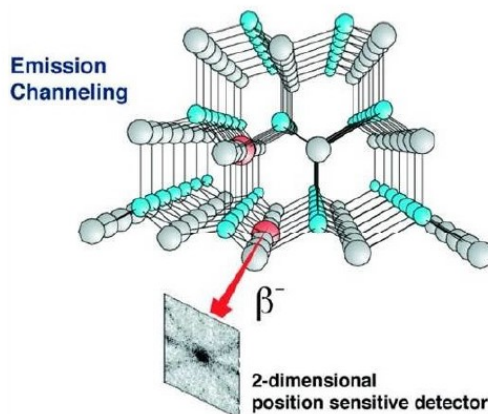


Figura 1.24: Emission channeling: emissione di elettroni da parte di atomi radioattivi che si trovano lungo una riga atomica

1.4.3 Applicazioni in medicina nucleare

Anche in ambito clinico i fasci di ioni radioattivi possono avere importanti applicazioni, sia nella diagnostica che nel campo del trattamento di patologie tumorali. Si fornisce una breve panoramica delle principali applicazioni e obiettivi dei prossimi anni.

Tomografia ad emissione positronica (PET)

L'antimateria generalmente si utilizza in laboratori di ricerca di fisica nucleare (come il C.E.R.N.) nello studio delle interazioni tra particelle elementari ma è sfruttata anche per una significativa applicazione tecnologica, la Tomografia a Emissione Positronica (abbreviata con PET – Positron Emission Tomography). È una tecnica che riguarda la branca della medicina nucleare e la diagnostica medica e sfrutta l'emissione positronica per controllare il funzionamento degli organi dei pazienti. Il risultato dell'esame sono mappe tridimensionali della parte del corpo analizzata.

Prima dell'inizio dell'esame vero e proprio la procedura prevede l'iniezione per via endovenosa di alcuni isotopi traccianti (caratterizzati da avere vite medio-brevi) legati ad una molecola metabolicamente attiva che generalmente è uno zucchero. Dopodiché si lascia trascorrere un breve periodo di tempo per aspettare che la molecola contenente il tracciante si sia diffusa nel corpo e si sia legata alle cellule dei vasi sanguigni degli organi da esaminare. Si fa distendere il paziente all'interno di uno scanner. L'isotopo radioattivo decade ed emette un positrone. Grazie agli esperimenti di fisica nucleare sappiamo che il positrone, dopo aver percorso al limite qualche millimetro, si annichila con un elettrone ed emette due fotoni lungo una stessa retta ma in direzioni opposte. L'energia della coppia di fotoni è paragonabile a quella di una radiazione gamma. Lo scanner rivela i fotoni e considera valido il segnale solamente se la coppia arriva in un intervallo di tempo sufficientemente ristretto (una manciata di nanosecondi) altrimenti l'informazione viene scartata. La direzione dei due fotoni identifica una sola retta così è possibile ricostruire la posizione del corpo da cui sono stati emessi. In questo modo si è in grado di monitorare l'attività dei tessuti osservati.

Lo scanner, come semplificato con un anello in Figura 1.25, sfrutta l'emissione dei fotoni per determinare la densità di isotopi radioattivi nei tessuti. L'output dell'analisi è una mappa che mostra dove vi è più concentrazione della molecola tracciante: i risultati vengono interpretati da uno specialista in medicina nucleare o un radiologo per formulare una diagnosi e stabilire l'eventuale trattamento adeguato.

Spesso gli esiti ottenuti con la PET sono comparati e integrati con i risultati della Risonanza Magnetica Nucleare che permette di ottenere una ricostruzione completa dei tessuti analizzati. L'unione delle informazioni di esami diversi permette di comprendere i dati morfologici, anatomici e metabolici.

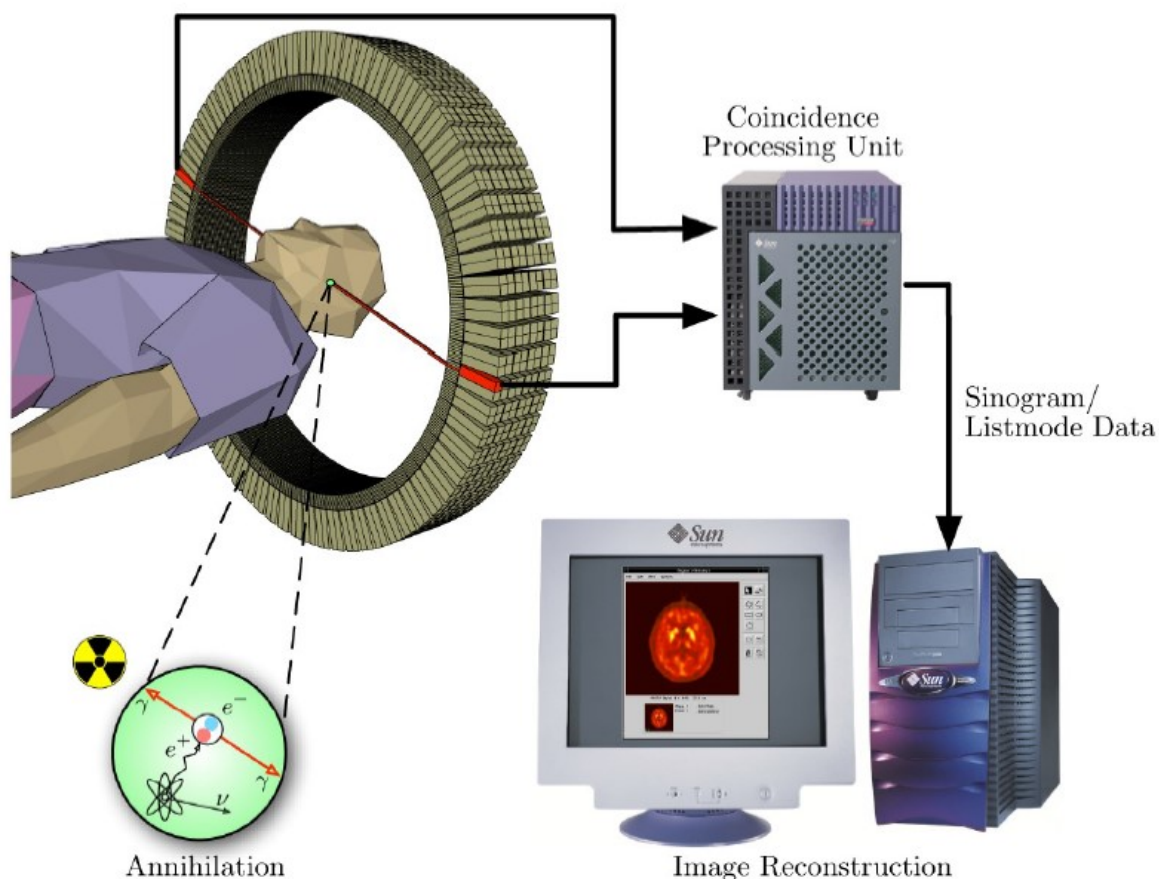


Figura 1.25: Schema semplificato dell'esame PET.

La differenza fondamentale tra i metodi di scansione come la Risonanza Magnetica Nucleare (RMN) o la Tomografia Assiale Computerizzata (TAC) e la PET è che le prime possono permettere di individuare variazioni anatomiche o morfologiche mentre la seconda consente di identificare alterazioni biologiche molecolari. La mappa di output della Figura 1.25 è costruita in funzione della velocità di assorbimento dei marcatori ed essa cambia in funzione del tipo di tessuto.

Le alterazioni biologiche spesso precedono quelle morfologiche e questo offre un grande vantaggio in quanto è possibile diagnosticare con più anticipo eventuali anomalie.

Sempre con una PET è possibile individuare, con una sufficiente precisione, zone in cui l'afflusso sanguigno nei tessuti è variato: questo è reso possibile analizzando la concentrazione dell'emissione positronica. Gli isotopi radioattivi più comunemente utilizzati nella PET sono caratterizzati da brevi emivite, come ^{11}C (≈ 20 min), ^{13}N (≈ 10 min), ^{18}F (≈ 110 min), ^{15}O (≈ 2 min). Proprio per il ridotto tempo di dimezzamento questi isotopi devono essere prodotti nelle vicinanze dello scanner PET.

Produzione di radioisotopi

All'interno del progetto SPES si sta già studiando la possibilità produrre radioisotopi adatti per applicazioni di medicina nucleare. In collaborazione con altri laboratori di fisica nucleare e ospedali si stanno studiando

prototipi di radiofarmaci. La direzione di ricerca punta a produrre radioisotopi neutron – rich β – emitters. Il punto di forza di questa promettente tecnologia è quella di produrre radiofarmaci ad altissima purezza, cioè senza contaminanti: questo permette di essere ottenere risultati molto più precisi e riduce la pericolosità dell'esame. Per ora è stata sviluppata con successo una sperimentazione pilota con ^{89}Sr .

Si descrive quindi brevemente la procedura di produzione dei radiofarmaci. Il fascio primario viene fatto collidere su un opportuno target in modo da ottenere i radionuclidi desiderati che vengono depositati su appositi dischetti in materiale inerte. I dischetti contenenti i radionuclidi vengono dissolti; si procede ad estrarre i radioisotopi che andranno incontro a processi di purificazione in modo da ottenere un radionuclide completamente puro che potrà essere usato per la produzione di radiofarmaci.

1.4.4 Applicazioni in astrofisica

L'astrofisica nucleare studia i meccanismi alla base della produzione di energia nell'universo e la sintesi degli elementi. Nelle stelle vengono liberate enormi quantità di energia in seguito alle reazioni nucleari che coinvolgono atomi stabili e radioattivi. Le reazioni sono costanti durante quasi tutta la vita di una stella permettendole di continuare a brillare per bilioni di anni prima di esaurire la fonte di energia. I corpi celesti più grandi, negli ultimi istanti della loro vita, liberano un'improvvisa quantità di energia esplodendo, distruggendosi in alcuni minuti o pochi secondi. Grazie alle reazioni nucleari nella stella vengono sintetizzati nuovi elementi chimici sia per mezzo di processi di nucleo-sintesi (seguono la valle di stabilità) che attraverso processi parzialmente sconosciuti al momento. Per studiare il processo di nucleo-sintesi è necessario sviluppare un modello teorico, e per farlo, occorre valutare le rese delle reazioni nucleari dei principali eventi astrofisici e approfondire il fenomeno del decadimento dei nuclei non ancora conosciuti. È quindi fondamentale studiare l'emivita, la massa e le modalità del decadimento di atomi distanti dalla valle di stabilità. I radioisotopi possono rappresentare un prezioso contributo perché le reazioni nucleari che coinvolgono nuclei instabili possono essere studiate solamente con un fascio di atomi esotici: anche per questo motivo è prevista una nuova generazione di facilities, ossia anche per comprendere la sintesi elementare dell'Universo.

1.5 Conclusioni

La crescente importanza assunta dai fasci radioattivi negli ultimi anni, sia per studi teorici che per ricerca applicata, ha spinto la comunità scientifica internazionale a progettare numerose facilities. Il progetto SPES ai Laboratori Nazionali di Legnaro contribuisce alla realizzazione di una facility europea di tipo ISOL per alte prestazioni (progetto EURISOL). Per la realizzazione del progetto finale si prevede l'allestimento di centri di ricerca ed infrastrutture intermedie, in grado di ottenere come prestazioni 10^{13} fissioni/s in un target composto da 7 dischi di UCx bombardati da un fascio di protoni con energie fino a 70 MeV e correnti di 0.2 mA. Questo lavoro di tesi si inserisce all'interno del progetto SPES e mira a riprogettare un nuovo integratore di corrente elettrica (detto Faraday Cup) destinato alla linea protonica del Front-End. L'obiettivo del nuovo componente sarà quello di essere adatto anche alle nuove condizioni operative a cui è sottoposto, molto più critiche rispetto a quelle degli studi passati. Nei prossimi capitoli si presenteranno i requisiti e si ripercorreranno i passi fondamentali della progettazione. A causa delle condizioni estreme a cui sono soggette le apparecchiature della facility è fondamentale, oltre alle leggi che controllano la fisica del sistema, avere a disposizione uno strumento molto più preciso ma anche più complesso: il metodo degli Elementi Finiti.

CAPITOLO 2

Macchine di prova ad elevata temperatura: approfondimento sul sistema di riscaldamento e sulla messa in vuoto

2.1 Introduzione

Per via dell'utilizzo sempre più spinto dei materiali si sono rese necessarie macchine di prova che ne potessero testare le prestazioni meccaniche ad elevata temperatura, dando quindi la possibilità di ampliare la caratterizzazione meccanica dei materiali.

Nel seguente capitolo sarà fatta una panoramica di quelle che sono le macchine di prova per test ad alta temperatura presenti nel mercato, al giorno d'oggi. Successivamente verranno esposte le soluzioni adottate per il progetto portato avanti al Laboratorio Nazionale di Legnaro. In particolare verranno analizzati gli aspetti riguardanti la messa in vuoto del sistema e il metodo di riscaldamento del provino.

2.2 Panoramica sulle macchine di prova ad elevata temperatura

2.2.1 ZwickRoell

Uno dei marchi che ha raggiunto i risultati più interessanti nel campo dei test sui materiali ad elevata temperatura è sicuramente l'azienda svizzera ZwickRoell.

Nel 1854 da Jakob Amsler-Laffon ha fondato l'azienda Amsler. Nel 1880 questa si è focalizzata sulla produzione di macchine di prova idrauliche, pendoli a impatto e macchine per prove di torsione. L'Azienda viene acquisita da Roell nel 1982. Nel 1992 avviene la fusione tra le aziende Roell e Zwick, entrambe specializzate nella produzione di macchine di prova.

Con più di 160 anni di esperienza la ZwickRoell si è guadagnata la posizione di fornitore leader mondiale di macchine di prova materiali. Questa Azienda si occupa di fornire macchine per prove statiche e dinamiche oltre a comprendere nel proprio catalogo macchine imbutitrici BUP, sistemi e strumenti per prove di durezza, plastometri ad estrusione per la determinazione dell'indice di fluidità e prodotti per le prove di impatto.

Tra i vari prodotti resi disponibili da ZwickRoell ci concentriamo sui sistemi di prova ad elevata temperatura. ZwickRoell offre soluzioni standard in un intervallo di temperatura da -80°C fino a +1.600 °C e soluzioni di prova personalizzate fino a +2.000°C. Il carico di prova può variare tra i 5 kN e i 250 kN con la possibilità di effettuare prove a trazione, compressione, flessione e prove in deformazione controllata.

Sono disponibili diversi sistemi di riscaldamento per le varie applicazioni e condizioni ambientali nelle prove ad alta temperatura. Ecco le possibili alternative:

- Forno a 3 zone fino a +1.250 °C;
- Forno a 3 zone fino a +1.500 °C;
- Forno corto fino a +1.200 °C;
- Camera a vuoto e con gas inerte fino a 2.000 °C;
- Sistemi di riscaldamento a induzione fino a +2.000 °C;
- Caricatore girevole per 3, 4 o 6 forni controllabili singolarmente;
- Camera climatica fino a +250 °C.

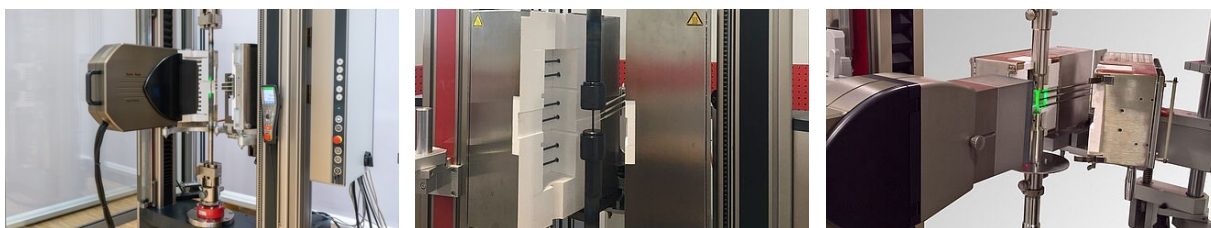


Figura 2.1: da sinistra a destra il forno a 3 zone per prove fino a 1250 °C, fino a 1500 °C e il forno corto per prove fino a 1200 °C [5].

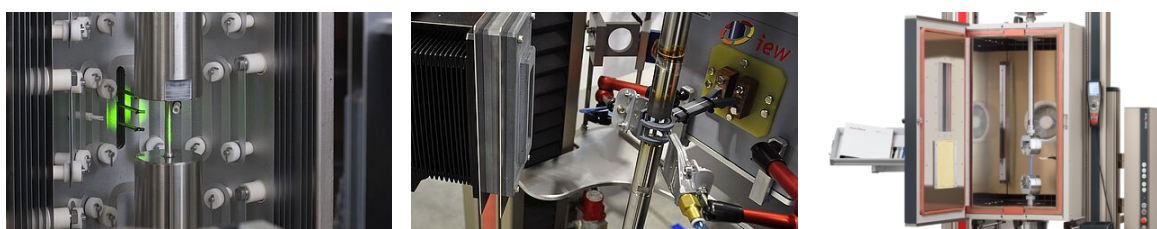


Figura 2.2: da sinistra a destra Camera a vuoto e con gas inerte fino a +2.000 °C, sistema di riscaldamento a induzione fino a +2.000 °C e Camera climatica fino a +250 °C [5].

Nel caso dei forni presenti in Figura 2.1 essi risultano rimovibili per poter effettuare test anche a temperatura ambiente.

La regolazione della temperatura avviene attraverso un termoregolatore che assicura un controllo della temperatura su tutto il provino riproducibile e indipendente dall'utente.



Figura 2.3: Termoregolatore [5].

Per il controllo esatto della temperatura, a seconda della geometria e della tipologia del provino vengono utilizzati dispositivi di misura fissi o variabili con diverse termocoppie (tipo K, N, S, ...). Normalmente vengono impiegate 3 termocoppie (Fig 2.4) poste a contatto con la superficie del provino in modo tale da garantire che la temperatura sia costante lungo il campione. La temperatura del forno stesso viene verificata sempre tramite 3 termocoppie.

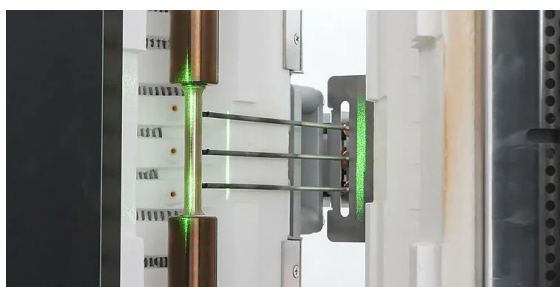


Figura 2.4: Termocoppie a contatto con la superficie del provino [5].

La trasmissione della forza avviene attraverso stringhe di carico resistenti alle alte temperature. Risulta possibile anche misurare la deformazione del provino con estensimetri a contatto oppure estensimetri laser. Estensimetri e termocoppie possono essere attaccati al sistema tramite appositi slot presenti nel forno di riscaldamento, andando quindi ad integrarsi perfettamente nel sistema.

I provini installabili sono di 3 tipologie differenti:

- Provini cilindrici con teste filettate;
- Provini piatti con spallamento;
- Provini piatti con spallamento e foro nella testa.

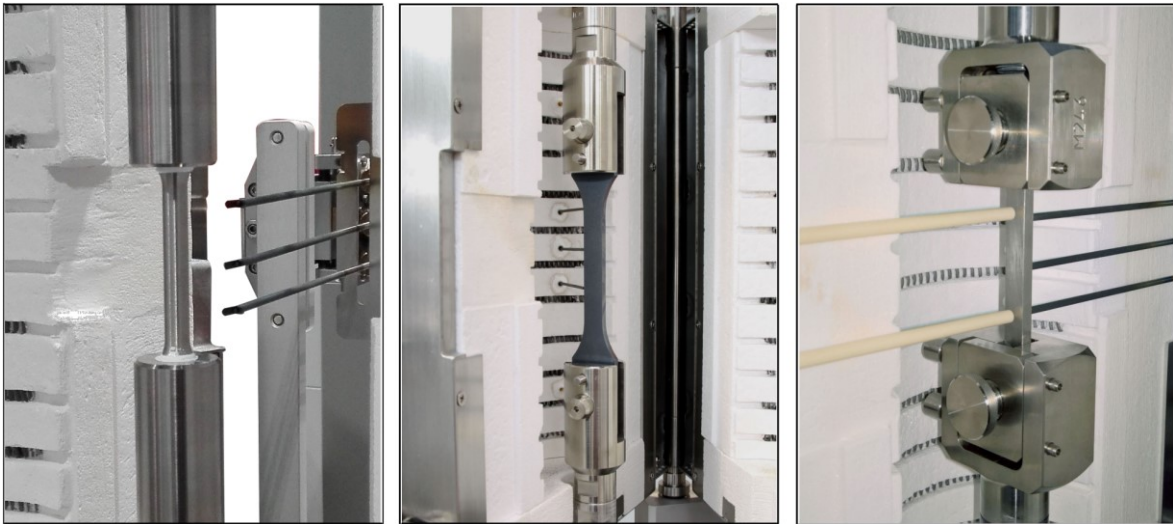


Figura 2.5: da sinistra a destra provino cilindrico con teste filettate, provino piatto con spallamento, provino piatto con spallamento e foro nella testa

2.2.2 Cermac

Cermac è nata nel 1983 come Sider Metro Test per soddisfare le richieste di manutenzioni, taratura e revisione di attrezzature per prove di laboratorio, principalmente macchine di trazione, pendoli e durometri.

Nel 2008, nell'ottica di soddisfare le richieste del mercato, l'Azienda è passata dalla semplice manutenzione alla produzione di proprie attrezzature. Questa trasformazione l'ha portata, nel 2012, a possedere nel proprio catalogo una vasta gamma di proposte spaziando dal campo delle macchine elettromeccniche ed idrauliche per prove statiche e dinamiche a quello dei pendoli per prove di resilienza Charpy. Tra le macchine di prova sviluppate dall'Azienda ve ne sono anche per prove a caldo.



Figura 2.6: Serie UTM-E [6].

Il modello più recente di macchina per prove ad alta temperatura è la Serie UTM-E (Figura 2.6). Essa permette di eseguire prove a trazione. Il movimento della macchina di prova è ottenuto tramite un motore brushless azionato in maniera digitale per avere un miglior controllo sulla velocità di deformazione. Il forno (Figura 2.6 e Figura 2.7) per il riscaldamento dei provini è suddiviso in 3 zone indipendenti e può portare il provino fino ad una temperatura di 1200 °C.

La forza massima resa disponibile dalla macchina varia dai 100 ai 200 kN a seconda del modello scelto, così come la corsa che va dai 700 agli 800 mm.



Figura 2.7: Forno tubolare apribile [6].

2.2.3 MTS

MTS viene fondata nel 1966 e due anni dopo installa il suo primo simulatore di terremoti. Dopo la costruzione della sede centrale in Minnesota, nel 1972 si espande anche in Europa e in Asia.

Nel 1984 MTS acquisisce Temposonics andando ad ampliare il proprio catalogo con prodotti legati a test sui materiali, misurazione e sensoristica.

Con l'acquisizione di PCB (2016) l'Azienda riesce a migliorare la prestazione dei vecchi prodotti e a ridurre i lead time di immissione nel mercato dei nuovi prodotti, tutto grazie a nuove tecnologie piezoelettriche.

L'anno seguente vengono sviluppate nuove soluzioni di test sui materiali ad alta temperatura, fondamentali per l'efficienza del carburante dei motori a reazione. Questi test permettono di conoscere le proprietà dei materiali andandoli a sfruttare nel modo migliore possibile: si vanno a ridurre i costi sui materiali utilizzandone in minor quantità, senza influenzare negativamente la sicurezza dei componenti.

Il settore test e simulazione è stato oggetto investimenti da parte di MTS. Una delle principali soluzioni per test ad alta temperatura offerta da MTS sono i Landmark Servohydraulic Test Systems, disponibili in varie configurazioni per effettuare diverse tipologie di test, tra le quali quelli ad elevata temperatura.

Le forze che può rendere disponibili questo sistema di test possono andare dai 5 kN ai 500 kN. La configurazione della macchina permette di posizionare i provini e preparare il set-up per i test in maniera molto semplice.

Il sistema per test ad alte temperature possiede lo spazio necessario per l'introduzione del sistema di riscaldamento ad induzione, gli afferraggi sono raffreddati ad acqua e sono presenti particolari estensometri resistenti alle alte temperature. In dotazione ci sono anche un software di analisi dati e un sistema di generazione di grafici real time utili per monitorare in maniera completa la prova.

Un secondo sistema di test ad alta temperatura progettato da MTS è il Model 653 Furnaces per Sistema Serie 40(EM) (Figura 2.9). In questo caso le temperature raggiungibili dal provino vanno dai 100°C ai 1400°C.

Possono essere svolti test a trazione, compressione e flessione su materiali metallici, compositi e ceramici. Il controllo del riscaldamento tramite più fonti di calore permette di ottenere un basso gradiente di temperatura lungo il provino.



Figura 2.8: Sistema di riscaldamento per induzione [7].

Alternativamente a questa tipologia di riscaldamento MTS mette a disposizione anche un forno che permette di raggiungere i 1050°C (Figura 2.9) o una camera che consente invece di arrivare a 315 °C (Figura 2.10).



Figura 2.9: Model 653 Furnaces per Sistema Serie 40(EM) [7].



Figura 2.10: Camera per Sistema Serie 40 [7].

2.3 Introduzione alla soluzione per prove ad alta temperatura ai LNL

L'obiettivo di questa tesi era lo sviluppo di un sistema di riscaldamento per altissime temperature e in alto vuoto che potesse essere accoppiato alla macchina di prova MTS Mini Bionix 858 (presente ai laboratori del dipartimento di ingegneria industriale dell'Università di Padova), così da poter mantenere i provini ad elevata temperatura durante i test di caratterizzazione meccanica. Quando si parla di altissime temperature ci si riferisce a valori che arrivano fino a 2500 °C. Questo perché i test da effettuare tramite il sistema progettato devono contribuire alla realizzazione del progetto SPES presso i Laboratori Nazionali di Legnaro. Questo prevede la produzione di isotopi radioattivi tramite il bombardamento di un target in carburo di uranio con un fascio di protoni ad elevata potenza. Tutti i componenti del sistema target sono mantenuti a temperature molto elevate, anche prossime ai 2000 °C e in una condizione di alto vuoto.

Viene riportato ora un elenco dei vincoli e dei requisiti dell'attrezzatura di prova dai quali si è partiti con la progettazione. Il sistema deve poter:

- essere inserito nella Mini Bionix 858 (forza resa disponibile dalla macchina pari a 15 kN) tenendo quindi in considerazione gli ingombri di questa;
- effettuare prove sia a trazione che a compressione;
- scaldare per effetto Joule attraverso il passaggio diretto di corrente elettrica provini in grafite, tantalio e tungsteno fino a 2000 – 2500 °C e provini in acciaio e titanio fino a 1000 °C;
- effettuare prove in condizioni di alto vuoto;
- misurare la temperatura dei provini sia attraverso termocoppie che pirometri a infrarosso;
- aver accesso alla visione dei provini per applicare misurazioni ottiche di deformazione.

Tra le macchine descritte al paragrafo 2.2 solamente quella sviluppata da ZwickRoell consente di condurre test statici su provini a temperature di 2000 °C e in condizioni di alto vuoto (Figura 2.2). Gran parte delle prove ad alta temperatura si svolgono infatti in aria con i provini riscaldati tramite forni o sistemi di induzione localizzati in prossimità del provino (Figura 2.1, Figura 2.2, Figura 2.7, Figura 2.8). Non esiste quindi in commercio una macchina che soddisfi contemporaneamente tutti i requisiti richiesti precedentemente tranne quello di ZwickRoell il cui acquisto risulterebbe particolarmente costoso. Di seguito verranno approfonditi alcuni dei requisiti della macchina di prova.

2.3.1 Inserimento dell'attrezzatura nella macchina di prova Mini Bionix 858

Presso i laboratori dell'Università di Padova è disponibile la macchina di prova MTS Mini Bionix 858, utilizzata sia per prove statiche che a fatica rendendo disponibile una forza di 15 kN.

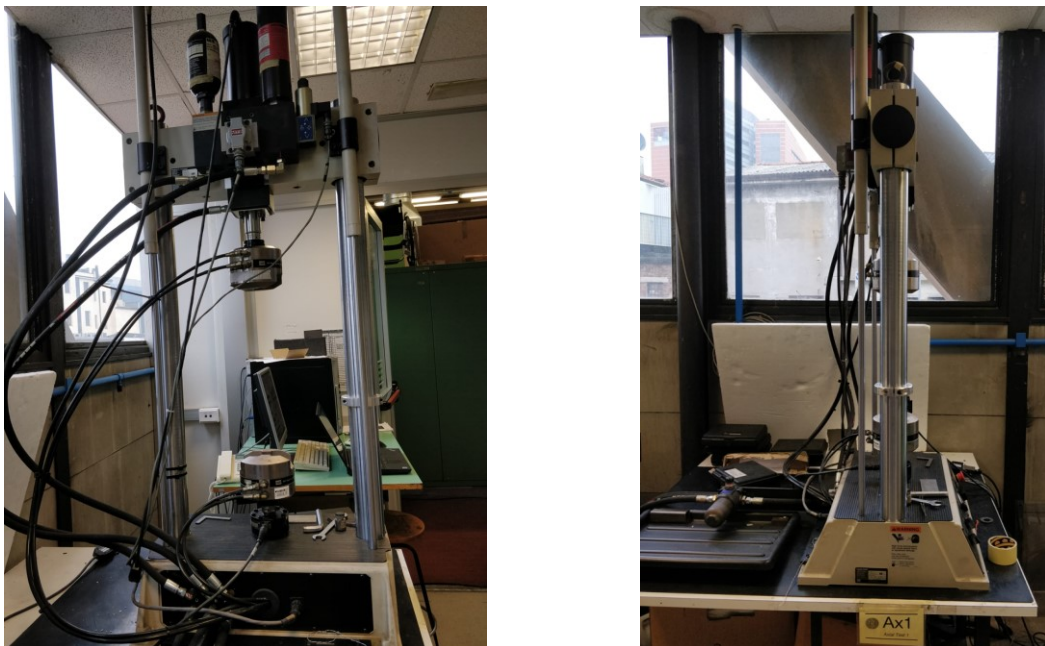


Figura 2.11: Macchina di prova MTS Mini Bionox presente ai laboratori dell'Università di Padova.

Uno dei vincoli che maggiormente hanno influenzato la progettazione è proprio quello di dover inserire l'attrezzatura progettata all'interno di questa macchina andando quindi a prendere in considerazione gli ingombri.

Le dimensioni più importanti da tenere presenti erano la distanza tra l'interno delle colonne (Figura 2.12) e la distanza massima tra le ganasce in sicurezza (Figura 2.13). Per la progettazione del sistema ci si è posti quindi i limiti di 350 mm per l'altezza e di 300mm per la larghezza.

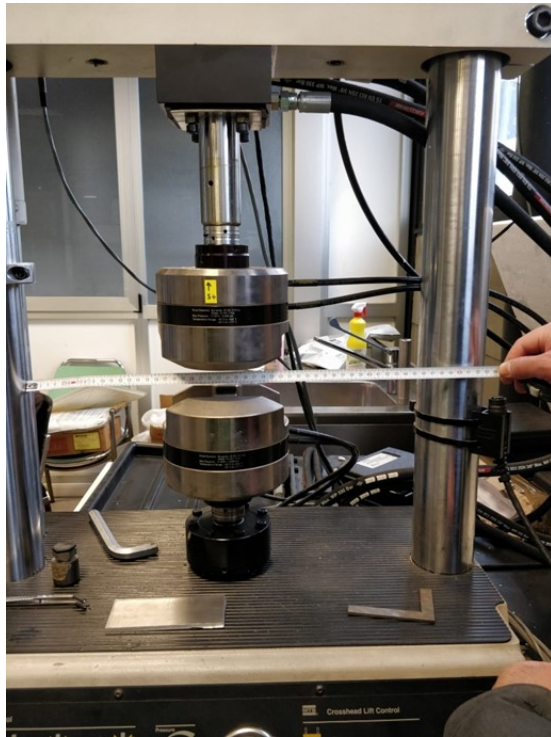


Figura 2.12: Distanza tra l'interno delle colonne della MTS Mini Bionix 858.

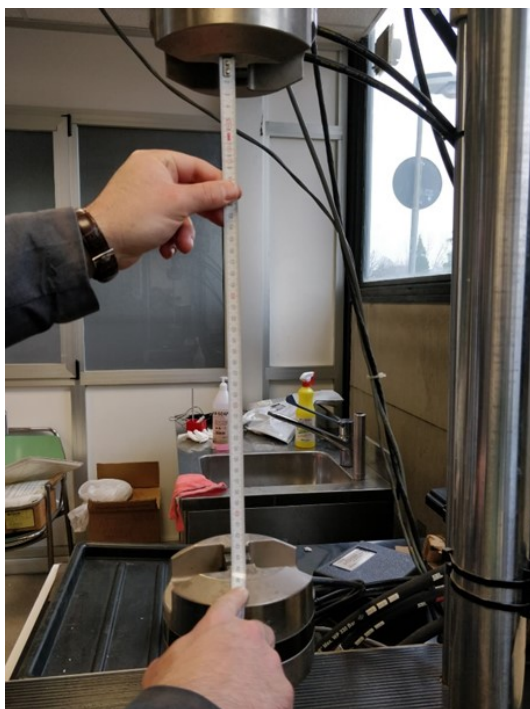


Figura 2.13: Distanza massima tra le ganasce in sicurezza della MTS Mini Bionix 858.

2.3.2 Test in condizione di alto vuoto

Un altro requisito molto importante era quello di permettere di effettuare prove in condizioni di alto vuoto. Questo perché, nell'ottica di testare i materiali che verranno impiegati nella linea SPES, si vuole simulare il loro comportamento in un ambiente più simile possibile a quello in cui si troveranno in condizioni di esercizio.

I materiali nella linea SPES sono sottoposti a temperature che raggiungono, e talvolta superano, i 2000 °C. A queste temperature i materiali, esposti alle condizioni ambientali, vedrebbero il fenomeno dell'ossidazione.

L'ossidazione è una reazione nella quale una specie chimica perde elettroni (riducente) aumentando il proprio numero di ossidazione, questi elettroni vengono ceduti ad un'altra specie chimica che, acquistando elettroni, si riduce (agente ossidante). Da questa reazione vengono generati quelli che chiamiamo ossidi e anidridi:



La sostanza che si andrebbe a testare in caso di presenza di questo fenomeno risulterebbe dunque differente da quella originaria, col rischio di ottenere dati fuorvianti per la caratterizzazione di un materiale.

Per evitare il verificarsi di questo fenomeno, impedire la contaminazione del fascio protonico e anche per aumentare il cammino libero medio delle particelle, la camera target viene posta in condizioni di alto vuoto, raggiungendo al suo interno pressioni dell'ordine dei 10^{-6} mbar.

Nel sistema progettato il vuoto verrà generato da una pompa volumetrica e una pompa turbomolecolare in serie che permetteranno di raggiungere pressioni dell'ordine di 10^{-8} mbar.

2.3.3 Sistema di riscaldamento dei provini

Come si può leggere da quanto riportato al paragrafo 2.2 la soluzione maggiormente utilizzata per effettuare prove ad alta temperatura prevede la presenza di un forno che scalda il provino per irraggiamento. Tutte le soluzioni di questo tipo vengono non raggiungono temperature superiori ai 1500 °C. Una soluzione simile, quindi, non soddisferebbe le richieste progettuali del sistema sviluppato nel corso di questo lavoro di tesi. Un vincolo posto inizialmente era proprio quello di poter effettuare test a temperature prossime ai 2500 °C andando a scaldare il provino per effetto Joule, quindi tramite il passaggio di corrente.

2.3.3.1 Riscaldamento per effetto Joule

Come detto in precedenza, per provini in acciaio, grafite, tantalio, titanio, tungsteno si sceglie di riscaldare il provino per effetto Joule, ovvero grazie al passaggio di corrente attraverso gli alberi. Questo effetto si presenta in un qualsiasi materiale conduttore percorso da corrente: una parte dell'energia elettrica viene dissipata sotto forma di altro tipo di energia, prevalentemente sotto forma di calore. Quello che accade a livello microscopico è che un generatore di tensione crea un campo elettrico e questo comporta il movimento di flusso ordinato di cariche (corrente). Gli elettroni mossi dal campo elettrico, trovando davanti a sé un cammino accidentato per via della presenza del reticolo cristallino dei materiali che incontrano, urtano contro atomi e molecole del reticolo rilasciando una quota della propria energia alle particelle che urtano. Queste ultime, in seguito all'acquisizione di energia dal flusso di elettroni, cominciano ad oscillare attorno alla propria posizione di equilibrio e questo risulta in un aumento di temperatura.

Il calore dissipato per effetto Joule può essere espresso in formule considerando che la potenza elettrica si esprime come:

$$P = R \cdot i^2 \quad (2.1)$$

Con:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A} \quad (2.2)$$

Dove ρ è la resistività elettrica, l e A sono rispettivamente la lunghezza e la sezione del tratto del materiale che viene attraversato dalla corrente.

Il calore dissipato da un conduttore attraversato da una corrente i in un certo intervallo di tempo Δt corrisponde a:

$$Q = P \cdot \Delta t = R \cdot i^2 \cdot \Delta t \quad (2.3)$$

Un sistema che permette di scaldare i provini per effetto Joule è già presente ai Laboratori Nazionali di Legnaro. Come si può osservare in Figura 2.14 la corrente viene immessa nella camera tramite un puntale alla cui estremità è fissato un morsetto in rame. Da quest'ultimo partono delle lamine in tantalio che vengono fissate all'albero. L'estrazione della corrente avviene allo stesso modo tramite un secondo puntale.

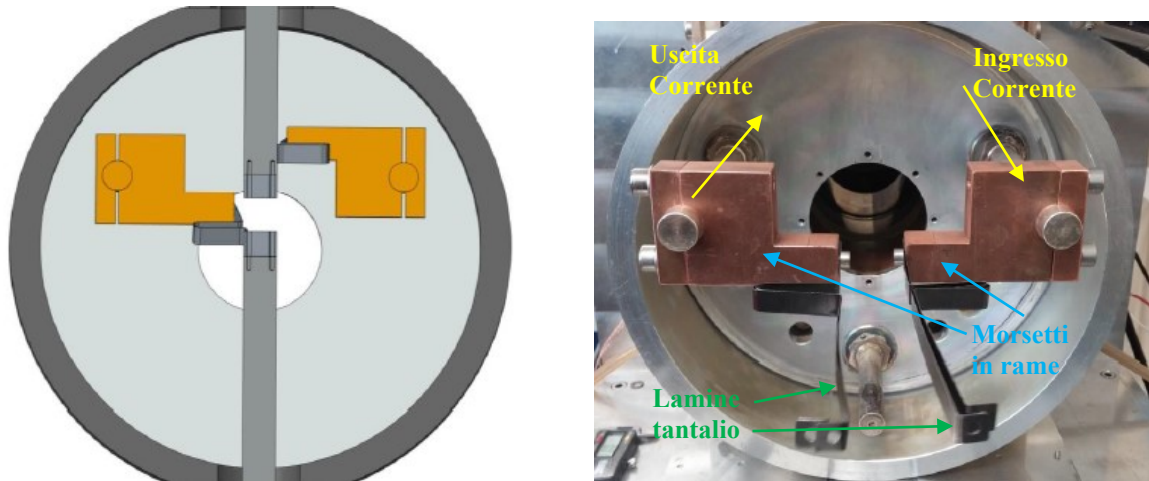


Figura 2.14: Sistema di riscaldamento della macchina per prove a compressione presente ai LNL [4].

La macchina presente ai LNL tuttavia è progettata per realizzare esclusivamente prove a compressione e senza possibilità di essere inserita nella MTS Mini Bionix 858.

Nel nuovo sistema verrà utilizzata una configurazione del sistema di riscaldamento leggermente differente rispetto a quella della macchina dei LNL. Verranno infatti rimossi i puntali, i morsetti in rame e le lamine in tantalio (Figura 2.14). In questo modo si riducono il numero di componenti dell'assieme e le lavorazioni necessarie per la realizzazione della camera. Si è scelto infatti di introdurre la corrente fissando direttamente agli alberi i cavi di alimentazione.

CAPITOLO 3

Progettazione termica del sistema per prove ad alta temperatura in alto vuoto

3.1 Introduzione

Come definito al paragrafo 2.3, l'obiettivo di questa tesi era lo sviluppo di un sistema di riscaldamento per altissime temperature e in alto vuoto che potesse essere accoppiato alla macchina di prova MTS Mini Bionix 858, così da poter mantenere i provini ad elevata temperatura durante i test di caratterizzazione meccanica. Si devono poter raggiungere temperature prossime ai 2500 °C per provini in grafite, tantalio e tungsteno e temperature di 1000 °C per provini in acciaio e titanio.

Uno dei vincoli che ha maggiormente influito sulla progettazione termica è stato quello di poter accoppiare il sistema progettato alla macchina di prova MTS Mini Bionix. Questo implica di dover realizzare dei componenti di dimensioni limitate rendendo complicato smaltire le alte temperature alle quali si trovano ad operare i componenti del sistema. Le macchine di prova presenti oggi nel mercato (paragrafo 2.2) sono progettate senza alcun vincolo dal punto di vista delle dimensioni e questo facilita il raffreddamento dell'apparato.

Un ulteriore vincolo imposto è stato quello di non superare gli 800 A di corrente da immettere nel sistema. Questo perché limitati dalla corrente massima resa disponibile dagli alimentatori, ovvero una corrente di 1000 A, rispetto alla quale ci si è tenuti un margine di sicurezza. Partendo da questo dato sono state fatte delle simulazioni elettrotermiche su ANSYS con 800 A e 400 A di corrente per un dimensionamento preliminare degli alberi e dei provini. Questo è stato seguito dall'introduzione di un sistema di raffreddamento, per il quale sono state sondate sia l'opzione di impiego di aria che di acqua. Una volta scelto il fluido refrigerante e la dimensione dei canali del sistema di raffreddamento è stato scelto il layout di quest'ultimo.

3.2 Dimensionamento dei provini per i test ad alta temperatura in alto vuoto

Il primo passo è stato quello di simulare il riscaldamento di provini in acciaio, grafite, tantalio, titanio e tungsteno per effetto Joule facendo passare una corrente di

- 800 A, andando a simulare la risposta dei provini con la corrente massima che ci si è imposti di utilizzare;
- 400 A per verificare di riuscire a scaldare a sufficienza i provini anche con una corrente dimezzata rispetto a quella massima.

Lo scopo di queste simulazioni era quello di verificare la presenza di limitazioni termiche o strutturali sui provini da testare. La macchina di prova MTS Mini Bionix infatti rende disponibile una forza massima di 15 kN. Se per arrivare a rompere un provino scaldato questa forza non fosse sufficiente il sistema risulterebbe limitato strutturalmente. Se il problema fosse invece quello di raggiungere le temperature obiettivo per i diversi materiali (definite al paragrafo 2.3), il problema risulterebbe essere una limitazione termica del sistema, quindi una difficoltà nel riscaldamento dei provini.

Queste prime simulazioni sono state svolte con provini a forma di clessidra posti a contatto con un albero in tantalio a sua volta collegato ad un albero in acciaio. Le geometrie sono provvisorie e hanno subito numerose modifiche nel corso della progettazione.

Entrando in maniera più dettagliata nell'analisi FEM, va osservato come siano state sfruttate le simmetrie del sistema andando ad analizzarne la metà superiore e utilizzando una mesh di elementi Plane 223 per analisi assialsimmetriche (Figura 3.1 **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** a sinistra). I gradi di libertà sono la Temperatura (TEMP) e la tensione (VOLT). Per quanto riguarda le condizioni al contorno è

stata simulata l'immissione di una corrente dalla superficie superiore, appartenente all'albero in acciaio, andando ad imporre l'ingresso di una corrente dal Keypoint 9 giacente sull'asse di simmetria (vedere Figura 3.1 a sinistra) e ponendo una condizione di pari tensione lungo la linea 10 (compresa tra i keypoint 8 e 9) e tensione nulla lungo la linea 1 (compresa tra i keypoint 1 e 11).

In si osserva invece una delle soluzioni ricavate dalle varie analisi elettrotermiche, i cui risultati più significativi sono riportati in Tabella 3.1 (per correnti di 800 A) e Tabella 3.2 (per correnti di 400 A).

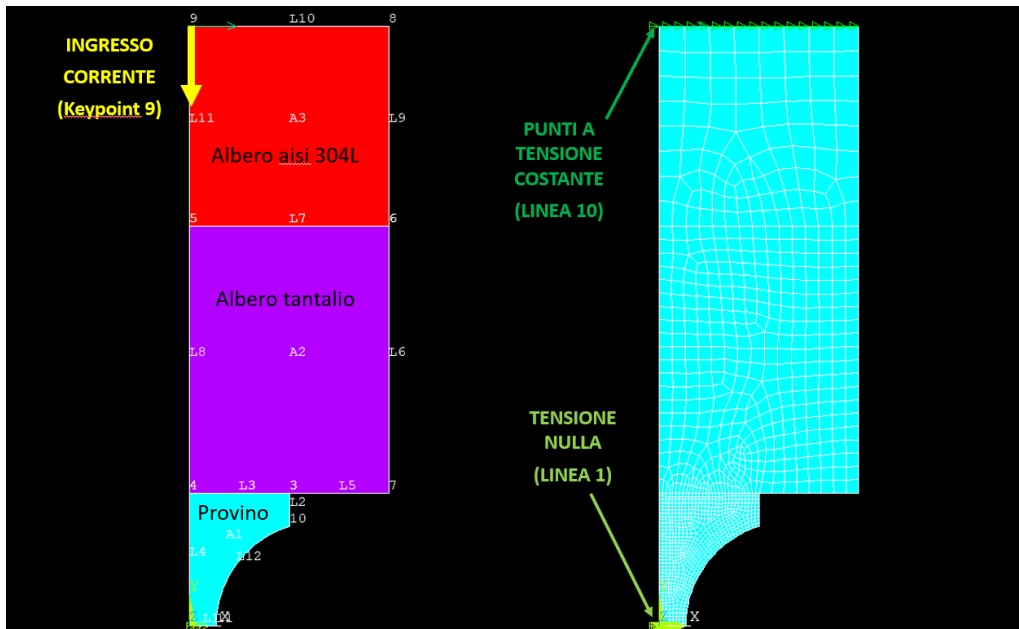


Figura 3.1: Geometria, mesh e vincoli adottati per le simulazioni elettrotermiche (l'esempio in figura rappresenta un provino in grafite con diametro della sezione ristretta 8 mm, scaldato con 800 A di corrente).

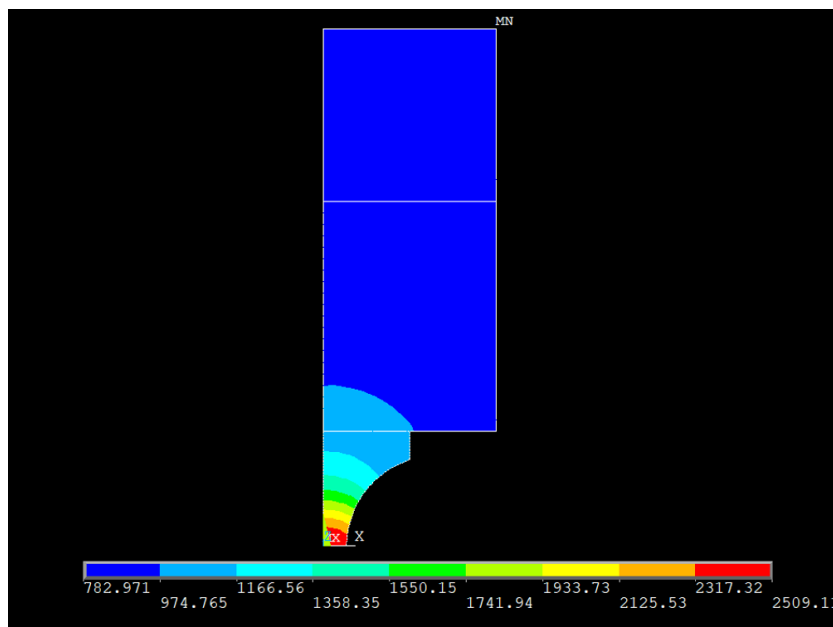


Figura 3.2: Esempio di risultato delle analisi FEM elettrotermiche. In particolare è riportato l'esempio di un provino in grafite con diametro della sezione ristretta di 8 mm, scaldato per effetto Joule con 800 A di corrente.

Corrente: 800 A					
Materiale Provino	T _{OBIETTIVO} (°C)	Ø _{max} per T _{OBIETTIVO} (mm)	σ _R T _{OBIETTIVO} (MPa)	F _R Macchina (kN)	F _{MAX} Disponibile (kN)
Acciaio	1000	8	90,0	4,52	15
Grafite	2500	8	117,2	5,89	15
Tantalio	2300	3.5	93,0	0,89	15
Titanio	1000	12	90,0	10,18	15
Tungsteno	2500	3	50,0	0,35	15

Tabella 3.1: Risultati delle analisi termoelettriche con corrente di 800 A.

Corrente: 400 A					
Materiale Provino	T _{OBIETTIVO} (°C)	Ø _{max} per T _{OBIETTIVO} (mm)	σ _R T _{OBIETTIVO} (MPa)	F _R Macchina (kN)	F _{MAX} Disponibile (kN)
Acciaio	1000	5	90,0	1,77	15
Grafite	2500	6	117,2	3,31	15
Tantalio	2300	2	93,0	0,29	15
Titanio	1000	8	90,0	4,52	15
Tungsteno	2500	/	50,0	/	15

Tabella 3.2: Risultati delle analisi termoelettriche con corrente di 400 A.

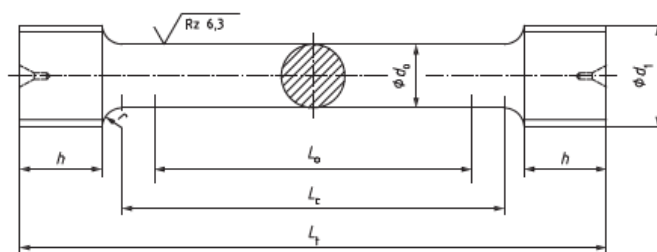
Ciò che si può osservare dai risultati riportati nelle tabelle è che il sistema non presenta limiti strutturali con queste geometrie provvisorie, bensì limiti termici. I due esempi più rilevanti sono quelli dei provini in tantalio e tungsteno che richiedono diametri della sezione ristretta del provino molto più piccoli rispetto agli altri materiali per raggiungere le temperature desiderate. Nel caso di provino in tungsteno riscaldato tramite una corrente di 400 A non si è arrivati alla temperatura posta come obiettivo nemmeno con un provino di diametro della sezione ristretta pari a 2 mm.

Altro aspetto evidenziato fin da subito, che verrà discusso in maniera più approfondita nei prossimi paragrafi, è quello delle elevate temperature alle quali sono soggetti il sistema di prova e i collegamenti bullonati.

Dopo aver svolto queste prime simulazioni, la definizione completa della geometria del provino è avvenuta seguendo le indicazioni della normativa BS EN ISO 6892 – 2 (2018) riguardante i test ad elevata temperatura [8]. In Figura 3.3 e Figura 3.4 sono riportate le quote che caratterizzano la geometria del provino ed i valori ad esse associati.

A.3 Test pieces to be used for wires, bars and sections with diameter or thickness equal to or greater than 4 mm

For these materials, threaded gripping ends are often used (see Figure A.3 and Table A.3).



Key

- d_0 original diameter of the parallel length
- d_1 metric ISO-thread
- r transition radius
- h length of the gripped ends
- L_0 original gauge length ($L_0 = 5d_0$)
- L_c parallel length ($L_c \geq L_0 + d_0$)
- L_t total length of test piece

Figura 3.3: Provini filettati a sezione circolare da utilizzare per prove ad alta temperatura secondo normativa BS EN ISO 6892 – 2 (2018) [8].

Table A.3 — Examples of cylindrical test pieces with threaded gripping ends

Dimensions in millimetres

d_0	L_0	d_1	r min.	h min.	L_c min.	L_t min. ^a
4	20	M6	3	6	24	41
5	25	M8	4	7	30	51
6	30	M10	5	8	36	60
8	40	M12	6	10	48	77
10	50	M16	8	12	60	97
12	60	M18	9	15	72	116
14	70	M20	11	17	84	134
16	80	M24	12	20	96	154
18	90	M27	14	22	108	173
20	100	M30	15	24	120	191
25	125	M33	20	30	150	234

^a The minimum value is only sufficient when the transition radius, r , the length of the gripped ends, h , and the parallel length, L_c , are minimum values.

Figura 3.4: Valori relativi alle quote specificate in Figura 3.3 dalla normativa BS EN ISO 6892 – 2 (2018) [8].

3.3 Modifica della filosofia di progettazione del sistema di riscaldamento per alte temperature e alto vuoto

Un passaggio che ha fortemente influenzato la progettazione di questo sistema è stato il cambiamento delle modalità di isolamento e di immissione della corrente. In Figura 3.5 è riportata la vista sezionata dell'assieme provvisorio basato sulla filosofia di progettazione originaria.

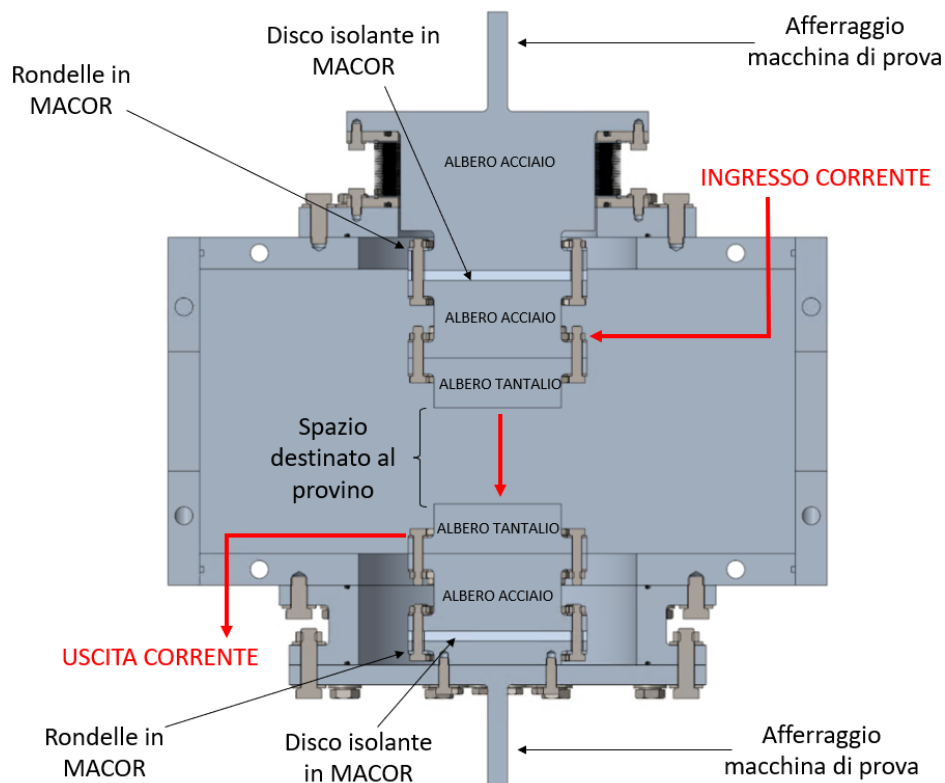


Figura 3.5: Assieme provvisorio del sistema di riscaldamento per alte temperature e alto vuoto progettato sulla base della prima filosofia di progettazione.

L'idea iniziale era quella di immettere ed estrarre la corrente tramite il sistema puntale - morsetto in rame - lamine in tantalio già visto in Figura 2.14. L'isolamento elettrico delle estremità che devono essere afferrate dalla macchina di prova MTS Mini Bionix 858 era garantito da due dischi in MACOR e delle rondelle sempre in MACOR (Figura 3.5). Questo materiale è un buon isolante elettrico e può lavorare fino a temperature di 1000 °C (800 °C in caso di funzionamento continuo), motivi per i quali era stato inizialmente scelto. Il MACOR, tuttavia, è anche un buon isolante termico. Accade così che il calore generato in corrispondenza del provino non ha modo di essere smaltito perché dopo essere passato attraverso l'albero in tantalio e quello in acciaio trova una elevata resistenza termica. Dalla legge di Fourier la potenza termica può essere espressa come:

$$q = -\lambda A \frac{dT}{dx} \quad (3.1)$$

$$q = -\lambda A \frac{\Delta T}{L} \quad (3.2)$$

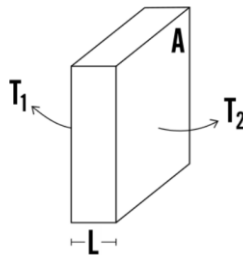


Figura 3.6: Propagazione del calore attraverso una lastra.

La resistenza termica risulta:

$$R = \frac{L}{\lambda A} \quad (3.3)$$

A parità di lunghezza (s) e sezione del tratto attraversato dal flusso di calore è facile comprendere come la resistenza termica dell'acciaio ($\lambda = 15$ W/mK) e del tantalio ($\lambda = 57$ W/mK) sia ben inferiore a quella del MACOR ($\lambda = 1,46$ W/mK). Anche i collegamenti bullonati raggiungevano temperature molto elevate (superiori ai 1000 °C) che rendevano complicato garantirne l'integrità sia per prove statiche che dinamiche.

Altro aspetto da considerare è quello dei canali di raffreddamento degli alberi. Nella configurazione iniziale il sistema di raffreddamento poteva arrivare al più all'altezza dei dischi isolanti in MACOR senza potersi avvicinare alla zona calda e vedendo il proprio effetto mitigato dalla presenza appunto dell'isolante termico.

Rivedendo la metodologia di riscaldamento è stato deciso di rimuovere puntali, morsetti in rame e lamine in tantalio oltre ai dischi e alle rondelle in MACOR (vedere Figura 3.5). La corrente infatti può essere immessa fissando un cavo o una treccia ad un componente saldato all'albero in acciaio superiore (Figura 3.8) e uscire attraverso un cavo fissato direttamente all'albero in acciaio inferiore. Entrambi i cavi saranno fissati tramite un collegamento bullonato. L'isolamento del sistema sarà garantito da un disco e da un anello in arnite rinforzata teflon (PETP + PTFE) che imporranno alla corrente di scorrere verso il basso in direzione del provino. Una volta che la corrente avrà attraversato il sistema di alberi arrivando all'albero in acciaio inferiore, verrà richiamata interamente attraverso il cavo collegato a quest'ultimo. Per isolare anche la camera verrà impiegata una boccia in PETP + PTFE, che avrà la triplice funzione di permettere il movimento dell'albero, di fare da isolante elettrico e di garantire che il sistema rimanga in vuoto con l'inserimento di due guarnizioni (Figura 3.7). Questo materiale è stato scelto per via delle sue ottime proprietà di isolante elettrico ($R = 10^{16}$ $\Omega \cdot \text{cm}$) e termico ($\lambda = 0,29$ W/mK) oltre ad avere un basso coefficiente di attrito con l'acciaio (0.011). Inoltre risulta molto meno costoso di materiali quali MACOR e PEEK.

I canali di raffreddamento inoltre potranno essere notevolmente avvicinati alle zone più calde degli alberi contribuendo ad ottenere temperature sostenibili dagli alberi e dai collegamenti bullonati.

Una configurazione simile a questa è stata utilizzata, con risultati positivi, per effettuare i test ai Laboratori Nazionali di Legnaro dei quali si discuteranno i dettagli al Capitolo 4.

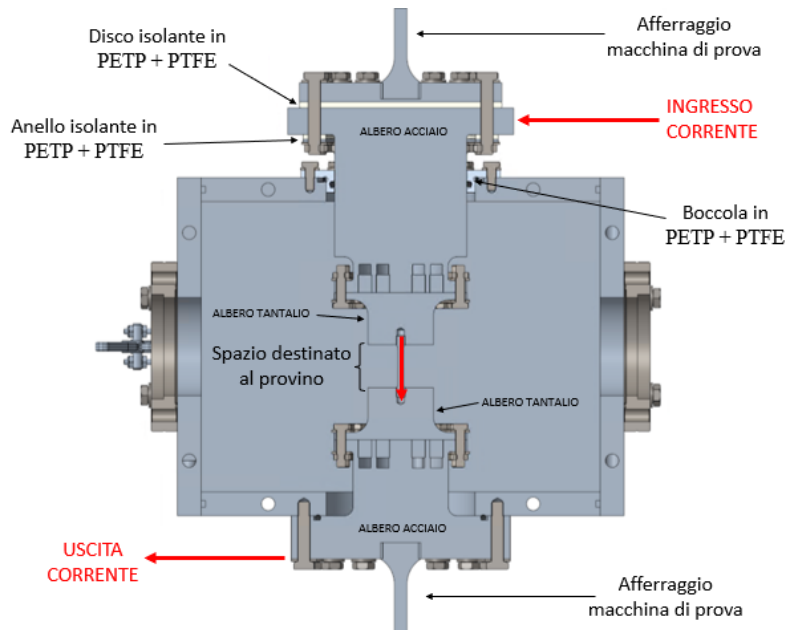


Figura 3.7: Assieme finale del sistema di riscaldamento per alte temperature e alto vuoto basato sulla nuova filosofia di progettazione.

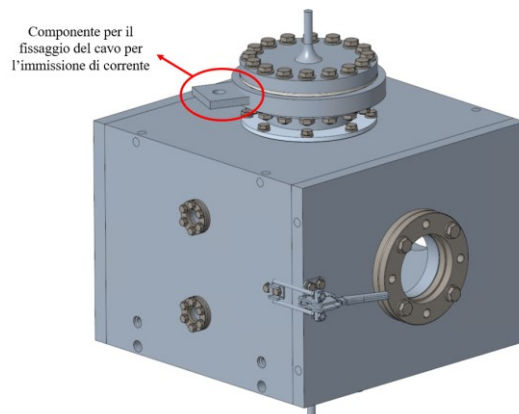


Figura 3.8: Vista di assieme con indicazione del componente su cui andrà fissato il cavo per l'ingresso della corrente

Per verificare l'ottenimento dei vantaggi previsti con questo cambio di filosofia di progettazione sono state lanciate due analisi FEM assialsimmetriche su ANSYS a parità di geometria, materiali e di posizione del sistema di raffreddamento. La differenza tra le due analisi è stata la presenza del disco isolante in MACOR in una e la sua assenza nell'altra, che ha portato alla rimozione della flangia superiore in quest'ultima. In Figura 3.9 a sinistra è possibile osservare i risultati dell'analisi con disco isolante in MACOR mentre in Figura 3.9 a destra i risultati relativi all'analisi senza disco isolante in MACOR. Il provino in questione è in tantalio con diametro della sezione ristretta di 6 mm e geometria determinata da normativa BS EN ISO 6892 – 2 (2018) [8] citata al paragrafo precedente. Per scaldare questo provino per effetto Joule è stata simulata l'immissione di una corrente di 750 A. Queste analisi sono state svolte tenendo conto delle resistenze di contatto [9] i cui valori vengono riportati di seguito.

Elementi a contatto	Thermal Contact Conductance (TCC) [W/m ² K]	Electric Contact Conductance (ECC) [(Ω m) ⁻¹]
Provino – Albero tantalio	306905	639648
Albero tantalio – albero acciaio	5321	532229
Albero acciaio – Disco MACOR	293	10 ⁻¹⁵
Disco MACOR – Albero acciaio	316	10 ⁻¹⁵

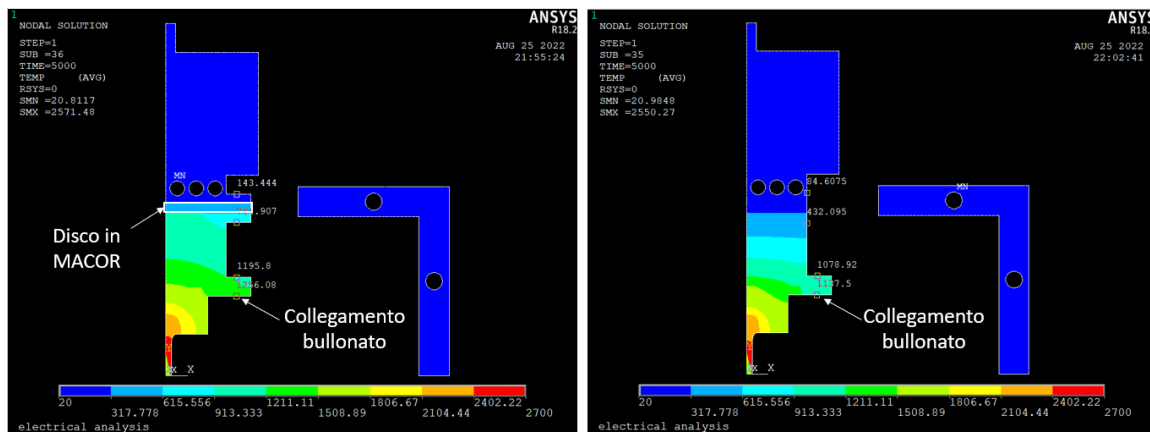


Figura 3.9: Risultati analisi FEM – configurazione con disco isolante in MACOR (sinistra); Risultati analisi FEM – configurazione senza disco isolante in MACOR (destra).

Dal confronto tra le due soluzioni è possibile evidenziare come, in corrispondenza della zona in cui andrà a trovarsi il collegamento bullonato, la temperatura della soluzione senza isolante (Figura 3.9 a destra) presenti valori inferiori di più di 100 °C rispetto a quelli della soluzione iniziale (Figura 3.9 a sinistra). Inoltre, come spiegato in precedenza, senza la necessità dello strato isolante sarà possibile avvicinare il sistema di raffreddamento alla zona del collegamento bullonato andando ad abbassare ulteriormente le temperature (aspetto che verrà approfondito nel paragrafo 3.5).

3.4 Dimensionamento degli alberi in acciaio e in tantalio

Avendo optato per provini con estremità filettate, come indicato dalla normativa BS EN ISO 6892 – 2 [8], anche gli afferraggi dovranno prevedere una filettatura per poter avvitare il provino. Questo vuol dire che il contatto tra provino e alberi in tantalio, e quindi il passaggio di corrente, avverrà solamente lungo il tratto filettato in cui i due elementi si toccheranno. Da notare che ad ogni provino con differente diametro della sezione ristretta corrisponde una determinata filettatura alle estremità (Figura 3.4). Questo vuol dire che nel momento in cui saranno prodotti i componenti dovranno essere realizzati due alberi in tantalio per ogni diametro della sezione ristretta che si vorrà testare. Ciascuno dei due alberi in tantalio sarà collegato ad un albero in acciaio attraverso dei collegamenti bullonati. Una delle maggiori difficoltà nella scelta della geometria stava proprio nel trovare un giusto compromesso tra le dimensioni degli alberi e la temperatura raggiunta da questi (in particolare in corrispondenza della flangia e quindi dei collegamenti bullonati), rimanendo sempre dentro i vincoli di spazio imposti dalla macchina di prova MTS Mini Bionix.

Per quanto riguarda gli alberi in tantalio una prima modifica è stata quella che ha visto la riduzione del diametro più piccolo andando ad ottenere benefici dal punto di vista delle temperature e del peso del sistema, che ovviamente ne è risultato alleggerito. Sono state condotte analisi FEM elettrotermiche in ambiente ANSYS sul caso più critico, ovvero quello di un provino in grafite, di diametro della sezione ristretta pari a 8 mm, scaldato per effetto Joule con 550 A di corrente.

Il motivo per il quale è stata scelta questa particolare dimensione del provino è che possiede la lunghezza massima accettabile dal sistema progettato visti i vincoli dimensionali imposti dalla macchina di prova MTS Mini Bionix 858 (in Figura 2.13 si può osservare la distanza massima tra le ganasce in sicurezza pari a 450 mm). La scelta della grafite è dovuta al fatto che risulta essere il materiale del provino che porta a risultati più gravosi dal punto di vista termico. La corrente è stata scelta per fare in modo di raggiungere la temperatura obiettivo di 2500 °C richiesta per i provini in grafite.

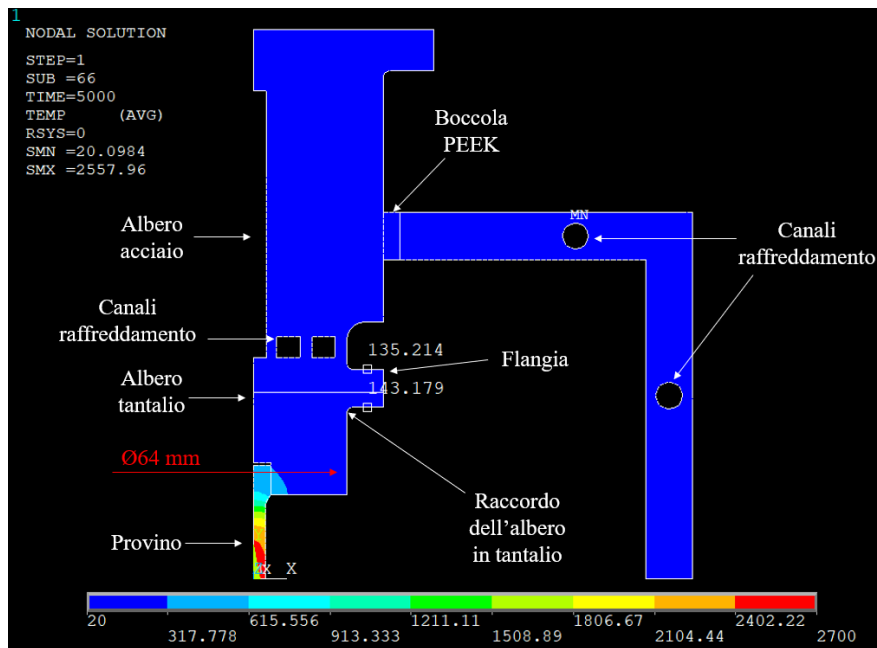


Figura 3.10: Risultati analisi FEM su un provino in grafite con diametro della sezione ristretta pari a 8 mm, scaldato per effetto Joule con una corrente di 550 A. Configurazione del sistema con diametro inferiore dell'albero in tantalio $d=64$ mm.

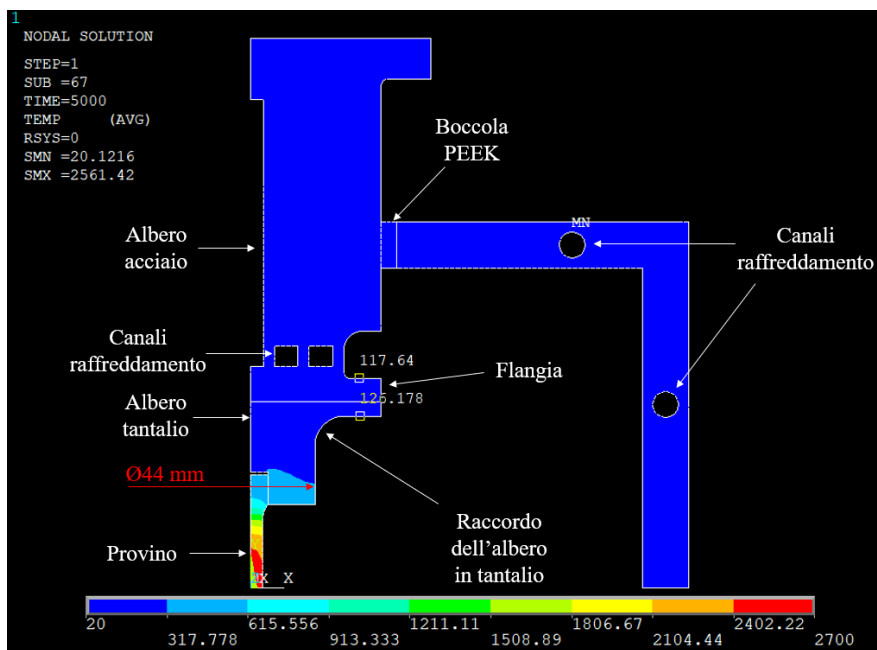


Figura 3.11: Risultati analisi FEM su un provino in grafite con diametro della sezione ristretta pari a 8 mm, scaldato per effetto Joule con una corrente di 550 A. Configurazione del sistema con diametro inferiore dell'albero in tantalio $d=44$ mm.

Come si può osservare da Figura 3.10 e Figura 3.11, le temperature in corrispondenza delle flange vengono ridotte di circa 20 °C riducendo il diametro dell'albero in tantalio da 64 mm a 44 mm. La riduzione di questo diametro è accompagnata dalla scelta di un raggio di raccordo dell'albero in tantalio più grande in modo da ridurre il fattore di concentrazione delle tensioni. Questo vantaggio di riduzione delle temperature, assieme a quello di alleggerimento dell'apparato, hanno condotto all'approvazione della modifica. Il diametro maggiore dell'albero in tantalio è rimasto invariato e pari a 89 mm. Dimensione che permette un sufficiente allontanamento del collegamento bullonato dalla zona più calda nei pressi del provino. Quest'ultima è inoltre una dimensione che va a condizionare anche le dimensioni dell'albero in acciaio e dei fori della camera attraverso cui dovranno passare gli alberi in fase di montaggio. Si ricordi che, oltre ad essere montato, l'albero superiore dovrà poter scorrere durante le prove mentre quello inferiore rimarrà fisso.

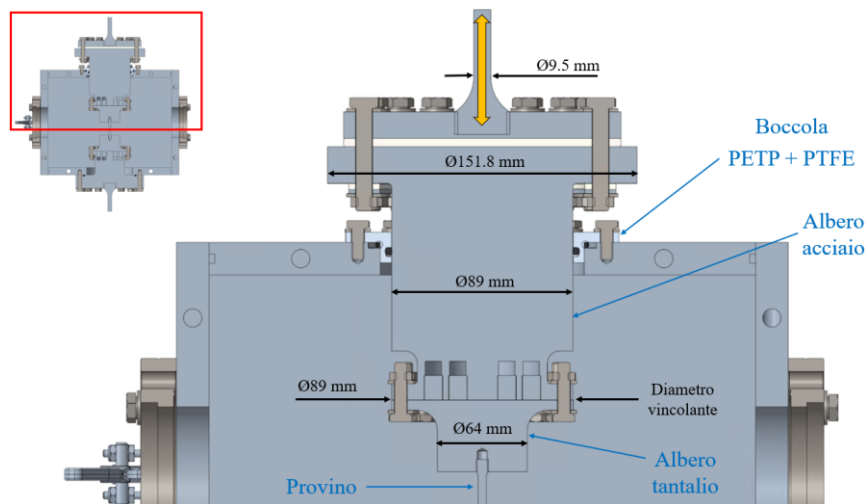


Figura 3.12: Sezione del CAD di assieme soggetta ad analisi FEM.

Guardando la Figura 3.12, relativa alla parte superiore dell'assieme, se ci si mette in ottica di assemblaggio del sistema, è possibile comprendere come l'albero in acciaio debba avere diametro pari a quello dell'albero in tantalio per poter realizzare il collegamento bullonato. Di conseguenza la boccola in PETP + PTFE dovrà avere diametro interno di poco superiore al diametro dell'albero in tantalio per essere montata e permettere lo scorrimento in direzione assiale degli alberi nella metà superiore. La camera dovrà invece permettere di fissare la boccola in PETP + PTFE. Il diametro del foro quindi dipenderà dalle dimensioni della boccola (e indirettamente dalle dimensioni degli alberi).

La geometria utilizzata per l'analisi in Figura 3.11 è anche frutto di queste osservazioni. Andando a visualizzare i dati di temperatura ottenuti lungo gli alberi in tantalio e in acciaio (Figura 3.14) si nota l'effetto benefico della modifica di filosofia di progettazione spiegata al paragrafo 3.3, soprattutto per quanto riguarda la possibilità di estendere i canali di raffreddamento verso il provino. La temperatura in corrispondenza della flangia risulta inferiore ai 200°, valore per il quale i bulloni alto resistenziali, come verrà approfondito nel Capitolo 5, non presentano problemi strutturali di resistenza statica o a fatica date le forze in gioco (forza massima di 15 kN fornita dalla macchina di prova MTS Mini Bionics).

Lungo l'albero in tantalio la temperatura alla quale bisognerà fare più attenzione è quella in corrispondenza del raggio di raccordo (punto 1 in Figura 3.13) che raggiunge circa i 200 °C, variabile della quale andrà tenuto conto in sede di verifica statica e a fatica degli alberi.

Lungo l'albero in acciaio le temperature sono notevolmente mitigate grazie alla presenza dei canali di raffreddamento. Anche in questo caso in sede di verifica statica e a fatica verrà considerata la temperatura raggiunta in corrispondenza dei raccordi, in particolare quello più vicino all'albero in tantalio che è soggetto alle temperature più elevate, prossime ai 100 °C (punto 2 in Figura 3.13).

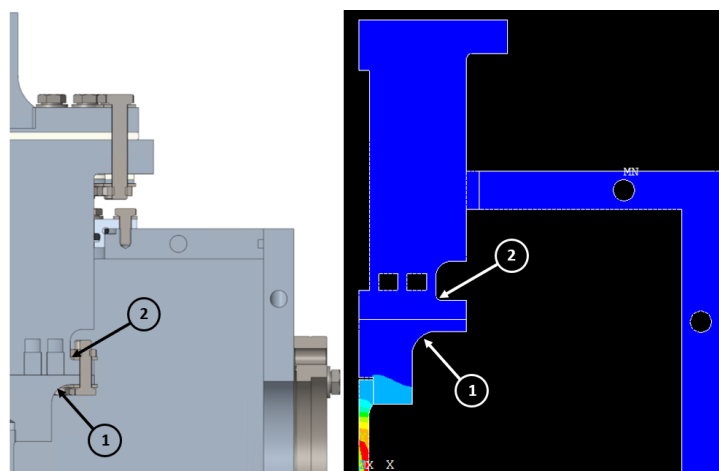


Figura 3.13: Dettaglio dei punti nei quali monitorare la temperatura in ottica di verifiche statiche e a fatica. Il punto 1 corrisponde al raggio di raccordo dell'albero in tantalio, il punto 2 al raggio di raccordo dell'albero in acciaio.

Numero del punto (Figura 3.13)	Descrizione	Temperatura (°C)
1	Raccordo albero in tantalio	167
2	Raccordo albero in acciaio	96

Tabella 3.3: Temperature risultanti nei punti 1 e 2 di Figura 3.13 dall'analisi FEM elettrotermica svolta su un provino in grafite di diametro 8 mm scaldato per effetto Joule con 550 A di corrente.

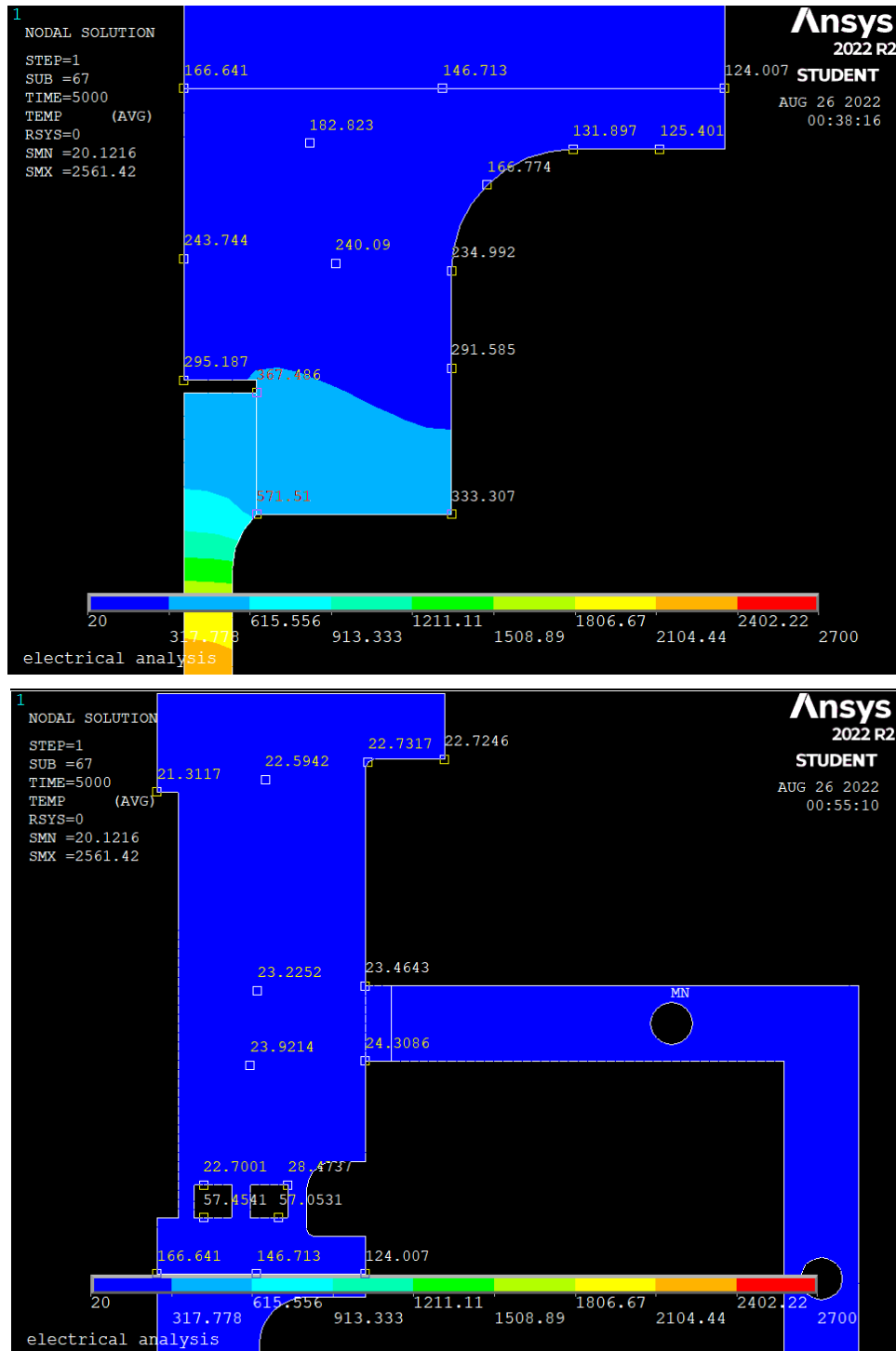


Figura 3.14: Temperature dell'albero in tantalio (in alto) e dell'albero in acciaio (in basso) risultanti dall'analisi FEM elettrotermica svolta su un provino in grafite di diametro 8 mm scaldato per effetto Joule con 550 A di corrente.

3.5 Sistema di raffreddamento nel sistema per test ad alta temperatura in alto vuoto

Il sistema di raffreddamento in questo contesto ha il compito di raffreddare prima di tutto gli alberi. Le alte temperature vanno a ridurre la resistenza meccanica dei componenti, portando alla rottura o al danneggiamento a tensioni inferiori rispetto al caso di esercizio a temperatura ambiente.

È previsto un sistema di raffreddamento anche per la camera e per gli sportelli. Questo per evitare di danneggiare le guarnizioni e che gli operatori, toccando accidentalmente il sistema, possano incorrere in bruciature o infortuni sul lavoro.

Inizialmente è stato fatto un confronto tra il raffreddamento tramite aria compressa e il raffreddamento tramite acqua, due fluidi che immessi nel circuito di raffreddamento permettono lo scambio di calore tramite convezione forzata. Una volta stimati i coefficienti di scambio termico per convezione sono state lanciate delle analisi FEM per decidere il fluido refrigerante da impiegare. Una volta scelto il fluido sono stati, posizionati i punti di ingresso e uscita del sistema di raffreddamento ed è stato effettuato il dimensionamento dei canali tenendo conto delle geometrie del sistema e rispettando i limiti di velocità consigliati per il fluido in questione.

3.5.1 Stima dei coefficienti di scambio termico per convezione forzata

Il fenomeno della convezione termica è strettamente legato a quello della conduzione. È un fenomeno di scambio del calore che avviene all'interno di un materiale ed è associata ad un campo di moto, implicando quindi l'utilizzo di fluidi. In particolare si parla di convezione forzata quando il campo di moto è una condizione predefinita e non legata allo scambio termico che ha luogo. Nel caso in esame il moto verrà infatti imposto da una pompa che spingerà all'interno dei canali di raffreddamento il fluido refrigerante.

Le variabili che maggiormente influenzano lo scambio termico sono:

- Geometria considerata;
- Area di scambio (A_{sc});
- Temperatura della superficie di interfaccia (T_p);
- Temperatura del fluido (di ingresso T_i e di uscita T_u);
- Campo di velocità (u);
- Tipo di fluido considerato;
- Conducibilità termica (λ);
- Calore specifico a pressione costante (c_p);
- Densità viscosità dinamica (μ).

Una variabile di grande importanza è il coefficiente di scambio in convezione forzata α_c che appare nella formulazione del flusso convettivo elaborata da Newton:

$$|q| = \alpha_c A_{sc} (T_p - T_f)$$

Il coefficiente di scambio in convezione forzata è funzione di numerose variabili. Grazie al teorema di Buckingham è però possibile semplificare l'analisi dimensionale andando a raccogliere le variabili in tre gruppi adimensionali:

- Numero di Nusselt: $Nu = \frac{\alpha_c L}{\lambda}$;
- Numero di Prandtl: $Pr = \frac{c_p \mu}{\lambda}$;
- Numero di Reynolds: $Re = \frac{\rho u L}{\mu}$.

Sfruttando questi tre parametri adimensionali è possibile ottenere una stima del coefficiente di scambio in convezione forzata. In particolare è stato scelto di utilizzare la correlazione di Gnielinski per regimi di moto turbolenti ($Re > 4000$) e numeri di Prandtl $0.5 \leq Pr \leq 1\,000\,000$.

$$Nu_{TURB} = \frac{\left(\frac{\xi}{8}\right) (Re - 1000) Pr}{1 + 12.7 \left(\frac{\xi}{8}\right)^{0.5} \left(Pr^{\frac{2}{3}} - 1\right)} \left\{ 1 + \left(\frac{d}{L}\right)^{\frac{2}{3}} \right\}$$

$$\xi = (1.82 \log_{10} Re - 1.64)^{-2}$$

È stata ipotizzata una temperatura di uscita del fluido di 40 °C di 200 °C (473 K), una portata massima di 300 l/h ($8,33 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$) per l'acqua e di 250 l/min ($4,17 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$) per l'aria compressa (assunta una pressione di 6 bar). Il canale di raffreddamento degli alberi avrà un diametro $d=9 \text{ mm}$ e una lunghezza di circa $L=500 \text{ mm}$, da cui deriva un'area di scambio pari a $A_{sc}=2 \pi d/2 = 0.00157 \text{ m}^2$.

Per il calcolo del coefficiente di scambio α_c viene utilizzato il metodo iterativo ϵ -NTU (metodo efficienza - numero di unità di trasporto). Il processo iterativo è il seguente:

- Calcolo della temperatura media del fluido tra ingresso e uscita;
- Calcolo della velocità di deflusso (rapporto tra portata volumetrica e sezione di deflusso);
- Calcolo delle proprietà alla temperatura media (c_p, λ, μ, ρ);
- Calcolo il calore $q_I = \dot{m} c_p (T_u - T_i)$
- Calcolo dei numeri Pr e Re;
- Calcolo ξ e Nu;
- Calcolo $\alpha_c = \frac{Nu \lambda}{d}$;
- Consideriamo il coefficiente globale di scambio K coincidente con α_c ;
- Calcolo $NTU = \frac{K A_{sc}}{\dot{m} c_p}$ ed $r = \frac{C_{min}}{C_{max}}$;
- Calcolo l'efficienza con la formula per la pura controcorrente: $\epsilon = \frac{1 - e^{-NTU(1-r)}}{1 - r e^{-NTU(1-r)}}$;
- Calcolo il calore per la seconda iterazione come $q_{II} = \epsilon q_I$;
- Calcolo la nuova temperatura di uscita $T_u = T_i + \frac{q_{II}}{\dot{m} c_p}$;
- Ricalcolo la temperatura media tra ingresso e uscita ripetendo tutto il procedimento sopra descritto fino a quanto non arrivo a convergenza del valore della T_u .

I coefficienti di scambio ricavati per aria e acqua sono stati:

$$\alpha_{c,acqua} = 6300 \frac{W}{m^2 K}$$

$$\alpha_{c,aria} = 213 \frac{W}{m^2 K}$$

Nelle simulazioni elettrotermiche in ambiente ANSYS è stato deciso di adottare dei coefficienti più bassi, in favore di sicurezza:

$$\alpha_{c,acqua} = 5000 \frac{W}{m^2 K}$$

$$\alpha_{c,aria} = 100 \frac{W}{m^2 K}$$

3.5.2 Raffreddamento ad aria vs raffreddamento ad acqua

Dopo aver stimato i coefficienti di scambio termico in convezione forzata per l'acqua e per l'aria è stata lanciata un'analisi FEM elettrotermica per verificare la differenza di temperatura derivante dall'impiego di un fluido refrigerante o dell'altro. I risultati, visualizzati in Figura 3.15 e Figura 3.16, sono quelli ottenuti sulla geometria finale dei componenti e del sistema di raffreddamento che è stata utilizzata anche per le analisi del paragrafo 3.4. Il caso analizzato è sempre quello più gravoso dal punto di vista termico: un provino in grafite con diametro della sezione ristretta di 8 mm, scaldato per effetto Joule con una corrente di 800 A.

È evidente fin da subito che l'utilizzo di aria compressa come fluido refrigerante non sia sufficiente per le temperature in gioco. Lungo gli alberi si ottengono temperature di $\approx 300 \text{ °C}$ superiori rispetto al caso di raffreddamento con acqua. La temperatura di interfaccia dei canali di raffreddamento raggiunge temperature troppo elevate che vanno dai 100 °C della camera ai 430 °C in corrispondenza dei canali di raffreddamento

interni all'albero in acciaio. Altro problema che si presenta è quello della temperatura della boccola in P.E.T.P. + P.T.F.E. Questo materiale ha un range di temperatura di lavoro che va dai $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ai $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ [10], mentre in Figura 3.15 si possono osservare temperature che raggiungono i $260\text{ }^{\circ}\text{C}$. Infine sussiste il problema della resistenza meccanica dei componenti alle alte temperature con l'albero in tantalio soggetto a temperature di $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ nei pressi del raggio di raccordo contro i $166\text{ }^{\circ}\text{C}$ del caso di raffreddamento ad acqua. Allo stesso modo l'albero in acciaio è soggetto a temperature superiori a $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ in corrispondenza del collegamento bullonato e del raggio di raccordo, mentre raffreddando con acqua si riescono a mantenere le temperature inferiori ai $125\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Si decide quindi di utilizzare l'acqua come fluido refrigerante.

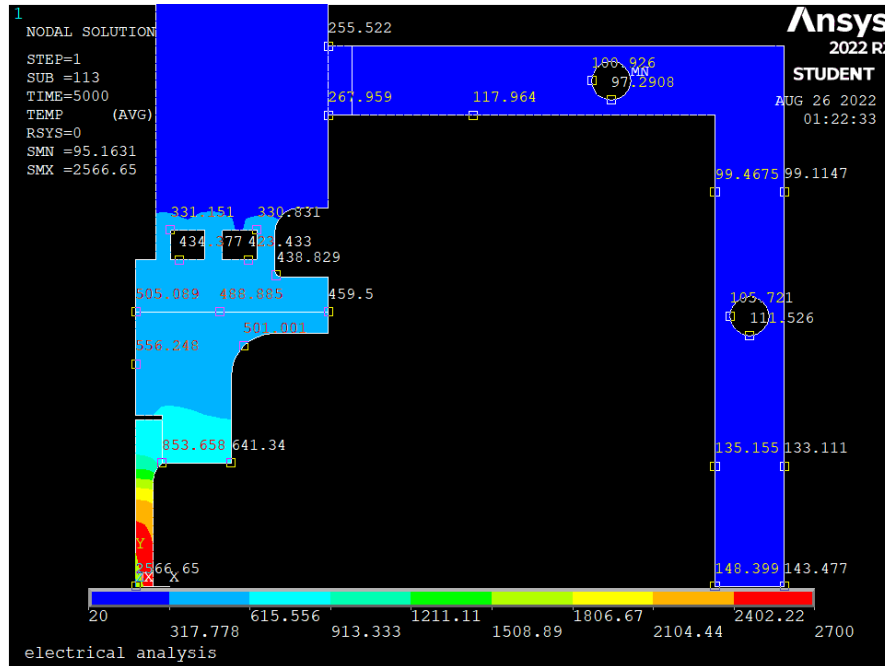


Figura 3.15: Risultati dell'analisi FEM elettrotermica svolta su un provino in grafite di diametro 8 mm scaldato per effetto Joule con 550 A di corrente – refrigerante aria.

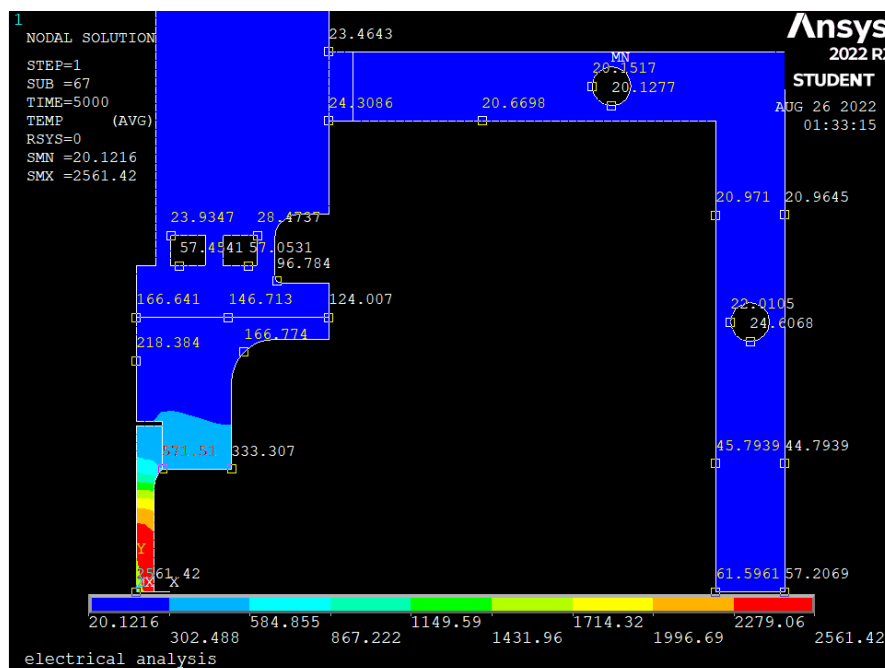


Figura 3.16: Risultati dell'analisi FEM elettrotermica svolta su un provino in grafite di diametro 8 mm scaldato per effetto Joule con 550 A di corrente – refrigerante acqua.

3.5.3 Configurazione del sistema di raffreddamento

Verrà ora descritto il layout finale per il sistema di raffreddamento ad acqua. Per quanto riguarda la camera e gli sportelli esso verrà realizzato tramite delle operazioni di foratura, seguite dalla saldatura di “tappi” che andranno a definire il percorso al quale dovrà attenersi il fluido refrigerante (indicato con le frecce azzurro in Figura 3.17). Il layout del sistema di raffreddamento di camera e sportelli è stato influenzato dalla presenza dei fori previsti per l’inserimento di alberi e termocoppie, per l’attacco della pompa da vuoto e per la misurazione della temperatura del provino tramite un pirometro.

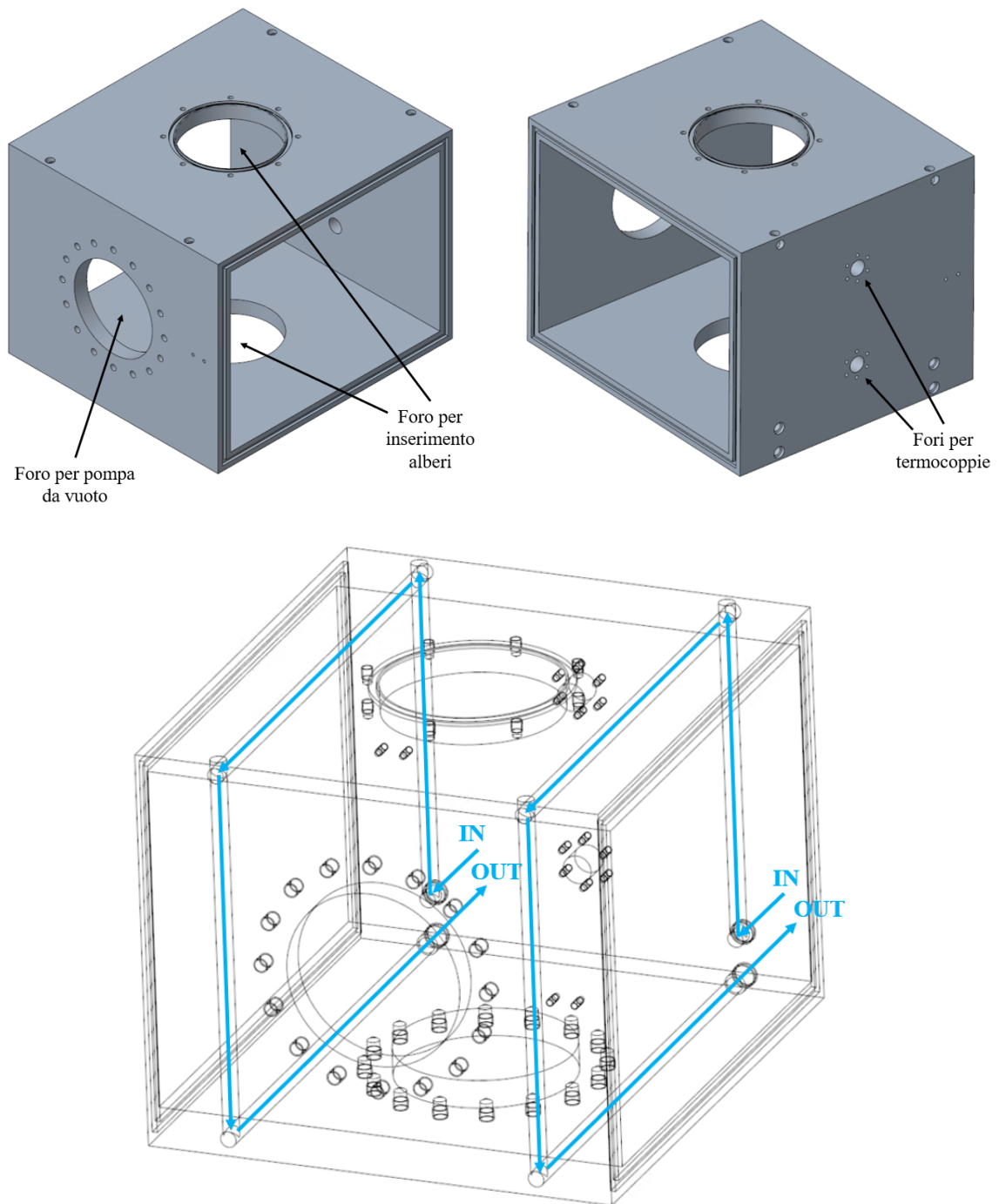
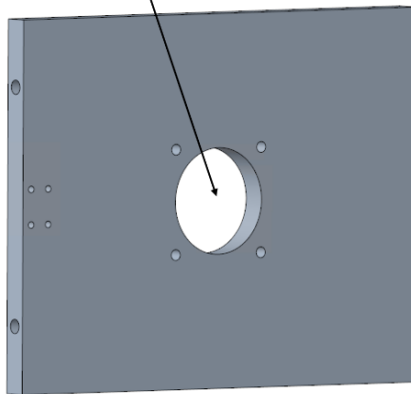


Figura 3.17: Viste 3D del CAD relativo alla camera con illustrazione del sistema di raffreddamento ad acqua.

Foro per misurazioni di temperatura attraverso pirometro



“tappi”
saldati

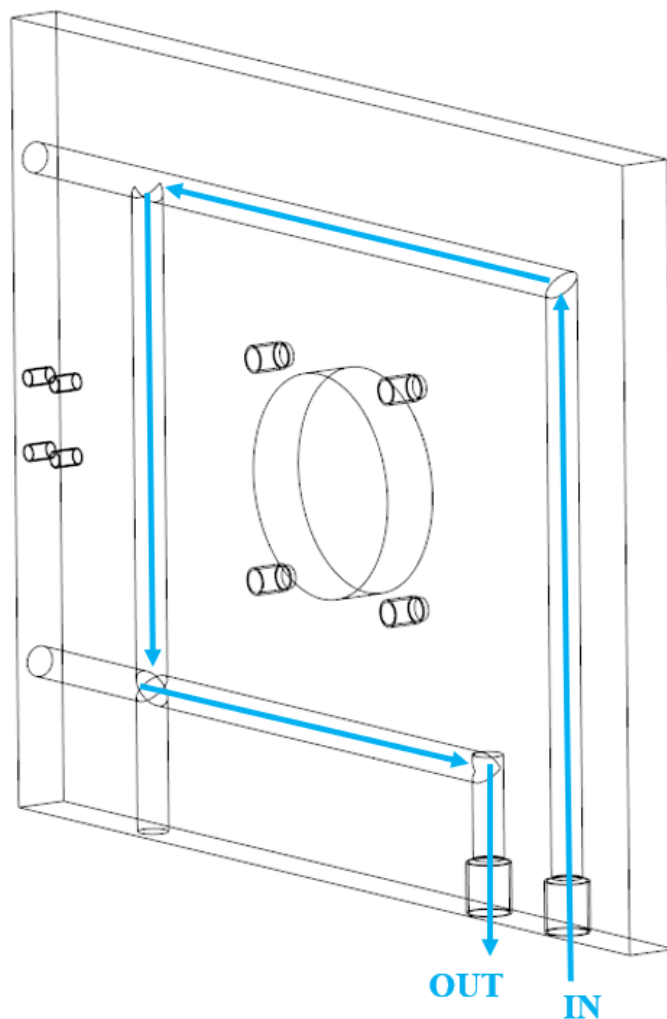
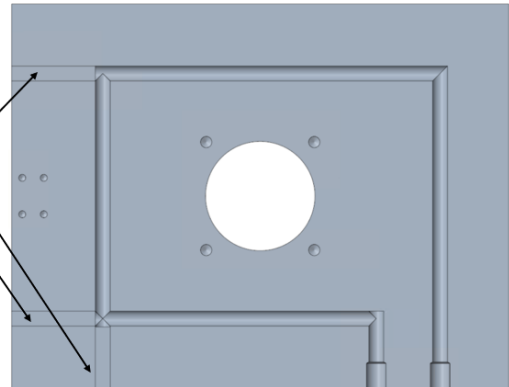


Figura 3.18: Viste 3D del CAD relativo allo sportello con illustrazione del sistema di raffreddamento ad acqua.

Più complicata è risultata la definizione del sistema di raffreddamento per gli alberi (Figura 3.18). Per realizzare i tratti di ingresso e uscita verranno forati gli alberi. Il tratto ricurvo nella parte inferiore dell'albero verrà realizzato per fresatura andando a creare un gradino di 0,5 mm che permetterà di appoggiare il tappo che andrà saldato nella parte inferiore per chiudere il circuito di raffreddamento. Per tutti gli attacchi di ingresso e uscita del circuito di raffreddamento sono stati realizzati dei fori filettati di tipo GAS $\frac{1}{4}$.

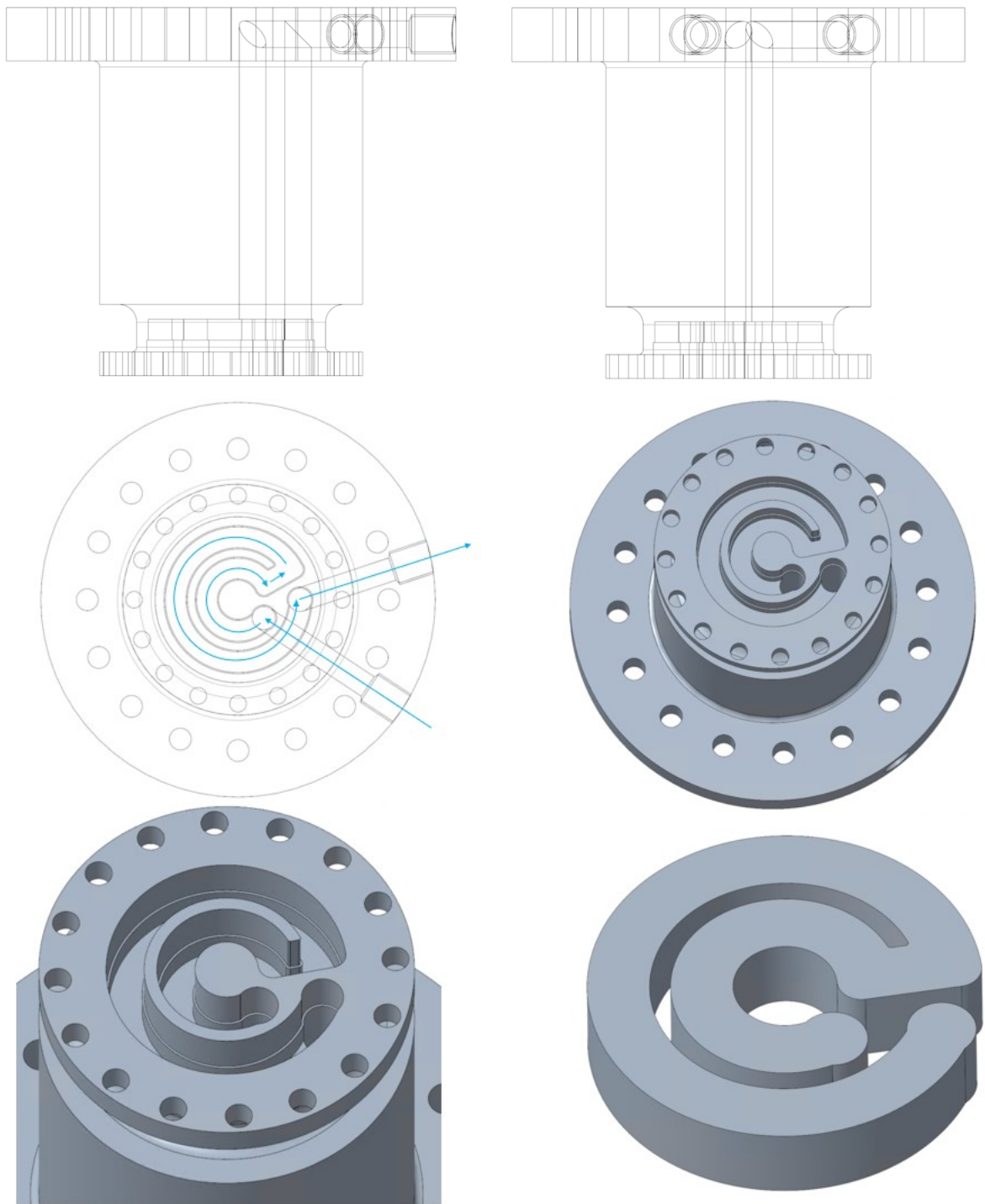


Figura 3.19: Sistema di raffreddamento degli alberi (in figura viste dell'albero superiore).

CAPITOLO 4

Test sperimentali sul sistema per prove ad alta temperatura dei LNL

4.1 Introduzione

La progettazione del sistema di riscaldamento per prove ad alta temperatura in alto vuoto (da inserire nella macchina di prova MTS Mini Bionix) fino a questo momento si è basata fondamentalmente sull'analisi del comportamento dei componenti tramite il software ANSYS. Questo, sfruttando il metodo degli elementi finiti, consente di simulare il comportamento dei componenti del sistema imponendo carichi e vincoli a cui sarà soggetto nella realtà.

Nel caso della macchina per prove ad alta temperatura in alto vuoto è stata simulata la risposta ai carichi termici dovuti al riscaldamento del provino per effetto Joule. In particolare ci si è concentrati sul monitoraggio delle temperature in corrispondenza di:

- Sezione ristretta del provino
- Raggi di raccordo degli alberi
- Collegamenti bullonati
- Superfici di interfaccia del sistema di raffreddamento
- Camera

I risultati derivanti dalle sole simulazioni non sono sufficienti a garantire il corretto funzionamento del sistema progettato. Si è preferito effettuare alcuni test sperimentali per validare i risultati derivanti dalle analisi agli elementi finiti. I materiali testati sono stati acciaio, molibdeno e tantalio.

In questo caso è stato sfruttato un sistema di test per prove a compressione in alto vuoto ad alta temperatura già presente ai Laboratori Nazionali di Legnaro (Figura 4.1).

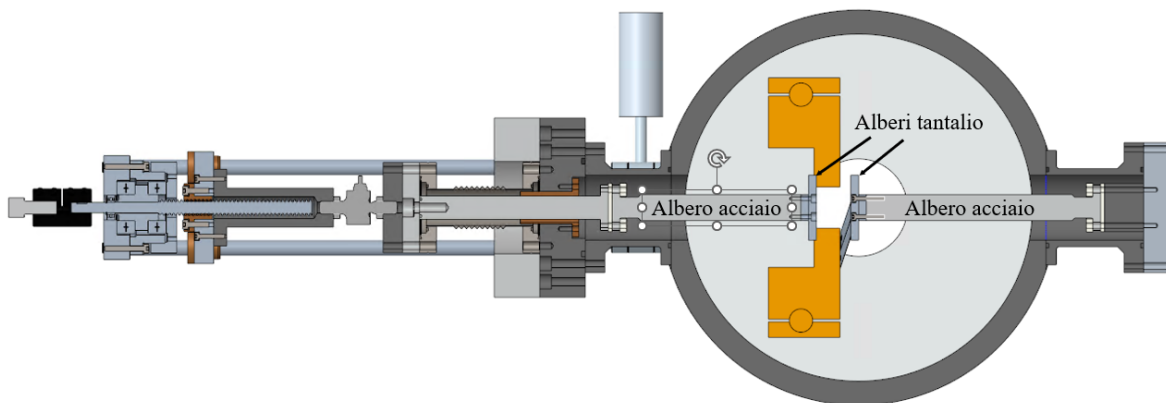


Figura 4.1: Vista sezionata del sistema di test per prove a compressione in alto vuoto ad alta temperatura presso i Laboratori Nazionali di Legnaro.

Gli obiettivi dei test erano i seguenti:

- Verificare l'impastamento dell'afferraggio in tantalio;
- Verificare la filettatura dell'afferraggio per test su materiali metallici;
- Verificare che le temperature stimate dalle analisi siano confrontabili con quelle dei test sperimentali.

Dovendo eseguire test a trazione per la verifica degli afferraggi filettati si è resa necessaria la riprogettazione di alcuni componenti. In particolare sono stati riprogettati i due alberi in acciaio e realizzati due alberi in tantalio con foro filettato per l'afferraggio dei provini. Nella progettazione dei nuovi componenti sono stati considerati i semilavorati a disposizione dell'officina e le geometrie del sistema dei LNL. Questi fattori

hanno portato alla realizzazione di componenti più snelli rispetto a quelli del sistema oggetto di tesi. Sono state quindi condotte nuove analisi FEM per ottenere dei dati analitici da confrontare poi con quelli sperimentali.

In questo capitolo verranno descritti l'apparato sperimentale con i componenti riprogettati, i risultati delle simulazioni su software ANSYS, le modalità di svolgimento dei test e i risultati di questi ultimi che saranno messi a confronto con quelli analitici ricavati in precedenza.

4.2 Apparato per i test sperimentali sul sistema per prove ad alta temperatura dei LNL

Come detto in precedenza, per ottenere i dati sperimentali è stato utilizzato il sistema per test ad elevata temperatura in alto vuoto già presente ai laboratori di Legnaro (

Figura 4.2). Questo sistema, dopo la chiusura della camera che vediamo aperta in

Figura 4.2, permette di creare una condizione di vuoto raggiungendo pressioni dell'ordine di 10^{-6} mbar. A creare il vuoto sono la pompa volumetrica e la pompa turbomolecolare poste in serie. Il riscaldamento del provino, posto tra i due alberi in tantalio, avviene per effetto Joule grazie all'immissione di una corrente fornita da un alimentatore. L'ingresso della corrente ha luogo attraverso un cavo di alimentazione e una treccia mentre l'uscita tramite le lamine in tantalio fissate all'albero in tantalio inferiore collegate a loro volta al puntale che esce dal retro della camera. Camera e puntali sono raffreddati grazie ad un sistema di canali all'interno dei quali circola acqua.

In verde sono evidenziati i componenti del sistema per test a compressione (

Figura 4.2 a sinistra) che sono stati sostituiti con quelli progettati per i test a trazione (

Figura 4.2 al centro).

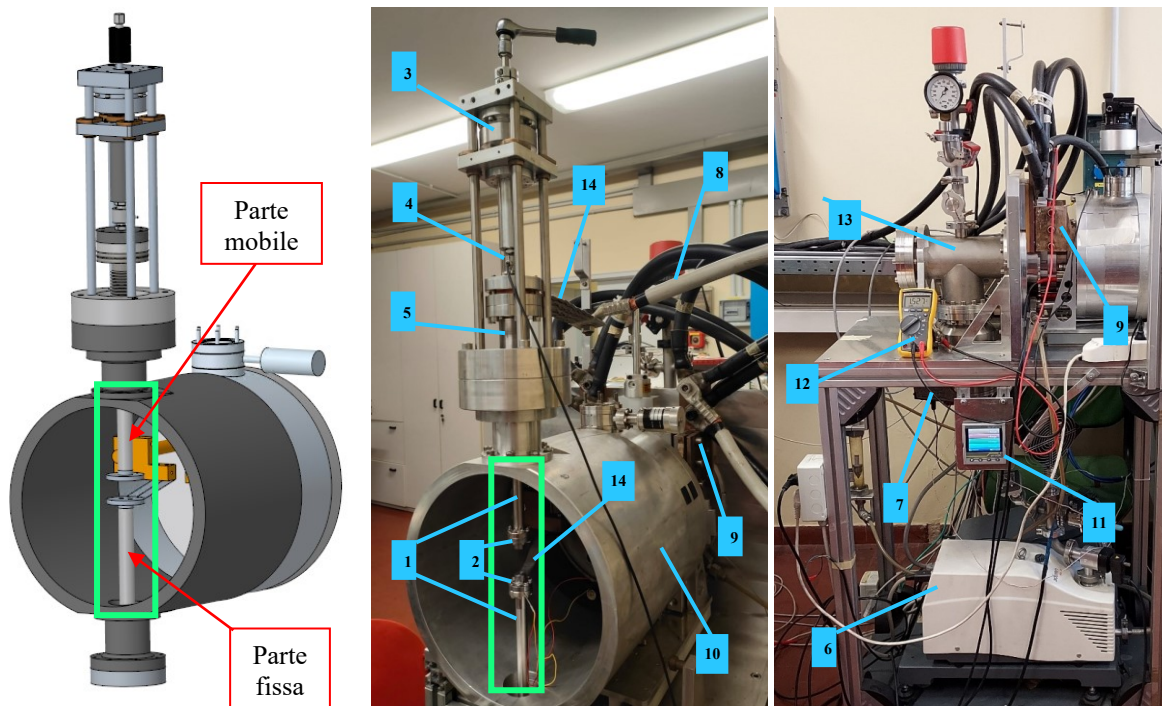


Figura 4.2: Sistema di test per alte temperature in alto vuoti. 1) Alberi in acciaio; 2) Alberi in tantalio; 3) Sistema di movimentazione; 4) Cella di carico; 5) Soffietto; 6) Pompa volumetrica; 7) Pompa turbomolecolare; 8) Cavo elettrico per il trasporto di corrente; 9) Estremità dei puntali di alimentazione e

uscita di corrente; 10) Camera da vuoto; 11) Display per visualizzazione temperatura della termocoppia; 12) Multimetro per la misura della ddp tra i puntali; 13) Condotto di aspirazione per il vuoto; 14) Lamine in tantalio per l'estrazione di corrente; 14) Treccia che collega il cavo di alimentazione al punto di immissione della corrente.

4.3 Progettazione dei nuovi componenti per i test sperimentali presso i LNL

Per poter eseguire delle prove a trazione ad elevata temperatura si è scelto di ricorrere a provini filettati. Di conseguenza sono stati realizzati due nuovi alberi in tantalio ai quali poter avvitare i provini e due nuovi alberi in acciaio ai quali poter fissare quelli in tantalio tramite dei collegamenti bullonati. In Figura 4.3 si possono visualizzare la configurazione della macchina per prove a compressione (sinistra) e a trazione (destra).

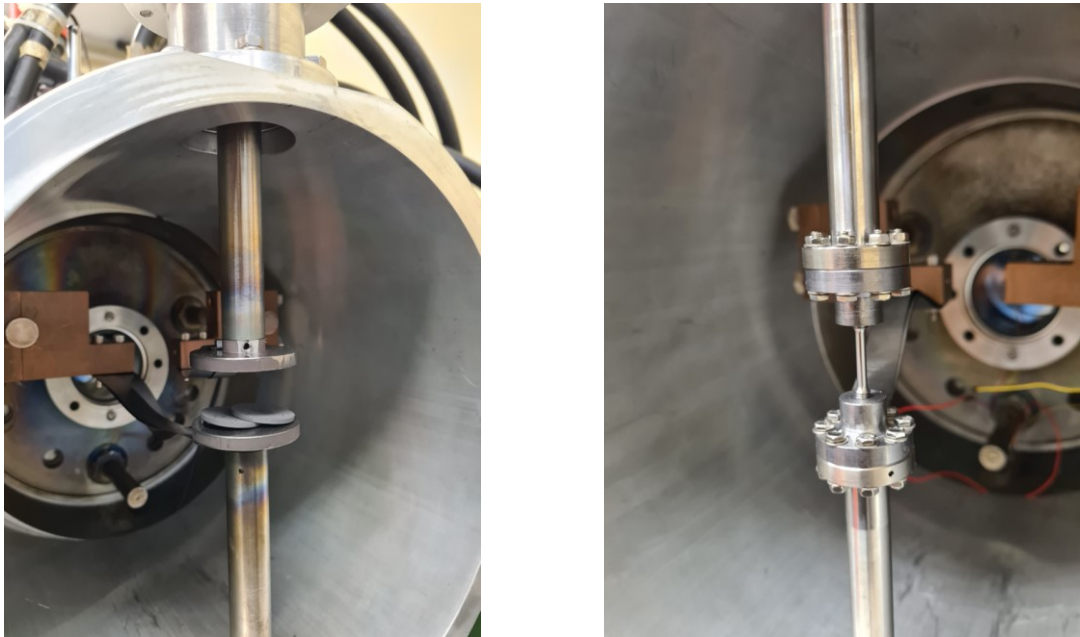


Figura 4.3: Configurazione per prove a trazione (sinistra) e configurazione per prove a trazione con componenti riprogettati (destra) sul sistema presente ai LNL.

I vincoli maggiori in fase di progettazione sono stati quelli legati agli ingombri (Figura 4.4) e alle materie prime a disposizione. Essendo provvisti di semilavorati cilindrici in tantalio di diametro 30 mm e dovendo consentire l'accoppiamento dei nuovi alberi in acciaio con il resto del sistema, non si è quindi potuto testare i componenti di dimensioni pari a quelle dei componenti del progetto di tesi (vedere dimensioni in Figura 3.12). La riduzione dei diametri ha implicato inoltre il raggiungimento di temperature maggiori in corrispondenza dei collegamenti bullonati. Da normativa ISO 892-5 : 2012 [11], le prestazioni dei collegamenti bullonati sono garantite fino a temperature di 300 °C. Per questa ragione durante i test condotti in laboratorio sono state raggiunte temperature massime sul provino di 1000 °C, inferiori ai 2000 °C richiesti da progetto.

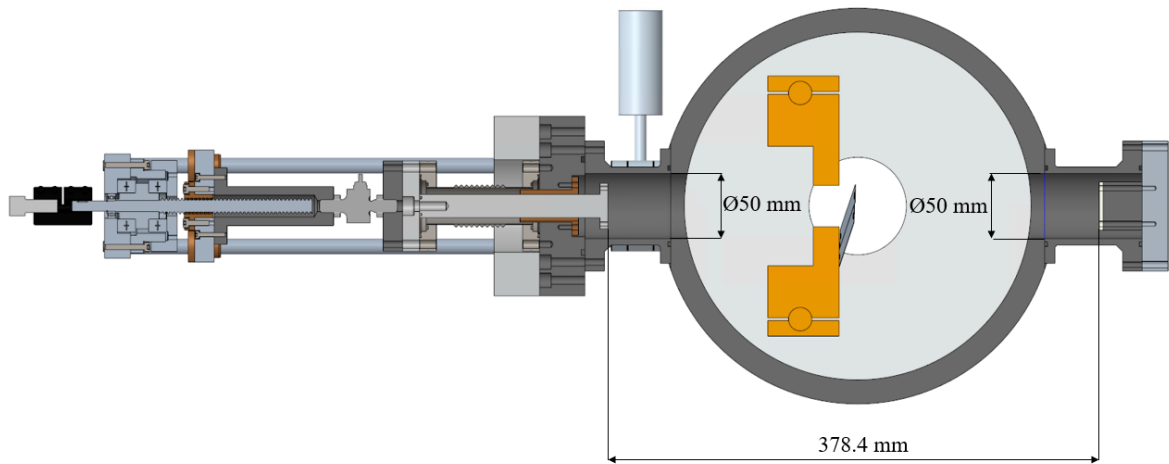
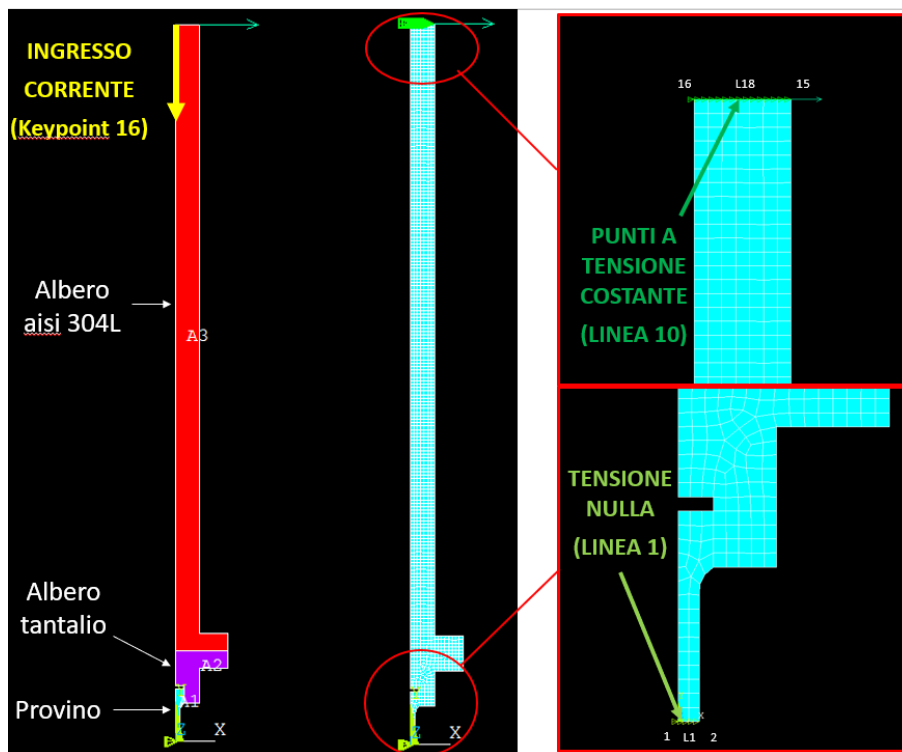


Figura 4.4: Vincoli dimensionali, legati al sistema per test ad elevata temperatura in alto vuoto presente ai LNL, che hanno influenzato la progettazione dei componenti per i test sperimentali ai LNL.

La progettazione dei componenti ha visto dapprima delle simulazioni elettrotermiche su ANSYS che hanno permesso di stimare la temperatura lungo il provino e gli alberi. Una volta verificato che le tensioni raggiunte a quelle temperature non fossero dannose per i componenti sono stati realizzati i modelli CAD da mandare in officina.

Nell'immagine inferiore di Figura 4.5 vengono riportati i risultati di una delle analisi FEM che sono state fatte simulando il comportamento di provini in acciaio, tantalio e molibdeno. Per alleggerire il carico computazionale sono state svolte analisi assialsimmetriche tramite elementi PLANE 223. I vincoli e i carichi sono della stessa tipologia di quelli applicati nelle analisi descritte nei capitoli precedenti: ingresso della corrente dal keypoint 16 con imposizione di pari tensione nella linea 18 e tensione nulla nella linea 1 (immagine superiore di Figura 4.5).



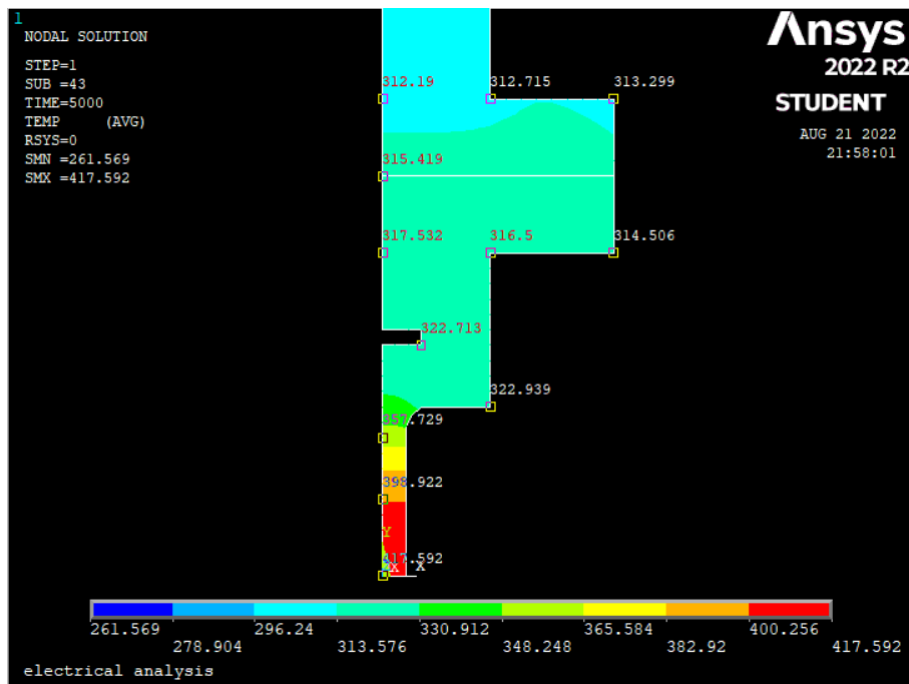
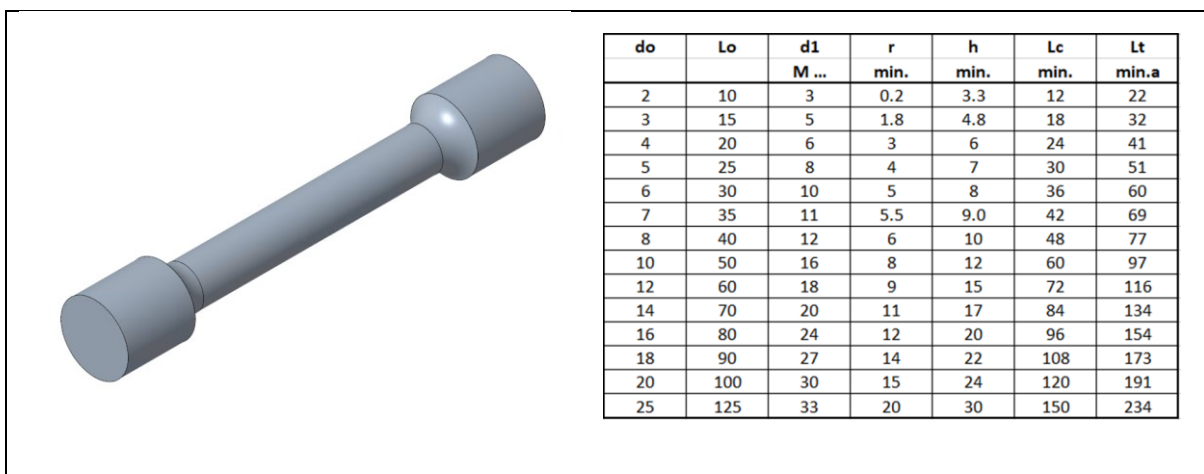


Figura 4.5: Risultati dell'analisi FEM sul riscaldamento per effetto Joule di un provino in Tantalio con diametro della sezione ristretta di 3 mm.

4.3.1 Provini per i test sperimentali presso i LNL

Per questioni di ingombri e per raggiungere temperature sufficientemente elevate senza innalzare troppo la temperatura degli alberi, sono stati realizzati provini con diametro della sezione ristretta pari a 3 mm. Le quote sono state estrapolate andando a plottare i diversi parametri presenti in Figura 3.4 (normativa BS EN ISO 6892-2:2018 [12]) in funzione del diametro d_0 tramite un'interpolazione dei dati. Dalle curve sono stati ricavati i risultati visualizzati nel grafico in alto a destra in Figura 4.6. Da evidenziare come le due estremità filettate del provino presentino due filettature diverse, una destrorsa e una sinistrorsa, in modo da poter avvitare il provino ai due alberi in tantalio. La rugosità superficiale dei provini è definita da normativa [8] e corrisponde a $R_z = 6,3$. In totale sono stati realizzati 7 provini: uno in tantalio, uno in molibdeno e cinque in acciaio.



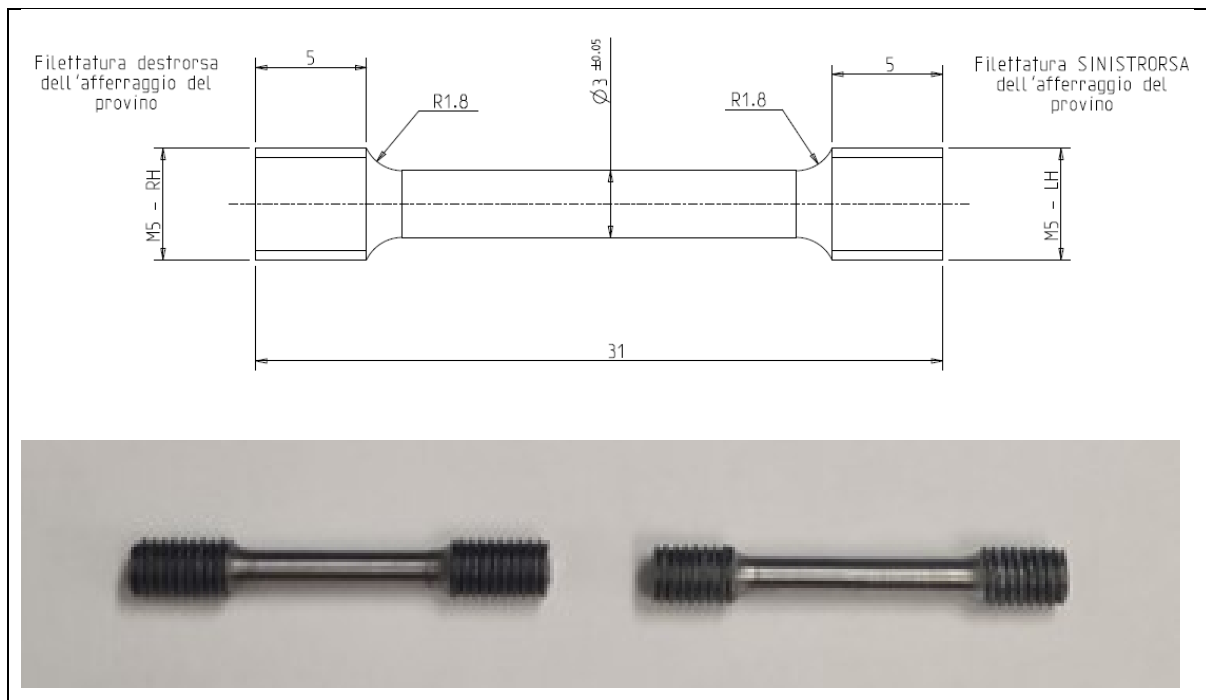
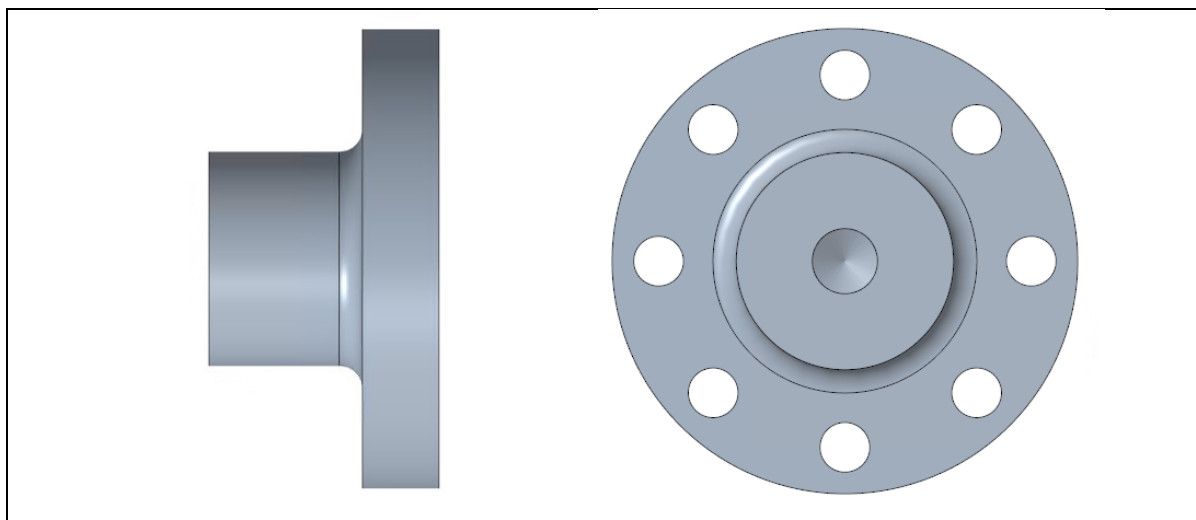


Figura 4.6: Modello CAD del provino (in alto a sinistra); tabella delle quote del provino in funzione di d_0 (in alto a destra); Messa in tavola del provino (al centro); Esempi di due provini realizzati per i test nel sistema dei LNL (in basso).

4.3.2 Alberi in tantalio riprogettati per i test sperimentali presso i LNL

Per realizzare gli alberi in tantalio i punti di partenza sono stati la filettatura del provino (M5) e il semilavorato cilindrico disponibile in magazzino di diametro 30 mm. Il foro M5 è stato realizzato di profondità 1 mm superiore alla lunghezza del tratto filettato del provino. Altro aspetto da tenere in considerazione è stato lo spazio per appoggiare le rondelle dei collegamenti bullonati considerando la presenza di un certo raggio di raccordo. Avendo scelto delle viti M3, le corrispondenti rondelle avevano diametro esterno di 6 mm, di conseguenza il diametro più piccolo dell'albero in tantalio è stato fatto di 14 mm con un raggio di raccordo di 1.5 mm. L'altezza dell'albero in tantalio è la stessa di quella dell'albero in tantalio utilizzato per le prove di compressione. Le quote complete sono visibili nelle viste in Figura 4.7.



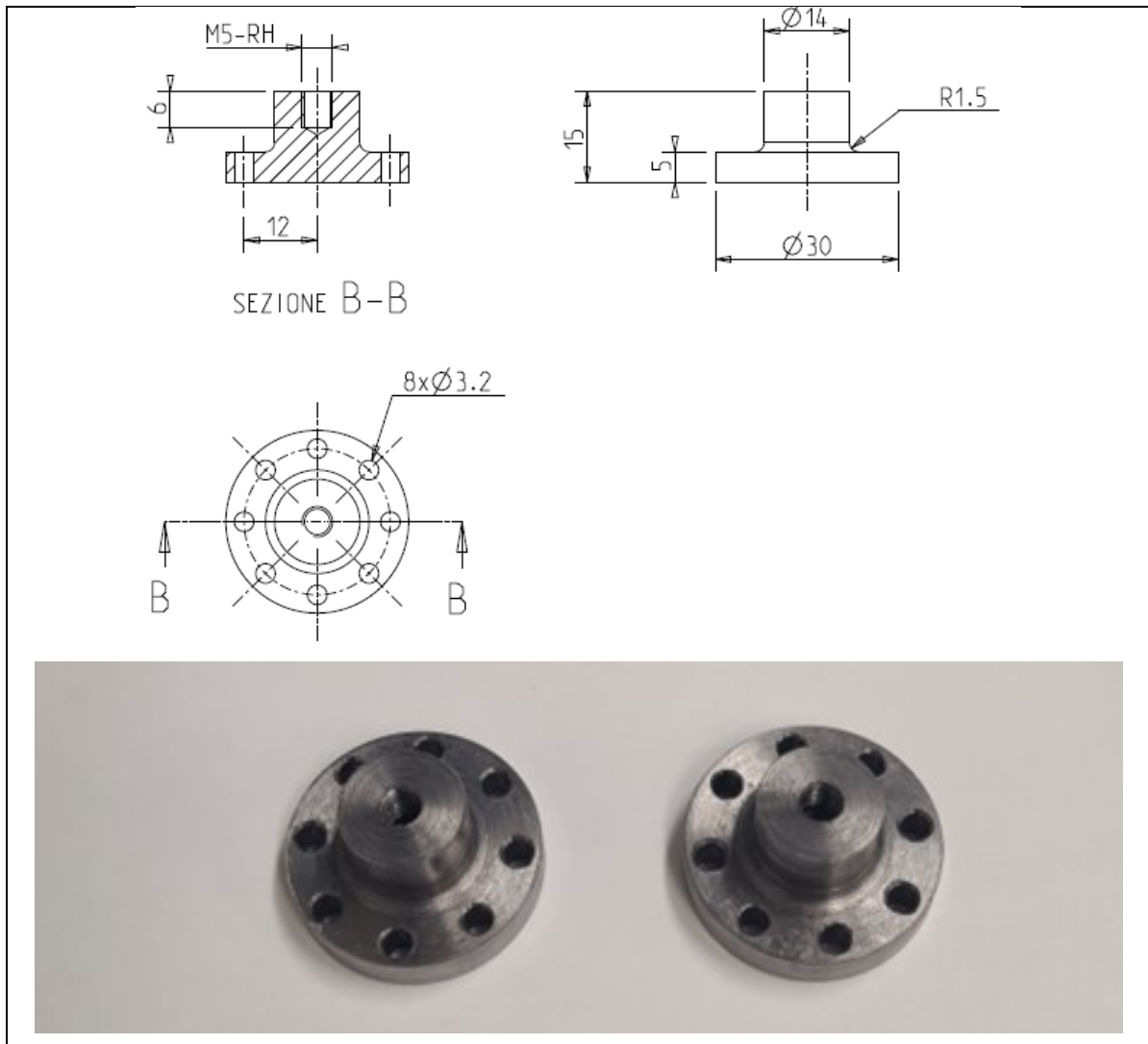


Figura 4.7: Modello CAD degli alberi in tantalio (in alto); Messa in tavola dell'albero in tantalio (al centro); Alberi in tantalio realizzati per i test sul sistema dei LNL (in basso).

4.3.3 Alberi in acciaio riprogettati per i test sperimentali presso i LNL

I due alberi in acciaio sono identici tranne nella lunghezza. L'albero più lungo è stato accoppiato alla parte inferiore fissa mentre quello più corto alla parte superiore mobile (vedere Figura 4.2). Questo per far sì che il provino fosse centrato rispetto alla finestrella di osservazione presente nel tappo della camera da vuoto. Entrambi gli alberi sono stati poi accoppiati ai due alberi in tantalio tramite dei collegamenti bullonati realizzati con viti M3. All'estremità più piccola di ciascuno dei due alberi in acciaio è stato realizzato un foro di diametro 1,6 mm e profondità 4 mm sul quale poter inserire la termocoppia per la misura di temperatura della flangia di collegamento con l'albero in tantalio (Figura 4.8).

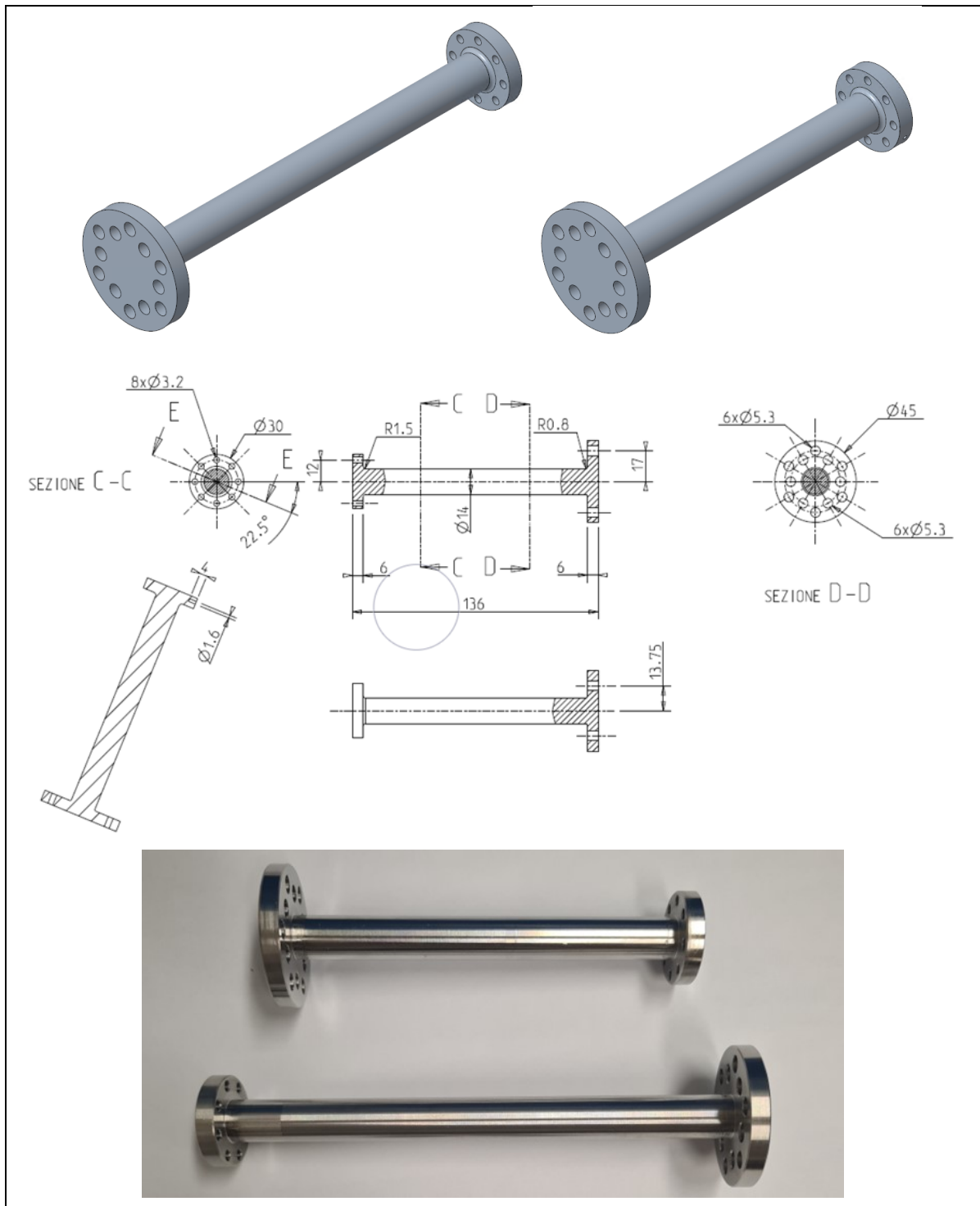


Figura 4.8: Modello CAD degli alberi in acciaio (in alto); Messa in tavola dell'albero in tantalio (al centro); Alberi in tantalio realizzati per i test sul sistema dei LNL (in basso).

4.4 Elementi della camera da vuoto

Per ottenere la condizione di vuoto la camera risulta costituita da una serie di elementi cilindrici dotati di guarnizione a tenuta. In Figura 4.9 a sinistra è mostrato il componente principale della camera. Esso è realizzato in alluminio così da essere manovrato in maniera relativamente semplice dagli operatori. Nella

parte destra della figura sono invece visibili i due fori di diametro 50 mm attraverso i quali devono passare gli alberi in acciaio progettati.

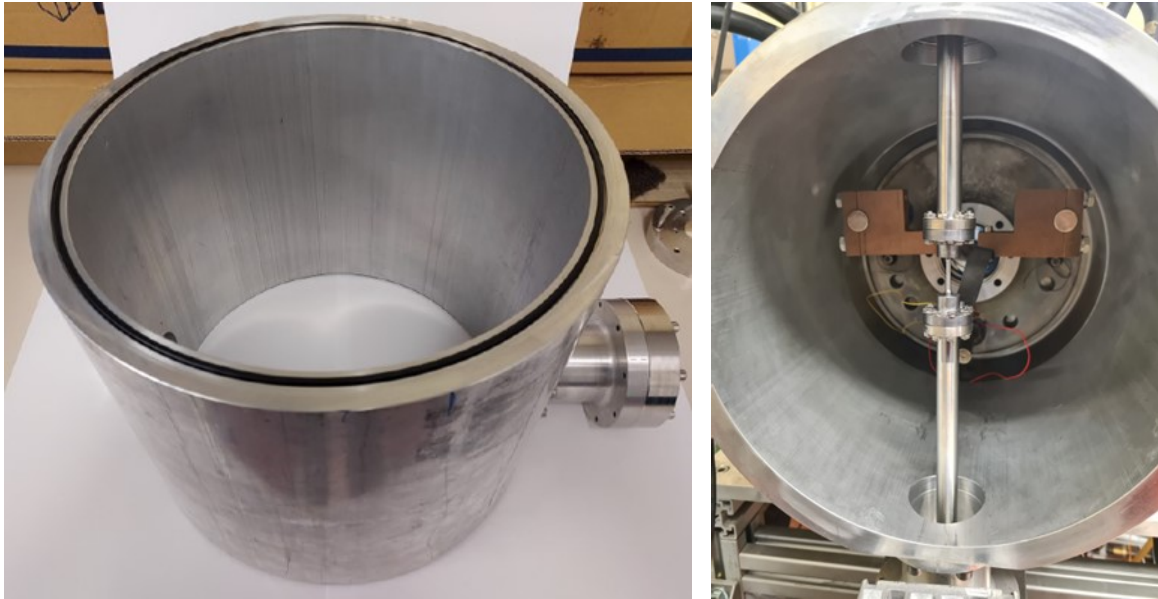


Figura 4.9: Camera cilindrica in alluminio con guarnizione alloggiata all'interno della cava (sinistra). Camera montata insieme al sistema di alberi progettati e al provino da testare nel sistema dei LNL (sinistra).

Nel retro della camera è presente l'elemento di transizione, anch'esso realizzato in alluminio. In altri esperimenti questo deve permettere l'osservazione del componente testato. In questo caso è semplicemente necessario per arrivare ad appoggiare correttamente la transizione con tappo flangiato di Figura 4.9 al banco su cui poggia il sistema. Anche la transizione è dotata di una cava con una guarnizione alloggiata al suo interno per evitare trafileamenti di aria e garantire quindi la condizione di vuoto (Figura 4.10).



Figura 4.10: Transizione con finestra di osservazione.

La parte anteriore della camera cilindrica viene chiusa dal coperchio di Figura 4.11. Esso è realizzato sempre in alluminio e presenta due finestre di osservazione CF40. Durante i test è stata utilizzata la finestra centrale per misurare la temperatura del provino tramite un pirometro. Nella faccia del coperchio che andrà a contatto con la camera cilindrica è presente una cava sulla quale è posta la guarnizione per la tenuta del vuoto.

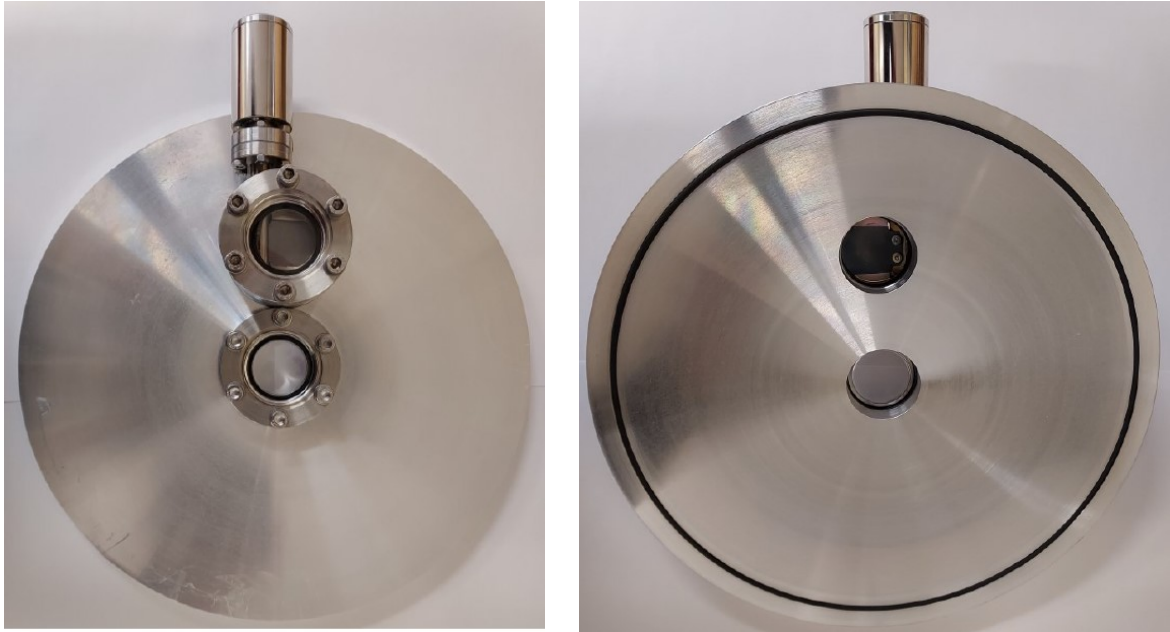


Figura 4.11: Coperchio con doppia finestra di osservazione.

Una volta allineati e uniti i tre elementi appena descritti, facendo aderire correttamente le guarnizioni alle superfici sulle quali si affacciano, ciò che crea la condizione di vuoto sono la pompa volumetrica rotativa e la pompa turbomolecolare poste in serie. Inizialmente entra in azione la pompa volumetrica che porta la pressione a valori dell'ordine di 10^{-2} mbar, una volta raggiunta la pressione di soglia si può azionare manualmente la pompa turbomolecolare che porta la pressione a valori dell'ordine dei 10^{-6} mbar.

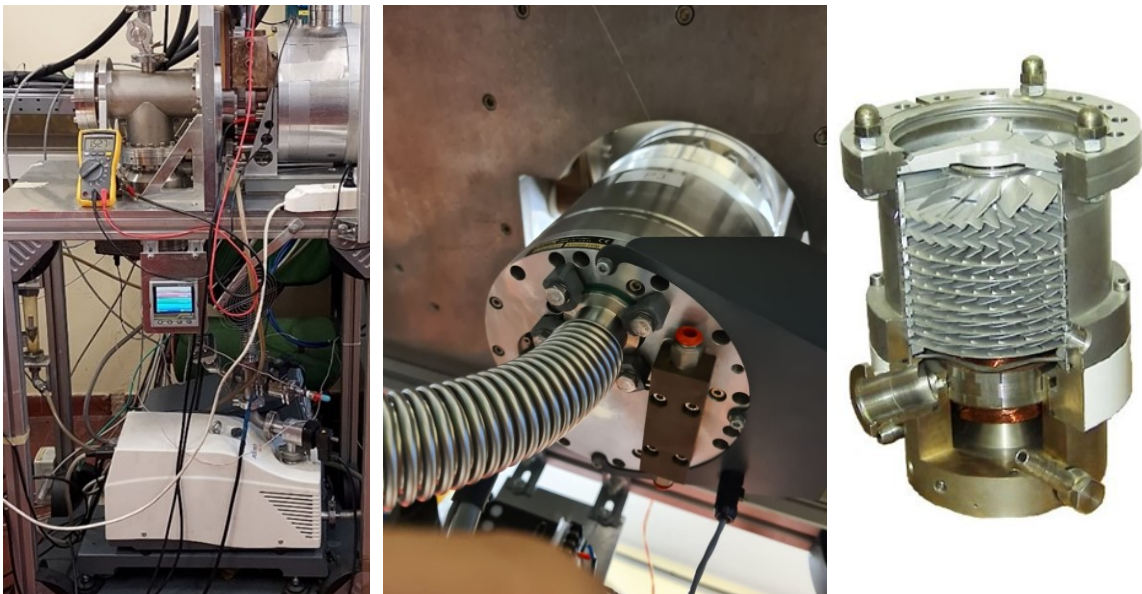


Figura 4.12: Foto delle due pompe per la creazione del vuoto(sinistra); Pompa turbomolecolare (centro e destra);

4.5 Sistema di alimentazione

Dovendo riscaldare i provini per effetto Joule è necessario immettere nel sistema una certa corrente. Questa viene erogata dall'alimentatore riportato in Figura 4.13. Durante i test l'alimentatore è stato utilizzato in controllo di corrente andando a ruotare completamente la rotellina di sinistra, riferita alla tensione, e ruotando un po' alla volta la rotellina a destra per aumentare la corrente a rampe di 5 o 10 A. Se la tensione fosse impostata ad un valore troppo basso potrebbe succedere di non riuscire più ad incrementare la corrente. Per questo motivo viene impostata al valore massimo. Effettuare le prove in controllo di tensione sarebbe complicato perché non si riuscirebbe a controllare adeguatamente l'erogazione di corrente al variare della tensione.



Figura 4.13: Alimentatore utilizzato in modalità di controllo di corrente durante i test ai LNL.

La tensione rilevata dall'alimentatore verrà indicata nel display di sinistra e confrontata con la tensione misurata attraverso il multimetro (Figura 4.14). Il valore di tensione misurato dal multimetro è quella tra cavo in ingresso e puntale in uscita dalla camera. Per ricavare questo valore è necessario ruotare la manopola nella terza posizione partendo dall'alto.

Altra funzione che doveva svolgere il multimetro era quella di verificare l'isolamento elettrico di due componenti. In questo caso la manopola andava posizionata nella sesta posizione dall'alto.



Figura 4.14: Multimetro utilizzato per il confronto della tensione rilevata tra ingresso e uscita e la corrente rilevata dall'alimentatore.

4.6 Sistema di movimentazione

Per imprimere la forza viene utilizzato un sistema già a disposizione presso i Laboratori Nazionali di Legnaro (Figura 4.15). Tramite il giunto è possibile far ruotare la vite trapezia saldobrasata ad un componente in acciaio il cui carico è sostenuto da due cuscinetti assiali. Un cuscinetto lavorerà nel caso di carico di trazione mentre l'altro nel caso di applicazione di uno sforzo di compressione. Eventuali vibrazioni sono sostenute da un cuscinetto radiale. Il carico viene trasferito al resto del sistema tramite un elemento cilindrico coassiale alla vite.

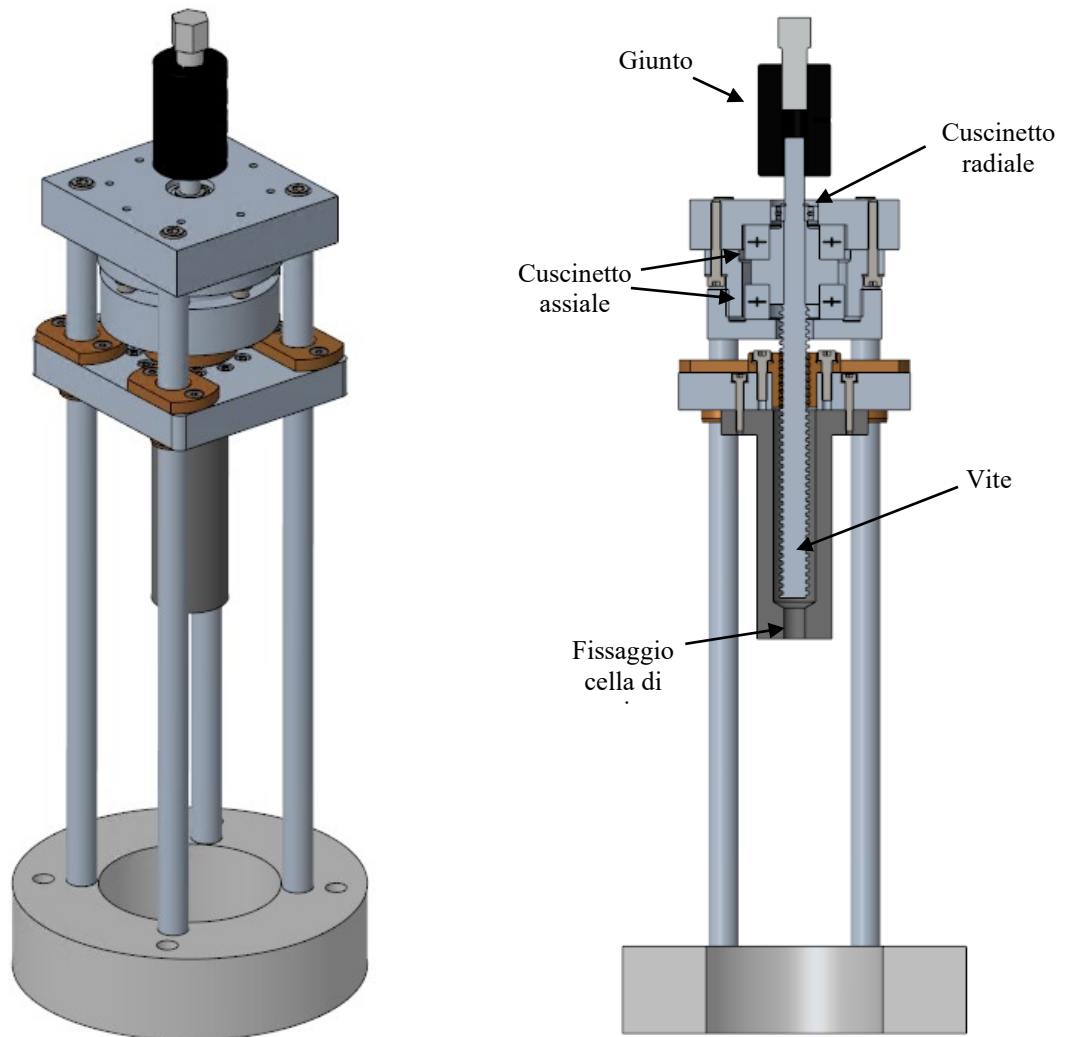


Figura 4.15: Sistema di movimentazione per il trasferimento di carico utilizzato per i test presso i LNL.

Alla parte inferiore del sistema di movimentazione sarà fissata la cella di carico, collegata a sua volta ad un sistema di flange e all'albero mobile. Quest'ultimo è mantenuto in asse tramite una boccia in PEEK. Per garantire il vuoto e la movimentazione in direzione assiale degli alberi viene inserito un soffietto metallico saldato a due flange CF40: quella inferiore viene fissata ad una flangia che permette di collegare camera e movimentazione; quella superiore viene fissata con altre due flange, una collegata tramite una vite centrale all'albero, l'altra collegata alla cella di carico tramite un opportuno foro filettato. La lunghezza del soffietto a riposo è di 115 mm e può essere compresso di 40 mm. La testa dell'albero che passa internamente al soffietto è provvista di una cava dove poter alloggiare una guarnizione per garantire il vuoto.

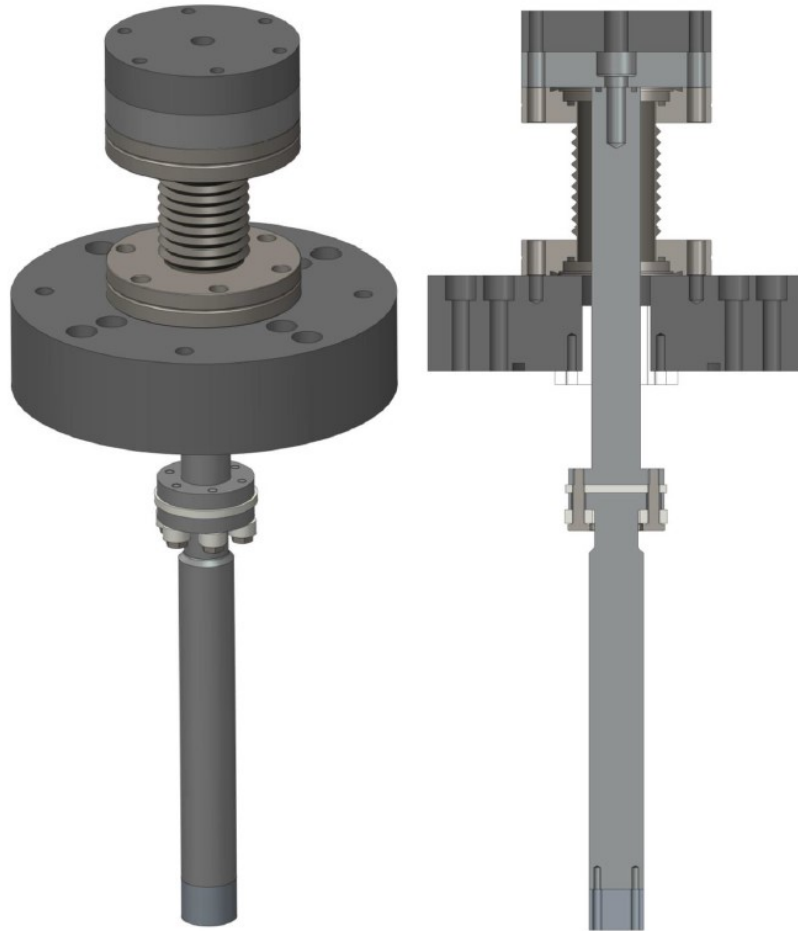


Figura 4.16: Modello CAD del collegamento tra albero mobile e sistema di movimentazione.

4.7 Misurazione di temperatura durante i test ai LNL

Uno degli obiettivi dei test presso i LNL era quello di verificare la conformità tra i risultati di temperatura ricavati dalle simulazioni e quelli ottenuti dai test sperimentali. In questo modo è stato possibile valutare l'affidabilità delle analisi elettrotermiche per stimare il comportamento di un qualsiasi apparato strumentale.

Le misure di temperatura sono state prese nel centro del provino tramite un pirometro per alte temperature e nei pressi del collegamento bullonato tra albero in acciaio e albero in tantalio tramite una termocoppia di tipo K inserita lato albero d'acciaio in un apposito foro.

4.7.1 Pirometro

La temperatura in corrispondenza della sezione ristretta del provino è stata misurata attraverso il pirometro mostrato in Figura 4.17. Questo modello in particolare permette di rilevare temperature dai 650 °C in su.

Prima di utilizzare il pirometro è stato necessario verificare che il parametro "E-SLOPE" fosse impostato nel valore corretto. Questo infatti cambia a seconda del materiale del quale va misurata la temperatura. Nel caso dei provini in tantalio, acciaio e molibdeno il valore corretto era 1.060.

Per effettuare le misurazioni il pirometro è stato appoggiato su un cavalletto posto frontalmente al coperchio della camera. Per visualizzare il provino tramite il pirometro è stata utilizzata la viewport centrale del coperchio che è stata attentamente pulita prima dell'utilizzo.

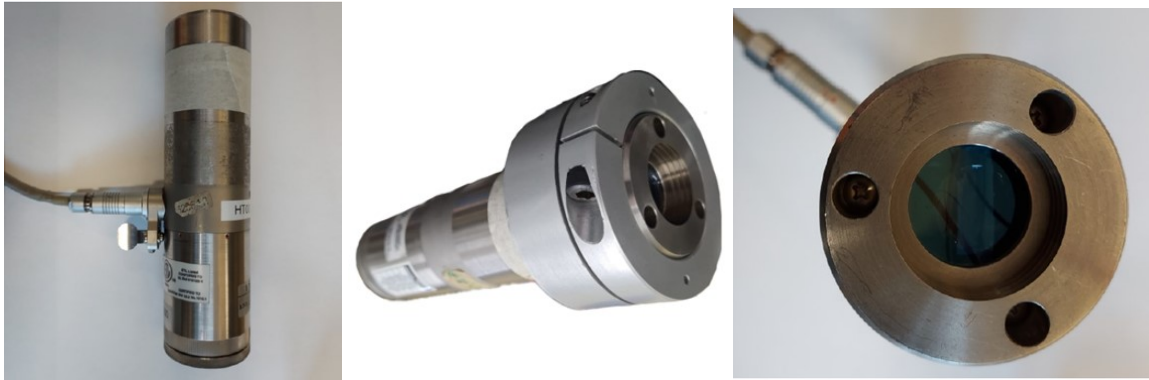


Figura 4.17: Pirometro Modline® modello 5R-3015 000 utilizzato per misurare la temperatura del provino durante i test effettuati ai LNL.

4.7.2 Termocoppie

Per misurare la temperatura della flangia nei pressi del collegamento bullonato tra albero in acciaio e albero in tantalio è stata utilizzata una termocoppia di tipo K che può rilevare temperature fino a 1200 °C. La termocoppia è stata inserita in un apposito foro realizzato nell'albero in acciaio (Figura 4.18 in alto a sinistra). Passando poi per il retro della camera e per il tubo di aspirazione dell'aria è stata fatta uscire attraverso una flangia CF16 (Figura 4.18 in basso) e collegata al display visibile in Figura 4.2 (11).

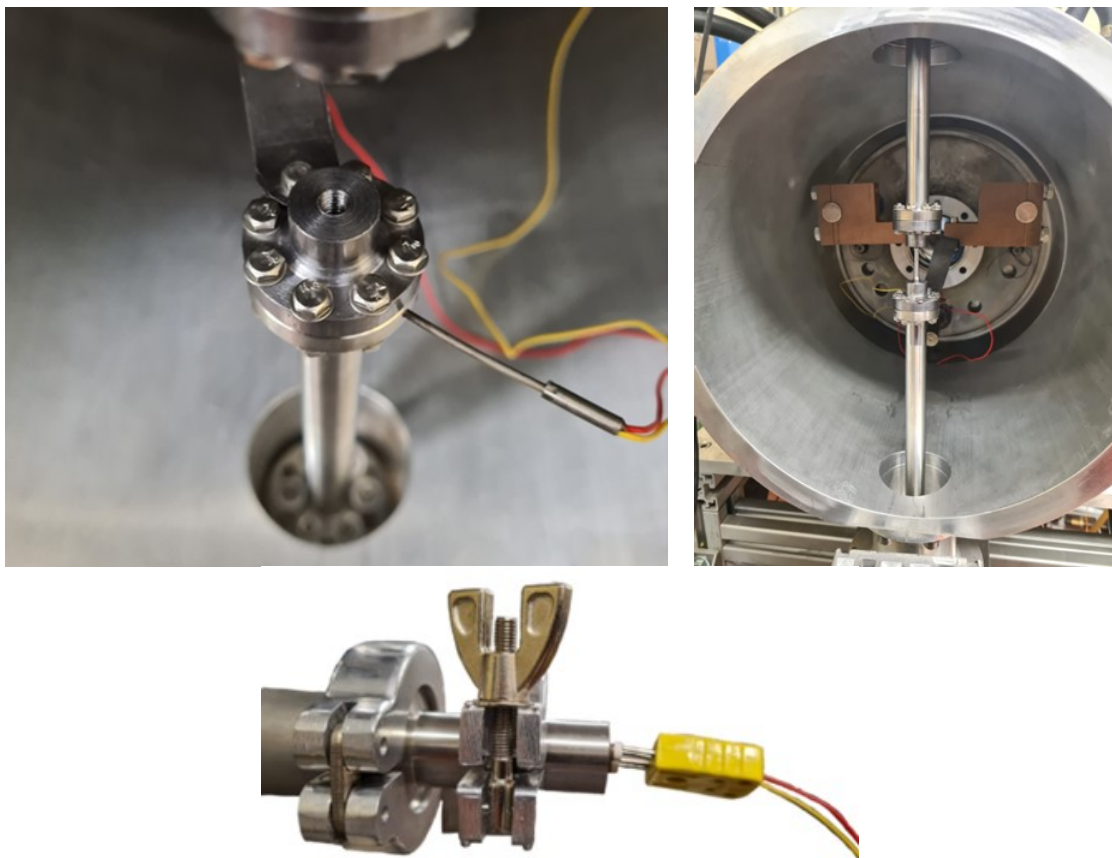


Figura 4.18: Termocoppia di tipo K inserita nel foro presente nell'albero in acciaio (in alto a sinistra); Cavi della termocoppia che vanno nel condotto di spirazione posto nel retro della camera (in alto a destra); Uscita dei cavi della termocoppia tramite una flangia CF16 (in basso).

4.8 Risultati delle analisi FEM

Prima di condurre i test sono state effettuate delle analisi FEM su software ANSYS per ricavare l'andamento della temperatura in corrispondenza della sezione ristretta del provino e del punto in cui andrà posizionata la termocoppia al variare della corrente. Per quanto riguarda mesh, vincoli e condizioni al contorno queste analisi sono state identiche a quelle esposte nel paragrafo 4.3 e vengono riprese in Figura 4.19.

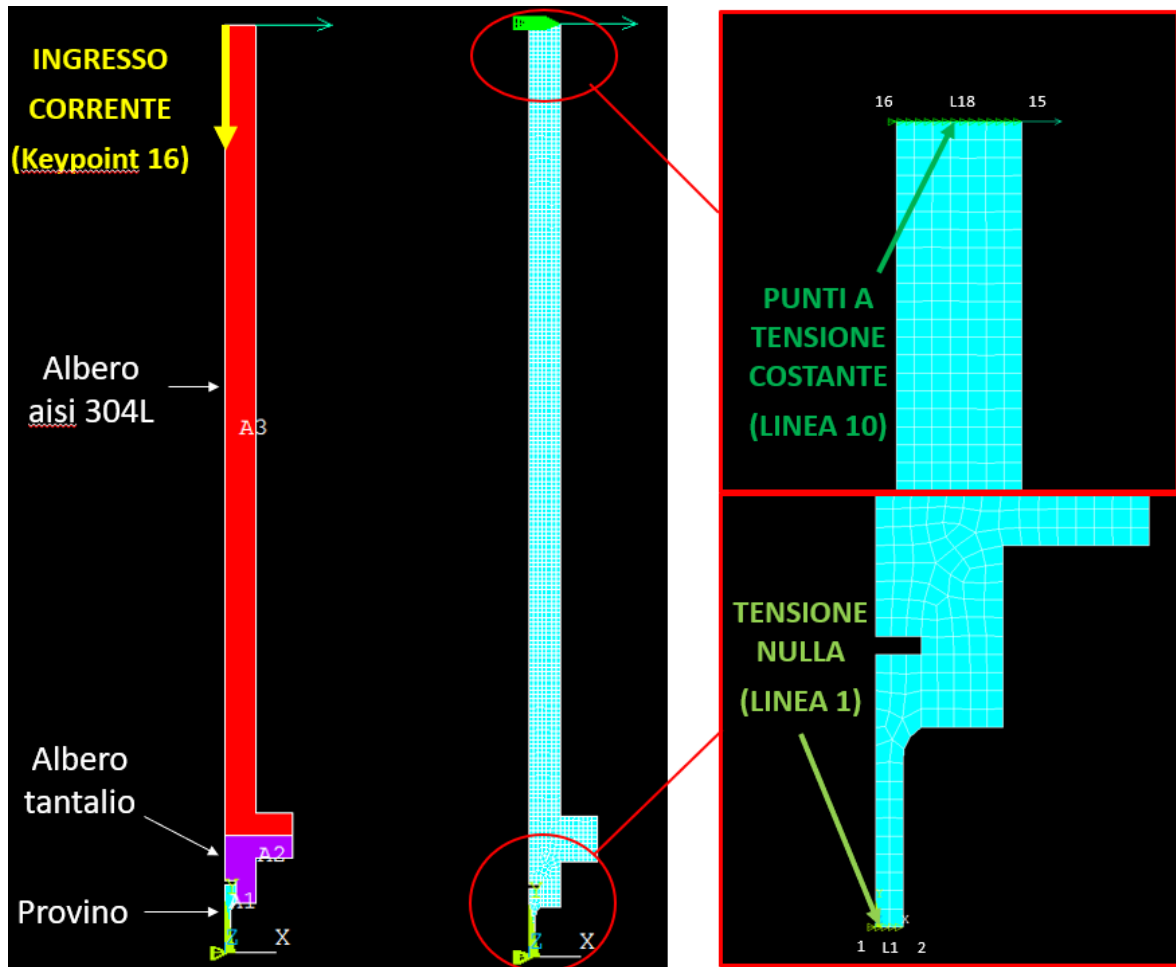


Figura 4.19: Aree, mesh, vincoli e condizioni al contorno dell'analisi FEM.

In Figura 4.20 viene visualizzata una delle soluzioni relative alle analisi FEM. Nell'immagine, in particolare, vengono illustrati i punti dei quali verranno riportate le temperature da confrontare con quelle ricavate dai test tramite il pirometro (in corrispondenza del provino) e dalla termocoppia (in corrispondenza della flangia). Per semplicità chiameremo rispettivamente queste due variabili "temperatura provino" e "temperatura flangia".

I risultati sono stati raccolti in tabelle e grafici presenti in Figura 4.21 (provino in tantalio), Figura 4.22 (provino in acciaio) e Figura 4.23 (provino in molibdeno). Viene fatto osservare che le simulazioni riguardanti il molibdeno e il tantalio si sono fermate rispettivamente ad un valore di corrente pari a 210 A e 190 A per non convergenza delle soluzioni.

Lo scopo di queste analisi è stato quello di verificare la corrispondenza tra i dati analitici e quelli sperimentali. Dopo aver verificato l'affidabilità delle simulazioni si potrà procedere con le verifiche strutturali, le quali dipendono dalle temperature raggiunte dai componenti in condizioni di esercizio.

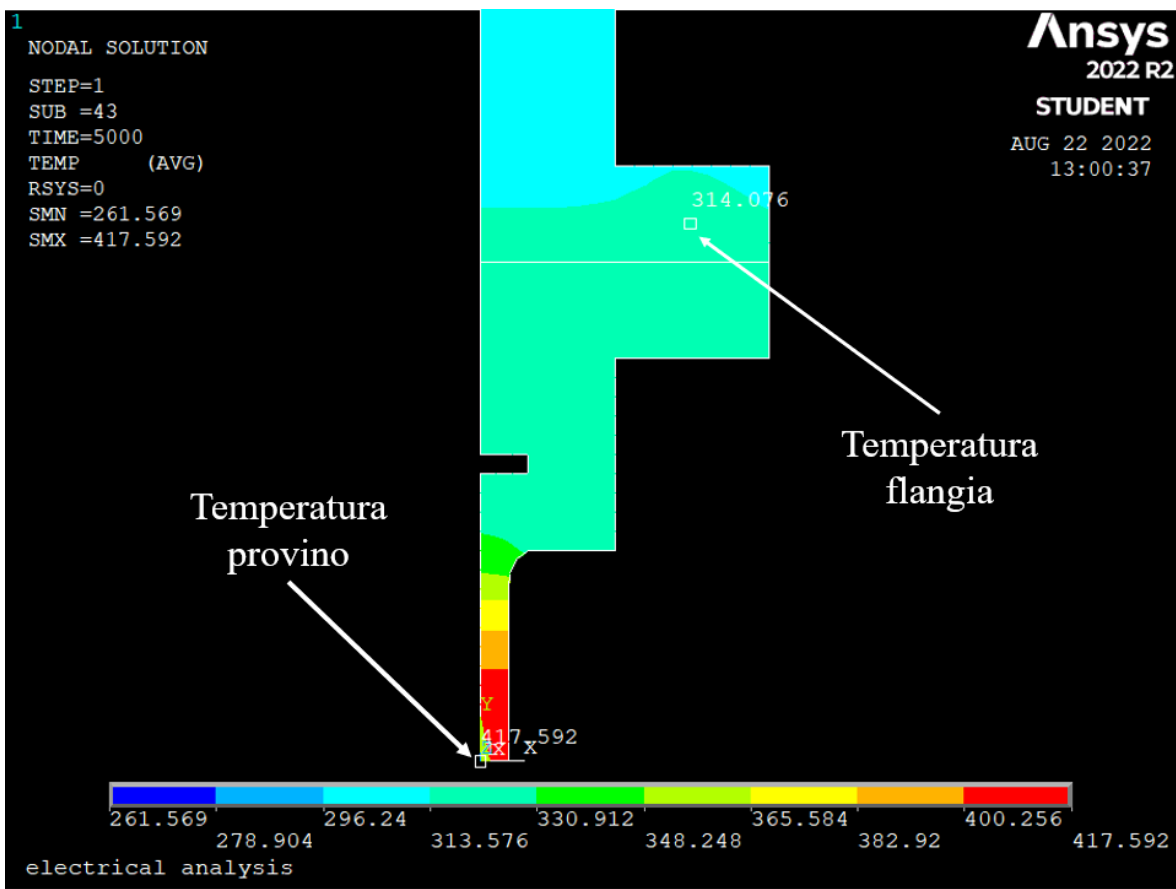
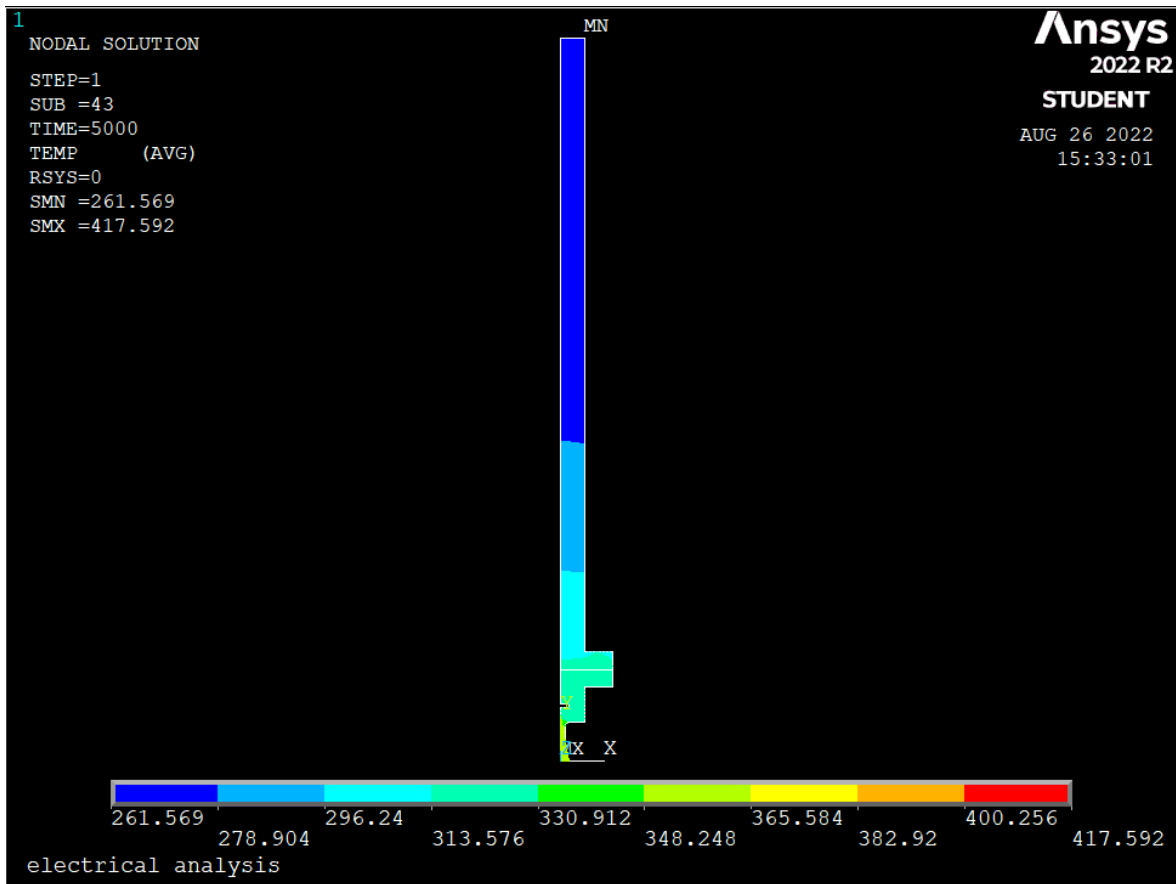


Figura 4.20: Soluzione di una delle analisi FEM con dettaglio sui punti presi in considerazione per ottenere i grafici Intensità di corrente vs Temperatura.

CORRENTE (A)	T Flangia (°C)	T Provino Tantalio (°C)
20	30	31
30	36	39
40	45	50
50	56	65
60	70	84
70	87	107
80	106	134
90	128	167
100	153	205
110	181	248
120	211	298
130	243	354
140	278	417
150	313	488
160	351	566
170	389	651
180	429	744
190	545	943

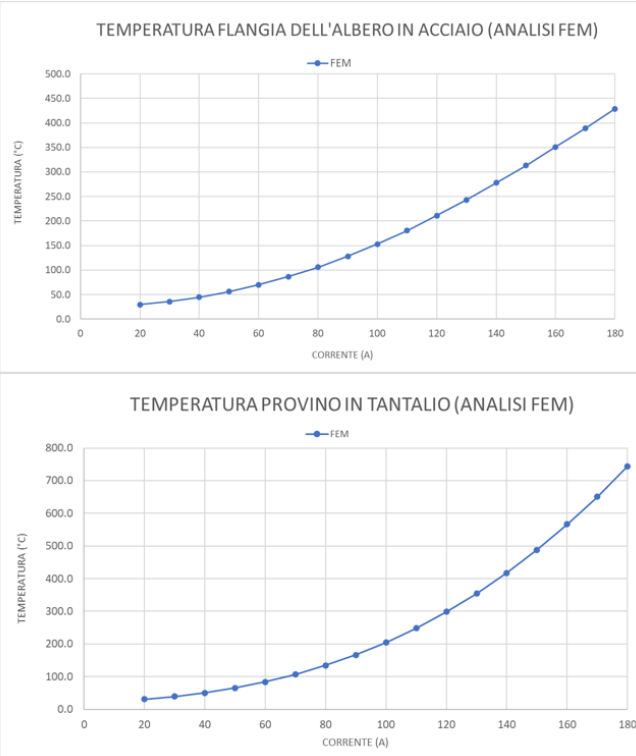


Figura 4.21: Tabella e grafici delle temperature relative alla flangia dell'albero in acciaio e al provino in tantalio derivanti dalle analisi FEM. Analisi svolte con le geometrie dei componenti riprogettati per il sistema di test dei LNL.

Corrente (A)	T Flangia (°C)	T Provino Acciaio (°C)
10	42	45
20	84	100
30	138	174
40	195	263
50	253	364
60	311	479
70	367	605
80	420	739
90	472	879
100	520	1023

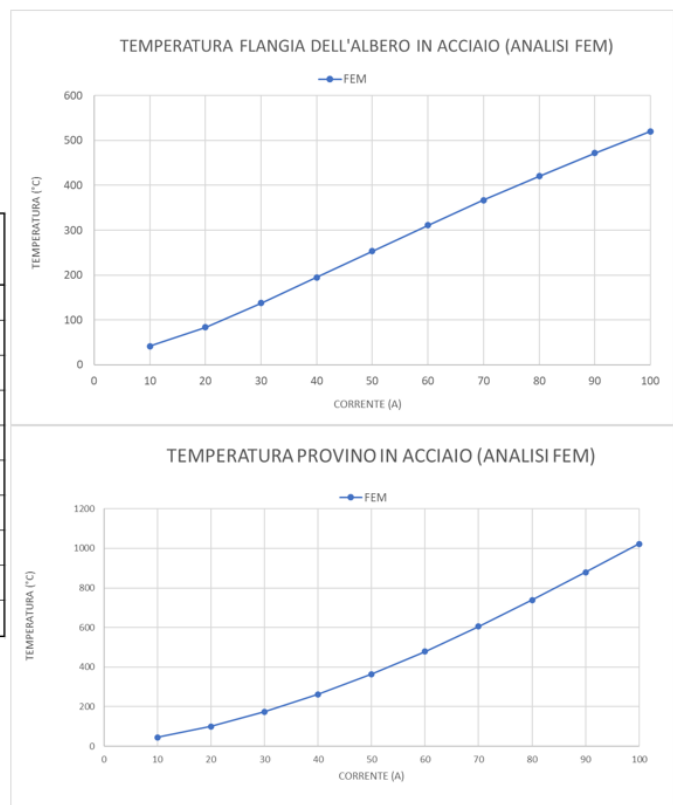


Figura 4.22: Tabella e grafici delle temperature relative alla flangia dell'albero in acciaio e al provino in acciaio derivanti dalle analisi FEM. Analisi svolte con le geometrie dei componenti riprogettati per il sistema di test dei LNL.

Corrente (A)	T Flangia (°C)	T Provino Molibdeno (°C)
10	28	28
20	38	38
30	53	54
40	72	73
50	93	95
60	116	120
70	139	145
80	163	170
90	186	196
100	209	222
110	232	249
120	255	277
130	279	305
140	302	335
150	325	365
160	348	397
170	372	430
180	395	464
190	419	500
200	442	539
210	467	579

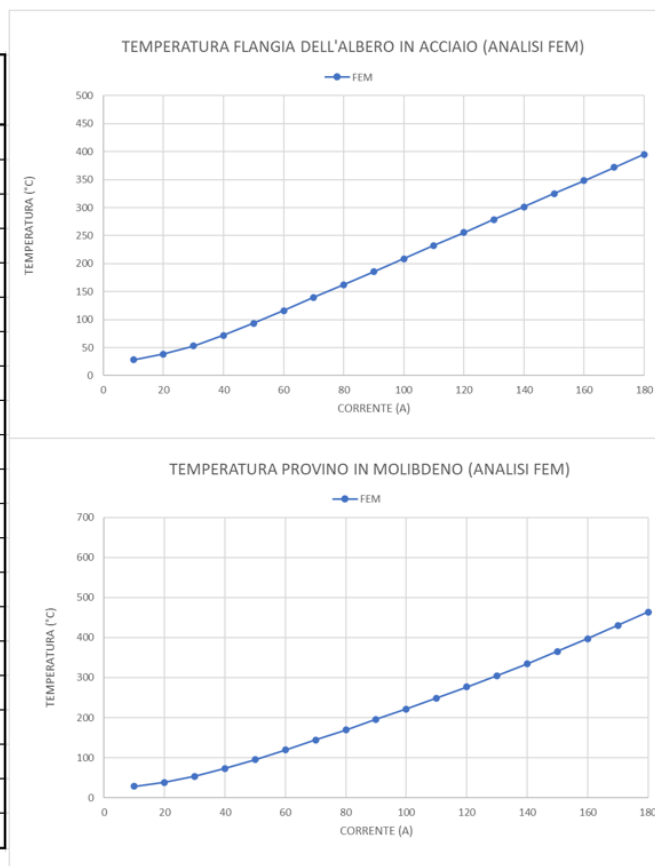


Figura 4.23: Tabella e grafici delle temperature relative alla flangia dell'albero in acciaio e al provino in molibdeno derivanti dalle analisi FEM. Analisi svolte con le geometrie dei componenti riprogettati per il sistema di test dei LNL.

4.9 Procedura per i test

Per prima cosa i componenti destinati alla camera da vuoto devono essere ripuliti tramite ultrasuoni in acqua distillata, asciugati e passati con dell'acetone. Da ripulire con attenzione sono anche le finestre di osservazione in modo che non vi siano impurità che potrebbero compromettere la misura del pirometro. Dopo aver sostituito gli alberi per prove a compressione con quelli progettati per prove a trazione (Figura 4.7 e Figura 4.8), vengono posizionate in serie la transizione e la camera con tanto di alberi e sistema di movimentazione. Successivamente, tramite due collegamenti bullonati, vengono fissate le lamine in tantalio al morsetto in rame e all'albero in acciaio inferiore. Nella parte superiore, appena sotto alla flangia sulla quale è fissata la cella di carico, viene incastrata una delle due estremità della treccia. L'altra estremità viene invece fissata al cavo di alimentazione. A questo punto è possibile posizionare il provino tra i due alberi in tantalio e avvitare contemporaneamente le sue due estremità andando ad abbassare man mano l'albero superiore tramite il sistema di movimentazione. Dopo aver acceso l'alimentazione e l'acquisizione della cella di carico e posizionato la termocoppia si può procedere alla chiusura della camera tramite l'apposito coperchio. Il vuoto verrà generato tramite la pompa volumetrica e la pompa turbomolecolare poste in serie. Attendendo di raggiungere le pressioni desiderate si va a posizionare il pirometro frontalmente al coperchio facendo in modo di vedere il provino attraverso la finestra di osservazione. Una volta raggiunta una pressione dell'ordine dei 10^{-6} mbar viene acceso l'alimentatore impostandolo al valore di massima tensione. La corrente viene quindi aumentata di 5-10 A alla volta fino al raggiungimento della temperatura desiderata da parte del provino. Durante la fase di riscaldamento gli alberi tenderanno ad espandersi ponendo il provino in uno stato di compressione. Andrà quindi riportato il valore della cella di carico a quello originario, andando ad agire sul sistema di movimentazione (Figura 4.24). Prima di cominciare la prova è importante verificare che il sistema di raffreddamento sia in funzione controllando il flussimetro.

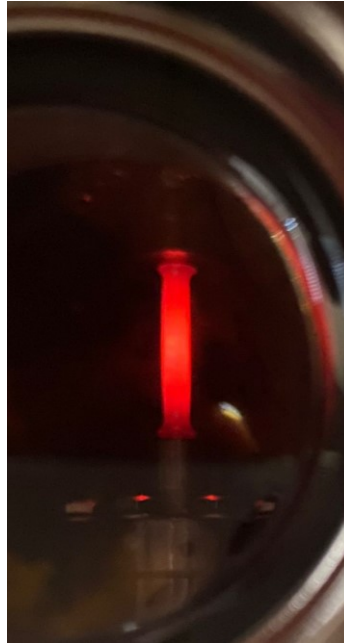


Figura 4.24: Provino compresso con un principio di barreling per via dell'espansione degli alberi.

Una volta raggiunta la temperatura di prova si può cominciare a tirare il provino. Durante i test sono necessarie 3 persone: una che tramite il sistema di movimentazione tiri il provino, una che monitori la temperatura tramite il pirometro e una che modifichi la corrente per far sì che la temperatura del provino resti costante. L'operatore che si occupa della movimentazione degli alberi utilizza una chiave a bussola per ruotare la vite trapezia posta nella sommità del sistema di prova (Figura 4.25 a sinistra).

Durante la prova verrà inoltre ripresa la schermata in cui compariranno i dati della cella di carico per ricavare l'andamento della tensione nel tempo. Da osservare che al termine della prova, quindi successivamente alla rottura del provino, la cella di carico segnerà un valore pari al suo zero, corrispondente ad una tensione nulla.

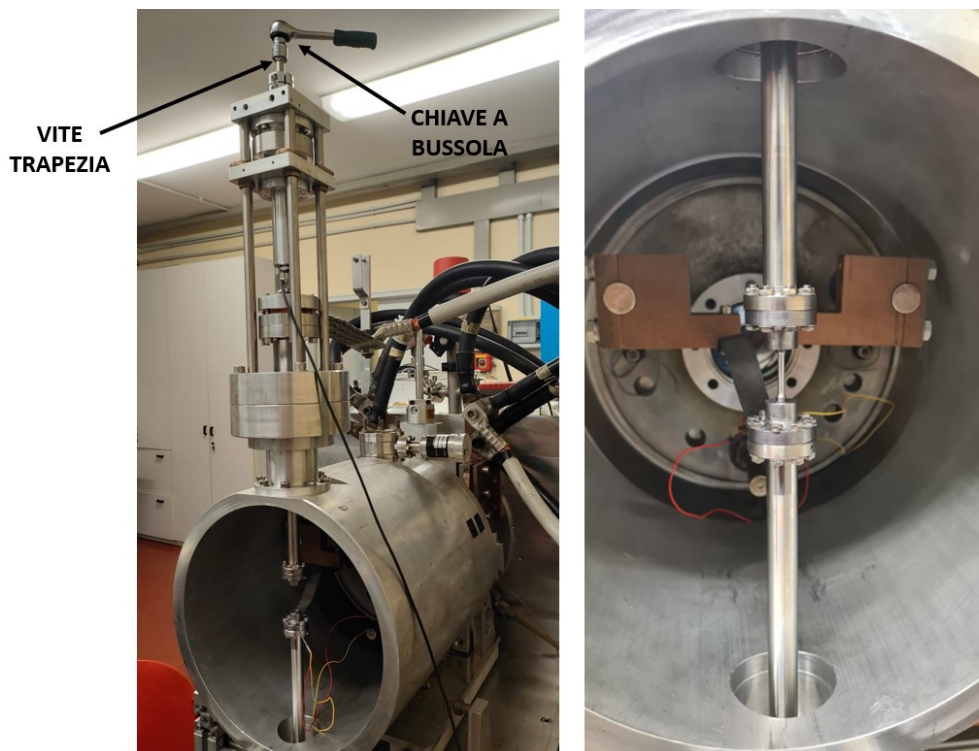


Figura 4.25: assieme montato senza coperchio (a sinistra); provino avvitato ai due alberi in tantalio (a destra)

4.10 Risultati sperimentali

In seguito verranno riportati i risultati riguardanti:

- andamento della tensione durante la prova;
- temperatura (ricavata tramite termocoppia e pirometro) in funzione dell'intensità di corrente durante la fase di riscaldamento del provino.

Durante le prove sono stati monitorati il tempo, l'intensità di corrente imposta, la tensione dell'alimentatore, la tensione misurata dal multimetro, le temperature misurate dal pirometro e dalla termocoppia, la tensione registrata dalla cella di carico e la pressione interna della camera.

Per la stima della tensione di rottura a partire dai dati ricavati dalla cella di carico è stata utilizzata la seguente formula:

$$\sigma(t) = \frac{(U_{cella\ di\ carico}(t) - U_{zero}) \cdot F_{nom}}{A \cdot U_0 \cdot c}$$

Dove:

- A è l'area della sezione ristretta del provino [mm^2];
- $U_{cella\ di\ carico}$ è la tensione misurata al tempo t dalla cella di carico e letta nel display [mV];
- U_{zero} è lo zero della cella di carico [mV] che va sottratto a $U_{cella\ di\ carico}$ per ottenere lo sbilanciamento della cella di carico;
- F_{nom} è la forza nominale del trasduttore pari a 10000 N;
- U_0 è la tensione di alimentazione che corrisponde a 5 V;
- c è la sensibilità che è pari a 1.0018 mV/V.

4.10.1 Provini in acciaio aisi 304

Per quanto riguarda il provino in acciaio sono stati testati 4 provini in vuoto a temperatura di 750 °C (test che nei grafici verranno richiamati come TEST 1, TEST 2, TEST 3 e TEST 4) e un provino a temperatura ambiente in aria.

4.10.1.1 Test in aria a temperatura ambiente

In seguito viene riportato il grafico relativo all'andamento della tensione nel tempo e la tabella dei dati ricavati dalla cella di carico.

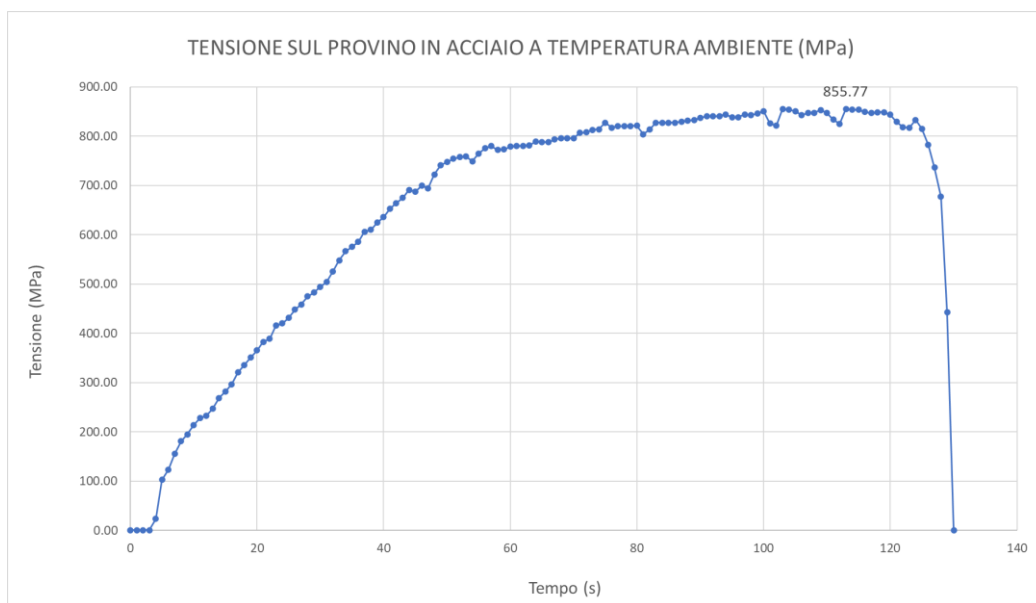


Figura 4.26: Grafico tempo vs tensione nel provino in acciaio aisi 304 durante la prova a temperatura ambiente.

Tempo (s)	cella di carico (mV)	Forza (N)	Tensione (MPa)
0	0.121	2.00	0.28
1	0.121	2.00	0.28
2	0.121	2.00	0.28
3	0.121	2.00	0.28
4	0.202	163.71	23.16
5	0.483	724.70	102.52
6	0.557	872.43	123.42
7	0.67	1098.02	155.34
8	0.761	1279.70	181.04
9	0.8101	1377.72	194.91
10	0.878	1513.28	214.08
11	0.926	1609.10	227.64
12	0.945	1647.04	233.01
13	0.994	1744.86	246.85
14	1.072	1900.58	268.88
15	1.117	1990.42	281.59
16	1.171	2098.22	296.84
17	1.256	2267.92	320.84
18	1.309	2373.73	335.81
19	1.363	2481.53	351.07
20	1.413	2581.35	365.19
21	1.475	2705.13	382.70
22	1.496	2747.06	388.63
23	1.591	2936.71	415.46
24	1.607	2968.66	419.98
25	1.648	3050.51	431.56
26	1.706	3166.30	447.94
27	1.744	3242.16	458.67
28	1.802	3357.96	475.05
29	1.829	3411.86	482.68
30	1.871	3495.71	494.54
31	1.905	3563.59	504.14
32	1.982	3717.31	525.89
33	2.06	3873.03	547.92
34	2.127	4006.79	566.84
35	2.157	4066.68	575.32
36	2.193	4138.55	585.49
37	2.267	4286.28	606.39
38	2.281	4314.23	610.34
39	2.332	4416.05	624.74
40	2.371	4493.91	635.76
41	2.431	4613.70	652.70
42	2.472	4695.55	664.28
43	2.509	4769.42	674.73
44	2.568	4887.20	691.40
45	2.555	4861.25	687.73
46	2.596	4943.10	699.31
47	2.579	4909.16	694.50
48	2.678	5106.81	722.47
49	2.745	5240.57	741.39
50	2.768	5286.48	747.88
51	2.79	5330.41	754.10
52	2.803	5356.36	757.77
53	2.807	5364.34	758.90
54	2.774	5298.46	749.58
55	2.829	5408.27	765.11
56	2.866	5482.13	775.56
57	2.882	5514.07	780.08
58	2.854	5458.18	772.17
59	2.859	5468.16	773.59
60	2.878	5506.09	778.95
61	2.882	5514.07	780.08
62	2.884	5518.07	780.65
63	2.887	5524.06	781.49
64	2.914	5577.96	789.12
65	2.912	5573.97	788.56

Tempo (s)	cella di carico (mV)	Forza (N)	Tensione (MPa)
65	2.912	5573.97	788.56
66	2.91	5569.97	787.99
67	2.93	5609.90	793.64
68	2.939	5627.87	796.18
69	2.938	5625.87	795.90
70	2.94	5629.87	796.46
71	2.976	5701.74	806.63
72	2.98	5709.72	807.76
73	2.998	5745.66	812.84
74	3.003	5755.64	814.26
75	3.05	5849.47	827.53
76	3.015	5779.60	817.65
77	3.024	5797.56	820.19
78	3.027	5803.55	821.03
79	3.027	5803.55	821.03
80	3.028	5805.55	821.32
81	2.967	5683.77	804.09
82	3	5749.65	813.41
83	3.05	5849.47	827.53
84	3.05	5849.47	827.53
85	3.05	5849.47	827.53
86	3.05	5849.47	827.53
87	3.059	5867.44	830.07
88	3.063	5875.42	831.20
89	3.069	5887.40	832.90
90	3.084	5917.35	837.13
91	3.097	5943.30	840.81
92	3.095	5939.31	840.24
93	3.098	5945.30	841.09
94	3.11	5969.26	844.48
95	3.087	5923.34	837.98
96	3.09	5929.33	838.83
97	3.11	5969.26	844.48
98	3.103	5955.28	842.50
99	3.118	5985.23	846.74
100	3.132	6013.18	850.69
101	3.044	5837.49	825.84
102	3.031	5811.54	822.16
103	3.149	6047.12	855.49
104	3.143	6035.14	853.80
105	3.134	6017.17	851.26
106	3.104	5957.28	842.78
107	3.121	5991.22	847.58
108	3.122	5993.21	847.87
109	3.141	6031.14	853.23
110	3.119	5987.22	847.02
111	3.071	5891.40	833.46
112	3.043	5835.50	825.55
113	3.15	6049.11	855.77
114	3.143	6035.14	853.80
115	3.143	6035.14	853.80
116	3.127	6003.19	849.28
117	3.119	5987.22	847.02
118	3.125	5999.20	848.71
119	3.126	6001.20	849.00
120	3.108	5965.26	843.91
121	3.056	5861.45	829.23
122	3.019	5787.58	818.78
123	3.013	5775.60	817.08
124	3.07	5889.40	833.18
125	3.007	5763.63	815.39
126	2.889	5528.05	782.06
127	2.727	5204.63	736.30
128	2.517	4785.39	676.99
129	1.687	3128.37	442.57
130	0.12	0.00	0.00

Tabella 4.1: Dati ricavati dalla cella di carico nei diversi istanti di tempo tradotti in termini di forza [N] e tensione [MPa].

Da questi test è risultata una tensione di rottura di 855 MPa.

4.10.1.2 Test in vuoto a 750 °C

In seguito vengono riportati i grafici dei dati relativi alla rampa per portare il provino in temperatura e quelli relativi all'andamento delle temperature misurate dal pirometro e dalla termocoppia. Questi dati sono stati messi a confronto con i risultati ricavati dalle analisi FEM. È stato inoltre plottato l'andamento della tensione nel tempo. Sono poi presenti le tabelle riguardanti i dati ricavati durante la fase di riscaldamento e quelli ricavati dalla cella di carico durante la prova.

ORARIO	tempo (min)	Corrente (A)	V alimentatore (V)	V tester (V)	T Flangia (°C)	T Provino (°C)	cella di carico (mV)	Pressione ($\times 10^{-6}$ mbar)
15.20	0	10	0.13	0.13	22.8	/	-0.156	10
15.23	3	20	0.3	0.28	25.9	/	-0.152	10
15.26	6	30	45	0.37	32.5	/	-0.148	9.7
15.29	9	40	0.51	0.47	41	/	-0.136	9.2
15.32	12	50	0.64	0.58	55	/	-0.114	9.1
15.35	15	60	0.82	0.76	77	/	-0.121	9.9
15.38	18	70	0.97	0.91	90	620	-0.113	12
15.42	22	70	1.06	1	128	660	-0.12	11
15.47	27	70	1.09	1.01	172	718	-0.116	11
15.50	30	70	1.11	1.05	186	798	-0.129	11
15.52	32	65	1.02	0.98	196	754	-0.143	11
15.56	36	65	0.99	0.91	204	701	-0.118	10
16.00	40	65	1.01	0.94	214	700	-0.115	9.8
16.04	44	65	1.02	0.94	220	737	-0.122	9.9

Tabella 4.2: Tabella relativa ai dati presi in fase di riscaldamento del provino in acciaio aisi 304.

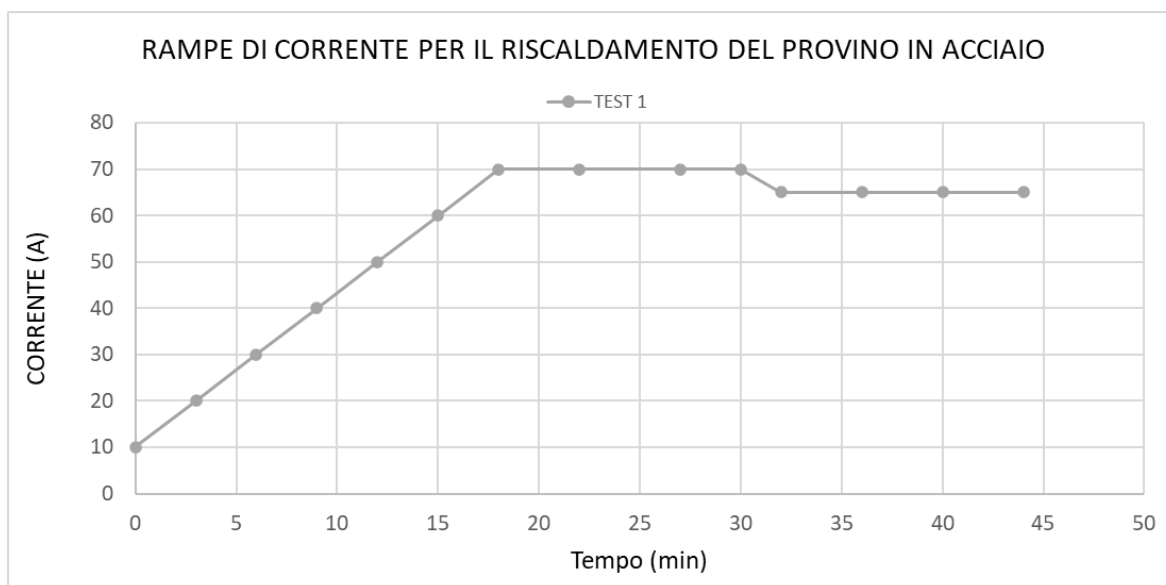


Figura 4.27: Rampe di riscaldamento per portare il provino in acciaio aisi 304 a 750°C durante il TEST 1.

In Tabella 4.2 e Figura 4.27 vengono riportati i dati rilevati durante la fase di riscaldamento e il grafico della rampa di riscaldamento del primo dei 4 test effettuati sui provini in acciaio aisi 304 (TEST 1).

In considerazione del fatto che il pirometro ha una soglia minima di temperatura misurabile di 650 °C fino al raggiungimento di un'intensità di corrente di 70 A il pirometro non ha registrato alcun dato.

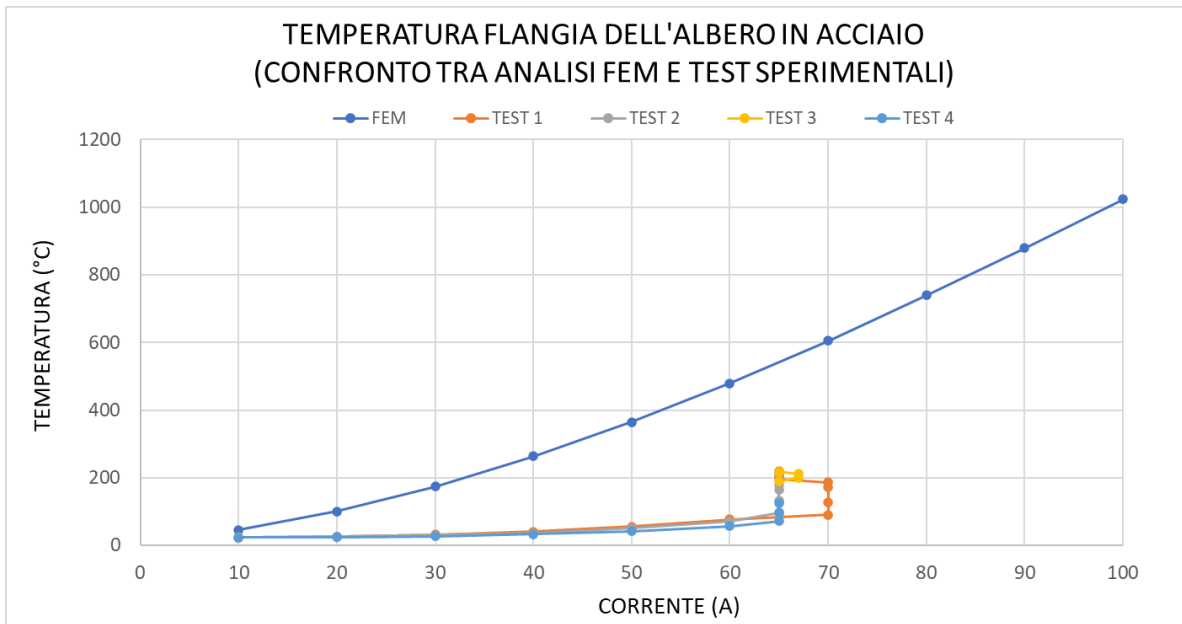


Figura 4.28: Confronto tra simulazioni FEM e test sperimentali dell'andamento della temperatura della flangia in acciaio (in funzione della corrente di riscaldamento).

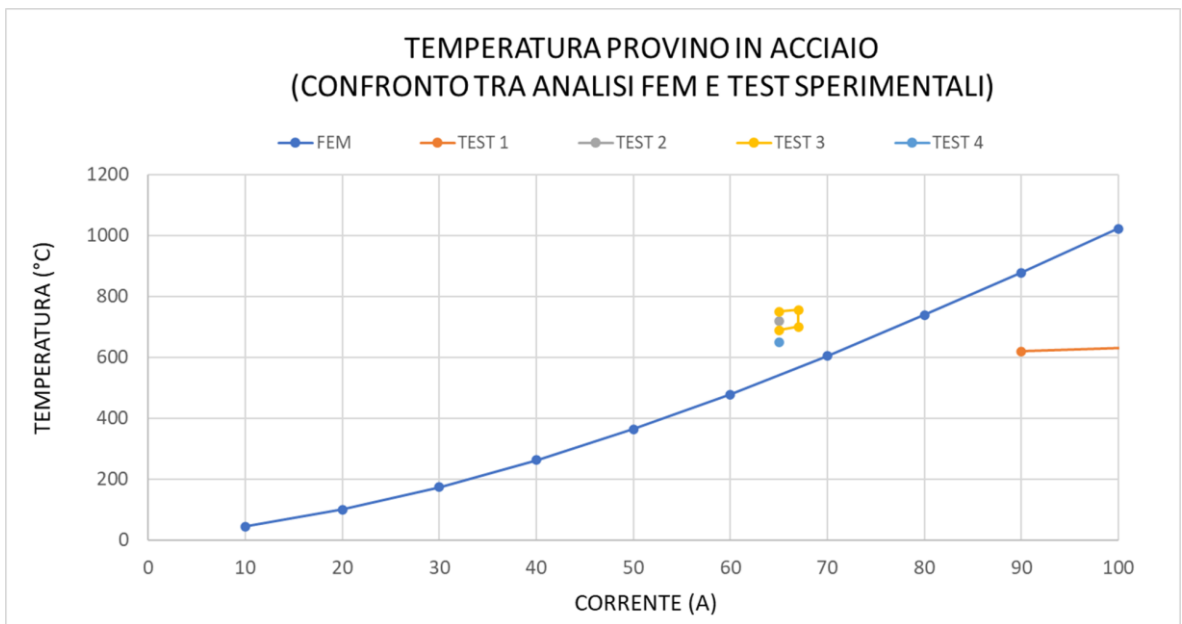


Figura 4.29: Confronto tra simulazioni FEM e test sperimentali dell'andamento della temperatura del provino in acciaio (in funzione della corrente di riscaldamento).

Da osservare come i tratti orizzontali del grafico in Figura 4.31 (tratti a corrente costante nel tempo) corrispondono ai tratti verticali in Figura 4.32 (aumento di temperatura a corrente costante). Questo accade perché la risposta agli incrementi di corrente in termini di aumento di temperatura non è istantanea.

Tempo (s)	cella di carico (mV)	Forza (N)	Tensione (MPa)
0	0.16	0.0	0.0
2	0.17	20.0	2.8
4	0.178	35.9	5.1
6	0.251	181.7	25.7
8	0.298	275.5	39.0
10	0.332	343.4	48.6
12	0.383	445.2	63.0
14	0.419	517.1	73.2
16	0.429	537.0	76.0
18	0.441	561.0	79.4
20	0.446	571.0	80.8
22	0.443	565.0	79.9
24	0.437	553.0	78.2
26	0.429	537.0	76.0
28	0.417	513.1	72.6
30	0.39	459.2	65.0
32	0.388	455.2	64.4
34	0.389	457.2	64.7
36	0.392	463.2	65.5
38	0.429	537.0	76.0
40	0.432	543.0	76.8
42	0.448	575.0	81.3
44	0.46	598.9	84.7
46	0.489	656.8	92.9
48	0.54	758.6	107.3
50	0.59	858.5	121.4
52	0.629	936.3	132.5
54	0.681	1040.1	147.1
56	0.691	1060.1	150.0
58	0.771	1219.8	172.6
60	0.805	1287.7	182.2
62	0.849	1375.5	194.6
64	0.9	1477.3	209.0
66	0.914	1505.3	213.0
68	0.955	1587.1	224.5
70	0.997	1671.0	236.4

Tempo (s)	cella di carico (mV)	Forza (N)	Tensione (MPa)
72	1.021	1718.9	243.2
74	1.027	1730.9	244.9
76	1.069	1814.7	256.7
78	1.081	1838.7	260.1
80	1.112	1900.6	268.9
82	1.14	1956.5	276.8
84	1.142	1960.5	277.3
86	1.157	1990.4	281.6
88	1.188	2052.3	290.3
90	1.185	2046.3	289.5
92	1.213	2102.2	297.4
94	1.25	2176.1	307.9
96	1.26	2196.0	310.7
98	1.264	2204.0	311.8
100	1.27	2216.0	313.5
102	1.262	2200.0	311.2
104	1.266	2208.0	312.4
106	1.271	2218.0	313.8
108	1.268	2212.0	312.9
110	1.22	2116.2	299.4
112	1.257	2190.1	309.8
114	1.233	2142.1	303.1
116	1.226	2128.2	301.1
118	1.215	2106.2	298.0
120	1.209	2094.2	296.3
122	1.196	2068.3	292.6
124	1.168	2012.4	284.7
126	1.126	1928.5	272.8
128	1.116	1908.6	270.0
130	1.031	1738.9	246.0
132	0.948	1573.2	222.6
134	0.906	1489.3	210.7
136	0.855	1387.5	196.3
138	0.162	4.0	0.6
140	0.162	4.0	0.6

Tabella 4.3: Dati ricavati dalla cella di carico nei diversi istanti di tempo tradotti in termini di forza [N] e tensione [MPa].

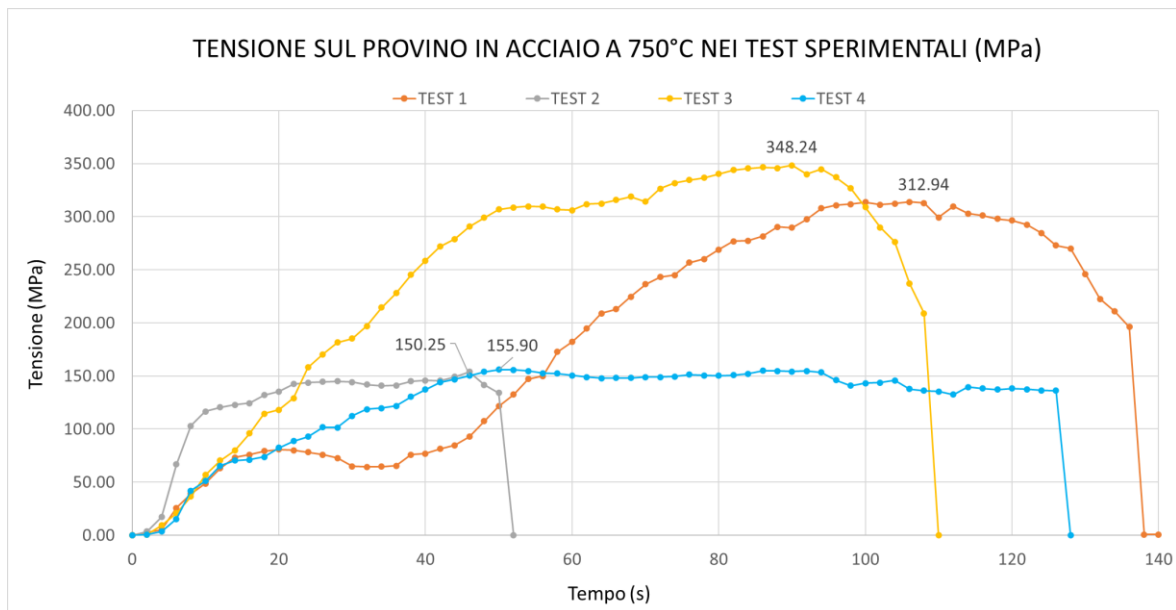


Figura 4.30: Grafico tempo vs tensione nel provino in acciaio aisi 304 durante i test con provino a 750 °C (TEST 1, TEST 2, TEST 3 e TEST 4).

Osservando le curve relative all'andamento della tensione nel tempo in Figura 4.30 si nota subito come la velocità media di risalita dell'albero mobile sia stata diversa in ognuna delle quattro prove. Il movimento dell'albero infatti non è automatico bensì determinato da un operatore che andava a ruotare la vite trapezia manualmente.

4.10.2 Provini in tantalio

L'unico provino in tantalio è stato testato in condizioni di vuoto ad una temperatura di 1000°C. In seguito vengono riportati i grafici dei dati relativi alla rampa per portare il provino in temperatura e quelli relativi all'andamento delle temperature misurate dal pirometro e dalla termocoppia. Questi dati sono stati messi a confronto con i risultati ricavati dalle analisi FEM. È stato inoltre plottato l'andamento della tensione nel tempo. Sono poi presenti le tabelle riguardanti i dati ricavati durante la fase di riscaldamento e quelli ricavati dalla cella di carico durante la prova.

ORARIO	tempo (min)	Corrente (A)	V alimentatore (V)	V tester (V)	T Flangia (°C)	T Provino (°C)	cella di carico (mV)	Pressione (x10 ⁻⁶ mbar)
14.45	0	10	0.9	0.086	25	/	-0.156	1.5
14.47	2	20	0.24	0.38	26	/	-0.154	1.5
14.49	4	30	0.38	0.33	31	/	-0.153	1.4
14.51	6	40	0.47	0.44	34	/	-0.153	1.4
14.53	8	50	0.53	0.47	42	/	-0.15	1.4
14.55	10	60	0.61	0.54	49	/	-0.146	1.4
14.57	12	70	0.69	0.62	57	/	-0.137	1.4
14.59	14	80	0.9	0.81	64	/	-0.123	1.4
15.01	16	90	0.98	0.89	72	/	-0.112	1.5
15.03	18	100	1.13	1.04	86	/	-0.109	1.5
15.05	20	110	1.25	1.12	100	/	-0.089	1.5
15.08	23	120	1.48	1.3	137	/	-0.133	1.9
15.10	25	130	1.5	1.37	167	/	-0.113	2.5
15.15	30	130	1.45	1.3	214	/	-0.043	2.5
15.21	36	130	1.56	1.42	289	666	-0.103	6.1
15.33	48	130	1.64	1.5	320	745	-0.132	5.1
15.42	57	130	1.43	1.5	350	710	-0.107	5.3
15.49	64	140	1.73	1.55	363	767	-0.114	5.9
15.55	70	140	1.59	1.56	369	750	-0.06	6.3
16.05	80	140	1.74	1.57	394	817	-0.127	6.8
16.31	106	140	1.72	1.54	406	782	-0.132	8.0
16.32	107	145	1.77	1.61	408	806	-0.123	6.1
16.34	109	150	1.82	1.67	413	828	-0.12	6.3
16.37	112	155	1.91	1.74	419	886	-0.116	7.2
16.40	115	160	1.95	1.78	426	907	-0.107	7.3
16.43	118	165	2.06	1.86	438	1070	-0.185	8.3

Tabella 4.4: Tabella relativa ai dati presi in fase di riscaldamento del provino in tantalio.

Anche in questo caso va considerato che il pirometro ha una soglia minima di temperatura misurabile di 650 °C, quindi fino al raggiungimento di un'intensità di corrente di 130 A il pirometro non ha registrato alcun dato.

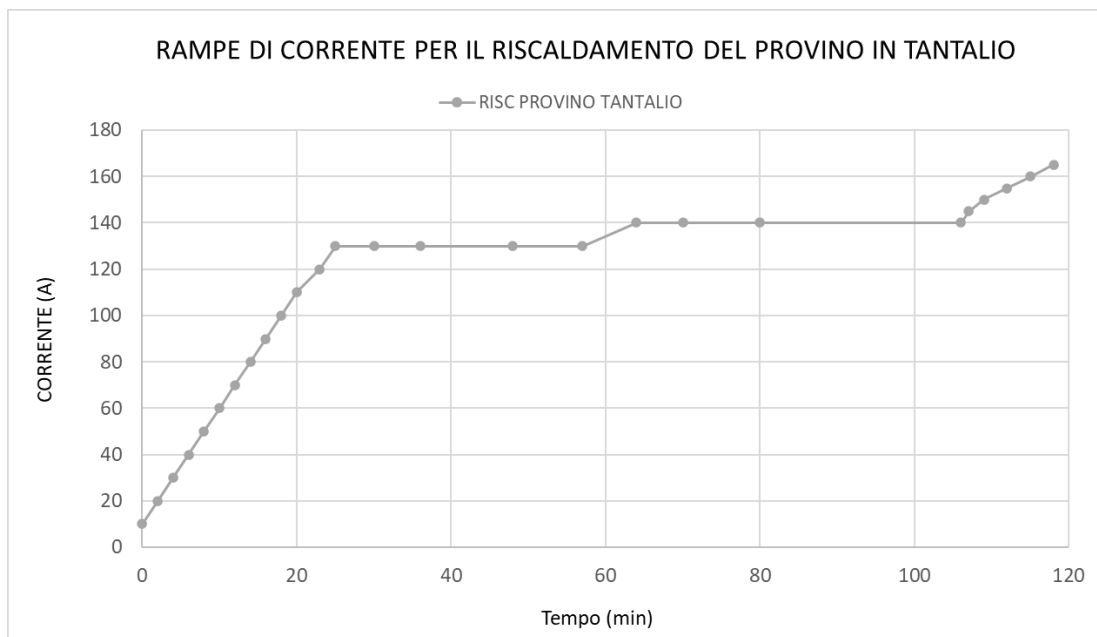


Figura 4.31: Rampe di riscaldamento per portare il provino in tantalio a 1000°C.

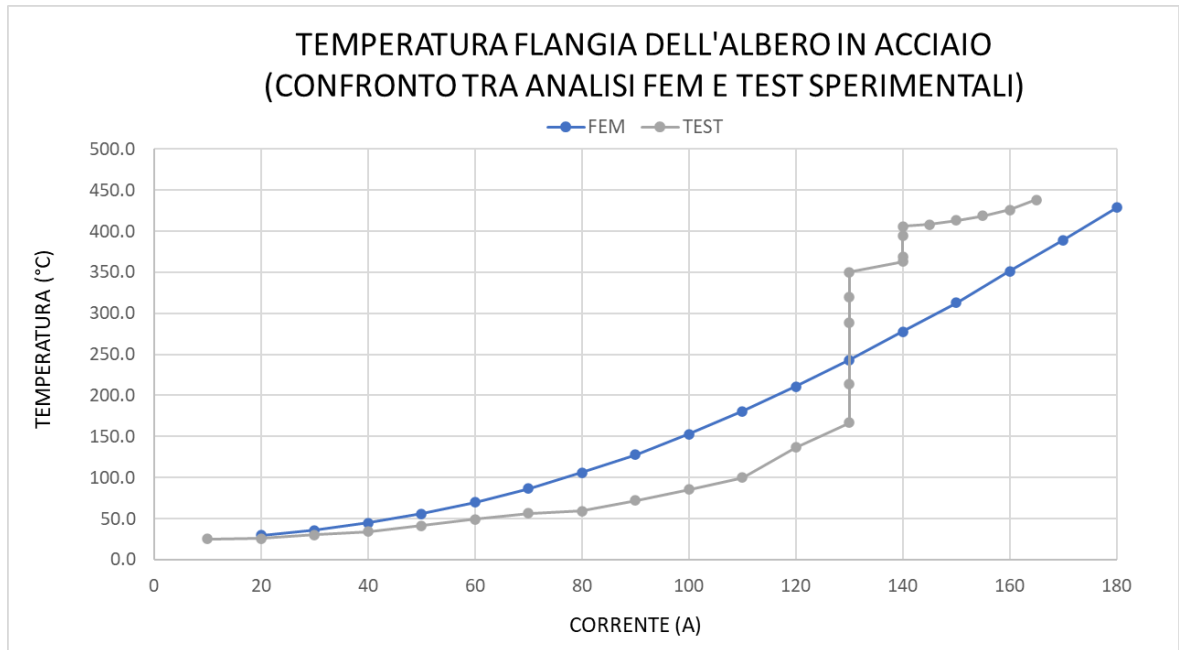


Figura 4.32: Confronto tra simulazioni FEM e test sperimentali dell'andamento della temperatura della flangia in acciaio (in funzione della corrente di riscaldamento).

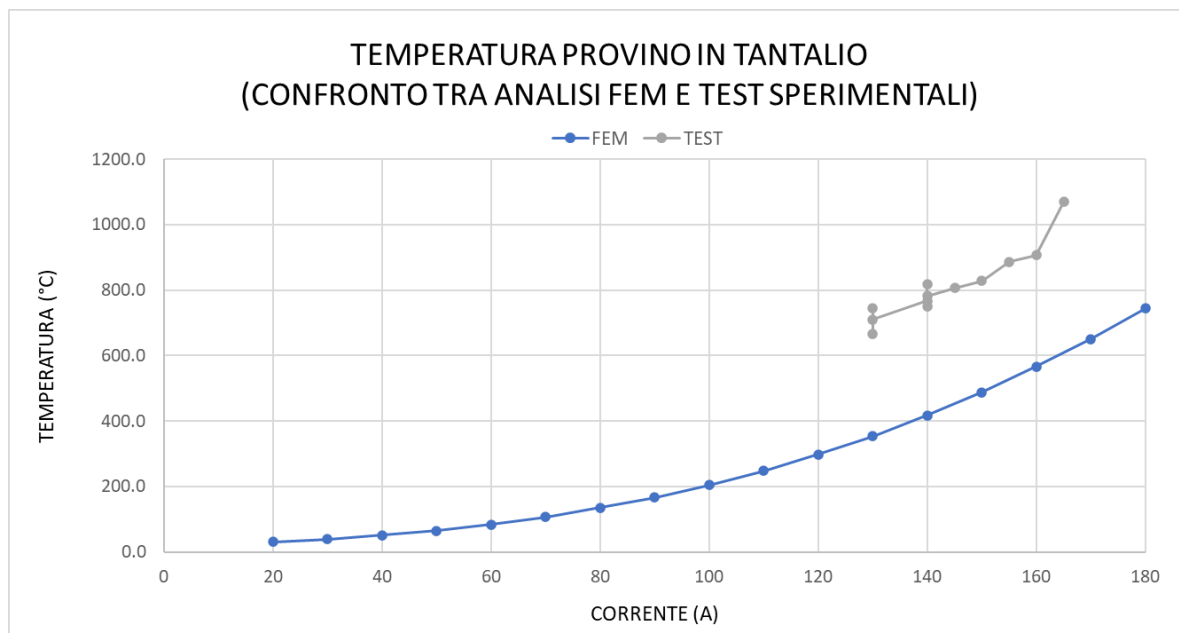


Figura 4.33: Confronto tra simulazioni FEM e test sperimentali dell'andamento della temperatura del provino in tantalio (in funzione della corrente di riscaldamento).

Anche in questo caso, come per i test sui provini in acciaio, i tratti orizzontali del grafico in Figura 4.31 (tratti a corrente costante nel tempo) corrispondono ai tratti verticali in Figura 4.32 (aumento di temperatura a corrente costante). Questo accade perché la risposta agli incrementi di corrente in termini di aumento di temperatura non è istantanea.

Tempo (s)	cella di carico (mV)	Forza (N)	Tensione (MPa)
10	0.166	11.98	1.69
20	0.163	5.99	0.85
30	0.224	127.77	18.08
40	0.226	131.76	18.64
50	0.216	111.80	15.82
60	0.232	143.74	20.34
70	0.225	129.77	18.36
80	0.225	129.77	18.36
90	0.227	133.76	18.92
100	0.254	187.66	26.55
110	0.262	203.63	28.81
120	0.286	251.55	35.59
130	0.292	263.53	37.28
140	0.301	281.49	39.82
150	0.333	345.38	48.86
160	0.347	373.33	52.82
170	0.370	419.25	59.31
180	0.393	465.16	65.81
190	0.438	555.00	78.52
200	0.477	632.86	89.53
210	0.479	636.85	90.10
220	0.484	646.84	91.51
230	0.493	664.80	94.05
240	0.498	674.79	95.46
250	0.504	686.76	97.16
258	0.513	704.73	99.70
271	0.528	734.68	103.94
280	0.530	738.67	104.50
288	0.537	752.65	106.48
300	0.518	714.71	101.11
310	0.476	630.86	89.25
320	0.252	183.67	25.98
330	0.239	157.72	22.31
334	0.238	155.72	22.03

Tabella 4.5: Dati ricavati dalla cella di carico nei diversi istanti di tempo tradotti in termini di forza [N] e tensione [MPa].

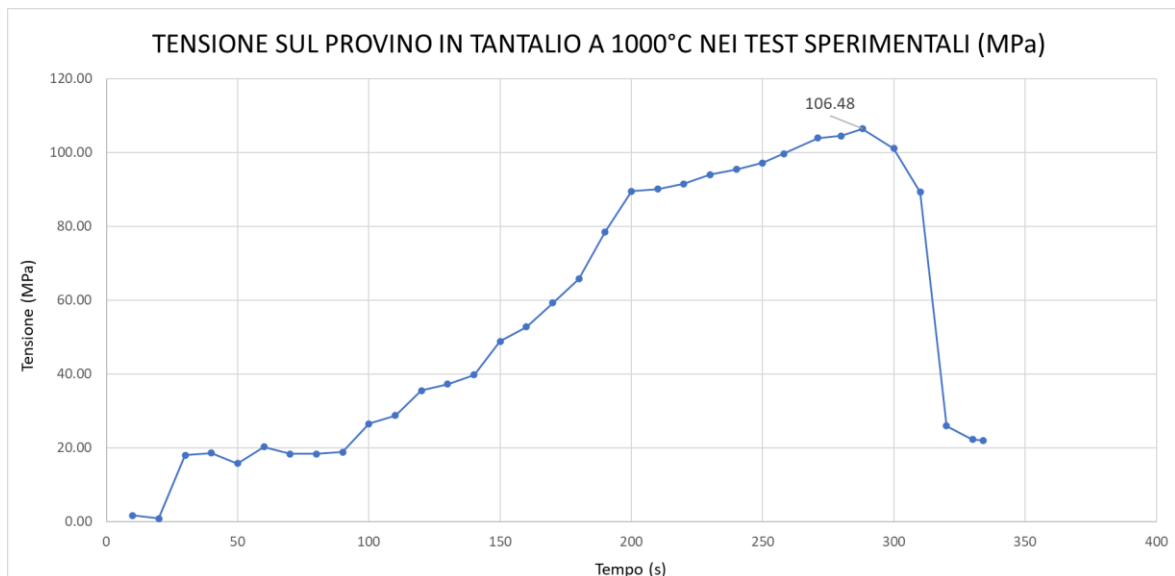


Figura 4.34: Grafico tempo vs tensione nel provino in tantalio durante i test con provino a 1000 °C.

Da questi test è risultata una tensione di rottura del provino in tantalio pari a 106,5 MPa ad una temperatura di 1000 °C. Essa risulta simile al dato ricavato da un altro studio sulle proprietà del tantalio [13] il quale riporta una tensione di rottura a 1000 °C di 120 MPa.

4.10.3 Provini in molibdeno

Il provino in molibdeno è stato testato in condizioni di vuoto ad una temperatura di 1000°C. In seguito vengono riportati i grafici dei dati relativi alla rampa per portare il provino in temperatura e quelli relativi all'andamento delle temperature misurate dal pirometro e dalla termocoppia. Questi dati sono stati messi a confronto con i risultati ricavati dalle analisi FEM. È stato inoltre plottato l'andamento della tensione nel tempo. Sono poi presenti le tabelle riguardanti i dati ricavati durante la fase di riscaldamento e quelli ricavati dalla cella di carico durante la prova.

ORARIO	Tempo (min)	Corrente (A)	V alimentatore (V)	V tester (V)	T Flangia (°C)	T Pirometro (°C)	Cella di carico (mV)	Pressione (x10 ⁻⁶ mbar)
18.08	0	10	0.09	0.08	25.0	/	-0.146	14
18.10	2	20	0.19	0.17	25.0	/	-0.145	13
18.12	4	30	0.29	0.26	25.6	/	-0.142	13
18.14	6	40	0.38	0.33	27.2	/	-0.136	12
18.16	8	50	0.48	0.45	30.0	/	-0.128	12
18.18	10	60	0.61	0.55	35.5	/	-0.127	12
18.2	12	70	0.80	0.73	40.0	/	-0.129	12
18.22	14	80	1.03	0.94	50.0	/	-0.124	12
18.24	16	90	1.13	1.03	61.5	/	-0.120	13
18.26	18	100	1.20	1.08	77.0	/	-0.119	13
18.28	20	110	1.21	1.09	98.0	/	-0.120	12
18.35	27	120	1.50	1.36	165.0	/	-0.128	13
18.38	30	130	1.44	1.29	190.0	/	-0.122	12
18.42	34	140	1.55	1.40	221.0	/	-0.123	13
18.46	38	150	1.85	1.65	275.0	/	-0.126	13

Tabella 4.6: Tabella relativa ai dati presi in fase di riscaldamento del provino in molibdeno.

Anche in questo caso va considerato che il pirometro ha una soglia minima di temperatura misurabile di 650 °C, quindi fino al raggiungimento di un'intensità di corrente di 130 A il pirometro non ha registrato alcun dato.

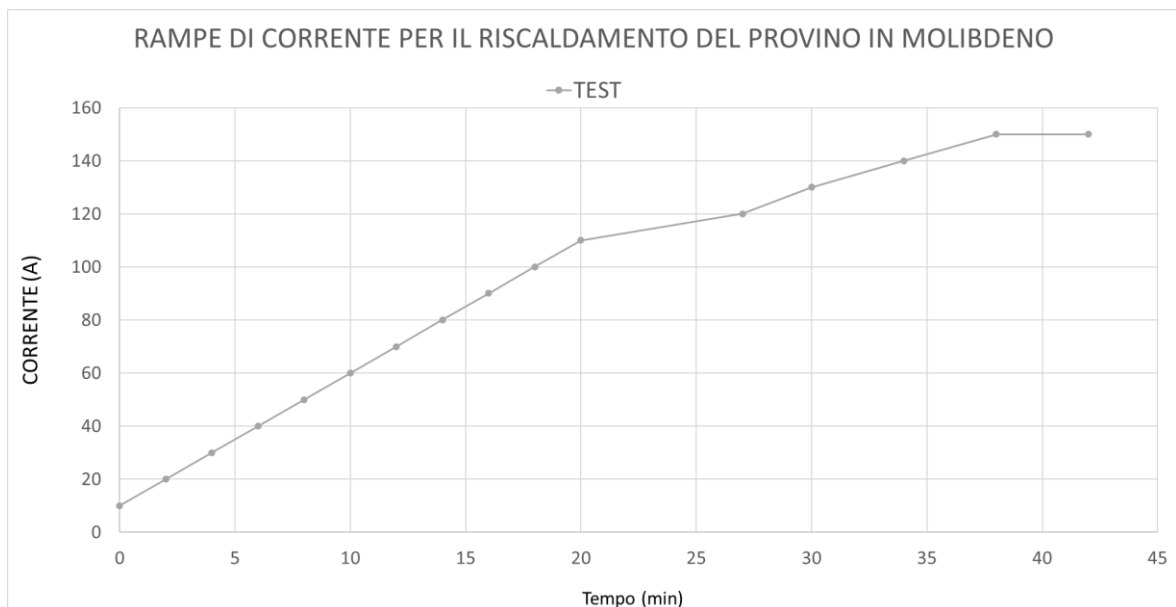


Figura 4.35: Rampe di riscaldamento per portare il provino in molibdeno a 1000°C.

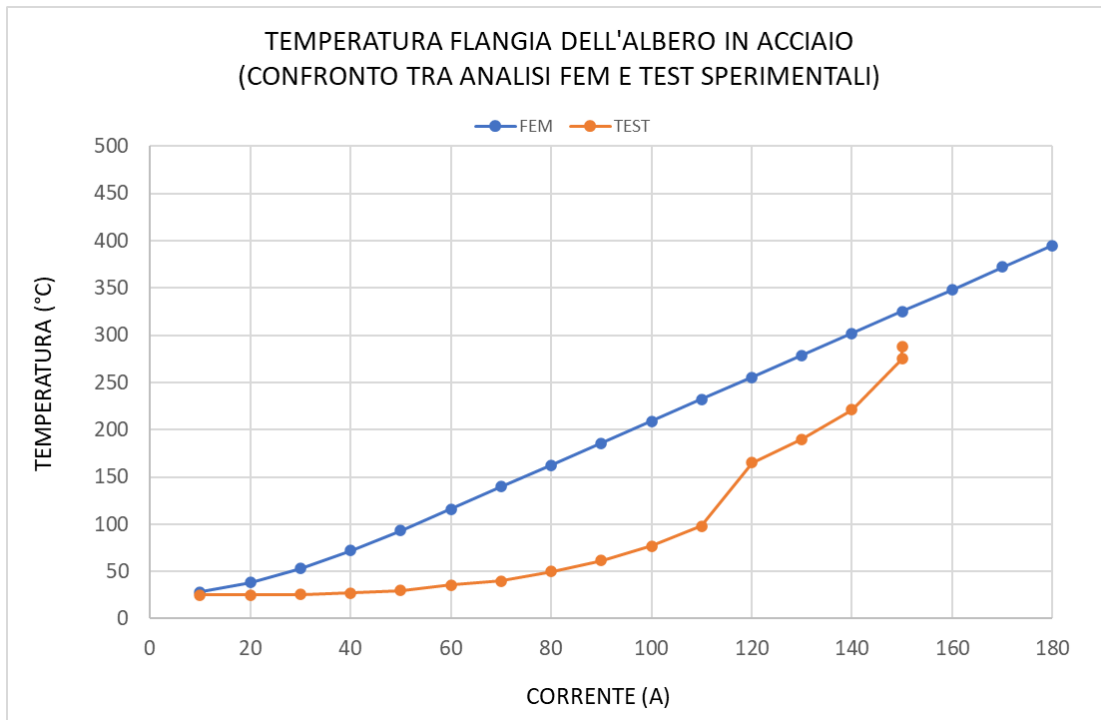


Figura 4.36: Confronto tra simulazioni FEM e test sperimentali dell'andamento della temperatura della flangia in acciaio (in funzione della corrente di riscaldamento).

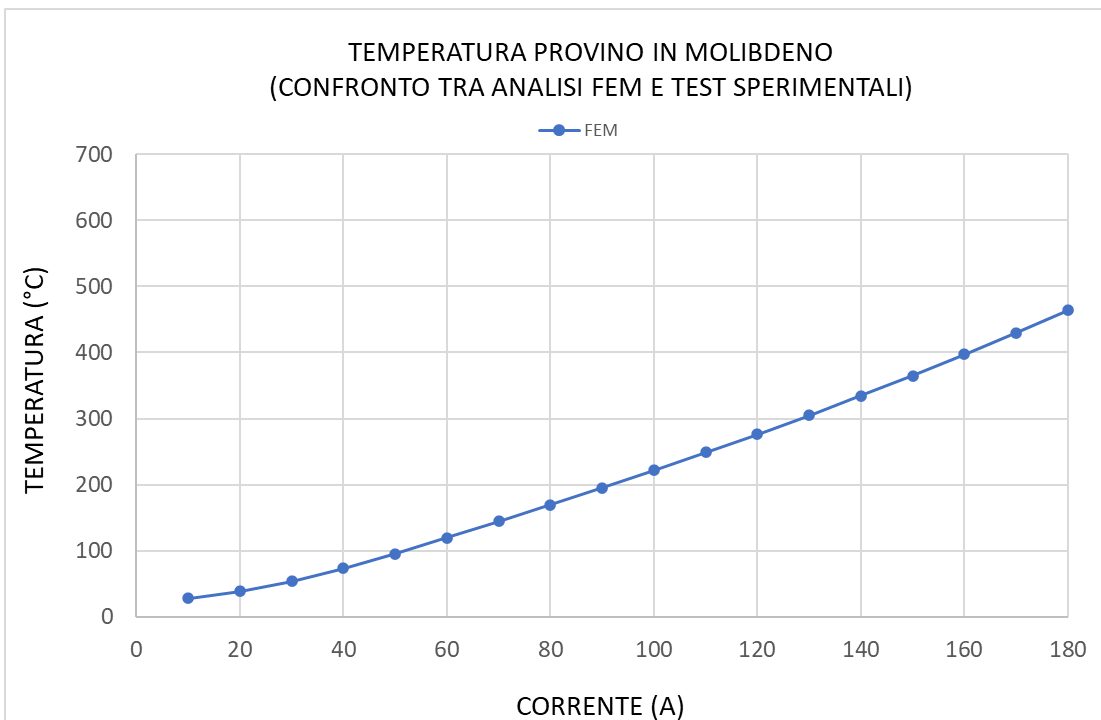


Figura 4.37: Confronto tra simulazioni FEM e test sperimentali dell'andamento della temperatura del provino in molibdeno (in funzione della corrente di riscaldamento).

I dati dei test sperimentali non sono disponibili perché è stato deciso di andare ad accelerare il processo di riscaldamento del provino alzando repentinamente la corrente e andandola poi ad abbassare in base alla temperatura del provino. In questa fase non sono stati quindi raccolti dati come fatto in precedenza,

Tempo (s)	Cella di carico (mV)	Forza (N)	Tensione (MPa)
0	0.17	0.00	0.00
2	0.177	13.97	1.98
4	0.193	45.92	6.50
6	0.238	135.76	19.21
8	0.284	227.59	32.20
10	0.417	493.11	69.76
12	0.598	854.46	120.88
14	0.69	1038.13	146.87
16	0.796	1249.75	176.80
18	0.939	1535.24	217.19
20	1.089	1834.70	259.56
22	1.101	1858.65	262.95
24	1.163	1982.43	280.46
26	1.323	2301.86	325.65
28	1.25	2156.12	305.03
30	1.244	2144.14	303.33
32	1.208	2072.27	293.17
34	1.172	2000.40	283.00
36	1.126	1908.56	270.01
38	1.06	1776.80	251.37
40	1.02	1696.95	240.07
42	0.978	1613.10	228.21
44	0.926	1509.28	213.52
46	0.876	1409.46	199.40
48	0.814	1285.69	181.89
50	0.77	1197.84	169.46
52	0.738	1133.96	160.42
54	0.732	1121.98	158.73
56	0.713	1084.05	153.36
58	0.673	1004.19	142.06
60	0.581	820.52	116.08
62	0.513	684.77	96.87
64	0.41	479.14	67.78
66	0.279	217.61	30.79
68	0.201	61.89	8.76
70	0.2	59.89	8.47

Tabella 4.7: Dati ricavati dalla cella di carico nei diversi istanti di tempo tradotti in termini di forza [N] e tensione [MPa].

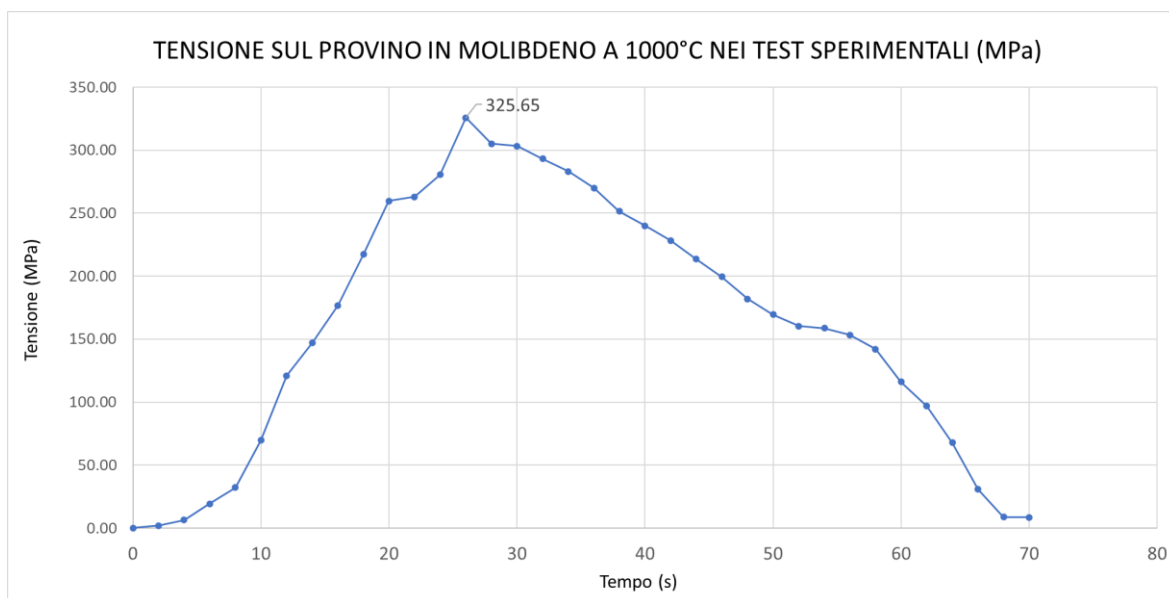


Figura 4.38: Grafico tempo vs tensione nel provino in tantalio durante i test con provino a 1000 °C.

Durante il test c'è stato un brusco abbassamento della temperatura tra i 20 e i 26 secondi che ha causato il picco di tensione visibile in Figura 4.38. Per questa ragione non ha alcun significato confrontare la tensione di rottura ottenuta con quella presente in letteratura per molibdeno a 1000 °C.

4.11 Conclusioni

Dai test sperimentali è stato riscontrato un ottimo comportamento della filettatura per l'afferraggio dei provini. Fino a temperature di 1000 °C non è stata osservata alcuna forma di degrado o deformazione del tratto filettato. Questo infatti ha permesso una facile rimozione dei provini una volta terminate le diverse prove. Al contrario, il fatto di dover avvitare contemporaneamente le due estremità del provino agli alberi in tantalio è risultata un'operazione piuttosto scomoda. Nel caso di questi test, quella di realizzare una filettatura destrorsa e una sinistrorsa per provino e alberi in tantalio, è stata una soluzione obbligata dall'impossibilità degli alberi di ruotare attorno al proprio asse. A tal riguardo, come già discusso al paragrafo 3.3, nel nuovo sistema progettato per prove ad alta temperatura il soffietto verrà sostituito da una boccola. Questa permetterà all'albero mobile superiore di ruotare facilitando il montaggio che vedrà prima di tutto l'avvitamento del provino all'albero in tantalio fisso inferiore e poi l'avvitamento dell'albero in tantalio mobile superiore all'estremità superiore del provino. Così facendo non dovranno più essere realizzate filettature sinistrorse ma potranno essere utilizzate tutte filettature convenzionali. Inoltre, l'unica filettatura ad alta temperatura che si è pianificato di dover avvitare e svitare sarà solo quella del fissaggio del provino stesso.

Altro aspetto che è stato analizzato è quello relativo al confronto tra risultati analitici e quelli sperimentali per quanto riguarda il fattore temperatura. Sebbene i risultati siano stati differenti, l'aspetto positivo è stato che le analisi vanno a sovrastimare la temperatura della flangia nei pressi del collegamento bullonato e a sottostimare quella del provino. Questo vuol dire che andando a dimensionare il sistema tramite queste analisi termiche si andrà in favore di sicurezza. Uno dei fattori che ha contribuito a questa disparità di risultati è stato sicuramente l'aver trascurato la resistenza di contatto dovuta alla non perfetta adesione tra le superfici dei diversi componenti durante la prova. Problema che nel caso di prove a fatica verrebbe sicuramente accentuato per la continua variazione della pressione di contatto tra le superfici. L'influenza di questo fattore è stata evidenziata in particolare negli istanti iniziali della prova. Quello che si verificava era un allentamento della pressione di contatto tra albero in acciaio e albero in tantalio, conseguenza del fatto che l'albero in acciaio veniva tirato in una direzione dal sistema di movimentazione, mentre l'albero in tantalio veniva tirato nell'altra per la presenza del provino. Il risultato era una riduzione della pressione iniziale tra i due alberi (garantita dai collegamenti bullonati). Una diminuzione della pressione tra due superfici porta ad una minor area di contatto disponibile per il passaggio di corrente. Questo si traduce in una riduzione della temperatura che veniva compensato da un aumento dell'intensità di corrente attraverso l'alimentatore. L'aspetto riguardante la resistenza di contatto potrà essere approfondito in sede di sviluppi futuri.

Rimanendo in tema di temperature, lungo il tratto a sezione costante di un provino in acciaio, è stata registrata una variazione di temperatura di circa 50 °C (Figura 4.39 a sinistra). In fase di test invece è stato raggiunto un picco di 775 °C in fase di necking (Figura 4.39 a destra).

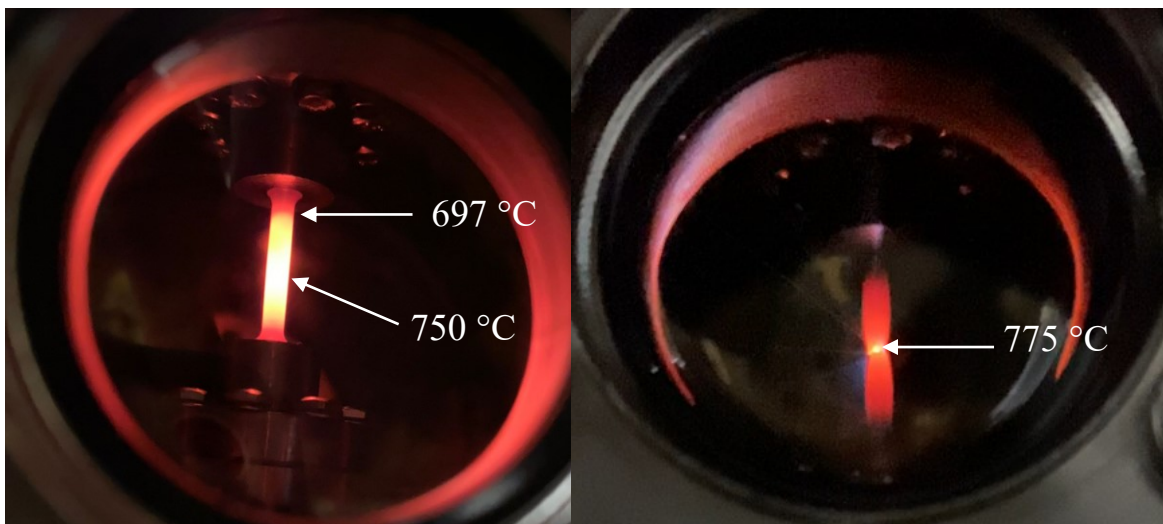


Figura 4.39: Provino in acciaio in temperatura (sinistra); fase di necking del provino in acciaio con picco di temperatura (destra).

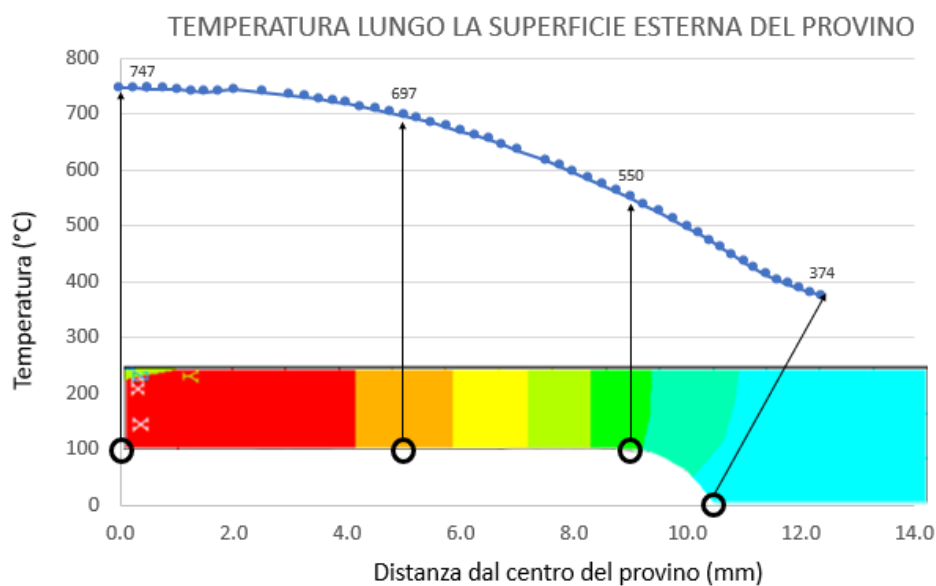
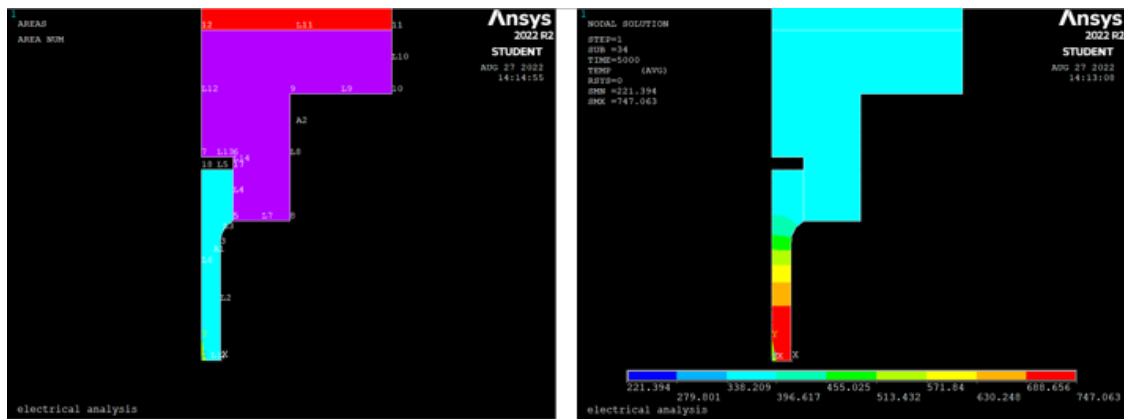


Figura 4.40: Plot della temperatura lungo la superficie esterna del provino ricavata dall'analisi FEM elettrotermica di un provino in acciaio riscaldato per effetto Joule tramite una corrente di 87.5 A.

Il dato riguardante la distribuzione di temperatura lungo la superficie del provino in acciaio osservato sperimentalmente è stato confrontato con quello proveniente da un'analisi FEM elettrotermica eseguita con geometrie, mesh e condizioni al contorno identiche a quelle descritte al paragrafo 4.8 (Figura 4.19). In particolare è stato simulato il riscaldamento di un provino in acciaio per effetto Joule con una corrente di 87.5 A. Ciò che è stato riscontrato da questo confronto è che la temperatura durante i test è risultata più uniforme rispetto a quello che ci si poteva attendere dalle analisi FEM. Dalle simulazioni infatti risulta una differenza di temperatura lungo la superficie esterna del provino pari a 200 °C contro i 50 °C rilevati sperimentalmente. Questa osservazione tuttavia è stata fatta sulla base di un solo campione. Andrebbero dunque svolte più prove per confermarla.

Mat. Provino e Temperatura	σ_R , TEST (MPa)	σ_R , LETTERATURA (MPa)
Acciaio T ambiente	855,8	650 [14]
Acciaio 750° (TEST 1)	312,9	200 [14]
Acciaio 750° (TEST 2)	150,3	200 [14]
Acciaio 750° (TEST 3)	348,2	200 [14]
Acciaio 750° (TEST 4)	155,9	200 [14]
Tantalio 1000 °C	106,5	120 [13]
Molibdeno 1000 °C	325,7	225 [15]

Tabella 4.8: Risultati delle tensioni di rottura ricavati dai test sperimentali sul sistema del LNL messi a confronto con quelli provenienti da datasheet (dove disponibili) o da altri studi.

Per quanto riguarda i risultati di tensioni di rottura ottenuti, non li si può ritenere del tutto affidabili in quanto le prove non sono state condotte come descritto da normativa. Innanzitutto la temperatura non era perfettamente costante al centro del provino ma variava durante la prova ma variava da +30°C a -30°C circa rispetto alla temperatura prestabilita per il test. Motivo per il quale un operatore doveva continuamente variare la corrente per riportare la temperatura del provino al valore prestabilito per la prova. Inoltre, la movimentazione avveniva con l'ausilio di un operatore che, ruotando la vite trapezia, faceva traslare l'albero mobile verso l'alto. Quindi, pur cercando di mantenere una velocità di deformazione costante, essa risultava variabile durante la prova e differente da quella richiesta dalla normativa per i test ad elevata temperatura (BS EN ISO 6892-2-2018 [12]). In figura Figura 4.41 nel grafico di sinistra (dove Metodo A indica prove in controllo di deformazione) sono riportati nell'asse delle ordinate i range di strain rate da utilizzare durante i test ad elevata temperatura per determinare i parametri riportati nelle ascisse (nel nostro caso la tensione di rottura R_m). Gli stessi intervalli, con i loro estremi esplicitati vengono riportati in Tabella 4.9.

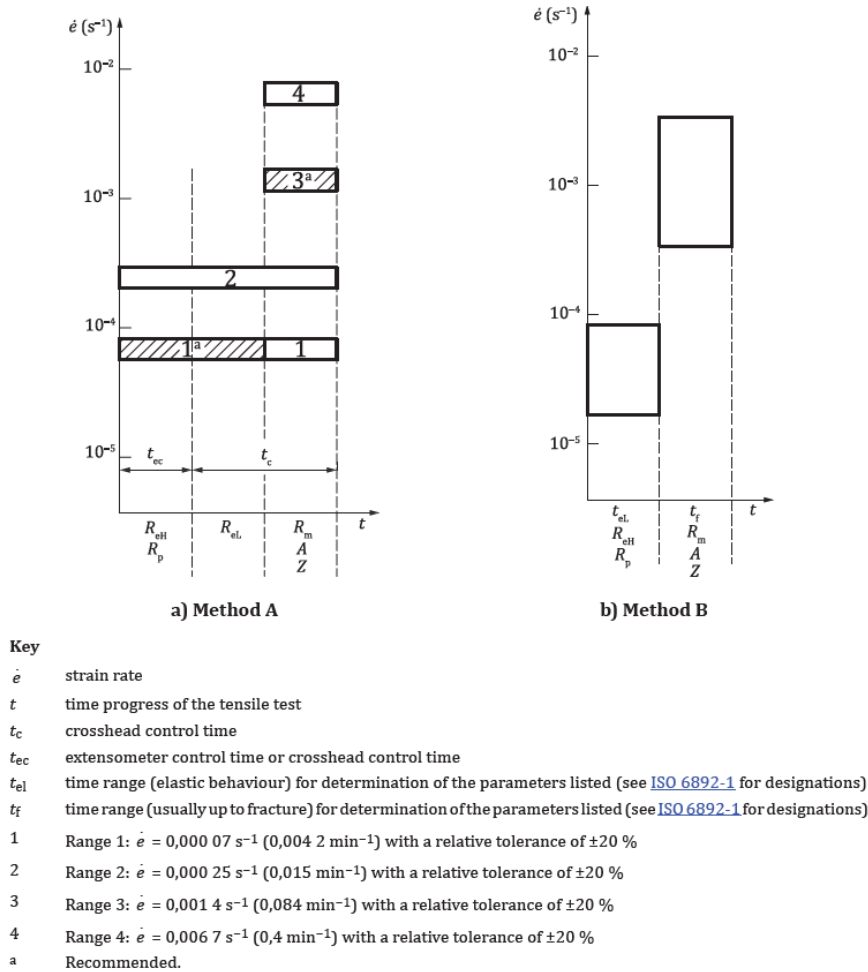


Figura 4.41: Range di strain rate da utilizzare per ricavare i parametri riportati nell'asse delle ascisse durante prove ad elevata temperatura [12].

# Strain rate	Velocità di deformazione per R_m (s^{-1})	Vaore min (s^{-1}) (-20%)	Vaore min (s^{-1}) (+20%)
1	0.000070	0.000056	0.000084
2	0.000250	0.000200	0.000300
3	0.001400	0.001120	0.001680
4	0.006700	0.005360	0.008040

Tabella 4.9: Valori limite relativi agli intervalli di strain rate da utilizzare per ricavare la tensione di rottura (R_m) durante prove ad elevata temperatura [12].

CAPITOLO 5

Progettazione Meccanica del sistema per test ad alta temperatura in alto vuoto

5.1 Introduzione

In questo capitolo verrà presentata l'ultima versione del sistema di riscaldamento per prove ad alta temperatura in alto vuoto.

Verranno illustrate prima di tutto la funzione e le geometrie dei componenti. Il design di questi è stato scelto in modo da semplificare il più possibile la realizzazione e l'assemblaggio. Le geometrie saranno poi validate, dove necessario, dalle verifiche statiche e a fatica. Nell'effettuarle si sono tenute a mente le temperature di lavoro più gravose ricavate dalle analisi FEM elettrotermiche.

5.2 Sistema di riscaldamento per test a trazione e a compressione ad alte temperature e in alto vuoto

Di seguito vengono riportate le immagini relative al modello CAD 3D del sistema progettato.

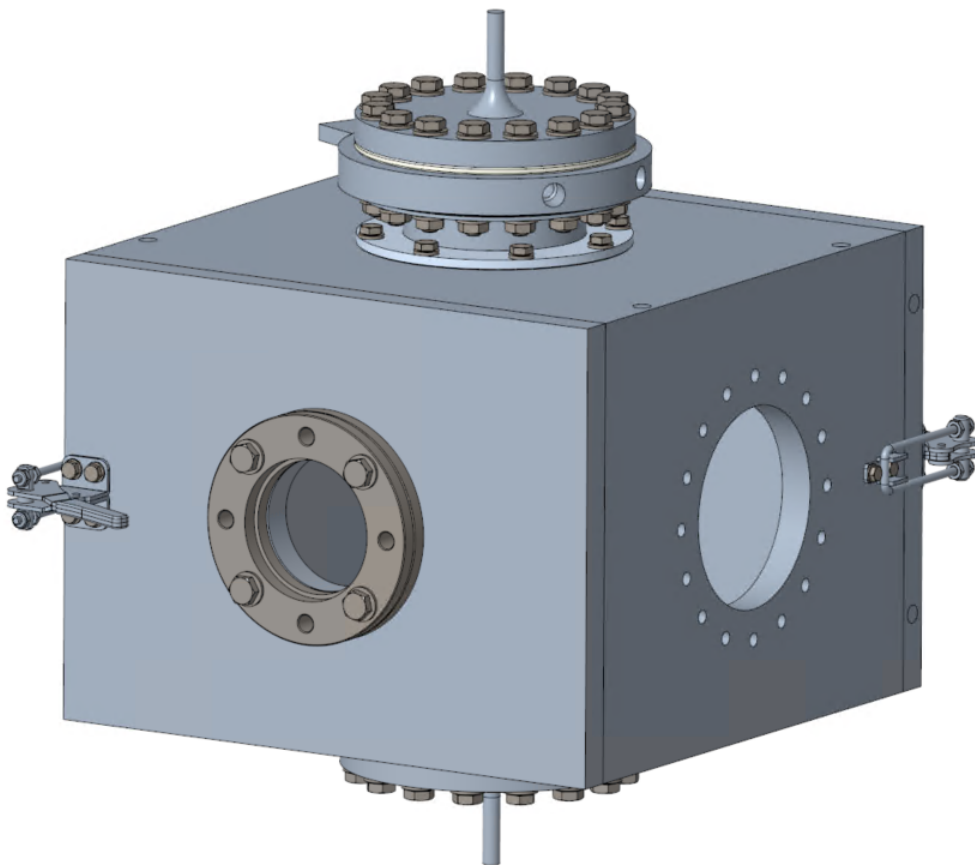


Figura 5.1: Assieme finale del sistema di riscaldamento per test ad alta temperatura in alto vuoto da inserire nella macchina di prova MTS Mini Bionix.

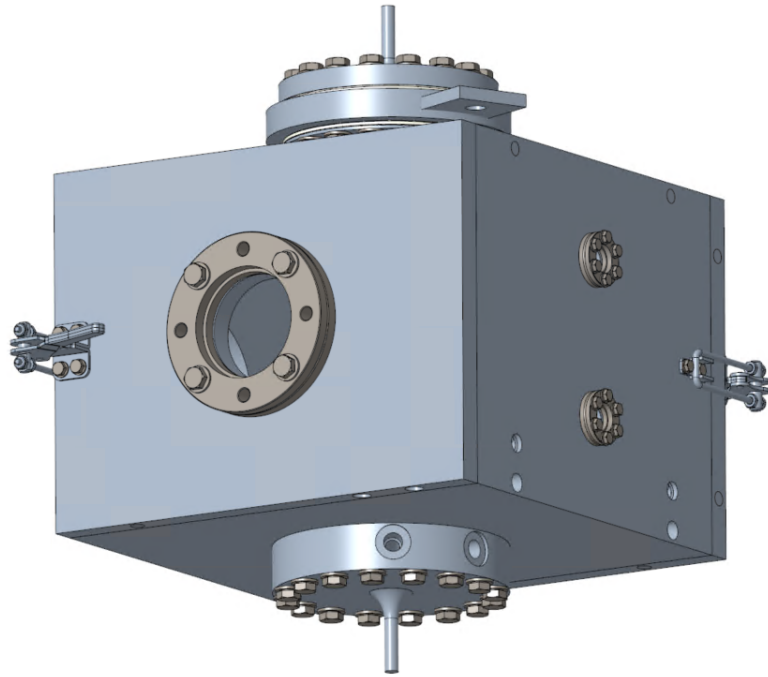


Figura 5.2: Assieme finale del sistema di riscaldamento per test ad alta temperatura in alto vuoto da inserire nella macchina di prova MTS Mini Bionix.

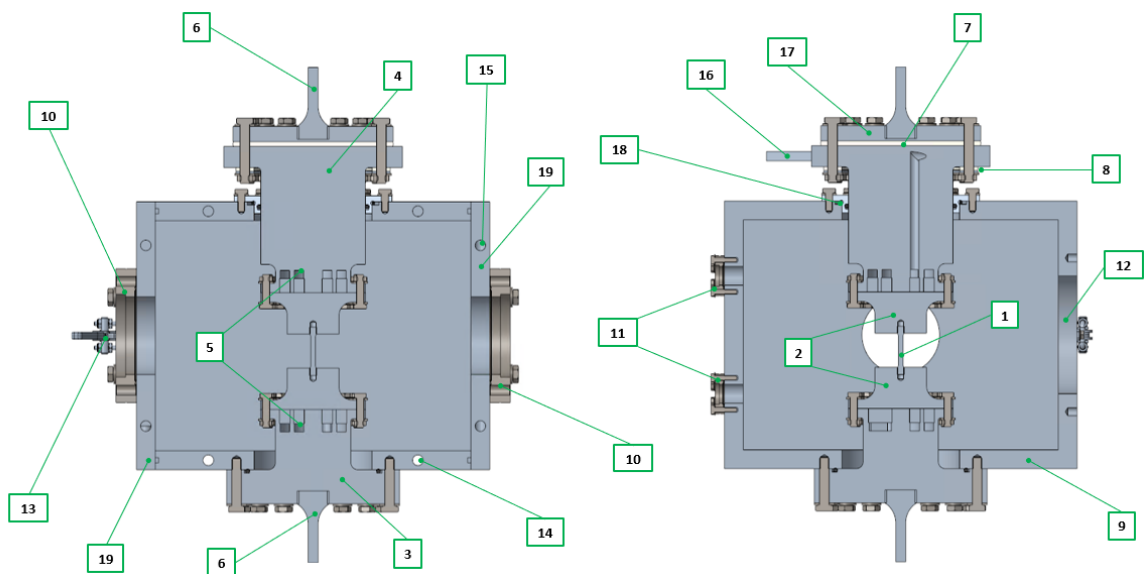


Figura 5.3: Vista sezionata dell'assieme per test ad alta temperatura in alto vuoto da inserire nella macchina di prova MTS Mini Bionix: 1) Provino; 2) Alberi in tantaio; 3)Albero fisso in acciaio; 4) Albero mobile in acciaio; 5)Canali di raffreddamento interni agli alberi in acciaio; 6)Afferraggi ai quali si attaccherà la macchina di prova Mini Bionix 858; 7)Disco isolante in P.E.T.P. + P.T.F.E.; 8) Anello isolante in P.E.T.P. + P.T.F.E; 9)Camera in alluminio; 10) Viewport (flange CF 63); 11) Flange CF 16 per l'inserimento di termocoppie; 12) Foro al quale verranno attaccate le due pompe in serie utilizzate per generare il vuoto; 13)Morsetto per la chiusura dello sportello; 14) Canale del sistema di raffreddamento interno alla camera in alluminio; 15) Canale del sistema di raffreddamento interno agli sportelli in alluminio; 16) Componente saldato all'albero in acciaio dove fissare il cavo per l'entrata della corrente; 17) Flangia che accoglierà l'afferraggio superiore; 18) Boccola in P.E.T.P. + P.T.F.E.; 19) Sportelli in alluminio che chiuderanno la camera.

Verrà ora descritto brevemente il modello CAD 3D nei suoi componenti (riferiti alla Figura 5.3) e aspetti peculiari. Il sistema è dotato di un albero fisso composto da 2 elementi: uno in tantalio (2) e uno in acciaio (3). Vi è poi un albero mobile composto da 4 elementi (2,4,7,17) che trasferisce il carico dalla macchina di prova al provino. È stata inserita inoltre una boccia (18) in arnite e teflon (P.E.T.P.+P.T.F.E.) che permette lo scorrimento dell'albero mobile, l'isolamento elettrico e la tenuta del vuoto tramite il posizionamento di due guarnizioni in apposite cave. Il vuoto viene garantito principalmente da una camera in alluminio (9) che ha il compito di isolare gli alberi e il provino durante i test. Questa è dotata di due sportelli (19) la cui chiusura avviene grazie all'azione di due morsetti (13) e della differenza di pressione tra interno della camera, che si troverà in condizioni di alto vuoto, e l'esterno della camera, che si troverà a pressione ambiente. Il vuoto è generato tramite due pompe poste in serie che si attaccano direttamente alla camera (12). La camera è inoltre provvista di due viewport (10) per effettuare misurazioni di temperatura tramite pirometri ad infrarosso e misure di deformazione ottica. In uno dei lati della camera si trovano poi due flange CF 16 dalle quali far entrare eventuali termocoppie.

Gli ingombri del sistema sono di 300 mm in larghezza e 415 mm in altezza per un peso di 38 Kg. Durante i test l'apparato verrà afferrato dalla macchina di prova Mini Bionix tramite degli afferraggi intercambiabili (6). Il provino (1), con estremità filettate (quote ricavate dalla normativa BS EN ISO 6892-2 [12]), sarà avvitato ai due alberi in tantalio e scaldato per effetto Joule attraverso il passaggio diretto di una corrente. Quest'ultima scorrerà lungo gli alberi entrando da un componente saldato all'albero in acciaio superiore (16) per poi uscire attraverso un cavo collegato all'albero in acciaio inferiore. Infine vi sarà un sistema di raffreddamento ad acqua interno agli alberi in acciaio (5), alla camera (14) e agli sportelli (15).

5.3 Provino

I provini saranno realizzati seguendo le indicazioni della normativa BS EN ISO 6892-2:2018 [12]. In particolare la normativa propone l'utilizzo di provini piatti con spessore compreso tra 0,1 mm e 3 mm, provini piatti con spessore superiore a 3 mm e provini cilindrici con estremità filettate e diametro della sezione ristretta superiore a 4 mm. La scelta è ricaduta sui provini cilindrici dei quali vengono riportati i dettagli in Figura 5.5. Entrambe le estremità dei provini saranno provviste di tratti filettati (con filettatura standard) per permettere l'avvitamento prima all'albero in tantalio della parte fissa e poi all'albero in tantalio della parte mobile.

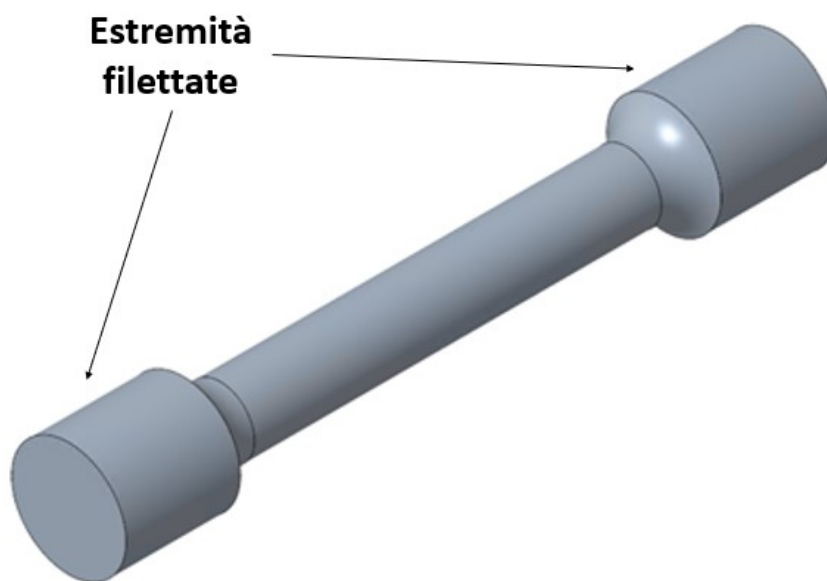
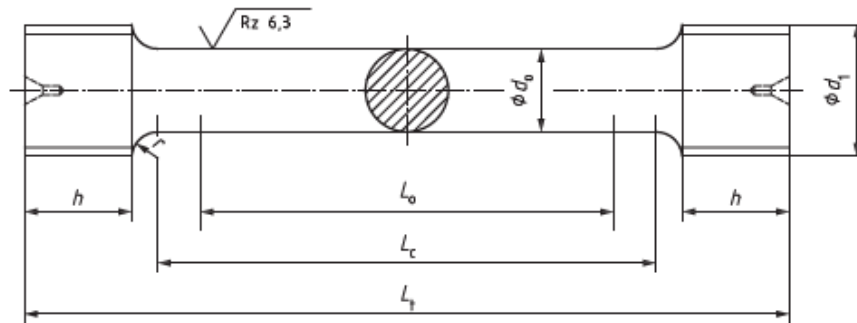


Figura 5.4: Modello CAD di un provino dimensionato da normativa BS EN ISO 6892-2 [11] con diametro della sezione ristretta di 4 mm ed estremità filettate.

A.3 Test pieces to be used for wires, bars and sections with diameter or thickness equal to or greater than 4 mm

For these materials, threaded gripping ends are often used (see [Figure A.3](#) and [Table A.3](#)).



Key

d_o original diameter of the parallel length
 d_1 metric ISO-thread
 r transition radius
 h length of the gripped ends

L_o original gauge length ($L_o = 5d_o$)
 L_c parallel length ($L_c \geq L_o + d_o$)
 L_t total length of test piece

Figure A.3 — Example of cylindrical test piece with threaded gripping ends

Table A.3 — Examples of cylindrical test pieces with threaded gripping ends

Dimensions in millimetres

d_o	L_o	d_1	r min.	h min.	L_c min.	L_t min. ^a
4	20	M6	3	6	24	41
5	25	M8	4	7	30	51
6	30	M10	5	8	36	60
8	40	M12	6	10	48	77
10	50	M16	8	12	60	97
12	60	M18	9	15	72	116
14	70	M20	11	17	84	134
16	80	M24	12	20	96	154
18	90	M27	14	22	108	173
20	100	M30	15	24	120	191
25	125	M33	20	30	150	234

^a The minimum value is only sufficient when the transition radius, r , the length of the gripped ends, h , and the parallel length, L_c , are minimum values.

Figura 5.5: Dettagli dimensionali dei provini normati per prove ad elevata temperatura tratti da normativa BS EN ISO 6892-2 [12].

5.4 Alberi in tantalio

Gli alberi in tantalio hanno la funzione fondamentale di afferrare il provino permettendo che la corrente ci passi attraverso. Questo avverrà andando ad avvitare le estremità filettate dei provini ai fori filettati praticati sull'albero in tantalio (osservabili in Figura 5.6). Si ricordi che, da normativa BS EN ISO 6892-2:2018 [12], ad ogni provino con diametro della sezione ristretta (d_o) differente corrisponde una diversa filettatura delle estremità (d_1). Questo vuol dire che, ogni qualvolta si vorrà testare un provino con d_o differente, andranno smontati gli alberi in tantalio per montarne quelli con il foro filettato adatto al nuovo provino.

L'albero è poi provvisto di 16 fori M6 con gioco che permetteranno il suo accoppiamento con gli alberi in acciaio. La superficie sarà soggetta ad una rettifica che garantirà una rugosità $R_z = 0,8 \mu\text{m}$.

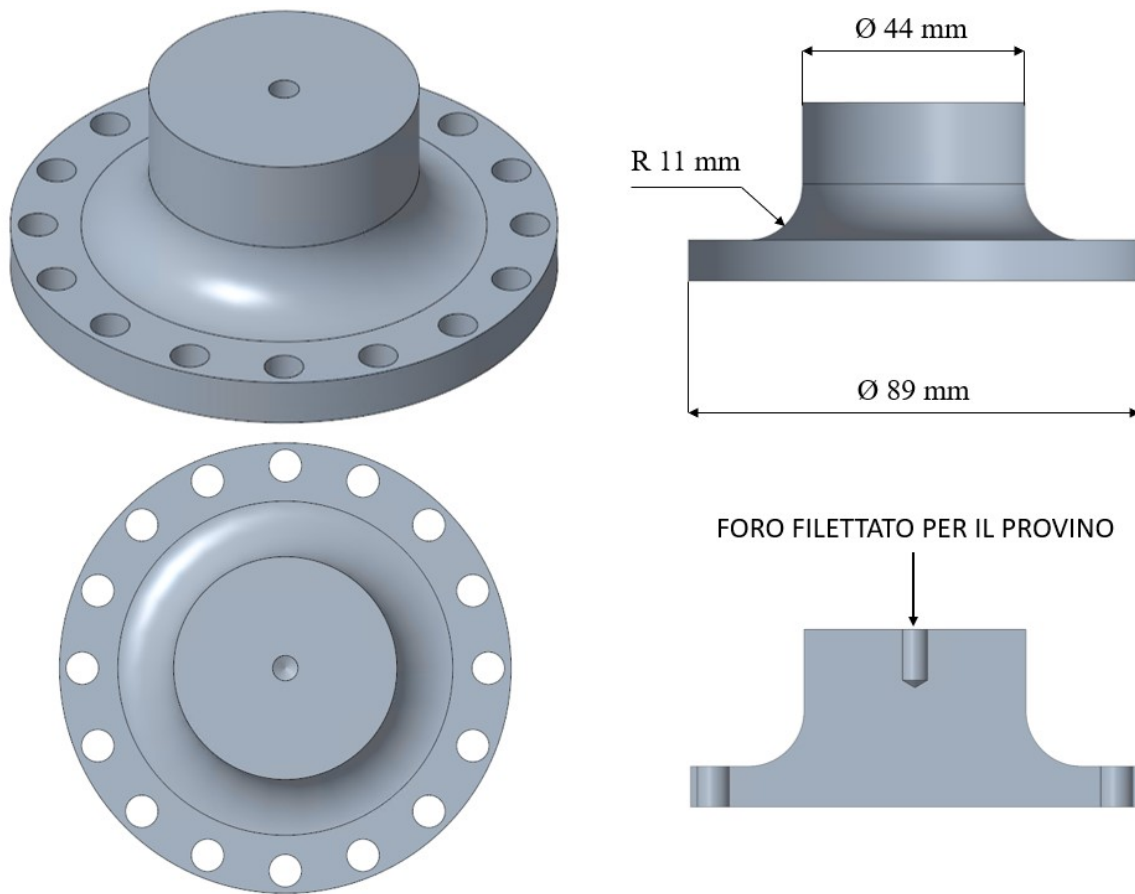


Figura 5.6: Modello CAD 3D degli alberi in tantalio. In figura in basso a destra viene messo in evidenza il foro filettato dove andrà avvitata l'estremità filettata del provino.

In Figura 5.6 è possibile osservare il modello CAD 3D dell'albero in tantalio con le quote utili al calcolo dei fattori di concentrazione delle tensioni legati alla forma del componente (K_i) e alle sue dimensioni (K_d).

5.5 Alberi in acciaio

Gli alberi in acciaio aisi 304L sono collegati tramite una flangia e dei collegamenti bullonati agli alberi in tantalio. L'albero in acciaio inferiore è quello fisso. L'albero in acciaio superiore è quello mobile che, durante le prove in compressione e in trazione, scorrerà attraverso la boccia grazie all'azione della macchina di prova MTS Mini Bionix, andando così a trasferire il carico al provino.

Un aspetto fondamentale riguardante gli alberi in acciaio è quello del sistema di raffreddamento. Tra i requisiti del sistema progettato vi era quello di raggiungere temperature superiori ai $2000 \text{ }^\circ\text{C}$. Senza prevedere la presenza di un circuito di raffreddamento si otterrebbero temperature troppo elevate nel sistema per garantirne l'integrità strutturale e per garantire la sicurezza degli operatori che andrebbero ad utilizzarlo. Una parte di questo sistema di raffreddamento è previsto proprio all'interno dei due alberi in acciaio. Per realizzarlo verranno eseguite quattro operazioni di foratura per ottenere i canali di ingresso e uscita. Questi avranno una sezione circolare di diametro 9 mm (

Figura 5.7 a sinistra). Per quanto riguarda la geometria ricurva che seguirà il fluido (

Figura 5.7 a destra), essa verrà realizzata tramite un'operazione di fresatura. Questa prevederà di lasciare un "gradino" di 0,5 mm sul quale appoggiare il tappo da saldare per chiudere il sistema di raffreddamento (Figura 5.8). Una volta saldato il tappo all'albero in acciaio andrà ripresa la superficie del componente.

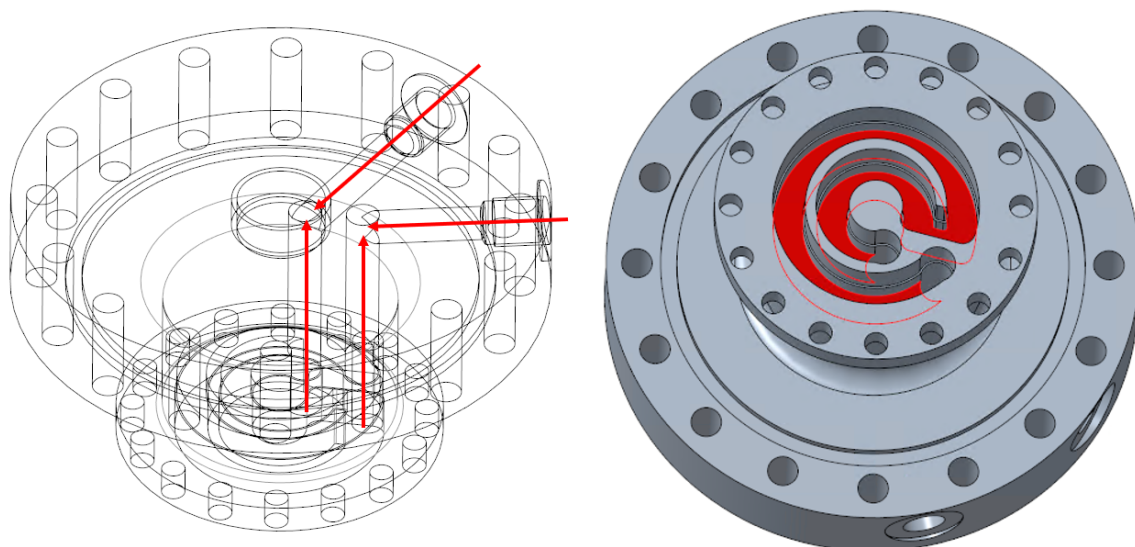


Figura 5.7: A sinistra sono indicate in rosso le direzioni delle quattro operazioni di foratura che bisognerà eseguire sugli alberi in acciaio per realizzare i canali di ingresso e uscita del fluido refrigerante.; A destra viene evidenziata in rosso l'area della geometria ricurva del sistema di raffreddamento che verrà realizzata tramite fresatura.

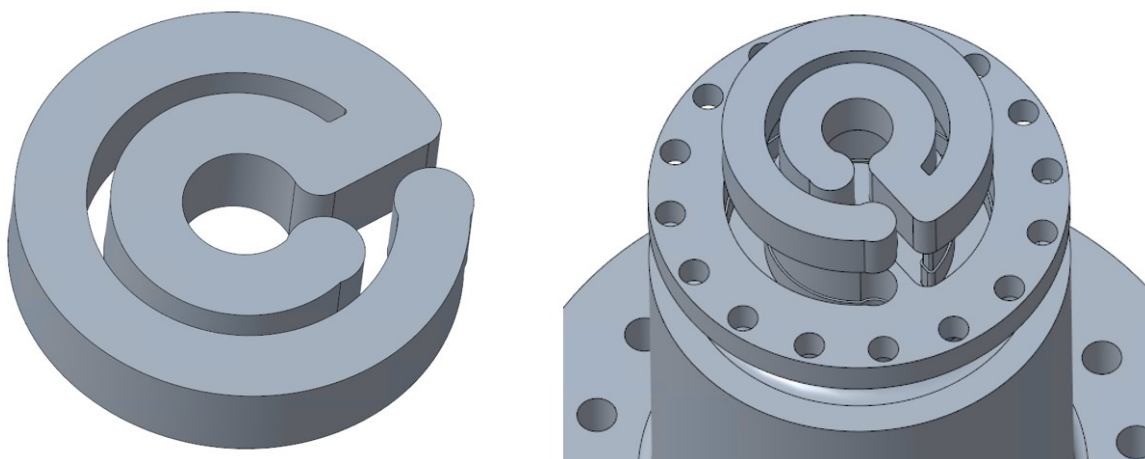


Figura 5.8: A sinistra il tappo in acciaio da saldare agli alberi in acciaio per chiudere il sistema di raffreddamento. A destra viene illustrato come verrà applicato il tappo che andrà ad appoggiarsi sul "gradino" creato all'interno della geometria ricurva.

All'ingresso e all'uscita del sistema di raffreddamento sono stati realizzati due fori con filettatura GAS ¼ in modo tale da poter fissare i connettori del sistema di raffreddamento. I connettori scelti sono stati gli Stainless Steel Swagelok Tube Fitting, Male Connector, 10 mm Tube OD x 1/4 in. Male ISO Tapered Thread [16] mostrati in Figura 5.9. Questi connettori sono stati impiegati in tutti gli ingressi e in tutte le uscite dei canali di raffreddamento presenti nel sistema progettato.



Figura 5.9: Stainless Steel Swagelok Tube Fitting, Male Connector, 10 mm Tube OD x 1/4 in. Male ISO Tapered Thread (connettore scelto per il sistema di raffreddamento progettato) [16]

5.5.1 Albero inferiore fisso in acciaio

L'albero fisso in acciaio viene collegato alla camera tramite 16 viti M8 che devono provocare lo schiacciamento della guarnizione da alloggiare all'interno della cava ricavata nell'albero (Figura 5.10). Per permettere il passaggio di queste viti, da una parte sono stati dunque previsti 16 fori M8 con gioco; all'altra estremità sono stati invece previsti 16 fori M6 con gioco per permettere l'accoppiamento con l'albero in tantalio tramite dei collegamenti bullonati.

Un ulteriore particolare presente nel componente è il foro M27 che è stato pensato per l'inserimento dell'afferraggio intercambiabile (Figura 5.10 in basso a destra).

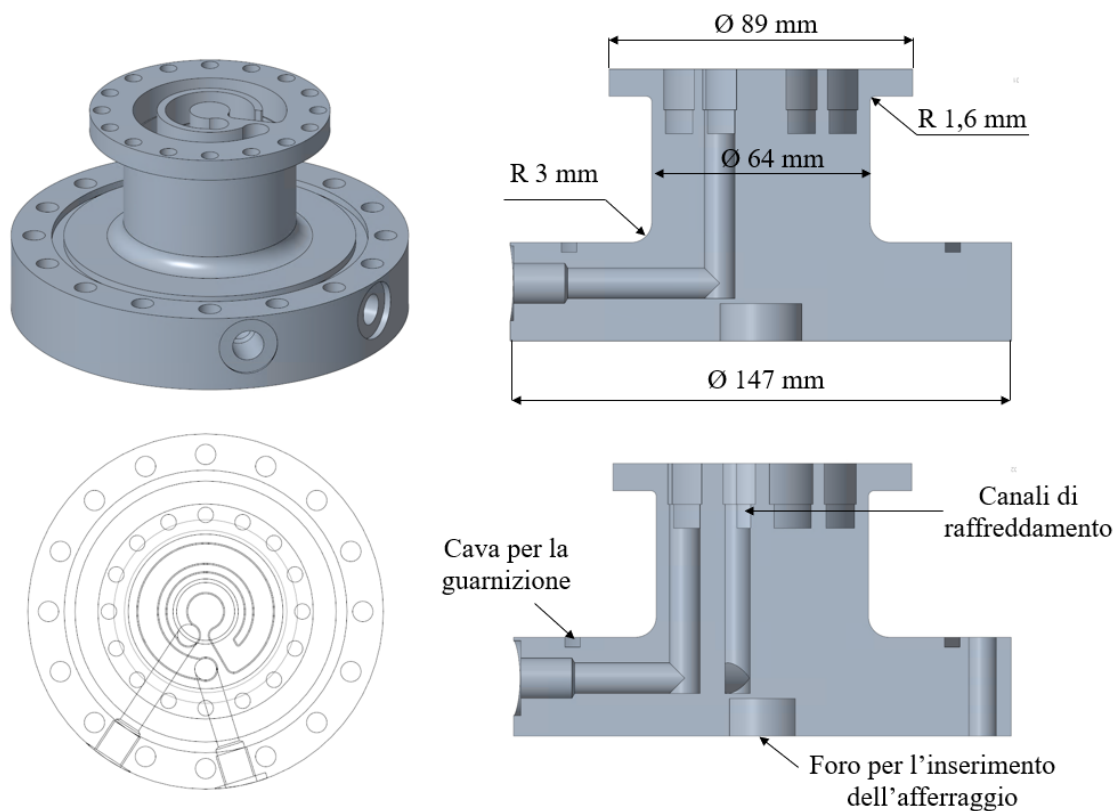


Figura 5.10: Modello CAD 3D dell'albero fisso in acciaio. In figura in basso a destra vengono messi in evidenza la cava dove alloggiare la guarnizione, il foro filettato nel quale andrà inserito l'afferraggio e i canali di raffreddamento interni.

In Figura 5.10 è possibile osservare il modello CAD 3D dell'albero in acciaio con le quote utili per il calcolo dei fattori di concentrazione delle tensioni legati alla forma del componente (K_t) e alle sue dimensioni (K_d).

La superficie del componente sarà soggetta ad una rettifica che garantirà una rugosità superficiale $R_z=0,8 \mu\text{m}$.

5.5.2 Albero superiore mobile in acciaio

L'albero mobile in acciaio è il componente che andrà a scorrere attraverso la boccola permettendo di sollecitare il provino a trazione o a compressione. Questo implica che il diametro interno della boccola sia vincolato dal diametro della flangia inferiore, pari a 89 mm (Figura 5.11). Allo stesso modo però anche il corpo dell'albero dovrà avere un diametro tale da renderlo accoppiabile alla boccola. Questo per permettere lo scorrimento dell'albero e garantire lo schiacciamento della guarnizione (e quindi della condizione di vuoto). Per questo motivo il tratto centrale dell'albero avrà un diametro di 88.8 mm (Figura 5.11). La lunghezza di quest'ultimo tratto andrà inoltre ad influenzare la corsa resa disponibile.

L'albero mobile in acciaio è dotato da un lato di 16 fori M6 con gioco per permettere l'accoppiamento con l'albero in tantalio tramite dei collegamenti bullonati. Dall'altro lato sono stati previsti 16 fori M8 per accoppiare l'albero ai rimanenti elementi della parte mobile.

Il modello CAD 3D dell'albero mobile in acciaio è presentato in quattro viste:

- Una vista isometrica a sinistra che mostra l'intero componente, una flangia superiore con 16 fori M6 e una flangia inferiore con 16 fori M8.
- Una sezione trasversale in alto a destra che evidenzia i canali di raffreddamento interni, indicati con l'etichetta "Canali di raffreddamento".
- Una vista di dettaglio in basso a destra con le seguenti quote: diametro esterno superiore $\varnothing 151,8 \text{ mm}$, diametro interno superiore $\varnothing 88,8 \text{ mm}$, diametro interno inferiore $\varnothing 64 \text{ mm}$, diametro esterno inferiore $\varnothing 89 \text{ mm}$, e raggi di curvatura $R 3 \text{ mm}$, $R 1,6 \text{ mm}$ e $R 6 \text{ mm}$.
- Una vista di dettaglio in basso a sinistra che mostra la disposizione circolare dei fori M6 e M8 sulla flangia superiore.

Figura 5.11: Modello CAD 3D dell'albero mobile in acciaio. In figura in alto a destra vengono messi in evidenza i canali di raffreddamento interni.

93

5.6 Afferraggi

Uno dei vincoli di progettazione del sistema era quello di poter inserire l'apparato all'interno della macchina di prova MTS Mini Bionix 858. Questa è dotata di due ganasce che possono afferrare elementi a sezione circolare di diametro massimo 9,5 mm. Partendo da questo dato, per il sistema progettato, sono stati pensati degli afferraggi di diametro 9,5 mm che verranno fissati al sistema tramite un tratto filettato (M27) (Figura 5.12). È stato inoltre previsto un raggio di raccordo di 20 mm per alleviare l'effetto della concentrazione delle tensioni nel componente.

L'aver realizzato afferraggi che possono essere svitati dalla loro sede e sostituiti permetterà di utilizzare il sistema progettato anche con macchine di prova diverse dalla Mini Bionix 858, nel caso in cui queste presentassero ganasce con caratteristiche differenti.

La superficie dell'afferraggio, esattamente come quella dell'albero in tantalio, sarà soggetta ad una rettifica che garantirà una rugosità superficiale $R_z = 0,8 \mu\text{m}$.

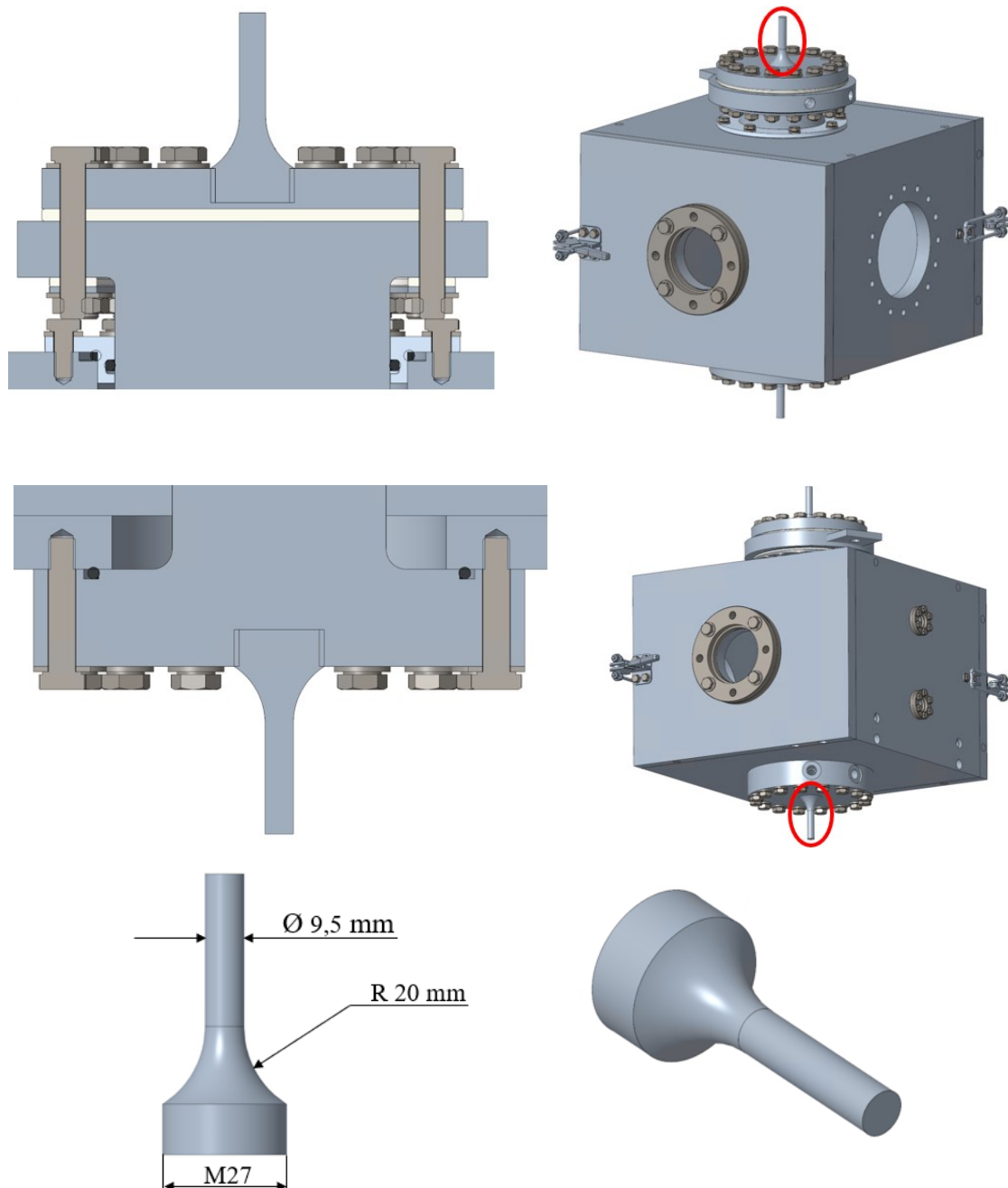


Figura 5.12: In alto si osserva l'afferraggio superiore. In basso si osserva l'afferraggio inferiore. In basso vengono mostrato il modello CAD ED dell'afferraggio con relative quote.

5.7 Camera

La camera è l'elemento dell'apparato che, assieme alla boccola, deve garantire l'isolamento del sistema mediante una serie di guarnizioni da alloggiare nelle apposite cave. Il materiale scelto per questo componente è stato l'alluminio. La camera non sarà soggetta ad alcuno sforzo durante l'utilizzo del sistema, quindi l'utilizzo di materiali come l'acciaio avrebbe solamente portato all'aumento del peso senza determinare alcun vantaggio dal punto di vista della resistenza strutturale.

La camera è costituita da due elementi principali: il corpo della camera e gli sportelli.

Sono stati poi previsti:

- 2 morsetti per la chiusura degli sportelli;
- 2 flange CF 63 per effettuare misurazioni di temperatura tramite pirometri e misurazioni ottiche di deformazione;
- 2 flange CF 16 per l'inserimento di eventuali termocoppie;
- 1 foro per l'attacco delle pompe per la generazione del vuoto;
- canali per il passaggio del fluido refrigerante sia per il corpo della camera che per gli sportelli;
- 2 fori per il passaggio degli alberi.

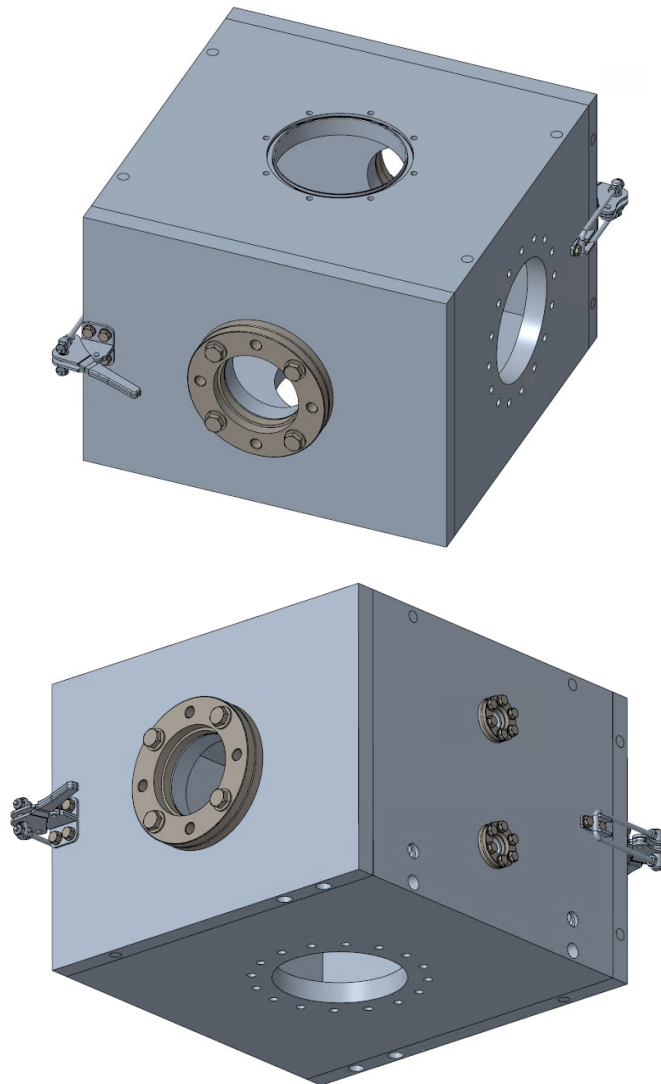


Figura 5.13: Modello CAD 3D dell'assieme camera (corpo della camera, sportelli, due flange CF 60, due flange CF 16, un foro per l'attacco delle pompe da vuoto, due fori per il passaggio degli alberi).

5.7.1 Corpo della camera

Il corpo della camera (Figura 5.14), fatto in alluminio è caratterizzato dalla presenza di:

- 2 flange CF 16 per l'inserimento di eventuali termocoppie;
- 1 foro per l'attacco delle pompe per la generazione del vuoto;
- 2 fori per il passaggio degli alberi;
- 3 cave di sezione $2,9 \text{ mm} \times 4,5 \text{ mm}$ [17] dove andranno poste guarnizioni di diametro 3,53 mm;
- 8 fori M6 per il fissaggio della boccola;
- 16 fori M8 per il fissaggio dell'albero in acciaio inferiore;
- canali di raffreddamento con filettatura GAS $\frac{1}{4}$ per l'attacco dei connettori.

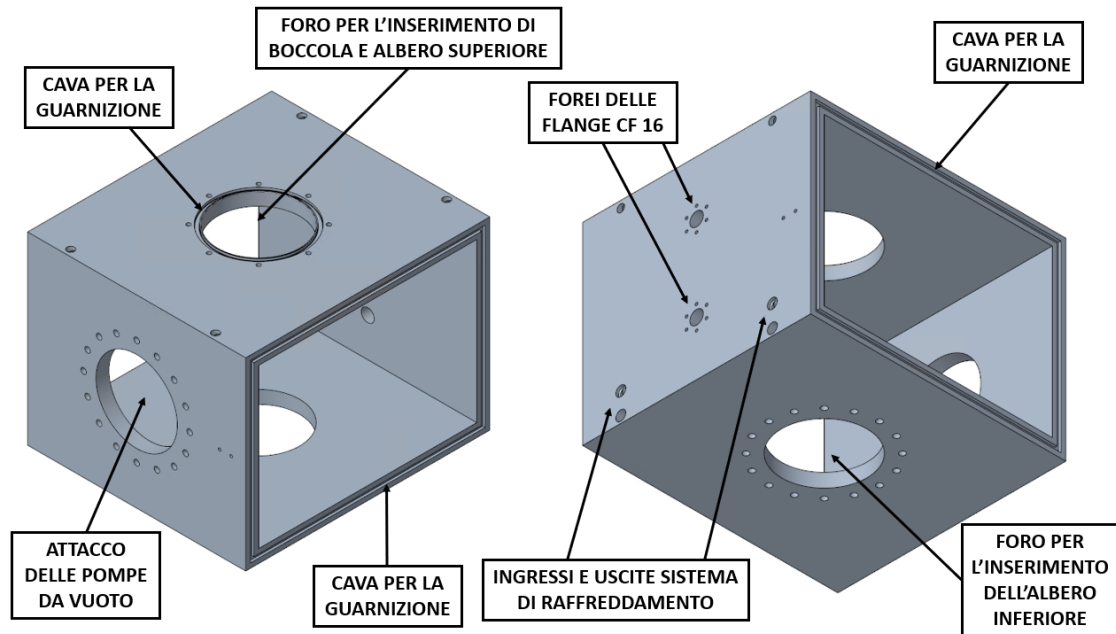


Figura 5.14: Modello CAD 3D del corpo della camera con indicazioni delle feature caratterizzanti questo componente.

La camera è inoltre dotata di un sistema di raffreddamento costituito da due canali di diametro pari a 9 mm, che saranno realizzati tramite delle operazioni di foratura. Per evitare fuoriuscite del fluido refrigerante verranno riempiti i tratti forati in eccesso andando a saldare al loro interno dei “tappi”.

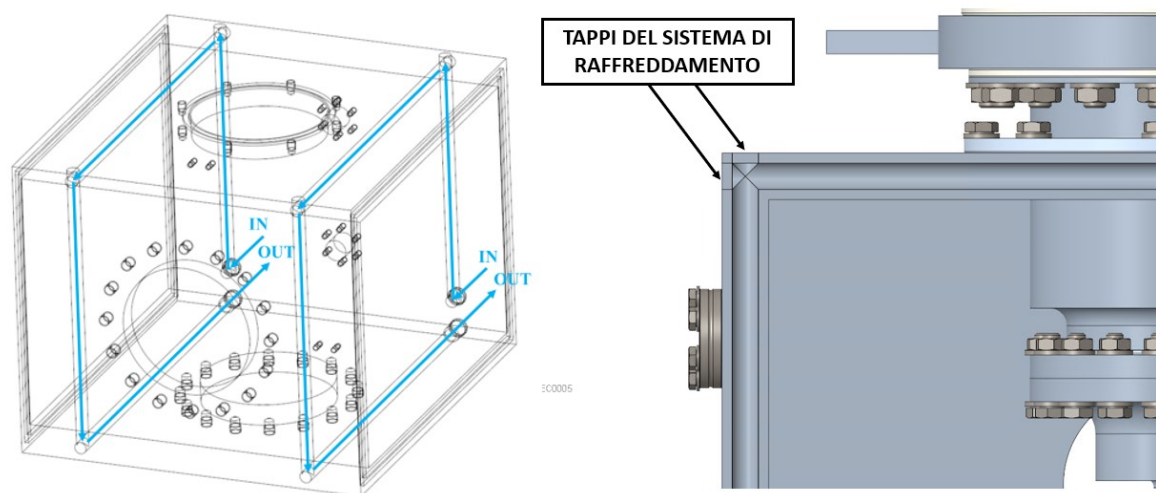


Figura 5.15: Layout del sistema di raffreddamento del corpo della camera e dettaglio dei tappi saldati per evitare le fuoriuscite di fluido refrigerante.

I connettori del sistema di raffreddamento della camera sono dello stesso tipo di quelli degli alberi in acciaio. Sono stati quindi realizzati quattro fori con filettatura GAS $\frac{1}{4}$ in modo tale da poter fissare i connettori Stainless Steel Swagelok Tube Fitting, Male Connector, 10 mm Tube OD x 1/4 in. Male ISO Tapered Thread [16].

5.7.2 Sportelli

Gli altri elementi facenti parte della camera sono gli sportelli (Figura 5.16). Essi sono stati progettati per permettere agli operatori di inserire e rimuovere i provini da testare e posizionare eventuali termocouple per monitorare la temperatura nei punti di interesse. È importante inoltre che garantiscano una tenuta efficace per mantenere la condizione di alto vuoto. Per questa ragione ogni sportello verrà chiuso dall'azione di un morsetto, combinata con la differenza di pressione tra esterno (pressione ambiente) ed interno della camera (alto vuoto). La forza di chiusura dovrà essere abbastanza elevata da andare a deformare le guarnizioni che andranno a mantenere la condizione di alto vuoto all'interno del sistema.

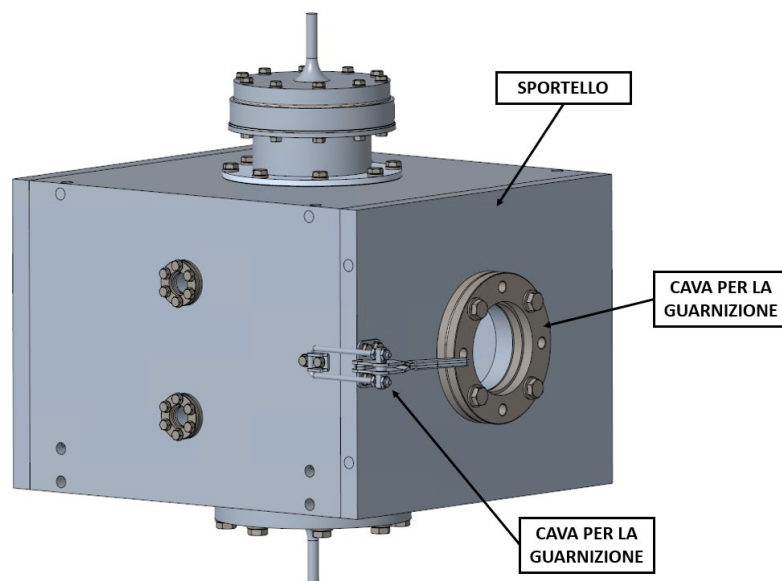


Figura 5.16: Modello CAD 3D del sistema di riscaldamento per test ad alta temperatura in alto vuoto con descrizione degli elementi facenti parte lo sportello.

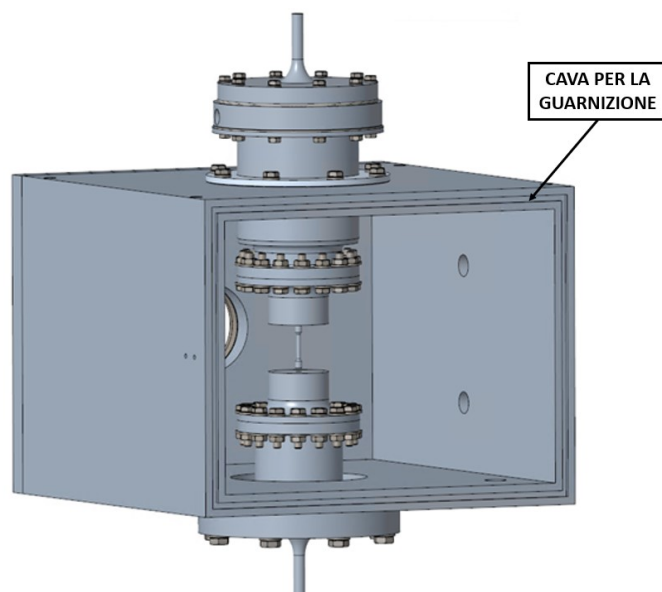


Figura 5.17: Modello CAD 3D del sistema di riscaldamento per test ad alta temperatura in alto vuoto con vista della cava per la guarnizione dello sportello.

Nelle due facce opposte della camera sulle quali poggeranno gli sportelli, sono state ricavate due cave 2,9 mm × 4,5 mm [17] dove andranno posizionate due guarnizioni di diametro 3,53 mm.

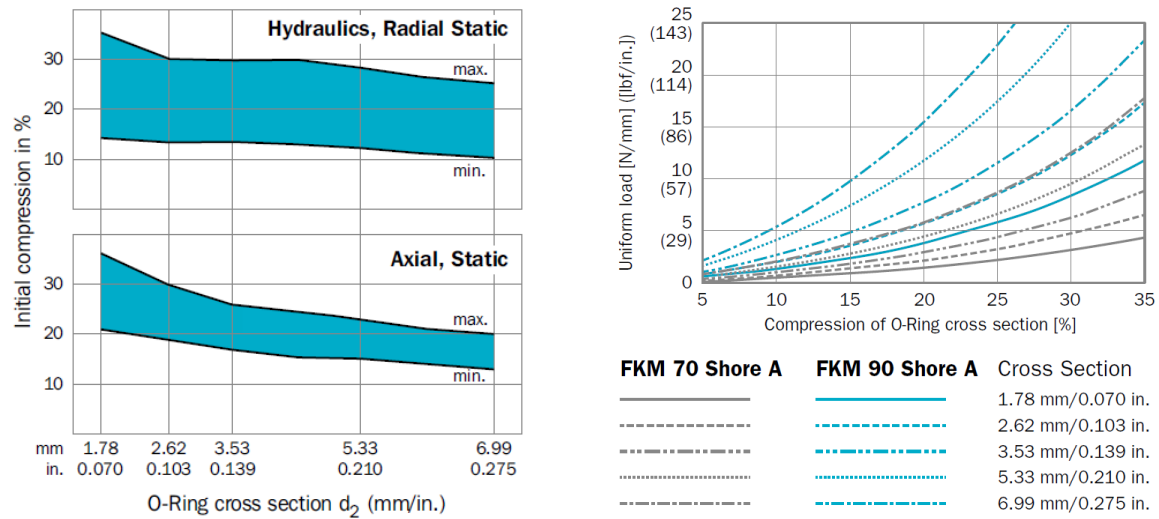


Figura 5.18: Range permissible di compressione iniziale in funzione della sezione della guarnizione (sinistra). Valori guida per carico uniforme nell'O-ring compresso per le tipologie FKM 70 Shore A e FKM 90 Shore A (destra) [18].

Come riportato nel manuale Trelleborg (Figura 5.18 a destra), per l'installazione di O-ring di diametro 3,53 mm è consigliata una compressione iniziale del 17÷25 %. Scegliendo delle guarnizioni di tipo FKM 70 Shore A, dal grafico in Figura 5.18 (a destra) si deduce che la forza per unità di lunghezza deve essere ≥ 2,5 N/mm.

Series 40324
 Supplied with latch plate
 These unique latch clamps are designed for enclosure applications where the clamps are perpendicular to the latches.

Model	Cross Ref. DE-STA-CO	Holding Capacity	A	B	C	D	ØE	ØF	G	H	ØJ	K	L	M	N	P	Q	R	S	T	Weight
GH-40324	324	500 lbs. (225 kg)	0.56 (14.3)	1* (25.4)	2.09 (53.3)	3.11 (79)	0.17 (4.4)	0.21 (5.3)	0.44 (11.1)	0.16 (4)	0.16 (4)	0.08 (2)	0.51 (13)	1.02 (26)	0.19 (4.7)	2.76 (70)	0.87 (22)	1.04 (26.5)	3.09 (78.5)	1.22 (31)	0.25 lb. (113 g)
GH-40334	334	1,000 lbs. (450 kg)	0.81 (20.6)	1.50 (38.1)	2.57 (65.4)	4.79 (122)	0.22 (5.6)	0.28 (7.1)	0.39 (17.5)	0.28 (7.1)	0.24 (6)	0.12 (3)	0.75 (19.1)	1.31 (33.3)	0.34 (8.7)	4.21 (107)	1.10 (28)	1.59 (40.5)	4.37 (111)	1.63 (41.3)	0.56 lb. (250 g)
GH-40344	344	2,000 lbs. (900 kg)	1.06 (27)	2.13 (54)	3.31 (84.1)	5.13 (130)	0.34 (8.7)	0.34 (8.7)	1.13 (28.6)	0.37 (9.5)	0.31 (7.9)	0.16 (4)	1.25 (31.8)	1.87 (47.6)	0.50 (12.7)	5.91 (150)	1.44 (36.5)	2.28 (58)	6.06 (154)	2.37 (60.3)	1.54 lbs. (700 g)

UNIT: inch (metric mm)

Figura 5.19: Morsetto GH Serie 40324 [19] scelto per la chiusura degli sportelli.

Dopo aver scelto il morsetto che manterrà chiusi i due sportelli (Figura 5.19) sono stati calcolati i valori delle forze agenti. La prima forza è derivante dal morsetto, la seconda è quella generata dalla differenza di pressione tra l'interno della camera, che è in condizioni di vuoto, e l'esterno della camera, che si trova a pressione ambiente. Dopo aver trovato l'entità di queste forze è stato verificato che la forza per unità di lunghezza sviluppata fosse sufficiente a raggiungere la deformazione desiderata.

Forze agenti:

$$F_{\text{tot}} = F_{\text{morsetto}} + F_{P \text{ esterna}} = 9150 \text{ N}$$

con:

- $F_{\text{morsetto}} = 2250 \text{ N}$
- $F_{P \text{ esterna}} = P_{\text{amb}} * A_{\text{sportello}} = 0,101325 * 68100 = 6900 \text{ N}$

La forza per unità di lunghezza risultante corrisponde a:

$$F_{\text{per unità di lunghezza}} = F_{\text{tot}} / l_{\text{guarnizione}} = 9150 / 2059,25 = 4,44 \text{ N/mm} > 2,5 \text{ N/mm}$$

Una forza per unità di lunghezza di circa 4,44 N/mm permette di ottenere una deformazione iniziale della guarnizione di circa il 20% andando a soddisfare quindi le indicazioni del manuale Trelleborg (*Figura 5.18* sinistra).

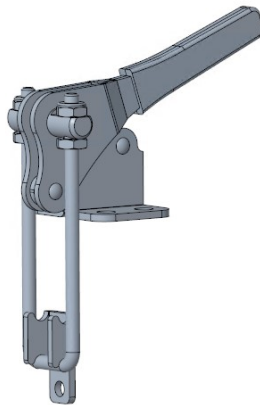


Figura 5.20: CAD Morsetto GH Serie 40324 Shore 70 A per la chiusura degli sportelli della camera [19].

Ulteriori elementi presenti negli sportelli sono le flange CF 63. Queste permettono di osservare ciò che avviene all'interno della camera durante la fase di test. Inoltre, tramite un pirometro puntato verso l'interno della camera, è possibile monitorare la temperatura del provino o di altri componenti. Anche in questo caso la tenuta del vuoto è garantita da una guarnizione posta tra lo sportello e la flangia CF 63, compressa tramite l'azione di 4 viti M8.

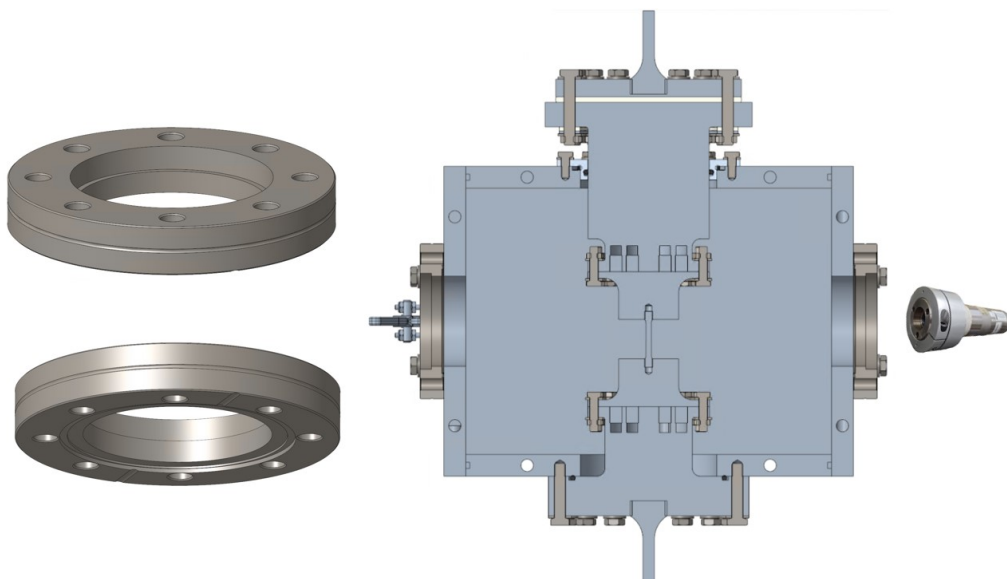


Figura 5.21: Flangia CF 63 e relativo posizionamento negli sportelli.

Così come il corpo della camera, anche gli sportelli saranno dotati di un loro circuito di raffreddamento il cui layout viene riportato in Figura 5.22.

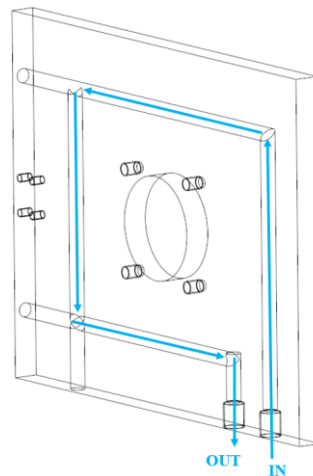


Figura 5.22: Layout del sistema di raffreddamento degli sportelli. Le frecce azzurre indicano il percorso che seguirà il fluido refrigerante.

5.8 Isolamento elettrico del sistema di riscaldamento per test ad elevata temperatura in alto vuoto

Uno dei vincoli posti al progetto era quello di poter scaldare i provini fino a temperature di 2000÷2500 °C per effetto Joule tramite il passaggio diretto di corrente.

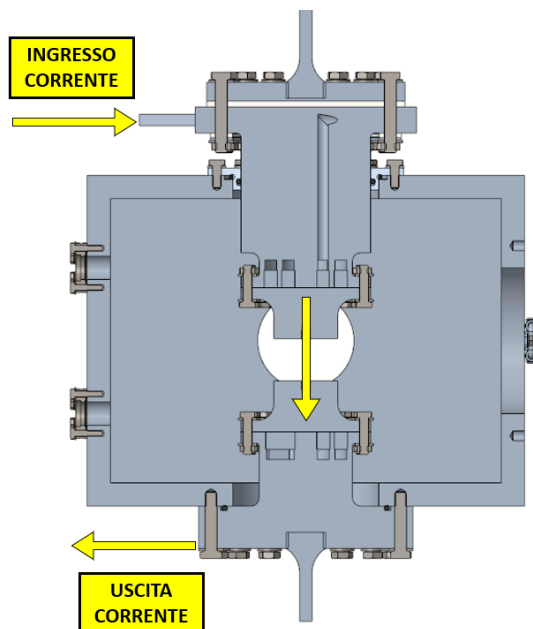


Figura 5.23: Percorso della corrente che andrà a scaldare il provino per effetto Joule

Nel sistema progettato la corrente entrerà attraverso un elemento saldato all'albero in acciaio superiore, al quale verrà fissato il cavo collegato all'alimentatore di corrente. L'uscita della corrente avverrà attraverso un cavo fissato direttamente all'albero in acciaio inferiore tramite una vite.

Per questioni di sicurezza si è andati dunque ad isolare elettricamente il sistema nella parte superiore ponendo un disco in materiale isolante tra l'albero in acciaio superiore e l'afferraggio superiore. È stato posto poi un

anello, sempre in materiale isolante, tra l'albero in acciaio e le rondelle del collegamento bullonato in modo da non permettere alla corrente di passare attraverso le viti. Infine, per isolare la camera dall'albero percorso da corrente, è stata posta una boccola costituita dallo stesso materiale del disco e dell'anello appena citati.

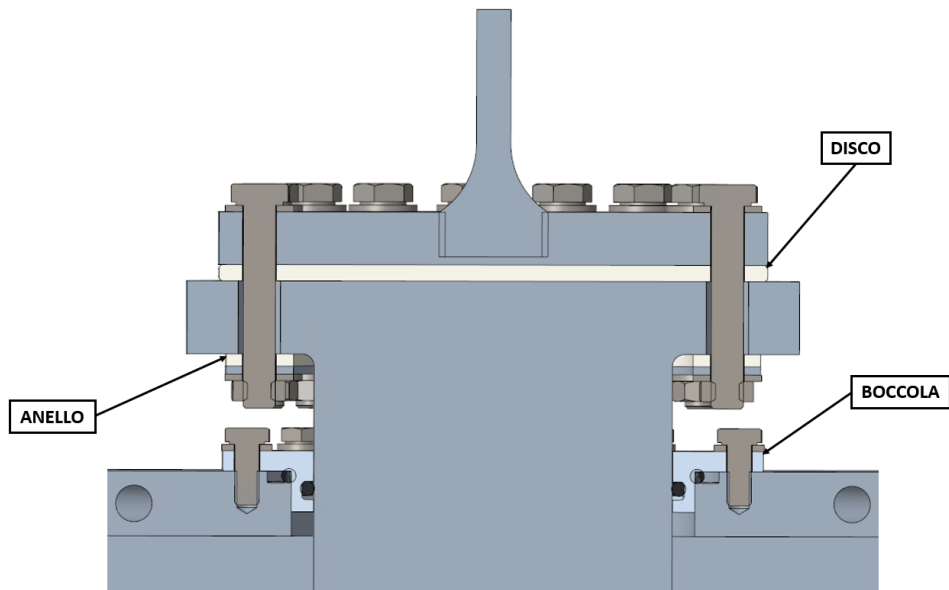


Figura 5.24: Vista sezionata del modello CAD 3D con indicati gli elementi che renderanno possibile l'isolamento elettrico (disco, anello, boccola).

Il materiale isolante scelto è stato un materiale plastico costituito da arnite + teflon (P.E.T.P. + P.T.F.E.) che possiede le seguenti caratteristiche [10]:

- tensione di rottura: $\sigma_R=75$ MPa;
- attrito con l'acciaio: $\mu=0,0011$;
- conduttività termica: $\lambda=0,29$ W/mK;
- resistività: $R=10^{18}$ Ω cm.

Questo materiale risulta essere un ottimo isolante termico ed elettrico con buone caratteristiche meccaniche. A questi aspetti si aggiunge il basso attrito con l'acciaio, importante soprattutto per la boccola che deve permettere lo scorrimento dell'albero mobile. Infine il costo di questa materia prima è decisamente inferiore rispetto a quello di materiali quali PEEK e MACOR utilizzati in altri contesti.

5.8.1 Disco e anello isolanti in P.E.T.P. + P.T.F.E.

Il disco presenta un diametro di 136 mm e 16 fori M8 con gioco per permettere il passaggio delle viti.

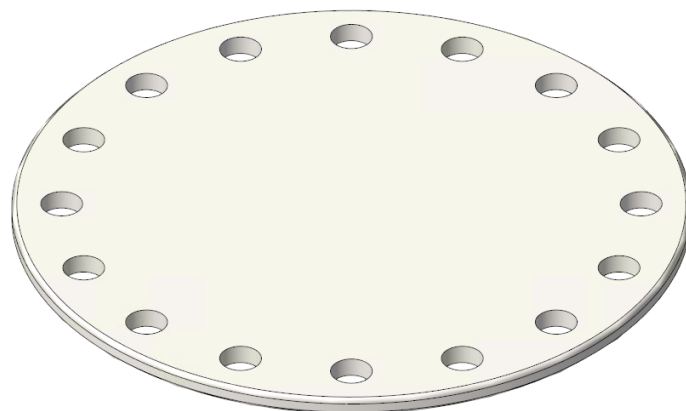


Figura 5.25: Modello CAD 3D del disco isolante in P.E.T.P. + P.T.F.E..

L'anello presenta un diametro esterno di 131 mm e un diametro interno di 100,5 mm. Anch'esso è dotato di 16 fori M8 con gioco per permettere il passaggio delle viti.

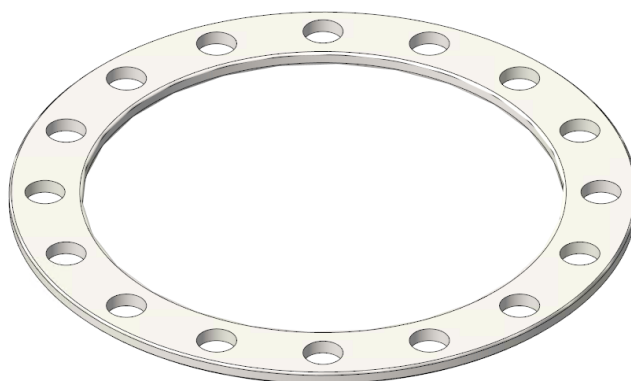


Figura 5.26: Modello CAD 3D dell'anello isolante in P.E.T.P. + P.T.F.E..

5.8.2 Boccola in P.E.T.P. + P.T.F.E.

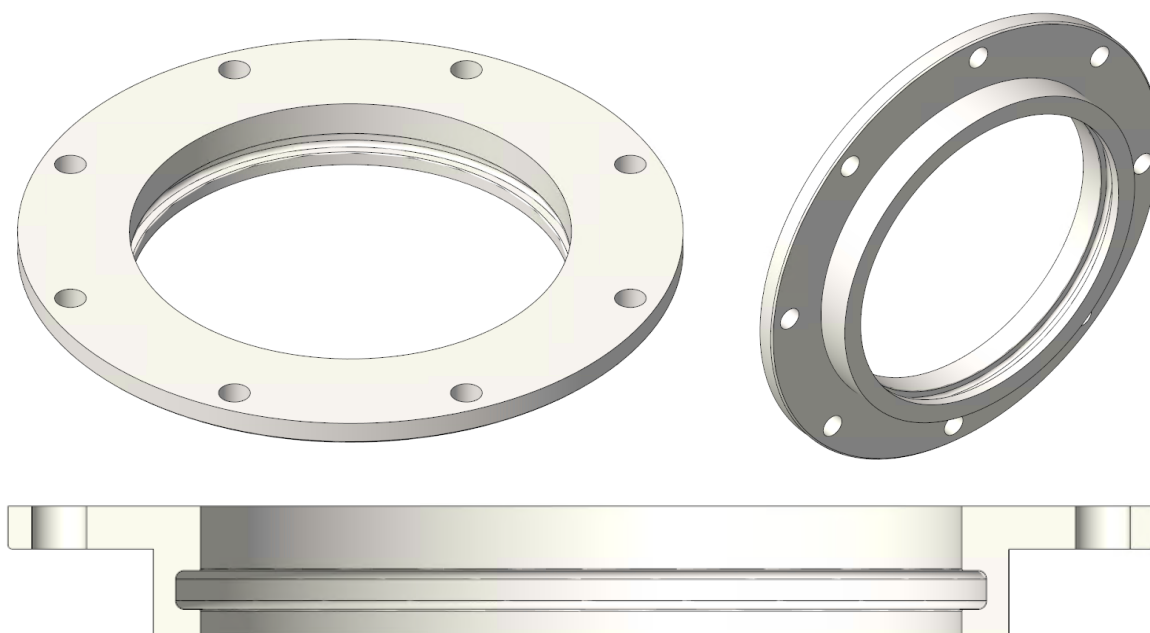


Figura 5.27: Modello CAD 3D dell'anello isolante in P.E.T.P. + P.T.F.E..

La boccola ha la triplice funzione di permettere il movimento all'albero mobile, isolare elettricamente la camera e garantire la tenuta del vuoto. Quest'ultima funzione sarà svolta con l'ausilio di due guarnizioni: la prima alloggiata in una cava ricavata nella camera; la seconda posizionata nella cava di sezione 2,9 mm × 4,5 mm [17] realizzata nella boccola stessa.

Sono stati previsti 8 fori M6 con gioco per permettere di fissare la boccola alla camera e andare a schiacciare la guarnizione che è visibile in Figura 5.24.

La boccola permetterà anche all'albero mobile di ruotare. Questo vuol dire che per avvitare il provino agli alberi in tantalio non correrà l'obbligo di girarlo in un solo verso andando a realizzare una filettatura destrorsa e una sinistrorsa (come avvenuto durante i test svolti presso i LNL). Quello che si dovrà fare sarà invece realizzare tutte filettature convenzionali. Per installare il provino lo si avviterà prima di tutto all'albero fisso. Successivamente si dovrà porre l'albero mobile a contatto con l'estremità libera del provino per andare ad avvitarlo.

5.9 Verifiche statiche e a fatica degli alberi e dei collegamenti bullonati

La parte conclusiva della progettazione meccanica ha visto la verifica statica e a fatica dei diversi componenti del sistema.

La forza considerata per le verifiche è stata quella massima resa disponibile dalla macchina di prova MTS Mini Bionix 858 ($F_{MAX}=15$ kN). Nel calcolo dei coefficienti di sicurezza si è tenuto in considerazione la temperatura massima alla quale saranno soggetti i componenti. Questa risulta infatti influire sulle tensioni di rottura e di snervamento dei materiali, abbassandone i valori.

Per quanto riguarda le verifiche statiche, una volta calcolata la tensione generata da questa forza sulla sezione minima dei componenti (o sull'area resistente nel caso dei collegamenti bullonati), verrà verificato che sia garantito un coefficiente di sicurezza $\gamma_s \geq 1,5$ rispetto alla tensione di snervamento.

$$\gamma_s = \frac{\sigma_{sn}}{\sigma} \geq 1,5$$

Per le verifiche a fatica sono stati calcolati i coefficienti di concentrazione delle tensioni legati a:

- modalità di sollecitazione ($K_v = 1.1$ nel caso di sollecitazione di trazione);
- forma (K_f);

$$K_f = q \cdot (K_t - 1) + 1$$

$$q = \frac{1}{1 + \frac{a}{r}}$$

dove:

- “ K_t ” è stato determinato sia attraverso il grafico in Figura 5.29 che attraverso analisi FEM strutturali;
- “ a ” è un coefficiente dipendente dal carico di rottura del materiale ricavabile dalla tabella in Figura 5.28;
- “ r ” è il raggio di raccordo dell'albero preso in considerazione.

f_t (MPa)	a
300	0,420
400	0,330
500	0,265
600	0,212
700	0,175
800	0,145
900	0,117
1 000	0,094
1 100	0,077
1 200	0,065
1 300	0,057
1 400	0,050
1 500	0,043
1 600	0,038
1 700	0,034

Figura 5.28: Coefficiente dipendente dal carico di rottura del materiale utilizzato per il calcolo del fattore di concentrazione delle tensioni e tratto da UNI 7670 [20].

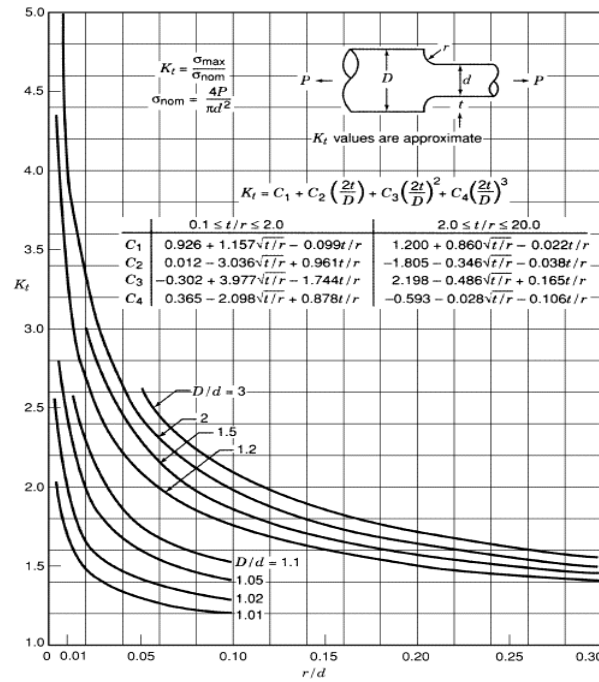


Figura 5.29: Fattore di concentrazione delle tensioni di Peterson dovuto alla forma [21].

- finitura superficiale (K_f);

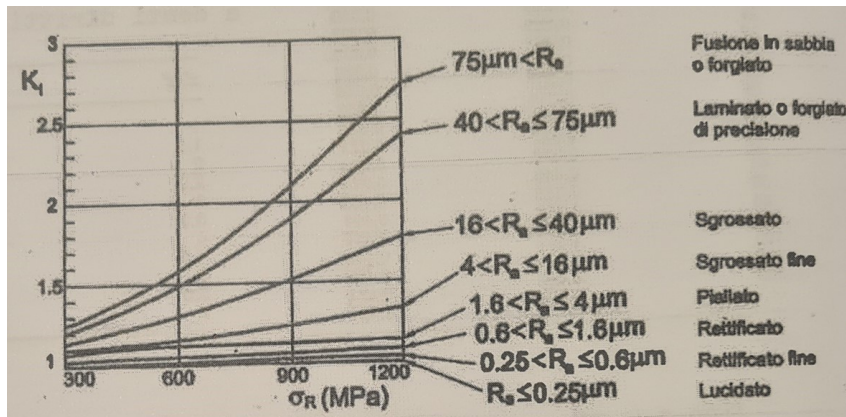


Figura 5.30: Fattore di concentrazione delle tensioni legato alla finitura superficiale tratto da UNI 7670 [20].

- dimensioni (K_d).

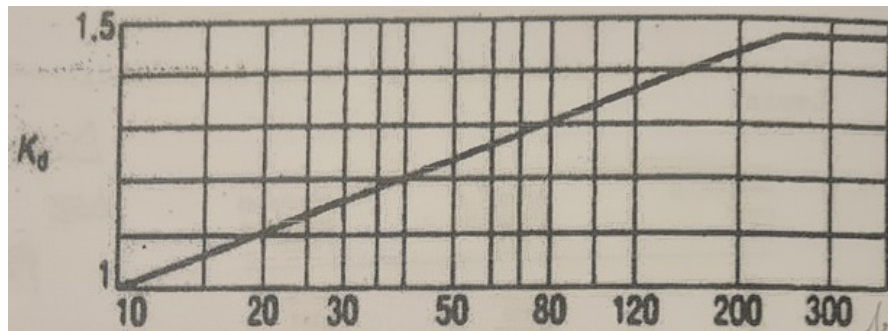


Figura 5.31: Fattore di concentrazione delle tensioni legato alle dimensioni tratto da UNI 7670 [20].

Una volta determinati i fattori di concentrazione delle tensioni si è diviso il limite di fatica del materiale per il loro prodotto per ricavare il limite di fatica corretto:

$$\sigma_{a\infty,-1}^* = \frac{\sigma_{a\infty,-1}}{K_f \cdot K_v \cdot K_l \cdot K_d}$$

Questo è stato poi diviso per l'ampiezza di tensione per ricavare il coefficiente di sicurezza a fatica.

$$\gamma_f = \frac{\sigma_{a\infty,-1}^*}{\sigma_a} \geq 1,6$$

I punti e i collegamenti bullonati sottoposti alle verifiche sono riportati in Figura 5.32.

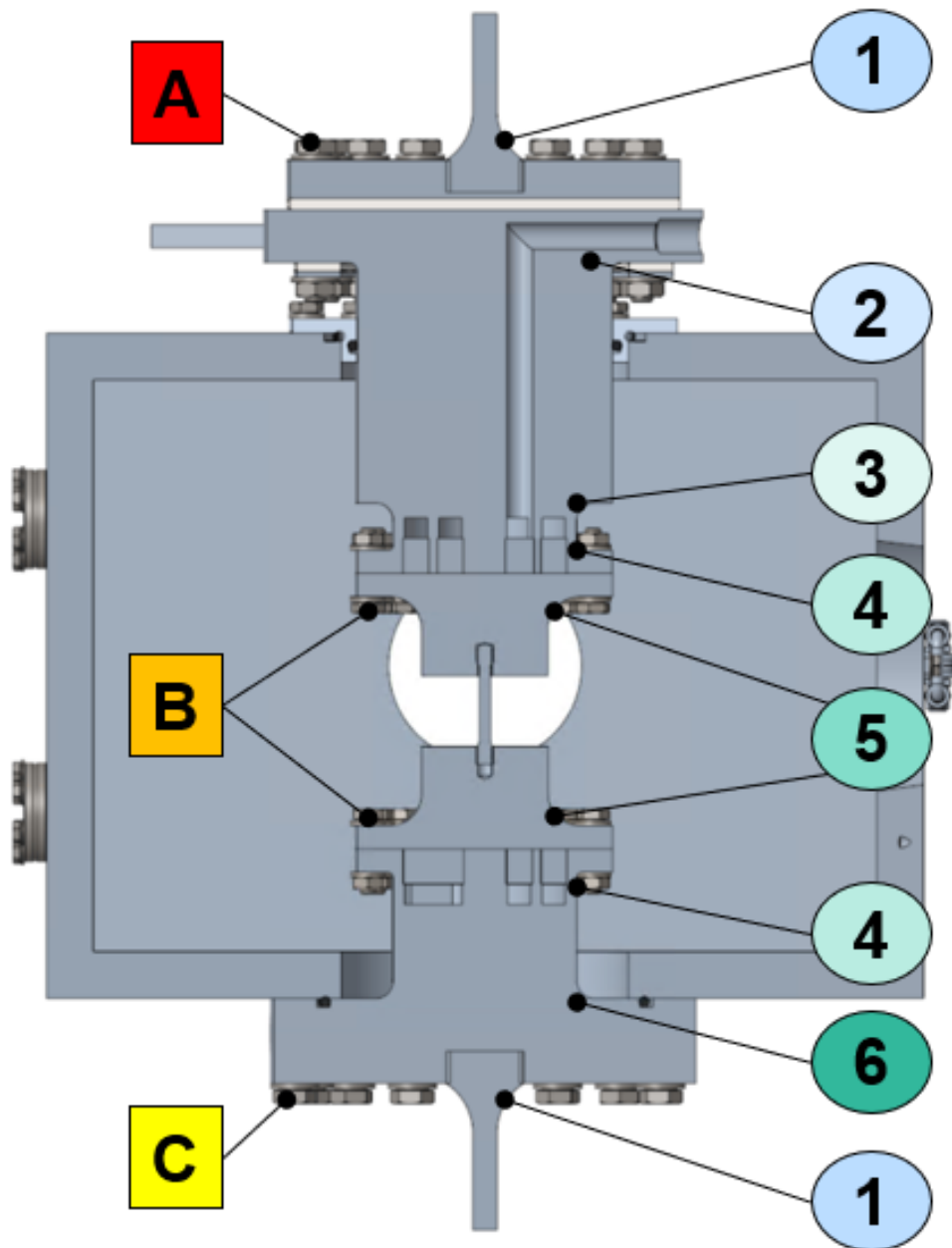


Figura 5.32: A) Collegamento bullonato tra camera e albero in acciaio inferiore – 16xM8; B) Collegamento bullonato tra albero in tantalio e albero in acciaio – 16xM6; C) Collegamento bullonato tra flangia, disco

isolante e albero in acciaio superiore – 16xM8; 1) Afferraggi; 2,3,4) Albero in acciaio; 5) Albero in tantalio; 4,6) Albero in acciaio inferiore.

5.9.1 Verifica di afferraggi, alberi in tantalio e alberi in acciaio

Di seguito verranno esposti i risultati delle verifiche statiche e a fatica dei componenti del sistema.

Per quanto riguarda i risultati delle verifiche a fatica saranno riportati sia quelli con K_t ricavato dai manuali [20], sia quelli con K_t ricavato da analisi FEM.

Prima di esporre i risultati verranno mostrate, in una serie di immagini, la mesh, i vincoli e i risultati delle analisi FEM (relativi ai diversi punti verificati a fatica nei componenti del sistema). In queste analisi, nel caso degli alberi, oltre al vincolo di spostamento nullo lungo la direzione X ($UX=0$), viene posto un vincolo $UY=0$ corrispondente all'azione esercitata dai collegamenti bullonati.

Per quanto riguarda la presentazione dei risultati delle verifiche a fatica, verranno mostrati sia quelli con K_t ricavato analiticamente che quelli con K_t ricavato tramite le analisi FEM. Tuttavia, nelle conclusioni, verranno considerati esclusivamente questi ultimi. Il motivo risiede nella precisione con la quale avviene la stima del fattore di concentrazione delle tensioni, nel caso delle analisi FEM, rispetto al caso analitico dove si controlla manualmente in un grafico il valore di interesse.

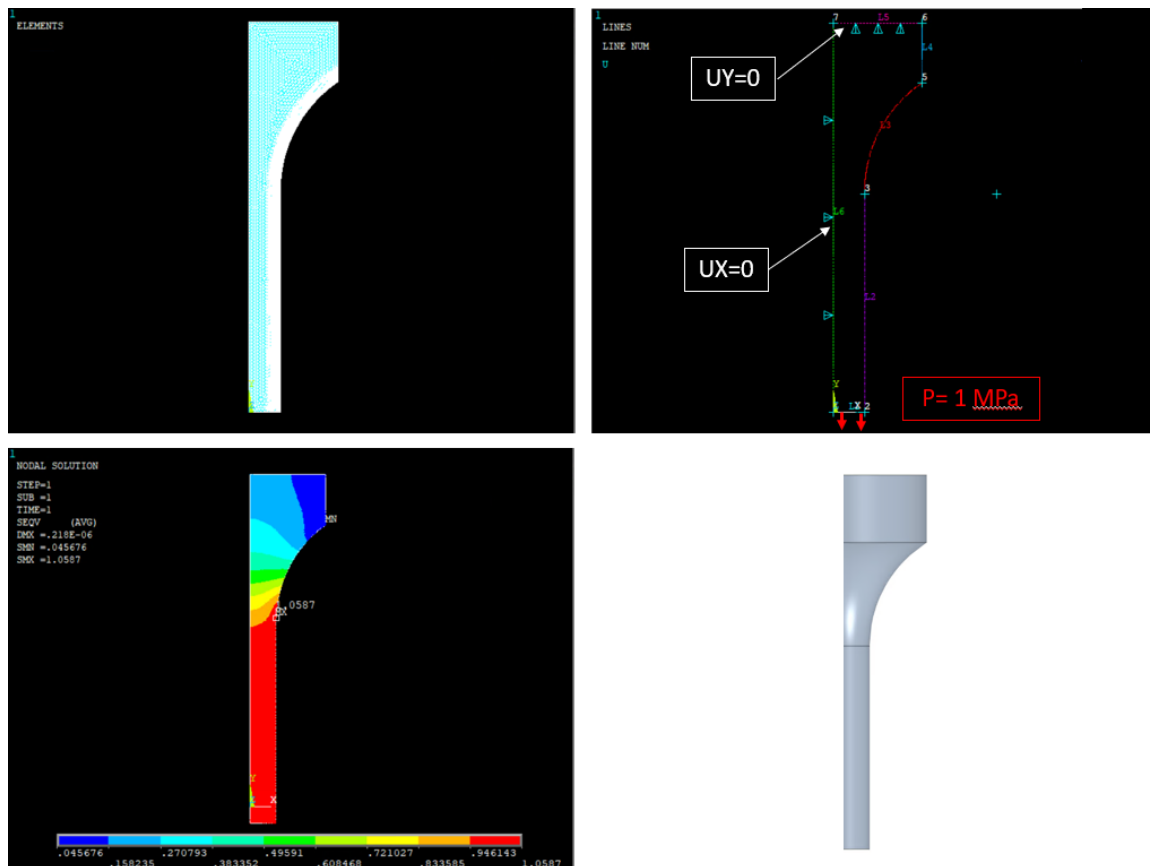


Figura 5.33: Analisi strutturale FEM per la stima del fattore di concentrazione delle tensioni K_t sul punto 1 (provino). In alto a sinistra la mesh. In alto a destra i vincoli. In basso a sinistra i risultati. In basso a destra il modello CAD del provino.

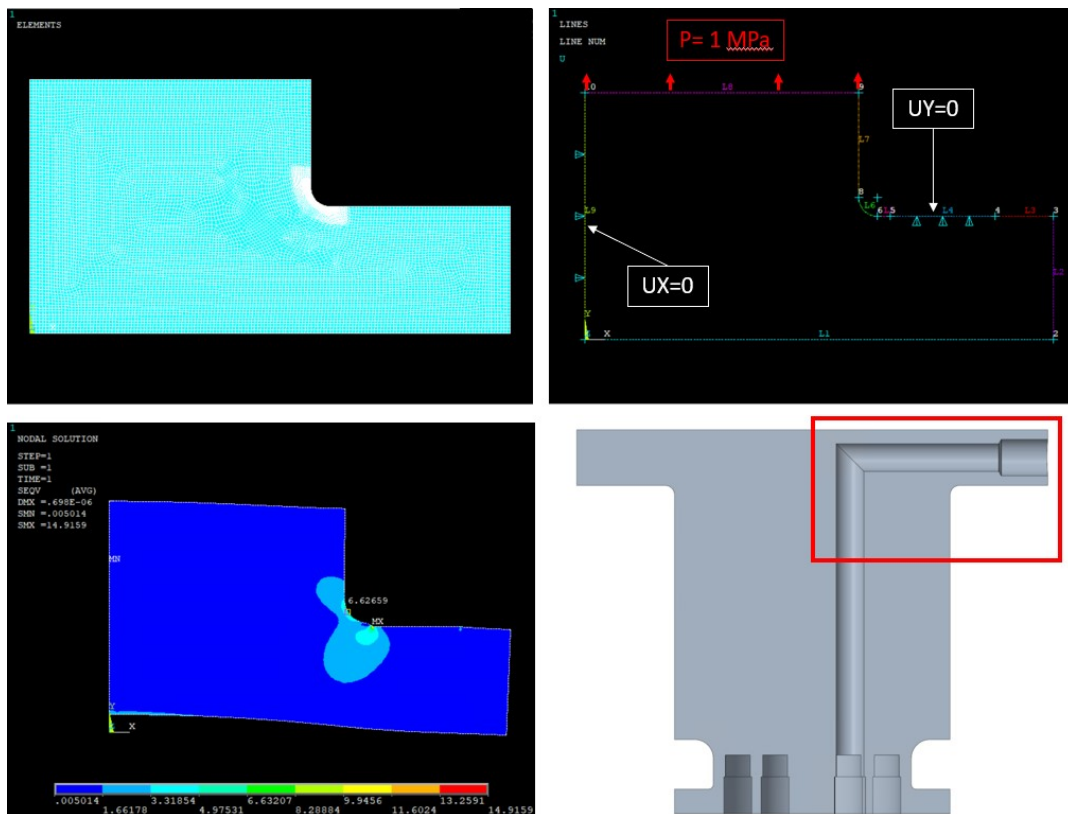


Figura 5.34: Analisi strutturale FEM per la stima del fattore di concentrazione delle tensioni K_t sul punto 2 (albero in acciaio superiore). In alto a sinistra la mesh. In alto a destra i vincoli. In basso a sinistra i risultati. In basso a destra il modello CAD dell'albero in acciaio mobile.

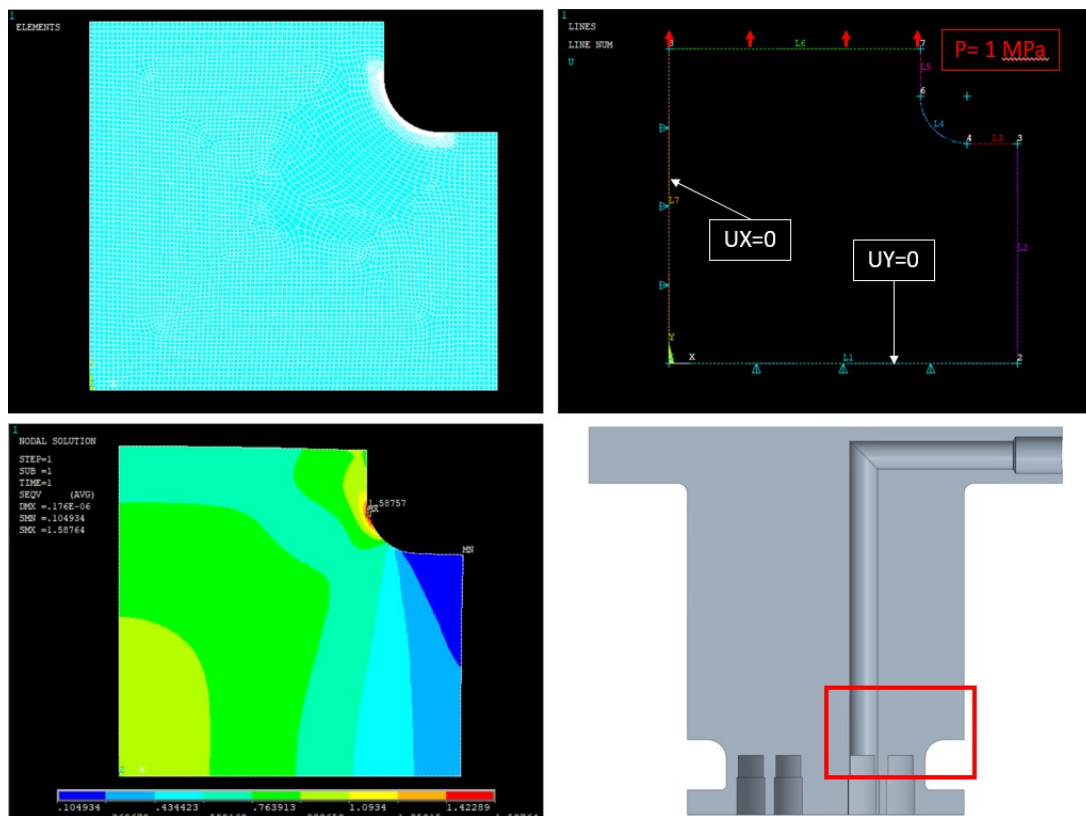


Figura 5.35 Analisi strutturale FEM per la stima del fattore di concentrazione delle tensioni K_t sul punto 3 (albero in acciaio superiore). In alto a sinistra la mesh. In alto a destra i vincoli. In basso a sinistra i risultati. In basso a destra il modello CAD dell'albero in acciaio mobile.

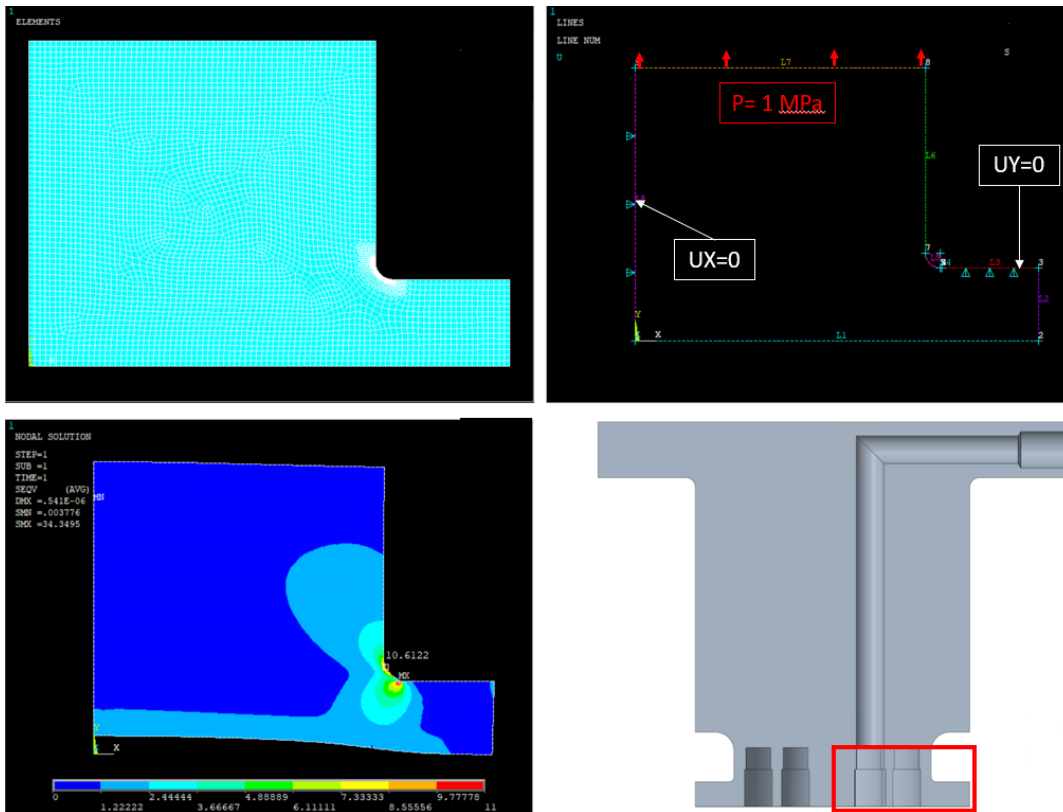


Figura 5.36: Analisi strutturale FEM per la stima del fattore di concentrazione delle tensioni K_t sul punto 4 (albero in acciaio superiore). In alto a sinistra la mesh. In alto a destra i vincoli. In basso a sinistra i risultati. In basso a destra il modello CAD dell'albero in acciaio mobile.

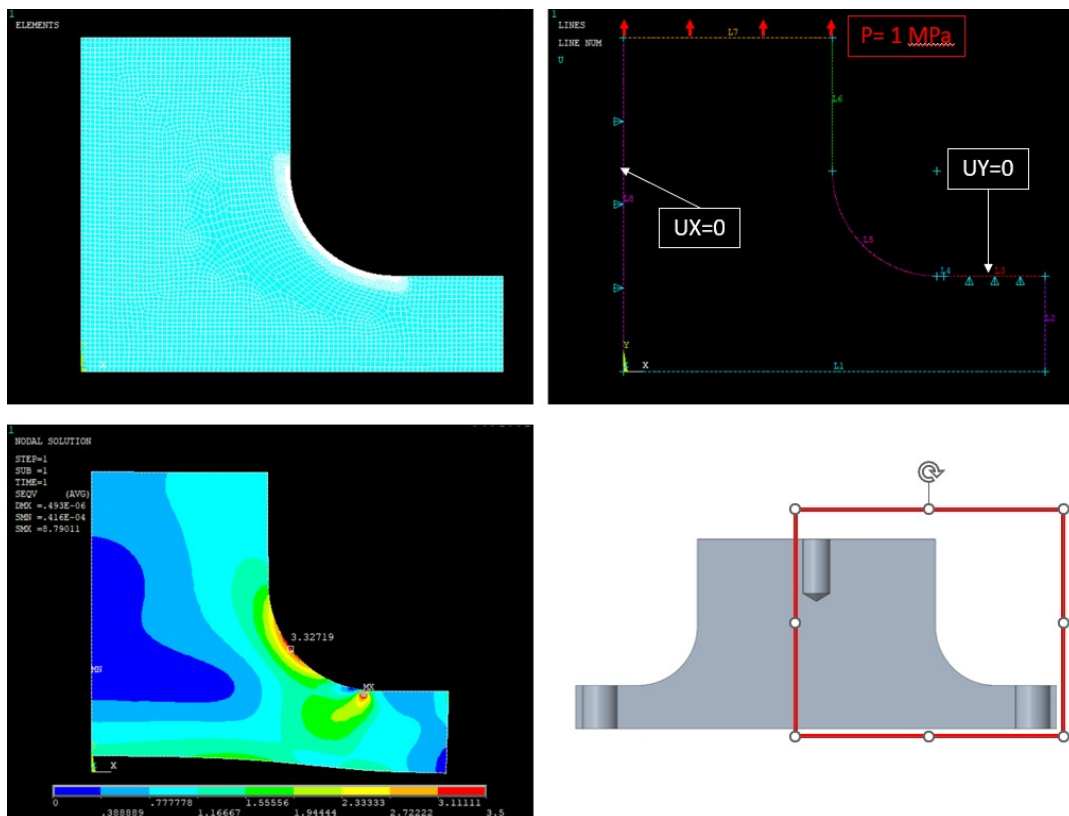


Figura 5.37: Analisi strutturale FEM per la stima del fattore di concentrazione delle tensioni K_t sul punto 2 (albero in tantalio). In alto a sinistra la mesh. In alto a destra i vincoli. In basso a sinistra i risultati. In basso a destra il modello CAD dell'albero in tantalio.

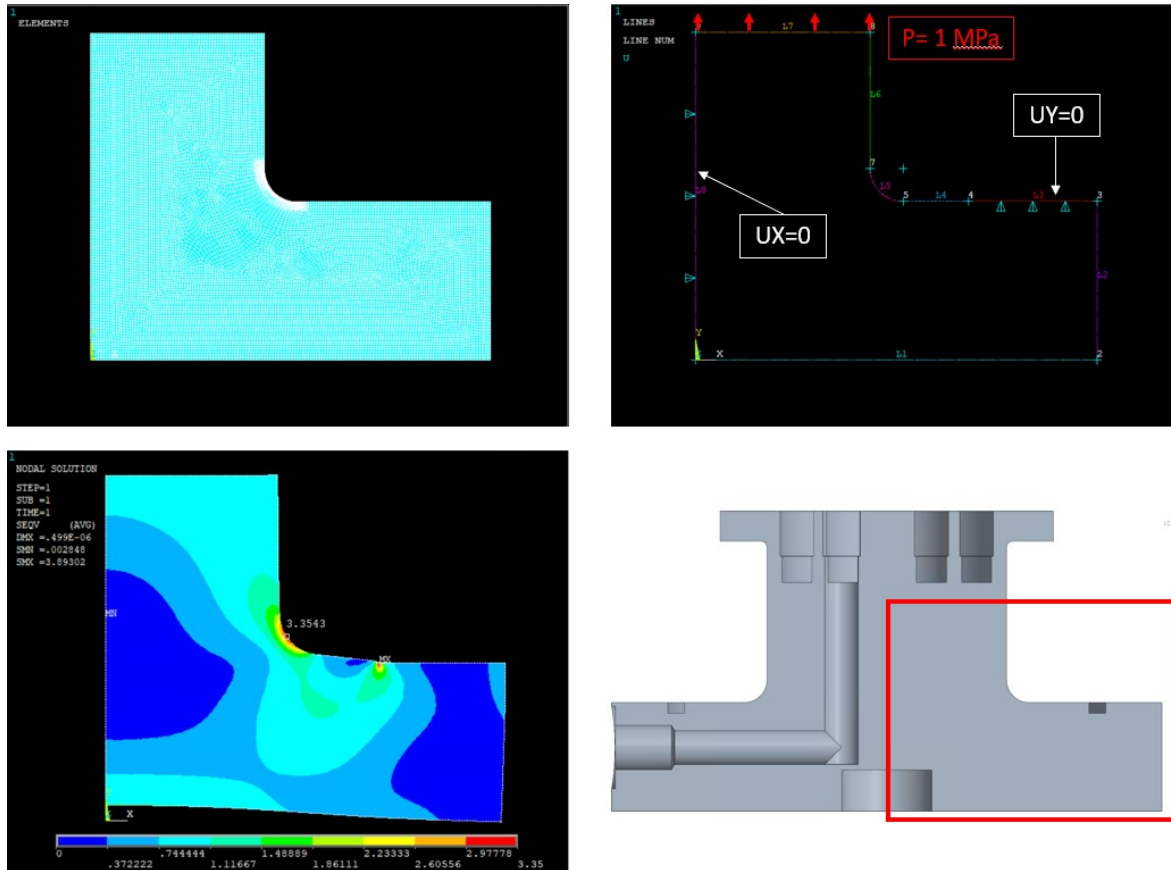


Figura 5.38: Analisi strutturale FEM per la stima del fattore di concentrazione delle tensioni K_t sul punto 4 (albero in acciaio inferiore). In alto a sinistra la mesh. In alto a destra i vincoli. In basso a sinistra i risultati. In basso a destra il modello CAD dell'albero in acciaio fisso.

- Risultati analitici

ANALITICO	N.°	D (mm)	d (mm)	t (mm)	r (mm)	t/r	D/d	r/d	Kt grafico	a	q	Kf grafico	kv	kl	Kd
Afferraggi macchina	1	27	9.5	8.75	20	0.44	2.84	2.11	1.40	0.094	1.00	1.40	1.1	1.05	1.00
Albero acciaio superiore	2	151.8	88.8	31.5	3	10.50	1.71	0.03	2.80	0.194	0.94	2.69	1.1	1.05	1.31
	3	88.8	64	12.4	6	2.07	1.39	0.09	1.85	0.194	0.97	1.82	1.1	1.05	1.26
Albero Tantalio	4	88.8	64	12.4	1.6	7.75	1.39	0.03	2.60	0.265	0.86	2.37	1.1	1.04	1.26
	5	89	44	22.5	11	2.05	2.02	0.25	3.10	0.42	0.96	3.02	1.1	1.03	1.21
Albero acciaio inferiore	6	147	88.8	29.1	6	4.85	1.66	0.07	2.10	0.194	0.97	2.07	1.1	1.05	1.31

ANALITICO	N.°	D (mm)	d (mm)	t (mm)	r (mm)	Temperatura (°C)	σ_R (MPa)	σ_a^∞ (MPa)	σ_n^∞ *(MPa)	σ_{sn} (MPa)	F (N)	Area min (mm ²)	σ_a (MPa)	γ statico	γ fatica
Afferraggi macchina	1	27	9.5	8.75	20	25	1000	500	309.63	900	15000	70.88	423.24	2.13	0.73
Albero acciaio superiore	2	151.8	88.8	31.5	3	25	650	325	80.11	275	15000	6193.21	4.84	56.77	16.54
	3	88.8	64	12.4	6	25	650	325	122.52	275	15000	3216.99	9.33	29.49	13.14
	4	88.8	64	12.4	1.6	100	500	250	73.13	225	15000	3216.99	9.33	24.13	7.84
Albero Tantalio	5	89	44	22.5	11	170	260	130	31.45	105	15000	1520.53	19.73	5.32	1.59
Albero acciaio inferiore	6	147	88.8	29.1	6	25	650	325	104.36	275	15000	6193.21	4.84	56.77	21.54

Figura 5.39: Verifiche statica e a fatica sui componenti del sistema di riscaldamento per prove ad alta temperatura in alto vuoto -Risultati analitici. Coefficienti di sicurezza riportati nelle ultime due colonne in basso a destra.

- **Risultati da analisi FEM**

2D	N.°	D (mm)	d (mm)	t (mm)	r (mm)	t/r	D/d	r/d	Kt FEM	a	q	Kf FEM	kv	kl	Kd
Afferraggi macchina	1	27	9.5	8.75	20	0.44	2.84	2.11	1.05	0.094	1.00	1.05	1.1	1.05	1.00
	2	151.8	88.8	31.5	3	10.50	1.71	0.03	7.00	0.194	0.94	6.64	1.1	1.05	1.31
Albero acciaio superiore	3	88.8	64	12.4	6	2.07	1.39	0.09	1.58	0.194	0.97	1.56	1.1	1.05	1.26
	4	88.8	64	12.4	1.6	7.75	1.39	0.03	10.60	0.265	0.86	9.24	1.1	1.04	1.26
Albero Tantalio	5	89	44	22.5	11	2.05	2.02	0.25	3.33	0.42	0.96	3.24	1.1	1.03	1.21
Albero acciaio inferiore	6	147	64	41.5	6	6.92	2.30	0.09	3.35	0.194	0.97	3.28	1.1	1.05	1.26

2D	N.°	D (mm)	d (mm)	t (mm)	r (mm)	Temperatura (°C)	σ_R (MPa)	$\sigma_{a\infty}$ (MPa)	$\sigma_{a\infty}^*$ (MPa)	σ_{sn} (MPa)	F (N)	Area min (mm ²)	σ_a (MPa)	γ statico	γ fatica
Afferraggi macchina	1	27	9.5	8.75	20	25	1000	500	412.38	900	15000	70.88	423.24	2.13	0.97
	2	151.8	88.8	31.5	3	25	650	325	32.48	275	15000	6193.21	4.84	56.77	6.71
Albero acciaio superiore	3	88.8	64	12.4	6	25	650	325	143.04	275	15000	3216.99	9.33	29.49	15.34
	4	88.8	64	12.4	1.6	100	500	250	18.79	225	15000	3216.99	9.33	24.13	2.01
Albero Tantalio	5	89	44	22.5	11	170	260	130	29.30	105	15000	1520.53	19.73	5.32	1.48
Albero acciaio inferiore	6	147	88.8	29.1	6	25	650	325	68.18	275	15000	3216.99	9.33	29.49	7.31

Figura 5.40: Verifiche statica e a fatica sui componenti del sistema di riscaldamento per prove ad alta temperatura in alto vuoto -Risultati da analisi FEM. Coefficienti di sicurezza riportati nelle ultime due colonne in basso a destra.

5.9.2 Verifica dei collegamenti bullonati

Per quanto riguarda i collegamenti bullonati si è scelto di utilizzare delle viti alto resistenziali di classe 8.8. Le proprietà meccaniche (tensione di snervamento f_{yt} e tensione di rottura f_{ut}) in funzione della temperatura sono riportate in Figura 5.41 e verranno utilizzate per le verifiche statiche e a fatica.

	f_{uT}	f_{yT}
	8.8	8.8
	Mean (MPa)	Mean (MPa)
20	865.3	668.2
100	813.6	577.5
200	835.7	543.8
300	939.5	575.0
400	676.2	493.7
500	436.2	374.8
600	236.1	213.4
700	98.76	84.89
800	63.72	47.43
900	41.98	24.66

Figura 5.41: Tensione di snervamento f_{yt} e tensione di rottura f_{ut} delle viti alto resistenziali di classe 8.8 in funzione della temperatura [22].

Nel caso delle verifiche statiche è stato ipotizzato un carico di 15 kN (F) che è stato diviso per il numero di viti (N_{viti}) e per l'area resistente di una singola vite (A_{res}) per ottenere il valore della tensione agente sulla singola vite (σ).

$$\sigma = \frac{F}{N_{viti} \cdot A_{res}}$$

La tensione così ottenuta è stata divisa per la tensione di snervamento andando a ricavare il coefficiente di sicurezza statico che doveva risultare superiore al valore di 1,5.

$$\gamma_s = \frac{\sigma_{sn}}{\sigma} \geq 1,5$$

Per la verifica a fatica è stato ipotizzato che tutto il carico fosse concentrato sulle viti. La variazione massima di forza considerata è stata sempre di 15 kN. Questo è dovuto al fatto che nel momento in cui il sistema si trova a lavorare in compressione, il carico si distribuisce negli alberi senza sollecitare le viti. È stata calcolata quindi la variazione massima di tensione legata al carico di 15 kN ($\Delta\sigma_a$), andando a confrontarla successivamente con i valori di variazione di tensione riportati nelle curve σ -N a fatica relativi alla classe 50 riportate in CNR UNI 10011 [23] (Figura 5.42). Infine è stata calcolata la vita a fatica per la quale viene garantito un coefficiente di sicurezza di $\gamma_f = 1,6$.

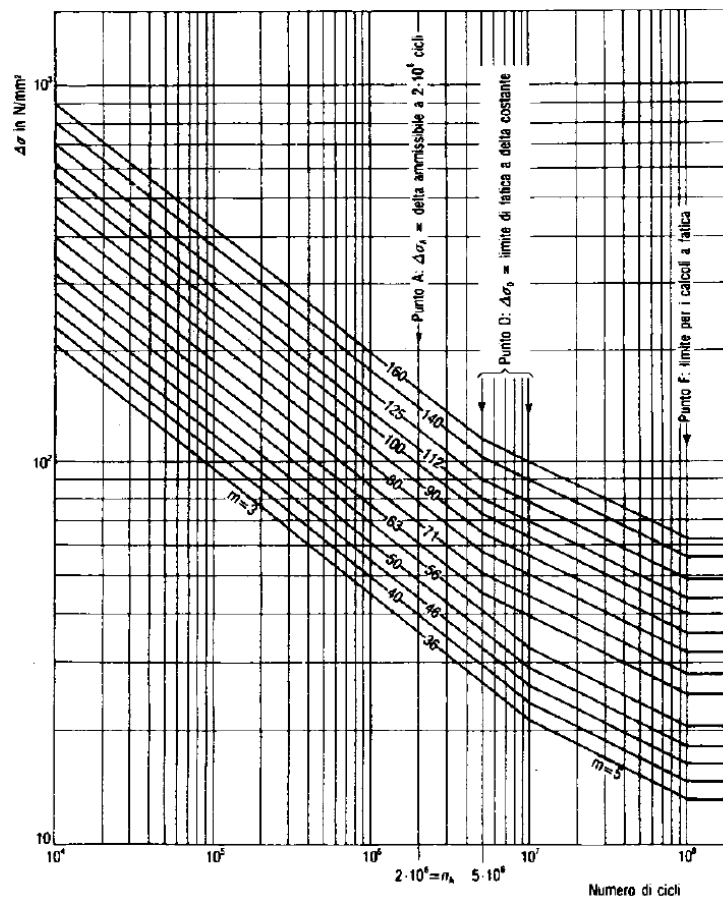


Figura 5.42: Curve SN per il calcolo della vita a fatica dei particolari strutturali soggetti a trazione o compressione [23].

N.°	Filettatura	N.° viti	Temperatura (° C)	Area res (mm ²)	σ_R (MPa)	σ_{sn} (MPa)	$\Delta\sigma_{amm}$ (MPa)	$\Delta\sigma_a$ 5×10^8 cicli (MPa)	$\Delta\sigma_a$ 2×10^9 cicli (MPa)	F (N)	Area res (mm ²)	$\Delta\sigma_a$ (MPa)	γ statico	Vita a fatica (γ fatica =1,6)
A	M8	16	25	36.6	865	668	11.1	36.8	50	15000	585.60	25.61	26.08	3.06E+07
B	M6	16	130	20.1	825	560	11.1	36.8	50	15000	321.60	46.64	12.01	2.46E+06
C	M8	16	25	36.6	865	668	11.1	36.8	50	15000	585.60	25.61	26.08	3.06E+07

Figura 5.43: Verifiche statica e a fatica sui collegamenti bullonati del sistema di riscaldamento per prove ad alta temperatura in alto vuoto -Risultati analitici.

Un ulteriore elemento filettato da verificare è stato l'afferraggio. La filettatura è di tipo M27, alla quale corrisponde un'area resistente $A_{res} = 459 \text{ mm}^2$. Dalla verifica statica è risultato quindi:

$$\sigma = \frac{F}{A_{res}} = \frac{15000}{459} = 32,7 \text{ MPa}$$

$$\gamma_s = \frac{\sigma_{sn}}{\sigma} = \frac{668}{32,7} = 20,4 \geq 1,5$$

In questo caso la filettatura risulta caricata sia a compressione che a trazione. È stata quindi considerata una variazione di forza pari a $2F_{MAX} = 30000 \text{ N}$ per la verifica a fatica.

$$\Delta\sigma_a = \frac{F}{A_{res}} = \frac{30000}{459} = 65,4 \text{ MPa}$$

Questa variazione di tensione corrisponde ad una vita di 893730 cicli.

5.9.3 Verifica degli elementi con funzione di isolanti elettrici

Altri due elementi sottoposti a verifica sono stati il disco e l'anello in materiale isolante (*Figura 5.44*), posti nell'albero superiore per isolare elettricamente l'afferraggio dagli alberi lungo i quali scorrerà la corrente. Per entrambi i componenti la sollecitazione è di compressione. Da datasheet [10] viene quindi considerato un carico di rottura pari a $\sigma_R = 75 \text{ MPa}$ un carico di compressione che genera una deformazione del 2% corrispondente a $\sigma_{comp,def 2\%} = 47 \text{ MPa}$.

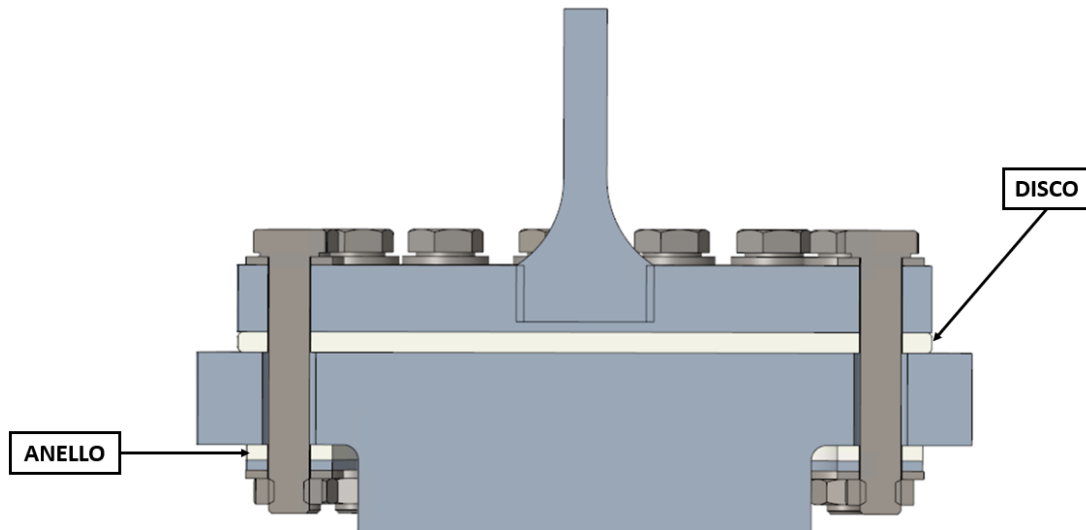


Figura 5.44: Vista sezionata del modello CAD 3D con indicati gli elementi che renderanno possibile l'isolamento elettrico (disco, anello) soggetti a verifiche strutturali.

Il disco in P.E.T.P. + P.T.F.E. sarà soggetto ad uno sforzo di compressione dovuto al preserraggio delle viti. Questo carico verrà ridotto quando il sistema lavorerà in trazione (i collegamenti bullonati assorbiranno il carico) e ad aumentare quando il sistema lavorerà in compressione. Si ipotizza quindi di lavorare in compressione, con un precarico pari al carico reso disponibile dalla macchina di prova. Di seguito si riporta quindi la verifica statica.

$$F_{precarico} = F_{MAX} = 15000 = 30000 \text{ N}$$

$$\sigma_{disco} = \frac{F_{precarico} + F_{MAX}}{A_{disco}} = \frac{15000 + 15000}{13640} = 2,2 \text{ MPa}$$

$$\gamma_s = \frac{\sigma_{comp,def 2\%}}{\sigma_{disco}} = \frac{47}{2,2} = 21,36 \geq 1,5$$

L'anello in P.E.T.P. + P.T.F.E. sarà soggetto ad uno sforzo di compressione dovuto al preserraggio delle viti. Questo carico verrà ridotto quando il sistema lavorerà in compressione (gli alberi assorbiranno il carico) e ad aumentare quando il sistema lavorerà in trazione. Si ipotizza quindi di lavorare in trazione, con un precarico pari al carico reso disponibile dalla macchina di prova. Per semplicità si considera inoltre l'anello come una serie di 16 rondelle, una per vite, che vengono compresse tra il bullone e l'albero in acciaio. L'area minima di contatto è quella con l'albero in acciaio (Figura 5.45) e verrà presa come riferimento per la verifica strutturale:

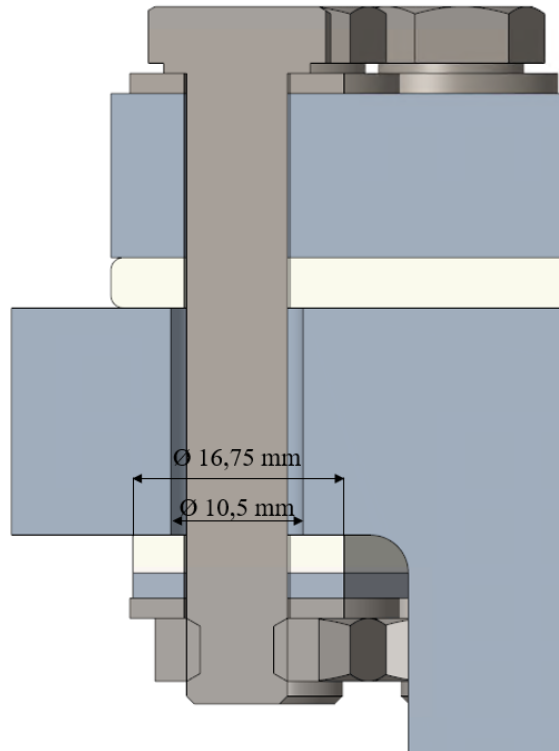


Figura 5.45: Dettaglio del contatto tra l'anello in materiale isolante e l'albero in acciaio.

$$F_{precarico} = F_{MAX} = 15000 = 30000 \text{ N}$$

$$\sigma_{disco} = \frac{F_{precarico} + F_{MAX}}{N^{\circ} \text{viti} \cdot A_{contatto}} = \frac{15000 + 15000}{16 \cdot \pi \cdot \frac{16,75^2 - 10,5^2}{4}} = 14 \text{ MPa}$$

$$\gamma_s = \frac{\sigma_{comp, def 2\%}}{\sigma_{disco}} = \frac{47}{14} = 3,36 \geq 1,5$$

5.9.4 Conclusioni sulle verifiche statiche e a fatica

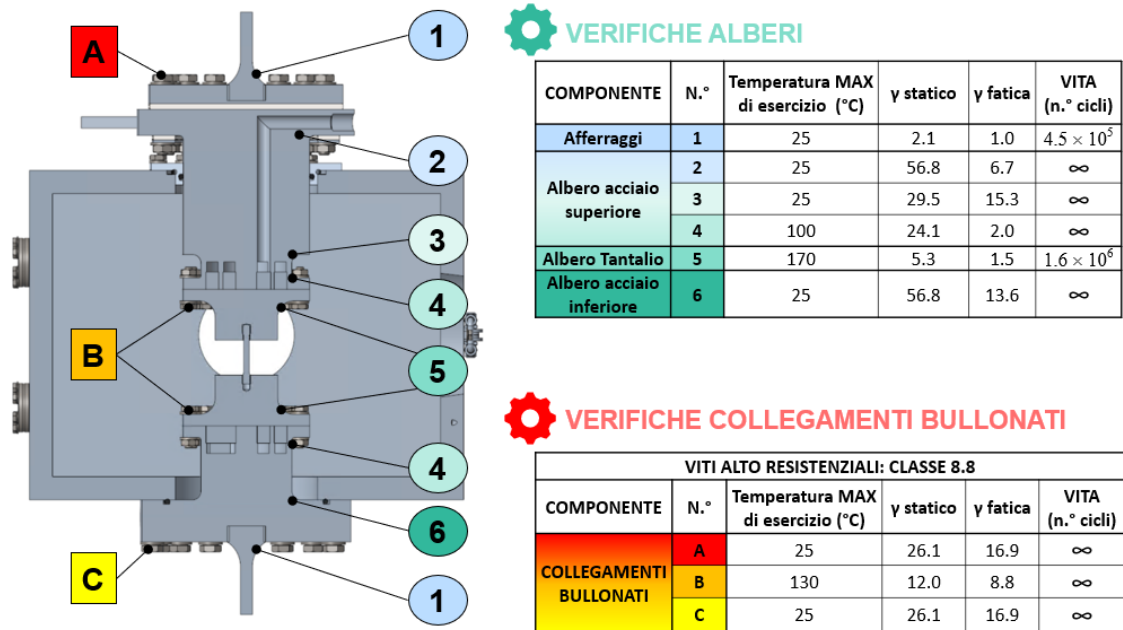


Figura 5.46: Riepilogo dei risultati derivanti dalle verifiche statiche e a fatica sugli elementi del sistema per prove ad alta temperatura in alto vuoto.

Osservando i risultati in Figura 5.46, a non assicurare vita infinita sono gli alberi in tantalio che hanno un coefficiente di sicurezza a fatica di 1,5 e garantiscono un coefficiente di sicurezza pari a 1,6 per $1,6 \times 10^6$ cicli. Anche gli afferraggi intercambiabili non assicurano vita infinita. Essi infatti garantiscono un coefficiente di sicurezza di 1,6 per una vita di 450 000 cicli che risulta inferiore anche alla vita garantita dalla filettatura dell'afferraggio, la quale corrisponde a circa 890000 cicli.

Per quanto riguarda i collegamenti bullonati, optando per viti alto resistenziali di classe 8.8, i collegamenti bullonati A e C garantiscono una vita a fatica di $3,06 \times 10^7$ cicli mentre il collegamento bullonato B garantisce una vita a fatica di $2,46 \times 10^6$ cicli.

Infine, prendendo come riferimento il componente più critico dal punto di vista delle verifiche statiche, ovvero gli afferraggi, è stata stimata la forza massima alla quale può essere soggetto il sistema per prove di tipo statico andando sempre a garantire un coefficiente di sicurezza γ_s pari a 1,5.

$$F_{MAX} = \frac{\sigma_{sn}}{1,5} \cdot A = \frac{900}{1,5} \cdot \pi \cdot \frac{9,5^2}{4} \cong 42500 \text{ N}$$

CAPITOLO 6

Conclusioni e sviluppi futuri

L'obiettivo di questa tesi era quello di progettare un sistema di riscaldamento per effettuare prove a trazione e compressione ad alte temperature (fino a 2000÷2500 °C) e in alto vuoto. I provini da inserire nel sistema dovevano essere scaldati per effetto Joule tramite il passaggio diretto di una corrente massima di 800 A. Inoltre, era necessario tenere in considerazione il fatto di dover inserire il sistema all'interno della macchina di prova MTS Mini Bionix 858 presente presso i Laboratori del Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Padova. La configurazione dell'apparato doveva inoltre consentire di effettuare misurazioni di temperatura tramite pirometri e termocoppie e misurazioni ottiche di deformazione durante l'utilizzo dell'apparecchiatura.

Inizialmente è stata verificata la possibilità di scaldare i provini in grafite, tantalio, tungsteno, acciaio e titanio per effetto Joule tenendo conto della corrente massima disponibile di 800 A. Una volta definito questo aspetto e dopo aver dimensionato correttamente i provini con estremità filettate, rifacendosi alla normativa BS EN ISO 6892-2 (2018) [12], il passo successivo ha visto il dimensionamento degli alberi del sistema basandosi su simulazioni elettrotermiche dei componenti mediante analisi agli Elementi Finiti, svolte con il software ANSYS. In questo procedimento è stato tenuto in considerazione il fatto di dover prevedere un circuito di raffreddamento interno agli alberi, per ottenere temperature sostenibili dai componenti durante l'utilizzo del sistema. È stato simulato sia l'impiego di aria compressa che quello di acqua andando a scegliere quest'ultimo a causa delle limitazioni sull'utilizzo dell'aria, legate alle temperature eccessivamente elevate lungo gli alberi.

Parallelamente allo sviluppo dei due alberi del sistema è stata progettata la camera che li avrebbe racchiusi per garantire la condizione di alto vuoto. Per la camera sono stati previsti due sportelli in modo tale da permettere di inserire agevolmente i provini nel sistema. Ricordando i requisiti del sistema da progettare la camera è stata dotata di due viewport per effettuare misurazioni di temperatura tramite pirometri e misurazioni ottiche di deformazione. Inoltre sono state inserite due flange CF 16 per inserire eventuali termocoppie. Come gli alberi, anche la camera e gli sportelli sono stati dotati di un circuito di raffreddamento ad acqua il cui comportamento è stato simulato attraverso analisi elettrotermiche agli Elementi Finiti, svolte con il software ANSYS.

Per validare i risultati derivanti dalle simulazioni è stato deciso di procedere con alcuni test sperimentali. È stato utilizzato il sistema presente ai LNL per test a compressione ad alta temperatura in alto vuoto [4], andando a riprogettare gli alberi in acciaio e in tantalio per poter effettuare prove a trazione su provini con estremità filettate. Ciò che è emerso dai test è stata l'integrità della filettatura degli alberi in tantalio che andavano ad afferrare il provino (per test fino a 1000 °C sul provino), tradotta anche in una facilità di rimozione del provino post rottura in fase di test. È stata inoltre rilevata sperimentalmente una variazione di temperatura nel tratto utile del provino di 50 °C contro i 100 °C delle simulazioni FEM. Infine è risultato che le analisi FEM andavano a sovrastimare la temperatura in corrispondenza delle flange e a sottostimare quella del provino. Questo vuol dire che sarà possibile ottenere le temperature desiderate immettendo correnti inferiori a quelle previste dalle simulazioni, e così come saranno inferiori le temperature in gioco negli alberi.

A conclusione del progetto, dopo aver ottenuto i risultati delle analisi elettrotermiche sulla geometria definitiva e i risultati dei test, è stato progettato il modello CAD 3D del sistema. A causa dei limiti di sviluppo in altezza del sistema saranno installabili provini di diametro massimo della sezione ristretta di 8 mm. Provini di diametro della sezione ristretta superiore, rifacendosi alle quote della normativa BS EN ISO 6892-2 (2018) [12], non riuscirebbero ad essere inseriti tra i due alberi sui quali vanno avvitate le estremità filettate dei provini.

Per chiudere definitivamente il progetto sarà necessario svolgere altri test sperimentali a temperature superiori ai 1000 °C. Si dovrà cercare di alleggerire quanto più possibile il sistema (che attualmente pesa 38 Kg), andando ad agire in particolare sulla camera in alluminio e sugli alberi in acciaio. Inoltre si proverà ad estendere la gamma di diametri dei provini installabili. Nella camera si dovrà prevedere un foro per inserire una termocoppia da porre a contatto con il provino e dei piedini o cavalletti che dovranno permettere di sostenere l'albero mobile in fase di inserimento del provino. Infine si realizzeranno le tavole del CAD 3D per la produzione dei componenti.

BIBLIOGRAFIA

- [1] “Fisica nucleare - INFN Sezione di Padova.” <https://www.pd.infn.it/it/la-ricerca-in-sezione/fisica-nucleare/#spes> (accessed Sep. 02, 2022).
- [2] “Borgna F., Potenzialità della tecnologia Isotope Separation On Line (ISOL) per la realizzazione di un radiofarmaco a base di ⁸⁹Sr e preliminare sviluppo tecnologico della forma farmaceutica, A.A. 2013-14 -PREVIEW- – Isolpharm.” <https://isolpharm.pd.infn.it/web/?wpdmpro=borgna-f-potenzialita-della-tecnologia-isotope-separation-on-line-isol-per-la-realizzazione-di-un-radiofarmaco-a-base-di-89sr-e-preliminare-sviluppo-tecnologico-della-forma-farmaceutica-a-a-2013> (accessed Sep. 02, 2022).
- [3] “SPES – Home INFN Legnaro.” <https://www.lnl.infn.it/en/spes-2/> (accessed Sep. 02, 2022).
- [4] L. Centofante, “Progettazione meccanica, simulazione e test sperimentali dell’integratore di corrente per le prove di accettazione del bersaglio SPES,” Università degli studi di Padova, 2018. Accessed: Aug. 10, 2022. [Online]. Available: <https://thesis.unipd.it/handle/20.500.12608/27042>
- [5] “Prove materiali ZwickRoell | ZwickRoell.” <https://www.zwickroell.com/it/> (accessed Aug. 10, 2022).
- [6] “Macchine prova materiali - Cermac S.r.l.” <https://www.cermacsrl.com/> (accessed Aug. 10, 2022).
- [7] “MTS - Home.” <https://corp.mts.com/home/index.html> (accessed Aug. 10, 2022).
- [8] “Bibliographic Info :: BSOL British Standards Online.” <https://bsol.bsigroup.com/Bibliographic/BibliographicInfoData/00000000030382501> (accessed Aug. 18, 2022).
- [9] L. Antoniazzi, “Progettazione meccanica dell’integratore di corrente destinato alla linea protonica del progetto SPES,” Università di Padova, 2021.
- [10] M. Metalli, “Proprietà P.E.T.P. + P.T.F.E”, [Online]. Available: <https://www.materieplastiche.eu/images/documenti/schede-tecniche-pom-c-petp-petppte-peek.pdf>
- [11] “UNI EN ISO 898-5:2012 - UNI Ente Italiano di Normazione.” https://store.uni.com/p/UNI21011383/uni-en-iso-898-52012-109169/UNI21011383_EIT (accessed Aug. 21, 2022).
- [12] “ISO - ISO 6892-2:2018 - Metallic materials — Tensile testing — Part 2: Method of test at elevated temperature.” <https://www.iso.org/standard/72571.html> (accessed Aug. 23, 2022).
- [13] “(PDF) High-temperature tantalum tungsten alloy photonic crystals: Stability, optical properties, and fabrication.” https://www.researchgate.net/publication/260704826_High-temperature_tantalum_tungsten_alloy_photonic_crystals_Stability_optical_properties_and_fabrication (accessed Aug. 21, 2022).
- [14] Acciai Speciali Terni, “TECHNICAL DATASHEET 304.”
- [15] “When To Use TZM Alloy Instead of Pure Molybdenum - Rembar Co.” <https://www.rembar.com/when-to-use-tzm-alloy-instead-of-pure-molybdenum/> (accessed Aug. 27, 2022).
- [16] “Stainless Steel Swagelok Tube Fitting, Male Connector, 10 mm Tube OD x 1/4 in. Male ISO Tapered Thread | Male Connectors | Tube Fittings and Adapters | Fittings | Swagelok.” <https://products.swagelok.com/en/c/straights/p/SS-10M0-1-4RT?q=:relevance:bodyMaterial:316+Stainless+Steel:connection2Size:1%2F4+in.:connection1Size:10+mm> (accessed Sep. 03, 2022).
- [17] “CATALOGO DIMENSIONALE O-RING”, Accessed: Sep. 03, 2022. [Online]. Available: www.dilanda.it
- [18] “Solutions that seal, damp and protect | Trelleborg.” <https://www.trelleborg.com/en> (accessed Aug. 14, 2022).
- [19] “(GH-40324) Toggle Clamp - Pull Action Type - Vertical Flanged Base, U-Shaped Hook GH-40324 / GH-40324-SS from GOODHANDCLAMP | MISUMI.” <https://uk.misumi-ec.com/vona2/detail/221005335977/?HissuCode=GH-40324#> (accessed Aug. 14, 2022).

- [20] G. Meneghetti, “Allegati per lo svolgimento del progetto d’anno”.
- [21] W. D. PILKEY, *PETERSON'S STRESS CONCENTRATION FACTORS*, SECOND. Wiley-Interscience, 1997.
- [22] X. P. Pang *et al.*, “Physical properties of high-strength bolt materials at elevated temperatures,” *Results Phys.*, vol. 13, p. 102156, Jun. 2019, doi: 10.1016/J.RINP.2019.102156.
- [23] “Norme CNR-UNI 10011-88 - [PDF Document].” <https://fdocumenti.com/document/norme-cnr-uni-10011-88.html> (accessed Sep. 05, 2022).
- [24] C. Y. Ho and T. K. Chu, “Electrical Resistivity and Thermal Conductivity of Nine Selected AISI stainless Steels.” Sep. 01, 1977. Accessed: Sep. 03, 2022. [Online]. Available: <https://apps.dtic.mil/sti/citations/ADA129160>

APPENDICE A

Codici APDL utilizzati

In questa sezione vengono riportati alcuni esempi di codici APDL utilizzati nelle analisi FEM eseguite per ottenere i risultati riportati nei capitoli discussi precedentemente. L'obiettivo è quello di dare la possibilità al lettore di replicare le analisi svolte e verificare personalmente i risultati. In particolare verrà riportata l'analisi elettrotermica svolta per stimare le temperature massime alle quali saranno soggetti i componenti del sistema e una delle analisi strutturali effettuate per ricavare i coefficienti di concentrazione delle tensioni nei componenti.

- **ANALISI ELETTROTERMICA ASSIALSIMMETRICA**

```
/PREP7
FINISH
/CLEAR,ALL           !Resets the ANSYS database to the conditions at the beginning of the problem
/CONFIG,NRES,1000000 !Assign maximum number of results sets (substeps) allowed on the result file
/TITLE, electrical analysis
```

```
/PREP7
```

```
!-----
!PARAMETRI PER LA GEOMETRIA
```

```
!Provino d0=2
!Lc=12/1000
!dp=3/1000
!lp=22/1000
!dris=2/1000
!h=4/1000
!r=1/1000
```

```
!Provino d0=3
!Lc=18/1000
!dp=5/1000
!lp=32/1000
!dris=3/1000
!h=5/1000
!r=1.8/1000
```

```
!Provino d0=4
!Lc=24/1000
!dp=6/1000
!lp=41/1000
!dris=4/1000
!h=6/1000
!r=3/1000
```

```
!Provino d0=5
!Lc=30/1000
!dp=8/1000
!lp=51/1000
!dris=5/1000
!h=7/1000
!r=6/1000
```


!Provino d0=6
!Lc=36/1000
!dp=10/1000
!lp=60/1000
!dris=6/1000
!h=8/1000
!r=5/1000

!Provino d0=7
!Lc=42/1000
!dp=11/1000
!lp=69/1000
!dris=7/1000
!h=9/1000
!r=5.5/1000

!Provino d0=8
Lc=48/1000
dp=12/1000
lp=77/1000
dris=8/1000
h=10/1000
r=6/1000

!Provino d0=10
!Lc=60/1000
!dp=16/1000
!lp=97/1000
!dris=10/1000
!h=12/1000
!r=8/1000

dalb=64/1000
D=123/1000
dTa=44/1000
daff=10/1000
df=89/1000
decamera=300/1000
dicamera=100/1000
lta=35/1000
lace=124/1000
lcamera=125/1000
laff=15/1000
lmac=5/1000
sta=8/1000
sacc=8/1000
s=16/1000
t=14/1000
scamera=16/1000
rTa=11/1000
racc1=1.6/1000
racc2=6/1000
racc3=3/1000

I=550 !corrente

!-----

!termoelectric
ET,1,PLANE223
KEYOPT,1,1,110
KEYOPT,1,3,1

!-----

*USE,M26Ta.mac

*USE,M2Macor.mac
*USE,M10C_EDM3.mac
*USE,M50SS316.mac
*USE,M27W.mac
*USE,M30Ti6Al4V.mac
*USE,M30Mo.mac
*USE,M23A15083_X.mac

!PROPRIETA' AISI304L
aisi=1
!CONDUTTIVITA' ELETTRICA
!http://dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a129160.pdf PAG.25, AISI304L
MPTEMP, 1, -0.15, 19.85, 26.85
MPTEMP, 4, 76.85, 126.85, 226.85
MPTEMP, 7, 326.85, 426.85, 526.85
MPTEMP, 10, 626.85, 726.85, 826.85
MPTEMP, 13, 926.85, 1026.85, 1126.85
MPDATA,RSVX,aisi, 1, 6.96E-7, 7.13E-7, 7.19E-7
MPDATA,RSVX,aisi, 4, 7.60E-7, 7.98E-7, 8.68E-7
MPDATA,RSVX,aisi, 7, 9.33E-7, 9.92E-7, 10.43E-7
MPDATA,RSVX,aisi, 10, 10.86E-7, 11.25E-7, 11.58E-7
MPDATA,RSVX,aisi, 13, 11.87E-7, 12.14E-7, 12.40E-7

!emissività acciaio
emaisi=0.5

!CONDUTTIVITA' TERMICA
!http://dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a129160.pdf PAG.25, AISI304L
MPTEMP, 1, -0.15, 19.85, 26.85
MPTEMP, 4, 76.85, 126.85, 226.85
MPTEMP, 7, 326.85, 426.85, 526.85
MPTEMP, 10, 626.85, 726.85, 826.85
MPTEMP, 13, 926.85, 1026.85, 1126.85
MPDATA,KXX,aisi, 1, 14.39, 14.76, 14.89
MPDATA,KXX,aisi, 4, 15.79, 16.61, 18.28
MPDATA,KXX,aisi, 1, 19.77, 21.21, 22.59
MPDATA,KXX,aisi, 4, 23.99, 25.33, 26.58
MPDATA,KXX,aisi, 1, 27.81, 29.18, 30.34

!DENSITA'
MP,DENS,aisi,7940

K,1,0,0,0
K,2,dris/2,0,0
K,3,dris/2,Lc/2,0
K,4,dp/2,Lc/2,0
K,5,dp/2,lp/2-h,0
K,6,dp/2,lp/2,0
K,7,0,lp/2,0
K,8,dp/2,lp/2+1/1000,0
K,9,0,lp/2+1/1000,0
K,10,dTa/2,lp/2-h,0
K,11,dTa/2,lp/2-h+lta-sta-rTa,0
K,12,dTa/2+rTa,lp/2-h+lta-sta-rTa,0
K,13,dTa/2+rTa,lp/2-h+lta-sta,0
K,14,df/2,lp/2-h+lta-sta,0
K,15,df/2,lp/2-h+lta,0
K,16,0,lp/2-h+lta,0
K,17,df/2,lp/2-h+lta+sacc,0
K,18,dalb/2+racc1,lp/2-h+lta+sacc,0
K,19,dalb/2+racc1,lp/2-h+lta+sacc+racc1,0
K,20,dalb/2,lp/2-h+lta+sacc+racc1,0
K,21,dalb/2,lp/2-h+lta+sacc+s-racc2,0
K,22,dalb/2+racc2,lp/2-h+lta+sacc+s-racc2,0
K,23,dalb/2+racc2,lp/2-h+lta+sacc+s,0
K,24,df/2,lp/2-h+lta+sacc+s,0
K,25,df/2,lcamera-scamera,0

```

K,26,df/2,lcamera,0
K,27,df/2,lp/2-h+lta+lacc-t-racc3,0
K,28,df/2+racc3,lp/2-h+lta+lacc-t-racc3,0
K,29,df/2+racc3,lp/2-h+lta+lacc-t,0
K,30,D/2,lp/2-h+lta+lacc-t,0
K,31,D/2,lp/2-h+lta+lacc,
K,32,0,lp/2-h+lta+lacc,0

L,1,2                                !1
L,2,3                                !2
LARC,3,5,4,r                         !3
L,5,6                                !4
L,7,6                                !5
L,7,1                                !6
L,5,10                               !7
L,10,11                              !8
LARC,11,13,12,rTa                    !9
L,13,14                              !10
L,14,15                              !11
L,15,16                              !12
L,16,9                               !13
L,9,8                                !14
L,8,6                                !15
L,15,17                              !16
L,17,18                              !17
LARC,18,20,19,racc1                 !18
L,20,21                              !19
LARC,21,23,22,racc2                 !20
L,23,24                              !21
L,24,25                              !22
L,25,26                              !23
L,26,27                              !24
LARC,27,29,28,racc3                 !25
L,29,30                              !26
L,30,31                              !27
L,31,32                              !28
L,16,32                              !29

AL,1,2,3,4,5,6
    !Area 1
AL,4,7,8,9,10,11,12,13,14,15
LSEL,S,LINE,,16,29
    !Area 3
LSEL,A,LINE,,12
    !Area 3
AL,ALL
    !Area 3

ALLSELL,ALL

K,33,decamera/2,lcamera-scamera,0
K,34,decamera/2,lcamera,0

L,25,33                              !30
L,33,34                              !31
L,34,26                              !32

AL,30,31,32,23
    !Area 4

K,35,decamera/2,lcamera,0
K,36,decamera/2,0,0
K,37,decamera/2-scamera,0,0
K,38,decamera/2-scamera,lcamera-scamera,0

L,34,35                              !33
L,35,36                              !34

```

```

L,36,37                                !35
L,37,38                                !36
L,38,33                                !37

AL,31,33,34,35,36,37                    !Area 5

RECTNG,8/1000,16/1000,lp/2-h+lta+12/1000,lp/2-h+lta+19/1000    !Area 6
RECTNG,20/1000,28/1000,lp/2-h+lta+12/1000,lp/2-h+lta+19/1000    !Area 7
RECTNG,0/1000,4.5/1000,lp/2-h+lta+12/1000,lp/2-h+lta+lacc-laff-6/1000    !Area 8

ASBA,3,6,,DELETE,DELETE                !Area 9
ASBA,9,7,,DELETE,DELETE                !Area 3
ASBA,3,8,,DELETE,DELETE                !Area 4

CYL4,decamera/2-40/1000,lcamera-scamera/2,4.5/1000            !Area 3

ASBA,5,3,,DELETE,DELETE                !Area 7

CYL4,decamera/2-scamera/2,lcamera/2,4.5/1000                !Area 3

ASBA,7,3,,DELETE,DELETE                !Area 5

MSHAPE,0,2D
MSHKEY,0
TYPE,1

MAT,C_EDM3
ESIZE,0.002
AMESH,1

MAT,Ta
ESIZE,0.002
AMESH,2

MAT,aisi
ESIZE,0.002
AMESH,6

MAT,A15083_X
ESIZE,0.002
AMESH,5

MAT,MAcor
ESIZE,0.002
AMESH,4

!-----
!CONDIZIONI AL CONTORNO

DL,1,,VOLT,0

FK,32,AMPS,I
LSEL,S,LINE,,28
NSLL,S,1
CP,1,VOLT,ALL

ALLSEL,ALL

!IRRAGGIAMENTO TOTALE

TUNIF,25
RADOPT,,0.001,0,10000,,0.5
HEMIOPT,100
SPCTEMP,1,25

```

STEF,5.67e-8
TOFFST,273.15
V2DOPT,1

ALLSEL,ALL

!emissività acciaio
LSEL,S,LINE,,16
LSEL,A,LINE,,17
LSEL,A,LINE,,18
LSEL,A,LINE,,19
LSEL,A,LINE,,20
LSEL,A,LINE,,21
LSEL,A,LINE,,22
LSEL,A,LINE,,24
LSEL,A,LINE,,25
LSEL,A,LINE,,26
LSEL,A,LINE,,27
SFL,ALL,RDSF,emaisi,,1
ALLSEL,ALL

!emissività alluminio
LSEL,S,LINE,,33
LSEL,A,LINE,,34
LSEL,A,LINE,,35
LSEL,A,LINE,,36
LSEL,A,LINE,,37
SFL,ALL,RDSF,-Al5083_X,,1
ALLSEL,ALL

!emissività tantalio
LSEL,S,LINE,,7
LSEL,A,LINE,,8
LSEL,A,LINE,,9
LSEL,A,LINE,,10
LSEL,A,LINE,,11
LSEL,A,LINE,,14
LSEL,A,LINE,,15
SFL,ALL,RDSF,-Ta,,1
ALLSEL,ALL

!emissività macor
LSEL,S,LINE,,30
LSEL,A,LINE,,32
SFL,ALL,RDSF,-Macor,,1
ALLSEL,ALL

!emissività Provino Grafite
LSEL,S,LINE,,2
LSEL,A,LINE,,3
LSEL,A,LINE,,5
SFL,ALL,RDSF,-C_EDM3,,1
ALLSEL,ALL

!CONVEZIONE

Traff=20
alfa=5000
!-----
LSEL,S,LINE,,38
LSEL,A,LINE,,39
LSEL,A,LINE,,40
LSEL,A,LINE,,41
LSEL,A,LINE,,42
LSEL,A,LINE,,43
LSEL,A,LINE,,44
LSEL,A,LINE,,45

```

LSEL,A,LINE,,46
LSEL,A,LINE,,47
LSEL,A,LINE,,48
LSEL,A,LINE,,29
LSEL,A,LINE,,49
LSEL,A,LINE,,52
LSEL,A,LINE,,53
LSEL,A,LINE,,54
LSEL,A,LINE,,55
LSEL,A,LINE,,56
LSEL,A,LINE,,57
SFL,ALL,CONV,alfa,,Traff
ALLSEL,ALL

```

```

!AMBIENTE SOLUTION
/SOLU
SOLCONTROL,ON
ANTYPE,TRANS
AUTOTS,ON
KBC,1
DELTIM,0.001,0.0001,1000
TIME,5000
OUTRES,NSOL,ALL
SAVE
SOLVE
SAVE

```

```

/POST1
PLNSOL,TEMP

```

- **ANALISI STRUTTURALE ASSIALSIMMETRICA PER RICAVARE IL K_t**

```

/PREP7
/CLEAR,ALL

```

```

/PREP7

```

```

!-----

```

```

!Tipo Elemento
ET,1,PLANE25

```

```

!-----

```

```

!Proprietà materiale elemento 1
MP,EX,1,206000      !Modulo di elasticità
MP,PRXY,1,0.3      !poisson coefficiente

```

```

!-----

```

```

!PARAMETRI PER LA GEOMETRIA

```

```

D1=147/1000          !Diametro maggiore
d2=64/1000           !Diametro minore
haff=60/1000         !lunghezza afferraggio
s=29/1000            !spessore flangia
r=6/1000             !raggio raccordo
dcamera=23.5/1000   !raggio interno foro camera

```

```

!GEOMETRIA

```

```

K,1,0,0,0
K,2,D1/2,0,0

```

```

126

```

```

K,3,D1/2,s,0
K,4,D1/2-drond,s,0
K,5,d2/2+r,s,0
K,6,d2/2+r,s+r,0
K,7,d2/2,s+r,0
K,8,d2/2,haff,0
K,9,0,haff,0

L,1,2                ! L1
L,2,3                ! L2
L,3,4                ! L3
L,4,5                ! L4
LARC,5,7,6,r        ! L5
L,7,8                ! L6
L,8,9                ! L7
L,9,1                ! L8

AL,1,2,3,4,5,6,7,8    !Area 1

!RECTNG,8/1000,16/1000,25/1000,32/1000    !Area 2
!RECTNG,20/1000,28/1000,25/1000,32/1000    !Area 3
!
!ASBA,1,2,,DELETE,DELETE                    !Area 4
!ASBA,4,3,,DELETE,DELETE                    !Area 1

!-----

!MESH

ESIZE,0.0005
AMESH,1

LREFINE,5,,1,3,1,1
LREFINE,5,,1,3,1,1
!-----

!VINCOLI
DK,ALL,UZ
DL,8,,UX
DL,3,,UY

!-----

!CONDIZIONI AL CONTORNO

SFL,7,PRES,-1

!-----

FINISH
/SOL
/STATUS,SOLU
SOLVE
FINISH
/POST1
PLNSOL, S,EQV, 0,1.0

```

APPENDICE B

Integrazione macro aisi 304L

Per svolgere le analisi elettrotermiche è necessario utilizzare le macro dei materiali. Questi sono dei file che vengono richiamati nell'APDL e contengono le proprietà dei materiali. In alternativa le proprietà possono essere riportate direttamente nel codice APDL senza richiamare la macro. Nel caso specifico delle analisi elettrotermiche è di grande utilità andare a definire la variazione dei parametri in funzione della temperatura.

Viene quindi riportato l'aggiornamento della macro dell'acciaio aisi 304L le cui proprietà erano definite fino ad una temperatura di 126 °C. Con questa nuova macro sono state estese le proprietà di conduttività termica e di Resistività elettrica fino ad una temperatura di 1126 °C. I dati sono stati ricavati dalla pubblicazione "Electrical Resistivity and Thermal Conductivity of Nine Selected AISI stainless Steels" di Ho, C. Y. e Chu, T. K. [24].

Table 3. Electrical Resistivity and Thermal Conductivity of AISI 304L Stainless Steel †

Temperature (K)	Electrical Resistivity ($10^{-8} \Omega\text{-m}$)	Thermal Conductivity ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)
1	48.5	0.069
4	48.5	0.305
10	48.5	0.875
20	48.3	1.99
30	48.2	3.27
40	48.3	4.65
50	48.5	6.02
60	48.9	7.11
70	49.5	7.98
80	50.3	8.69
90	51.2	9.26
100	52.2	9.75
150	57.5	11.55
200	62.7	12.89
250	67.5	13.90
273	69.6	14.39
293	71.3	14.76
300	71.9	14.89
350	76.0	15.79
400	79.8	16.61
500	86.8	18.28
600	93.3	19.77
700	99.2	21.21
800	104.3	22.59
900	108.6	23.99
1000	112.5	25.33
1100	115.8	26.58
1200	118.7	27.81
1300	121.4	29.18
1400	124.0	30.34
1500	126.4	31.55
1600	128.7	32.70
1672*	130.4	33.53
1727*	150.0	28.15
1800	151.7	28.99

Figura B. 1: "Electrical Resistivity and Thermal Conductivity of Nine Selected AISI stainless Steels" di Ho, C. Y. e Chu, T. K. [24].

- **MACRO AISI 304L**

!PROPRIETA' AISI304L
aisi=1
!CONDUTTIVITA' ELETTRICA
!http://dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a129160.pdf PAG.25, AISI304L
MPTEMP, 1, -0.15, 19.85, 26.85
MPTEMP, 4, 76.85, 126.85, 226.85
MPTEMP, 7, 326.85, 426.85, 526.85
MPTEMP, 10, 626.85, 726.85, 826.85
MPTEMP, 13, 926.85, 1026.85, 1126.85
MPDATA,RSVX,aisi, 1, 6.96E-7, 7.13E-7, 7.19E-7
MPDATA,RSVX,aisi, 4, 7.60E-7, 7.98E-7, 8.68E-7
MPDATA,RSVX,aisi, 7, 9.33E-7, 9.92E-7, 10.43E-7
MPDATA,RSVX,aisi, 10, 10.86E-7, 11.25E-7, 11.58E-7
MPDATA,RSVX,aisi, 13, 11.87E-7, 12.14E-7, 12.40E-7

!emissività acciaio
emaisi=0.5

!CONDUTTIVITA' TERMICA
!http://dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a129160.pdf PAG.25, AISI304L
MPTEMP, 1, -0.15, 19.85, 26.85
MPTEMP, 4, 76.85, 126.85, 226.85
MPTEMP, 7, 326.85, 426.85, 526.85
MPTEMP, 10, 626.85, 726.85, 826.85
MPTEMP, 13, 926.85, 1026.85, 1126.85
MPDATA,KXX,aisi, 1, 14.39, 14.76, 14.89
MPDATA,KXX,aisi, 4, 15.79, 16.61, 18.28
MPDATA,KXX,aisi, 1, 19.77, 21.21, 22.59
MPDATA,KXX,aisi, 4, 23.99, 25.33, 26.58
MPDATA,KXX,aisi, 1, 27.81, 29.18, 30.34

!DENSITA'
MP,DENS,aisi,7940