

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA



FACOLTÀ DI INGEGNERIA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA MECCANICA

TESI DI LAUREA MAGISTRALE

STUDIO ELETTRICO-TERMICO,
PROGETTAZIONE MECCANICA E TEST
DEL SISTEMA TARGET-SORGENTE
PER IL PROGETTO SPES

Relatore: Ch.mo Prof. Dott. Ing. GIOVANNI MENEGHETTI

Correlatori: Ch.mo Dott. ALBERTO ANDRIGHETTO

Ch.mo Dott. Ing. MATTIA MANZOLARO

Laureando: ALESSANDRO PREVEDELLO

ANNO ACCADEMICO 2012-2013

Ai miei genitori
Alla mia famiglia
Ai miei amici

Indice

| | |
|---|-----------|
| Introduzione | 1 |
| 1 Il progetto SPES ai Laboratori Nazionali di Legnaro: produzione ed utilizzo di fasci di ioni esotici | 5 |
| 1.1 Introduzione | 5 |
| 1.2 Il progetto SPES | 10 |
| 1.2.1 Introduzione | 10 |
| 1.2.2 L'acceleratore primario | 11 |
| 1.2.3 Il target di produzione ed il sistema di estrazione e ionizzazione | 11 |
| 1.2.4 Separatori elettromagnetici e post accelerazione | 19 |
| 1.3 Applicazione dei fasci di ioni esotici | 21 |
| 1.3.1 Applicazioni in fisica nucleare [1] | 21 |
| 1.3.2 Applicazioni in fisica dello stato solido | 24 |
| 1.3.3 Applicazioni mediche: la Tomografia ad Emissione Positronica [1] | 26 |
| 1.3.4 Applicazioni in astrofisica [1] | 29 |
| 1.4 Conclusioni | 30 |
| Bibliografia | 31 |
| 2 Studio, ottimizzazione e test del target di produzione SPES | 33 |
| 2.1 Introduzione | 33 |
| 2.2 Il modello analitico monodimensionale [1] | 36 |
| 2.3 Il modello numerico ad Elementi Finiti | 38 |
| 2.4 Studio del target attuale | 44 |
| 2.4.1 I test sperimentali | 44 |
| 2.4.2 Confronto tra i dati numerici e sperimentali | 48 |
| 2.5 Studio per la definizione di un nuovo target | 56 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 2.5.1 | Definizione e test sperimentali del <i>Prototipo 1</i> | 56 |
| 2.5.2 | Definizione e test sperimentali del <i>Prototipo 2</i> | 62 |
| 2.5.3 | Definizione e test sperimentali del <i>Prototipo 3</i> | 66 |
| 2.5.4 | Definizione e test sperimentali del <i>Prototipo 4</i> | 71 |
| 2.6 | Modello CAD di dettaglio del target definitivo | 75 |
| 2.7 | Conclusioni | 77 |
| | Bibliografia | 78 |
| 3 | Studio, ottimizzazione e test del “sistema target - sorgente di ionizzazione” | 79 |
| 3.1 | Introduzione | 79 |
| 3.2 | Descrizione del collegamento tra la linea di trasferimento ed il riscaldatore del sistema target | 81 |
| 3.2.1 | Disaccoppiamento tra la linea di trasferimento ed il riscaldatore e soluzione al problema | 81 |
| 3.2.2 | Studio sulla saldatura tra la linea di trasferimento e la connessione elettrica | 85 |
| 3.3 | Studio e ottimizzazione del sistema di allineamento per la sorgente di ionizzazione superficiale | 90 |
| 3.3.1 | Ottimizzazione delle barre di centraggio | 90 |
| 3.3.2 | Analisi dell’influenza del sistema di allineamento per la sorgente, sulla temperatura della sorgente stessa | 91 |
| 3.4 | Il Modello FEM del sistema target-sorgente | 95 |
| 3.5 | Test sperimentali del sistema target-sorgente e confronto con i dati numerici | 97 |
| 3.6 | Conclusioni | 105 |
| | Bibliografia | 106 |
| 4 | Preparazione del sistema “target - sorgente di ionizzazione” per i test di effusione | 107 |
| 4.1 | Introduzione | 107 |
| 4.2 | Il modello FEM | 111 |
| 4.3 | Misure di temperatura | 115 |
| 4.4 | Confronto tra dati sperimentali e numerici | 117 |
| 4.5 | Conclusioni | 121 |

| | |
|--|------------|
| Bibliografia | 122 |
| 5 Porting del pacchetto software Ansys® sull'IGI Grid Portal | 123 |
| 5.1 Introduzione | 123 |
| 5.2 Registrazione al portale | 125 |
| 5.2.1 Richiesta certificato INFN CA | 125 |
| 5.2.2 Registrazione VO (Virtual Organization) | 126 |
| 5.2.3 Registrazione al portale Grid | 129 |
| 5.3 Come avviene lo stop ed il rilancio di una analisi | 132 |
| 5.4 Tutorial per il lancio di un'analisi | 133 |
| 5.5 Accortezze da adottare nei listati di codice APDL di una analisi . | 135 |
| 5.5.1 Analisi di tipo elettro-termico | 136 |
| 5.5.2 Analisi di tipo strutturale | 143 |
| 5.6 Conclusioni | 145 |
| Bibliografia | 146 |
| Conclusioni | 147 |
| A Misure di temperatura in alto vuoto mediante pirometri ad infrarosso | 149 |
| A.1 Introduzione | 149 |
| A.2 Alterazione delle misure di temperatura e soluzione al problema . | 150 |
| B Proprietà dei materiali | 155 |
| B.1 Introduzione | 155 |
| B.2 Tantalio – M26Ta.mac | 156 |
| B.3 Tungsteno – M27W.mac | 161 |
| B.4 Rame – M28Cu.mac | 167 |
| B.5 Lega di alluminio Al5083 – M23Al5083.mac | 171 |
| B.6 Grafite ATJ – M29C_ATJ.mac | 173 |
| C Listati dei comandi impiegati per le analisi descritte ai capitoli 2, 3 e 4 | 177 |
| C.1 Analisi elettro-termica del sistema target-sorgente | 177 |
| C.2 Listato comandi APDL per il postprocessor | 196 |
| D Rottura del riscaldatore durante i test di effusione | 199 |

E Tavole costruttive

201

Introduzione

Dall'inizio del ventesimo secolo la fisica nucleare esplora i confini della natura per produrre materia mai osservata prima in laboratorio; le ricerche di base e le complesse tecnologie appositamente create, hanno spesso portato alla nascita di un gran numero di applicazioni nel campo della medicina, dell'industria e della fisica applicata, arrivando in molti casi ad influenzare usi e costumi della società: basti pensare alla nascita del “*Web*” presso i laboratori del CERN.

Nel corso degli anni l'Europa ha assunto la leadership nel campo della ricerca nucleare e sta pianificando la costruzione di una nuova generazione di *facility* per la produzione di fasci radioattivi, con lo scopo di esplorare la materia esotica e di fornire un valido strumento per applicazioni di tipo medico ed industriale. All'interno del programma partecipa attivamente, con il progetto SPES (*Selective Production of Exotic Species*), anche l'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN) di Legnaro; tale progetto prevede la costruzione di una *facility* per la produzione di fasci di ioni radioattivi ricchi di neutroni (*neutron-rich*) e di alta qualità, nel range di massa compreso tra *80* e *160 uma*.

La produzione di fasci di ioni radioattivi richiede l'impiego di tecnologie estremamente complesse ed innovative; come sarà descritto dettagliatamente in seguito, il progetto SPES prevede il bombardamento di un bersaglio (*target*) in carburo di uranio con un fascio primario, in modo da generare, tramite una reazione nucleare, specie radioattive all'interno del *target*. Le particelle radioattive generate vengono successivamente estratte, ionizzate, separate in massa ed accelerate come fascio di ioni radioattivo.

Solitamente, il *target* si presenta come un unico blocco cilindrico racchiuso all'interno di una scatola in grafite; l'idea innovativa introdotta dal progetto SPES è la suddivisione del *target* in sette dischi opportunamente spazati; questo consente, a parità di volume, di aumentare la superficie di scambio termico radiattivo tra il *target* e la scatola che lo contiene: tale particolare è di fondamentale importanza

in quanto permette al *target* di smaltire con maggiore efficienza la potenza termica dissipata dal fascio protonico che lo investe (stimato in circa 8 kW).

Gli isotopi prodotti vengono estratti dalla scatola grazie alla linea di trasferimento; attraverso tale dispositivo le particelle vengono indirizzate verso la sorgente di ionizzazione (*ion source*) dove avviene il processo di ionizzazione (ioni $+1$). La scelta della sorgente di ionizzazione è di fondamentale importanza, in quanto il suo funzionamento influenza l'intensità e la qualità del fascio radioattivo. A seconda del tipo di elemento di cui si vuole produrre il fascio, vengono impiegate sorgenti di ionizzazione differenti; in particolare si possono avere: sorgenti con ionizzazione superficiale, sorgenti laser (RILIS), sorgenti al plasma (FEBIAD) o la sorgenti ECR (*Electron Cyclotron Resonance*).

Gli ioni prodotti dalla sorgente di ionizzazione vengono accelerati da un elettrodo estrattore (*electrode*) realizzato in lega di titanio, il quale viene mantenuto ad una differenza di potenziale di 60 kV rispetto alla sorgente.

Lo studio della distribuzione di temperatura e delle deformazioni termiche presenti nei componenti che costituiscono il *target*, la linea di trasferimento, la sorgente di ionizzazione e l'elettrodo estrattore è assai complesso. Per tale motivo i Laboratori Nazionali di Legnaro hanno avviato delle strette collaborazioni con l'ENEA (Bologna), i Dipartimenti di Ingegneria Meccanica e di Scienze Chimiche dell'Università degli Studi di Padova, il CERN (Svizzera) ed i Laboratori di Oak Ridge (USA). Il presente lavoro di tesi si inserisce in quest'ambito, e vuole fornire un solido appoggio allo studio elettro-termico del sistema *target*-sorgente di ionizzazione. Per poter fare questo ci si appoggia a dei metodi numerici; in particolare si fa riferimento al metodo degli Elementi Finiti ed al codice di calcolo Ansys[®] Release 13.0 (con il quale si sono effettuate tutte le analisi esposte nel presente lavoro).

La tesi si sviluppa in cinque capitoli, il cui contenuto viene di seguito brevemente riassunto.

- **Capitolo 1** La prima parte del primo capitolo si soffermerà sulla descrizione della metodologia ISOL per la produzione di fasci di ioni radioattivi. Successivamente, si passerà ad illustrare le principali caratteristiche del progetto SPES, in fase di sviluppo presso i Laboratori Nazionali di Legnaro. Infine, verranno elencate le principali applicazioni dei fasci di ioni radioattivi nei

campi di interesse della fisica nucleare, dell'astrofisica, della scienza dei materiali e della medicina.

- **Capitolo 2** In questo capitolo verrà effettuato uno studio per l'ottimizzazione del *target* di produzione SPES, in modo da ottenere una configurazione definitiva che risolva il problema della formazione del circuito parallelo attraverso la scatola.
- **Capitolo 3** Nel presente capitolo verrà in primo luogo ottimizzato il collegamento tra linea di trasferimento e riscaldatore per risolvere il problema del loro distacco e successivamente verrà eseguito uno studio sulla saldatura tra la linea e la connessione elettrica. In secondo luogo sarà studiata l'influenza del sistema di allineamento per la sorgente, sulla temperatura della sorgente stessa. Infine, con alcuni test sperimentali verrà verificata l'efficacia sia del nuovo collegamento sia del sistema di allineamento.
- **Capitolo 4** In questo capitolo verranno presentati i test termici preliminari, in preparazione ai test di effusione. I dati ottenuti saranno inoltre analizzati e confrontati con quelli del modello FEM.
- **Capitolo 5** Nell'ultimo capitolo verrà introdotto l'IGI Grid Portal, sul quale è stato effettuato il porting del software Ansys[®] Release 13.0. In particolare verrà spiegato come effettuare la registrazione al portale, come lanciare un'analisi ed infine quali accortezze è necessario adottare nei listati APDL.

Capitolo 1

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

1.1 Introduzione

L'atomo è l'unità che determina le proprietà degli elementi presenti in natura: le proprietà chimiche sono dovute principalmente alla nube elettronica esterna, mentre le proprietà fisiche sono dovute alla combinazione di più atomi disposti ed organizzati in reticoli cristallini. La maggior parte della massa dell'atomo (più del 99,9%) si concentra nel nucleo; i nuclei sono entità composite costituite da protoni (particelle a carica positiva) e neutroni (particelle elettricamente neutre), chiamati entrambi nucleoni ed aventi massa circa 1800 volte più grande degli elettroni [1]. La stabilità del nucleo è garantita dalla presenza di una forza di attrazione tra i nucleoni molto intensa definita interazione forte; tale forza si manifesta con efficacia a distanze inferiori alle dimensioni nucleari e bilancia la repulsione elettrostatica tra i protoni carichi positivamente. L'interazione forte vincola il moto dei nucleoni attorno alla massa nucleare centrale e a causa della sua notevole intensità, la rottura del nucleo richiede molta energia. La branca della fisica che studia il comportamento e la stabilità del nucleo atomico è la fisica nucleare.

I nuclei stabili possiedono, approssimativamente, ugual numero di neutroni e di protoni [2], e costituiscono la cosiddetta “valle di stabilità” nella carta dei

1. IL PROGETTO SPES AI LABORATORI NAZIONALI DI LEGNARO:
PRODUZIONE ED UTILIZZO DI FASCI DI IONI ESOTICI

nuclidi (vedi figura 1.1); il motivo fondamentale della maggiore stabilità dei nuclei con numero di protoni uguale al numero di neutroni è da ricercarsi nel fatto che l'interazione neutrone-protone è leggermente più intensa rispetto alle interazioni protone-protone e neutrone-neutrone. Per nuclei con numero di massa $A \geq 40$ (si ricorda che $A = Z + N$, con $Z = \text{numero di protoni}$ ed $N = \text{numero di neutroni}$), la forza elettrostatica sposta la linea di stabilità lontano dalla retta in cui giacciono i nuclei con numero di protoni uguale al numero di neutroni, verso nuclei ricchi di neutroni (che essendo privi di carica, non alimentano la forza repulsiva elettrostatica). Inoltre, la forza elettrostatica limita pure l'esistenza di elementi super pesanti, dato che il corto raggio di azione della forza nucleare forte non permette un'efficace opposizione alla forza elettrostatica, agente invece a più lungo raggio.

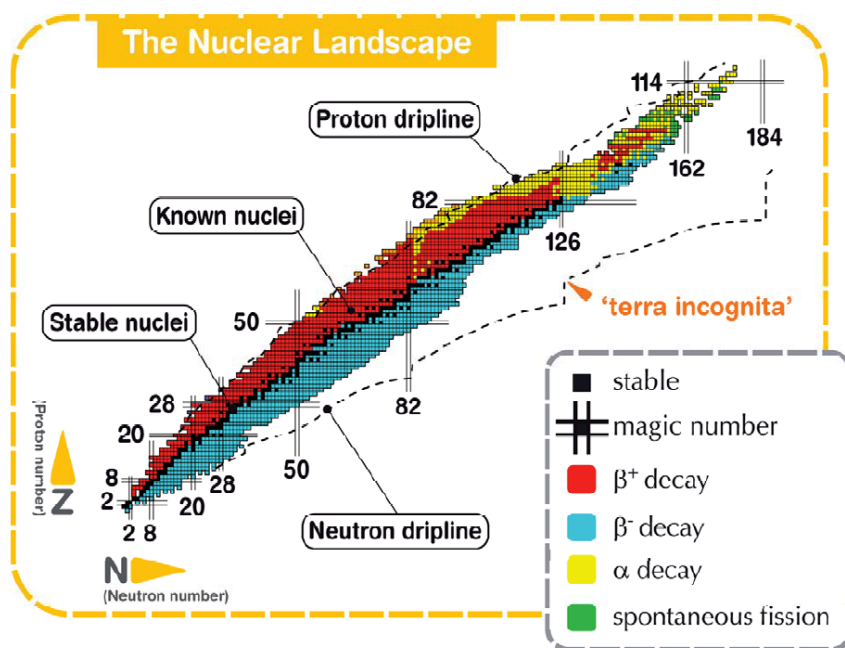


Figura 1.1: *Carta dei nuclidi.*

I nuclei con eccesso o difetto di neutroni, e quindi lontani dalla valle di stabilità, sono radioattivi e decadono con emissione di particelle (α e β) e raggi γ . Tali nuclei instabili vengono comunemente chiamati "esotici" ed al momento circa 3600 di essi sono stati prodotti e caratterizzati in laboratori di ricerca di tutto il mondo. Calcoli teorici prevedono tuttavia l'esistenza di un numero di nuclei esotici molto più elevato (più di 6000), cosicché è possibile che un gran numero di essi sia presente nella cosiddetta "terra incognita", che comprende la regione ricca

di neutroni (*neutron-rich*) e quella dei nuclei superpesanti (SHE, *Super Heavy Elements*).

La carta dei nuclidi individua e classifica i nuclei in base al numero di protoni (Z) e al numero di neutroni (N); in particolare i 6000 nuclei che si prevede esistano sono rappresentati all'interno dei confini definiti dalla *proton dripline* e dalla *neutron dripline*. I nuclei già conosciuti e studiati sono indicati in rosso, blu, giallo, verde e molti dei nuclei non conosciuti si trovano nell'area bianca, nel lato ricco di neutroni. Calcoli teorici hanno dimostrato che al di fuori delle *driplines* i nuclei emettono nucleoni molto rapidamente per formare nuovi nuclei, con combinazioni di protoni e neutroni tali da poter rientrare nell'area di potenziale stabilità, nella quale l'interazione forte è nuovamente capace di garantire il grado di coesione necessario.

Come vedremo nei paragrafi successivi lo studio dei nuclei instabili, ed in particolare dei nuclei esotici, ha aperto nuovi campi di ricerca in fisica nucleare, ha permesso di confermare precedenti ipotesi di fondamentale importanza ed ha infine 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 (*facilities*); sono numerose le *facilities* per la produzione di fasci radioattivi operanti sia in Europa che in altre parti del mondo; la maggior parte di queste sono basate sul metodo ISOL.

La tecnica ISOL (*Isotope Separation On-Line*), schematizzata in figura 1.2, utilizza la separazione degli isotopi in linea [3]; i principali costituenti di tale tipologia di *facility* sono:

- l'acceleratore primario;
- il complesso target-sistema di estrazione e ionizzazione;
- i separatori di massa ed isobari;
- il post acceleratore.

Un fascio di particelle della voluta energia, proveniente dall'acceleratore primario, viene fatto collidere con un bersaglio (*target*) di materiale fissile; in questo modo si ottiene la produzione degli isotopi radioattivi tramite reazioni nucleari

1. IL PROGETTO SPES AI LABORATORI NAZIONALI DI LEGNARO:
PRODUZIONE ED UTILIZZO DI FASCI DI IONI ESOTICI

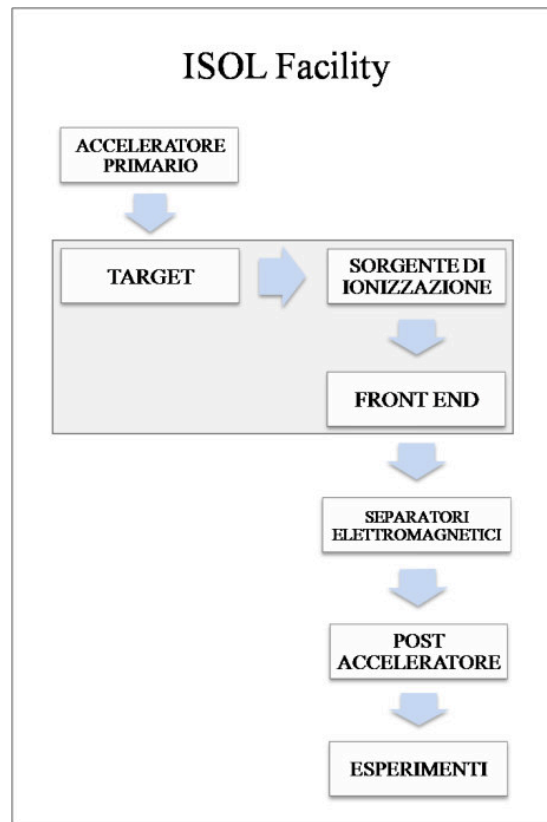


Figura 1.2: Schema di una facility di tipo ISOL per la produzione di fasci di ioni esotici.

(fissione, spallazione, frammentazione, ecc ...). Attraverso un opportuno sistema i radioisotopi prodotti vengono estratti e ionizzati; in questo modo potranno essere accelerati per differenza di potenziale. Il primo stadio di accelerazione avviene nel *front end* che attira gli ioni e li invia verso dei separatori elettromagnetici all'interno dei quali il fascio viene opportunamente selezionato e purificato; i separatori sono quindi necessari se si vuole ottenere un fascio chimicamente ed isobaricamente puro. Successivamente, gli ioni vengono post accelerati al livello di energia richiesto dal particolare esperimento.

L'intensità del fascio radioattivo prodotto è usualmente descritta dalla seguente equazione:

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

dove σ è la sezione d'urto per le reazioni nucleari, Φ è l'intensità del fascio primario, N è lo spessore del target, ε_1 è l'efficienza di rilascio del target, ε_2 è l'efficienza di ionizzazione e ε_3 è l'efficienza del processo di estrazione. Una corretta configurazione del complesso target-sistema di estrazione e ionizzazione è

cruciale per un efficiente funzionamento di una *facility* di tipo ISOL; gli obiettivi che stanno alla base del dimensionamento sono:

- la riduzione del tempo di ritardo;

- la massimizzazione della produzione senza deterioramento della purezza del fascio.

La separazione dei prodotti radioattivi dal substrato del *target* e l'estrazione dei nuclei esotici, sono processi fortemente dipendenti dalla temperatura; in particolare, all'aumentare del livello termico, la diffusione delle particelle risulta accelerata. Chiaramente, più breve è la vita media degli atomi radioattivi, più rapido deve essere il tempo di rilascio, e di conseguenza, per quanto appena affermato, il sistema deve essere mantenuto alla più alta temperatura possibile.

In ambito europeo, le opportunità scientifiche offerte dai RIB ed i notevoli problemi tecnologici ad essi associati, hanno portato la comunità scientifica a proporre la costruzione di una rete di *facilities* complementari, definite di "inter-media generazione", fondamentali per arrivare alla costruzione di un'unica grande *facilities* europea di tipo ISOL, chiamata EURISOL [4]: tale progetto rappresenta un'iniziativa che vede coinvolti i principali laboratori nucleari europei, ed è dedicato allo studio ed alla progettazione di una struttura per la produzione di fasci radioattivi di qualità significativamente superiore a quella attualmente disponibile. In tale direzione sono orientati anche i Laboratori Nazionali di Legnaro (LNL), nei quali è prevista la costruzione di una *facilities* ISOL per la produzione di fasci di ioni esotici: il progetto SPES (*Selective Production of Exotic Species*). Tale programma è coordinato a livello nazionale e prevede la collaborazione tra sei sezioni INFN, l'ENEA (Bologna), i Dipartimenti di Ingegneria Meccanica e di Scienze Chimiche dell'Università degli Studi di Padova e, a livello internazionale, strette collaborazioni con il CERN (Svizzera) ed i Laboratori di Oak Ridge (USA).

Nel prossimo paragrafo sarà descritto il progetto SPES e la struttura della *facility* in fase di costruzione ai Laboratori Nazionali di Legnaro (LNL), mentre nel paragrafo 1.3 si fornirà una descrizione delle principali applicazioni dei fasci di ioni radioattivi.

1.2 Il progetto SPES

1.2.1 Introduzione

Il principale obiettivo del progetto SPES è di fornire un acceleratore che permetta di svolgere ricerca all'avanguardia in fisica nucleare attraverso lo studio di nuclei lontani dalla valle di stabilità. Il progetto è basato sulla produzione di nuclei radioattivi *neutron-rich* attraverso la fissione nucleare (con una resa massima di 10^{13} *fissioni/s*) indotta bombardando un *target*, realizzato in carburo di uranio, con un fascio di protoni di 40MeV a $200\mu\text{A}$ di corrente (per una potenza totale di 8kW) [5]. Essendo il livello di radioattività stimato nel target di produzione molto elevato, è necessaria la progettazione di speciali infrastrutture in modo da garantire la sicurezza in termini di radio protezione.



Figura 1.3: Layout del progetto SPES (RIB e Neutron facilities).

La *facility* SPES prevede inoltre la realizzazione di un acceleratore di neutroni (*Neutron Facility*) attraverso l'impiego di un secondo fascio di protoni ad alta energia. La *Neutron Facility* è un obiettivo secondario del progetto SPES, ma permette comunque importanti applicazioni mediche ed interdisciplinari. In figura 1.3 viene mostrato il layout del progetto SPES nel quale è visibile sia la *facility* per la produzione del fascio di ioni esotici, sia la *Neutron Facility*.

Viene di seguito fornita una descrizione dei componenti principali appartenenti alla RIB *facility* attualmente in fase di costruzione ai Laboratori Nazionali di Legnaro.

1.2.2 L'acceleratore primario

L'acceleratore primario ha la funzione di produrre un fascio primario di particelle, il quale deve essere direzionato verso il target dove la reazione nucleare ha luogo [5].

La *facility* SPES utilizzerà come acceleratore primario un Ciclotrone. Tale dispositivo è in grado di garantire le performance richieste per la produzione di fasci di ioni esotici ed offre la possibilità di utilizzare una seconda linea di fascio in modo completamente indipendente per alimentare la *Neutron Facility*. Il mercato offre oggi la possibilità di produrre, con la tecnologia del ciclotrone, fasci di intensità molto vicina alle richieste del progetto SPES.

Il ciclotrone scelto per il progetto SPES è il Best 70p, sviluppato dalla BestCyclotron e mostrato in figura 1.4; il quale è in grado di fornire due fasci di protoni indipendenti fino a 70MeV di energia ed aventi una corrente massima di $750\mu\text{A}$.

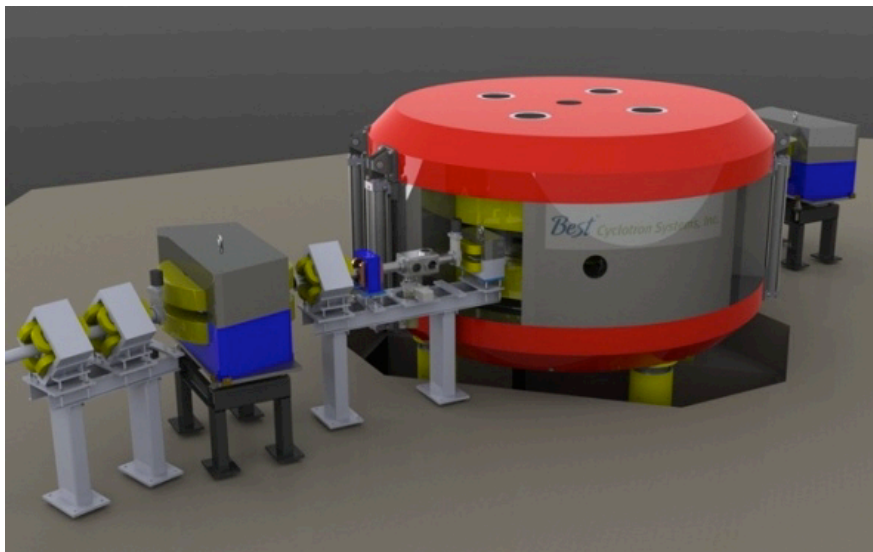


Figura 1.4: Il ciclotrone BEST 70p.

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

Sia il target di produzione dei radioisotopi, sia il sistema di estrazione e ionizzazione degli stessi sono contenuti all'interno di una camera di forma cilindrica (camera *target*), la quale viene raffreddata mediante un opportuno circuito, viste le elevate temperature in gioco (vedi figura 1.5). Sempre a causa delle alte

1. IL PROGETTO SPES AI LABORATORI NAZIONALI DI LEGNARO: PRODUZIONE ED UTILIZZO DI FASCI DI IONI ESOTICI

temperature, per evitare l'ossidazione dei componenti presenti, l'interno della camera viene mantenuto in condizioni di alto vuoto (con pressione dell'ordine dei $10^{-6}mbar$); la mancanza di atmosfera è inoltre necessaria per aumentare il cammino libero medio delle particelle radioattive prodotte. Il volume della camera è delimitato dallo spallamento di una flangia (*plate*) e da un coperchio (*cover*) a forma di pentola, entrambi realizzati in lega di alluminio, mentre la tenuta a vuoto è garantita da un O-Ring.

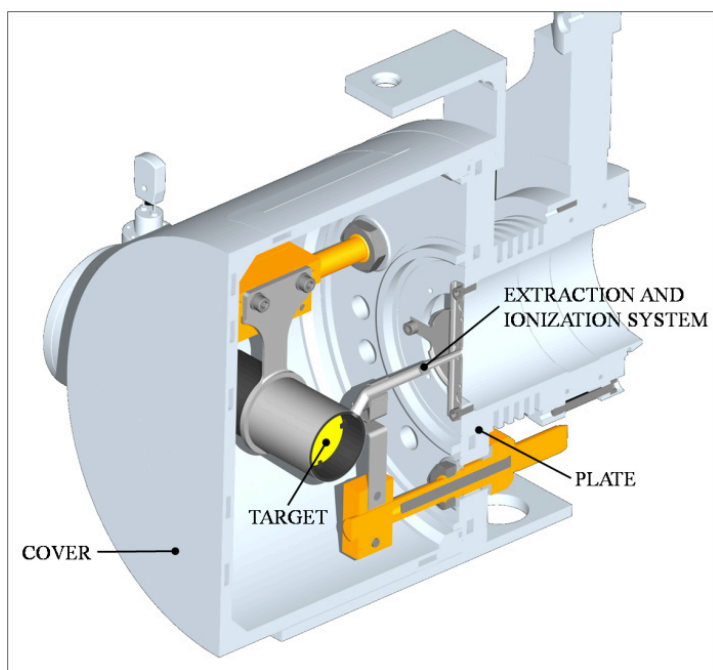


Figura 1.5: Configurazione della camera target.

Il *target* è composto da sette dischi coassiali in UC_x , aventi $40mm$ di diametro e circa $1mm$ di spessore ed opportunamente distanziati in direzione assiale, al fine di dissipare attraverso radiazione termica la potenza sviluppata dal fascio di protoni. Essi sono contenuti in una scatola (*box*), un tubo cavo di grafite, avente un diametro esterno e una lunghezza di 49 e $200mm$ rispettivamente (vedi figura 1.6). Il fascio di protoni, prima di impattare contro i dischi, attraversa due finestre in grafite (*windows*), molto sottili per non attenuare l'intensità del fascio, ma di fondamentale importanza in quanto consentono di schermare la zona attiva e di evitare un eccessivo raffreddamento del materiale fissile in corrispondenza dell'ingresso del fascio. Dopo aver investito le due finestre di grafite e i dischi di UC_x , il fascio primario va ad impattare su tre *dumper* e sul fondo scatola (*box base*); questi elementi provvedono sia all'assorbimento definitivo del fascio (che

così non va ad attivare la camera esterna), sia ad evitare la fuoriuscita di particelle dal lato posteriore del *target* [6].

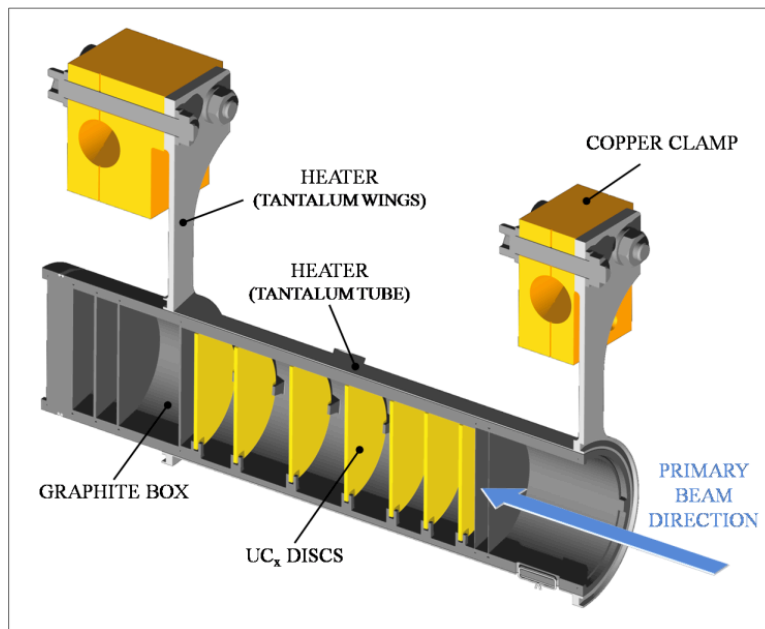


Figura 1.6: Rappresentazione del prototipo di bersaglio diretto del progetto SPES.

La scatola deve mantenere la temperatura media di $2000^{\circ}C$, in modo da migliorare l'estrazione dei prodotti di fissione. Essendo la potenza del fascio di protoni non sufficiente a portare il *target* al livello di temperatura richiesto, è necessario introdurre un dispositivo indipendente avente la funzione di riscaldare e schermare il *target*. Inoltre, il sistema di riscaldamento supplementare deve essere in grado di sostenere il *target* durante i transitori, evitando improvvisi sbalzi di temperatura molto pericolosi per l'integrità strutturale dei dischi. Il riscaldatore (*heater*) è composto da un tubo molto sottile (*tube*) saldato ai bordi a due ali (*wings*) direttamente collegate ai morsetti in rame (*clamps*); attraverso i morsetti è possibile far dissipare per effetto Joule il desiderato quantitativo di potenza al riscaldatore. La dissipazione di potenza (dovuta all'effetto Joule) in aggiunta al calore sviluppato dalla fissione nucleare, fa in modo che la temperatura del sistema scatola-dischi sia mantenuta al valore di utilizzo. Il materiale scelto per il riscaldatore è il tantalio: si tratta di un metallo altamente resistente alla corrosione, in grado di condurre energia elettrica e termica e di raggiungere temperature molto elevate.

1. IL PROGETTO SPES AI LABORATORI NAZIONALI DI LEGNARO: PRODUZIONE ED UTILIZZO DI FASCI DI IONI ESOTICI

Il processo di fissione nucleare, che si manifesta quando il fascio di protoni investe i sette dischi in carburo di uranio, produce nuclei radioattivi aventi massa compresa tra gli 80 ed i 160 *uma*; per la produzione di un RIB la specie esotica desiderata deve essere estratta dal *target* e ionizzata. Tale processo richiede del tempo e non può essere applicato ad isotopi aventi una vita media inferiore a poche decine di millisecondi.

Il processo di estrazione avviene mediante la linea di trasferimento (*transfer line*), attraverso la quale gli isotopi in uscita dal target vengono indirizzati verso la sorgente di ionizzazione (*ion source*) dove sono ionizzati positivamente (ioni +1). Nell'attuale configurazione la linea di trasferimento (*transfer line*) è un tubo sottile di tantalio saldato al riscaldatore ad un'estremità e connesso meccanicamente alla sorgente di ionizzazione all'estremità opposta (vedi figura 1.7). Come accade per il riscaldatore, anche il sistema linea di trasferimento-sorgente di ionizzazione viene riscaldato mediante dissipazione di potenza per effetto Joule; in questo modo la temperatura della sorgente arriva a sfiorare i 2400°C.

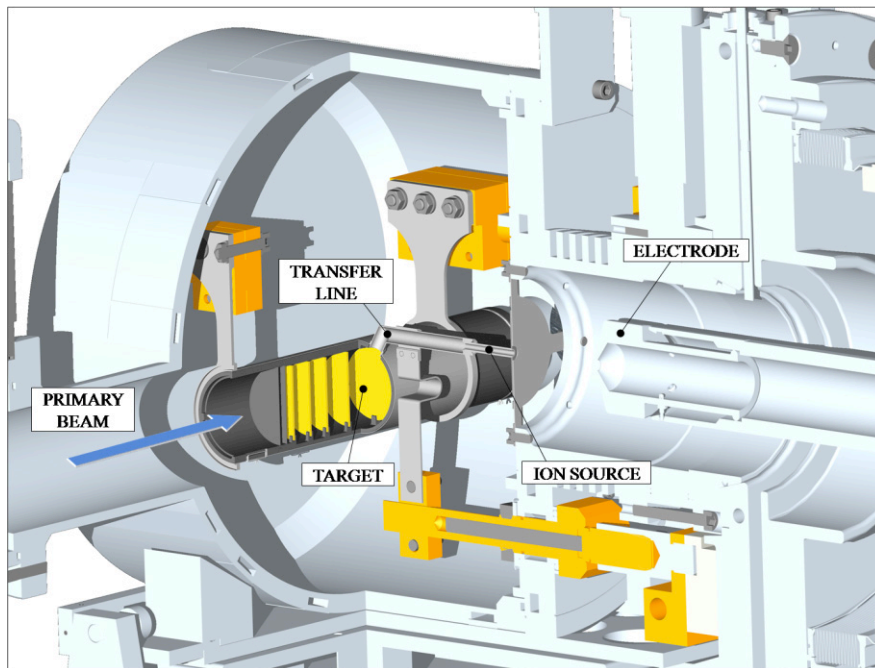


Figura 1.7: Rappresentazione del sistema di estrazione e ionizzazione del progetto SPES.

La camera target viene collegata al *front end*; tra i due componenti è presente una differenza di potenziale ($V_{camera} - V_{frontend}$) pari a 60kV ed è quindi necessario, al fine di evitare il contatto diretto, interporre un isolante elettrico (*electrical insulator*) come rappresentato in figura 1.8. La differenza di potenziale presente

attira gli ioni radioattivi verso il *front end*; in particolare il componente che accoglie gli ioni in uscita dalla sorgente di ionizzazione è un elettrodo (*electrode*) realizzato in lega di titanio (Ti6Al4V) e visibile in figura 1.7. In questo modo si forma il fascio di ioni radioattivi che verrà, dopo il passaggio attraverso i separatori elettromagnetici ed il post acceleratore, inviato alle sale sperimentali.

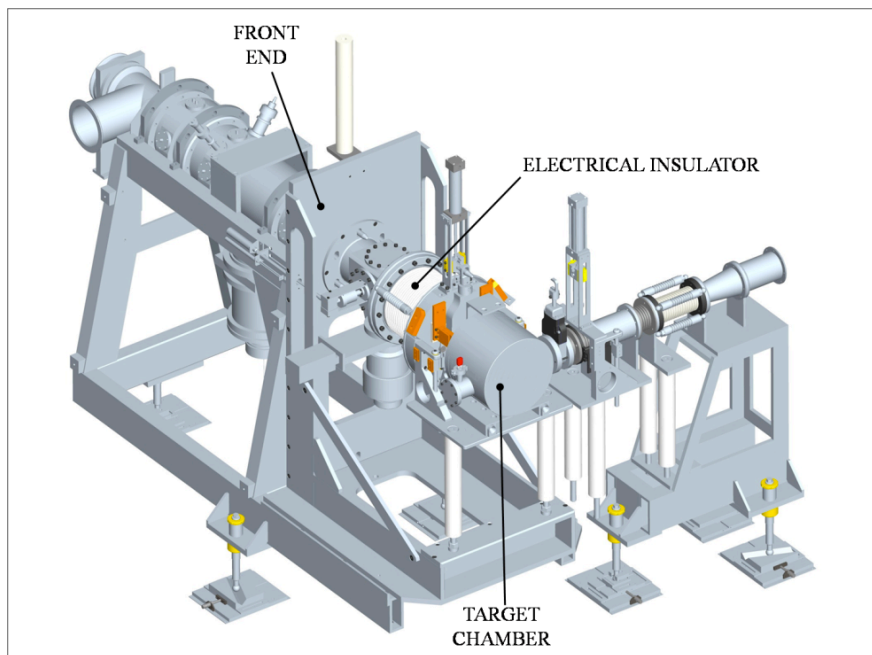


Figura 1.8: Rappresentazione del front end.

La scelta della sorgente è di fondamentale importanza, in quanto il suo funzionamento influenza l'intensità e la qualità del fascio radioattivo. La *facility* SPES viene inizialmente progettata in riferimento a due diverse tipologie di sorgente: una sorgente con ionizzazione di tipo superficiale (*Surface Ion Source*) ed una sorgente con ionizzazione laser (RILIS, *Resonant Ionization Laser Ion Source*) [7]. Per entrambe le tipologie di ionizzazione si fa riferimento alla medesima architettura (mostrata in dettaglio in figura 1.9); si tratta di uno sviluppo della sorgente MK1 ISOLDE sviluppata dal CERN. Il componente principale della sorgente MK1 è la *hot cavity* si tratta di un tubicino in tungsteno all'interno del quale avviene la ionizzazione.

La *hot cavity*, dotata di un opportuno invito conico, viene accoppiata per interferenza al foro centrale del supporto (*support*) in tantalio; la gestione delle tolleranze è tale da impedire qualsiasi movimento relativo tra i due componenti. Dall'altra parte, il collegamento con la linea di trasferimento avviene per mezzo di

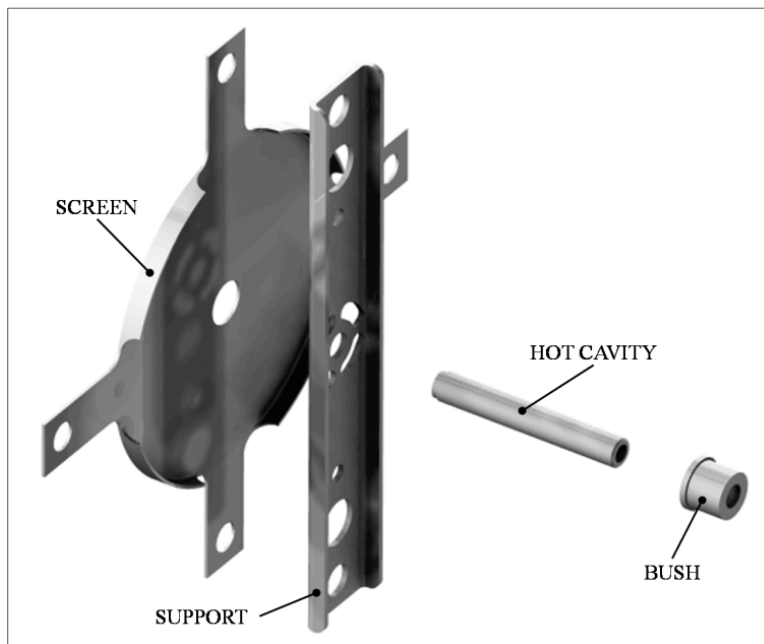


Figura 1.9: Architettura sorgente di ionizzazione MK1.

un tappo (*bush*) in tantalio, sul quale vanno in battuta sia la linea di trasferimento sia la *hot cavity*. Le elevate temperatura raggiunte dalla sorgente di ionizzazione in condizioni di utilizzo, fanno sì che i componenti si saldino tra loro. Il collegamento tra il supporto e la flangia principale avviene mediante 4 viti *DIN912 M5 × 12*.

Tra supporto e flangia principale viene interposto uno schermo (*screen*) in tantalio; si tratta di un componente fondamentale per l'estrazione degli isotopi radioattivi.

Surface Ion Source

Attraverso la *Surface Ion Source* la ionizzazione è causata dallo strisciamento degli isotopi radioattivi provenienti dal *target* sulla superficie interna della *hot cavity*. A causa di tale strisciamento gli isotopi cedono un elettrone e vengono quindi ionizzati positivamente (ioni +1). Questo è possibile se la minima energia necessaria per rimuovere un elettrone da una superficie (funzione di lavoro) è maggiore del potenziale di ionizzazione dell'isotopo. Nel caso in esame si riescono a produrre con elevata efficienza ioni positivi per elementi con potenziale di ionizzazione inferiore alla funzione di lavoro del tungsteno pari a circa $5eV$. L'elevata temperatura a cui si trova la sorgente permette di avere un processo di ionizzazione efficiente; si favorisce infatti il moto Browniano e si incrementano i

contatti isotopo-superficie.

Lo svantaggio principale di tale metodo sta nel fatto che la ionizzazione non è selettiva, cioè non vengono ionizzati soltanto gli isotopi della specie desiderata. Si devono quindi predisporre dei separatori elettromagnetici in grado di selezionare, in base alla massa, le particelle presenti nel fascio.

In ogni caso la purezza del fascio non è garantita; vi sono infatti isotopi di diversa specie tra loro isobari, aventi cioè lo stesso numero di massa A ma un diverso numero atomico Z (come ad esempio il ^{132}Cs e lo ^{132}Sn). Per separare tali elementi sono necessari dei separatori isobari; tali dispositivi, oltre ad essere molto complicati e costosi sono anche poco affidabili, inoltre riducono notevolmente l'intensità del fascio.

Questa tipologia di sorgente permette di ottenere anche ioni negativi. La produzione di fasci di atomi esotici ionizzati negativamente è comunque molto complicata; non tanto per la produzione degli ioni, per cui è sufficiente realizzare la *hot cavity* con un materiale la cui funzione di lavoro sia più piccola dell'affinità elettronica degli isotopi, bensì per la loro accelerazione. La differenza di potenziale presente tra la camera *target*, il *front end* ed i sistemi di post accelerazione deve essere invertita; questo è possibile soltanto se si dispone di particolari dispositivi denominati *charge exchange devices*.

Resonant Ionization Laser Ion Source

Il metodo *RILIS* (il cui principio di funzionamento è schematizzato in figura 1.10) è oggi il più potente strumento per la produzione di fasci di ioni radioattivi per le facilities di tipo ISOL, in quanto fornisce un processo di ionizzazione selettiva e garantisce la soppressione di contaminazioni indesiderate a livello della sorgente di ionizzazione. Vale la pena notare che il metodo *RILIS* utilizza la stessa architettura della tecnica di ionizzazione superficiale.

Un laser caratterizzato dalla sovrapposizione di più raggi (due o tre a seconda dell'elemento chimico da ionizzare) aventi lunghezze d'onda differenti, corrispondenti a diversi valori energetici ($E = hf$, dove h è la costante di Planck ed f è la frequenza d'onda), viene proiettato all'interno della *hot cavity*. Tale laser irradia gli isotopi e fornisce loro l'energia necessaria per far compiere all'elettrone più esterno dei salti quantici verso orbitali più esterni fino alla separazione dall'atomo; in questo modo si ha la formazione di uno ione positivo $+1$.

1. IL PROGETTO SPES AI LABORATORI NAZIONALI DI LEGNARO: PRODUZIONE ED UTILIZZO DI FASCI DI IONI ESOTICI

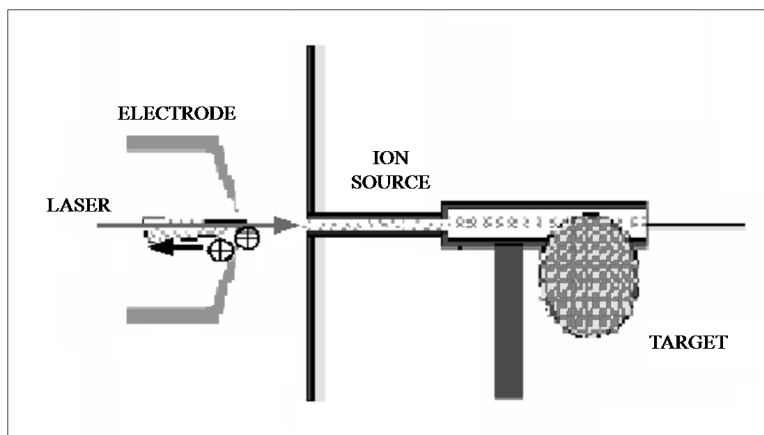


Figura 1.10: Schematizzazione del sistema di ionizzazione RILIS.

La metodologia di ionizzazione *RILIS* permette di acquisire soltanto ioni radioattivi della specie di interesse e si riesce quindi ad ottenere un fascio nel quale le contaminazioni sono minime. In ogni caso, a causa dell'architettura della sorgente, c'è la possibilità che alcuni elementi (in particolare il cesio) vengano ionizzati per strisciamento; gli ioni così prodotti sporcano il fascio. Per risolvere tale inconveniente si può pensare di sostituire il materiale che costituisce la *hot cavity*; passando al niobio la ionizzazione superficiale viene notevolmente attenuata.

Per avere un'efficienza di ionizzazione elevata è di fondamentale importanza limitare e controllare il disallineamento della *hot cavity* causato dall'espansione termica. Se la *hot cavity* si disallinea viene a ridursi la zona di azione del laser e di conseguenza anche l'efficienza di ionizzazione si riduce (vedi figura 1.11).

Di seguito viene riportata una tavola periodica degli elementi nella quale vengono indicati in rosso gli elementi di cui, attraverso il progetto SPES, è possibile la produzione degli isotopi. In particolare sono evidenziati gli isotopi che possono essere prodotti con le tecniche di ionizzazione superficiale, laser o entrambe; per la produzione degli altri isotopi si dovrà ricorrere ad altri tipi di sorgente, come ad esempio la sorgente al plasma (FEBIAD) o la sorgente ECR. La prima è in grado di ionizzare qualsiasi tipo di elemento, anche se con efficienze minori rispetto alle tecniche laser e superficiale, mentre la seconda è particolarmente adatta alla produzione di elementi aventi un potenziale di ionizzazione molto elevato (come i gas nobili, di grande interesse per le applicazioni nucleari).

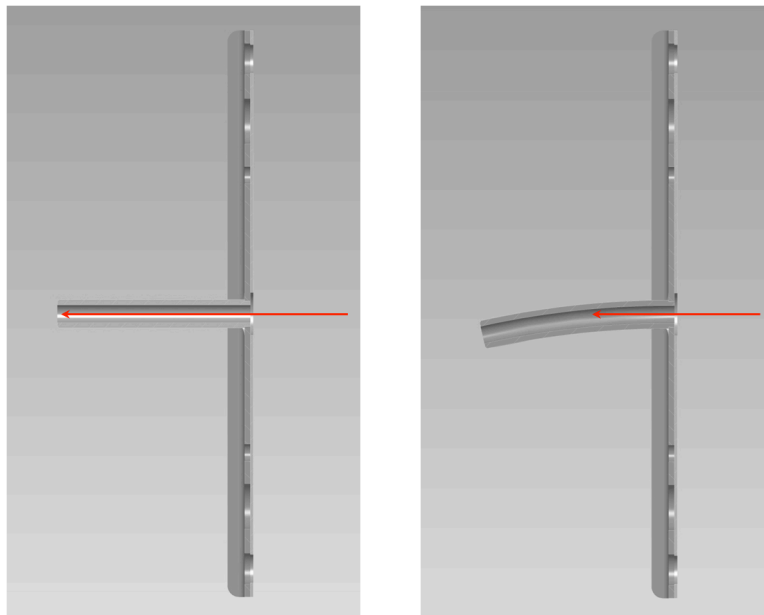


Figura 1.11: Allineamento della hot cavity.

1.2.4 Separatori elettromagnetici e post accelerazione

Il fascio estratto dalla sorgente di ionizzazione viene sottoposto ad una prima fase di purificazione nella quale, attraverso un separatore di massa, viene intrappolata una grande quantità di contaminanti. La risoluzione di tale dispositivo ($M/\Delta M$, dove per M si intende la massa dell'isotopo) è pari a circa 300; si riescono così a separare in base alla massa i vari elementi.

Il separatore di massa è seguito da un separatore isobaro, avente una risoluzione pari a 15000, e che permette quindi di separare gli isotopi come il ^{132}Cs e lo ^{132}Sn tra loro isobari. Per migliorare la capacità di selezione dei separatori isobari è necessario operare con un'energia in ingresso dell'ordine dei 200keV ; questo è possibile se, sia il target che il primo separatore vengono montati in una piattaforma HV a 250kV .

A questo punto il fascio radioattivo può essere direttamente convogliato alle sale sperimentali (ed utilizzato in esperimenti che richiedono fasci radioattivi di bassissima energia), oppure essere post accelerato. La post accelerazione viene ottimizzata mediante l'impiego di un *Charge Breeder*; un dispositivo in grado di incrementare la carica degli ioni prima dell'iniezione del fascio esotico attraverso PIAVE, che rappresenta il primo stadio di post accelerazione prima dell'ingresso in ALPI (acceleratore LINAC superconduttore). Il complesso PIAVE-ALPI è da

1. IL PROGETTO SPES AI LABORATORI NAZIONALI DI LEGNARO:
 PRODUZIONE ED UTILIZZO DI FASCI DI IONI ESOTICI

| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|----|----|----|----|----|
| 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | 2 |
| H | | | | | | | | | | | | | | | | | He |
| 3 | 4 | | | | | | | | | | | | | | | 10 | |
| Li | Be | | | | | | | | | | | | | | | Ne | |
| 11 | 12 | | | | | | | | | | | | | | | 18 | |
| Na | Mg | | | | | | | | | | | | | | | Ar | |
| 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 |
| K | Ca | Sc | Ti | V | Cr | Mn | Fe | Co | Ni | Cu | Zn | Ga | Ge | As | Se | Br | Kr |
| 37 | 38 | 39 | 40 | 41 | 42 | 43 | 44 | 45 | 46 | 47 | 48 | 49 | 50 | 51 | 52 | 53 | 54 |
| Rb | Sr | Y | Zr | Nb | Mo | Tc | Ru | Rh | Pd | Ag | Cd | In | Sn | Sb | Te | I | Xe |
| 55 | 56 | 57 | 72 | 73 | 74 | 75 | 76 | 77 | 78 | 79 | 80 | 81 | 82 | 83 | 84 | 85 | 86 |
| Cs | Ba | La | Hf | Ta | W | Re | Os | Ir | Pt | Au | Hg | Tl | Pb | Bi | Po | At | Rn |
| 87 | 88 | 89 | 104 | 105 | 106 | 107 | 108 | 109 | 110 | 111 | 112 | | | | | | |
| Fr | Ra | Ac | Rf | Db | Sg | Bh | Hs | Mt | | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | | | | | |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|
| 58 | 59 | 60 | 61 | 62 | 63 | 64 | 65 | 66 | 67 | 68 | 69 | 70 | 71 |
| Ce | Pr | Nd | Pm | Sm | Eu | Gd | Tb | Dy | Ho | Er | Tm | Yb | Lu |
| 90 | 91 | 92 | 93 | 94 | 95 | 96 | 97 | 98 | 99 | 100 | 101 | 102 | 103 |
| Th | Pa | U | Np | Pu | Am | Cm | Bk | Cf | Es | Fm | Md | No | Lr |

Figura 1.12: *Tavola Periodica degli Elementi.*

molti anni in funzione ai LNL, ma negli ultimi tempi è stato sottoposto ad un numero significativo di miglioramenti. In particolare, mentre prima consentiva la produzione di fasci ioni stabili, ora può essere impiegato come un acceleratore di RIB.

In figura 1.13 è visibile una rappresentazione schematica in cui sono visibili i componenti principali che costituiscono la *facility* SPES per la produzione di fasci di ioni esotici.

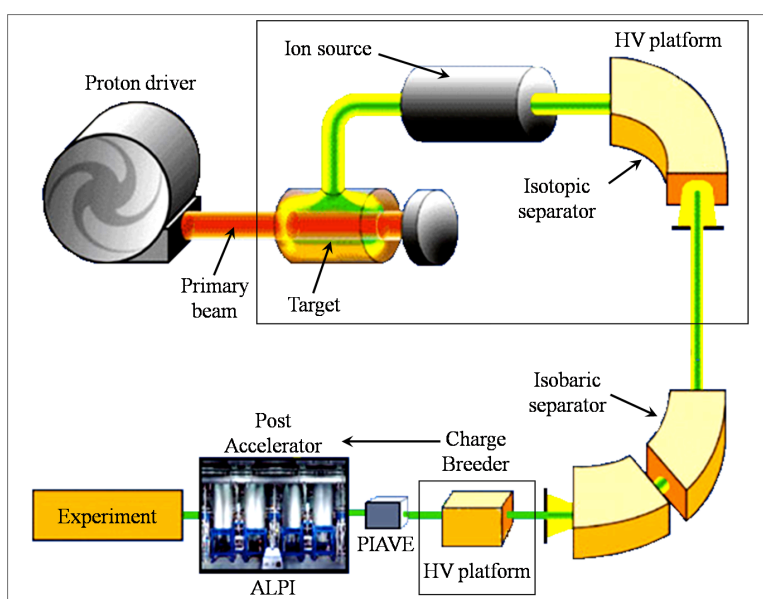


Figura 1.13: *Tavola Periodica degli Elementi.*

Si ricorda che la corrente finale del fascio radioattivo dipende dall'efficienza di

molti processi chimici-fisici (vedi equazione (1.1)); complessivamente ci si aspetta, alle sale sperimentali, un fascio avente un rapporto di circa $10^6 \div 10^9 \text{ isotopi/s}$ (molto inferiore alle $10^{13} \text{ fissioni/s}$ date dalla fissione nucleare). Il diagramma di figura 1.14 mostra l'intensità del fascio radioattivo, calcolata tenendo conto delle efficienze di emissione, di ionizzazione e di accelerazione, per diverse specie di isotopi.

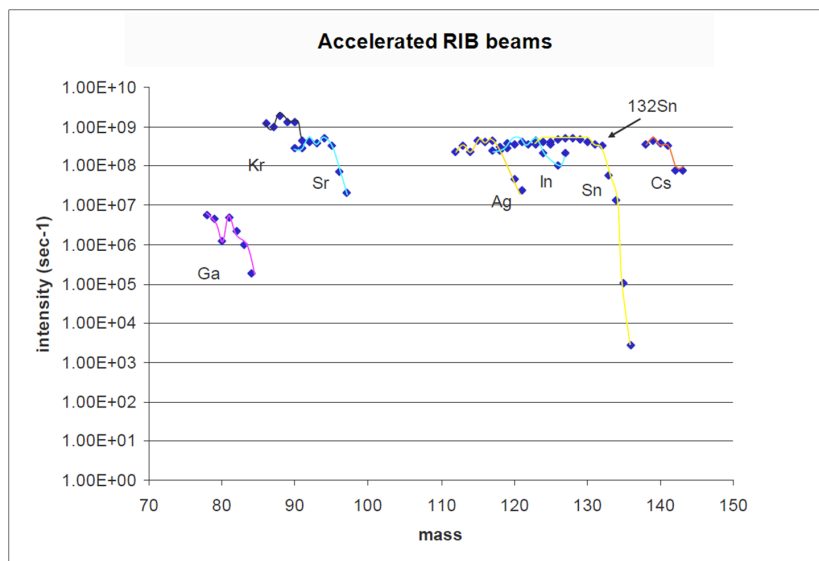


Figura 1.14: Intensità finale del fascio, calcolata tenendo conto delle efficienze di emissione, di ionizzazione e di accelerazione, per diverse specie di isotopi.

1.3 Applicazione dei fasci di ioni esotici

I fasci di ioni esotici hanno suscitato, nel corso degli anni, un crescente interesse dovuto alle loro molteplici applicazioni non solo nel campo della fisica nucleare ma anche in astrofisica, medicina e fisica dello stato solido. Nel presente paragrafo vengono brevemente descritte le principali applicazioni dei fasci di ioni radioattivi nelle quattro aree sopra citate.

1.3.1 Applicazioni in fisica nucleare [1]

Miglioramento e verifica del Modello Standard

Il modello standard della fisica delle particelle è una teoria che descrive insieme tre delle quattro forze fondamentali, cioè l'interazione nucleare forte, l'elettro-

magnetismo e l'interazione nucleare debole (queste ultime due unificate nell'interazione elettrodebole), nonché la funzione e le proprietà di tutte le particelle (note ed osservate) che costituiscono la materia. Nonostante il suo successo, tale modello non è del tutto soddisfacente, poiché dipende in modo sostanziale da alcune assunzioni fatte ad-hoc. Elaborati esperimenti di fisica nucleare, suggeriti da convincenti basi teoriche, sono stati ideati allo scopo di chiarire l'origine di queste assunzioni e pervenire così all'unificazione delle interazioni fondamentali. Tali esperimenti prevedono precise misure delle proprietà di decadimento di alcuni nuclei, che possono essere effettuate proprio utilizzando come sorgente pura di ioni, i fasci di ioni radioattivi prodotti dalle facilities.

Studio della struttura di nuclei complessi

I nucleoni (protoni e neutroni) sono costituiti da subparticelle chiamate quark, esse esercitano un effetto fisico anche oltre i nucleoni nei quali sono confinati: in particolare le interazioni tra i nucleoni all'interno del nucleo sono diverse da quelle esistenti tra due nucleoni liberi, in quanto esse dipendono anche dalla densità di protoni e neutroni associata al particolare tipo di nucleo. Al momento, non esiste una formula generale che consenta di quantificare l'entità delle interazioni nucleari per tutti i nuclei rappresentati nella figura 1.1, in quanto i calcoli quantomeccanici sono applicabili unicamente ai nuclei più leggeri; l'obiettivo della fisica nucleare è di ottenere una trattazione unitaria che:

1. permetta di derivare l'effettiva interazione tra le particelle nucleari
2. elimini le incongruenze dei modelli correnti
3. sia applicabile anche ai nuclei aventi rapporto protoni/neutroni estremo (nuclei esotici)

A questo proposito i fasci di ioni radioattivi possono fornire un prezioso contributo.

Misura della dimensione del nucleo: i nuclei "halo"

La dimensione del nucleo è legata al numero totale di nucleoni che lo costituiscono A dalla semplice relazione $R = R_0 A^{1/3}$, dove R è il raggio nucleare ed R_0 una costante pari a $1,2 \text{ fermi}$ ($1 \text{ fermi} = 10^{-15} \text{ m}$). Tuttavia, allontanandosi dalla valle di stabilità, si possono incontrare notevoli deviazioni da tale legge, in

quanto le energie di legame tra le particelle di uno stesso nucleo possono diventare così piccole da causare la formazione di nuclei particolari, chiamati “ad anello” (nuclei “*halo*”). I nuclei “*halo*” sono caratterizzati da una diversa collocazione dei neutroni; tali nuclei possiedono molti più neutroni dei rispettivi isotopi stabili, inoltre uno o due neutroni, essendo debolmente legati al nucleo, orbitano attorno ad esso (neutroni di valenza).

Un esempio di nucleo “*halo*” è il ^{11}Li ; esso ha una dimensione media del nucleo paragonabile a quella del ^{48}Ca , se però si considera l’alone, racchiuso dalle orbite dei due elettroni di valenza presenti, il nucleo assume dimensioni paragonabili a quelle del ^{208}Pb (vedi figura 1.15).

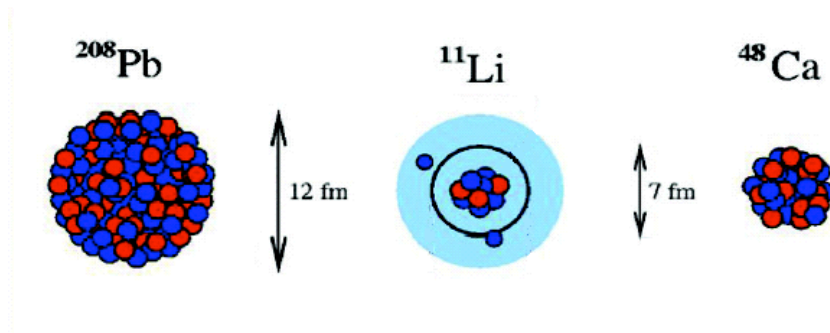


Figura 1.15: Paragone tra la dimensione del nucleo di ^{11}Li e quella di altri nuclei più massivi.

Il nucleo ^{11}Li è un sistema a tre corpi (i due neutroni “esterni” ed il core) e rappresenta un esempio naturale di sistema Borromeico (vedi figura 1.16); in topologia, i tre anelli borromeici sono legati l’un l’altro in modo tale che la rottura di uno permetta la separazione degli altri due.

I nuclei ad anello sono anche chiamati “nuclei Borromeici” proprio perché se uno dei loro costituenti viene a mancare, gli altri divengono immediatamente instabili e si possono a loro volta allontanare facilmente.

Attualmente, per la misura della distribuzione di protoni, sulla base di esperimenti di spettroscopia atomica, si usano fasci radioattivi di bassa energia e luce laser collineata; per la determinazione della distribuzione di tutti i nucleoni, vengono invece impiegati fasci radioattivi ad alta energia.



Figura 1.16: *Gli anelli Borromeici.*

Produzione di elementi superpesanti

Gli elementi naturali sono circa 90: dall'Idrogeno all'Uranio; negli ultimi anni l'utilizzo di reazioni di fusione nucleare ha permesso la sintesi di nuovi elementi di elevato peso atomico, estendendo il numero dei costituenti della Tavola Periodica sino all'elemento avente numero atomico 112 e prospettando un'ulteriore estensione a 116. In particolare questi elementi, chiamati superpesanti (nei quali si ha una fortissima repulsione colombiana), sembra riescano a formarsi attorno alla cosiddetta "Isola di Stabilità" (una combinazione di 114 protoni e 184 neutroni che sembra garantire la stabilità del nucleo). La recente disponibilità di fasci intensi, costituiti da nuclei instabili ricchi di neutroni (n-rich), accoppiati a target stabili, anch'essi ricchi di neutroni, potrebbe sbarrare definitivamente la strada ad uno studio e ad una indagine accurata di tale fenomeno.

1.3.2 Applicazioni in fisica dello stato solido

La tecnica *Radio Tracer Diffusion*, nata nel 1920, consiste nell'impiantare all'interno di un sistema solido dei nuclei radioattivi e di studiarne il decadimento, rilevando le particelle o la radiazione gamma da essi emessa. Tale tecnica permette di captare segnali anche da pochissimi atomi e rappresenta uno dei metodi più comuni per studiare i processi di diffusione atomica nei solidi [8].

Il sistema ospitante può essere drogato con i radioisotopi "sonda" per diffusione, tramite reazione nucleare, oppure per impianto ionico; la scelta dell'atomo radioattivo da utilizzare per un determinato esperimento viene fatta in base alla natura chimica e alle proprietà nucleari di quest'ultimo.

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

- osservare, tramite i prodotti di decadimento, l'interazione tra l'atomo sonda e l'intorno reticolare che lo circonda;
- ottenere informazioni riguardanti il campo elettrico e magnetico all'interno del cristallo;
- studiare i processi diffusivi e le interazioni tra gli atomi sonda;
- indagare i tipi di difetti presenti nel cristallo.

Drogaggio dei semiconduttori

Lo sviluppo di semiconduttori di piccole dimensioni aventi caratteristiche ottiche ed elettriche ottimali richiede un controllo completo dei difetti che governano tali proprietà, sia intrinseci (come le vacanze interstiziali) che estrinseci (come i droganti e le impurità atomiche): per tale motivo sia la ricerca di base che quella applicata stanno concentrando notevoli sforzi nello studio dei difetti e dell'attivazione elettrica dei droganti in diversi semiconduttori.

Analogamente agli isotopi stabili, gli isotopi radioattivi influenzano le proprietà elettroniche ed ottiche dei semiconduttori in base alla loro natura chimica ed alla loro posizione all'interno del reticolo cristallino: in particolare, poiché le proprietà elettroniche ed ottiche dei semiconduttori dipendono oltre che dal tipo di semiconduttore anche dalle sue dimensioni, si è dimostrato che in semiconduttori molto piccoli tali proprietà possono essere sensibilmente alterate da un difetto presente con concentrazione minore di $10^{12} \text{ atomi/cm}^3$; per controllare in maniera affidabile le prestazioni dei semiconduttori sono quindi necessarie tecniche sperimentali che combinino un'alta sensibilità chimica con un'alta sensibilità per la determinazione di basse concentrazioni di difetti.

Per decenni la principale tecnica di rilevazione delle impurezze all'interno di un cristallo è stata il *channeling*: in tale tecnica un fascio di ioni viene guidato lungo le righe atomiche o lungo i piani del cristallo (canali), tuttavia non è possibile determinare concentrazioni di difetti inferiori a $10^{18} \text{ atomi/cm}^3$. La sensibilità di tale tecnica può essere profondamente aumentata impiantando all'interno del cristallo impurezze radioattive che emettono particelle cariche (*emission channeling*). La misura dell'emissione lungo differenti direzioni cristalline permette

la determinazione del sito cristallografico dell'atomo emittente con un'accuratezza di pochi decimi di Å.

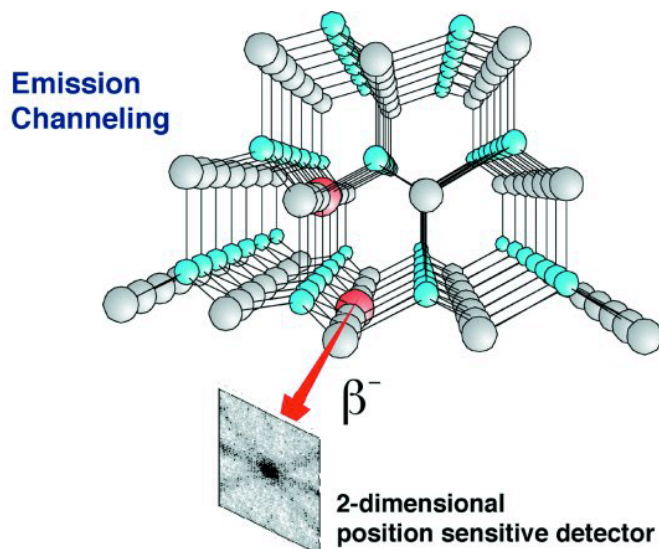


Figura 1.17: *Emission channeling degli elettroni emessi da atomi radioattivi situati in una riga atomica del reticolo.*

1.3.3 Applicazioni mediche: la Tomografia ad Emissione Positronica [1]

Prima di procedere si forniscono alcune fondamentali definizioni:

- L'antimateria è la materia composta da antiparticelle: si tratta di particelle aventi la stessa massa e caratteristiche opposte a quelle che costituiscono la materia ordinaria.
- Il positrone (detto anche antielettrone) è l'equivalente di antimateria dell'elettrone ed ha carica elettrica pari a $+1$. Quando un positrone si annichila con un elettrone, la loro massa viene convertita in energia, sotto forma di due fotoni ad altissima energia nella banda dei raggi gamma. Un positrone può essere generato dal decadimento radioattivo con emissione di positroni, o dall'interazione con la materia di fotoni con energia superiore a $1,022MeV$.

Sebbene utilizzata principalmente per studiare le interazioni tra particelle elementari, l'antimateria ha anche un'applicazione tecnologica: la Tomografia

ad Emissione Positronica (PET, *Positron Emission Tomography*) una tecnica di medicina nucleare e diagnostica medica che utilizza l'emissione di positroni per realizzare immagini tridimensionali o mappe ad alta risoluzione degli organi interni dei pazienti.

La procedura PET inizia con l'iniezione (generalmente per via endovenosa) nel soggetto da esaminare, di un isotopo tracciante di breve vita media, legato chimicamente ad una molecola attiva a livello metabolico. Dopo un tempo di attesa durante il quale la molecola metabolicamente attiva (spesso uno zucchero), raggiunge una determinata concentrazione all'interno dei tessuti organici da analizzare, il soggetto viene posizionato nello scanner.



Figura 1.18: *Scanner impiegato nella tecnica di rilevazione PET.*

L'isotopo di breve vita media decade, emettendo un positrone. Dopo un percorso che può raggiungere al massimo pochi millimetri, il positrone si annichila con un elettrone, producendo una coppia di fotoni (di energia paragonabile a quella dei raggi gamma) emessi in direzioni opposte fra loro (sfasate di 180° lungo una stessa retta); questi fotoni sono successivamente rilevati dal dispositivo di scansione grazie anche all'impiego di speciali tubi fotomoltiplicatori. Punto cruciale della tecnica è la rilevazione simultanea di coppie di fotoni: i fotoni che non raggiungono il rivelatore in coppia, cioè entro un intervallo di tempo di pochi nanosecondi, non sono presi in considerazione; dalla misurazione della posizione in cui i fotoni colpiscono il rivelatore (ogni coppia di fotoni individua una retta),

1. IL PROGETTO SPES AI LABORATORI NAZIONALI DI LEGNARO: PRODUZIONE ED UTILIZZO DI FASCI DI IONI ESOTICI

si può ricostruire la posizione del corpo da cui sono stati emessi (teoricamente con due coppie di fotoni, e dunque con due rette, è possibile individuare il punto di emissione dei fotoni), permettendo la determinazione dell'attività o dell'utilizzo chimico all'interno delle parti del corpo investigate.

Lo scanner utilizza la rilevazione delle coppie di fotoni per mappare la densità dell'isotopo nel corpo; la mappa risultante rappresenta i tessuti in cui la molecola campione si è maggiormente concentrata e viene letta e interpretata da uno specialista in medicina nucleare o in radiologia al fine di determinare una diagnosi ed il conseguente trattamento. Spesso, e sempre più frequentemente, le scansioni della Tomografia a Emissione di Positroni sono raffrontate con le scansioni a Risonanza Magnetica Nucleare, fornendo informazioni sia anatomiche e morfologiche, sia metaboliche (in sostanza, su come il tessuto o l'organo siano conformati e su cosa stiano facendo). La PET è usata estensivamente in oncologia clinica (per avere rappresentazioni dei tumori e per la ricerca di metastasi) e nelle ricerche cardiologiche e neurologiche.

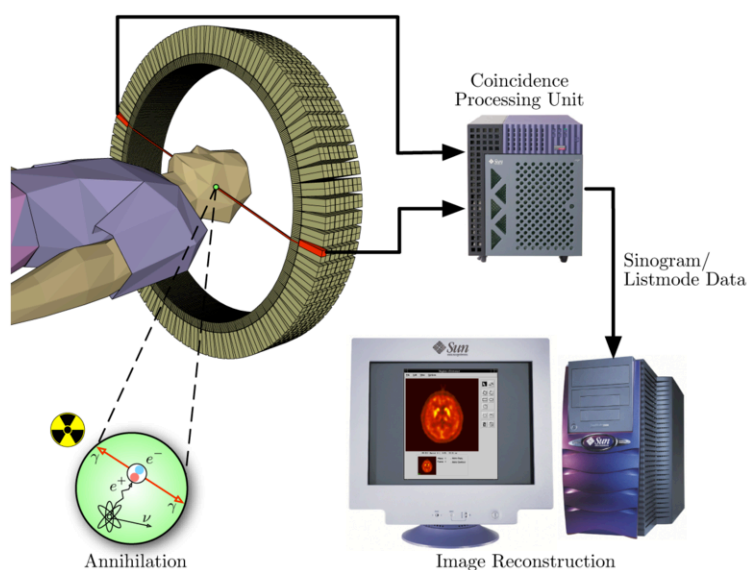


Figura 1.19: Schema riassuntivo della tecnica di analisi PET e modalità di acquisizione e presentazione dei dati.

Ad ogni modo, mentre gli altri metodi di scansione, come la TAC e la RMN permettono di identificare alterazioni organiche e anatomiche nel corpo umano, le scansioni PET sono in grado di rilevare alterazioni a livello biologico molecolare che spesso precedono l'alterazione anatomica, attraverso l'uso di marcatori molecolari che presentano un diverso ritmo di assorbimento a seconda del tessuto interessato.

Con una scansione PET è possibile visualizzare e quantificare con discreta precisione il cambio di afflusso sanguigno nelle varie strutture anatomiche (attraverso la misurazione della concentrazione dell'emettitore di positroni iniettato). I radionuclidi utilizzati nella scansione PET sono generalmente isotopi con breve tempo di dimezzamento, come ^{11}C ($\sim 20\text{min}$), ^{13}N ($\sim 10\text{min}$), ^{15}O ($\sim 2\text{min}$) e ^{18}F ($\sim 110\text{min}$). Per via del loro basso tempo di dimezzamento, i radioisotopi devono essere prodotti da un ciclotrone posizionato in prossimità dello scansionatore PET[8].

La PET gioca un ruolo sempre maggiore nella verifica della risposta alla terapia, specialmente in particolari terapie anti-cancro; si prospettano dunque per essa sempre maggiori applicazioni e sviluppi.

1.3.4 Applicazioni in astrofisica [1]

L'astrofisica nucleare gioca un ruolo fondamentale nella comprensione della struttura, evoluzione e composizione dell'Universo e dei suoi costituenti.

Le stelle generano energia attraverso reazioni nucleari coinvolgenti sia nuclei stabili che radioattivi. A volte, il consumo del carburante nucleare procede stabilmente e dura bilioni di anni, altre volte è esplosivo e dura pochi minuti o pochi secondi. Nelle differenti fasi della consunzione delle stelle vengono sintetizzati nuovi elementi chimici, sia tramite processi di nucleosintesi che seguono strettamente la valle di stabilità, sia attraverso processi che si svolgono in un territorio sconosciuto.

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

1.4 Conclusioni

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

Il presente lavoro di tesi si inserisce all'interno del progetto SPES; in particolare si effettuerà uno studio del target di produzione SPES e poi del sistema target-sorgente più in generale. Si sono già illustrate le condizioni estreme di lavoro che tale struttura deve sopportare e risulta davvero di cruciale importanza avere una conoscenza dettagliata delle condizioni di lavoro elettriche, termiche e strutturali.

Bibliografia

- [1] M. Manzolaro, *Analisi termica e strutturale del bersaglio diretto per la produzione di fasci radioattivi per il progetto SPES*, Tesi di Laurea Specialistica a.a. 2006-2007, Università degli Studi di Padova.
- [2] G. Diavola, *Fasci di ioni radioattivi ai laboratori nazionali del sud dell'INFN: il progetto EXCYT*, Il Saggiatore, 1999.
- [3] M. Lindroos, *Review of ISOL-type radioactive beam facilities*, EPAC, 2004.
- [4] <http://www.ganil.fr/eurisol/EURISOLlinks.html>.
- [5] A. Andrichetto et al., *The SPES Project At LNL*, AIP (American Institute of Physics), 2009.
- [6] G. Meneghetti, M. Manzolaro, A. Andrichetto, *Design of the SPES Target Heating System: theoretical analyses and comparison with experimental data*, TCN CAE, 2008.
- [7] G. Prete, A. Covello, *SPES Technical Design Report*, Laboratori Nazionali di Legnaro, 2008.
http://www.lnl.infn.it/~spes/TDR2008/tech_design08_index.htm.
- [8] M. Deicher, *Radioactive isotopes in solid state physics*, Vol. 33 No 3, Europhysics News, 2002.
- [9] <http://wikipedia.org>.

Capitolo 2

Studio, ottimizzazione e test del target di produzione SPES

2.1 Introduzione

Il progetto SPES (Selective Production of Exotic Species) è destinato a sviluppare una *facility* per produrre fasci di ioni radioattivi (RIBs) ricchi di neutroni (n-rich) e di alta qualità, in base alla tecnica ISOL (*Isotope Separation On-Line*).

Il target di produzione SPES (vedi figura 2.1) è composto da 7 dischi coassiali in Carburo di Uranio (UC_x) (diametro e spessore di 40 e 1.3mm, rispettivamente), spaziatosi in direzione assiale al fine di dissipare per radiazione termica la potenza media di 8 kW dovuta al passaggio attraverso i dischi del fascio di protoni.

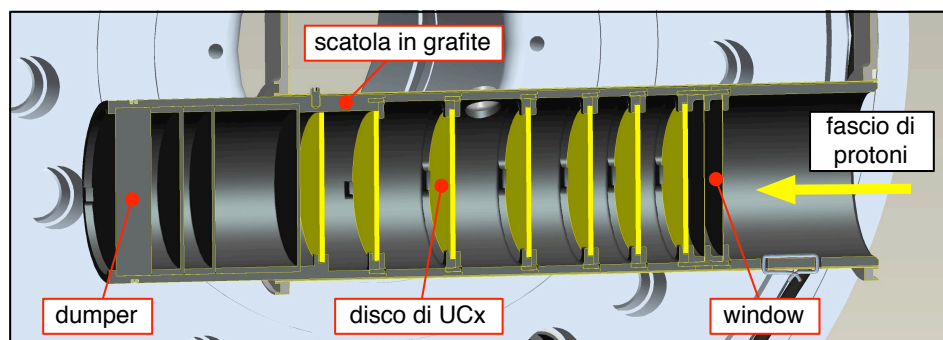


Figura 2.1: Rappresentazione CAD del target di produzione SPES e dei suoi componenti.

All'ingresso del fascio di protoni sono poste due sottili (0.2mm) finestre circolari in grafite per evitare indesiderate fuoriuscite di frammenti nucleari, mentre quattro

2. STUDIO, OTTIMIZZAZIONE E TEST DEL TARGET DI PRODUZIONE SPES

dumpers circolari sempre in grafite, con spessore compreso tra 0.8mm e 10mm , sono posti alla fine del target di produzione SPES per fermare il fascio di protoni [2]. Tutti i dischi, le finestre e i dumpers sono posti all'interno di una scatola tubolare in grafite di diametro esterno e lunghezza pari a 49 e 208.5mm , rispettivamente. La scatola è posta sottovuoto all'interno di una camera raffreddata ad acqua ed è mantenuta ad una temperatura media di 2000°C : il vuoto e l'alta temperatura sono essenziali per una corretta e favorevole estrazione degli isotopi radioattivi dal target verso la sorgente. L'energia e l'intensità del fascio di protoni primario è 40MeV e $200\mu\text{A}$, rispettivamente, con conseguente deposito nel target di una potenza pari a 8kW ; la corrispondente produzione di isotopi all'interno del target è riportata in figura 2.2.

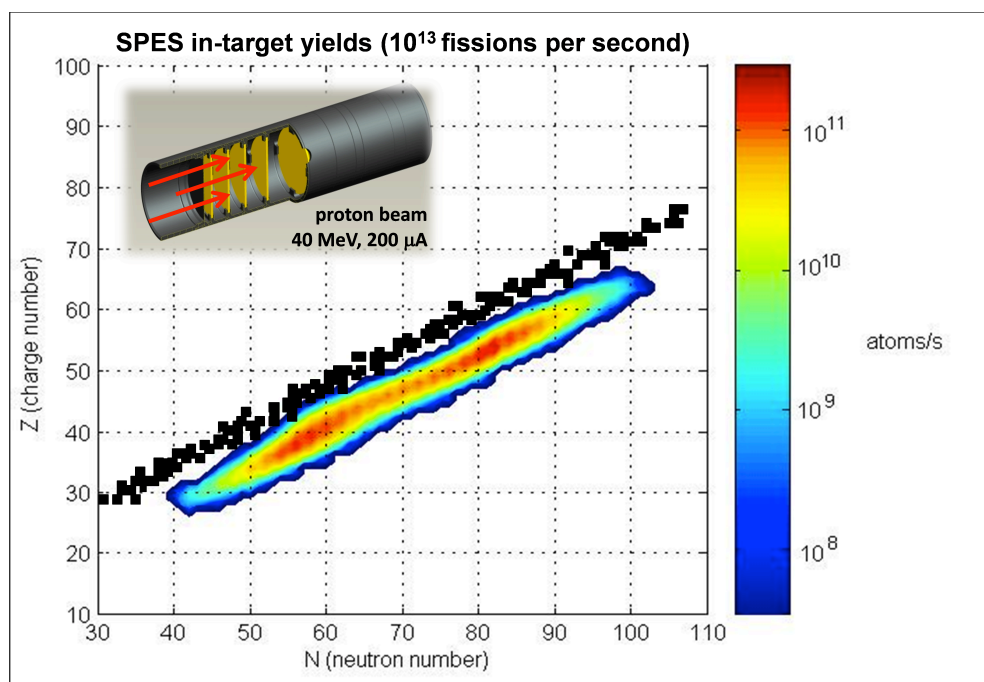


Figura 2.2: Rappresentazione della produzione di isotopi all'interno del target [2].

La potenza del fascio di protoni non è sufficiente a scaldare la scatola fino al livello di temperatura richiesto, a causa dell'intenso scambio di calore radiante dalla scatola in grafite alla camera raffreddata [2]. Di conseguenza, è necessario introdurre un sistema di schermo e di riscaldamento aggiuntivo indipendente. È importante sottolineare che il sistema di riscaldamento è completamente indipendente dal fascio di protoni e permette un miglior controllo termico del target quando la potenza del fascio di protoni non è stabile, cioè durante le procedure

di avvio e di arresto. Questo sistema di riscaldamento (vedi figura 2.3) consiste in un sottile tubo in tantalio (Ta), con una lunghezza di 208.5mm , un diametro esterno di 50mm e uno spessore di 0.2mm . Esso è saldato alle estremità a due ali in tantalio, che sono direttamente connesse ai morsetti di rame, attraverso i quali una corrente elettrica fornita da un alimentatore da 13kW (corrente massima $I_{MAX} = 1300\text{A}$ e potenziale massimo $\Delta V_{MAX} = 10\text{V}$) riscalda per effetto Joule il tubo in Ta. Il tantalio è stato scelto per costruire il sistema di riscaldamento perché è un metallo di transizione altamente resistente alla corrosione, in grado di condurre il calore e l'elettricità (conducibilità termica e resistività elettrica a temperatura ambiente sono pari a $57\text{W}/(\text{m}^\circ\text{C})$ e $1.34 \cdot 10^{-7}\Omega \cdot \text{m}$, rispettivamente, che aumentano all'aumentare della temperatura) e in grado di operare ad elevate temperature: ad una pressione di 10^{-4}Pa (che è il livello di pressione all'interno della camera durante le condizioni di lavoro) il Ta inizia a sublimare approssimativamente a 2200°C [3]. Inoltre, grazie alla sua bassa emissività (0.15 a 1000°C e 0.26 a 2000°C), il tantalio è in grado di schermare efficientemente la scatola in grafite, limitando l'effetto di raffreddamento per radiazione termica.

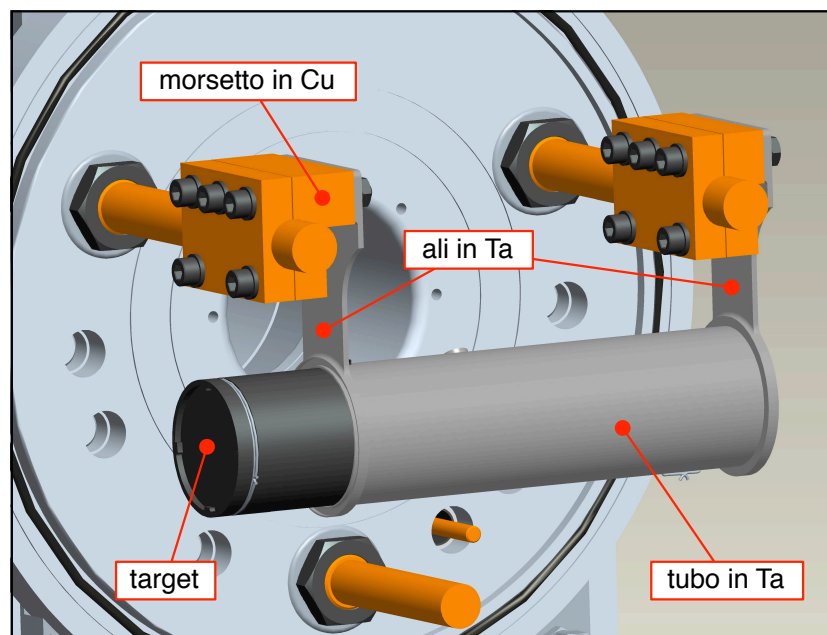


Figura 2.3: Rappresentazione CAD e foto del sistema di riscaldamento del target con i suoi principali componenti (tubo, ali e morsetti).

Descritto il target di produzione SPES e il suo sistema di riscaldamento si

2. STUDIO, OTTIMIZZAZIONE E TEST DEL TARGET DI PRODUZIONE SPES

possono fare le seguenti osservazioni:

- a) per garantire una efficiente velocità di produzione del RIB, il target di produzione SPES deve lavorare ad elevate temperature, circa 2000°C ; perciò è importante conoscere la distribuzione della temperatura del target in dettaglio, specialmente nelle zone dove non è possibile eseguire una misura di temperatura;
- b) il target è riscaldato da due componenti del carico termico: la prima generata dal fascio di protoni, la seconda causata dal sistema di riscaldamento indipendente;
- c) i problemi termici ed elettrici sono accoppiati, poiché il carico termico dovuto al sistema di riscaldamento è prodotto per effetto Joule e la resistività elettrica del tantalio dipende dalla temperatura.

Per queste ragioni è perciò necessario eseguire uno studio teorico (sia analitico che numerico) e sperimentale del comportamento termo-elettrico del target.

2.2 Il modello analitico monodimensionale [1]

Al fine di ottimizzare il target di produzione SPES, si considera un semplice modello analitico monodimensionale (vedi figura 2.4).

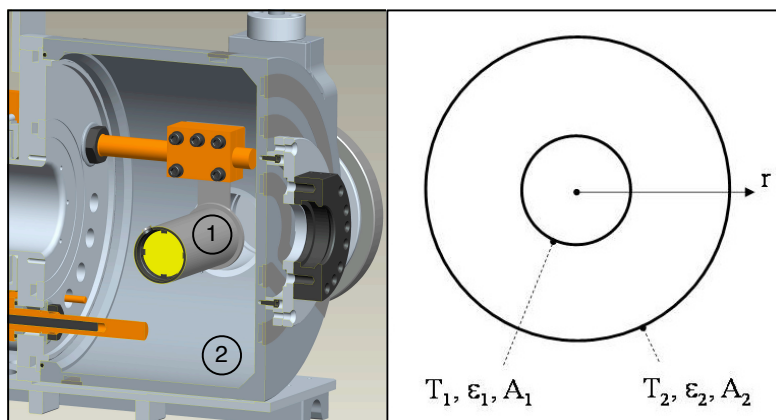


Figura 2.4: *Modello termico analitico: la superficie cilindrica esterna del tubo in T_a (A_1) e la superficie interna della camera (A_2) sono modellate come sfere concentriche equivalenti.*

In particolare questo modello dà un unico valore di temperatura per l'intero tubo in Ta che circonda la scatola di grafite (in realtà il tubo in Ta è caratterizzato da significativi gradienti di temperatura, in particolare vicino alle connessioni con le ali in Ta). Nonostante la geometria sia drasticamente semplificata, il modello prende in considerazione la variazione della resistività elettrica e dell'emissività del tantalio al variare della temperatura (vedi figura 2.5 e 2.6).

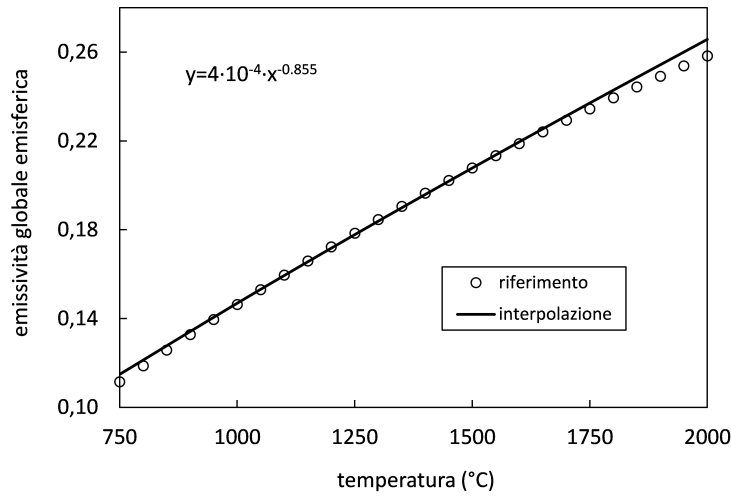


Figura 2.5: Dipendenza dell'emissività globale emisferica del tantalio dalla temperatura [4] e funzione di interpolazione utilizzata nel modello analitico [1].

Poiché il blocco target è mantenuto sottovuoto e la sua temperatura di lavoro è attorno ai 2000°C , allora la radiazione termica è dominante rispetto agli altri meccanismi di trasferimento del calore. Se prendiamo in considerazione solo la superficie laterale esterna del tubo in Ta (area A_1) e la superficie interna della camera (area A_2), e le approssimiamo con superfici sferiche concentriche equivalenti aventi le stesse aree A_1 e A_2 (vedi ancora figura 2.4), il flusso termico scambiato per radiazione termica tra il blocco target e la camera può essere espresso come (in ipotesi di superfici grigie e riflessione dell'energia radiante di tipo diffuso) [6]:

$$q_{1-2} = \frac{A_1 \cdot \sigma_n \cdot (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \left(\frac{A_1}{A_2}\right) \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right)} \quad (2.1)$$

dove σ_n è la costante di Stefan-Boltzmann, T_1 e T_2 sono le temperature assolute delle due superfici sferiche concentriche, ε_1 e ε_2 sono le emissività globali emisferiche delle superfici 1 e 2, rispettivamente.

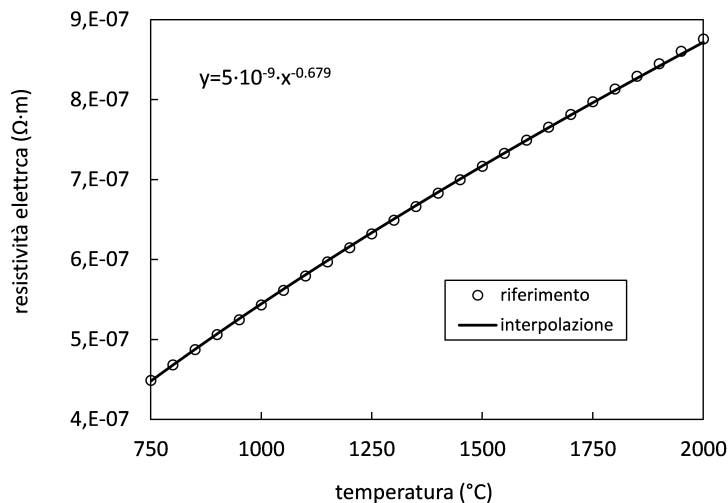


Figura 2.6: Dipendenza della resistività elettrica del tantalio dalla temperatura [5] e funzione di interpolazione utilizzata nel modello analitico [1].

Se si considera la dissipazione di calore prodotta dalla corrente elettrica I che circola attraverso il riscaldatore in Ta (conduttore di sezione S , lunghezza L e resistività elettrica ρ) e supposto che sia totalmente dissipato per radiazione termica, si ottiene [7]:

$$q_{1-2} = \frac{\rho \cdot L}{S} \cdot I^2 \quad (2.2)$$

Di conseguenza, combinando le equazioni (2.1) e (2.2), la temperatura del tubo in Ta può essere stimata per mezzo della seguente espressione:

$$T_1 = \sqrt[4]{T_2^4 + (A_1 \cdot \sigma_n)^{-1} \cdot \left[\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right) \right] \cdot \frac{\rho \cdot L}{S} \cdot I^2} \quad (2.3)$$

L'equazione (2.3) può essere usata per studiare la dipendenza della temperatura del tubo in Ta dalla corrente elettrica I . Essa però, deve essere risolta numericamente poiché la resistività elettrica ρ e l'emissività ε_1 del Ta dipendono dalla temperatura T_1 .

2.3 Il modello numerico ad Elementi Finiti

Come descritto precedentemente, nel modello analitico sono state effettuate delle semplificazioni sulla geometria e sulle proprietà del sistema. Sebbene tali

semplificazioni in alcuni casi consentono di ottenere comunque dei risultati soddisfacenti, molte volte queste sono tali da comprometterne l'esito; perciò, per avere dei risultati più vicini alla realtà, è necessario l'utilizzo di metodi numerici, tra cui compare anche il metodo degli Elementi Finiti (FEM, Finite Element Method).

In particolare, al fine di simulare il comportamento termico del target di produzione SPES e il suo riscaldatore, è stato definito un modello FEM elettro-termico accoppiato, in ambiente Ansys[®] Release 13.0. Inoltre, per modellare il riscaldatore, è stato usato l'elemento accoppiato SOLID226 (*3-D 20-Node Coupled-Field Solid*), che a seconda dell'impostazione KEYOPT(1) può effettuare una vasta gamma di simulazioni dirette tra diversi campi, nel nostro caso analisi elettrotermiche. Esso ha 20 nodi ognuno avente un massimo di 5 gradi di libertà a seconda della simulazione (nel caso di simulazioni elettrotermiche sono due, la temperatura e il potenziale). Invece per modellare il target e la camera è stato utilizzato l'elemento termico SOLID70 con un solo grado di libertà, poiché doveva essere risolto solo un problema termico.

L'irraggiamento (modo di trasmissione del calore dominante alle alte temperature) è stato implementato utilizzando il metodo Radiosity Solver, che permette di introdurre valori di emissività dipendenti dalla temperatura. Inoltre è stata presa in considerazione anche la dipendenza dalla temperatura di tutte le proprietà rilevanti dei materiali.

I componenti coinvolti nel problema accoppiato elettro-termico sono i morsetti ed il riscaldatore fatti di rame e tantalio, rispettivamente; per calcolare la loro temperatura in regime stazionario e la distribuzione di tensione, è necessario considerare la dipendenza dalla temperatura delle loro proprietà in termini di resistività elettrica, emissività globale emisferica e conducibilità termica. I componenti coinvolti solo nel problema termico sono le windows, i dumpers e la scatola in grafite, i dischi in carburo di silicio e la camera in lega di alluminio. La dipendenza dalla temperatura dei valori di emissività e conducibilità termica è stata considerata sia per la grafite che per il carburo di silicio. Per la lega di alluminio 5083, la conducibilità termica è stata assegnata come funzione della temperatura, mentre l'emissività è stata fissata pari a 0.1, questo perché la superficie interna della camera non era ossidata ed era priva di particolari trattamenti superficiali che avrebbero migliorato la finitura superficiale.

Prima di procedere con l'importazione della geometria, la meshatura e l'appli-

2. STUDIO, OTTIMIZZAZIONE E TEST DEL TARGET DI PRODUZIONE SPES

cazione dei carichi, è necessario soffermarsi sulla semplificazione geometrica dei componenti a partire dalla configurazione originale. La semplificazione, intesa come eliminazione di parti o variazione di alcune dimensioni caratteristiche, è un'operazione estremamente delicata perché influisce pesantemente sui risultati se non operata nel modo corretto. Infatti, da un lato riduce i tempi di calcolo, le probabilità di non convergenza delle simulazioni a causa delle geometrie complesse e limita i problemi legati all'importazione dei componenti in formato neutro IGES. Dall'altro lato, si può incorrere in errori macroscopici, visto che la semplificazione geometrica delle parti allontana il modello reale da quello impiegato per le analisi numeriche. In figura 2.7 è possibile osservare, confrontando le due figure, le semplificazioni eseguite sul modello in esame.

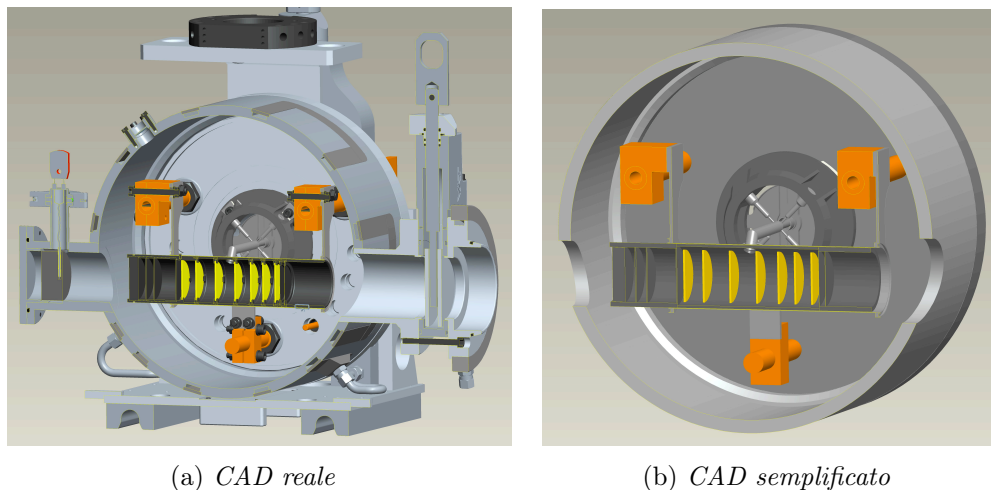


Figura 2.7: Confronto tra il CAD originale e il CAD semplificato per il modello FEM.

Tra le ali in tantalio e i morsetti in rame è stato considerato un contatto sia elettrico che termico perfetto (nel sistema reale essi sono connessi per mezzo di viti), mentre un piccolo spazio radiale ($0.2mm$) è stato introdotto tra il tubo in Ta e la superficie cilindrica esterna della scatola in grafite (nel sistema reale sia la scatola in grafite sia il tubo in Ta sono posizionati orizzontalmente e la scatola si appoggia al tubo a causa della forza di gravità): perciò nel modello numerico il riscaldatore e il target possono scambiare calore solo per irraggiamento.

Sono stati definiti sei diversi enclosures (cioè un insieme di superfici radianti tra loro): cinque per calcolare il trasferimento di calore per irraggiamento tra windows, dischi, dumpers e le superfici interne della scatola in grafite, mentre uno

è stato definito per calcolare l'irraggiamento tra le superfici esterne della scatola in grafite, il riscaldatore e le superfici interne della camera.

Per quanto riguarda il problema elettrico, è stato assegnato un vincolo di $0V$ ad uno dei morsetti in rame, mentre all'altro è stata imposta una rampa di corrente elettrica. Per quanto riguarda il problema termico, è stato assegnato un vincolo di temperatura di $25^{\circ}C$ alle superfici dei canali del sistema di raffreddamento che attraversano il piatto base della camera e i morsetti in rame e un vincolo sempre di $25^{\circ}C$ alle superfici interne ed esterne della camera (vedi figura 2.8).

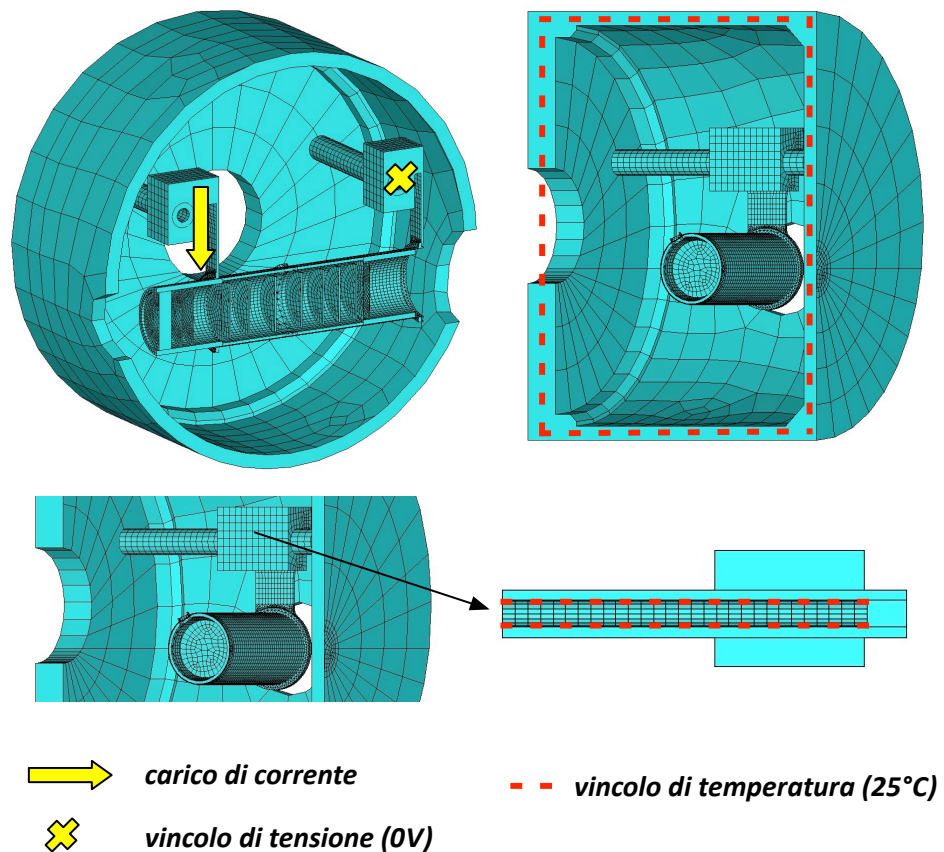


Figura 2.8: Viste in sezione del modello numerico FEM usato per simulare il comportamento del riscaldatore e rappresentazione delle condizioni al contorno applicate.

Per favorire la convergenza del metodo Radiosity Solver sono state eseguite analisi transitorie invece di analisi stazionarie; in particolare è stato assegnato un graduale valore di corrente dipendente dal tempo, a partire da $100A$ fino ad un

2. STUDIO, OTTIMIZZAZIONE E TEST DEL TARGET DI PRODUZIONE SPES

massimo di 1300A con gradini di 100A. Ad ogni gradino la simulazione impiegava un sufficiente periodo di tempo per lasciar stabilizzare la temperatura.

I risultati ottenuti dal modello FEM sono riportati in figura 2.9, che mostra la distribuzione della temperatura del riscaldatore quando il carico termico è fornito dalla corrente di intensità 1300A.

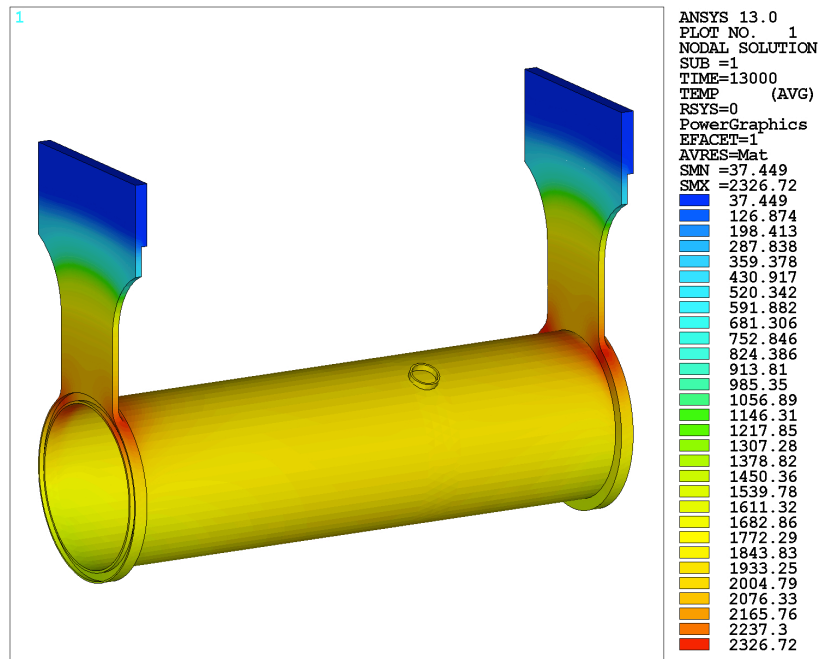


Figura 2.9: Mappa delle temperature [°C] ottenute dal modello FEM per il riscaldatore a 1300A.

La figura 2.10 dimostra chiaramente che la massima differenza di potenziale del riscaldatore è compatibile con gli alimentatori adottati (tensione limite pari a 10V).

Per poter successivamente confrontare i risultati del modello FEM con le misure sperimentali, sono state estratte, dal file dei risultati, (utilizzando il listato APDL in appendice C.2) le temperature in due punti di interesse sulla superficie esterna del riscaldatore (vedi figura 2.11) e la tensione ai capi dei morsetti. I valori ricavati sono riportati in tabella 2.1.

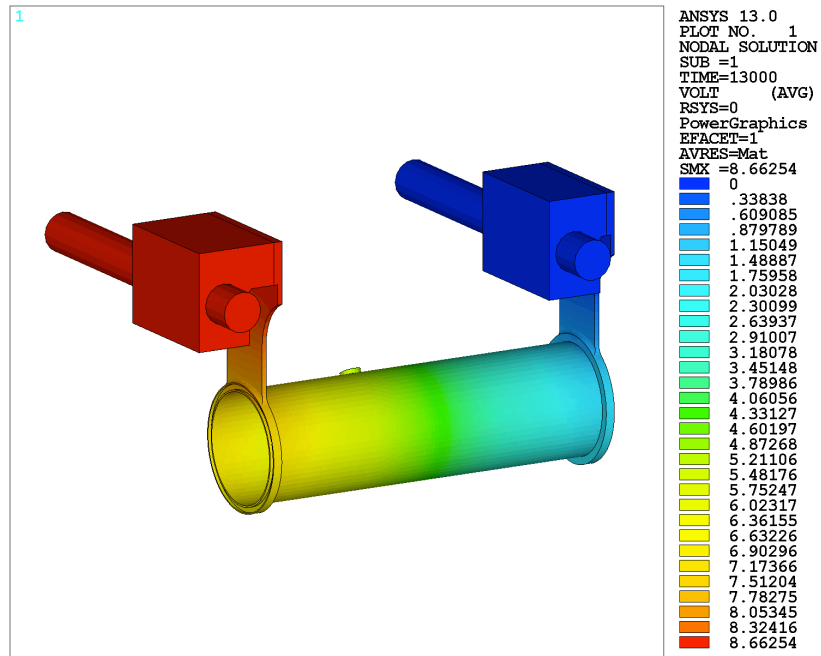


Figura 2.10: Mappa delle tensioni [V] ottenute dal modello FEM per il riscaldatore a 1300A.

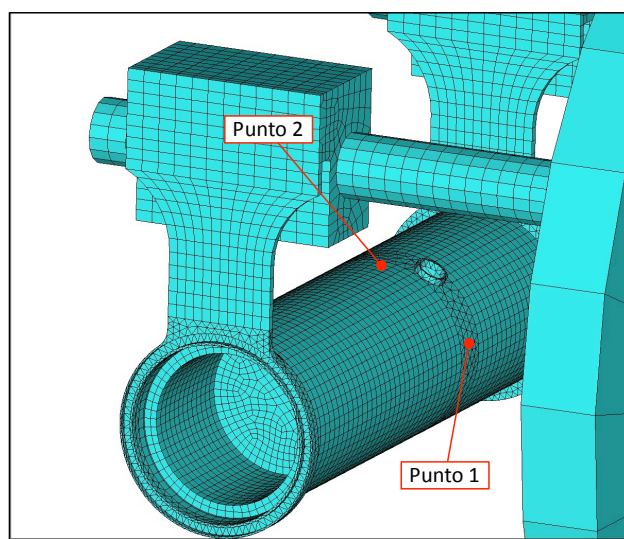


Figura 2.11: Punti di rilevamento della temperatura.

| I [A] | V [V] | T ₁ [°C] | T ₂ [°C] |
|-------|-------|---------------------|---------------------|
| 600 | 2.72 | 1144.46 | 1166.97 |
| 700 | 3.44 | 1271.93 | 1296.06 |
| 800 | 4.20 | 1391.09 | 1416.86 |
| 900 | 5.02 | 1503.64 | 1530.95 |
| 1000 | 5.87 | 1610.40 | 1639.18 |
| 1100 | 6.76 | 1712.18 | 1742.42 |
| 1200 | 7.69 | 1809.64 | 1841.39 |
| 1300 | 8.66 | 1903.41 | 1936.69 |

Tabella 2.1: Risultati del modello FEM

2.4 Studio del target attuale

2.4.1 I test sperimentali

L'apparato sperimentale utilizzato per effettuare i test off-line (cioè senza l'effetto del fascio di protoni) sul target di produzione SPES è rappresentato in figura 2.12.

Due alimentatori collegati in parallelo (ognuno dei quali trasferisce una potenza massima di $10kW$) per trasmettere una potenza di $13kW$, sono stati connessi elettricamente al tubo in Ta attraverso i morsetti in rame provocando così una dissipazione di calore per effetto Joule. Il vuoto all'interno della camera è stato raggiunto mediante una pompa rotativa e una pompa turbomolecolare installate in serie, in grado di fornire un livello di vuoto pari a $10^{-6}mbar$. Il piatto base della camera ed i morsetti in rame sono stati raffreddati ad acqua (la temperatura dell'acqua e la sua portata sono $20^{\circ}C$ e $400l/h$, rispettivamente) al fine di evitare problemi di surriscaldamento e danneggiamento delle guarnizioni della camera. L'apparato sperimentale è stato predisposto per consentire la misurazione della temperatura del tubo in Ta in due punti (vedi figura 2.13):

- il *Punto 1* sulla superficie esterna laterale (lungo l'asse e allineato con il foro);
- il *Punto 2* sulla superficie esterna superiore (lungo l'asse e a $10.5mm$ dal centro del foro).

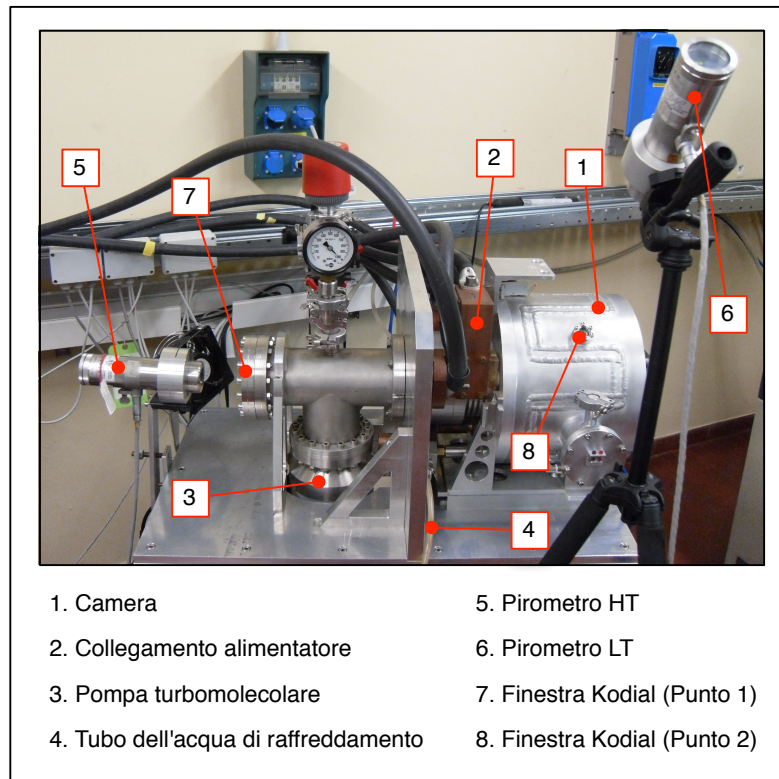


Figura 2.12: *Rappresentazione dell'apparato sperimentale utilizzato per misurare le temperature del tubo in Ta.*

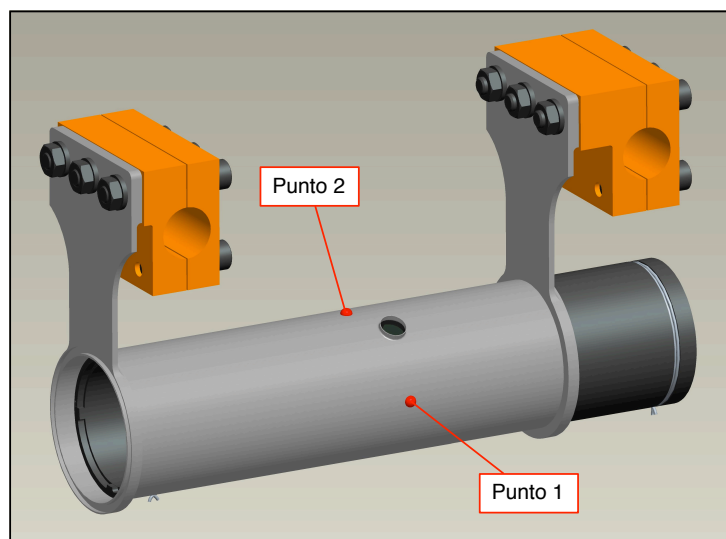


Figura 2.13: *Rappresentazione dei due punti del tubo in Ta in cui sono state rilevate le temperature.*

2. STUDIO, OTTIMIZZAZIONE E TEST DEL TARGET DI PRODUZIONE SPES

Per queste misure è stato usato un pirometro ad infrarosso a due colori avente un range di temperatura di $1000 - 3000^{\circ}\text{C}$ (pirometro High Temperature), caratterizzato da una precisione entro lo 0.5% della lettura più 2°C e da una ripetibilità entro lo 0.1% della temperatura di fondo scala. Per misurare la temperatura del tubo in Ta all'interno della camera sottovuoto, sono state installate due finestre (una posteriore e una laterale, rispettivamente per il *Punto 1* ed il *Punto 2*) in vetro borosilicato (finestre Kodial, fornite dalla Torr Scientific Ltd, East Sussex-UK) quasi completamente trasparenti alla radiazione infrarossa. Inoltre, per prevenire il loro surriscaldamento locale, è stato puntato su di esse un flusso di aria compressa.

Avendo a disposizione un solo pirometro High Temperature, sono stati eseguiti test indipendenti per la misurazione della temperatura nei due punti: in altre parole è stata effettuata una prima serie di tre test con il pirometro puntato sulla finestra posteriore per misurare la temperatura nel *Punto 1* e una seconda serie di tre test con il pirometro puntato sulla finestra laterale per misurare la temperatura nel *Punto 2*.

I test sperimentali sono stati condotti aumentando la corrente di riscaldamento (divisa ugualmente tra i due alimentatori) con gradini di 100A iniziando da 100A fino a 1300A e tenendo la corrente costante per 20min ad ogni gradino, in modo da far stabilizzare la distribuzione di temperatura del sistema (vedi figura 2.14).

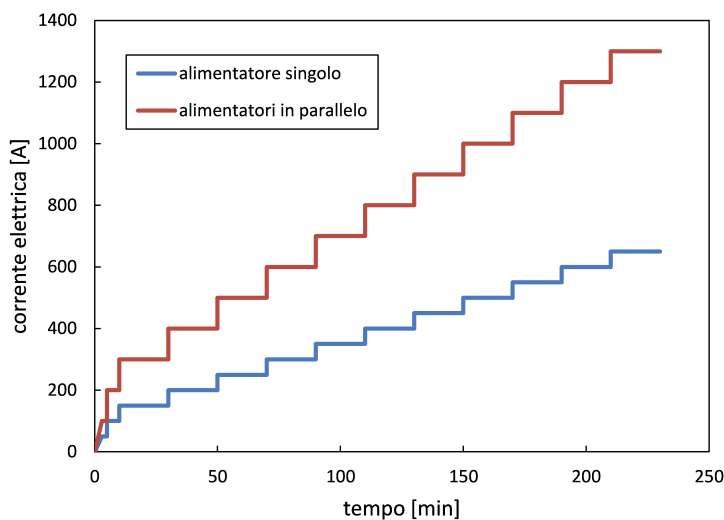


Figura 2.14: *Rampa di carico.*

Quando si utilizzano i pirometri è importante limitare e valutare gli effetti

della riflessione che può portare a significativi errori di misurazione. Durante le misure di temperatura sul tubo in Ta, i problemi della riflessione si sarebbero potuti verificare a causa della bassa emissività di tale materiale (vedi figura 2.5). Fortunatamente, la superficie attorno al punto di misura, cioè la superficie della camera, è caratterizzata da un basso livello di temperatura (sull'ordine dei 50°C), quindi gli effetti della riflessione risultano trascurabili.

La differenza di potenziale tra i lati esterni dei morsetti in rame è stata misurata con un voltmetro, caratterizzato da un campo di misura di $0 - 1000\text{V}$ e una precisione pari allo 0.1% della lettura.

È importante sottolineare che ogni valore sperimentale riportato in questo lavoro è la media di tre misure ripetute, che hanno dimostrato di mantenere un comportamento molto stabile: in particolare la differenza tra una singola misura ed il valore medio corrispondente era sempre sotto l' 1% circa.

Con lo scopo di iniziare i test ad alte temperature, il riscaldatore è stato connesso ai morsetti in rame necessari per installarlo all'apparato sperimentale appena descritto (vedi figura 2.15).

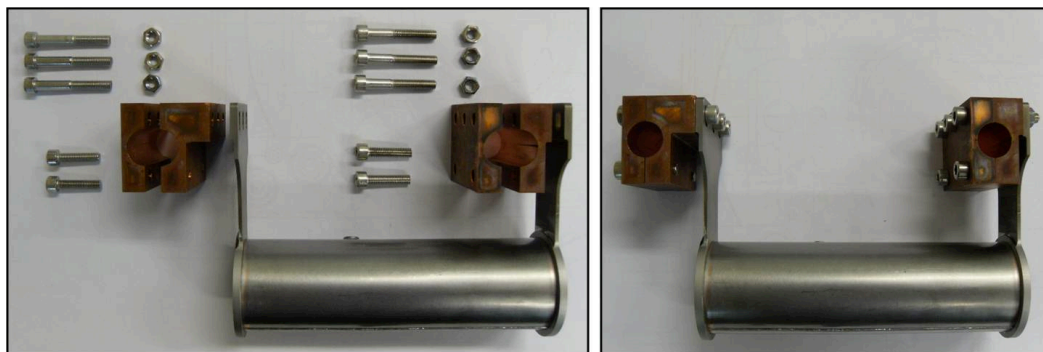


Figura 2.15: *Connessione del riscaldatore ai morsetti in rame.*

Successivamente il target di produzione è stato accuratamente inserito all'interno del riscaldatore: due piccoli pezzi di filo di Ta sono stati usati per tenere chiusa la scatola in grafite in prossimità dell'estremità esposta e per fissare il target rispetto al riscaldatore.

A questo punto il blocco target (cioè l'insieme costituito dal target di produzione ed il riscaldatore) è stato installato nell'apparato sperimentale e i morsetti in rame sono stati opportunamente serrati al fine di sostenere l'alto flusso di corrente elettrica necessario per riscaldare il blocco target al livello di temperatura desiderato (vedi figura 2.16).

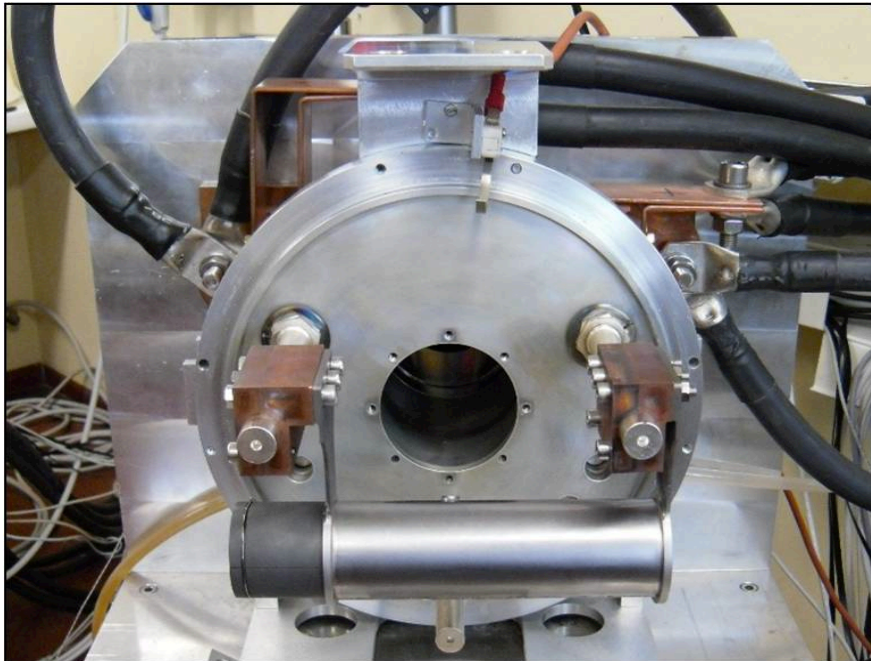


Figura 2.16: *Installazione del blocco target nell'apparato sperimentale.*

Infine, il tutto è stato chiuso utilizzando la camera raffreddata ad acqua. Il blocco target è stato posizionato e allineato prendendo in considerazione l'apertura per l'ingresso del fascio di protoni presente sulla camera.

2.4.2 Confronto tra i dati numerici e sperimentali

Il target attuale (vedi figura 2.17) è costituito da un cilindro di grafite cavo diviso in due parti secondo un piano normale contenente l'asse del cilindro stesso; questi due pezzi di grafite racchiudono le due windows, i dumpers e i dischi in carburo di uranio, formando un unico blocco compatto, che costituisce il target di produzione SPES.

La figura 2.18 mostra il confronto tra le temperature nel primo punto di interesse (*Punto 1*) ottenute dal modello analitico, dal modello FEM e dai tre test sperimentali riportati in [1] (per quest'ultime la curva rappresenta la media delle temperature dei tre test), per differenti valori della corrente elettrica. Il corrispondente confronto tra i valori della differenza di potenziale ai morsetti, per differenti valori della corrente elettrica, è riportato in figura 2.19.

Le temperature del modello FEM sono sempre più basse rispetto a quello analitico. Infatti il modello analitico non considera l'ulteriore flusso termico



Figura 2.17: Rappresentazione del target attuale.

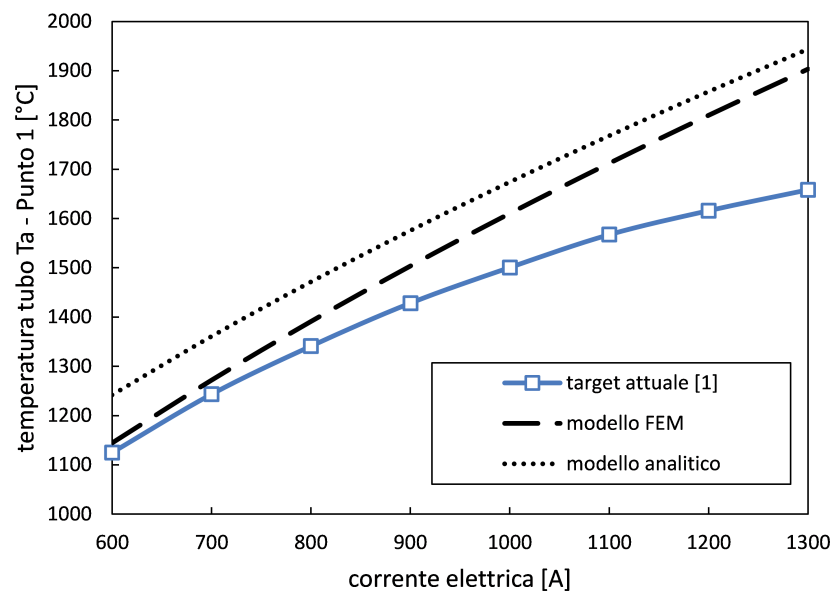


Figura 2.18: Confronto tra le temperature analitiche, numeriche e sperimentali, nel Punto 1, del target attuale.

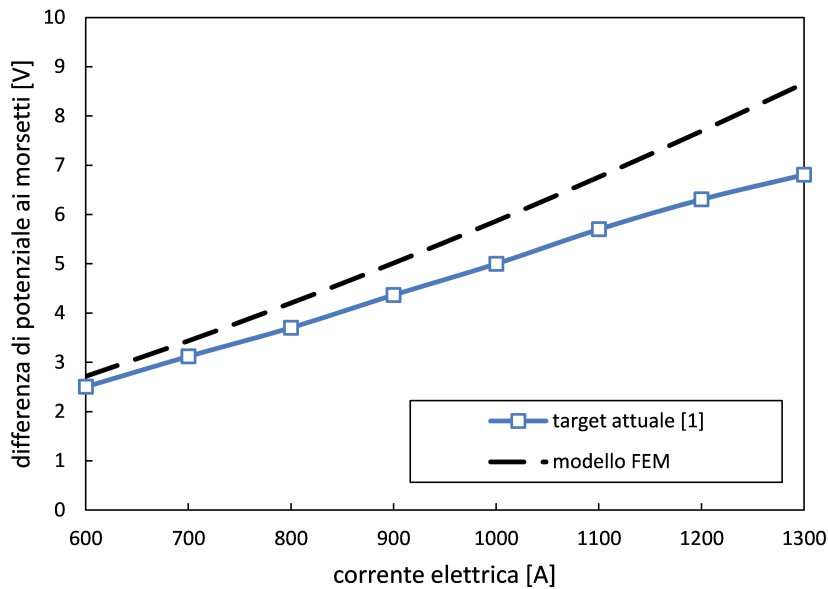


Figura 2.19: Confronto tra i valori della differenza di potenziale ai morsetti sia numerica che sperimentale, del target attuale.

conduttivo dal tubo in Ta verso i morsetti raffreddati. Questo effetto diventa sempre più debole con l'aumentare della temperatura, perché la trasmissione di calore per conduzione è sempre più ridotta rispetto all'irraggiamento. Inoltre, si ricorda che il modello analitico è monodimensionale e perciò dà un unico valore di temperatura per l'intera superficie esterna del tubo in Ta, a differenza dei risultati FEM e sperimentali che si riferiscono ad uno specifico punto sulla superficie esterna del tubo in Ta.

Concentrando l'attenzione sulla temperatura sperimentale massima del tubo ($1658^{\circ}C$), registrata quando la corrente è pari a $1300A$, è possibile notare la grande differenza rispetto al corrispondente valore previsto dal modello FEM ($1903^{\circ}C$). Questa discrepanza, insieme ai grafici riportati in figura 2.20 e 2.21, portano al sospetto di un circuito elettrico parallelo: in altre parole le deformazioni del riscaldatore, causate dall'espansione termica, sembrano causare, specialmente in prossimità delle ali, alcuni punti di contatto con la scatola in grafite attraverso cui fluisce una parte della corrente. In questo modo la resistenza elettrica globale diminuisce e conseguentemente, per la stessa corrente di riscaldamento, anche la potenza dissipata decresce. La figura 2.20 mostra l'evoluzione della temperatura del tubo durante i test 1, 2 e 3 (la corrente elettrica è mantenuta costante ad ogni

gradino); è facile notare, specialmente alle alte temperature e ad alti valori di corrente, la generale instabilità del sistema di riscaldamento. L'instabilità della temperatura è fedelmente confermata dalla figura 2.21 che riporta i corrispondenti valori della differenza di potenziale. Inoltre il circuito parallelo nella scatola in grafite è provato anche dalla figura 2.22: terminati i test, una volta estratta la scatola dal riscaldatore e pulita con carta abrasiva, è stato possibile notare i punti di contatto tra la scatola in grafite e le ali del riscaldatore attraverso cui la corrente elettrica parallela entra ed esce dalla scatola.

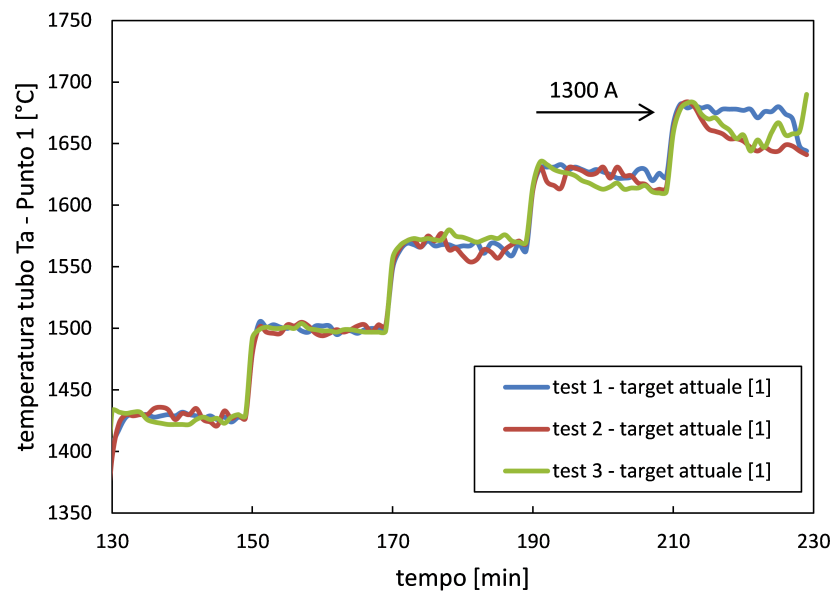


Figura 2.20: *Temperature nel Punto 1 del target attuale, in funzione del tempo, durante i tre test sperimentali riportati in [1].*

La differenza di potenziale misurata direttamente ai morsetti del riscaldatore è in generale più bassa rispetto a quella registrata automaticamente dall'alimentatore: questo è dovuto alla perdita di potenza attraverso i cavi elettrici che collegano l'alimentatore ai morsetti.

Con lo scopo di risolvere il problema menzionato e di conseguenza migliorare i risultati del sistema di riscaldamento, la geometria della scatola in grafite era stata leggermente modificata riducendo da 49 a 48mm il diametro esterno alla sue estremità (vedi figura 2.23) [1]; in questo modo era possibile aumentare lo spazio radiale tra la scatola e il tubo in Ta in prossimità delle ali, dove, a causa dell'espansione termica, si verificavano importanti deformazioni.

2. STUDIO, OTTIMIZZAZIONE E TEST DEL TARGET DI PRODUZIONE SPES

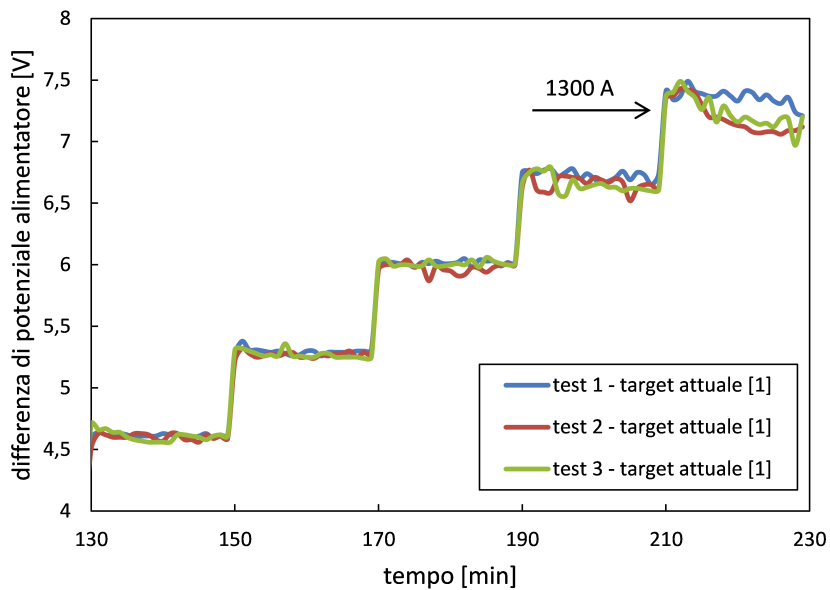


Figura 2.21: Differenza di potenziale del target attuale, in funzione del tempo, durante i tre test sperimentali riportati in [1].

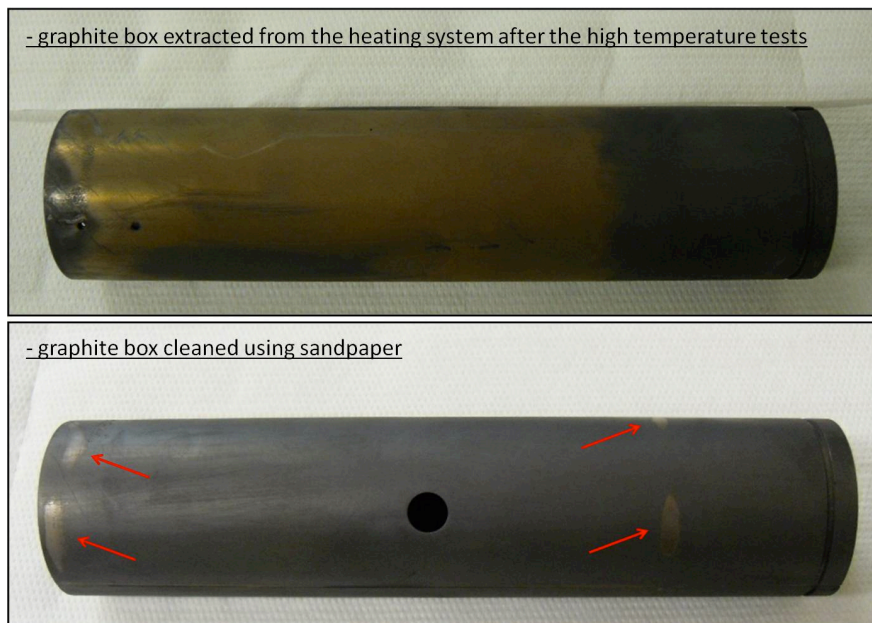


Figura 2.22: La scatola in grafite estratta dal riscaldatore dopo i test di alta temperatura: gli spots evidenziati non sono stati rimossi dopo pulitura con carta abrasiva e mettono chiaramente in evidenza l'ingrasso e l'uscita del flusso di corrente elettrica attraverso la scatola, formando un circuito parallelo rispetto al sistema di riscaldamento del target [1].

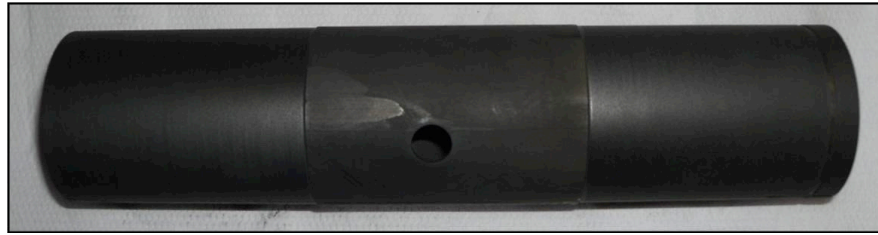


Figura 2.23: *Rappresentazione del target attuale modificato (diametro esterno alle estremità ridotto da 49 a 48mm) [1].*

Per verificare l'efficacia di questa modifica sono stati eseguiti nuovi test. Come si può vedere dalla figura 2.24, durante i primi test con la scatola modificata riportati in [1], l'incremento di temperatura era evidente ed importante, ma ad alte temperature ed alti livelli di corrente, il circuito parallelo della scatola era ancora attivo e contribuiva a diminuire significativamente il livello di temperatura del target. Con l'aumentare del numero dei test però, la temperatura tendeva ad abbassarsi fino ad assestarsi su valori simili a quelli del target non modificato, come si può notare dalla curva che rappresenta la media delle temperature dei tre test da me effettuati utilizzando, appunto, il target modificato (vedi anche figura 2.26a). Le misure di temperatura sono state confermate e rinforzate dai valori della differenza di potenziale (vedi figura 2.25).

I grafici di figura 2.26 mostrano il confronto tra le temperature nel *Punto 1* e nel *Punto 2* del target attuale modificato ottenute dal modello analitico, dal modello FEM e dai test sperimentali da me condotti (per quest'ultime la curva rappresenta la media delle temperature dei tre test), per differenti valori della corrente elettrica. È importante sottolineare che ogni punto riportato in figura 2.26 e anche 2.27, rappresenta l'ultimo valore del corrispondente gradino della relativa curva di figura 2.24 e 2.25, rispettivamente.

In figura 2.27 è riportato il confronto tra la differenza di potenziale del modello FEM e l'andamento medio della differenza di potenziale ottenuta nella serie di test di temperatura, al variare della corrente. La differenza tra i valori numerici e sperimentali è probabilmente dovuta ai contatti ideali tra le ali in Ta e i morsetti in rame che sono stati implementati nel modello FEM. Dalle connessioni reali, invece, ci si aspettano delle resistenze elettriche di contatto, causate dalla rugosità delle superfici di contatto, dalle giunzioni bullonate e dalle deformazioni meccaniche dovute all'espansione termica.

2. STUDIO, OTTIMIZZAZIONE E TEST DEL TARGET DI PRODUZIONE SPES

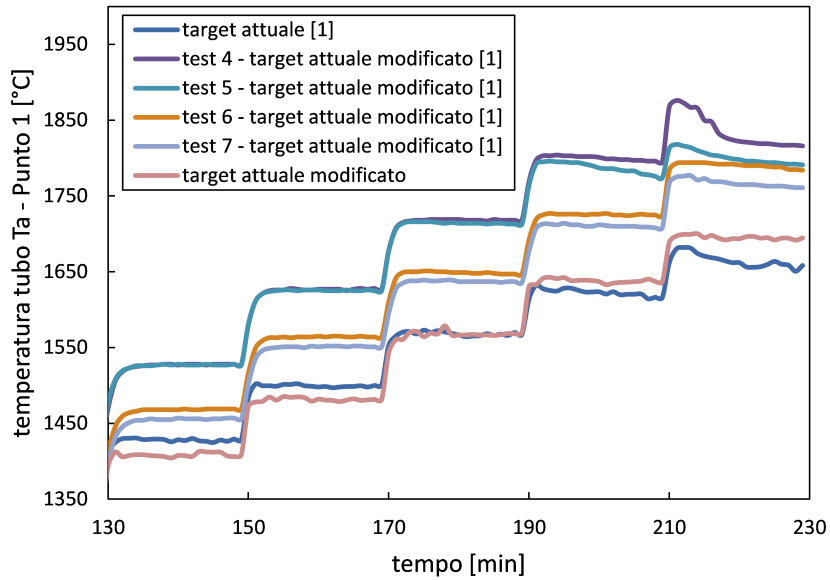


Figura 2.24: Confronto delle temperature nel Punto 1 del target attuale e modificato, in funzione del tempo.

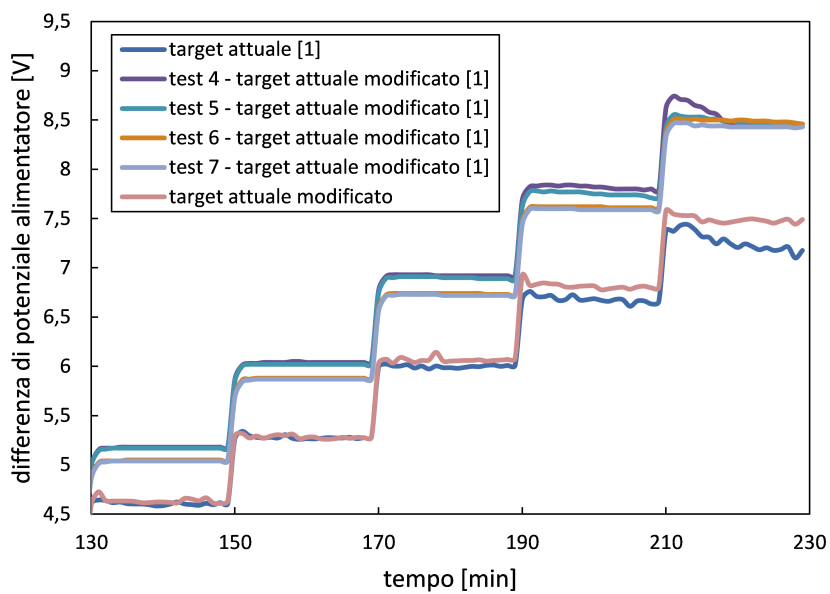
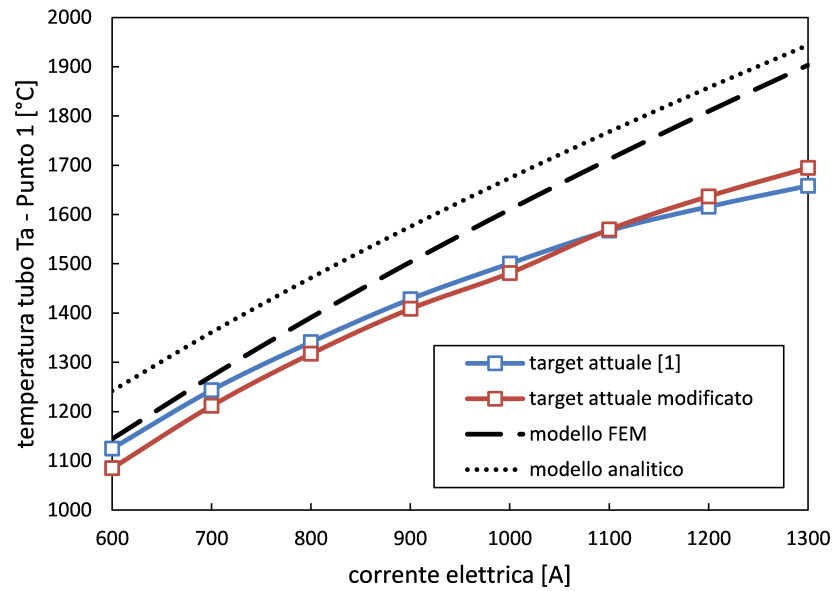
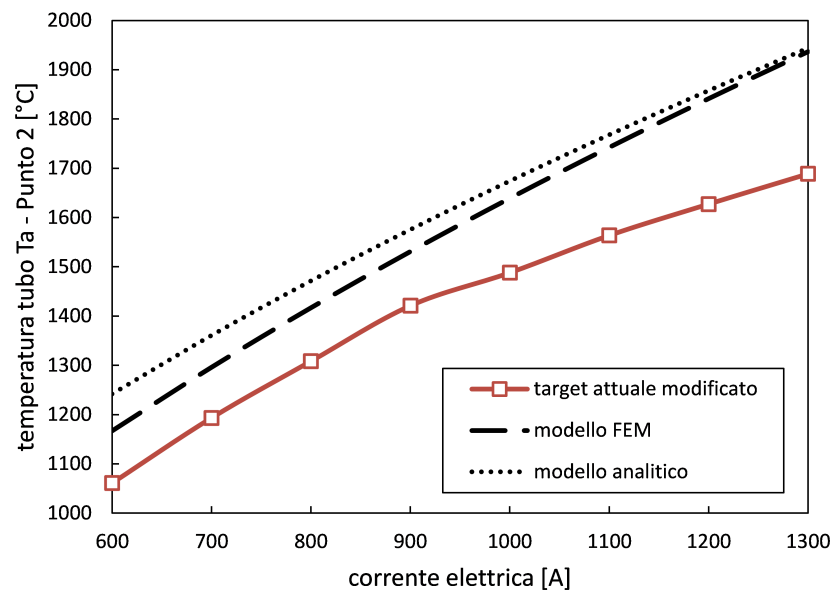


Figura 2.25: Confronto della differenza di potenziale del target attuale e modificato, in funzione del tempo.



(a) Temperature nel Punto 1



(b) Temperature nel Punto 2

Figura 2.26: Temperature analitiche, numeriche e sperimentali, nel Punto 1 e nel Punto 2, del target attuale modificato.

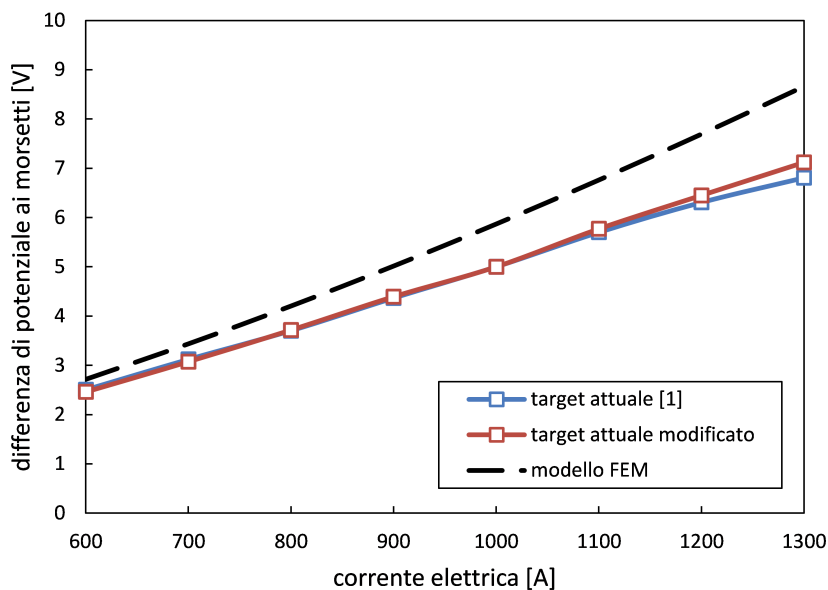


Figura 2.27: Valori della differenza di potenziale ai morsetti sia numerica che sperimentale, del target attuale modificato.

È stato così accertato che, anche utilizzando il target modificato, persiste l'instabilità del sistema di riscaldamento con valori della temperatura che, al crescere del numero di test effettuati, tornano ad avvicinarsi a quelli del target non modificato. E' dunque opportuno procedere con la progettazione di un nuovo target, anche per la necessità di ottenere temperature più elevate e più vicine al modello FEM, come verrà descritto nel prossimo paragrafo.

2.5 Studio per la definizione di un nuovo target

2.5.1 Definizione e test sperimentali del *Prototipo 1*

Per risolvere il problema del circuito parallelo della scatola, al fine di riuscire ad ottenere temperature più elevate sul riscaldatore e quindi sul target, si è pensato di creare un primo prototipo di target (*Prototipo 1*). Esso riprende il progetto originale della scatola in grafite, composta da più anelli separatori, impilati secondo un certo ordine al fine di mantenere i dischi di carburo di uranio alla corretta distanza l'uno dall'altro (vedi figura 2.28), con la quale si raggiungevano temperature più elevate e vicine al modello FEM.

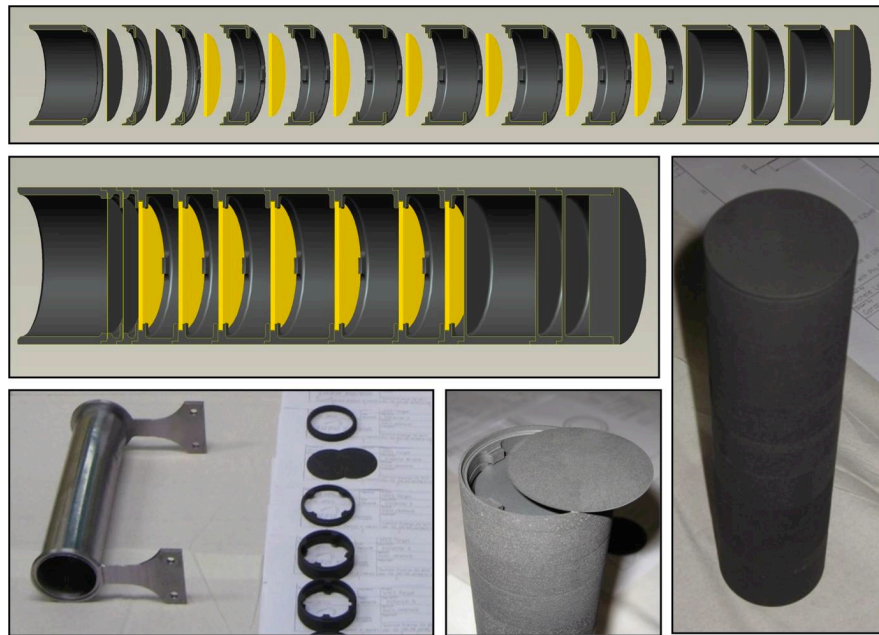


Figura 2.28: *Rappresentazione del progetto originale della scatola in grafite e relativo riscaldatore all'interno del quale andava inserita.*

La scatola in grafite originale era stata progettata per essere utilizzata con il precedente riscaldatore in Ta, più lungo rispetto a quello attuale, perciò, per effettuare i test di temperatura la si è dovuta adattare, accorciandola in lunghezza cioè utilizzando solo gli anelli separatori che riempivano il riscaldatore, omettendo gli ultimi tre dumper (vedi figura 2.29).

Analizzando i dati ottenuti dai test sperimentali sul *Prototipo 1* sono state fatte considerazioni molto importanti ed interessanti. Come si può notare in figura 2.30, l'andamento della temperatura in funzione del tempo è molto stabile, raggiungendo, ad ogni gradino, valori costanti nel tempo. Inoltre, i valori di temperatura raggiunti sono più elevati rispetto a quelli relativi al target attuale modificato, con un aumento di $170^{\circ}C$ a $1300A$, in entrambi i punti di misura e coincidono quasi perfettamente con quelli del modello FEM (vedi figura 2.33). Anche i valori della differenza di potenziale in figura 2.31 e 2.32 rispecchiano l'andamento osservato per le temperature nei confronti del target attuale modificato, cioè sono più elevati e perfettamente coincidenti con i valori del modello FEM.

È perciò possibile dedurre che l'idea di separare assialmente la scatola in grafite sia la strada giusta da seguire per eliminare il problema della formazione del circuito parallelo. Questo scoppia poiché separando la scatola e quindi

2. STUDIO, OTTIMIZZAZIONE E TEST DEL TARGET DI PRODUZIONE SPES

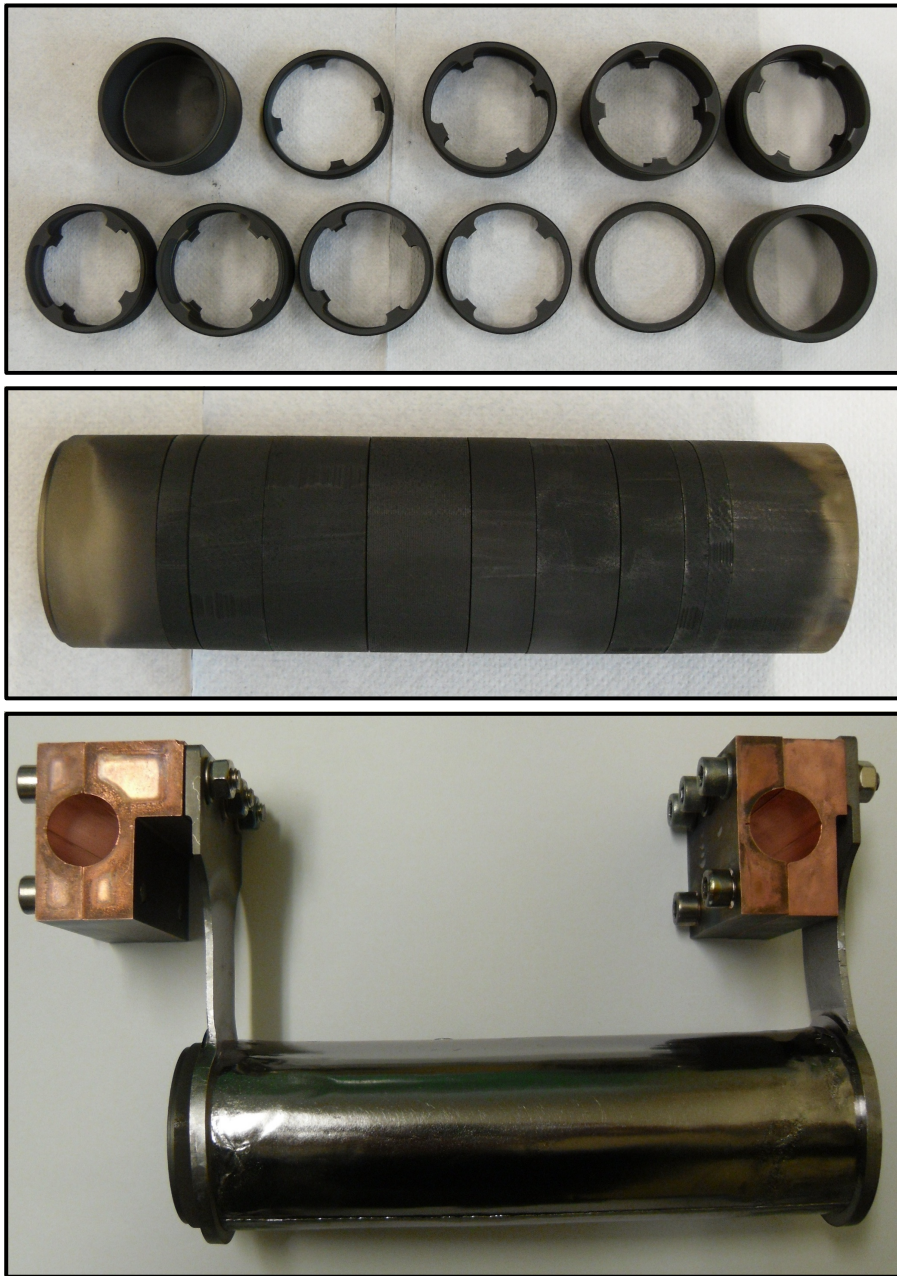
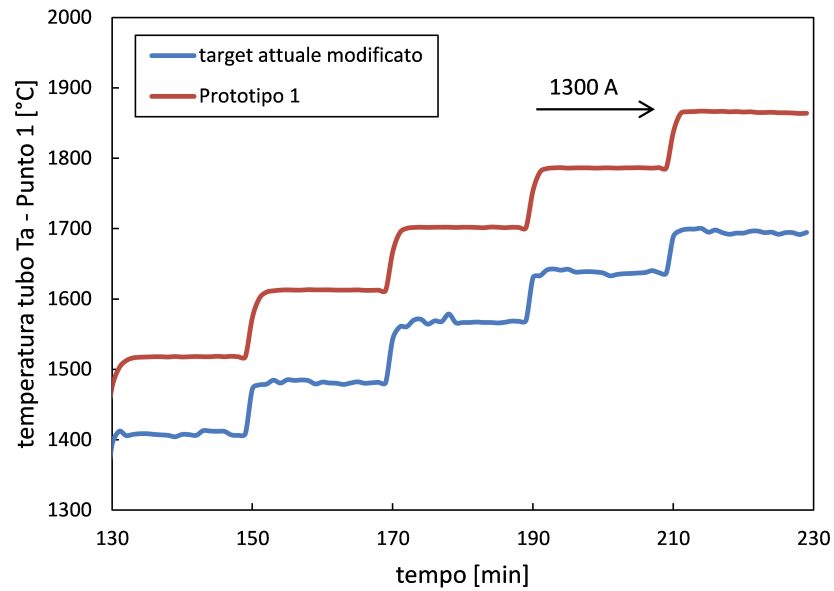
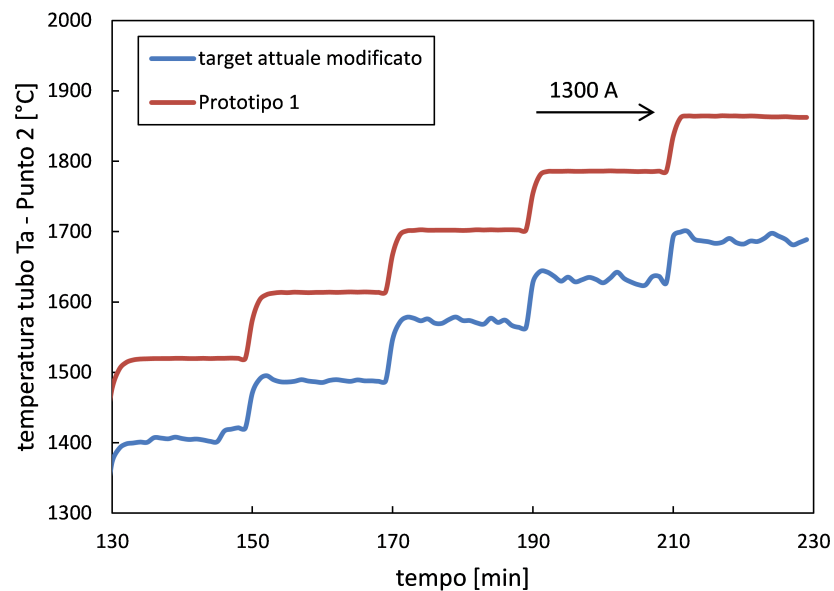


Figura 2.29: *Adattamento della scatola in grafite originale al riscaldatore attuale.*



(a) Temperature nel Punto 1



(b) Temperature nel Punto 2

Figura 2.30: Confronto tra le temperature sperimentali nel Punto 1 e nel Punto 2, del Prototipo 1 e del target attuale modificato, in funzione del tempo.

2. STUDIO, OTTIMIZZAZIONE E TEST DEL TARGET DI PRODUZIONE SPES

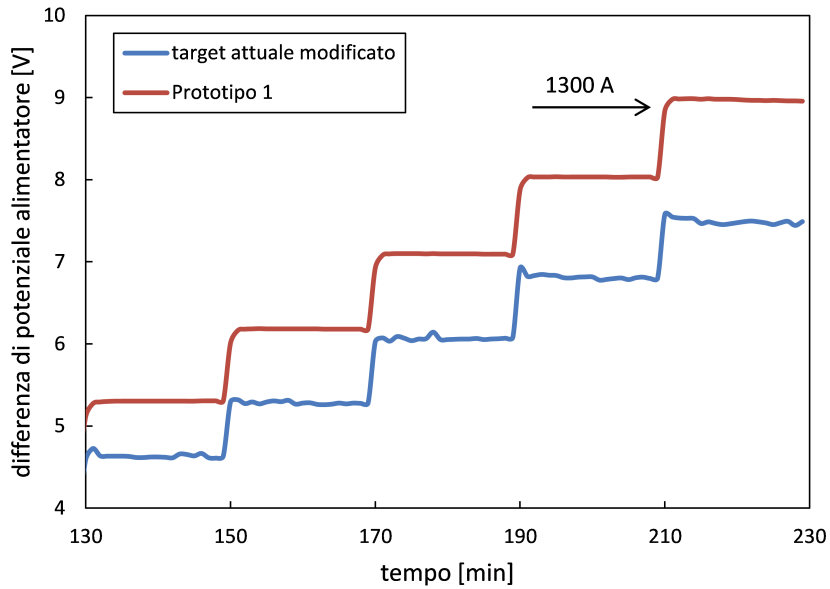


Figura 2.31: Confronto della differenza di potenziale del Prototipo 1 e del target attuale modificato, in funzione del tempo.

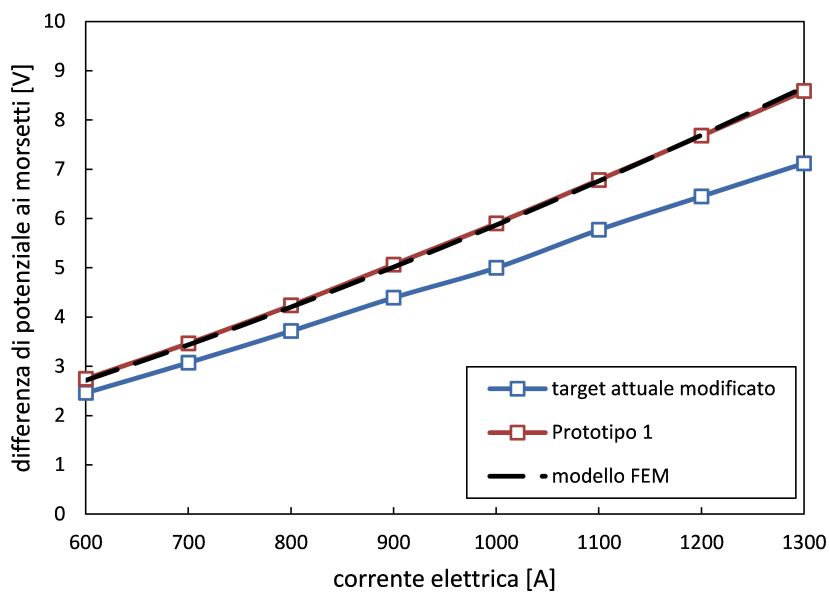
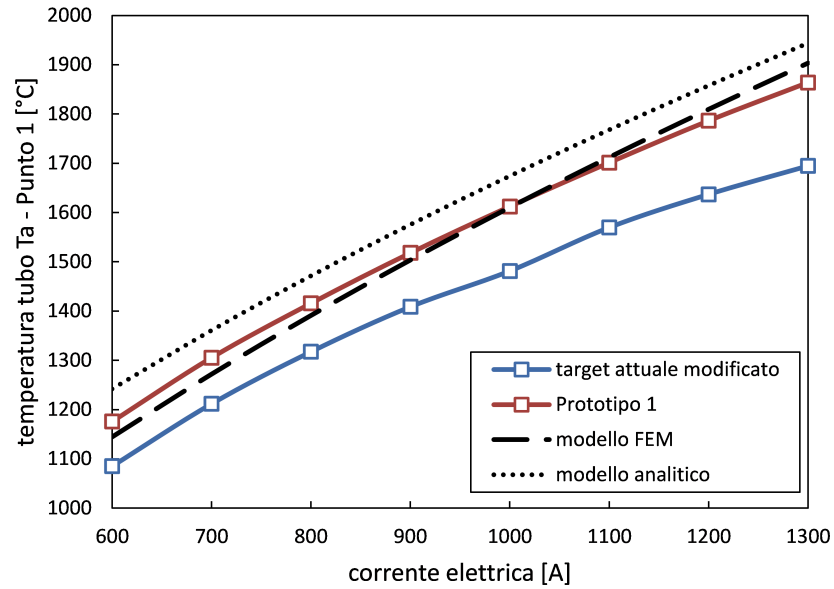
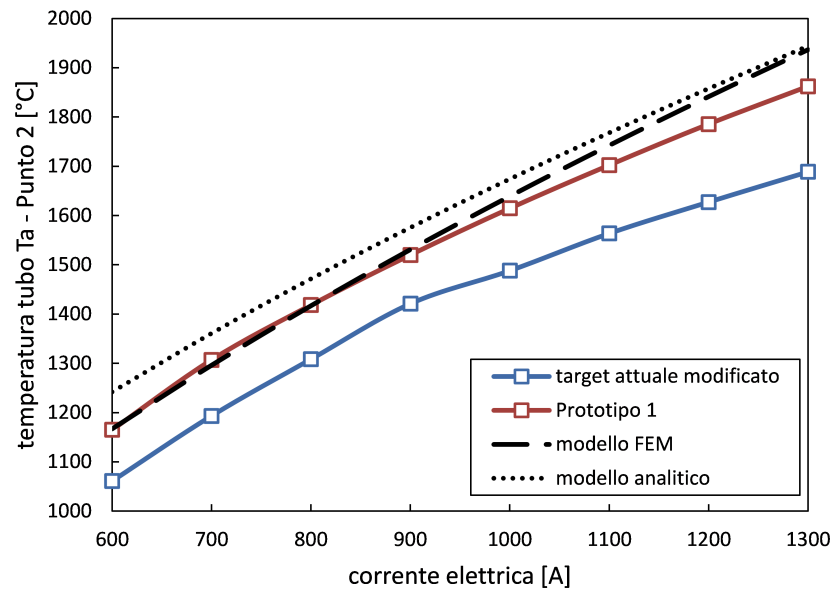


Figura 2.32: Valori della differenza di potenziale ai morsetti sia numerica che sperimentale, del Prototipo 1.



(a) Temperature nel Punto 1



(b) Temperature nel Punto 2

Figura 2.33: Temperature analitiche, numeriche e sperimentali, nel Punto 1 e nel Punto 2, del Prototipo 1.

inserendo delle discontinuità lungo il target, la sua resistenza aumenta perché all'interfaccia tra due anelli consecutivi essa è molto alta, quindi viene ostacolato il passaggio di corrente, la quale preferisce fluire attraverso il riscaldatore.

2.5.2 Definizione e test sperimentali del *Prototipo 2*

Assodato che la separazione in direzione assiale della scatola in grafite ha portato a dei miglioramenti in termini di innalzamento delle temperature e scomparsa delle instabilità, quindi alla risoluzione del problema del circuito parallelo, si è pensato di creare un secondo prototipo di target (*Prototipo 2*), che fosse completo anche degli ultimi tre dumpers.

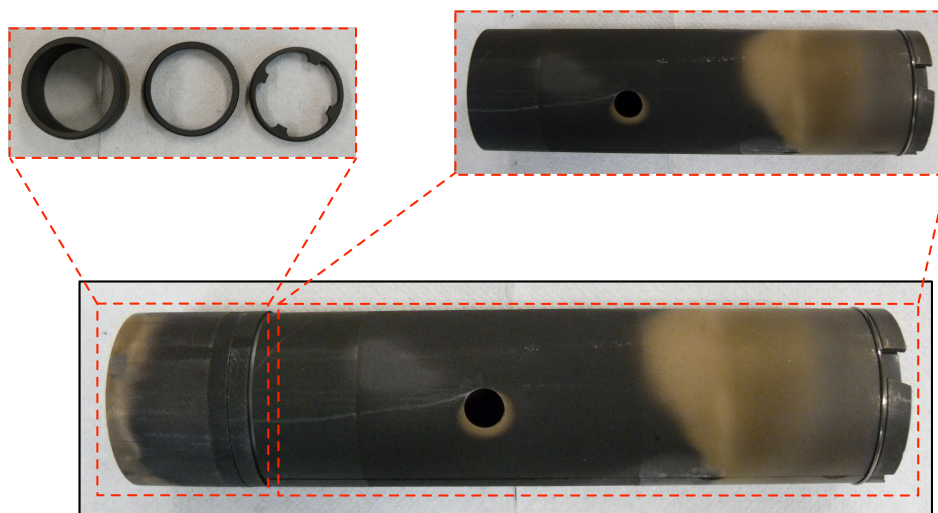
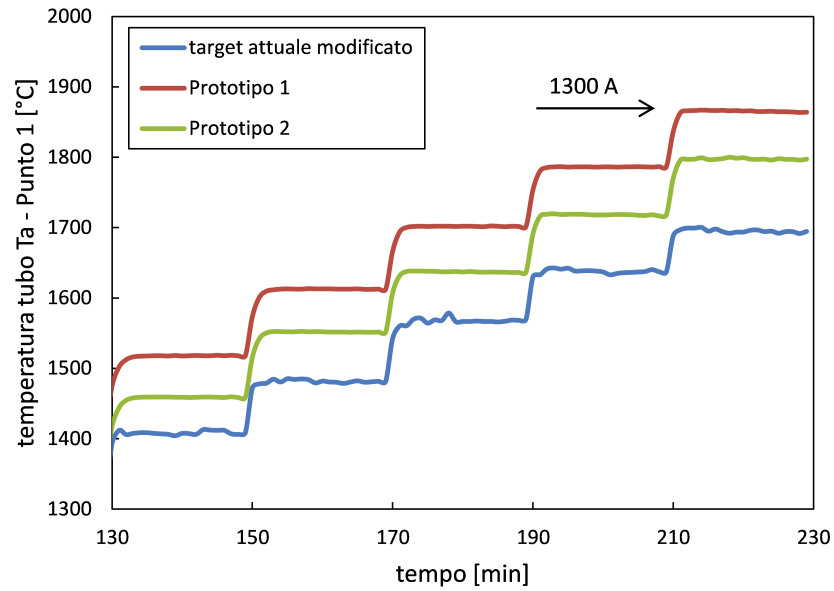


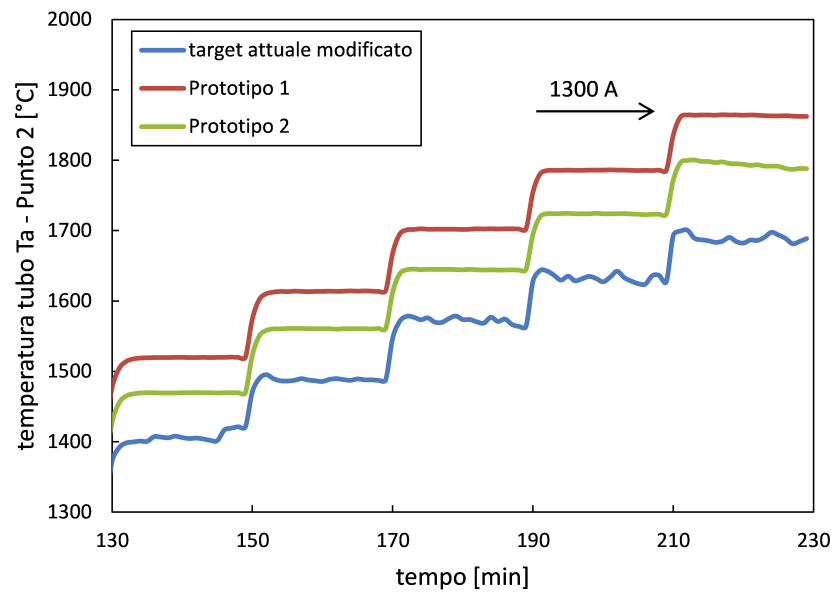
Figura 2.34: *Rappresentazione del Prototipo 2.*

Per poter garantire la continuità alla parte centrale del target (la più importante, dove sono contenuti i dischi di carburo di uranio e si producono i radioisotopi) ne è stata tagliata la parte iniziale comprendente le due windows e sostituita dai primi tre anelli distanziatori della scatola originale (vedi figura 2.34).

Come si può notare in figura 2.35, l'andamento della temperatura in funzione del tempo rimane stabile ad ogni gradino, ma i valori di temperatura raggiunti sono più bassi, anzi intermedi tra quelli del *Prototipo 1* e del target attuale modificato, in entrambi i punti di misura (vedi anche figura 2.38). Per quanto riguarda i valori della differenza di potenziale di figura 2.36 e 2.37 essi risultano leggermente inferiori rispetto a quelli del *Prototipo 1* e del target attuale modificato.



(a) Temperature nel Punto 1



(b) Temperature nel Punto 2

Figura 2.35: Confronto tra le temperature sperimentali nel Punto 1 e nel Punto 2, del Prototipo 2, Prototipo 1 e del target attuale modificato, in funzione del tempo.

2. STUDIO, OTTIMIZZAZIONE E TEST DEL TARGET DI PRODUZIONE SPES

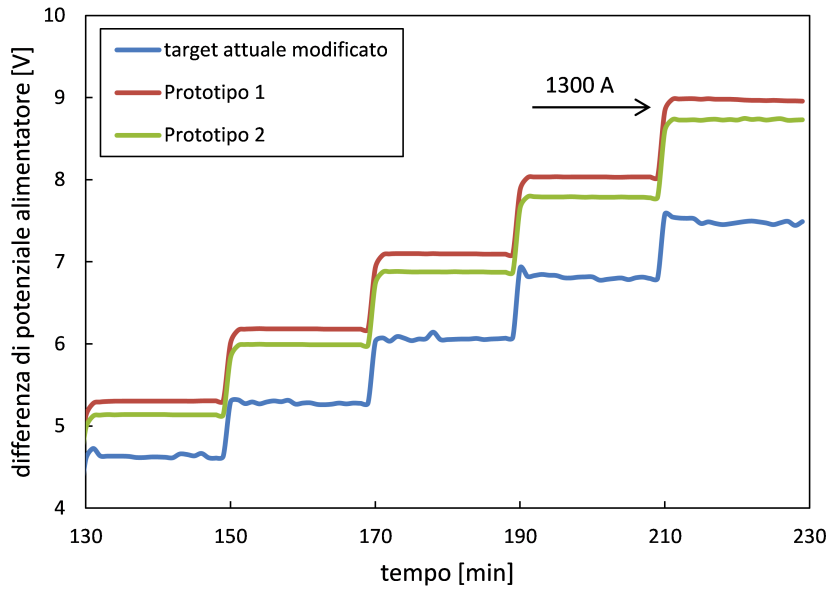


Figura 2.36: Confronto della differenza di potenziale del Prototipo 2, Prototipo 1 e del target attuale modificato, in funzione del tempo.

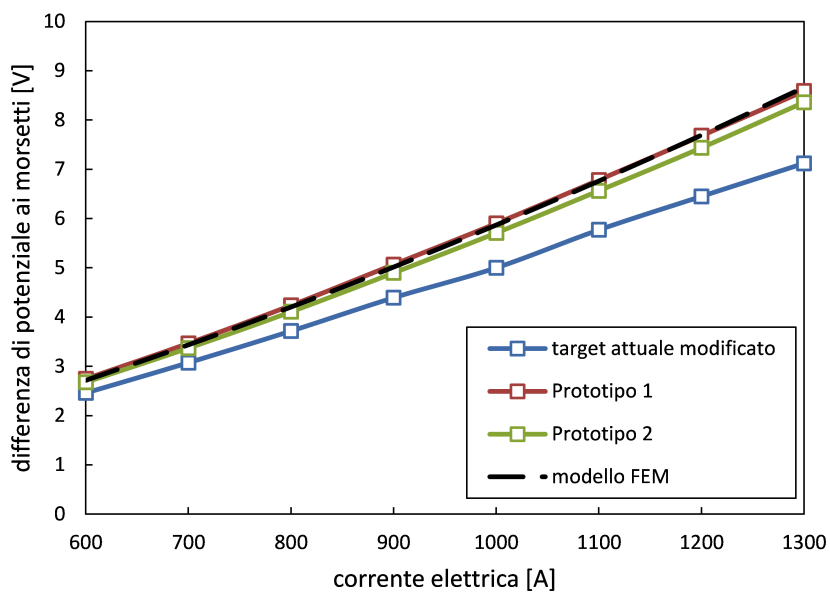
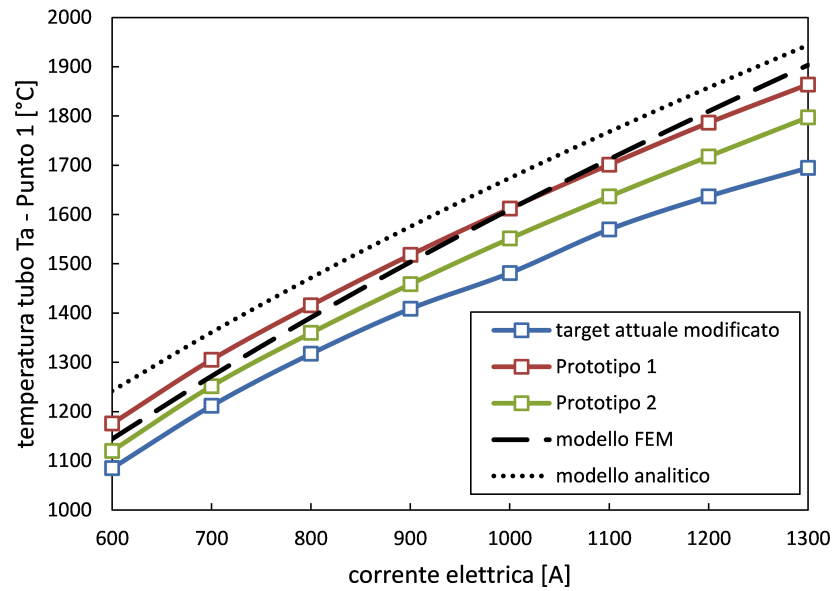
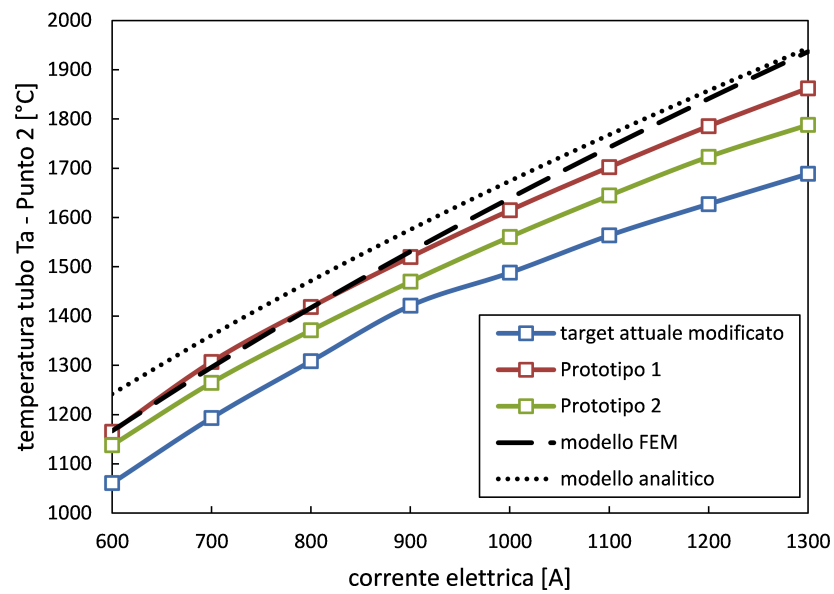


Figura 2.37: Valori della differenza di potenziale ai morsetti sia numerica che sperimentale, del Prototipo 2.



(a) Temperature nel Punto 1



(b) Temperature nel Punto 2

Figura 2.38: Temperature analitiche, numeriche e sperimentali, nel Punto 1 e nel Punto 2, del Prototipo 2.

2. STUDIO, OTTIMIZZAZIONE E TEST DEL TARGET DI PRODUZIONE SPES

Dai test sperimentali sul *Prototipo 2* è perciò emerso che separare solamente la prima parte del target non è sufficiente per eliminare totalmente il problema del circuito parallelo e raggiungere le temperature desiderate sul target.

2.5.3 Definizione e test sperimentali del *Prototipo 3*

Vista la non soddisfacente efficacia del *Prototipo 2* è stato pensato e fabbricato un terzo prototipo di target (*Prototipo 3*).

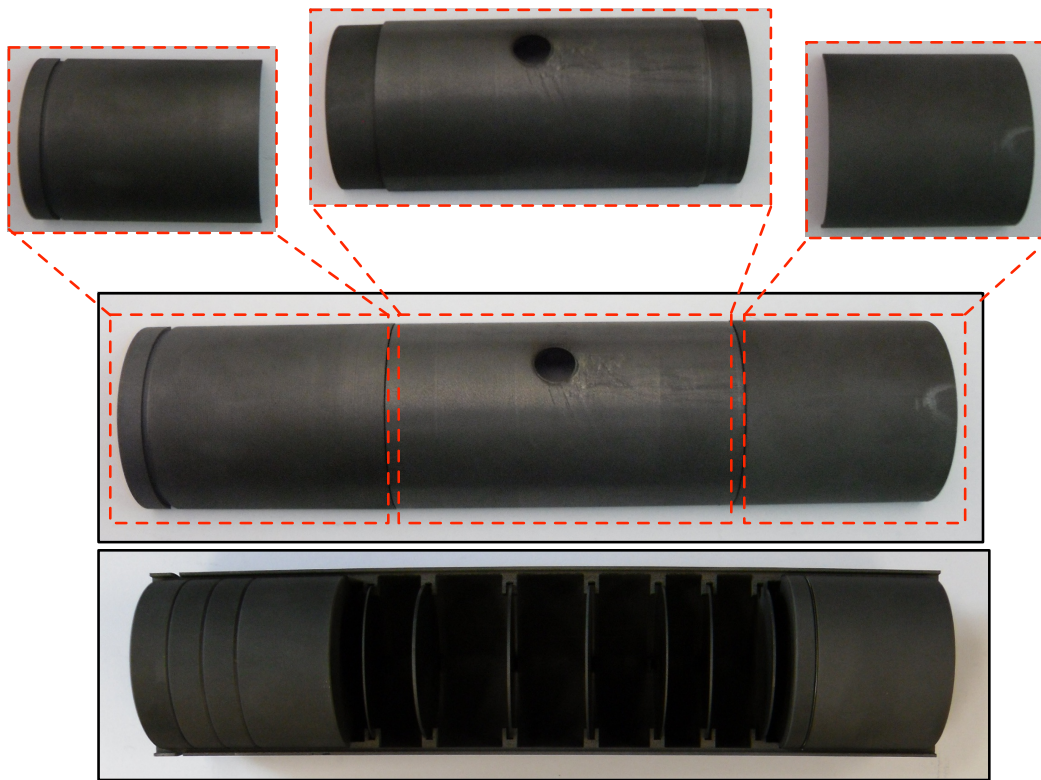


Figura 2.39: *Rappresentazione del Prototipo 3.*

Per non stravolgere il disegno del target attuale, solo il pezzo superiore della scatola è stato diviso in tre parti, mantenendo quello inferiore inalterato (vedi figura 2.39). Delle tre parti, quella centrale è stata ricavata semplicemente lavorando la parte superiore di un target attuale nuovo, mentre le due laterali sono state prodotte partendo da un blocco cilindrico di grafite.

L'idea di dividere la sola parte superiore nasceva dal fatto che da essa entrava ed usciva il flusso di corrente, come illustrato in figura 2.22. Questo perché il riscaldatore, a causa della dilatazione termica vincolata, tendeva ad incurvarsi

creando tra sé e la scatola dei punti di maggior pressione, quindi di miglior contatto e minor resistenza (in particolare due punti alle estremità della parte superiore e un punto centrale sulla parte inferiore) attraverso i quali, probabilmente, entrava ed usciva la corrente.

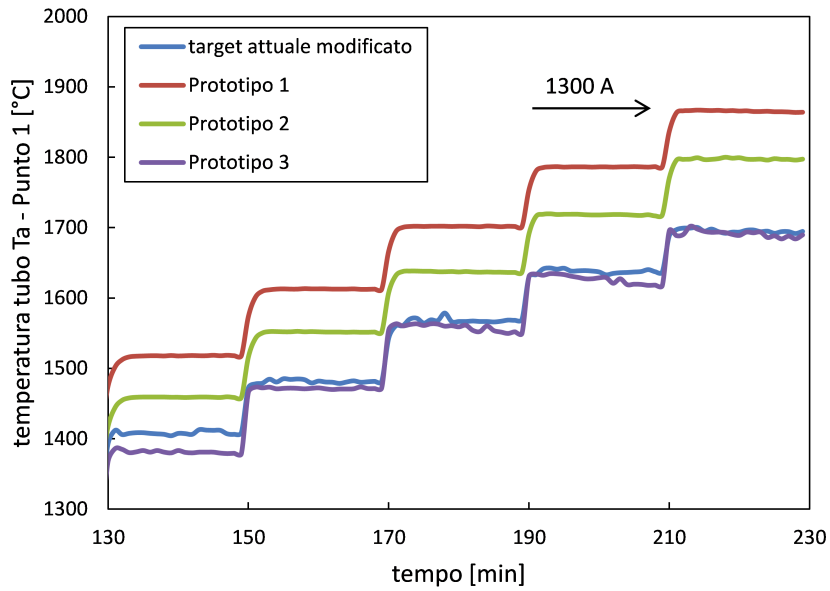
Osservando, in figura 2.40, l'andamento della temperatura in funzione del tempo si può notare come, utilizzando il *Prototipo 3*, il sistema di riscaldamento sia tornato ad essere instabile. L'instabilità della temperatura è fedelmente confermata dalla figura 2.41 che riporta i corrispondenti valori della differenza di potenziale.

Inoltre, le temperature raggiunte nel Punto 1 sono inferiori rispetto a quelle dei *Prototipi* precedenti, tornando ai valori del target attuale modificato (vedi figura 2.43a). Lo stesso succede anche per la tensione (vedi figura 2.42).

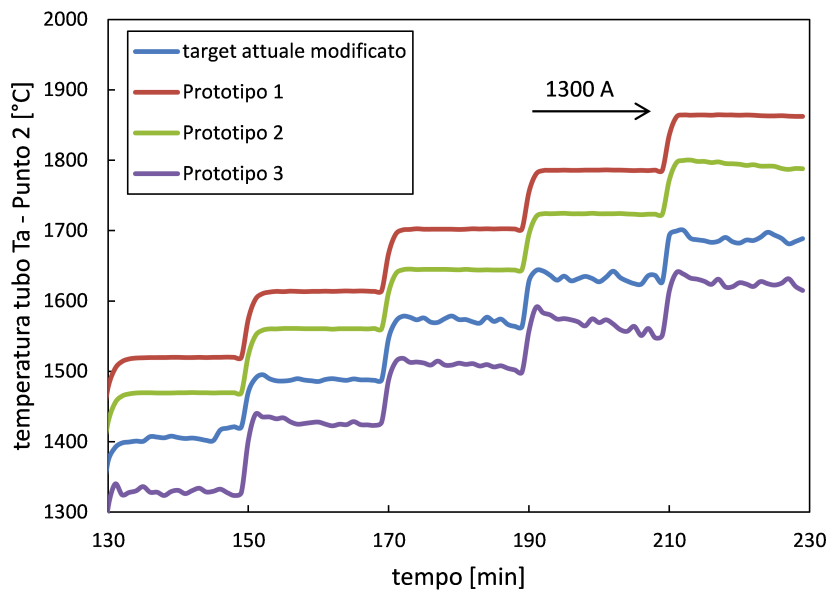
Invece le temperature raggiunte nel Punto 2 sono alquanto anomale perché addirittura inferiori a quelle del target attuale modificato (vedi figura 2.43b). Ciò è molto strano visto che le stesse anomalie non si riscontravano confrontando i valori della differenza di potenziale delle due serie di tre test eseguite per misurare la temperatura nei due punti; tali tensioni risultavano infatti coincidenti (vedi figura 2.42). Poi è stato scoperto che questa anomalia è dovuta al deposito di materiale sublimato all'interno della camera sulla superficie interna del vetro della finestra Kodial laterale (favorito anche dal raffreddamento di quest'ultima per mezzo di aria compressa), che alterava il valore di temperatura rilevato dal pirometro, come spiegato in dettaglio nell'appendice A. La conferma di questa alterazione nelle misure di temperatura con la finestra sporca è stata ottenuta dai risultati dei test sperimentali sul *Prototipo 4* presentati nel paragrafo successivo.

Dai test sul *Prototipo 3* è perciò emerso che separare solamente la parte superiore del target non elimina il problema del circuito parallelo, ma è necessario separare assialmente il target lungo tutta la sua circonferenza.

2. STUDIO, OTTIMIZZAZIONE E TEST DEL TARGET DI PRODUZIONE SPES



(a) Temperature nel Punto 1



(b) Temperature nel Punto 2

Figura 2.40: Confronto tra le temperature sperimentali nel Punto 1 e nel Punto 2, del Prototipo 3, Prototipo 2, Prototipo 1 e del target attuale modificato, in funzione del tempo.

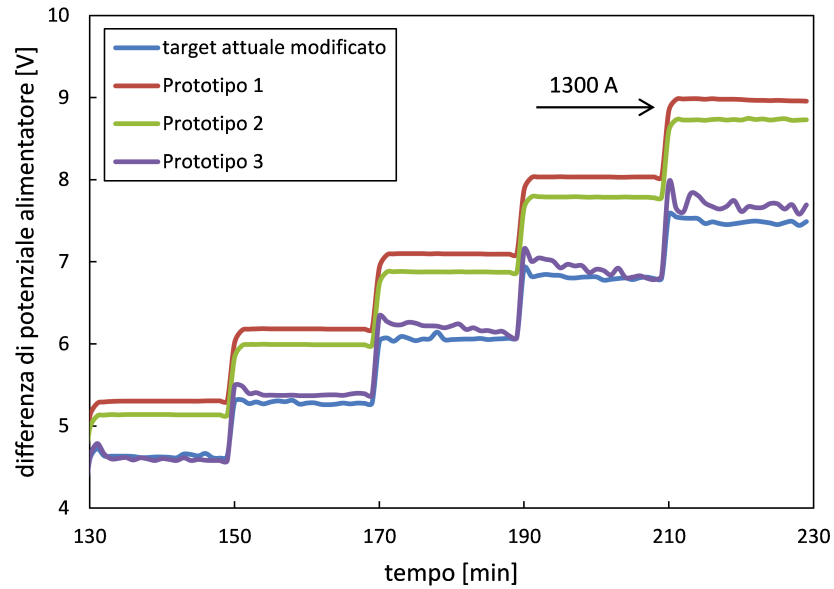


Figura 2.41: Confronto della differenza di potenziale del Prototipo 3, Prototipo 2, Prototipo 1 e del target attuale modificato, in funzione del tempo.

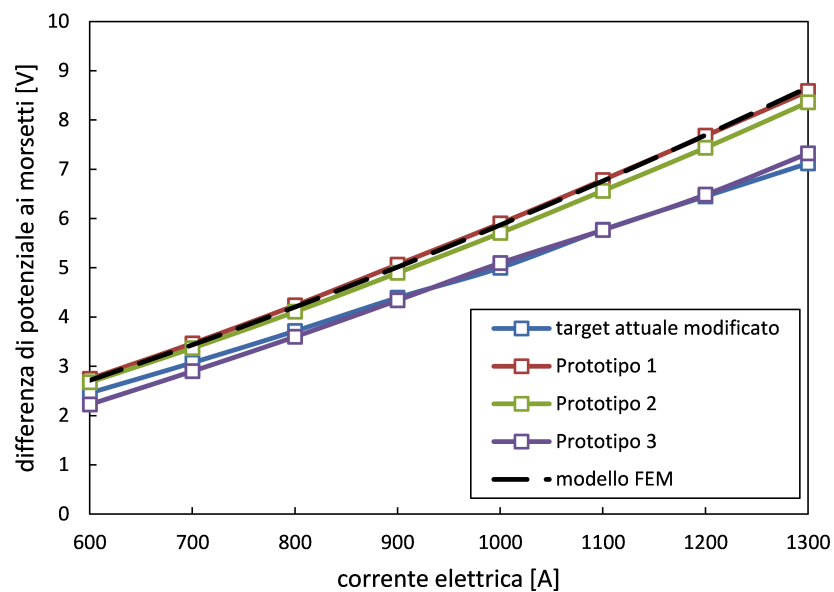
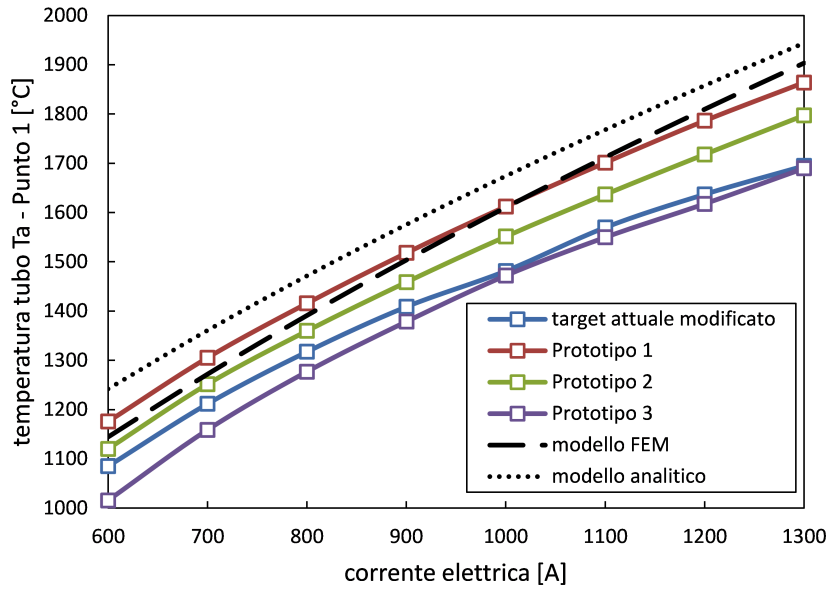
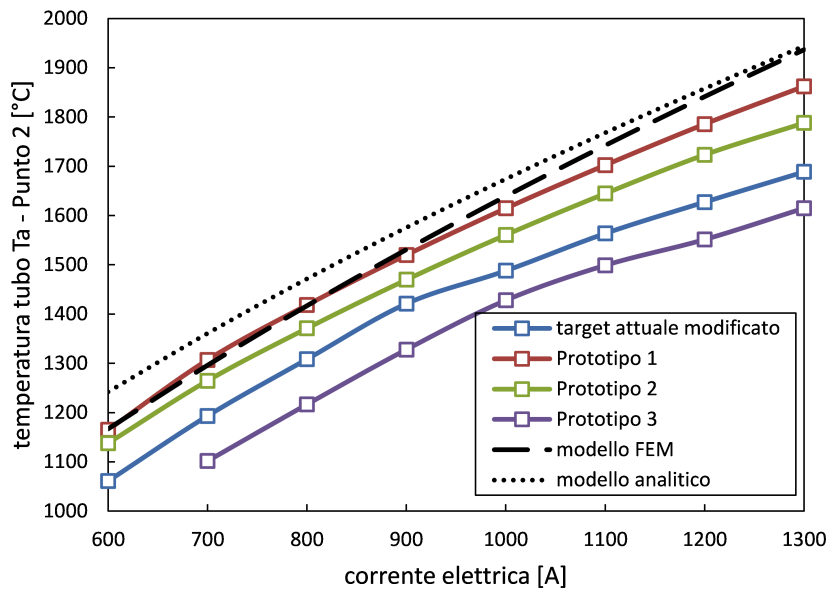


Figura 2.42: Valori della differenza di potenziale ai morsetti sia numerica che sperimentale, del Prototipo 3.

2. STUDIO, OTTIMIZZAZIONE E TEST DEL TARGET DI PRODUZIONE SPES



(a) Temperature nel Punto 1



(b) Temperature nel Punto 2

Figura 2.43: Temperature analitiche, numeriche e sperimentali, nel Punto 1 e nel Punto 2, del Prototipo 3.

2.5.4 Definizione e test sperimentali del *Prototipo 4*

Per risolvere definitivamente il problema della formazione del circuito parallelo, è stato necessario realizzare un quarto prototipo di target (*Prototipo 4*).

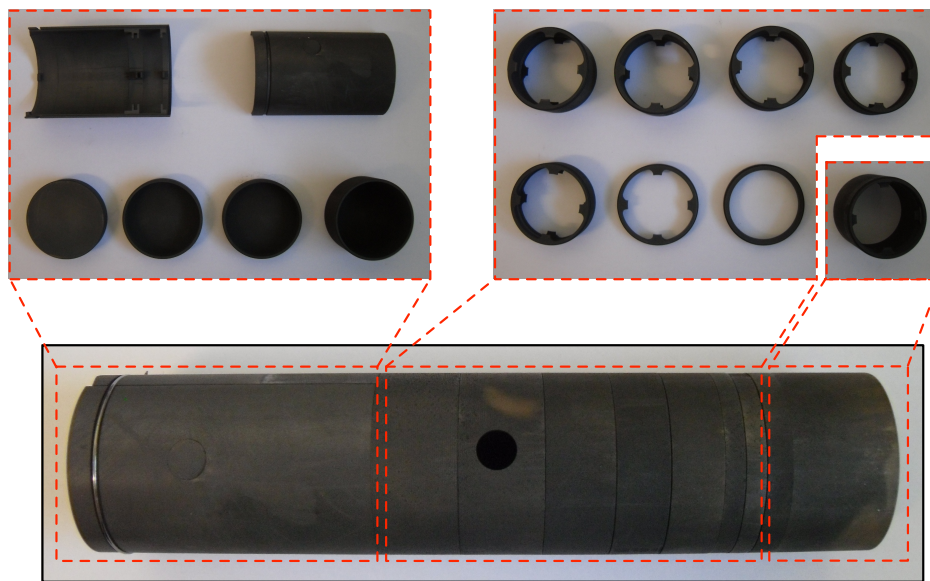


Figura 2.44: *Rappresentazione del Prototipo 4.*

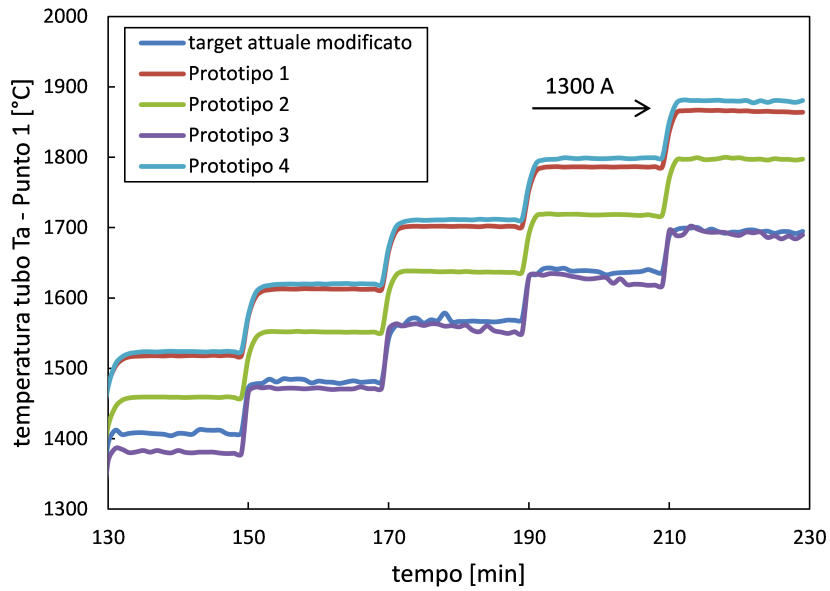
Per l'assemblaggio di questo quarto prototipo sono stati utilizzati i primi otto anelli separatori della scatola originale per contenere le due windows e i primi cinque dischi di carburo di uranio, mentre per gli ultimi due dischi e i dumpers è stata utilizzata la parte finale della scatola del target attuale, tagliandola a livello del penultimo disco (vedi figura 2.44). In questo modo si è riusciti ad ottenere la totale separazione assiale del target senza tralasciarne alcun componente, a differenza del *Prototipo 1* in cui erano stati esclusi gli ultimi tre dumper.

Osservando in figura 2.45 l'andamento della temperatura in funzione del tempo si può notare come il sistema di riscaldamento sia tornato ad essere stabile, stabilità confermata dalla figura 2.46 che riporta i corrispondenti valori della differenza di potenziale.

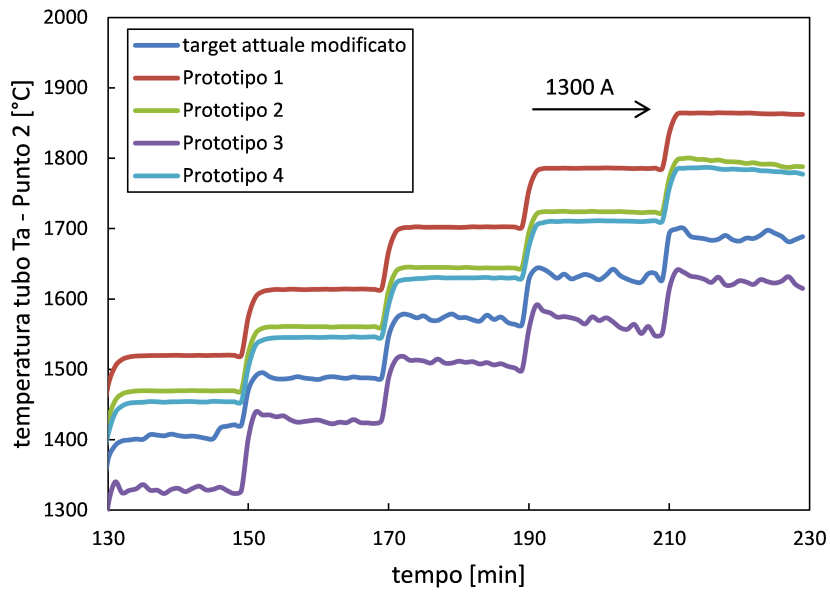
Inoltre, le temperature raggiunte nel Punto 1 sono decisamente aumentate, superando i valori del *Prototipo 1* (vedi figura 2.48a). Lo stesso succede anche per la tensione (vedi figura 2.47).

Per quanto riguarda le temperature raggiunte nel Punto 2, anche in questo caso esse sono alquanto anomale perché il loro andamento in funzione del tempo è

2. STUDIO, OTTIMIZZAZIONE E TEST DEL TARGET DI PRODUZIONE SPES



(a) Temperature nel Punto 1



(b) Temperature nel Punto 2

Figura 2.45: Confronto tra le temperature sperimentali nel Punto 1 e nel Punto 2, del Prototipo 4, Prototipo 3 Prototipo 2, Prototipo 1 e del target attuale modificato, in funzione del tempo.

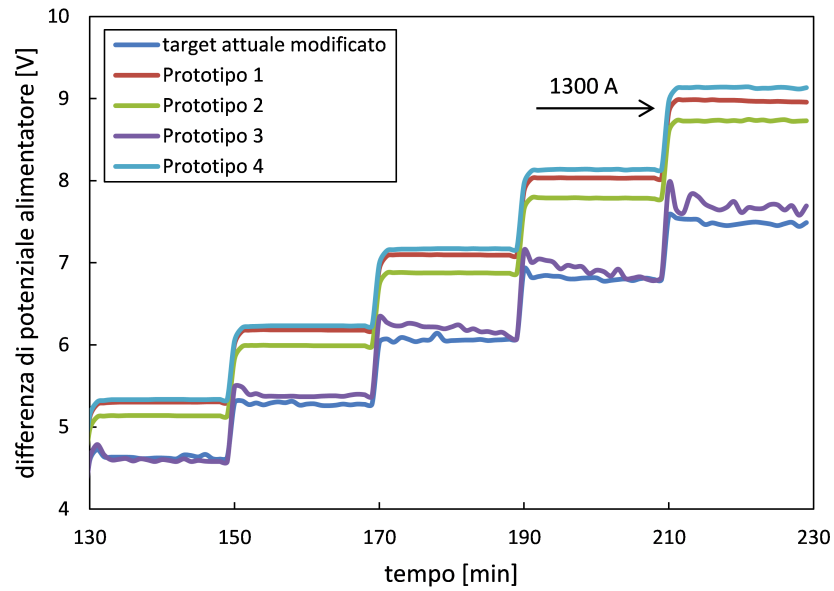


Figura 2.46: Confronto della differenza di potenziale del Prototipo 4, Prototipo 3 Prototipo 2, Prototipo 1 e del target attuale modificato, in funzione del tempo.

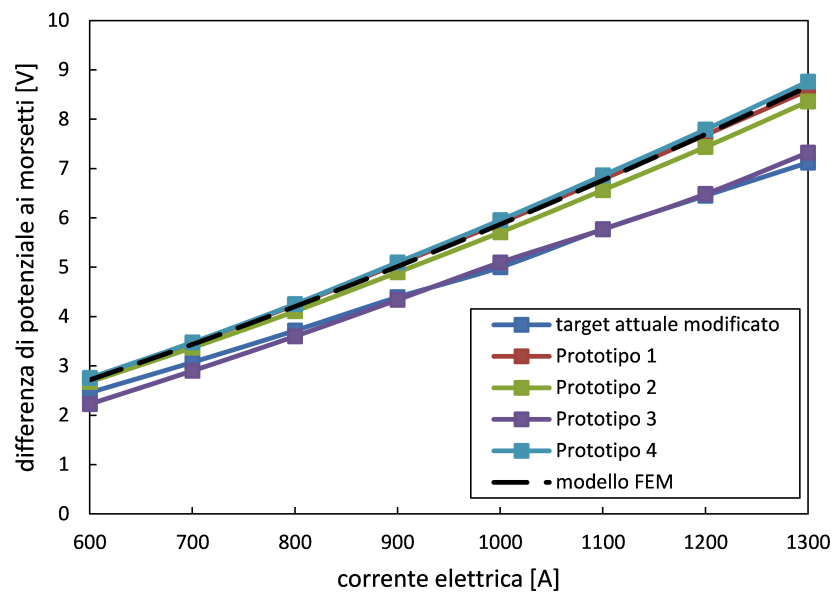
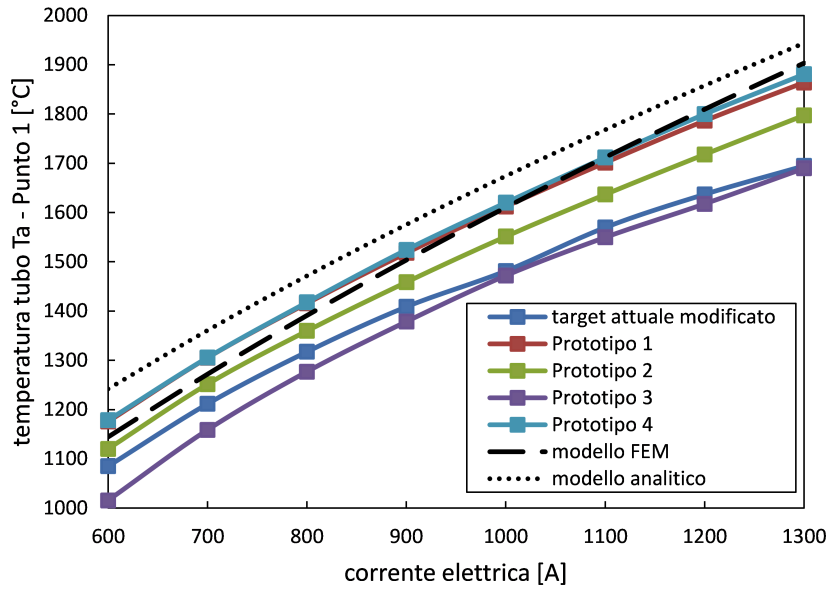
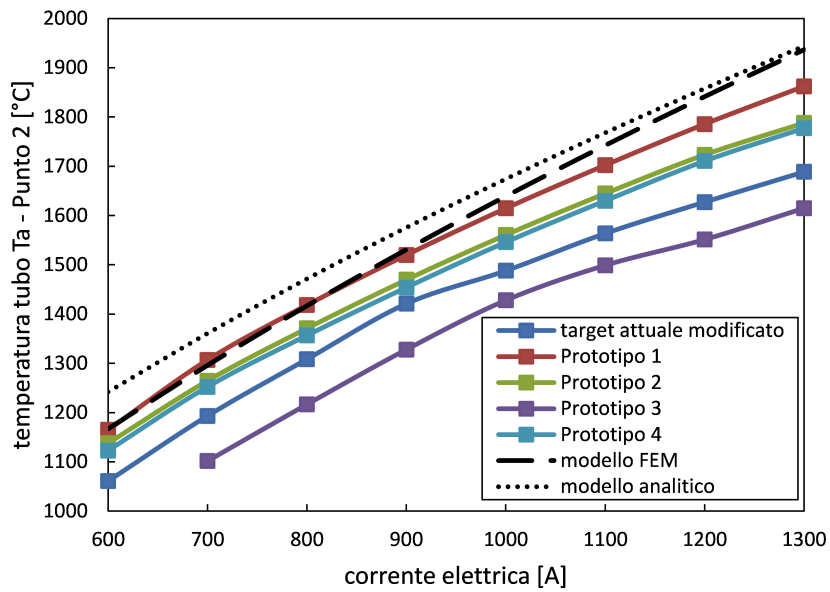


Figura 2.47: Valori della differenza di potenziale ai morsetti sia numerica che sperimentale, del Prototipo 4.

2. STUDIO, OTTIMIZZAZIONE E TEST DEL TARGET DI PRODUZIONE SPES



(a) Temperature nel Punto 1



(b) Temperature nel Punto 2

Figura 2.48: Temperature analitiche, numeriche e sperimentali, nel Punto 1 e nel Punto 2, del Prototipo 4.

molto stabile, (raggiungendo, ad ogni gradino, valori costanti nel tempo), ma i loro valori sono traslati verso il basso rispetto a quelli attesi (vedi figura 2.45b e 2.48b). Quindi si ha la conferma della scomparsa del circuito parallelo, ma allo stesso tempo, mentre le temperature nel Punto 1 superano quelle del *Prototipo 1*, nel Punto 2 sono inferiori a quelle del *Prototipo 2*. Questa discordanza tra i valori di temperatura misurata nei due punti ha dato la conferma che il materiale sublimato e depositato sulla superficie interna della finestra Kodial laterale alterava il valore di temperatura rilevato dal pirometro che risultava più basso rispetto a quello reale, come accennato nel paragrafo precedente e approfondito nell'appendice A.

Con questo prototipo si è dunque riusciti a risolvere definitivamente il problema della formazione del circuito parallelo.

2.6 Modello CAD di dettaglio del target definitivo

Una volta avuta la conferma dai test sperimentali, dell'efficacia del *Prototipo 4*, la sua geometria è stata accuratamente formalizzata in un modello CAD 3D (vedi figura 2.49); poi sono stati prodotti i disegni meccanici dettagliati dei vari componenti (vedi appendice E), successivamente inviati all'officina meccanica dell'INFN per la loro produzione.

Rispetto al *Prototipo 4*, assemblato utilizzando anelli già esistenti, per il target definitivo alcuni di essi sono stati ridefiniti.

Una modifica molto importante è stata quella di allungare il primo anello, e quindi con esso l'intero target, in modo da farne coincidere l'estremità con il bordo esterno del riscaldatore, come si può vedere in figura 2.50. Questa variazione è stata pensata, come spiegato in dettaglio nell'appendice D, dopo che, nel corso di successivi test, il riscaldatore si è tranciato proprio in corrispondenza della fine della target, che nel progetto iniziale era fissato a $7mm$ dal bordo del riscaldatore. Il secondo e terzo anello sono stati semplificati riguardo alla geometria, mentre i cinque successivi sono stati conservati pressoché uguali a quelli della scatola originale.

Infine, come per il *Prototipo 4*, per contenere gli ultimi due dischi e i dumpers è stata utilizzata la geometria della parte finale della scatola del target attuale, troncadola a livello del penultimo disco.

C'era però la necessità di impedire un eventuale spostamento del target sia di

2. STUDIO, OTTIMIZZAZIONE E TEST DEL TARGET DI PRODUZIONE SPES

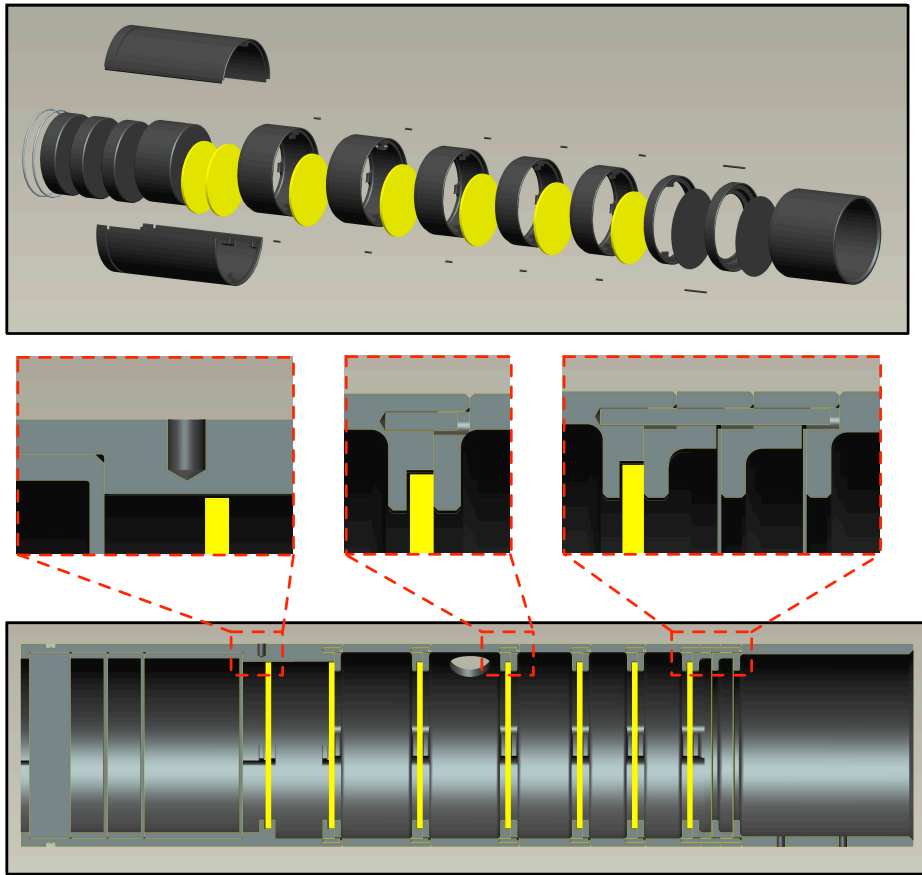


Figura 2.49: Modello CAD 3D del target definitivo.

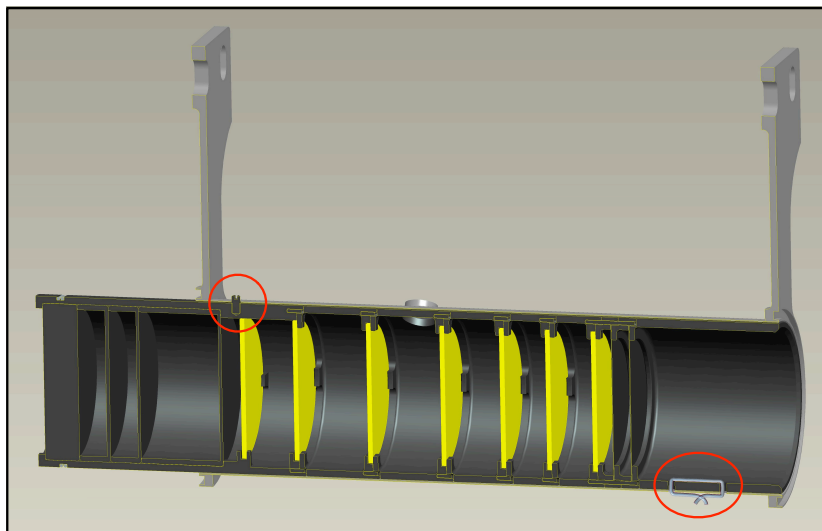


Figura 2.50: Sistema di fissaggio del target definitivo al riscaldatore in Ta.

tipo assiale, per evitare il distacco degli anelli e quindi l'inclinazione dei dischi di carburo di uranio, sia di tipo rotazionale, soprattutto dell'anello forato per vietare l'eventuale occlusione del foro che avrebbe bloccato la fuoriuscita dei radioisotopi.

Per vincolare il target in direzione assiale, il primo anello è stato fissato al riscaldatore per mezzo di un pezzo di filo in tantalio e il blocco finale attraverso un grano in tantalio $M2.5$; in questo modo si impediva anche lo spostamento rotazionale di questi due componenti (vedi figura 2.50).

A questo punto, non rimaneva che fissare tra loro gli anelli interni, per bloccarne un'eventuale rotazione. Per fare ciò sono stati utilizzati due tipi di perni in tungsteno ($\phi = 1mm$): uno più lungo ($14mm$) per fissare tra loro i primi quattro anelli e uno corto ($4mm$) per bloccare a due a due tutti gli altri. I perni sono stati inseriti sia nella parte superiore, sia nella parte inferiore del target, per un totale di due perni lunghi e dieci perni corti (vedi figura 2.49).

Definito dunque in modo dettagliato il target definitivo, non rimane che testarlo per verificare la sua semplicità d'assemblaggio, la sua efficacia nell'eliminare il circuito parallelo e quindi il raggiungimento delle temperature desiderate.

2.7 Conclusioni

In questo capitolo è stato presentato e discusso lo studio e i test sperimentali eseguiti per ottimizzare il target di produzione SPES.

In primo luogo è stato studiato il comportamento elettro-termico del target attuale sia con un modello analitico e un modello FEM, sia con test sperimentali.

In secondo luogo, dopo aver confermato le problematiche del target attuale, sono stati creati e testati quattro prototipi prima di riuscire ad ottenere una configurazione definitiva del target che risolvesse il problema della formazione del circuito parallelo attraverso la scatola.

Bibliografia

- [1] M. Manzolaro, *Study, design and test of the Target-Ion Source system for the INFN SPES facility*, Ph.D. Thesis, Università degli Studi di Padova.
- [2] Andrighetto A, Antonucci C M, Cevolani S, Petrovich C, Santana Leitner M. *Multifoil UCx target for the SPES project – An update*, Eur Phys J A 2006.
- [3] Kohl WH. *Handbook of materials and techniques for vacuum devices*, Woodbury, NY: American Institute of Physics, 1995.
- [4] Touloukian YS, DeWitt DP. *Thermophysical Properties of Matter vol 7*, NY, NY: IFI/Plenum, 1970.
- [5] Desai PD, Chu TK, James HM, Ho CY. *Electrical Resistivity of Selected Elements*, J Phys Ref Data 1984.
- [6] Chapman AJ. *Heat transfer*, New York, NY: Macmillan, 1984.
- [7] Moliton A. *Basic Electromagnetism and Materials*, New York, NY: Springer, 2007.
- [8] M. Rossignoli, *Studio, progettazione e test della sorgente di ionizzazione superficiale per il progetto SPES*, Tesi di laurea magistrale, Università degli Studi di Padova.

Capitolo 3

Studio, ottimizzazione e test del “sistema target - sorgente di ionizzazione”

3.1 Introduzione

In questo capitolo, a differenza del precedente in cui è stato studiato separatamente solo il blocco target SPES, si prende in considerazione l'insieme costituito dal blocco target SPES e dalla sorgente di ionizzazione superficiale SPES (SIS), rappresentato in figura 3.1.

Come per il target di produzione, anche la sorgente di ionizzazione e la linea di trasferimento devono essere mantenute ad una temperatura media di $2000^{\circ}C$ per migliorare la mobilità, l'estrazione e la ionizzazione dei radioisotopi. Questo è possibile grazie ad un circuito elettrico indipendente connesso ad un alimentatore di $10 kW$ in grado di fornire una corrente elettrica massima e una differenza di potenziale pari a $1000 A$ e $10 V$, rispettivamente. La corrente passa prima attraverso la linea di trasferimento in Ta e poi attraverso la sorgente di ionizzazione, dissipando, per effetto Joule, la potenza che consente al sistema di raggiungere il livello di temperatura desiderato. I due circuiti elettrici indipendenti, atti a riscaldare per effetto Joule il target di produzione e la sorgente di ionizzazione, sono rappresentati in figura 3.2, dove è anche possibile apprezzare una loro semplice e chiara schematizzazione: essi sono indipendenti ed ognuno è collegato ad un alimentatore dedicato.

3. STUDIO, OTTIMIZZAZIONE E TEST DEL “SISTEMA TARGET - SORGENTE DI IONIZZAZIONE”

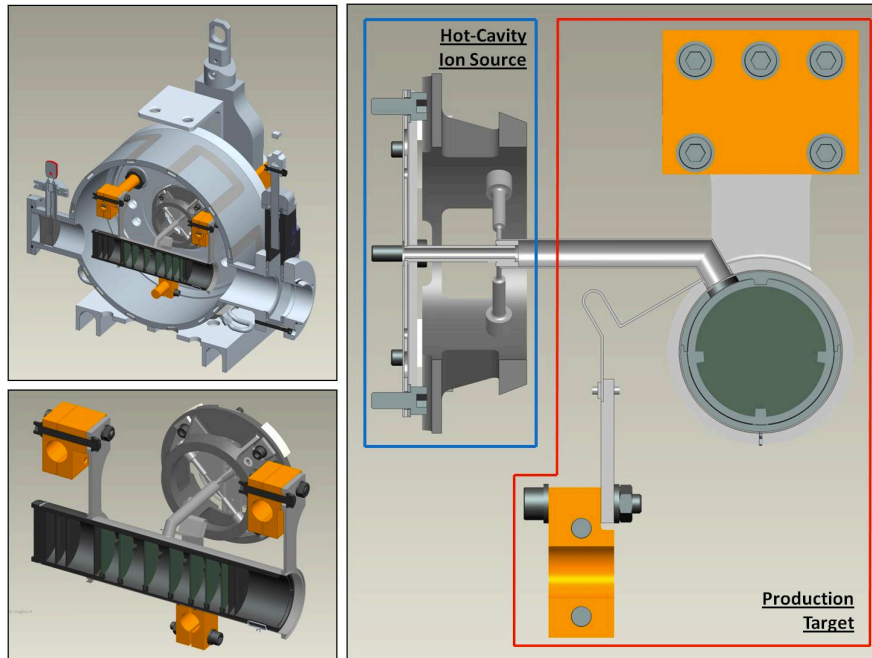


Figura 3.1: Rappresentazione CAD dell'assieme “blocco target - sorgente di ionizzazione superficiale (SIS)” [1].

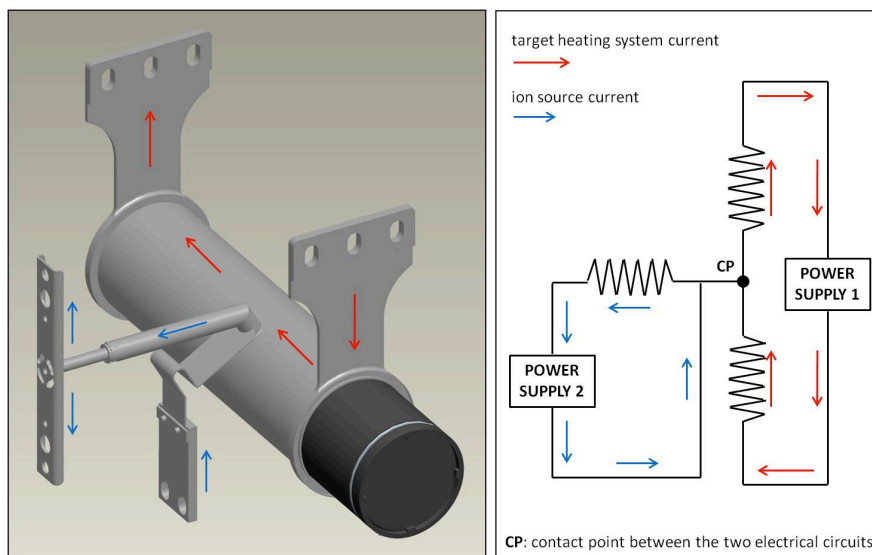


Figura 3.2: Circuiti elettrici utilizzati per riscaldare per effetto Joule sia il target di produzione che la sorgente di ionizzazione [1].

La sorgente di ionizzazione viene riscaldata per prima, attivando il circuito elettrico corrispondente fino a raggiungere il valore massimo di corrente di 400 A ; poi anche il target di produzione viene gradualmente riscaldato per effetto Joule attraverso il suo circuito elettrico aumentando la corrente fino a 1300 A . Una volta stabilizzato il campo di temperatura, il fascio di protoni di 40 MeV inizia a colpire il target SPES per produrre le reazioni nucleari di interesse, aumentando gradualmente la sua intensità fino a $200\text{ }\mu\text{A}$. Quando la sua potenza non è più trascurabile rispetto alla potenza dissipata per effetto Joule, la corrente del target viene gradualmente ridotta a zero al fine di mantenere il campo di temperatura sotto controllo ed evitare dannosi hot spots. Così, durante le ideali condizioni di lavoro, la corrente della sorgente è fissa a 400 A , la corrente del target è uguale a zero e l'intensità del fascio di protoni è mantenuta a $200\text{ }\mu\text{A}$.

In questo capitolo, per lo studio termico del sistema target-sorgente si considerano i carichi termici per effetto Joule dovuti al solo circuito elettrico della sorgente. Entrambi i circuiti elettrici saranno considerati nel capitolo 4.

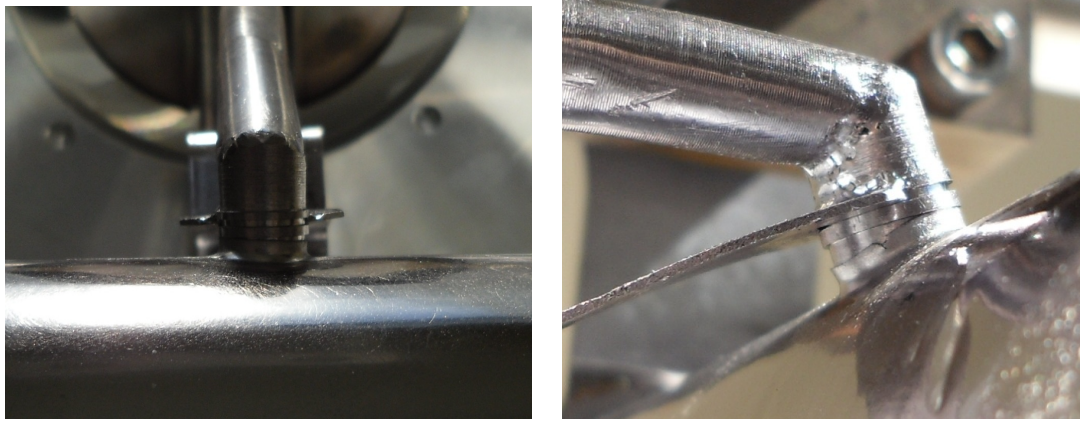
3.2 Descrizione del collegamento tra la linea di trasferimento ed il riscaldatore del sistema target

3.2.1 Disaccoppiamento tra la linea di trasferimento ed il riscaldatore e soluzione al problema

Il processo di estrazione dei radioisotopi avviene mediante la linea di trasferimento (*transfer line*), attraverso la quale essi sono trasportati per effusione, dal foro di uscita del target alla sorgente di ionizzazione dove vengono ionizzati. Nella configurazione attuale la linea di trasferimento, costituita da due tubi in Ta saldati di diametro esterno 8.8 mm ed interno 8 mm , è connessa sia alla hot cavity sia al foro del tubo in Ta per interferenza meccanica che, rispetto ad una saldatura, non permette di creare una perfetta continuità di materiale (vedi figura 3.3a). Inoltre, potrebbe capitare di non riuscire ad ottenere un accoppiamento ottimale a causa di eventuali deformazioni che si potrebbero avere durante riscaldamenti precedenti

3. STUDIO, OTTIMIZZAZIONE E TEST DEL “SISTEMA TARGET - SORGENTE DI IONIZZAZIONE”

o di difetti dei componenti, come mostrato in figura 3.3b, dove il foro e la linea di trasferimento sono disassati.



(a) Collegamento attuale

(b) Disassamento

Figura 3.3: Rappresentazione del collegamento attuale tra linea di trasferimento e tubo in Ta e una problematica riscontrata.

Questo tipo di collegamento per interferenza, oltre a creare una discontinuità termica ed elettrica tra la linea di trasferimento e il tubo in Ta, potrebbe addirittura rompersi, compromettendo l'esito dell'eventuale test in corso. Infatti, la linea di trasferimento e il tubo in Ta, a causa delle varie deformazioni subite durante il riscaldamento, potrebbero disaccoppiarsi completamente, come successo durante i test di potenza riportati in [2]. Si crea così una fessura (leak) attraverso la quale escono i radioisotopi con conseguente perdita in termini di efficienza di ionizzazione (vedi figura 3.4).

Confrontando l'area interna della hot cavity pari a:

$$A_{hot\ cavity} = \frac{\pi \cdot \phi_{hc}^2}{4} \approx 8\ mm^2 \quad (3.1)$$

dove $\phi_{hc} = 3.1\ mm$ è il suo diametro interno, con l'area della fessura creatasi dal distacco pari a

$$\begin{aligned} A_{leak} &= \iint_{A_{leak}} dx\ dy = \\ &= \int_{-\arccos \frac{d}{\phi_{tl}}}^{\arccos \frac{d}{\phi_{tl}}} \left(\int_{\frac{\phi}{2}}^{d \cos \theta + \sqrt{d^2 \cos^2 \theta - d^2 + \frac{\phi_{tl}^2}{4}}} \rho\ d\rho \right) d\theta \approx 9\ mm^2 \end{aligned} \quad (3.2)$$

dove $\phi_{tl} = 8\ mm$ è il diametro interno della linea di trasferimento e $d = 1.1\ mm$ è l'altezza massima della fessura, si può notare come esse siano dello stesso ordine

3.2 DESCRIZIONE DEL COLLEGAMENTO TRA LA LINEA DI TRASFERIMENTO ED IL RISCALDATORE DEL SISTEMA TARGET

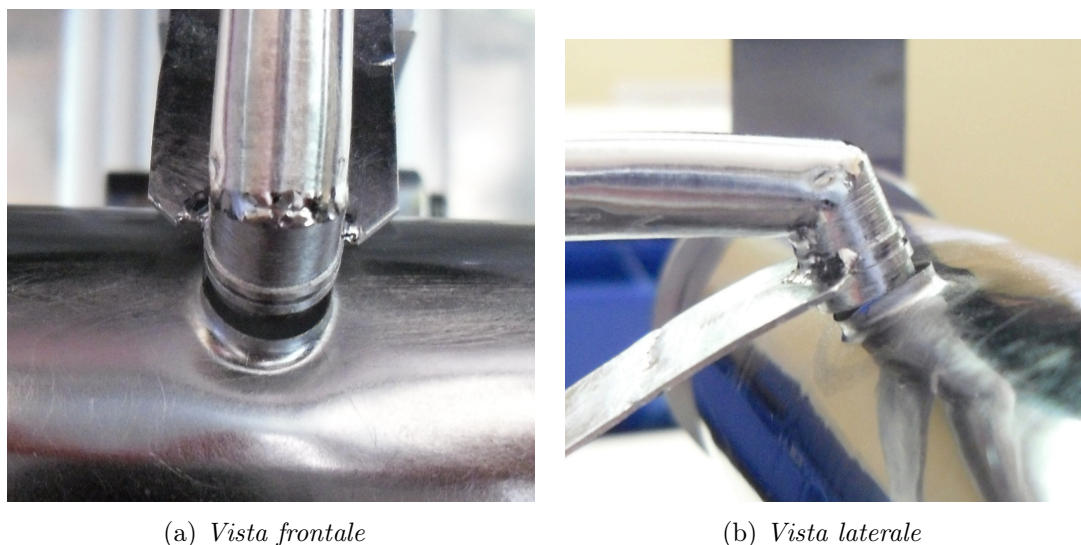


Figura 3.4: *Distacco tra la linea di trasferimento e il tubo in Ta avvenuto durante i test di potenza riportati in [2].*

di grandezza, perciò si avrà una fuoriuscita totale di radioisotopi prodotti, i quali anziché raggiungere la hot cavity, usciranno attraverso la fessura.

Per ovviare a questo tipo di problema anziché utilizzare solo un accoppiamento per interferenza tra i due componenti, il collegamento è stato migliorato saldando la linea di trasferimento al tubo in Ta, così da creare un blocco unico costituito da riscaldatore, transfer line e connessione elettrica (vedi figura 3.5).

Per poter saldare la transfer line al riscaldatore si è dovuto, però, accettare una saldatura parziale (non completa) tra la linea di trasferimento e la connessione elettrica. In altre parole, nel caso di accoppiamento per interferenza il cordone di saldatura atto ad unire la linea di trasferimento alla connessione elettrica si estendeva lungo tutto l'arco di contatto tra le due superfici (saldatura completa), mentre nel caso di unione saldata tra transfer line e riscaldatore, la saldatura completa tra linea e connessione elettrica non è possibile. Questa impossibilità è dovuta alla procedura di costruzione ed all'ingombro fisico della torcia TIG. Infatti nel primo caso, dopo aver saldato tra loro i tubi che costituiscono la transfer line, nell'eseguire la saldatura tra la linea e la connessione elettrica si ha pieno accesso ambo i lati e tutt'attorno la connessione che porta la corrente al tubo (vedi figura 3.6a). Nel secondo caso, invece, si saldano prima di tutto i due tubi della linea di trasferimento (già saldati tra loro) al foro del riscaldatore, in questo modo c'è lo spazio necessario per eseguire tutta la saldatura circonferenziale (e garantire

3. STUDIO, OTTIMIZZAZIONE E TEST DEL “SISTEMA TARGET - SORGENTE DI IONIZZAZIONE”

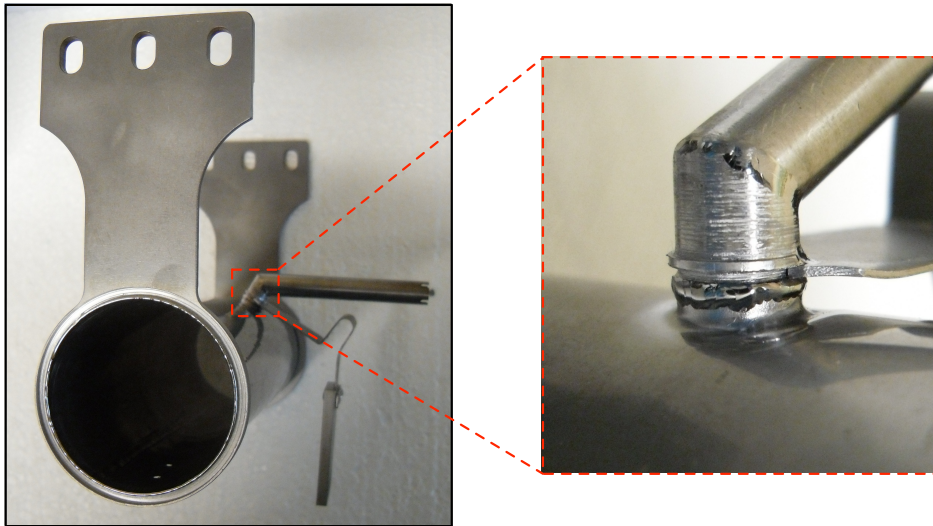
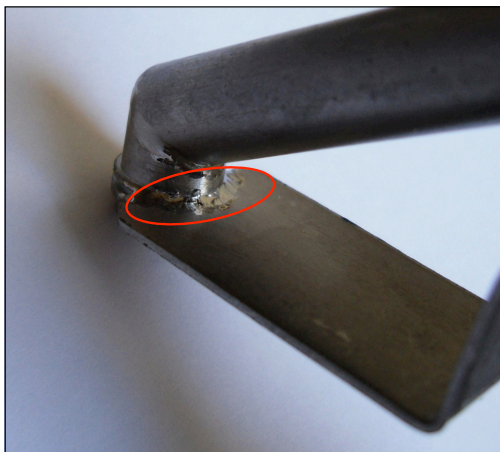
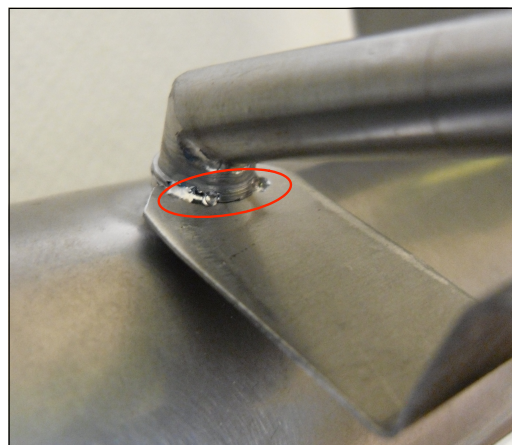


Figura 3.5: Nuovo riscaldatore con linea di trasferimento saldata.



(a) Saldatura completa



(b) Saldatura non completa

Figura 3.6: Confronto tra la precedente ed attuale saldatura della connessione elettrica alla linea di trasferimento.

la tenuta della linea), poi viene saldata la connessione elettrica e così lo spazio per eseguire la saldatura è molto limitato. Vista la geometria del riscaldatore, è difficile riuscire ad eseguire una saldatura più lunga di quella in figura 3.6b, anche operando in camera inerte dove è possibile allungare l'elettrodo in tungsteno anche di $7 - 8\text{ cm}$. Lo spazio di saldatura potrebbe sembrare lo stesso, ma con il corpo del riscaldatore già saldato alla linea, l'operatore non riesce ad infilare l'elettrodo come nel caso della sola linea di trasferimento perché il riscaldatore limita la possibilità di manovrare la torcia TIG.

Per studiare l'influenza della saldatura non completa sulla distribuzione della temperatura è stato utilizzato un modello FEM locale in cui si è concentrata l'attenzione sul cordone di saldatura e nelle sue vicinanze.

3.2.2 Studio sulla saldatura tra la linea di trasferimento e la connessione elettrica

Per capire se la saldatura parziale tra linea di trasferimento e connessione elettrica potesse dare origine ad hot spots, influenzare la distribuzione della temperatura o, a causa di un suo aumento locale, portare al distacco dei due componenti, sono stati definiti due modelli FEM locali, supportati poi anche da test sperimentali. Un modello per simulare la saldatura completa tra linea e connessione e uno per simulare la saldatura parziale, la quale è stata ottenuta semplicemente creando nel modello geometrico di figura 3.7 una fessura centrale di larghezza 3 mm , che si estende per metà del cordone (vedi figura 3.8b). Questa larghezza non è molto realistica in quanto nella realtà è molto inferiore, ma è in favore di sicurezza, quindi accettabile.

Trattandosi di analisi elettro termiche accoppiate è stato usato l'elemento accoppiato SOLID226, mentre per quanto riguarda i materiali dei componenti sono il tantalio ed il rame.

Visto l'interesse per le temperature lungo e in prossimità del cordone di saldatura la mesh è stata infittita maggiormente in questa zona.

Un unico enclosure aperto è stato definito per calcolare il trasferimento di calore per irraggiamento tra le superfici dei componenti e tra esse e l'ambiente esterno circostante, la cui temperatura viene fissata a $25\text{ }^\circ\text{C}$. Inoltre, tale temperatura è stata imposta costante sia all'interno del puntale, dove un sistema di canalizzazioni

3. STUDIO, OTTIMIZZAZIONE E TEST DEL “SISTEMA TARGET - SORGENTE DI IONIZZAZIONE”

interne permette il passaggio di acqua per il raffreddamento, sia sulle superfici della griglia a contatto con la flangia, anch'essa raffreddata.

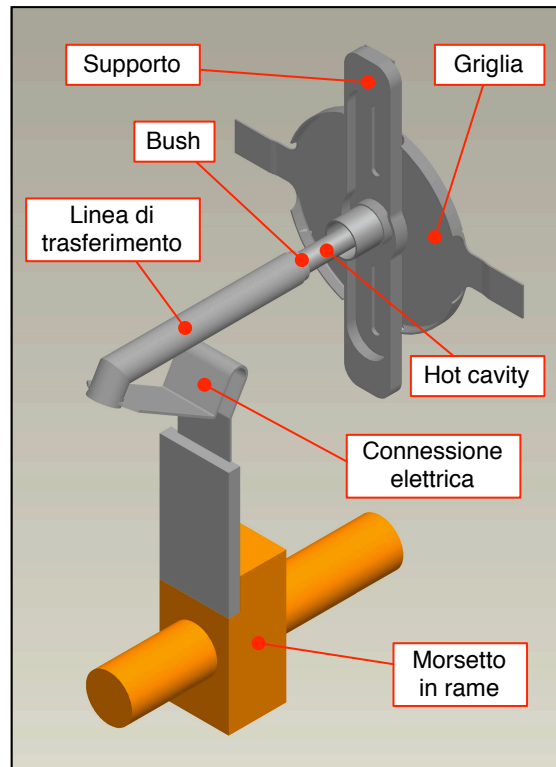
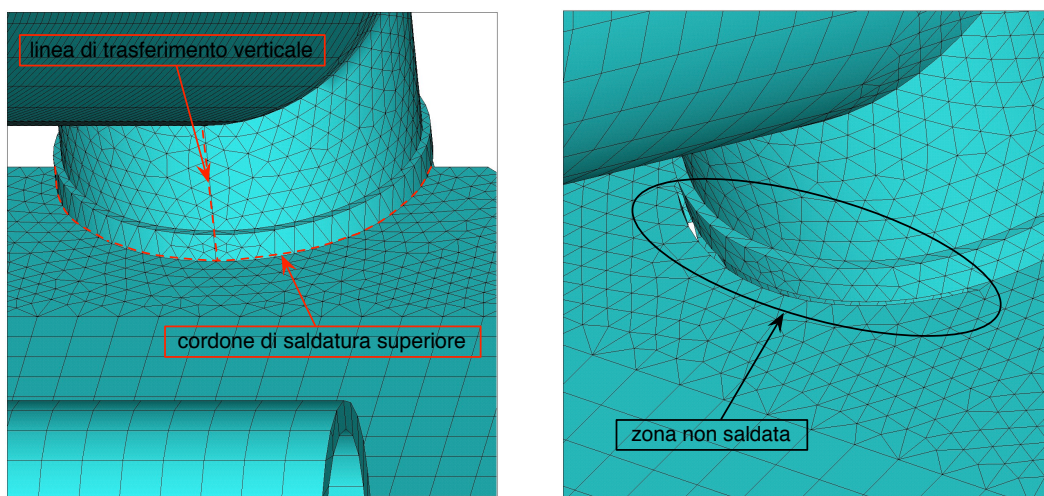


Figura 3.7: Modello geometrico utilizzato per le analisi FEM della saldatura.



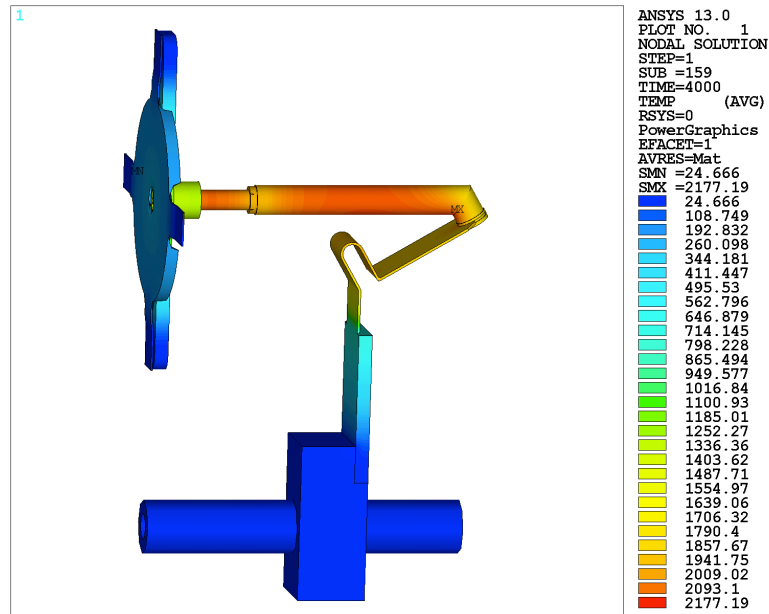
(a) Modello FEM saldatura completa

(b) Modello FEM saldatura non completa

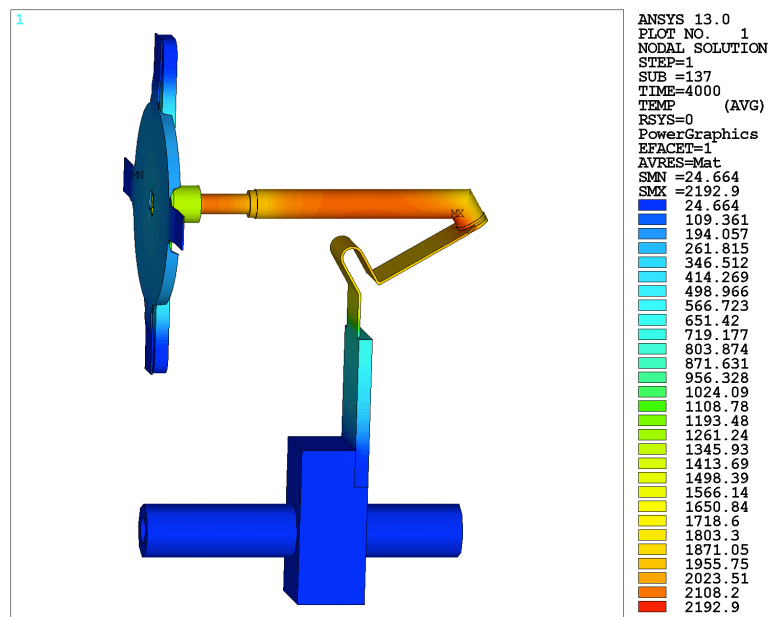
Figura 3.8: Confronto tra il cordone di saldatura nei due modelli FEM.

3.2 DESCRIZIONE DEL COLLEGAMENTO TRA LA LINEA DI TRASFERIMENTO ED IL RISCALDATORE DEL SISTEMA TARGET

Infine, per il problema elettrico, è stata assegnata una tensione di 0 V sulle estremità della griglia che poggia sulla flangia di testa e un carico di corrente costante paria a 400 A alla base del puntale in rame.



(a) Temperatura massima ottenuta con la saldatura completa



(b) Temperatura massima ottenuta con la saldatura non completa

Figura 3.9: Confronto tra le temperature massime ottenuta con la saldatura completa e non completa.

3. STUDIO, OTTIMIZZAZIONE E TEST DEL “SISTEMA TARGET - SORGENTE DI IONIZZAZIONE”

Analizzando i risultati ottenuti, si può notare come la temperatura massima rimanga pressoché uguale per entrambi i modelli (vedi figura 3.9).

Inoltre, osservando i grafici in figura 3.10 e 3.11 si vede come la temperatura lungo il cordone di saldatura aumenti fino ad un massimo di quasi 200°C passando dalla saldatura completa a quella non completa; è però un aumento di tipo locale, infatti allontanandosi via via dal cordone lungo la linea di trasferimento, i valori della temperatura dei due modelli tornano ad avvicinarsi (vedi figura 3.12). Le temperature utilizzate nei grafici sono state estratte dal file dei risultati dell’analisi FEM utilizzando il listato APDL in appendice C.2.

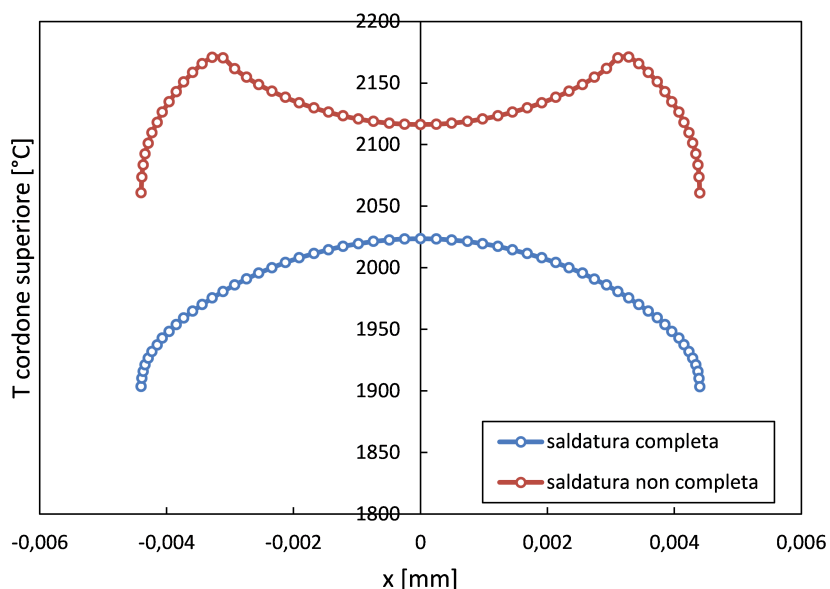


Figura 3.10: Andamento della temperatura lungo il cordone superiore dei due modelli.

Dopo questa semplice analisi si può concludere che la saldatura parziale tra la linea di trasferimento e la connessione elettrica può, in questo caso, essere utilizzata senza particolari problemi. Un’ulteriore conferma verrà data dai test sperimentali presentati nel paragrafo 3.5.

3.2 DESCRIZIONE DEL COLLEGAMENTO TRA LA LINEA DI TRASFERIMENTO ED IL RISCALDATORE DEL SISTEMA TARGET

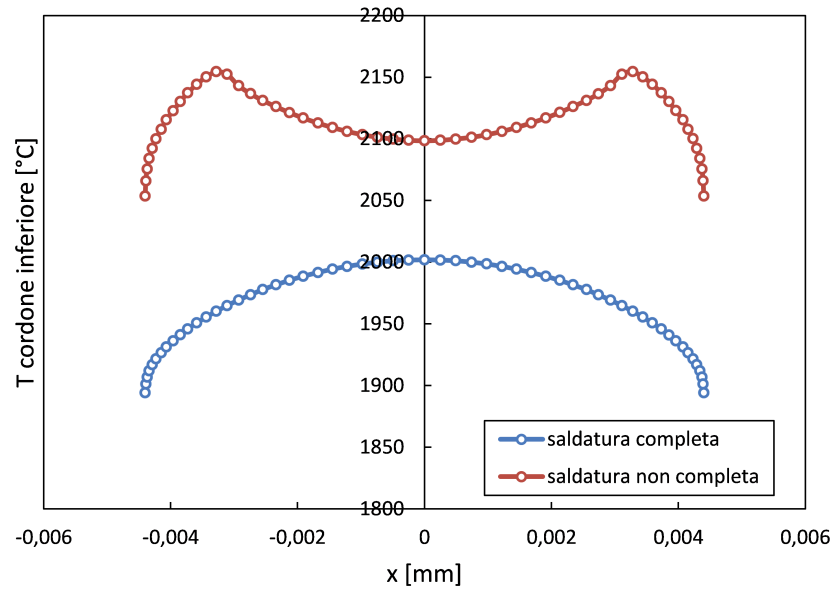


Figura 3.11: Andamento della temperatura lungo il cordone inferiore dei due modelli.

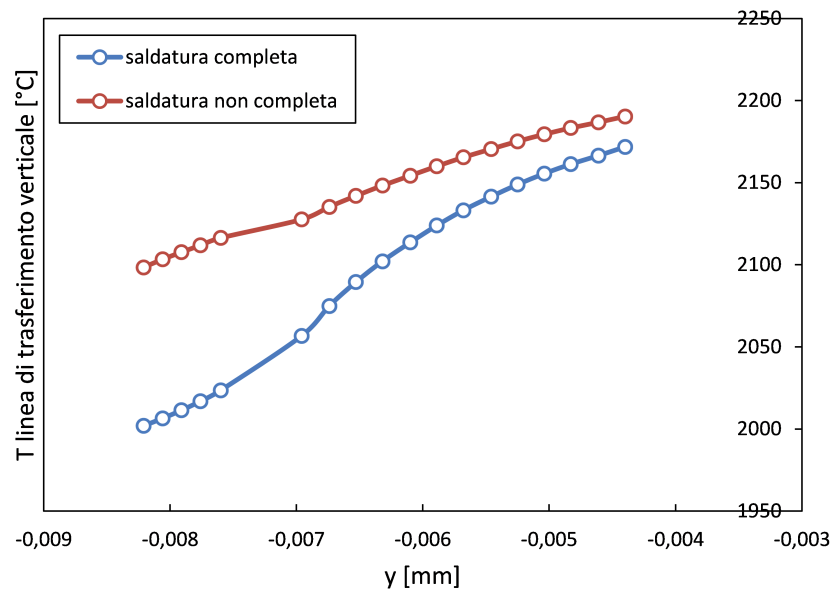


Figura 3.12: Andamento della temperatura lungo la linea di trasferimento verticale dei due modelli.

3.3 Studio e ottimizzazione del sistema di allineamento per la sorgente di ionizzazione superficiale

3.3.1 Ottimizzazione delle barre di centraggio

Quando si utilizza la tecnica di ionizzazione laser, per avere un'elevata efficienza di ionizzazione, è importante che la hot cavity sia sempre mantenuta coassiale rispetto al fascio laser. Questo non è affatto facile ad alte temperature, perciò è stato introdotto un dedicato sistema di allineamento (vedi figura 3.13). I principali componenti che costituiscono questo sistema sono: un supporto circolare in grafite, quattro barre di centraggio in tantalio e una serie di isolatori in Macor[®] che sostengono il supporto in grafite ed evitano che la corrente passi attraverso le barre di centraggio.

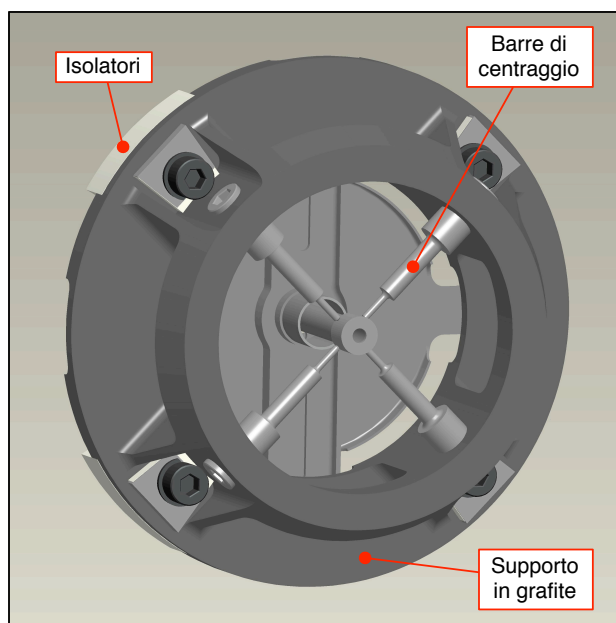
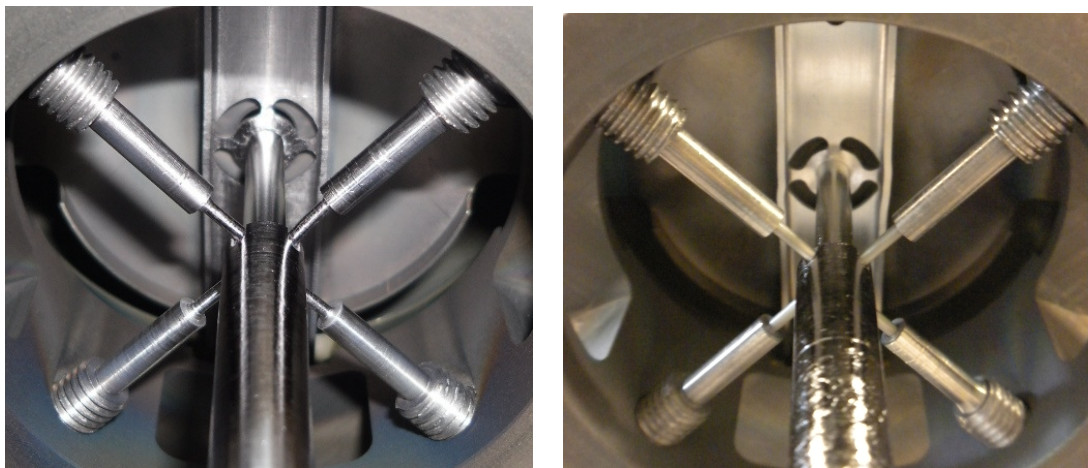


Figura 3.13: Rappresentazione della sorgente di ionizzazione superficiale SPES e del suo sistema di allineamento.

Per quanto riguarda le quattro barre di centraggio in Ta, si è notato, come mostrato in figura 3.14a, che dopo vari test tendevano a deformarsi e degradarsi sempre di più soprattutto nella parte finale, quella a diretto contatto con il bush,

3.3 STUDIO E OTTIMIZZAZIONE DEL SISTEMA DI ALLINEAMENTO PER LA SORGENTE DI IONIZZAZIONE SUPERFICIALE

perdendo quindi la capacità di mantenere l'allineamento, funzione per la quale erano state progettate. Si è perciò pensato di utilizzare il tungsteno invece del tantalio per la parte finale, quella di diametro minore che è soggetta ad un maggior riscaldamento rispetto al resto della barra, perché è un metallo più duro e resistente a temperature più elevate, quindi meno deformabile del tantalio.



(a) *Barre di centraggio in Tantalio deformate* (b) *Barre di centraggio in Tantalio con parte finale in W indeformate*

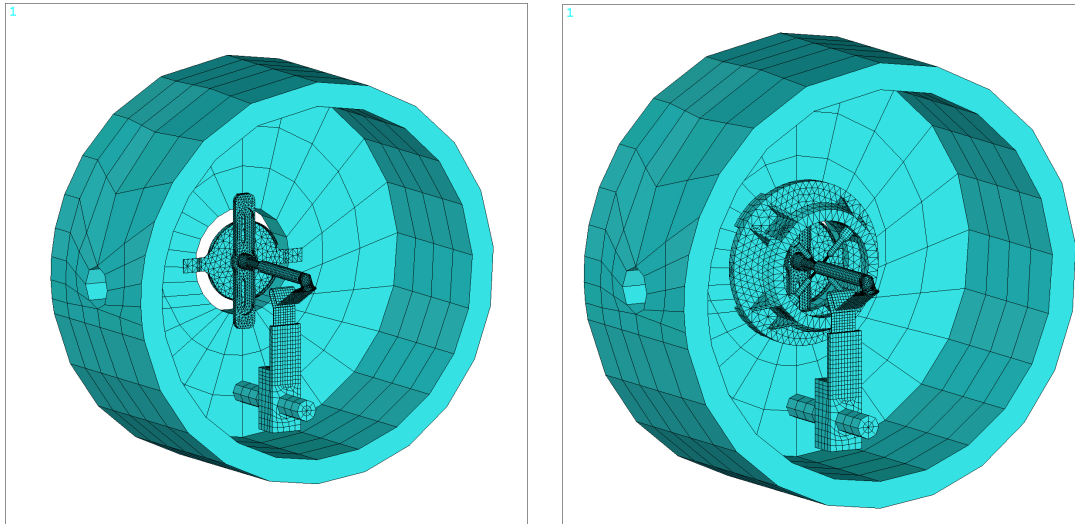
Figura 3.14: *Confronto tra le barre di centraggio in Ta e quelle con parte finale in W.*

Questa modifica si è rivelata essere molto efficace infatti, come si può vedere in figura 3.14b, dopo numerosi test, le barre non si sono deformate, anzi sono rimaste inalterate.

3.3.2 Analisi dell'influenza del sistema di allineamento per la sorgente, sulla temperatura della sorgente stessa

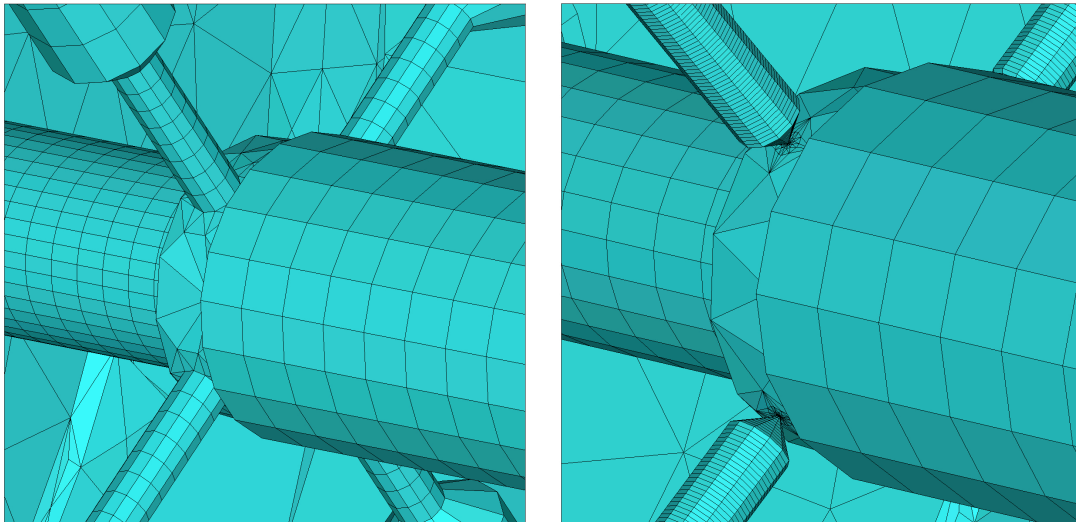
Per verificare l'influenza della presenza del sistema di allineamento sull'andamento della temperatura della hot cavity, sono stati definiti due modelli FEM: uno senza sistema di allineamento (vedi figura 3.15a) ed uno con sistema di allineamento (vedi figura 3.15b). Del secondo modello ne sono state definite due versioni: nella prima è stata approssimata la parte finale delle barre di centraggio come un cilindro uniforme (vedi figura 3.16a); nella seconda, invece, è stata mantenuta la loro punta conica con area quasi puntuale, conforme alla realtà (vedi figura 3.16b).

3. STUDIO, OTTIMIZZAZIONE E TEST DEL “SISTEMA TARGET - SORGENTE DI IONIZZAZIONE”



(a) Modello FEM senza sistema di allineamento (b) Modello FEM con sistema di allineamento

Figura 3.15: I due modelli FEM utilizzati.



(a) Prima semplificazione geometrica delle barre di centraggio (b) Seconda semplificazione geometrica delle barre di centraggio

Figura 3.16: Le due semplificazioni geometriche utilizzate per l'area di contatto tra le barre di centraggio ed il bush.

3.3 STUDIO E OTTIMIZZAZIONE DEL SISTEMA DI ALLINEAMENTO PER LA SORGENTE DI IONIZZAZIONE SUPERFICIALE

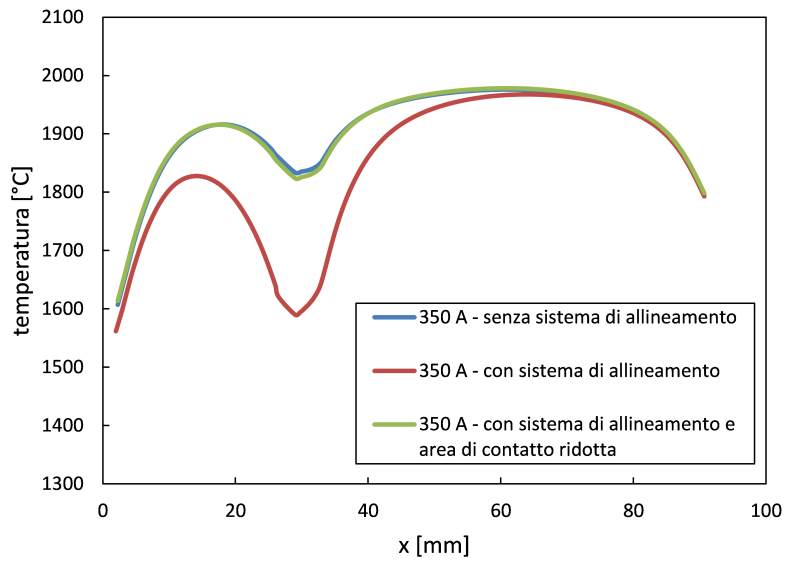
Trattandosi di analisi elettro termiche accoppiate è stato usato l'elemento accoppiato SOLID226 per quasi tutti i componenti, tranne per la camera modellata con l'elemento termico SOLID70. I materiali dei componenti sono il tantalio, il rame e la lega di alluminio, con l'aggiunta, nel secondo modello, del tungsteno per la parte inferiore delle barre e del Macor[®] per gli isolatori. Per quest'ultimo il valore di emissività è stato ricavato da [4], mentre la conducibilità termica, la resistività elettrica, la densità e il calore specifico da [5].

È stato definito un unico enclosure per calcolare il trasferimento di calore per irraggiamento tra le superfici dei componenti, e tra esse e quelle interne della camera, la cui temperatura è stata fissata a $25^{\circ}C$. Inoltre, la stessa temperatura è stata imposta costante sia all'interno del puntale, raffreddato ad acqua, sia sulle superfici della griglia e degli isolatori a contatto con la flangia, anch'essa raffreddata. Infine, per il problema elettrico, è stata assegnata una tensione di $0V$ sulle estremità della griglia e degli isolatori che poggiano sulla flangia di testa, mentre, alla base del puntale in rame, è stato imposto un carico di corrente dipendente dal tempo a partire da $100A$ fino a $400A$ con gradini di $50A$. Ad ogni gradino la simulazione impiegava un sufficiente periodo di tempo per lasciar stabilizzare la temperatura.

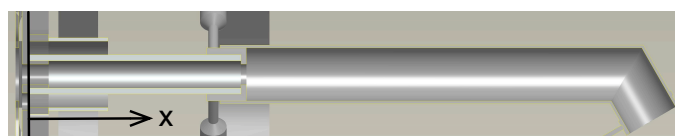
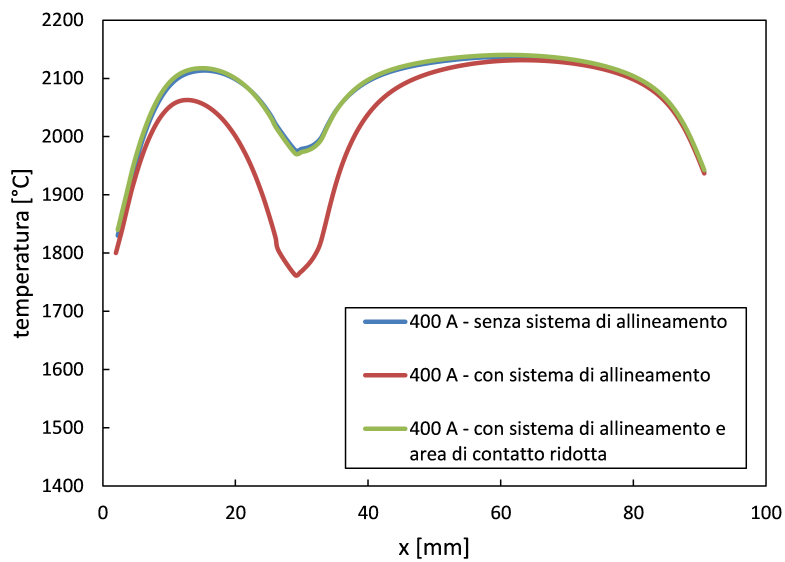
Nei grafici di figura 3.17 è riportato l'andamento della temperatura lungo la hot cavity e la linea di trasferimento per le tre analisi FEM effettuate. Questi valori della temperatura sono stati estratti dal file dei risultati delle analisi FEM utilizzando il listato APDL in appendice C.2. Confrontando le curve per le due versioni del modello FEM con sistema di allineamento si può notare come in prossimità delle barre di centraggio, la temperatura sia molto maggiore nella versione con barre a punta conica, rispetto a quella con barre a punta cilindrica. Questo è dovuto al fatto che, oltre ad aver considerato un contatto perfetto tra barre e bush, nel primo caso quest'area di contatto è molto ampia quindi c'è un grande scambio di calore per conduzione termica, il quale viene asportato da quella zona che si raffredda localmente; nel secondo caso, invece, l'area di contatto è piccolissima, quasi puntuale perciò il calore scambiato per conduzione è quasi nullo.

L'informazione di gran lunga più importante che si può ottenere dai grafici è la coincidenza delle temperature tra il modello senza sistema di allineamento e quello con il sistema di allineamento più realistico (cioè con barre a punta conica).

3. STUDIO, OTTIMIZZAZIONE E TEST DEL “SISTEMA TARGET - SORGENTE DI IONIZZAZIONE”



(a) Andamento della temperatura a 350 A



(b) Andamento della temperatura a 400 A

Figura 3.17: Confronto tra l'andamento della temperatura lungo la hot cavity e la linea di trasferimento in assenza e presenza del sistema di allineamento.

Questo era proprio ciò che si voleva dimostrare con queste analisi, cioè l'ininfluenza del sistema di allineamento sull'andamento della temperatura lungo la hot cavity e la linea di trasferimento.

Perciò, come sarà confermato anche dai test sperimentali descritti nel paragrafo 3.5, con questo sistema di allineamento è stato risolto il problema meccanico del garantire l'allineamento della hot cavity, senza però compromettere la termica del sistema target-sorgente, che non ha subito alterazione con l'introduzione di questo sistema.

3.4 Il Modello FEM del sistema target-sorgente

Prima di svolgere i test sperimentali sul sistema target-sorgente è stato sviluppato un modello FEM per poi confrontarne i risultati. Dato che, dallo studio nel paragrafo precedente, il sistema di allineamento non influenza i risultati di temperatura, si è definito il modello FEM del sistema target-sorgente omettendo il sistema di allineamento. Per porsi nelle stesse condizioni dei test sperimentali è stata modellata anche la transizione con finestra Kodial utilizzata per misurare la temperatura della hot cavity e della linea di trasferimento, posta tra il piatto e la camera (vedi figura 3.18).

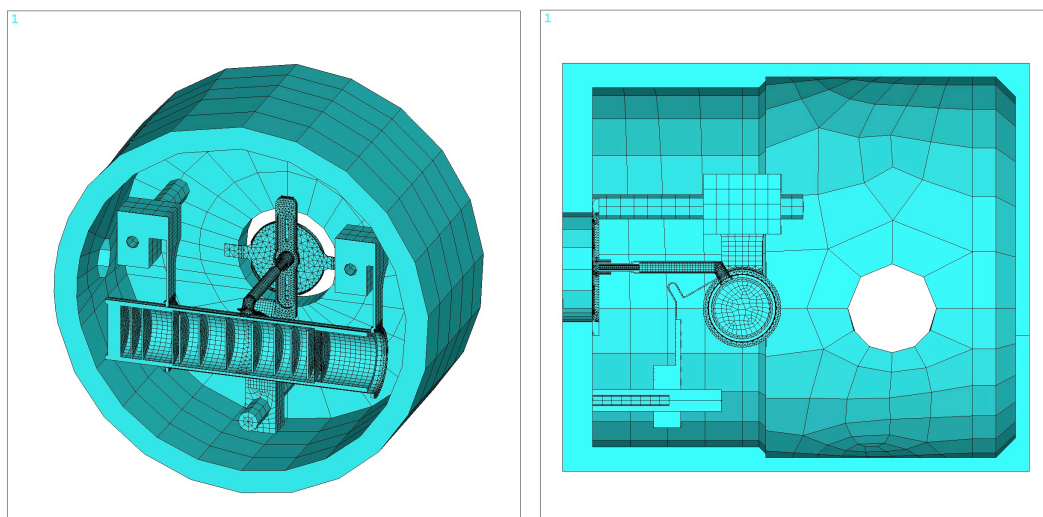


Figura 3.18: *Vista frontale e laterale del modello FEM utilizzato.*

Il modello geometrico semplificato impiegato nell'analisi è quello già presentato in figura 2.7. Tra tutti i componenti è stato considerato un contatto ideale sia

3. STUDIO, OTTIMIZZAZIONE E TEST DEL “SISTEMA TARGET - SORGENTE DI IONIZZAZIONE”

termico che elettrico. Sono stati usati l'elemento accoppiato SOLID226 e l'elemento termico SOLID70 per modellare i componenti come descritto nei modelli FEM precedenti. Per quanto riguarda i materiali usati, essi sono sempre il tantalio, il rame, la lega di alluminio, il tungsteno, la grafite e il carburo di silicio. Sono stati definiti sei enclosures in modo del tutto analogo al modello FEM del solo riscaldatore (vedi paragrafo 2.3).

Inoltre, è stato imposto un vincolo di temperatura pari a 25°C all'interno dei puntali in rame, sulle superfici della griglia a contatto con la flangia e sulle superfici della camera. Infine, per il problema elettrico, è stata assegnata una tensione di 0 V sulle estremità della griglia che poggiano sulla flangia di testa, mentre, alla base del puntale in rame, è stato imposto un carico di corrente dipendente dal tempo a partire da 100 A fino a 400 A con gradini di 50 A .

I risultati ottenuti dal modello FEM sono riportati in figura 3.19 e 3.20, e mostrano la distribuzione della temperatura del sistema quando è applicato il carico di corrente di intensità 400 A alla sola sorgente.

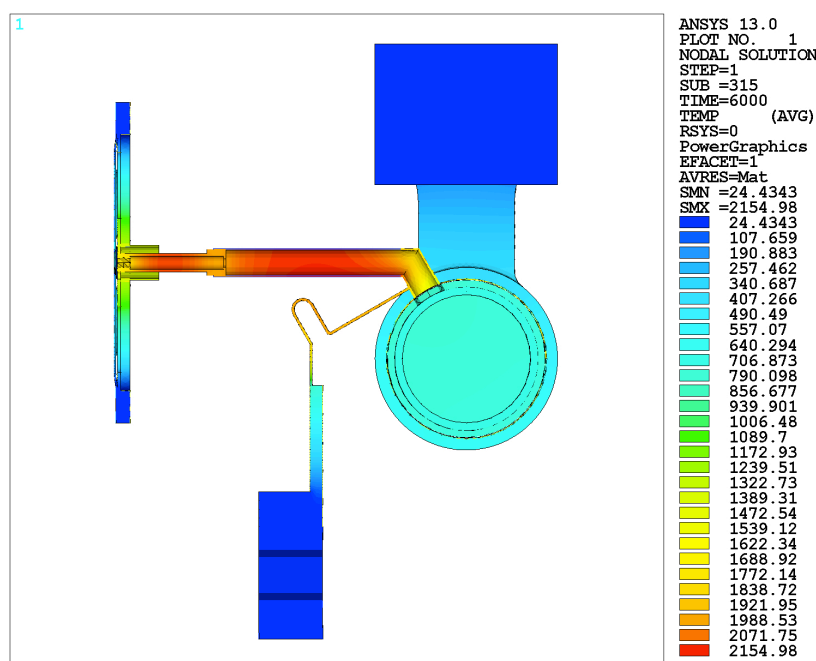


Figura 3.19: Mappa delle temperature ottenute dal modello FEM (vista laterale).

Come si può notare, il punto di massima temperatura è realizzato nella mezzeria della linea di trasferimento. L'idealità delle connessioni nell'analisi numerica viene meno nell'analisi sperimentale dove intervengono anomalie nel contatto fra le superfici adiacenti di componenti in serie. Conoscendo questo

3.5 TEST SPERIMENTALI DEL SISTEMA TARGET-SORGENTE E CONFRONTO CON I DATI NUMERICI

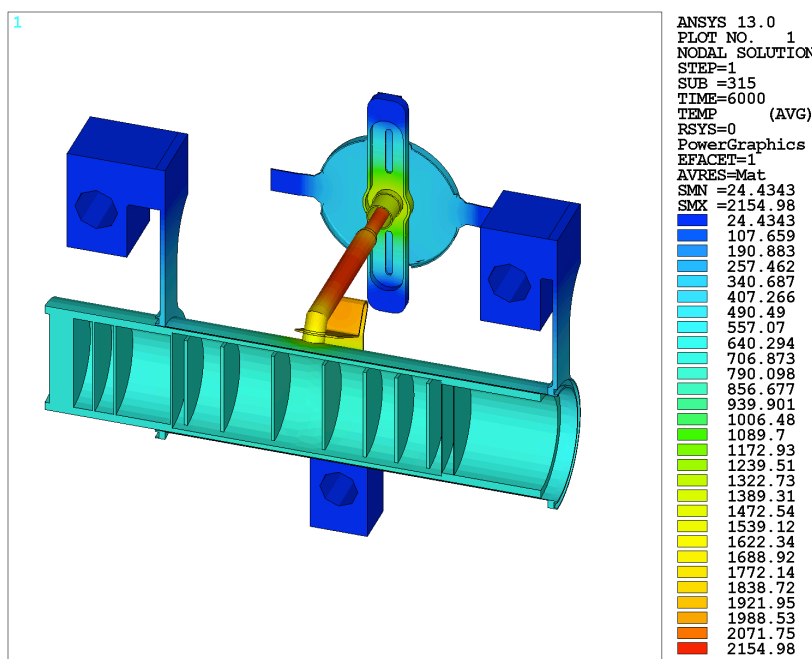


Figura 3.20: Mappa delle temperature ottenute dal modello FEM (vista frontale).

aspetto, la progettazione e lo studio attraverso metodi numerici, deve essere un supporto certamente importante ma che non può trascendere dalle conoscenze che si hanno sul reale funzionamento dei componenti in gioco. Questo a voler dire che, nonostante le figure ci mostrino che la temperatura massima si realizza sulla linea di trasferimento, nella realtà ci si aspetterà una temperatura maggiore tra la hot cavity e il supporto (dove la connessione non è ideale) che favorirà un innalzamento del valore di temperatura nella mezzeria della hot cavity la quale, in certe condizioni potrà essere il punto di massima temperatura assoluta, ovvero quando si presenterà un peggioramento delle condizioni dei componenti e dei contatti fra di loro.

3.5 Test sperimentali del sistema target-sorgente e confronto con i dati numerici

L'apparato sperimentale utilizzato per effettuare i test è lo stesso illustrato nel capitolo precedente per i test sul target. In questo caso però è stata inserita, tra il piatto e la camera, una transizione con finestra Kodial per poter misurare, con un pirometro High Temperature, la temperatura lungo l'estensione assiale della

3. STUDIO, OTTIMIZZAZIONE E TEST DEL “SISTEMA TARGET - SORGENTE DI IONIZZAZIONE”

hot cavity e della linea di trasferimento (vedi figura 3.21). Inoltre uno dei due alimentatori da 10 kW è stato connesso elettricamente al circuito della sorgente, in modo da poter riscaldare per effetto Joule, attraverso il passaggio di una corrente, sia la linea di trasferimento sia la sorgente.

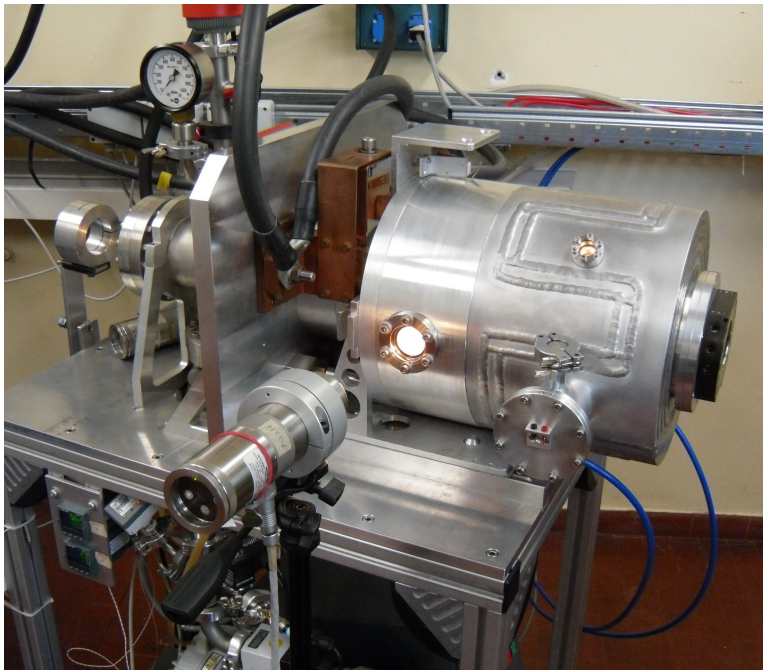


Figura 3.21: Rappresentazione dell'apparato sperimentale.

Il sistema target-sorgente completo è stato accuratamente assemblato e montato in tutti i suoi componenti all'interno della camera come mostrato in figura 3.22

I test sperimentali sono stati eseguiti alimentando solamente il circuito della sorgente, aumentando la corrente di riscaldamento con gradini di 50 A iniziando da 100 A fino a 350 A e tenendo la corrente costante per 15 min ad ogni gradino, in modo da far stabilizzare la distribuzione di temperatura del sistema. La figura 3.23 mostra il sistema target-sorgente quando il circuito della sorgente è alimentato da una corrente pari a 350 A .

I punti sui quali sono state rilevate le temperature con il pirometro sono mostrati in figura 3.24. Essi sono sei, distribuiti lungo l'asse longitudinale della sorgente e posti ad una distanza di 13.5 mm , 20 mm , 25.5 mm , 38 mm , 57 mm , 90.6 mm dall'origine, fissata sul piano di contatto tra hot cavity e supporto. L'impossibilità di marcare le superfici con un localizzatore di posizione, introdurrà inevitabilmente un errore nel posizionamento del pirometro a infrarossi.

3.5 TEST SPERIMENTALI DEL SISTEMA TARGET-SORGENTE E CONFRONTO
CON I DATI NUMERICI

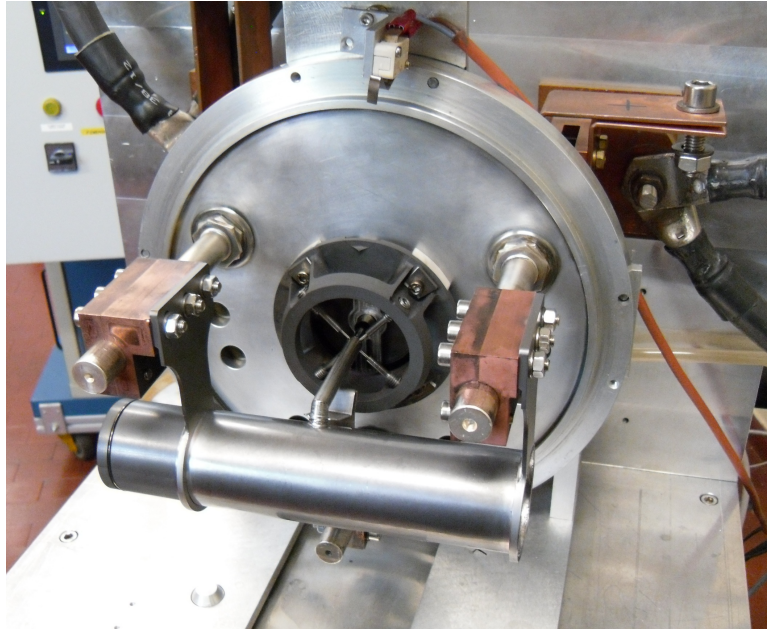


Figura 3.22: *Installazione del sistema target-sorgente nell'apparato sperimentale.*

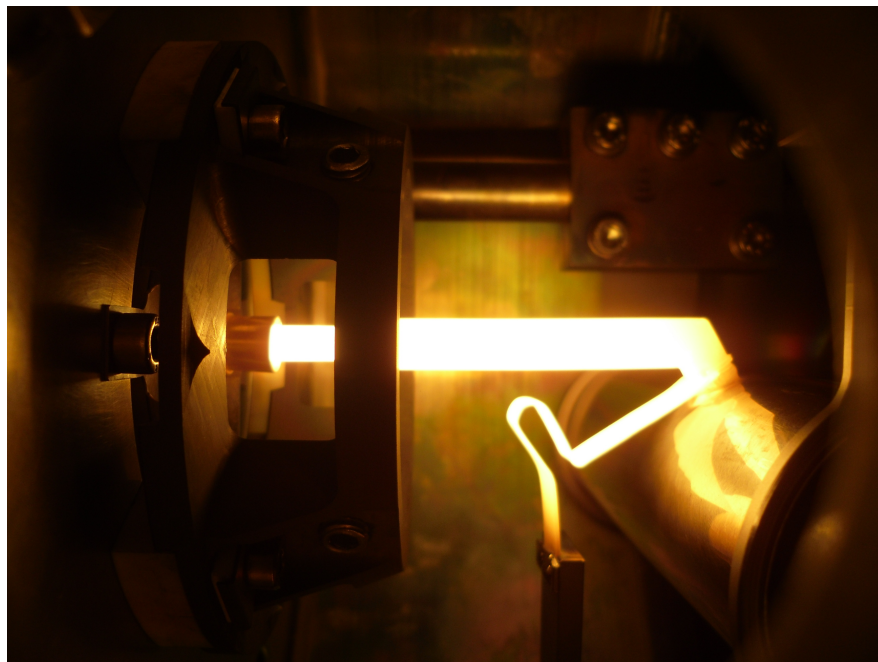


Figura 3.23: *Sistema target-sorgente alla corrente di 350 A.*

3. STUDIO, OTTIMIZZAZIONE E TEST DEL “SISTEMA TARGET - SORGENTE DI IONIZZAZIONE”

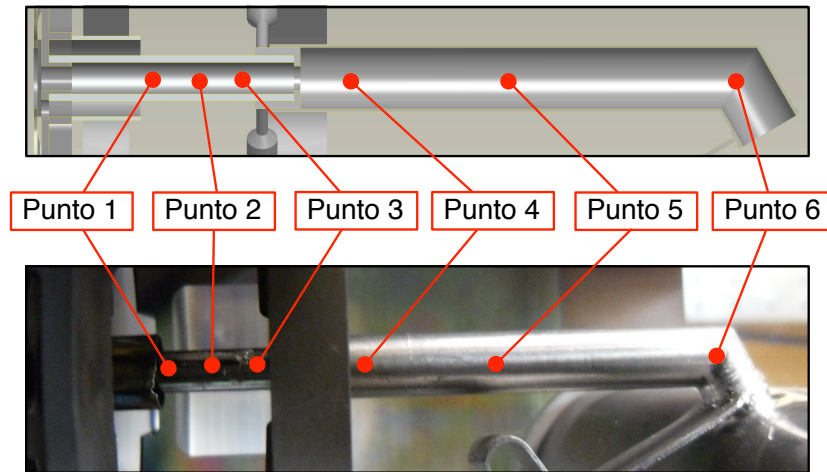


Figura 3.24: Punti di misura sulla hot cavity e sulla linea di trasferimento.

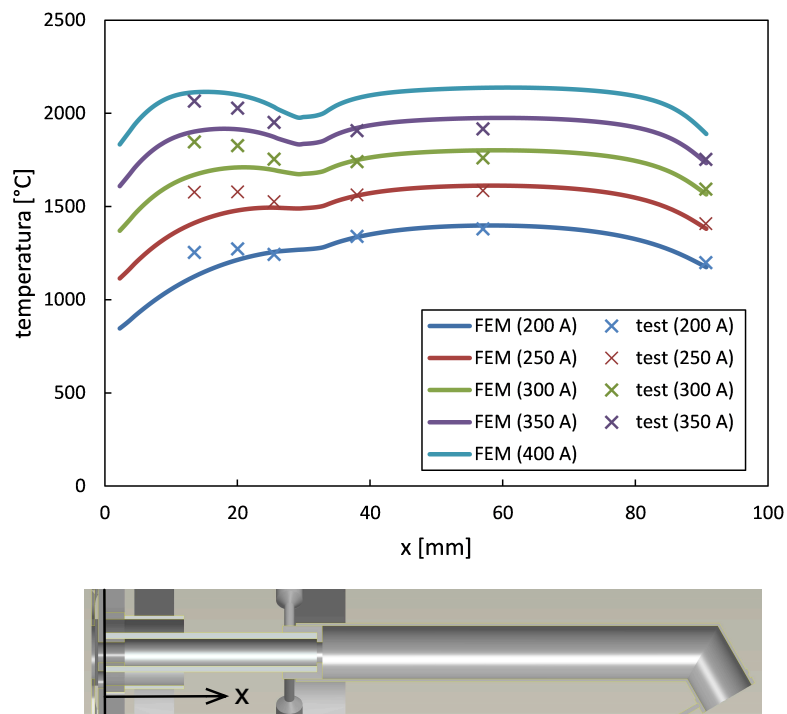


Figura 3.25: Distribuzione della temperatura numerica e sperimentale lungo la hot cavity e la linea di trasferimento al variare della corrente applicata.

Sono stati inoltre misurati i valori della differenza di potenziale tra il lato esterno del morsetto in rame e il piatto base della camera attraverso un voltmetro.

È importante ricordare che ogni valore sperimentale riportato di seguito è la media di tre misure ripetute condotte per limitare l'incertezza dovuta alla ripetibilità delle misurazioni.

In figura 3.25 è riportato l'andamento della temperatura lungo la hot cavity e la linea di trasferimento ricavate dal modello FEM, considerando valori di corrente pari a 200 A, 250 A, 300 A, 350 A, 400 A. I valori di temperatura sono confrontati con quelli misurati nei sei punti di interesse, durante i test sperimentali. Il modello FEM è in grado di riprodurre accuratamente la distribuzione di temperatura lungo la direzione assiale della linea di trasferimento. Per quanto riguarda la hot cavity le temperature numeriche risultano inferiori rispetto alle sperimentali, probabilmente perché nel modello FEM sono stati considerati contatti ideali.

Le figure 3.26 e 3.27 riportano, al variare della corrente, il confronto tra le temperature del modello FEM e quelle sperimentali ai Punti 1 e 5, posti nel punto medio della hot cavity e della linea di trasferimento rispettivamente. Come si può notare, per il Punto 1 le temperature sperimentali sono più alte rispetto alle numeriche, mentre per il Punto 5 sono quasi coincidenti.

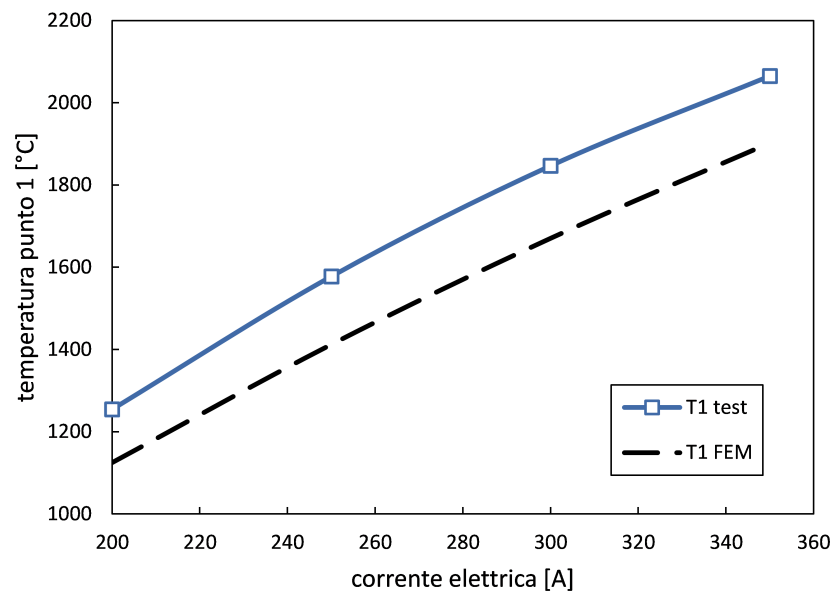


Figura 3.26: Confronto tra la temperatura numerica e sperimentale nel punto medio della hot cavity (Punto 1).

3. STUDIO, OTTIMIZZAZIONE E TEST DEL “SISTEMA TARGET - SORGENTE DI IONIZZAZIONE”

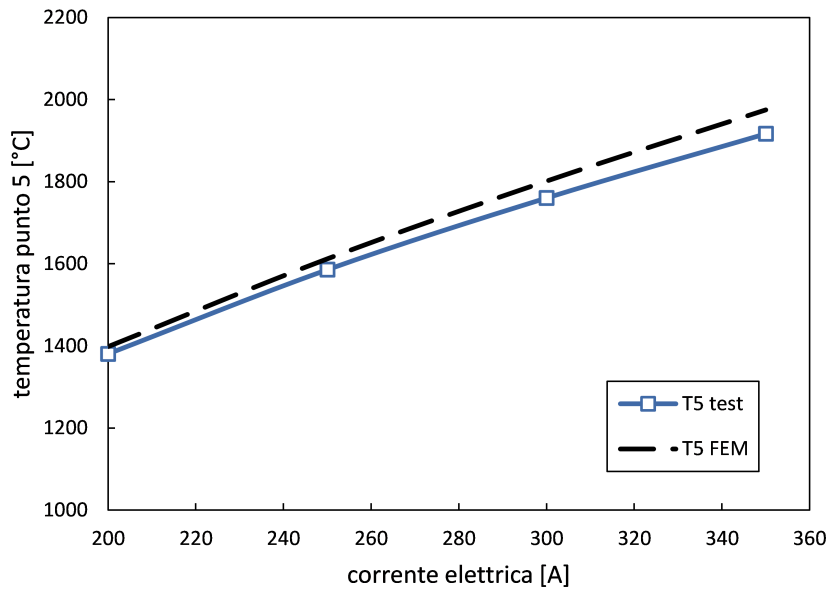


Figura 3.27: Confronto tra la temperatura numerica e sperimentale nel punto medio della linea di trasferimento (Punto 5).

In tabella 3.1 si riporta il confronto tra le temperature numeriche e sperimentali ai Punti 2, 3, 4 e 6. Per i Punti 2 e 3 le temperature numeriche sono sempre più basse rispetto a quelle sperimentali, mentre per i Punti 4 e 6 i valori sono quasi coincidenti.

| I [A] | T _{2-FEM} [°C] | T _{2-test} [°C] | T _{3-FEM} [°C] | T _{3-test} [°C] | T _{4-FEM} [°C] | T _{4-test} [°C] | T _{6-FEM} [°C] | T _{6-test} [°C] |
|----------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| 200 | 1216.42 | 1272 | 1256.24 | 1243 | 1334.07 | 1340 | 1174.84 | 1199 |
| 250 | 1480.60 | 1579 | 1494.05 | 1527 | 1556.63 | 1562 | 1380.69 | 1409 |
| 300 | 1710.23 | 1826 | 1695.93 | 1755 | 1747.80 | 1741 | 1565.05 | 1594 |
| 350 | 1913.77 | 2028 | 1873.52 | 1951 | 1919.79 | 1907 | 1733.20 | 1753 |
| 400 | 2098.39 | | 2034.67 | | 2079.19 | | 1889.59 | |

Tabella 3.1: Temperature numeriche e sperimentali per i Punti 2, 3, 4, 6

I valori della differenza di potenziale tra il lato esterno del morsetto in rame e il piatto base della camera sono riportati in figura 3.28. La differenza tra le tensioni numeriche e sperimentali è dovuta probabilmente al fatto di aver considerato nel modello FEM contatti ideali, quando invece nelle giunzioni reali esistono resistenze

elettriche di contatto. Infatti i valori della tensione del modello FEM sono sempre inferiori rispetto a quelli sperimentali, per la stessa corrente applicata.

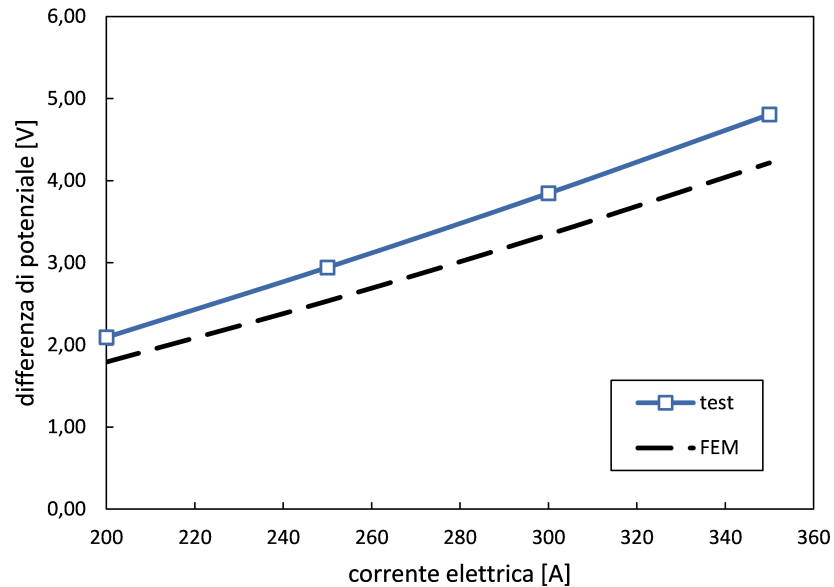
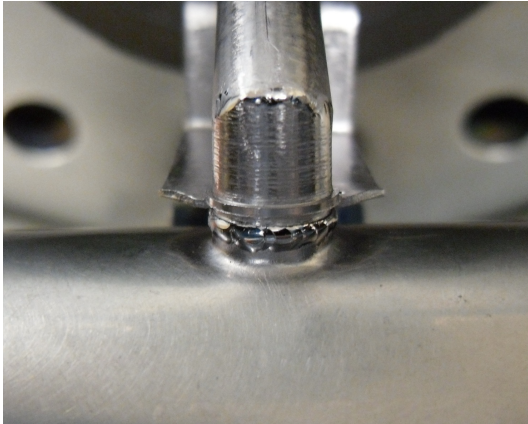


Figura 3.28: Confronto tra la differenza di potenziale numerica e sperimentale.

Lo scopo principale di questi test è stato, però, verificare la tenuta dell'accoppiamento tra riscaldatore e linea di trasferimento, e soprattutto l'integrità della saldatura tra la linea di trasferimento e la connessione elettrica. Come si può vedere in figura 3.29, dopo i vari test termici subiti, entrambe le saldature non hanno mostrato segni di danneggiamento, confermando così l'efficacia e la resistenza ad alte temperature di ambo i tipi di collegamento.

È stata inoltre verificata l'efficacia del sistema di allineamento per la sorgente, confrontando l'allineamento della stessa prima e dopo i test. Osservando la figura 3.30 si vede come la sorgente sia rimasta perfettamente orizzontale, mentre la linea di trasferimento si sia leggermente deformata.

3. STUDIO, OTTIMIZZAZIONE E TEST DEL “SISTEMA TARGET - SORGENTE DI IONIZZAZIONE”

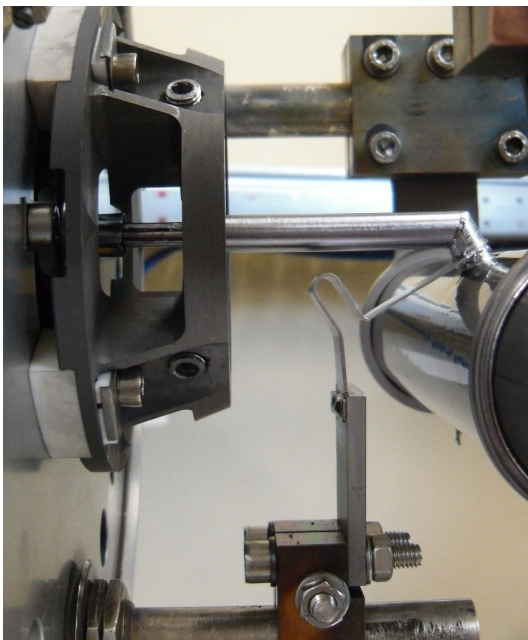


(a) Accoppiamento tra riscaldatore e linea di trasferimento

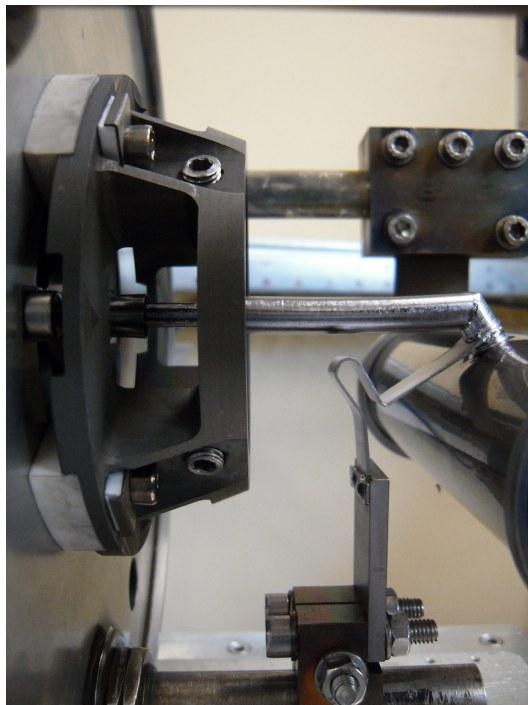


(b) Accoppiamento tra linea di trasferimento e connessione elettrica

Figura 3.29: Stato degli accoppiamenti dopo la serie di test sperimentali effettuati.



(a) Prima dei test termici



(b) Dopo i test termici

Figura 3.30: Allineamento della sorgente prima e dopo i test termici.

3.6 Conclusioni

In questo capitolo è stato ottimizzato il collegamento attuale tra la linea di trasferimento ed il riscaldatore saldandoli tra loro anziché utilizzare un accoppiamento per interferenza. Per far ciò si è dovuto accettare una saldatura parziale (non completa) tra la linea di trasferimento e la connessione elettrica, quindi è stato eseguito uno studio FEM locale per capire se tale saldatura parziale potesse influenzare la distribuzione della temperatura o, a causa di un suo aumento locale, portare al distacco dei due componenti. Da tale studio è emerso che la saldatura non completa, può, in questo caso, essere utilizzata senza particolari problemi.

In secondo luogo dopo aver ottimizzato le barre di centraggio utilizzando il tungsteno invece del tantalio per la parte finale, è stata effettuata un'analisi per verificare l'ininfluenza del sistema di allineamento sulla temperatura della sorgente.

L'efficacia di queste modifiche è poi stata confermata da vari test sperimentali, durante i quali sono state anche rilevate le temperature lungo la hot cavity e la transfer line per poi confrontarle con quelle ottenute dal modello FEM.

Bibliografia

- [1] M. Manzolaro, *Study, design and test of the Target-Ion Source system for the INFN SPES facility*, Ph.D. Thesis, Università degli Studi di Padova.
- [2] R. Tatullo, *Test di alta temperatura sul complesso target-sorgente del progetto SPES*, Tesi di laurea triennale, Università degli Studi di Padova.
- [3] M. Rossignoli, *Studio, progettazione e test della sorgente di ionizzazione superficiale per il progetto SPES*, Tesi di laurea magistrale, Università degli Studi di Padova.
- [4] Giovanni Maria Carlomagno, Gennaro Cardone, *Infrared thermography for convective heat transfer measurements*, review article, *Exp Fluids* (2010) 49:1187–1218, DOI 10.1007/s00348-010-0912-2
- [5] Macor[®] brochure, <http://www.corning.com/>

Capitolo 4

Preparazione del sistema “target - sorgente di ionizzazione” per i test di effusione

4.1 Introduzione

Il bombardamento dei dischi di UC_x con il fascio protonico produce isotopi radioattivi di vari elementi, tramite il processo di fissione. Non appena i radioisotopi vengono generati, si instaurano i meccanismi quali la diffusione di questi all'interno del materiale del bersaglio e l'effusione dal bersaglio alla sorgente di ionizzazione attraverso la transfer line.

Il processo di diffusione è governato dalle proprietà di diffusione degli atomi di interesse e della matrice del bersaglio ed è il processo più lento.

Il processo di effusione inizia quando gli atomi radioattivi raggiungono la superficie esterna dei grani e continua dentro i pori del materiale e tra le pareti esterne del bersaglio, le pareti interne della scatola in grafite e la superficie esterna della transfer line, fino a che i radioisotopi raggiungono la sorgente di ionizzazione. Tale processo dipende essenzialmente dai seguenti parametri:

- il numero medio di collisioni ω con la superficie del bersaglio e con le pareti della scatola;
- il tempo medio di arresto per collisione τ_s (*sticking time*);
- il tempo medio di volo τ_f che intercorre tra le collisioni (*flight time*).

4. PREPARAZIONE DEL SISTEMA “TARGET - SORGENTE DI IONIZZAZIONE” PER I TEST DI EFFUSIONE

I test di effusione consistono nel depositare una quantità prefissata di una soluzione acquosa dell'elemento chimico di interesse su una faccia di uno dei dischi in grafite del target, dalla quale grazie alle alte temperature, evaporano ed effondono fino alla sorgente dove vengono ionizzati. In questo caso, perciò si instaura solo il meccanismo di effusione.

Lo scopo iniziale del test è verificare la possibilità di rilasciare specie chimiche stabili dalla superficie interna del disco in grafite vicino al foro del target (quindi quello più vicino alla transfer line) e, ipotizzando che tutta la carica iniziale dell'elemento venga rilasciata attraverso la transfer line, calcolare la quantità di carica totale rilevata dalla Faraday-cup per quell'elemento. Supponendo che il caso illustrato sia il più favorevole per il rilascio, sarà utilizzato come riferimento per confrontare i risultati dei test sugli altri dischi.

Successivamente cambiando posizione e orientamento della faccia del disco rivestito si può confrontare la quantità totale di carica rilevata dalla Faraday-cup con quella del caso di riferimento, ottenendo dei dati significativi sulle modalità di rilascio di un target costituito da dischi separati.

L'efficienza di rilascio rappresenta la frazione di ioni ottenuti a partire da una certa quantità di atomi neutri; per calcolarla è necessario dividere la quantità totale di carica ionica rilevata dalla Faraday-cup, con la quantità di atomi depositati inizialmente sulla superficie del disco.

Per i test di effusione si utilizza l'apparato sperimentale (*front-end*) mostrato in figura 4.1 che rappresenta la versione off-line (cioè senza l'effetto del fascio di protoni, ovvero senza fissioni) del *front-end* descritto in figura 1.8. L'apparato di sperimentazione è suddiviso in macrosezioni, ognuna delle quali strettamente connessa all'altra in una configurazione in serie.

Canale protonico: è il canale di adduzione del fascio protonico che, in presenza del sistema target, provvede a fornire l'energia necessaria a liberare gli atomi di carburo di uranio aggregati in dischi e collocati nel target stesso. Viene collegato al ciclotrone in grado di produrre il fascio protonico. Sebbene sia la struttura da dove inizia il processo, nei test non verrà impiegato. Questo perché, finché non saranno costruite le strutture adatte, non si potranno liberare ed ionizzare atomi con emissioni di radiazioni. In realtà, al fine di studiare il comportamento di elementi radioattivi durante il processo di ionizzazione, si possono impiegare atomi della stessa specie ma al contempo stabili. Infatti la configurazione elettronica

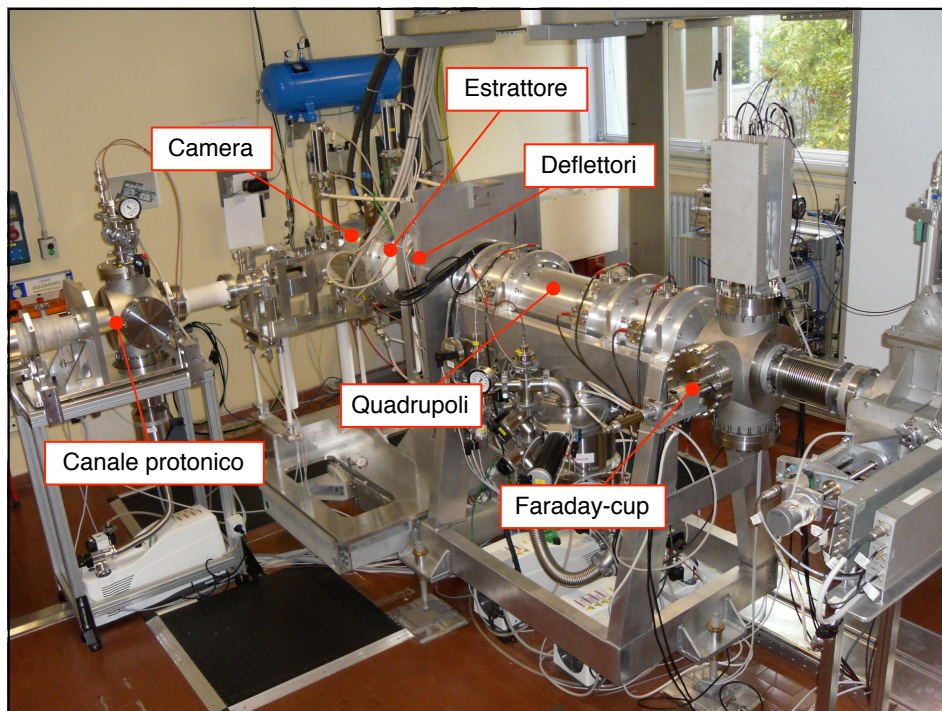


Figura 4.1: Immagine dell'apparato front-end.

rimane immutata negli isotopi, in cui a variare è il numero di neutroni mentre rimane invariato il numero di protoni ed elettroni. Questo gioca a nostro favore, perché permette di monitorare il comportamento di una specie atomica dal punto di vista della ionizzazione di tali atomi. Ovviamente, il numero di neutroni, come detto, non rimane inalterato per gli isotopi e di questo si terrà conto nel momento in cui si dovranno isolare atomi caratterizzati da una massa specifica di interesse a valle del sistema di estrazione attraverso il separatore di massa. Ciò permetterà di evitare la contaminazione del fascio assicurando che quest'ultimo sia caratterizzato da atomi di una certa specie e di massa voluta.

Camera ed Estrattore: è il cuore della facility in cui è collocato il sistema target, composto dal blocco target dove avviene il processo di fissione e si instaurano i meccanismi di diffusione ed effusione, la linea di trasferimento (*transfer line*) e la sorgente di ionizzazione (*hot-cavity*). Nei test di efficienza, come già spiegato, si utilizzano dischi in grafite con depositata una soluzione acquosa dell'elemento chimico di interesse, perciò si instaurerà solo il meccanismo di effusione. L'estrattore, a ionizzazione compiuta, per differenza di potenziale (circa 25 kV) accelera il fascio di ioni.

4. PREPARAZIONE DEL SISTEMA “TARGET - SORGENTE DI IONIZZAZIONE” PER I TEST DI EFFUSIONE

Deflettori, quadrupoli e diagnostica: una volta ionizzati gli atomi della specie da analizzare ed accelerati grazie all’estrattore per differenza di potenziale tra griglia ed estrattore stesso, il fascio di ioni viene dapprima orientato correttamente in un sistema di coordinate cartesiane che giace in un piano ortogonale alla direzione delle particelle (*steerers*). Tale orientamento avviene secondo campi elettrostatici. Successivamente i quadrupoli, sempre agendo secondo campi elettrostatici, focalizzano il fascio eseguendo delle focalizzazioni orizzontali e poi verticali in successione. È inevitabile che le focalizzazioni in un piano deformino il fascio nella direzione complementare, ma grazie a strizioni del fascio fatte in successione, è possibile ridurre, globalmente, la sezione del fascio. Il fascio successivamente viene separato in massa, dal *separatore di massa*, in modo da selezionare solo gli ioni con numero di massa desiderato che corrispondono all’isotopo stabile dell’elemento di cui si vuole caratterizzare il rilascio dal target. Infine viene intercettato dalla *Faraday-cup*, che consiste in una vera coppa metallica che intercetta gli ioni di carica positiva, enumerandoli; ad ogni carica positiva intercettata, attraverso il collegamento a terra, viene indotta una corrente grazie al movimento degli elettroni che equilibrano le cariche positive. Il soppressore, invece è una coppa di diametro più grande rispetto alla Faraday-cup che impedisce agli elettroni, liberati dal bombardamento di ioni positivi, di staccarsi ed uscire dalla Faraday-cup, con il rischio di avere un conteggio doppio delle cariche.

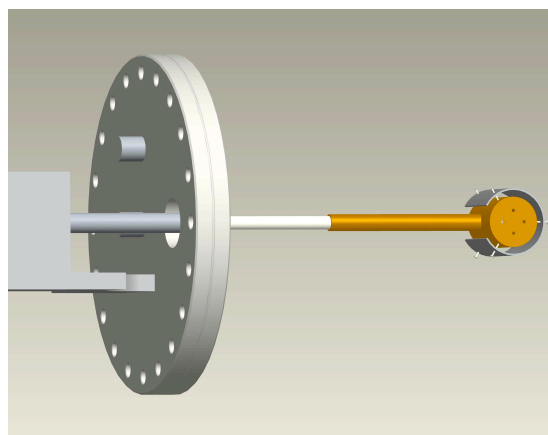


Figura 4.2: *Faraday-Cup*.

Nei paragrafi successivi si riportano solo i test termici preliminari effettuati utilizzando il *front-end*, atti a preparare dal punto di vista termico l’apparato sperimentale. I test di effusione verranno effettuati in futuro.

4.2 Il modello FEM

Il modello FEM elettro termico del sistema target-sorgente differisce da quello definito nel paragrafo 3.4, solo per l'assenza della transizione tra piatto e camera da vuoto (vedi figura 4.3).

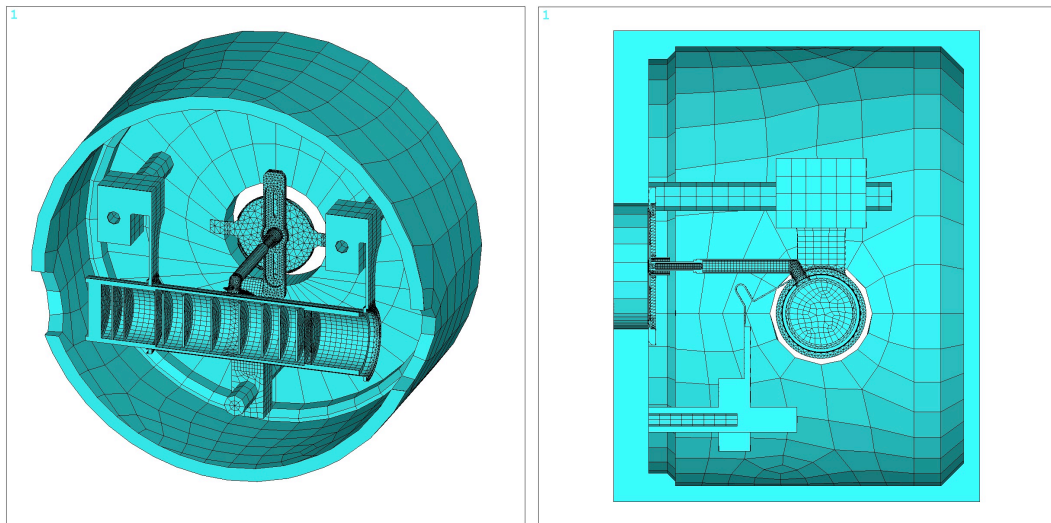


Figura 4.3: Vista frontale e laterale del modello FEM utilizzato.

Anche le condizioni al contorno ed i carichi termici sono assegnati allo stesso modo, con l'aggiunta di un carico di corrente dipendente dal tempo a partire da 500 A fino a 1300 A con gradini di 100 A , applicato ai puntali in rame del riscaldatore. Questo carico è applicato dopo che la sorgente si è stabilizzata a 400 A come mostrato dalla rampa di carico di figura 4.4.

In figura 4.5 viene messa a confronto la temperatura del riscaldatore nei *Punti 1 e 2* con e senza la presenza della sorgente, ad una corrente di 400 A . L'effetto di riscaldamento della sorgente sul target di produzione è evidente per entrambi i punti, specialmente quando la corrente del riscaldatore è bassa.

La distribuzione della temperatura lungo la hot cavity e la transfer line quando la corrente della sorgente è pari a 400 A , è mostrata in figura 4.6; in particolare sono riportati due casi: quello in cui la corrente del riscaldatore è nulla e quello con la corrente del riscaldatore fissata a 1300 A .

Quando il sistema di riscaldamento del target è attivo e la corrente è uguale a 1300 A , le temperature registrano un aumento a livello di hot cavity tra i 106 e i 180°C e a livello di transfer line tra i 101 e i 259°C . È importante sottolineare

4. PREPARAZIONE DEL SISTEMA "TARGET - SORGENTE DI IONIZZAZIONE" PER I TEST DI EFFUSIONE

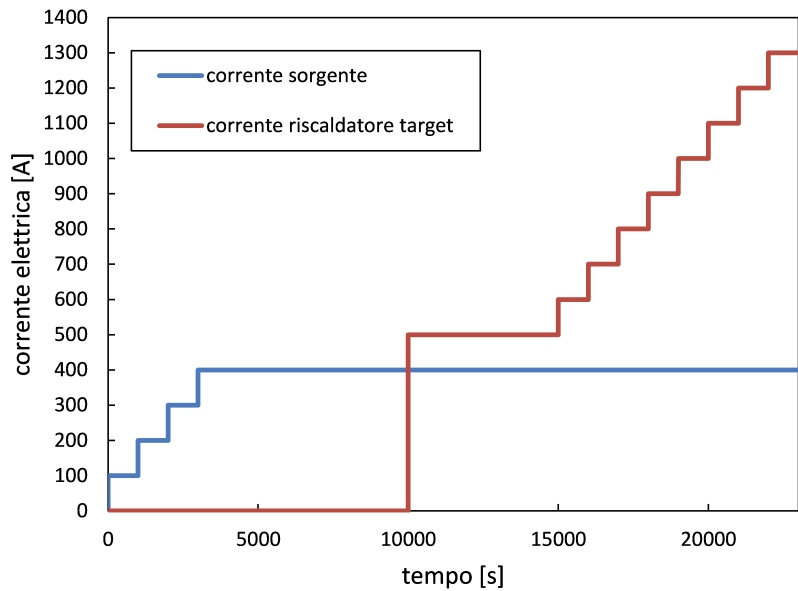


Figura 4.4: *Rampa di carico del modello FEM.*

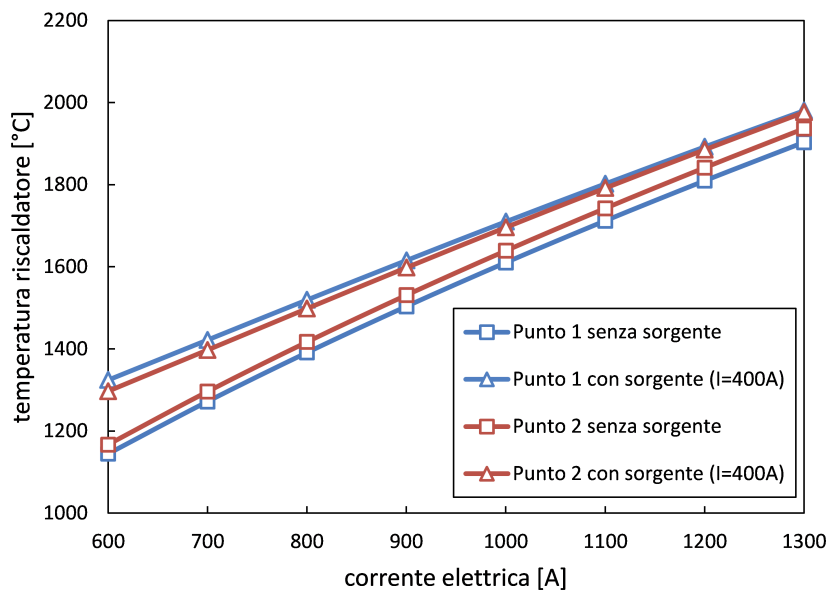


Figura 4.5: *Confronto tra la temperatura del riscaldatore nei Punti 1 e 2, con e senza la presenza della sorgente di ionizzazione (scaldata da una corrente di 400 A).*

che sia un segmento della hot cavity che un segmento della transfert line superano la temperatura limite del Ta (2200°C), di conseguenza la massima corrente della sorgente dovrebbe essere lievemente ridotta.

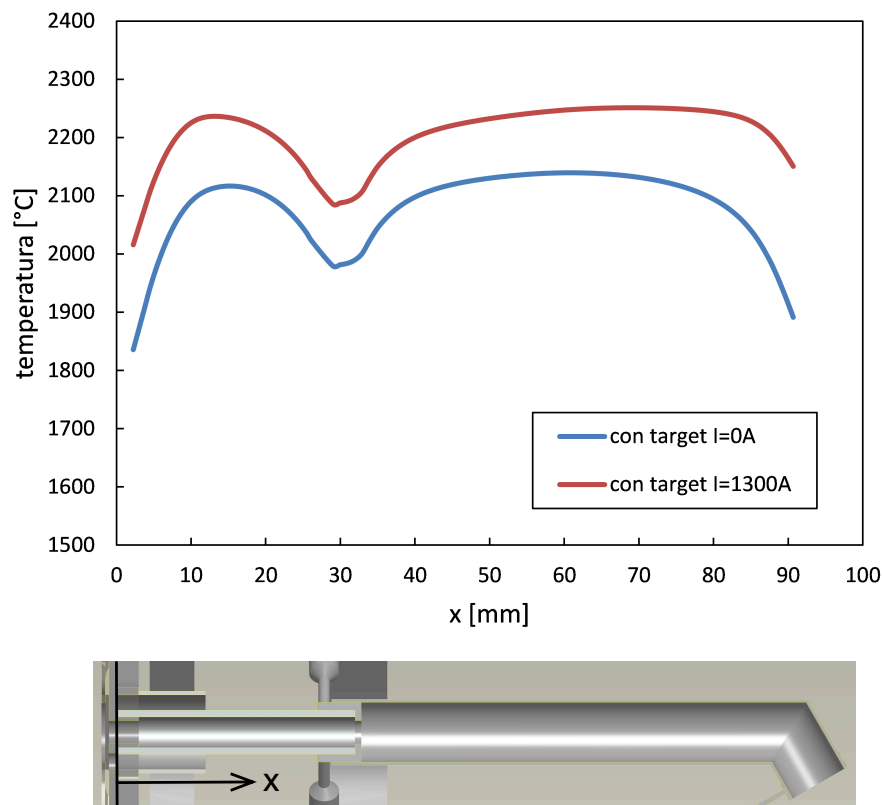


Figura 4.6: Confronto di distribuzione della temperatura lungo la hot cavity e la linea di trasferimento per la corrente di 400 A sulla sorgente, quando la corrente del riscaldatore è uguale a 0 e 1300 A.

Premesso che la temperatura della hot cavity è quella nel suo punto medio ($x = 13.5\text{ mm}$), in figura 4.7 è possibile apprezzare la curva della temperatura della hot cavity per una corrente della sorgente variabile tra 200 e 400 A. La figura 4.8, invece, mostra come varia la temperatura della hot cavity quando la corrente della sorgente è mantenuta costante a 400 A e la corrente del riscaldatore è incrementata da 600 A a 1300 A. Il graduale aumento di temperatura è evidente ed è pari a 100°C , passando da 600 a 1300 A.

4. PREPARAZIONE DEL SISTEMA "TARGET - SORGENTE DI IONIZZAZIONE" PER I TEST DI EFFUSIONE

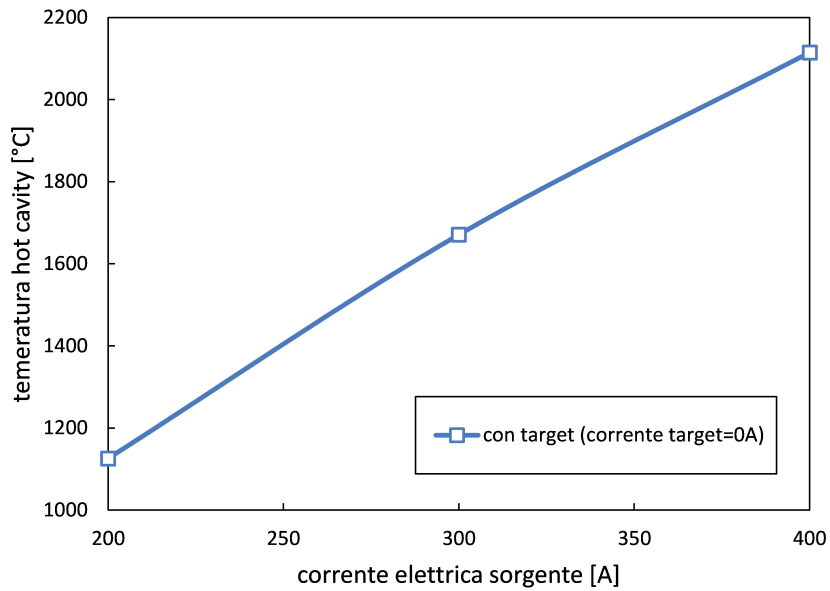


Figura 4.7: *Temperatura nel punto medio della hot cavity al variare della corrente della sorgente con corrente del riscaldatore nulla.*

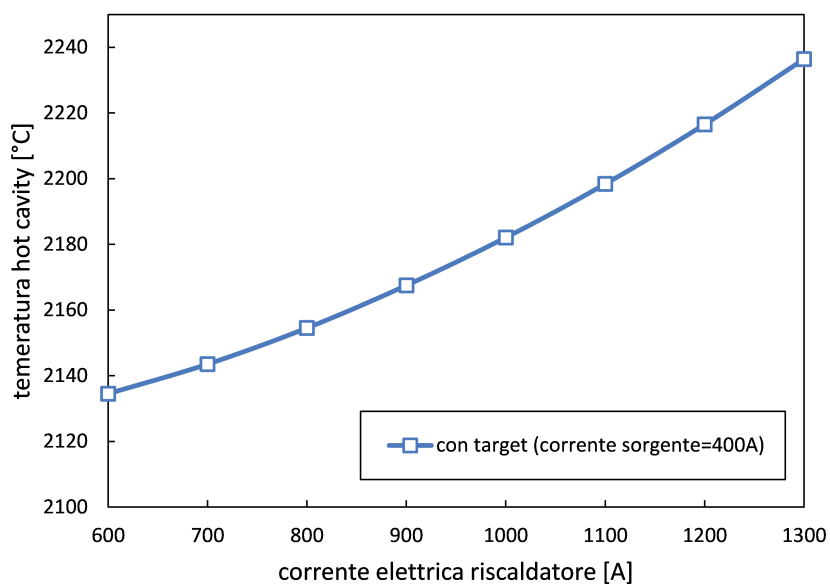


Figura 4.8: *Temperatura nel punto medio della hot cavity al variare della corrente del riscaldatore con corrente della sorgente fissa a 400 A.*

4.3 Misure di temperatura

Il sistema target-sorgente da utilizzare per i test è quello implementato nel modello FEM, però a causa dell'indisponibilità dei componenti della nuova sorgente SIS C (vedi figura 3.7) e del nuovo target definitivo, è stata utilizzata la vecchia sorgente MK1 (vedi figura 1.9) ed il target attuale (con il relativo problema del circuito parallelo). Così è stato possibile anche fare un confronto con i risultati dei test sperimentali riportati in [1], quest'ultimi svolti utilizzando il riscaldatore accoppiato alla linea di trasferimento per interferenza meccanica e non saldato ad essa.

I test termici, come già accennato nell'introduzione, sono stati effettuati utilizzando l'apparato sperimentale del *front-end*.

Il sistema target-sorgente completo è stato accuratamente assemblato e montato in tutti i suoi componenti nel piatto base della camera (vedi figura 4.9). Poi è stata installata la transizione con finestra Kodial e la camera raffreddata ad acqua (vedi figura 4.10). Il tutto è stato, infine, sistemato nel *front-end*.

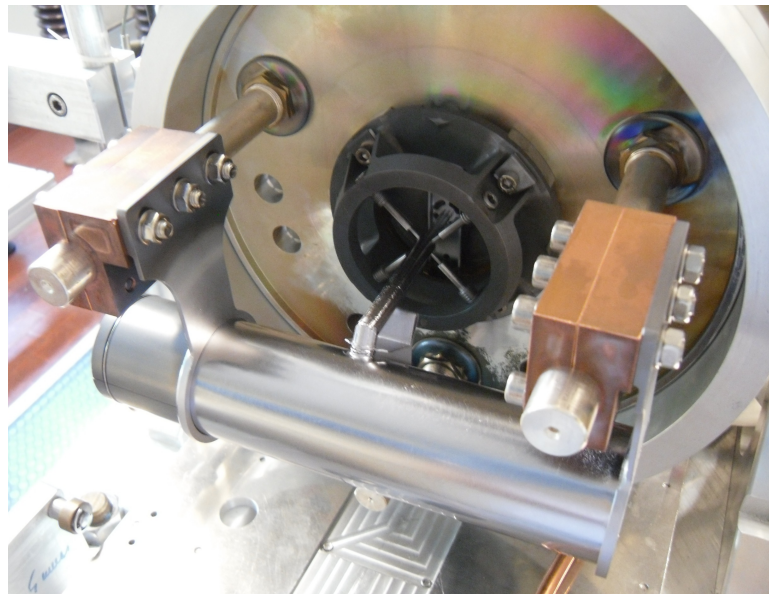


Figura 4.9: *Installazione del sistema target-sorgente.*

Lo scopo di queste misure è quello di mantenere monitorata la temperatura della hot cavity e del target così da poterla associare ad un determinato valore di potenza dissipata, in modo che nel corso dei test di effusione, durante i quali non si ha accesso alla camera perché si opera in alta tensione, si possa risalire alla

4. PREPARAZIONE DEL SISTEMA “TARGET - SORGENTE DI IONIZZAZIONE” PER I TEST DI EFFUSIONE

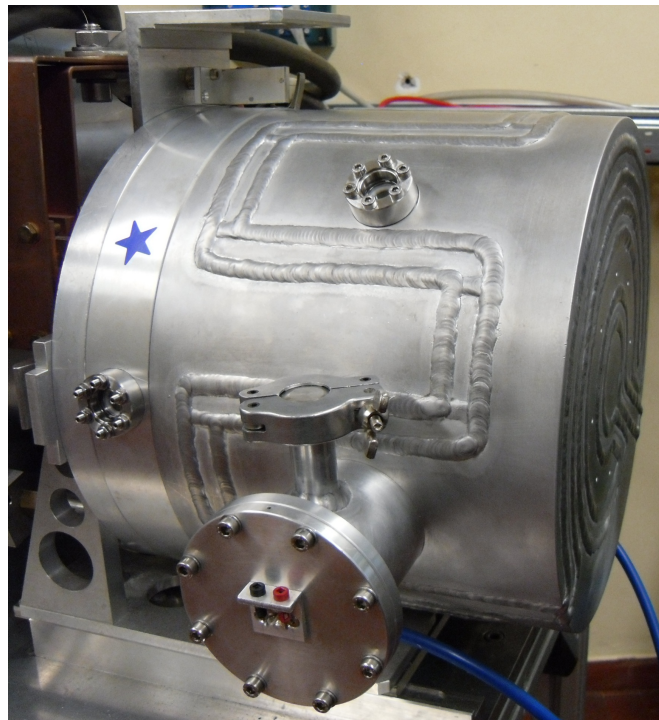


Figura 4.10: Camera e transizione utilizzate nei test.

presenza di eventuali anomalie dallo scostamento dei valori di temperatura o di potenza, o di entrambi, da quelli ottenuti nei test termici.

Inoltre questi test sono utili per capire quanta corrente fornire ai due circuiti per avere la temperatura voluta sulla hot cavity e sul target.

Sono stati effettuati 3 tipi di test termici, ognuno dei quali ripetuto tre volte, per confermare la ripetibilità dei risultati.

1. La prima tipologia consiste nel monitorare la temperatura sul punto medio della hot cavity (vedi figura 4.11), alimentando solo il circuito della sorgente con gradini di 50 A iniziando da 100 A fino a 350 A e tenendo costante la corrente per 10 min ad ogni gradino.
2. La seconda tipologia consiste sempre nel monitorare la temperatura sul punto medio della hot cavity, ma, raggiunti i 350 A sulla sorgente, si alimenta anche il circuito del riscaldatore con gradini di 100 A iniziando da 100 A fino a 1300 A e tenendo costante la corrente per 10 min ad ogni gradino.
3. La terza tipologia, infine, consiste nel monitorare la temperatura sulla superficie esterna superiore del riscaldatore (*Punto 2*) (vedi figura 4.11),

alimentando entrambi i circuiti con le stesse modalità del test precedente.

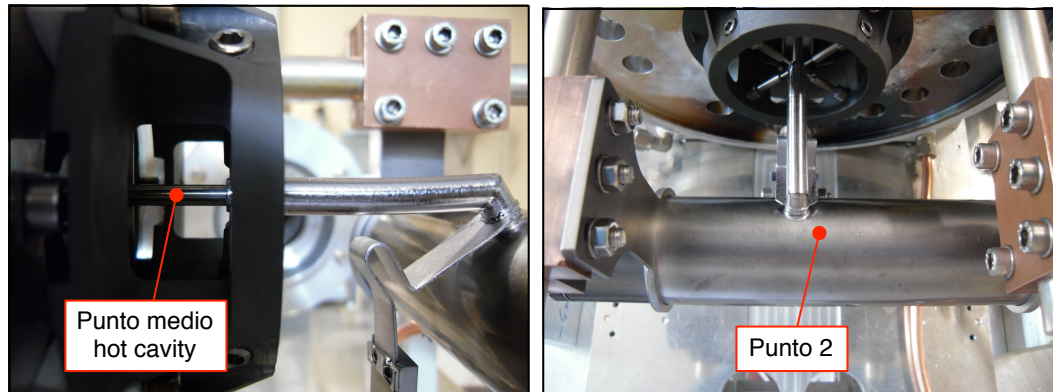


Figura 4.11: *Punti di misura della temperatura.*

La temperatura nel punto medio della hot cavity, è stata misurata con un pirometro High Temperature, per mezzo della finestra Kodial laterale della transizione, mentre quella sulla superficie esterna superiore del riscaldatore (*Punto 2*), sempre con un pirometro High Temperature, attraverso la finestra Kodial laterale della camera (vedi figura 4.10).

Per tutti i test è stata misurata, con un voltmetro, la differenza di potenziale per entrambi i circuiti e registrato il valore della potenza dissipata calcolato dalla console di comando.

4.4 Confronto tra dati sperimentali e numerici

Dato che nei test sperimentali è stata utilizzata la sorgente MK1, i dati ottenuti non possono essere confrontati con quelli del modello FEM riportato nel paragrafo 4.2 (che implementa l'ultima versione del sistema target-sorgente), perciò per il confronto si farà riferimento al modello FEM con la sorgente MK1 riportato in [1].

In figura 4.12 si confrontano la temperatura numerica e sperimentale nel *Punto 2* del riscaldatore, per differenti valori di corrente del riscaldatore e corrente della sorgente fissata a 400 A. Come ci si aspettava, i valori sperimentali sono più bassi rispetto a quelli numerici, questo perché utilizzando il target attuale si presenta il problema della formazione del circuito parallelo. La conferma di ciò si ottiene dal confronto tra i valori numerici e sperimentali della differenza di potenziale mostrato in figura 4.13.

4. PREPARAZIONE DEL SISTEMA "TARGET - SORGENTE DI IONIZZAZIONE" PER I TEST DI EFFUSIONE

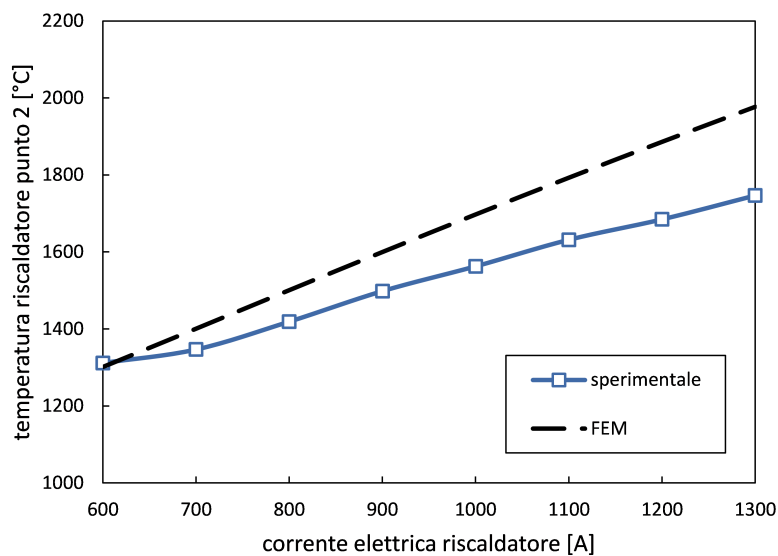


Figura 4.12: Confronto, al variare della corrente del riscaldatore, tra la temperatura numerica e sperimentale nel Punto 2 del riscaldatore, per la corrente di 400 A sulla sorgente.

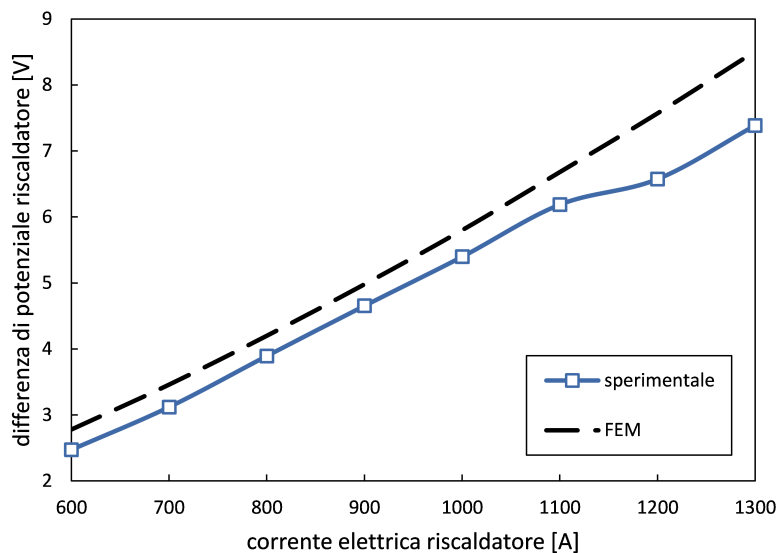


Figura 4.13: Confronto, al variare della corrente del riscaldatore, tra la tensione numerica e sperimentale nel Punto 2 del riscaldatore, per la corrente di 400 A sulla sorgente.

Le figure 4.14 e 4.15 riportano i valori numerici e sperimentali della temperatura nel punto medio della hot cavity e della differenza di potenziale, rispettivamente,

per differenti valori di corrente della sorgente e corrente del riscaldatore nulla. Per quanto riguarda la tensione, i dati sperimentali sono sempre più alti di quelli numerici a causa dei contatti ideali elettrici e termici implementati nel modello FEM, che invece non risultano tali nella realtà.

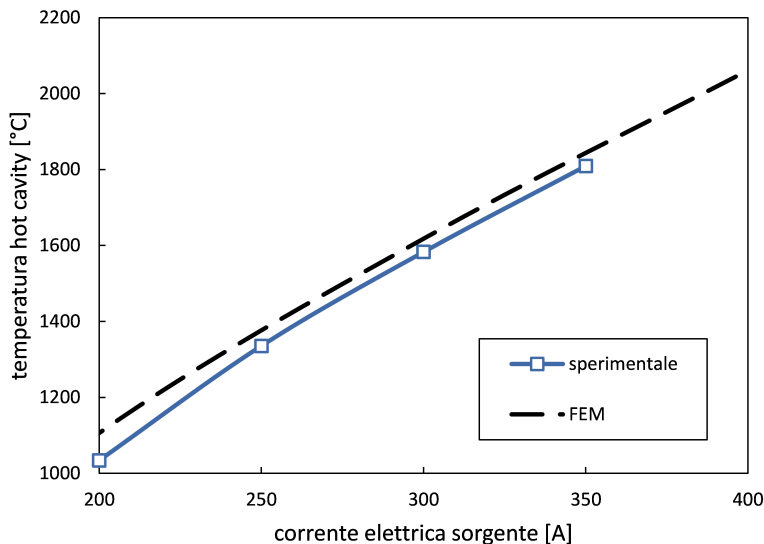


Figura 4.14: Confronto tra la temperatura numerica e sperimentale nel punto medio della hot cavity, al variare della corrente della sorgente e corrente del riscaldatore nulla.

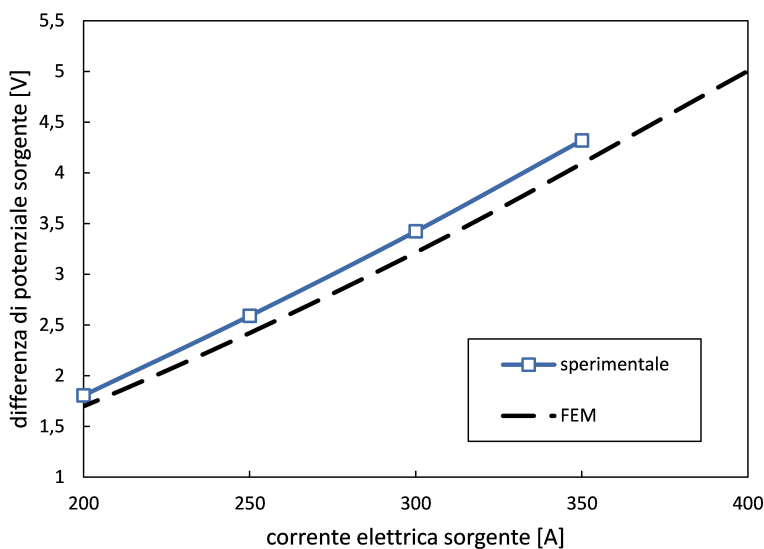


Figura 4.15: Confronto tra la tensione numerica e sperimentale della sorgente, al variare della corrente della sorgente e corrente del riscaldatore nulla.

4. PREPARAZIONE DEL SISTEMA “TARGET - SORGENTE DI IONIZZAZIONE” PER I TEST DI EFFUSIONE

La figura 4.16 mostra il confronto tra l’andamento della temperatura numerica e sperimentale nel punto medio della hot cavity, all’aumentare della corrente del riscaldatore da 600 A a 1300 A, tenendo fissa la corrente della sorgente. Per il modello FEM quest’ultima è pari a 400 A, mentre nei test sperimentali ci si è fermati a 350 A. Perciò non vanno confrontati i valori di temperatura raggiunti, bensì il loro andamento al variare della corrente. Come si può notare, per entrambe le curve l’andamento della temperatura è crescente con la corrente, aumentando, nel passaggio da 600 a 1250 A, di 90 °C quella numerica e di 30 °C quella sperimentale. Questo andamento crescente è più evidente in figura 4.17, che mostra la tensione numerica e sperimentale della sorgente, all’aumentare della corrente del riscaldatore e tenendo fissa la corrente della sorgente.

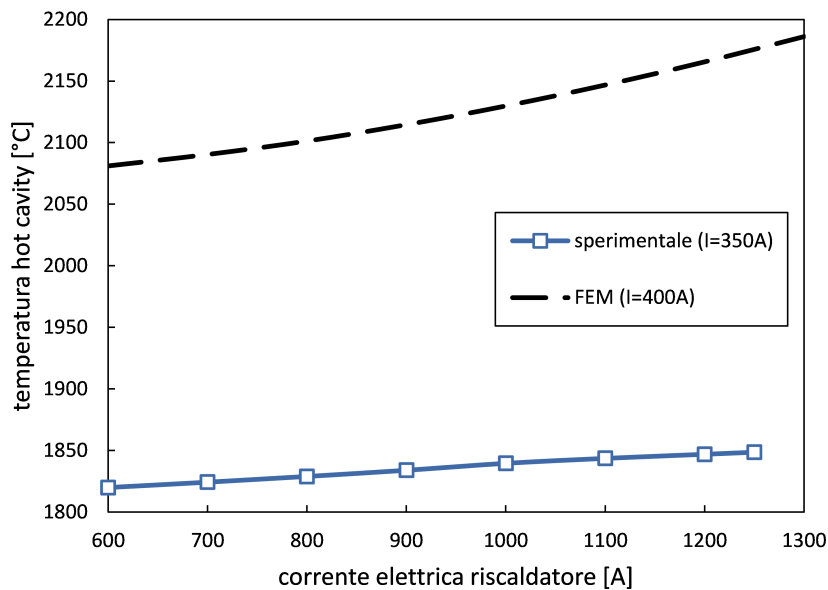


Figura 4.16: Confronto tra l’andamento della temperatura numerica e sperimentale nel punto medio della hot cavity, al variare della corrente del riscaldatore e corrente fissa sulla sorgente.

Le stesse curve sperimentali riportate in [1], ottenute però con il riscaldatore collegato per interferenza meccanica alla linea di trasferimento, invece, hanno un andamento costante al variare della corrente; questo ad indicare la non influenza del riscaldamento del target sulla temperatura della sorgente, in disaccordo con il modello FEM, che mostra il contrario. Questo fatto è dovuto alla discontinuità termica ed elettrica tra tubo in Ta e transfert line.

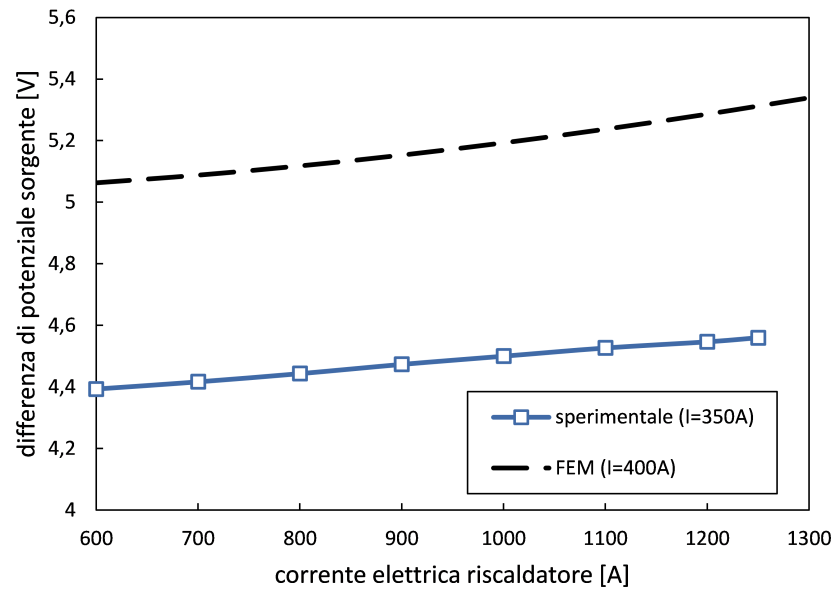


Figura 4.17: Confronto tra l'andamento della tensione numerica e sperimentale della sorgente, al variare della corrente del riscaldatore e corrente fissa sulla sorgente.

Il miglioramento dell'accoppiamento per interferenza meccanica con la saldatura della linea di trasferimento al tubo in Ta, oltre a portare i benefici descritti nel capitolo precedente, ne migliora quindi anche la continuità termica ed elettrica, come confermato dalle curve di figura 4.16 e 4.17.

4.5 Conclusioni

In questo capitolo sono stati introdotti i test di effusione ed eseguiti i test termici preliminari.

Il comportamento elettro-termico dell'ultima versione del sistema target-sorgente è stato studiato usando un modello FEM. Per i test termici, però, è stata utilizzata la vecchia sorgente MK1, perciò i dati ottenuti sono stati analizzati e confrontati con quelli del modello FEM con la sorgente MK1 riportato in [1]. Analogie e discrepanze tra i risultati numerici e sperimentali sono state discusse in dettaglio.

Bibliografia

- [1] M. Manzolaro, *Study, design and test of the Target-Ion Source system for the INFN SPES facility*, Ph.D. Thesis, Università degli Studi di Padova.
- [2] M. Rossignoli, *Studio, progettazione e test della sorgente di ionizzazione superficiale per il progetto SPES*, Tesi di laurea magistrale, Università degli Studi di Padova.
- [3] S. Corradetti, *Produzione e caratterizzazione di carburi porosi per il progetto SPES*, Tesi di laurea specialistica, Università degli Studi di Padova.

Capitolo 5

Porting del pacchetto software Ansys[®] sull'IGI Grid Portal

5.1 Introduzione

La GRID è una rete planetaria che unisce e utilizza contemporaneamente la potenza di calcolo e la memoria di decine di migliaia di differenti computer sparsi nel mondo. È stata sviluppata per immagazzinare e rendere accessibili i dati prodotti dall'acceleratore LHC: 15 milioni di gigabyte ogni anno, pari ai dati immagazzinati in una pila di CD di 20 mila metri. Coinvolge 140 centri di calcolo distribuiti in 33 paesi e ha una potenza di calcolo pari a quella di 100000 computer (vedi figura 5.1). L'INFN è uno dei promotori principali del progetto Grid e ospita al CNAF di Bologna uno degli 11 nodi del primo livello della Grid (vedi figura 5.2).

In altre parole, la GRID (Grid computing) è un'infrastruttura di calcolo distribuito, utilizzata per l'elaborazione di grandi quantità di dati, mediante l'uso di una vasta quantità di risorse; quella italiana prende il nome di Infrastruttura Grid Italiana (IGI). Alla base c'è la necessità della condivisione coordinata di risorse all'interno di una dinamica e multi-istituzionale organizzazione virtuale (Virtual Organization, VO). La condivisione non è limitata solo allo scambio dei file, ma si estende all'accesso diretto a computer, a software e in generale a tutto l'hardware necessario alla risoluzione di un problema scientifico, ingegneristico o industriale.

A tale scopo è stato sviluppato, presso il CNAF di Bologna, un portale di

5. PORTING DEL PACCHETTO SOFTWARE ANSYS® SULL'IGI GRID PORTAL

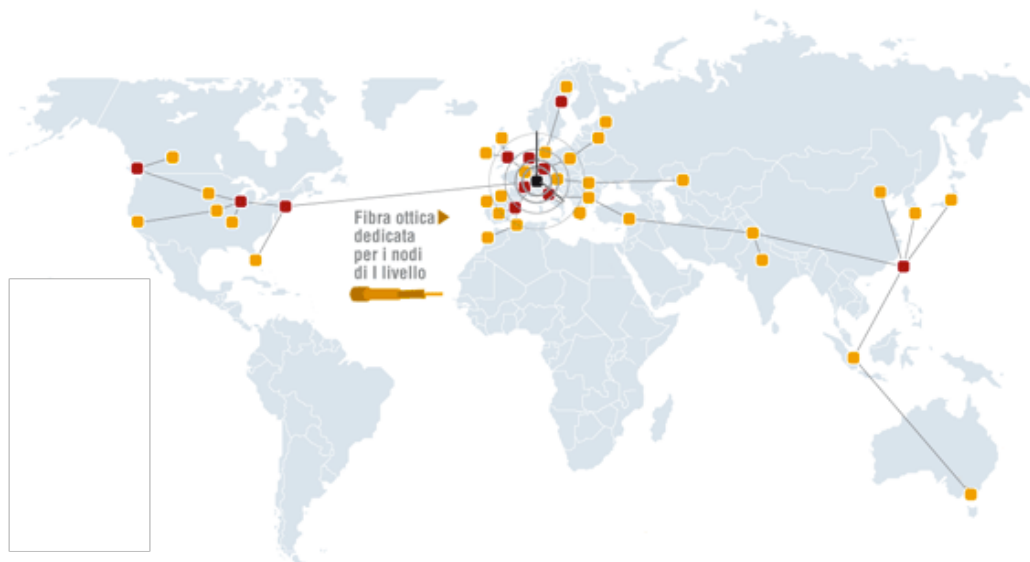


Figura 5.1: Nodi della GRID.



Figura 5.2: Nodi della GRID in Italia.

accesso alla Grid per la sottomissione di Job e l'utilizzo dei suoi servizi, in modo trasparente e tutto direttamente dall'interfaccia del portale. In particolare, per i problemi ingegneristici è stato implementato il porting del pacchetto software Ansys® sull'IGI web portal.

Un'interfaccia web per eseguire la simulazione sfruttando i servizi messi a disposizione da Grid è stata assicurata da un portlet dedicato dell'IGI web portal, che è un gateway potente e facile da usare per il calcolo distribuito e la memorizzazione delle risorse. In un tipico caso d'uso, l'utente fornisce i file di input iniziali e i parametri di configurazione per poi attendere i risultati fino a quando il calcolo è terminato. Questo processo può richiedere diverse ore, anche giorni utilizzando le risorse disponibili per eseguire questa applicazione. Un aspetto fondamentale delle simulazioni lunghe è la verifica dell'evoluzione dei calcoli in fase di running, quindi è stata creata una struttura che sfrutta i Grid Storage Elements per rendere i file.log temporanei disponibili per la consultazione in fase di running.

Nel paragrafo successivo verrà illustrata la procedura per registrarsi al portale.

5.2 Registrazione al portale

5.2.1 Richiesta certificato INFN CA

Prima di procedere con la registrazione al portale è necessario avere:

- un account e-mail INFN;
- carta d'identità valida;
- codice fiscale.

In secondo luogo è necessario possedere il certificato INFN CA. Per ottenerlo, l'utente deve recarsi dalla propria Registration Authority, che, dopo l'accertamento della sua identità, gli fornirà un codice identificativo (da inserire nel campo ID) via e-mail; successivamente deve collegarsi al sito internet:

<https://security.fi.infn.it/CA/mgt/restricted/ucert.php>, riempire tutti i campi (vedi figura 5.3), lasciando di default il *KeySize* su Alta efficacia e cliccare "Sottometti richiesta". Tra l'autorizzazione della Registration Authority e la richiesta di certificato non devono trascorrere più di 48 ore.

5. PORTING DEL PACCHETTO SOFTWARE ANSYS[®] SULL'IGI GRID PORTAL

| | |
|----------------------------|-------------------------------------|
| Organizzazione: | <input type="text"/> |
| Nome e Cognome: | <input type="text"/> |
| E-mail: | <input type="text"/> |
| KeySize: | Alta efficacia <input type="text"/> |
| ID: rilasciato dalla RA | <input type="text"/> |

Figura 5.3: Richiesta certificato.

La procedura di richiesta certificato memorizza la chiave privata nel database del browser che si sta utilizzando (qui verrà utilizzato il browser Firefox). È quindi essenziale che il download del certificato avvenga con lo stesso browser, e che, nel frattempo, non siano stati fatti aggiornamenti che possano aver distrutto il database in questione. A firma avvenuta, tipicamente entro due giorni lavorativi, verrà inviato un messaggio di e-mail con le istruzioni per il download del certificato.

5.2.2 Registrazione VO (Virtual Organization)

Il passo successivo è la registrazione alla VO andando al sito internet:

<https://voms.cnaf.infn.it:8443/voms/gridit/>.

Cliccare su “Sono consapevole dei rischi”, poi “Aggiungi eccezione” e confermare (vedi figura 5.4).

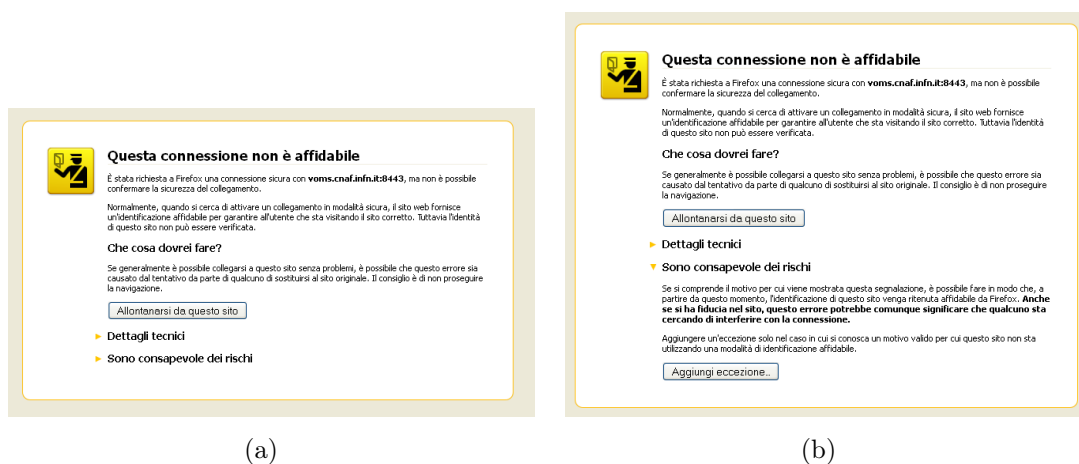


Figura 5.4

Dare “OK” all’identificazione tramite certificato, poi compilare i campi in figura 5.5, accettare le condizioni di utilizzo e premere “Submit”.

Your certificate subject (DN):
/C=IT/O=INFN/OU=Personal Certificate/L=LNL/CN=Marco Marin

The CA that issued your certificate:
/C=IT/O=INFN/CN=INFN CA

Given name:

Family name:

Institution:

Phone number:

Address:

Email address:

The VO AUP:

By registering with the Virtual Organization (the "VO") as a GRID user you shall be deemed to accept these conditions of use:

1. You shall only use the GRID to perform work, or transmit or store data consistent with the stated goals and policies of the VO of which you are a member and in compliance with these conditions of use.
2. You shall not use the GRID for any unlawful purpose and not (attempt to) breach or circumvent any GRID administrative or security controls. You shall respect copyright and confidentiality agreements and protect your GRID credentials (e.g. private keys, passwords), sensitive data and files.
3. You shall immediately report any known or suspected security breach or misuse of the GRID or GRID credentials to the incident reporting locations specified by the VO and to the relevant credential issuing authorities.
4. Use of the GRID is at your own risk. There is no guarantee that the GRID will be available at any time or that it will suit any purpose.
5. Logged information, including information provided by you for registration purposes, shall be used for administrative, operational, accounting, monitoring

I confirm I have read and agree with the terms expressed in the VO Acceptable Usage Policy document displayed above.

Figura 5.5

A questo seguirà la schermata:

voms admin for VO: gridit Current user: CN=Marco Marin

[Home](#) [Browse VO](#) [Configuration Info](#) [Request membership](#) [Other VOs on this server](#)

Confirmation required.

An email has been sent to you with instructions on how to proceed with the registration for the gridit VO.
Please follow the instructions before the following date:

10/29/2012 03:34:11 PM CET

or your request will be discarded by voms-admin.

Figura 5.6

5. PORTING DEL PACCHETTO SOFTWARE ANSYS® SULL'IGI GRID PORTAL

Nella e-mail ricevuta confermare la richiesta cliccando sul link e seguirà:

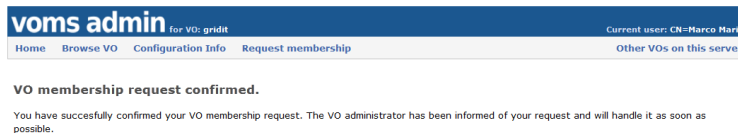


Figura 5.7

Successivamente arriverà l'e-mail da *VOMS Admin for VO gridit* con l'approvazione della richiesta di vo membership per VO gridit. (Potrebbe arrivare una e-mail con una richiesta di motivazione per la registrazione alla VO gridit; rispondere specificando che si è un tesista presso INFN-LNL progetto SPES e di volersi registrare al gruppo */gridit/ansys* per poter lanciare simulazioni con ANSYS).

Verificare al link <https://voms.cnaf.infn.it:8443/voms/gridit/> di essere registrati al gruppo */gridit/ansys*, in caso contrario procedere con la richiesta scegliendo */gridit/ansys* dal menù a tendina e cliccando su "Request membership" (vedi figura 5.8).

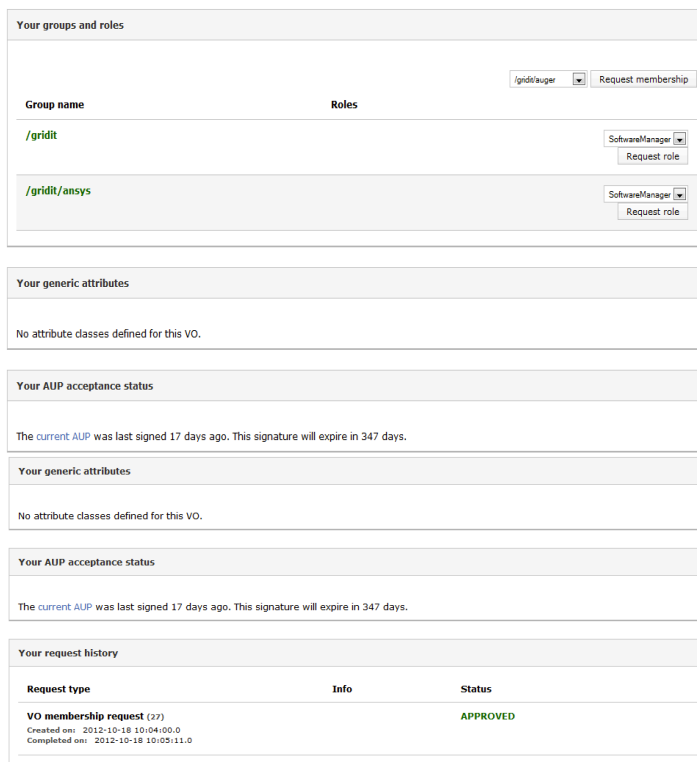


Figura 5.8

5.2.3 Registrazione al portale Grid

Per la registrazione al portale è necessario seguire la seguente procedura:

- Collegarsi al sito <https://portal.italiangrid.it/> e cliccare su “Register Now”.
- Per l'autenticazione è necessario appartenere ad una delle Organizzazione presenti nell'elenco: scegliere *INFN* se si è associati oppure *Università di Padova*, poi cliccare “Continua”.

The screenshot shows the 'IGP | IGI GRID portal' header with the 'idem garr aai' logo. The main heading is 'Seleziona la tua Organizzazione di Appartenenza'. Below it, a note states 'E' necessario autenticarsi per poter accedere alla risorsa che si vuole utilizzare'. A text input field contains 'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare' and a 'Continua' button is to its right. A blue link at the bottom reads 'Oppure mostrami l'elenco di tutte le Organizzazioni di Appartenenza'.

This screenshot is identical to the previous one, but the text input field now contains 'Università di Padova'.

- Successivamente, nel caso si scelga *INFN* cliccare “X.509 Certificate” e poi “OK” sulla schermata di richiesta identificazione utente,

The screenshot shows the 'INFN AAI Identity Check' page. It features the INFN AAI logo, a language selector (Italian and English), and a login form with fields for 'Username:' and 'Password:' and a 'Login' button. To the right, there are two options: 'X.509 Certificate' with a key icon and 'Kerberos5 GSS-API' with a person icon. Below the login form, there are links for 'How to obtain an account for INFN-AAI' and 'Change or Reset Password - Retrieve Username'. A red warning message states: 'DO NOT BOOKMARK THIS PAGE! After login you will be redirected to cookie:d80d7241'. At the bottom, there is technical support information: 'Technical Support and Questions to aai-support@lists.infn.it' and 'This is WAWA (Widely Assorted Web Authenticator) by Dael Maselli, based on a SAML Identity Provider running simpleSAMLphp by Feide'.

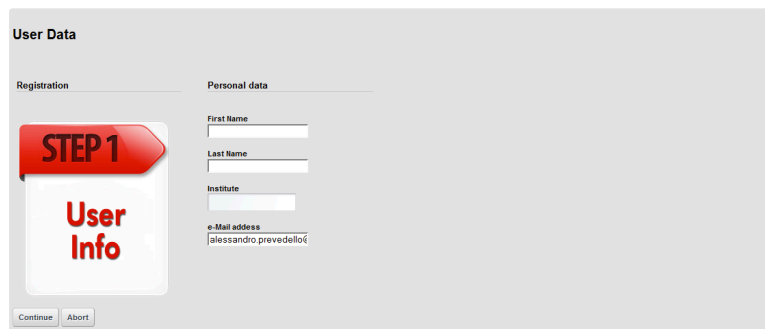
5. PORTING DEL PACCHETTO SOFTWARE ANSYS® SULL'IGI GRID PORTAL

mentre nel caso si scelga *Università di Padova* inserire *username* e *password* dell'università.



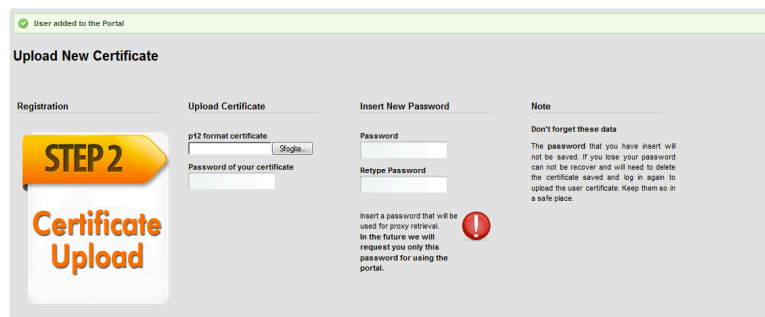
The screenshot shows the authentication page for the University of Padua. At the top left is the university's seal, and to its right is the text "UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA". Below this, the heading "AUTENTICAZIONE CENTRALIZZATA SINGLE SIGN ON" is displayed. The form includes a "Username" field with "mario.rossi" entered, a radio button selected for "@unipd.it" (with "@studenti.unipd.it" as an alternative), and a "Password" field. An "Accedi" button is located at the bottom of the form.

- Compilare i campi nella schermata sottostante e premere "Continue".



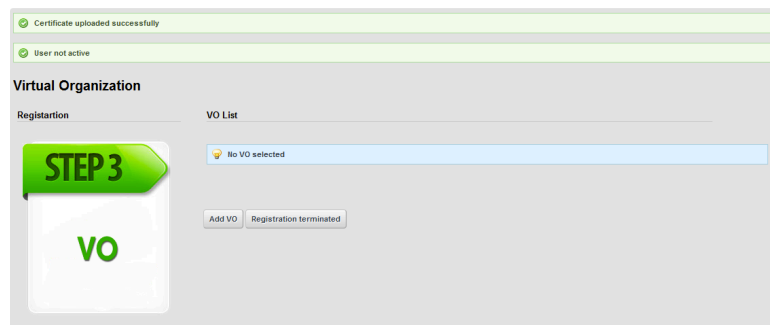
The screenshot shows the "User Data" registration form. A red arrow labeled "STEP 1" points to a box containing "User Info". The form is divided into "Registration" and "Personal data" sections. The "Personal data" section contains fields for "First Name", "Last Name", "Institute", and "e-Mail address" (with the example "alessandro.prevedello@"). "Continue" and "Abort" buttons are at the bottom.

- Caricare il certificato, inserire la "password" del certificato e una "nuova password" che verrà utilizzata per aggiornare il proxy.

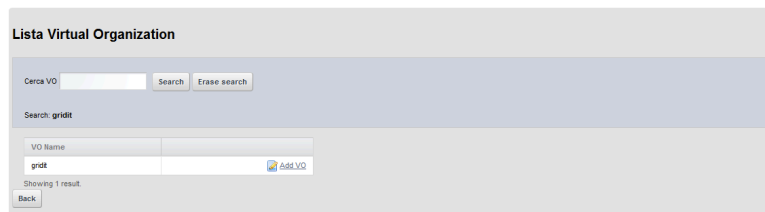


The screenshot shows the "Upload New Certificate" form. A green banner at the top indicates "User added to the Portal". A yellow arrow labeled "STEP 2" points to a box containing "Certificate Upload". The form has four sections: "Registration", "Upload Certificate" (with a "p12 format certificate" field and a "Sfoglia..." button, and a "Password of your certificate" field), "Insert New Password" (with "Password" and "Retype Password" fields), and "Note". The note section contains a warning icon and text: "Don't forget these data. The password that you have insert will not be saved. If you lose your password can not be recover and will need to delete the certificate saved and log in again to upload the user certificate. Keep them so in a safe place." Below this, it says: "Insert a password that will be used for proxy retrieval. In the future we will request you only this password for using the portal."

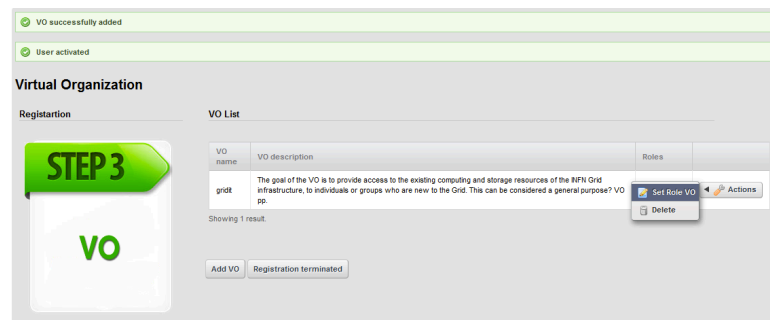
- Cliccare su "Add VO".



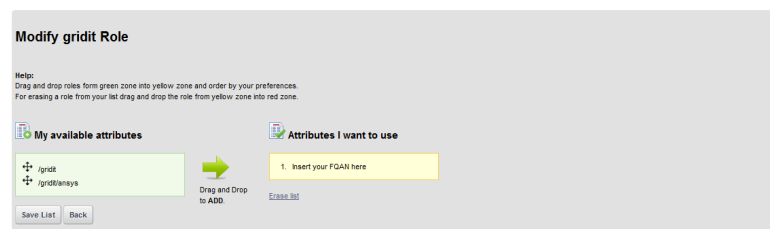
- Cercare *gridit* e premere “Add VO”.



- Cliccare su “Actions” e “Set Role VO”.

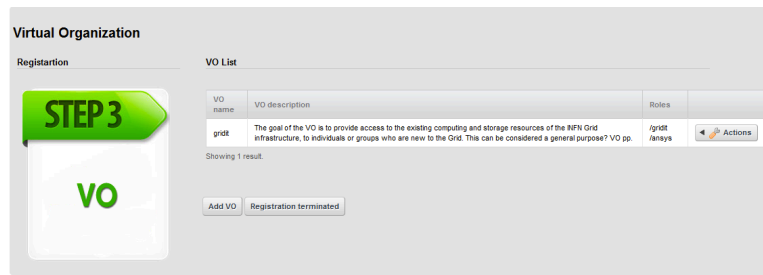


- Trascinare */gridit/ansys* nello spazio a destra in figura e premere “Save list”.



- Sulla schermata successiva premere “Registration terminated”.

5. PORTING DEL PACCHETTO SOFTWARE ANSYS® SULL'IGI GRID PORTAL



- Spedire una e-mail all'indirizzo *igi-portal-admin@lists.italiangrid.it* per richiedere l'iscrizione al gruppo Ansys.
- Ora è possibile lanciare i Job dal portale collegandosi al sito:
https://portal.italiangrid.it/group/ansys1.

5.3 Come avviene lo stop ed il rilancio di una analisi

Nei siti della Grid, è concesso un tempo di utilizzo della stessa CPU limitato a 24 ore. Questo richiede la necessità di interrompere la simulazione in modo corretto dopo 23 ore, per poi riavviarla. La corretta interruzione avviene mediante uno script che esegue lo stop della simulazione. Il riavvio del calcolo è gestito da un altro script a seguire:

```
FINISH
RESUME
/POST1
SET, LAST
*GET, nsub, ACTIVE, 0, SET, SBST
*GET, nloa, ACTIVE, 0, SET, LSTP
/SOLU
ANTYPE, TRANS, REST, nloa, nsub-1, CONTINUE
OUTRES, NSOL, ALL
VFOPT, READ
SOLVE
```

Il comando *RESUME* richiama il database precedentemente calcolato, l'istruzione *SET, LAST* carica l'ultimo substep. Successivamente si attribuisce ai parametri *nsub* e *nload* il numero corrente di substep e di load step con i comandi **GET, nsub, ACTIVE, 0, SET, SBST* e **GET, nload, ACTIVE, 0, SET, LSTP*, rispettivamente. Nell'ambiente */SOLU* si fa continuare la simulazione transitoria dall'ultimo loadstep e penultimo substep con il comando *ANTYPE, TRANS, REST, nload, nsub-1, CONTINUE*; si imposta la memorizzazione dei risultati per ogni substep mediante *OUTRES, NSOL, ALL*, con *VFOPT, READ* si leggono i fattori di vista già calcolati, infine si risolve con *SOLVE*.

5.4 Tutorial per il lancio di un'analisi

Dopo essersi collegarsi al sito: <https://portal.italiangrid.it/group/ansys1> ed aver effettuato il *Login*, prima di eseguire qualsiasi operazione sul portale è necessario aggiornare il proxy inserendo la propria *password*; la sua durata si può impostare fino ad un massimo di 7 giorni.

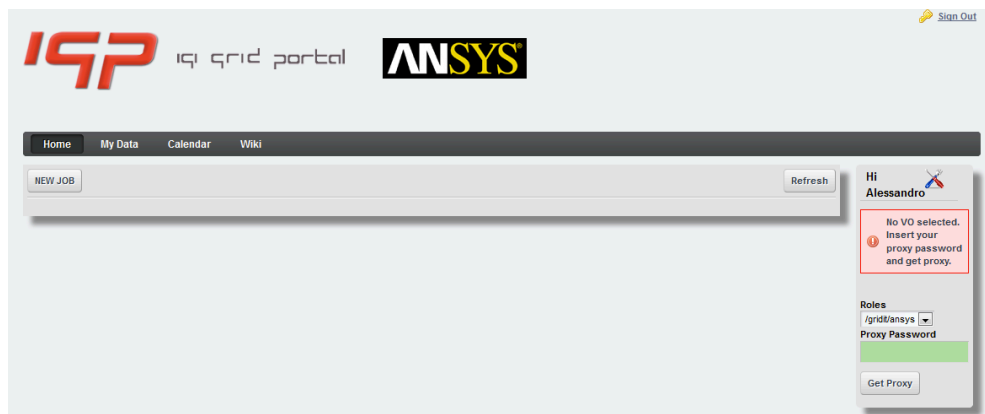


Figura 5.9: Aggiornamento proxy

L'esecuzione di un Job richiede lo script APDL e un archivio in formato nome_archivio.tar contenente tutti i file utilizzati per l'analisi (macro, geometrie cad, etc.); dopo aver preparato questi file è necessario svolgere la seguente procedura di immissione:

1. Cliccare sul tasto "New Job": compare l'interfaccia in figura 5.10
2. Nel campo "Insert APDL" localizzare il listato APDL, quindi caricarlo cliccando sul tasto "Upload".

5. PORTING DEL PACCHETTO SOFTWARE ANSYS® SULL'IGI GRID PORTAL

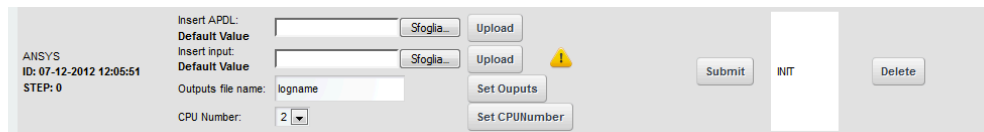


Figura 5.10: *Interfaccia di input*

3. Nel campo “*Insert input*” va localizzato l’archivio in formato .tar contenete tutti i file richiamati nell’APDL; caricare l’archivio cliccando su “*Upload*”.
4. Scegliere un nome per l’archivio che conterrà i file di risultato dell’analisi, quindi digitarlo nel campo “*Outputs file name*” e cliccare su “*Set Outputs*”.
5. Nel campo “*CPU Number*” è possibile scegliere il numero di core utilizzati in parallelo per il calcolo della soluzione; si consiglia di lasciare il valore preimpostato. Attualmente sono complessivamente disponibili 16 core.
6. Per avviare l’analisi cliccare sul tasto “*Submit*”: lo stato passa da INIT a SUBMITTED, quindi a RUNNING oppure ERROR.

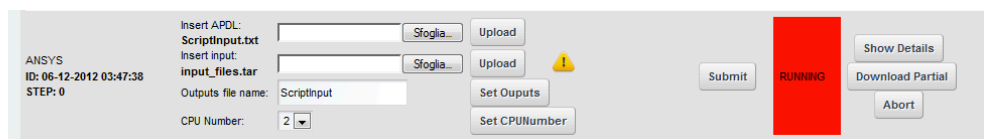


Figura 5.11: *Stato RUNNING*

Durante la risoluzione è possibile monitorare la convergenza del calcolo cliccando sul tasto “*Download Partial*”. Le informazioni sulla gestione del Job si trovano nella schermata che appare cliccando su “*Show Detail*”, quindi “*Show Instances*” per la (ri)sottomissione d’interesse. Per l’interruzione di un Job, senza la possibilità di risottometterlo successivamente, cliccare su “*Abort*”.

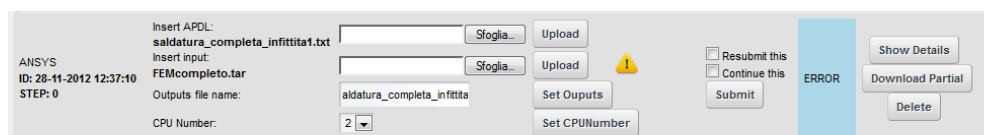


Figura 5.12: *Stato ERROR*

In caso di errore è possibile:

- continuare il Job selezionando l’opzione “*Continue this*” e cliccare su “*Submit*”, la simulazione ripartirà dall’ultimo substep completato con successo;

- ricominciare dal principio (opzione “*Resubmit this*”).

Quando il problema giunge a convergenza lo stato diventa “*FINISHED*”. Cliccando su “*Download Output*” viene scaricato l’archivio contenente i file necessari al postprocessing, mentre con “*Show details*” si visualizzano i dettagli delle risottomissioni effettuate.

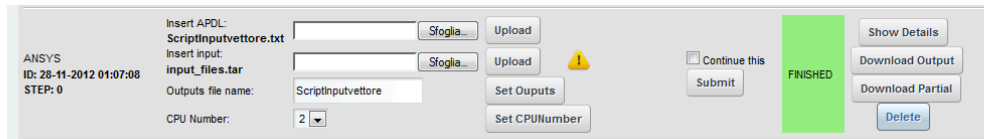


Figura 5.13: Stato *FINISHED*

5.5 Accortezze da adottare nei listati di codice APDL di una analisi

Nel preparare i listati APDL è necessario considerare che il portale IGI esegue Ansys® su una piattaforma Linux mediante degli script che richiedono alcuni accorgimenti descritti a seguire.

- Le macro devono essere richiamate con l’istruzione in formato esteso **USE, nome_macro.mac*.
- Il modello deve essere concepito in modo che i carichi siano definiti su elementi geometrici (per esempio i keypoints) e non sui nodi degli elementi.
- È possibile lanciare simulazioni in cui sono definiti più loadsteps, purché arrivino a convergenza prima della risottomissione (cioè prima di 23 ore); infatti lo script per la risottomissione automatica attualmente non prevede l’istruzione *LSSOLVE*. In alternativa, è possibile applicare un carico progressivo utilizzando un approccio vettoriale (vedi paragrafo 5.5.1).
- Posizionare il comando *SAVE* prima e dopo il comando *SOLVE* senza specificare il *Jobname*, infatti il nome deve essere quello preimpostato “*file*”.
- Per analisi pesanti, cioè che richiedono più di 23 ore, si consiglia di introdurre l’istruzione “*OUTRES,NSOL,ALL*” in modo da salvare i risultati al

temine di ogni *substep*. Questi verranno automaticamente caricate nell'auto risottomissione del *Job*. È buona norma adottare questi accorgimenti per ogni analisi.

- È necessario assegnare sempre un tempo per l'applicazione del carico (istruzione *TIME*), tale valore deve essere numerico e non rappresentato da una variabile, pena l'impossibilità di risottomissione automatica dell'analisi e conseguente comparsa dello stato di *ERROR* (vedi Figura 5.12). Nel caso di analisi non transitorie è necessario inserire l'istruzione *TIME,1*.

Nei due paragrafi successivi verranno riportati due esempi di listati ADPL riferiti alle tematiche affrontate nel progetto SPES: analisi accoppiata elettro-termica e analisi puramente strutturale.

5.5.1 Analisi di tipo elettro-termico

A titolo di esempio si riporta il listato delle istruzioni APDL per una simulazione nel campo elettrico e termico accoppiati. L'oggetto dell'analisi è la sorgente di ionizzazione MK1. Le istruzioni APDL di colore rosso evidenziano l'applicazione degli accorgimenti precedentemente descritti.

```
!-----initializing-----
FINISH
/CLEAR, START
/TITLE, MK1
/CONFIG,NRES,100000 !maximum number of
!substeps

!-----parameters-----
T0=25 !temperature constraint [°C]
I_LINE=300 !line electric current [A]

!-----geometry import-----
/AUX15

IOPTN,IGES,NODEFEAT !no defeaturing
IOPTN,MERG,YES !automatic merging of entities
IOPTN,SOLID,YES !solid is created automatically
IOPTN,SMALL,YES !small areas are deleted
IOPTN,GTOLER,0.00001 !merging tolerance
```

5.5 ACCORTEZZE DA ADOTTARE NEI LISTATI DI CODICE APDL DI UNA ANALISI

```

IGESIN,'is_support','igs'          !is_support import
IGESIN,'ion-source_main_clamp','igs' !ion-source_main_clamp import
IGESIN,'is_screen','igs'          !is_screen import
IGESIN,'is_hot_cavity','igs'      !is_hot_cavity import
IGESIN,'is_bush','igs'           !is_bush import
IGESIN,'transfer_line','igs'      !transfer_line import
IGESIN,'electrical_connection','igs' !electrical_connection import
IGESIN,'electrical_conn_support','igs' !electrical_conn_support
IGESIN,'ion_source_clamp','igs'   !ion_source_clamp import

FINISH

!-----model definition-----
/PREP7                             !enters the model creation preprocessor

*USE,M26Ta.mac                     !tantalum macro
*USE,M27W.mac                     !tungsten macro
*USE,M28Cu.mac                    !copper macro
*USE,M30Re.mac                    !rhenium macro

ET,1,SOLID226                      !3D element with element with multi-field formulation
KEYOPT,1,1,110                    !specification of thermal-electric capability for ET 1

VGLUE,ALL                          !generates new volumes by gluing volumes

NUMCMP,VOLU                       !compresses volume numbers
NUMCMP,AREA                       !compresses area numbers
NUMCMP,LINE                       !compresses line numbers
NUMCMP,KP                         !compresses keypoint numbers

ALLSEL                             !selects all entities with a single command
VLSCALE,ALL,,0.001,0.001,0.001,,0,1 !scaling from "mm" to "m"

!ion-source_main_clamp meshing
VSEL,S,,5                          !selects a subset of volumes
ALLSEL,BELOW,VOLU                 !selects all entities with a single command
MAT,Cu                             !sets the element material attribute pointer
TYPE,1                             !sets the element type attribute pointer (SOLID69)
MSHAPE,1,3D                       !specifies the element shape (tetrahedrons)
AESIZE,ALL,0.0050                 !element size to be meshed onto areas
MSHKEY,0                          !specifies free meshing method
VMESH,ALL                          !generates nodes and volume elements within volumes
ALLSEL                             !selects all entities with a single command

!is_screen meshing
VSEL,S,,1                          !selects a subset of volumes
ALLSEL,BELOW,VOLU                 !selects all entities with a single command
MAT,Ta                             !sets the element material attribute pointer
TYPE,1                             !sets the element type attribute pointer (SOLID69)
MSHAPE,1,3D                       !specifies the element shape (tetrahedrons)
MSHKEY,0                          !specifies free meshing method
AESIZE,ALL,0.0040                 !element size to be meshed onto areas
VMESH,ALL                          !generates nodes and volume elements within volumes
ALLSEL                             !selects all entities with a single command

```

5. PORTING DEL PACCHETTO SOFTWARE ANSYS® SULL'IGI GRID PORTAL

lis_support meshing

```
VSEL,S,,9
ALLSEL,BELOW,VOLU
MAT,Ta
TYPE,1
MSHAPE,1,3D
MSHKEY,0
AESIZE,ALL,0.0022
VMESH,ALL
ALLSEL
```

lis_hot_cavity meshing

```
VSEL,S,,4
ALLSEL,BELOW,VOLU
MAT,W
TYPE,1
MSHAPE,1,3D
MSHKEY,0
AESIZE,ALL,0.0010
VMESH,ALL
ALLSEL
```

lis_bush meshing

```
VSEL,S,,6
ALLSEL,BELOW,VOLU
MAT,Ta
TYPE,1
MSHAPE,1,3D
MSHKEY,0
AESIZE,ALL,0.0018
VMESH,ALL
ALLSEL
```

ltransfer_line meshing

```
VSEL,S,,7
ALLSEL,BELOW,VOLU
MAT,Ta
TYPE,1
MSHAPE,1,3D
MSHKEY,0
AESIZE,ALL,0.0022
VMESH,ALL
ALLSEL
```

lelectrical_connection meshing

```
VSEL,S,,8
ALLSEL,BELOW,VOLU
MAT,Ta
TYPE,1
MSHAPE,1,3D
MSHKEY,0
```

5.5 ACCORTEZZE DA ADOTTARE NEI LISTATI DI CODICE APDL DI UNA ANALISI

```

AESIZE,ALL,0.0026
VMESH,ALL
ALLSEL

!electrical_conn_support meshing
VSEL,S,,2
ALLSEL,BELOW,VOLU
MAT,Ta
TYPE,1
MSHAPE,1,3D
MSHKEY,0
AESIZE,ALL,0.0035
VMESH,ALL
ALLSEL

!ion_source_clamp meshing
VSEL,S,,3
ALLSEL,BELOW,VOLU
MAT,Cu
TYPE,1
MSHAPE,1,3D
MSHKEY,0
AESIZE,ALL,0.0050
VMESH,ALL
ALLSEL

ALLSEL, ALL           !selects all entities
VSEL,R,MAT,,Ta       !reselects a subset of volumes of a specific material
ALLSEL,BELOW,VOLU   !selects all entities below the selected volumes
SFA,ALL,,RDSF,-Ta,1 !specifies surface radiation as surface loads

ALLSEL, ALL
VSEL,R,MAT,,W
ALLSEL,BELOW,VOLU
SFA,ALL,,RDSF,-W,1

ALLSEL, ALL
VSEL,R,MAT,,Cu
ALLSEL,BELOW,VOLU
SFA,ALL,,RDSF,-Cu,1

ALLSEL, ALL
VSEL,R,MAT,,Re
ALLSEL,BELOW,VOLU
SFA,ALL,,RDSF,-Re,1

!removal from the radiation problem of the surfaces of mutual contact
ALLSEL, ALL
*GET,nvolu,VOLU,0,COUNT
nn=0
*DO,i,1,nvolu
nn=vlnext(nn)
VSEL,ALL

```

5. PORTING DEL PACCHETTO SOFTWARE ANSYS® SULL'IGI GRID PORTAL

```
VSEL,U,VOLU,,nn
ALLSEL,BELOW,VOLU
VSEL,S,VOLU,,nn
ASLV,R
SFADELE,ALL,,RDSF
ALLSEL,ALL
*ENDDO

!thermal initial conditions
TUNIF,T0 !assigns a uniform temperature to all nodes [°C]

!is_screen temperature DOF constraint
DA,111,TEMP,T0 !defines DOF constraints on areas [°C]
DA,124,TEMP,T0
DA,138,TEMP,T0
DA,151,TEMP,T0

!ion-source_main_clamps temperature DOF constraint
DA,10,TEMP,T0
DA,11,TEMP,T0
DA,12,TEMP,T0

!is_screen voltage DOF constraint
DA,111,VOLT,0 !defines DOF constraints on areas [V]
DA,124,VOLT,0
DA,138,VOLT,0
DA,151,VOLT,0

!power generation - Joule effect
ASEL,S,AREA,,8,8,1 !selects a subset of areas
ALLSEL,BELOW,AREA !selects all entities below the selected areas
NSLA,S,1 !selects those nodes associated with the selected areas
CP,3,VOLT,ALL !defines a set of coupled degrees of freedom
ni=kpnext(0) !next selected kp having a number greater than "x"
FK,ni,AMPS,I_LINE !force loads (el. current) at the master kp "ni"
ALLSEL

!space temperature definition (open enclosure)
SPCTEMP,1,T0 !defines a free-space ambient temperature

!defining Solution Options
STEF,5.67e-8 !Stefan-Boltzmann constant [W/(m2 * K4)]
RADOPT,0.5,0.006,,5000 !Gauss-Seidel Radiosity Solver options
TOFFST,273.15 !temperature offset from absolute to °C

!defining View Factor Options
HEMIOPT,100 !options for Hemicube view factor calculation
VFOPT,OFF !specifies options for view factor file

FINISH
/REPLOT

!-----solver-----
```

5.5 ACCORTEZZE DA ADOTTARE NEI LISTATI DI CODICE APDL DI UNA ANALISI

```
/SOLU                                !enters the solution processor  
  
SOLCONTROL,ON                       !optimized nonlinear solution defaults  
ANTYPE,TRANS                         !transient analysis valid for all DOF  
AUTOTS,ON                             !specifies to use automatic time stepping  
KBC,1                                  !specifies stepped loading within a load step  
DELTIM,0.0001,0.00005,100          !time step sizes to be used for this l.s.  
OUTRES,NSOL,ALL                     !save the nodal DOF solution for every substep  
TIME,4000                             !sets the time for a load step  
SAVE,,,ALL                           !saves all current database information  
SOLVE                                  !starts a solution  
SAVE,,,ALL  
FINISH
```

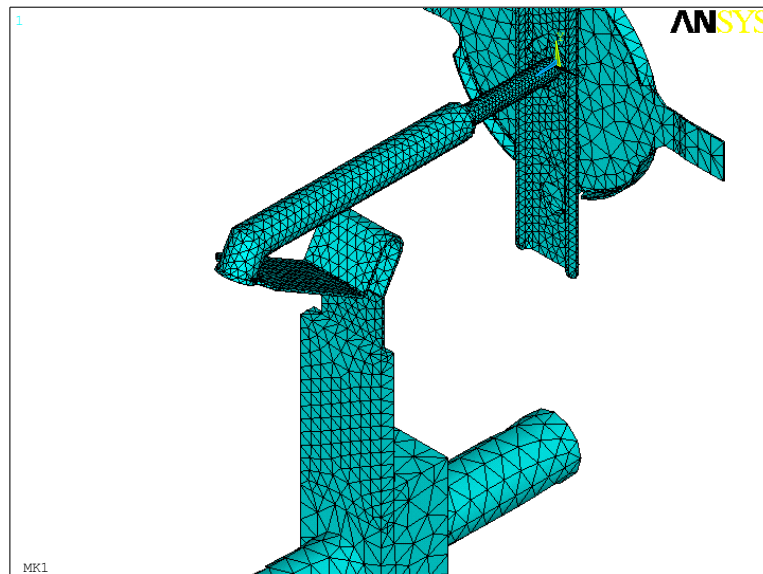


Figura 5.14: *Mesh*

5. PORTING DEL PACCHETTO SOFTWARE ANSYS® SULL'IGI GRID PORTAL

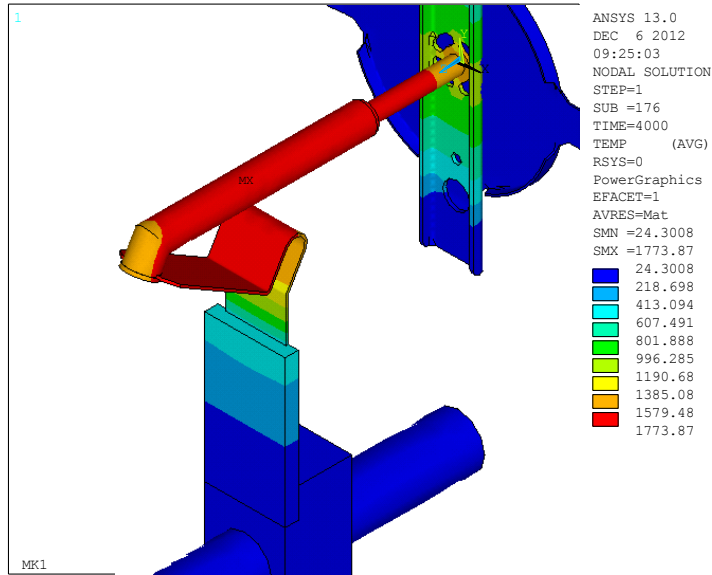


Figura 5.15: Rappresentazione delle temperature [°C] risultanti dall'analisi elettro-termica

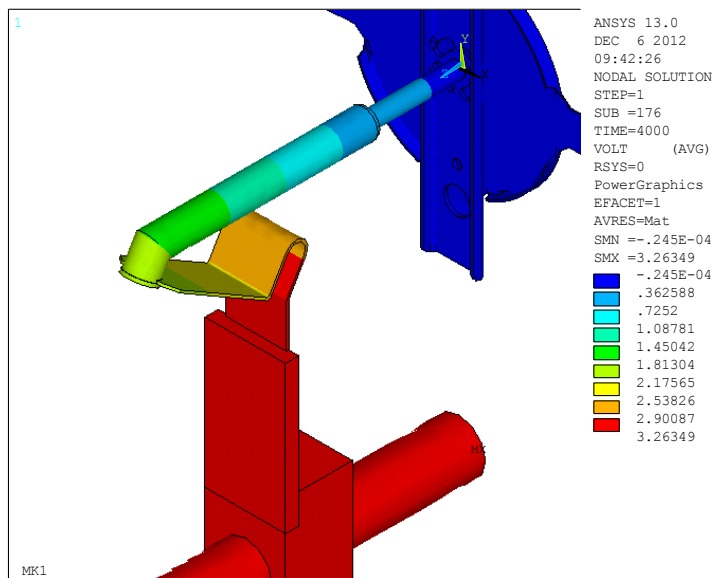


Figura 5.16: Rappresentazione della tensione elettrica [V] risultante dall'analisi elettro-termica

5.5.2 Analisi di tipo strutturale

In questo caso si illustrano le peculiarità del listato APDL per una simulazione puramente strutturale. La geometria e la mesh sono le medesime dell'analisi elettro-termica. In questo caso l'analisi riceve in input i carichi termici risultanti dalla simulazione elettro-termica. L'input APDL è molto simile al precedente; vengono di seguito riportate solo le istruzioni che si differenziano da quelle della precedente analisi elettro-termica.

```

...
ET,1,SOLID226  !3D element with element with multi-field formulation
KEYOPT,1,1,1  !structural capability for ET 1
...
[meshing]
...
!is_screen temperature DOF constraint
DA,111,ALL  !defines DOF constraints on areas
DA,124,ALL
DA,138,ALL
DA,151,ALL

!ion-source_main_clamps temperature DOF constraint
DA,8,ALL

!temperatures from the results file as body force loads
LDREAD,TEMP,LAST,,0,file,rst  !last data set

FINISH
/REPLOT

!-----solver-----
/SOLU  !enters the solution processor

TIME,1

SAVE,,,ALL  !saves all current database information
SOLVE      !starts a solution
SAVE,,,ALL

FINISH

```

I risultati ottenuti sono puramente teorici, infatti è stata fatta l'ipotesi di elasticità lineare dei materiali. Un modello elastoplastico permetterebbe di ottenere delle tensioni più realistiche, tuttavia ciò esula dallo scopo di questo capitolo.

5. PORTING DEL PACCHETTO SOFTWARE ANSYS® SULL'IGI GRID PORTAL

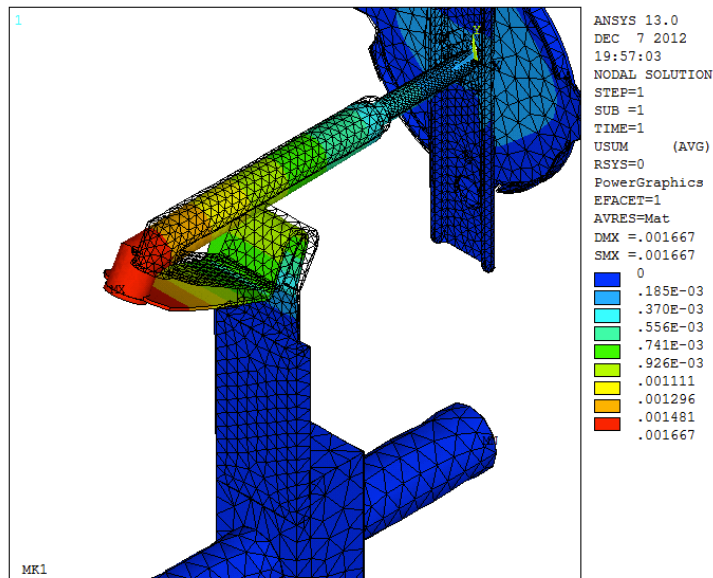


Figura 5.17: *Spostamento somma [m] risultante dall'analisi strutturale*

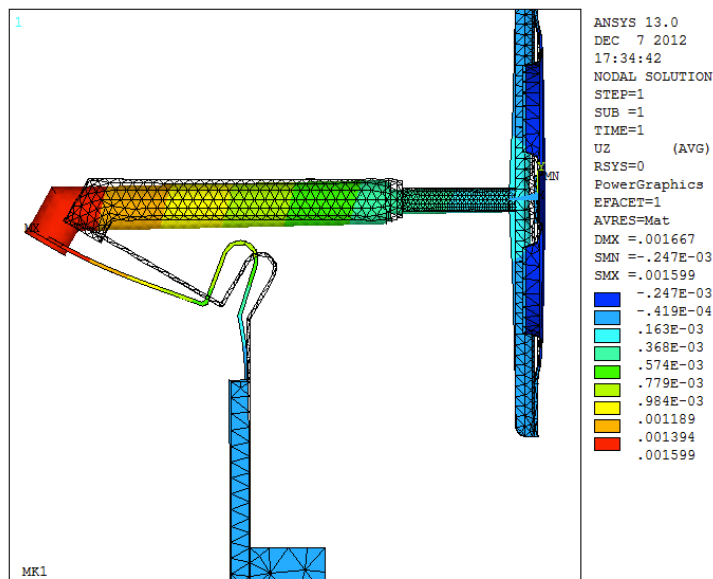


Figura 5.18: *Spostamento in direzione z [m] risultante dall'analisi strutturale*

5.6 Conclusioni

In questo capitolo è stata presentata la rete Grid e ci si è soffermati sulla sottomissione di analisi utilizzando il software Ansys® sull'IGI web portal, che richiede la registrazione per poter essere utilizzato.

In particolare, l'interfaccia è user-friendly grazie agli script precaricati per la sottomissione e risottomissione dei Job. Inoltre, a differenza dell'utilizzo tradizionale di Ansys®, per l'utilizzo di Grid sono necessari alcuni accorgimenti e diversi approcci (carico vettoriale e carico sui keypoint) nello stilare i listati APDL. Per concretizzare queste accortezze sono stati presi in considerazione due esempi illustrativi.

In conclusione è stato evidenziato che l'infrastruttura IGI è un valido strumento in termini di tempo e produttività, permettendo anche di semplificare la gestione delle licenze.

Bibliografia

- [1] <http://wikipedia.org>.
- [2] <https://wiki.italiangrid.it/twiki/bin/view/UserSupport/PortingDiSwANSYSPerSPELNL>.
- [3] <https://portal.italiangrid.it/group/ansys1/home>.
- [4] D. Michelotto, *Analisi e sviluppo di Web Service orientati alla costruzione di servizi e portali Web per l'autenticazione, l'autorizzazione e la gestione di applicazioni scientifiche in ambiente Grid*, Tesi di laurea specialistica, Università degli Studi di Ferrara.

Conclusioni

Nel presente lavoro di tesi è stato studiato ed ottimizzato il sistema “target-sorgente di ionizzazione”.

In primo luogo è stato risolto il problema della formazione del circuito parallelo nella scatola in grafite, al fine di ottenere temperature più elevate sul riscaldatore. Prima di arrivare alla configurazione definitiva del target, sono stati creati e testati quattro prototipi:

- dal *Prototipo 1*, ottenuto adattando la scatola in grafite originale all'attuale riscaldatore in Ta, è stato dedotto che l'idea di separare assialmente la scatola era la strada giusta da seguire per risolvere il problema;
- il *Prototipo 2*, ottenuto dal target attuale tagliandone la parte iniziale e sostituendola con i primi tre anelli distanziatori della scatola originale, ha portato a risultati poco soddisfacenti in quanto le temperature raggiunte dal riscaldatore sono diminuite rispetto al prototipo precedente;
- nel *Prototipo 3* è stato diviso in tre parti solo il pezzo superiore della scatola, mantenendo inalterato quello inferiore, ma tale modifica non ha risolto il problema del circuito parallelo, in quanto le temperature sono rimaste ai livelli del target attuale;
- con il *Prototipo 4*, costruito utilizzando i primi otto anelli separatori della scatola originale e la parte finale della scatola del target attuale, il problema è stato definitivamente risolto.

Infine è stata accuratamente formalizzata la geometria del target definitivo sulla base del *Prototipo 4*, completo del sistema di fissaggio al riscaldatore per impedirne lo spostamento sia di tipo assiale che rotazionale.

In secondo luogo è stato ottimizzato il collegamento attuale tra la linea di trasferimento ed il riscaldatore saldandoli tra loro anziché utilizzare un accoppiamento per interferenza. Per far ciò si è dovuto accettare una saldatura parziale (non completa) tra la linea di trasferimento e la connessione elettrica, quindi è stato eseguito uno studio FEM locale per capire se tale saldatura parziale potesse influenzare la distribuzione della temperatura o, a causa di un suo aumento locale, portare al distacco dei due componenti. Da tale studio è emerso che la saldatura non completa, può, in questo caso, essere utilizzata senza particolari problemi. Successivamente, dopo aver riscontrato che le barre di centraggio tendevano a deformarsi, sono state ottimizzate utilizzando il tungsteno invece del tantalio per la parte finale. È stata inoltre effettuata uno studio FEM per verificare l'ininfluenza del sistema di allineamento sulla temperatura della sorgente.

L'efficacia di queste modifiche è poi stata confermata da vari test sperimentali, durante i quali sono state anche rilevate le temperature lungo la hot cavity e la transfer line per poi confrontarle con quelle ottenute dal modello FEM.

Per concludere sono stati introdotti i test di effusione ed eseguiti i test termici preliminari utilizzando il front-end, atti a preparare dal punto di vista termico l'apparato sperimentale.

Inoltre, nel quinto capitolo, è stata presentata la rete Grid soffermandosi sulla sottomissione di analisi utilizzando il software Ansys[®] sull'IGI web portal, di cui ci si è serviti per effettuare le analisi FEM esposte nel presente lavoro.

Nel prossimo futuro saranno svolti una serie di test di effusione presso i Laboratori Nazionali di Legnaro, con lo scopo di calcolare e confrontare l'efficienza di rilascio per ogni posizione dei dischi in grafite, ottenendo dei dati significativi sulle modalità di rilascio di un target costituito da dischi separati.

Appendice A

Misure di temperatura in alto vuoto mediante pirometri ad infrarosso

A.1 Introduzione

Per misurare le temperature dei componenti presenti all'interno della camera in alto vuoto si utilizzano pirometri ad infrarosso bicolore. Si tratta di uno strumento in grado di effettuare misure senza contatto; la temperatura viene monitorata in modo continuo da un sensore sensibile all'energia irradiata dagli oggetti nel campo degli infrarossi.

I pirometri impiegati utilizzano un doppio sensore (*dual detector assembly*) che misura la temperatura dal confronto del livello di radiazione (nel campo dell'infrarosso) in due diverse bande di lunghezza d'onda ($0.8 \div 1.05 \mu m$ e $1.0 \div 1.1 \mu m$); la temperatura letta è basata sul rapporto tra due segnali provenienti da queste bande.

Le operazioni di misura mediante l'impiego di pirometri, sono possibili grazie alla presenza di finestre in Kodial (un vetro borosilicato) che offrono una banda di trasmissione ottica che si estende dal visibile all'infrarosso, cioè in un range di lunghezza d'onda di trasmissione ottimale di $0.4 \div 2 \mu m$. In figura A.1 è riportato un esempio di finestra Kodial utilizzata per il rilevamento della temperatura del riscaldatore.



Figura A.1: Esempio di finestra Kodial.

A.2 Alterazione delle misure di temperatura e soluzione al problema

La lettura del pirometro è influenzata da vari fattori, tra i quali ci sono le impurità depositate sulla superficie delle finestre, che possono essere fonte di errore.

Durante gli ultimi test riportati nel paragrafo 2.5, sulla finestra Kodial laterale si è formato un alone di colore scuro, probabilmente dovuto al deposito di materiale sublimato all'interno della camera, favorito anche dal raffreddamento della finestra per mezzo di aria compressa (vedi figura A.2).

Questo alone alterava il valore di temperatura rilevato dal pirometro, il quale misurava una temperatura più bassa rispetto a quella reale.

Infatti, osservando i grafici delle figure 2.45 e 2.48, si può notare come l'andamento delle temperature nei due punti per i vari *Prototipi*, siano in contrasto tra loro: mentre quelle nel *Punto 1* aumentano passando da un prototipo all'altro, quelle nel *Punto 2* rimangono uguali o addirittura diminuiscono. Le stesse anomalie non si riscontrano invece, confrontando i valori della differenza di potenziale delle due serie di tre test eseguite per misurare la temperatura nei due punti, che risultano coincidenti. Tutto questo a confermare l'alterazione delle misure di temperatura dovuta all'alone sulla finestra.



(a) *Finestra sporca montata sulla camera*



(b) *Finestra sporca smontata*

Figura A.2: *Finestra Kodial sporca.*

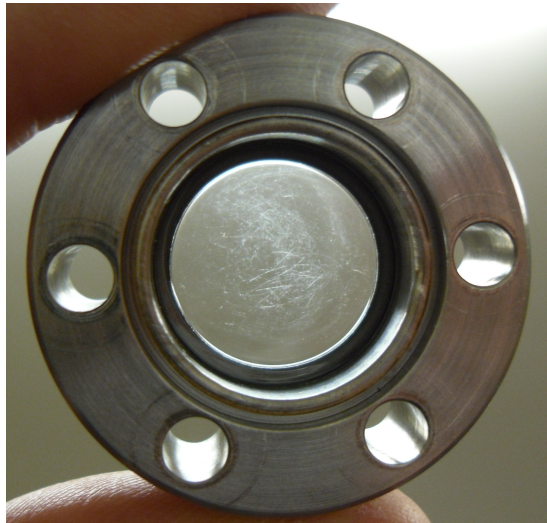


Figura A.3: *Finestra Kodial strisciata.*

All'inizio le finestre sono state pulite con carta abrasiva finissima che però graffiava in modo permanente il vetro, il quale non essendo più trasparente alterava le misure di temperatura ottenute con il pirometro (vedi figura A.3).

Per risolvere questo problema si è adottato un altro metodo che consiste nell'immergere la finestra in vasca ad ultrasuoni, nel pulirla con carta assorbente e acetone, infine asciugarla con aria compressa (vedi figura A.4).



Figura A.4: *Finestra Kodial pulita.*

Questa procedura di pulitura però è onerosa in termini di tempo, soprattutto perché è necessario rimuovere ogni volta la finestra dalla camera o transizione su cui è fissata. Per ovviare a ciò si è deciso di passare alle finestre con shutter fully closed riportate in figura A.5.



Figura A.5: *Finestra Kodial con shutter fully closed*

Grazie allo shutter è quindi possibile tenere la finestra oscurata impedendo il deposito di materiale sul vetro, per poi aprirlo solo quando è necessario effettuare la misurazione della temperatura.

Appendice B

Proprietà dei materiali

B.1 Introduzione

Se si vogliono ottenere dei risultati il più possibile vicini alla realtà, sia attraverso un'analisi agli Elementi Finiti, sia attraverso un calcolo analitico, è di fondamentale importanza una corretta definizione delle proprietà dei materiali. A tale proposito vengono di seguito riportate le macro, che consentono l'introduzione all'interno del programma APDL principale, delle proprietà dei principali materiali considerati nel presente lavoro di tesi.

Per ogni materiale si fa riferimento alle seguenti proprietà:

- Resistività elettrica [$\Omega \cdot m$]
- Conduttività termica [$W/m \cdot ^\circ C$]
- Emissività emisferica totale
- Densità [kg/m^3]
- Calore specifico [$J/kg \cdot ^\circ C$]
- Coefficiente di espansione termica [$1/^\circ C$]
- Modulo di Young [Pa]
- Coefficiente di Poisson.

Le proprietà vengono definite come funzione della temperatura; per ciascuna deve quindi essere costruita una tabella che associa a dei valori di temperatura il

corrispondente valore per la proprietà; Ansys® provvederà poi ad interpolare la curva in fase di ottenimento della soluzione.

B.2 Tantalio – M26Ta.mac

Autore: Ing. Mattia Manzolaro – I. N. F. N. Laboratori di Legnaro

Ta=26 !material number in the ANSYS library
 MPDELE,ALL,Ta

!-----

!ELECTRICAL RESISTIVITY

!
 ! Reference: - P.D. Desai, T.K. Chu, H.M. James and C.Y. Ho,
 ! J. Phys. Ref. Data, vol 13, no. 4, p1069 (1984).
 ! Composition: - purity 99.9% or higher;
 ! Note: - data below 60K is for Ta with a residual resistivity
 ! of $0.1 \cdot 10^{-8}$ ohm · m; not corrected for thermal expansion;
 ! - 2% error;
 ! - the S.I. system of units is used.

!Temperature table [°C]

MPTEMP !erase previous table

MPTEMP, 1, 0, 100, 200
 MPTEMP, 4, 300, 400, 500
 MPTEMP, 7, 600, 700, 800
 MPTEMP, 10, 900, 1000, 1100
 MPTEMP, 13, 1200, 1300, 1400
 MPTEMP, 16, 1500, 1600, 1700
 MPTEMP, 19, 1800, 1900, 2000
 MPTEMP, 22, 2100, 2200, 2300
 MPTEMP, 25, 2400, 2500, 2600
 MPTEMP, 28, 2700, 2800, 2900

!Electrical resistivity table [ohm · m]

MPDATA, RSVX, Ta, 1, 1.2237E-07, 1.7023E-07, 2.1664E-07
 MPDATA, RSVX, Ta, 4, 2.6165E-07, 3.0533E-07, 3.4774E-07
 MPDATA, RSVX, Ta, 7, 3.8895E-07, 4.2902E-07, 4.6802E-07
 MPDATA, RSVX, Ta, 10, 5.0601E-07, 5.4305E-07, 5.7922E-07
 MPDATA, RSVX, Ta, 13, 6.1458E-07, 6.4918E-07, 6.8311E-07
 MPDATA, RSVX, Ta, 16, 7.1641E-07, 7.4916E-07, 7.8142E-07
 MPDATA, RSVX, Ta, 19, 8.1326E-07, 8.4474E-07, 8.7592E-07
 MPDATA, RSVX, Ta, 22, 9.0687E-07, 9.3766E-07, 9.6835E-07
 MPDATA, RSVX, Ta, 25, 9.9900E-07, 1.0297E-06, 1.0605E-06
 MPDATA, RSVX, Ta, 28, 1.0914E-06, 1.1225E-06, 1.1540E-06

!-----

!THERMAL CONDUCTIVITY

!
! Reference: - *Thermophysical Properties of Matter, v1, Y.S. Touloukian,*
! *R.W.Powell, C.Y. Ho & P.G. Klemens, 1970, IFI/Plenum, NY, NY.*
! Composition: - *purity 99.9%;*
! Note: - *well-annealed with residual resistivity of 0.212 uohm-cm;*
! - *error is 5% near RT, 5-10% at others;*
! - *the S.I. system of units is used.*

!Temperature table [°C]

MPTEMP !erase previous table

MPTEMP, 1, 0, 100, 200
MPTEMP, 4, 300, 400, 500
MPTEMP, 7, 600, 700, 800
MPTEMP, 10, 900, 1000, 1100
MPTEMP, 13, 1200, 1300, 1400
MPTEMP, 16, 1500, 1600, 1700
MPTEMP, 19, 1800, 1900, 2000
MPTEMP, 22, 2100, 2200, 2300
MPTEMP, 25, 2400, 2500, 2600
MPTEMP, 28, 2700, 2800, 2900

!Thermal conductivity table [W/m°C]

MPDATA, KXX, Ta, 1, 5.7415E+01, 5.7703E+01, 5.8047E+01
MPDATA, KXX, Ta, 4, 5.8503E+01, 5.8887E+01, 5.9279E+01
MPDATA, KXX, Ta, 7, 5.9677E+01, 6.0080E+01, 6.0485E+01
MPDATA, KXX, Ta, 10, 6.0891E+01, 6.1297E+01, 6.1701E+01
MPDATA, KXX, Ta, 13, 6.2100E+01, 6.2494E+01, 6.2880E+01
MPDATA, KXX, Ta, 16, 6.3258E+01, 6.3624E+01, 6.3978E+01
MPDATA, KXX, Ta, 19, 6.4318E+01, 6.4642E+01, 6.4948E+01
MPDATA, KXX, Ta, 22, 6.5235E+01, 6.5501E+01, 6.5745E+01
MPDATA, KXX, Ta, 25, 6.5964E+01, 6.6157E+01, 6.6322E+01
MPDATA, KXX, Ta, 28, 6.6458E+01, 6.6563E+01, 6.6634E+01

!HEMISPHERICAL TOTAL EMISSIVITY

!
! Reference: - *Thermophysical Properties of Matter, v7,*
! *Y.S. Touloukian & D.P. DeWitt, 1970, IFI/Plenum, NY, NY.*
! Note: - *polished; 10% error;*
! - *the S.I. system of units is used.*

!Temperature table [°C]

MPTEMP !erase previous table

MPTEMP, 1, 727, 800, 900
MPTEMP, 4, 1000, 1100, 1200
MPTEMP, 7, 1300, 1400, 1500
MPTEMP, 10, 1600, 1700, 1800
MPTEMP, 13, 1900, 2000, 2100
MPTEMP, 16, 2200, 2300, 2400
MPTEMP, 19, 2500, 2600, 2700
MPTEMP, 22, 2800, 2900

!Emissivity table

APP. B PROPRIETÀ DEI MATERIALI

| | | | | | | |
|---------|-------|-----|-----|-------------|-------------|------------|
| MPDATA, | EMIS, | Ta, | 1, | 1.0813E-01, | 1.1867E-01, | 1.3273E-01 |
| MPDATA, | EMIS, | Ta, | 4, | 1.4634E-01, | 1.5952E-01, | 1.7225E-01 |
| MPDATA, | EMIS, | Ta, | 7, | 1.8455E-01, | 1.9640E-01, | 2.0782E-01 |
| MPDATA, | EMIS, | Ta, | 10, | 2.1879E-01, | 2.2932E-01, | 2.3942E-01 |
| MPDATA, | EMIS, | Ta, | 13, | 2.4907E-01, | 2.5828E-01, | 2.6705E-01 |
| MPDATA, | EMIS, | Ta, | 16, | 2.7538E-01, | 2.8328E-01, | 2.9073E-01 |
| MPDATA, | EMIS, | Ta, | 19, | 2.9774E-01, | 3.0431E-01, | 3.1044E-01 |
| MPDATA, | EMIS, | Ta, | 22, | 3.1613E-01, | 3.2138E-01 | |

!-----

!DENSITY

!

! Reference: - calculated from the linear expansion.

! Note: - the S.I. system of units is used.

!Temperature table [°C]

MPTEMP !erase previous table

| | | | | |
|---------|-----|-------|-------|------|
| MPTEMP, | 1, | 0, | 100, | 200 |
| MPTEMP, | 4, | 300, | 400, | 500 |
| MPTEMP, | 7, | 600, | 700, | 800 |
| MPTEMP, | 10, | 900, | 1000, | 1100 |
| MPTEMP, | 13, | 1200, | 1300, | 1400 |
| MPTEMP, | 16, | 1500, | 1600, | 1700 |
| MPTEMP, | 19, | 1800, | 1900, | 2000 |
| MPTEMP, | 22, | 2100, | 2200, | 2300 |
| MPTEMP, | 25, | 2400, | 2500, | 2600 |
| MPTEMP, | 28, | 2700, | 2800, | 2900 |

!Density table [kg/m³]

| | | | | | | |
|---------|-------|-----|-----|-------------|-------------|------------|
| MPDATA, | DENS, | Ta, | 1, | 1.6606E+04, | 1.6574E+04, | 1.6542E+04 |
| MPDATA, | DENS, | Ta, | 4, | 1.6509E+04, | 1.6475E+04, | 1.6441E+04 |
| MPDATA, | DENS, | Ta, | 7, | 1.6406E+04, | 1.6371E+04, | 1.6336E+04 |
| MPDATA, | DENS, | Ta, | 10, | 1.6300E+04, | 1.6264E+04, | 1.6227E+04 |
| MPDATA, | DENS, | Ta, | 13, | 1.6190E+04, | 1.6152E+04, | 1.6113E+04 |
| MPDATA, | DENS, | Ta, | 16, | 1.6072E+04, | 1.6031E+04, | 1.5987E+04 |
| MPDATA, | DENS, | Ta, | 19, | 1.5942E+04, | 1.5894E+04, | 1.5843E+04 |
| MPDATA, | DENS, | Ta, | 22, | 1.5789E+04, | 1.5731E+04, | 1.5668E+04 |
| MPDATA, | DENS, | Ta, | 25, | 1.5601E+04, | 1.5528E+04, | 1.5448E+04 |
| MPDATA, | DENS, | Ta, | 28, | 1.5362E+04, | 1.5268E+04, | 1.5165E+04 |

!-----

!SPECIFIC HEAT

!

! Reference: - I. Barin, Thermochemical Data of Pure

! Substances, pub. VCH, Weinheim (1993).

! Note: - the S.I. system of units is used.

!Temperature table [°C]

MPTEMP !erase previous table

MPTEMP, 1, 20, 100, 200

MPTEMP, 4, 300, 400, 500

MPTEMP, 7, 600, 700, 800

MPTEMP, 10, 900, 1000, 1100

MPTEMP, 13, 1200, 1300, 1400

MPTEMP, 16, 1500, 1600, 1700

MPTEMP, 19, 1800, 1900, 2000

MPTEMP, 22, 2100, 2200, 2300

MPTEMP, 25, 2400, 2500, 2600

MPTEMP, 28, 2700, 2800, 2900

!Specific heat table [J/kg°C]

MPDATA, C, Ta, 1, 1.4046E+02, 1.4229E+02, 1.4429E+02

MPDATA, C, Ta, 4, 1.4603E+02, 1.4759E+02, 1.4902E+02

MPDATA, C, Ta, 7, 1.5039E+02, 1.5174E+02, 1.5312E+02

MPDATA, C, Ta, 10, 1.5457E+02, 1.5613E+02, 1.5782E+02

MPDATA, C, Ta, 13, 1.5967E+02, 1.6169E+02, 1.6388E+02

MPDATA, C, Ta, 16, 1.6627E+02, 1.6883E+02, 1.7157E+02

MPDATA, C, Ta, 19, 1.7448E+02, 1.7753E+02, 1.8070E+02

MPDATA, C, Ta, 22, 1.8416E+02, 1.8836E+02, 1.9285E+02

MPDATA, C, Ta, 25, 1.9751E+02, 2.0257E+02, 2.0853E+02

MPDATA, C, Ta, 28, 2.1623E+02, 2.2682E+02, 2.4175E+02

!-----

!COEFFICIENT OF THERMAL EXPANSION

!

! Reference: - Thermophysical Properties of Matter, v12, Y.S. Touloukian,
 ! R.K.Kirby, R.E. Taylor & P.D. Desai, 1975, IFI/Plenum, NY, NY

! Note: - 3% error below 1100K, 5% from 1100-2100K, 10% above 2100K;
 ! - the S.I. system of units is used.

!Temperature table [°C]

MPTEMP !erase previous table

MPTEMP, 1, 0, 100, 200

MPTEMP, 4, 300, 400, 500

MPTEMP, 7, 600, 700, 800

MPTEMP, 10, 900, 1000, 1100

MPTEMP, 13, 1200, 1300, 1400

MPTEMP, 16, 1500, 1600, 1700

MPTEMP, 19, 1800, 1900, 2000

MPTEMP, 22, 2100, 2200, 2300

MPTEMP, 25, 2400, 2500, 2600

MPTEMP, 28, 2700, 2800, 2900

!Secant coefficient of thermal expansion [1/°C]

MPDATA, ALPX, Ta, 1, 6.2542E-06, 6.5206E-06, 6.7324E-06

MPDATA, ALPX, Ta, 4, 6.8984E-06, 7.0274E-06, 7.1281E-06

MPDATA, ALPX, Ta, 7, 7.2093E-06, 7.2797E-06, 7.3481E-06

MPDATA, ALPX, Ta, 10, 7.4233E-06, 7.5140E-06, 7.6289E-06

MPDATA, ALPX, Ta, 13, 7.7769E-06, 7.9666E-06, 8.2069E-06

MPDATA, ALPX, Ta, 16, 8.5065E-06, 8.8741E-06, 9.3186E-06

MPDATA, ALPX, Ta, 19, 9.8486E-06, 1.0473E-05, 1.1200E-05

MPDATA, ALPX, Ta, 22, 1.2040E-05, 1.2999E-05, 1.4089E-05

MPDATA, ALPX, Ta, 25, 1.5316E-05, 1.6690E-05, 1.8220E-05

MPDATA, ALPX, Ta, 28, 1.9914E-05, 2.1781E-05, 2.3830E-05

!-----

!ELASTIC MODULUS

!

! Reference: - R. Farraro and R.B. McLellan, Metall. Trans.,
 ! vol 10A, p1699, (1979);
 ! - above 2100K P.E. Armstrong and H.L. Brown,
 ! Trans. AIME, v230, p962 (1964).

! Composition: - 10 ppm C, 3 ppm O, < 1 ppm H, 3 ppm N

!

! Note: - fully annealed;
 ! - 3% error;
 ! - values above 2100K were increased by 3% to
 ! match the lower temperature values;
 ! - values above 2400° C are kept constant at 1.0023E+11 Pa (assumption);
 ! - the S.I. system of units is used.

!Temperature table [°C]

MPTEMP !erase previous table

MPTEMP, 1, 20, 100, 200
 MPTEMP, 4, 300, 400, 500
 MPTEMP, 7, 600, 700, 800
 MPTEMP, 10, 900, 1000, 1100
 MPTEMP, 13, 1200, 1300, 1400
 MPTEMP, 16, 1500, 1600, 1700
 MPTEMP, 19, 1800, 1900, 2000
 MPTEMP, 22, 2100, 2200, 2300
 MPTEMP, 25, 2400, 2500, 2600
 MPTEMP, 28, 2700, 2800, 2900

!Elastic modulus [Pa]

MPDATA, EX, Ta, 1, 1.8274E+11, 1.8220E+11, 1.7904E+11
 MPDATA, EX, Ta, 4, 1.7240E+11, 1.6647E+11, 1.6216E+11
 MPDATA, EX, Ta, 7, 1.5946E+11, 1.5813E+11, 1.5689E+11
 MPDATA, EX, Ta, 10, 1.5563E+11, 1.5434E+11, 1.5302E+11
 MPDATA, EX, Ta, 13, 1.5167E+11, 1.5030E+11, 1.4890E+11
 MPDATA, EX, Ta, 16, 1.4747E+11, 1.4602E+11, 1.4453E+11
 MPDATA, EX, Ta, 19, 1.4302E+11, 1.3980E+11, 1.3472E+11
 MPDATA, EX, Ta, 22, 1.2822E+11, 1.2030E+11, 1.1097E+11
 MPDATA, EX, Ta, 25, 1.0023E+11, 1.0023E+11, 1.0023E+11
 MPDATA, EX, Ta, 28, 1.0023E+11, 1.0023E+11, 1.0023E+11

!

```

!POISSON'S RATIO
!
! Note: - 10% error;
!       - calculated from E and G;
!       - errors may be large;
!       - values above 600° C are kept constant at 2.7853E-01 (assumption);
!       - the S.I. system of units is used.
!Temperature table [°C]
MPTEMP !erase previous table
MPTEMP, 1, 20, 100, 200
MPTEMP, 4, 300, 400, 500
MPTEMP, 7, 600, 700, 800
MPTEMP, 10, 900, 1000, 1100
MPTEMP, 13, 1200, 1300, 1400
MPTEMP, 16, 1500, 1600, 1700
MPTEMP, 19, 1800, 1900, 2000
MPTEMP, 22, 2100, 2200, 2300
MPTEMP, 25, 2400, 2500, 2600
MPTEMP, 28, 2700, 2800, 2900
!Poisson's ratio
MPDATA, PRXY, Ta, 1, 2.7745E-01, 2.7760E-01, 2.7778E-01
MPDATA, PRXY, Ta, 4, 2.7797E-01, 2.7816E-01, 2.7835E-01
MPDATA, PRXY, Ta, 7, 2.7853E-01, 2.7853E-01, 2.7853E-01
MPDATA, PRXY, Ta, 10, 2.7853E-01, 2.7853E-01, 2.7853E-01
MPDATA, PRXY, Ta, 13, 2.7853E-01, 2.7853E-01, 2.7853E-01
MPDATA, PRXY, Ta, 16, 2.7853E-01, 2.7853E-01, 2.7853E-01
MPDATA, PRXY, Ta, 19, 2.7853E-01, 2.7853E-01, 2.7853E-01
MPDATA, PRXY, Ta, 22, 2.7853E-01, 2.7853E-01, 2.7853E-01
MPDATA, PRXY, Ta, 25, 2.7853E-01, 2.7853E-01, 2.7853E-01
MPDATA, PRXY, Ta, 28, 2.7853E-01, 2.7853E-01, 2.7853E-01
!-----

```

B.3 Tungsteno – M27W.mac

Autore: Ing. Mattia Manzolaro – I. N. F. N. Laboratori di Legnaro

```

W=27      !material number in the ANSYS library
MPDELE,ALL,W
!-----

```

```

!ELECTRICAL RESISTIVITY

```

APP. B PROPRIETÀ DEI MATERIALI

!
 ! Reference: - P.D. Desai, T.K. Chu, H.M. James and C.Y. Ho,
 ! J. Phys. Ref. Data, vol 13, no. 4, p1069 (1984).
 ! Composition: - purity 99.9% or higher;
 !
 ! Note: - data below 200K is for a residual resistivity
 ! of 0.000015 x 10E-8 ohm-m;
 ! not corrected for thermal expansion;
 ! - 5% error;
 ! - the S.I. system of units is used.

!Temperature table [°C]

MPTEMP !erase previous table

MPTEMP, 1, 0, 100, 200
 MPTEMP, 4, 300, 400, 500
 MPTEMP, 7, 600, 700, 800
 MPTEMP, 10, 900, 1000, 1100
 MPTEMP, 13, 1200, 1300, 1400
 MPTEMP, 16, 1500, 1600, 1700
 MPTEMP, 19, 1800, 1900, 2000
 MPTEMP, 22, 2100, 2200, 2300
 MPTEMP, 25, 2400, 2500, 2600
 MPTEMP, 28, 2700, 2800, 2900
 MPTEMP, 31, 3000, 3100, 3200

!Electrical resistivity table [ohmm]

MPDATA, RSVX, W, 1, 4.8825E-08, 7.2753E-08, 9.7768E-08
 MPDATA, RSVX, W, 4, 1.2380E-07, 1.5076E-07, 1.7859E-07
 MPDATA, RSVX, W, 7, 2.0722E-07, 2.3659E-07, 2.6664E-07
 MPDATA, RSVX, W, 10, 2.9731E-07, 3.2856E-07, 3.6034E-07
 MPDATA, RSVX, W, 13, 3.9260E-07, 4.2530E-07, 4.5842E-07
 MPDATA, RSVX, W, 16, 4.9191E-07, 5.2575E-07, 5.5992E-07
 MPDATA, RSVX, W, 19, 5.9439E-07, 6.2915E-07, 6.6419E-07
 MPDATA, RSVX, W, 22, 6.9950E-07, 7.3507E-07, 7.7090E-07
 MPDATA, RSVX, W, 25, 8.0700E-07, 8.4337E-07, 8.8002E-07
 MPDATA, RSVX, W, 28, 9.1697E-07, 9.5424E-07, 9.9184E-07
 MPDATA, RSVX, W, 31, 1.0298E-06, 1.0682E-06, 1.1070E-06

!THERMAL CONDUCTIVITY

!
 ! Reference: - Thermophysical Properties of Matter, v1, Y.S. Touloukian,
 ! R.W.Powell, C.Y. Ho & P.G. Klemens, 1970, IFI/Plenum, NY, NY.
 ! Composition: - purity 99.9%
 !
 ! Note: - well-annealed with residual resistivity of 0.00170 uohm-cm;
 ! - error is 3% near RT, 3-5% at others;
 ! - the S.I. system of units is used.

!Temperature table [°C]

MPTEMP !erase previous table
MPTEMP, 1, 0, 100, 200
MPTEMP, 4, 300, 400, 500
MPTEMP, 7, 600, 700, 800
MPTEMP, 10, 900, 1000, 1100
MPTEMP, 13, 1200, 1300, 1400
MPTEMP, 16, 1500, 1600, 1700
MPTEMP, 19, 1800, 1900, 2000
MPTEMP, 22, 2100, 2200, 2300
MPTEMP, 25, 2400, 2500, 2600
MPTEMP, 28, 2700, 2800, 2900
MPTEMP, 31, 3000, 3100, 3200
!Thermal conductivity table [W/m°C]
MPDATA, KXX, W, 1, 1.8170E+02, 1.6693E+02, 1.5210E+02
MPDATA, KXX, W, 4, 1.4029E+02, 1.3445E+02, 1.2982E+02
MPDATA, KXX, W, 7, 1.2569E+02, 1.2199E+02, 1.1870E+02
MPDATA, KXX, W, 10, 1.1576E+02, 1.1313E+02, 1.1078E+02
MPDATA, KXX, W, 13, 1.0867E+02, 1.0676E+02, 1.0504E+02
MPDATA, KXX, W, 16, 1.0346E+02, 1.0202E+02, 1.0069E+02
MPDATA, KXX, W, 19, 9.9449E+01, 9.8288E+01, 9.7194E+01
MPDATA, KXX, W, 22, 9.6161E+01, 9.5182E+01, 9.4256E+01
MPDATA, KXX, W, 25, 9.3383E+01, 9.2567E+01, 9.1815E+01
MPDATA, KXX, W, 28, 9.1137E+01, 9.0546E+01, 9.0057E+01
MPDATA, KXX, W, 31, 8.9689E+01, 8.9465E+01, 8.9408E+01
!-----

!HEMISPHERICAL TOTAL EMISSIVITY
!
! Reference: - Thermophysical Properties of Matter, v7,
! Y.S. Touloukian & D.P. DeWitt, 1970, IFI/Plenum, NY, NY.
! Note: - polished; 5% error;
! - the S.I. system of units is used.
!Temperature table [°C]
MPTEMP !erase previous table
MPTEMP, 1, 127, 200, 300
MPTEMP, 4, 400, 500, 600
MPTEMP, 7, 700, 800, 900
MPTEMP, 10, 1000, 1100, 1200
MPTEMP, 13, 1300, 1400, 1500
MPTEMP, 16, 1600, 1700, 1800
MPTEMP, 19, 1900, 2000, 2100
MPTEMP, 22, 2200, 2300, 2400
MPTEMP, 25, 2500, 2600, 2700
MPTEMP, 28, 2800, 2900, 3000
MPTEMP, 31, 3100
!Emissivity table

APP. B PROPRIETÀ DEI MATERIALI

```

MPDATA, EMIS, W, 1, 3.1903E-02, 3.6965E-02, 4.5249E-02
MPDATA, EMIS, W, 4, 5.4998E-02, 6.6105E-02, 7.8466E-02
MPDATA, EMIS, W, 7, 9.1976E-02, 1.0653E-01, 1.2202E-01
MPDATA, EMIS, W, 10, 1.3835E-01, 1.5541E-01, 1.7309E-01
MPDATA, EMIS, W, 13, 1.9130E-01, 2.0622E-01, 2.1900E-01
MPDATA, EMIS, W, 16, 2.3086E-01, 2.4183E-01, 2.5197E-01
MPDATA, EMIS, W, 19, 2.6132E-01, 2.6991E-01, 2.7781E-01
MPDATA, EMIS, W, 22, 2.8505E-01, 2.9168E-01, 2.9775E-01
MPDATA, EMIS, W, 25, 3.0329E-01, 3.0836E-01, 3.1300E-01
MPDATA, EMIS, W, 28, 3.1726E-01, 3.2117E-01, 3.2480E-01
MPDATA, EMIS, W, 31, 3.2817E-01

```

!-----

!DENSITY

!

! Reference: - calculated from the linear expansion.

!

! Note: - the S.I. system of units is used.

!Temperature table [°C]

MPTEMP !erase previous table

```

MPTEMP, 1, 0, 100, 200
MPTEMP, 4, 300, 400, 500
MPTEMP, 7, 600, 700, 800
MPTEMP, 10, 900, 1000, 1100
MPTEMP, 13, 1200, 1300, 1400
MPTEMP, 16, 1500, 1600, 1700
MPTEMP, 19, 1800, 1900, 2000
MPTEMP, 22, 2100, 2200, 2300
MPTEMP, 25, 2400, 2500, 2600
MPTEMP, 28, 2700, 2800, 2900
MPTEMP, 31, 3000, 3100, 3200
MPTEMP, 34, 3300

```

!Density table [kg/m³]

```

MPDATA, DENS, W, 1, 1.9304E+04, 1.9278E+04, 1.9252E+04
MPDATA, DENS, W, 4, 1.9226E+04, 1.9199E+04, 1.9172E+04
MPDATA, DENS, W, 7, 1.9144E+04, 1.9115E+04, 1.9086E+04
MPDATA, DENS, W, 10, 1.9057E+04, 1.9027E+04, 1.8997E+04
MPDATA, DENS, W, 13, 1.8966E+04, 1.8934E+04, 1.8902E+04
MPDATA, DENS, W, 16, 1.8869E+04, 1.8835E+04, 1.8801E+04
MPDATA, DENS, W, 19, 1.8766E+04, 1.8729E+04, 1.8692E+04
MPDATA, DENS, W, 22, 1.8654E+04, 1.8614E+04, 1.8573E+04
MPDATA, DENS, W, 25, 1.8531E+04, 1.8487E+04, 1.8441E+04
MPDATA, DENS, W, 28, 1.8394E+04, 1.8344E+04, 1.8293E+04
MPDATA, DENS, W, 31, 1.8239E+04, 1.8183E+04, 1.8124E+04
MPDATA, DENS, W, 34, 1.8062E+04

```

!-----

!SPECIFIC HEAT

!

! Reference: - G.K. White and S.J. Collocott, *J. Phys. Chem. Ref. Data*,

! vol 13, no 4, p1251 (1984)

! Note: - error less than 2%

! - the S.I. system of units is used.

!Temperature table [°C]

MPTEMP !erase previous table
MPTEMP, 1, 0, 100, 200
MPTEMP, 4, 300, 400, 500
MPTEMP, 7, 600, 700, 800
MPTEMP, 10, 900, 1000, 1100
MPTEMP, 13, 1200, 1300, 1400
MPTEMP, 16, 1500, 1600, 1700
MPTEMP, 19, 1800, 1900, 2000
MPTEMP, 22, 2100, 2200, 2300
MPTEMP, 25, 2400, 2500, 2600
MPTEMP, 28, 2700, 2800, 2900
MPTEMP, 31, 3000, 3100

!Specific heat table [J/kg°C]
MPDATA, C, W, 1, 1.3092E+02, 1.3412E+02, 1.3652E+02
MPDATA, C, W, 4, 1.3884E+02, 1.4108E+02, 1.4326E+02
MPDATA, C, W, 7, 1.4538E+02, 1.4747E+02, 1.4953E+02
MPDATA, C, W, 10, 1.5158E+02, 1.5365E+02, 1.5576E+02
MPDATA, C, W, 13, 1.5793E+02, 1.6020E+02, 1.6257E+02
MPDATA, C, W, 16, 1.6510E+02, 1.6780E+02, 1.7072E+02
MPDATA, C, W, 19, 1.7389E+02, 1.7735E+02, 1.8114E+02
MPDATA, C, W, 22, 1.8531E+02, 1.8988E+02, 1.9493E+02
MPDATA, C, W, 25, 2.0048E+02, 2.0660E+02, 2.1333E+02
MPDATA, C, W, 28, 2.2074E+02, 2.2887E+02, 2.3778E+02
MPDATA, C, W, 31, 2.4754E+02, 2.5821E+02

!COEFFICIENT OF THERMAL EXPANSION
!
! Reference: - Thermophysical Properties of Matter, v12, Y.S. Touloukian,
! R.K.Kirby, R.E. Taylor & P.D. Desai, 1975, IFI/Plenum, NY, NY
! Note: - 3% error ;
! - the S.I. system of units is used.

!Temperature table [°C]
MPTEMP !erase previous table
MPTEMP, 1, 0, 100, 200
MPTEMP, 4, 300, 400, 500
MPTEMP, 7, 600, 700, 800
MPTEMP, 10, 900, 1000, 1100
MPTEMP, 13, 1200, 1300, 1400
MPTEMP, 16, 1500, 1600, 1700
MPTEMP, 19, 1800, 1900, 2000
MPTEMP, 22, 2100, 2200, 2300
MPTEMP, 25, 2400, 2500, 2600
MPTEMP, 28, 2700, 2800, 2900
MPTEMP, 31, 3000, 3100, 3200

!Secant coefficient of thermal expansion [1/°C]

APP. B PROPRIETÀ DEI MATERIALI

```

MPDATA, ALPX, W, 1, 4.4951E-06, 4.5000E-06, 4.5818E-06
MPDATA, ALPX, W, 4, 4.6916E-06, 4.7994E-06, 4.9046E-06
MPDATA, ALPX, W, 7, 5.0065E-06, 5.1046E-06, 5.1981E-06
MPDATA, ALPX, W, 10, 5.2864E-06, 5.3689E-06, 5.4450E-06
MPDATA, ALPX, W, 13, 5.5140E-06, 5.5752E-06, 5.6474E-06
MPDATA, ALPX, W, 16, 5.7551E-06, 5.8952E-06, 6.0660E-06
MPDATA, ALPX, W, 19, 6.2657E-06, 6.4924E-06, 6.7444E-06
MPDATA, ALPX, W, 22, 7.0198E-06, 7.3169E-06, 7.6338E-06
MPDATA, ALPX, W, 25, 7.9687E-06, 8.3198E-06, 8.6854E-06
MPDATA, ALPX, W, 28, 9.0635E-06, 9.4525E-06, 9.8504E-06
MPDATA, ALPX, W, 31, 1.0256E-05, 1.0666E-05, 1.1080E-05

```

!ELASTIC MODULUS

```

!
! Reference: - Lowrie R. and Gonas A.M., J. Applied Physics,
!            v.38, p.4505, (1967);
!            - below 298K W. Koester, Z. Metallkde.,
!            v39(1), p1 (1948) (in German);
!            - above 2073K P.E. Armstrong and H.L. Brown,
!            Trans. AIME, v230, p962 (1964).
! Composition: - 10 ppm C, 3 ppm O, < 1 ppm H, 3 ppm N
!
! Note:      - fully annealed;
!            - values above 2073K were decreased by 1.5%
!            to match the lower temperature values;
!            - values above 2400° C are kept constant at 2.1917E+11 Pa (assumption);
!            - the S.I. system of units is used.

```

!Temperature table [°C]

```

MPTEMP !erase previous table
MPTEMP, 1, 0, 100, 200
MPTEMP, 4, 300, 400, 500
MPTEMP, 7, 600, 700, 800
MPTEMP, 10, 900, 1000, 1100
MPTEMP, 13, 1200, 1300, 1400
MPTEMP, 16, 1500, 1600, 1700
MPTEMP, 19, 1800, 1900, 2000
MPTEMP, 22, 2100, 2200, 2300
MPTEMP, 25, 2400, 2500, 2600
MPTEMP, 28, 2700, 2800, 2900

```

!Elastic modulus [Pa]

```

MPDATA, EX, W, 1, 4.0011E+11, 3.9614E+11, 3.9201E+11
MPDATA, EX, W, 4, 3.8773E+11, 3.8330E+11, 3.7872E+11
MPDATA, EX, W, 7, 3.7399E+11, 3.6910E+11, 3.6407E+11
MPDATA, EX, W, 10, 3.5888E+11, 3.5355E+11, 3.4806E+11
MPDATA, EX, W, 13, 3.4242E+11, 3.3664E+11, 3.3070E+11
MPDATA, EX, W, 16, 3.2460E+11, 3.1836E+11, 3.1197E+11
MPDATA, EX, W, 19, 3.0543E+11, 2.9348E+11, 2.8055E+11
MPDATA, EX, W, 22, 2.6666E+11, 2.5180E+11, 2.3597E+11
MPDATA, EX, W, 25, 2.1917E+11, 2.1917E+11, 2.1917E+11
MPDATA, EX, W, 28, 2.1917E+11, 2.1917E+11, 2.1917E+11

```

```

!POISSON'S RATIO
!
! Note: - calculated from E and G;
!       - errors may be large;
!       - values above 1800° C are kept constant at 3.1517E-01 (assumption);
!       - the S.I. system of units is used.
!Temperature table [°C]
MPTEMP !erase previous table
MPTEMP, 1, 0, 100, 200
MPTEMP, 4, 300, 400, 500
MPTEMP, 7, 600, 700, 800
MPTEMP, 10, 900, 1000, 1100
MPTEMP, 13, 1200, 1300, 1400
MPTEMP, 16, 1500, 1600, 1700
MPTEMP, 19, 1800, 1900, 2000
MPTEMP, 22, 2100, 2200, 2300
MPTEMP, 25, 2400, 2500, 2600
MPTEMP, 28, 2700, 2800, 2900
!Poisson's ratio
MPDATA, PRXY, W, 1, 2.8202E-01, 2.8295E-01, 2.8398E-01
MPDATA, PRXY, W, 4, 2.8512E-01, 2.8636E-01, 2.8772E-01
MPDATA, PRXY, W, 7, 2.8918E-01, 2.9075E-01, 2.9243E-01
MPDATA, PRXY, W, 10, 2.9422E-01, 2.9612E-01, 2.9812E-01
MPDATA, PRXY, W, 13, 3.0023E-01, 3.0245E-01, 3.0478E-01
MPDATA, PRXY, W, 16, 3.0721E-01, 3.0976E-01, 3.1241E-01
MPDATA, PRXY, W, 19, 3.1517E-01, 3.1517E-01, 3.1517E-01
MPDATA, PRXY, W, 22, 3.1517E-01, 3.1517E-01, 3.1517E-01
MPDATA, PRXY, W, 25, 3.1517E-01, 3.1517E-01, 3.1517E-01
MPDATA, PRXY, W, 28, 3.1517E-01, 3.1517E-01, 3.1517E-01
!-----

```

B.4 Rame – M28Cu.mac

Autore: Ing. Mattia Manzolaro – I. N. F. N. Laboratori di Legnaro

Cu=28 !material number in the ANSYS library

MPDELE,ALL,Cu

!-----

!ELECTRICAL RESISTIVITY

!

! Reference: - R.A. Matula, J. Phys. Chem. Ref. Data,
! vol 8, no. 4, p 1147 (1979).

! Composition: - purity 99.9% or higher;

!

! Note: - data below 55K is for Cu with a residual resistivity
! of 0.002 x 10E-8 ohm-m;

! - the S.I. system of units is used.

!Temperature table [°C]

APP. B PROPRIETÀ DEI MATERIALI

```

MPTEMP !erase previous table
MPTEMP, 1, 0, 100, 200
MPTEMP, 4, 300, 400, 500
MPTEMP, 7, 600, 700, 800
MPTEMP, 10, 900, 1000
!Electrical resistivity table [ohmm]
MPDATA ,RSVX, Cu, 1, 1.5327E-08, 2.2139E-08, 2.9003E-08
MPDATA, RSVX, Cu, 4, 3.5980E-08, 4.3132E-08, 5.0520E-08
MPDATA, RSVX, Cu, 7, 5.8206E-08, 6.6251E-08, 7.4717E-08
MPDATA, RSVX, Cu, 10, 8.3666E-08, 9.3160E-08
!-----

```

!THERMAL CONDUCTIVITY

```

!
! Reference: - Thermophysical Properties of Matter, v1, Y.S. Touloukian,
!            R.W.Powell, C.Y. Ho & P.G. Klemens, 1970, IFI/Plenum, NY, NY.
! Composition: - purity 99.999%
!
! Note: - well-annealed with residual resistivity of 0.000851 uohm-cm;
!        - error is 3% near RT, 3-5% at others;
!        - the S.I. system of units is used.
!-----

```

!Temperature table [°C]

```

MPTEMP !erase previous table
MPTEMP, 1, 0, 100, 200
MPTEMP, 4, 300, 400, 500
MPTEMP, 7, 600, 700, 800
MPTEMP, 10, 900, 1000
!Thermal conductivity table [W/m°C]
MPDATA, KXX, Cu, 1, 4.0253E+02, 3.9389E+02, 3.8911E+02
MPDATA, KXX, Cu, 4, 3.8393E+02, 3.7835E+02, 3.7237E+02
MPDATA, KXX, Cu, 7, 3.6598E+02, 3.5920E+02, 3.5201E+02
MPDATA, KXX, Cu, 10, 3.4442E+02, 3.3643E+02
!-----

```

!HEMISPHERICAL TOTAL EMISSIVITY

```

!
! Reference: - Thermophysical Properties of Matter, v7,
!            Y.S. Touloukian & D.P. DeWitt, 1970, IFI/Plenum, NY, NY.
! Note: - polished;
!        - the S.I. system of units is used.
!-----

```

!Temperature table [°C]

```

MPTEMP !erase previous table
MPTEMP, 1, 0, 100, 200
MPTEMP, 4, 300, 400, 500
MPTEMP, 7, 600, 700, 800
MPTEMP, 10, 900
!Emissivity table
MPDATA, EMIS, Cu, 1, 2.9484E-02, 3.0726E-02, 3.1491E-02
MPDATA, EMIS, Cu, 4, 3.2118E-02, 3.2949E-02, 3.4322E-02
MPDATA, EMIS, Cu, 7, 3.6578E-02, 4.0057E-02, 4.5099E-02
MPDATA, EMIS, Cu, 10, 5.2044E-02
!-----

```

!DENSITY

!
! Reference: - calculated from the linear expansion.
!
! Note: - the S.I. system of units is used.
!Temperature table [$^{\circ}\text{C}$]
MPTEMP !erase previous table
MPTEMP, 1, 0, 100, 200
MPTEMP, 4, 300, 400, 500
MPTEMP, 7, 600, 700, 800
MPTEMP, 10, 900, 1000
!Density table [kg/m^3]
MPDATA, DENS, Cu, 1, 8.9659E+03, 8.9226E+03, 8.8768E+03
MPDATA, DENS, Cu, 4, 8.8288E+03, 8.7787E+03, 8.7265E+03
MPDATA, DENS, Cu, 7, 8.6723E+03, 8.6163E+03, 8.5586E+03
MPDATA, DENS, Cu, 10, 8.4991E+03, 8.4382E+03

!SPECIFIC HEAT

!
! Reference: - G.K. White and S.J. Collocott, *J. Phys. Chem. Ref. Data*,
! vol 13, no 4, p1251 (1984)
! Note: - error less than 2%
! - the S.I. system of units is used.
!Temperature table [$^{\circ}\text{C}$]
MPTEMP !erase previous table
MPTEMP, 1, 0, 100, 200
MPTEMP, 4, 300, 400, 500
MPTEMP, 7, 600, 700, 800
MPTEMP, 10, 900, 1000
!Specific heat table [$\text{J}/\text{kg}^{\circ}\text{C}$]
MPDATA, C, Cu, 1, 3.7967E+02, 3.9238E+02, 4.0332E+02
MPDATA, C, Cu, 4, 4.1285E+02, 4.2123E+02, 4.2899E+02
MPDATA, C, Cu, 7, 4.3691E+02, 4.4607E+02, 4.5781E+02
MPDATA, C, Cu, 10, 4.7376E+02, 4.9580E+02

!COEFFICIENT OF THERMAL EXPANSION

!
! Reference: - *Thermophysical Properties of Matter*, v12, Y.S. Touloukian,
! R.K.Kirby, R.E. Taylor & P.D. Desai, 1975, IFI/Plenum, NY, NY
! Note: - 3% error ;
! - the S.I. system of units is used.
!Temperature table [$^{\circ}\text{C}$]
MPTEMP !erase previous table
MPTEMP, 1, 0, 100, 200
MPTEMP, 4, 300, 400, 500
MPTEMP, 7, 600, 700, 800
MPTEMP, 10, 900, 1000
!Secant coefficient of thermal expansion [$1/^{\circ}\text{C}$]
MPDATA, ALPX, Cu, 1, 1.6312E-05, 1.7368E-05, 1.8131E-05
MPDATA, ALPX, Cu, 4, 1.8737E-05, 1.9283E-05, 2.0036E-05
MPDATA, ALPX, Cu, 7, 2.1019E-05, 2.2150E-05, 2.3343E-05
MPDATA, ALPX, Cu, 10, 2.4515E-05, 2.5582E-05

APP. B PROPRIETÀ DEI MATERIALI

!ELASTIC MODULUS

!

! Reference: - below 300K N.J. Simon, E.S. Drexler, R.P. Reed,
 ! NIST Monograph 177, Properties of Copper
 ! and Copper Alloys at Cryogenic Temperatures (1992);
 ! - above 300K H.M. Ledbetter, J. Phys. Chem. Reference Data,
 ! vol 6, p1181 (1977).

! Composition: - high purity

!

! Note: - annealed;
 ! - 2% error, data above 300K was multiplied
 ! by 0.975 to match the low temperature data;
 ! - dynamic method;
 ! - the S.I. system of units is used.

!Temperature table [°C]

MPTEMP !erase previous table

MPTEMP, 1, 0, 20, 100

MPTEMP, 4, 200, 300, 400

MPTEMP, 7, 500, 600, 700

MPTEMP, 10, 800, 900, 976.85

!Elastic modulus [Pa]

MPDATA, EX, Cu, 1, 1.2752E+11, 1.2609E+11, 1.2150E+11

MPDATA, EX, Cu, 4, 1.1570E+11, 1.0964E+11, 1.0333E+11

MPDATA, EX, Cu, 7, 9.6757E+10, 8.9925E+10, 8.2836E+10

MPDATA, EX, Cu, 10, 7.5487E+10, 6.7880E+10, 6.1859E+10

!-----

!POISSON'S RATIO

!

! Note: - calculated from E and G;
 ! - errors may be large;
 ! - values above 20° C are kept constant at 3.3507E-01 (assumption);
 ! - the S.I. system of units is used.

!Temperature table [°C]

MPTEMP !erase previous table

MPTEMP, 1, 0, 20, 100

MPTEMP, 4, 200, 300, 400

MPTEMP, 7, 500, 600, 700

MPTEMP, 10, 800, 900, 976.85

!Poisson's ratio

MPDATA, PRXY, Cu, 1, 3.3545E-01, 3.3507E-01, 3.3507E-01

MPDATA, PRXY, Cu, 4, 3.3507E-01, 3.3507E-01, 3.3507E-01

MPDATA, PRXY, Cu, 7, 3.3507E-01, 3.3507E-01, 3.3507E-01

MPDATA, PRXY, Cu, 10, 3.3507E-01, 3.3507E-01, 3.3507E-01

!-----

B.5 Lega di alluminio Al5083 – M23Al5083.mac

Autore: Ing. Luca Bruno - C.E.R.N. Geneve SWITZERLAND

!Aluminium alloy 5083 H111, sheet

!Version 1.0, Feb 08

!-----

!by

!Luca Bruno

!C.E.R.N. tel. 0041-22-76.75372

!Accelerators & Beams Dep. 0041-76-487.3885

!Mailbox C26200 fax 0041-22-76.69627

!1211 Geneve 23 e-mail luca.bruno@cern.ch

!SWITZERLAND web www.cern.ch

!-----

!Ver. 1.0 - 19 Feb 08 - Only thermal properties

!-----

/prep7

Al5083 = 23 !Material number in the ANSYS library

MPDELE,all,23

!-----

! NOTE 1 - Unless otherwise stated, data are taken from:

! E.A.Brandes & G.B.Brook Eds., "Smithells metals reference book",

! Table 14.4b, p.14-15

!

! NOTE 2 - the S.I. system of units is used.

!-----

!DENSITY

!

!Temperature points to interpolate the material properties [Celsius]

!(The same for all the material properties defined below)

MPTEMP !erase previous table

MPTEMP, 1, 0.

!Density, [kg/(m3)]

MPDATA, DENS, Al5083, 1, 2670

!-----

!THERMAL CONDUCTIVITY

!

! Data taken from NIST Cryogenic Technologies Group, Bolder CO and C.Y.Ho,

! M.W.Ackerman, K.Y.Wu, S.G.Oh and T.N.Havill,

! J. Phys, Chem. Ref. Data, v7(3), p959 (1978)

!

!Temperature points to interpolate the material properties [Celsius]

!(The same for all the material properties defined below)

APP. B PROPRIETÀ DEI MATERIALI

MPTEMP !erase previous table
 MPTEMP, 1, -269.1, -219.1, -169.1, -119.1
 MPTEMP, 5, -69.1, -19.1, 30.9, 80.9
 MPTEMP, 9, 130.9, 180.9, 230.9, 280.9
 MPTEMP, 13, 330.9, 380.9, 430.9, 480.9
 MPTEMP, 17, 530.9, 575.9
 !Thermal conductivity, [W/(m * C)]
 MPDATA, KXX, Al5083, 1, 2.875192e+000, 4.217026e+001, 6.798818e+001, 8.640142e+001
 MPDATA, KXX, Al5083, 5, 1.002552e+002, 1.110588e+002, 1.199628e+002, 1.268330e+002
 MPDATA, KXX, Al5083, 9, 1.321078e+002, 1.360260e+002, 1.388263e+002, 1.407474e+002
 MPDATA, KXX, Al5083, 13, 1.420279e+002, 1.429067e+002, 1.436224e+002, 1.444138e+002
 MPDATA, KXX, Al5083, 17, 1.455195e+002, 1.469807e+002

!SPECIFIC HEAT- Alloy 1050 (99.5% aluminium)
 !
 ! Data taken from B.J. McBride, S. Gordon and M.A. Reno,
 ! NASA Technical Paper 3287 (1993)
 !

!Temperature points to interpolate the material properties [Celsius]
 !(The same for all the material properties defined below)

MPTEMP !erase previous table
 MPTEMP, 1, -173.1, -123.1, -73.1, -23.1
 MPTEMP, 5, 26.9, 76.9, 126.9, 176.9
 MPTEMP, 9, 226.9, 276.9, 326.9, 376.9
 MPTEMP, 13, 426.9, 476.9, 526.9, 576.9
 MPTEMP, 17, 626.9, 659.9
 !Specific Heat, [J/(kg * C)]
 MPDATA, C, Al5083, 1, 4.816635e+002, 6.752455e+002, 7.909130e+002, 8.578184e+002
 MPDATA, C, Al5083, 5, 8.982018e+002, 9.275278e+002, 9.530906e+002, 9.761246e+002
 MPDATA, C, Al5083, 9, 9.976077e+002, 1.018518e+003, 1.039832e+003, 1.062528e+003
 MPDATA, C, Al5083, 13, 1.087584e+003, 1.115978e+003, 1.148687e+003, 1.186689e+003
 MPDATA, C, Al5083, 17, 1.230962e+003, 1.264092e+003

!HEMISPHERICAL TOTAL EMISSIVITY

!
 ! Temperature points to interpolate the material properties [Celsius]
 !(The same for all the material properties defined below)
 MPTEMP !erase previous table
 MPTEMP, 1, 0
 !Hemispherical total emissivity, [-]
 ! Data are taken from Table No.1, Curve 31, of Y.S.Touloukian,D.P.DeWitt
 ! Note: hand polished plate, measured in vacuum, T=227-282K, err +/-3%
 ! Vol.7, p.7.

MPDATA, EMIS, Al5083, 1, 0.06

!ELECTRICAL RESISTIVITY

!
 ! Temperature points to interpolate the material properties [Celsius]
 !(The same for all the material properties defined below)

MPTEMP !erase previous table
 MPTEMP, 1, 0

```

!Hemispherical total emissivity, [Ohm.m]
MPDATA, RSVX, Al5083, 1, 5.7100e-008
!-----

```

B.6 Grafite ATJ – M29C_ATJ.mac

Autore: Ing. Mattia Manzolaro – I. N. F. N. Laboratori di Legnaro

```

/prep7 C_ATJ=29          !Material number in the ANSYS library

MPDELE,all,C_ATJ

!-----

```

```

!ELECTRICAL RESISTIVITY

```

```

!
! NOTE 1 - Data are taken from:
!         R.E. Taylor, F.E. Davis and R.W. Powell, High Temperatures-High Pressures, v1,
!         p663 (1969).
!

```

```

! NOTE 2 - values over 2126.9° C are calculated by linear extrapolation.
!

```

```

! NOTE 3 - 5% error; National Carbon Co.
!

```

```

! NOTE 4 - the S.I. system of units is used.

```

```

!Temperature table [°C]

```

```

MPTEMP !erase previous table

```

```

MPTEMP, 1, 727., 800., 900

```

```

MPTEMP, 4, 1000., 1100., 1200

```

```

MPTEMP, 7, 1300., 1400., 1500

```

```

MPTEMP, 10, 1600., 1700., 1800

```

```

MPTEMP, 13, 1900., 2000., 2100

```

```

MPTEMP, 16, 2126., 2200., 2300

```

```

MPTEMP, 19, 2400.,

```

```

!Electrical resistivity table [ohmm]

```

```

MPDATA, RSVX, C_ATJ, 1, 6.6151E-06, 6.7224E-06, 6.8702E-06

```

```

MPDATA, RSVX, C_ATJ, 4, 7.0193E-06, 7.1698E-06, 7.3215E-06

```

```

MPDATA, RSVX, C_ATJ, 7, 7.4746E-06, 7.6290E-06, 7.7847E-06

```

```

MPDATA, RSVX, C_ATJ, 10, 7.9417E-06, 8.1001E-06, 8.2598E-06

```

```

MPDATA, RSVX, C_ATJ, 13, 8.4208E-06, 8.5831E-06, 8.7468E-06

```

```

MPDATA, RSVX, C_ATJ, 16, 8.7909E-06, 8.9105E-06, 9.0742E-06

```

```

MPDATA, RSVX, C_ATJ, 19, 9.2379E-06
!-----

```

```

!THERMAL CONDUCTIVITY

```

APP. B PROPRIETÀ DEI MATERIALI

```

!
! NOTE 1 - Data are taken from:
!         R.E. Taylor, F.E. Davis and R.W. Powell, High Temperatures-High Pressures,
!         v1, p663 (1969).
!
! NOTE 2 - thermal conductivity is strongly dependent on impurities.
!
! NOTE 3 - 5% error; National Carbon Co.
!
! NOTE 4 - the S.I. system of units is used.
!Temperature table [°C]
MPTEMP !erase previous table
MPTEMP, 1, 1227, 1300, 1400
MPTEMP, 4, 1500, 1600, 1700
MPTEMP, 7, 1800, 1900, 2000
MPTEMP, 10, 2100, 2127
!Thermal conductivity table [W/m°C]
MPDATA, KXX, C_ATJ, 1, 5.6386E+01, 5.4953E+01, 5.3090E+01
MPDATA, KXX, C_ATJ, 4, 5.1337E+01, 4.9695E+01, 4.8163E+01
MPDATA, KXX, C_ATJ, 7, 4.6743E+01, 4.5433E+01, 4.4233E+01
MPDATA, KXX, C_ATJ, 10, 4.3145E+01, 4.2871E+01
!-----

```

```

!EMISSION (hemispherical total emissivity)
!
! NOTE 1 - Data are taken from:
!         L. Biassetto, M. Manzolaro, A. Andrighetto Emissivity measurements
!         of opaque gray bodies up to 2000° C by a dual-frequency pyrometer (2008)
!
! NOTE 2 - Isotropic graphite 2114 (unpolished)
!Temperature table [°C]
MPTEMP !erase previous table
MPTEMP, 1, 1270, 1380, 1450
MPTEMP, 4, 1560, 1660, 1775
MPTEMP, 7, 1870, 1970
!Emissivity table [-]
MPDATA, EMIS, C_ATJ, 1, 0.815, 0.820, 0.825
MPDATA, EMIS, C_ATJ, 4, 0.835, 0.840, 0.845
MPDATA, EMIS, C_ATJ, 7, 0.850, 0.855
!-----

```

```

!DENSITY
!
! NOTE 1 - UCAR "Technical Data Sheet: 31": Grade ATJ Isomolded Graphite.
!
! NOTE 2 - the S.I. system of units is used.
!Temperature table [°C]
MPTEMP !erase previous table
MPTEMP, 1, 20
!Density table [kg/m³]
MPDATA, DENS, C_ATJ, 1, 1.76E+03

```

!-----

!SPECIFIC HEAT

!

! NOTE 1 - Data are taken from:

! UCAR Data Sheet (file "UCAR_vol.2.pdf")

MPTEMP !erase previous table

MPTEMP, 1, 0, 500, 1000

MPTEMP, 4, 1500, 2000, 2500

!Specific heat table [J/kg°C]

MPDATA, C, C_ATJ, 1, 600, 1550, 1800

MPDATA, C, C_ATJ, 4, 1900, 2000, 2000

!-----

!COEFFICIENT OF THERMAL EXPANSION

!

! NOTE 1 - Data are taken from:

! Thermophysical Properties of Matter, v13, Y.S. Touloukian, R.K.

! Kirby, R.E. Taylor & T.Y.R. Lee, 1977, IFI/Plenum, NY, NY.

!

! NOTE 2 - Orientation: with grain

!

! NOTE 3 - 10% error; National Carbon Co..

!

! NOTE 4 - the S.I. system of units is used.

!Temperature table [°C]

MPTEMP !erase previous table

MPTEMP, 1, 20, 100, 500

MPTEMP, 4, 1000, 1500, 1600

MPTEMP, 7, 1700, 1800, 1900

MPTEMP, 10, 2000, 2100, 2200

MPTEMP, 13, 2300, 2400, 2500

MPTEMP, 16, 2600, 2700, 2800

!Secant coefficient of thermal expansion [1/°C]

MPDATA, ALPX, C_ATJ, 1, 2.2162E-06, 2.4088E-06, 3.2597E-06

MPDATA, ALPX, C_ATJ, 4, 4.1250E-06, 4.8376E-06, 4.9649E-06

MPDATA, ALPX, C_ATJ, 7, 5.0872E-06, 5.2044E-06, 5.3162E-06

MPDATA, ALPX, C_ATJ, 10, 5.4224E-06, 5.5227E-06, 5.6165E-06

MPDATA, ALPX, C_ATJ, 13, 5.7034E-06, 5.7828E-06, 5.8539E-06

MPDATA, ALPX, C_ATJ, 16, 5.9159E-06, 5.9681E-06, 6.0096E-06

!-----

!ELASTIC MODULUS

!

! NOTE 1 - Data are taken from:

! UCAR "Technical Data Sheet: 31": Grade ATJ Isomolded Graphite

!

! NOTE 2 - the S.I. system of units is used.

!Temperature table [°C]

APP. B PROPRIETÀ DEI MATERIALI

```
MPTEMP !erase previous table
MPTEMP, 1, 20
!Elastic modulus [Pa]
MPDATA, EX, C_ATJ, 1, 9.8E+09
!-----

!POISSON'S RATIO
!
! NOTE 1 - No data available:
! To perform thermo-structural analysis we assign the "reasonable" value of 0.3.
!Temperature table [°C]
MPTEMP !erase previous table
MPTEMP, 1, 20
!Poisson's ratio [-]
MPDATA, PRXY, C_ATJ, 1, 3.0E-01
!-----
```

Appendice C

Listati dei comandi impiegati per le analisi descritte ai capitoli 2, 3 e 4

In questa appendice sono riportati due listati APDL utilizzati per lo studio del target SPES.

In particolare il primo riguarda l'assemblato completo costituito dal riscaldatore e scatola in grafite sottoposti ad una corrente massima di 1300 A, sorgente di ionizzazione superficiale sottoposta ad una corrente massima di 400 A ed infine la camera raffreddata senza l'inserimento di alcuna transizione.

Il secondo listato, invece, è stato utilizzato per ricavare le informazioni utili, quali la temperatura e la differenza di potenziale, in date posizioni dei vari volumi. In particolare dati i tempi a cui si vogliono le soluzioni, si va a ricercare quelle più vicine al tempo dato.

C.1 Analisi elettro-termica del sistema target-sorgente

```
/PREP7  
Tconstr=25  
FINISH  
/TITLE,SPES "Production Target - Surface Ion Source" assembly  
/CONFIG,NRES,100000  
/PREP7  
!c: material properties definition by APDL commands
```

APP. C LISTATI DEI COMANDI IMPIEGATI PER LE ANALISI DESCRITTE AI
CAPITOLI 2, 3 E 4

!—Silicon Carbide SiC—

SiC=1

MP,KXX,SiC,30 !thermal conductivity [W/mK]

MP,EMIS,SiC,0.8 !emissivity (at T=2000° C)

!—Macor—

Macor=2

MP,KXX,Macor,1.46 !thermal conductivity [W/mK]

MP,EMIS,Macor,0.95 !emissivity

MP,RSVX,Macor,1E+14 !electrical resistivity [ohm]

MP,DENS,Macor,2520 !density [kg/m³]

MP,C,Macor,790 !specific heat [J/kgK]

!c: material properties definition by macros

!c: Al5083

*USE,M23Al5083.mac !calls the macro

!c: Ta

*USE,M26Ta.mac !calls the macro

!c: W

*USE,M27W.mac !calls the macro

!c: Cu

*USE,M28Cu.mac !calls the macro

!c: C_ATJ

*USE,M29C_ATJ.mac !calls the macro

!c: FE MODEL CONSTRUCTION

!c: element type

ET,1,SOLID70

ET,2,SOLID226

KEYOPT,2,1,110

ET,3,SHELL132

ET,4,SHELL131

!c: geometry import

FINISH

/AUX15

IOPTN,IGES,NODEFEAT

IOPTN,MERGE,YES

IOPTN,SOLID,YES

IOPTN,SMALL,YES

IOPTN,GTOLER,0.00001

IGESIN,'target_main_clamp','igs'

IGESIN,'target_main_clamp_cpy_1','igs'

IGESIN,'ion-source_main_clamp','igs'

IGESIN,'is_screen','igs'

IGESIN,'st_si100_001a','igs'

IGESIN,'st_si100_002a','igs'

IGESIN,'st_si100_004a','igs'

IGESIN,'st_si100_005a','igs'

IGESIN,'st_si200_001','igs'

IGESIN,'st_si200_001_cpy_1','igs'

IGESIN,'st_si200_001_cpy_2','igs'

```

IGESIN,'st_si200_001_cpy_3','igs'
IGESIN,'st_si200_002','igs'
IGESIN,'st_si200_005','igs'
IGESIN,'st_si200_005_cpy_1','igs'
IGESIN,'st_si200_005_cpy_2','igs'
IGESIN,'st_si200_005_cpy_3','igs'
IGESIN,'target_heater','igs'
IGESIN,'target_clamp_right','igs'
IGESIN,'target_clamp_left','igs'
IGESIN,'transfer_line','igs'
IGESIN,'electrical_connection','igs'
IGESIN,'electrical_conn_support','igs'
IGESIN,'ion_source_clamp','igs'
FINISH
/PREP7

```

```

!c: gluing of volumes
VGLUE,ALL
NUMCMP,VOLU
NUMCMP,AREA
NUMCMP,LINE
NUMCMP,KP

```

```

! SPES TARGET

```

```

!c: geometry (Graphite box, windows and dumpers) import
FINISH
/AUX15
IOPTN,IGES,NODEFEAT
IOPTN,MERGE,YES
IOPTN,SOLID,YES
IOPTN,SMALL,YES
IOPTN,GTOLER,0.00001
IGESIN,'box_1','igs'
IGESIN,'box_2','igs'
IGESIN,'box_3','igs'
IGESIN,'window','igs'
IGESIN,'window_cpy_1','igs'
IGESIN,'dumper_0-8','igs'
IGESIN,'dumper_0-8_cpy_1','igs'
IGESIN,'dumper_1-0','igs'
IGESIN,'dumper_10-0','igs'
FINISH

```

```

/PREP7

```

```

!c: gluing of volumes related to the objects made of Graphite
VSEL,S,,25,33,1
ALLSEL,BELOW,VOLU
VGLUE,ALL

```

```

!enters the model creation preprocessor

```

```

!selects a subset of volumes

```

```

!selects all entities with a single command

```

```

!generates new volumes by "gluing" volumes

```

APP. C LISTATI DEI COMANDI IMPIEGATI PER LE ANALISI DESCRITTE AI
CAPITOLI 2, 3 E 4

```

NUMCMP,VOLU !compressed entity number
NUMCMP,AREA
NUMCMP,LINE
NUMCMP,KP

!c: geometry (SiC disks) import
FINISH
/AUX15
IOPTN,IGES,NODEFEAT
IOPTN,MERGE,YES
IOPTN,SOLID,YES
IOPTN,SMALL,YES
IOPTN,GTOLER,0.00001
IGESIN,'disk','igs'
IGESIN,'disk_cpy_1','igs'
IGESIN,'disk_cpy_2','igs'
IGESIN,'disk_cpy_3','igs'
IGESIN,'disk_cpy_4','igs'
IGESIN,'disk_cpy_5','igs'
IGESIN,'disk_cpy_6','igs'
FINISH

/PREP7
ALLSEL
ne1=11000
NUMSTR,KP,ne1+1
NUMSTR,LINE,ne1+1
NUMSTR,AREA,ne1+1
NUMSTR,VOLU,ne1+1
/AUX15
IOPTN,IGES,NODEFEAT
IOPTN,MERGE,NO
IOPTN,SOLID,YES
IOPTN,SMALL,YES
IOPTN,GTOLER,0.00001
IGESIN,'main_plate','igs'
IGESIN,'cover','igs'

/PREP7
NUMSTR,KP,1
NUMSTR,LINE,1
NUMSTR,AREA,1
NUMSTR,VOLU,1

!c: VOLUME SCALING [from "mm" to "m"]
ALLSEL
VSEL,S,,1,10000,1
VLSCALE,ALL,,0.001,0.001,0.001,0,1
!c: VOLUME SCALING [from "mm" to "m"]
ALLSEL

! creazione area interna puntali
ARSCALE,10,11,,1,1,5,,1,0
ASEL,S,AREA,,526,527
VSBA,9,ALL,,DELETE,DELETE
ALLSEL
ARSCALE,15,16,,1,1,5,,1,0
ASEL,S,AREA,,9
ASEL,A,AREA,,526
VSBA,10,ALL,,DELETE,DELETE
ALLSEL

ARSCALE,20,21,,1,1,5,,1,0
ASEL,S,AREA,,9
ASEL,A,AREA,,14
VSBA,11,ALL,,DELETE,DELETE
ALLSEL

! divisione ion source clamp
VOFFST,288,-0.05
VSBA,8,566,,DELETE,KEEP
VDELE,11,,1
ALLSEL

! divisione delle 4 barre di centraggio
AL,615,619
VSBA,14,9,,DELETE,KEEP
AL,651,655
VSBA,15,14,,DELETE,KEEP
AL,628,637
VSBA,16,19,,DELETE,KEEP
AL,673,664
VSBA,17,261,,DELETE,KEEP
ALLSEL

! divisione heater e box grafite
K,10001,-0.05798,1,1
K,10002,-0.05798,1,-1
K,10003,-0.05798,-1,-1
K,10004,-0.05798,-1,1
NUMSTR,LINE,10000
NUMSTR,AREA,10000
A,10001,10002,10003,10004
NUMSTR,LINE,5000
NUMSTR,AREA,5000
NUMSTR,KP,5000
NUMSTR,VOLU,5000
VSEL,S,VOLU,,5
VSEL,A,VOLU,,33
VSBA,ALL,10000,DELETE,DELETE
ASEL,S,AREA,,10000,10100
LSEL,S,LINE,,10000,10100
KSEL,S,KP,,10000,10100
ADELE,10000,10100,,1

```

LDELE,10000,10100,,1
 KDELE,10000,10100
 ALLSEL

 K,10001,-0.0055,1,1
 K,10002,-0.0055,1,-1
 K,10003,-0.0055,-1,-1
 K,10004,-0.0055,-1,1
 NUMSTR,LINE,10000
 NUMSTR,AREA,10000
 A,10001,10002,10003,10004
 NUMSTR,LINE,5000
 NUMSTR,AREA,5000
 NUMSTR,KP,5000
 NUMSTR,VOLU,5000
 VSEL,S,VOLU,,5003
 VSEL,A,VOLU,,25
 VSBA,ALL,10000,,DELETE,DELETE
 ASEL,S,AREA,,10000,10100
 LSEL,S,LINE,,10000,10100
 KSEL,S,KP,,10000,10100
 ADELE,10000,10100,,1
 LDELE,10000,10100,,1
 KDELE,10000,10100
 ALLSEL

 K,10001,0.0055,1,1
 K,10002,0.0055,1,-1
 K,10003,0.0055,-1,-1
 K,10004,0.0055,-1,1
 NUMSTR,LINE,10000
 NUMSTR,AREA,10000
 A,10001,10002,10003,10004
 NUMSTR,LINE,5000
 NUMSTR,AREA,5000
 NUMSTR,KP,5000
 NUMSTR,VOLU,5000
 VSEL,S,VOLU,,5006
 VSEL,A,VOLU,,5007
 VSBA,ALL,10000,,DELETE,DELETE
 ASEL,S,AREA,,10000,10100
 LSEL,S,LINE,,10000,10100
 KSEL,S,KP,,10000,10100
 ADELE,10000,10100,,1
 LDELE,10000,10100,,1
 KDELE,10000,10100
 ALLSEL

 K,10001,0.1030200,0.03,1
 K,10002,0.1030200,0.03,-1
 K,10003,0.1030200,-1,-1
 K,10004,0.1030200,-1,1

 NUMSTR,LINE,10000
 NUMSTR,AREA,10000
 A,10001,10002,10003,10004
 NUMSTR,LINE,5000
 NUMSTR,AREA,5000
 NUMSTR,KP,5000
 NUMSTR,VOLU,5000
 VSBA,32,10000,,DELETE,DELETE
 ASEL,S,AREA,,10000,10100
 LSEL,S,LINE,,10000,10100

 NUMSTR,LINE,10000
 NUMSTR,AREA,10000
 A,10001,10002,10003,10004
 NUMSTR,LINE,5000
 NUMSTR,AREA,5000
 NUMSTR,KP,5000
 NUMSTR,VOLU,5000
 VSBA,32,10000,,DELETE,DELETE
 ASEL,S,AREA,,10000,10100
 LSEL,S,LINE,,10000,10100

 NUMSTR,LINE,10000
 NUMSTR,AREA,10000
 A,10001,10002,10003,10004
 NUMSTR,LINE,5000
 NUMSTR,AREA,5000
 NUMSTR,KP,5000
 NUMSTR,VOLU,5000
 VSBA,5010,10000,,DELETE,DELETE
 ASEL,S,AREA,,10000,10100
 LSEL,S,LINE,,10000,10100
 KSEL,S,KP,,10000,10100
 ADELE,10000,10100,,1
 LDELE,10000,10100,,1
 KDELE,10000,10100
 ALLSEL

 K,10001,1,0.001,1
 K,10002,-1,0.001,1
 K,10003,-1,0.001,-1
 K,10004,1,0.001,-1
 NUMSTR,LINE,10000
 NUMSTR,AREA,10000
 A,10001,10002,10003,10004
 NUMSTR,LINE,5000
 NUMSTR,AREA,5000
 NUMSTR,KP,5000
 NUMSTR,VOLU,5000
 VSEL,S,VOLU,,5002
 vSEL,A,VOLU,,5007
 VSBA,ALL,10000,,DELETE,DELETE
 ASEL,S,AREA,,10000,10100
 LSEL,S,LINE,,10000,10100
 KSEL,S,KP,,10000,10100
 ADELE,10000,10100,,1
 LDELE,10000,10100,,1
 KDELE,10000,10100
 ALLSEL

 K,10001,0.06132,1,1
 K,10002,0.06132,1,-1
 K,10003,0.06132,-1,-1
 K,10004,0.06132,-1,1
 NUMSTR,LINE,10000
 NUMSTR,AREA,10000
 A,10001,10002,10003,10004
 NUMSTR,LINE,5000
 NUMSTR,AREA,5000
 NUMSTR,KP,5000
 NUMSTR,VOLU,5000
 VSBA,32,10000,,DELETE,DELETE
 ASEL,S,AREA,,10000,10100
 LSEL,S,LINE,,10000,10100

APP. C LISTATI DEI COMANDI IMPIEGATI PER LE ANALISI DESCRITTE AI
CAPITOLI 2, 3 E 4

```

KSEL,S,KP,,10000,10100
ADELE,10000,10100,,1
LDELE,10000,10100,,1
KDELE,10000,10100
ALLSEL

! divisione heater wing
VOFFST,247,0.05
VSBA,5010,5073,,DELETE,KEEP
VDELE,5014,,1
ALLSEL
VOFFST,256,0.05
VSBA,5011,5072,,DELETE,KEEP
VDELE,5010,,1
ALLSEL

! divisione parte forata heater
NUMSTR,LINE,5000
NUMSTR,AREA,5000
NUMSTR,KP,5000
NUMSTR,VOLU,5000
AGEN,2,5025,,-0.05,,0
VSBA,5009,5044,,DELETE,DELETE
ALLSEL
VDELE,5010,,1
ALLSEL

! divisione transfert line and electrical _ connection
K,10001,1,1,0.089
K,10002,-1,1,0.089
K,10003,-1,-1,0.089
K,10004,1,-1,0.089
NUMSTR,LINE,10000
NUMSTR,AREA,10000
A,10001,10002,10003,10004
NUMSTR,LINE,7000
NUMSTR,AREA,7000
NUMSTR,KP,7000
NUMSTR,VOLU,7000
VSEL,S,VOLU,,20
vSEL,A,VOLU,,21
VSBA,ALL,10000,,DELETE,DELETE
ASEL,S,AREA,,10000,10100
LSEL,S,LINE,,10000,10100
KSEL,S,KP,,10000,10100
ADELE,10000,10100,,1
LDELE,10000,10100,,1
KDELE,10000,10100
ALLSEL

! divisione hot cavity
K,10001,1,1,0.003
K,10002,-1,1,0.003
K,10003,-1,-1,0.003
K,10004,1,-1,0.003
NUMSTR,LINE,10000
NUMSTR,AREA,10000
A,10001,10002,10003,10004
NUMSTR,LINE,8000
NUMSTR,AREA,8000
NUMSTR,KP,8000
NUMSTR,VOLU,8000
VSBA,18,10000,,DELETE,DELETE
ASEL,S,AREA,,10000,10100
LSEL,S,LINE,,10000,10100
KSEL,S,KP,,10000,10100
ADELE,10000,10100,,1
LDELE,10000,10100,,1
KDELE,10000,10100
ALLSEL

/PREP7
ne1=11000
NUMSTR,KP,ne1+1
NUMSTR,LINE,ne1+1
NUMSTR,AREA,ne1+1
NUMSTR,VOLU,ne1+1

!creo l'area di intersezione tra il piatto e la transi-
zione/coperchio
LGEN,2,38+ne1,,0,0,0,1,0
LGEN,2,49+ne1,,0,0,0,1,0
ASEL,S,AREA,,10+ne1
ALLSEL,BELOW,AREA
LSEL,A,LINE,,55+ne1
LSEL,A,LINE,,57+ne1
ASBL,ALL,ALL,,DELETE,KEEP
ALLSEL,ALL

l_tra=110
l_f=45
d_f=32

!sposto il coperchio
VGEN,1,2+ne1,,0,0,l_tra,0,1

!creo il piccolo foro sulla cover
NUMSTR,KP,100001
NUMSTR,LINE,100001
NUMSTR,AREA,100001
NUMSTR,VOLU,100001
CYL4,0,-30,20,360,,1000

NUMSTR,KP,ne1+1

```

```

NUMSTR,LINE,ne1+1
NUMSTR,AREA,ne1+1
NUMSTR,VOLU,ne1+1

VSEL,S,VOLU,,2+ne1
ALLSEL,BELOW,VOLU
ASEL,A,AREA,,100003,100004
VSBA,ALL,ALL,,DELETE,KEEP
VSEL,S,VOLU,,100001,100001+100
ASEL,S,AREA,,100001,100001+100
LSEL,S,LINE,,100001,100001+100
KSEL,S,KP,,100001,100001+100
VDELE,ALL
ADELE,ALL
LDELE,ALL
KDELE,ALL

ALLSEL,ALL

!taglio il piatto e la cover orizzontalmente
K,100001,1000,-30,1000
K,100002,1000,-30,-1000
K,100003,-1000,-30,-1000
K,100004,-1000,-30,1000

NUMSTR,LINE,100001
NUMSTR,AREA,100001
A,100001,100002,100003,100004
NUMSTR,KP,ne1+1
NUMSTR,LINE,ne1+1
NUMSTR,AREA,ne1+1
NUMSTR,VOLU,ne1+1

VSBA,1+ne1,100001,,DELETE,KEEP
VSBA,4+ne1,100001,,DELETE,DELETE
ASEL,S,AREA,,100001,100001+100
LSEL,S,LINE,,100001,100001+100
KSEL,S,KP,,100001,100001+100
ADELE,ALL
LDELE,ALL
KDELE,ALL

ALLSEL,ALL

!taglio il piatto e la cover verticalmente
K,100001,0,1000,1000
K,100002,0,-1000,1000
K,100003,0,-1000,-1000
K,100004,0,1000,-1000

NUMSTR,LINE,100001
NUMSTR,AREA,100001
A,100001,100002,100003,100004
NUMSTR,KP,ne1+1
NUMSTR,LINE,ne1+1
NUMSTR,AREA,ne1+1
NUMSTR,VOLU,ne1+1

VSEL,S,VOLU,,1+ne1
VSEL,A,VOLU,,2+ne1
VSEL,A,VOLU,,5+ne1
VSEL,A,VOLU,,6+ne1
VSBA,ALL,100001,,DELETE,DELETE
ASEL,S,AREA,,100001,100001+100
LSEL,S,LINE,,100001,100001+100
KSEL,S,KP,,100001,100001+100
ADELE,ALL
LDELE,ALL
KDELE,ALL

ALLSEL,ALL

VSEL,S,,ALL,,1
ASEL,INVE,,ALL
LSEL,INVE,,ALL
KSEL,INVE,,ALL
ADELE,ALL,,1
LDELE,ALL,,1
KDELE,ALL
ALLSEL

! avvicino e incollo
VSEL,S,VOLU,,3+ne1
VSEL,A,VOLU,,10+ne1,13+ne1,1
ALLSEL,BELOW,VOLU
VGEN,2,ALL,,0,0,-l_ tra,,0,1
ALLSEL

VSEL,S,VOLU,,12+ne1
VSEL,A,VOLU,,8+ne1
ALLSEL,BELOW,VOLU
VGLUE,ALL
ALLSEL,ALL

VSEL,S,VOLU,,10+ne1
VSEL,A,VOLU,,9+ne1
ALLSEL,BELOW,VOLU
VGLUE,ALL
ALLSEL,ALL

VSEL,S,VOLU,,11+ne1
VSEL,A,VOLU,,7+ne1
ALLSEL,BELOW,VOLU
VGLUE,ALL

```

APP. C LISTATI DEI COMANDI IMPIEGATI PER LE ANALISI DESCRITTE AI
CAPITOLI 2, 3 E 4

| | |
|-----------------------------------|--|
| ALLSEL,ALL | VSEL,S,,ALL,,1 |
| VSEL,S,VOLU,,13+ne1 | ASEL,INVE,,ALL |
| VSEL,A,VOLU,,4+ne1 | LSEL,INVE,,ALL |
| ALLSEL,BELOW,VOLU | KSEL,INVE,,ALL |
| VGLUE,ALL | ADELE,ALL,,1 |
| ALLSEL,ALL | LDELE,ALL,,1 |
| | KDELE,ALL |
| <i>!divido ancor il coperchio</i> | <i>!c: VOLUME SCALING [from "mm" to "m"]</i> |
| VSEL,S,VOLU,,1+ne1,2+ne1 | ALLSEL |
| VSEL,A,VOLU,,5+ne1,6+ne1 | VSEL,S,,ne1,ne1+10000,,1 |
| ALLSEL,BELOW,VOLU | VLSCALE,ALL,,0.001,0.001,0.001,,0,1 |
| | <i>!c: VOLUME SCALING [from "mm" to "m"]</i> |
| K,100001,1000,1000,17 | ALLSEL |
| K,100002,1000,-1000,17 | |
| K,100003,-1000,-1000,17 | <i>!c: DELETE VOLUMES</i> |
| K,100004,-1000,1000,17 | VDELE,1,4,1,1 |
| | VDELE,8,,1 |
| NUMSTR,LINE,100001 | VDELE,11,,1 |
| NUMSTR,AREA,100001 | VDELE,14,16,1,1 |
| A,100001,100002,100003,100004 | VDELE,22,,1 |
| NUMSTR,KP,ne1+1 | VDELE,47,49,1,1 |
| NUMSTR,LINE,ne1+1 | |
| NUMSTR,AREA,ne1+1 | <i>!c: Volume MESHING</i> |
| NUMSTR,VOLU,ne1+1 | |
| | <i>!c: st_si100_005a (schermo) MESH</i> |
| VSBA,ALL,100001,,DELETE,DELETE | MAT,Ta |
| ALLSEL,ALL | MSHAPE,0,2D |
| | MSHKEY,0 |
| VSEL,S,VOLU,,14+ne1,17+ne1,1 | TYPE,3 |
| ALLSEL,BELOW,VOLU | ASEL,S,AREA,,28 |
| | ALLSEL,BELOW,AREA |
| K,100001,1000,1000,168.5 | LESIZE,ALL,,14 |
| K,100002,1000,-1000,168.5 | AMESH,28 |
| K,100003,-1000,-1000,168.5 | EXTOPT,ACLEAR,1 |
| K,100004,-1000,1000,168.5 | ALLSEL,ALL |
| | TYPE,2 |
| NUMSTR,LINE,100001 | ESIZE,0.0016 |
| NUMSTR,AREA,100001 | VSWEEP,6,28 |
| A,100001,100002,100003,100004 | ALLSEL |
| NUMSTR,KP,ne1+1 | |
| NUMSTR,LINE,ne1+1 | <i>!c: is_hot_cavity MESH</i> |
| NUMSTR,AREA,ne1+1 | MAT,Ta |
| NUMSTR,VOLU,ne1+1 | MSHAPE,0,2D |
| VSBA,ALL,100001,,DELETE,DELETE | MSHKEY,0 |
| ALLSEL,ALL | TYPE,3 |
| | ASEL,S,AREA,,7 |
| NUMSTR,KP,1 | ALLSEL,BELOW,AREA |
| NUMSTR,LINE,1 | LESIZE,ALL,,12 |
| NUMSTR,AREA,1 | AESIZE,ALL,0.1 |
| NUMSTR,VOLU,1 | AMESH,7 |
| | EXTOPT,ACLEAR,1 |

```

ALLSEL,ALL
TYPE,2
ESIZE,0.0015
VSWEEP,8000,7
ALLSEL

MAT,Ta
TYPE,2
MSHAPE,1,3D
MSHKEY,0
VSEL,S,,8001
ALLSEL,BELOW,VOLU
LESIZE,274,,12
LESIZE,275,,12
AESIZE,ALL,0.001
VMESH,ALL
ALLSEL

!c: is_support MESH
MAT,Ta
TYPE,2
MSHAPE,1,3D
MSHKEY,0
VSEL,S,,24
ALLSEL,BELOW,VOLU
AESIZE,ALL,0.002
VMESH,ALL
ALLSEL

!c: is_screen MESH (Ta, thermal-electric-SOLID226)
MAT,Ta
TYPE,2
MSHAPE,1,3D
MSHKEY,0
VSEL,S,,23
ALLSEL,BELOW,VOLU
AESIZE,ALL,0.0040
VMESH,ALL
ALLSEL

!c: transfer_line MESH
MAT,Ta
MSHAPE,0,2D
MSHKEY,0
TYPE,3
ASEL,S,AREA,,7004
ALLSEL,BELOW,AREA
LESIZE,ALL,,8
AMESH,7004
EXTOPT,ACLEAR,1
ALLSEL,ALL
TYPE,2

ESIZE,0.002
VSWEEP,7000,7004
ALLSEL

!c: is_bush MESH (Ta, thermal-electric-SOLID226)
MAT,Ta
TYPE,2
MSHAPE,1,3D
MSHKEY,0
VSEL,S,,19
ALLSEL,BELOW,VOLU
AESIZE,ALL,0.002
VMESH,ALL
ALLSEL

!c: electrical_connection MESH
MAT,Ta
MSHAPE,0,2D
MSHKEY,0
TYPE,3
ASEL,S,AREA,,7012
ALLSEL,BELOW,AREA
ESIZE,0.002
AMESH,7012
EXTOPT,ACLEAR,1
ALLSEL,ALL
TYPE,2
ESIZE,0.002
VSWEEP,7002,7012
ALLSEL

MAT,Ta
TYPE,2
MSHAPE,1,3D
MSHKEY,0
VSEL,S,,7003
VSEL,A,,7001
ALLSEL,BELOW,VOLU
AESIZE,ALL,0.0012
VMESH,ALL
ALLSEL

!c: electrical_conn_support MESH
MAT,Ta
MSHAPE,0,2D
MSHKEY,0
TYPE,3
ASEL,S,AREA,,4
ALLSEL,BELOW,AREA
LESIZE,951,,15
LESIZE,958,,2
LESIZE,955,,3

```

APP. C LISTATI DEI COMANDI IMPIEGATI PER LE ANALISI DESCRITTE AI
CAPITOLI 2, 3 E 4

ESIZE,0.0035
 AMESH,4
 EXTOPT,ACLEAR,1
 ALLSEL,ALL
 TYPE,2
 ESIZE,0.003
 VSWEEP,7,4
 ALLSEL

!c: ion_source_clamp MESH

MAT,Cu
 TYPE,2
 ESIZE,0.007
 VSWEEP,45,288
 ALLSEL
 MAT,Cu
 MSHAPE,0,2D
 MSHKEY,0
 TYPE,3
 ASEL,S,AREA,,574
 ALLSEL,BELOW,AREA
 LESIZE,967,,4
 LESIZE,968,,4
 ESIZE,0.005
 AMESH,574
 EXTOPT,ACLEAR,1
 ALLSEL,ALL
 TYPE,2
 VSWEEP,46,574
 ALLSEL

!c: ion-source_main_clamp MESH

MAT,Cu
 MSHAPE,0,2D
 MSHKEY,0
 TYPE,3
 ASEL,S,AREA,,565
 ALLSEL,BELOW,AREA
 LESIZE,ALL,,4
 ESIZE,0.1
 AMESH,565
 EXTOPT,ACLEAR,1
 ALLSEL,ALL
 TYPE,2
 ESIZE,0.01
 VSWEEP,44,565
 ALLSEL

MAT,Cu
 MSHAPE,1,2D
 MSHKEY,0
 TYPE,3

ASEL,S,AREA,,526
 ALLSEL,BELOW,AREA
 ESIZE,0.1
 AMESH,526
 EXTOPT,ACLEAR,1
 ALLSEL,ALL
 TYPE,2
 VSWEEP,10,526
 ALLSEL

!c: target_main_clamp MESH

MAT,Cu
 MSHAPE,0,2D
 MSHKEY,0
 TYPE,3
 ASEL,S,AREA,,559
 ALLSEL,BELOW,AREA
 LESIZE,ALL,,4
 ESIZE,0.1
 AMESH,559
 EXTOPT,ACLEAR,1
 ALLSEL,ALL
 TYPE,2
 ESIZE,0.01
 VSWEEP,42,559
 ALLSEL

MAT,Cu
 MSHAPE,1,2D
 MSHKEY,0
 TYPE,3

ASEL,S,AREA,,528
 ALLSEL,BELOW,AREA
 ESIZE,0.1
 AMESH,528
 EXTOPT,ACLEAR,1
 ALLSEL,ALL
 TYPE,2
 VSWEEP,41,528
 ALLSEL

!c: target_clamp_left MESH

MAT,Cu
 MSHAPE,0,2D
 MSHKEY,0
 TYPE,3
 ASEL,S,AREA,,249
 ALLSEL,BELOW,AREA
 LESIZE,ALL,,4
 LESIZE,866,,1
 LESIZE,859,,2
 AMESH,249

```

EXTOPT,ACLEAR,1
ALLSEL,ALL
TYPE,2
ESIZE,0.007
VSWEEP,13,249
ALLSEL

!c: target_main_clamp_cpy_1 MESH
MAT,Cu
MSHAPE,0,2D
MSHKEY,0
TYPE,3
ASEL,S,AREA,,562
ALLSEL,BELOW,AREA
LESIZE,ALL,,4
ESIZE,0.1
AMESH,562
EXTOPT,ACLEAR,1
ALLSEL,ALL
TYPE,2
ESIZE,0.01
VSWEEP,43,562
ALLSEL

MAT,Cu
MSHAPE,1,2D
MSHKEY,0
TYPE,3
ASEL,S,AREA,,527
ALLSEL,BELOW,AREA
ESIZE,0.1
AMESH,527
EXTOPT,ACLEAR,1
ALLSEL,ALL
TYPE,2
VSWEEP,9,527
ALLSEL

!c: target_clamp_right MESH
MAT,Cu
MSHAPE,0,2D
MSHKEY,0
TYPE,3
ASEL,S,AREA,,240
ALLSEL,BELOW,AREA
LESIZE,ALL,,4
LESIZE,845,,1
LESIZE,837,,1
AMESH,240
EXTOPT,ACLEAR,1
ALLSEL,ALL
TYPE,2

ESIZE,0.007
VSWEEP,12,240
ALLSEL

!c: target_heater MESH
MAT,Ta
MSHAPE,0,2D
MSHKEY,0
TYPE,3
ASEL,S,AREA,,5023
ALLSEL,BELOW,AREA
LESIZE,ALL,,20
AMESH,5023
EXTOPT,ACLEAR,1
ALLSEL,ALL
TYPE,2
ESIZE,0.004
VSWEEP,5005,5023
ALLSEL

MAT,Ta
MSHAPE,0,2D
MSHKEY,0
TYPE,3
ASEL,S,AREA,,5041
ALLSEL,BELOW,AREA
LESIZE,ALL,,20
AMESH,5041
EXTOPT,ACLEAR,1
ALLSEL,ALL
TYPE,2
ESIZE,0.004
VSWEEP,5006,5041
ALLSEL

MAT,Ta
TYPE,2
MSHAPE,1,3D
MSHKEY,0
VSEL,S,,5011
ALLSEL,BELOW,VOLU
AESIZE,ALL,0.003
LSEL,S,,728,729,1
LSEL,A,,734,735,1
LSEL,A,,737,739,2
LSEL,A,,744,745,1
LSEL,A,,5102,5103,1
LESIZE,ALL,,8
VMESH,ALL
ALLSEL

MAT,Ta

```

APP. C LISTATI DEI COMANDI IMPIEGATI PER LE ANALISI DESCRITTE AI
CAPITOLI 2, 3 E 4

```

MSHAPE,0,2D
MSHKEY,0
TYPE,3
ASEL,S,AREA,,5084
ALLSEL,BELOW,AREA
LESIZE,ALL,,6
LESIZE,797,,2
LESIZE,5111,,1
LESIZE,716,,1
AMESH,5084
EXTOPT,ACLEAR,1
ALLSEL,ALL
TYPE,2
ESIZE,0.004
VSWEEP,5014,5084
ALLSEL

MAT,Ta
MSHAPE,0,2D
MSHKEY,0
TYPE,3
ASEL,S,AREA,,5078
ALLSEL,BELOW,AREA
LESIZE,ALL,,6
LESIZE,776,,2
LESIZE,5105,,1
LESIZE,764,,1
AMESH,5078
EXTOPT,ACLEAR,1
ALLSEL,ALL
TYPE,2
ESIZE,0.004
VSWEEP,5015,5078
ALLSEL

MAT,Ta
TYPE,2
ESIZE,0.004
VSWEEP,5016,5075,5031
ALLSEL

MAT,Ta
TYPE,2
ESIZE,0.004
VSWEEP,5017,5074,5050
ALLSEL

MAT,Ta
TYPE,2
MSHAPE,1,3D
MSHKEY,0
VSEL,S,,5012
VSEL,A,,5013
ALLSEL,BELOW,VOLU
AESIZE,ALL,0.002
VMESH,ALL
ALLSEL

!c: box_1 MESH (C_ATJ, thermal-SOLID70)
MAT,C_ATJ
MSHAPE,0,2D
MSHKEY,0
TYPE,4
ASEL,S,AREA,,481
ALLSEL,BELOW,AREA
LESIZE,ALL,,20
AMESH,481
EXTOPT,ACLEAR,1
ALLSEL,ALL
TYPE,1
ESIZE,0.0045
VSWEEP,5007,481
ALLSEL

!c: box_2 import
MAT,C_ATJ
MSHAPE,0,2D
MSHKEY,0
TYPE,4
ASEL,S,AREA,,5034
ALLSEL,BELOW,AREA
LESIZE,ALL,,20
AMESH,5034
EXTOPT,ACLEAR,1
ALLSEL,ALL
TYPE,1
ESIZE,0.0045
VSWEEP,5003,5034
ALLSEL

MAT,C_ATJ
MSHAPE,0,2D
MSHKEY,0
TYPE,4
ASEL,S,AREA,,5018
ALLSEL,BELOW,AREA
LESIZE,ALL,,20
AMESH,5018
EXTOPT,ACLEAR,1
ALLSEL,ALL
TYPE,1
ESIZE,0.0045
VSWEEP,5004,5018
ALLSEL

```

```
MAT,C_ATJ
TYPE,1
MSHAPE,1,3D
MSHKEY,0
VSEL,S,,5008
ALLSEL,BELOW,VOLU
AESIZE,ALL,0.004
VMESH,ALL
ALLSEL
```

```
!c: box_3 import
MAT,C_ATJ
MSHAPE,0,2D
MSHKEY,0
TYPE,4
ASEL,S,AREA,,482
ALLSEL,BELOW,AREA
LESIZE,ALL,,20
AMESH,482
EXTOPT,ACLEAR,1
ALLSEL,ALL
TYPE,1
ESIZE,0.0045
VSWEEP,5001,482
ALLSEL
```

```
!c: window import
MAT,C_ATJ
MSHAPE,0,2D
MSHKEY,0
TYPE,4
ASEL,S,AREA,,493
ALLSEL,BELOW,AREA
LESIZE,ALL,,20
AMESH,493
EXTOPT,ACLEAR,1
ALLSEL,ALL
TYPE,1
ESIZE,0.004
VSWEEP,26,493
ALLSEL
```

```
MAT,C_ATJ
TYPE,1
MSHAPE,1,3D
MSHKEY,0
VSEL,S,,5002
ALLSEL,BELOW,VOLU
AESIZE,ALL,0.004
VMESH,ALL
ALLSEL
```

```
!c: window_cpy_1 import
MAT,C_ATJ
MSHAPE,0,2D
MSHKEY,0
TYPE,4
ASEL,S,AREA,,495
ALLSEL,BELOW,AREA
LESIZE,ALL,,20
AMESH,495
EXTOPT,ACLEAR,1
ALLSEL,ALL
TYPE,1
ESIZE,0.004
VSWEEP,27,495
ALLSEL
```

```
!c: dumper_0-8 import
MAT,C_ATJ
MSHAPE,0,2D
MSHKEY,0
TYPE,4
ASEL,S,AREA,,496
ALLSEL,BELOW,AREA
LESIZE,ALL,,20
AMESH,496
EXTOPT,ACLEAR,1
ALLSEL,ALL
TYPE,1
ESIZE,0.004
VSWEEP,28,496
ALLSEL
```

```
MAT,C_ATJ
TYPE,1
MSHAPE,1,3D
MSHKEY,0
VSEL,S,,5000
ALLSEL,BELOW,VOLU
AESIZE,ALL,0.004
VMESH,ALL
ALLSEL
```

```
!c: dumper_0-8_cpy_1 import
MAT,C_ATJ
MSHAPE,0,2D
MSHKEY,0
TYPE,4
ASEL,S,AREA,,498
ALLSEL,BELOW,AREA
LESIZE,ALL,,20
AMESH,498
```

APP. C LISTATI DEI COMANDI IMPIEGATI PER LE ANALISI DESCRITTE AI
CAPITOLI 2, 3 E 4

```

EXTOPT,ACLEAR,1
ALLSEL,ALL
TYPE,1
ESIZE,0.004
VSWEEP,29,498
ALLSEL

!c: dumper_1-0 import
MAT,C_ATJ
MSHAPE,0,2D
MSHKEY,0
TYPE,4
ASEL,S,AREA,,500
ALLSEL,BELOW,AREA
LESIZE,ALL,,20
AMESH,500
EXTOPT,ACLEAR,1
ALLSEL,ALL
TYPE,1
ESIZE,0.004
VSWEEP,30,500
ALLSEL

!c: dumper_10-0 import
MAT,C_ATJ
MSHAPE,0,2D
MSHKEY,0
TYPE,4
ASEL,S,AREA,,502
ALLSEL,BELOW,AREA
LESIZE,ALL,,20
AMESH,502
EXTOPT,ACLEAR,1
ALLSEL,ALL
TYPE,1
ESIZE,0.004
VSWEEP,31,502
ALLSEL

!c: disk import
MAT,SiC
MSHAPE,0,2D
MSHKEY,0
TYPE,4
ASEL,S,AREA,,530
ALLSEL,BELOW,AREA
LESIZE,ALL,,16
AMESH,530
EXTOPT,ACLEAR,1
ALLSEL,ALL
TYPE,1
ESIZE,0.005

VSWEEP,34,530
ALLSEL

!c: disk_cpy_1 import
MAT,SiC
MSHAPE,0,2D
MSHKEY,0
TYPE,4
ASEL,S,AREA,,534
ALLSEL,BELOW,AREA
LESIZE,ALL,,16
AMESH,534
EXTOPT,ACLEAR,1
ALLSEL,ALL
TYPE,1
ESIZE,0.005
VSWEEP,35,534
ALLSEL

!c: disk_cpy_2 import
MAT,SiC
MSHAPE,0,2D
MSHKEY,0
TYPE,4
ASEL,S,AREA,,538
ALLSEL,BELOW,AREA
LESIZE,ALL,,16
AMESH,538
EXTOPT,ACLEAR,1
ALLSEL,ALL
TYPE,1
ESIZE,0.005
VSWEEP,36,538
ALLSEL

!c: disk_cpy_3 import
MAT,SiC
MSHAPE,0,2D
MSHKEY,0
TYPE,4
ASEL,S,AREA,,542
ALLSEL,BELOW,AREA
LESIZE,ALL,,16
AMESH,542
EXTOPT,ACLEAR,1
ALLSEL,ALL
TYPE,1
ESIZE,0.005
VSWEEP,37,542
ALLSEL

!c: disk_cpy_4 import

```

```

MAT,SiC
MSHAPE,0,2D
MSHKEY,0
TYPE,4
ASEL,S,AREA,,546
ALLSEL,BELOW,AREA
LESIZE,ALL,,16
AMESH,546
EXTOPT,ACLEAR,1
ALLSEL,ALL
TYPE,1
ESIZE,0.005
VSWEEP,38,546
ALLSEL

```

```

TYPE,4
MSHAPE,0,2D
MSHKEY,0
ESIZE,0.040
AMESH,57+ne1
TYPE,1
EXTOPT,ACLEAR,1
LESIZE,101+ne1,,ndiv
LESIZE,107+ne1,,ndiv
LESIZE,59+ne1,,ndiv
LESIZE,10+ne1,,ndiv
LESIZE,9+ne1,,ndiv
LESIZE,126+ne1,,ndiv
VSWEEP,11+ne1,57+ne1,53+ne1

```

```

!c: disk_cpy_5 import
MAT,SiC
MSHAPE,0,2D
MSHKEY,0
TYPE,4
ASEL,S,AREA,,550
ALLSEL,BELOW,AREA
LESIZE,ALL,,16
AMESH,550
EXTOPT,ACLEAR,1
ALLSEL,ALL
TYPE,1
ESIZE,0.005
VSWEEP,39,550
ALLSEL

```

```

ESIZE,0.020
LESIZE,84+ne1,,ndiv
VSWEEP,1+ne1
ALLSEL

MAT,AI5083
TYPE,4
MSHAPE,0,2D
MSHKEY,0
ESIZE,0.040
AMESH,106+ne1
TYPE,1
EXTOPT,ACLEAR,1
ESIZE,0.013
VSWEEP,18+ne1,106+ne1,102+ne1

```

```

!c: disk_cpy_6 import
MAT,SiC
MSHAPE,0,2D
MSHKEY,0
TYPE,4
ASEL,S,AREA,,554
ALLSEL,BELOW,AREA
LESIZE,ALL,,16
AMESH,554
EXTOPT,ACLEAR,1
ALLSEL,ALL
TYPE,1
ESIZE,0.005
VSWEEP,40,554
ALLSEL

```

```

LESIZE,77+ne1,,ndiv
LESIZE,62+ne1,,ndiv
LESIZE,97+ne1,,ndiv
LESIZE,158+ne1,,ndiv
LESIZE,152+ne1,,ndiv
LESIZE,153+ne1,,ndiv
ESIZE,0.040
VSWEEP,12+ne1,57+ne1,68+ne1

ESIZE,0.020
LESIZE,92+ne1,,ndiv
VSWEEP,2+ne1

VSWEEP,21+ne1,106+ne1,112+ne1

```

```

! camera MESH

```

```

ndiv=8

```

```

MAT,AI5083

```

```

LESIZE,52+ne1,,ndiv
LESIZE,106+ne1,,ndiv
LESIZE,99+ne1,,ndiv
LESIZE,7+ne1,,ndiv
LESIZE,4+ne1,,ndiv
LESIZE,135+ne1,,ndiv

```

APP. C LISTATI DEI COMANDI IMPIEGATI PER LE ANALISI DESCRITTE AI
CAPITOLI 2, 3 E 4

| | |
|---|---|
| <i>ESIZE,0.040</i> | <i>ALLSEL</i> |
| <i>VSWEEP,10+ne1,52+ne1,53+ne1</i> | <i>VSEL,R,MAT,,Cu</i> |
| | <i>ALLSEL,BELOW,VOLU</i> |
| | <i>SFA,ALL,,RDSF,-Cu,1</i> |
| <i>ESIZE,0.020</i> | <i>ALLSEL</i> |
| <i>LESIZE,130+ne1,,ndiv</i> | <i>VSEL,R,MAT,,W</i> |
| <i>VSWEEP,5+ne1</i> | <i>ALLSEL,BELOW,VOLU</i> |
| <i>!ESIZE,0.040</i> | <i>SFA,ALL,,RDSF,-W,1</i> |
| <i>VSWEEP,6+ne1,103+ne1,102+ne1</i> | |
| <i>LESIZE,72+ne1,,ndiv</i> | <i>ALLSEL</i> |
| <i>LESIZE,96+ne1,,ndiv</i> | <i>VSEL,R,MAT,,C_ATJ</i> |
| <i>LESIZE,65+ne1,,ndiv</i> | <i>ALLSEL,BELOW,VOLU</i> |
| <i>LESIZE,145+ne1,,ndiv</i> | <i>SFA,ALL,,RDSF,-C_ATJ,1</i> |
| <i>LESIZE,161+ne1,,ndiv</i> | |
| <i>LESIZE,144+ne1,,ndiv</i> | <i>ALLSEL</i> |
| <i>ESIZE,0.040</i> | <i>VSEL,R,MAT,,Macor</i> |
| <i>VSWEEP,13+ne1,52+ne1,68+ne1</i> | <i>ALLSEL,BELOW,VOLU</i> |
| | <i>SFA,ALL,,RDSF,0.95,1</i> |
| <i>ESIZE,0.020</i> | <i>ALLSEL</i> |
| <i>LESIZE,167+ne1,,ndiv</i> | <i>VSEL,R,MAT,,SiC</i> |
| <i>VSWEEP,19+ne1</i> | <i>ALLSEL,BELOW,VOLU</i> |
| <i>VSWEEP,20+ne1</i> | <i>SFA,ALL,,RDSF,0.8,1</i> |
| <i>ESIZE,0.010</i> | <i>ALLSEL</i> |
| <i>VSWEEP,3+ne1</i> | <i>VSEL,R,MAT,,Al5083</i> |
| <i>ALLSEL</i> | <i>ALLSEL,BELOW,VOLU</i> |
| | <i>SFA,ALL,,RDSF,0.10,1</i> |
| <i>MAT,Al5083</i> | |
| <i>TYPE,4</i> | <i>ALLSEL</i> |
| <i>MSHAPE,0,2D</i> | <i>*GET,nvolu,VOLU,0,COUNT</i> |
| <i>MSHKEY,0</i> | <i>nn=0</i> |
| <i>ESIZE,0.040</i> | <i>*DO,i,1,nvolu</i> |
| <i>AMESH,19+ne1</i> | <i>nn=vlnear(nn)</i> |
| <i>TYPE,1</i> | <i>VSEL,ALL</i> |
| <i>EXTOPT,ACLEAR,1</i> | <i>VSEL,U,VOLU,,nn</i> |
| <i>VSWEEP,9+ne1,19+ne1,33+ne1</i> | <i>ALLSEL,BELOW,VOLU</i> |
| | <i>VSEL,S,VOLU,,nn</i> |
| <i>VSWEEP,7+ne1</i> | <i>ASLV,R</i> |
| <i>VSWEEP,4+ne1</i> | <i>SFADELE,ALL,,RDSF</i> |
| <i>VSWEEP,8+ne1</i> | <i>ALLSEL,ALL</i> |
| | <i>*ENDDO</i> |
| <i>ALLSEL</i> | |
| <i>!c: RADIATING SURFACES ENCLOSURE-1</i> | <i>!c: Radiating Surfaces da togliere</i> |
| <i>!-open enclosure- (principale)</i> | <i>ALLSEL</i> |
| <i>ALLSEL</i> | <i>! camera</i> |
| <i>VSEL,R,MAT,,Ta</i> | <i>ASEL,s,AREA,,11101</i> |
| <i>ALLSEL,BELOW,VOLU</i> | <i>ASEL,A,AREA,,11049</i> |
| <i>SFA,ALL,,RDSF,-Ta,1</i> | <i>ASEL,A,AREA,,11023</i> |
| | <i>ASEL,A,AREA,,11098</i> |
| | <i>ASEL,A,AREA,,11111</i> |

```

ASEL,A,AREA,,11108
ASEL,A,AREA,,11069
ASEL,A,AREA,,11014
ASEL,A,AREA,,11091
ASEL,A,AREA,,11003
ASEL,A,AREA,,11079
ASEL,A,AREA,,11082
ASEL,A,AREA,,11093
ASEL,A,AREA,,11030
ASEL,A,AREA,,11034
ASEL,A,AREA,,11010
ASEL,A,AREA,,11027
ASEL,A,AREA,,11024
ASEL,A,AREA,,11054
ASEL,A,AREA,,11105
ASEL,A,AREA,,11114
ASEL,A,AREA,,11089
ASEL,A,AREA,,11060
ASEL,A,AREA,,11015
ASEL,A,AREA,,11038
! puntali
ASEL,A,AREA,,8
ASEL,A,AREA,,10,13,1
ASEL,A,AREA,,15,18,1
ASEL,A,AREA,,20,22,1
! screen
ASEL,A,AREA,,109
ASEL,A,AREA,,97
ASEL,A,AREA,,86
ASEL,A,AREA,,122
SFADELE,ALL,,RDSF
ALLSEL

!c: RADIATING SURFACES ENCLOSURE-2
!-closed enclosure- (window_zone)
!c: Graphite components Radiating Surfaces
ASEL,S,AREA,,493,494,1
ASEL,A,AREA,,5063,5064,1
ASEL,A,AREA,,5068,5069,1
SFA,ALL,,RDSF,-C_ATJ,2
ALLSEL

!c: RADIATING SURFACES ENCLOSURE-3
!-closed enclosure- (dumper_zone_1)
!c: Graphite components Radiating Surfaces
ASEL,S,AREA,,497,498,1
ASEL,A,AREA,,5007,5008,1
ASEL,A,AREA,,5002,5003,1
SFA,ALL,,RDSF,-C_ATJ,3
ALLSEL

!c: RADIATING SURFACES ENCLOSURE-4

!-closed enclosure- (dumper_zone_2)
!c: Graphite components Radiating Surfaces
ASEL,S,AREA,,499,500,1
ASEL,A,AREA,,521,522,1
SFA,ALL,,RDSF,-C_ATJ,4
ALLSEL

!c: RADIATING SURFACES ENCLOSURE-5
!-closed enclosure- (dumper_zone_3)
!c: Graphite components Radiating Surfaces
ASEL,S,AREA,,501,502,1
ASEL,A,AREA,,523,524,1
SFA,ALL,,RDSF,-C_ATJ,5
ALLSEL

!c: thermal initial conditions
TUNIF,Tconstr

!c: main_plate and cover temperature DOF constraint
vSEL,s,,ne1+1,ne1+1000,1
ALLSEL,BELOW,VOLU
DA,ALL,TEMP,Tconstr
ALLSEL

!c: target_main_clamps temperature DOF constraint
DA,10,TEMP,Tconstr
DA,11,TEMP,Tconstr
DA,12,TEMP,Tconstr
DA,15,TEMP,Tconstr
DA,16,TEMP,Tconstr
DA,17,TEMP,Tconstr

!c: ion-source_main_clamps temperature DOF constraint
DA,20,TEMP,Tconstr
DA,21,TEMP,Tconstr
DA,22,TEMP,Tconstr

!c: is_screen
DA,86,TEMP,Tconstr
DA,97,TEMP,Tconstr
DA,109,TEMP,Tconstr
DA,122,TEMP,Tconstr

!c: elettrico boundary conditions
!c: is_screen voltage DOF constraint
DA,86,VOLT,0
DA,97,VOLT,0
DA,109,VOLT,0
DA,122,VOLT,0

!***parameter "I_HEATER_IN" (heater current)

```

APP. C LISTATI DEI COMANDI IMPIEGATI PER LE ANALISI DESCRITTE AI
CAPITOLI 2, 3 E 4

```

ALLSEL

*DIM,I_HEATER_IN, TABLE, 20, 1, 1, TIME

*SET,I_HEATER_IN(1,0),0
*SET,I_HEATER_IN(1,1),0
*SET,I_HEATER_IN(2,0),10000
*SET,I_HEATER_IN(2,1),0
*SET,I_HEATER_IN(3,0),10001
*SET,I_HEATER_IN(3,1),500
*SET,I_HEATER_IN(4,0),15000
*SET,I_HEATER_IN(4,1),500
*SET,I_HEATER_IN(5,0),15001
*SET,I_HEATER_IN(5,1),600
*SET,I_HEATER_IN(6,0),16000
*SET,I_HEATER_IN(6,1),600
*SET,I_HEATER_IN(7,0),16001
*SET,I_HEATER_IN(7,1),700
*SET,I_HEATER_IN(8,0),17000
*SET,I_HEATER_IN(8,1),700
*SET,I_HEATER_IN(9,0),17001
*SET,I_HEATER_IN(9,1),800
*SET,I_HEATER_IN(10,0),18000
*SET,I_HEATER_IN(10,1),800
*SET,I_HEATER_IN(11,0),18001
*SET,I_HEATER_IN(11,1),900
*SET,I_HEATER_IN(12,0),19000
*SET,I_HEATER_IN(12,1),900
*SET,I_HEATER_IN(13,0),19001
*SET,I_HEATER_IN(13,1),1000
*SET,I_HEATER_IN(14,0),20000
*SET,I_HEATER_IN(14,1),1000
*SET,I_HEATER_IN(15,0),20001
*SET,I_HEATER_IN(15,1),1100
*SET,I_HEATER_IN(16,0),21000
*SET,I_HEATER_IN(16,1),1100
*SET,I_HEATER_IN(17,0),21001
*SET,I_HEATER_IN(17,1),1200
*SET,I_HEATER_IN(18,0),22000
*SET,I_HEATER_IN(18,1),1200
*SET,I_HEATER_IN(19,0),22001
*SET,I_HEATER_IN(19,1),1300
*SET,I_HEATER_IN(20,0),23000
*SET,I_HEATER_IN(20,1),1300

!c: power generation-Joule effect/"I_HEATER_IN"
!(ingresso corrente)
ASEL,S,AREA,,8,8
ALLSEL,BELOW,AREA
NSLA,S,1
CP,1,VOLT,ALL
ni=kpnext(0) !c: master kp definition
FK,ni,AMPS,%I_HEATER_IN%

ALLSEL

!***parameter "I_HEATER_OUT"
!(heater current - A -)***

*DIM,I_HEATER_OUT, TABLE, 20, 1, 1, TIME

*SET,I_HEATER_OUT(1,0),0
*SET,I_HEATER_OUT(1,1),0
*SET,I_HEATER_OUT(2,0),10000
*SET,I_HEATER_OUT(2,1),0
*SET,I_HEATER_OUT(3,0),10001
*SET,I_HEATER_OUT(3,1),(-500)
*SET,I_HEATER_OUT(4,0),15000
*SET,I_HEATER_OUT(4,1),(-500)
*SET,I_HEATER_OUT(5,0),15001
*SET,I_HEATER_OUT(5,1),(-600)
*SET,I_HEATER_OUT(6,0),16000
*SET,I_HEATER_OUT(6,1),(-600)
*SET,I_HEATER_OUT(7,0),16001
*SET,I_HEATER_OUT(7,1),(-700)
*SET,I_HEATER_OUT(8,0),17000
*SET,I_HEATER_OUT(8,1),(-700)
*SET,I_HEATER_OUT(9,0),17001
*SET,I_HEATER_OUT(9,1),(-800)
*SET,I_HEATER_OUT(10,0),18000
*SET,I_HEATER_OUT(10,1),(-800)
*SET,I_HEATER_OUT(11,0),18001
*SET,I_HEATER_OUT(11,1),(-900)
*SET,I_HEATER_OUT(12,0),19000
*SET,I_HEATER_OUT(12,1),(-900)
*SET,I_HEATER_OUT(13,0),19001
*SET,I_HEATER_OUT(13,1),(-1000)
*SET,I_HEATER_OUT(14,0),20000
*SET,I_HEATER_OUT(14,1),(-1000)
*SET,I_HEATER_OUT(15,0),20001
*SET,I_HEATER_OUT(15,1),(-1100)
*SET,I_HEATER_OUT(16,0),21000
*SET,I_HEATER_OUT(16,1),(-1100)
*SET,I_HEATER_OUT(17,0),21001
*SET,I_HEATER_OUT(17,1),(-1200)
*SET,I_HEATER_OUT(18,0),22000
*SET,I_HEATER_OUT(18,1),(-1200)
*SET,I_HEATER_OUT(19,0),22001
*SET,I_HEATER_OUT(19,1),(-1300)
*SET,I_HEATER_OUT(20,0),23000
*SET,I_HEATER_OUT(20,1),(-1300)

!c: power generation-Joule effect/"I_HEATER_OUT"
!(uscita corrente)
ASEL,S,AREA,,13,13
ALLSEL,BELOW,AREA

```

```

NSLA,S,1
CP,2,VOLT,ALL
ni=kpnex(0) !c: master kp definition
FK,ni,AMPS,%I_HEATER_OUT%
ALLSEL

!***parameter "I_LINE" (line current)

*DIM,I_LINE,TABLE,9,1,1,TIME

*SET,I_LINE(1,0),0
*SET,I_LINE(1,1),100
*SET,I_LINE(2,0),1000
*SET,I_LINE(2,1),100
*SET,I_LINE(3,0),1001
*SET,I_LINE(3,1),200
*SET,I_LINE(4,0),2000
*SET,I_LINE(4,1),200
*SET,I_LINE(5,0),2001
*SET,I_LINE(5,1),300
*SET,I_LINE(6,0),3000
*SET,I_LINE(6,1),300
*SET,I_LINE(7,0),3001
*SET,I_LINE(7,1),400
*SET,I_LINE(8,0),4000
*SET,I_LINE(8,1),400
*SET,I_LINE(9,0),23000
*SET,I_LINE(9,1),400

!c: power generation-Joule effect/"I_LINE"
ASEL,S,AREA,,18,18
ALLSEL,BELOW,AREA
NSLA,S,1
CP,3,VOLT,ALL
ni=kpnex(0)
FK,ni,AMPS,%I_LINE%
ALLSEL

!c: OPTIONS

SPCTEMP,1,Tconstr

!c: defining Solution Options
STEF,5.67e-8
RADOPT,0.5,0.006,,5000
TOFFST,273.15

!c: defining View Factor Options
HEMIOPT,100
VFOPT,OFF

FINISH

```

C.2 Listato comandi APDL per il postprocessor

```
/POST1
ALLSEL,ALL
*GET,nst,ACTIVE,0,SOLU,NCMSS
*CFOPEN,SOLUTION,dat
SET,LAST

*VWRITE,
% /! ——— %!TEMPERATURA MASSIMA
NSORT,TEMP,,1
*GET,tmax,SORT,0,MAX
*VWRITE,tmax
%13.7F

nris=5

*DIM,tvol,ARRAY,nris,1,1
*DIM,lsol,ARRAY,nris,1,1

tvol(1)=2000
tvol(2)=3000
tvol(3)=4000
tvol(4)=5000
tvol(5)=6000

SET,FIRST
*DO,i,1,nris-1
*DO,j,1,nst-1
*GET,timel,ACTIVE,0,SET,TIME
*IF,timel,GT,tvol(i),THEN
SET,PREVIOUS
*GET,lsol(i),ACTIVE,0,SET,SBST
*EXIT
*ELSE
SET,NEXT
*ENDIF
*ENDDO
*ENDDO

lsol(5)=nst
*VWRITE,
% /! ——— %!TEMPERATURA TRANSFERT LINE

*DO,i,1,nris
SET,,,,,lsol(i)
s=lsol(i)
*VWRITE,
% /N° SET
*VWRITE,s
%F
```

```

LSEL,S,LINE,,7022
LSEL,A,LINE,,7000
NSLL,S,1
*GET,nnode,NODE,,COUNT
*VWRITE,'nodo','X','Y','Z','TEMPERATURA','POTENZIALE','d',nnode
%C %8X %C %11X %C %11X %C %7X %C %5X %C %12X %C %6I
*DO,j,1,nnode
nn=NODE(-0.44E-02,0,0.921794919243E-01)
*GET,nnx1,NODE,nn,LOC,X
*GET,nnny1,NODE,nn,LOC,Y
*GET,nnnz1,NODE,nn,LOC,Z
*GET,nnntemp,NODE,nn,TEMP
*GET,nnnvolt,NODE,nn,VOLT
*VWRITE,nn,nnx1,nnny1,nnnz1,nnntemp,nnnvolt
%6I%2X%10.5F%2X%10.5F%2X%10.5F%2X%13.7F%2X%13.9F%5X%10.5F
NSEL,U,NODE,,nn
*ENDDO

*ENDDO

ALLSEL
*VWRITE,
%/!———%!TEMPERATURA HOT CAVITY

*DO,i,1,nris
SET,,,,,lsol(i)
s=lsol(i)
*VWRITE,
%/N° SET
*VWRITE,s
%F

*VWRITE,'nodo','X','Y','Z','TEMPERATURA','POTENZIALE'
%C %8X %C %11X %C %11X %C %7X %C %5X %C
*DO,nn,3744,4288,17
*GET,nnx1,NODE,nn,LOC,X
*GET,nnny1,NODE,nn,LOC,Y
*GET,nnnz1,NODE,nn,LOC,Z
*GET,nnntemp,NODE,nn,TEMP
*GET,nnnvolt,NODE,nn,VOLT

*VWRITE,nn,nnx1,nnny1,nnnz1,nnntemp,nnnvolt,dn
%6I%2X%10.5F%2X%10.5F%2X%10.5F%2X%13.7F%2X%13.9F%5X%10.5F
*ENDDO

*ENDDO

ALLSEL

*CFCLOSE
FINISH

```


Appendice D

Rottura del riscaldatore durante i test di effusione

Durante l'ultimo test di calibrazione per i test di efficienza, quando nel riscaldatore passava la massima corrente pari a 1300 A, si è verificato qualcosa di inaspettato: la rottura totale del riscaldatore, che ha così impedito lo svolgimento dei test di efficienza veri e propri (vedi figura D.1).

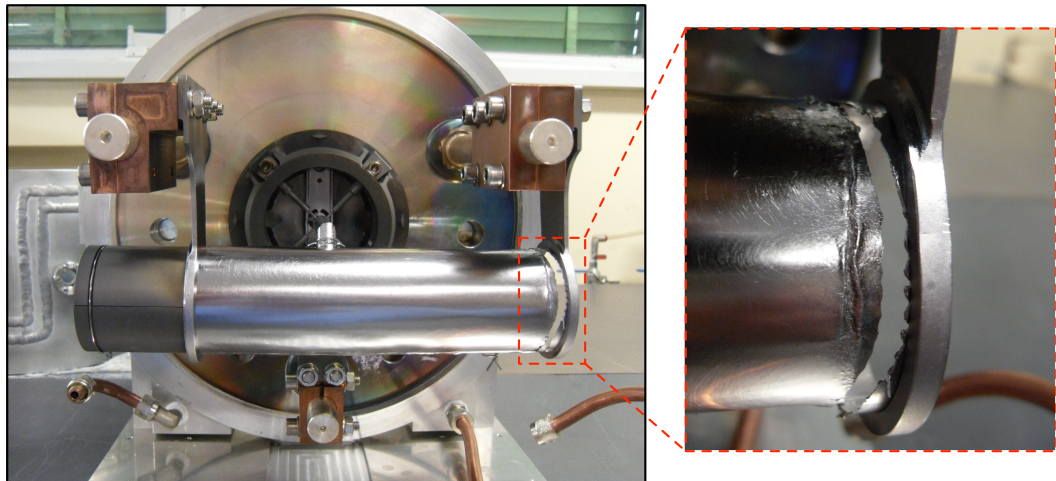
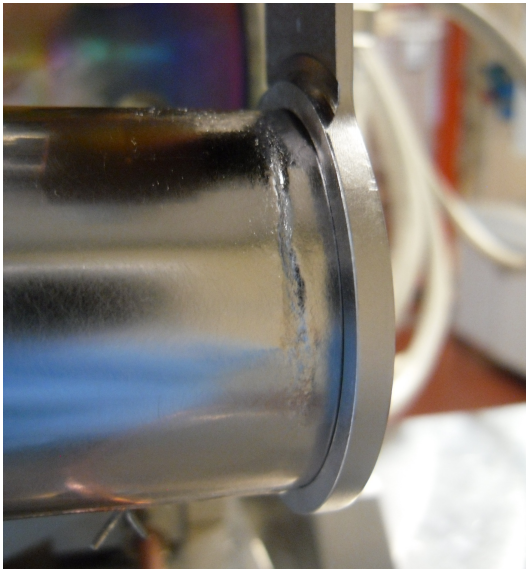


Figura D.1: *Rottura del riscaldatore.*

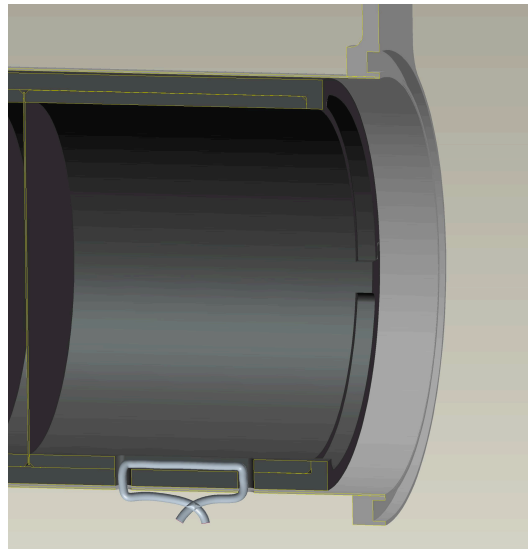
Il fatto è stato del tutto inaspettato perché il riscaldatore vecchio è stato sottoposto a moltissimi riscaldamenti senza subire grossi danneggiamenti, ma soprattutto senza rompersi. Probabilmente questo è dovuto al fatto che, non essendo collegato in modo fisso alla linea di trasferimento, ha la possibilità di

dilatarsi e contrarsi più liberamente; inoltre, la scatola in grafite non è così aderente alla superficie interna del riscaldatore come succede per il riscaldatore nuovo.

Osservando alcune foto precedenti la rottura del riscaldatore, si è notato un imbozzamento circonferenziale del riscaldatore in corrispondenza del bordo della scatola in grafite (vedi figura D.2). Questa aderiva troppo al riscaldatore impedendone la libera dilatazione e contrazione (durante i cicli di riscaldamento e raffreddamento) le quali potevano perciò avvenire solo nel tratto finale dove non c'era la scatola. Da qui è nata l'idea di modificare la scatola in grafite, allungandola fino alla fine del riscaldatore.



(a) *Imbozzamento circonferenziale del riscaldatore.*



(b) *Bordo della scatola in grafite.*

Figura D.2

Appendice E

Tavole costruttive

Ringraziamenti

Per quanto presto abbia iniziato a lavorare a questa tesi, mi ritrovo, come sempre, a dover finire e sistemare tutto all'ultimo minuto. Di certo però non possono mancare i ringraziamenti, che, lo ammetto, mi ritrovo a scrivere di notte; la cosa comunque non mi dispiace, anzi, credo sia l'unico momento di tranquillità, e forse il più adatto a comporre versi come questi.

Al termine di un percorso così importante, è doveroso, dunque, ringraziare tutti quelli che mi hanno aiutato a raggiungere questo prestigioso traguardo.

Ringrazio innanzitutto il mio relatore Giovanni Meneghetti per l'opportunità concessami di partecipare a questo progetto, assegnandomi il presente lavoro di tesi. È stata un'esperienza che mi ha arricchito molto dal punto di vista professionale e non solo. Lo ringrazio per la fiducia che mi ha dato, anche quando la consegna degli scritti ritardava e per la serietà e professionalità dimostratemi.

Un grazie speciale a Mattia Manzolaro che mi ha seguito accuratamente in questo lavoro e che anche nelle ultime settimane, pur essendo dall'altra parte del mondo mi ha puntualmente supervisionato il lavoro; la sua disponibilità, il suo sostegno e i suoi incoraggiamenti, anche quando mi sembrava di dover rimandare il tutto, sono stati fondamentali.

Ringrazio anche Alberto Andrighetto per la passione che ha sempre cercato di trasmettere a tutti noi, incoraggiandoci sempre.

Un grazie di cuore va a tutti i colleghi con cui ho condiviso questa splendida esperienza; ringrazio in particolare Stefano Corradetti, collega e compagno d'ufficio che mi ha da subito ben accolto e con cui mi sono sempre trovato molto bene, Michele Lollo responsabile dell'officina, sempre disponibile ad aiutarmi e a darmi preziosi suggerimenti, paziente quando mi ritrovavo a dover chiedere di costruire prototipi da testare. Ringrazio anche Matteo Vagnoni, compagno di tesi, che ha iniziato assieme a me questa avventura, Michele Calderolla per il supporto per Pro/E, Laura unica presenza femminile del gruppo per le chiacchiere sull'andamento della Borsa, Massimo Rossignoli per l'aiuto con il front-end. Infine un grazie ad Alberto Monetti per la sua disponibilità e per l'aiuto che attraverso skype mi ha dato anche quando zebre e gazzelle l'hanno tenuto per tre mesi in Sud Africa.

Ringrazio anche Jessica e Pier per il cammino universitario percorso assieme.

Non posso inoltre non ringraziare anche gli amici della compagnia, che da tanto aspettavano questo momento; li ringrazio per avermi sopportato in questi anni di studio, per avermi più o meno compreso tutte le volte che dicevo di non uscire perché dovevo studiare, per aver ascoltato tutte le idee balorde che negli anni spesso e volentieri mi sono venute in mente, per tutte le serate e le vacanze passate assieme.

Di certo però non sarei arrivato qui se non ci fossero stati i miei genitori. A loro va dunque il mio più grande GRAZIE. Ringrazio di cuore mia mamma perché è stata lei più di ogni altra persona ad incoraggiarmi sempre anche quando la voglia di preparare gli esami veniva meno; la ringrazio per tutto l'amore che mi ha dato in questi anni, per non avermi mai fatto mancare niente. Un grande grazie al papà che pur non essendo un gran chiacchierone mi ha sempre sostenuto e accompagnato al raggiungimento di questo traguardo. Un grazie particolare a mia sorella Anna per il diurno e notturno sostegno morale che mi ha dato durante la stesura di questa tesi, per tutti gli & che si è ritrovata a dover cliccare come pena del fatto di avermi messo a conoscenza del mondo L^AT_EX. Il grazie più speciale va però a mio fratello Emanuele che da Lassù mi guarda sempre e mi guida in ogni passo della vita e a nonna Irma che anche adesso, pur nella sua vecchiaia, mi dà sempre forza e coraggio. Ringrazio anche gli zii, Francesco e Stefania, le cugine Francesca, Sara e Chiara, e tutti coloro che hanno creduto in me in tutti questi anni e che sostenendomi hanno contribuito alla raggiungimento di questo obiettivo.

Alessandro Prevedello