



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Ingegneria Industriale DII

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

STUDIO, PROGETTAZIONE E TEST DELLA SORGENTE DI IONIZZAZIONE AL PLASMA PER IL PROGETTO SPES

Relatore: *Prof. Giovanni Meneghetti*
Correlatori: *Dott. Alberto Andrighetto*
Dott. Mattia Manzolaro

Laureando: *Gianluca Vivian*
N° matricola: *1039660*

Anno Accademico 2013/2014

INDICE

Ringraziamenti	V
Sommario	VII
Capitolo 1: Il progetto SPES ai Laboratori Nazionali di Legnaro	1
1.1 Introduzione	1
1.2 Il progetto SPES	5
1.2.1 L'acceleratore primario	6
1.2.2 Il target di produzione ed il sistema di estrazione e ionizzazione	7
1.2.3 Separatori elettromagnetici e post accelerazione	15
1.3 Applicazione dei fasci di ioni esotici	17
1.3.1 Applicazioni in fisica nucleare	17
1.3.2 Applicazioni in fisica dello stato solido	19
1.3.3 Applicazioni mediche: la Tomografia ad Emissione Positronica	21
1.3.4 Applicazioni in astrofisica	24
1.4 Conclusioni	24
Bibliografia	26
Capitolo 2: La Sorgente di Ionizzazione al Plasma	27
2.1 Introduzione	27
2.2 Lo stato Plasma	28
2.3 Il processo di ionizzazione	31
2.4 Tipologie di catodi	33
2.5 Le sorgenti a bombardamento di elettroni	35
2.6 La sorgente tipo FEBIAD per il progetto SPES	38
2.7 Parametri di lavoro: efficienza ed emittanza	46
2.8 Conclusioni	48
Bibliografia	49
Capitolo 3: Simulazione elettro-termo-strutturale della sorgente di ionizzazione al plasma	51
3.1 Introduzione	51
3.2 Il metodo degli elementi finiti	52
3.3 La trasmissione del calore ed il comportamento elettrico	54
3.4 Modello numerico della sorgente FEBIAD	57

3.4.1 Modellazione geometrica	57
3.4.2 Discretizzazione della geometria	59
3.4.3 Assegnazione dei carichi	61
3.5 Analisi parametrica sul modello FEM	63
3.6 Analisi di convergenza	73
3.7 Calcolo della corrente elettronica	78
3.8 Introduzione all'analisi strutturale accoppiata all'analisi elettro-termica	86
3.9 Conclusioni	88
Bibliografia	90
Capitolo 4: Misure sperimentali sulla sorgente di ionizzazione al plasma	91
4.1 Introduzione	91
4.2 Progettazione e realizzazione del banco-prove	92
4.2.1 Configurazione della sorgente al plasma sviluppata per la rilevazione delle grandezze fisiche	93
4.2.3 La linea di trasporto della corrente	100
4.2.4 Sistema della messa in vuoto della camera	102
4.2.5 Finestre di osservazione	102
4.3 Creazione del modello numerico del sistema per le prove sperimentali	106
4.4 Misura delle condizioni termiche ed elettriche	110
4.5 Misura delle deformazioni	121
4.5.1 Sviluppo del modello FEM strutturale per il calcolo delle deformazioni in campo elasto-plastico	121
4.5.2 Descrizione dell'apparato sperimentale per la misura delle deformazioni	126
4.5.3 Confronto fra dati sperimentali e numerici	132
4.6 Conclusioni ed applicazioni future	139
Bibliografia	141
Capitolo 5: Prove di efficienza sulla sorgente di ionizzazione al plasma	143
5.1 Introduzione	143
5.2 Il sistema "Front-End" per la generazione di fasci di ioni	144
5.2.1 La camera da vuoto	144
5.2.2 Sistema di estrazione e focalizzazione del fascio	148
5.2.3 Strumenti di diagnostica e selezione masse	150
5.3 Contaminanti presenti nel fascio di ioni per la sorgente FEBIAD	153
5.4 Studio della corrente elettronica	159
5.5 Prove di efficienza	166

5.6 Conclusioni	176
Bibliografia	177
Capitolo 6: Prove di efficienza sulla sorgente di ionizzazione al plasma	179
6.1 Introduzione	179
6.2 Ottimizzazione del campo di temperatura del catodo	180
6.2.1 Distribuzione della temperatura sul volume del catodo	180
6.2.2 Realizzazione del catodo	182
6.2.3 Studio del “punto caldo”	185
6.2.4 Geometria del catodo ottimizzato	190
6.2.5 Confronto fra catodo originale ed ottimizzato	203
6.3 Progettazione del sistema di allineamento	208
6.4 Riprogettazione dei componenti di supporto	212
6.5 Conclusioni e sviluppi futuri	216
Bibliografia	218
Conclusioni e sviluppi futuri	219
Appendice A: Porting del pacchetto software Ansys® sull’IGI Grid Portal	221
Appendice B: Montaggio della sorgente di ionizzazione al plasma	239
Appendice C: Proprietà dei materiali	261
Appendice D: Codici APDL e Matlab® per le analisi numeriche e elaborazione d’immagine	291
Appendice E: Disegni tecnici dei componenti progettati	315

RINGRAZIAMENTI

È più che doveroso ringraziare coloro che mi hanno aiutato a produrre questo lavoro, in particolare il professor Giovanni Meneghetti, il Dottor Alberto Andrighetto ed il Dottor Mattia Manzolaro, con i quali ho potuto lavorare ed imparare.

Un enorme grazie va anche a tutti i ragazzi che ho conosciuto ai Laboratori di Legnaro, i membri dell'officina che hanno "sopportato" le mie assurde pretese da giovane studente ed i miei colleghi ricercatori con cui ho condiviso questo percorso. Non faccio nomi più per paura di dimenticare qualcuno che per non dare a tutti coloro che mi sono stati vicino il giusto merito nei risultati ottenuti.

Grazie anche alla mia famiglia che mi ha permesso di intraprendere questo percorso di studio, ed ai miei amici, vecchi e nuovi, con cui sono cresciuto e, spero, continuerò a crescere e migliorare.

SOMMARIO

E' dai primi anni del 1900 che la fisica nucleare indaga riguardo la natura della materia, e da questa ricerca sorgono di continuo problemi di natura scientifica e tecnologica: gli studi effettuati e le complesse tecnologie utilizzati in quest'ambito, hanno avuto come logica conseguenza lo sviluppo di un grande numero di applicazioni in svariati campi come la medicina, l'industria e la fisica sperimentale, che hanno anche portato un mutamento negli usi e costumi della nostra società (basti pensare allo sviluppo del WEB presso i laboratori del CERN).

Nel corso degli anni l'Europa è diventata leader nel campo della ricerca nucleare e sta pianificando, sotto la guida maestra del CERN di Ginevra, la costruzione di una nuova generazione di impianti ("*facilities*") per la produzione di fasci radioattivi, con lo scopo di esplorare la materia esotica e di fornire un valido strumento per applicazioni di vario tipo.

A tale programma partecipa attivamente con il progetto SPES (Study and Production of Exotic Nuclear Species) l'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN) di Legnaro, che prevede la costruzione di un impianto per la produzione di fasci di ioni radioattivi ricchi di neutroni ("*n-rich*") e di alta qualità, nell'intervallo di massa compreso tra 80 e 160 u.m.a. La produzione di fasci di ioni radioattivi richiede l'impiego di tecnologie estremamente complesse; come sarà descritto nel dettaglio al Capitolo 1, il progetto SPES prevede il bombardamento di un bersaglio in Carburo di Uranio con un fascio di protoni: le particelle radioattive così generate dalla fissione dell'Uranio vengono successivamente estratte, ionizzate, separate in massa ed accelerate come fascio di ioni radioattivo. Il lavoro di questa tesi riguarda l'ottimizzazione di una delle sorgenti che verranno utilizzate per la ionizzazione, in particolare la Sorgente di Ionizzazione al Plasma. La prima parte del Capitolo 1 illustrerà quindi le finalità del progetto SPES e le sue varie applicazioni, che spaziano dalla fisica nucleare e subnucleare, all'astrofisica sino alla fisica medica. Si passa poi ad elencare le varie parti che costituiscono l'impianto che al momento della stesura di questa tesi è in fase di realizzazione presso i LNL e il procedimento di creazione dei fasci radioattivi. Di fondamentale importanza è l'apparato per la creazione ed il controllo di fasci di ioni ("*Front End*") del progetto SPES che è stato utilizzato in questo lavoro di tesi per testare la Sorgente di Ionizzazione.

Nel Capitolo 2 è descritta la Sorgente di Ionizzazione dal punto di vista fisico, poiché la comprensione dei meccanismi che regolano il comportamento dell'oggetto che viene studiato è il punto di partenza obbligato per la caratterizzazione e l'ottimizzazione dello

stesso. In particolare interessano i meccanismi con i quali viene prodotto il plasma all'interno del dispositivo (ionizzazione per bombardamento di elettroni) che sarà esaminato nel dettaglio.

Nel Capitolo 3 viene introdotto il metodo degli elementi finiti come strumento di studio teorico del comportamento meccanico della Sorgente al Plasma. Dopo una breve introduzione a questo metodo, sarà descritta la costruzione di un modello virtuale delle parti costituenti la Sorgente e si procede all'analisi dei dati forniti dal calcolatore, per poter fare una caratterizzazione dell'oggetto dello studio.

Per poter dar maggior senso ai dati teorici, è stato progettato un banco-prova apposito per lo studio dei parametri fondamentali che incidono sul funzionamento della Sorgente (temperatura e deformazioni su tutto). Nel Capitolo 4 verranno quindi descritte in dettaglio le fasi di progettazione e realizzazione di questo banco-prova e sono riportati i dati misurati, che sono stati confrontati con quelli elaborati al calcolatore.

Nel Capitolo 5 sono riportati i dati ricavati dalle prove effettuate sulla Sorgente al Plasma per quanto riguarda la ionizzazione di gas nobili (Argon) per misurarne l'efficienza. Anche in questo caso il concetto di efficienza, come parametro che descrive il buon funzionamento del dispositivo verrà spiegato ed analizzato a fondo.

Il Capitolo 6 infine contiene una serie di sviluppi che si sono voluti apportare al modello originale di Sorgente al Plasma che inizialmente era stato progettato e realizzato presso il CERN; si è voluto cercare di eseguire un'ottimizzazione dei componenti ed una riprogettazione delle varie parti per garantire maggiore affidabilità e semplicità di montaggio.

Nelle Appendici finali sono inserite delle guide sui sistemi informatici (GRID) per eseguire le simulazioni, sono spiegati i comandi dei software usati per le analisi e le proprietà dei materiali di cui è composta la sorgente. Inoltre è presente una spiegazione dettagliata sugli aspetti critici che riguardano la parte pratica del montaggio del sistema, ed infine sono mostrate le tavole costruttive realizzate, per chiudere in modo completo la descrizione del lavoro svolto.

Buona lettura.

CAPITOLO 1

IL PROGETTO SPES AI LABORATORI NAZIONALI DI LEGNARO: PRODUZIONE ED UTILIZZO DEI 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 ed 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 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-protoni 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 $Z =$ numero di protoni ed $N =$ numero di neutroni), la forza coulombiana 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); come se non bastasse, la forza coulombiana 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.

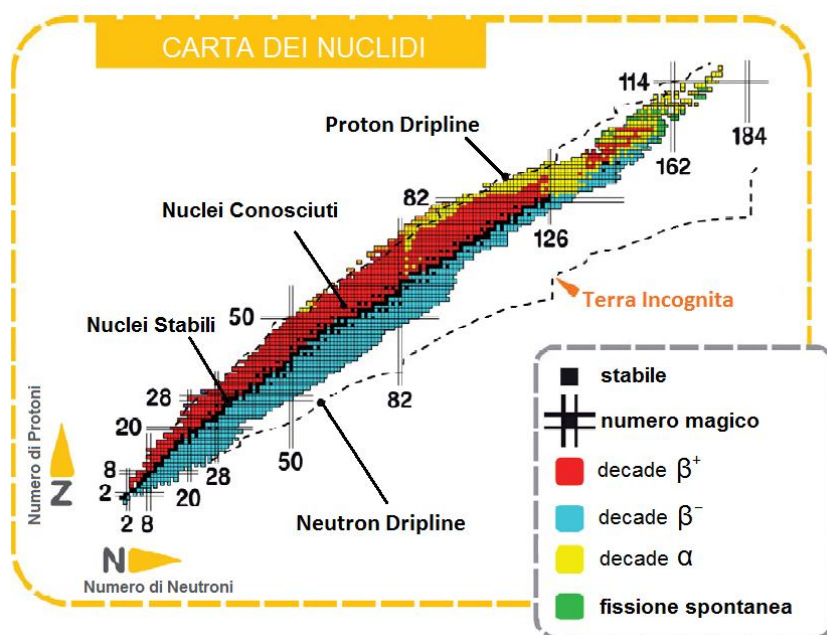


Figura 1.1: carta dei nuclidi.

I nuclei con eccesso o difetto di neutroni, e quindi lontani dalla valle di stabilità, sono radioattivi e decadono con emissione di particelle (α , β , neutrini, ...) e raggi γ . Tali nuclei instabili vengono comunemente chiamati “esotici” ed al momento circa 2000 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). I nuclei definiti “stabili” (quadrantini neri) sono quelli non radioattivi oppure aventi tempo di decadimento comparabile all’età della terra (o addirittura superiore); la regione dei nuclei artificiali (di colore giallo) rappresenta che gli isotopi possono avere vita più o meno breve a seconda dei casi; aggiungendo neutroni o protoni ad un nucleo ci si allontana dalla valle di stabilità fino a raggiungerne i limiti, detti *drip lines*, caratterizzati da una diminuzione della forza di attrazione tra neutroni e protoni tale da non garantire più la stabilità del nucleo: calcoli teorici hanno dimostrato che al di fuori delle *drip lines* 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.

La regione indicata in verde, ancora inesplorata, è definita “terra incognita” ed è caratterizzata dalla presenza di nuclei radioattivi con rapporti N/Z molto piccoli o molto grandi; la figura mostra che l'area *proton-rich* è relativamente ben definita teoricamente, mentre quella *neutron-rich* è molto più vasta ed indefinita.

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.

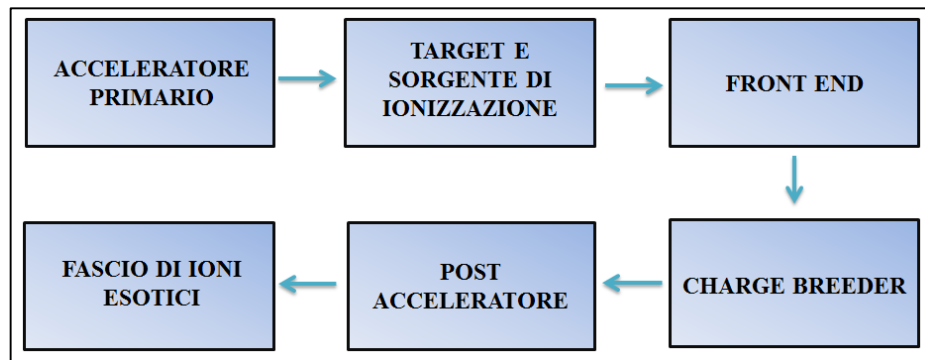


Figura 1.2: schema di una facility di tipo ISOL per la produzione di fasci di ioni esotici.

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*) contenete dischi di materiale fissile; in

questo modo si ottiene la produzione degli isotopi radioattivi tramite reazioni nucleari (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 "intermedia generazione", fondamentali per arrivare alla costruzione di un'unica grande *facility* europea di tipo ISOL, chiamata EURISOL [4]: tale progetto rappresenta un'iniziativa che vede coinvolti i principali laboratori nucleari europei, 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 *facility* 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

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 40 MeV a $200\ \mu\text{A}$ di corrente (per una potenza totale di 8 kW) [8]. 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.

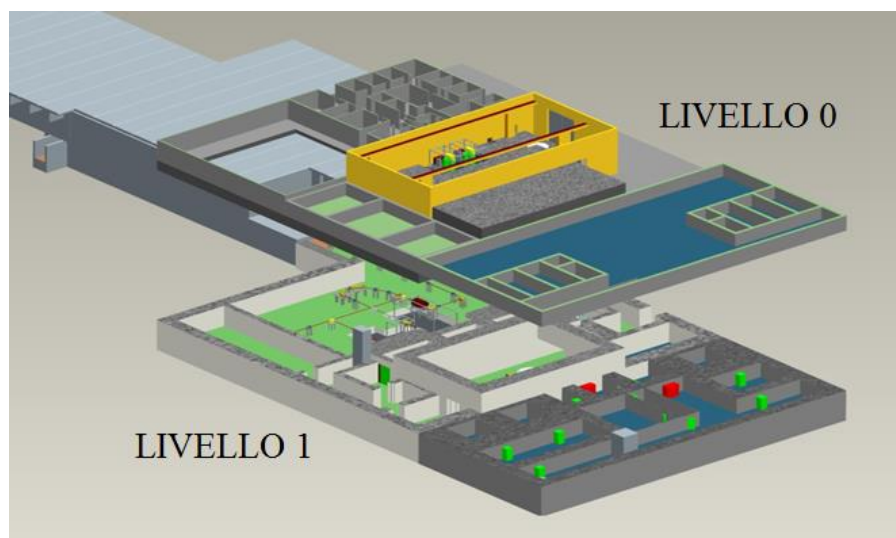


Figura 1.3: layout del progetto SPES (RIB e Neutron facilities).

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.

1.2.1. 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; questo ha portato alla scelta di una soluzione commerciale.

Un esempio di ciclotrone commerciale adatto al progetto SPES è il Cyclone[®] 70, sviluppato dalla IBA e mostrato in Figura 1.4; il quale è in grado di fornire due fasci di protoni indipendenti fino a 70 MeV di energia ed aventi una corrente massima di 750 μA .



Figura 1.4: il ciclotrone IBA Cyclone[®] 70.

1.2.2. 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 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.

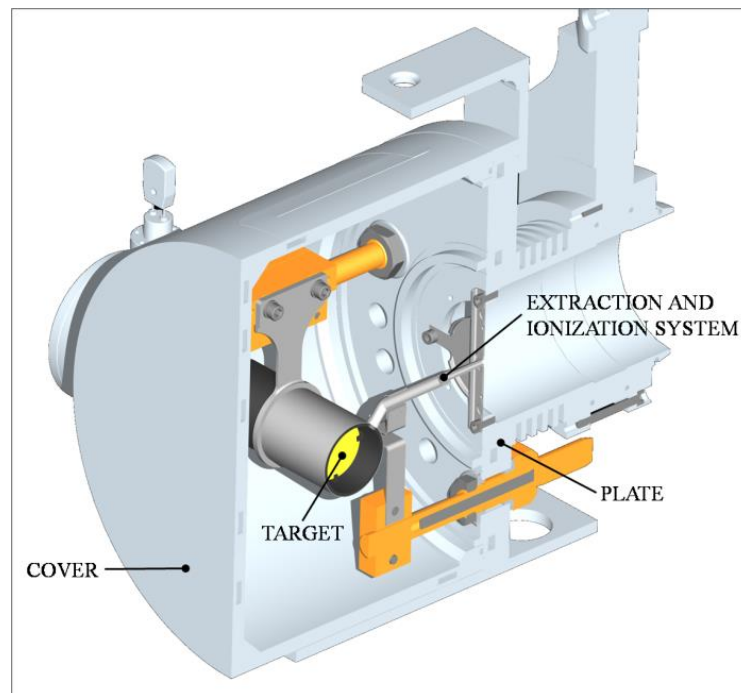


Figura 1.5: configurazione della camera target.

Il *target* è composto da sette dischi coassiali in UC_x , aventi 40 mm di diametro e circa 1 mm 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 200 mm 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* [5].

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.

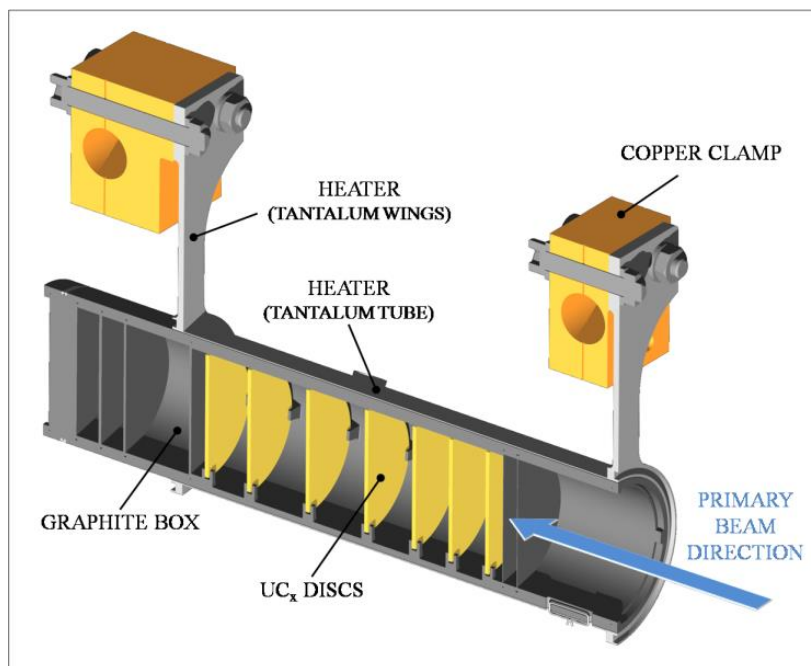


Figura 1.6: rappresentazione del prototipo di bersaglio diretto del progetto SPES.

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.

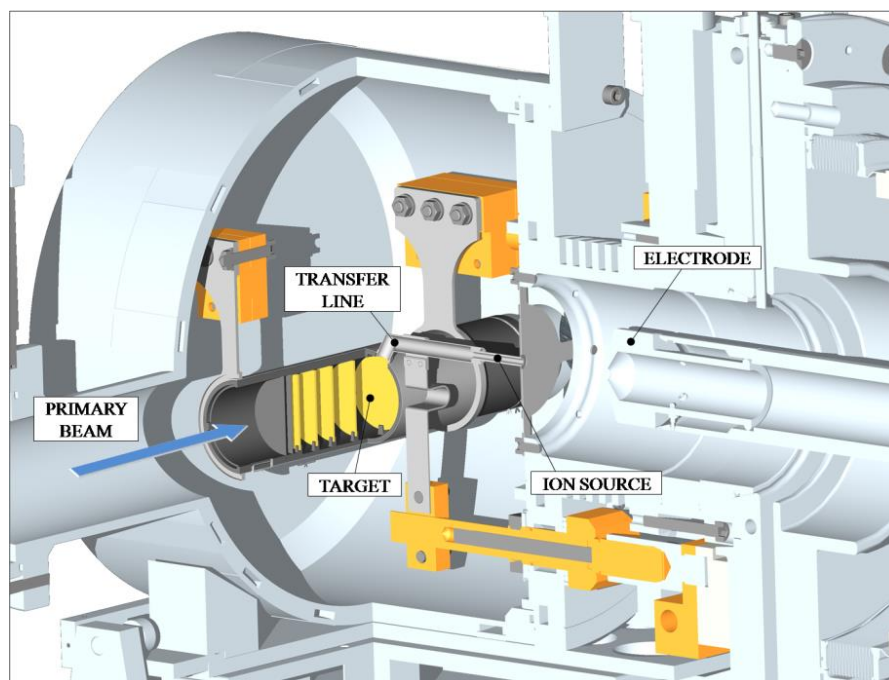


Figura 1.7: rappresentazione del sistema di estrazione e ionizzazione del progetto SPES.

La camera *target* viene collegata al *front end*; tra i due componenti è presente una differenza di potenziale ($V_{camera} - V_{front\ end}$) pari a 60 kV 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.

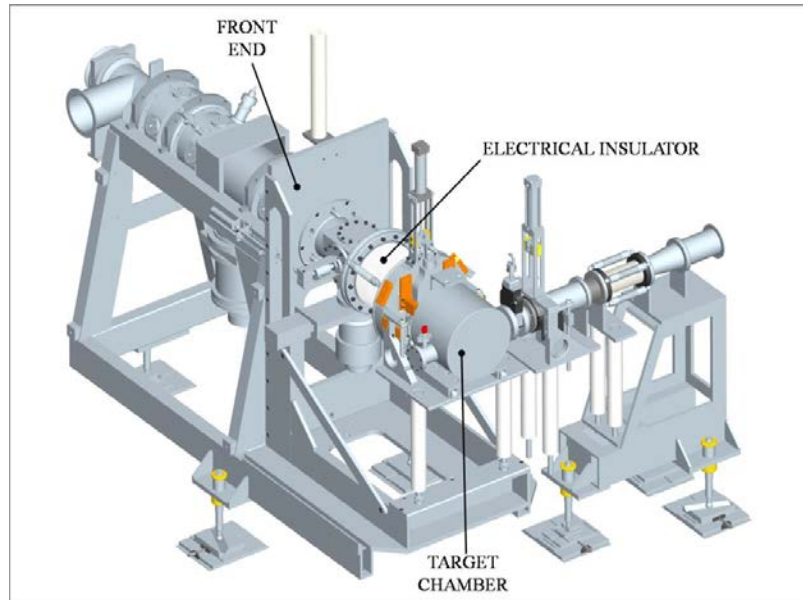


Figura 1.8: rappresentazione del front end.

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*) [6]. 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.

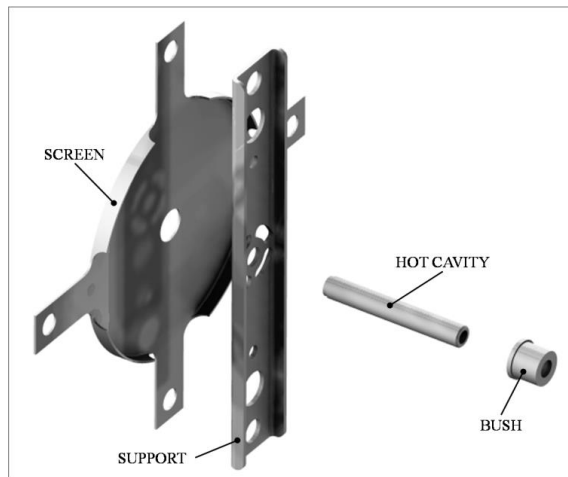


Figura 1.9: architettura sorgente di ionizzazione MK1.

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 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*. In Figura 1.10 è rappresentato il disegno costruttivo della sorgente di ionizzazione.

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

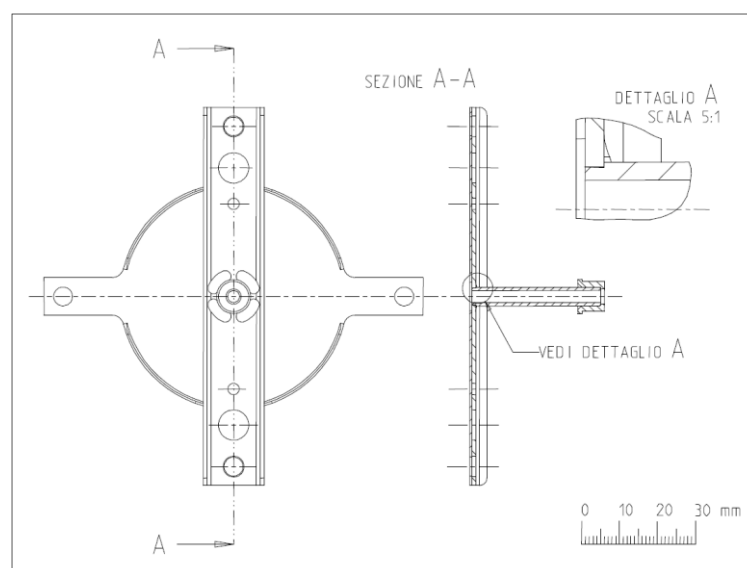


Figura 1.10: disegno costruttivo della sorgente di ionizzazione.

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 5 eV . 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 1.11) è oggi il più potente strumento per la produzione di fasci di ioni radioattivi per gli impianti 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.

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.

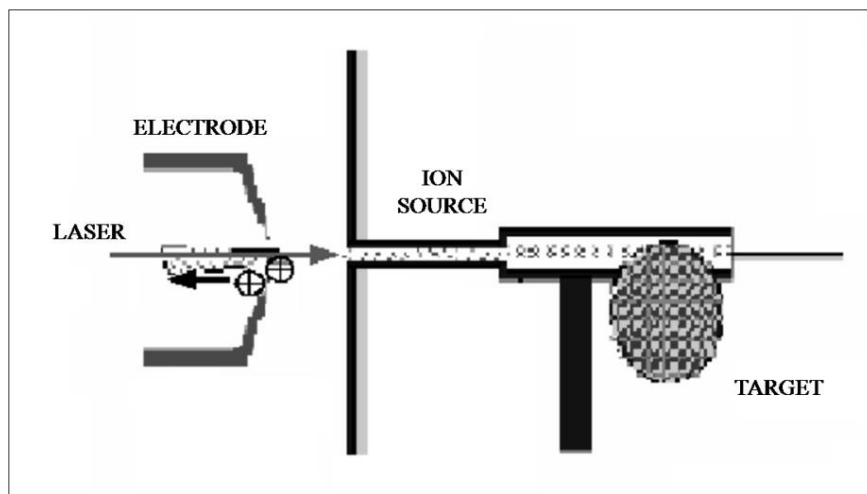


Figura 1.11: schematizzazione del sistema di ionizzazione *RILIS*.

Per avere un'efficienza di ionizzazione elevata è di fondamentale importanza limitare e controllare il disallineamento della *hot cavity* causato dall'espansione termica: se questa si disallinea viene infatti a ridursi la zona di azione del laser e di conseguenza anche l'efficienza di ionizzazione si riduce (vedi Figura 1.12).

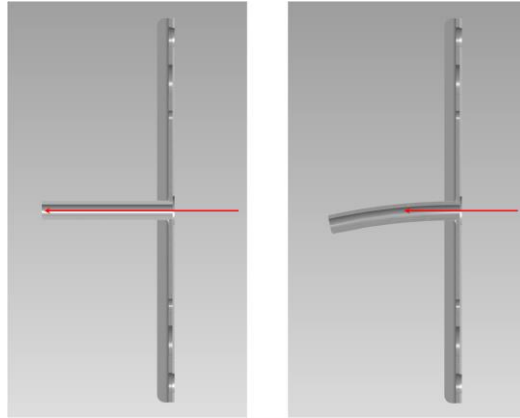


Figura 1.12: allineamento della hot cavity.

Forced Electron Beam Induced Arc Discharge Ion Source (FEBIAD)

Questa tipologia di sorgente permette di ionizzare tutti gli elementi, seppur con efficienze più basse rispetto alle sorgenti elencate in precedenza. In questa sorgente il fascio viene ionizzato attraverso il meccanismo per urto di elettroni: viene inviato attraverso una corrente di elettroni (*electron beam*), prodotto all'interno della stessa sorgente (in un componente detto catodo) che lo ionizza facendo passare il materiale allo stato di plasma che consente di confinare gli ioni senza che questi arrivino a superfici dove possano essere neutralizzati, perciò questo dispositivo viene anche chiamato Sorgente di Ionizzazione al Plasma. Esistono varie tipologie di Sorgenti al Plasma, ma quella usata nel progetto SPES è a FEBIAD, che sarà l'oggetto di studio principale di questa tesi; per questo motivo non vengono qui dati ulteriori approfondimenti ma si rimanda il lettore ai capitoli successivi.

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 ECR. La sorgente tipo FEBIAD, come già detto, è in grado di ionizzare qualsiasi tipo di elemento, mentre la ECR 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).

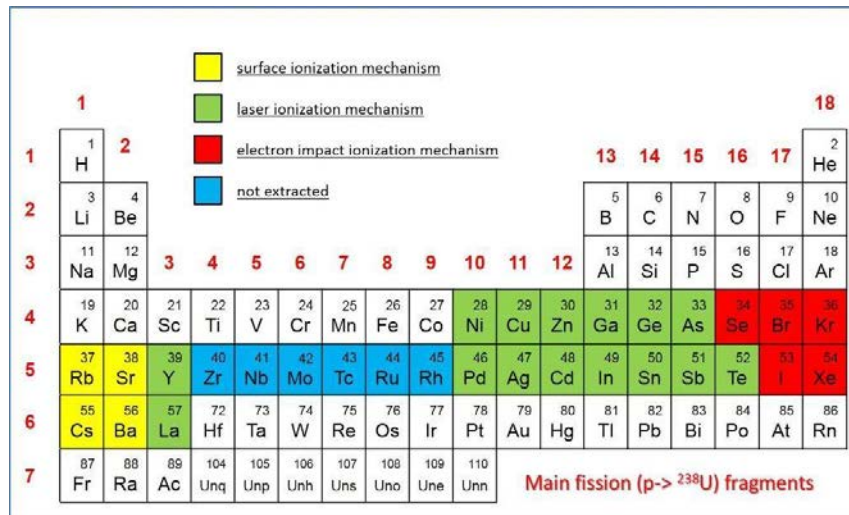


Figura 1.13: Tavola Periodica degli Elementi in cui sono evidenziati i fasci prodotti dal progetto SPES con le varie tipologie di ionizzazione.

1.2.3. 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 200 keV; questo è possibile se, sia il target che il primo separatore vengono montati in una piattaforma HV a 250 kV.

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 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 1.14 è mostrata una rappresentazione schematica in cui sono visibili i componenti principali che costituiscono la facility SPES per la produzione di fasci di ioni esotici.

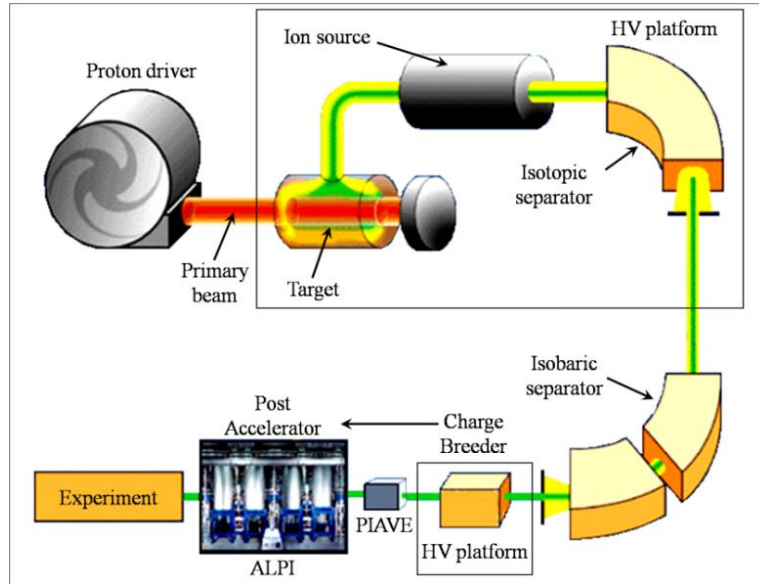


Figura 1.14: rappresentazione schematica dell'impianto per la produzione di specie rare SPES.

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 $10^6 \div 10^9$ isotopi/s (molto inferiore alle 10^{13} fissioni/s date dalla fissione nucleare). Il diagramma di Figura 1.15 mostra l'intensità del fascio radioattivo, calcolata tenendo conto delle efficienze di emissione, di ionizzazione e di accelerazione, per diverse specie di isotopi.

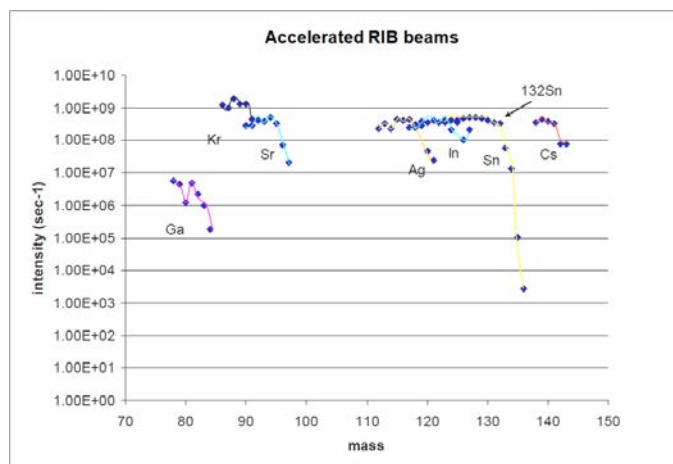


Figura 1.15: intensità finale del fascio, calcolata tenendo conto delle efficienze di emissione, di ionizzazione e di accelerazione, per diverse specie di isotopi.

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'elettromagnetismo 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 dagli impianti.

Studio della struttura di nuclei complessi

I nucleoni (protoni e neutroni) sono costituiti da sub-particelle 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:

- Permetta di derivare l'effettiva interazione tra le particelle nucleari;
- Elimini le incongruenze dei modelli correnti;

- 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 $R = R_o A^{1/3}$, dove R è il raggio nucleare ed R_o una costante pari a 1.2 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 1.16).

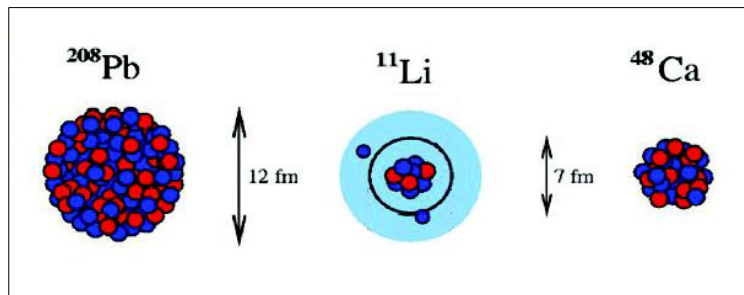


Figura 1.16: paragone tra la dimensione del nucleo di ^{11}Li e quella di altri nuclei più massivi.

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 1.17); 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.

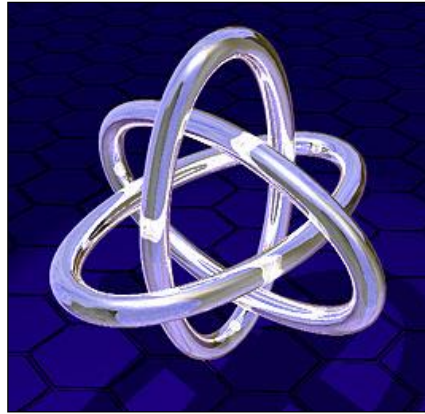


Figura 1.17: gli anelli Borromeici.

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.

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 [3].

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} atomi/cm³; 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} atomi/cm³. 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.

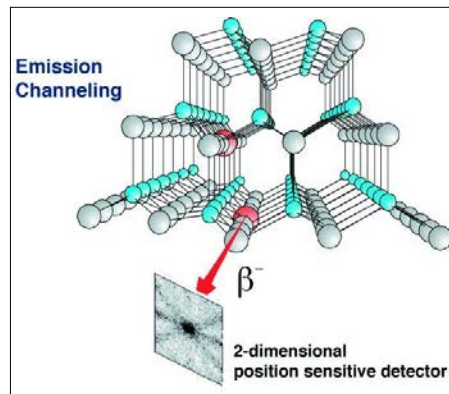


Figura 1.18: emission channeling degli elettroni emessi da atomi radioattivi situati in una riga atomica del reticolo.

1.3.3. Applicazioni mediche: la Tomografia ad Emissione Positronica [9]

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 1,022 MeV.

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 1.19: 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 rilevatore 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 rilevatore (ogni coppia di fotoni individua una retta), 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.

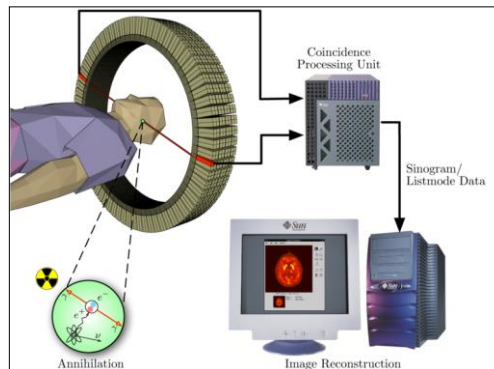


Figura 1.20: schema riassuntivo della tecnica di analisi PET e modalità di acquisizione e presentazione dei dati.

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 (~20 min), ^{13}N (~10 min), ^{15}O (~2 min) e ^{18}F (~110 min). Per via del loro basso tempo di dimezzamento, i radioisotopi devono essere prodotti da un ciclotrone posizionato in prossimità dello scansionatore PET [3].

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 40 MeV a $0,2\text{ mA}$.

Il presente lavoro di tesi si inserisce all'interno del progetto SPES; in particolare si effettuerà uno studio del sistema di estrazione e ionizzazione, per la tipologia FEBIAD (Sorgente di Ionizzazione al Plasma). 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.

È fondamentale, per iniziare uno studio dettagliato di un componente, avere bene in mente le leggi che controllano la fisica del sistema. Per questo nel Capitolo 2 si procederà con una spiegazione dei fenomeni che avvengono nel plasma e come è possibile riuscire a ionizzare degli elementi attraverso una Sorgente al Plasma. Oltre a questo, bisogna disporre di uno strumento che consenta un'analisi indiretta del comportamento di un oggetto nei casi in cui, a causa della complessità del problema, un approccio analitico risulti incapace di fornire risultati soddisfacenti: tale strumento è rappresentato dal metodo degli Elementi Finiti. Prima di procedere con lo studio del sistema di estrazione e ionizzazione si deve quindi capire in che modo il metodo degli Elementi Finiti consente di trattare problemi elettro-termo-strutturali accoppiati, per poi creare un modello affidabile di cui si conoscano vantaggi e limiti (Capitolo 3). È inoltre indispensabile fornire per tale metodo di analisi una validazione sperimentale, che consenta anche l'osservazione diretta di fenomeni che il metodo degli Elementi Finiti trascuri; nel Capitolo 4 sarà spiegato in dettaglio la progettazione di un banco ad hoc per la Sorgente FEBIAD. Infine, nel Capitolo 5 saranno riportati i risultati delle prove di ionizzazione effettuate sulla Sorgente di Ionizzazione e nel Capitolo 6 si tratterà una riprogettazione di questo oggetto per consentire una migliore manipolazione e un funzionamento ottimizzato.

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

CAPITOLO 2

LA SORGENTE DI IONIZZAZIONE AL PLASMA PER IL PROGETTO SPES

2.1. Introduzione

In questo Capitolo si è voluto descrivere in dettaglio il funzionamento della Sorgente di Ionizzazione al Plasma usata nel progetto SPES, che rappresenta l'oggetto di studio principale di questa tesi. Nei primi paragrafi si darà perciò spazio alla descrizione del Plasma in generale, indicando le caratteristiche di ciò che viene definito il "quarto stato della materia"; si capisce come la fisica che regola il comportamento dei fenomeni che si verificano all'interno del dispositivo debba essere la base per affrontare un'indagine su come poter migliorare o riprogettare l'oggetto stesso. Si parlerà poi delle varie tipologie di Sorgenti al Plasma, dove fra tutte verrà messa in evidenza quella particolare che è al centro del nostro interesse, ovvero la FEBIAD (acronimo che significa *Forced Electron Beam Induced Arc Discharge*, che sta ad indicare come la ionizzazione avvenga attraverso un fascio di elettroni che viene accelerato formando una corrente elettronica). Per comprendere bene il perché delle analisi effettuate e le proposte che sono state esaminate per lo sviluppo del dispositivo durante lo svolgimento di questo lavoro, bisogna partire da una conoscenza degli oggetti che verranno considerati e dei fenomeni fisici che sono coinvolti durante il funzionamento della Sorgente, così da permettere un'individuazione dei parametri fondamentali su cui concentrarsi per arrivare a poter eseguire un processo di caratterizzazione ed in seguito di ottimizzazione; saranno perciò descritti in dettaglio tutti gli elementi costitutivi della Sorgente di Ionizzazione. Come si vedrà, particolare attenzione verrà posta nel nostro caso al *catodo*, che è l'oggetto principale attorno a cui si è svolta questa ricerca. Naturalmente si vuole qui sottolineare che l'approccio alla materia di studio verrà eseguito dal punto di vista di un ingegnere meccanico, per avere approfondimenti riguardo alla fisica dei fenomeni in gioco si può fare riferimento a testi o articoli più dettagliati, in particolare si rimanda alle fonti citate nella bibliografia; ciononostante si vuole ribadire nuovamente che il punto di partenza che ogni ricercatore deve assumere, a prescindere di quale sia l'ambito della sua analisi,

è la comprensione dei fenomeni che regolano il funzionamento di un certo corpo in un sistema, per poter dare giustificazione alle decisioni prese in fase di progetto.

2.2. Lo stato Plasma [1] [2]

Per cominciare un'analisi che abbia come proposta finale uno sviluppo della Sorgente di Ionizzazione, bisogna innanzi tutto aver presente, anche solo in modo superficiale, che cos'è il Plasma e come si comporta.

Con plasma si è soliti indicare un gas ionizzato, composto da ioni positivi ed elettroni, che resta comunque globalmente neutro. Per questa peculiarità, è detto anche il quarto stato della materia, e si differenzia quindi da gas, liquido e solido. Mentre è osservabile in grande quantità nello spazio, sulla terra è piuttosto raro, anche se può essere utilizzato negli impieghi tecnologici od industriali.

Una descrizione comune del plasma è riferita al contenuto energetico della materia che lo compone: all'aumentare della temperatura un qualsiasi materiale cambia il suo stato da solido a liquido, successivamente da liquido a gas ed infine da gas a plasma. In quest'ultimo stato, alcuni degli elettroni "orbitali" sono strappati dai nuclei di appartenenza e sono liberi di partecipare al comportamento del materiale come particelle a se stanti. Quindi mentre in un gas le singole particelle sono molecole di quella particolare specie od atomi nel caso di gas nobili, nel plasma ritroviamo tre differenti tipi:

- Ioni (i nuclei a cui sono stati strappati gli elettroni);
- Elettroni;
- Particelle neutre.

La presenza di cariche all'interno del materiale rende differente il comportamento di un gas, in cui le molecole o gli atomi sono neutri, dal plasma, sia dal punto di vista delle interazioni fra le particelle sia considerando tutto il sistema in rapporto con l'ambiente esterno. Se si pensa a come è stato definito lo stato plasma, si può comprendere come il comportamento di una singola particella sia il risultato di più cause: in particolare la forza elettrica su uno ione od un elettrone carico sarà la somma dei contributi dati dai campi generati dalle cariche circostanti e dai campi elettrici esterni. Siccome la particella sarà in movimento, si verificherà un'evoluzione temporale della forza che agisce su un certo corpuscolo, che a sua volta provocherà di riflesso una variazione sull'interazione che lo stesso corpuscolo ha con quelli circostanti.

Tipicamente la fluidodinamica classica considera il comportamento di un fluido ipotizzando il sistema continuo (trascurando quindi la reale natura discreta della materia)

e descrivendone lo stato attraverso dei parametri “*esterni*” come temperatura, pressione, compressibilità, viscosità, ecc. L’aggettivo “*esterni*” sta a significare che sono ricavati da un’osservazione del sistema nel suo insieme, considerando cioè l’ipotesi iniziale di sistema continuo e quindi dando di fatto una caratterizzazione di tipo “macroscopica”; questo tipo di modellizzazione si basa su una descrizione generica delle proprietà del fluido, e le equazioni che descrivono il modello sono le equazione di conservazione (ad esempio della massa o dell’energia) che hanno valore solo in alcuni intervalli delle proprietà fisiche della materia in esame e devono essere regolate attraverso parametri ricavati da un’analisi sperimentale. Questo tipo di approccio può essere detto “cinetico” [2]. Per una descrizione d’insieme più accurata del comportamento di un fluido, l’approccio “statistico” risulta maggiormente affidabile per una caratterizzazione di tipo microscopico. Inoltre il modello classico non permette di descrivere il comportamento del plasma in modo dettagliato e di sviluppare una teoria che possa permettere di una modellizzazione sia di un sistema fluido con particelle neutre sia di un sistema allo stato plasma.

Per descrivere lo stato del plasma è possibile definire alcuni parametri che permettono di identificare le proprietà della materia. Il primo che viene introdotto è la *densità*. Per definirla, chiamo n_i la *densità di ioni*, ovvero il numero di ioni nell’unità di volume (m^3). Se le particelle hanno carica $1+$, la *densità di elettroni*, che sarà chiamata n_e sarà uguale a n_i (il plasma è globalmente neutro). In alcuni casi le particelle possono avere carica maggiore di $+1$, oppure anche negativa ($1-$) e possono anche essere presenti atomi o molecole neutre; se queste circostanze sono verificate si ha che n_e sarà diversa di n_i . Il termine *densità* viene riferito sia agli ioni che agli elettroni, ma si nota che se non siamo nel caso in cui tutte le particelle abbiano singola carica positiva è più corretto riferirsi agli elettroni e specificare la distribuzione dello stato delle cariche negli ioni. Per la sorgente tipo FEBIAD, valori tipici di densità sono $n_i \approx n_e = 10^{10} \div 10^{11}$ *particelle/cm³* [4]. Dai parametri definiti in precedenza inoltre si può ricavare la percentuale di ionizzazione F.I. (acronimo di *fractional ionization*), dalla formula:

$$F.I. = \frac{n_i}{n_i + n_n}; \quad (2.1)$$

dove n_n rappresenta il numero di particelle neutre per unità di volume. Per le sorgenti di ionizzazione, la densità è nell’ordine di $1 \cdot 10^{12}$ *particelle/cm³*, che corrisponde ad una pressione nell’ordine di $1 \cdot 10^{-2}$ *Pa*, e ciò è dovuto alla geometria ed alle dimensioni degli elettrodi in cui si forma il raggio ionizzato.

Un secondo parametro fondamentale per descrivere il plasma è la *temperatura*, che può essere anche espressa in elettronvolt, secondo la relazione [3]:

$$1 \text{ eV} = 11.600 \text{ K.} \quad (2.2)$$

Come per la densità, la temperatura degli ioni T_i e quella degli elettroni T_e possono essere diverse; inoltre se è presente un campo magnetico esterno, viene introdotta un'anisotropia e le temperature misurate parallelamente e perpendicolarmente al campo possono essere diverse: si ottengono perciò quattro differenti parametri, cioè $T_{\perp,i}$, $T_{\parallel,i}$, $T_{\perp,e}$, $T_{\parallel,e}$; inoltre per le particelle neutre sarà definibile un'ulteriore valore, ovvero T_n . Per dare un'idea dei valori che può assumere la temperatura, un plasma freddo può essere a circa 0.2 eV , corrispondenti a circa 2000 K , un valore tipico di temperatura elettronica nelle sorgenti FEBIAD è $T_e = 10 \text{ eV}$ [4]. Nei plasmi prodotti con archi elettrici, le temperature degli ioni (che saranno circa attorno a 1 eV) possono essere molto diverse dalle temperature degli elettroni (che raggiungono valori maggiori anche di molti eV rispetto alla precedente).

Per caratterizzare ulteriormente il plasma si possono usare funzioni di distribuzione, che descrivono, ad esempio, la distribuzione di velocità o di energia delle particelle. Naturalmente si può fare riferimento anche ai valori medi di queste grandezze, una volta definita la legge che ne regola la distribuzione.

In un plasma le collisioni fra le varie particelle non possono più essere pensate come urti fra sfere rigide con trasferimento di sola energia cinetica come avveniva nel caso dei gas; infatti nel caso di plasma le particelle possono avere cariche o temperature diverse a seconda siano esse ioni, elettroni o neutri, e si muovano parallelamente oppure perpendicolarmente al campo esterno. Quindi vengono definiti degli indici dette *tempi di rilassamento*, che indicano in quanti secondi la velocità, la pulsazione o l'energia di una particella varia una certa proprietà di un certo valore (ad esempio il tempo di rilassamento angolare può essere il tempo in cui la particella viene deflessa di un angolo di 90°). Siccome si capisce che possono essere definite molti tempi di rilassamento si semplifica la trattazione definendo un *cammino libero medio* come nel caso dei gas, tenendo presente che il tempo fra le collisioni di due particelle a cui questo parametro si rifà ha il significato più complesso di *tempo di rilassamento*.

Il plasma ha un certo numero di modi di vibrare propri, ma quelli fondamentali sono le *oscillazioni elettroniche*, che corrispondono alla risposta quando tutto il materiale si discosta leggermente dallo stato neutro globale. Queste sono oscillazioni della

componente elettronica e la frequenza corrispondente è chiamata *frequenza elettronica del plasma*, calcolabile dalla relazione [1]:

$$\omega_{pe}^2 = \frac{e^2 n_e}{\epsilon_0 m_e}, \quad (2.3)$$

dove ϵ_0 è la costante dielettrica del vuoto e gli altri termini rappresentano massa, carica e densità degli elettroni. Anche gli ioni possono oscillare con frequenza propria, ad esempio se eccitati da un'onda meccanica.

Infine viene introdotta una grandezza denominata *lunghezza di Debye*. Per capire cosa rappresenta bisogna esaminare una proprietà del plasma, che è quella di neutralizzare i campi elettrici al suo interno (questa proprietà è detta *schermo di Debye*). Se si pensa infatti a un plasma freddo, inteso come un plasma in cui le particelle non abbiano un moto di agitazione termica, se si introduce in esso un corpo carico si verifica la formazione di uno strato di cariche di segno opposto attorno a tale corpo che neutralizza il campo elettrico. Se ora si considera che però le particelle cariche sono anche in movimento avendo una certa temperatura, si capisce che non potranno più disporsi staticamente attorno al corpo, ma potranno spostarsi di una certa distanza attorno ad esso formando come una nube, al cui esterno non sarà più avvertibile l'effetto del campo elettrico introdotto dal corpo estraneo. La *lunghezza di Debye*, λ_D , è la grandezza che indica entro quale distanza sono neutralizzati gli effetti di un campo elettrico all'interno del plasma. Si trascura qui la formulazione analitica poiché di scarso interesse per il lavoro svolto, e si rimanda a [2] nel caso interessi approfondire l'argomento dal punto di vista fisico.

2.3. Il processo di ionizzazione

Si capisce che lo stato di plasma, essendo formato anche da ioni, rappresenta una possibile soluzione per quanto riguarda la ionizzazione degli isotopi radioattivi che vengono prodotti nel bersaglio di Carburo di Uranio del progetto SPES.

Un ulteriore aspetto su cui indagare è quindi come avviene la ionizzazione nella materia. Le tipologie con cui una particella acquisisce carica positiva (1+) possono essere:

- Ionizzazione superficiale;
- Fotoionizzazione;
- Ionizzazione di campo;
- Ionizzazione per impatto di ioni;
- Ionizzazione per impatto di elettroni.

Questi metodi producono ioni positivi con carica unitaria (1+), ma è possibile anche la produzione di ioni negativi (1-) oppure di particelle con cariche multiple, questi processi non saranno considerati.

La tipologia per impatto o bombardamento di elettroni è quella che sarà qui esaminata più in dettaglio, perché è attraverso gli urti di elettroni che avviene la formazione del plasma all'interno della sorgente FEBIAD studiata nel corso di questa tesi; mentre per le altre si rimanda a [1]. Si può osservare come la ionizzazione superficiale e la fotoionizzazione siano state già introdotte nel Capitolo 1 nell'ambito delle Sorgenti di Ionizzazione per il progetto SPES.

La ionizzazione per impatto di elettroni avviene in un gas, quando degli elettroni liberi colpiscono con le particelle neutre che compongono il fluido. Questi elettroni liberi devono essere accelerati da un campo elettrico esterno, formando così una scarica, per raggiungere un'energia sufficiente a strappare una carica negativa alla particella inizialmente neutra durante l'impatto; è importante notare come dopo la collisione aumenta il numero degli elettroni liberi (a quelli iniziali si sommano quelli liberati dagli atomi o dalle molecole del fluido) e quindi la scarica prodotta dal campo elettrico aumenta di conseguenza. L'energia di un elettrone (E_e) quando colpisce l'atomo neutro deve superare l'energia necessaria a rimuovere l'elettrone nell'orbitale più esterno dell'atomo stesso, ovvero il *potenziale di prima ionizzazione* (che in questa trattazione sarà chiamato P_i). La probabilità che ha un elettrone di ionizzare una particella quando la colpisce è tanto maggiore quanto più grande è l'energia dello stesso rispetto al P_i , assume valore minimo (di 0) quando $E_e < P_i$ e raggiungendo il massimo per $E_e = 3\div 4 P_i$. L'energia di un elettrone può essere definita a partire dalla temperatura elettronica T_e , ma si osserva che la ionizzazione per impatto elettronico in un plasma è massima quando la temperatura consente un livello energetico molte volte superiore a P_i (va ricordato che il potenziale di ionizzazione dipende dal gas da ionizzare, mentre la temperatura T_e rappresenta il valore medio della distribuzione di temperatura degli elettroni). Questa condizione è raramente assoluta poiché valori tipici di P_i per molti gas sono vicini ai $15 eV$, mentre come già accennato, per la sorgente FEBIAD e in generale per le sorgenti a scarica di elettroni si ha $T_e = 1\div 10 eV$. Se si continua ad aumentare la temperatura elettronica una volta raggiunto il massimo, si ha tuttavia una decrescita del numero di particelle ionizzate, quindi esiste un valore ottimo per la temperatura elettronica.

Gli elettroni con grande contenuto energetico che causano la ionizzazione sono detti "primari", mentre quelli più freddi che sono strappati dagli atomi di appartenenza sono

detti “secondari”; si nota come deve esserci una fonte di energia che sostiene il processo per garantire di riscaldare nuovamente gli elettroni primari dopo che hanno perso energia a causa dello scontro che ha causato la ionizzazione (con riscaldare si intende riportare E_e ad un valore superiore a P_i).

La ionizzazione di un gas attraverso questo metodo può essere incrementata in vari modi: gli elettroni possono essere riutilizzati più volte venendo riflessi tra due elettrodi polarizzati negativamente anche in presenza di un campo magnetico assiale; la riflessione permette un percorso maggiore e quindi aumenta la probabilità di un singolo elettrone di ionizzare un atomo: questo metodo è detto a *scarica riflessa*. Si può anche pensare di confinare sia gli elettroni che le particelle da ionizzare in uno spazio ristretto, attraverso ad esempio un multipolo magnetico, così da incrementare la possibilità degli elettroni primari di colpire un atomo.

2.4. Tipologie di catodi

Il catodo è l’oggetto che invia gli elettroni primari che consentono la ionizzazione per impatto di elettroni. Ne esistono di varie forme e di diversi materiali. Si può intuire come questo componente giochi un ruolo fondamentale per il buon funzionamento di una sorgente di ionizzazione che ne preveda l’utilizzo, e quello usato nella sorgente FEBIAD sarà l’oggetto su cui si è posta la maggior attenzione durante lo svolgimento di questa tesi, poiché come sarà spiegato ampiamente, il corretto funzionamento del catodo incide in modo marcato sull’efficienza di ionizzazione.

Fra tutte le tipologie di catodi, un primo sottoinsieme può essere indicato come “*catodi termoionici*”. Il principio di funzionamento di questi oggetti si basa sull’effetto termoionico, che può essere spiegato come l’emissione di una corrente elettronica da una superficie metallica la cui temperatura sia maggiore del potenziale di soglia. La massima densità di corrente che può emettere una superficie ad una certa temperatura è data dalla densità di corrente in saturazione, chiamata j_{eS} , e definita dalla **legge di Richardson**:

$$j_{eS} = AbT^2 \exp\left(-\frac{e\Phi}{kT}\right) A/cm^2; \quad (2.4)$$

dove Φ è la funzione di lavoro in Volt, T è la temperatura assoluta della superficie in K, A è una costante universale del valore di $120.4 Acm^{-2}K^{-2}$, b è un fattore relativo al materiale. Solitamente si usa riportare assieme A e b in un’unica costante; i valori dei parametri per i materiali più usati per i catodi sono riportati in Tabella 2.1.

La legge di Richardson sarà di particolare importanza per lo studio di un catodo di tipo termoionico, poiché permette di ricavare il numero degli elettroni emessi dal catodo ad una certa temperatura, e poiché questi elettroni saranno poi accelerati per diventare elettroni primari per permettere la ionizzazione per impatto; si comprende come j_{eS} sia un parametro da tenere monitorato per capire come effettivamente si comporta una sorgente.

La crescita della temperatura ha un grande effetto sull'aumento della corrente di saturazione, in quanto si può verificare che un aumento della prima del 10% porta a una j_{eS} dieci volte maggiore, mentre se l'incremento è del 20%, si ha una corrente 100 volte più grande.

MATERIALE	Φ [V]	$A*b$ [A/cm^2K^2]
Molibdeno	4.15	55
Nickel	4.61	30
Tantalio	4.12	60
Tungsteno	4.54	60
Bario	2.11	60
Cesio	1.81	160
Iridio	5.40	170
Platino	5.32	32
Renio	4.85	100
Torio	3.38	70
Bario su W	1.56	1.5
Cesio su W	1.36	3.2
Torio su W	2.63	3.0
Ossido di Torio	2.54	3.0
BaO + SrO	0.95	$\sim 10^{-2}$
Ossido di Cesio	0.75	$\sim 10^{-2}$
Carburo di Tantalio	3.14	0.3
LaB ₆	2.70	29

Tabella 2.1: valori della funzione di lavoro Φ e del fattore $A*b$ da inserire nella legge di Richardson per materiali di uso comune per la realizzazione di catodi termoionici [1].

La tipologia di catodi più semplice e comune è quella dei “catodi metallici”. Un filo di metallo che può essere disposto secondo varie geometrie, con alta temperatura di fusione, viene scaldato per mezzo di una corrente (per effetto Joule, corrente e potenziale variano

secondo le leggi di Ohm). Non è possibile aumentare la corrente di saturazione alzando la temperatura fino a che sia prossima al punto di fusione, poiché l'evaporazione del materiale causerebbe una riduzione della durata del catodo. La vita del componente è comunque limitata a causa di altri fenomeni, come ad esempio lo “*sputtering*” o polverizzazione catodica, che indica il distacco di atomi dalla superficie a causa di collisioni con delle particelle come gli ioni; inoltre i metalli ad alta temperatura sono soggetti alla corrosione da parte di gas contaminanti, primo fra tutti l'ossigeno.

Esistono anche catodi costituiti da Ossidi, specialmente formati da metalli alcalini. In questi casi l'uso della forma pura del metallo non è possibile visti i bassi punti di fusione di questi elementi, nonostante si verifichi l'emissione di un'alta corrente elettronica attorno ai 1000°C. Un'altra variante sono i catodi costituiti da metalli liquidi, ma questa versione non è usata nelle sorgenti di ionizzazione.

Si vogliono citare anche i “catodi cavi”, che hanno una geometria differente da quelli piani in cui gli elettroni sono emessi all'interno di un tubo stretto, ed i “catodi a scarica” che sono una variante dei precedenti; inoltre esistono “catodi a microonde” ed “a emissione secondaria”, che non saranno trattati in questa sede. Per approfondimenti si rimanda a [1].

2.5. Le sorgenti a bombardamento di elettroni

Come già accennato, il principio di funzionamento di questa tipologia di sorgenti si basa sull'emissione termoionica di elettroni da parte del catodo. Gli elettroni vengono accelerati da un secondo elemento, detto anodo, e qualcuno di questi “elettroni primari” colpisce degli atomi di gas ionizzandoli. Gli “elettroni secondari” prodotti da queste collisioni possono a loro volta essere accelerati verso l'anodo con energia che sarà funzione della distribuzione di potenziale e del punto iniziale da cui parte l'elettrone (in Figura 2.1 è rappresentato lo schema della processo).

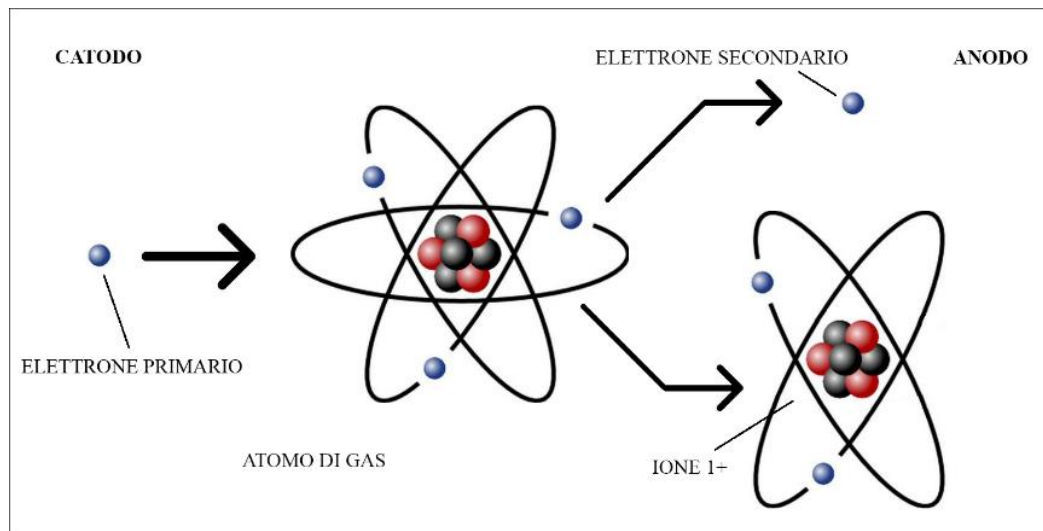


Figura 2.1: l'elettrone primario impatta sull'atomo, che diventa uno ione 1+ e produce un elettrone secondario.

Se la pressione è bassa, il potenziale ha andamento lineare nello spazio fra catodo ed anodo senza considerare il flusso elettrico. Se la pressione diventa abbastanza elevata, si verifica la formazione di una scarica provocata dal gran numero di elettroni secondari, portando a un plasma con un potenziale costante che però ha una caduta che può essere o nella zona di anodo o di catodo. Se si aumenta il potenziale di anodo, gli elettroni secondari acquisiscono più energia e perciò aumenta il numero degli atomi di gas ionizzati. Ciò che conta valutare perciò è la differenza fra potenziale di ionizzazione del gas ed energia “di soglia” degli elettroni secondari che permette la ionizzazione, per capire quanti atomi vengono effettivamente ionizzati. Nelle configurazioni a bassa pressione, la differenza fra energia “di soglia” (elettroni secondari) e “di ionizzazione” (atomi del gas) può essere ridotta attraverso l’uso di una “griglia” posta vicino al catodo, che ha la stessa funzione dell’anodo (cioè è posto ad un certo potenziale per poter accelerare gli elettroni), ed uno spazio di deriva prima dell’apertura di estrazione (che prima era l’anodo steso) che può essere ad un potenziale vicino od uguale a quello della griglia. In questo modo si ottiene un’energia degli elettroni di ionizzazione uniforme, ed una differenza fra energia di “soglia” e potenziale di ionizzazione bassa; questa configurazione è adottata nella sorgente tipo FEBIAD (Figura 2.2).

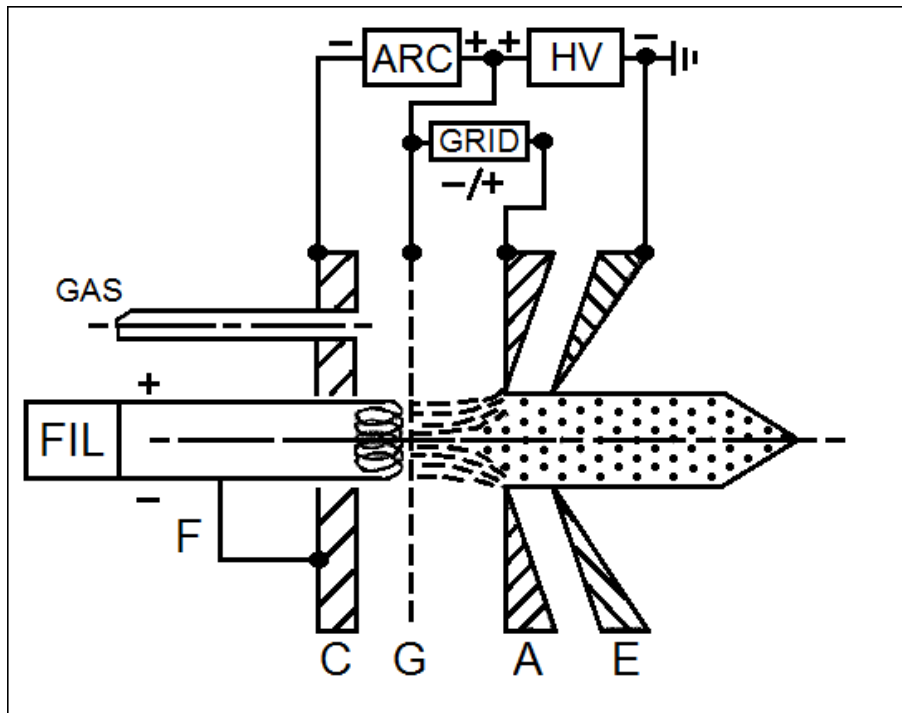


Figura 2.2: schema di una sorgente FEBIAD. Sono messi in evidenza il catodo, (C) che emette elettroni attraverso il filamento riscaldato per effetto Joule dal generatore FIL, La griglia (G) e l'anodo (A) tenuti a potenziale in modo da generare il campo per accelerare gli elettroni e l'elettrodo estrattore (E) [1].

Per aumentare la bassa efficienza di ionizzazione (intesa come atomi di gas immessa rispetto atomi ionizzati) si possono adottare alcuni accorgimenti: generando un campo magnetico che consenta di confinare gli elettroni nell'anodo e le cui linee di campo siano spiraliformi, si può far percorrere agli elettroni un percorso più lungo (elicoidale) aumentando la probabilità che ionizzino un atomo, inoltre con un anodo di forma cilindrica e un elettrodo riflettente, si ottiene lo stesso effetto.

Esistono vari tipi di sorgenti a bombardamento di elettroni, anche dette a scarica ad arco:

- La sorgente tipo Nielsen, in cui il catodo è un filamento di materiale metallico (W o Ta) all'interno di un anodo cilindrico;
- La sorgente a catodo cavo, che ha una particolare configurazione dell'estrazione del catodo, composto da due parti in Ta con interposto un filo di W o Ta;
- La sorgente Bernas-Nier, la cui peculiarità è un differente tipo di estrazione per gli ioni, che passano attraverso un'apertura che può essere in direzione assiale sul lato opposto o sullo stesso lato del catodo, oppure in direzione radiale grazie ad una slitta posta sull'anodo;

- La sorgente tipo FEBIAD, che è una configurazione ottimizzata della sorgente Nielsen;
- La sorgente EGBP, una versione ottimizzata della sorgente a catodo cavo.

Per approfondimenti riguardo le tipologie di sorgente a scarica si rimanda a [1] o a [5].

Naturalmente ogni configurazione elencata sopra ha le sue caratteristiche, i suoi pregi e difetti, e ciò è dovuto alle diverse geometrie che permettono o meno l'uso di un certo tipo di materiali e il raggiungimento di una certa temperatura di lavoro. Anche il campo di applicazione di ognuna è diverso, ed è stabilito in base all'esperienza di utilizzo che hanno maturato i vari laboratori in giro per il mondo. In particolare, la sorgente di tipo FEBIAD, è una versione che è già stata analizzata e sviluppata presso l'impianto ISOLDE al CERN [5], che permette la formazione a partire da atomi di vari elementi (come gas nobili, metalli o elementi refrattari) di ioni $1+$ che possono in seguito essere estratti e trattati in vari modi e con vari obiettivi (come già accennato nel Capitolo 1). Le sue caratteristiche permettono di avere una buona efficienza tra le sorgenti al plasma e l'essere in grado di ionizzare tutti gli elementi presenti sulla tavola periodica la rende uno strumento versatile: si può comprendere quindi come l'ottimizzazione di questo oggetto sia fondamentale per produrre radioisotopi con buona efficienza, visto che il breve tempo di decadenza di qualcuno di questi costringe ad adottare strumenti le cui prestazioni siano molto elevate.

2.6. La sorgente tipo FEBIAD per il progetto SPES

Come già spiegato nel Capitolo 1, per la produzione di radioisotopi nel progetto SPES sono utilizzate varie sorgenti di ionizzazione. Se si vuole che sia possibile ionizzare gli atomi appartenenti ad una gran parte degli elementi presenti sulla tavola periodica (in particolare i gas nobili) con una buona efficienza, la sorgente FEBIAD rappresenta una buona soluzione. FEBIAD è un acronimo che significa "*Forced Electron Beam Induced Arc Discharge*". La sorgente usata per SPES è basata sulla configurazione MK5 sviluppata presso l'impianto ISOLDE al CERN (vedi [5] e [6]) ed è pensata per la produzione di ioni $1+$. Nella Figura 2.3 è mostrata una sezione del modello tridimensionale della sorgente, dove è messa in evidenza la zona dell'anodo che deve essere tenuta isolata dal punto di vista elettrico rispetto al resto del sistema. Di seguito saranno quindi descritti in dettaglio tutti gli elementi che compongono il sistema e che sono rappresentati nella Figura 2.3.

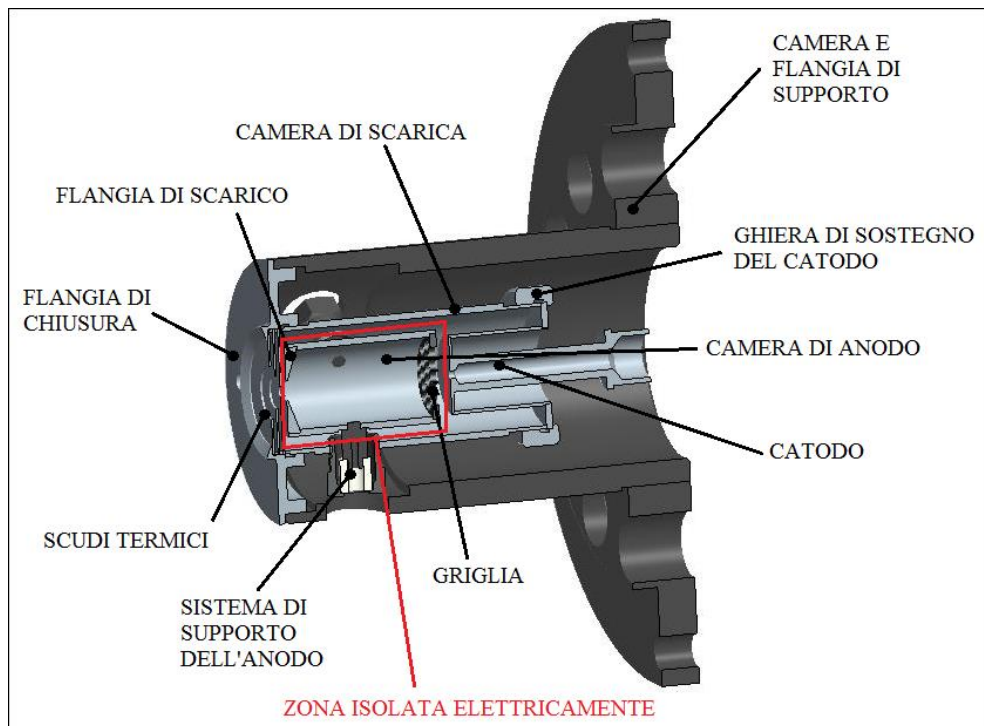


Figura 2.3: Modello 3D in sezione lungo un piano meridiano della Sorgente di ionizzazione al Plasma.

Il catodo (cathode)

Il componente principale di questo oggetto è il catodo: nei Laboratori di Legnaro si fa uso di catodi metallici in Tantalio, e la scelta di questo materiale è dovuta a più motivi: è un materiale con alto punto di fusione (3017°C), perciò ideale per le applicazioni in alta temperatura che abbiamo descritto, inoltre è un buon conduttore elettrico. Queste proprietà lo rendono ideale per l'impiego in un catodo, visto che tale componente deve essere scaldato per effetto Joule, e quindi essere attraversato da una corrente, e stare a lungo a temperature in cui sia possibile il verificarsi dell'effetto termoionico. Inoltre le proprietà meccaniche (è molto duttile) lo rendono lavorabile alle macchine utensili, anche se va ricordato che la grande capacità di plasticizzare rende indispensabile un'attenzione particolare nelle lavorazioni per asportazione di truciolo; è inoltre anche saldabile, anche se bisogna porre attenzione all'ossidazione e alla contaminazione dall'aria durante la saldatura. Da queste caratteristiche si capisce che tale materiale può essere trattato per la realizzazione di diverse geometrie, tra cui il catodo usato per la FEBIAD (vedi Figura 2.4).

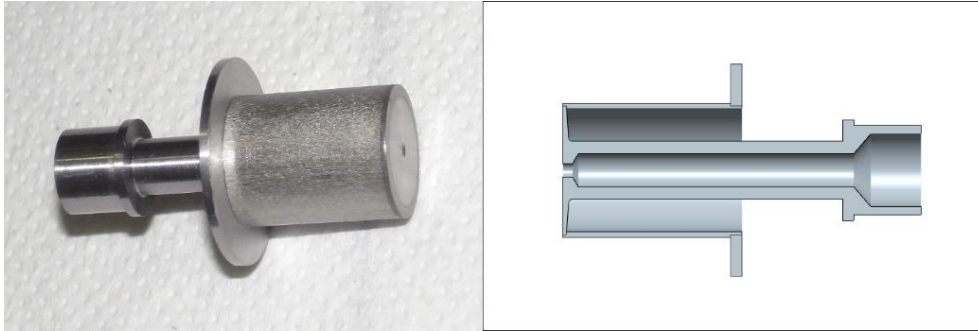


Figura 2.4: nella figura a destra è rappresentata una fotografia del catodo in uso presso i laboratori nazionali di Legnaro. Si nota la faccia piana frontale che è quella da cui vengono emessi gli elettroni. A destra, il modello CAD dello stesso elemento mostra una vista sezionata, in cui si può apprezzare il canale centrale dove passa il fascio da ionizzare.

Nel modello CAD di Figura 2.4 si nota che il catodo è formato da tre parti distinte, cioè una corona che serve per fissare il componente alla camera di scarica (descritta in seguito), un collare cilindrico che si collega alla corona e un corpo centrale formato da un tubicino aperto alle estremità, in cui scorre il fascio, che termina in una faccia frontale che viene posta frontalmente all'anodo. Questi tre sotto-componenti vengono uniti attraverso saldatura. Si utilizzano tre tecnologie:

- Saldatura TIG;
- Saldatura Laser;
- Saldatura Electron Beam.

La scelta del metodo di saldatura comporta una diversa realizzazione del cordone di saldatura, che si può tradurre in geometrie differenti o finiture delle superfici più o meno precise. Il problema sarà analizzato in dettaglio quando si analizzerà il campo di temperatura dell'oggetto (Capitolo 6).

Anodo (anode, anode grid e outlet)

La faccia del catodo piana ortogonale all'asse è quella da cui fuoriescono gli elettroni, che vengono accelerati da una griglia (*anode grid*) verso l'anodo. Nella sorgente per il progetto SPES, l'anodo, la griglia e la flangia di scarico (detta anche *outlet*) sono uniti in un unico corpo, la camera di anodo (*anode body*) (vedi Figura 2.5), all'interno della quale avviene la formazione del plasma per mezzo della scarica.

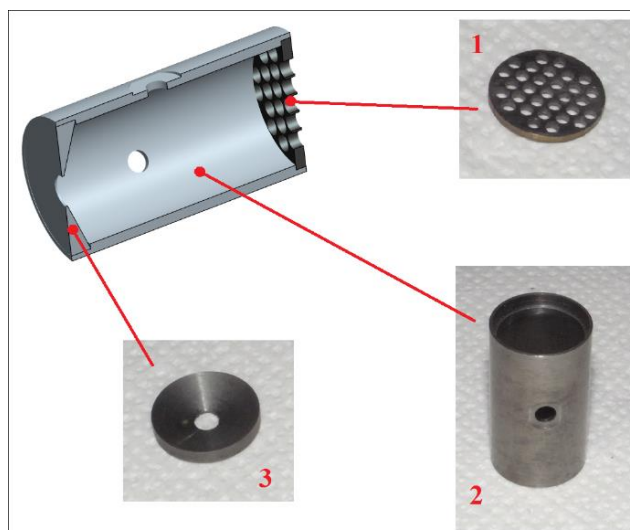


Figura 2.5: rappresentazione del modello 3D dell'anodo assemblato e dei suoi componenti, cioè 1) griglia; 2) corpo cilindrico con cave per l'alloggiamento dei supporti; 3) flangia o tappo di scarico.

La griglia è stata progettata perché i fori con asse parallelo all'asse del fascio guidino gli elettroni cosicché essi assumano una traiettoria più rettilinea possibile all'interno della camera di anodo. La corrente elettronica riempie tutta la camera, ma la maggior parte delle particelle sarà situata nella zona centrale.

Sistema di supporto dell'anodo (pin, insulator e support anode nut)

Poiché l'anodo deve avere un certo potenziale, dev'essere isolato elettricamente dal resto del sistema. Per questo si fa uso di tre isolatori di Allumina (*Al₂O₃ anode support insulator*) che, assieme anche a tre puntali in materiale altofondente (*pin* realizzati in Molibdeno o Grafite) e tre dadi di supporto (*anode support nut*) servono a sostenere ed allineare l'anodo stesso all'interno della sorgente (vedi Figura 2.6).

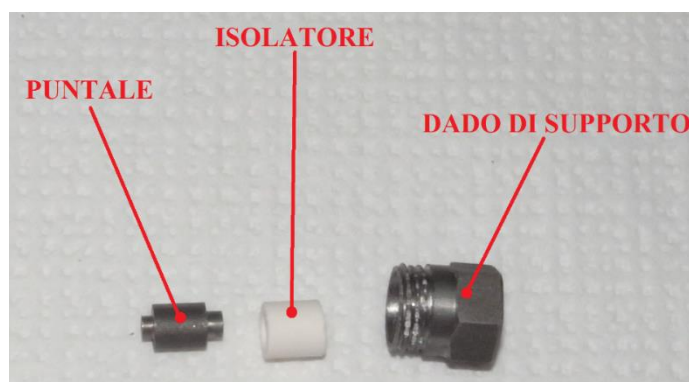


Figura 2.6: raffigurazione dei tre elementi che compongono il sistema di supporto dell'anodo. Come si vede dall'immagine, i tre vanno infilati l'uno dentro l'altro in sequenza per consentire l'isolamento elettrico.

La camera di scarica

Questo componente è un oggetto cilindrico, in Molibdeno o Tantalio, che contiene catodo e anodo. Il catodo viene fissato alla camera di scarica tramite una ghiera di tenuta (*retainer nut*). Il principale compito di questo componente è condurre la corrente che attraversa il catodo e schermare la potenza radiante che andrebbe dispersa (vedi Figura 2.7).



Figura 2.7: camera di scarica con anodo montato al suo interno attraverso il sistema di supporto.

Flangia di chiusura e scudi termici (end flange e heat shields)

Questi componenti costituiscono il sistema di estrazione della sorgente, infatti sono posti dopo il tappo di scarico. La flangia ha anche scopo di sostenere gli elementi interni, infatti ad essa si accoppia la camera di scarica tramite un collegamento filettato.

Camera e flangia di supporto (support house e support flange)

Questi due componenti fanno parte di un unico sottoinsieme che serve a collegare la sorgente al piatto della camera da vuoto. I fori sulla flangia servono a permettere la realizzazione del vuoto anche all'interno della sorgente. Questi componenti possono essere realizzati in Grafite o Acciaio Inox, il secondo è preferibile per evitare contaminazioni di CO.

Elettromagnete

All'esterno della sorgente, al livello dell'anodo, sono montate due bobine circolari e coassiali con il fascio; sono costituite da due nastri di Alluminio avvolti per 232 giri e vengono alimentati con corrente continua di 5 A. Il campo magnetico generato ha la funzione di far percorrere agli elettroni, che avanzerebbero in linea retta, un percorso

elicoidale, aumentando la probabilità che impattino su un atomo ionizzandolo (vedi Figura 2.8).

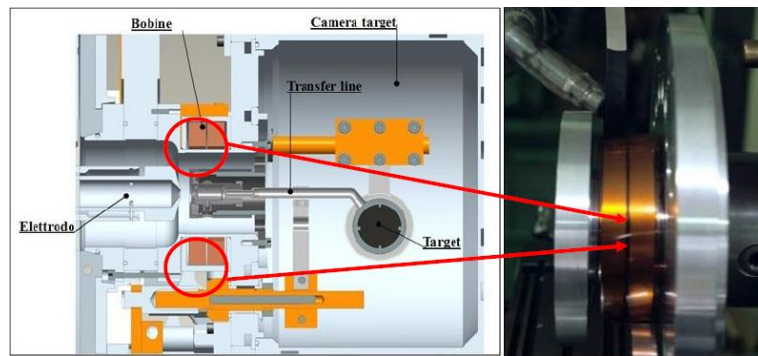


Figura 2.8: elettromagnete montato dietro il piatto della camera da vuoto, all'esterno della Sorgente [2].

Tutti i componenti interni della sorgente possono essere realizzati in metalli ad alto punto di fusione, tipicamente Tantalio o Molibdeno, oppure Grafite che è comunque un buon conduttore elettrico, con l'accortezza che nel caso dei metalli, se è previsto il disaccoppiamento dopo l'utilizzo, è preferibile mettere a contatto materiale diversi per evitare che i componenti aderiscano e si saldino.

Nel progetto SPES la sorgente sarà accoppiata ad un bersaglio, dove avviene la fissione del Carburo di Uranio e si producono gli isotopi radioattivi; le particelle passano alla sorgente attraverso un tubo sottile di Tantalio detto "linea di trasferimento" (*transfer line*), che si collega al catodo attraverso un accoppiamento geometrico. Per eseguire le prove di efficienza il bersaglio non è necessario e quindi non viene montato, in questa configurazione viene usata una linea di trasferimento più corta che si collega ad un supporto che consente il trasporto della corrente riscaldante (Figura 2.9).

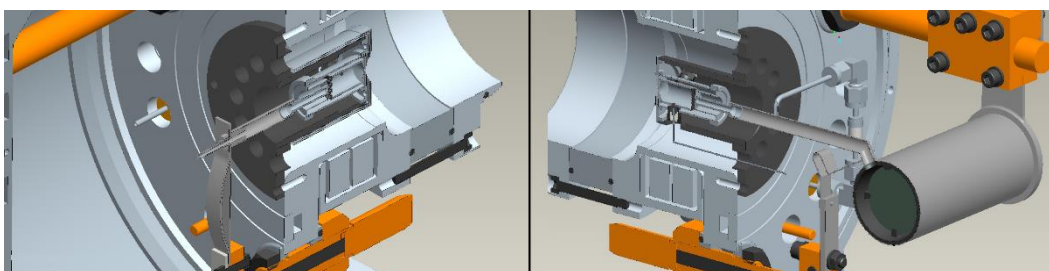


Figura 2.9: modelli 3D delle configurazioni di montaggio della Sorgente al Plasma. A sinistra la soluzione senza bersaglio per le prove di efficienza, a destra quella con bersaglio + sorgente di ionizzazione.

La corrente riscaldante arriva attraverso un puntone di Rame presente nella camera, a cui viene collegato un morsetto dello stesso materiale che sostiene una serie di fogli in Ta che sono posti a contatto con la linea di trasferimento. La corrente quindi fluisce

attraverso il tubo, arriva al catodo, attraversa la faccia frontale riscaldandola per effetto Joule a temperature attorno ai 2000°C , passa alla camera di scarica, quindi alla flangia di chiusura e alla camera di supporto; la flangia di supporto è collegata al piatto della camera che viene tenuto a massa (0 V). Lo schema del percorso della corrente di linea è illustrato in Figura 2.10.

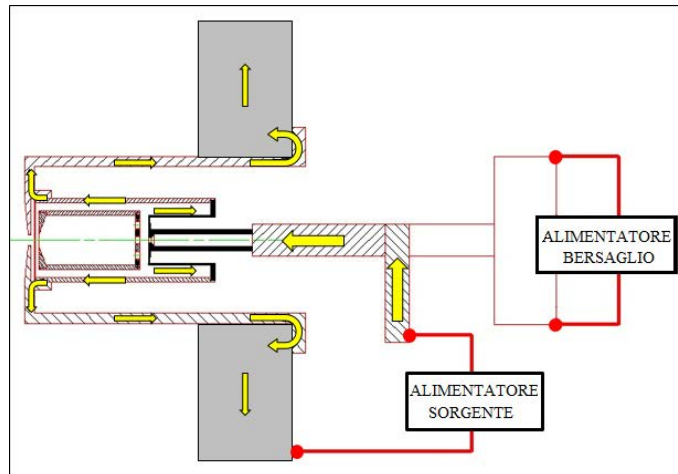


Figura 2.10: percorso della corrente nella sorgente di ionizzazione al plasma. Nello schema è mostrata la configurazione nel caso di un accoppiamento bersaglio – sorgente di ionizzazione.

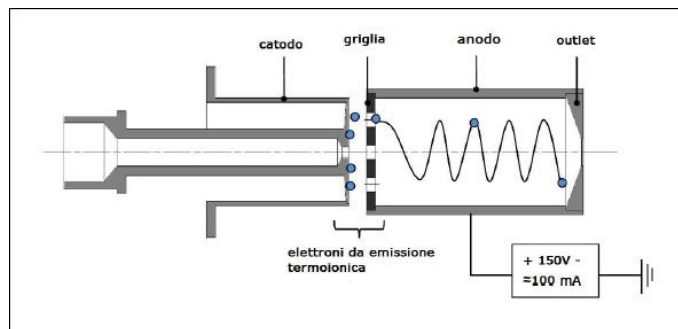


Figura 2.11: schema in sezione di catodo ed anodo affiancati in cui è mostrato il potenziale dell'anodo e la traiettoria elicoidale di un elettrone causata dal campo magnetico [2].

Il catodo quindi emette una corrente elettronica per effetto termoionico, le particelle con carica negativa vengono accelerate verso l'anodo che è tenuto a potenziale costante di 150 V , attraverso un filo conduttore che passa per uno dei fori degli isolatori di Allumina (vedi schema di Figura 2.11): per questo è importante assicurarsi dell'isolamento elettrico fra anodo e resto del sistema se si vuole garantire un corretto funzionamento. Grazie alla struttura della griglia, gli elettroni possono entrare nella camera di anodo e impattare sugli atomi di gas da ionizzare. Il fascio che deve essere ionizzato percorre la linea di trasferimento, attraversa in senso assiale il canale ricavato all'interno del catodo ed entra nella camera di anodo dove diventa plasma, per poi passare

dal foro sulla flangia di scarico, superare gli scudi termici e quindi essere estratto da un elettrodo (detto “elettrodo estrattore”) ed essere controllato da una successione di campi elettrici o magnetici, poiché ora lo stato delle particelle $I+$ permette di sfruttare le forze elettromagnetiche. Nel caso sia presente il bersaglio, le particelle da ionizzare sono estratte grazie alle alte temperature a cui è sottoposto il sistema, mentre nel caso di prove con configurazione senza bersaglio il gas viene insufflato tramite un tubo di Tantalio che si innesta in una cavità presente sulla vite che unisce linea di trasferimento e connessione elettrica. Si capisce che se nel loro transito, le particelle da ionizzare incontrassero delle zone fredde, sarebbero da queste trattenute causando una caduta dell’efficienza in quanto non si potrebbero estrarre, perciò è importante non ci siano zone fredde che attirino le particelle. Un altro parametro da controllare è che il sistema operi in buon livello di vuoto, infatti se non si opera in un ambiente a bassa pressione i contaminanti potrebbero sia disturbare il flusso di elettroni, che essere ionizzati al posto delle particelle che interessano, causando ulteriori cali dell’efficienza. In quest’ottica la progettazione della camera da vuoto con sistemi di tenuta opportuni per permettere il raggiungimento di livelli di vuoto attorno ai 10^{-6} mbar diventa di fondamentale importanza (nella camera di anodo si hanno pressioni nell’ordine di $10^{-5} \div 10^{-2}$ mbar).

Come già accennato il campo di temperatura degli oggetti in esame incide sul comportamento dell’oggetto in vari modi, a partire dall’effetto termoionico che permette l’emissione di elettroni e quindi la ionizzazione. La legge che spiega in modo analitico questo fenomeno è già stata descritta nell’Equazione 2.4, è detta legge di Richardson, che fornisce il valore della densità di corrente elettronica emessa da una superficie ad una certa temperatura T . In particolare si nota che al crescere della temperatura, la densità di corrente aumenta, perciò pensando a come funziona la ionizzazione per bombardamento di elettroni, si può pensare che lavorando alla temperatura massima consentita dalla resistenza strutturale del materiale di cui è composto il catodo, si arrivi all’efficienza massima. In realtà non si tiene conto di un secondo fenomeno, che provoca la saturazione della corrente elettronica che può essere inviata dal catodo verso l’anodo.

La **legge di Child-Langmuir** esprime la massima corrente di elettroni che può essere trasmessa fra due elettrodi piani, considerati di estensione infinita, distanti tra loro a , nel vuoto:

$$J = \chi \frac{V_a^{\frac{3}{2}}}{a^2}, \quad (2.5)$$

dove χ è una costante che dipende dal tipo di particella che forma la corrente, e per gli elettroni si ha $\chi = 2.334 \cdot 10^{-6} A/V^{3/2}$ e V_a è la differenza di potenziale fra i due elettrodi. Nel nostro caso possiamo assumere come la faccia del catodo frontale e la griglia come i due piani infiniti. La differenza di potenziale fra i due sarà di 150 V. Per quanto riguarda la distanza a , questa viene regolata durante il montaggio (vedi l'Appendice B per una spiegazione in dettaglio), e dalle esperienze fra i vari impianti tipo ISOL nel mondo, dev'essere compresa tra 0.9 e 1.4 mm, anche se i valori ottimi sono fra 1.0 e 1.2 mm. Perciò in pratica quello che ci dice questa legge è che anche continuando ad alzare la corrente che attraversa il catodo e quindi la temperatura, avrò comunque un limite sul numero di elettroni che potrò inviare all'anodo e che serviranno al processo di ionizzazione. Perciò sarà possibile determinare una temperatura di lavoro in cui si raggiungono le condizioni di saturazione.

2.7. Parametri di lavoro: efficienza ed emittanza

Nel corso dei precedenti paragrafi si è parlato più volte delle prestazioni della sorgente di ionizzazione utilizzando il termine efficienza, senza però definirlo in dettaglio.

Chiamiamo *efficienza di ionizzazione* della sorgente FEBIAD il rapporto tra il numero di atomi di un certo elemento da ionizzare che è possibile estrarre dalla sorgente stessa e il numero di atomi dello stesso elemento immessi nel sistema. In formule:

$$e.i. = \frac{a.u.}{a.i.}; \quad (2.6)$$

dove è stato definito *a.u.* il numero di particelle in uscita che si riescono ad estrarre ed *a.i.* il numero di particelle in ingresso. Quindi l'efficienza è una sorta di rendimento, e si capisce che più il suo valore è alto, maggiore è l'efficacia con cui si riescono ad estrarre ioni radioattivi, e maggiore sono le possibilità di poter ionizzare anche elementi critici come isotopi con tempo di decadenza molto breve. Il lavoro svolto durante lo svolgimento di questa tesi sarà incentrato proprio ad ottimizzare questo parametro, oltre che ad esaminare l'oggetto dal punto di vista termico e strutturale, per cercare di riprogettarlo in modo da avere un miglior comportamento in termini di durata ed efficienza.

L'efficienza non è l'unico parametro da considerare se si vuole ottenere una caratterizzazione completa della Sorgente di Ionizzazione: anche l'emittanza è un fattore che incide in modo marcato sul comportamento del sistema.

Con la parola *emittanza* ci si riferisce ad una proprietà di un fascio di cariche elettriche, come quello che viene estratto dalla sorgente. Misura la dimensione e l'espansione di tale

fascio nello spazio delle fasi, con coordinate posizione e quantità di moto [9]. Se ha un valore basso, significa che le particelle avranno una coordinata simile nello spazio (quindi il fascio sarà compresso in un'area piccola se consideriamo la sua dispersione in un piano perpendicolare alla direzione con cui procede) e quantità di moto simile fra loro, perciò procederanno tutte in una direzione comune. Si capisce come una piccola emittanza fornisca un fascio migliore da gestire. Per rappresentare lo sviluppo del fascio di ioni occorre una forma semplice; siccome il fascio ha distribuzione di tipo gaussiano in entrambe le coordinate dello spazio delle fasi, e la rappresentazione di tale distribuzione in un sistema bidimensionale è composta da ellissi, un'ellisse è il modo più ovvio di descrivere l'emittanza. Si costruisce perciò un grafico, come quello in Figura 2.12, dove si riportano tutti i parametri che indicano lo sviluppo del fascio.

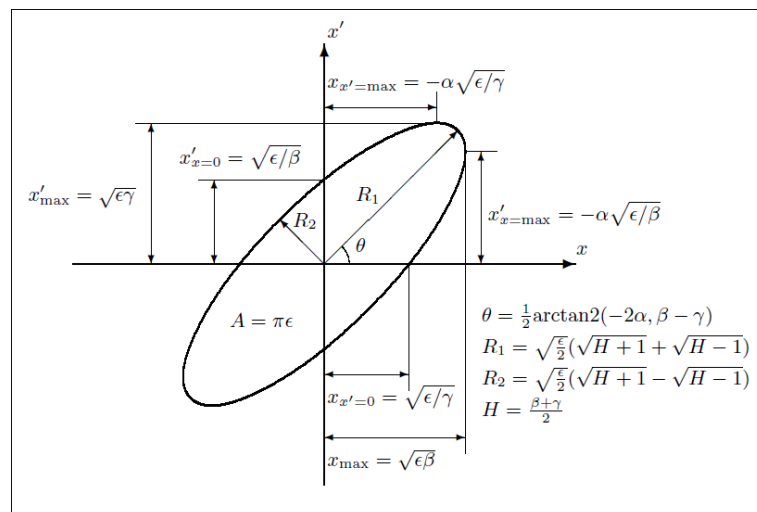


Figura 2.12: rappresentazione dell'ellisse dell'emittanza; i fattori α , β , γ sono noti come parametri di Twiss e definiscono l'orientamento e la scala, ϵ definisce l'area dell'ellisse, R_1 ed R_2 sono i raggi [12].

Questo parametro dipende dalla geometria della sorgente, dell'elettrodo estrattore e dalle condizioni del plasma.

In questa tesi il valore dell'emittanza non sarà considerato per quanto riguarda l'ottimizzazione, poiché il suo esame comprende nell'analisi anche l'apparato di estrazione esterno alla sorgente; tuttavia bisogna sempre tener presente che per la scelta dell'oggetto che poi sarà montato in linea per il progetto SPES, il valore di questo parametro diventa cruciale in quanto incide sulla possibilità della gestione e del controllo del fascio di ioni radioattivi.

2.8. Conclusioni

La descrizione dello stato di Plasma, assieme alla comprensione dei fenomeni che ne regolano il comportamento e dei parametri che ne descrivono lo stato, ci dà uno strumento per poter approcciare lo studio della sorgente di ionizzazione al plasma con la consapevolezza che le scelte di progetto che saranno prese avranno sul sistema in esame. Inoltre la descrizione dei meccanismi di ionizzazione per impatto di elettroni ed in particolare dei vari tipi di catodi, ci permette di capire in che modo sia possibile un miglioramento del progetto della sorgente al plasma in uso presso i Laboratori di Legnaro.

In quest'ottica, la descrizione della attuale versione della sorgente è stata inserita perché si capisca in che direzione sono state effettuate le scelte progettuali che saranno descritte nei successivi capitoli e perché ci sia concentrati su degli elementi in particolare, uno su tutti il catodo in Tantalo. La trattazione è stata svolta dal punto di vista di un laureando in Ingegneria e non di un fisico, perciò per eventuali approfondimenti si rimanda alle fonti citate.

Bibliografia

- [1]. Bernhard Wolf, *Handbook of Ion Source*, 1995, CRC Press.
- [2]. Laura Cavaletto, *Studio dei meccanismi di ionizzazione e della formazione del plasma in una sorgente per il progetto SPES dei Laboratori INFN di Legnaro*, Tesi di Laurea Magistrale, Università degli Studi di Padova, 2012/2013.
- [3]. Francis F. Chen, *Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion*, 1984, KA/PP.
- [4]. L. Pesescu, R. Catherall, J. Lettry, T. Stora, *Numerical Simulation of Space Charge Effects and Plasma Dynamics for FEBIAD Ion Source*, Elsevier, 2008.
- [5]. L. Pesescu, T. Stora, J. Lettry, G. Catadanil, R. Catherall, *Arc Discharge Ion Source Development at CERN ISOLDE*, U.P.B. Sci. Bull, Series A, 2010.
- [6]. L. Pesescu, R. Catherall, J. Lettry, T. Stora, *Development of High efficiency Versatile Arc Discharge Ion Source at CERN ISOLDE*, AIP Review id Science Instruments, 2010.
- [7]. M. Manzolaro, A. Andrighetto, G. Meneghetti, A. Monetti, D. Scarpa, M. Rossignoli, J. Vasquez, S. Corradetti, M. Calderolla, G. Prete, *Characterization of the FEBIAD Ion Source for the SPES Facility*, 2013.
- [8]. A. Monetti, *Studio, Simulazione e Test di un Apparato per la Produzione di Fasci Radioattivi*, Tesi di Laurea Magistrale, Università degli Studi di Padova, 2011/2012.
- [9]. A. T. Forrester, *Large Ion Beam – Fundamentals of Generation and Propagation*, Wiley Interscience Publication, 1988.
- [10]. M. Manzolaro, *Study, Design and Test of the Target – Ion Source System for the INFN SPES Facility*, Tesi di Dottorato, Università degli Studi di Padova, 2010.
- [11]. «Wikipedia,» Indirizzo: <http://wikipedia.org>.
- [12]. T. Kalvas, *Beam Extraction and Transport*, Department of Physics, University of Jyväskylä, 40500 Jyväskylä, Finland, 2014.

CAPITOLO 3

SIMULAZIONE ELETTRO-TERMO-STRUTTURALE DELLA SORGENTE DI IONIZZAZIONE AL PLASMA

3.1. Introduzione

Nel panorama delle varie metodologie ingegneristiche che un progettista o un ricercatore ha a disposizione per studiare il sistema in esame, il metodo degli elementi finiti ricopre decisamente un ruolo di primo piano. Grazie alla sua caratteristica di riferirsi all'algebra delle matrici, è stato infatti così implementato in numerosi programmi con lo scopo di indagare varie problematiche relative a vari sistemi meccanici o fisici, riguardanti anche più aspetti di uno stesso sistema (come il comportamento strutturale, termico, dinamico, fluidodinamico, ecc.). Naturalmente, come in ogni ambito scientifico, uno strumento molto potente va usato con giudizio, interpretando di volta in volta i risultati ottenuti e ancor prima imparando a gestire le risorse di calcolo che il software ci mette a disposizione. In questo capitolo quindi, dopo aver introdotto il metodo degli elementi finiti da un punto di vista generale, facendo anche riferimento al problema della trasmissione del calore per radiazione che ha una formulazione di tipo non lineare, saranno analizzati più in dettaglio i problemi relativi alle analisi in campo elettrico, termico e strutturale. Si descriverà poi il modello sviluppato per lo studio della Sorgente di ionizzazione al plasma, indicando e giustificando di volta in volta le semplificazioni e le assunzioni che si sono adottate per analizzare il comportamento del sistema in esame con il miglior compromesso fra qualità della soluzione e tempo di calcolo. Infine, dallo studio del campo di temperatura della sorgente eseguito con questo metodo, si cercherà di ricavare, attraverso la conoscenza dei fenomeni fisici che controllano il sistema, un modo semplice per calcolare le prestazioni (in particolare la corrente della scarica di elettroni che influenza pesantemente l'efficienza di ionizzazione) della sorgente di ionizzazione al plasma. Si vedrà che maggior spazio sarà dedicato al campo termico del catodo, poiché il suo funzionamento è la sua durata nel tempo in condizioni di lavoro, sono il vero punto centrale di questa tesi.

3.2. Il metodo degli elementi finiti

Per l'analisi del comportamento dei corpi che compongono la sorgente al plasma e che vengono riscaldati durante il funzionamento, si è fatto ricorso al metodo numerico degli elementi finiti.

Per i problemi ingegneristici in generale esistono tre diversi possibili tipi di approccio:

- Analitico;
- Sperimentale;
- Numerico.

Lo studio di un sistema continuo col primo metodo è possibile grazie alla semplificazione del sistema stesso (a livello geometrico o fisico), che permette di arrivare allo sviluppo di un modello che possa essere descritto da equazioni differenziali risolvibili analiticamente: si pensa per esempio di approssimare una legge complessa con un andamento lineare, oppure considerare come costanti alcune proprietà che invece variano. Il secondo metodo consiste nell'andare a misurare direttamente o indirettamente le grandezze di interesse sul sistema fisico considerato, ma ciò evidentemente può essere un limite in fase di progettazione perché richiede che il sistema sia già realizzato o, al limite, di un suo prototipo, cosa che spesso si traduce in costi elevati e non sostenibili. Perciò l'alternativa consiste in un approccio di tipo numerico: si possono semplificare le equazioni differenziali che descrivono il sistema complesso sostituendo un differenziale infinitesimo con una differenza finita (metodo delle differenze finite) oppure si può affrontare il problema a priori suddividendo un continuo in più parti *discretizzandolo*, in tal modo il sistema di equazioni differenziali viene sostituito da un sistema algebrico (metodo degli elementi finiti).

Quindi, vista l'iniziale trasformazione da continuo a discreto, si ha una soluzione approssimata per il sistema di equazioni differenziali iniziale. L'approssimazione sarà controllata da colui che svolge il calcolo, scegliendo opportunamente la dimensione degli elementi di suddivisione. La discretizzazione effettuata viene detta “*mesh*” (termine che indica il reticolo di elementi) del dominio di partenza: gli elementi usati hanno geometria semplice (triangoli e quadrilateri per stati piani, esaedri e tetraedri per problemi tri-dimensionali) per cui lo stato ai vertici, detti nodi, è calcolato in base al sistema algebrico, mentre lo stato interno viene computato con l'assegnazione di ogni elemento di un'opportuna funzione di forma. Complessivamente, la soluzione approssimata dell'equazione differenziale di partenza, si ottiene dalla combinazione lineare delle funzioni di forma di elemento, con la soluzione ottenuta in corrispondenza dei nodi della

discretizzazione. Per le analisi FEM svolte per questo lavoro di tesi si è utilizzato il software di Elementi Finiti Ansys® Release 13.0.

Per svolgere un'analisi FEM, l'operatore deve sempre eseguire i seguenti passaggi, tenendo presente che l'ordine con cui sono descritti spesso è indispensabile o comunque facilita lo svolgimento della simulazione:

1. Va, per prima cosa selezionato, il tipo di elemento a seconda della tipologia di studio da effettuare (gli elementi vanno scelti da una libreria interna al software a seconda delle proprietà richieste);
2. Dopo aver selezionato l'elemento, il codice richiede di descriverne le proprietà ("*element options*") per poter eseguire correttamente il calcolo sul modello richiesto;
3. Un'altra operazione preliminare fondamentale è l'indicazione al codice di calcolo delle proprietà dei materiali inseriti nel modello. Queste possono essere inserite manualmente o selezionate da una libreria, oppure come spesso verrà fatto in questo lavoro, si richiameranno automaticamente dei sottocodici, detti "macro" contenenti le proprietà richieste;
4. È necessario descrivere al codice la geometria del modello studiato. Anche in questo caso si può svolgere questa operazione manualmente, visto che Ansys® possiede un modellatore geometrico integrato, ma la sua semplicità consiglia di importare le geometrie più complesse create con appositi modellatori CAD e convertite in opportuni formati (IGES);
5. Una delle fasi delicate del processo, da cui dipende in gran parte il grado di affinità della soluzione ottenuta con la realtà del sistema studiato è la discretizzazione del modello geometrico in elementi finiti, cioè la stesura del reticolo, detta operazione di "*meshatura*". Questa operazione influisce oltre che sul grado di approssimazione dei risultati, anche sul tempo di calcolo della soluzione e sulle dimensioni dei file di risposta del codice;
6. L'ultima operazione prima della soluzione consiste nell'assegnazione di vincoli, carichi e condizioni iniziali, che saranno scelti in base al tipo di elemento e quindi in base al tipo di analisi che si vuole eseguire (ad esempio un vincolo su uno spostamento o rotazione per analisi strutturali, una temperatura assegna nel caso di analisi termiche);
7. Una volta definiti i punti precedenti, è possibile risolvere il modello. Bisogna quindi scegliere correttamente le impostazioni del solutore (ad esempio se il tipo di analisi è

stazionaria o transitoria). La soluzione sarà in generale un vettore che rappresenta il valore assunto dai gradi di libertà nodali;

8. È infine possibile analizzare i risultati con uno strumento detto “Post-processore”, in cui si possono cercare ed esaminare i valori dei parametri che interessano che saranno accessibili a seconda del tipo di elemento scelto (non posso leggere la temperatura se ho eseguito un'analisi di tipo strutturale o viceversa).

Per le analisi elettro-termo-meccaniche di strutture tridimensionali, ad esempio, nel passo 1 è stato scelto l'elemento *SOLID 226*. Nella guida di Ansys® [1] sono spiegate in dettaglio le caratteristiche di tale elemento, a cui in pratica si possono assegnare caratteristiche di resistenza meccanica, conducibilità elettrica e termica attraverso la scelta del materiale.

3.3. La trasmissione del calore ed il comportamento elettrico

La radiazione termica è la principale metodologia di trasmissione del calore alle alte temperature. In Ansys® viene implementata attraverso il metodo “*Radiosity Solver*” che permette l'introduzione di valori di emissività dei materiali dipendenti dalla temperatura. In questo modo la dipendenza dalla temperatura di tutte le proprietà fondamentali dei materiali viene tenuta in considerazione.

Se ripensiamo alla sorgente descritta nel Capitolo 2, ci rendiamo conto che il suo funzionamento può essere studiato a partire da un modello che consideri nell'analisi i campi termico ed elettrico del sistema. Infatti una corrente riscaldante che sarà chiamata corrente di linea attraversa la linea di trasferimento, il catodo, la camera di scarica per poi dispersi nei corpi di supporto. Il riscaldamento per effetto Joule fa sì che i corpi si portino a temperature prossime ai 2000°C, diventando emettitori di calore attraverso radiazione. È chiaro che per caratterizzare in modo preciso la temperatura dei corpi in esame, conduzione e radiazione sono fondamentali per definire il campo termico.

Per risolvere problemi di questo genere che considerano effetti accoppiati di irraggiamento e conduzione si usano metodi iterativi: partendo da una condizione iniziale, il calcolo del flusso termico radiativo fornisce le condizioni al contorno per l'analisi di diffusione termica all'interno dei corpi; dal campo di temperatura ottenuto, si può calcolare nuovamente l'effetto della radiazione, e ripetere il ciclo finché non si arriva a convergenza (la soluzione non varia più). La Figura 3.1 schematizza il problema della trasmissione del calore con modalità accoppiata conduttiva e radiativa in una regione solida D con all'interno una zona vuota con delle superfici affacciate.

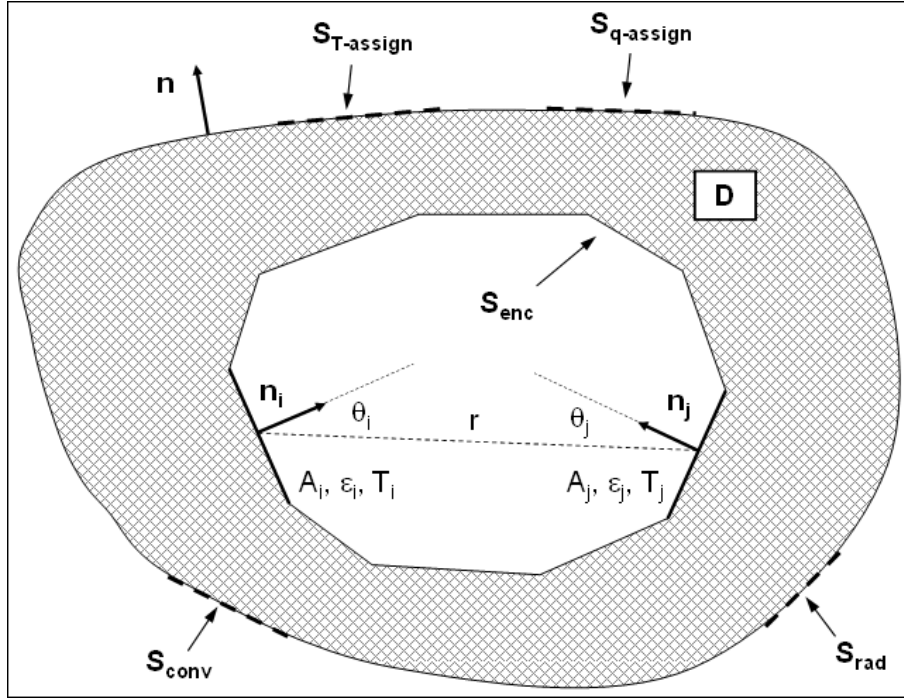


Figura 3.1: schema che spiega il flusso di calore all'interno di una regione solida D (per conduzione) con una superficie interna S_{enc} formata da delle superfici A_i che scambiano il calore fra di loro per radiazione [2].

La conduzione è descritta dall'*equazione generale della conduzione* (in coordinate cartesiane) [3]:

$$c\rho \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial z} \right) + H; \quad (3.1)$$

dove c , ρ e λ sono rispettivamente calore specifico a volume costante, densità e conducibilità termica del materiale, t è la temperatura in $^{\circ}\text{C}$, H è detta *intensità di generazione interna*, cioè l'energia prodotta nel corpo per unità di volume e x , y , z sono le coordinate. Le condizioni iniziali vengono fornite assegnando ad ogni punto di D (individuabile con le coordinate cartesiane) una temperatura iniziale al tempo 0:

$$t(x, y, z, 0) = t_i(x, y, z) \quad \forall (x, y, z) \in D; \quad (3.2)$$

mentre le condizioni al contorno possono essere definite assegnando la temperatura sulle superfici esterne del corpo, il flusso di calore incidente su tali superfici e il flusso di calore fra le superfici chiuse (tale flusso termico è radiativo se consideriamo che ci sia il vuoto nel volume):

$$t(x, y, z, \tau) = t_{assign}(x, y, z) \quad \forall (x, y, z) \in D; \quad (3.3)$$

$$-k \frac{\partial t}{\partial n}(x, y, z) = q_{assign} + q_{conv} + q_{rad} \quad \forall (x, y, z) \in (S_{q-assign} \cup S_{conv} \cup S_{rad}); \quad (3.4)$$

$$-k \frac{\partial t}{\partial n}(x, y, z) = q_{enc} \quad \forall (x, y, z) \in S_{enc}; \quad (3.5)$$

l'equazione 3.3 rappresenta un vincolo sulle temperature (si può usare nel caso si abbia ad esempio una refrigerazione su una superficie che la mantenga a temperatura costante oppure nel caso si metta in contatto il corpo con un oggetto caldo di cui si conosce il campo termico e di cui la capacità termica sia approssimabile come infinita. Le derivate nelle equazioni 3.4 e 3.5 sono svolte rispetto al versore n normale alla superficie S . I termini q_{conv} e q_{rad} rappresentano i flussi calore termici e radianti di corpi esterni non considerati nel modello che agiscono sulle porzioni di bordo S_{conv} ed S_{rad} e sono descritti dalle equazioni:

$$q_{conv} = \alpha(t - t_c); \quad (3.6)$$

$$q_{rad} = \varepsilon\sigma(T^4 - T_r^4); \quad (3.7)$$

dove α è il coefficiente di scambio termico convettivo sulla superficie S_{conv} , t_c è la temperatura del fluido a contatto con tale superficie, ε è l'emissività emisferica totale del materiale della superficie S_{rad} supposta grigia, σ è la costante di Stefan-Boltzmann e T_r è la temperatura assoluta di riferimento dell'ambiente esterno, inteso come una superficie di estensione molto maggiore di S che circonda completamente il corpo. È chiaro che nella superficie interna S_{enc} l'equazione principale è la 3.5, e che in assenza di uno scambio termico convettivo su tale superficie (spazio vuoto all'interno del corpo) il flusso q_{enc} diventa uguale al flusso termico conduttivo nel materiale.

La soluzione del problema radiativo, cioè la determinazione di q_{enc} , ipotizzando di avere N superfici coinvolte, grigie e con proprietà di irraggiamento indipendenti dalla direzione, ognuna caratterizzata da un valore di temperatura e flusso radiativo netto scambiato:

$$\sum_{i=1}^N \left[\frac{\delta_{ji}}{\varepsilon_i} - F_{j-i} \left(\frac{1-\varepsilon_i}{\varepsilon_i} \right) \right] q_{enc,i} = \sum_{i=1}^N (\delta_{ij} - F_{j-i}) \sigma T_i^4; \quad (3.8)$$

dove δ_{ij} è il simbolo di Kronecker (vale 1 se $i = j$, 0 altrimenti), ε_i è l'emissività emisferica globale della superficie i -esima, F_{i-j} è il fattore di vista fra le superfici i -esima e j -esima, $q_{enc,i}$ è il flusso termico radiativo netto scambiato dalla superficie, T_i è la sua temperatura assoluta. Il fattore di vista F_{i-j} si calcola dalla formula:

$$F_{i-j} = \frac{1}{A_j} \int_0^{A_i} \int_0^{A_j} \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j}{\pi r^2} dA_i dA_j; \quad (3.9)$$

dove le entità geometriche sono riferite alle Figura 3.1 e rappresentano la distanza fra le aree \mathcal{R} , l'estensione delle aree stesse (A_i e A_j) e gli angoli fra la congiungente (direzione di r) e il versore normale n (θ_i e θ_j).

Per quanto riguarda il comportamento elettrico di un corpo, è possibile fare riferimento alle leggi di Ohm, scegliendo la formulazione generale nel caso la resistività dei materiali vari con la temperatura:

$$\mathbf{j} = -\frac{1}{\rho(T)}\nabla V; \quad (3.10)$$

dove $\rho(T)$ è la resistività dei materiali in funzione della temperatura assoluta, $\mathbf{j}(x,y,z)$ è la densità di corrente elettrica e ∇V è il gradiente del potenziale elettrico $V(x,y,z)$. Se le condizioni del sistema sono stazionarie, vale l'equazione di continuità nella forma:

$$\nabla * \mathbf{j} = 0; \quad (3.11)$$

Cioè la divergenza del vettore \mathbf{j} è nulla, inoltre dalla formulazione dell'effetto Joule la dissipazione di calore di un corpo per unità di volume, $H(x,y,z)$ nell'equazione 3.1 può essere calcolata dalla seguente:

$$H = -\nabla V * \mathbf{j}. \quad (3.12)$$

3.4. Modello numerico della sorgente FEBIAD

In questo paragrafo sono spiegate tutte le fasi seguite per la costruzione di un modello numerico della sorgente di ionizzazione, in particolare per quanto riguarda la fase di pre-processamento che comprende modellazione geometrica, discretizzazione e assegnazione dei carichi.

3.4.1. Modellazione geometrica

Per costruire un modello ad elementi finiti (detto anche FEM) il punto di partenza è la costruzione, come già spiegato nel paragrafo 3.2, di un telaio geometrico su cui stendere il reticolo di nodi ed elementi che permetteranno la soluzione. Avendo progettato la sorgente attraverso programmi CAD, è già disponibile il modello tridimensionale completo dell'oggetto che può essere caricato in Ansys® dopo essere stato convertito in formato *IGES* (.iges/.igs). Se si usa la geometria tale e quale si corre però il rischio di ottenere un modello FEM non gestibile dal punto di vista della suddivisione in elementi o del tempo di calcolo: è opportuno perciò eseguire una semplificazione geometrica che consenta di ridurre le parti del modello a quelle necessarie per la soluzione, senza però rimuovere componenti o dettagli che influenzino in modo significativo la soluzione.

La prima analisi che è stata svolta sulla sorgente al plasma è un'analisi accoppiata nei campi elettrico e termico: generando una corrente che attraversasse il catodo si è cercato di determinare il campo di temperatura del sistema.

Per prima cosa è necessario osservare tutte le semplificazioni geometriche adottate: per capire perché sono state eseguite bisogna pensare a come si esegue in Ansys® la fase di pre-processamento e di “meshatura”: il modello geometrico viene inserito dando come dato in ingresso al programma i vari file di ogni componente nel formato corretto (IGES nel nostro caso). Perciò il programma vede i componenti come indipendenti fra loro, anche se disposti corretti nello spazio, quindi ciò che manca è la continuità strutturale che permette il passaggio della corrente ed il flusso termico conduttivo. Per questo si utilizza un comando (*VGLUE*) che permette di incollare i volumi, cioè di fatto vengono generate delle nuove entità tridimensionali che hanno le superfici di contatto in comune (vedi Figura 3.2).

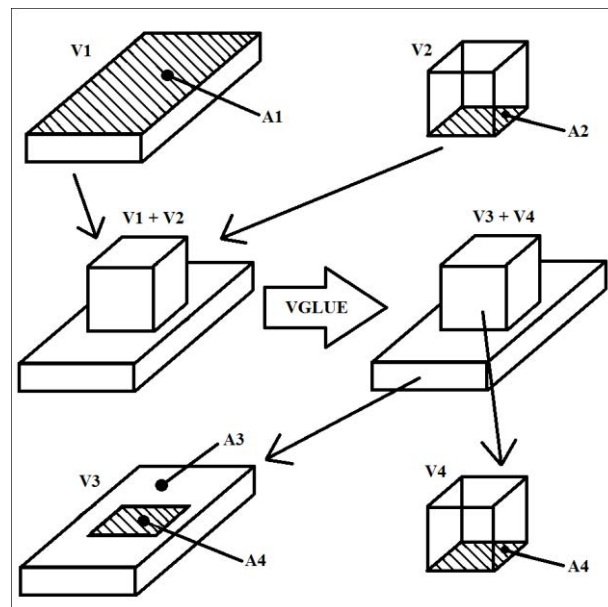


Figura 3.2: schema dell'operazione di incollaggio dei volumi attraverso il comando VGLUE. I volumi di partenza V1 e V2 sono accostati nel modello geometrico, le aree A1 e A2 sono a contatto. Dopo aver eseguito il comando il programma crea due nuovi volumi V3 e V4 uguali ai precedenti, ma racchiusi da nuove aree, in particolare nella zona di superficie comune viene creata un'area A4 che appartiene ad entrambi i volumi, mentre la vecchia A1 viene sostituita da A3 e A4.

Questa è una delle operazioni più critiche durante lo sviluppo di un modello FEM poiché per poter essere eseguita bisogna che siano rispettate alcune condizioni: tutti i volumi che vengono uniti fra di loro devono essere a contatto l'uno con l'altro, consecutivamente; se ciò non è vero il comando di incollaggio fallisce. Inoltre se si uniscono corpi con una certa dimensione con altri di dimensioni molto più piccola, Ansys® non riesce a generare nuovi volumi contenuti nelle superfici, che ora saranno anche molto piccole. Infine se si importano geometrie preesistenti da un modello CAD

l'attenzione dev'essere posta alle linee curve o angoli molto acuti che possono dar luogo ad aree irregolari.

Non si può trascurare inoltre l'aspetto legato alla suddivisione: la creazione attraverso l'incollaggio dei volumi di superfici molto piccole rispetto alle dimensioni generali dell'oggetto può costringere ad utilizzare elementi con dimensioni molto piccole, generando così molti nodo ed aumentando il tempo richiesto per risolvere il sistema e le dimensioni del file dei risultati in termini di memoria occupata. Inoltre una buona "meshatura" prevede che elementi appartenenti a volumi consecutivi non siano di dimensione troppo diversa l'uno rispetto all'altro. Detto questo, appare evidente come il modello CAD originale dei componenti della sorgente mostrati nel Capitolo 2 non siano adatti ad essere implementati direttamente nel modello FEM.

Con il comando VGLUE si ottiene un modello in cui tutte le parti sono unite, la condizione corrispettiva nella realtà sarebbe verificata se si saldassero assieme tutti i componenti (a prescindere dai materiali). È chiaro che quella descritta è una situazione ideale di perfetto accoppiamento.

Nel modello su cui si svolgerà l'analisi, innanzi tutto il catodo è descritto come componente unico invece che come assemblato di tre parti, anche se questo dettaglio è trascurabile poiché in realtà vengono saldati assieme perciò è realmente ristabilita la continuità del materiale. Gli anelli distanziatori posti tra gli scudi termici sono trascurati del tutto (lo spessore è trascurabile agli effetti della conduzione e la superficie ridotta non influenza in modo particolare l'irraggiamento); anche i supporti dell'anodo sono semplificati: vengono tolti i dadi e i puntali di supporto sono schematizzati come cilindri attaccati alla camera di anodo. Il modello considera la linea di connessione elettrica a partire dalle lamine in Tantalio, che sono accostate alla linea di trasferimento tramite una vite di chiusura, senza però tenere conto del dado; le stesse lamine sono descritte come un volume unico, di geometria rettangolare, mentre in realtà sarebbero un foglio più spesso accostato ad altri fogli sottili, che si flettono assumendo una forma curva. Non viene tenuto conto nemmeno del morsetto di Rame che si accoppia al puntone della camera.

3.4.2. Discretizzazione della geometria

Dopo la costruzione della geometria, si può passare alla discretizzazione del modello: la scelta del tipo di elemento è caduta sul *SOLID226*, che permette di gestire le proprietà termiche, elettriche e strutturali contemporaneamente per un materiale, risolvendo anche

problemi non lineari (come ad esempio il comportamento plastico del materiale). Naturalmente in questo primo modello si sono attivati soltanto i campi elettrico e termico, poiché l'accoppiamento del campo strutturale è stato eseguito in un secondo momento. Le opzioni di questo elemento consentono le creazione di geometrie di suddivisione di forma tetraedrica o esaedrica, e che utilizza venti nodi (vedi Figura 3.3).

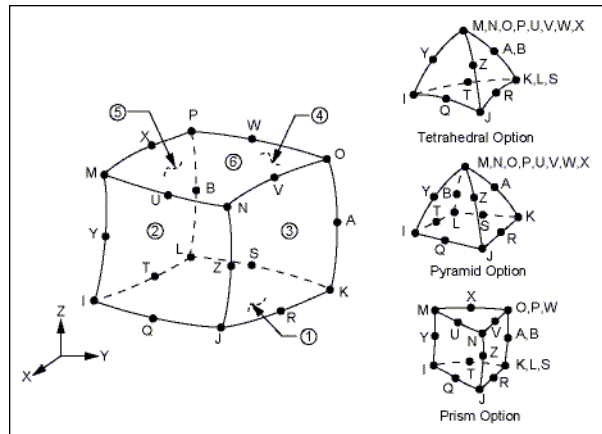


Figura 3.3: geometria del SOLID226 come illustrata nella guida di Ansys® [1].

Gli elementi di forma cubica sono quelli che forniscono la soluzione migliore, ma per permettere al programma di utilizzare tale forma bisogna avere geometrie regolari e adottare dimensioni di elemento molto ridotte. La dimensione di elemento o taglia (*“element size”* nel linguaggio di Ansys®), per non dare problemi dovrebbe coincidere con la dimensione più piccola del volume discretizzato (ad esempio con lo spessore nel caso di un disco sottile). Appare chiaro come, nel caso di oggetti che hanno una grande estensione in una direzione e una piccola estensione in un'altra, ciò provochi modelli con un gran numero di elementi e di nodi, che richiedono un tempo alto per ottenere la soluzione. Perciò, nella pratica, si cerca di avvicinarsi a questa situazione accettando un certo numero di elementi con geometria distorta (in tal caso il programma visualizzerà un messaggio di attenzione) in cui gli angoli siano troppo acuti o la geometria non sia regolare, ma permetterà la soluzione. Naturalmente finché gli elementi critici risulteranno essere pochi (qualche punto percentuale rispetto al numero totale che compone il modello) la qualità della soluzione sarà buona, altrimenti il risultato potrebbe risentirne.

Il problema del numero eccessivo di nodi ed elementi è particolarmente significativo nel caso di un modello come il nostro che consideri un flusso termico di tipo radiante, poiché se si riprende l'equazione 3.7 si nota che il problema della radiazione dipende dalla quarta potenza della temperatura: quindi nel modello il programma dovrà risolvere

un sistema non lineare, facendo ricorso ad un metodo iterativo che impiega perciò molto tempo ad eseguire l'analisi. Inoltre, ancora prima di avviare la soluzione, dovrà essere effettuato il calcolo dei fattori di vista, e dev'essere scritto un file con gli $F_{i,j}$, dove i e j sono indici utilizzati per indicare tutte le superfici degli elementi creati: si intuisce perciò quanto sia importante scegliere la dimensione di elemento ottimale che consenta un compromesso tra tempo di risoluzione ridotto e buona qualità della soluzione. In Figura 3.4 si può osservare il modello discretizzato della sorgente.

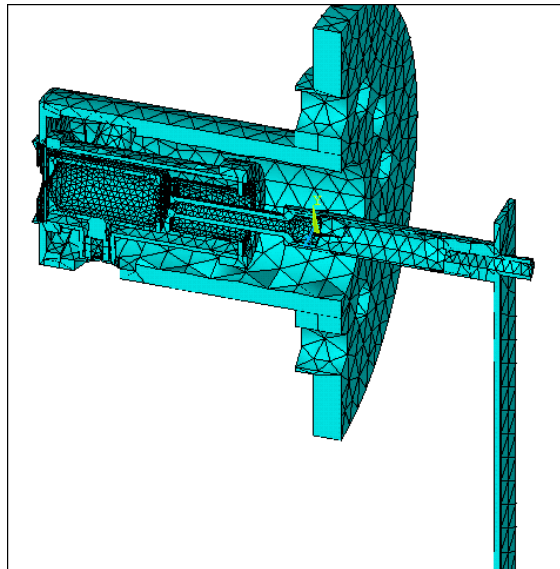


Figura 3.4: rappresentazione della discretizzazione adottata nel modello FEM della sorgente di ionizzazione.

3.4.3. Assegnazione dei carichi

Una volta steso il reticolo di suddivisione su tutti i volumi, si possono assegnare i carichi al modello. Con questa operazione, si intende la definizione di tutti gli effetti che incidono dall'esterno sui corpi, cioè, nel caso di analisi elettro-termica, correnti elettriche entranti, vincoli sul potenziale di alcune zone, vincoli termici (temperature fissate), superfici su cui agiscono flussi termici convettivi o radiativi. In particolare, all'inizio della connessione elettrica, è stata imposta una corrente entrante, che corrisponde con la corrente riscaldante che attraversa il catodo. Per questa operazione si è imposta una corrente di intensità fissata (il valore viene imposto attraverso un parametro detto I_{LINE}) su un nodo della superficie di base (che in realtà sarebbe stata a contatto col morsetto di Rame collegato con un puntone per il trasporto della corrente nella camera, poi vengono scelti consecutivamente tutti i nodi della stessa superficie che sono vincolati allo stesso potenziale di quello a cui è stata assegnata la corrente. In questo modo la stessa intensità

di corrente elettrica attraversa uniformemente la superficie iniziale della connessione elettrica. Per poter circolare, la corrente ha bisogno di un punto dove scaricarsi: per questo la superficie della flangia di supporto che va in contatto col piatto della camera è messa a terra (cioè tenuto a $0 V$), visto che la situazione reale prevede che il telaio sia a potenziale nullo e la camera sia con questo in contatto diretto. Il flusso termico radiativo può essere definito sulle superfici di tutti i corpi, ma occorre rimuovere le aree di intersezione poiché, essendo interne ai volumi non sono irradiate da nessun corpo e a loro volta non emettono radiazione: bisogna infatti ricordare l'ipotesi iniziale di considerare tutti i componenti come saldati tra loro. Infine vengono posti due vincoli termici: con le semplificazioni fatte è necessario imporre una temperatura di vincolo alla base della connessione elettrica perché le parti in Rame, di volume maggiore e con resistenza minore delle parti in Tantalio, si scaldano meno e raffreddano i componenti vicini asportando calore per conduzione. Inoltre, nella situazione reale, la sorgente è contenuta nella camera, di cui il piatto viene raffreddato a liquido (che rappresenta un flusso termico per convezione forzata) e sul coperchio agisce l'effetto convettivo naturale dell'aria nell'ambiente esterno. Per semplificare il problema, evitando di inserire carichi convettivi, si vincola inizialmente la superficie della flangia di supporto in contatto col piatto. I valori delle temperature scelte saranno oggetto del paragrafo successivo e saranno assegnate attraverso un unico parametro detto T_{amb} .

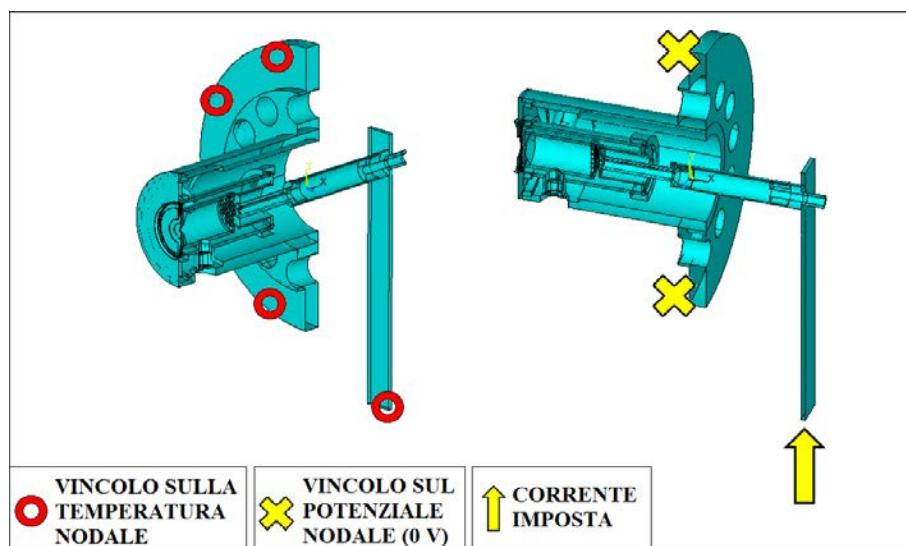


Figura 3.5: rappresentazione del modello FEM della sorgente al plasma con indicazione dei carichi assegnati. In particolare si possono notare le superfici a cui sono state imposti i vincoli di potenziale nullo, temperatura costante il cui valore viene regolato dal parametro T_{amb} , che sarà esaminato nel paragrafo successivo, e l'area alla base della connessione elettrica in cui viene imposto il passaggio della corrente riscaldante secondo il parametro I_{LINE} .

3.5. Analisi parametrica sul modello FEM

Le condizioni al contorno rappresentano un aspetto significativo di un sistema fisico, poiché concorrono a determinare il suo stato. In base alla loro scelta la soluzione può variare anche di molto. Perciò per la scelta di un modello FEM definitivo è necessario mettere in evidenza le ipotesi che si adottano e il sistema di vincoli scelto, che in generale saranno una semplificazione della realtà.

Nel nostro caso, le condizioni al contorno sono rappresentate dalle temperature di vincolo assegnate alla base della connessione elettrica e sulla superficie della flangia: per la prima, si è già accennato come la presenza del morsetto di Rame e del puntone nella camera provochi un raffreddamento del materiale in quella zona per effetto del flusso termico conduttivo, però bisognerà indagare su quale temperatura assegnare in quel punto (l'alternativa consisterebbe nel progettare un sistema per rilevare con un termometro la temperatura sul morsetto, operazione più lunga e costosa). Per la temperatura del corpo a contatto con la camera invece, non basta eseguire un'analisi come la precedente, ma bisogna considerare se la presenza o meno della camera stessa nel modello finali influenzi in modo significativo il campo di temperatura del sistema.

Per prima cosa ci si è concentrati sull'effetto della presenza della camera e come le condizioni ambientali potessero portare a modificazioni della temperature del sistema sorgente. Per confrontare le soluzioni sono stati scelti dei dati che potessero dare un indice del buon funzionamento della sorgente: in particolare gli oggetti più delicati dal punto di vista termico sono catodo ed anodo; ne Capitolo 2 è già stato spiegato perché la temperatura del catodo, in particolare, sia così significativa per il processo di ionizzazione (legge di Richardson). Siccome la zona di maggior interesse è quella compresa fra anodo e catodo, i risultati confrontati saranno T_{av_cath} , cioè la temperatura media (intesa come media delle temperature nodali sulla faccia frontale del catodo), T_{max} , cioè la temperatura massima del modello (appartiene ad un nodo sul catodo, anche se non è sulla faccia frontale fornisce un'indicazione di massima del campo di temperatura), l'andamento della temperatura lungo il raggio sulla faccia frontale del catodo, T_{av_an} , che rappresenta la temperatura media delle superfici interne della camera di anodo (media delle temperature nodali). Le zone su cui è stata rilevata la temperatura sono rappresentate in Figura 3.6, mentre in Figura 3.7 è mostrata una delle soluzioni del modello per corrente riscaldante imposta pari a $350 A$, in cui si può vedere la zona della sorgente in cui viene raggiunta la temperatura massima.

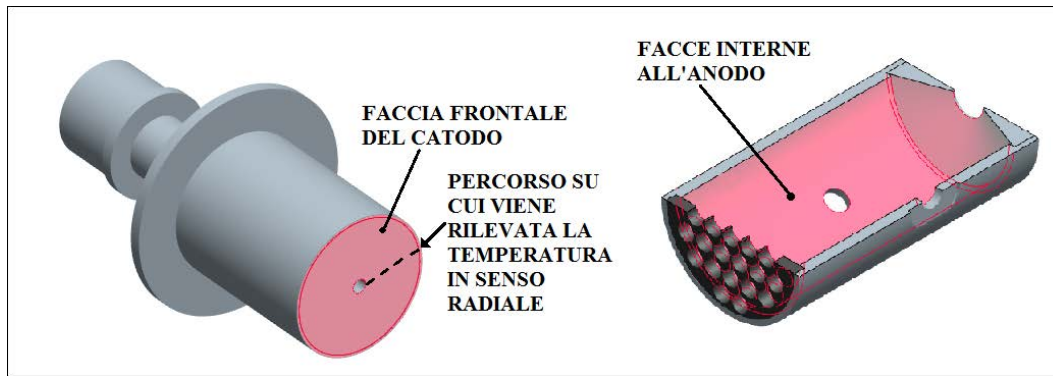


Figura 3.6: zone su cui è stata rilevata la temperatura per il confronto dei modelli. La linea nera sulla faccia frontale del catodo rappresenta il percorso su cui viene rilevata la temperatura in senso radiale. La temperatura massima viene rilevata su tutto il volume del catodo, che è l'oggetto più caldo del modello.

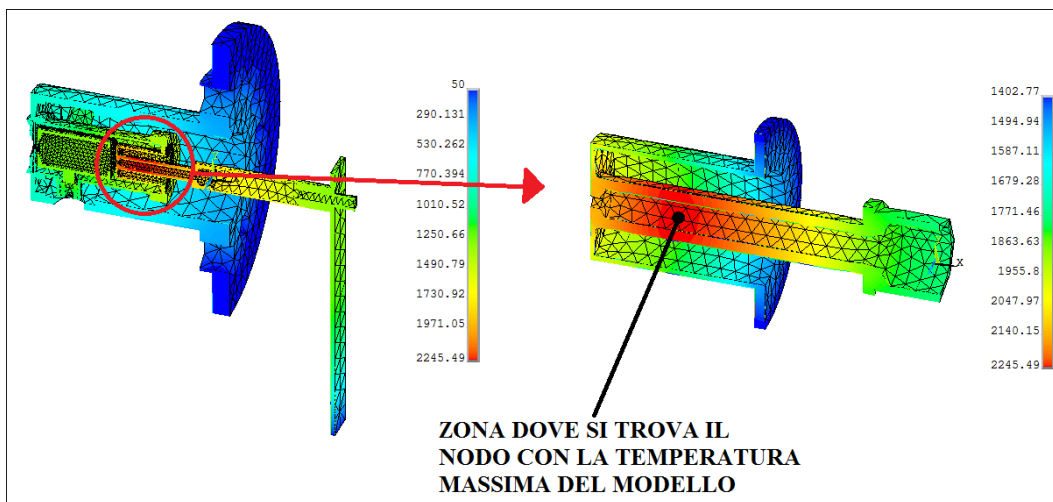


Figura 3.7: rappresentazione del campo di temperatura della sorgente di ionizzazione calcolata con il modello numerico. Si può notare che la zona più calda del sistema è situata sul catodo, sul canale dove scorre il fascio di gas da ionizzare.

Si è proceduto quindi a una modellazione molto semplificata della camera: facendo riferimento alle misure reali (lette ad esempio dal modello CAD) si sono costruiti due cilindri coassiali con la sorgente, che devono rappresentare nel modello FEM il coperchio della camera da vuoto con il piatto raffreddato e il canale da cui parte il fascio, dov'è alloggiata la sorgente (vedi Figura 3.8).

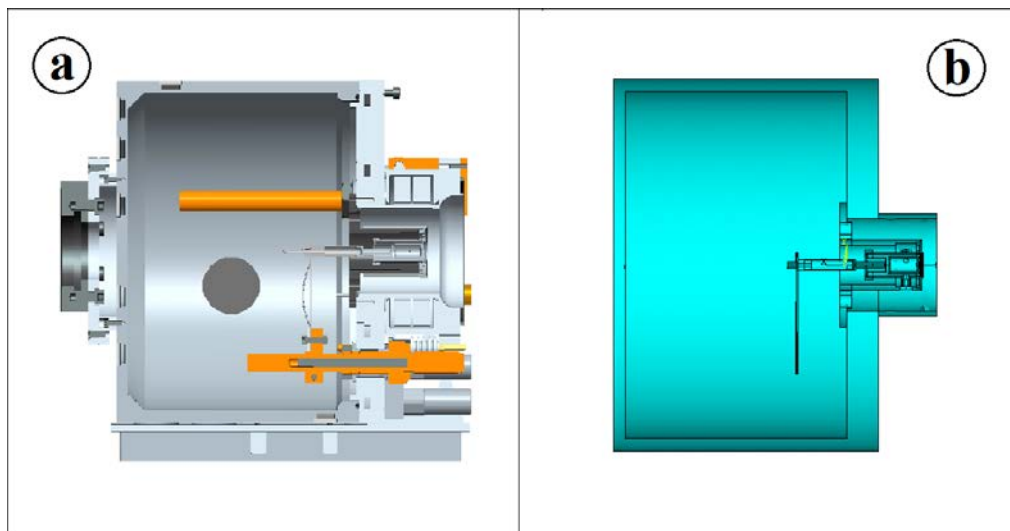


Figura 3.8: rappresentazione del modello CAD (a) della sorgente montata nella camera da vuoto e del modello FEM (b) costruito con geometrie semplificate (cilindri coassiali) per studiare l'effetto della temperatura esterna sul campo di temperatura.

Scelto come riferimento un valore della corrente di linea, si sono potute lanciare varie simulazioni. È stata imposta la corrente di 320 A , essendo questa scelta comunque non significativa ai fini di questo tipo di analisi, poiché, come si vedrà dai risultati la crescita della temperatura sarà lineare rispetto alla crescita della corrente riscaldante (secondo il codice a elementi finiti), purché ci si trovi nelle condizioni in cui il flusso termico di tipo radiante sia predominante, cioè con temperature vicine ai 2000°C , perciò le variazioni saranno costanti al variare della corrente riscaldante. Nel codice APDL (linguaggio di programmazione di Ansys®) è stato introdotto un parametro, che sarà chiamato T_{amb} poiché rappresenta le condizioni per cui la temperatura dell'esterno della camera e alla base della connessione elettrica è in equilibrio termico con il flusso convettivo dell'aria ambiente e del fluido refrigerante per quanto riguarda il puntone di Rame. Attraverso T_{amb} si è fissato il valore di temperatura sulle superfici esterne di camera e canale, e sulla superficie su cui la connessione elettrica va a contatto col morsetto di Rame (vedi Figura 3.9); tali superfici sono anche quelle che sono state poste a potenziale nullo, considerate cioè messe a terra al fine di consentire la circolazione della corrente riscaldante. Tutti le altre condizioni sono state tenute costanti; è chiaro inoltre che per poter confrontare tra loro in modo esatto i risultati delle simulazioni, bisogna adottare sempre una discretizzazione uguale per tutti i modelli, in modo che il grado di approssimazione della soluzione ottenuta sia lo stesso. Se questa condizione non viene rispettata, è possibile che l'errore generato dalla suddivisione di un sistema reale continuo sia più grande delle

differenze provocate dal cambiamento di una condizione al contorno, rendendo l'analisi inutile e dando risultati inconcludenti o errati.

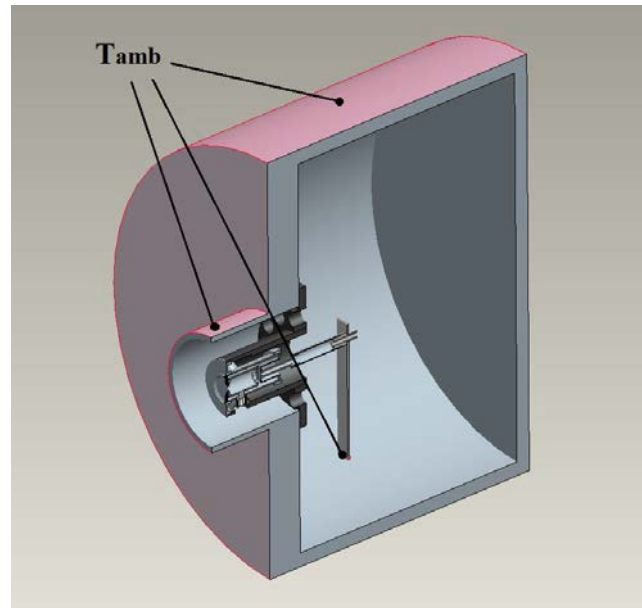


Figura 3.9: rappresentazione della geometria implementata in Ansys® della sorgente contenuta nella camera da vuoto. In rosso sono evidenziate le superfici a cui è stato imposto il vincolo di temperatura attraverso il parametro T_{amb} , cioè la superficie esterna della camera e la base della connessione elettrica.

La Tabella 3.1 mostra i risultati riguardanti le analisi descritte sopra:

T_{amb} [°C]	T_{max} [°C]	ΔT_{max} [°C]	T_{av_cath} [°C]	ΔT_{av_cath} [°C]	T_{av_an} [°C]	ΔT_{av_an} [°C]
50	2105	/	1923	/	1212	/
100	2106	1	1924	1	1214	2
200	2108	3	1927	4	1225	13
300	2110	5	1930	7	1234	22
400	2114	9	1934	11	1246	34
500	2118	13	1940	17	1264	52

Tabella 3.1: valori ricavati dall'analisi FEM per T_{max} , T_{av_cath} e T_{av_an} nel modello della sorgente al plasma. Sono anche riportate le variazioni rispetto al modello con T_{amb} fissata a 50°C, per mettere in evidenza la variazione del campo termico dell'oggetto dal caso di riferimento.

I risultati della Tabella 3.1 sono riassunti anche dai diagrammi seguenti (vedi Grafico 3.1, Grafico 3.2, Grafico 3.3). Si può notare che come era prevedibile, al crescere della temperatura con cui si vincolano le superfici esterne, crescono anche le temperature del sistema all'interno.

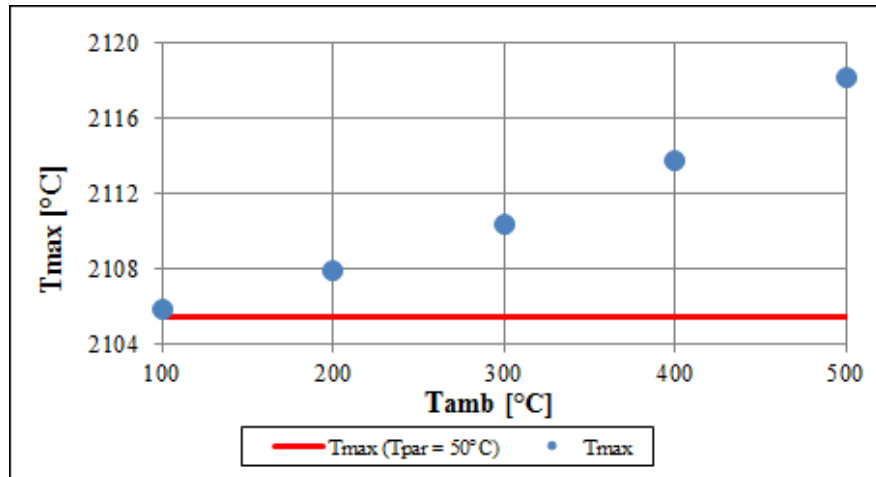


Grafico 3.1: valori della temperatura massima nodale del modello FEM della sorgente al variare della temperatura di vincolo delle superfici esterne della camera T_{amb} .

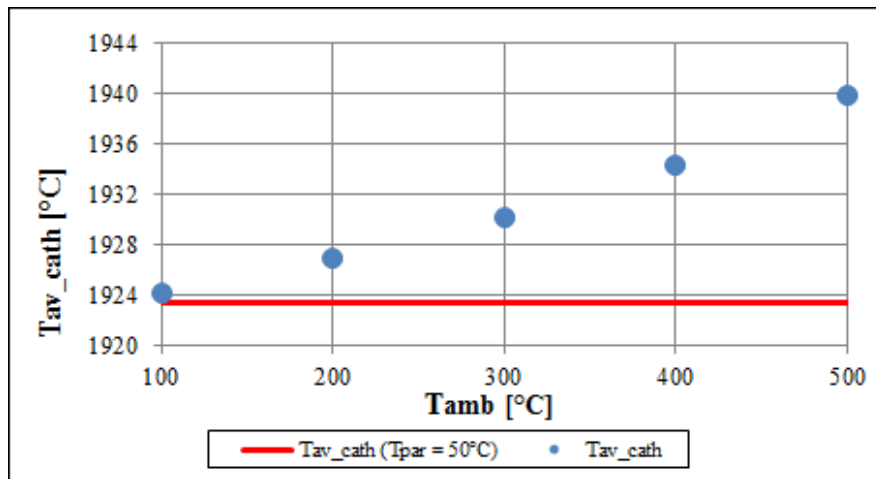


Grafico 3.2: valori della temperatura media nodale della faccia frontale del catodo nel modello FEM della sorgente al variare della temperatura di vincolo delle superfici esterne della camera T_{amb} .

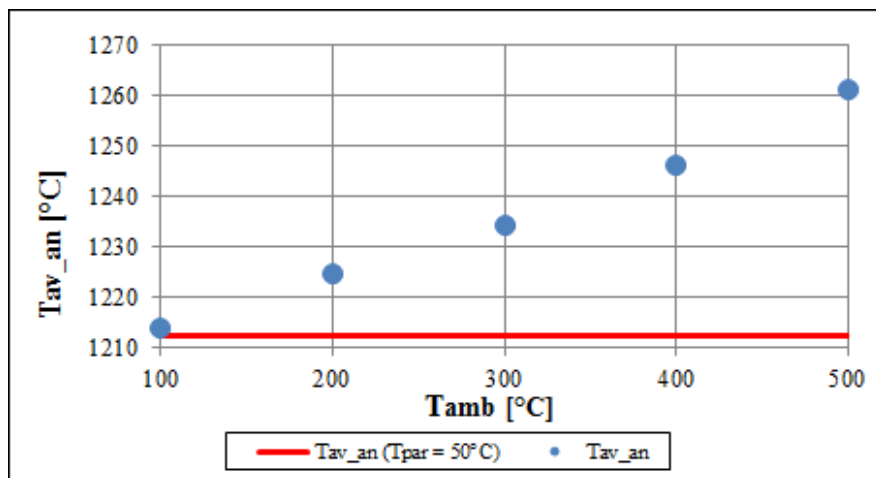


Grafico 3.3: valori della temperatura media nodale delle superfici interne della camera di anodo nel modello FEM della sorgente al variare della temperatura di vincolo delle superfici esterne della camera T_{amb} .

I valori di T_{amb} scelti per le varie analisi variano da 100°C a 500°C . Si può notare che a fronte di un aumento della temperatura esterna di 100°C , la crescita della temperatura massima del modello T_{max} non supera i 5°C , che in termini percentuali rappresentano una variazione inferiore all'1%, quindi in pratica trascurabile. La stessa situazione si presenta nel caso della temperatura media nodale della faccia frontale del catodo T_{av_cath} , perciò si può concludere che il catodo, che è anche l'oggetto di maggior interesse per lo studio svolto, è scarsamente influenzato dalla variazione delle condizioni esterne. In definitiva si può affermare che per quanto riguarda il modello numerico, si possono usare temperature di vincolo comprese fra 0°C e 100°C senza riscontrare un effetto significativo sul campo termico della sorgente; sperimentalmente la temperatura esterna del coperchio non supera mai valori dell'ordine dei 60°C nella configurazione con la sola sorgente di ionizzazione (se ci si avvicina alla situazione limite si ricorre a getti di aria compressa per controllare le temperature), mentre, nel caso sia presente anche il bersaglio radioattivo si utilizzano coperchi raffreddati a liquido per prevenire eventuali problemi di surriscaldamento, mantenendo le temperature sempre al di sotto dei 100°C . Per avere un'ulteriore conferma di quanto affermato, si possono confrontare gli andamenti della temperatura locale sulla faccia frontale del catodo letta in senso radiale (vedi Grafico 3.4).

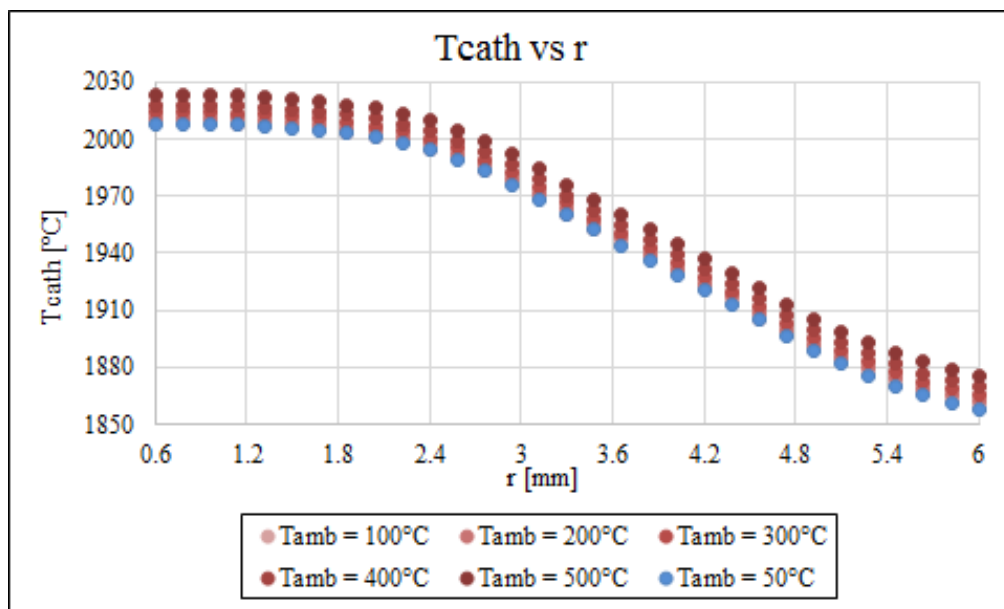


Grafico 3.4: andamento della temperatura lungo il raggio della faccia frontale del catodo al variare della temperatura di vincolo T_{amb} . I dati in blu rappresentano la serie di riferimento con 50°C all'esterno della camera. Si nota come, anche a fronte di un aumento importante della temperatura esterna il campo termico dell'oggetto vari di poco.

La temperatura lungo il raggio mantiene lo stesso andamento, ed aumenta al crescere di T_{amb} , tuttavia ancora una volta si nota che la variazione è minima.

Per quanto riguarda l'anodo, dalla Tabella 3.1 e dal Grafico 3.3 si nota che invece l'effetto è più accentuato; ricordando però che la temperatura dell'anodo è meno interessante per lo scopo della nostra analisi e che il campo in cui è stato fatto variare il parametro T_{amb} coinvolge temperature anche molto superiori a quelle effettive di funzionamento, si può ritenere che tale variazione sia trascurabile, anche visto che un incremento di $100^{\circ}C$ sulla temperatura esterna comporta una variazione di T_{av_an} inferiore ad un punto percentuale.

In conclusione si può affermare che la temperatura esterna, anche a fronte di grandi incrementi, non ha un particolare effetto sulla sorgente al plasma, perciò nel modello FEM definitivo sarà imposto un valore di vincolo pari a $50^{\circ}C$, vicino alle reali condizioni di esercizio, con la consapevolezza che variazioni delle reali condizioni di lavoro non rappresentano un problema per la qualità della soluzione nell'analisi. Si sottolinea inoltre che in questo modo si semplifica l'analisi evitando di inserire il flusso termico convettivo esercitato da aria esterna e liquido refrigerante senza commettere un grande errore di calcolo.

Dal risultato precedente emerge una seconda questione, e cioè, visto che la temperatura esterna della camera non ha un grande effetto sul campo di temperatura della sorgente, occorra effettivamente includere la geometria della camera, seppur semplificata, nella fase di modellazione oppure sia possibile trascurarla ottenendo un numero minore di volumi da discretizzare e quindi un modello più "leggero", ovvero che richiede un minor tempo per essere implementato e che occupi meno memoria. Sebbene questa questione sembri secondaria, l'effetto di una dimensione dei file più gestibile è evidente in fase di progettazione, ma bisogna sempre avere la certezza che ciò non implichi una perdita d'informazioni che vada ad inficiare la qualità della soluzione.

Quindi, in questo caso, si sono costruiti due modelli con geometrie differenti, uno che includeva i volumi semplificati della camera (lo stesso usato nell'analisi parametrica) ed uno dove sono stati inseriti i soli componenti appartenenti alla sorgente (le due versioni sono già state rappresentate in Figura 3.5 e Figura 3.8).

Lo studio stavolta è stato eseguito variando la corrente riscaldante (che sarà chiamata anche I_{LINE}) nell'intervallo che rappresenta il campo di lavoro reale per la sorgente di ionizzazione, cioè tra i $280 A$ ed i $380 A$: questo intervallo viene scelto prendendo come limite inferiore la minima corrente alla quale è possibile osservare sperimentalmente

un'emissione di elettroni da parte del catodo superiore al mA , mentre il limite superiore viene scelto in base alla tenuta strutturale del Tantalio. I dati per il confronto dei due modelli sono stati sempre T_{max} , T_{av_cath} e T_{av_an} .

La Tabella 3.2 riporta i risultati per i due differenti modelli:

I_{LINE} [A]	Modello senza camera			Modello con camera		
	T_{max} [°C]	T_{av_cath} [°C]	T_{av_an} [°C]	T_{max} [°C]	T_{av_cath} [°C]	T_{av_an} [°C]
280	1869	1708	1033	1888	1724	1061
290	1925	1761	1074	1943	1776	1101
300	1981	1812	1113	1998	1826	1140
310	2036	1861	1151	2052	1875	1177
320	2090	1910	1188	2105	1923	1212
330	2142	1958	1226	2157	1970	1249
340	2194	2004	1259	2209	2016	1283
350	2245	2049	1293	2259	2061	1316
360	2296	2094	1326	2309	2105	1349
370	2346	2138	1357	2358	2149	1380
380	2395	2181	1388	2406	2191	1411

Tabella 3.2: valori di temperatura al variare della corrente riscaldante per i modelli FEM con e senza camera da vuoto. Si può apprezzare come la presenza della camera contribuisca a riflettere parte della radiazione emessa dalla sorgente così da provocare un riscaldamento dei corpi.

Il confronto può essere eseguito anche analizzando i seguenti grafici (Grafico 3. 5, Grafico 3. 6 e Grafico 3. 7) in cui sono riportati i dati contenuti nella Tabella 3.2.

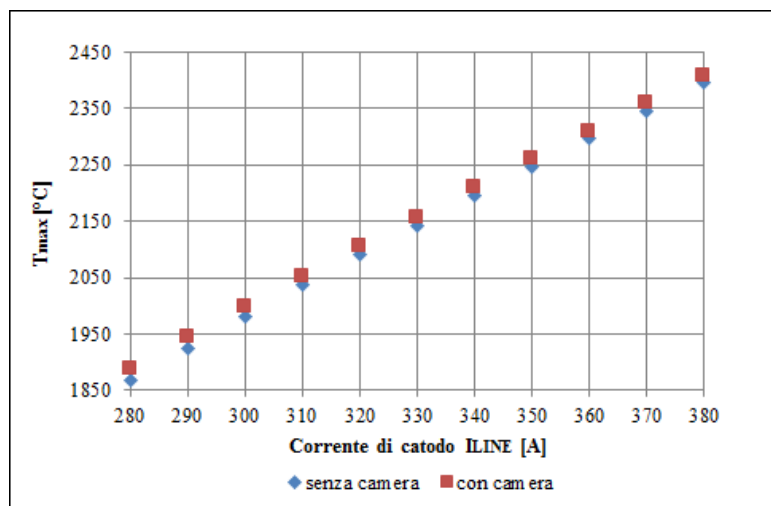


Grafico 3. 5: confronto tra le temperature massime dei modelli della sorgente al plasma con e senza camera da vuoto.

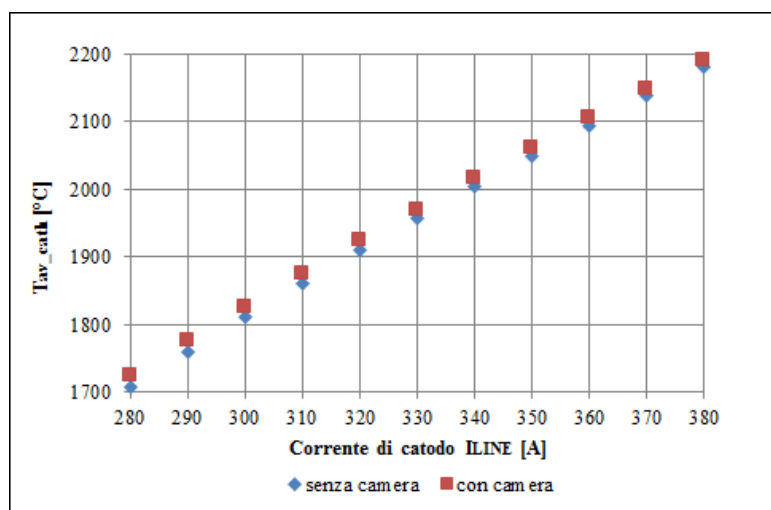


Grafico 3. 6: confronto tra le temperature medie nodali della faccia frontale del catodo dei modelli della sorgente al plasma con e senza camera da vuoto.

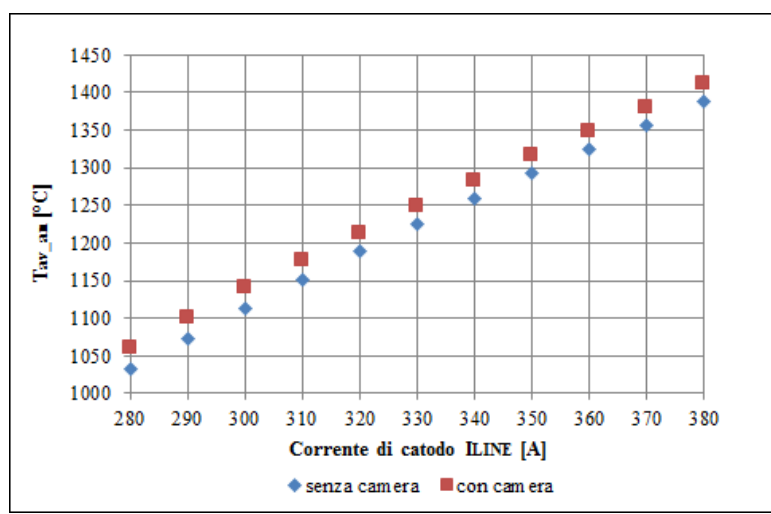


Grafico 3. 7: confronto tra le temperature medie nodali delle facce interne dell'anodo dei modelli della sorgente al plasma con e senza camera da vuoto.

Una prima osservazione è che le temperature rilevate nel modello con la camera sono in ogni caso maggiori di quelle osservate nel modello più semplificato. Ciò appare ovvio se si pensa che le pareti della camera e del canale in cui è contenuta la sorgente, che nella realtà sono realizzate in Alluminio contribuiscono a riflettere il flusso di calore radiante, rallentando la dispersione del calore e quindi il raffreddamento del pezzo. Alla luce di questo fatto, occorre capire quanto, in effetti, sia rilevante questa differenza nel modello FEM: evidenziare questo aspetto si possono riportare in una seconda tabella i valori delle differenze fra lo stesso parametro riportato nei due modelli diversi (vedi Tabella 3.3).

I_{LINE} [A]	ΔT_{max} [°C]	ΔT_{av_cath} [°C]	ΔT_{av_an} [°C]
280	19	16	28
290	18	15	27
300	17	14	26
310	16	14	26
320	16	13	24
330	15	12	23
340	14	12	24
350	13	12	24
360	13	11	23
370	12	11	24
380	12	10	23

Tabella 3.3: variazione dei valori dei parametri T_{max} , T_{av_cath} e T_{av_an} nei modelli con e senza camera da vuoto. I valori sono stati ottenuti facendo la differenza fra i dati riportati nella Tabella 3.2.

Bisogna distinguere dunque due aspetti: per quanto riguarda il catodo, la differenza fra i campi termici è minima: variazioni comprese tra i $10^{\circ}C$ ed i $20^{\circ}C$ sia per la temperatura massima sia per quella media sulla faccia frontale, su temperature nell'ordine dei $1800\div 2000^{\circ}C$ rappresentano differenze vicine all'1%. Perciò l'approssimazione è accettabile e trascurabile in fase di calcolo, poiché si può presumere che l'approssimazione dovuta alla discretizzazione propria del metodo degli elementi finiti possa anche essere superiore. Da questi risultati e da quelli ottenuti in precedenza dall'analisi parametrica è possibile affermare che il campo termico del catodo non è influenzato in modo decisivo dalle condizioni dei corpi esterni alla sorgente, e questa condizione che è stata verificata nell'analisi FEM può essere ritenuta vera anche nel caso

reale. Perciò a partire dalla corrente riscaldante si potrà ricavare con buona accuratezza la temperatura del catodo, a prescindere dalle condizioni esterne della camera.

Per quanto riguarda l'anodo, anche in questo caso le differenze di temperatura non sono molto elevate, comunque inferiori ai 30°C nell'intervallo di lavoro considerato (inteso come campo di valori assunti dalla corrente riscaldante), tuttavia la temperatura media interna all'anodo è molto minore da quelle lette per il catodo: la variazione in termini relativi (o percentuali) aumenta, anche se resta su valori accettabili attorno al $2\div 3\%$. L'anodo, essendo meno schermato da camera di scarica e camera di supporto è quindi più sensibile alle condizioni esterne.

In definitiva si può affermare che per lo studio del catodo, il modello più semplice è anche quello più indicato: senza modellare la camera da vuoto infatti si risparmia tempo di calcolo poiché si escludono dei volumi che vanno discretizzati andando ad aumentare il numero di nodi ed elementi. Ciò d'altra parte non va ad influire sui risultati per quanto riguarda la temperatura.

Se si vuole concentrarsi invece sullo studio termico dell'anodo in modo più dettagliato, sarebbe meglio affinare il modello, includendo la camera da vuoto e descrivendo in maniera più precisa le condizioni ambientali. Tuttavia, per uno studio preliminare già il modello semplificato da buoni risultati.

In conclusione si è scelto di fare riferimento al modello senza la camera, perché i vantaggi di avere simulazioni più veloci in fase di progettazione permettono di indagare l'oggetto sotto più aspetti, e ciò non va ad influenzare la qualità delle soluzioni numeriche.

3.6. Analisi di convergenza

Come già stato spiegato, la scelta del modello è stata effettuata confrontando le soluzioni di vari modelli numerici tra loro. Per eseguire questo confronto, si è adoperata una discretizzazioni delle geometrie che permettesse tempi di calcolo gestibili, e il numero di nodi ed elementi è stato mantenuto costante per ogni volume. Come già accennato nel paragrafo 3.2, la discretizzazione di un sistema continuo introduce un errore nel modello di calcolo che non può essere eliminato, ma può essere ridotto di una quantità desiderata andando a regolare la "densità" della suddivisione (ovvero la dimensione delle maglie del reticolo che viene steso sui volumi). Inoltre, usando elementi di suddivisione con dimensione sempre minore, si migliorerà anche la rappresentazione geometrica, poiché quando sostituisco ad una forma curva o con angoli molto acuti, un elemento a facce piane con dimensione dello spigolo prestabilita dovrò per forza accettare

un'approssimazione della linea o della faccia rappresentata: si capisce che con elementi più piccoli avrò una migliore descrizione del modello geometrico iniziale.

In quest'ottica è utile un'analisi di convergenza, cioè uno studio dell'effetto della dimensione degli elementi sui risultati forniti dal modello numerico: prendendo come riferimento il modello scelto come definitivo nel paragrafo precedente, si può andare ad infittire progressivamente la mesh, confrontando di volta in volta i risultati, per verificare se ciò ha o meno effetto sulla soluzione. Se, ad esempio, il campo di temperatura del catodo varia in maniera evidente, significa che dovrò andare ad adottare dimensioni di elemento minori se voglio che la soluzione approssimi in modo più preciso la realtà.

In Ansys® è possibile controllare la densità della suddivisione attraverso il comando *ESIZE* che permette di controllare o la dimensione degli spigoli di ogni elemento creato oppure il numero di suddivisioni che si vogliono implementare sulle linee di confine di una regione [1].

Partendo da dimensioni di elemento iniziali, che consentissero di risolvere l'analisi in un tempo accettabile, si è proceduto ad infittire via via la discretizzazione per osservare gli effetti che questa operazione provoca sulla soluzione. I carichi imposti al modello sono stati:

- Temperatura della faccia della flangia di supporto a contatto con la camera e della base della connessione elettrica vincolata a $50^{\circ}C$, come era stato spiegato nel corso dell'analisi parametrica;
- Potenziale dei nodi della superficie della flangia di supporto a contatto con la camera vincolato a $0 V$, anche se in realtà è già stato spiegato che la terra è rappresentata dal telaio su cui si appoggia la camera;
- Corrente entrante nella connessione elettrica imposta a $350 A$, questo valore viene scelto perché dall'esperienza acquisita nei laboratori si è osservato che è un buon punto di lavoro, vicino a cui si trova il massimo della corrente elettronica emessa dal catodo. Tuttavia questa scelta non influenza lo studio successivo, perciò può essere scelto un altro valore di corrente purché sia all'interno del campo di lavoro fissato.

Per confrontare i vari risultati i dati scelti sono stati gli stessi dell'analisi parametrica, ovvero T_{max} , T_{av_cath} e T_{av_an} , oltre all'andamento della temperatura lungo il raggio sulla faccia frontale del catodo. I dati sono riportati in Tabella 3.4, e sono di seguito rappresentati graficamente. La variabile i rappresenta il grado di infittimento della mesh che è stato implementato: partendo dalle dimensioni di elemento iniziali ($i = 1$) si è ridotta la dimensione degli elementi di ogni volume di un fattore di riduzione f pari a 0.95 , ciò

significa che gli elementi della simulazione con $i = 2$ hanno dimensione pari al 95% di quelli della simulazione con $i = 1$, e così via fino alla fine, in altre parole si ha che:

$$ESIZE_i = ESIZE_1 * f^{i-1}. \quad (3.13)$$

La dimensione dell'elemento per i vari volumi per $i = 1$ è riportata in Tabella 3.5, mentre un esempio dell'infittimento della suddivisione degli elementi del catodo si può osservare nella Figura 3.10.

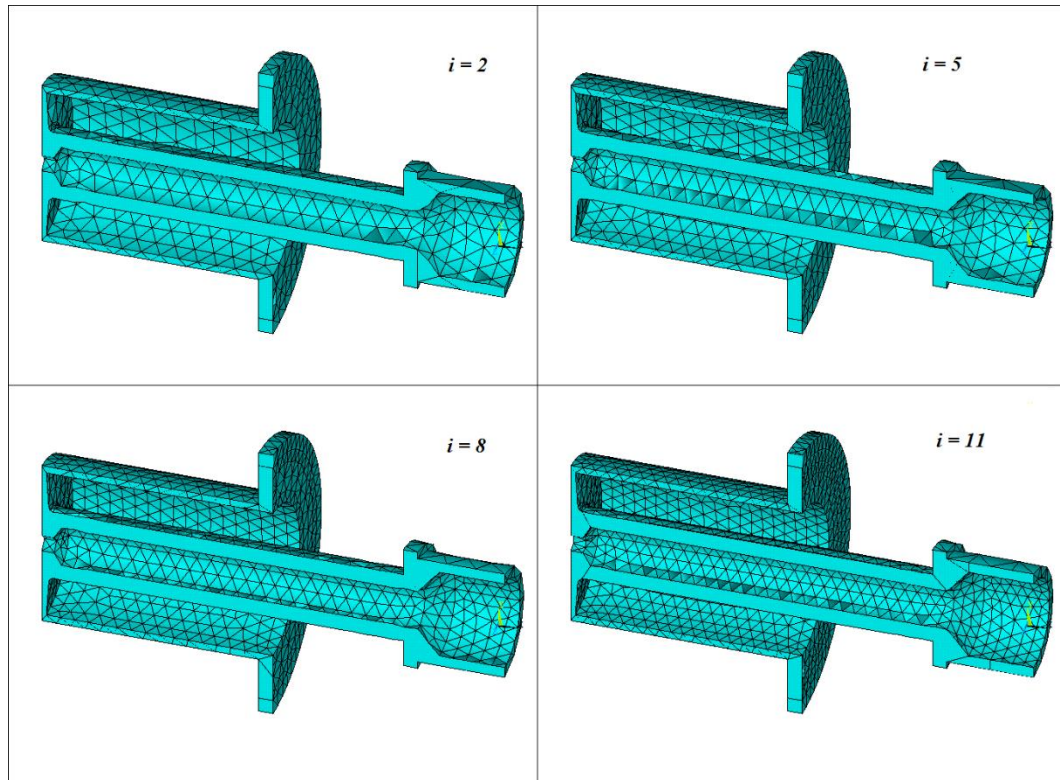


Figura 3.10: esempio dell'infittimento della mesh per gli elementi del catodo. La *ESIZE* per ogni elemento è calcolabile a partire dalla Tabella 3.5, moltiplicando la *ESIZE* della prima prova per il fattore di riduzione $f = 0.95$ tante volte quanto indicato dalla variabile i del caso in esame.

Nei grafici successivi (Grafico 3.8, Grafico 3.9, Grafico 3.10) sono diagrammati i valori riportati nella Tabella 3.4, in cui è possibile osservare l'andamento dei parametri in esame rispetto al progressivo infittimento della suddivisione nel modello FEM.

<i>N° Prova</i>	<i>T_{max}</i> [°C]	<i>T_{av_cath}</i> [°C]	<i>T_{av_an}</i> [°C]	<i>N° elementi</i> <i>anodo + catodo</i>
1	2245.49	2049.45	1292.59	11542
2	2246.76	2051.01	1284.61	12088
3	2249.26	2044.68	1283.15	13138
4	2251.46	2057.13	1282.32	14024
5	2252.49	2056.85	1282.61	15710
6	2252.48	2058.38	1283.83	17053
7	2252.26	2049.63	1282.67	18533
8	2253.33	2048.47	1301.21	20686
9	2253.86	2050.84	1301.14	22428
10	2255.21	2049.85	1301.21	24350
11	2255.31	2052.82	1301.84	26492

Tabella 3.4: valori di temperatura numero di elementi usati per anodo e catodo per le prove dell'analisi di convergenza. Il calcolo diventa più preciso al crescere di *N° Prova*.

<i>Nome componente</i>	<i>ESIZE [m]</i>
Anodo	0.0013
Camera di supporto	0.0058
Flangia di supporto	0.0058
Isolatori di supporto dell'anodo	0.0018
Griglia	0.0017
Connessione elettrica	0.0060
Linea di trasferimento	0.0032
Vite di chiusura della linea	0.0020
Catodo	0.0014
Ghiera di sostegno del catodo	0.0032
Camera di scarica	0.0030
Scudi termici	0.0018
Flangia finale	0.0033
Flangia di scarico dell'anodo	0.0016

Tabella 3.5: valori della dimensione di elemento *ESIZE* per i volumi che rappresentano i componenti della sorgente di ionizzazione per la simulazione con la mesh più rada, ovvero $i = 1$. Siccome in Ansys® non è possibile definire l'unità di misura, i valori vengono dati in unità relative al sistema internazionale, ovvero metri.

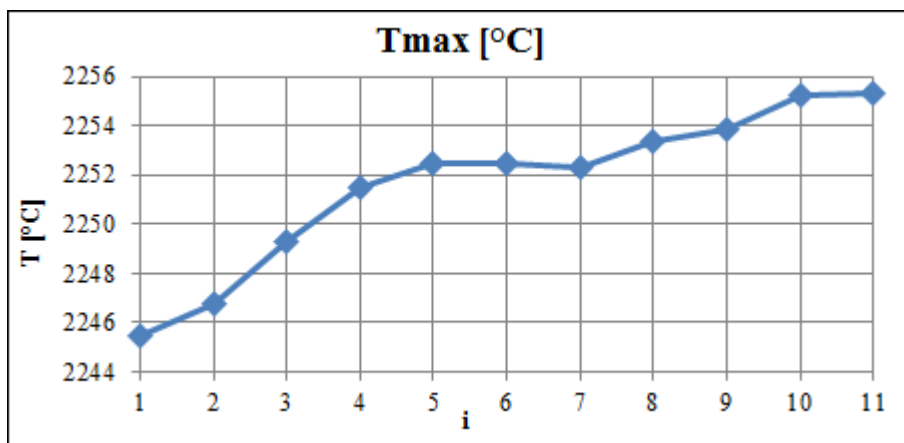


Grafico 3.8: andamento della temperatura massima dei modelli per l'analisi di convergenza. L'asse delle ascisse rappresenta il grado di infittimento, la ESIZE si può calcolare dall'equazione 3.13 e dalla Tabella 3.5. I dati sono quelli riportati nella Tabella 3.4.

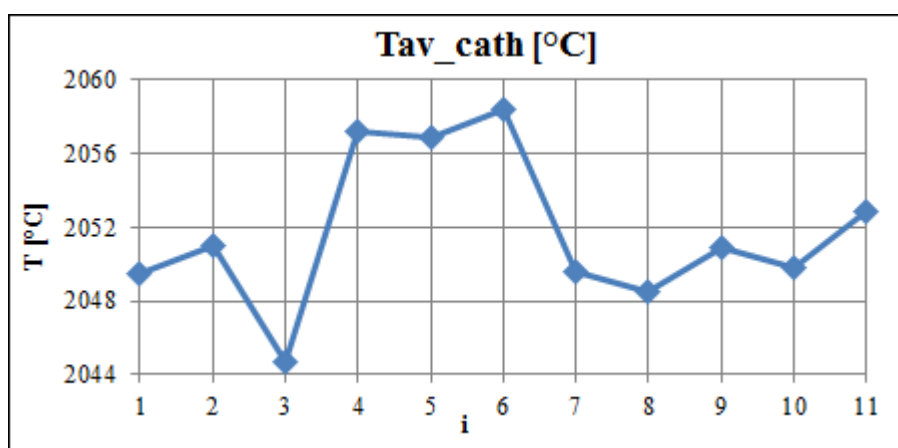


Grafico 3.9: andamento della temperatura media nodale sulla faccia frontale del catodo dei modelli per l'analisi di convergenza. I dati sono quelli riportati nella Tabella 3.4.

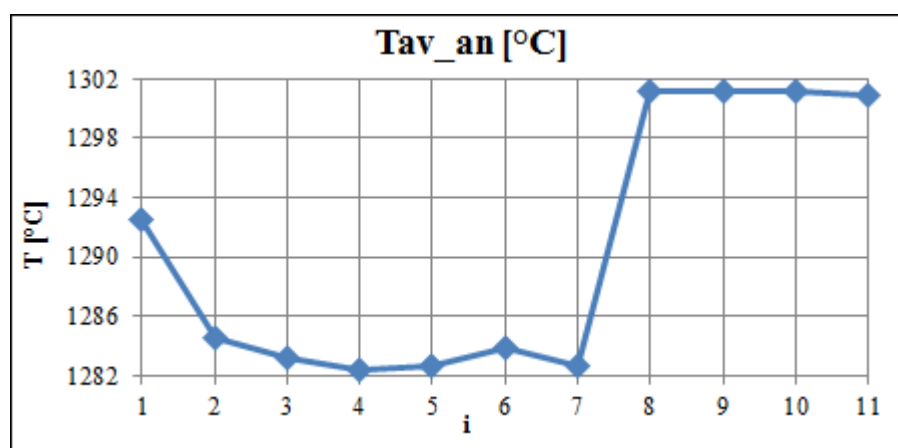


Grafico 3.10: andamento della temperatura media nodale delle facce interne dell'anodo dei modelli per l'analisi di convergenza. L'asse delle ascisse rappresenta il grado di infittimento. I dati sono quelli riportati nella Tabella 3.4.

In questa analisi solo l'andamento della T_{max} è abbastanza regolare, e continua a crescere mano a mano che si adottano dimensioni di elemento più piccole. Una prima osservazione è che la variazione delle temperature durante l'analisi ha all'incirca lo stesso ordine di grandezza di quelle rilevate durante l'analisi parametrica: ciò rafforza l'affermazione già fatta in precedenza che la discretizzazione assume nel modello un ruolo fondamentale per la qualità della soluzione, che ha lo stesso effetto delle condizioni al contorno.

Dai grafici si nota che T_{av_an} sembra raggiungere un valore stabile per $i = 8$, mentre per T_{max} pare ci sia un appiattimento della curva per $i = 10$. L'andamento di T_{av_cath} è il più irregolare e sembra che la tendenza sia crescere anche per $i > 11$. Il raggiungimento di una soluzione stabile dovuta alla dimensione degli elementi in questo tipo di analisi è complicato dal fatto che la soluzione del flusso termico radiante è di tipo non lineare: per risolvere questi problemi si imposta l'ambiente di soluzione perché esegua un'analisi transitoria di durata T , in cui i carichi termici vengono imposti con una funzione a gradino al tempo $\tau = 0$ s. Ciò porta a problemi di convergenza del modello numerico e i dati letti dipendono anche dal tempo τ a cui vengono letti i risultati e dalla convergenza dei metodi numerici usati per risolvere i singoli sotto-passi (*SUBSTEP*) in cui è scomposta l'analisi: si pensa sia questo il motivo per cui gli andamenti dei parametri riportati sopra non sono del tutto regolari. Tuttavia si può osservare che le oscillazioni nei valori della temperatura che si rilevano via via che si affina il reticolo di suddivisione sono al massimo nell'ordine di qualche punto percentuale, e per quanto riguarda il catodo non raggiungono l'1% per quanto riguarda il campo termico del catodo. Non si è andati oltre $i = 11$ poiché i tempi di risoluzione del modello diventano troppo elevati per i mezzi di calcolo a nostra disposizione durante la tesi, ma dall'osservazione fatta in precedenza si capisce che le variazioni sono del tutto trascurabili e che la ESIZE per $i = 1$ permette di calcolare dei risultati già ottimi, perciò non avrebbe senso andare ad appesantire il modello infittendo ulteriormente il reticolo.

Nelle analisi seguenti perciò, i modelli saranno risolti con una suddivisione che adotta i valori contenuti nella Tabella 3.5, o vicini a questi in caso si siano riscontrati problemi legati alla geometria durante la discretizzazione.

3.7. Calcolo della corrente elettronica

L'importanza dell'analisi FEM per lo studio del campo termico del catodo riveste un'importanza cruciale nella comprensione del funzionamento e della caratterizzazione

della sorgente tipo FEBIAD. Oltre infatti a fornire uno strumento che indichi a quale corrente riscaldante sia possibile lavorare per evitare che l'oggetto subisca stress termici eccessivi e mantenga la sua integrità strutturale per tutta la vita della sorgente, può essere sfruttato anche per la comprensione del comportamento fisico dell'oggetto, in particolare per quanto riguarda la corrente elettronica emessa dal catodo e accelerata verso l'anodo.

La correlazione fra analisi termica ed analisi del comportamento elettronico del catodo era stato descritto nel Capitolo 2 con la legge di Richardson, in cui si esprimeva la densità di corrente j_{es} che un elettrodo metallico è in grado di emettere da una sua superficie piana scaldata alla temperatura T . Nel nostro caso, la superficie di interesse è quella frontale disposta davanti alla griglia di anodo, poiché è da questa che, attraverso l'effetto termoionico, partono gli elettroni che saranno poi accelerati per ionizzare gli atomi di gas. Attraverso il modello a elementi finiti, per un dato valore della corrente riscaldante siamo dunque in grado di esprimere il campo termico della faccia frontale del catodo; quindi attraverso la formula di Richardson ricavare in ogni punto della superficie la densità di corrente emessa. Integrando j_{es} su tutta l'area si può quindi ricavare il numero esatto di elettroni emessi nella quantità di tempo dal catodo verso l'anodo, o più semplicemente l'intensità dal fascio elettronico. Come già approfondimento, la ionizzazione per bombardamento di elettroni è più efficace maggiore è il numero di elettroni che vengono accelerati, poiché c'è più probabilità che un atomo di gas venga colpito: per questo motivo poter dare una stima della corrente elettronica equivale a definire l'efficienza della sorgente.

Quindi, dai risultati delle simulazioni del modello definitivo si può creare un diagramma che esprima la temperatura del catodo in funzione della corrente riscaldante I_{LINE} . Visto che la temperatura del catodo non è uniforme su tutto il corpo, si può identificare il campo termico con uno dei parametri già usati nell'analisi parametri e di convergenza, ovvero T_{max} e T_{av_cath} , oppure se ne possono usare altri: una possibile scelta è la temperatura massima sulla faccia frontale del catodo, oppure l'andamento della temperatura sulla stessa superficie rispetto al raggio. Nei grafici riportati qui sotto (Grafico 3.11, Grafico 3.12) sono riportati gli andamenti ricavati dal modello FEM.

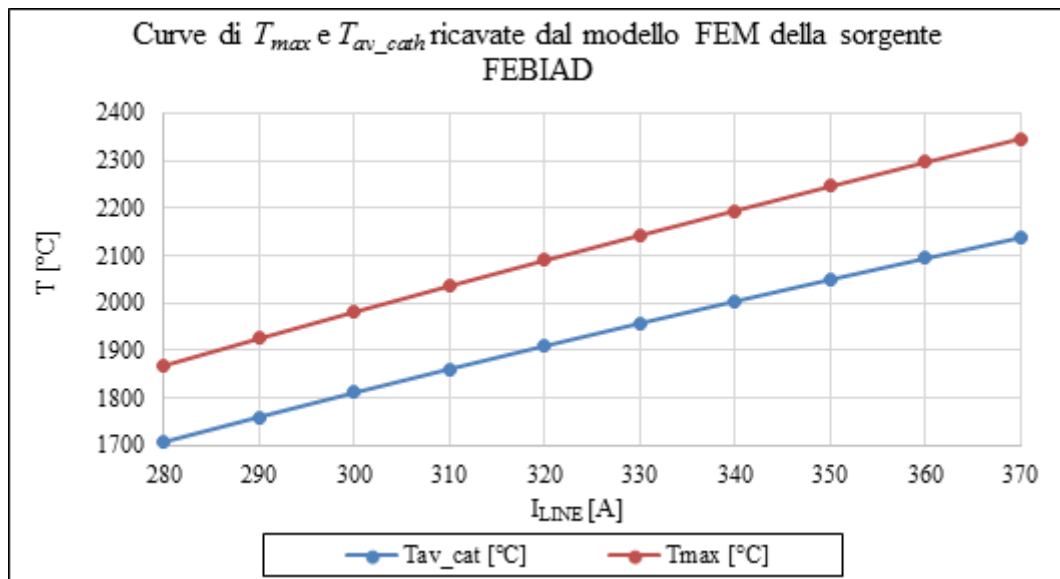


Grafico 3.11: curve che descrivono il campo termico del catodo al variare della corrente riscaldante: per ogni valore di I_{LINE} sarà possibile quindi ricavare la temperatura della faccia del catodo.

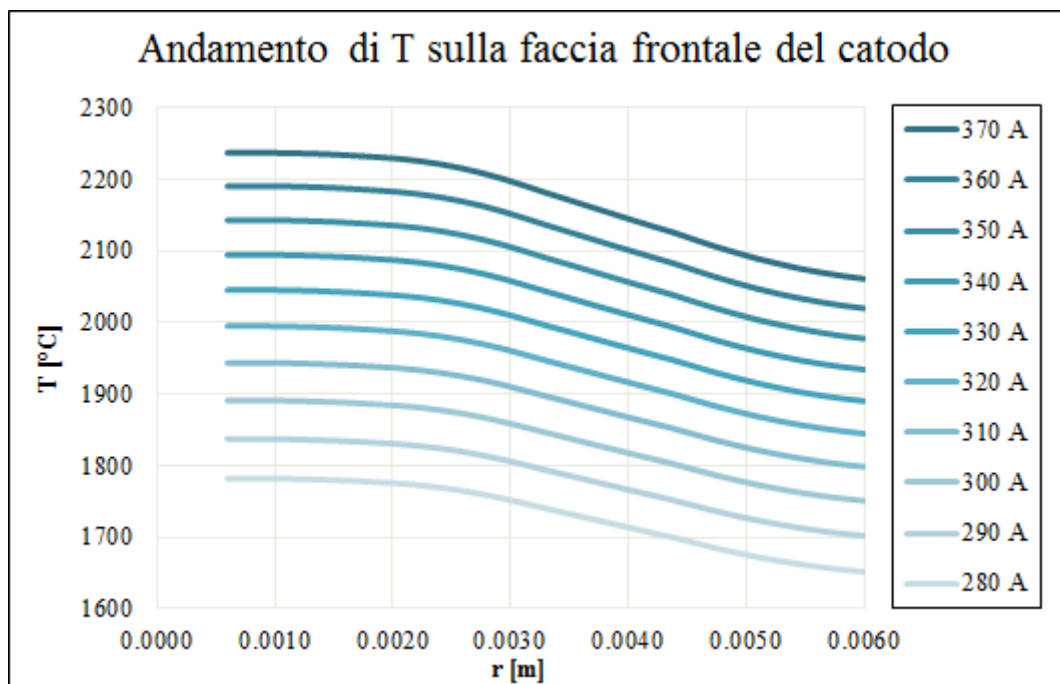


Grafico 3.12: rappresentazione dell'andamento della temperatura lungo il raggio della faccia frontale del catodo al variare della corrente riscaldante. La legenda indica il valore di I_{LINE} in ampere.

In particolare, grazie ai valori riportati nel Grafico 3.12 è possibile ricavare in modo preciso la corrente emessa per effetto termoionico ($I_{el-Rich}$) dalla faccia frontale del catodo integrando la legge di Richardson su tutta l'area. Si avrà dunque:

$$I_{el-Rich} = \int_0^A j_{eS} dA = \int_{r_i}^{r_e} 2\pi r j_{eS} dr; \quad (3.14)$$

dove si è considerato di suddividere l'area in anelli di spessore infinitesimo dr e di raggio interno r e j_{eS} era stata definita nell'equazione 2.4, e viene qui richiamata:

$$j_{eS} = AbT^2 \exp\left(-\frac{e\Phi}{kT}\right) A/cm^2. \quad (2.4)$$

La temperatura da inserire nell'equazione è quella locale della zona con raggio r dall'asse del catodo, le altre costanti sono ricavabili dalle tabelle nel Capitolo 2, in particolare per il Tantalio si avrà $\Phi = 4.12 V$, $A*b = 60 Acm^{-2}K^{-2}$, k ed e sono la costante di Boltzmann e la carica di un singolo elettrone che valgono $k = 1.38*10^{-23} JK^{-1}$, $e = 1.602*10^{-19} C$.

Attraverso il codice numerico non si può ricavare l'andamento analitico della temperatura lungo il raggio, ma dalla soluzione si può scrivere l'andamento della temperatura lungo un percorso rettilineo (funzione "PATH" di Ansys®). Perciò indicando come punto iniziale il centro della faccia frontale del catodo e muovendosi in senso radiale fino al bordo esterno, è possibile, per un numero di suddivisioni scelto durante la stesura del codice APDL, ottenere l'andamento desiderato. Quindi si può calcolare numericamente l'integrale, assumendo che il campo di temperatura abbia simmetria assiale sulla faccia considerata e che la temperatura sia costante su ogni anello spesso dr . In realtà, dr non sarà più infinitesimo, ma sarà scelto in base al numero di suddivisioni che si decidono di adottare: ad esempio, nel nostro caso, è stato di rilevare la temperatura dal punto del bordo interno della faccia ($r_{int} = 0.6 mm$) al punto del bordo esterno ($r_{est} = 6.0 mm$), per un totale di 30 punti, perciò si avrà che $\Delta r = (r_e - r_i)/30 = 0.18 mm$ (Δr si differenzia da dr in quanto è una differenza finita e non un differenziale infinitesimo). Perciò la nuova espressione della corrente sarà:

$$I_{el-Rich} = \sum_{i=1}^{n-1} 2\pi r_i \Delta r j_{eS,i}; \quad (3.15)$$

dove n è il numero di suddivisioni impostate, r_i è il raggio a cui viene rilevata la temperatura, $j_{eS,i}$ è la densità di corrente alla temperatura rilevata in r_i . Il motivo per cui la sommatoria si ferma a $n-1$ è che se considerassi anche r_n , che corrisponde al raggio esterno, starei considerando un anello fuori dall'area della faccia che sto esaminando, per cui avrei una sovrastima della corrente.

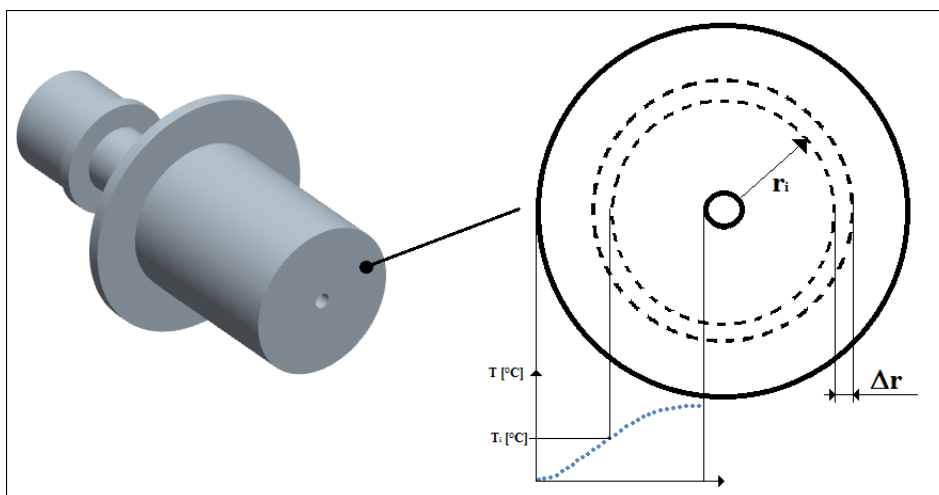


Figura 3.11: rappresentazione che spiega in che modo si è eseguito numericamente l'integrale per il calcolo della corrente elettronica emessa del catodo, calcolando la T_i al raggio r_i sull'andamento radiale della temperatura sulla faccia frontale (curva blu), e moltiplicando il valore così ottenuto di $j_{eS,i}$ per l'area di spessore Δr .

Se non volessi eseguire l'integrale, potrei eseguire comunque un'approssimazione considerando nella legge di Richardson la temperatura media nodale sulla faccia frontale del catodo (T_{av_cath}), e quindi calcolare la corrente elettronica moltiplicando la densità di corrente così calcolata per l'area totale della superficie.

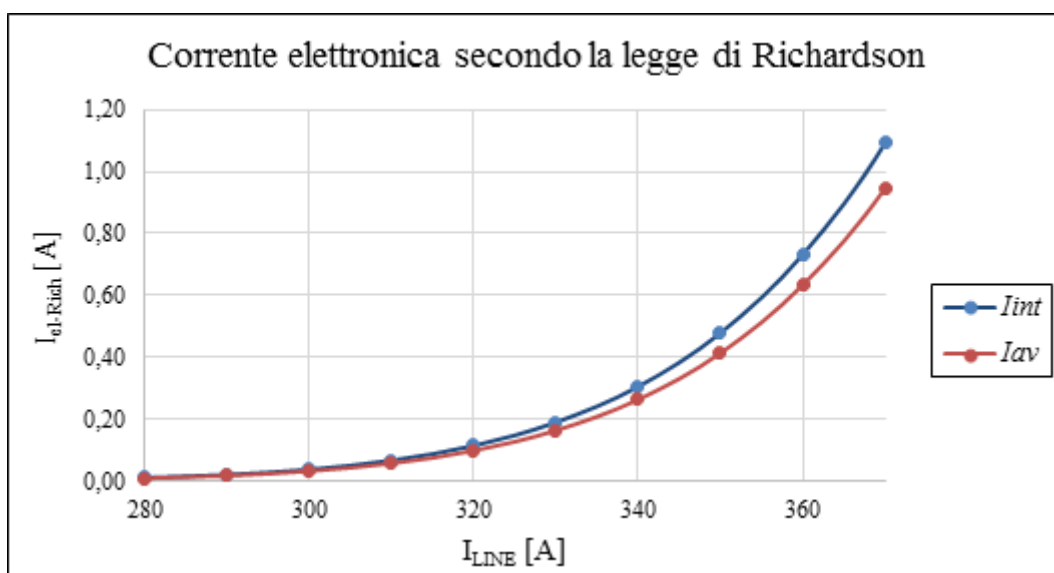


Grafico 3.13: andamento della corrente prodotta per effetto termoionico dalla faccia frontale del catodo calcolato dalle temperature ottenute attraverso il codice a elementi finiti per diversi valori della corrente riscaldante. In particolare la curva I_{int} (in blu) è ottenuta eseguendo l'integrazione numerica delle distribuzioni di temperatura lungo il raggio della superficie descritti nel Grafico 3.12, mentre I_{av} (in rosso) è ottenuta moltiplicando j_{eS} ricavata dalla temperatura media con l'area della faccia frontale.

L'andamento reale della corrente di elettroni che è possibile accelerare verso l'anodo non è però determinato dalla sola formula di Richardson, come descritto in dettaglio nel Capitolo 2, ha un limite superiore calcolabile attraverso la legge di Child-Langmuir: in pratica, l'andamento della corrente elettronica avrà un asintoto orizzontale il cui valore si può determinare dall'equazione 2.5, che viene qui riportata:

$$J = \chi \frac{V_a^{3/2}}{a^2}, \quad (2.5)$$

dove a rappresenta, in questo caso, la distanza tra la faccia frontale del catodo e la griglia (vedi Figura 3.12), mentre V_a è la differenza di potenziale fra i due elettrodi, che in genere viene mantenuta a 150 V; la costante per una corrente di elettroni vale $\chi = 2.334 \cdot 10^{-6} \text{ A/V}^{3/2}$, già definita nel Capitolo 2.

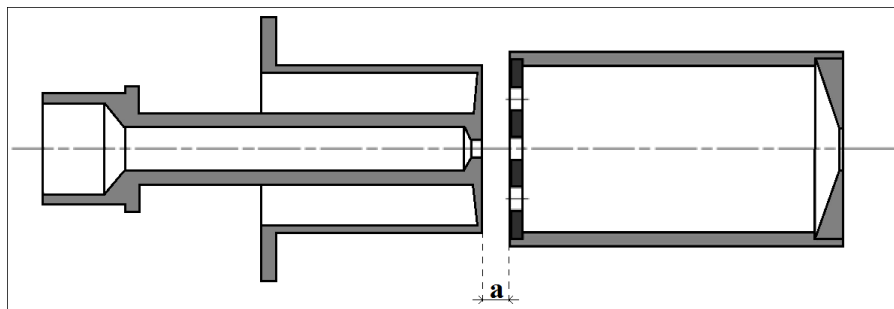


Figura 3.12: rappresentazione della distanza anodo – catodo che influenza il passaggio di elettroni secondo la legge di Child-Langmuir.

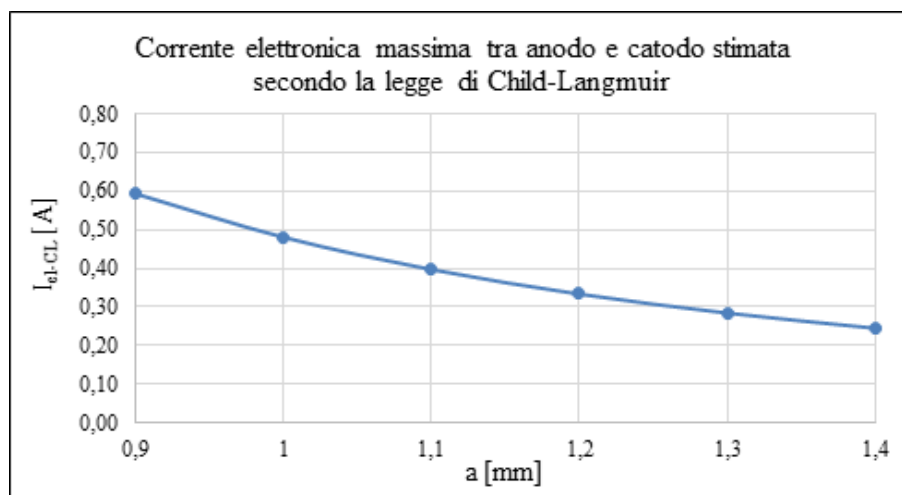


Grafico 3.14: diagramma che rappresenta la corrente elettronica massima trasferibile dal catodo all'anodo I_{et-CL} calcolata con la legge di Child-Langmuir al variare della distanza a tra anodo e catodo.

L'andamento reale della corrente elettronica perciò sarà calcolabile a partire dai due andamenti di Richardson e di Child-Langmuir: se per il primo era possibile sfruttare il codice FEM per ricavare l'emissione di elettroni del materiale a partire dalla temperatura,

il secondo dipende principalmente dalla geometria dell'oggetto (se si considera la differenza di potenziale costante); a viene regolata in fase di montaggio. Nell'Appendice B sarà spiegato in dettaglio come sia possibile controllare e misurare la distanza a mentre si esegue il montaggio della camera di anodo all'interno della camera di scarica. I valori della distanza anodo-catodo accettabili per un buon funzionamento della sorgente sono compresi tra 0.9 mm e 1.4 mm ; il valore ottimo non è determinato in modo univoco, ma ogni laboratorio o impianto di produzione di ioni radioattivi che fa uso di sorgenti FEBIAD ha, nel corso degli anni e con numerose esperienze, determinato un valore ottimale che può essere tra 1 mm e 1.2 mm : questi valori sono il frutto di un compromesso tra la necessità di avvicinare il più possibile i due elettrodi per avere un limite superiore che non sia limitativo per la corrente (Child-Langmuir) e il dover assolutamente impedire che anodo e catodo vengano a contatto, avvenimento possibile nel caso di configurazione bersaglio montato assieme alla sorgente di ionizzazione poiché la lunghezza della linea di trasferimento, unita alle alte temperature, porta a dilatazioni termiche elevate che spingono sulla faccia frontale del catodo causando uno spostamento in senso assiale dell'oggetto (vedi Figura 3.13). Il contatto fra i due componenti provoca un cortocircuito che impedisce il funzionamento e può rovinare la griglia, portando così a dei guasti che interrompono la vita della sorgente prematuramente.

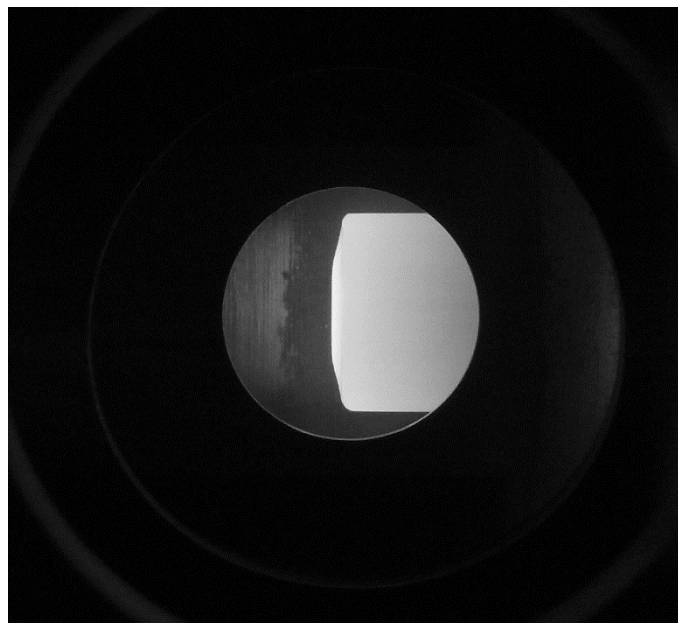


Figura 3.13: immagine del catodo deformato in senso assiale osservata durante una prova sperimentale.

In definitiva, attraverso la conoscenza delle leggi che regolano il funzionamento della sorgente FEBIAD e con il codice di calcolo a elementi finiti, è possibile ottenere, tramite

lo sviluppo e l'implementazione di un modello virtuale, una stima della corrente elettronica che viene accelerata verso la griglia di anodo. Come già accennato, la I_{el} sarà il parametro che più di ogni altro sarà collegato all'efficienza della sorgente: durante il Capitolo 5 saranno esaminate le prove di efficienza eseguite sulla sorgente al plasma e si potrà eseguire il confronto fra i dati ottenuti sperimentalmente e quelli ricavati numericamente.

Di seguito vengono riportati gli andamenti della corrente elettronica I_{el} che va dal catodo all'anodo ottenuti dal campo di temperatura calcolato col codice FEM per la formula di Richardson, e ipotizzando un valore di $a = 1.2 \text{ mm}$ per quanto riguarda la Child-Langmuir, ricavati per i valori della corrente riscaldante che sono già stati indicati come campo di lavoro, cioè da 280 A fino a 370 A (in precedenza era stato adottato come valore limite 380 A , ma durante le prove sperimentali si è ritenuto più prudente per il mantenimento dell'integrità del catodo fermarsi a 370 A) (vedi Grafico 3.15).

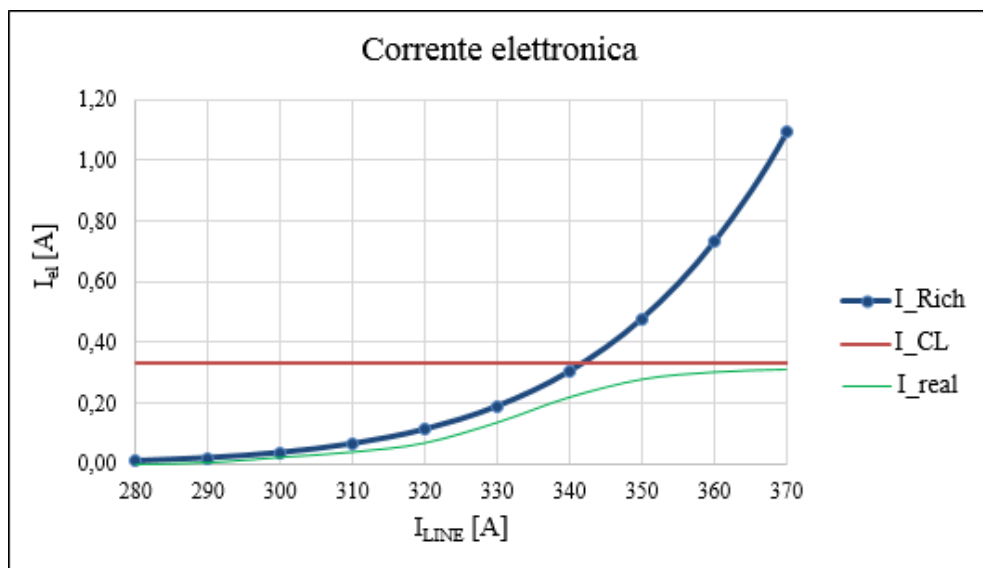


Grafico 3.15: andamento della corrente elettronica calcolato considerando il campo di temperatura ricavato dal modello FEM e una distanza a anodo-catodo di 1.2 mm . La curva blu rappresenta la formula di Richardson (integrazione numerica) mentre quella rossa la formula di Child-Langmuir; la linea verde I_{real} è un esempio di quale andamento assume la corrente reale.

L'andamento reale (di cui un esempio è mostrato nel Grafico 3.15) non sarà rappresentato dagli spezzoni delle due curve, ma sarà approssimato dalla legge di Richardson per correnti riscaldanti per cui $I_{RICH} < I_{CL}$, mentre tenderà a I_{CL} per il successivo intervallo. Si nota che nel caso descritto rappresentato nel Grafico 3.15 si ha una saturazione della corrente elettronica per correnti riscaldanti ai $350\div 360 \text{ A}$; non

avrebbe perciò senso operare a temperature maggiori poiché non si otterrebbero miglioramenti del comportamento ma si abbasserebbe invece la durata dell'oggetto.

3.8. Introduzione all'analisi strutturale accoppiata all'analisi elettro-termica

I modelli FEM esaminati finora sono stati tutti impostati per risolvere problemi accoppiando i campi elettrico e termico. Ansys® permette, attraverso l'elemento *SOLID226*, di gestire anche le proprietà meccaniche del materiale, con la possibilità quindi di avere una stima degli sforzi e delle deformazioni in gioco, naturalmente dopo avere attivato le opzioni opportune.

Si capisce però che si introduce una notevole complicazione nel modello numerico: il campo di temperatura degli oggetti infatti (circa 2000°C per il catodo) fa capire che considerare il solo campo lineare elastico, specialmente per il Tantalio, porta a risultati molto approssimati poiché in realtà si è anche in presenza di deformazioni di tipo plastico.

Quindi oltre ad accoppiare un altro campo fisico con proprietà che dipendono dalla temperatura, si introduce un'ulteriore non linearità, cioè quella della curva sforzo-deformazione reale del materiale, che va ad aggiungersi a quella del flusso termico radiativo. Inoltre nasce anche un problema legato alla discretizzazione dell'oggetto: nel caso strutturale le difficoltà di gestione della discretizzazione sono accentuate: infatti oltre ad avere la necessità di approssimare le geometrie in gioco in maniera corretta e riuscire a raggiungere un buon grado di approssimazione della soluzione, in questo caso se si utilizza un reticolo troppo rado durante il calcolo iterativo degli sforzi e delle deformazioni elastiche e plastiche sul materiale, se le tensioni superano il valore massimo consentito dalle curve σ - ϵ vere del materiale si ha che il solutore si blocca e la soluzione diverge. Nelle zone più sollecitate occorre perciò usare elementi molto piccoli, può essere necessario un raffinamento della mesh.

Oltre alla semplice analisi accoppiata, dove il reticolo degli elementi è unico per tutti i campi fisici, Ansys® consente anche l'utilizzo di un altro strumento cioè il "Multi-Field Solver", che consente di risolvere iterativamente il problema relativo ad un singolo campo e di introdurre le soluzioni su tutto il volume del corpo (ottenuto grazie alla funzione di forma dell'elemento) come condizioni iniziale per il calcolo del campo fisico successivo. Questo strumento, seppure molto potente, richiede competenze maggiori rispetto all'interfaccia Mechanical APDL usata per i modelli descritti nel corso del capitolo, e non è stato usato nel corso di questa tesi, anche se ne viene fatto riferimento qualora eventualmente si volesse approfondire l'analisi già svolta.

Per evitare di avere simulazioni troppo lunghe dovute alle non linearità presenti, nel caso dell'analisi strutturale è stata introdotta un'ulteriore approssimazione: partendo dall'analisi elettro-termica, il campo di temperatura ottenuto è stato usato come condizione iniziale per l'analisi strutturale, in modo da disaccoppiare i campi fisici ed avere così due modelli separati che consentano tempi di calcolo più agevoli.

Per provare questa procedura è stato costruito un modello preliminare considerando soltanto la linea di trasferimento ed il catodo: in particolare ciò che più interessa stimare è la deformazione della faccia frontale in senso assiale: è stato realizzato un modello di prova assegnando a tutti i corpi una temperatura costante di 2200°C e vincolando i corpi in modo da bloccare le traslazioni della base della linea di trasferimento e del bordo della flangia del catodo a contatto con la linea di trasferimento (vedi Figura 3.14).

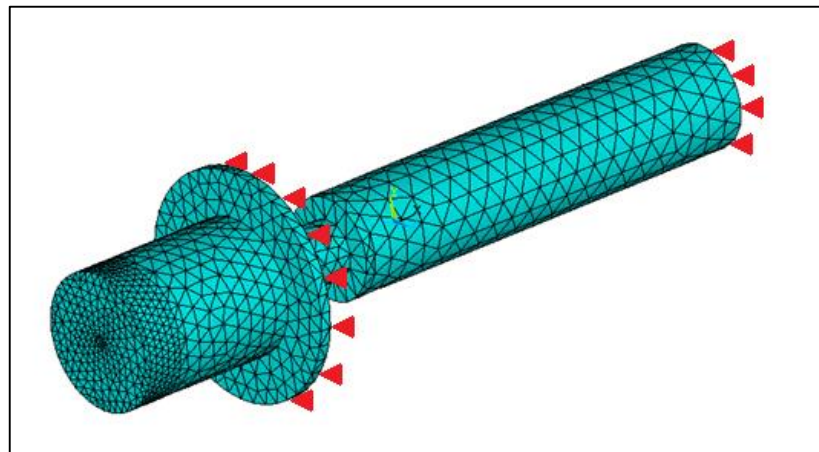


Figura 3.14: rappresentazione del modello strutturale di catodo e linea di trasferimento. I triangoli rossi sono le zone vincolate a non muoversi in senso assiale. Si nota che per fare in modo che la soluzione converga la mesh è stata infittita nella zona dove le tensioni sono massime, cioè sulla faccia frontale del catodo.

È chiaro che i dati ricavati da questo modello di prova sovrastimeranno la deformazione reale per il campo termico maggiore di quello reale e per la presenza di vincoli rigidi al posto di sostegni deformabili, tuttavia confrontare l'ordine di grandezza con le deformazioni misurate sui catodi usati in precedenza per le prove sperimentali consente di capire se la modellazione dell'oggetto, ottenuta considerando il materiale (Tantalio) in campo elasto-plastico e trascurando i fenomeni dipendenti dal tempo come lo scorrimento viscoso (*creep*), consente una buona approssimazione dei valori delle deformazioni reali del catodo.

La Figura 3.15 mostra la soluzione ottenuta dal modello, in particolare lo spostamento dei nodi in direzione assiale.

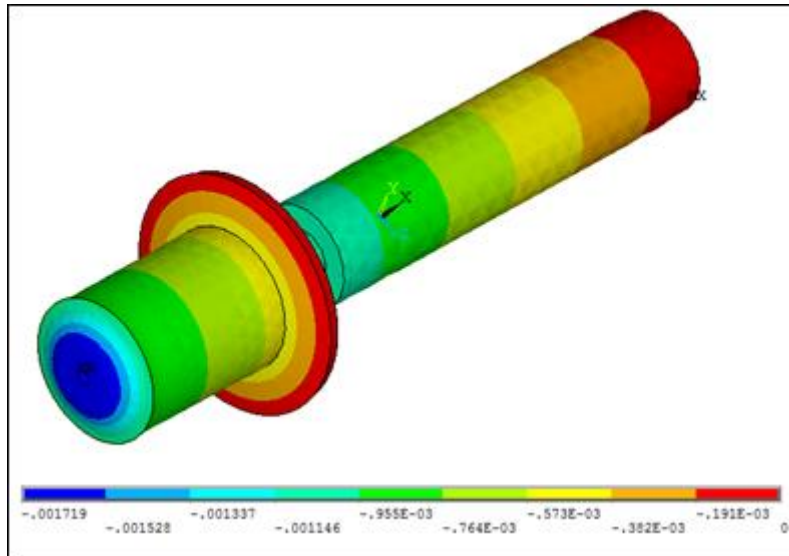


Figura 3.15: rappresentazione della soluzione del modello FEM strutturale di catodo e linea di trasferimento. Sono visualizzati sul modello gli spostamenti nodali rispetto alla direzione assiale (asse x nel sistema di riferimento del codice di calcolo).

Si nota che, a fronte di deformazioni reali misurate dell'ordine del millimetro, il modello da una deformazione di 1.7 mm nel centro della faccia. Considerando che il campo di temperatura assegnato è molto più elevato di quello reale calcolato col FEM (in particolare la linea di trasferimento si trova a temperature inferiori a quelle del catodo), si può dire che il codice consente un calcolo delle deformazioni di un oggetto di materiale plastico con una buona confidenza.

L'assialsimmetria dei corpi considerati permette la modellazione dell'oggetto anche con elementi piani; naturalmente è un'approssimazione perché in realtà il sistema sorgente più linea di trasporto della corrente non è completamente a simmetria assiale, ma la situazione reale resta comunque molto vicina a quella ideale.

Nel Capitolo 4, per poter confrontare i risultati del modello numerico con i dati ricavati sperimentalmente, sarà descritto in dettaglio il modello FEM strutturale del catodo per il calcolo della deformazione della faccia frontale: occorre sottolineare ancora una volta come questa superficie influenzi in modo significativo la corrente elettronica e quindi l'efficienza della sorgente, e come debba essere controllata per garantire il funzionamento del sistema.

3.9. Conclusioni

In questo capitolo è stato introdotto il metodo degli elementi finiti per la modellazione della sorgente di ionizzazione al plasma. Dopo aver scelto quali semplificazioni adottare

per avere un modello gestibile in termini di memoria occupata e di tempo di risoluzione, si sono dovute studiare in dettaglio le condizioni al contorno ed i carichi da adottare, oltre a verificare che la discretizzazione implementata consentisse al codice di calcolo di fornire soluzioni precise.

Il risultato del calcolo del campo termico dei componenti della sorgente ed in particolar modo del catodo consente, attraverso la conoscenza delle leggi che regolano i fenomeni fisici in gioco, di poter calcolare il flusso di elettroni che viene inviato alla camera di anodo per ottenere la ionizzazione delle particelle di gas al suo interno e quindi la formazione del plasma.

Il calcolo di tale grandezza permette quindi di prevedere il comportamento della sorgente: con Ansys® quindi, è possibile controllare il funzionamento della sorgente FEBIAD sotto vari aspetti che influenzano il comportamento.

Per poter dare però una previsione precisa delle grandezze che si calcolano col programma FEM, occorre dare una verifica sperimentale del codice, perciò nel prossimo capitolo sarà descritto lo sviluppo di un banco-prove per la verifica del campo termico del catodo.

Per quanto riguarda l'analisi in campo strutturale, si sono introdotti i metodi in cui è possibile dare una stima delle deformazioni degli oggetti, e nel capitolo successivo verrà mostrato il sistema sperimentale per rilevare le deformazioni, che saranno confrontate con quelle ottenute dal modello FEM più dettagliato, che sarà sviluppato a partire dal sistema montato sul banco-prove.

Bibliografia

- [1]. Ansys® 13.0 *Online Help*, 2010.
- [2]. M. Manzolaro, Study, *Design and Test of the Target – Ion Source System for the INFN SPES Facility*, Tesi di Dottorato, Università degli Studi di Padova, 2010.
- [3]. C. Bonacina, A. Cavallini, L. Mattarolo, *Trasmissione del Calore*, Cleup Editore, 1992.
- [4]. G. Meneghetti, M. Manzolaro, M. Quaresimin, *Introduzione all'Analisi Strutturale Statica con il Codice di Calcolo Ansys®*, Edizioni Libreria Progetto Padova, 2012.
- [5]. G. Meneghetti, M. Manzolaro, *Introduzione all'Analisi Termica con il Codice di Calcolo Ansys®*, Edizioni Libreria Progetto Padova, 2012.

CAPITOLO 4

MISURE SPERIMENTALI SULLA SORGENTE DI IONIZZAZIONE AL PLASMA

4.1. Introduzione

È già stato spiegato come, attraverso il metodo ad elementi finiti, si possa dare un'indicazione sul comportamento della sorgente tipo FEBIAD per quanto concerne i parametri di funzionamento quali:

- Campo termico, cioè temperature sui vari componenti;
- Parametri elettrici, in particolare la differenza di potenziale tra il punto di ingresso e di uscita della corrente;
- Comportamento meccanico dei corpi caldi, fra cui l'aspetto più significativo sono le dilatazioni termiche dei materiali elasto-plastici (ovvero il Tantalio).

Inoltre, dalla conoscenza delle leggi che regolano i fenomeni in gioco, è possibile stimare il parametro che più di ogni altro influenza il processo di ionizzazione, ovvero la corrente elettronica emessa dal catodo.

Attraverso il codice FEM si può pensare quindi di stabilire a priori se la sorgente soddisfa i requisiti di funzionamento richiesti, poiché efficienza e corrente elettronica sono strettamente collegate.

Per essere sicuri che i calcoli su cui si basano tali previsioni siano esatti e che il modello numerico approssimi sufficientemente bene la realtà sperimentale, occorre però validarlo: il catodo è un oggetto inaccessibile per eventuali misure dirette di temperatura o deformazione mentre si trova in condizioni di lavoro ed il campo termico elevato sul pezzo impedisce di usare strumenti di rilevamento a contatto (come le termocoppie); anche se si potesse pensare di potervi appoggiare un qualsiasi rilevatore bisognerebbe tener conto dell'isolamento elettrico dello stesso rispetto al sistema.

C'è anche da considerare che la sorgente si trova all'interno della camera da vuoto e sarebbe troppo costoso forare il piatto od il canale dove dovrebbe passare il fascio, per osservare all'interno.

Occorre quindi studiare un sistema apposito per rilevare le grandezze di nostro interesse senza compromettere del tutto la geometria degli oggetti in questione: in questo modo si ottiene uno strumento in grado di validare il modello numerico, ma che sia anche un punto di riferimento in grado di farci comprendere il comportamento dei componenti all'interno della sorgente quando si trovano ad alta temperatura.

4.2. Progettazione e realizzazione del banco-prove

Per prima cosa si è quindi dovuto realizzare e progettare il banco-prove, cioè un sistema del tutto simile alla sorgente reale che però possa consentire l'osservazione di temperatura, differenza di potenziale e deformazioni, cioè delle grandezze di nostro interesse.

Per poter pensare ad un oggetto che consenta di rilevare tali parametri si è partiti dagli strumenti di misura a disposizione: mentre per le grandezze elettriche non ci sono particolari problemi poiché per misurare la differenza di potenziale basta usare un multimetro, per quanto riguarda temperature e deformazioni il problema è più complesso: se si esclude l'utilizzo di strumenti a contatto, problematici anche perché sarebbe necessario gestirli nel vuoto, si può considerare di rendere possibile l'accesso visivo ai componenti da misurare. In particolare, l'oggetto che risulta essere il centro del nostro studio è il catodo, che si trova all'interno della sorgente; la faccia frontale, che è quella da porre al centro della nostra attenzione, in quanto influenza l'emissione elettronica, è posta nella camera di scarica, schermata in senso assiale da anodo e scudi termici.

La sorgente verrà montata su un apparato che consentirà l'esecuzione delle prove sperimentali, che viene mostrato in Figura 4.1. Tale sistema è chiamato forno ad alte temperature, e consente il riscaldamento degli oggetti senza però essere dotato dei dispositivi che permettono l'estrazione e la gestione del fascio (prove dette *off-line*, cioè senza che avvenga l'effettiva produzione e ionizzazione di atomi da ionizzare). Non è altro che una camera da vuoto come quella descritta per l'impianto di produzione e ionizzazione degli isotopi radioattivi, a cui arrivano i puntoni per il trasporto della corrente collegati ad un alimentatore, ed in cui viene fatto il vuoto ($10^{-6} \div 10^{-7}$ mbar) attraverso un canale collegato a pompe apposite. Il tutto è posto su un telaio di supporto che è anche la zona di messa a terra (potenziale nullo ovvero $0 V$) sempre grazie al collegamento con l'alimentatore. L'interno della camera è accessibile visivamente attraverso delle finestre di osservazione apposite. Il rilevamento della temperatura risulta possibile con un pirometro. Naturalmente la sorgente originale non

prevede punti da cui sia possibile osservare il catodo dall'esterno, è perciò necessaria una modifica al sistema per consentire l'esecuzione delle prove.

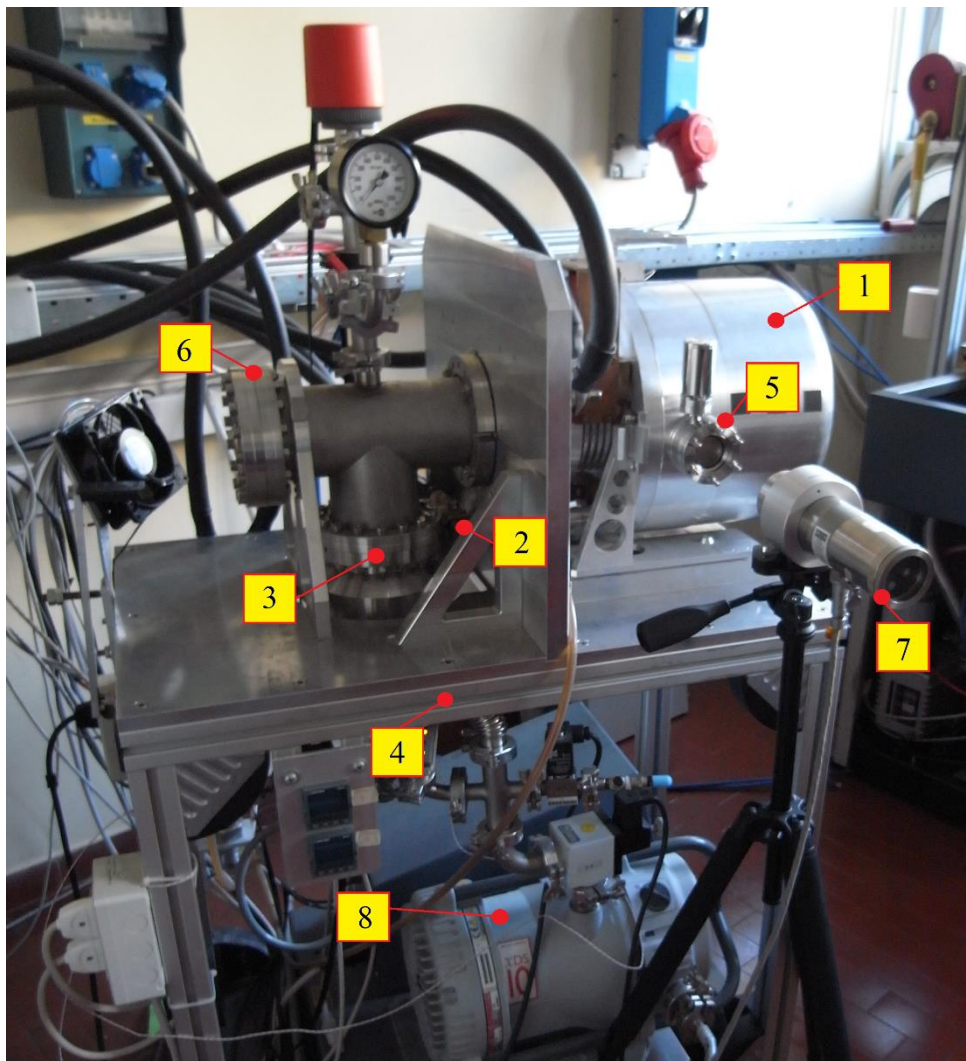


Figura 4.1: telaio con camera per le prove che costituiscono il forno ad alta temperatura. Il sistema di misura è formato da: 1) camera da vuoto con distanziale per l'alloggiamento della finestra di osservazione con all'interno la sorgente per le prove sperimentali; 2) puntone elettrico da cui viene fornita la corrente riscaldante alla sorgente; 3) canale per il vuoto collegato alle pompe; 4) telaio di supporto a cui viene anche collegato il cavo dell'alimentatore per la messa a terra ($0 V$); 5) e 6) finestre in Kodial® per l'osservazione degli elementi interni alla camera, la finestra 5 è protetta da un otturatore; 7) pirometro a infrarossi; 8) pompe da vuoto rotativa (la bianca) e turbomolecolare (la blu).

4.2.1. Configurazione della sorgente al plasma sviluppata per la rilevazione delle grandezze fisiche

Per permettere le rilevazioni descritte, in particolare quelle sui parametri su cui non si ha accesso dall'esterno della camera e cioè temperature e deformazioni, è necessaria una modifica del sistema sorgente: l'anodo e gli scudi termici non sono necessari visto che durante queste prove non occorre ionizzare nessun gas, perciò sono stati tolti assieme ai

loro sistemi di supporto, così da avere un corridoio di osservazione in senso assiale. Per consentire l'accesso visivo al catodo in senso radiale è stato pensato di prolungare il canale dove è contenuta la FEBIAD con un distanziale forato realizzato in Acciaio inossidabile. Forando anche camera di supporto (d'Acciaio) e camera di scarica (realizzata in Molibdeno) nella giusta posizione è possibile creare una finestra di osservazione che permetta di osservare direttamente il catodo (il modello CAD della configurazione descritta è mostrato in Figura 4.2). Naturalmente, se ci fosse il coperchio della camera da vuoto ad impedire che si possa riuscire a “vedere” all'interno tutto questo sarebbe inutile: è stato perciò realizzato una transizione in Alluminio, forata a cui è stata collegata una finestra in Kodial® (“viewport”), che sarà descritta in seguito.

È stata necessaria anche una modifica al morsetto di Rame per la connessione elettrica: poiché il sistema si sposta indietro rispetto al piatto della camera è stato realizzato un collegamento appositamente prolungato per poter arrivare al puntone.

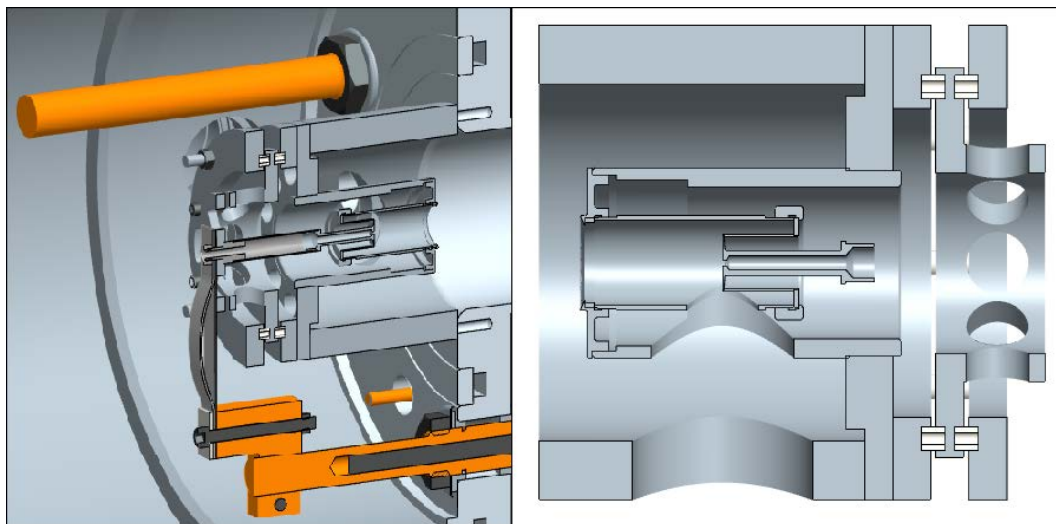


Figura 4.2: rappresentazione del modello CAD della versione della sorgente senza anodo e scudi termici, con foro radiale per l'osservazione della temperatura del catodo. Dall'assemblato della camera si nota come anche la connessione elettrica venga modificata per consentire l'accoppiamento.

La realizzazione dei componenti a geometria cilindrica è stata eseguita con lavorazioni al tornio, mentre le forature sono state realizzate con fresatrici o trapani.

Per quanto riguarda la lavorazione dei materiali refrattari, cioè Tantalio e Molibdeno, occorre porre particolare attenzione durante le operazioni che contemplano l'asportazione di truciolo, poiché le caratteristiche meccaniche sono differenti da quelle dei materiali più comunemente lavorati come Acciaio e Alluminio: il Molibdeno è un materiale molto duro ma fragile, perciò una lavorazione sbagliata potrebbe portare a crepe o difetti sulle

superfici che abbassano la resistenza del componente: durante i processi occorrono utensili affilati e una lubrificazione continua. Inoltre per le lavorazioni con fresatrici a controllo numerico la profondità di passata (spessore di materiale asportato per ogni passaggio della fresa) è stata tenuta bassa, cioè qualche decimo di millimetro; anche la velocità di avanzamento dell'utensile non deve essere troppo elevata, sia per evitare di crepare il pezzo sia per fare in modo che gli utensili non flettano e la qualità finale sia migliore. Allo stesso modo non si sono potute impostare velocità di avanzamento troppo basse per evitare che l'utensile, facendo presa solo con la parte finale, subisca forti pressioni in una zona ristretta della lama e subisca usura eccessiva: l'usura va a compromettere la precisione dell'operazione e la qualità della finitura del pezzo. Il Tantalio invece, già a temperatura ambiente, è un metallo con un comportamento fortemente plastico: la grande deformabilità fa sì che la lavorabilità sia bassa: applicare sforzi eccessivi agli oggetti costituiti da questo materiale provoca deformazioni permanenti che rendono la qualità finale del componente più bassa. Il riscaldamento degli utensili durante la lavorazione deve essere contrastato con la lubrificazione continua; nell'officina dei Laboratori Nazionali di Legnaro si fa uso di una miscela di acqua ed olio minerale. Il processo di tornitura è rappresentato in Figura 4.3.

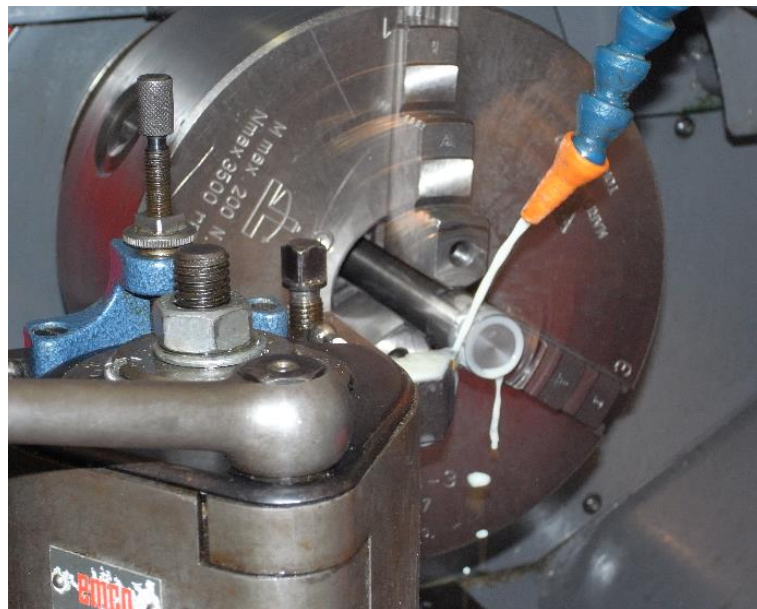


Figura 4.3: processo di tornitura della camera di scarica in Molibdeno. Si può notare il tubo da cui esce il lubrificante per migliorare la finitura del pezzo.

Per la realizzazione del distanziale che ha lo scopo di estrarre la sorgente dal canale dov'è alloggiata, si è pensato di utilizzare Acciaio inossidabile, 304L o 316L, sono entrambi acciai al Cromo (18%) e Nichel (8%), nel 316 è presente anche Molibdeno

(2.5%), con basso contenuto di Carbonio (la lettera L dopo il nome indica i cosiddetti acciai “*low carbon*”, con concentrazione di C minore dello 0.03%) e che hanno un buon comportamento alle alte temperature; con lo stesso materiale si sono realizzate anche flangia e camera di supporto. Prima di procedere con la foratura è stata realizzata anche una nuova camera di scarica, in Molibdeno, priva dei fori per il supporto dell’anodo. Queste parti sono state forate partendo dal componente più esterno, la camera di supporto, e centrando di volta in volta l’asse della fresatrice col foro realizzato precedentemente: in questo modo si è ottenuta la massima accuratezza sul controllo della posizione della finestra di osservazione in direzione radiale e si sono potute allineare le finestre sui vari componenti mantenendo i collegamenti filettati previsti nelle tavole costruttive originali della sorgente FEBIAD. Il processo di foratura con fresatrice a controllo numerico è rappresentato in Figura 4.4. L’ideale per favorire il montaggio dello strumento per le prove sarebbe rimuovere la maggior parte dei collegamenti filettati per consentire l’allineamento manuale dei componenti, ma la riprogettazione dei componenti è stata eseguita solamente dopo la messa a punto del sistema sperimentale.



Figura 4.4: foratura dei componenti con fresatrice a controllo numerico.

In Figura 4.5 è possibile osservare il corridoio di osservazione ottenuto attraverso l’allineamento dei vari fori che consente di accedere visivamente al catodo. L’oggetto viene disposto in modo che il bordo del catodo cada all’incirca al centro della cava ottenuta sulla camera di scarica.

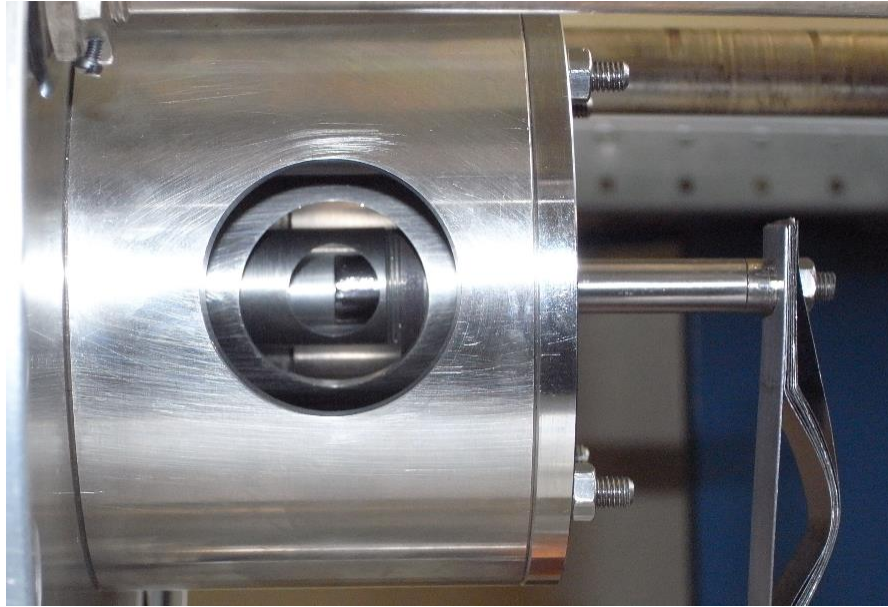


Figura 4.5: sorgente per le prove montata sul piatto della camera. È possibile osservare il corridoio di osservazioni ottenuto con fori allineati sui vari componenti.

Sono inoltre stati fatti degli aggiustamenti sui componenti che costituiscono la linea di trasporto della corrente. Per poter studiare le deformazioni che si verificano sul catodo quando la sorgente è montata accoppiandola con il bersaglio radioattivo è necessario porsi nelle stesse condizioni di vincolo: con la configurazione descritta nei Capitoli 2 e 3 la connessione elettrica in Tantalio non ha rigidità flessionale elevata rispetto all'asse orizzontale (vedi Figura 4.6).

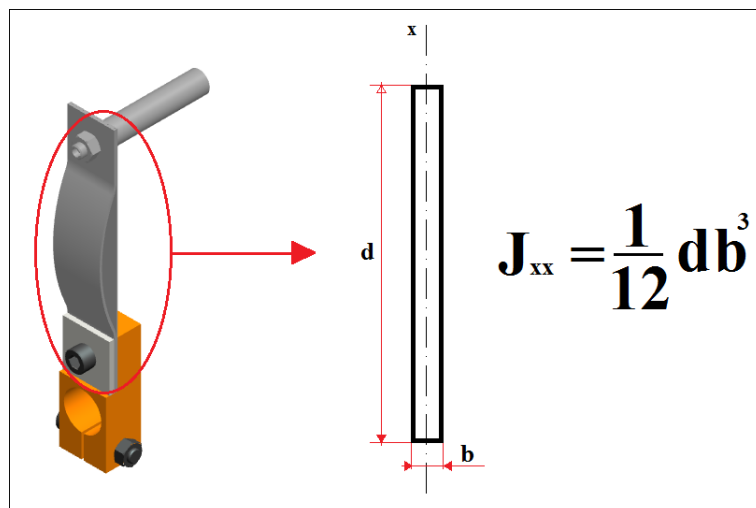


Figura 4.6: rappresenta della rigidità flessionale della connessione elettrica. La parte curva viene considerata di rigidità trascurabile perché formata da una serie di lamelle sottili, molto deformabili, mentre il foglio di Tantalio più spesso ha lo spessore b molto piccolo, quindi un momento d'inerzia basso rispetto all'asse x , cosa che favorisce le deformazioni sotto sforzi flessionali.

È stato verificato durante le prove che a causa della bassa resistenza agli sforzi della connessione elettrica, la deformazione della faccia frontale del catodo è anomala: lo spostamento risulta essere in verso opposto a quello atteso, e la superficie tende a rientrare (l'effetto deleterio di questo fenomeno è stato ben osservato durante le prove di efficienza, e si può osservare in Figura 4.7).



Figura 4.7: catodo dopo essersi deformato in verso contrario di quello atteso.

Per impedire il verificarsi di questo fenomeno è stato pensato un sistema per bloccare le traslazioni della linea di trasferimento: il problema principale che rende difficoltosa questa operazione è la necessità di mantenere l'isolamento elettrico: si è pensato quindi di costruire un morsetto con due flange in Acciaio inossidabile, in cui inserire il componente con cui vincolare la linea di trasferimento. Tale componente, anch'esso di Acciaio, è accoppiato al morsetto per mezzo di isolatori cilindrici in Allumina, posizionati all'interno di apposite cave. Nel vincolo vengono avvitati quattro prigionieri, in cui è inserito un disco in Tantalio che va ad inserirsi nella vite di chiusura grazie ad una lamatura del foro passante. In questo modo si mantiene l'isolamento elettrico e le parti che si scaldano di più sono costituite da materiali altofondenti. Il sistema è presente nel modello CAD di Figura 4.2, ed in Figura 4.8 è mostrato quello reale montato assieme alla sorgente.

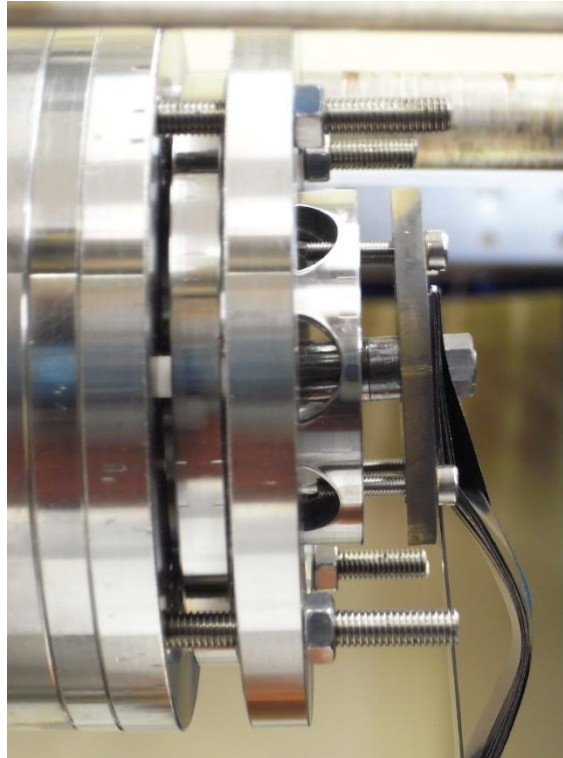


Figura 4.8: foto del sistema di vincolo che blocca la traslazione della linea di trasferimento. Si notano gli isolatori in Allumina che separano il morsetto dal componente di supporto, a cui è collegato il disco in Tantalio. Le viti M3 presenti nella foto sono state sostituite da grani fermati con dei dadi.

In tutti i componenti sono state scavate delle cave di alleggerimento per consentire un miglior livello di vuoto e una minor riflessione per il flusso termico radiante che parte dai componenti incandescenti. Durante la lavorazione delle varie parti, è stato ritenuto più conveniente cercare di ottenere un miglior allineamento dei fori realizzando, nel vincolo centrale in Acciaio, un forellino di costruzione passante con lo scopo di riferimento per la lavorazione.

Il montaggio dell'elemento di bloccaggio è uno dei procedimenti più complicati per l'assemblaggio della sorgente e sarà descritto nell'Appendice B.

La camera da vuoto in cui è alloggiata la sorgente è già stata mostrata nel Capitolo 1 ed è composta da un piatto disposto in verticale su cui vengono fissati tutti i componenti relativi al bersaglio e alla sorgente. Il piatto viene raffreddato con acqua che circola alla temperatura di circa 18°C , e dalla sua superficie partono i puntoni di Rame che servono al trasporto della corrente agli elementi riscaldanti. Il coperchio, per poter eseguire le prove desiderate, deve essere montato dopo un elemento di transizione su cui sono scavate le cave per l'alloggiamento delle finestre.

Bisogna garantire la tenuta del vuoto anche nelle zone di contatto fra la transizione, il piatto della camera ed il coperchio: per risolvere questo problema si utilizzano delle

guarnizioni in Viton® (detti *O-ring*) che possono essere acquistate della giusta misura oppure prodotte di taglia personalizzata incollando una corda del giusto diametro. Durante la fase di incollaggio bisogna fare attenzione che nella zona di adesione le due estremità siano piatte e combacino perfettamente, altrimenti si rileveranno delle infiltrazioni di aria all'interno della camera e non si potranno raggiungere alti livelli di vuoto: si può rendere regolare la superficie di quella zona lavorandola con della carta vetrata fine. In Figura 4.9 si può osservare la guarnizione inserita nella transizione in Alluminio.



Figura 4.9: distanziale con finestra di osservazione e otturatore. Sul bordo dell'oggetto si nota che è stata inserita la guarnizione per la tenuta del vuoto nella cava realizzata appositamente.

È importante garantire che la zona dove si trovano le guarnizioni in gomme non superi temperature di 100°C , poiché altrimenti si rovinerebbero rischiando di non garantire la tenuta, per questo si possono usare getti di aria compressa diretti sui punti di interesse.

4.2.2. La linea di trasporto della corrente

All'interno della camera, attraverso delle cave realizzate sul piatto, arrivano i puntoni di Rame adibiti al trasporto della corrente. In Figura 4.10 sono visibili i due puntoni superiori, che sono destinati al riscaldamento del bersaglio, e quello inferiore, che dà corrente alla sorgente. Il circuito si chiude attraverso la camera che è collegata al telaio che a sua volta è tenuto a potenziale nullo attraverso un cavo che parte dall'alimentatore.

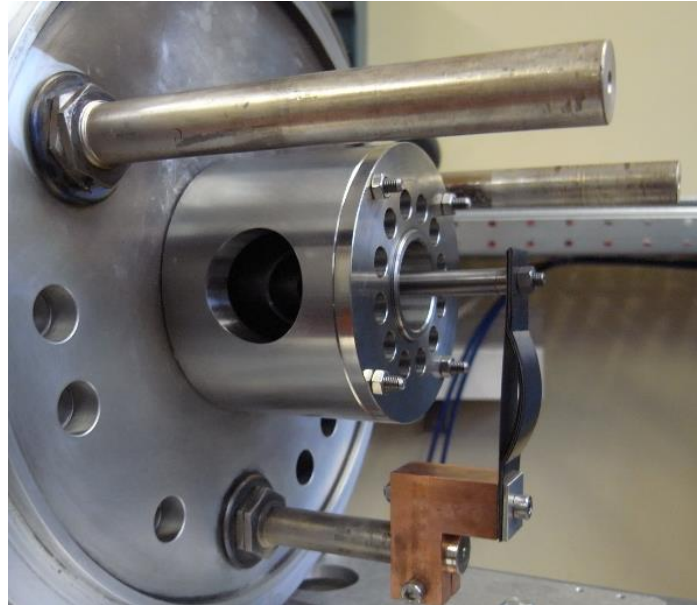


Figura 4.10: rappresentazione del piatto della camera in cui sono visibili i puntone di Rame. Si può osservare che la sorgente è collegata ad un unico componente, mentre gli altri due sono liberi.

Per effettuare le rilevazioni è stata imposta una corrente riscaldante che, scorrendo attraverso i componenti della sorgente, portasse gli oggetti alla temperatura voluta: un alimentatore con il compito di erogare la corrente voluta è stato collegato al puntone di Rame interno alla camera (su cui si innesta il morsetto di Rame collegato con la connessione elettrica visibile in Figura 4.10) e al telaio. Manualmente, attraverso una manopola, è possibile impostare il valore di corrente (in Ampere) desiderato: si sono andati ad impostare gli stessi valori usati per il parametro I_{LINE} usato nel modello FEM.



Figura 4.11: trasformato usato nel laboratorio per l'erogazione della corrente riscaldante. Sul pannello frontale si possono leggere corrente che circola (chiamata finora I_{LINE} , sulla destra) e differenza di potenziale applicata (che sarà nominata V_{MS} , sulla sinistra), che sono regolabili manualmente agendo sulle manopole sottostanti.

Dall'alimentatore (visibile in Figura 4.11) è possibile leggere, oltre alla corrente erogata, anche la differenza di potenziale che sta applicando in uscita (nelle prove questo

parametro sarà chiamato V_{AL}); la differenza di potenziale è stata verificata anche con un multimetro, posizionando i contatti sulla camera e sulla zona del puntone di Rame che esce dalla camera e si collega al trasformatore (il valore sarà chiamato V_{MIS}).

I valori della tensione applicata che vengono così letti potranno essere confrontati con quelli calcolati numericamente, al pari della temperatura.

4.2.3. Sistema per la messa in vuoto della camera

Per portare i componenti ad alta temperatura nella camera da vuoto la pressione deve essere attorno ai 10^{-6} mbar. Per consentire il raggiungimento di questo stato, oltre alle guarnizioni fra le parti a contatto che garantiscono la tenuta, ci devono essere una serie di pompe che aspirino l'aria: viene utilizzata una pompa rotativa che consente di raggiungere pressioni fino a $10^{-2} \div 10^{-3}$ mbar, ma per andare a livelli più bassi occorre una pompa particolare detta turbomolecolare, che permette di estrarre in modo più efficiente le particelle presenti. Tuttavia questo tipo di macchina non può essere usata a pressioni troppo alte perché ciò ne causerebbe la rottura, perciò le due tipologie vanno usate in serie (la pompa turbomolecolare viene accesa quando il vuoto generato dalla rotativa arriva vicino ai 10^{-3} mbar). L'aria è estratta attraverso un canale opportuno posto dietro la camera.

4.2.4. Finestre di osservazione

Per il rilevamento delle temperature si può pensare di utilizzare un pirometro ad infrarossi, usato spesso in casi di questo tipo (oggetti incandescenti in vuoto) visto che non ha bisogno di essere a contatto con l'oggetto e non richiede un mezzo meccanico posto fra strumento di misura e componente da misurare. Si è quindi pensato, visto che l'accesso visivo al catodo è reso possibile per le rilevazioni termiche, di provare a misurare le deformazioni della faccia frontale del catodo utilizzando anche in questo caso un sistema di visione: con un dispositivo ottico come una fotocamera, ponendosi lungo una direzione radiale in modo da allinearsi col bordo del catodo, sarebbe possibile valutare la deformazione progressiva in direzione assiale.

Per avere la possibilità di eseguire questi esperimenti bisogna accedere all'interno della camera usando delle finestre di osservazione posizionate alla fine del canale (per l'osservazione della temperatura in senso assiale) e sulla transizione del coperchio della camera (per la misura di temperatura e deformazione in senso radiale).

In Figura 4.12 sono mostrate le flange da cui è stata eseguita la misura e la vista che si ha sull'oggetto.

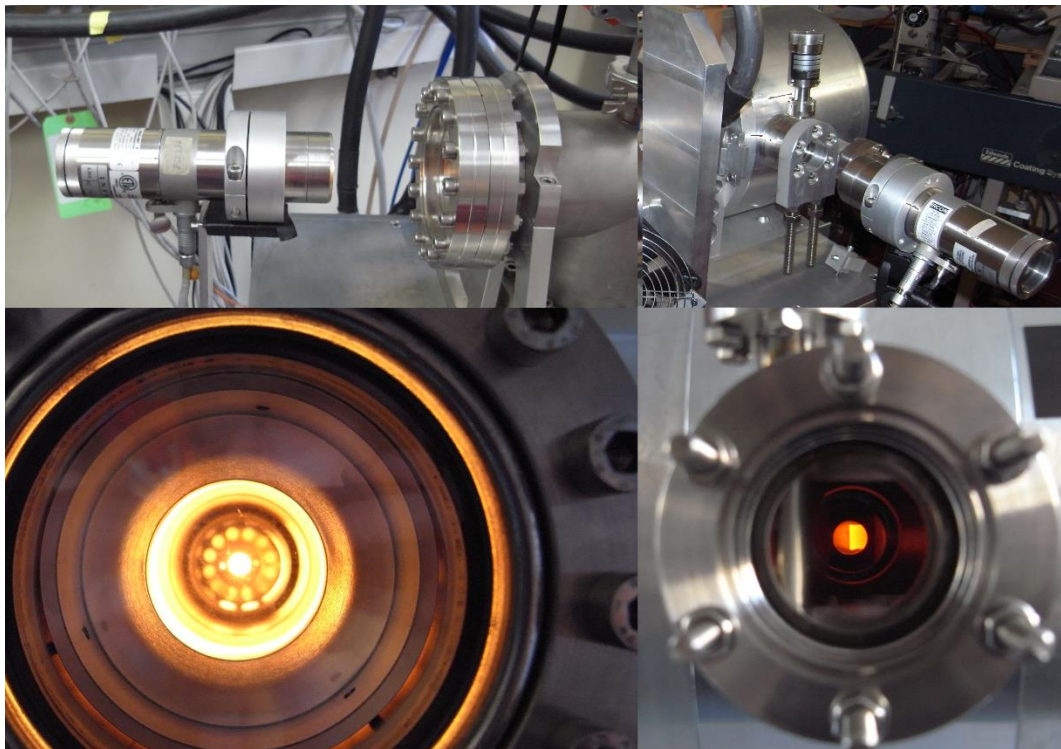


Figura 4.12: nella parte alta della foto si possono osservare i posizionamenti del pirometro per l'osservazione della temperatura nelle due direzioni indicate, mentre sotto si notano i corridoi di visione creati per accedere al catodo.

Il Kodial® è un particolare tipo di vetro trasparente alle radiazioni infrarosse e nel campo del visibile; la finestra di osservazione in senso radiale che si collega alla transizione è realizzata con una flangia in Acciaio del tipo CF40 per consentire la tenuta del vuoto, già presente in commercio, mentre la quella per l'osservazione in senso assiale è una CF100, anch'essa normata.

In Figura 4.13 si può osservare che per collegare la finestra di osservazione alla transizione in Alluminio si è fatto uso di un componente aggiuntivo: è stato usato un otturatore (“*shutter*”) per evitare che la sublimazione dei componenti metallo o l'emissione di eventuali contaminanti dalle superfici degli oggetti ad alta temperatura (gli oggetti che si scaldano fino ad essere incandescenti in vuoto possono sublimare, le particelle emesse vanno ad attaccarsi alle zone più fredde della camera) possa sporcare il vetro falsando le letture della temperatura effettuate con un pirometro. Per prevenire che le temperature troppo elevate danneggiassero le parti in Alluminio o rendessero difficoltosa la chiusura dell'otturatore per via delle deformazioni termiche dei

componenti si è provveduto a raffreddare precauzionalmente l'esterno della camera con dei getti d'aria compressa.

Le finestre di osservazione vanno verificate prima dell'utilizzo: si osserva col pirometro una lampadina ad incandescenza: il filamento in Tungsteno raggiunge valori di temperatura di circa $2200 \div 2300^{\circ}\text{C}$. Se dopo aver interposto tra pirometro e lampadina la finestra si legge un valore di temperatura che si discosta dal primo di $10 \div 20^{\circ}\text{C}$, il vetro è pulito e si può procedere alla misura.



Figura 4.13: dettaglio della finestra di osservazione in Kodial® montata dopo l'otturatore per garantire la pulizia del vetro anche durante le prove con gli oggetti ad alta temperatura.

Per consentire di poter montare e operare agevolmente con l'otturatore, si è evitato di collocarlo in contatto diretto con la transizione in Alluminio e si è inserita una flangia (sempre CF40) opportunamente lavorata che funga da distanziale. Per collegare tra loro i vari elementi si usano dei collegamenti filettati: per evitare di rovinare i filetti sull'Alluminio (che sono meno resistenti di quelli sull'Acciaio) si è pensato non usare viti, ma tagliare delle barre filettate da inserire nella transizione come prigionieri; il distanziale, l'otturatore e la finestra sono realizzati tutti con flange normate CF40 e possono essere infilate nei prigionieri e fissate semplicemente con dei dadi. Per garantire la tenuta in tutte le zone di transizione fra due elementi viene inserita una guarnizione in Teflon (l'uso di guarnizioni in Rame non è possibile perché occorrerebbe un'eccessiva pressione per accoppiare le flange, cosa che distruggerebbe le filettature sull'Alluminio, mentre è utilizzabile se i collegamenti filettati sono in Acciaio, come sulla flangia CF100).

Le flange normate di tipo CF hanno un dente che si appoggia direttamente sulla guarnizione, deformandola ed evitando quindi perdite o passaggio di aria.

Un ulteriore sottosistema che sarà collegato al forno di alte temperature assieme alla finestra (camera da vuoto usata specificamente per test termici) è il sistema di supporto per la fotocamera che servirà a misurare le eventuali deformazioni assiali. È formato da una flangia che si inserisce nelle stesse barre filettate che servono al collegamento della finestra in Kodial®: i sei fori lamati consentono l'alloggiamento dei dadi di fissaggio e sulla faccia inferiore sono collegate due barre M12 che servono a fare scorrere la tavola di supporto in verticale; tutto è bloccato con dei dadi.

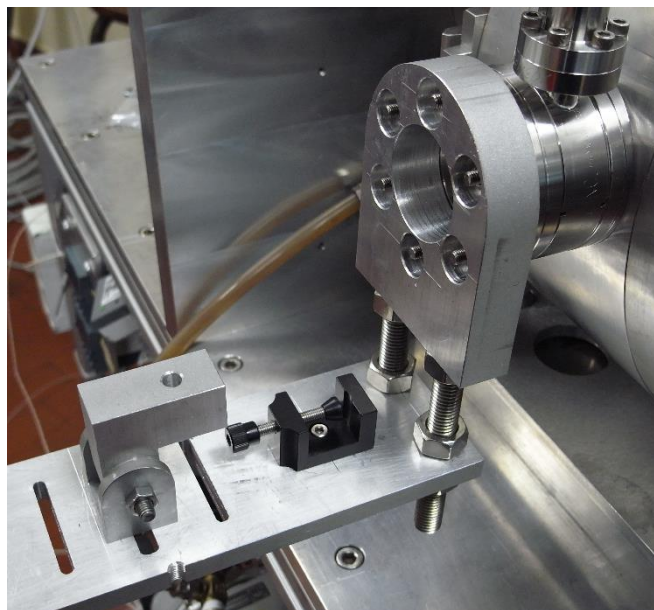


Figura 4.14: sistema di supporto per i dispositivi ottici per la misura delle deformazioni.

Sulla tavola di supporto vengono fissati, attraverso delle guide che ne consentono lo spostamento, due componenti in Alluminio che servono all'alloggiamento del dispositivo ottico: stringendo viti e dadi si può garantire la rigidità del sistema che consente di effettuare i rilevamenti in modo preciso. Per prevenire che le deformazioni elastiche del sistema compromettano la buona riuscita delle misure, tutti i pezzi sono stati fatti con piatti di Alluminio spessi da *10 mm* in su, in modo da essere sicuri che il sistema mantenga la sua forma iniziale anche se sottoposto a sforzi esterni (come può essere l'azione di premere i pulsanti della fotocamera per scattare se non si dispone di un controllo remoto).

4.3. Creazione del modello numerico del sistema per le prove sperimentali

Come già spiegato nel paragrafo precedente, il sistema sviluppato per le prove sperimentali, pensato principalmente per la caratterizzazione del catodo, contiene modifiche sostanziali rispetto alla sorgente FEBIAD originale. Si commetterebbe perciò un errore concettuale se si confrontassero i dati ricavati dal modello FEM presentato nel Capitolo 3 con quelli ottenuti durante le prove, visto che, oltre alle approssimazioni dovute al metodo numerico, si andrebbero ad aggiungere i fattori dovuti alle differenze della geometria e dei componenti, cioè si andrebbero a confrontare due diverse configurazioni. In particolare la rimozione di anodo e scudi termici, necessaria per poter effettuare i rilevamenti termici sul catodo, porta inevitabilmente ad un abbassamento delle temperature a causa del mancato effetto di schermatura che davano gli oggetti, posti in prossimità del corpo su cui si sta misurando, così come gli oggetti che compongono il sistema di bloccaggio della linea di trasferimento asporteranno calore per conduzione.

Per questo motivo è necessario sviluppare un modello numerico che approssimi al meglio il sistema con cui ci si vuole confrontare, per avere una migliore comprensione di quanto il codice FEM garantisca dei risultati attendibili.

Quindi si può procedere partendo dalle stesse semplificazioni geometriche descritte nel Capitolo 3, cominciando con l'inserire la corretta configurazione dei volumi in gioco: non vengono più considerati i componenti relativi all'anodo, sono inclusi nelle geometrie dei pezzi anche i fori sulle parti di sostegno per le osservazioni in senso radiale, inoltre sono inseriti i volumi del sistema di bloccaggio della linea di trasferimento. In quest'ultimo sottoassieme non sono stati considerati gli isolatori di Allumina perché, oltre a creare problemi nell'incollaggio dei volumi (*VGLUE*) richiedevano anche una discretizzazione con elementi molto piccoli, allo stesso modo si sarebbe stati costretti ad adottare un reticolo fine anche per i volumi a contatto con tali isolatori, cosa che avrebbe richiesto un grande tempo di calcolo per via delle dimensioni delle flange e del componente di supporto. Sono stati anche trascurati tutti gli elementi di collegamento, cioè le barre filettate ed i dadi, ma avendo volumi e superficie ridotte è stata ritenuta accettabile l'approssimazione. È stata fatta anche qualche modifica sulle cave di alleggerimento, per facilitare la discretizzazione dei volumi. In Figura 4.15 si può osservare il modello numerico sviluppato con un dettaglio in sezione che mostra i componenti interni (il catodo e la camera di scarica) e la discretizzazione.

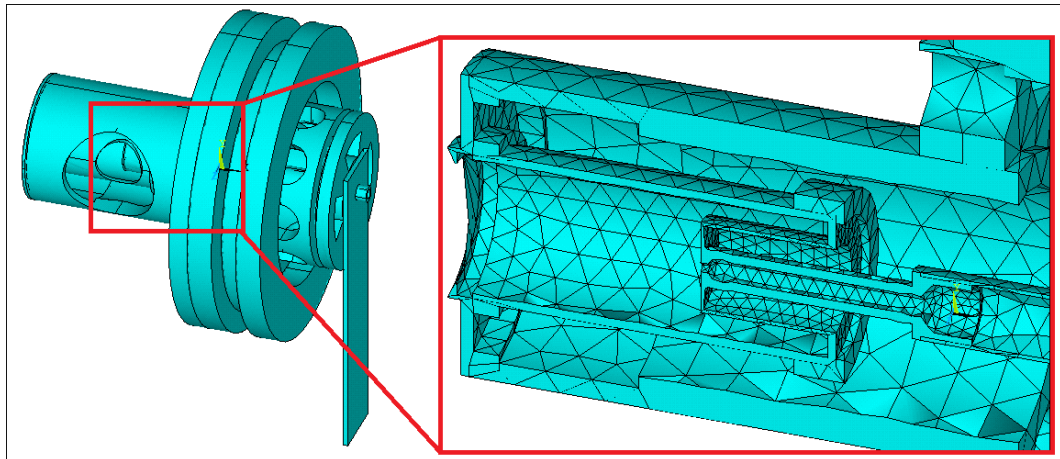


Figura 4.15: rappresentazione del modello FEM della sorgente con configurazione per le prove sperimentali. Nel dettaglio in evidenza si nota l'assenza di anodo e scudi termici, oltre alla discretizzazione adottata per la risoluzione.

Il primo passo è stato quindi confrontare i due modelli numerici fra di loro, per valutare le differenze, per quanto concerne il campo termico, fra le due configurazioni studiate. I parametri considerati sono stati la T_{av_cath} , la T_{max} e l'andamento della temperatura sulla faccia del catodo lungo il raggio. I dati ottenuti dai modelli FEM sono riportati nella Tabella 4.1, nel Grafico 4.1, Grafico 4.2 e Grafico 4.3.

I_{LINE} [A]	MODELLO STANDARD		MODELLO HT	
	T_{max} [°C]	T_{av_cath} [°C]	T_{max} [°C]	T_{av_cath} [°C]
280	1868.64	1708.30	1802.89	1610.04
290	1925.47	1760.73	1859.10	1661.35
300	1981.30	1811.77	1913.94	1711.30
310	2035.98	1861.51	1967.81	1759.73
320	2089.64	1910.06	2020.72	1807.06
330	2142.49	1957.72	2072.55	1853.12
340	2194.26	2003.96	2123.47	1898.04
350	2245.49	2049.45	2173.69	1941.95
360	2295.94	2094.08	2223.08	1984.91
370	2345.60	2137.65	2271.74	2026.97

Tabella 4.1: confronto fra i dati ottenuti dai due differenti modelli FEM della sorgente al plasma. Il MODELLO STANDARD rappresenta le geometrie presentate nel Capitolo 3, con anodo e senza fori radiali, mentre il MODELLO HT è quello senza anodo e con le finestre di osservazione usato per lo studio del comportamento termo-strutturale.

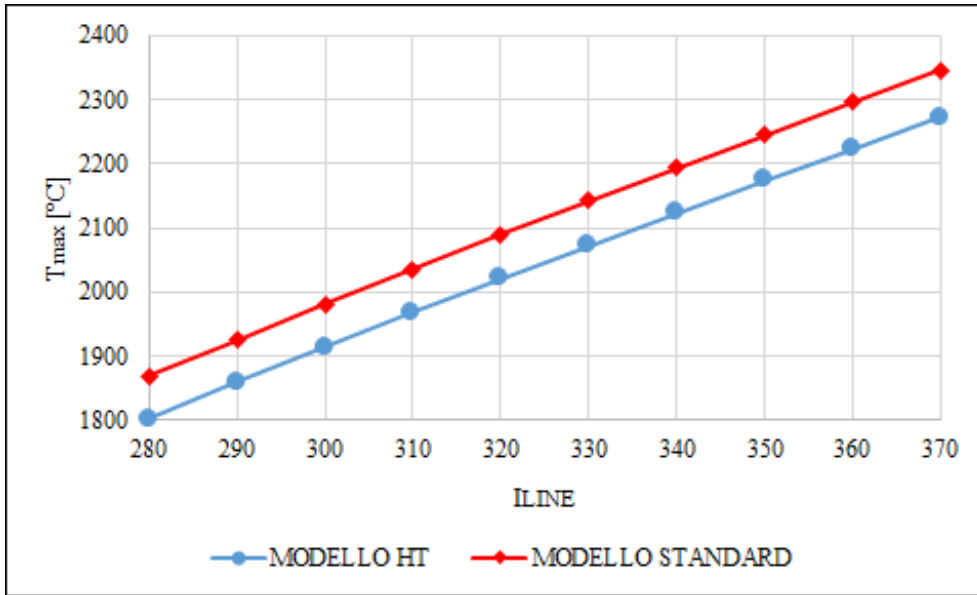


Grafico 4.1: confronto fra le temperature massime dei modelli FEM della configurazione STANDARD e HT della sorgente di ionizzazione.

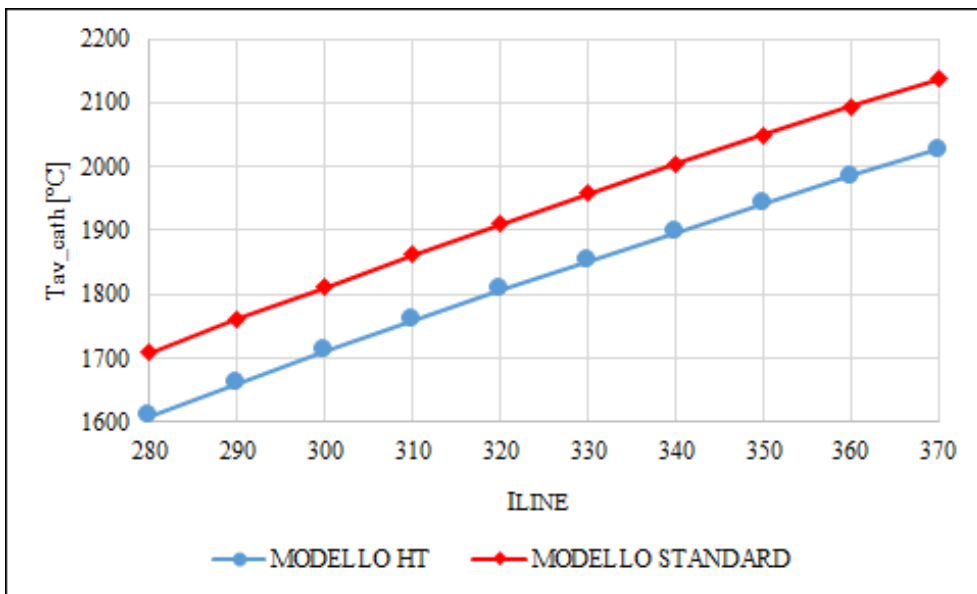


Grafico 4.2: confronto fra le temperature medie nodali della faccia frontale del catodo dei modelli FEM della configurazione STANDARD e HT della sorgente di ionizzazione.

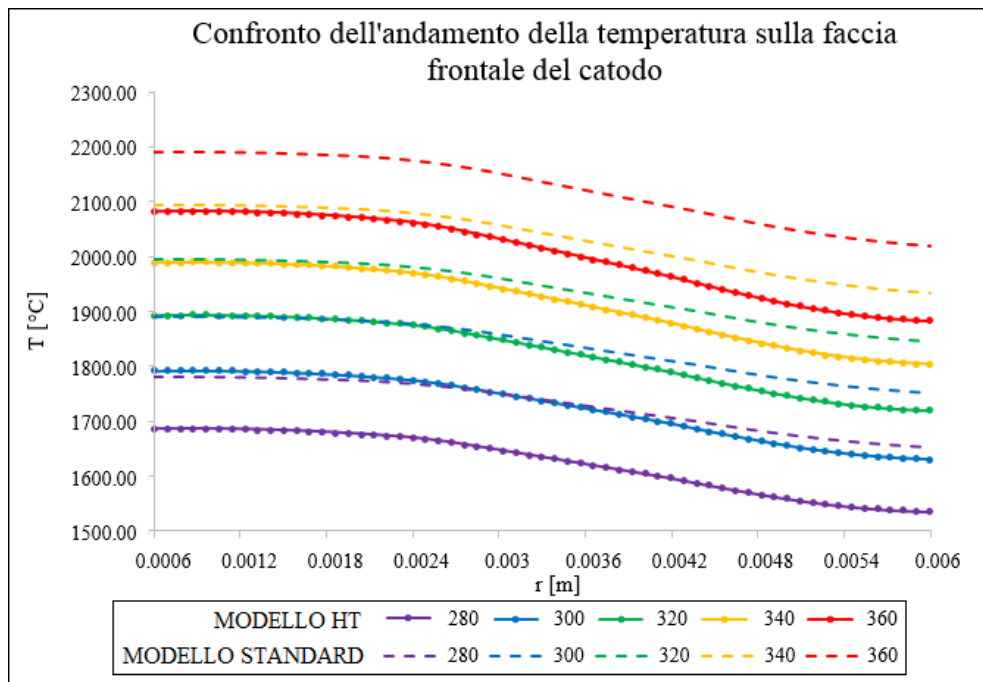


Grafico 4.3: confronto fra gli andamenti lungo il raggio della faccia frontale del catodo delle temperature ottenute dai modelli FEM delle configurazioni *STANDARD* (con indicatori quadrati) e *HT* (con indicatori triangolari) della sorgente al plasma. La legenda indica i valori di I_{LINE} assegnati ad ogni prova, non è stato considerato l'intero intervallo (da 280 A fino a 370 A) per semplificare la visualizzazione degli andamenti.

Si può notare che il modello senza anodo, chiamato *MODELLO HT* è sensibilmente più freddo della versione completa: infatti in tutti i parametri che sono stati esaminati le temperature maggiori sono state rilevate nel *MODELLO STANDARD*.

Per le temperature massime (T_{max}), le differenze tra le due configurazioni sono circa attorno ai 70°C . In termini percentuali, gli scostamenti sono compresi tra il 3% ed il 4%. Per quanto riguarda invece le medie sulla superficie frontale (T_{av_cath}), le differenze sono maggiori, arrivando anche ad un massimo di circa 110°C , in termini relativi parliamo di variazioni attorno al 6%. Infine, per quanto riguarda l'andamento della temperatura in senso radiale sulla faccia frontale, bisogna precisare in che direzione sono stati esaminati i dati: infatti nel *MODELLO HT* non si può più pensare di avere una situazione assialsimmetrica poiché i fori di osservazioni ricavati sugli elementi di supporto in senso radiale contribuiscono a disperdere parte del calore attraverso un flusso termico radiante che non viene più schermato come nel *MODELLO STANDARD*. Per analizzare in dettaglio questo fenomeno, la temperatura sulla faccia del catodo è stata rilevata proprio in direzione dei fori per il *MODELLO HT*: se si esamina il Grafico 4.3 si nota che le differenze fra i due modelli superano i 100°C .

Si può quindi affermare che le differenze fra le due versioni non sono trascurabili per quanto riguarda il campo termico dell'oggetto; d'altra parte le differenze geometriche sono marcate e influenzano sensibilmente i flussi termici che determinano il campo di temperature finale: in particolare, la presenza o meno dell'anodo (con anodo ci si riferisce al sottosistema camera di anodo, griglia e flangia di scarico) contribuisce in modo significativo alla dispersione del calore per effetto del flusso radiativo, portando ad una modifica evidente delle temperature dei corpi vicini. Tuttavia per osservare direttamente le temperature su oggetti così caldi non ho altra scelta che rimuovere alcuni componenti se non voglio stravolgere completamente l'assetto della camera.

La configurazione montata per lo studio termico sarà pertanto un sistema che mi consente da una parte di validare i risultati ottenuti col modello numerico per quanto riguarda il campo termico ed in particolar modo le deformazioni, dall'altra di controllare il comportamento degli oggetti con temperature attorno ai 2000°C e di capire da cosa dipendono i risultati che si ottengono durante le prove di efficienza, infatti attraverso il controllo visivo riusciamo a capire quanto l'oggetto si rovina restando incandescente.

4.4. Misura delle condizioni termiche ed elettriche

Una volta che si sono completate le analisi numeriche preliminari si è potuto procedere con le prove sperimentali.

Per poter realizzare la prova in modo corretto bisogna avere ben presente le caratteristiche degli strumenti di misura che si utilizzano. Nel nostro caso si è fatto ricorso ad un multimetro per rilevare la differenza di potenziale ai capi della linea di trasporto della corrente riscaldante, oltre ad un pirometro ad infrarossi. In particolare il pirometro va configurato con le giuste impostazioni perché la lettura della temperatura dia i risultati corretti. Presso ai Laboratori Nazionali di Legnaro si dispone di un termometro a infrarossi Modline® 5, serie 5R, modello 5R-3015.

È importante conoscere le specifiche dello strumento poiché a seconda della distanza fra lente del pirometro e oggetto da misurare, l'ampiezza del punto di osservazione varia (infatti la temperatura viene misurata entro una zona che può essere approssimata come un cerchio di diametro d). In generale, aumentando la distanza fra oggetto caldo e pirometro, l'ampiezza del punto di osservazione aumenta, causando una contemporanea riduzione della qualità dell'osservazione, poiché nella zona considerata può esserci un gradiente di temperatura che rende l'errore della misurazione elevato dal momento che in realtà ciò che viene letto dallo strumento è la media delle temperature nella zona

osservata. Dal manuale dello strumento di misura [1] si è potuto misurare il diametro del punto in cui viene eseguita la lettura: seguendo lo schema del manuale si può calcolare d con la formula:

$$d = \frac{D}{F} \quad (4.1)$$

dove D è la distanza della superficie da misurare e la lente, ed F è il “*resolution factor of sensor model and lens combination*” (fattore di risoluzione, è un parametro dello strumento e dipende dal tipo di lenti). La relazione fra i diametri del punto che si sta osservando (punto messo a fuoco) e distanza del sensore dalla superficie calda è spiegata in Figura 4.16.

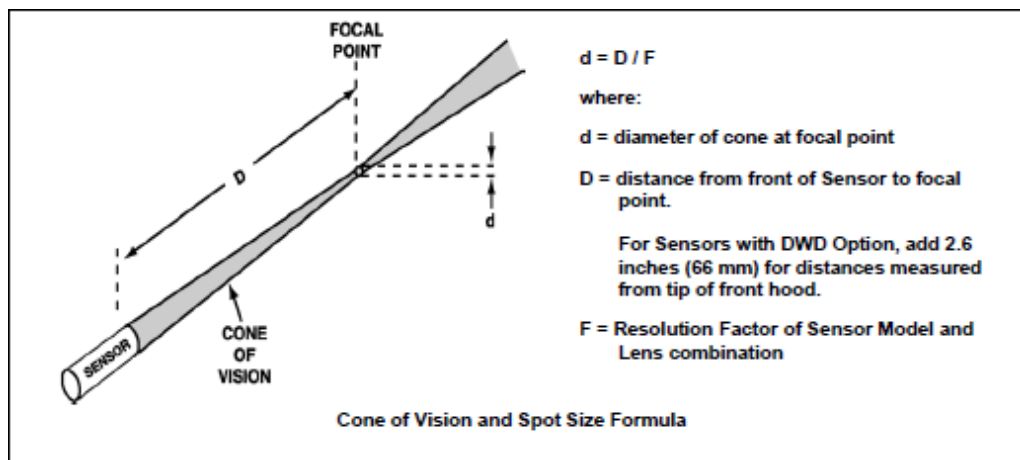


Figura 4.16: spiegazione del fattore di risoluzione F del pirometro presa dal manuale dello strumento [1].

Il manuale fornisce F in funzione di D , in particolare si possono riportare i valori di d al variare della distanza fra oggetto e pirometro considerando:

F	Tipo di lente	Intervallo di validità (valori in mm)
150	RA	$330 < D < \infty$

Tabella 4.2: valori del fattore di risoluzione per l'intervallo di distanza obiettivo-oggetto considerata e per la tipologia di lente montata nel pirometro. Per $D < 330 \text{ mm}$ si usa il valore minimo calcolato nell'intervallo (cioè con $D = 330 \text{ mm}$).

Dalla Tabella 4.2 si possono ricavare i diametri dei punti di osservazione (*spot*) al variare della distanza tra pirometro e superficie da misurare, attraverso l'equazione 4.1, e quindi tabulare i dati ottenuti (Tabella 4.3):

<i>D [mm]</i>	<i>d [mm]</i>
300	2.20
350	2.33
400	2.67
450	3.00
500	3.33
550	3.67
600	4.00

Tabella 4.3: valori del diametro dell'area circolare su cui viene rilevata la temperatura al variare della distanza tra l'obiettivo e l'oggetto da misurare.

Il pirometro, nel nostro caso, viene posto ad una distanza di circa *40 cm* dall'oggetto se l'osservazione della temperatura avviene sulla faccia laterale del catodo, mentre per la faccia frontale è *55 cm* (i valori dipendono dalla geometria del telaio e del forno ad alte temperature e ai supporti per il pirometro). Questi valori consentiranno di calcolare il diametro dell'area *d* su cui vengono mediate le temperature, così dal modello numerico si potrà eseguire la stessa operazione (cioè si andranno a considerare tutte le temperature entro una certa distanza *d*) per avere un confronto più accurato.

Un altro parametro da considerare è il comportamento del materiale: si possono osservare due diversi tipi di superficie:

- Superficie grigie, la cui emissività è la stessa in tutte le direzioni;
- Superficie non grigie, la cui emissività non può essere considerata costante al variare della direzione di osservazione [1].

Il pirometro a nostra disposizione rileva la temperatura comparando i livelli di radiazione nel campo dell'infrarosso per due diversi intervalli di lunghezze d'onda (funzionamento di tipo bi-cromatico); la temperatura letta sarà stimata in base al rapporto fra le due misurazioni. Per questo bisogna impostare correttamente il valore di un parametro detto "*E-SLOPE*" per definire il tipo di comportamento del materiale che si sta osservando.

Per il Tantalio, che è considerato un corpo non grigio, il valore da inserire nello strumento è di *1.060*. Se si eseguono le misure con un diverso valore, i risultati ottenuti saranno errati: bisognerà procedere creando una curva di taratura, rilevando cioè una serie di temperature con il valore di *E-SLOPE* usato in precedenza e quello esatto, e dall'interpolazione sarà possibile risalire ai valori corretti senza dover ripetere le prove.

Per le misurazioni, dopo aver acceso il sistema e riscaldato gradualmente la sorgente per evitare che un gradiente termico troppo elevato possa introdurre nei componenti tensioni elevate che possano rovinarli, si sono eseguite delle serie di riscaldamenti e raffreddamenti, misurando la temperatura ogni $10 A$, i valori della corrente riscaldante sono stati scelti dal campo indicato nel Capitolo 3 come campo di lavoro, cioè partendo da $280 A$ e arrivando a $370 A$ per non compromettere le condizioni del catodo con temperature troppo elevate. Siccome abbiamo avuto a disposizione un solo pirometro, si sono potuto osservare le temperature frontale e laterale una per volta e non contemporaneamente.

Per la temperatura frontale si è puntato il pirometro in modo rilevare la temperatura massima sulla faccia, e per questo si è dovuto escludere dall'area osservata il foro centrale del catodo, cioè il vuoto del canale per il passaggio dei gas da ionizzare, mentre per la temperatura laterale si è cercato di mirare il più vicino possibile al bordo esterno (vedi Figura 4.17).

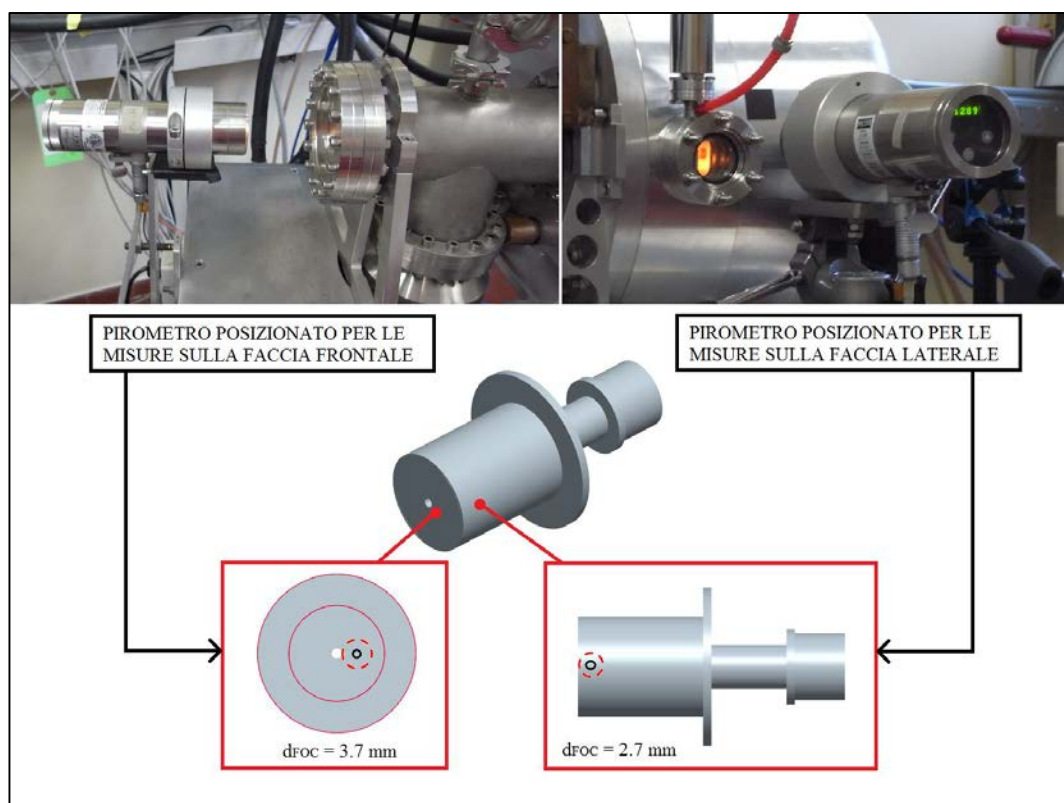


Figura 4.17: rappresentazione dei punti in cui è stato focalizzato il pirometro (cerchietti neri) per le misure di temperatura, sulle facce frontali e laterali del catodo. Le zone tratteggiate in rosso sono le aree in cui viene rilevato il campo termico, con l'indicazione relativa al diametro della zona di osservazione (d_{Foc}).

Sono stati esaminati due catodi realizzati con due diverse tecnologie: un catodo con saldatura TIG ed uno con saldatura LASER (per i dettagli sul tipo di saldatura si rimanda il lettore al Capitolo 5).

I risultati ottenuti vengono quindi confrontati con i valori ricavati dal modello FEM: per il confronto si è proceduto a ricavare dal modello numerico l'andamento della temperatura sulla faccia frontale, in senso radiale, e su quella laterale, in senso assiale. Quindi misurando la distanza del pirometro dall'oggetto misurato per i due diversi posizionamenti, si è potuto calcolare il fattore d , noto il fattore di risoluzione del pirometro, con la formula 4.1. Misurando semplicemente la distanza fra pirometro e posizione del catodo, si ottiene $D_{FRONT} = 550 \text{ mm}$ e $D_{LAT} = 400 \text{ mm}$ che inseriti nell'equazione danno $d_{FRONT} = 3.7 \text{ mm}$ e $d_{LAT} = 2.7 \text{ mm}$. Quindi, dagli andamenti della temperatura sul catodo, il valore preso per il confronto è stato quello ottenuto entro una distanza d dal bordo dell'oggetto, che nel caso della faccia frontale è il canale centrale, nel caso di quella laterale è il bordo esterno.

Le Tabella 4.4 e Tabella 4.5 riportano i dati relativi ai confronti fra dati numerici e sperimentali, dove questi ultimi sono ottenuti mediando i valori rilevati durante i vari cicli di riscaldamento e raffreddamento. Per il catodo TIG la media è stata ottenuta considerando due serie di misure, mentre per quello LASER una sola serie. Quando si parla di serie di misure, viene inteso che sono stati effettuati due cicli di riscaldamento ed uno di raffreddamento, cioè partendo da 280 A , si è saliti a 370 A , poi si è ripartiti tornando a 280 A e quindi nuovamente a 370 A . Perciò per il catodo TIG la media è effettuata su sei valori, mentre su quello LASER su tre. Si è osservato che i dati ottenuti sono sempre ripetibili fra le varie misure, i valori della temperatura per lo stesso valore di I_{LINE} erano sempre compresi in un intervallo di circa 10°C . Il diametro considerato per la valutazione delle temperature dei modelli FEM è, come già spiegato durante la descrizione del pirometro a infrarossi, di 3.7 mm per la faccia frontale e di 2.7 mm per quella laterale.

I_{LINE} [A]	T_{FRONT} [°C]			
	STANDARD (FEM)	HT (FEM)	TIG (EXP)	LASER (EXP)
280	1761	1664	1763	1780
290	1816	1717	1805	1820
300	1869	1769	1844	1859
310	1921	1819	1883	1898
320	1971	1868	1920	1936
330	2021	1916	1956	1974
340	2069	1963	1996	2011
350	2117	2009	2033	2045
360	2164	2054	2068	2078
370	2209	2098	2110	2122

Tabella 4.4: confronto fra i dati relativi ai modelli numerici e i dati sperimentali riguardanti la temperatura della faccia frontale del catodo. I dati dei modelli numerici rappresentano il modello STANDARD, che comprende le geometrie di anodo e scudi termici, e quello HT, che rappresenta la configurazione usata nelle prove termiche e con cui deve essere eseguito il confronto. Le serie sperimentali distinguono il catodo con saldatura TIG da quello con saldatura LASER. Il diametro su cui si è eseguita la media è $d_{FOC} = d_{FRONT} = 3.7$ mm.

I_{LINE} [A]	T_{LAT} [°C]			
	STANDARD (FEM)	HT (FEM)	TIG (EXP)	LASER (EXP)
280	1634	1513	1656	1627
290	1684	1560	1694	1670
300	1732	1607	1729	1704
310	1780	1652	1762	1739
320	1826	1695	1797	1773
330	1871	1738	1830	1806
340	1915	1779	1862	1838
350	1958	1819	1894	1866
360	2000	1859	1926	1900
370	2041	1897	1957	1931

Tabella 4.5: confronto fra i dati relativi ai modelli numerici e i dati sperimentali riguardanti la temperatura della faccia laterale del catodo. Le varie serie sono già state spiegate nella didascalia della Tabella 4.4. Il diametro su cui si è eseguita la media è $d_{FOC} = d_{LAT} = 2.7$ mm.

Di seguito sono anche riportati gli stessi dati di Tabella 4.4 e Tabella 4.5 in forma grafica, per una migliore comprensione delle differenze fra prove sperimentali e modello FEM (vedi Grafico 4.4 e Grafico 4.5). Il fatto di riportare anche i risultati relativi all'analisi del modello *STANDARD* consente una migliore valutazione di quanto il modello numerico si avvicini alla realtà sperimentale.

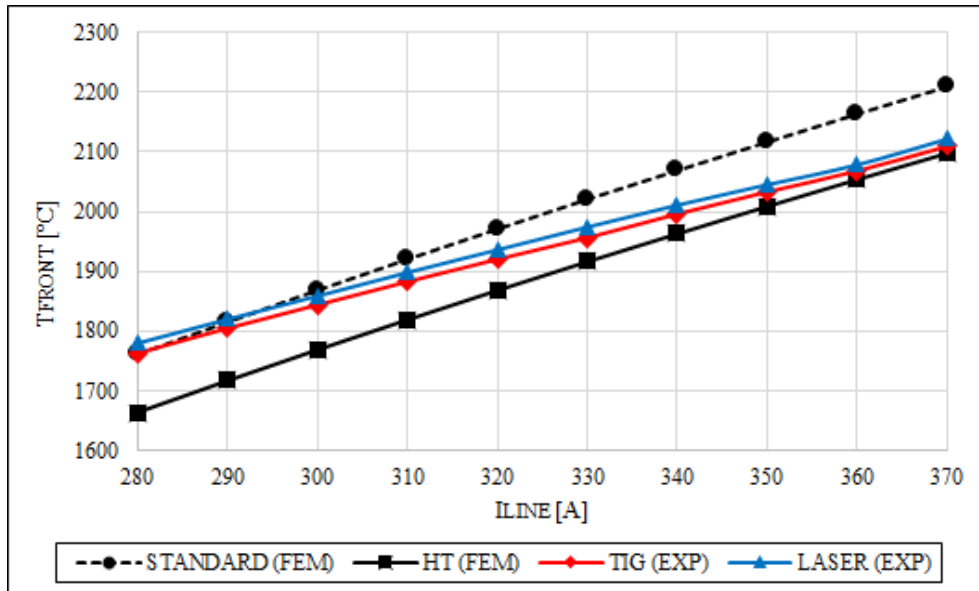


Grafico 4.4: andamento della temperatura rilevata sulla faccia frontale del catodo al variare della corrente riscaldante per i modelli numerici *STANDARD* e *HT*, e per le prove sperimentali eseguite su catodo saldato *TIG* oppure *LASER*.

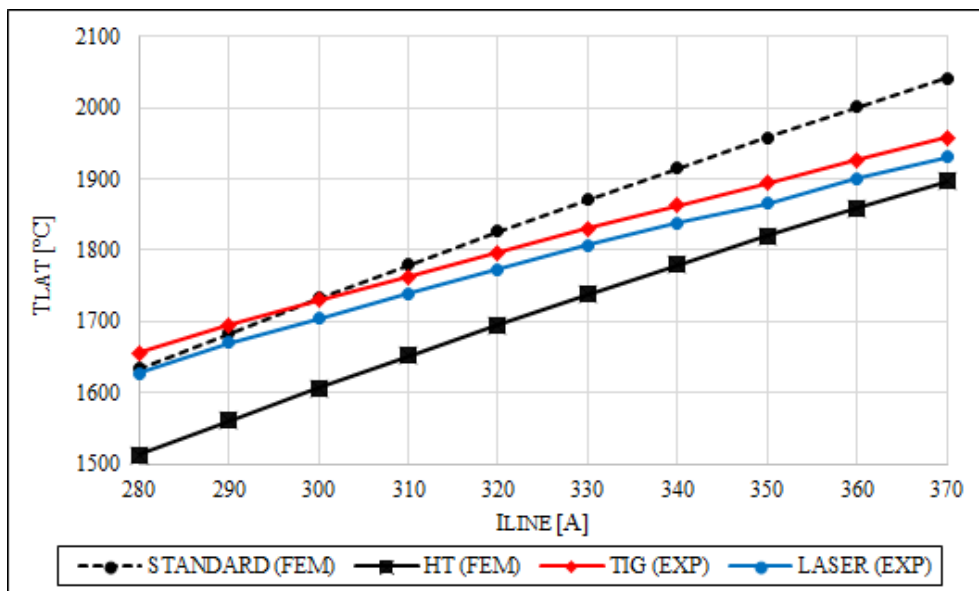


Grafico 4.5: andamento della temperatura rilevata sulla faccia laterale del catodo al variare della corrente riscaldante per i modelli numerici *STANDARD* e *HT*, e per le prove sperimentali eseguite su catodo saldato *TIG* oppure *LASER*.

La prima considerazione da fare è che i due catodi saldati con differenti tecnologie mostrano valori di temperatura molto simili: se infatti si pensa che spostamenti anche minimi del pirometro possano provocare differenze sulle temperature lette anche di 10°C , e che sia il posizionamento che la messa a fuoco viene eseguita manualmente dall'operatore, si capisce che osservando le differenze fra le temperature sperimentali, che sono nell'ordine di 30°C o parlando in termini percentuali, che non superano l'1%, possono essere considerate simili a meno dell'incertezza della misura. Quindi si può affermare che il tipo di tecnologia usata per produrre il catodo non modifica in modo sostanziale il campo di temperatura dell'oggetto stesso.

Una seconda considerazione riguarda il confronto relativo la temperatura fra modello numerico *HT* e prove sperimentali: innanzi tutto si può notare che durante le prove sono state rilevate temperature maggiori di quelle ricavate dall'analisi ad elementi finiti; questo fatto è spiegabile considerando che nella modellazione i volumi dei vari componenti sono considerati come se fossero saldati perfettamente fra di loro (attraverso il comando *VGLUE*). Questa è una condizione ideale che non si verifica nella realtà fisica: le zone dove due diverse parti vengono a contatto in realtà non combaciano perfettamente, perciò la corrente riscaldante attraversa superfici molto più piccole di quelle che considera il modello numerico: ciò fa sì che la resistenza al passaggio della corrente sia localmente più elevata di quella ideale, portando ad un riscaldamento maggiore dei corpi. Oltre a questo aspetto, per capire lo scostamento fra i valori trovati, c'è anche da considerare che le geometrie modellate hanno le dimensioni nominali nel modello numerico, mentre nella realtà sono realizzate con certe tolleranze, perciò una piccola variazione di diametro o spessore può portare a lievi variazioni del campo termico.

Più la temperatura cresce, più i vari componenti aderiscono l'uno all'altro avvicinandosi alle condizioni ideali che sono descritte dal modello ad elementi finiti, infatti si osserva un progressivo avvicinarsi delle curve sperimentali con quelle analitiche. In particolare, con correnti riscaldanti fra i 340 A ed i 370 A si ha una correlazione molto buona fra dati numerici e sperimentali per quanto riguarda la temperatura frontale. In Tabella 4.6 e Tabella 4.7 sono riportate le differenze calcolate tra le temperature riportate in precedenza. In particolare, per quanto riguarda la differenza di temperatura in termini assoluti si ha:

$$\Delta T_{FRONT,i} = T_{FRONT,HT} - T_{FRONT,i}; \quad (4.2)$$

dove il pedice i rappresenta la tecnologia di saldatura del catodo (LASER o TIG) ed il pedice HT indica il modello di riferimento con cui si sta eseguendo il confronto. Per la temperatura laterale vale la stessa trattazione.

I_{LINE} [A]	ΔT_{FRONT}			
	$\Delta T_{FRONT,TIG}$ [°C]	$\Delta T_{FRONT,LASER}$ [°C]	$\Delta T\%_{FRONT,TIG}$	$\Delta T\%_{FRONT,LASER}$
280	99	116	6.0	7.0
290	88	103	5.1	6.0
300	75	90	4.2	5.1
310	64	79	3.5	4.3
320	52	68	2.8	3.6
330	40	58	2.1	3.0
340	33	48	1.7	2.4
350	24	36	1.2	1.8
360	14	25	0.7	1.2
370	12	24	0.6	1.1

Tabella 4.6: differenze fra le temperature della faccia frontale del catodo nel modello numerico HT e nelle rilevazioni sperimentali sui pezzi realizzati con saldatura TIG e LASER, espressa in termini assoluti e percentuali.

I_{LINE} [A]	ΔT_{LAT}			
	$\Delta T_{LAT,TIG}$ [°C]	$\Delta T_{LAT,LASER}$ [°C]	$\Delta T\%_{TIG}$	$\Delta T\%_{LASER}$
280	144	114	9.5	7.6
290	134	110	8.6	7.0
300	123	98	7.6	6.1
310	111	87	6.7	5.3
320	101	77	6.0	4.6
330	93	69	5.3	3.9
340	83	59	4.7	3.3
350	74	46	4.1	2.5
360	68	42	3.6	2.2
370	60	34	3.2	1.8

Tabella 4.7: differenze fra le temperature della faccia laterale del catodo nel modello numerico HT e nelle rilevazioni sperimentali sui pezzi realizzati con saldatura TIG e LASER, espressa in termini assoluti e percentuali.

Si può quindi affermare che il modello ad elementi finiti approssima la realtà in maniera soddisfacente per quanto riguarda il campo termico del catodo, ed in particolar modo questa considerazione vale per le alte temperature, che rappresentano il campo di nostro interesse; perciò per lo studio del comportamento della sorgente al plasma il codice numerico rappresenta uno strumento efficace.

Un altro confronto da fare è relativo alla differenza di potenziale fra zona d'ingresso e di uscita della corrente riscaldante. I dati sperimentali sono ottenuti dalle letture effettuate direttamente sul trasformatore e dalla misura attraverso il multimetro della tensione presente tra piatto della camera da vuoto e parte esterna del puntone in Rame per il trasporto della corrente. Queste due zone rappresentano infatti i punti accessibili più vicini a quelli calcolati nel FEM, che sono la base della connessione elettrica e la superficie della flangia di supporto a contatto col piatto della camera. I dati sono riportati in Tabella 4.8, quelli sperimentali sono ottenuti con una media aritmetica fra le varie serie di misura; gli stessi valori sono rappresentati nel Grafico 4.6.

I_{LINE} [A]	ΔV_{FEM} [V]	CATODO TIG		CATODO LASER	
		ΔV_{AL} [V]	ΔV_{MIS} [V]	ΔV_{AL} [V]	ΔV_{MIS} [V]
280	1.58	3.81	3.13	3.61	2.97
290	1.66	3.95	3.27	3.74	3.08
300	1.75	4.04	3.35	3.87	3.19
310	1.84	4.17	3.45	3.99	3.31
320	1.94	4.27	3.58	4.12	3.43
330	2.02	4.42	3.71	4.25	3.55
340	2.12	4.54	3.81	4.38	3.68
350	2.21	4.62	3.88	4.51	3.78
360	2.31	4.74	4.00	4.64	3.91
370	2.40	4.87	4.10	4.79	4.03

Tabella 4.8: valori relativi alla differenza di potenziale sulla sorgente. ΔV_{FEM} indica il modello numerico, ΔV_{AL} è il valore letto sul trasformatore e ΔV_{MIS} è quello misurato col multimetro.

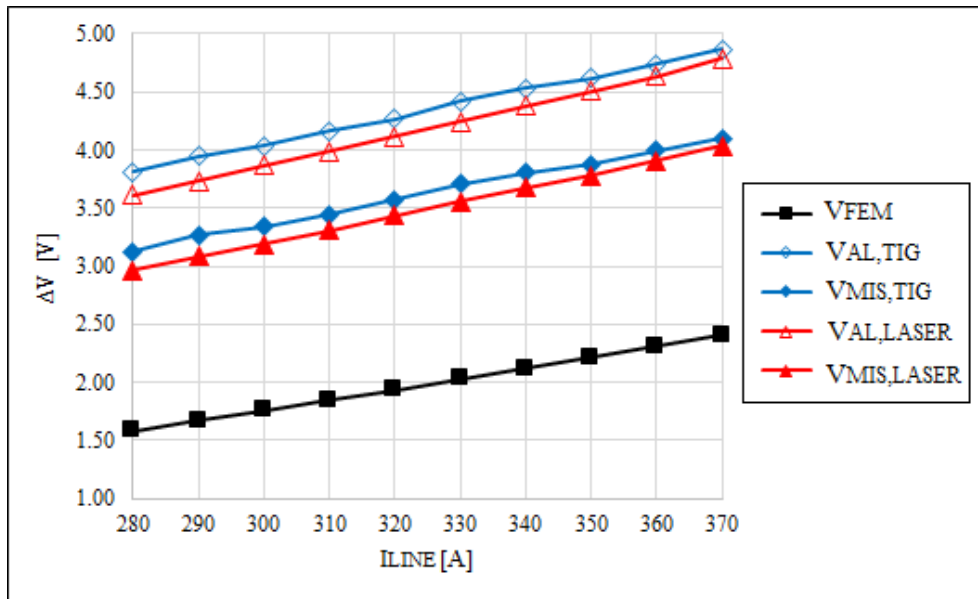


Grafico 4.6: andamento della differenza di potenziale dai dati riportati in Tabella 4.8.

Analizzando gli andamenti della differenza di potenziale possiamo inizialmente osservare che, come accadeva per la temperatura, anche in questo caso le curve relative ai grafici saldati con due differenti tecnologie non si discostano di molto: in altre parole, il tipo di saldatura non influenza il comportamento del catodo dal punto di vista termico e nemmeno dal punto di vista elettrico. Tuttavia è evidente che attraverso il modello numerico i valori calcolati sono molto minori di quelli calcolati durante le prove. Si possono dare due spiegazioni al riguardo: i dati relativi alle rilevazioni sperimentali fanno, come già spiegato, riferimento ai valori che applica in uscita il trasformatore ed a quelli letti manualmente su puntone di Rame e camera. Si nota che già fra le due curve relative alle prove c'è una differenza di circa $0.5 V$; bisogna ricordare che nel modello numerico non sono considerati puntone e morsetto di Rame, ma se dal punto di vista termico questa approssimazione poteva essere ritenuta accettabile, dal punto di vista elettrico potrebbe non esserlo perché si va di fatto a trascurare la resistenza di alcune parti del circuito elettrico, e quindi non considera la relativa caduta di potenziale portando ad una sottostima dei valori di tensione applicati. Il secondo punto riguarda invece la condizione, già descritta nel caso di verifica termica, di non perfetta adesione dei vari componenti l'uno con l'altro. Se in precedenza si era notato che la condizione di incollaggio dei volumi imposta al modello FEM poteva portare a sottostimare il campo termico, lo stesso vale per la differenza di potenziale: nelle zone che non si accoppiano perfettamente (con tolleranze non precise) il contatto fra i materiali avverrà su una superficie molto più piccola di quella "nominale", cioè pensata dal progettista. Perciò

attraverso una piccola superficie dovrà passare una corrente elevata, ed oltre ad un riscaldamento elevato maggiore di quello calcolato col modello numerico si verificherà la presenza di una “resistenza di contatto” non prevista inizialmente: il trasformatore dovrà imporre una tensione maggiore per far fronte alla caduta di potenziale che si verifica localmente. Questo fenomeno si evidenzia nel caso si stringano più o meno i collegamenti filettati dei componenti nel quale scorre la corrente: se due parti non vengono strette si nota come la tensione del trasformatore sarà maggiore.

Da questa analisi quindi, si può concludere che per quanto riguarda il comportamento termico della sorgente, il metodo degli elementi garantisce una buona confidenza sulla stima delle temperature in gioco, mentre per il comportamento elettrico il modello indicato non è sufficiente a descrivere la realtà sperimentale con un'approssimazione sufficientemente buona.

4.5. Misura delle deformazioni

Attraverso il sistema già descritto per l'acquisizione di fotografie del catodo mentre si trova ad alta temperatura si è cercato di sviluppare uno strumento in grado di misurare la deformazione della faccia frontale in senso assiale (cioè lungo l'asse di simmetria del catodo lungo cui dovrebbe scorrere il fascio di particelle da ionizzare). Questo aspetto è necessario per poter avere un termine di confronto con il modello numerico che sarà usato per studiare la sorgente. L'aspetto che concerne le deformazioni termiche è rilevante per quanto riguarda il comportamento della sorgente FEBIAD poiché, come è stato già spiegato, un'eccessiva dilatazione dell'oggetto verso l'anodo porterebbe ad un contatto con la griglia che andrebbe ad impedire il corretto comportamento della sorgente, mentre un'eventuale deformazione in senso opposto porterebbe ad un abbassamento della soglia definita dalla legge di Child-Langmuir, abbassando la corrente elettronica e quindi l'efficienza di ionizzazione.

Tali effetti potrebbero essere studiati con un modello numerico adeguato, dopo aver fatto dei confronti con la realtà sperimentale per capire quali errori si potrebbero commettere.

4.5.1. Sviluppo del modello FEM strutturale per il calcolo delle deformazioni in campo elasto-plastico

Nel Capitolo 3 è già stato spiegato perché, nel corso di questa tesi, si è scelto di disaccoppiare l'analisi in campo elettro-termico da quella in campo strutturale, usando il

risultato della prima (cioè il campo termico calcolato) come carico per la risoluzione della seconda. È questo il metodo che si è usato per calcolare le deformazioni della faccia frontale del catodo.

Per costruire un modello, bisogna partire dalle geometrie degli elementi che si considerano: nel nostro caso si è eseguita la semplificazione di considerare solo catodo e linea di trasferimento e supporre rigidi ed indeformabili gli elementi che sono a questi collegati. Si può comprendere come, per una descrizione precisa del sistema dal punto di vista del comportamento meccanico, bisogna includere nel calcolo il comportamento di tutti gli elementi che vanno ad alta temperatura. Si è però deciso di considerare soltanto catodo e linea di trasferimento. Per capire il senso di questa assunzione bisogna pensare a più aspetti: Ansys® permette di trasferire il carico termico proveniente da un'analisi precedente attraverso un file di risultati (con estensione *.rst*) facendo riferimento ai nodi. Tuttavia l'analisi strutturale richiede un reticolo molto più fine rispetto all'analisi elettro-termica, perciò non si può usare questa tecnica. Si potrebbe considerare una temperatura media su ogni volume che compone il modello, ma l'approssimazione non sarebbe trascurabile. Una seconda via sarebbe riportare una serie di andamenti della temperatura in varie zone della geometria, e risolvere un modello accoppiando i campi fisici termico e strutturale; si capisce che per una geometria complessa come quella della sorgente FEBIAD tale procedura richiede molto tempo. Anche adottando una di queste strategie di risoluzione e considerando il modello completo, bisognerebbe considerare le proprietà dei materiali a temperature compatibili con quelle del sistema: per il Tantalio si è proceduto a estrapolare i dati di interesse dalle curve ricavate in letteratura (vedi Appendice C) fino a valori di temperatura superiori ai 2000°C. Per Molibdeno, Acciaio e Allumina i dati non erano disponibili, perciò si è preferito non considerare i componenti realizzati con questi materiali, poiché con il campo termico del sistema si dovrebbe almeno assicurarsi se il comportamento meccanico del materiale sia lineare elastico o diventi non lineare. È chiaro d'altra parte che i vincoli che saranno imposti al sistema come rigidi in realtà dipendono da componenti deformabili.

Una volta deciso che sono catodo e linea di trasferimento i componenti che saranno inclusi nel modello, si può passare alla fase di modellazione.

I componenti che si stanno analizzando sono a geometria assialsimmetrica; l'uso di elementi piani sarebbe dunque una grande semplificazione per la risoluzione del problema in campo non lineare. Per poter sviluppare il modello in questo modo si deve ipotizzare che anche il campo termico sia a simmetria assiale: nonostante il foro le

temperature rispetto alla distanza radiale variano di molto poco, perciò l'ipotesi è accettabile, come mostra il Grafico 4.7.

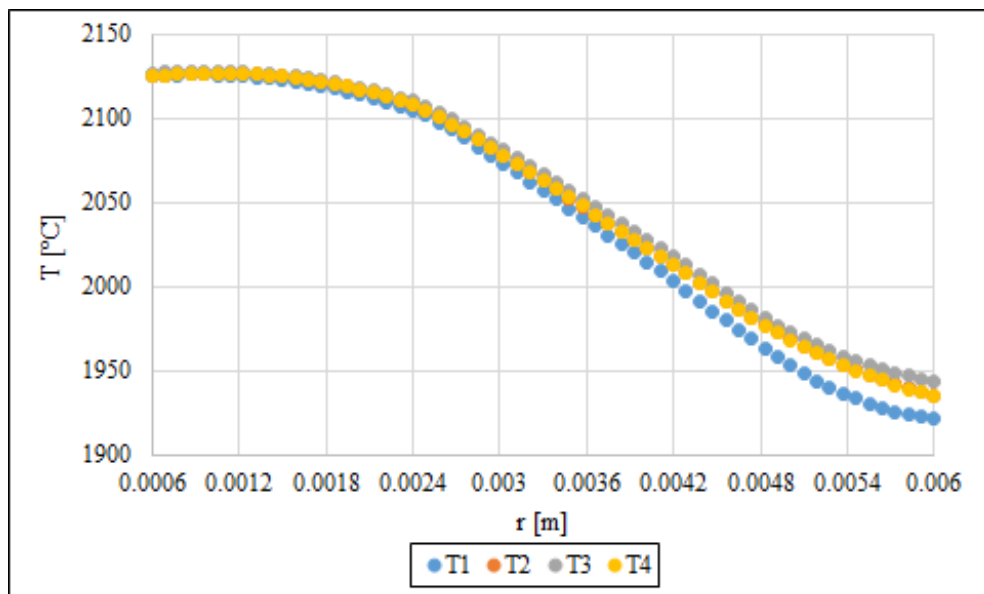


Grafico 4.7: temperatura rispetto distanza radiale rilevata in quattro diverse direzioni sulla faccia frontale del catodo. La direzione in cui viene calcolata $T1$ coincide con quella della finestra di osservazione in senso radiale. Le direzioni di $T2$, $T3$ e $T4$ sono ottenute ruotando rispettivamente di 90° , 180° e 270° attorno all'asse centrale rispetto alla direzione di $T1$ in senso antiorario. Si nota che lo scostamento fra le varie serie è minima, perciò il campo di temperatura può essere considerato assialsimmetrico.

Quindi, partendo dalle dimensioni dei componenti riportate nei modelli CAD si è potuto costruire in Ansys® lo schizzo della sezione del sistema formato da catodo e linea di trasferimento che rappresenta una sezione dei pezzi in un piano meridiano (piano passante per l'asse di simmetria, le geometrie sono rappresentate in Figura 4.18).

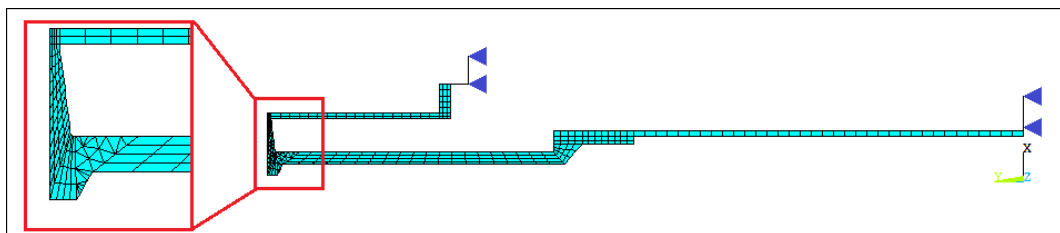


Figura 4.18: rappresentazione della geometria piana modella in Ansys®. Perché il programma riconosca la simmetria assiale, l'asse deve coincidere con la direzione y del sistema di riferimento assoluto. Sono inoltre indicati i vincoli che saranno applicati al modello (blocco dello spostamento in direzione y) ed è messo in evidenza un dettaglio della suddivisione adottata.

Anche in questo caso le due parti che formano i due diversi componenti sono stati considerati come saldate insieme. Per la discretizzazione delle aree è stata usata una suddivisione di tipo mappato (*mesh MAPPED*) che permette la creazione di elementi

regolari e di forma quadrangolare; l'unica zona in cui si è fatto ricorso ad elementi triangolari è quella vicino alla faccia frontale sul canale di passaggio dei gas da ionizzare, dove la geometria consentiva solo la discretizzazione con un reticolo libero (*mesh FREE*). I vincoli sono stati applicati impedendo la traslazione in senso assiale delle facce alla base della linea di trasferimento e della flangia di supporto del catodo, come si vede in Figura 4.18. Per il grado di libertà in senso radiale sul catodo, è stato anch'esso vincolato poiché si è ritenuto che il fissaggio eseguito con la ghiera di supporto impedisse eventuali spostamenti in tale direzione, mentre la linea di trasferimento è stata lasciata libera (si è verificato comunque che le differenze fra modelli con e senza vincolo radiale sono minori di 0.1 mm per quanto riguarda gli spostamenti in direzione assiale).

Per l'assegnazione del campo di temperatura ai corpi si è usato il seguente metodo: si è scelto come tipo di elemento il *PLANE223*, che permette analisi accoppiate nei campi elettrico, termico e strutturale. Attivando le corrette impostazioni, i nodi di tutti gli elementi sono stati dotati di tre gradi di libertà, di cui due sono di tipo strutturale (gli spostamenti in direzione assiale e radiale) e uno è termico (la temperatura). Dal modello tridimensionale in campo elettro-termico quindi, si sono ricavati gli andamenti di temperatura lungo diversi percorsi sui corpi considerati, oppure si sono presi i valori su vari spigoli per poi assegnarli ai vari punti; quindi sono state create delle tabelle per assegnare le corrette condizioni al contorno vincolando il grado di libertà termico sui vari lati del modello sviluppato. In questo modo si considera il solo flusso termico per conduzione all'interno dei materiali, che essendo un problema di tipo lineare non incide molto sul tempo di calcolo, mentre il materiale (Tantalio) viene considerato in campo elasto-plastico. In questo modo si evita di dover risolvere il problema del flusso termico radiativo e si possono sfruttare le soluzioni già ottenute dalle analisi precedenti. I punti e gli andamenti di temperatura assegnati al modello piano sono visibili in Figura 4.19.

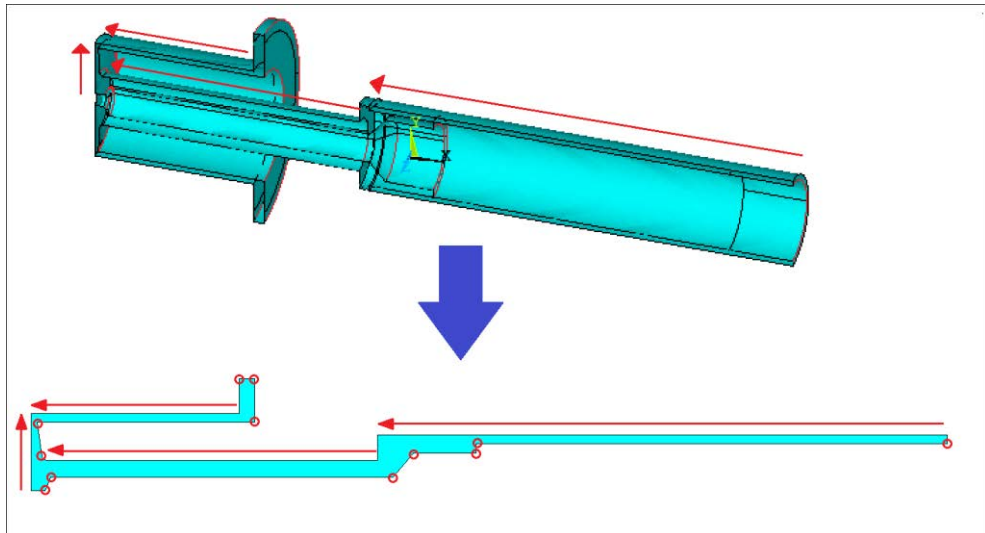


Figura 4.19: la rappresentazione mostra gli andamenti di temperatura che sono stati calcolati attraverso il modello tridimensionale e usati come condizione al contorno per il modello piano strutturale. Per riportare la temperatura sui singoli punti (segnati d cerchietti rossi in figura) è stata fatta la media delle temperature dei nodi appartenenti alle linee di bordo del modello solido.

Perciò, il campo di temperatura che si assegna al modello piano è del tutto simile a quello del modello solido elettro-termico. A questo punto non resta che calcolare le deformazioni; tuttavia in qualche caso il catodo usato poteva aver subito precedentemente delle deformazioni plastiche e la faccia frontale poteva presentare delle deformazioni iniziali a freddo, causate o da precedenti riscaldamenti o da deformazioni in campo plastico avvenute in fase di montaggio. Perché il modello fosse congruo con la realtà sperimentale, invece di bloccare la base della linea di trasferimento nella posizione iniziale, si è assegnato uno spostamento iniziale che, attraverso il campo di tensioni esercitato sul sistema, portasse la faccia frontale ad una condizione simile a quella del catodo reale deformato plasticamente già prima del riscaldamento (la deformazione plastica iniziale è spiegata nel paragrafo successivo). La deformazione iniziale da assegnare alla linea di trasferimento è stata calcolata per tentativi, imponendo vari valori fino a che lo spostamento del bordo frontale avesse un valore pari a quello misurato sull'oggetto.

La Figura 4.20 rappresenta la soluzione del modello FEM con deformazione a freddo imposta di 0.58 mm .

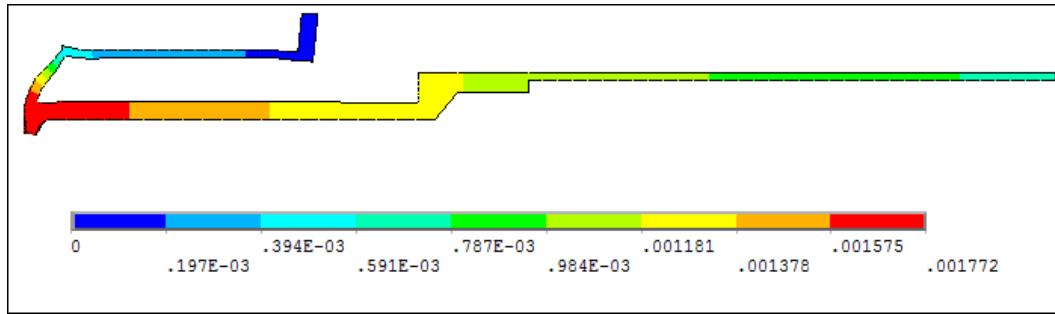


Figura 4.20: soluzione dell'analisi strutturale. Sull'immagine, che rappresenta la deformata, sono riportati i valori degli spostamenti lungo l'asse di simmetria centrale per correnti riscaldanti di 370 A.

I dati ottenuti in questo modo potranno quindi essere confrontati con le prove sperimentali eseguite con il catodo caldo, per poter capire quanto è affidabile il modello numerico. Infatti sappiamo che ci sono varie approssimazioni nel codice FEM sviluppato che potrebbero portare ad un calcolo errato delle deformazioni: oltre ai vincoli, considerati infinitamente rigidi quando invece sappiamo che i componenti che sostengono catodo e linea di trasferimento sono anch'esse deformabili e soggette a dilatazioni termiche, non sono stati considerati i fenomeni dipendenti dal tempo, in particolare lo scorrimento viscoso; inoltre si è già accennato come le proprietà del materiale (Tantalio) per temperature superiori ai 2000°C non siano state trovate direttamente attraverso prove sperimentali ma siano state estrapolate dalle curve presenti in letteratura (in particolare tale procedimento è stato eseguito per le curve vere σ - ϵ).

4.5.2. Descrizione dell'apparato sperimentale per la misura delle deformazioni

Il sistema messo a punto per il rilevamento sperimentale delle deformazioni è molto complesso e merita un'attenzione particolare nel corso di questo studio. Il processo di misurazione attraverso elaborazione d'immagine non è banale ed occorre attenzione ed esperienza per capire quale sia il grado di confidenza delle rilevazioni che si eseguono.

Per la stima delle deformazioni dei pezzi incandescenti si è preso spunto dai sistemi di controllo visivo che alcune aziende utilizzano per controllare la variazione di volume dei corpi che subiscono un processo di sinterizzazione. Nel nostro caso ciò che interessa misurare è lo spostamento del bordo appartenente alla faccia frontale del catodo, poiché è già stato ampiamente discusso quali problemi crei la sua interazione con la griglia di anodo. Per questo motivo è stato progettato e realizzato il sistema di supporto per il dispositivo ottico che, montato davanti alla finestra in direzione radiale, permette l'osservazione del catodo nella zona interessata. Il piatto di supporto è dotato di varie guide a cui collegare i blocchetti in Alluminio su cui è possibile collegare una qualsiasi

fotocamera, e prevede un alloggiamento per un dispositivo di supporto di filtri ottici, in caso la radiazione luminosa dell'oggetto sia troppo forte e non permetta la messa a fuoco. Il sistema era già stato rappresentato in Figura 4.14.

Il dispositivo ottico a nostra disposizione era una macchina fotografica Ricoh GX200 dotata di lente con focale $5.1-15.3\text{ mm}$. Avendo obiettivo di tipo grandangolare, non è la più indicata per fotografare oggetti in dettaglio, tuttavia si sono riuscite ad ottenere foto con discreta qualità. L'ideale comunque sarebbe scegliere il tipo di lente a seconda dell'ordine di grandezza delle dimensioni da misurare.

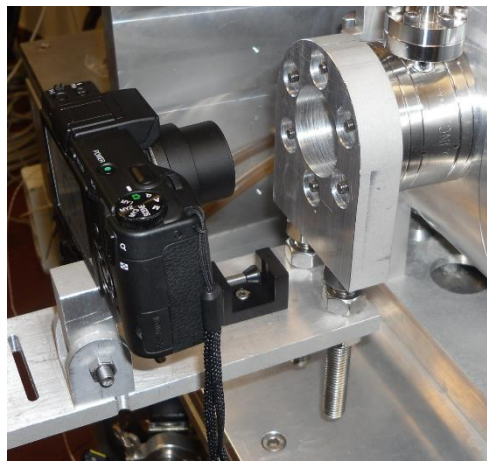


Figura 4.21: macchina fotografica usata per la prova montata sul sistema di supporto.

L'obbiettivo dell'esperienza era quello di fotografare il bordo del catodo mentre si trova ad alta temperatura. Con una serie di acquisizioni per ogni valore della corrente riscaldante è possibile, se la macchina è stata mantenuta fissa, confrontare la posizione di un bordo dell'oggetto fra due immagini consecutive e quindi, dopo un'opportuna taratura, convertire le informazioni visive in spostamenti.

Il sistema ideale comporterebbe l'utilizzo una fotocamera controllata in remoto da un comando automatico che, dopo aver imposto un valore della corrente riscaldante e aver atteso che il campo di temperatura sull'oggetto si stabilizzasse, acquisisca l'immagine autonomamente senza bisogno che un operatore vada ad interagire col sistema, col rischio di spostare anche lievemente l'apparecchio andando a rovinare la serie di misure.

Purtroppo non è stato possibile allestire un sistema di questo genere e le prove sono state svolte in modo più "artigianale", controllando manualmente sia la corrente sul catodo che il dispositivo ottico. Per evitare che la macchina fotografica subisse spostamenti, il sistema di supporto è stato progettato usando piastre di Alluminio molto spesse e barre filettate di diametro elevato, in modo da minimizzare il rischio di

deformazioni e da rendere l'apparato sperimentale più rigido possibile. Le guide e le barre filettate, oltre ai supporti Alluminio, hanno consentito una corretta orientazione della macchina fotografica, ed è stato così possibile immortalare l'oggetto incandescente in maniera soddisfacente, come si può notare in Figura 4.22.

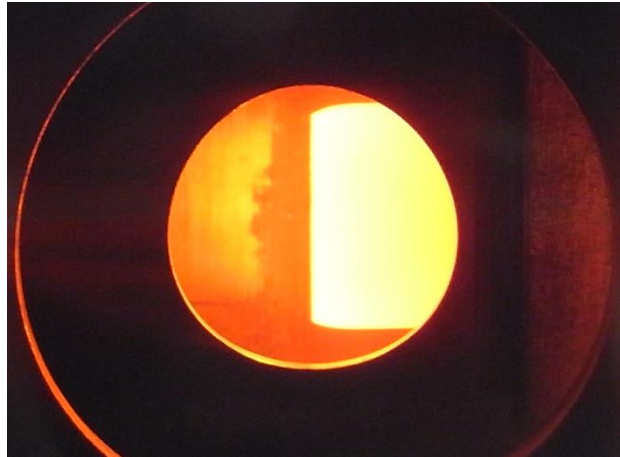


Figura 4.22: fotografia del catodo incandescente scattata durante le prove. Si può notare come sono evidenti le deformazioni nei pressi del bordo frontale, in questo caso infatti la faccia frontale era rientrata (era un catodo già deformato come quello in Figura 4.7) ed il bordo esterno si era deformato di conseguenza.

A questo punto è importante capire come, dalle immagini ottenute, è possibile risalire agli spostamenti. Innanzi è necessaria un'operazione di taratura del sistema di misura. In generale, si sarebbe dovuto applicare al posto del catodo una geometria di dimensioni note, acquisire un'immagine e capire a quale distanza corrispondeva un punto della fotografia in formato digitale (*pixel*). L'immagine infatti viene tradotta dal calcolatore in una matrice. Nel caso di foto a colori, la matrice è del tipo $b*h*s$, dove b e h sono la larghezza e l'altezza, mentre s vale solitamente 3 e corrisponde al numero di strati dell'immagine, uno per ogni colore rilevato dal sensore ottico. Se si rilevano foto in bianco e nero, s vale 1, perciò avrò una semplice matrice piana dove ogni elemento avrà un valore che corrisponderà al livello di grigio. In altre parole, ogni elemento della matrice rappresenta un quadratino che nella realtà corrisponderà ad una ben precisa dimensione.

Per la taratura del dispositivo, invece di inserire una geometria nota della camera, operazione che avrebbe comportato problemi per le temperature in gioco, per l'effetto di un elemento nuovo sui flussi termici e per il problema di dover smontare ogni volta la camera se si fosse voluta effettuare questa azione a freddo (compromettendo per altro il posizionamento della fotocamera), si è presa come riferimento una dimensione del catodo, ovvero il diametro del collare esterno. Con un calibro, prima della prova, a

dispositivo smontato, si è andati a misurare il diametro esatto, poi nella foto scattata a freddo, si è comparato tale diametro con la dimensione in pixel ottenendo un rapporto che è stato chiamato fattore di taratura o fattore di scala $f.t.$:

$$f.t. = \frac{d_{cat.}}{d_{pix}}, \quad (4.3)$$

dove d_{cat} è il diametro misurato e d_{pix} è la distanza in pixel ricavata dalla fotografia. Si nota che $f.t.$ ha dimensione $mm/pixel$.

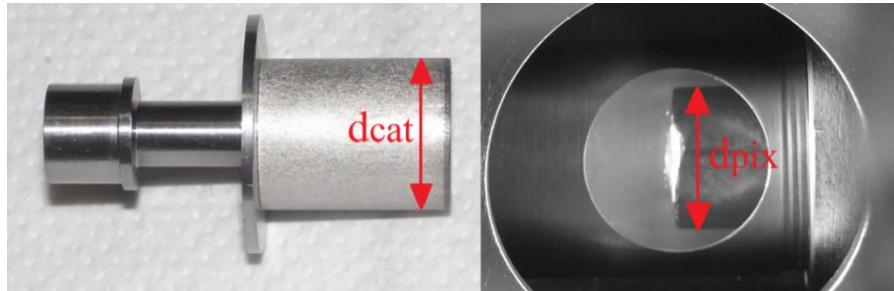


Figura 4.23: nell'immagine sono riportate le misure del diametro del collare, misurato con un calibro e con la sorgente non ancora assemblata, e la stessa dimensione misurata però in pixel, leggendo le ordinate dei punti del bordo dell'oggetto nella matrice che compone il formato digitale della foto.

Il problema che sorge a questo punto è il seguente: nella foto il bordo di un'oggetto non è ben definito, risulta bensì sfumato e irregolare. Come si può scegliere la giusta coordinata di un punto per la valutazione di d_{pix} , non è un problema banale. I programmi di elaborazione d'immagine mettono a disposizione una serie di strumenti di filtraggio che permettono di evidenziare i contorni. In particolare sono interessanti quelli basati su metodi che utilizzano le derivate: a seconda della variazione del valore dei livelli di grigio in una certa direzione, è possibile capire in maniera più accurata dove si trova il bordo dell'oggetto.

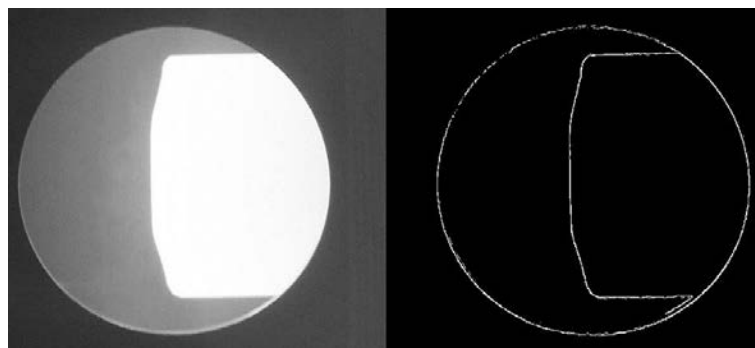


Figura 4.24: esempio di filtraggio di un'immagine attraverso un filtro Sobel. Regolando opportunamente alcuni valori di soglia è possibile evidenziare più o meno alcuni contorni.

Un programma che consente il filtraggio e l'elaborazione d'immagine è Matlab®, con cui è possibile leggere la foto digitale come una matrice, ritagliare l'area che ci interessa ed applicare il filtro migliore. Fra i filtri derivativi di vari tipi, il filtro Sobel è quello che si basa sul gradiente dell'andamento dei livelli di grigio, e può essere applicato in riferimento ai bordi orizzontali o verticali a seconda delle esigenze.

È chiaro che l'utilizzo di un sistema di filtraggio dell'immagine non è obbligatorio per procedere con la misura attraverso il sistema di visione, ma è d'aiuto nel caso i contorni dell'oggetto non siano ben definiti.

Per approfondimenti sull'elaborazione d'immagine e la teoria dei filtri si rimanda a [2].

Una volta definito il bordo del collare, è stato quindi possibile calcolare il fattore di scala. Risulta evidente che per una più corretta stima delle deformazioni occorre ripetere l'operazione di taratura ogni volta che il dispositivo ottico viene smontato o spostato. Per avere una migliore stima di $f.t.$ si sono considerate più d_{pix} , ognuna rilevata variando la quota orizzontale ed infine mediando i risultati.

Una volta eseguite queste operazioni preliminari, si può procedere con la misura. Dopo aver acquisito un'immagine di riferimento con l'oggetto freddo, si eseguono cicli di riscaldamento e raffreddamento, considerando gli stessi valori di correnti riscaldanti che erano stati indicati come campo di lavoro della sorgente e che sono stati usati per le analisi elettro-termiche. Quindi si cattura una foto per ogni valore di I_{LINE} fissato, con intervallo di $10 A$ fra un'acquisizione e l'altra. In seguito, fissando una riga nella matrice dell'immagine che rappresenta l'ordinata dei pixel, si è andati a leggere su quale colonna si trovasse il bordo del catodo, cioè quale fosse l'ascissa. Andando a verificare la variazione della posizione dei pixel del contorno dell'oggetto in senso orizzontale, si è quindi potuto stimare lo spostamento della faccia frontale del catodo espresso in pixel, e attraverso $f.t.$ risalire al valore in millimetri.

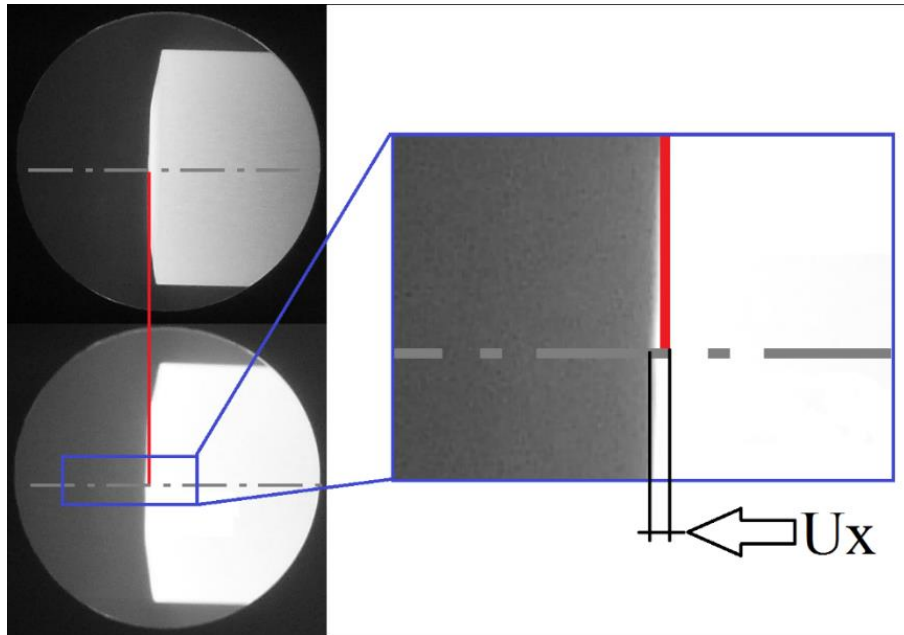


Figura 4.25: rappresentazione dello spostamento che si osserva imponendo due diversi valori della corrente riscaldante sul catodo. Si è calcolato che ogni pixel corrisponde ad una distanza di 0.03 mm, perciò si capisce che la deformazione rappresentata corrisponde a qualche decimo di millimetro.

Per riuscire ad ottenere fotografie di qualità ancora migliore, prima di eseguire un filtraggio digitale sono stati usati dei filtri ottici, che non sono altro che lenti scure che bloccano parte della radiazione consentendo di avere un'immagine più nitida. I filtri usati durante l'esperienza avevano una fattore di riduzione pari a 2 ed a 4. Il fattore di riduzione f indica il reciproco della frazione di radiazione luminosa a cui è consentito il passaggio, quindi con fattore pari a 2 passa il 50% della luce totale, mentre con 4 solamente il 25%. In particolare, si avevano a disposizione due filtri con $f = 4$ ed uno con $f = 2$, che sono stati usati singolarmente oppure in serie, a seconda della luminosità del catodo al momento dell'acquisizione dell'immagine.

Per il calcolo degli spostamenti per ogni valore della corrente riscaldante si può dunque procedere in due modi: il più semplice è procedere manualmente andando a leggere su ogni su ogni immagine, una volta scelta una riga orizzontale, il valore della colonna del pixel di bordo e quindi riportando i dati ottenuti in una tabella dove si fa la differenza tra il valore della colonna del contorno sulla foto dell'oggetto freddo e quello della foto scattata con una certa I_{LINE} impostata. Quindi moltiplicando per $f \cdot t$ si ottiene lo spostamento in millimetri. Allo stesso si può invece scrivere un codice con Matlab®, che legga come ingresso le varie fotografie, calcoli dal caso del catodo freddo il valore di $f \cdot t$ e confronti anche la foto del sistema non deformato con quelle dopo il riscaldamento, fornendo in uscita i valori della deformazione per ogni I_{LINE} . Il codice automatico, che

può essere molto comodo, può portare però a valutare i dati in modo errato se non si considerano eventuali spostamenti della macchina fotografica: poiché non si disponeva di un controllo remoto, è stato infatti necessario premere il tasto di controllo dell'otturatore direttamente sul dispositivo ottico, con la possibilità di causare piccoli spostamenti. Nel caso gli andamenti trovati siano risultati molto irregolari, si è proceduto ad una verifica manuale dei valori andando a considerare come riferimento un punto del contorno del foro del distanziale in Acciaio che si suppone subisca deformazioni trascurabili rispetto al reato del sistema. Quindi, se tale punto fisso risulti spostato in orizzontale fra una acquisizione e l'altra è dovuto ad uno spostamento del sistema ottico e non ad una deformazione termica, è possibile quindi correggere la misura andando a sottrarre allo spostamento misurato sul catodo lo spostamento rigido della fotocamera. Per prove di questo tipo l'ideale sarebbe comunque segnare prima di cominciare la misura, un punto di riferimento fisso, possibilmente all'esterno della camera, così da avere una stima precisa degli spostamenti del sistema di misura.

Occorre fare una precisazione sull'immagine del catodo che si ottiene quando l'oggetto è freddo. Infatti l'immagine viene presa illuminando l'oggetto con una lampada dalla luce che si ha a disposizione dalla finestra di osservazione in direzione assiale. Il fatto che i raggi luminosi non siano prodotti dall'oggetto incandescente porta ad avere una minore definizione per quanto riguarda i bordi: eventuali riflessi o sfumature possono portare a problemi durante il filtraggio o per la corretta lettura della posizione. Inoltre bisogna sottolineare che il catodo potrebbe avere subito deformazioni precedenti: la faccia frontale potrebbe essere spostata in avanti o all'indietro rispetto alla configurazione non deformata, di qualche decimo di millimetro: tale spostamento, di tipo plastico poiché non viene recuperato quando cessano gli sforzi sull'oggetto può essere dovuto a dilatazioni termiche precedenti oppure a sforzi meccanici a freddo, avvenuti ad esempio durante la fase di montaggio. Nel caso sia presente una deformazione iniziale, si dovranno distinguere gli spostamenti totali, calcolati rispetto alla configurazione iniziale con il bordo perfettamente piatto, e gli spostamenti dovuti alla dilatazione termica, calcolati prendendo come riferimento l'oggetto freddo con le eventuali deformazioni plastiche iniziali.

4.5.3. Confronto fra dati sperimentali e numerici

Quindi, una volta impostato correttamente il sistema di misura, si può procedere alla raccolta dei dati ed al confronto con i risultati ottenuti col modello FEM.

Prima di esaminare i valori numerici, si vogliono mettere in evidenza due osservazioni ottenute dalle esperienze di carattere pratico, che sono di aiuto per comprendere le caratteristiche meccaniche del catodo.

Quando si è esaminato il catodo con saldatura TIG, l'oggetto di partenza era perfettamente piatto con geometria regolare. Fissando il sistema di bloccaggio della linea di trasferimento, e quindi andando ad esercitare una pressione sul canale assiale del componente, si è verificata una deformazione plastica della faccia frontale. Questo ha messo in evidenza un punto fondamentale, cioè che lo spessore ridotto della faccia frontale rende l'oggetto molto delicato, e in fase di montaggio è richiesta una cura particolare per evitare deformazioni che possono rivelarsi dannose per il funzionamento della sorgente FEBIAD. La deformazione plastica esaminata è rappresentata in Figura 4.26.



Figura 4.26: catodo saldato TIG prima (a sinistra) e dopo (a destra) il montaggio. Si nota come la faccia frontale si sia deformata in avanti.

Una seconda osservazione riguarda invece il riscaldamento dell'oggetto, questa volta il catodo esaminato è quello con saldatura LASER, e si è osservato che anche il riscaldamento induce nell'oggetto una deformazione plastica che non viene recuperata col raffreddamento. In altre parole, la faccia frontale, oltre a determinare il comportamento della sorgente per quanto riguarda corrente elettronica e quindi efficienza di ionizzazione, è una zona critica anche dal punto di vista strutturale.

Si possono quindi esaminare i risultati ottenuti. Per primo è stato esaminato il catodo TIG. La deformazione dell'oggetto a freddo è stata misurata di 0.59 mm . Negli andamenti che saranno riportati in seguito, i valori della deformazione U_y (in senso assiale) saranno quindi la deformazione a freddo sommata a quella a caldo, cioè quella totale rispetto all'oggetto non deformato. Per calcolare i soli spostamenti dovuti all'effetto termico basterà sottrarre ai valori riportati la deformazione a freddo.

CATODO SALDATO TIG						
<i>I</i>LINE [A]	<i>U</i>_{y,FEM} [mm]	<i>U</i>_{y,raffr1} [mm]	<i>U</i>_{y,risc1} [mm]	<i>U</i>_{y,raffr2} [mm]	<i>U</i>_{y,risc2} [mm]	<i>U</i>_{y,medio} [mm]
280	1.37	1.10	1.07	1.00	1.10	1.07
290	1.41	1.10	1.07	1.03	1.17	1.09
300	1.45	1.10	1.10	1.03	1.17	1.10
310	1.49	1.10	1.10	1.07	1.17	1.11
320	1.53	1.10	1.14	1.10	1.17	1.13
330	1.58	1.10	1.14	1.14	1.24	1.16
340	1.63	1.10	1.17	1.17	1.24	1.17
350	1.68	1.10	1.17	1.21	1.24	1.18
360	1.73	1.14	1.17	1.24	1.28	1.21
370	1.78	1.14	1.17	1.24	1.28	1.21

Tabella 4.9: risultati del calcolo delle deformazioni in senso assiale del bordo della faccia frontale del catodo. L'asse di simmetria coincide con l'asse *y* nel sistema di riferimento del modello numerico. Le prove sperimentali sono state eseguite su un catodo con saldatura TIG, e sono riportati due cicli di riscaldamento da 280 A fino a 370 A (*U*_{y,risc1} e *U*_{y,risc2}) e due cicli di raffreddamento (*U*_{y,raffr1} e *U*_{y,raffr2}). L'ultima colonna riporta la media dei valori sperimentali.

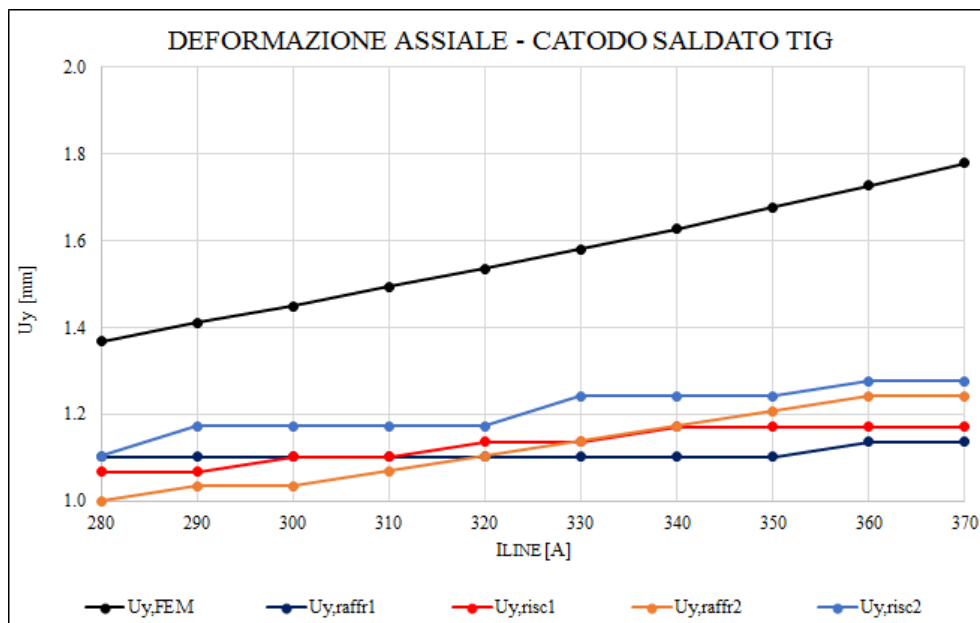


Grafico 4.8: il grafico riporta il confronto dei dati presentati in Tabella 4.9, riguardante le deformazioni calcolate col modello numerico (linea nera) e gli andamenti ottenuti attraverso il sistema sperimentale.

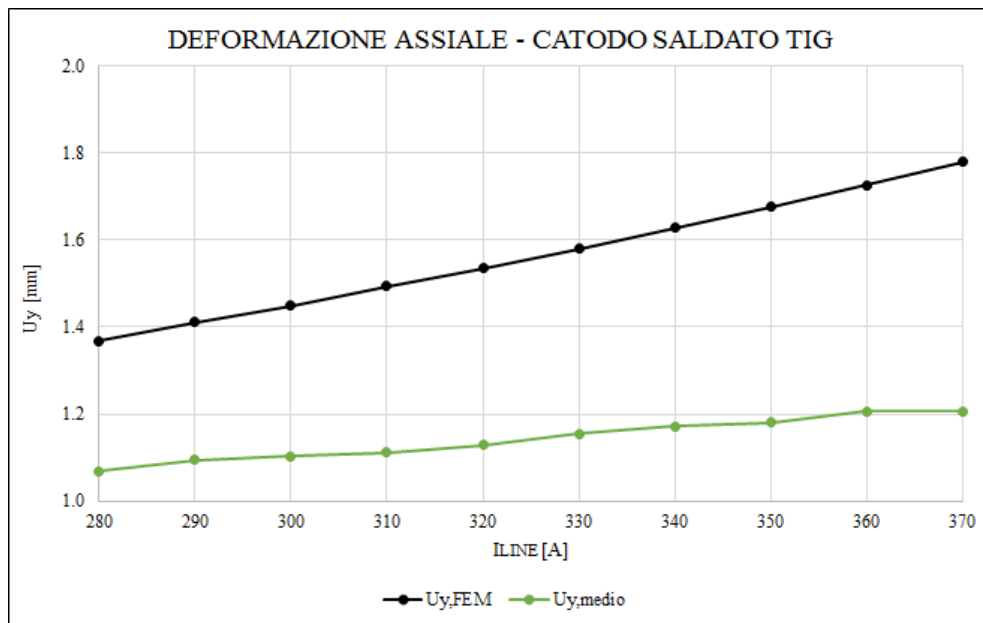


Grafico 4.9: il grafico riporta il confronto dei dati presentati in Tabella 4.9, riguardante le deformazioni calcolate col modello numerico (linea nera) e l'andamento ottenuto mediando i dati ricavati attraverso il sistema sperimentale.

Nei diagrammi che riportano i dati relativi alle deformazioni descritti in Tabella 4.9 (ovvero Grafico 4.8 e Grafico 4.9) si può effettuare il confronto visivo fra curva numerica e sperimentale. In tutti i rilevamenti effettuati si nota che la deformazione aumenta al crescere della corrente riscaldante e quindi della temperatura, come atteso. L'andamento ottenuto dal modello numerico sembra sovrastimare gli spostamenti in gioco, ma anche questo aspetto era stato previsto, poiché è già stato spiegato che nella modellazione sono stati imposti dei vincoli rigidi che non corrispondono alle condizioni verificate nella realtà sperimentale, poiché tutto il sistema è soggetto a temperature elevate e le parti sono tutte deformabili (anche il blocco sulla linea di trasferimento inevitabilmente concederà qualche piccola traslazione). La differenza massima fra le due curve è di circa 0.5 mm , che non è un valore trascurabile, ma considerando la condizione già esaminata e, pensando che l'incertezza sulla misura per il sistema ottico può essere anche superiore a 0.1 mm , si può ritenere che sviluppando l'apparato di misura e con una modellazione dei vincoli strutturali più precisa, le due curve si dovrebbero avvicinare. Non si deve inoltre dimenticare che le curve delle proprietà del materiale sono state ottenute estrapolando i dati per le alte temperature, e anche questo aspetto può avere un'influenza sui risultati ottenuti.

Nonostante tutto il modello numerico e i dati sperimentali sono confrontabili, inoltre il fatto che il codice FEM sia in vantaggio di sicurezza è un punto molto importante.

Quando si parla di sviluppo dell'apparato sperimentale si intende in particolare ad un controllo remoto che permetta lasciare imperturbato il dispositivo ottico durante il ciclo di riscaldamento o raffreddamento, in modo che l'inquadratura cada sempre nella stessa posizione, e di usare un punto di riferimento su un elemento fisso per la verifica del posizionamento. Questi accorgimenti, che si consiglia di adottare nel caso si volesse seguire un approccio simile, non sono stati considerati per la mancanza di mezzi (nel caso del controllo remoto per la fotocamera) oppure perché pensati dopo la realizzazione delle prove: questa è stata la prima esperienza di questo tipo eseguita ai Laboratori Nazionali di Legnaro ed è stata perciò un momento di sviluppo di una nuova metodologia oltre che una fase di misura.

La stessa analisi è stata ripetuta per il catodo con saldatura LASER, con la differenza che in questo caso è stato effettuato un solo ciclo di raffreddamento. I dati sono riportati in Tabella 4.10, in questo caso la deformazione iniziale era pari a 0.44 mm .

I_{LINE} [A]	$U_{y,FEM}$ [mm]	$U_{y,risc1}$ [mm]	$U_{y,raffr1}$ [mm]	$U_{y,risc2}$ [mm]	$U_{y,medio}$ [mm]
280	1.22	1.02	0.71	0.92	0.88
290	1.27	1.02	0.78	0.95	0.92
300	1.30	1.02	0.85	0.92	0.93
310	1.35	1.02	0.85	0.95	0.94
320	1.39	1.02	0.88	0.95	0.95
330	1.43	1.08	0.88	0.98	0.98
340	1.48	1.08	0.92	0.95	0.98
350	1.53	1.12	0.98	0.95	1.02
360	1.58	1.12	1.02	1.02	1.05
370	1.63	1.15	1.05	1.02	1.07

Tabella 4.10: risultati del calcolo delle deformazioni in senso assiale del bordo della faccia frontale del catodo. L'asse di simmetria coincide con l'asse y nel sistema di riferimento del modello numerico. Le prove sperimentali sono state eseguite su un catodo con saldatura LASER, e sono riportati due cicli di riscaldamento da 280 A fino a 370 A ($U_{y,risc1}$ e $U_{y,risc2}$) e un solo ciclo di raffreddamento ($U_{y,raffr1}$). L'ultima colonna riporta la media dei valori sperimentali.

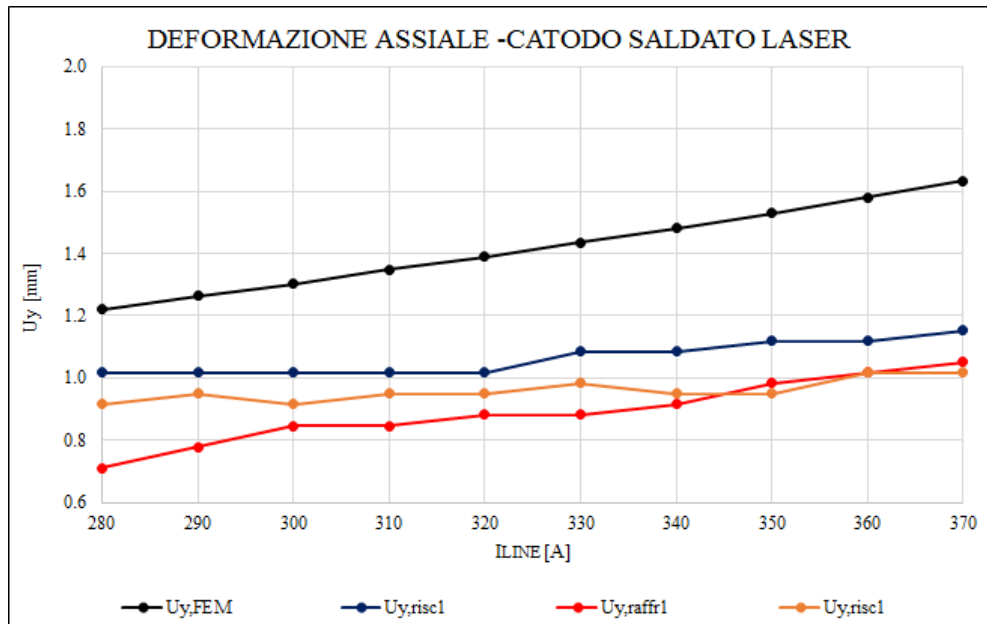


Grafico 4.10: il grafico riporta il confronto dei dati presentati in Tabella 4.10, riguardante le deformazioni calcolate col modello numerico (linea nera) e gli andamenti ottenuti attraverso il sistema sperimentale.

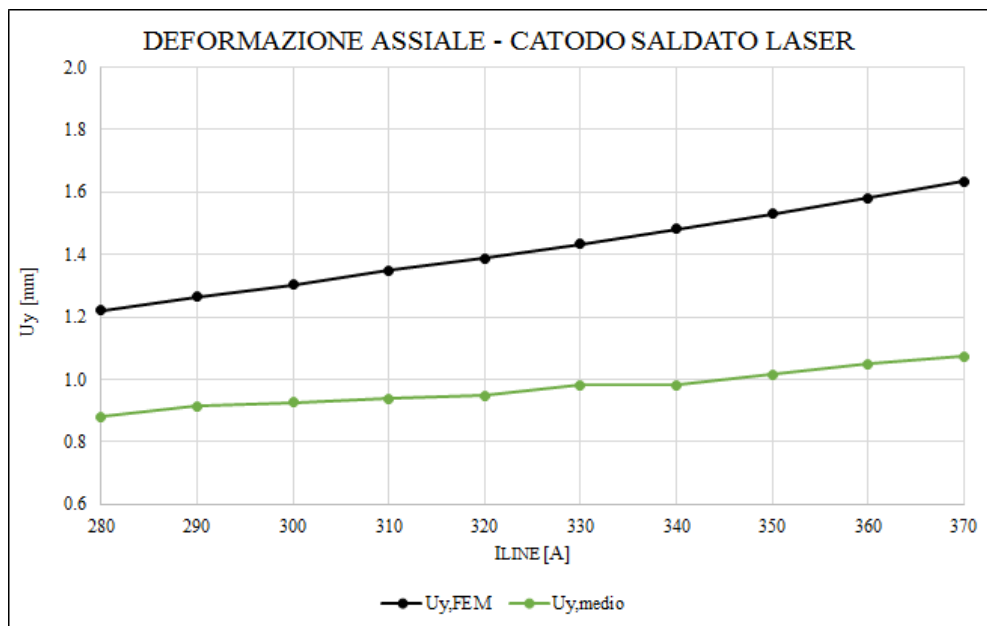


Grafico 4.11: il grafico riporta il confronto dei dati presentati in Tabella 4.10, riguardante le deformazioni calcolate col modello numerico (linea nera) e l'andamento ottenuto mediando i dati ricavati attraverso il sistema sperimentale.

Nel Grafico 4.10 e nel Grafico 4.11 sono riportati i dati relativi alle deformazioni del catodo saldato LASER, i cui valori sono riportati in Tabella 4.10. Chiaramente i valori non coincidono con quelli ricavati dal catodo TIG, poiché la deformazione plastica iniziale della faccia frontale era diversa. Si nota che in questo caso, il confronto evidenzia un'affinità fra dati sperimentali e numerici simile a quella riscontrata in precedenza.

Si può concludere che per un confronto delle deformazioni su un sistema di questo tipo, per una stima più accurata sarebbe necessario un sistema di vincoli più vicino a quello della realtà sperimentale. Il Multi-Field Solver, in questo caso, permetterebbe di risolvere il problema in modo più agevole.

Per confrontare i dati fra i catodi realizzati con le diverse tecnologie è possibile epurare i valori dello spostamento assoluto dalla deformazione iniziale, così da avere un'idea della sola dilatazione dovuta all'effetto termico.

I_{LINE} [A]	$U_{y,FEM,0.58}$ [mm]	$U_{y,FEM,0.44}$ [mm]	$U_{y,TIG}$ [mm]	$U_{y,LASER}$ [mm]
280	0.78	0.78	0.48	0.44
290	0.83	0.82	0.51	0.47
300	0.86	0.86	0.52	0.49
310	0.91	0.91	0.53	0.50
320	0.95	0.95	0.54	0.51
330	0.99	0.99	0.57	0.54
340	1.04	1.04	0.59	0.54
350	1.09	1.09	0.60	0.58
360	1.14	1.14	0.62	0.61
370	1.19	1.19	0.62	0.63

Tabella 4.11: sono riportati i dati relativi alla sola deformazione causata per l'effetto termico sulla faccia frontale del catodo. Per gli andamenti ricavati dal modello FEM si sono riportati i risultati relativi all'analisi con deformazione iniziale 0.58 mm ($U_{y,FEM,0.58}$) e 0.44 mm ($U_{y,FEM,0.44}$); gli andamenti sperimentali sono ottenuti dalle medie fra i vari andamenti.

Dalla Tabella 4.11, in cui i valori sono ottenuti dai dati riportati in precedenza a cui è stata semplicemente sottratta la deformazione iniziale, si evidenzia ancora una volta la differenza fra risultati ottenuti dal modello numerico e dati sperimentali. Oltre a questo però, c'è un altro risultato da sottolineare: sia dal codice FEM che dalla prova risulta che la deformazione iniziale non influisce sulla dilatazione termica se non in modo minimo, e questo fatto poteva essere anticipato osservando che la lunghezza lungo l'asse del sistema catodo e linea di trasferimento variava di qualche decimo di millimetro, cioè di una quantità trascurabile, quindi l'espansione differenziale dovuta al campo termico risultava avere effetto sulla stessa lunghezza.

Questo dettaglio ci fornisce un'indicazione utile per il montaggio della sorgente: se infatti la distanza tra catodo e griglia di anodo viene misurata tra i punti più vicini sui due oggetti, e si rispettano le regole che indicano un divario minimo fra i componenti di 0.9 mm , non si corre il rischio che si verifichi il contatto tra i due componenti. Il valore di 0.9 mm risulta accettabile se si considerano i valori degli spostamenti calcolati con le prove sperimentali, mentre il modello FEM indica che potrebbe non essere sufficiente: il calcolo è in vantaggio di sicurezza dal punto di vista del contatto anodo – catodo.

I dati di Tabella 4.11 sono rappresentati nel Grafico 4.12.

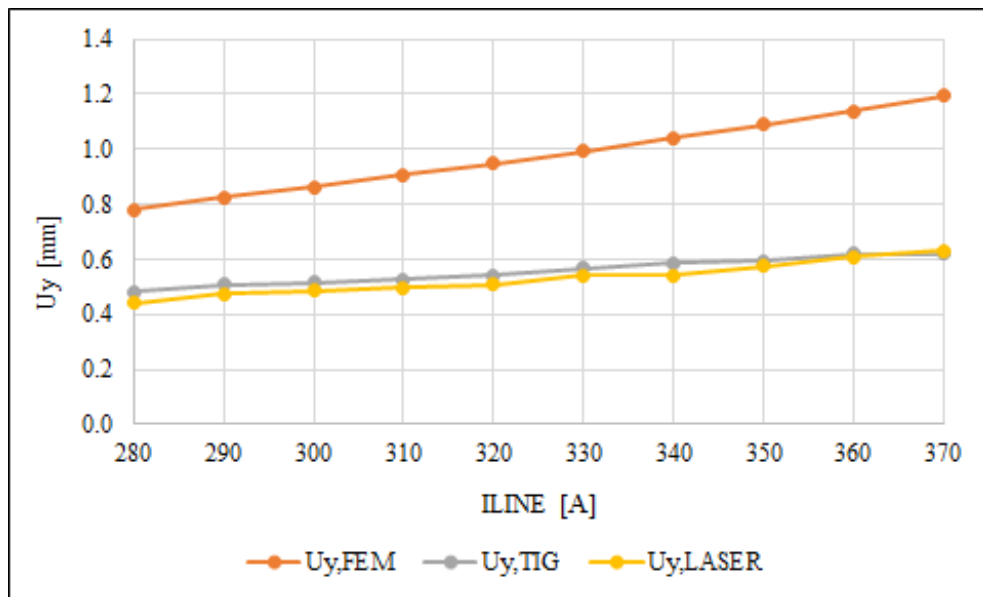


Grafico 4.12: andamento delle sole dilatazioni dovute al campo termico calcolate nel modello FEM e sui catodi saldati con due differenti tecnologie.

4.6. Conclusioni ed applicazioni future

Le prove sperimentali ed il confronto dei dati ottenuti con quelli calcolati attraverso il metodo degli elementi finiti portano a concludere che attraverso un programma come Ansys®, con un modello creato in modo preciso (specialmente per quanto riguarda il sistema di vincoli e le proprietà del materiale) e con lo studio di un corretto sistema di semplificazioni e condizioni al contorno, è possibile per un progettista avere un'idea del comportamento elettrico, termico e strutturale di un oggetto complesso come la sorgente di ionizzazione tipo FEBIAD. Dalla conoscenza delle leggi fisiche che ne regolano i fenomeni quindi, sarà possibile andare a calcolare quei parametri che possono dare un'indicazione del comportamento della sorgente per quanto riguarda l'efficienza di ionizzazione (in particolare la corrente elettronica emessa dal catodo).

È stato dimostrato che già con l'utilizzo di strumenti e modelli semplici come quelli descritti nel corso di questo Capitolo, si può avere una stima anche su come risponde la FEBIAD alle condizioni di lavoro. Con una modellazione più complessa quindi, ponendo una particolare attenzione su proprietà del materiale e vincoli strutturali, e magari considerando i fenomeni dipendenti dal tempo come lo scorrimento viscoso, sarebbe possibile calcolare per ogni condizione di lavoro l'effettivo stato della sorgente, e quindi attraverso le leggi di Richardson e Child-Langmuir risalire alla corrente elettronica, per poter avvicinarsi maggiormente alla situazione più conveniente e cioè portare il catodo alla massima temperatura possibile senza giungere alla saturazione del numero di elettroni a disposizione per il processo di ionizzazione.

Uno sviluppo possibile per l'utilizzo dei modelli descritti in questo Capitolo è la stima delle deformazioni nel caso dell'utilizzo della configurazione bersaglio radioattivo – sorgente di ionizzazione (in Figura 4.27).

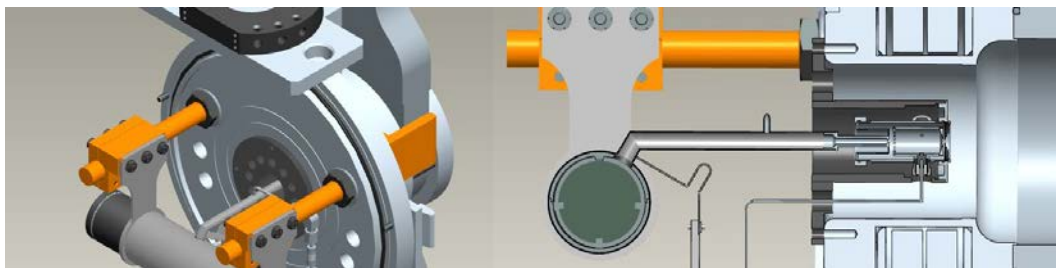


Figura 4.27: modello CAD del sistema formato da target radioattivo e sorgente di ionizzazione FEBIAD. Si può notare come la lunghezza della linea di trasferimento aumenti rispetto alla configurazione che prevede solo la sorgente, perciò anche le dilatazioni termiche porteranno a deformazioni maggiori.

Nel modello si può notare che la linea di trasferimento è molto più lunga di quella usata nel caso della configurazione con la sola linea di connessione per il trasporto della corrente riscaldante. Il bersaglio con il suo sistema di raffreddamento costituisce un vincolo estremamente rigido che blocca la linea di trasferimento. Si potrà assumere come vincolo ideale con rigidità infinita, perciò è comprensibile come risulterà importante sviluppare un sistema di sostegno per evitare che gli spostamenti eccessivi dovuti alle dilatazioni termiche possano rovinare il sistema a tal punto da causare rotture premature durante le fasi di lavoro, che sarebbero problematiche durante la produzione di isotopi radioattivi.

Bibliografia

- [1]. Modline® 5 Infrared Thermometer, *Installation and Operation Manual*, Ircon Inc.©, 2007
- [2]. Giulio Fanti, *Sistemi di visione per misure dimensionali*, Libreria Progetto, 2007.

CAPITOLO 5

PROVE DI EFFICIENZA SULLA SORGENTE DI IONIZZAZIONE AL PLASMA

5.1. Introduzione

Gli studi sui modelli numerici della sorgente FEBIAD presentati nei Capitoli 3 e 4 vengono sviluppati al fine di produrre una stima della corrente elettronica, parametro che è stato preso come riferimento per capire se la ionizzazione avviene con efficienza maggiore o minore nelle condizioni di lavoro, come si vedrà nel corso della trattazione seguente.

Occorre quindi capire quale sia la relazione tra la corrente elettronica emessa dal catodo e l'efficienza di ionizzazione della sorgente, e per farlo bisogna montare collegare il sistema da studiare ad un apparato che consenta la formazione e la gestione degli ioni.

L'efficienza di ionizzazione, definita come rapporto fra il numero di atomi ionizzati di un certo elemento ed il numero totale di atomi dello elemento che vengono inviati alla sorgente, è il dato che più interessa al fine della produzione di raggi di ioni: infatti si capisce che un valore elevato di questa proprietà consentirebbe di estrarre da un bersaglio radioattivo molti più atomi, visto che il numero di quelli prodotti in totale per ogni specie è basso, aumentando il rendimento dell'intero processo. Oltre a questo, bisogna anche considerare che il tempo di decadimento di alcune specie è molto rapido, e può essere inferiore al secondo; in quest'ottica una sorgente con efficienza elevata permette la ionizzazione di più atomi nello stesso periodo e quindi aumentano le possibilità di riuscire ad estrarre un isotopo particolare prima che decada e quindi di poterlo studiare o utilizzare.

L'efficienza di ionizzazione è quindi la proprietà che indica le prestazioni della sorgente di ionizzazione, ed è chiaro che per una corretta progettazione deve essere messo al centro dell'attenzione.

Per questo, durante questo Capitolo, si analizzeranno i dati ottenuti dalle prove di efficienza, per capire a che punto sia l'oggetto in esame e su quali caratteristiche agire per proporre eventuali sviluppi.

5.2. Il sistema “Front-End” per la generazione e la gestione del fascio di ioni [4]

Per eseguire le prove di efficienza occorre un sistema complesso dove sia possibile immettere le particelle da ionizzare, ed in seguito gestire il fascio di ioni prodotto dalla sorgente convogliandolo verso strumenti di diagnostica appositi.

Presso i Laboratori Nazionali di Legnaro è stata allestita appositamente una sala sperimentale dov'è posizionato il cosiddetto sistema “*Front-End*”, cioè un banco di prova “non in linea” (nel senso che non viene collegato all'impianto per la produzione di isotopi radioattivi) in grado di fornire fasci di ioni stabili. Questo apparato è pensato principalmente per la caratterizzazione delle sorgenti di ionizzazione in termini di efficienza ed emittanza.

Esso è suddiviso in tre sotto-sistemi funzionali, mostrati in Figura 5.1:

- La camera per l'alloggiamento della sorgente di ionizzazione;
- Strumenti di estrazione e focalizzazione del fascio;
- Strumenti di diagnostica;
- Strumenti per la separazione di massa (filtro di Wien).

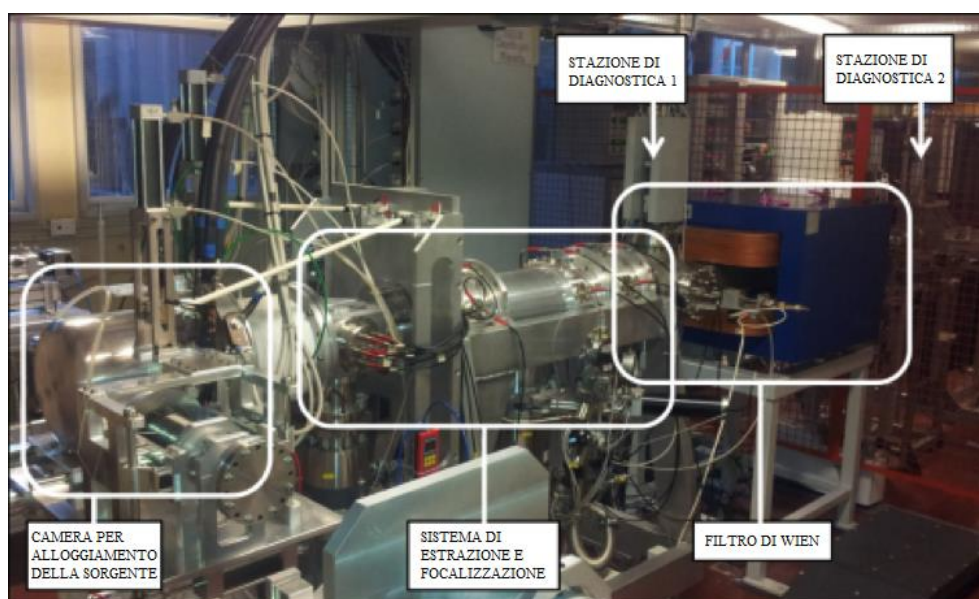


Figura 5.1: rappresentazione del sistema per la caratterizzazione delle sorgenti di ionizzazione. Nella foto sono visibili i tre sottoinsiemi indicati in precedenza; si può notare che il sistema di diagnostica e selezione delle masse è a sua volta diviso in due stazioni e nel filtro di Wien [4].

5.2.1. La camera da vuoto [1]

La parte iniziale del sistema di produzione dei fasci deve necessariamente essere la camera da vuoto dove alloggiare la sorgente di ionizzazione ed eventualmente il bersaglio; come rappresentato in Figura 5.2.

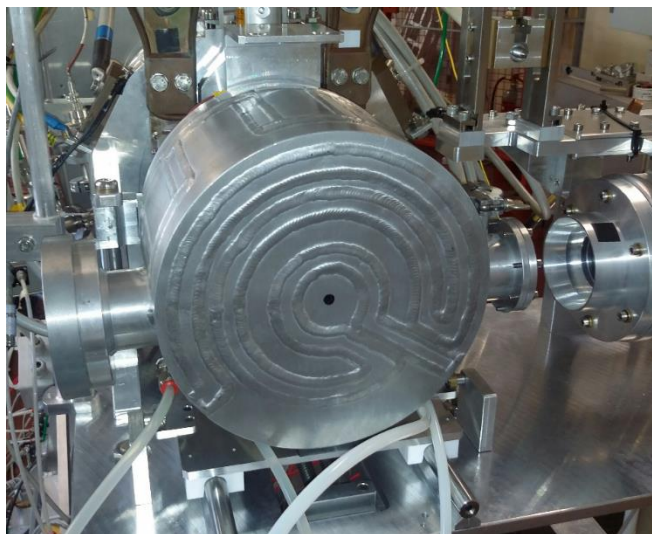


Figura 5.2: immagine della camera da vuoto nel quale è montata la sorgente di ionizzazione. Nella foto è rappresentato il coperchio collegato al circuito di raffreddamento attraverso i tubi che portano l'acqua deionizzata al piatto della camera.

La camera è del tutto simile a quella descritta per le prove nel Capitolo 4, solo che per l'accoppiamento al sistema di produzione di fasci di ioni devono esserci alcune differenze: il telaio è progettato per essere successivamente alloggiato nella sala dove si produrranno isotopi radioattivi ed è isolato elettricamente per consentire di porre il sistema con una differenza di potenziale elevata (nell'ordine delle decine di kV) rispetto alla zona di estrazione. Lo schema è mostrato nel modello tridimensionale di Figura 5.3.

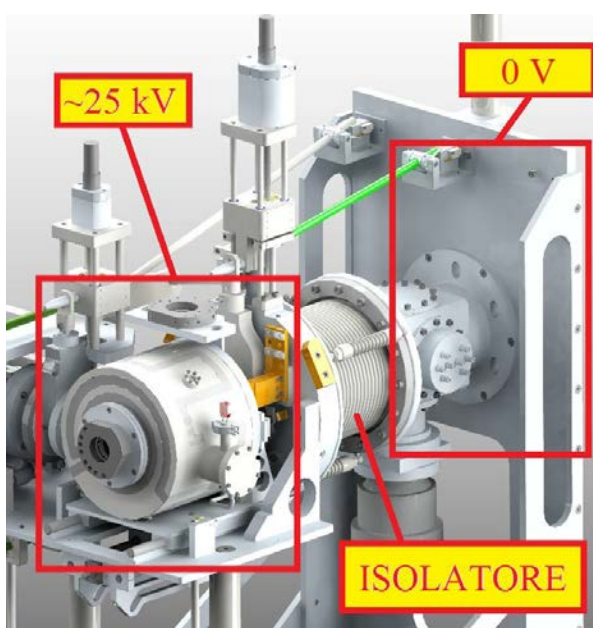


Figura 5.3: schema dell'apparato Front-End in cui la camera è posta ad alta tensione (per le prove di efficienza si è tenuto un potenziale di 25000 V) ed è isolata dal sistema di estrazione che è messo a terra (0 V). L'isolatore è un canale in Allumina, all'interno del quale scorre l'elettrodo estrattore.

Dietro al piatto, che viene raffreddato con acqua de-ionizzata, è disposto il magnete descritto nel Capitolo 2 che serve a confinare il plasma in modo ottimale all'interno della camera di anodo. Dopo il sistema di estrazione della sorgente, per separare l'ambiente della camera da quello di passaggio del fascio, è presente una valvola a saracinesca che permette la tenuta del vuoto.

Il coperchio della camera può essere anch'esso raffreddato, poiché durante le prove sul bersaglio la potenza interna al sistema è molto alta rispetto a quella che viene sfruttata per la sola sorgente; per smaltirla senza rovinare le guarnizioni in gomme ed i componenti di Alluminio è necessario continuare a refrigerare le parti più sensibili. Naturalmente saranno presenti anche tutti i collegamenti elettrici necessari per portare le correnti di linea o per imporre la differenza di potenziale a tutti i sottosistemi presenti nella camera, e cioè riscaldatore del bersaglio, linea per il riscaldamento delle sorgenti, anodo da impostare su un potenziale definito nel caso di sorgente FEBIAD ed eventualmente il serbatoio di materiale da ionizzare. Per inserire gli atomi nella sorgente infatti è possibile utilizzare un contenitore in materiale altofondente come il Tantalio, (detto in inglese "oven"). Riscaldando questo sistema le particelle all'interno, che saranno in numero calibrato, cominceranno a diffondere per agitazione termica. Se si collega il serbatoio alla linea di trasferimento della sorgente, si può insufflare il materiale direttamente nell'apparato perché sia ionizzato.

Questo metodo è necessario nel caso si voglia produrre un fascio con una ben precisa quantità di atomi. Nel nostro caso invece la linea di trasferimento viene collegata direttamente ad un circuito dove scorre il gas (visibile in Figura 5.5) che si intende ionizzare. Il fluido parte da una bombola e viene inviato, attraverso una valvola di laminazione, ad un dispositivo di filtraggio ("leak") che è collegato alla camera come si vede in Figura 5.4. Quest'ultimo permette, nota la pressione di mandata, il passaggio di un numero noto di atomi di gas.

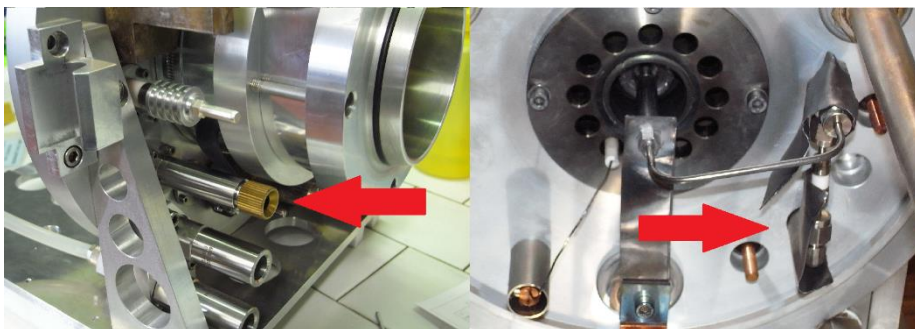


Figura 5.4: le frecce rosse nella foto indicano il posizionamento del "leak" all'esterno della camera ed il passaggio del canale del gas alla sorgente.

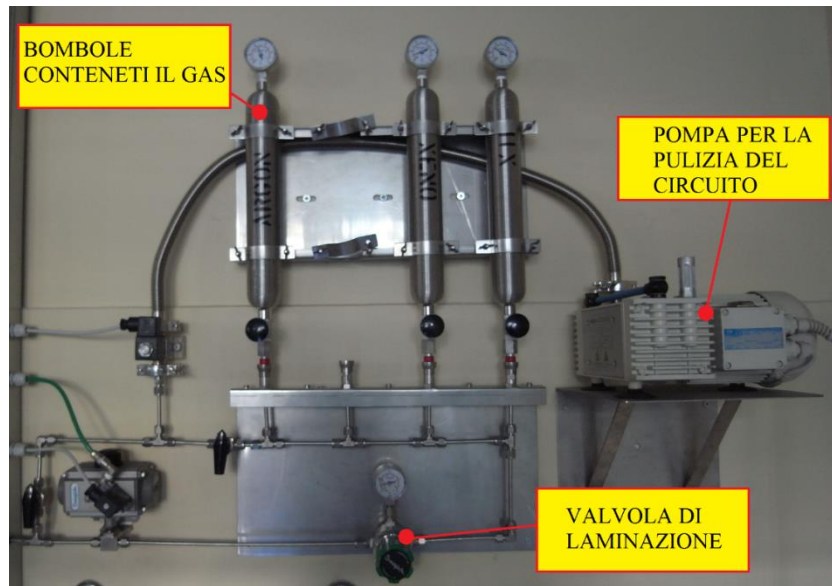


Figura 5.5: rappresentazione della prima parte del circuito di immissione del gas da ionizzare. Le bombole forniscono una certa pressione di fluido che viene poi regolata attraverso la valvola di laminazione. Una pompa da vuoto garantisce la pulizia dei canali, che possono essere aperti o chiusi attraverso la manipolazione di una valvola pneumatica e di alcuni rubinetti.

Il filtro per il controllo del numero di particelle (“*leak*”) che viene inviato alla sorgente è un apparecchio delicato. La casa produttrice emette tra le specifiche il valore di particelle che vengono lasciate passare nell’unità di tempo in $mbar \cdot l \cdot s^{-1}$. Per calcolare l’efficienza devo convertire questo dato in $atomi \cdot s^{-1}$. Per effettuare la conversione si considera l’equazione di stato di un gas ideale:

$$pV = nRT; \quad (5.1)$$

dove p e V sono pressione e volume del gas, n è il numero di moli, R è la costante universale dei gas e T è la temperatura assoluta. Se si esprimono le grandezze con le unità di misura citate sopra, invertendo la 6.1 si ricava che:

$$\frac{mol}{sec} = \frac{mbar \cdot l}{s} * \frac{10^{-1}}{8.314 \cdot 273.15} = 4.4 * 10^{-5} \frac{mbar \cdot l}{s}; \quad (5.2)$$

dove $R = 8.314 J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$, $T = 273.15 K$ e il fattore 10^{-1} è dovuto alla conversione di $mbar \cdot l$ nelle unità del sistema internazionale. Quindi moltiplicando il fattore di conversione trovato per il numero di Avogadro ($N_A = 6.022 \cdot 10^{23} \text{ atomi} \cdot mol^{-1}$) si possono calcolare il numero di particelle al secondo che vengono inviate alla sorgente partendo dal valore fornito dalla casa produttrice. Naturalmente bisogna essere certi che al filtro arrivi esattamente una pressione $p = 1 \text{ bar}$, e per questo bisogna regolare manualmente la valvola di laminazione, controllando il valore con manometro differenziale finché non si giunga al risultato corretto.

Le particelle ionizzate prodotte dalla sorgente devono essere quindi accelerate e controllate per formare il fascio di ioni.

5.2.2. Sistema di estrazione e focalizzazione del fascio [2]

Subito dietro la zona della camera è posizionato il sistema di estrazione del fascio: il telaio che sostiene il canale di passaggio è collegato ad un trasformatore che genera una differenza di potenziale fra la zona della sorgente e quella dell'estrazione. Nel nostro caso le prove sono state eseguite con una $\Delta V = 25 \text{ kV}$, anche se durante la produzione di isotopi sarà posta a 40 o 60 kV . Per isolare le due zone si usa un tubo di Allumina sostenuto da un soffiutto metallico (già visibile in Figura 5.3) che ne evita l'incremento delle tensioni per effetto di eventuali dilatazioni termiche dei componenti vicini (l'Allumina è fragile e potrebbe rompersi se soggetta a pressioni elevate). All'interno del canale è posto un componente assialsimmetrico forato detto "elettrodo estrattore" (o in inglese "*puller*"), visibile in Figura 5.6.

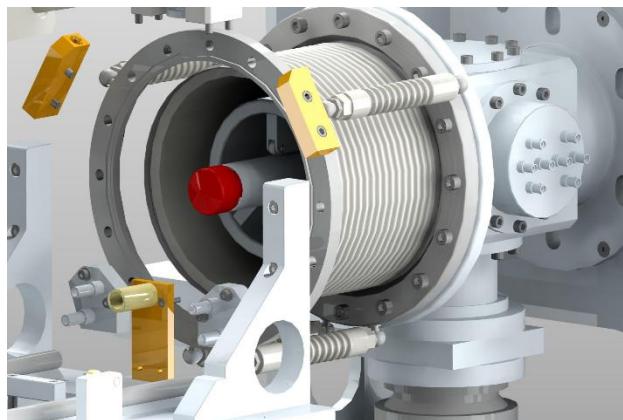


Figura 5.6: modello 3D del sistema di estrazione. In particolare si nota l'elettrodo estrattore, in rosso, che scorre all'interno dell'isolatore in Allumina, tenuto a potenziale nullo.

Questo pezzo si può spostare in direzione dell'asse del fascio per poter raccogliere gli ioni accelerati, ed è tenuto messo a terra (0 V) rispetto al resto del sistema. La posizione dell'elettrodo varia le caratteristiche del fascio, in particolare l'emittanza, ma può avere effetto anche sull'efficienza poiché spostandolo in una posizione piuttosto che in un'altra si potrebbero raccogliere più o meno particelle cariche.

A valle dell'estratto è presente l'apparato per la focalizzazione del fascio: come già spiegato per quanto riguarda l'emittanza, un fascio di ioni è composto da particelle che viaggiano con direzioni diverse e la sua sezione ortogonale all'asse può occupare un'area più o meno estesa. È chiaro che la condizione ideale sarebbe avere un raggio cilindrico

con una sezione ridotta, ma visto che non è possibile si cerca di convogliare gli ioni in un punto di interesse in modo da potervi eseguire i vari rilevamenti. Ciò viene eseguito attraverso un tripletto: è composto da tre quadrupoli elettrostatici che servono a comprimere il fascio in una direzione ortogonale all'asse; in questo modo, regolando il potenziale sulle piastre, è possibile focalizzare il fascio alla distanza dall'estrazione desiderata.

Inoltre può accadere che il raggio non rispetti l'allineamento, per via del montaggio non perfetto oppure se a causa delle deformazioni termiche si perde l'assialsimmetria della sorgente. In questo caso si usa deviarlo attraverso dei deflettori: con una serie di quattro schermi elettrostatici è possibile gestire il fascio in direzione orizzontale e verticale.

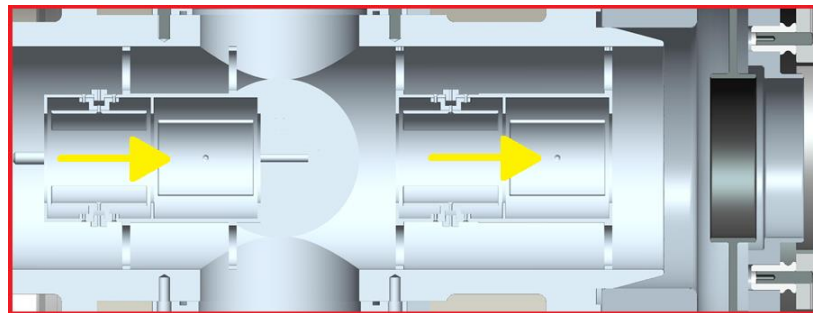


Figura 5.7: modello 3D dei deflettori. Le frecce indicano il verso del fascio.

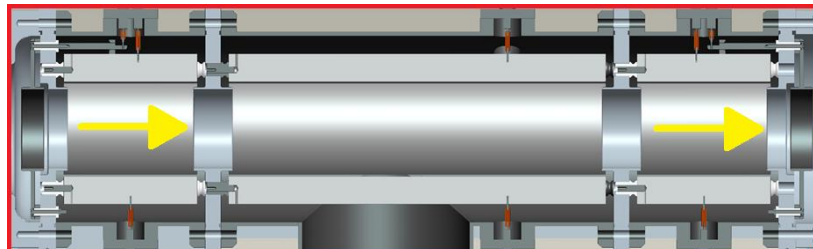


Figura 5.8: modello CAD del tripletto. Si notano le tre armature e le frecce indicano il verso del fascio.

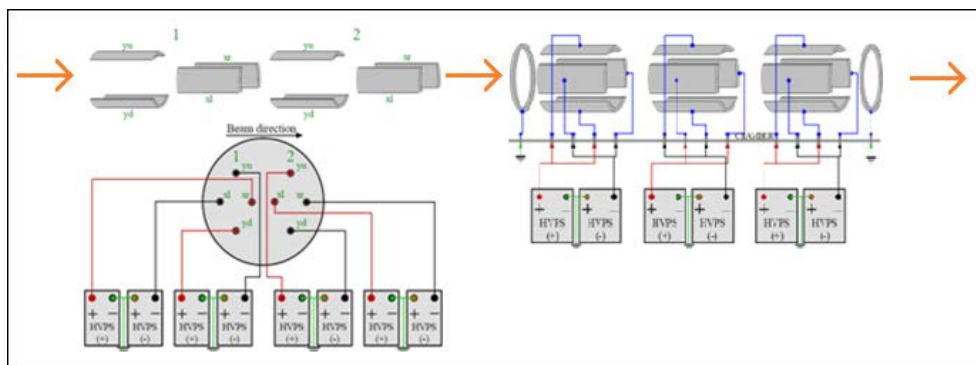


Figura 5.9: schema del tripletto e dei deflettori per la gestione del fascio di ioni. La direzione di avanzamento del fascio è rappresentata dalle frecce rosse [1].

In Figura 5.7 e Figura 5.8 si possono osservare i modelli CAD di deflettori, formati da due serie di armatura, ognuna con piastre orientate in orizzontale e verticale per dirigere correttamente il fascio, e del tripletto, formato da tre armature in sequenza. In Figura 5.9 si può osservare lo schema elettrico del sistema di focalizzazione, in cui il fascio viene prima direzionato e poi focalizzato in un punto preciso a seconda dei potenziali sulle piastre.

Una volta che le proprietà del fascio sono state regolate nel giusto modo, si possono eseguire i rilevamenti voluti.

5.2.3. Strumenti di diagnostica e selezione masse [3]

Gli strumenti di misura per caratterizzare il fascio sono principalmente tre:

- Coppa o pozzo di Faraday (*“Faraday cup”*), che serve a rilevare la corrente di ioni e quindi l'intensità del fascio. Non è altro che una sorta di bicchierino in Rame che, collegata ad un circuito elettrico, è in grado di misurare la corrente che vi scorre quando viene colpita dal fascio di ioni.
- Rilevatore del profilo (o profilatore) del raggio (*“beam profiler”*) che serve a rappresentare la forma del fascio. Questo oggetto è composto da un reticolo di fili di Rame che rilevano la corrente provocata dalle particelle cariche del fascio. In questo modo, conoscendo la posizione del filo su cui si effettua la misura, si conosce automaticamente la posizione della particella e quindi, attraverso il reticolo si riesce a ricostruire la forma della sezione del raggio ortogonale all'asse di avanzamento.
- Rilevatore di emittanza (*“emittance meter”*), come indica il nome serve a misurare l'emittanza del fascio. È simile al rilevatore di profilo del fascio, cioè una serie di fili di Rame, solo che in questo caso il reticolo orizzontale e quello verticale vengono inseriti in sequenza all'interno del raggio.

I sistemi descritti sono collocati in due stazioni di diagnostica, tranne il rilevatore di emittanza che è presente solamente alla fine della linea.

Con riferimento alla Figura 5.1, si può costruire uno schema della parte finale del sistema per la caratterizzazione delle sorgenti (Figura 5.10):

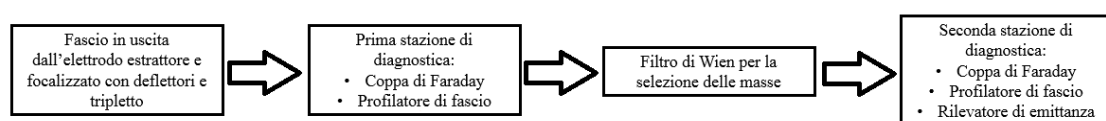


Figura 5.10: schema della disposizione dei dispositivi di diagnostica.

Questa disposizione è dovuta alla presenza del filtro di Wien per la selezione delle masse (in realtà nel sistema reale il rilevatore di emittanza si trova subito dopo la seconda coppa di Faraday e profilatore di fascio): se usassi solo la prima stazione otterrei informazioni generali sul fascio che viene estratto dalla sorgente, ma non conoscerei da quali specie è composto; la seconda stazione invece consente di ottenere misure particolari su un elemento specifico, tuttavia l'effetto del campo magnetico fa sì che si perdano informazioni sulla totalità del fascio. Inoltre si usano delle slitte che migliorano la risoluzione del sistema di filtraggio delle masse, ma che assorbono gli ioni che ci impattano. Per questo, sfruttando le informazioni provenienti da due diverse stazioni di rilevamento si può caratterizzare il fascio in modo preciso.

Gli strumenti di misura descritti, da soli non sono sufficienti per le prove di efficienza, in quanto non siamo a conoscenza di quanti atomi di una determinata specie stiamo estraendo: non posso infatti confrontare la totalità della corrente del fascio con la quantità di atomi di gas immessi nella sorgente, poiché starei trascurando la presenza di contaminanti.

Per questo è stato aggiunto al sistema il filtro o spettrometro di massa (“*Wien Filter*”). Questo elemento è composto da un'armatura che ha il compito di generare un campo elettrico e da un elettromagnete formato da una serie di avvolgimenti che deve formare un campo magnetico.

Il principio di funzionamento consiste nel selezionare le particelle di massa diversa in base alla velocità. Il fascio di ioni che viene estratto è composto da particelle che hanno velocità con direzione rettilinea coincidente con l'asse della sorgente. La velocità e la massa sono legate dalla relazione seguente, che lega energia cinetica ed elettrica:

$$qV = \frac{1}{2}mv^2; \quad (5.3)$$

dove q è la carica della particella espressa in *coulomb*. Si suppone che la sorgente ionizzi sempre particelle fino allo stato $I+$, perciò si pone $q = e = 1.602 \cdot 10^{-19} C$. V è la differenza di potenziale con cui lo ione viene accelerato, cioè nel nostro caso $25 kV$; m è la massa dell'atomo o della molecola e v è la sua velocità, dati entrambi incogniti.

Quando la particella carica entra in un campo elettrico è soggetta ad una forza $\vec{F}_E = q\vec{E}$, dove \vec{E} è il vettore campo il cui modulo è espresso in V/m . Anche per un campo magnetico vale una formulazione simile, tuttavia, stavolta la forza è espressa dalla formula di Lorentz, cioè $\vec{F}_B = \vec{v} \times \vec{B}$, dove \vec{B} è il vettore campo magnetico.

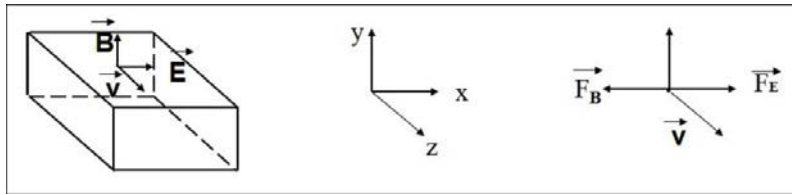


Figura 5.11: rappresentazione dei vettori delle forze elettrica, magnetica e della velocità della particella ionizzata nello spettrometro di massa [1].

Se si dispongono gli avvolgimenti e l'armatura in modo che il campo magnetico, il campo elettrico e la velocità risultino ortogonali fra di loro, come mostrato in Figura 5.11, si ottiene che le forze elettrica e magnetica hanno stessa direzione ma verso opposto, e la forza di Lorentz si può esprimere semplicemente come $F_B = vB$. Si può quindi, annullando la somma vettoriale delle due forze, dire che:

$$v = \frac{E}{B}; \quad (5.4)$$

ed è per questo motivo che lo spettrometro è considerato un filtro in velocità.

Gli ioni del fascio passano attraverso l'analizzatore, costituito da un tubo cilindrico disposto nell'elettromagnete. La sola forza magnetica agirebbe sullo ione deviandolo e costringendolo a percorrere una traiettoria circolare di raggio r , la forza centrifuga, che verrà eguagliata da quella centrifuga, è quindi uguale a:

$$Bqv = \frac{B^2 r^2}{v}; \quad (5.5)$$

Considerando le relazioni espresse sopra, si capisce che se vale l'ipotesi che gli ioni abbiano tutti la stessa carica, e siano cioè tutti $I+$, masse diverse corrispondono a velocità diverse. Quindi per differenziare i vari elementi che compongono il fascio basta variare il campo magnetico, agendo sulla corrente negli avvolgimenti, così da variare la forza di Lorentz e selezionando quindi di volta in volta masse diverse.

La presenza nello stesso fascio di ioni di particelle con massa simile fa sì che se le forze elettrica e magnetica non sono molto elevate la risoluzione dello spettrometro sarà modesta, al punto da non rendere distinguibili due specie diverse. Ciò è dovuto anche al fatto che come detto gli ioni scorrono in tubo aperto alle estremità, perciò anche se deviate leggermente alcune particelle potrebbero passare e andare ad essere rilevate dalla seconda stazione di diagnostica. Per evitare questo fenomeno si usano due slitte, che non sono altro che due saracinesche che possono essere chiuse a piacere. Facendo in modo che vi sia una luce molto sottile fra le due slitte, si potrà permettere il passaggio solo alle particelle che viaggiano in direzione rettilinea, fermando le altre. Perciò si è sicuri che

impostando una certa corrente sugli avvolgimenti del filtro di Wien, la seconda stazione di diagnostica rileverà soltanto gli ioni con massa voluta.

Il sistema descritto permette dunque la stima dell'efficienza della sorgente FEBIAD attraverso la misura delle proprietà del fascio di ioni stabili.

5.3. Contaminanti presenti nel fascio di ioni per la sorgente FEBIAD

Uno dei fattori che incide in modo drastico sull'efficienza della sorgente FEBIAD è la presenza di contaminanti nel fascio di ioni.

Durante le prove di efficienza, come già spiegato, si usa iniettare un gas nobile, spesso Argon, attraverso un circuito all'interno della linea di trasferimento. Il gas diffonde verso al catodo e all'anodo, dove viene ionizzato e quindi accelerato per formare fascio. Ma se si analizza il sistema appare evidente che l'eventuale presenza di atomi o molecole diverse produce il risultato che il fascio in uscita non sia composto dal solo gas immesso, ma anche da tutte le particelle che possono venire a trovarsi all'interno della camera di anodo, poiché la sorgente FEBIAD ha la capacità di ionizzare tutti gli elementi e non è selettiva.

Bisogna quindi riuscire a capire quali atomi e molecole possono essere ionizzati nel processo di produzione del fascio, e per fare questo occorre eseguire una procedura detta "scansione di massa" ("*mass scan*"), che consiste nel variare la corrente sugli avvolgimenti del filtro di Wien e misurare di volta in volta, attraverso il rilevatore di Faraday, la corrente di fascio per ogni amperaggio. Si otterrà un grafico in cui è possibile rappresentare la corrente del fascio rispetto a quella degli avvolgimenti. L'andamento su tale grafico presenterà una serie di picchi, che saranno le masse presenti.

Dalle formule 5.3 e 5.4, si può ricavare il rapporto m/q , e quindi nell'ipotesi che gli ioni siano tutti $I+$, m :

$$\frac{m}{q} = 2V \frac{B^2}{E^2}, \quad (5.6)$$

dove i vari termini erano già stati descritti nel Paragrafo precedente.

Se si esprime la differenza di potenziale V viene moltiplicata per la carica q si ottiene l'energia del fascio in elettronvolt, e quindi portandola in joule, ed esprimendo B in tesla ed E in V/m , è possibile calcolare la massa della particella esaminata in kg . Si può quindi ricavare il peso della particella traducendo in unità di massa atomica, per confrontare le masse con la tavola dei nuclidi e capire di che elemento si sta facendo la scansione.

Nel caso di presenza di molecole la massa trovata sarà la somma delle masse dei componenti.

La tavola dei nuclidi inoltre indica anche la percentuale di ogni isotopo stabile per ogni elemento, perciò nel caso ci siano più isotopi stabili si troveranno i picchi ad essi relativi, e il rapporto fra la loro intensità sarà pari al rapporto fra le percentuali che indicano l'abbondanza indicata sulla tavola.

L'obiettivo in questo paragrafo è dare una mappatura dei contaminanti più comuni e cercare di spiegare, basandosi sull'esperienza acquisita durante le prove sperimentali, come evitare che la contaminazione porti a false stime dell'efficienza.

Innanzitutto si vuole esaminare uno degli spettri delle masse ottenuto durante le prove con la sorgente FEBIAD, riportato nel Grafico 5.1. I contaminanti principali sono riportati in Tabella 5.1.

<i>ELEMENTO</i>	<i>m/q [u]</i>	<i>Carica</i>
<i>Idrogeno</i>	<i>1</i>	<i>1+</i>
<i>Idrogeno (H₂)</i>	<i>2</i>	<i>1+</i>
<i>Carbonio</i>	<i>12</i>	<i>1+</i>
<i>Azoto</i>	<i>14</i>	<i>1+</i>
<i>Azoto (N₂)</i>	<i>14</i>	<i>2+</i>
<i>Ossigeno</i>	<i>16</i>	<i>1+</i>
<i>H₂O</i>	<i>18</i>	<i>1+</i>
<i>Argon</i>	<i>20</i>	<i>2+</i>
<i>Sodio</i>	<i>23</i>	<i>1+</i>
<i>Azoto (N₂)</i>	<i>28</i>	<i>1+</i>
<i>Monossido di Carbonio (CO)</i>	<i>28</i>	<i>1+</i>
<i>Ossigeno (O₂)</i>	<i>32</i>	<i>1+</i>
<i>Potassio</i>	<i>39</i>	<i>1+</i>
<i>Argon</i>	<i>40</i>	<i>1+</i>
<i>Anidride Carbonica (CO₂)</i>	<i>44</i>	<i>1+</i>
<i>Cromo</i>	<i>52</i>	<i>1+</i>
<i>Ferro</i>	<i>56</i>	<i>1+</i>
<i>Rame</i>	<i>63/65</i>	<i>1+</i>
<i>Tantalio</i>	<i>90.5</i>	<i>2+</i>
<i>Tantalio</i>	<i>181</i>	<i>1+</i>
<i>Ossido di Tantalio</i>	<i>197</i>	<i>1+</i>

Tabella 5.1: listato dei principali componenti dello spettro durante le prove di efficienza con la sorgente di ionizzazione al plasma.

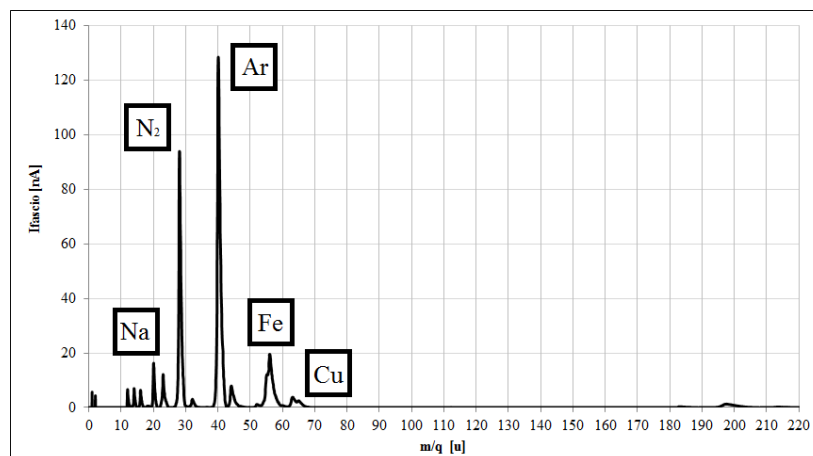


Grafico 5.1: andamento ottenuto attraverso il filtro di Wien che rappresenta lo spettro delle masse estratte dalla sorgente al plasma. In ascissa è riportato il rapporto tra l'unità di massa atomica e la carica della particella, mentre in ordinata la corrente di fascio letta attraverso il rivelatore di Faraday.

L'andamento mostrato è ottenuto durante una prova in cui viene immesso Argon nel sistema. Si vede infatti che nel caso riportato la corrente relativa alla massa 40, che corrisponde all'Argon, è il picco più alto. Si notano però una serie di altri picchi che non sono trascurabili, e che saranno esaminati ponendo attenzione di volta in volta ai vari intervalli del grafico.

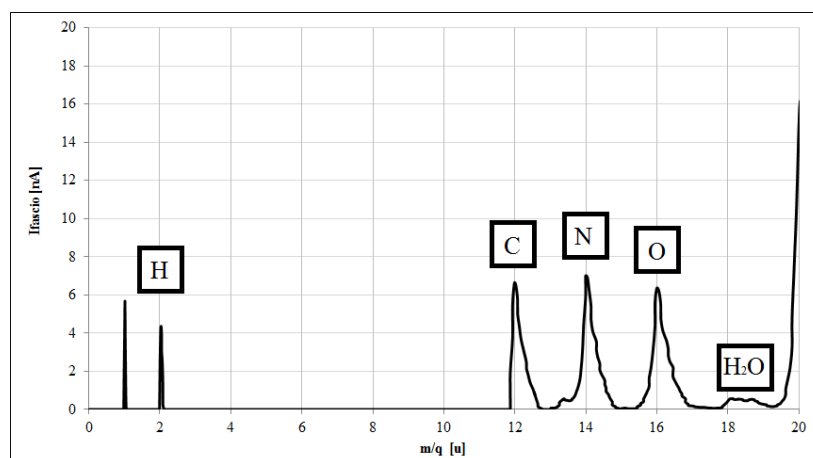


Grafico 5.2: dettaglio del Grafico 5.1 in cui sono evidenziate le masse da 0 a 20 u.

Nel Grafico 5.2 si nota in dettaglio l'intervallo iniziale del Grafico 5.1, dove sono riportate le correnti di fascio per particelle fino a $m/q = 20 u$. I primi due picchi hanno masse 1 e 2: sono i gas più leggeri della tavola periodica e devono essere isotopi stabili. Perciò il primo è senza dubbio Idrogeno. Sappiamo che H ha un isotopo stabile con massa 2, cioè il Deuterio, tuttavia il rapporto delle correnti fa escludere che ci sia poiché H con numero di massa unitario ha un'abbondanza superiore al 99,8% dell'Idrogeno totale. Ricordando però che l'Idrogeno ha anche una forma bi-atomica (la molecola del gas è

H₂) si capisce il perché sono presenti due picchi. Si potrebbe osservare che dal momento che stiamo studiando il rapporto m/q , nel caso siano presenti ioni con carica doppia, si potrebbe avere Elio, che ha massa atomica 4 ionizzato due volte, tuttavia questo non è il caso poiché il picco dello stesso elemento ionizzato $1+$ non è presente.

Le correnti successive sono a $12 u$, $14 u$ e $18 u$, che indicano la presenza di Carbonio, Azoto ed Ossigeno; parte del picco della massa 14 in realtà potrebbe essere anche dovuto alla seconda ionizzazione delle molecole con massa $28 u$ che saranno analizzate in seguito. Gli elementi esaminati finora fanno pensare a un'infiltrazione di aria nella camera: infatti l'aria atmosferica è composta principalmente da Azoto, Ossigeno, Argon e altri gas tra cui l'anidride carbonica e l'Idrogeno. Inoltre l'umidità porta alla possibile presenza di acqua. H₂O è la molecole d'acqua, che ha massa $18 u$, e si nota la presenza di un picco di corrente in quella zona. Tuttavia per accertarsi che la contaminazione sia data dall'aria si dovrebbe trovare una grande quantità di N₂, che è il componente principale.

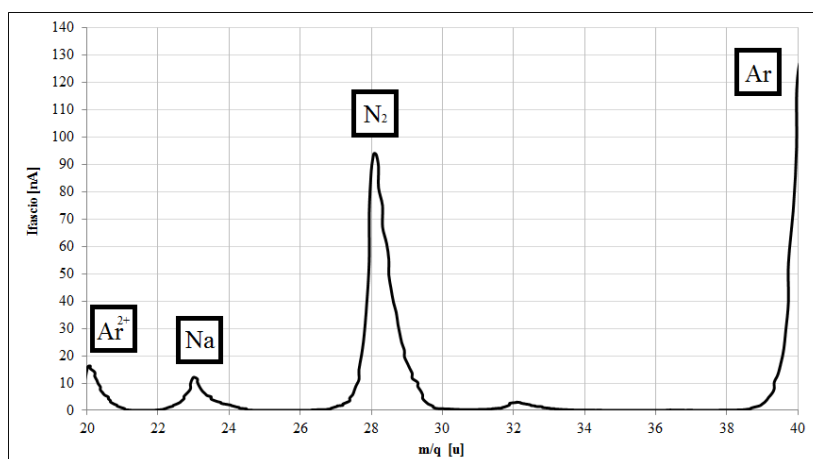


Grafico 5.3: dettaglio del Grafico 5.1 in cui sono evidenziate le masse da 20 a 40 u.

Nel Grafico 5.3 è mostrato l'intervallo successivo dello spettro, in cui si nota il contaminante maggiore: la massa 28 che indica solitamente la presenza di aria, poiché rappresenta la molecola di Azoto. In realtà la stessa massa può indicare anche la molecola di monossido di carbonio, tuttavia se non ci sono nella camera elementi che contengono C in quantità considerevole, si può affermare che la contaminazione principale non è dovuta alla CO. La presenza di aria della sorgente non è positiva poiché la contaminazione da N₂ causa un drastico abbassamento dell'efficienza della sorgente: questa molecola viene ionizzata al posto dell'Argon e così non riuscirò ad estrarre il gas che sto immettendo. È necessario assicurarsi che il vuoto nella camera sia buono, e che non ci siano importanti infiltrazioni d'aria, anche nel circuito d'immissione del gas da ionizzare.

Se queste condizioni sono verificate dovrebbe verificarsi una progressiva diminuzione dell'intensità dei picchi dei contaminanti indicati nel tempo (effetto di pulizia della sorgente), e l'efficienza dovrebbe contemporaneamente crescere. Anche la massa 32, che rappresenta la molecola di Ossigeno (O_2) conferma la presenza di aria.

Nell'intervallo da $20 u$ a $40 u$ ci sono degli altri picchi di corrente da considerare, cioè la massa 23 che rappresenta il sodio (Na) dovuto al contatto degli oggetti con il sudore o con la pelle. È per questo che è necessario indossare i guanti durante il montaggio. Tuttavia questo elemento, così come il Potassio, ha una bassa energia di prima ionizzazione e viene estratto molto in fretta dalla sorgente: la pulizia è rapida e non rallenta il proseguo delle prove. Per quanto riguarda il Potassio, bisogna fare anche un'ulteriore osservazione: il numero di massa di questo elemento è 39, quindi molto vicino a quello dell'Argon che è l'elemento che più spesso viene utilizzato per le prove di efficienza. La differenza piccola fra il peso delle due particelle fa sì che utilizzando un filtro di Wien con bassa risoluzione non si è in grado di separare in modo preciso le due masse ed il picco relativo al Potassio "scompare" perché assimilato a quello dell'Argon. La visibilità dei due picchi dipende anche dal sistema di estrazione, che influenza l'emittanza della sorgente.

I due valori principali nell'intervallo in esame sono le masse 20 e 40, i cui picchi rappresentano le correnti di fascio degli atomi di Argon di prima e seconda ionizzazione. È su queste correnti che si andrà a calcolare l'efficienza della FEBIAD.

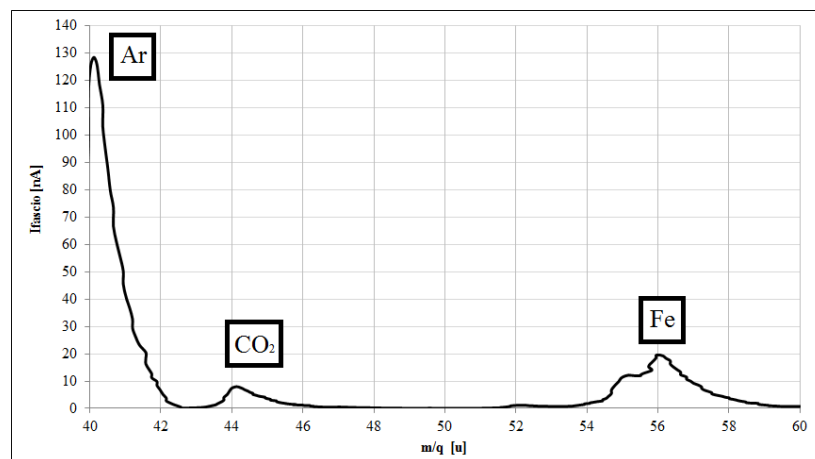


Grafico 5.4: dettaglio del Grafico 5.1 in cui sono evidenziate le masse da 40 a 60 u.

Nell'intervallo di m/q da $40 u$ a $60 u$ i contaminanti principali rilevati sono l'anidride carbonica CO_2 , con $m/q = 44 u$, presente anch'essa nell'aria, ed il Ferro, con $m/q = 56 u$, che è presente poiché una buona parte dei componenti del sistema di supporto sono in

acciaio che va ad alte temperature. I picchi intorno a quello principale dovrebbero essere dovuti, oltre agli isotopi del Ferro meno abbondanti, anche ai leganti che compongono l'acciaio, cioè Cromo e Nichel. Il Carbonio è già stato preso in considerazione.

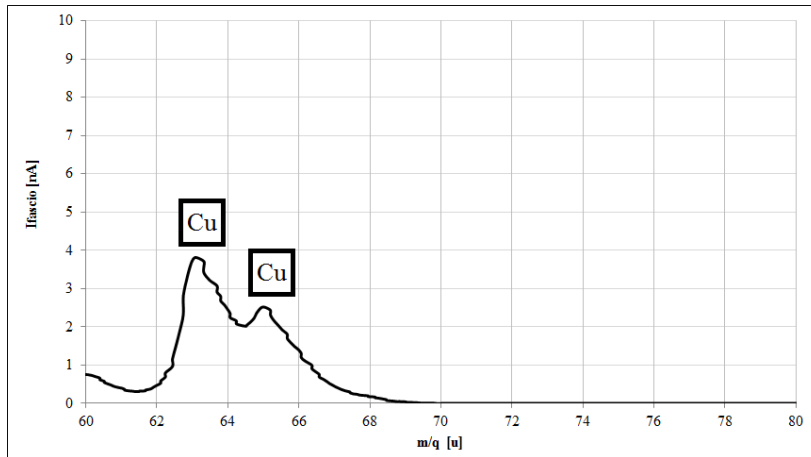


Grafico 5.5: dettaglio del Grafico 5.1 in cui sono evidenziate le masse da 60 a 80 u.

L'ultimo intervallo rilevante è quello da 60 u a 80 u. I due picchi che si osservano nel Grafico 5.5 rappresentano i due isotopi del Rame. Anche se nella prova mostrata la contaminazione non è elevata, durante le prove è capitato che il fascio fosse composto per quasi la totalità da questo elemento, rovinando le misure e costringendo a lunghi periodi in cui la sorgente è stata lasciata ad alte temperature per la pulizia dal contaminante.

Altri picchi che si possono trovare sono a $m/q = 90.5 u$ e $181 u$, e indicano il Tantalio; $m/q = 197 u$ e $213 u$, e indicano gli ossidi di Tantalio. È chiaro che la presenza di questo elemento è dovuta alla composizione del catodo che, andando a temperature elevate, è soggetto in modo lieve alla sublimazione del materiale.

Il problema della contaminazione è di grande rilevanza durante i test: gli elettroni che vanno a ionizzare i contaminanti vengono in un certo senso “sprecati”, cioè non vengono sfruttati per gli atomi del gas di interesse. Se quindi si esegue una prova di efficienza dove la presenza di contaminanti è rilevante, si sottostima la capacità di produzione della sorgente, poiché nei conti considero solo gli atomi del gas nobile che immetto.

Naturalmente il problema è esteso a tutto il sistema di misura: è chiaro che un apparato con una pressione più bassa, e cioè un vuoto migliore porta ad avere minori infiltrazioni d'aria e quindi spettri più puliti che portano inevitabilmente ad alti valori di efficienza.

5.4. Studio della corrente elettronica

Durante le prove di efficienza si è anche potuta rilevare, attraverso il sistema di misura, la corrente elettronica trasferita dal catodo verso l'anodo. Infatti per poter mantenere l'anodo al potenziale necessario ad accelerare gli elettroni, questo è collegato ad un alimentatore attraverso un filo in Tantalio inserito in uno dei puntali di supporto, che arriva fino ad una connessione in Rame posizionata sul piatto della camera. Se il circuito elettrico fosse aperto, la corrente misurata dall'alimentatore sarebbe nulla, ma se invece emetto elettroni dal catodo questi formano un flusso che può essere quantificato, e l'operatore può leggerlo direttamente sugli indicatori dello strumento.

Siccome, come è già stato indicato in dettaglio, la corrente elettronica è uno dei parametri che mi consente di capire quanto sia grande la capacità ionizzante della sorgente, è importante eseguire una lettura dei valori di questo indice, anche per poter confrontare i dati con quelli ottenuti numericamente attraverso il codice FEM.

Naturalmente, per poter dare una corretta valutazione numerica dell'emissioni di elettroni non basta considerare l'effetto termoionico, ma bisogna anche ricordarsi della presenza del vincolo costituito dalla legge di Child-Langmuir: per poter valutare analiticamente la corrente massima che può essere accelerata dal catodo verso l'anodo bisogna misurare la distanza tra i due componenti d (nel caso dell'anodo si prende la superficie della griglia, per il catodo la superficie frontale). La procedura per stimare d è riportata in dettaglio nell'Appendice B.

Montando la sorgente con la linea di trasporto della corrente priva del vincolo che blocca gli spostamenti assiali della linea di trasferimento, si ha un progressivo arretramento della faccia frontale del catodo, come si nota in Figura 5.12.



Figura 5.12: catodo con faccia frontale spanciata all'indietro dopo le prove di efficienza.

Tale spostamento della superficie frontale provoca una variazione della distanza d . Quindi, in questo modo, oltre a vedere una discesa progressiva della corrente di anodo provocata dal rapido deterioramento del catodo, non è nemmeno possibile misurare alti valori della corrente elettronica: durante le prove sperimentali, non si andava oltre i $40\text{--}60\text{ mA}$, anche portando il catodo a temperature molto elevate. Si capisce dunque che la corrente elettronica aveva raggiunto la saturazione prematuramente per un effetto strutturale del sistema.

Nella configurazione bersaglio – sorgente di ionizzazione, la rigidità della linea di trasferimento in senso assiale è molto elevata, tanto da essere considerata infinita. Per simulare tale condizione durante le prove di efficienza senza bersaglio, si è ricorso al vincolo descritto nel Capitolo 4 per effettuare le prove sul catodo ad alta temperatura.

Dopo questo aggiornamento, non si sono più rilevati problemi di deformazioni in senso contrario a quello atteso, e si è potuta rilevare, anche con un montaggio preciso, la corrente elettronica. In particolare, di seguito si riportano i dati relativi a tre serie di misure, ottenute con un parametro $d = 0.98\text{ mm}$, al variare della corrente di linea e del potenziale di anodo. Di seguito i dati saranno poi confrontati con i dati ottenuti analiticamente.

La Tabella 5.2 mostra le medie dei valori misurati sperimentalmente:

$V_{AN} [V]$	50	100	150	200	250	300
$I_{LINE} [A]$	$I_{el} [A]$	$I_{el} [A]$	$I_{el} [A]$	$I_{el} [A]$	$I_{el} [A]$	$I_{el} [A]$
280	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
290	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
300	0.0054	0.0062	0.123	0.0133	0.0141	0.0150
310	0.0178	0.0198	0.213	0.0228	0.0239	0.0251
320	0.0304	0.0334	0.0361	0.0358	0.0405	0.0425
330	0.0481	0.0553	0.0599	0.0641	0.0677	0.0719
340	0.0670	0.0886	0.0974	0.1053	0.1143	0.1227
350	0.0802	0.1340	0.1511	0.1649	0.1794	0.1966
360	0.0845	0.1816	0.2118	0.2324	0.2566	0.2844
370	0.0847	0.2142	0.3011	0.3494	0.3952	0.4489

Tabella 5.2: dati ottenuti durante le prove di efficienza della corrente elettronica accelerata dal catodo all'anodo, al variare del potenziale di anodo V_{AN} . Occorre sottolineare che il sistema di misura non rileva correnti inferiori ai 0.01 mA .

La Tabella 5.3 elenca invece i valori della corrente elettronica massima che è possibile accelerare dal catodo all'anodo stimata con la formula di Child-Langmuir:

$V_{AN} [V]$	$I_{el,max} [A]$
50	0.0962
100	0.2721
150	0.4999
200	0.7696
250	1.0756
300	1.4139

Tabella 5.3: valore della corrente massima di elettroni trasferibile dal catodo all'anodo stimata con la legge di Child-Langmuir per un valore della distanza fra gli elettrodi $d = 0.98 \text{ mm}$.

La Tabella 5.4, infine, indica i valori della corrente elettronica calcolati con la legge di Richardson (che considera il solo effetto termoionico) a partire dal campo di temperatura valutato con il modello numero della sorgente tipo FEBIAD:

$I_{LINE} [A]$	$I_{el,num} [A]$
280	0.0103
290	0.0200
300	0.0373
310	0.0665
320	0.1141
330	0.1899
340	0.3051
350	0.4782
360	0.7312
370	1.0913

Tabella 5.4: valori della corrente elettronica emessa dal catodo calcolati analiticamente secondo la legge di Richardson a partire dal campo termico sul catodo stimato attraverso il modello ad elementi finiti.

Il Grafico 5.6 riassume tutte le informazioni di Tabella 5.2, Tabella 5.3 e Tabella 5.4.

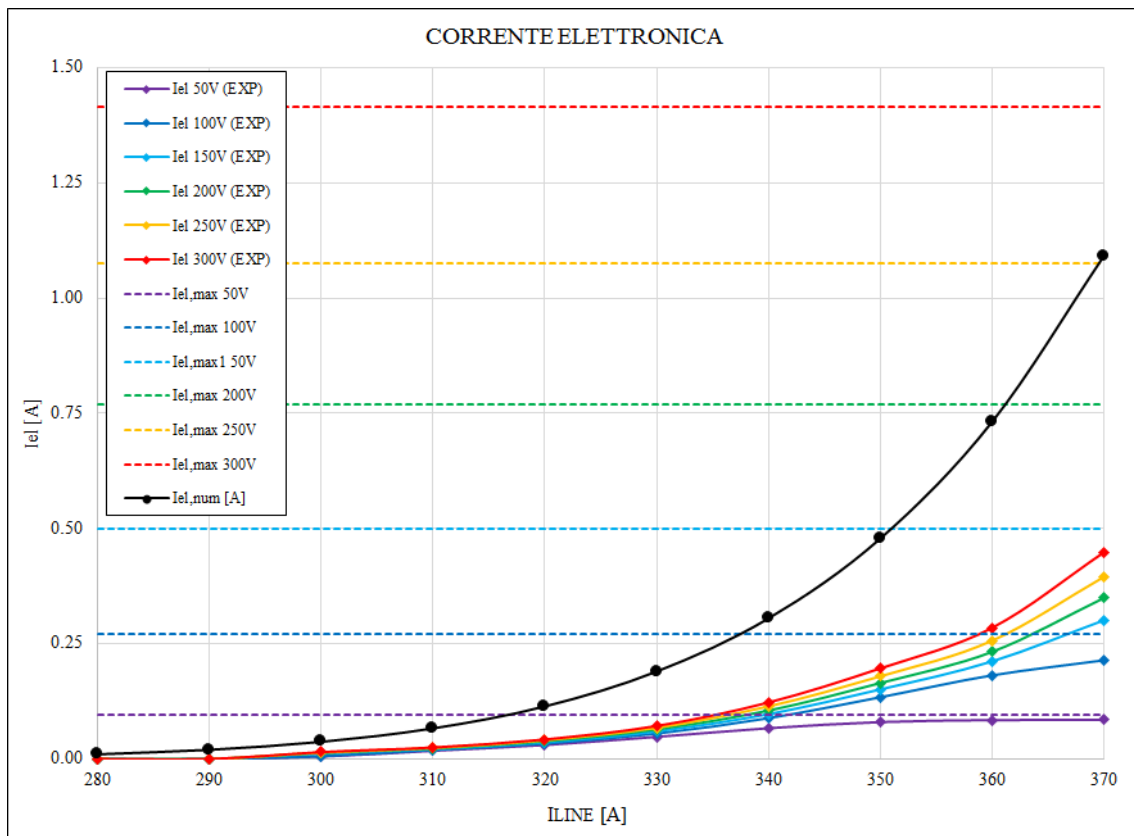


Grafico 5.6: rappresentazione dei dati relativi alla corrente elettronica ricavati variando il potenziale di anodo durante le prove di efficienza (dati segnati con EXP misurati sperimentalmente). Nel grafico sono mostrati anche gli andamenti analitici ottenuti con le leggi di Richardson (linea nera, da campo termico ricavato dal modello numerico) e di Child-Langmuir (linee tratteggiate, stimati con $d = 0.98 \text{ mm}$).

Dall'analisi dei dati riportati si possono trarre diverse considerazioni: con un montaggio che garantisca una d vicina a 1 mm la legge di Child-Langmuir non rappresenta un problema poiché la corrente di saturazione al potenziale di anodo che si usa più comunemente, cioè 150 V , è di circa 0.5 A , molto maggiore dei valori misurati sperimentalmente. L'effetto della saturazione si nota solo con $V_{AN} = 50 \text{ V}$, e per temperature elevate del catodo, mentre per $V_{AN} = 100 \text{ V}$ e $I_{LINE} = 370 \text{ A}$, che rappresenta il valore limite, si nota che ci si trova in una zona di transizione.

È chiaro che se il montaggio avviene in maniera meno precisa, la corrente di saturazione si può abbassare molto al crescere di d , portando ad un effetto maggiormente visibile già a temperature inferiori. Dagli studi sulla deformazione del catodo sappiamo inoltre che il riscaldamento provoca, specialmente con la corretta configurazioni dei vincoli e cioè con bloccaggio in direzione assiale opposta all'anodo della linea di trasferimento, uno spostamento della faccia frontale, che ha come effetto l'innalzamento della corrente di soglia.

Durante le prove è stato osservato che la corrente elettronica misurata è molto stabile per basse temperature del catodo, mentre al crescere del campo termico il tempo per stabilizzare il valore cresce molto.

La questione che appare però più evidente è lo scostamento del dato ricavato numericamente da quello sperimentale. Dal grafico sembra che i valori più bassi della corrente elettronica letti durante le prove indicano che il catodo sia in realtà più freddo di quanto calcolato mediante il modello FEM. Questo rappresenta un aspetto problematico della nostra ricerca, anche visto che, come descritto nel Capitolo 4, era stata riscontrata una buona affinità fra valori numerici e sperimentali.

Le ipotesi che sono emerse durante l'elaborazione dei risultati ottenuti sono due. La prima riguarda un eventuale errore insito nel modello numerico. Il codice FEM infatti, calcola il campo termico degli oggetti a partire dalle condizioni al contorno e dalle proprietà del materiale che vengono fornite dal ricercatore. Sebbene sulle condizioni al contorno, come è stato ampiamente spiegato nei Capitoli precedenti, si siano fatte ricerche dettagliate, per le proprietà del materiale si è fatto riferimento a dati reperibili in letteratura. In particolare, per il Tantalio, che compone la maggior parte degli oggetti della sorgente, l'emissività emisferica totale viene assegnata con riferimento ad una superficie non ossidata, poiché si presuppone che dopo una certa temperatura il metallo si pulisca.

Probabilmente, visto che sulle superfici della camera di scarica e dell'anodo le temperature non superano i 1400°C , in realtà potrebbe accadere che le superfici non sono completamente pulite e mantengono un'emissività più alta di quella che avrebbe il metallo, raffreddando il catodo. Inoltre piccole variazioni geometriche a cui non era stato dato peso in fase di progetto per quanto riguarda l'influenza sul campo termico, potrebbero invece aver avuto effetti maggiori di quelli attesi.

Bisogna analizzare in dettaglio la differenza fra i valori trovati per la corrente elettronica sperimentalmente e attraverso il codice numerico, per capire quale aspetto del modello vada migliorato.

Fissando la corrente riscaldante a 360 A , sono state lanciate varie simulazioni in cui sono state fatte delle variazioni per capire come si riesca ad avere una tale modifica della temperatura sulla faccia frontale del catodo: nella prima, è stato posto un vincolo sul grado di libertà termico ai nodi delle superficie in cui vanno ad agganciarsi i puntali di allineamento che saranno descritti nel Capitolo 6, come spiegato dalla Figura 5.13.

Questa condizione considera un abbassamento drastico se si pensa che normalmente il FEM indica un campo termico superiore ai 1800°C per quella zona.

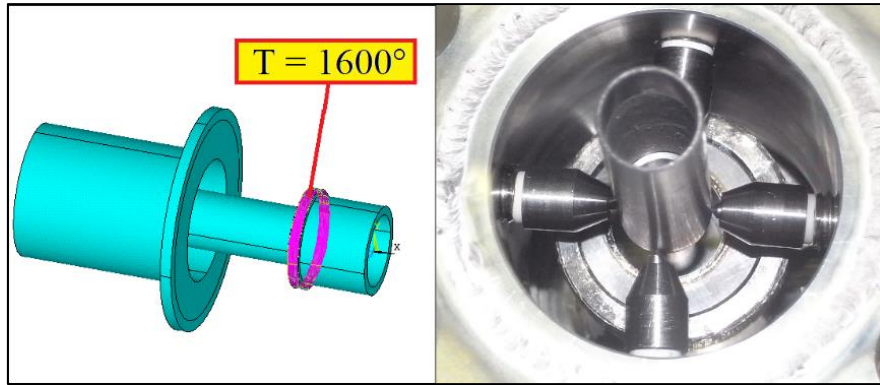


Figura 5.13: vincolo termico applicato per valutare l'effetto sulla faccia frontale del catodo di un eventuale raffreddamento provocato dalla presenza della croce di centraggio mostrata a destra.

Posta tale condizione, si è calcolata una differenza sul campo termico della faccia frontale di circa 50°C , molto inferiore a quella cercata.

Perciò si può escludere che una variazione geometrica possa compromettere il campo termico del sistema nella misura indicata, poiché anche assegnando le nuove temperature si riscontra ancora una differenza notevole tra dati numerici e sperimentali.

Si può quindi cambiare approccio, e da [5] si ricava che per il Tantalio con superficie ossidata, l'emissività totale normale vale, a temperature superiori a circa 200°C , $\varepsilon_n = 0.42182$. Inoltre in [6] si può leggere che i materiali con bassa emissività tendono a comportarsi come i metalli, che possiedono emissività emisferica totale che può essere fino al 25% maggiore di quella normale.

Quindi si è creato un materiale con tutte le proprietà del Tantalio, ma con un valore uniforme $\varepsilon = 0.51$, cioè ε_n incrementata del 25%. Questo modello è stato utilizzato per definire le proprietà di linea di trasferimento e tutto il corpo dell'anodo ad eccezione della griglia, che sono i corpi più vicini al catodo (in realtà la griglia di anodo è composta da Molibdeno, per questo non è stata considerata ossidata). I risultati sono che la temperatura rilevata sulla faccia frontale rispetto al raggio si scosta da quella del modello originale di un ΔT che va dai 90°C ai 110°C , come si può osservare nel Grafico 5.7.

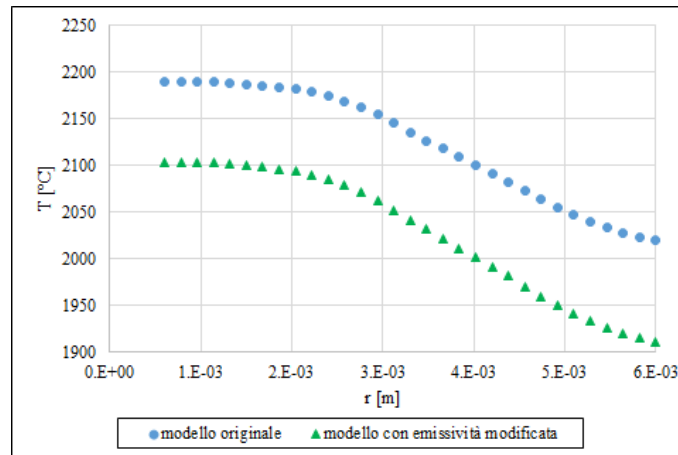


Grafico 5.7: temperatura rilevata sulla faccia frontale del catodo in senso radiale sui modelli FEM originale (proprietà dei materiali con superfici pulite) e con emissività variata (proprietà posta uguale al valore costante 0.51). Valori calcolati con corrente riscaldante pari a 360 A.

Applicando la formula di Richardson ai valori del grafico precedente, si ottiene una corrente elettronica pari a 0.297 A, molto più vicina al valore calcolato sperimentalmente.

Perciò occorrerebbe uno studio sulle effettive proprietà dei materiali alle temperature in esame per poter capire quali sono le condizioni dei componenti e per poter sfruttare al meglio il modello FEM. Durante le prove sperimentali lo stesso problema non si era verificato, probabilmente per la mancanza dell'anodo e perché la camera di scarica era realizzata in Molibdeno; inoltre il foro sulla camera di scarica porta ad un minor effetto delle condizioni dei materiali sulla faccia frontale del catodo.

La seconda ipotesi per spiegare lo scostamento fra dati numerici e sperimentali potrebbe riguardare il comportamento degli elettroni durante la loro migrazione verso l'anodo: se si osservano i dati di Tabella 5.4 infatti si nota che specialmente alle temperature maggiori la corrente elettronica assume valori importanti. Tale flusso deve scorrere in uno spazio ristretto, accelerato da un campo elettrico intenso. Tuttavia è possibile che per effetto della carica spaziale degli elettroni, essi si respingano l'uno con l'altro, ed ogni particella acquista una componente della velocità in senso radiale rispetto all'asse del fascio. Se una parte della corrente impatta sulla camera di scarica, è possibile che venga assorbita dal metallo e venga assimilata dalla corrente riscaldante, non potendo più essere sfruttata per la ionizzazione dei gas.

Questa ipotesi andrebbe approfondita con l'aiuto di strumenti appositi, per controllare l'effettiva forma del fascio di elettroni, tuttavia il fatto che aumentando il potenziale di anodo si rilevano incrementi importanti nella corrente misurata in uscita dall'anodo potrebbe essere una conferma, poiché la componente radiale della velocità diventerebbe

sempre più trascurabile al crescere della componente assiale generata dal campo elettrico dell'anodo.

Naturalmente non si esclude che i due effetti esaminati possano verificarsi assieme durante il funzionamento della sorgente.

I valori della corrente elettronica misurati, comunque, garantiscono un buon livello di ionizzazione ed è possibile passare all'analisi dei risultati delle prove di efficienza.

5.5. Prove di efficienza

Le prove di efficienza sono state effettuate sulla sorgente tipo FEBIAD per capire quale sia la capacità di ionizzazione di questo strumento. Si capisce che per la produzione degli isotopi radioattivi questo indice è fondamentale, poiché indica quanta materia si riesca effettivamente a ricavare da un bersaglio, e in altre parole esprime in un certo senso il rendimento dell'impianto.

Per calcolare l'efficienza, che d'ora in avanti verrà indicata con μ , bisogna considerare lo spettro delle masse rilevate attraverso il filtro di Wien. Poiché per avere una miglior suddivisione si utilizzano le slitte descritte nel paragrafo 5.2.3, se usassi le informazioni delle correnti del fascio di ioni lette direttamente sugli spettri perderei parte delle informazioni. Per poter stimare la quantità di corrente di fascio del gas nobile che mi interessa (Argon) prodotta dalla sorgente considero la percentuale di corrente della massa voluta (per l'Argon è $40 u$) rispetto alla totalità delle masse in uscita, e la moltiplico per il valore della corrente totale del fascio che leggo sulla prima stazione di diagnostica. In questo modo, sapendo che le particelle sono ioni I^+ , posso confrontare la produzione della sorgente con la quantità di gas immessa, nota dalla caratteristica del circuito (paragrafo 5.2.1). L'efficienza sarà calcolata attraverso la formula:

$$\mu = \frac{N_{ion.}}{N_{in}}, \quad (5.7)$$

dove N_{ion} è il numero di particelle del gas estratte dalla sorgente ed N_{in} è il numero di particelle di gas immesse nel sistema (è importante ricordare che i rapporti avvengono tra flussi di particelle, e non tra il numero degli atomi o degli ioni).

È chiaro che ciò che si misura non dipende dalla sola sorgente di ionizzazione, ma anche dal sistema di misura: la distanza dell'elettrodo estrattore, ad esempio, ha un effetto importante sulla quantità di ioni che si riesce a misurare, poiché quelli che escono dall'estrazione della sorgente con un angolo troppo elevato non vengono intercettati dal foro e sono dispersi.

Nelle misure che saranno presentate, la distanza dell'elettrodo estrattore è stata fissata, secondo un criterio sviluppato presso i Laboratori Nazionali di Legnaro. L'elettrodo infatti si può muovere lungo una guida da una posizione indicata con D , espressa in percentuale, dove lo 0% indica il punto più distante dal piatto della camera. Durante le prove è stato fissato $D = 70\%$, che indica una distanza fra elettrodo estrattore e flangia finale di circa 33 mm .

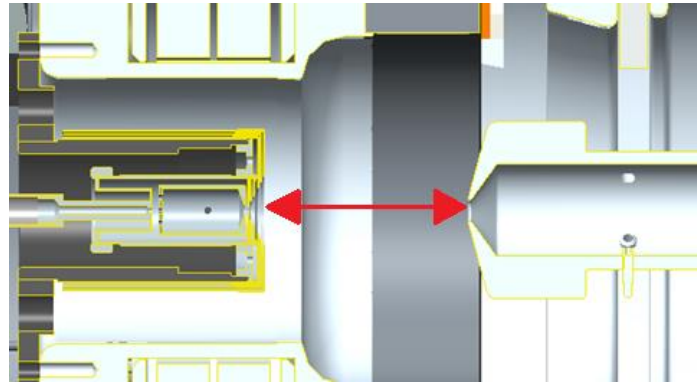


Figura 5.14: la freccia rossa indica la distanza fra elettrodo estrattore e zona di estrazione della sorgente.

È già stato spiegato quanto la deformazione del catodo influisca sul comportamento del sistema, perciò le prove senza vincolo assiale della linea di trasferimento. Si può però affermare che la tenuta strutturale dell'oggetto è un aspetto fondamentale, e con la crociera di centraggio già mostrata in Figura 5.13 e che sarà descritta in dettaglio nel Capitolo 6, si è cercato di garantire una maggiore rigidità in senso assiale al corpo centrale del catodo, così da provare a limitare le deformazioni termiche che possono compromettere il funzionamento della sorgente.

È stato notato infatti che con l'introduzione di questo sistema, nonostante non si sia riusciti ad annullare completamente la deformazione in verso negativo rispetto all'anodo, che l'efficienza è aumentata rispetto alla configurazione originale, poiché limitando l'allontanamento della faccia frontale si evita che la soglia dovuta alla legge di Child-Langmuir diventi il fattore preponderante nella trasmissione degli elettroni, permettendo così un maggior flusso elettronico tra catodo ed anodo e quindi favorendo la ionizzazione per impatto.

I dati sono riportati nel Grafico 5.8.

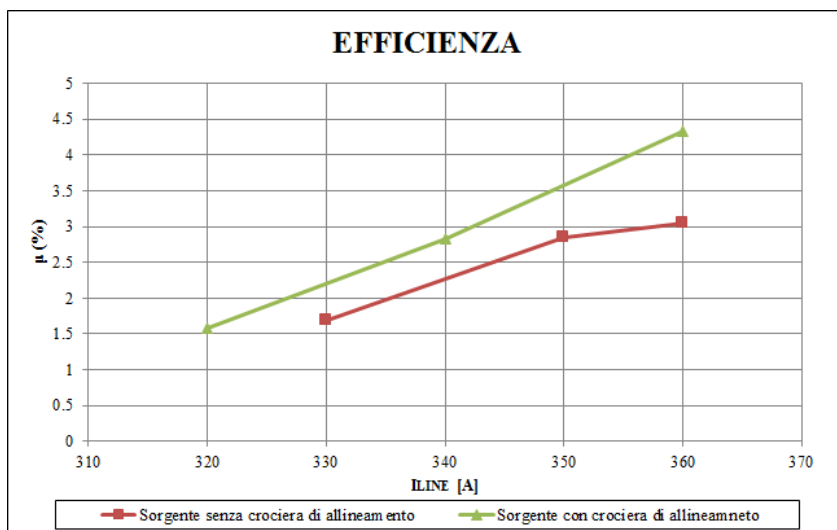


Grafico 5.8: incremento dell'efficienza della sorgente riscontrato con l'inserimento dell'irrigidimento assiale del corpo centrale del catodo.

Si è quindi continuato in tutte le prove successive ad usare la configurazione con le prestazioni migliori, anche dopo aver introdotto il vincolo per la linea di trasferimento. In particolare, il comportamento che è stato osservato riguarda la crescita dell'efficienza rispetto alla temperatura del catodo: quando si supera il valore di 350 A della corrente riscaldante, il catodo è caldo a tal punto che poteva avvenire una fusione del materiale sul cordone di saldatura della faccia frontale, portando alla distruzione dell'oggetto, dovuta anche al fatto che la faccia si sposta in senso contrario rispetto alla posizione dell'anodo. Con la crociera di allineamento che garantisce, seppur non in maniera definitiva, una certa rigidità nella direzione della deformazione, il catodo rimaneva integro e poteva continuare a lavorare, nonostante si andassero a rilevare valori bassi della corrente elettronica (appena superiori ai 60 mA per $I_{LINE} = 360\text{ A}$).



Figura 5.15: immagine del catodo deformato con (a sinistra) e senza (a destra) crociera di allineamento. Si nota come l'oggetto si rompa se la deformazione non viene opportunamente controllata.

Nel caso mostrato nel Grafico 5.8 gli spettri indicavano che la presenza del contaminante, che è stata osservata crescere al crescere della temperatura, probabilmente per un effetto dovuto alla sezione d'urto di ionizzazione (il contaminante principale è il picco con $m/q = 28 u$, che corrisponde alle molecole N_2 o CO). Un esempio di uno spettro ottenuto durante le prove è mostrato in Grafico 5.9, in cui si può osservare chiaramente che il picco maggiore è quello relativo ad $m/q = 40 u$, che rappresenta l'Argon, cioè il gas che stiamo immettendo. In questo modo una grande frazione della corrente di fascio totale sarà composta dal gas nobile, quindi l'efficienza risulterà maggiore rispetto al caso in cui uno dei contaminanti risulti la massa più presente.

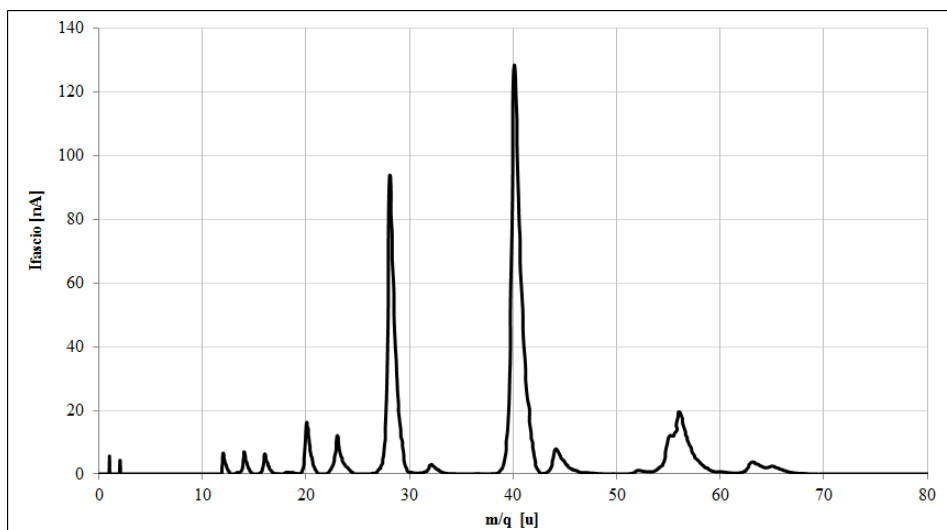


Grafico 5.9: spettro delle masse ottenuto durante le prove senza bloccaggio assiale della linea di trasferimento.

Queste prove mostrano che non si riesce a superare il valore di $\mu = 4.5\%$, ma, come è stato più volte osservato, la deformazione del catodo influisce in maniera determinante sul processo di ionizzazione, vincolando la corrente elettronica attraverso la modificazione della soglia di Child-Langmuir.

È importante anche visualizzare come varia l'efficienza rispetto alla corrente elettronica, per poter confermare le osservazioni fatte in precedenza rispetto all'importanza di questo parametro.

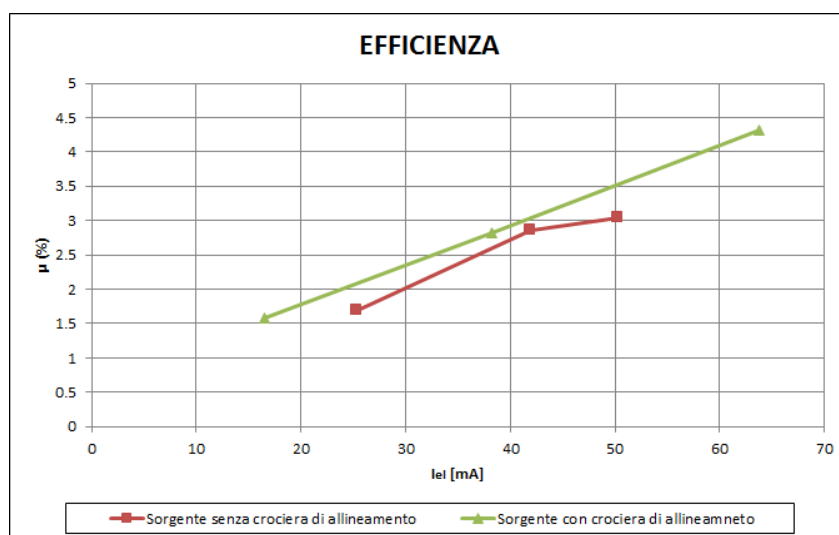


Grafico 5.10: efficienza della sorgente al plasma con e senza la crociera di allineamento al variare della corrente elettronica.

Dal Grafico 5.10 si nota ciò che era stato dedotto dalle considerazioni sul processo di ionizzazione: al crescere della corrente elettronica l'efficienza cresce: in particolare si

nota che nei due andamenti (rosso e verde), per valori di I_{el} entrambi vicini a 40 mA l'efficienza risulta sempre vicina al 3%, naturalmente in condizioni di contaminazione simili. Questo conferma che la corrente elettronica è il parametro chiave su cui occorre indagare in maniera approfondita.

Dopo queste prove, che sono state considerate come preliminari poiché falsate dalla deformazione in verso “negativo” della faccia frontale del catodo, poiché quando sarà accoppiato il bersaglio questo costituirà un irrigidimento notevole ed impedirà tali deformazioni, ed a seguito del riscontro di un guasto alla sorgente (cortocircuito dell'anodo con la linea della corrente riscaldante) ed all'elettrodo estrattore (rottura della vite guida che ne regola la posizione) che ha comportato un periodo di fermo macchine, sono state eseguiti alcuni aggiornamenti all'apparato di misura. In particolare, per quanto riguarda la sorgente, è stato adattato il sistema di bloccaggio delle traslazioni in senso assiale della linea di trasferimento già utilizzato per le prove sul catodo ad alta temperatura. La nuova installazione è mostrata in Figura 5.16.

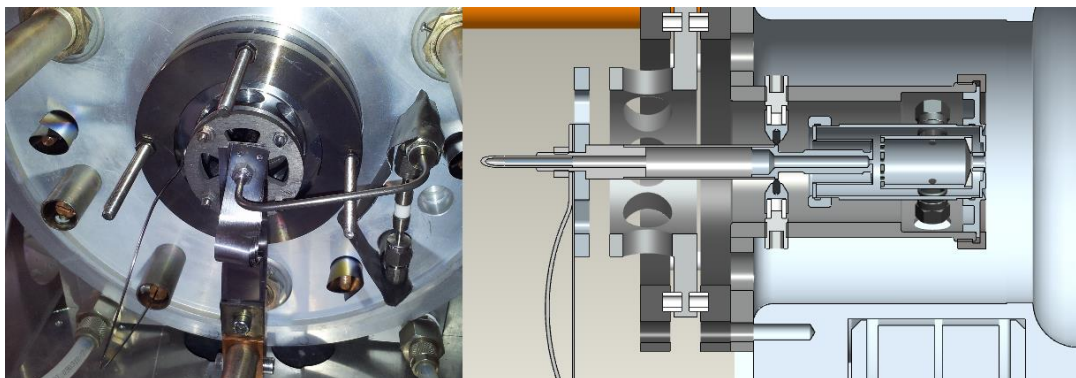


Figura 5.16: sorgente al plasma montata sul piatto della camera da vuoto con bloccaggio per evitare traslazioni all'indietro della linea di trasferimento. A destra si può osservare il modello CAD del sistema.

Le prove di efficienza eseguite con questa configurazione sono state effettuate con valori della corrente riscaldante di 320 A , 340 A e 360 A . Prima di tutto si faranno alcune considerazioni sugli spettri ottenuti durante le prove, ed in seguito si analizzeranno i dati.

Nei tre grafici successivi (Grafico 5.11, Grafico 5.12 e Grafico 5.13) sono riportati gli spettri delle masse ottenuti al variare della corrente riscaldante.

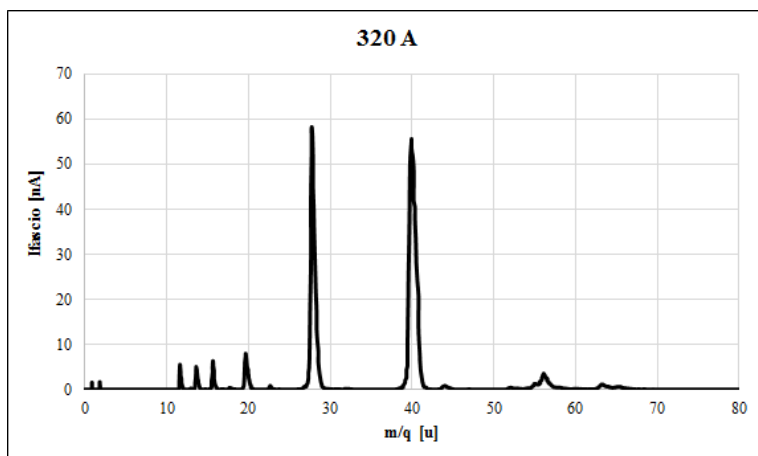


Grafico 5.11: spettro delle masse ottenuto dalle prove con la sorgente al plasma per una corrente riscaldante di 320 A. Sulla sorgente è montato il vincolo per la linea di trasferimento.

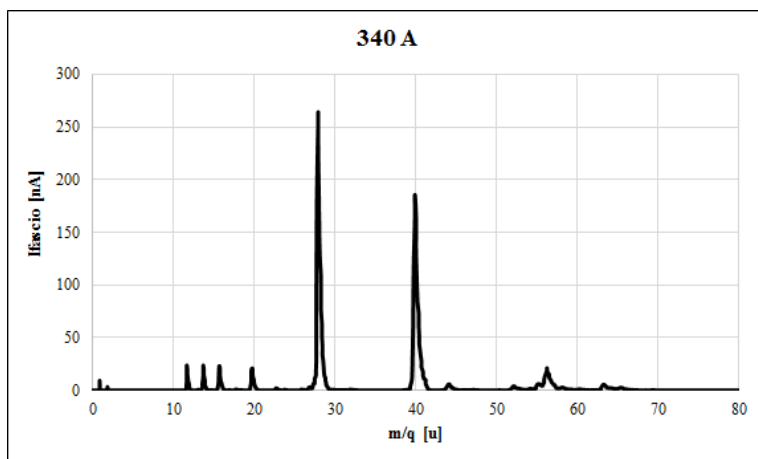


Grafico 5.12: spettro delle masse ottenuto dalle prove con la sorgente al plasma per una corrente riscaldante di 340 A. Sulla sorgente è montato il vincolo per la linea di trasferimento.

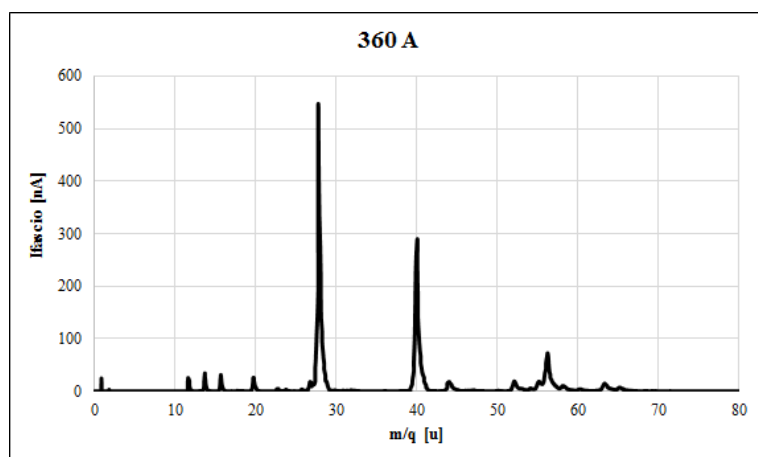


Grafico 5.13: spettro delle masse ottenuto dalle prove con la sorgente al plasma per una corrente riscaldante di 360 A. Sulla sorgente è montato il vincolo per la linea di trasferimento.

Si nota subito l'effetto già sottolineato che prevede che al crescere della temperatura aumenti la presenza di contaminanti. In particolare la forte presenza di N_2 e di altri gas fanno pensare che durante le sostituzioni di alcuni componenti dell'impianto possa essersi spostata qualche guarnizione che provochi un'infiltrazione d'aria nella camera.

Nella Tabella 5.5 sono riportati i parametri ricavati durante le prove:

$I_{LINE} [A]$	$I_{el} [mA]$	$I_{fascio,totale}$	μ (%)
320	41.5	820	1.53
340	103.2	2475	3.83
360	231.5	4380	5.02

Tabella 5.5: dati relativi al fascio di ioni ricavati durante le prove di efficienza. Si nota che i valori delle correnti elettroniche sono molto più elevati rispetto a quelli calcolati senza vincolo della linea di trasferimento (vedi Grafico 5.10, asse orizzontale). La $I_{fascio,totale}$ è la corrente di fascio misurata nella prima stazione di diagnostica. Si nota che la contaminazione non permette una misura di alti valori dell'efficienza μ .

Infine in Grafico 5.14 e Grafico 5.15 si possono vedere gli andamenti relativi ai dati riportati in Tabella 5.5.

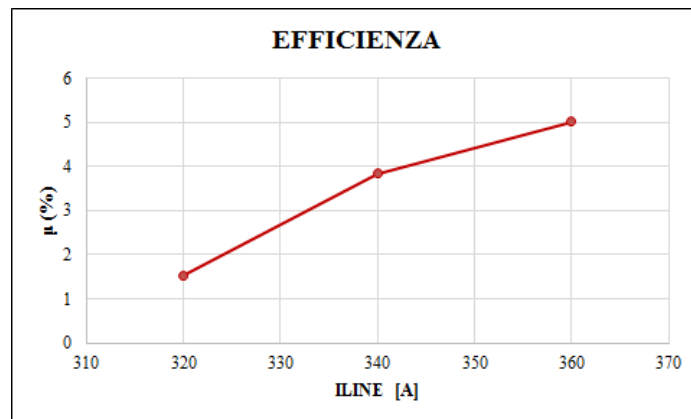


Grafico 5.14: andamento dell'efficienza al variare della corrente riscaldante.

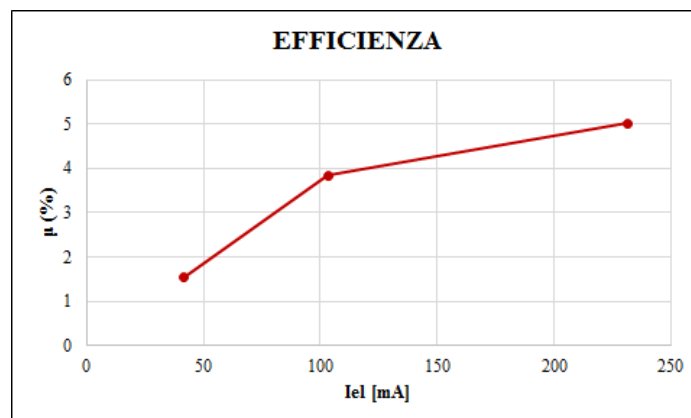


Grafico 5.15: andamento dell'efficienza al variare della corrente elettronica.

Di seguito è mostrato il confronto fra le tre prove esaminate finora, con l'indicazione sul fattore di pulizia N . Questo parametro è ottenuto rapportando la corrente misurata dell'elemento che ci interessa (l'Argon) con quella del contaminante principale (l'Azoto biatomico), per capire quanto la mia misura è influenzata dalle condizioni della camera. In Grafico 5.16 e Grafico 5.17 sono riportati i valori di efficienza già mostrati in precedenza per le varie configurazioni della sorgente, ma è anche inserito l'andamento del fattore di pulizia N (valori sugli assi secondari). In particolare si nota che per le prove senza vincolo assiale della linea di trasferimento la contaminazione del sistema è confrontabile, mentre, dopo il fermo macchine e l'introduzione del vincolo, l'Argon non è più il componente principale del fascio.

Tuttavia si nota che la riduzione dell'allontanamento della faccia del catodo dalla griglia tende ad incrementare l'efficienza nonostante le peggiori condizioni di lavoro.

Si può notare che la contaminazione ha il suo effetto peggiore nel fatto che non permette di sfruttare la maggiore corrente elettronica generata.

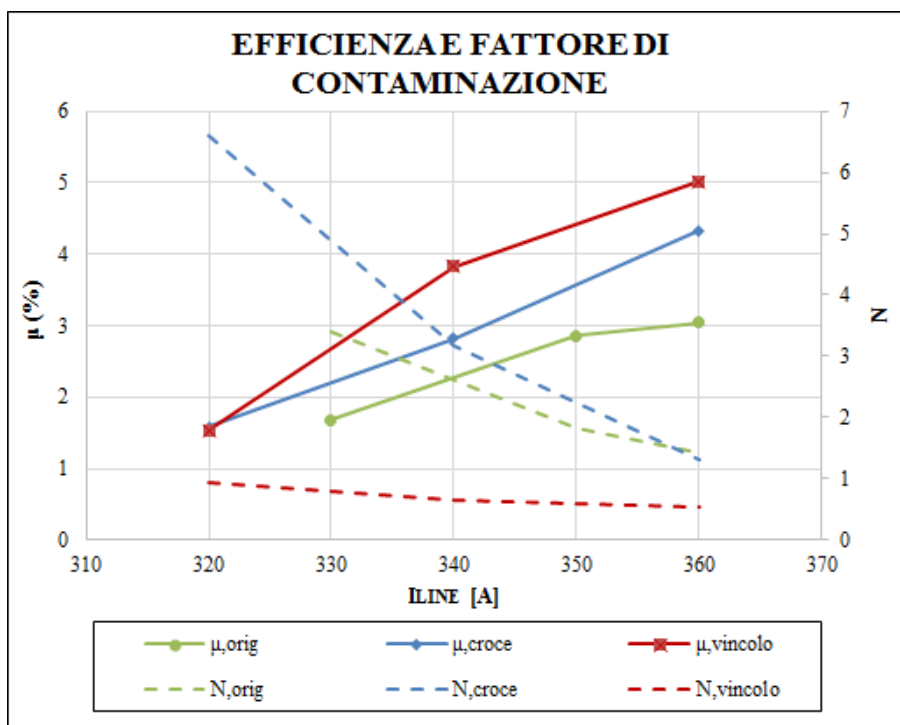


Grafico 5.16: efficienza (riportata sull'asse sinistro) e fattore di pulizia (sull'asse destro) misurate nelle prove di efficienza per le varie versioni della sorgente, in particolare *orig* indica la versione senza alcun vincolo, *croce* indica la presenza della crociera di allineamento e *vincolo* indica la presenza del bloccaggio della linea di trasferimento. I valori sono riportati rispetto alla corrente riscaldante.

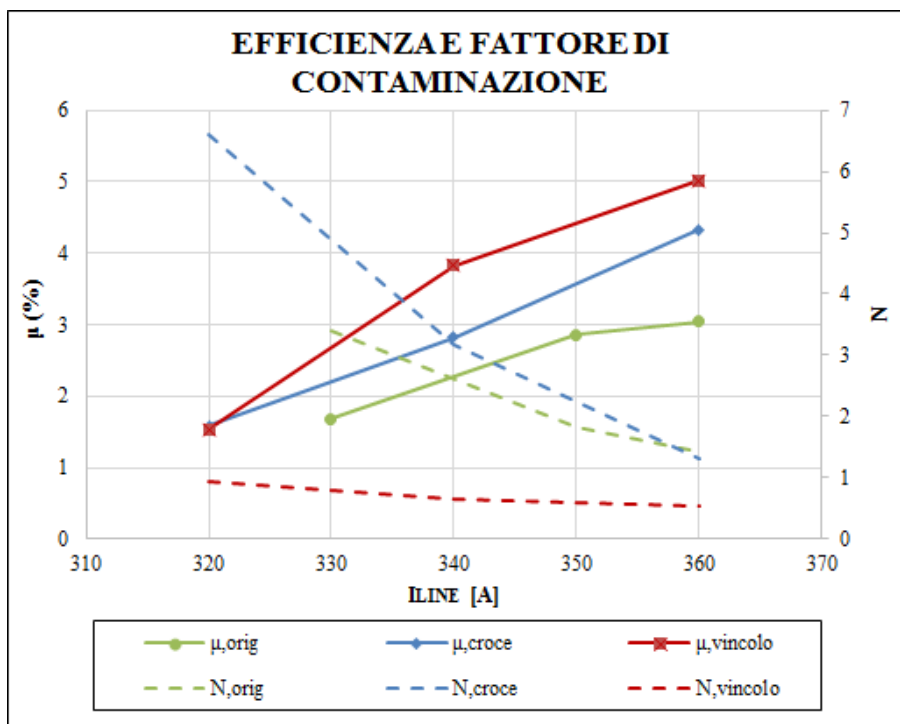


Grafico 5.17: efficienza (riportata sull'asse sinistro) e fattore di pulizia (sull'asse destro) misurate nelle prove di efficienza per le varie versioni della sorgente, in particolare *orig* indica la versione senza alcun vincolo, *croce* indica la presenza della crociera di allineamento e *vincolo* indica la presenza del bloccaggio della linea di trasferimento. I valori sono riportati rispetto alla corrente elettronica.

Le conclusioni che si possono trarre da queste misure sono che l'efficienza della sorgente al plasma misurata non è molto alta, poiché ci si attendevano valori vicini al 10%. Tuttavia le prove sono state caratterizzate da una forte presenza di contaminante, infatti sia dagli spettri che dai grafici si nota che più la temperatura sale, più grande è l'effetto delle diverse masse sull'efficienza. Il problema, come già accennato, non riguarda più il processo di ionizzazione, ma tutto il sistema su cui la sorgente va ad operare. Il fatto che la sorgente FEBIAD non sia selettiva e possa ionizzare ogni tipo di elemento o molecola venga a trovarsi all'interno della camera, può essere un fattore positivo ma può rappresentare un grande problema se si voglia produrre una specie ben precisa, poiché dovrà avere strumenti di separazione delle masse adeguate.

Tuttavia appare evidente che la capacità di ionizzazione della sorgente è elevata, poiché i valori delle correnti di fascio totali indicano che si riesce ad estrarre fascio in quantità soddisfacente (quando il contaminante non è aria ma sono metalli come Sodio o Rame, la corrente di fascio può arrivare a valori superiori ai 10000 nA).

5.6. Conclusioni

In questo Capitolo, le prove eseguite per la caratterizzazione della sorgente sembrano confermare quanto osservato durante le fasi precedenti dello studio: infatti, sebbene attraverso il modello FEM non si riesca a dare una buona approssimazione della corrente elettronica con la legge di Richardson, ciò sembra dovuto più ad un problema di definizione del modello (dal punto di vista fisico se fosse verificata l'ipotesi dell'effetto della carica spaziale, da quello delle proprietà dei materiali se è vero il fatto che le superfici restino ossidate). Tuttavia il modello numerico resta uno strumento utile per valutare le caratteristiche dell'oggetto, ma per svilupparlo occorre uno studio più approfondito di questi aspetti (purtroppo non si è avuto il tempo di analizzare i materiali e di creare un modello per simulare il comportamento degli ioni).

Le prove di efficienza hanno inoltre confermato l'importanza della corrente elettronica, e messo in luce un aspetto che non era stato considerato prima, cioè quanto sia determinante la contaminazione ai fini della stima dell'efficienza della sorgente.

Appare comunque evidente che la capacità della sorgente di produrre un fascio di ioni sia elevata, e che qualsiasi molecola vada a trovarsi all'interno della camera di anodo venga ionizzato.

L'ottimizzazione che seguirà servirà quindi a fornire il progetto di un sistema con prestazioni ancora migliori, e che abbia anche una maggior affidabilità del punto di vista strutturale.

Bibliografia

- [1]. M. Marin, *Analisi Elettro-Termo-Strutturale, Sviluppo e Test di una Sorgente di Ionizzazione Superficiale per il Progetto SPES*, Tesi di Laurea Magistrale, Università degli Studi di Padova, 2012/2013.
- [2]. A. Monetti, *Studio, Simulazione e Test di un Apparato per la Produzione di Fasci Radioattivi*, Tesi di Laurea Magistrale, università degli Studi di Padova, 2011/2012
- [3]. Laura Cavaletto, *Studio dei meccanismi di ionizzazione e della formazione del plasma in una sorgente per il progetto SPES dei Laboratori INFN di Legnaro*, Tesi di Laurea Magistrale, Università degli Studi di Padova, 2012/2013.
- [4]. M. Manzolaro et al., *Ongoing Characterization of Forced Electron Beam Induced Arc Discharge Ion Source for the Selective Production of Exotic Species Facility*, Review of Scientific Instrument 85, 02B918, 2014.
- [5]. Y. S. Touloukian e D.P. DeWitt, *Thermophysical Properties of Matter*, v 7, IFI/Plenum, NY, 1970.
- [6]. Michael F. Modest, *Radiative Heat Transfer*, II edition, Academic Press, 2003.

CAPITOLO 6

PROGETTAZIONE ED OTTIMIZZAZIONE DELLA SORGENTE FEBIAD

6.1. Introduzione

L'ultima parte dello studio svolto e presentato in questa tesi riguarda le proposte di miglioramento che si sono ideate per migliorare il comportamento della sorgente.

Quest'ultima, come è stato esposto nei Capitoli precedenti, è un oggetto delicato e difficile da gestire, che richiede molta attenzione a partire dalla fase di montaggio fino a quando il sistema viene acceso ed utilizzato. Le geometrie originali sono state pensate per garantirne il funzionamento, ma non è ancora stato eseguito un processo di studio volto ad ottimizzare il comportamento termico dei componenti (è stato spiegato come più caldo sia il catodo nella zona frontale, maggiore diventi la corrente elettronica emessa secondo la formula di Richardson), e non è stato verificato se sia possibile controllare le deformazioni causate dalla temperatura, che sappiamo causare una modifica nelle leggi che controllano i fenomeni fisici in gioco (una su tutti la legge di Child-Langmuir che riguarda lo spostamento della faccia frontale del catodo). Infine si potrebbe passare attraverso una fase di semplificazione da cui si possa sviluppare una nuova versione della sorgente al plasma tipo FEBIAD, del tutto simile alla prima per quanto riguarda i principi di funzionamento, ma che garantisca a colui che esegua il montaggio un approccio più semplice, in modo che in fase di assemblaggio risulti più facile e comodo controllare i parametri che garantiscano il funzionamento corretto dell'oggetto (come ad esempio l'allineamento dei corpi a simmetria assiale, cioè catodo, anodo e sistema di estrazione, i quali risultano fondamentali per avere in uscita un fascio di ioni che sia centrato e con buoni parametri di estrazione).

Per questi motivi ci si è concentrati sui punti descritti, per provare a concludere il lavoro di questa tesi fornendo un oggetto che possa già essere usato nel progetto SPES per produrre ioni radioattivi con buona efficienza, e che lasci aperta la strada ad ulteriori sviluppi partendo dai concetti e dalle metodologie qui esposte.

L'oggetto su cui si concentrerà la nostra attenzione sarà ancora una volta il catodo, che come già ampiamente osservato è uno dei componenti che principalmente incide sul processo di ionizzazione.

6.2. Ottimizzazione del campo di temperatura del catodo

Il primo aspetto da indagare per quanto riguarda l'ottimizzazione della sorgente di ionizzazione FEBIAD è verificare se esiste una possibilità per incrementare l'efficienza di ionizzazione.

6.2.1. Distribuzione della temperatura sul volume del catodo

Dallo studio sulle leggi fisiche che intervengono durante il funzionamento della sorgente al plasma, nella metodologia di ionizzazione per impatto di elettroni appare evidente che il numero di particelle che viene inviato verso l'anodo, e quindi di fatto l'intensità della corrente elettronica emessa dal catodo, regolata dall'effetto termoionico, influisce in modo significativo: in particolare si può pensare che aumentando la quantità di elettroni che vengono inviati alla camera di anodo, sia possibile aumentare allo stesso tempo la probabilità che un atomo di gas venga colpito e quindi ionizzato, passando allo stato plasma. Quindi, secondo la legge di Richardson, un aumento della temperatura del catodo, ed in particolare della zona frontale, porterebbe ad una maggiore emissione di elettroni che si tradurrebbe in una conseguente crescita dell'efficienza.

Per approfondire i concetti relativi alla ionizzazione per bombardamento di elettroni bisogna ricordare anche l'effetto della sezione d'urto di ionizzazione, che indica la probabilità di un atomo di un certo elemento di venire colpito da un elettrone, tuttavia tale trattazione non è importante al fine della nostra analisi, perciò si rimanda il lettore interessato a [1] e [2].

Il modo più conveniente per migliorare le prestazioni della sorgente è cercare di ottimizzare il campo di temperatura del catodo. Già nel Capitolo 3, era risultato che la corrente elettronica poteva essere stimata attraverso l'integrale della j_{eS} (densità di corrente calcolata con la legge di Richardson) sulla superficie frontale del catodo. Ma l'andamento della temperatura lungo il raggio indicava un raffreddamento man mano che partendo dal centro della faccia si proseguiva verso il bordo esterno, con questa configurazione non si ottiene una corrente emessa omogeneamente da tutta la superficie. Già la geometria originale sviluppata presso i laboratori del CERN di Ginevra aveva affrontato il problema: la faccia frontale del catodo non ha spessore uniforme ma si

assottiglia verso l'esterno: secondo la legge di Ohm infatti, una sezione più sottile ha resistenza elettrica maggiore (minore è l'area attraversata dalla corrente, maggiore sarà la resistenza), e quindi la corrente al suo passaggio provoca un maggior riscaldamento (per l'effetto Joule). Quindi con questa configurazione rastremata si era cercato di redistribuire la corrente sulla superficie frontale.

Ciò che non è stato considerato però è un secondo effetto: il punto più caldo del catodo non è sulla faccia frontale, ma bensì si trova sul canale centrale. Grazie al modello FEM siamo in grado di indicare la zona più calda: il campo termico crea una sorta di “punto caldo” (in inglese *hot spot*): questo fenomeno ha un effetto negativo poiché sposta il massimo di temperatura dalla faccia frontale in una zona dove l'emissione di elettroni non viene sfruttata per la generazione della scarica, inoltre le alte temperature in gioco possono portare a deformazioni termiche che rovinano la struttura centrale dell'oggetto: se il sistema non è ben allineato si corre il rischio di perdere alcune particelle e di dover far grade uso dei deflettori per deviare il raggio di ioni, sporcandone le proprietà. In Figura 6.1 è mostrata la soluzione del modello FEM che ci indica la posizione della zona calda sul catodo in Tantalio.

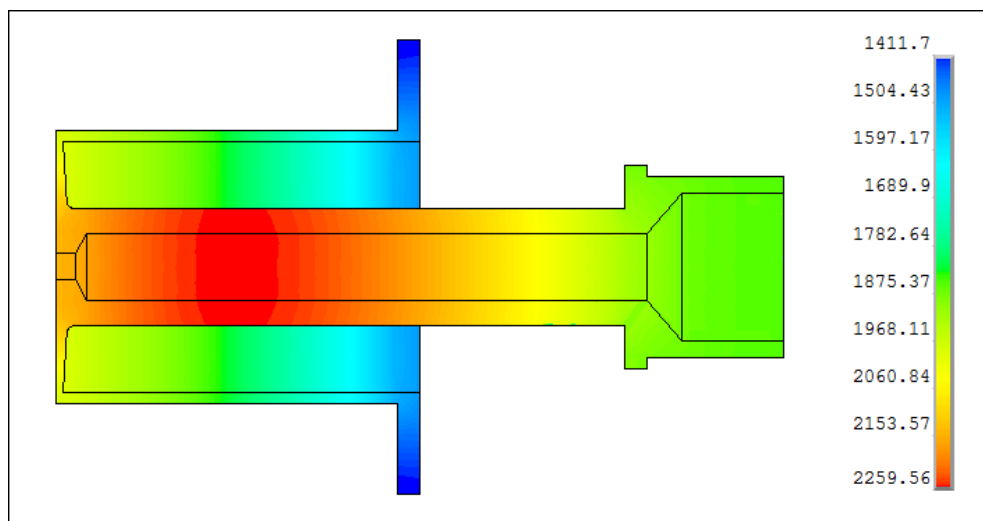


Figura 6.1: rappresentazione del campo di temperatura del catodo calcolato col modello a elementi finiti con corrente riscaldante imposta a 350 A. Si nota che la zona più calda (in rosso) è sul canale all'interno del quale fluiscono gli atomi di gas per essere ionizzati. Dalla scala cromatica si capisce che la faccia frontale è più fredda di almeno 100°C.

Lo spostamento della zona più calda dalla faccia frontale verso indietro può essere interpretata come una perdita in termini di prestazioni del catodo: non potrà ricavare tutta la corrente elettronica che avrei se l'oggetto fosse alla temperatura massima. Ciò che porta a questa configurazione del campo termico è la geometria del sistema: il punto più caldo

è anche quello che riceve più potenza radiante per effetto degli elementi che lo circondano. Inoltre il Tantalio, prima di cominciare a sublimare, può sopportare, alla pressione di circa 10^{-6} mbar, una temperature limite attorno ai 2200°C . Se anche solo un punto dell'oggetto raggiunge il livello massimo, non posso più aumentare la potenza. Perciò si capisce che se il punto non è vicino alla faccia frontale, sto sfruttando in modo non ottimale l'oggetto.

6.2.2. Realizzazione del catodo

Un'altra osservazione, basata sugli stessi principi che sono già stati espressi per il punto caldo, riguarda invece la lavorazione della faccia frontale. Sebbene il catodo si presenti come un pezzo unico e sia considerato come tale al fine delle analisi, in realtà è prodotto attraverso la saldatura di tre parti come si osserva nella tavola costruttiva di fig:

- La flangia di sostegno, che va in battuta con la camera di scarica;
- Il corpo centrale che costituisce il canale dove fluiscono i gas che saranno poi ionizzati e che termina con la faccia frontale;
- Il collare, cilindrico, che collega la flangia al corpo interno.

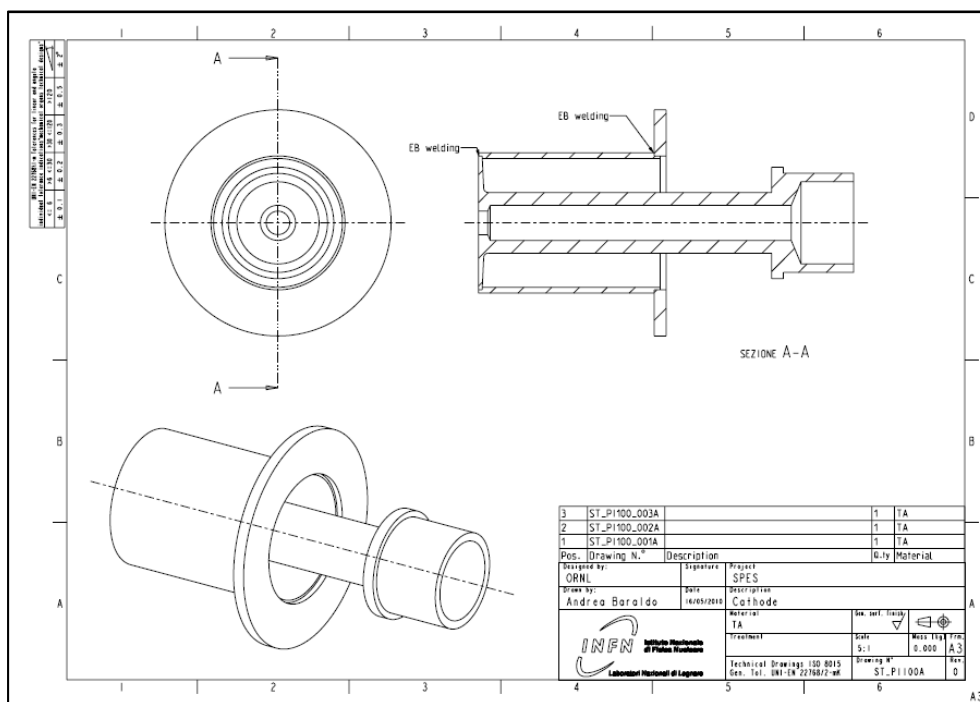


Figura 5.1: tavola costruttiva del catodo che ne mostra le tre diverse parti.

Le tre parti elencate sono realizzate per tornitura, ed il corpo centrale in particolare richiede un processo complicato eseguito da tecnici esperti.

La saldatura di materiali refrattari non è un'operazione banale: il punto di fusione di questi metalli (per il Tantalio superiore ai 3000°C) e l'alta possibilità di ossidazione rende l'operazione gestibile solo con alcune tecnologie.

La più semplice ed economica è la saldatura TIG (acronimo di *Tungsten Inert Gas*): è una saldatura ad arco elettrico con elettrodo infusibile in Tungsteno, eseguita sotto la protezione di un fascio di gas inerte (come l'Argon o l'Elio). Può essere eseguita con o senza materiale d'apporto, a seconda dell'applicazione. Il cordone risulta spesso ed irregolare.

Una seconda metodologia è la saldatura LASER, in cui un raggio luminoso ad alta energia viene usato come fonte di calore e indirizzato sul giunto. Il cordone che si ottiene in questo caso è più sottile e regolare, ma il processo è più costoso e richiede attrezzature particolari.

Ai Laboratori Nazionali di Legnaro si sono avuti a disposizione i catodi saldati con queste due tecnologie.

L'ultimo metodo che viene considerato è la saldatura a fascio di elettroni (*Electron Beam Welding*) che consiste nel far attraversare la zona del giunto che si desidera unire da un fascio di elettroni, generato da un catodo ed accelerato da una differenza di potenziale esattamente come nel caso della sorgente al plasma. Gli elettroni vengono fatti impattare sul materiale, scaldandolo e fondendolo, il processo deve avvenire all'interno di una camera da vuoto. Questo metodo è il più costoso ed è quello indicato sulle tavole costruttive del catodo originale realizzate presso il CERN. Purtroppo non si è potuto testare un catodo realizzato con questa tecnologia.

Ciò che influenza maggiormente l'emissione elettronica del catodo è ancora una volta la geometria e la temperatura della faccia frontale: la saldatura con tecnologia TIG che viene fatta per collegare il collare al corpo centrale porta alla generazione di una zona irregolare e più spessa sul cordone di saldatura. Il maggiore spessore e la geometria non perfettamente piana portano a raffreddamenti locali sulla superficie, così da ridurre la corrente elettronica e rendere i rilevamenti non ripetibili. La saldatura LASER fornisce risultati migliori in termini di finitura della superficie, poiché lo spessore del cordone è ridotto e limitato alle immediate vicinanze della zona di giunzione, ma in catodi testati avevano minore resistenza strutturale e in un caso si è anche arrivati alla rottura dell'oggetto in breve tempo, nonostante le correnti riscaldanti siano sempre state tenute al di sotto di 370 A . In Figura 6.2 sono rappresentati i catodi realizzati con saldature TIG e LASER testati durante lo svolgimento di questa tesi, mentre in Figura 6.3 è mostrato il

catodo con saldatura LASER in cui il cordone di saldatura risulta sciolto in parte dopo le prove di efficienza.

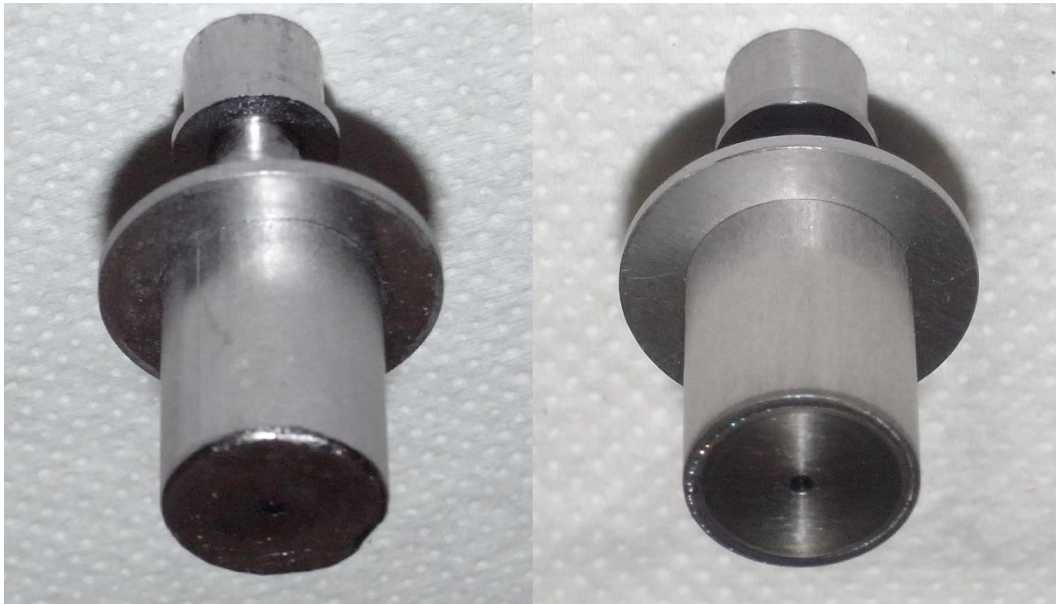


Figura 6.2: la fotografia riporta il catodo saldato LASER (a destra) con geometria più regolare, e quello saldato TIG (a sinistra) con più imperfezioni sulla faccia frontale.



Figura 6.3: rappresentazione del catodo con saldatura LASER dopo la rottura. In realtà la ionizzazione con un componente in queste condizioni è ancora possibile, ma la corrente elettronica risulta sempre decrescente col passare del tempo e l'efficienza è molto bassa, poiché la faccia continua a spostarsi all'indietro facendo scendere la soglia di Child-Langmuir. Questo catodo è stato usato nelle prove di efficienza senza bloccaggio assiale della linea di trasferimento.

Dopo che si è riscontrato dalle prove sperimentali e dall'esperienza acquisita nel tempo presso i LNL, che la geometria del cordone di saldatura sulla faccia frontale del catodo influenza già in modo marcato l'emissione di elettrone rendendo i rilevamenti della corrente elettronica accelerata verso l'anodo meno ripetibili più risulta irregolare, si è pensato di spostare la giunzione fra le due parti in una zona meno delicata dell'oggetto.

In particolare il nuovo progetto prevede che il diametro esterno della faccia vada a coincidere con quello del collare, spostando il cordone nella zona esterna. In questo modo è possibile utilizzare la tecnologia TIG, eventualmente effettuando la rasatura del cordone per migliorare la finitura dell'oggetto finale. In Figura 6.4 è possibile notare la modifica progettata nel modello CAD, a confronto con la versione originale di ISOLDE.

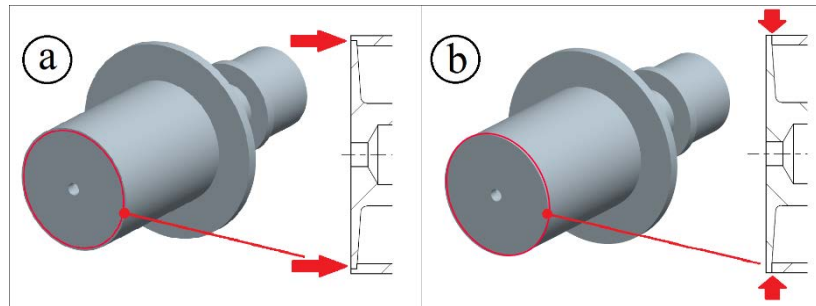


Figura 6.4: nell'immagine si possono osservare le due configurazioni dei catodi. La a) a destra rappresenta la versione del CERN che è quella con cui si sono eseguite le prove. La b) a sinistra rappresenta la proposta sviluppata per il progetto SPES presso i LNL. Dal dettaglio delle sezioni posto a fianco dei modelli tridimensionali, in cui è possibile osservare il diverso punto di giunzione fra collare e corpo centrale.

Questa modifica quindi dovrebbe rendere il comportamento dell'oggetto più regolare dal punto della corrente elettronica emessa, oltre a facilitare il processo di produzione e renderlo più economico, oltre ad evitare che una saldatura mal fatta o un cordone eccessivamente spesso causino lo scioglimento localizzato del materiale come successo per l'oggetto di Figura 6.3 o un eccessivo raffreddamento che vada ad influire sull'effetto termoionico.

Tutte le decisioni prese che coinvolgono il processo realizzativo sono studiate assieme a tecnici esperti per avere una conferma della fattibilità delle modifiche proposte. Per approfondire l'argomento sulla saldatura di materiali refrattari si rimanda a [3] e [4]

6.2.3. Studio del “punto caldo”

Il vero punto saliente dello studio riguarda però il tentativo di modificare il campo di temperatura del corpo centrale del catodo per poter spostare il picco di temperatura il più possibile verso la faccia frontale.

Visto che il riscaldamento del canale di passaggio dei gas da ionizzare dipende dai flussi termici di conduzione e radiazione, sono questi i due aspetti su cui concentrarsi.

Presso i Laboratori Nazionali di Legnaro erano già stati svolti degli studi in merito, che sono stati considerati come punto iniziale.

La riprogettazione dell'oggetto centrale della sorgente per quanto riguarda l'efficienza della sorgente è una fase delicata che ha bisogno di alcune considerazioni preliminari prima di produrre risultati accettabili: un tentativo di uniformare il campo termico radiante potrebbe essere sviluppato cercando di schermare la faccia frontale con componenti che riflettano la radiazione termica: in questo modo il calore potrebbe essere smaltito soltanto per conduzione e le zone dell'oggetto con spessore maggiore si raffredderebbero. L'aggiunta di un componente è però un'operazione complicata poiché bisogna tenere sempre presente che gli oggetti in gioco hanno diametri massimi di qualche centimetro, si capisce che l'ingombro è problematico da gestire, oltre al fatto che l'ostacolo maggiore è rappresentato dall'isolamento termico. Infatti i materiali che resistono a temperature così alte sono ceramici, spesso fragili e difficili da lavorare. Si è anche pensato di inspessire una zona della camera di scarica nei pressi della faccia frontale perché fungesse essa stessa da schermo, ma, oltre a complicare la realizzazione del pezzo, questa configurazione non ha fornito buoni risultati nei modelli numerici preliminari.

Lo studio iniziale svolto ai laboratori considerava invece la possibilità di accorciare il collare per permettere la radiazione che si sviluppa dal corpo centrale di disperdersi nella camera invece di essere riflessa. Anche in questo caso il modello FEM ha evidenziato che la zona calda, invece di avvicinarsi alla faccia frontale si spostava nel verso opposto.

Come già detto, la geometria della faccia frontale è rastremata per tentare di rendere l'andamento di temperatura lungo il raggio il più uniforme possibile, perciò andare a modificare questa zona sarebbe molto complicato, senza contare che un'ulteriore riduzione di spessore per aumentare la resistenza elettrica è fuori questione per problemi realizzativi (il corpo centrale viene realizzato per tornitura).

Da queste osservazioni si capisce che il procedimento più semplice da seguire è quello di cercare di ridefinire il campo termico cercando di modificare il flusso conduttivo: aggiungendo materiale in un punto preciso, si otterrà un raffreddamento locale, quindi con un inspessimento del corpo centrale nei pressi della zona calda si dovrebbe ottenere l'effetto desiderato.

Per studiare gli effetti delle modifiche che apportiamo alla sorgente per quanto riguarda il campo termico il codice a elementi finiti è lo strumento ideale: in breve tempo consente di confrontare molti modelli diversi per capire quale sia la migliore configurazione cercata.

Il modello FEM sviluppato per lo studio del catodo è simile a quello descritto nel Capitolo 3, con la differenza che si è considerato di avere una connessione elettrica ed una linea di trasferimento che si possa accoppiare al bersaglio radioattivo. In particolare la linea di connessione elettrica viene in questo caso trascurata e la linea di trasferimento viene allungata fino alla lunghezza di 100 mm . Il bersaglio non viene modellato perché non interessante ai fini dall'analisi. La temperatura alla base della linea di trasferimento viene lasciata libera per confrontare i vari modelli, poiché più prove hanno evidenziato che comunque il campo termico del catodo è influenzato in maniera minima dalle condizioni al contorno degli elementi più distanti.

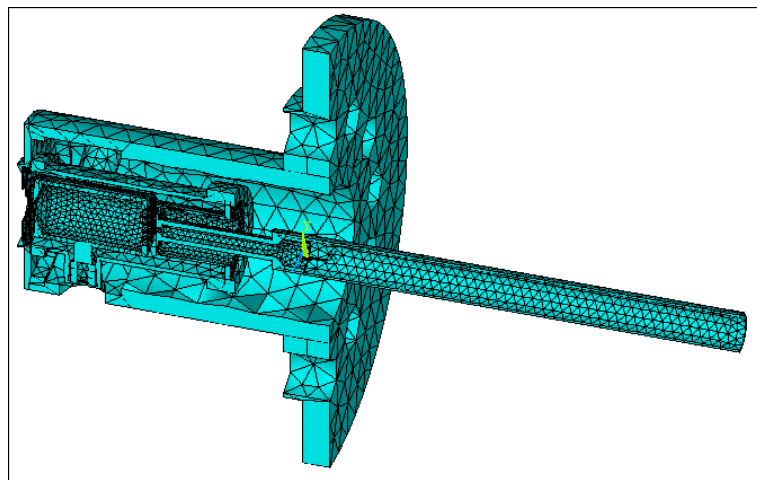


Figura 6.5: modello FEM della sorgente di ionizzazione usato per i confronti fra catodo originale e modello ottimizzato.

Un'altra precisione da fare prima di introdurre gli sviluppi sul catodo riguarda i parametri da studiare: i dati che si esaminano devono essere in relazione con gli obiettivi che ci si pone, che nel nostro caso sono l'omogeneizzazione della temperatura sulla superficie frontale e lo spostamento della zona calda verso l'estremità del catodo. Oltre a questi aspetti, si sono posti dei vincoli ulteriori per quanto riguarda il campo termico dell'oggetto: andando ad aggiungere del materiale nella zona del canale centrale si andrà a raffreddare il catodo, e quindi ad abbassare la temperatura media di tutti gli oggetti che compongono la sorgente. Nella linea di trasferimento avviene il passaggio delle particelle da ionizzare, che nel progetto SPES saranno ioni radioattivi ad alta temperatura; delle zone troppo fredde fanno sì che per equilibrio termico gli atomi vadano a depositarsi, impendendo quindi l'estrazione ed abbassando l'efficienza del processo di produzione. Si dovrà perciò fare attenzione che la differenza fra le temperature massime non sia troppo

elevata; per le nostre scelte si è fissata una soglia attorno ai 150°C , andandosi a basare sull'opinione e sull'esperienza dei ricercatori ai Laboratori Nazionali di Legnaro.

La corrente riscaldante imposta per lo studio è stata di 350 A : questa scelta è basata al fatto che tale valore di corrente è spesso usato durante le prove, poiché si è in grado di generare una corrente elettronica elevata senza raggiungere le condizioni di saturazione, e le temperature dell'oggetto sono già sopra i 2000°C , anche se siamo ancora a valori che consentono di non rovinare i componenti anche se permangono in tali condizioni per lungo tempo. Inoltre sappiamo che la temperatura, secondo il modello FEM, cresce linearmente di circa 40°C ogni 10 A di cui si incrementa la corrente riscaldante. Perciò la forma degli andamenti non si dovrebbe modificare al crescere di I_{LINE} .

Per comprendere come varia la distribuzione della temperatura si è scelto di analizzare diversi parametri: dal modello FEM si possono ricavare gli andamenti della temperatura sulla faccia frontale del catodo in direzione radiale, già esaminato nei Capitoli 3 e 4; naturalmente durante questo studio diventa fondamentale conoscere anche l'andamento sul corpo centrale in direzione assiale, sarà perciò ricavata la curva che descrive le temperature lungo l'asse centrale, e questa costruzione sarà ripetuta anche per il controllo delle geometrie sulla linea di trasferimento. La Figura 6.6 rappresenta i percorsi lungo cui sono state rilevate le temperature del modello numerico.

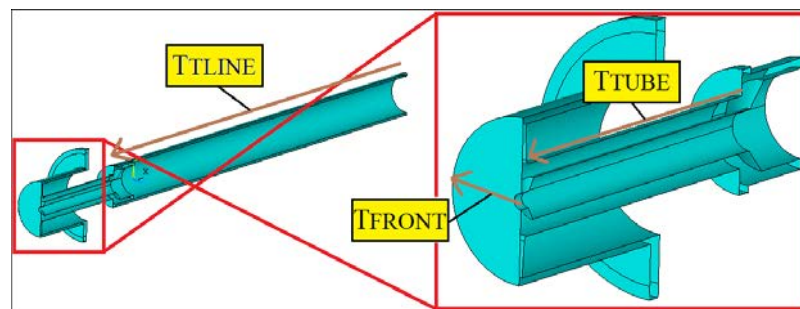


Figura 6.6: l'immagine rappresenta gli andamenti (mostrati come frecce marroni) lungo cui è stata rilevata la temperatura del catodo (a sinistra) e della linea di trasferimento (a destra) con i rispettivi nomi. I percorsi sono stati mantenuti gli stessi anche sul modello di catodo con l'incremento di spessore sul corpo centrale.

Ciò che interessa da questi andamenti è un indice che possa descrivere in maniera adeguata l'intensità del campo di temperatura della zona più calda e il gradiente sulla faccia frontale. Per questo sono stati adottati tre differenze:

- La ΔT_{MAX} è la differenza fra il massimo dell'andamento rilevato lungo l'asse del catodo e il massimo di quello sulla faccia frontale, che indica quanto intenso sia

l'effetto del punto caldo sull'oggetto. Più questo valore è basso, più sto sfruttando il campo termico per la produzione della scarica elettronica;

- La ΔT_{FRONT} è la differenza fra massimo e minimo valore delle temperature sull'andamento della stessa rispetto al raggio, rilevato sulla faccia frontale. Rappresenta una sorta di rendimento della superficie del catodo, poiché l'abbassarsi di questo parametro indica che sto sfruttando tutto il materiale allo stesso modo per quanto riguarda l'emissione termoionica;

- La ΔT_{TUBE} è la differenza fra valore massimo e minimo di temperatura sull'andamento della stessa lungo il canale del corpo centrale del catodo. Anche questo parametro indica l'intensità del punto caldo, considerando però solo il canale dove scorre il fascio. Anche questo parametro va minimizzato per avere un campo termico più efficiente.

Per la linea di trasferimento non c'è un indice particolare se non la temperatura massima sull'andamento ricavato dal modello FEM.

L'obiettivo diventa dunque studiare la migliore geometria che consenta di minimizzare gli indici descritti, così da avere le massime prestazioni del catodo per quanto riguarda la produzione di corrente elettronica. Bisognerà tenere conto tuttavia dei vincoli già descritti, e compiere scelte di compromesso.

Per effettuare una comparazione in maniera corretta bisogna che tutti i parametri su cui non interessa focalizzare l'indagine siano costanti nei vari casi, così da essere certi che gli scostamenti sui dati che otteniamo siano causati esclusivamente dalle modifiche che apportiamo al sistema. Per questo le temperature di vincolo dei nodi della superficie della flangia di supporto a contatto con la camera e dello spazio esterno sono state fissate a $50^{\circ}C$ mentre come corrente riscaldante è stato scelto un valore di I_{LINE} pari a $350 A$. In particolare sappiamo, dopo aver esaminato le analisi descritte nei Capitoli precedenti, che la corrente è il parametro che più di ogni altro influenza il campo di temperatura, poiché è anche l'unica causa che contribuisce al riscaldamento degli oggetti. Perciò dovremmo essere certi che cambiando il valore di I_{LINE} , gli effetti di riduzione della zona calda e di omogeneizzazione della temperatura che sono gli obiettivi del nostro studio e che cerchiamo di ottenere con le modifiche che apporteremo al sistema siano sempre valide. È possibile considerare verificata questa condizione perché era già stato osservato, dagli andamenti di temperatura descritti nei diagrammi dei Capitoli 3 e 4, che al crescere della corrente riscaldante il campo termico varia in modo quasi perfettamente lineare. Perciò, si può supporre a priori che delle piccole modificazioni sulla geometria degli oggetti non

cambi l'andamento trovato, ma li trasli semplicemente su una condizione più calda o più fredda. Naturalmente questa condizione, per il codice FEM sarà verificata una volta scelta la versione ottimale del catodo, producendo per questo oggetto una caratterizzazione completa del campo di temperatura al variare della corrente riscaldante.

Dalle considerazioni descritte sopra quindi, si può spiegare il perché la scelta per I_{LINE} sia ricaduta su $350 A$: per questo valore si ha infatti che il catodo originale ha una temperatura massima superiore ai $2000^{\circ}C$, che coincide con il campo di lavoro ipotizzato per la produzione di isotopi radioattivi.

Con queste considerazioni quindi, si può andare ad adoperare il codice ad elementi finiti per confrontare le varie modifiche che vengono apportate all'oggetto e scegliere la soluzione finale in base agli indici introdotti.

6.2.4. Geometria del catodo ottimizzato

Dalle precisazioni fatte nel paragrafo precedente si capisce che la soluzione che viene considerata per ridefinire il campo di temperatura del catodo è aggiungere del materiale nella zona più calda, per poterne favorire il raffreddamento per via del conseguente abbassamento della resistenza elettrica locale. Come accennato sono state testate altre geometrie, ma la complicazione realizzativa e lo scarso impatto in termini di incremento delle prestazioni relativo al campo termico valutato con dei modelli FEM preliminari ha spinto per un abbandono di modifiche quali, ad esempio, l'ispessimento della camera di scarica nella zona nei pressi della faccia frontale per favorire la riflessione del calore emesso per effetto radiante, la modifica della dimensione del collare cilindrico, che non dava risultati significativi con allungamenti (ottenuti tramite ispessimento della flangia di supporto) mentre accorciando peggiorava la situazione portando ad un'intensificazione del punto caldo; si è deciso inoltre di non modificare la faccia frontale poiché le geometrie originali sono già al limite della realizzabilità per quanto riguarda il processo di tornitura, agire sugli spessori avrebbe comportato l'infattibilità dell'oggetto.

Si è quindi deciso di inserire un ispessimento del corpo centrale così da raffreddarlo. Sempre pensando ai processi di produzione, si è pensato che la forma del canale centrale dovesse restare in ogni caso assialsimmetrica, perciò si è aggiunto un volume solido di rivoluzione con forma della sezione trapezoidale. Gli angoli alla base sono stati posti a 45° , e l'oggetto di studio per l'ottimizzazione sono stati:

- La distanza dell'ispessimento dalla faccia frontale " s ";
- L'altezza (diametro) dell'ispessimento " d ".

- La lunghezza del volume di materiale aggiunto “ l ”;

In Figura 6.7 e Figura 6.8 sono rappresentati la sezione del nuovo catodo ed i parametri studiati.

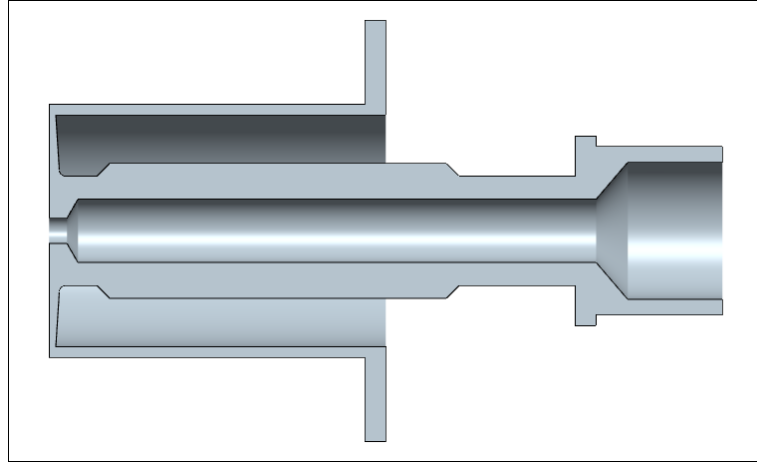


Figura 6.7: rappresentazione del catodo con geometria del corpo centrale modificata per favorire l'eliminazione del punto caldo.

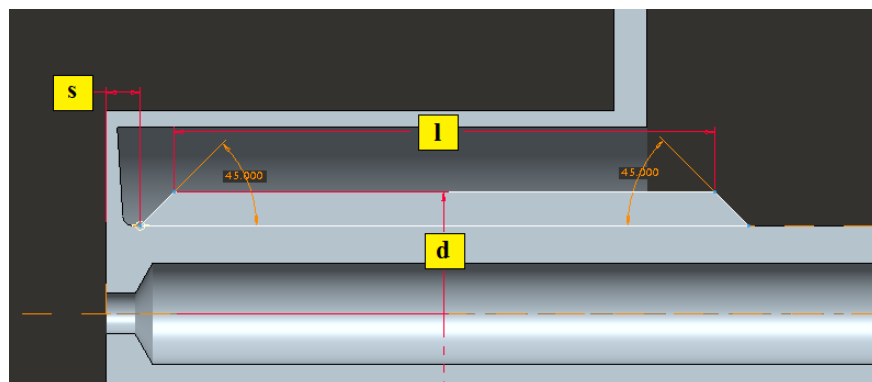


Figura 6.8: rappresentazione dei parametri studiati per eseguire l'ottimizzazione termica del catodo. s rappresenta la distanza del materiale aggiunto dalla faccia frontale, l la lunghezza dell'ispessimento e d il diametro massimo.

Per lo studio si è considerato un parametro per volta, variandolo in un intervallo definito per capire come si correlavano le modifiche geometriche con quelle del campo termico. Quindi, dopo tre analisi, si è giunti ad avere una forma ottimizzata che è stata caratterizzata.

Distanza dalla faccia frontale

Il primo parametro oggetto di studio è stato s : infatti la distanza dell'ispessimento dalla faccia frontale dev'essere scelta, oltre che in base alle considerazioni sul campo termico, anche con riferimento alla fattibilità dell'oggetto.

Sono state eseguite alcuni simulazioni imponendo $s = 0 \text{ mm}, 0.5 \text{ mm}, 1.0 \text{ mm}, 1.5 \text{ mm}, 2.3 \text{ mm}$. Lo scopo è capire se aggiungendo del materiale nella zona di prossimità del bordo frontale si ha un'omogeneizzazione della temperatura o viceversa.

I valori delle dimensioni che non state considerate in questa fase sono state poste a $l = 15 \text{ mm}$ e $d = 1 \text{ mm}$.

Per esaminare le differenze fra i modelli sono stati usati gli indici esposti nel paragrafo precedente, cioè ΔT_{MAX} , ΔT_{FRONT} e ΔT_{TUBE} , oltre alle temperature massime ricavate sui vari andamenti, cioè $T_{MAX,FRONT}$ sulla faccia frontale, $T_{MAX,TUBE}$ sul corpo centrale e $T_{MAX,TLINE}$ sulla linea di trasferimento. La Tabella 6.1 riporta i risultati ottenuti dal metodo ad elementi finiti.

s [mm]	$T_{MAX,FRONT}$ [°C]	$T_{MAX,TUBE}$ [°C]	$T_{MAX,TLINE}$ [°C]	ΔT_{MAX} [°C]	ΔT_{FRONT} [°C]	ΔT_{TUBE} [°C]
<i>CATODO ORIGINALE</i>	2153	2259	1880	106	166	352
0.0	1887	1910	1829	24	68	87
0.5	1914	1926	1929	13	79	102
1.0	1922	1933	1828	11	83	111
1.5	1928	1939	1828	10	86	119
2.3	1936	1947	1827	11	90	133

Tabella 6.1: dati relativi agli indici di confronto e alle temperature massime sugli andamenti esaminati relativi al campo di temperatura del catodo al variare del parametro s .

Nei grafici successivi sono riportati gli andamenti letti dalla soluzione del modello ad elementi finiti. In particolare Grafico 6.1 rappresenta la temperatura sulla faccia frontale rilevata in funzione del raggio, Grafico 6.2 rappresenta la temperatura lungo l'asse del corpo centrale, ed è qui che si può notare, specialmente sul catodo originale, la presenza della zona calda che riduce le prestazioni dell'oggetto, mentre Grafico 6.3 mostrala temperatura lungo la linea di trasferimento. È chiaro che per quest'ultimo, interessa in particolar modo il valore minimo e quello massimo, poiché evitare di raffreddare troppo il TUBE si tradurrà in una migliore estrazione degli isotopi radioattivi dal bersaglio.

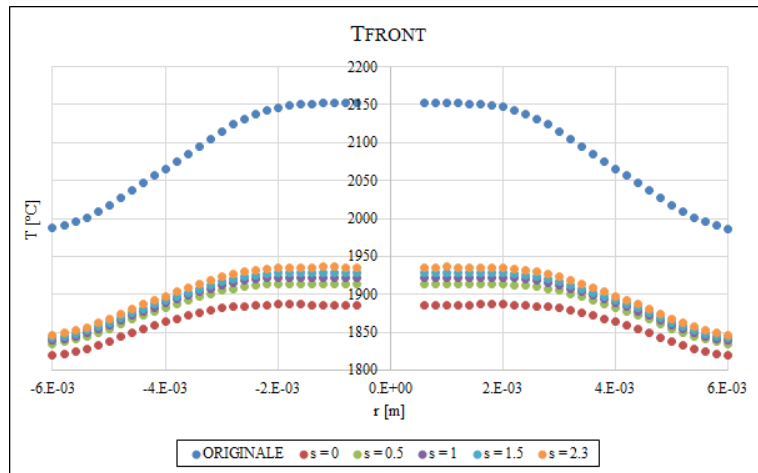


Grafico 6.1: andamento della temperatura sulla faccia frontale del catodo al variare di s .

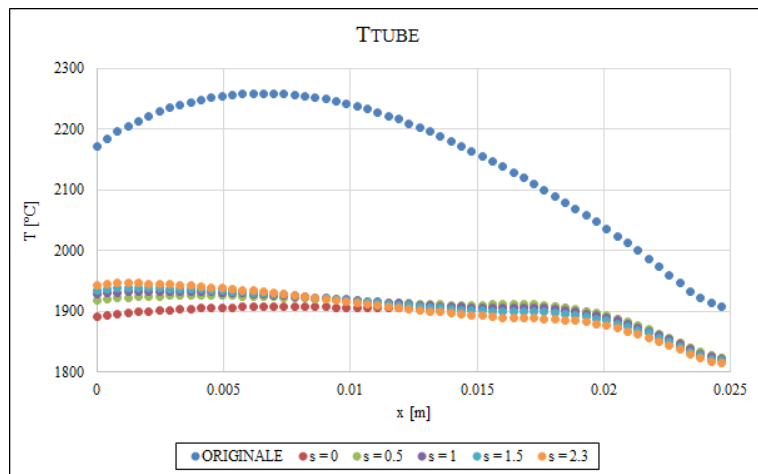


Grafico 6.2: andamento della temperatura lungo l'asse del corpo centrale del catodo al variare di s . Sul catodo originale è chiaramente visibile la zona calda.

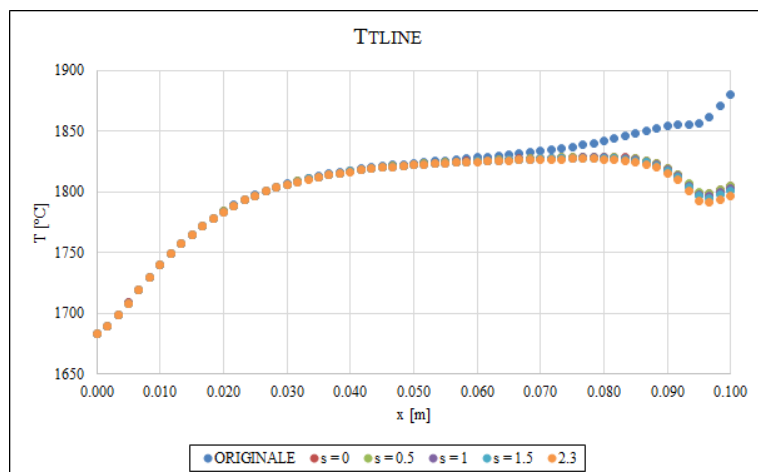


Grafico 6.3: andamento della temperatura sulla linea di trasferimento al variare di s .

Dai grafici che riportano gli andamenti, si possono trarre alcune conclusioni interessanti: innanzi tutto aggiungendo del materiale l'oggetto si raffredda, ed è ciò che

ci si attendeva per via di una massa che oltre ad abbassare la resistenza elettrica locale consente anche di disperdere più calore per conduzione.

Nel Grafico 6.2, per quanto riguarda il catodo originale, è chiaramente visibile il massimo di temperatura che va a definire la zona calda. Poiché lo θ della coordinata x rappresenta la faccia frontale, si capisce che il picco si trova a più di mezzo centimetro di distanza dal bordo, e ciò riduce pesantemente le prestazioni dal punto di vista termico. Si nota ad occhio, anche senza esaminare gli indici, che l'ispessimento provoca una omogeneizzazione della temperatura sulla faccia frontale (Grafico 6.1), in altre parole con la nuova configurazione si potrebbero estrarre più elettroni dalle zone periferiche.

Infine, dal Grafico 6.3 si nota che l'effetto sulla linea di trasferimento del raffreddamento è sensibile solo nella parte più prossima al catodo (valori alti dell'asse x), mentre nella zona che andrà nelle vicinanze del bersaglio il campo termico non varia.

Per la scelta del valore ottimo di s , si esaminano i dati in Tabella 6.1, che sono diagrammati in Grafico 6.4 e Grafico 6.5.

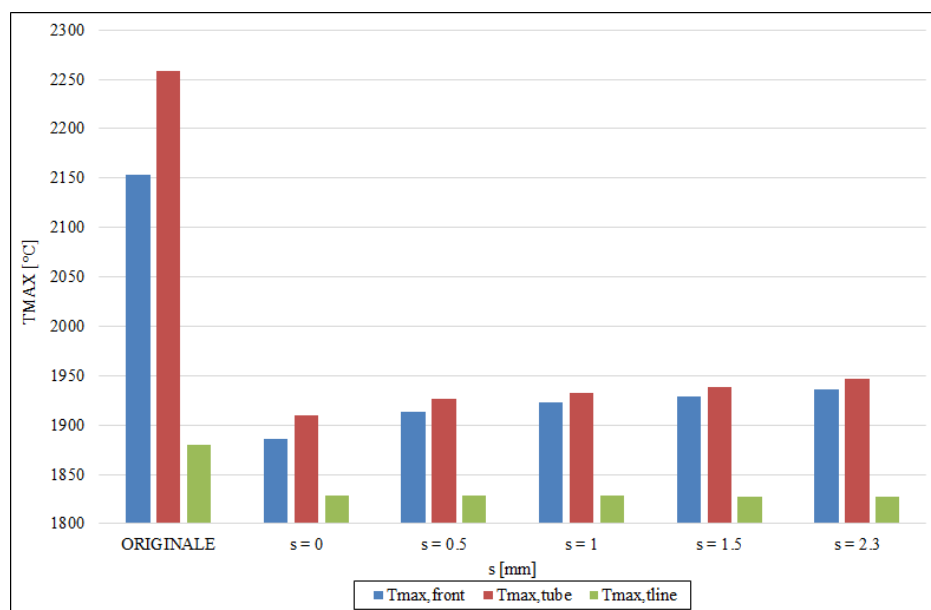


Grafico 6.4: istogramma che riporta le temperature massime degli andamenti sulla faccia frontale, lungo il corpo del catodo e sulla linea di trasferimento. Si nota come si verifichi un raffreddamento progressivo via via che avvicino l'ispessimento alla faccia frontale.

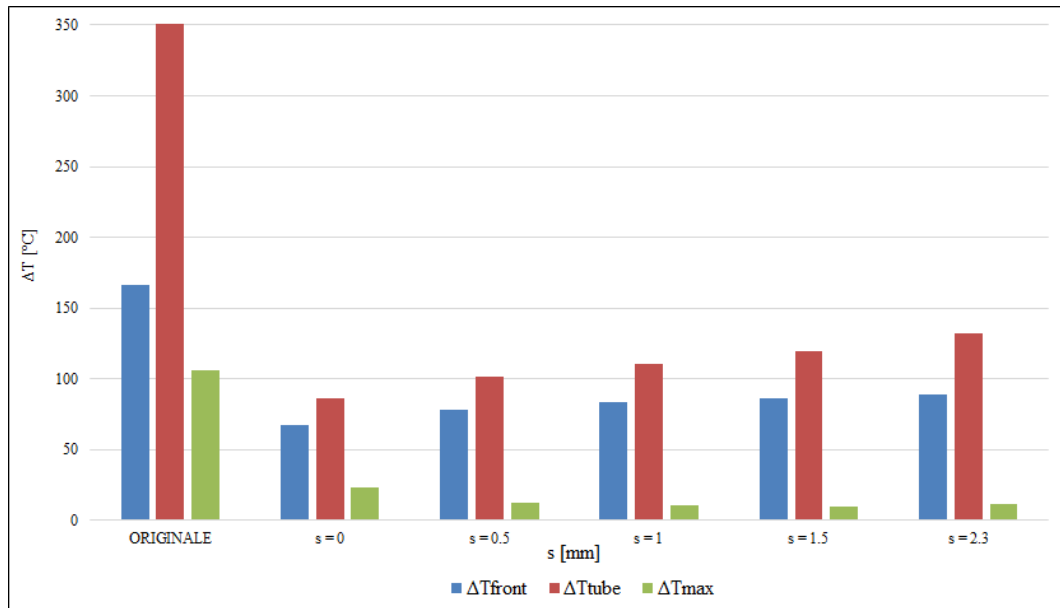


Grafico 6.5: rappresentazione degli indici già descritti nel paragrafo precedente. Si nota, come si può apprezzare dai grafici relativi agli andamenti della temperatura, il campo termico diventi più omogeneo inserendo più materiale sul corpo centrale.

Dagli istogrammi si può apprezzare come le variazioni degli indici e degli andamenti del campo termico al variare di s siano minime. Tuttavia, esaminando anche i dati numerici di Tabella 6.1 si può affermare che l'andamento ottimale si avrebbe avvicinando il più possibile l'ingrossamento al bordo frontale, poiché gli indici ΔT_{FRONT} e ΔT_{TUBE} sono minimi. ΔT_{MAX} invece, che si ricorda rappresenta lo scostamento fra corpo centrale e faccia frontale, non raggiunge un minimo assoluto, ma la differenza fra i vari modelli è talmente ridotta ($2^{\circ}C$) che si può trascurare. Quindi l'ideale sarebbe scegliere $s = 0$. Tuttavia, per la realizzazione dell'oggetto bisogna pensare di dover inserire l'utensile per la tornitura, perciò, ascoltando il parere dei tecnici, si è pensato di adottare un valore di s pari a 2.3 mm . Questa scelta ha anche un ulteriore vantaggio, e cioè si mantiene il sistema più caldo di circa $40^{\circ}C$, senza compromettere eccessivamente l'omogeneità della temperatura.

In definitiva, si adotterà $s = 2.3 \text{ mm}$. Tale valore sarà leggibile anche nelle tavole costruttive definitive mostrate nell'Appendice E.

Diametro massimo

Il secondo parametro esaminato per giungere alla definizione di una geometria ottimizzata è d , cioè il diametro massimo finale del corpo centrale del catodo (vedi Figura 6.8). Anche in questo caso si è seguito il metodo di approccio già visto per s , cioè si è

fatto variare d in un intervallo che va da 5.2 mm (che rappresenta il diametro del catodo originale) a 8 mm , con passo 0.4 mm . Anche in questo caso si riporteranno di seguito i valori numerici ottenuti dal modello FEM, gli indici calcolati ed i diagrammi degli andamenti letti sui vari modelli.

La Tabella 6.2 riporta i dati ricavati dal modello FEM.

d [mm]	$T_{MAX,FRONT}$ [°C]	$T_{MAX,TUBE}$ [°C]	$T_{MAX,TLINE}$ [°C]	ΔT_{MAX} [°C]	ΔT_{FRONT} [°C]	ΔT_{TUBE} [°C]
<i>CATODO ORIGINALE</i>	2153	2259	1880	106	166	352
5.6	2083	2149	1857	66	143	267
6.0	2032	2073	1838	41	126	212
6.4	1992	2018	1832	26	112	174
6.8	1962	1979	1829	16	99	150
7.2	1936	1947	1827	11	90	133
7.6	1914	1922	1826	8	81	120
8.0	1896	1901	1825	5	73	111

Tabella 6.2: dati relativi ai modelli FEM ottenuti al variare del diametro dell'ispessimento d . Si ricorda che nel catodo originale il diametro del corpo centrale è pari a 5.2 mm .

Di seguito, in Grafico 6.6, Grafico 6.7 e Grafico 6.8, si possono osservare gli andamenti diagrammati come nel caso precedente.

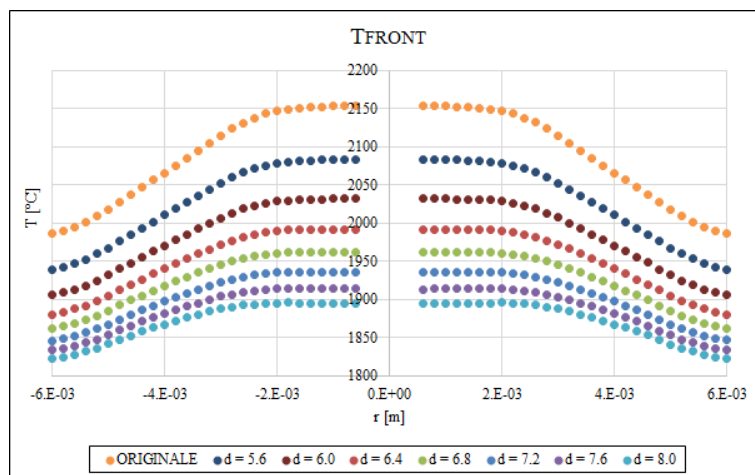


Grafico 6.6: andamento della temperatura sulla faccia frontale del catodo rispetto al raggio al variare di d .

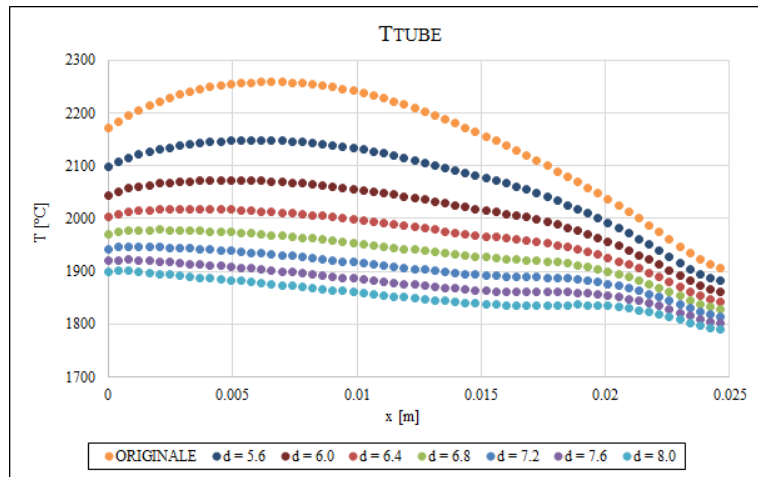


Grafico 6.7: andamento della temperatura sul corpo centrale del catodo lungo l'asse al variare di d .

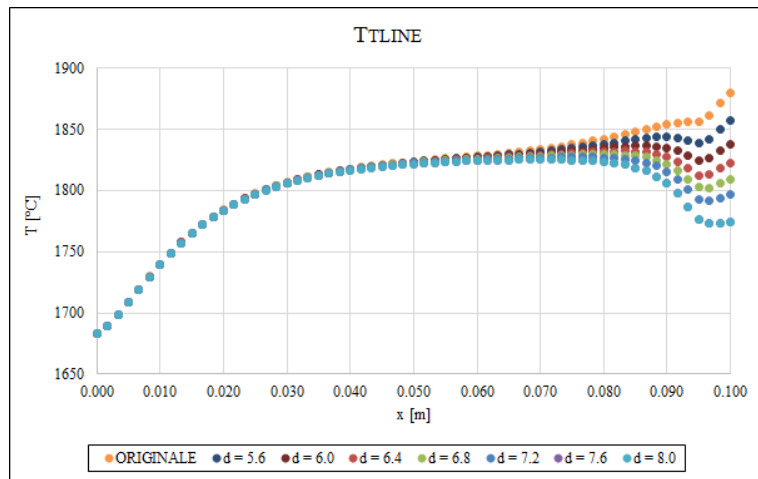


Grafico 6.8: andamento della temperatura sulla linea di trasferimento lungo l'asse al variare di d .

Si mostrano invece, in Grafico 6.9 e Grafico 6.10 gli indici e le temperature massime dei vari andamenti.

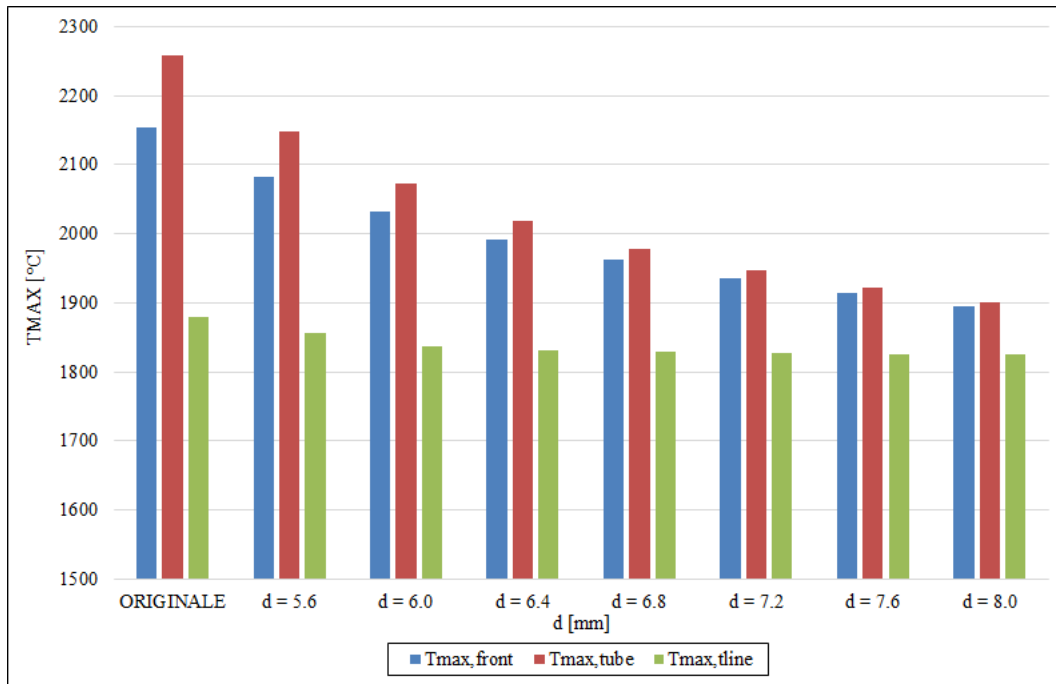


Grafico 6.9: istogramma che riporta le temperature massime relative ai tre andamenti su faccia frontale e corpo centrale del catodo e sulla linea di trasferimento al variare del diametro dell'ispessimento d . Si nota il raffreddamento progressivo del catodo al crescere dello spessore del materiale, mentre la linea di trasferimento resta a temperatura circa costante.

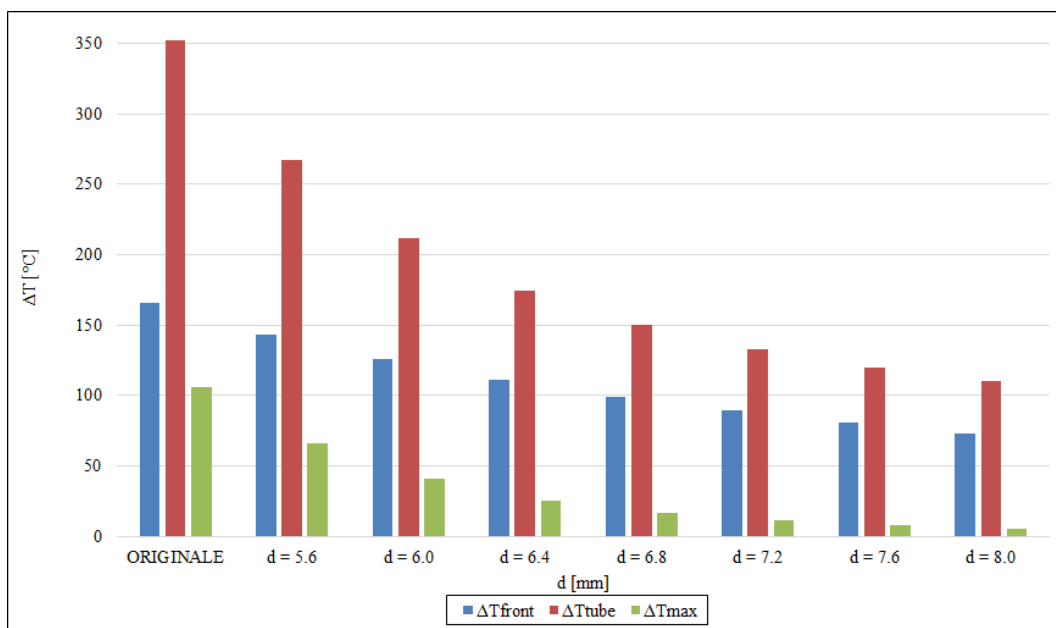


Grafico 6.10: rappresentazione dei tre indici definiti per lo studio del campo di temperatura al variare del diametro dell'ispessimento d . La zona calda sul corpo centrale si riduce man mano che viene aggiunto del materiale.

Anche in questo caso, dagli andamenti e dai dati riportati negli istogrammi si può effettuare la scelta di quello che sarà il parametro ottimo per la configurazione ottimizzata del catodo.

Innanzitutto, ancora una volta si può notare che l'effetto sulla linea di trasferimento è praticamente nullo, poiché le temperature variano soltanto dove il corpo viene a contatto col catodo, mentre la zona vicina al bersaglio non risente degli effetti delle nostre modifiche.

Si nota inoltre che partendo dal catodo originale, che è quello più caldo della serie, l'aggiunta di materiale provoca un progressivo raffreddamento dell'oggetto con la crescita dello spessore. Tuttavia si nota anche, esaminando gli indici ΔT_{MAX} , ΔT_{FRONT} e ΔT_{TUBE} , che il campo di temperatura tende a diventare sempre più omogeneo. Infatti il Grafico 6.7 mostra che per d massimo fra quelli testati, e cioè $d = 8.0 \text{ mm}$, la temperatura assume quasi un andamento costante, senza zone di picco termico particolarmente accentuate. Anche sulla faccia frontale la variazione della temperatura in senso radiale è sempre inferiore al crescere di d , perciò l'indicazione sarebbe quella di aumentare il diametro il più possibile compatibilmente con le altre dimensioni geometriche.

Tuttavia bisogna ricordare i vincoli spiegati all'inizio dell'analisi, e cioè che si sarebbero accettate differenze di temperatura fino a circa 150°C , per evitare un eccessivo raffreddamento del catodo rispetto al resto del sistema e per garantire che non venga dissipata una potenza eccessiva nell'oggetto (occorrerebbe infatti alzare la corrente di linea di parecchi ampere per riportare il campo termico agli stessi livelli del catodo originale).

Da queste considerazioni sorge spontanea la scelta del maggior diametro in grado di mantenere la differenza di temperatura al di sotto dei 150°C , cioè un diametro massimo di 6.4 mm , che comunque, come si può apprezzare dagli andamenti, consente di ottenere un campo di temperature molto più omogeneo rispetto alla versione originale.

Lunghezza dell'ispessimento

L'ultimo parametro su cui si è posta attenzione per l'ottimizzazione della geometria è la lunghezza totale dell'ispessimento, calcolata nella zona dove il diametro è massimo come si nota in Figura 6.8. Anche in questo caso è stata eseguita un'analisi parametrica per selezionare la grandezza ottima in un intervallo di valori possibili. Per le analisi precedenti, il l era stata posta pari a 15 mm . Si è quindi deciso di provare a variare la lunghezza dell'ispessimento in un intervallo dai 14 mm ai 17 mm , con passo 1 mm . Si sono continuati ad esaminare gli andamenti e gli indici già descritti nei paragrafi precedenti, per capire quale fosse la configurazione migliore.

La Tabella 6.3 riporta i valori calcolati col modello FEM delle varie geometrie.

l [mm]	$T_{MAX,FRONT}$ [°C]	$T_{MAX,TUBE}$ [°C]	$T_{MAX,TLINE}$ [°C]	ΔT_{MAX} [°C]	ΔT_{FRONT} [°C]	ΔT_{TUBE} [°C]
<i>CATODO ORIGINALE</i>	2153	2259	1880	106	166	352
13	2008	2038	1880	30	116	182
14	2000	2028	1834	28	113	177
15	1992	2018	1832	26	112	174
16	1985	2008	1831	24	110	172
17	1977	1999	1829	22	108	171

Tabella 6.3: dati relativi ai modelli FEM ottenuti al variare della lunghezza dell'ispessimento l . Si ricorda che nel catodo originale non è previsto alcun ispessimento, perciò si ha $l = 0$.

Di seguito, in Grafico 6.11, Grafico 6.12 e Grafico 6.13, sono riportati gli andamenti calcolati col metodo a elementi finiti per le temperature sulla faccia frontale del catodo, sul corpo centrale e sulla linea di trasferimento.

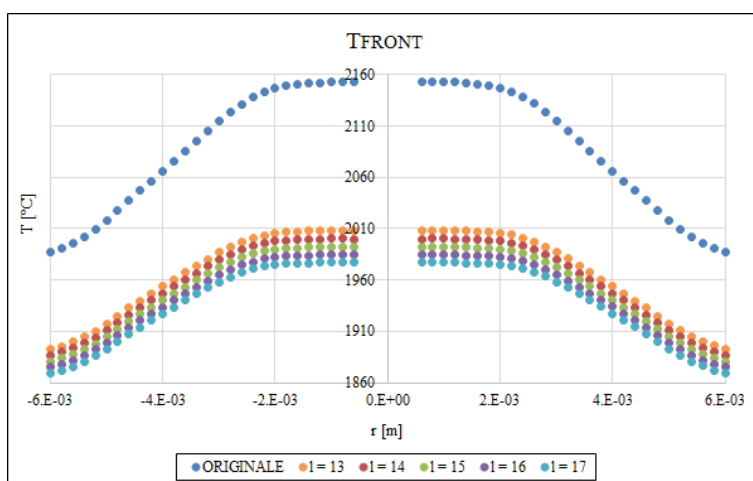


Grafico 6.11: andamento della temperatura sulla faccia frontale del catodo rispetto al raggio al variare di l .

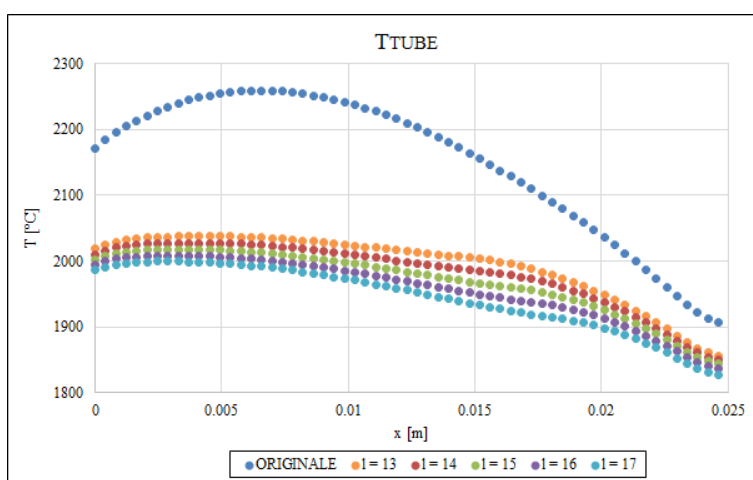


Grafico 6.12: andamento della temperatura sul corpo centrale del catodo lungo l'asse al variare di l .

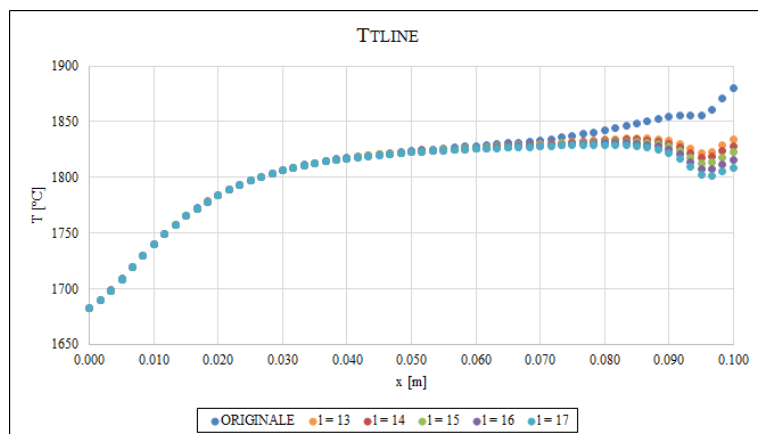


Grafico 6.13: andamento della temperatura sulla linea di trasferimento lungo l'asse al variare di l .

Vengono rappresentati infine gli indici per lo studio del campo di temperatura al variare di l già descritti in Tabella 6.3.

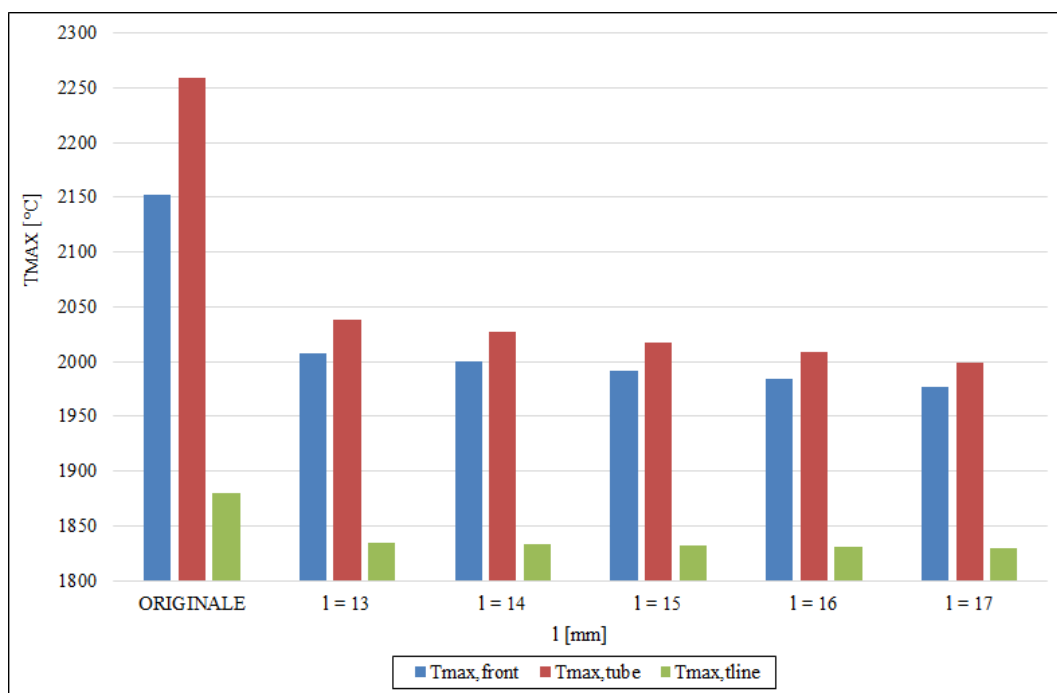


Grafico 6.14: istogramma che riporta le temperature massime relative ai tre andamenti su faccia frontale e corpo centrale del catodo e sulla linea di trasferimento al variare della lunghezza dell'ispessimento l . Si nota il raffreddamento progressivo del catodo al crescere del volume del materiale aggiunto, mentre la linea di trasferimento resta a temperatura circa costante. Tuttavia in questo caso la variazione è minima, meno di 10°C per ogni millimetro in più sulla lunghezza.

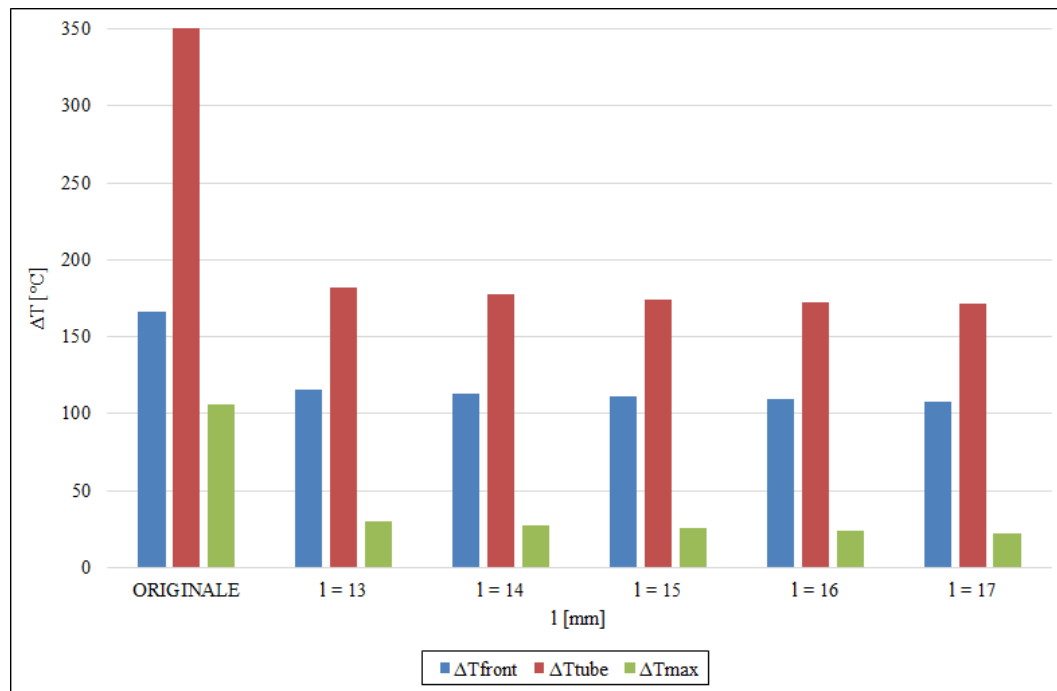


Grafico 6.15: rappresentazione dei tre indici definiti per lo studio del campo di temperatura al variare della lunghezza dell'ispessimento l . La zona calda sul corpo centrale resta praticamente costante, anche se si verifica un leggero miglioramento con l maggiore.

A questo punto abbiamo tutto ciò che occorre per effettuare la scelta dell'ultimo parametro, che consentirà quindi di definire la geometria ottimale per il nuovo catodo.

Dal Grafico 6.11, per quanto riguarda la temperatura sulla faccia frontale, si nota come la variazione di l influenzi in modo minimo il campo di temperatura sul catodo. Ciò appare evidente anche relativamente agli andamenti sul corpo centrale e sulla linea di trasferimento (Grafico 6.12 e Grafico 6.13). Naturalmente la differenza con il modello originale resta marcata. Anche relativamente all'analisi delle temperature massime e sugli andamenti si arriva alla stessa conclusione: in altre parole si può dire che il parametro l , dei tre presi in esame è quello meno efficace nel influenzare il campo termico dell'oggetto. Tuttavia dal Grafico 6.15 otteniamo lo stesso un'indicazione importante, e cioè che gli andamenti delle temperature diventano più omogenei man mano che l cresce. Questo provoca d'altra parte un raffreddamento dell'oggetto, quindi per la scelta del valore definitivo, bisogna rifarsi alle condizioni poste all'inizio dell'analisi: non voglio infatti raffreddare eccessivamente l'oggetto, che deve comunque rappresentare la zona più calda della sorgente.

Per questi motivi si è scelto di tenere il parametro l pari a 15 mm . Si può infatti osservare che sulla faccia frontale la differenza di temperatura con il catodo originale è

prossima ai 150°C , che la soglia che si era prefissata inizialmente, ed inoltre il campo termico viene reso molto più omogeneo.

Riepilogo delle scelte

Si possono quindi riassumere le scelte relative ai parametri studiati col modello FEM:

- $s = 2.3 \text{ mm}$;
- $d = 6.4 \text{ mm}$;
- $l = 15 \text{ mm}$.

Il passo successivo sarà quindi il confronto fra il catodo originale e la versione ottimizzata. Si rimanda inoltre all'Appendice E per le tavole costruttive con la nuova geometria.

6.2.5. Confronto fra catodo originale ed ottimizzato

Dopo aver scelto le dimensioni definitive che rendono il campo di temperatura del nuovo catodo ottimale per le nostre applicazioni, si può quindi passare alla caratterizzazione termica della sorgente. Mantenendo il modello FEM con la configurazione geometrica con cui è stata eseguita l'analisi relativa all'ottimizzazione, si può confrontare il comportamento delle due diverse configurazioni, cioè con catodo originale ed ottimizzato, per capire come impostare la corrente di linea in fase di funzionamento. L'unica novità riguarda il vincolo di temperatura alla base della linea di trasferimento, che poiché è una zona che va a posizionarsi in prossimità del bersaglio durante il funzionamento in linea, non viene più lasciata libera ma viene vincolata ad una temperatura di 2000°C , che in questo modo dovrebbe avvicinarsi di più alle condizioni reali. Naturalmente erano state eseguite delle prove per verificare che il campo termico della linea di trasferimento non influenzasse in maniera marcata le temperature del catodo.

La caratterizzazione in questo caso è stata eseguita per un intervallo di I_{LINE} che va da 280 A fino a 400 A . Lo spostamento del limite superiore verso correnti più elevate è dovuto al fatto che la nuova geometria del catodo contribuisce, come si è già visto in precedenza a raffreddare l'oggetto, perciò per raggiungere valori di temperatura in cui l'emissione elettronica sia confrontabile con quella del catodo originale bisogna fornire una potenza maggiore all'oggetto.

I parametri che si adopereranno per eseguire la caratterizzazione sono gli stessi già esaminati nel Capitolo 3, e cioè la temperatura massima dell'oggetto, T_{MAX} , la media nodale delle temperature sulla faccia frontale, T_{AV_CATH} , oltre all'andamento della stessa

ricavato al variare del raggio, la temperatura media nodale ricavata dalle facce interne dell'anodo T_{AV_AN} .

In Tabella 6.4 si riportano i risultati relativi ai modelli FEM delle due versioni della sorgente FEBIAD.

I_{LINE} [A]	T_{MAX}		T_{AV_CATH}		T_{AV_AN}	
	ORIGIN. [°C]	OTTIM. [°C]	ORIGIN. [°C]	OTTIM. [°C]	ORIGIN. [°C]	OTTIM. [°C]
280	1890	1628	1726	1614	1046	975
290	1945	1676	1777	1662	1086	1015
300	2001	1724	1828	1710	1124	1052
310	2053	1772	1876	1757	1162	1089
320	2106	1818	1924	1802	1198	1124
330	2158	1863	1971	1847	1233	1158
340	2208	1908	2017	1891	1267	1192
350	2260	1952	2062	1934	1300	1226
360	2309	1995	2106	1976	1333	1256
370	2359	2037	2151	2018	1365	1287
380	2407	2079	2192	2059	1395	1316
390	2454	2121	2234	2100	1425	1347
400	2501	2161	2276	2139	1455	1374

Tabella 6.4: parametri relativi al confronto dei dati dei modello FEM della sorgente FEBIAD con catodo originale (ORIGIN.) e catodo con geometria ottimizzata (OTTIM.).

Di seguito si riportano in forma grafica le informazioni di Tabella 6.4 (Grafico 6.16, Grafico 6.17 e Grafico 6.18) e in aggiunta vengono mostrati alcuni andamenti della temperatura sulla faccia frontale per alcuni valori della corrente riscaldante (Grafico 6.19).

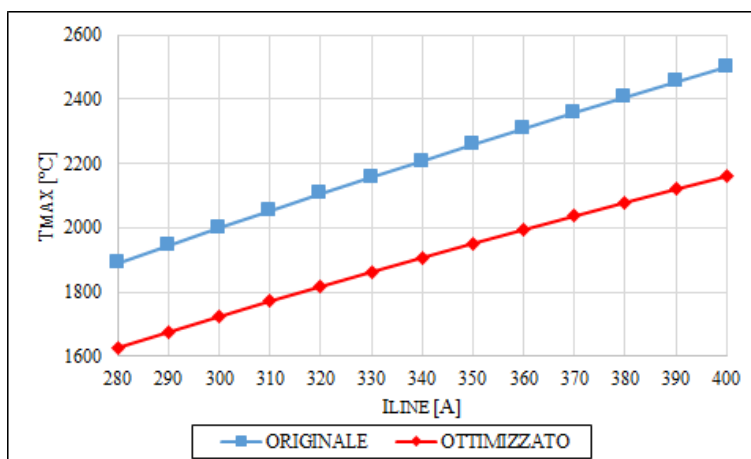


Grafico 6.16: temperature massime nei modelli FEM delle due versioni della sorgente (con catodo originale e con quello ottimizzato). Si nota il raffreddamento che si verifica nella nuova configurazione.

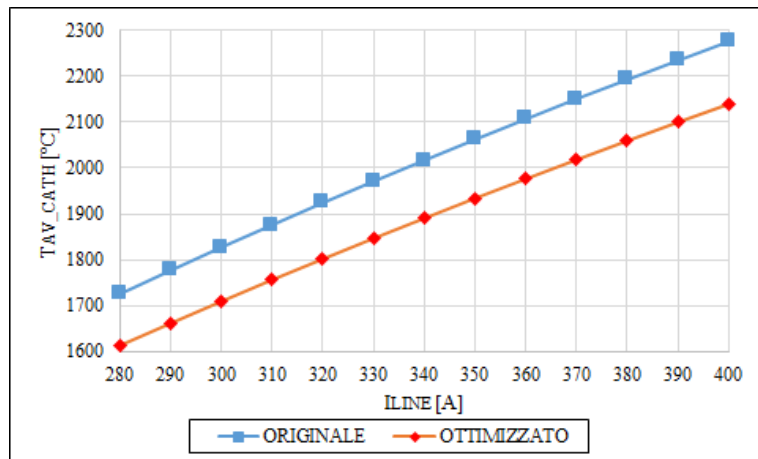


Grafico 6.17: medie nodali delle temperature rilevate sulle facce frontali delle due versioni del catodo.

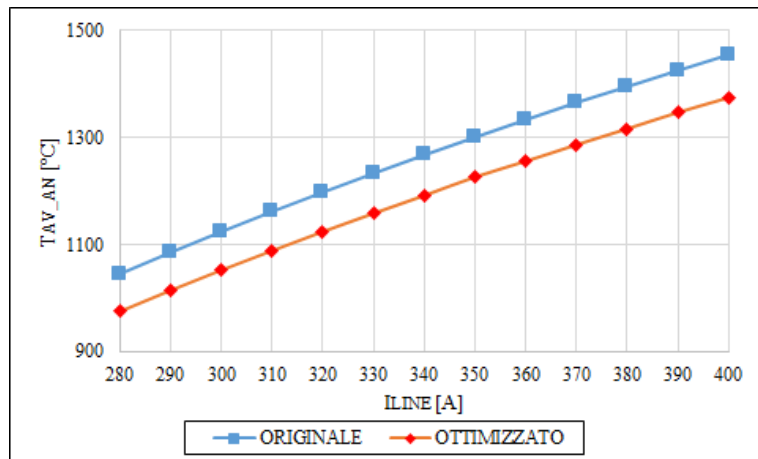


Grafico 6.18: medie nodali delle temperature rilevate sulle facce interne dell'anodo nella sorgente con le due diverse versioni del catodo.

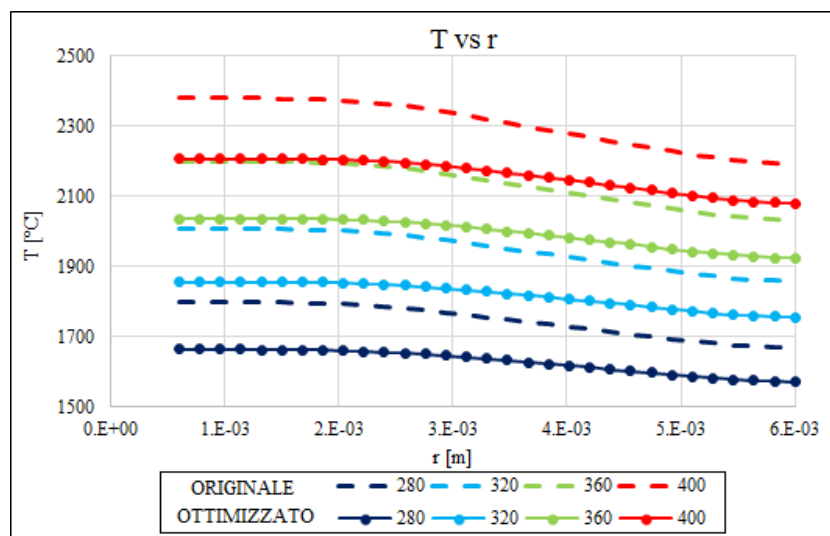


Grafico 6.19: andamento della temperatura rispetto al raggio sulla faccia frontale del catodo rilevata per i valori di I_{LINE} elencati nella legenda per il catodo originale e per quello ottimizzato.

Dai grafici precedenti si possono ricavare alcune indicazioni importanti: innanzi tutto si nota che le temperature massime sui modelli diminuiscono molto con l'introduzione del modello ottimizzato, e questo è un fenomeno atteso poiché l'aggiunta di materiale doveva proprio condurre ad una riduzione delle temperature sul corpo, centrale, tuttavia bisogna ricordare che il massimo nella nuova versione non è più lontano dalla faccia frontale, ma si avvicina potendo così sfruttare al meglio il campo termico che si crea al passaggio della corrente. Dal grafico relativo alle temperature medie sulla faccia frontale, si può ricavare di quanto bisogna incrementare la corrente riscaldante per poter lavorare col nuovo catodo alle stesse condizioni rispetto a quello vecchio. Un buon punto di lavoro, come si è osservato durante le prove di efficienza, per il catodo originale corrispondeva a $I_{LINE} = 360 A$. Se si vuole ritrovare una temperatura simile nella nuova versione, bisognerà porsi a $390 A$, e si nota anche dalle temperature sull'anodo come la sorgente si riscaldi raggiungendo una zona di lavoro simile a quella vecchia. Le temperature massime in questo caso saranno minori, consentendo all'oggetto una maggiore durata e minori stress termici.

Il grafico relativo all'andamento della temperatura lungo il raggio sulla faccia frontale infine, da forse l'indicazione più interessante, ovvero che se ci si pone a parità di temperatura sul punto centrale, si nota che l'efficienza con cui vengono estratti gli elettroni è maggiore poiché l'andamento del nuovo catodo è superiore rispetto a quello dell'originale (vedi per esempio $400 A$ per il catodo ottimizzato e $360 A$ per quello originale).

In altre parole il modello FEM conferma le nostre ipotesi iniziali su cui si è basata la riprogettazione: la cancellazione del punto caldo permette di sfruttare meglio la temperatura dell'oggetto per la ionizzazione, a costo però di inviare una potenza maggiore alla sorgente.

La Figura 6.9 mostra il campo di temperatura del nuovo catodo nel caso di una corrente riscaldante. È evidente che la faccia frontale si scaldi in maniera più efficiente, poiché la zona calda sul corpo centrale si sposta verso l'estremità del catodo, esattamente l'effetto che si voleva ottenere con la riprogettazione.

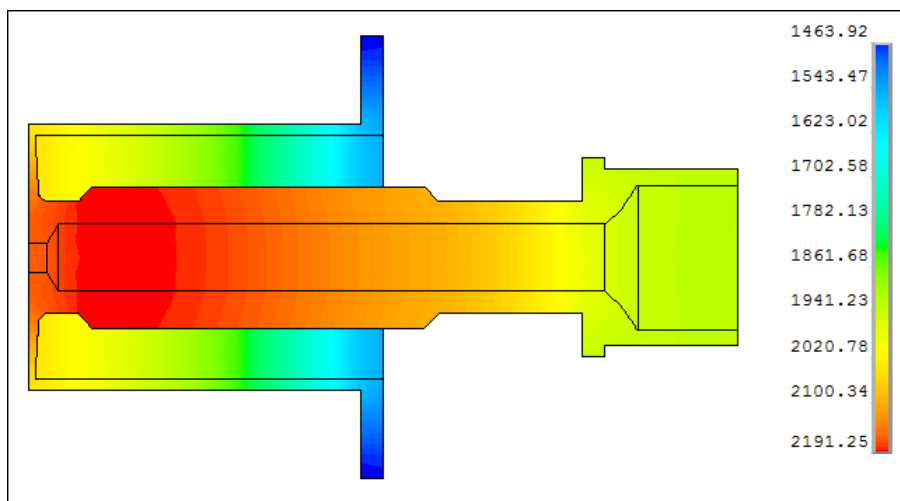


Figura 6.9: campo di temperatura del catodo ottimizzato calcolato col modello FEM per una corrente riscaldante di 390 A . Si nota come la zona calda si sia spostata verso sinistra, cioè verso la faccia frontale.

Ponendo come riferimento la temperatura massima di 2200°C , si vuole seguire un confronto fra i due catodi per quanto riguarda la corrente elettronica emessa.

Il valore di I_{LINE} che consente il raggiungimento della soglia termica per il catodo originale è 340 A , mentre per quello ottimizzato viene scelto 400 A . Gli andamenti della temperatura sulla faccia frontale sono mostrati in Grafico 6.20.

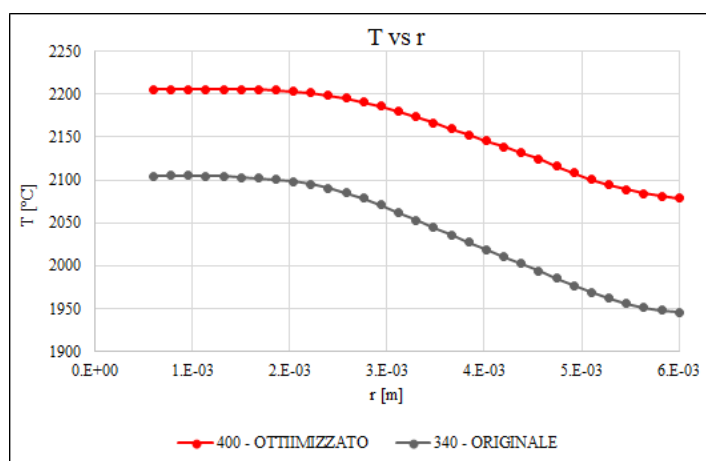


Grafico 6.20: andamento della temperatura sulla faccia frontale del catodo per i valori di corrente riscaldante e versione indicati in legenda. La temperatura massima sul catodo nel caso dell'originale vale 2208°C , mentre quella per l'ottimizzato vale 2161°C .

Calcolando con la formula di Richardson, risulta $I_{el,originale,340} = 0.338\text{ A}$, mentre $I_{el,ottimizzato,400} = 1.023\text{ A}$. La legge di Child-Langmuir indica una corrente limite per un montaggio con distanza catodo – anodo pari a 0.9 mm e potenziale di anodo 150 V , $I_{CL} = 0.593\text{ A}$.

Si capisce che con il nuovo sistema, il problema del campo termico sarebbe risolto se le prove confermassero gli andamenti, e bisognerebbe lavorare sulla fase di montaggio e sul potenziale di anodo per incrementare la corrente elettronica.

6.3. Progettazione del sistema di allineamento

Durante le fasi di montaggio, che si ricorda saranno descritte in modo accurato nell'Appendice B, si è potuta osservare quanto sia delicato il sistema formato da catodo e linea di trasferimento. Infatti l'allineamento di questi componenti permette un corretto comportamento della sorgente, inoltre tutti gli sforzi sulla linea di trasferimento vanno a scaricarsi direttamente sulla giunzione tra faccia frontale e collare cilindrico del catodo. È già stato osservato (Capitolo 4), che durante la manipolazione di questi oggetti si possono verificare delle deformazioni plastiche a freddo che vanno a minare l'integrità del catodo stesso e possono compromettere il corretto funzionamento (avere una superficie perfetta piana consente un miglior trasferimento degli elettroni verso l'anodo).

Per questi motivi, si è pensato di progettare un sistema che bloccasse il canale rigidità in senso radiale e che consentisse anche maggiore rigidità in senso assiale. Basandosi sull'esperienza maturata con la crociera di allineamento della sorgente superficiale (vedi [5]), sono stati disegnati dei puntali che, appoggiandosi nella zona di contatto fra catodo e linea di trasferimento permettano di vincolare questa zona conferendo al sistema una maggiore resistenza strutturale. Naturalmente, per poter arrivare a produrre delle tavole definitive, bisogna seguire alcune specifiche necessarie per consentire il corretto funzionamento della sorgente FEBIAD: innanzi tutto il campo di temperatura degli oggetti non deve essere soggetto a grandi modifiche, poiché è già stato spiegato in dettaglio quanto sia importante l'effetto della temperatura ai fini del processo di ionizzazione. Inoltre bisogna mantenere l'isolamento elettrico fra supporto e linea di trasferimento, poiché altrimenti si creerebbe un cortocircuito, la corrente si sposta zone diverse della sorgente e così la potenza non verrebbe trasferita al catodo.

L'idea è stata quella di forare la camera di supporto in Acciaio e inserire dei grani modificati in modo da inserirsi in un isolatore di allumina standardizzato. L'isolatore a sua volta è contenuto in un corpo di Tantalio, che all'altra estremità è accoppiato con un puntale in Tungsteno. Il sistema completo è visibile in Figura 6.10.

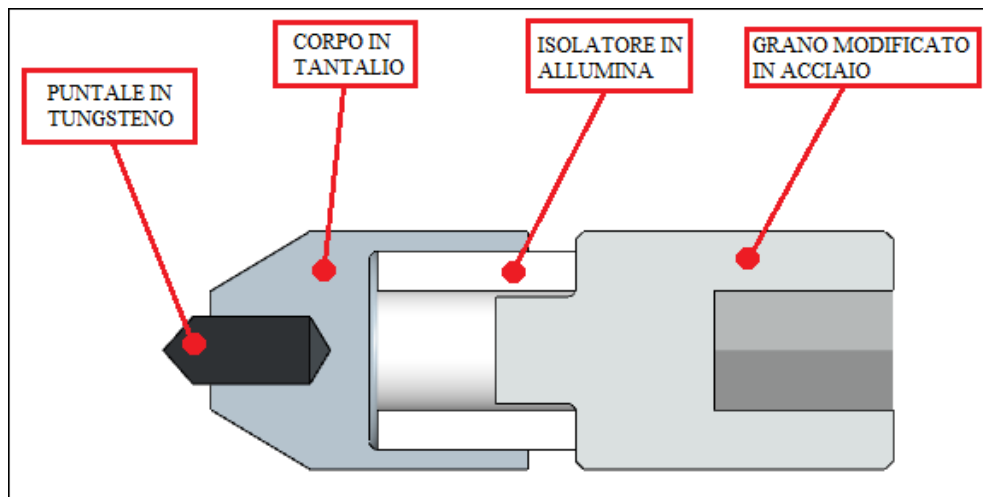


Figura 6.10: sezione del modello CAD di uno dei puntali per il bloccaggio radiale del catodo.

Per il bloccaggio completo del sistema si è pensato di utilizzare quattro di questi puntali, in modo da avere un buon sistema di centraggio. Per il loro alloggiamento si è dovuto, come già accennato, modificare la camera di supporto, eseguendo quattro fori filettati, posti frontalmente a due a due e ognuno con asse ruotata di 90° rispetto al precedente. L'accoppiamento filettato tra grani e camera di supporto permette di comprimere con la forza voluta i puntali in Tungsteno sul canale, in Tantalio. La lavorazione con una forma affilata consente al sistema di penetrare nel catodo o nella linea di trasferimento, garantendo anche un minimo di rigidità in senso assiale.

La zona del catodo dove è prevista la lavorazione che consente alla linea di trasferimento è la zona di spessore massimo, dove, oltre al maggior diametro esterno, è presente anche una lavorazione interna per consentire un miglior afflusso di gas verso l'anodo.

La scelta del Tungsteno è dovuta al fatto che tale materiale possiede un punto di fusione molto elevato ed inoltre è molto duro e resistente, possiede inoltre un elevato modulo elastico. Queste proprietà fanno sì che sia il componente ideale per questo tipo di applicazioni. Tuttavia è anche difficilmente lavorabile, perciò i puntali sono stati ottenuti da elettrodi da saldatura tagliati ed a cui è stata affilata un'estremità. In Figura 6.11 si nota il modello CAD del sistema di centraggio assemblato con la sorgente ed appoggiato sul catodo.

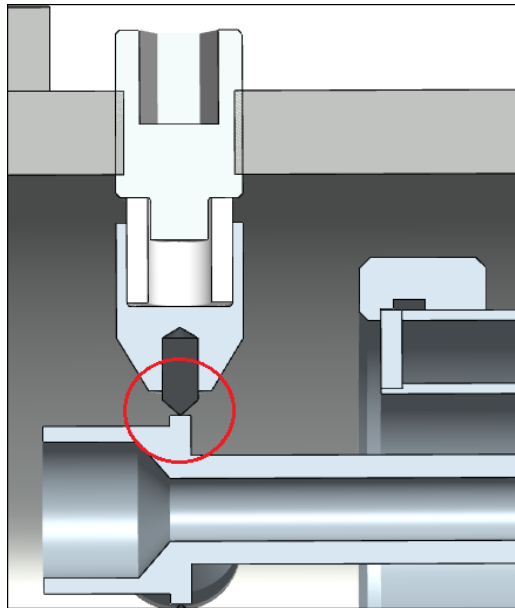


Figura 6.11: immagine del modello CAD della sorgente in cui si nota l'accoppiamento del puntale in Tungsteno col catodo.

L'Allumina, o Al_2O_3 , è un materiale ceramico, quindi durissimo e con comportamento fragile, con buone proprietà di isolamento termico ed elettrico. Svolge quindi due funzioni, cioè mantenere l'isolamento elettrico permettendo il normale passaggio della corrente attraverso il catodo e impedire che l'aggiunta di un volume metallico eccessivo in prossimità del catodo possa raffreddare i corpi ad alta temperatura. Dalle immagini dei modelli CAD infatti si nota come il corpo in Tantalio dei puntali rivesta quasi completamente l'isolatore, e questo è stato pensato perché si eviti il raffreddamento eccessivo del catodo per via delle scarse proprietà termiche relative alla radiazione dell'Allumina. In questo modo, nonostante parte del calore viene assorbito per conduzione nei nuovi corpi, i nuovi elementi costituiscono anche uno schermo per il flusso termico radiante perciò la temperatura non subisce grandi variazioni.

Per poter alloggiare correttamente il sistema è stato necessario modificare la geometria originale della flangia di supporto: è stata rimossa la variazione di spessore, nella zona dove si presentano i fori utili a creare un miglior vuoto nel canale. Lo spessore maggiore deriva del fatto che originariamente la camera di supporto era realizzata in Grafite ed era necessario dello spazio per consentire di filettare la zona di giunzione fra camera e flangia poiché tale materiale non consente la saldatura od altri tipi di sistemi di collegamento.

In Figura 6.12 sono mostrati i modelli CAD relativi a nuova e vecchia flangia. Naturalmente la variazione geometrica comporta solo variazioni del tutto trascurabili riguardo al campo termico degli oggetti.

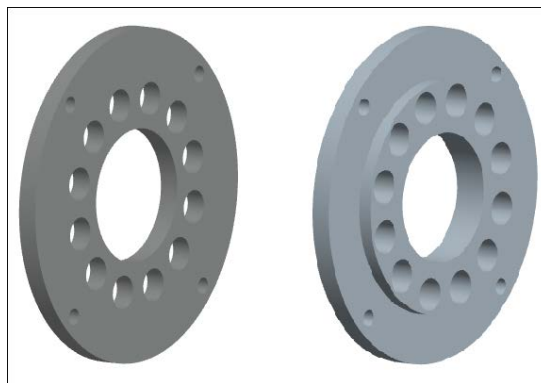


Figura 6.12: modelli CAD relativi alla flangia che consente il montaggio del sistema di allineamento (a sinistra) e della vecchia versione con gradino (a destra).

In definitiva alla sorgente FEBIAD sono stati aggiunti dei componenti che non danno alcuna modifica sul comportamento per quanto riguarda la ionizzazione, ma influenzano la stabilità strutturale dell'oggetto, migliorando la fase di assemblaggio e la tenuta meccanica. Infatti il catodo, essendo diventato più rigido, si deformerà in maniera più lieve e il mantenimento di un centraggio più preciso dei corpi assialsimmetrici garantire un funzionamento corretto per un tempo maggiore, aumentando l'affidabilità del sistema.

In Figura 6.13 è mostrato il modello CAD relativo alla sorgente montata, mentre in Figura 6.14 è rappresentato il sistema assemblato con cui sono state eseguite le prove di efficienza.

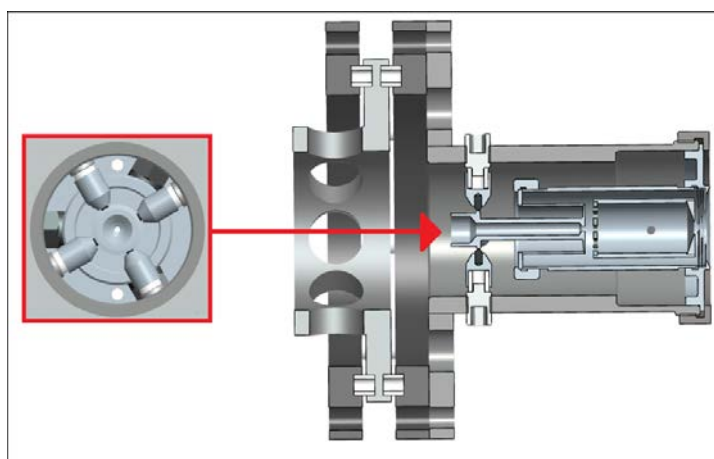


Figura 6.13: modello CAD della sorgente FEBIAD per le prove di efficienza che viene montata senza bersaglio radioattivo. Si notano i puntali della crociera per il centraggio descritti in questo paragrafo, che vanno ad agganciare il catodo nella zona di massimo spessore.



Figura 6.14: fotografia della sorgente con sistema di centraggio, montato per l'esecuzione delle prove di efficienza. Si può osservare anche il cordone di saldatura fra camera e flangia di supporto descritto nel paragrafo successivo.

6.4. Riprogettazione dei componenti di supporto

Nel paragrafo precedente è stato spiegato come, per far spazio al sistema di centraggio, sia stata modificata, variandone lo spessore, la flangia di supporto in Acciaio, e come tale modifica sia stata possibile grazie al cambiamento nel materiale, da Grafite ad AISI 304L o 316L, che può essere saldato.

Quella descritta è solo una delle variazioni possibili per migliorare la gestione della sorgente FEBIAD dal punto di vista della facilità di assemblaggio. Inoltre la rimozione di geometrie complicate come appunto le variazioni di spessore o le filettature è vantaggioso dal punto di vista dell'aspetto realizzativo, poiché si riesce a risparmiare sul materiale e sul tempo delle lavorazioni.

Si mostreranno quindi alcuni esempi che sono stati adottati durante questo studio, che sono stati adottati per consentire una migliore maneggevolezza dei componenti, che sarà apprezzabile dall'operatore soprattutto nella fase di montaggio descritta nell'Appendice B. Naturalmente ogni nuova modifica deve rispettare i parametri di funzionamento della sorgente ed incidere in modo trascurabile sul campo termico, altrimenti si rovinerebbe tutto il lavoro svolto fino a questo punto.

La modifica più semplice che è stata formalizzata è quella della rimozione del collegamento filettato fra flangia e camera i supporto. Quando infatti il materiale utilizzato per la realizzazione di questi elementi era la Grafite, avvitarne assieme le due

parti era l'unica maniera per tenerle unite. Come già spiegato, anche per questo motivo era necessario un maggiore spessore nella zona del foro sulla flangia, per riuscire ad effettuare la lavorazione senza distruggere il pezzo. Inizialmente, tale sistema era stato mantenuto per i pezzi in Acciaio, come si vede nella rappresentazione della camera usata per le prove termiche e strutturali sul catodo descritte nel Capitolo 4 (vedi Figura 6.15).

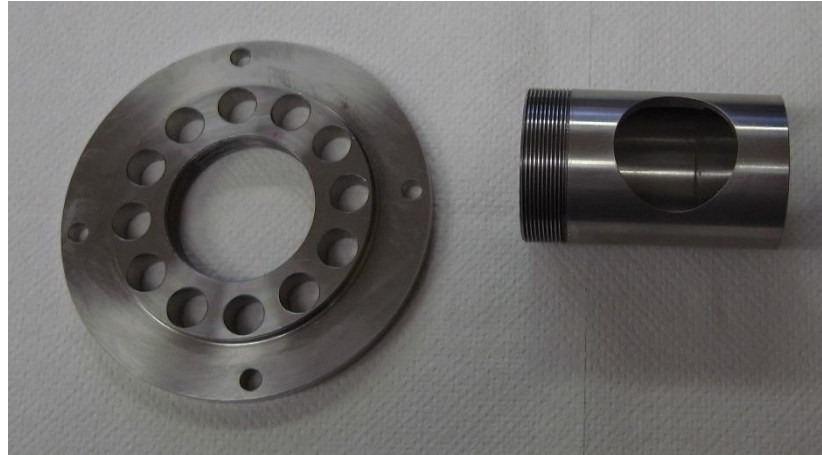


Figura 6.15: flangia con spessore variabile e camera in Acciaio con foro per l'osservazione delle temperature interne. Si notano sui pezzi le parti filettate necessarie per l'unione.

L'uso di un collegamento filettato, oltre al problema della lavorazione, ha altri svantaggi come la difficoltà dell'orientazione dei pezzi. Ad esempio, nel caso delle prove per rilevare la temperatura del catodo o le deformazioni, la coassialità delle finestre di osservazione è un aspetto importante di cui tenere conto: la filettatura non consente di ottenere la precisione che si avrebbe unendo i pezzi attraverso saldatura.

Quindi, supportati anche dalle prove di efficienza che indicano che la camera di supporto in Grafite provoca la presenza di Carbonio come contaminante nel fascio di ioni, è stato scelto l'Acciaio come costituente e la saldatura TIG come tecnologia utilizzata per l'unione dei due componenti (naturalmente non interessa che i pezzi possano essere separati una volta concluso l'utilizzo). In Figura 6.14 si può osservare il cordone di saldatura ottenuto dalla lavorazione. Poiché il sistema è statico e non deve supportare grossi carichi, non ci sono problemi di tenuta strutturale.

In Figura 6.16 si può osservare il nuovo sistema composto da flangia e camera di supporto durante il montaggio.

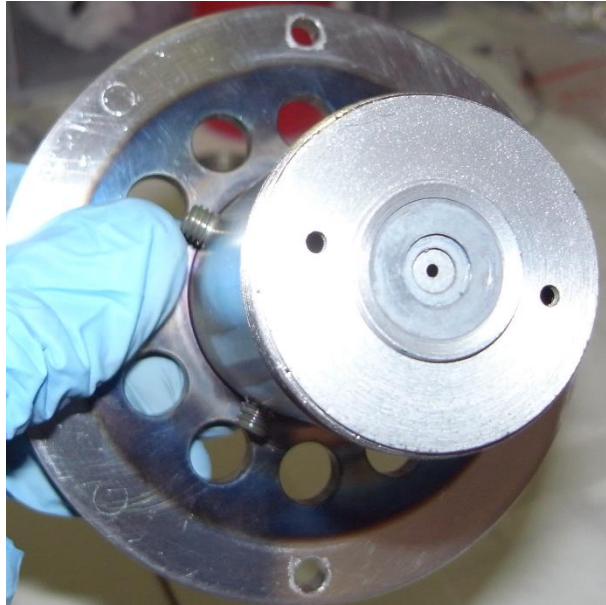


Figura 6.16: camera e flangia di supporto riprogettate senza variazione di spessore, unite attraverso saldatura.

L'altro componente su cui si è posta attenzione per semplificare il sistema è la flangia di chiusura, che collega la camera di scarica a quella di supporto.

Infatti anche per questo componente, nei disegni originali, era previsto un collegamento filettato per l'assemblaggio. Tuttavia, questa zona è più delicata di quella descritta in precedenza, perché una saldatura non consentirebbe nessun eventuale disaccoppiamento, necessario nel caso bisogni smontare la sorgente per un eventuale controllo dovuto ad errori nella fase di montaggio. Inoltre la zona è ad alta temperatura, per questo la flangia è composta di Molibdeno o, soluzione migliore, in Tantalio. La lavorazione di questi materiali è complicata, in particolare nel caso del Tantalio, il comportamento plastico del materiale può portare a deformazioni permanenti a freddo che hanno l'effetto di rovinare l'orientamento o l'assialità del pezzo. Ciò può essere un grave problema, ad esempio nel caso del sistema per l'osservazione delle temperature del catodo perché si ottiene un allineamento precario delle finestre di osservazione, oppure per quanto riguarda l'estrazione del fascio, visto che la perfetta sovrapposizione degli assi dei componenti da cui si genera e fuoriesce il raggio di ioni, cioè anodo, sistema di estrazione e, dopo la sorgente, elettrodo estrattore, permette di non utilizzare i deflettori e quindi rovinare meno la focalizzazione del fascio.

Inoltre c'è anche una seconda questione, che è quella del trasporto della corrente, e cioè quando si monta un sistema in cui deve scorrere una potenza elettrica importante, bisogna essere certi che le parti vengano a contatto in modo preciso poiché altrimenti si

genera una resistenza elettrica detta “di contatto”, l’alimentatore quindi deve generare una maggiore differenza di potenziale per poter garantire la trasmissione di corrente, senza contare che una resistenza maggiore genera anche un maggior riscaldamento per effetto Joule.

Tutte queste considerazioni hanno portato alla scelta di una metodologia di accoppiamento diversa: il collegamento filettato è stato mantenuto per il fissaggio dei pezzi, ma non è più la zona di giunzione fondamentale: è stata progettata una ghiera, sempre in Acciaio, che fissata alla camera di supporto ha la sola funzione di mantenere la flangia di chiusura in sede nel caso di bruschi spostamenti, dovuti alla movimentazione oppure alle deformazioni termiche: la zona filettata della flangia viene modificata in un bordo liscio e cilindrico, che si accoppia al foro della camera di supporto. Con l’aiuto dei tecnici sono state scelte le tolleranze foro – albero fra flangia e camera di supporto in modo che il centraggio fosse preciso e che ci sia un buon accoppiamento che renda il sistema abbastanza stabile anche senza la presenza della ghiera.

Naturalmente l’esterno della camera di supporto va lavorato in modo che sia presente il filetto, ma l’Acciaio è meno problematico dei materiali refrattari per quanto riguarda questo tipo di trattamenti, e le sue proprietà meccaniche sono migliori (non è fragile ma è comunque rigido ed elastico: non corre il rischio di deformarsi plasticamente).

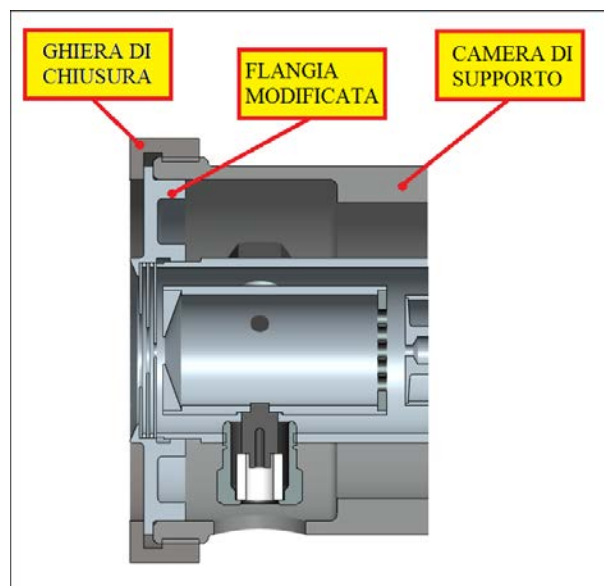


Figura 6.17: particolare del modello CAD della camera di supporto in Acciaio modificata con ghiera di fissaggio per assicurare la flangia finale.

Questa modifica, che appare banale dal punto di vista progettuale, è stata invece apprezzata durante le prove di efficienza perché ha permesso una notevole semplificazione della fase di montaggio: in precedenza infatti, il foro per il passaggio del cavo di potenziale che si congiunge all'anodo era ottenuto dopo un premontaggio, eseguendo una fresatura sul pezzo, poiché la flangia finale doveva essere avvitata alla camera e non si conosceva l'orientamento esatto. Con questa soluzione l'assemblaggio può avvenire senza lavorazioni in opera, evitando manipolazioni dei pezzi che possono portare all'introduzione di contaminanti.

Si capisce quindi come una progettazione che semplifichi la fase di montaggio possa portare a dei miglioramenti sul sistema in condizioni di lavoro.

Le nuove geometrie saranno descritte nelle tavole costruttive contenute nell'Appendice E.

6.5. Conclusioni e sviluppi futuri

Questo Capitolo ha rappresentato la conclusione del lavoro di tesi sulla sorgente FEBIAD, sviluppata per la produzione di fasci di ioni.

Infatti, attraverso le simulazioni numeriche ed una riprogettazione puramente geometrica si è arrivati alla definizione di una versione della sorgente di ionizzazione al plasma che, pur mantenendo tutte le caratteristiche dell'originale (dal punto di vista delle caratteristiche di funzionamento), si propone di risolvere alcune problematiche riguardanti il campo di temperatura e la confidenza nell'assemblare i componenti.

In particolare, con il nuovo catodo, si cerca di ottenere un oggetto con un'efficienza di ionizzazione maggiore, dando una conclusione alle prove sperimentali e numeriche eseguite finora.

Naturalmente, per completare l'opera, bisogna verificare che lo strumento si comporti come previsto durante la ionizzazione, prova che non è stata possibile per via dei tempi di realizzazione dei nuovi pezzi (il catodo viene prodotto da ditte esterne e non presso l'officina dei Laboratori Nazionali di Legnaro).

La Figura 6.18 mostra il modello tridimensionale della sorgente realizzata; ad eccezione del nuovo catodo, tutti i pezzi sono stati testati durante le prove di efficienza con buoni risultati.

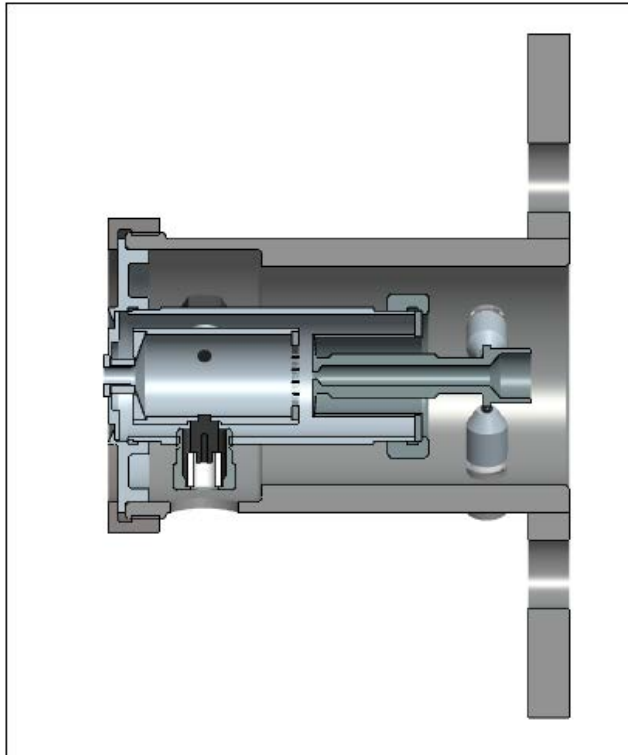


Figura 6.18: modello 3D della sorgente di ionizzazione con le modifiche descritte. Nell'immagine si nota anche un prototipo di un diverso sistema di estrazione, che sta venendo testato presso LNL.

Nell'Appendice E sono contenute le tavole dei nuovi pezzi prodotte durante la fase di progettazione. Naturalmente il lavoro di sviluppo può essere ancora proseguito, concentrandosi ad esempio sulle parti trascurate in questa tesi, come l'anodo.

Si ricorda infine che l'oggetto sarà completamente definito quando se ne definirà la configurazione completa accoppiata con il bersaglio radioattivo, vero scopo del progetto SPES, in cui la linea di trasferimento allungata darà maggiori problemi dal punto di vista strutturale e dovrà essere gestita con un nuovo sistema di vincoli nel caso la crociera di allineamento già progettata non garantisca sufficiente rigidità in direzione assiale (nel Capitolo 5 era stato comunque evidenziato come si presentasse un miglioramento in termini di efficienza utilizzando questo dispositivo).

Bibliografia

- [1]. V.A. Bernshtam, Y. V. Ralchenko, Y. Maron, *Empirical Formula for Cross Section of Direct-Electron Impact Ionization of Ions*, At. Mol. Opt. Phys. 33, 5025-5032, 2000.
- [2]. H.C. Straub et al., *Absolute Partial and Total Cross Section for Electron-Impact Ionization of Argon from Threshold of 1000eV*, Physical Review A, Volume 52, Number 2, 1995.
- [3]. S. Kalpakjian, *Manufacturing Processes for Engineering Materials*, Addison Wesley, V edizione.
- [4]. P. A. Kammer, R. E. Monroe e D.C. Martin, *Weldability of Tantalum Alloys*, welding Research Supplement, 1972.
- [5]. R. Zanaga, *Studio e Test della Sorgente Superficiale SPES*, tesi di laurea triennale, Università degli studi di Padova, 2012/2013

CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

Lo studio effettuato durante lo svolgimento di questa tesi sulla sorgente di ionizzazione al plasma, tipo FEBIAD, ha permesso di trarre delle importanti considerazioni che hanno portato ad uno sviluppo del sistema.

Innanzitutto, partendo dalla conoscenza dei fenomeni fisici coinvolti, in particolare l'effetto termoionico descritto dalla legge di Richardson e l'effetto di saturazione della corrente elettronica fra due elettrodi che trova la sua formulazione nella legge di Child-Langmuir, si è potuta dare, anche grazie all'utilizzo del modello ad elementi finiti per il calcolo della temperatura, una prima caratterizzazione della sorgente.

Il modello ad elementi finiti è stato analizzato in dettaglio, per capire quali parametri potessero avere un effetto maggiore nel modificare il campo di temperatura del sistema. In particolare si è individuata come zona nevralgica la faccia frontale del catodo, che per essere studiata in modo dettagliato ha richiesto la realizzazione di un banco-prova apposito.

In particolare è stato scelto come indice fondamentale del comportamento della sorgente la corrente elettronica che si riesce ad accelerare dal catodo verso l'anodo: durante le prove di efficienza sono emerse delle discrepanze tra dati sperimentali e numerici, e sono state fatte delle ipotesi che consentono di individuare la differenza. Se la lettura di un livello inferiore di elettroni sia dovuta ad un effetto di carica spaziale o di ossidazione delle superfici, è chiaro che il problema non sta nei metodi d'indagine, ma nelle ipotesi iniziali, come ad esempio la supposizione che tutta la corrente emessa dal catodo arrivi all'anodo oppure che i metalli siano perfettamente puliti. D'altra parte il modello FEM è stato validato attraverso le prove sperimentali.

Le prove di efficienza, pur non dando risultati positivi in termini assoluti, sono stati fondamentali per comprendere quali siano le migliori condizioni della sorgente, soprattutto in funzione dell'utilizzo per la produzione di fasci radioattivi. In particolare, la presenza di contaminazione dovuta ad infiltrazioni d'aria è una problematica che coinvolge tutto l'impianto, e va approfondita perché la fase di lavoro si svolga al meglio.

Con la riprogettazione descritta nell'ultimo Capitolo, infine, si è voluto realizzare un'oggetto affidabile e prestante, in grado di sopportare al meglio le condizioni di lavoro.

Naturalmente la conclusione sarà la prova in linea del nuovo sistema, che non è stata possibile durante questo lavoro.

APPENDICE A

PORTING DEL PACCHETTO SOFTWARE ANSYS® SULL'IGI GRID PORTAL

A.1. Introduzione [1]

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. E' 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 A.1). L'INFN è uno dei promotori principali del progetto Grid e ospita al CNAF di Bologna uno degli 11 nodi di primo livello della Grid (vedi Figura A. 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 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.

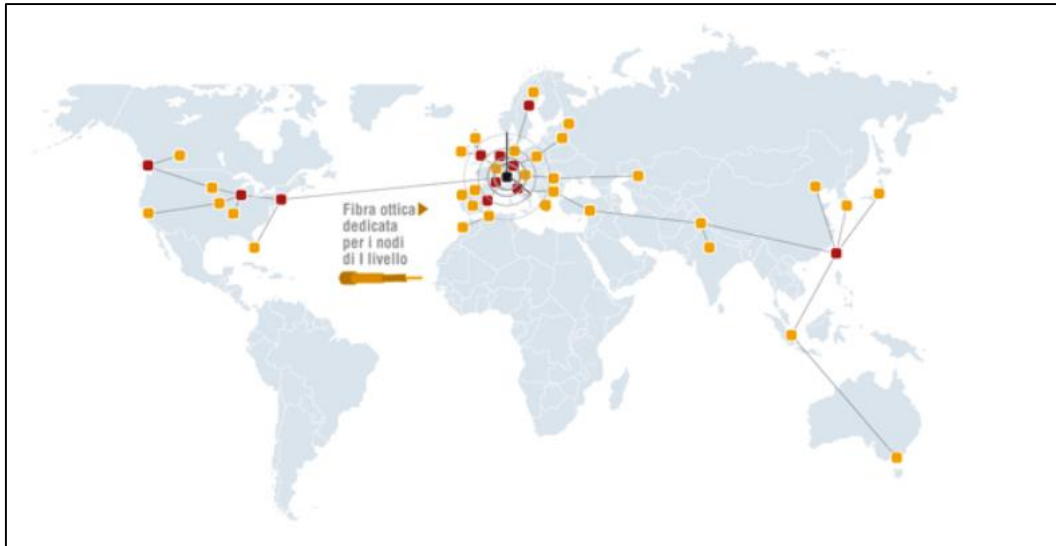


Figura A.1: Nodi della Grid [1].



Figura A. 2: Nodi della Grid in Italia [1].

Un'interfaccia web per eseguire la simulazione sfruttando i servizi messi a disposizione da Grid è stata assicurata da un portlet dedicato sull'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. Nei paragrafi successivi verrà illustrata la procedura per registrarsi al portale.

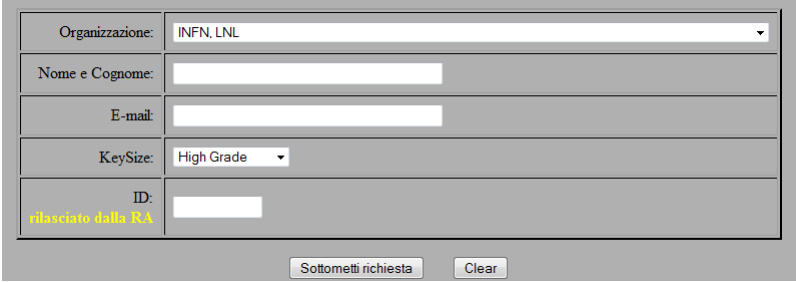
A.2. Richiesta del certificato INFN CA

Per poter procedere alla richiesta di certificato occorre possedere innanzitutto:

- Un account di posta elettronica INFN (nome.cognome@lnl.infn.it);
- Un documento d'identità valido (carta d'identità);
- Il codice fiscale.

A questo punto è possibile recarsi dalla *Registration Authority* di competenza, un ufficio della sede in cui si è allocati. In caso non si conoscesse l'ubicazione, è necessario collegarsi al sito <https://security.fi.infn.it/CA/RA>, e controllare la lista dei dipartimenti di INFN e cercare il nome delle persone competenti.

Una volta accertata l'identità del richiedente si riceveranno due mail. Nella prima, proveniente da INFN-CA, è contenuto il riepilogo della richiesta di certificato. La seconda è inoltrata dal personale della *Registration Authority* e contiene i dati che si dovranno immettere alla pagina che si apre cliccando sul link seguente: <https://security.fi.infn.it/CA/mgt/restricted/ucert.php>. A questo indirizzo si presenterà una schermata da cui scaricare il certificato della INFN *Certification Authority*. Si devono quindi compilare i campi del modulo con i dati ricevuti nell'e-mail dal personale della *Registration Authority*, compreso il codice identificativo da inserire nella casella ID. Lasciare il *KeySize* come di default, su *High Grade*.



Organizzazione:	INFN, LNL
Nome e Cognome:	<input type="text"/>
E-mail:	<input type="text"/>
KeySize:	High Grade
ID: <small>rilasciato dalla RA</small>	<input type="text"/>

Sottometti richiesta Clear

Figura A.3: richiesta di certificato.

Le successive operazioni devono essere eseguite con lo stesso browser con cui si è scaricato il certificato (i passaggi descritti in seguito fanno riferimento al browser Mozilla Firefox). Una volta inviata la richiesta di certificato personale si riceverà una nuova mail da INFN CA con le istruzioni per scaricarlo (questa mail dovrebbe arrivare entro qualche ora). Per assicurarsi di aver svolto correttamente le operazioni, controllare alla voce opzioni del browser utilizzato. Le operazioni successive vanno seguite sullo stesso computer con cui si è cominciata la procedura e utilizzando lo stesso browser, altrimenti alcuni parametri non correttamente impostati possono bloccare il processo di registrazione (ad esempio può essere impossibile scaricare il certificato dal link fornito dalla Registration Authority) ed è così impossibile accedere ai siti qui indicati, questo almeno fino a che non si è ottenuto il certificato personale e lo si è caricato nelle macchine da cui si vuole completare l'operazione.

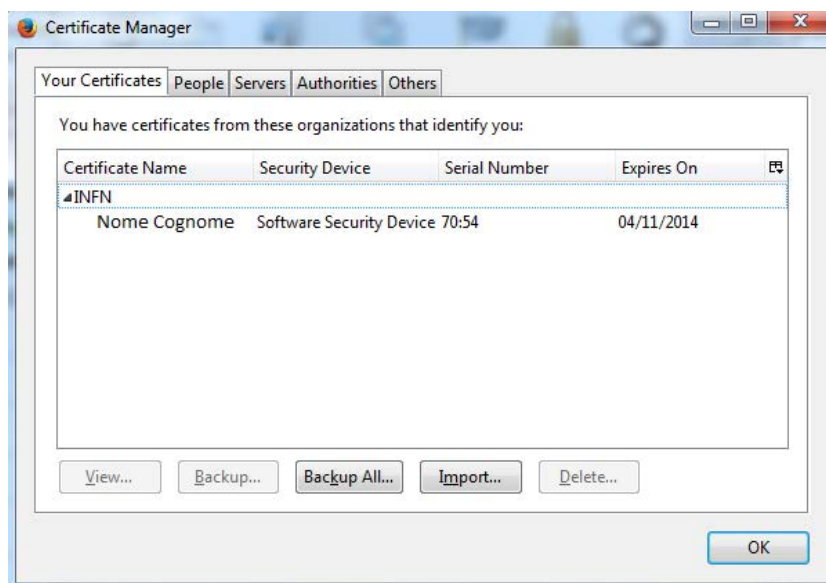


Figura A.4: Finestra di controllo dei certificati.

Nella scheda di visualizzazione dei certificati, sotto “personali”, dovrebbe apparire il vostro. Con il comando “esporta” o “backup all” si può salvare una copia del certificato inserendo una chiave di sicurezza di almeno dodici caratteri. Si raccomanda di conservare tale copia con la massima cura essendo strettamente personale, possibilmente su un dispositivo rimovibile.

A.3. Registrazione alla VO (Virtual Organization)

voms admin (for VO: gridit) Current user: CN=Nome Cognome

Home Browse VO Configuration Info Request membership Other VOs on this server

Welcome to the registration page for the **gridit** VO.

To access the VO resources, you must agree to the VO's Acceptable Usage Policy (AUP) rules. Please fill out all fields in the form below and click on the submit button at the bottom of the page.

IMPORTANT:

By submitting this information you agree that it may be distributed to and stored by VO and site administrators. You also agree that action may be taken to confirm the information you provide is correct, that it may be used for the purpose of controlling access to VO resources and that it may be used to contact you in relation to this activity.

After you submit this request, you will receive an email with instructions on how to proceed. Your request will not be forwarded to the VO managers until you confirm that you have a valid email address by following those instructions.

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

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 and security purposes only. This information may be disclosed to other

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

VOMS Admin version 3.2.0

Figura A.5: Inserimento dei dati presso la VO.

Si può procedere ora alla registrazione alla *Virtual Organization* andando all'indirizzo <https://voms.cnaif.infn.it:8443/voms/gridit/>. Accedere alla pagina, anche se compaiono messaggi di Warning, e autorizzare l'identificazione tramite certificato. Si aprirà una schermata come quella in Figura A.5 in cui immettere i propri dati. Spuntare la casella a fondo pagina sotto le condizioni e procedere con "submit". Apparirà la schermata di conferma, in cui si comunica l'invio di una mail alla propria casella di posta con le

successive istruzioni per procedere. Nella mail da parte di “*VOMS Admin for VO gridit*” è contenuto un riepilogo della richiesta effettuata e viene chiesto di confermare la procedura cliccando su un link sottostante.

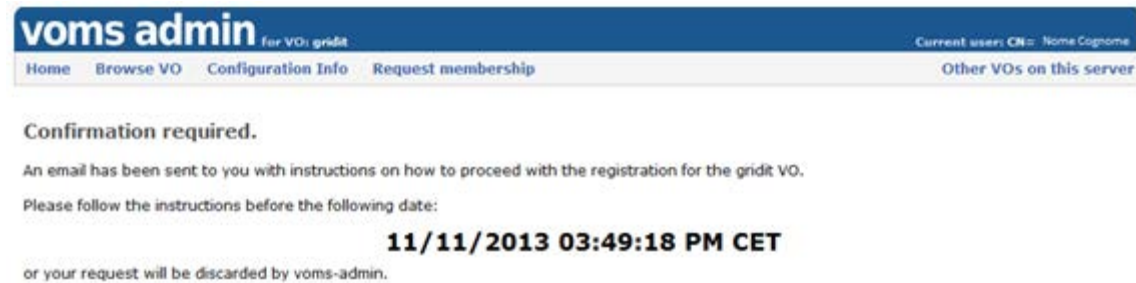


Figura A.6: Conferma della richiesta di accesso alla VO.

Se si clicca sul link presente nella mail apparirà la schermata di Figura A.7. Dopo un certo periodo arriverà dagli amministratori della VO una mail che conferma l’iscrizione al gruppo. Nel caso tardasse ad arrivare, si può sollecitarne la notifica inviando una mail all’amministratore di competenza (si può chiedere al superiore del proprio ufficio a chi rivolgersi). Quando è stata confermata l’iscrizione, si può passare all’iscrizione al portale Grid. Potrebbe arrivare una mail da un membro del CNAF che richiede di specificare le motivazioni per la registrazione alla VO gridit; si può rispondere scrivendo di essere un tesista presso INFN-LNL e che è necessaria l’iscrizione al gruppo */gridit/ansys* per poter lanciare simulazioni con Ansys®.

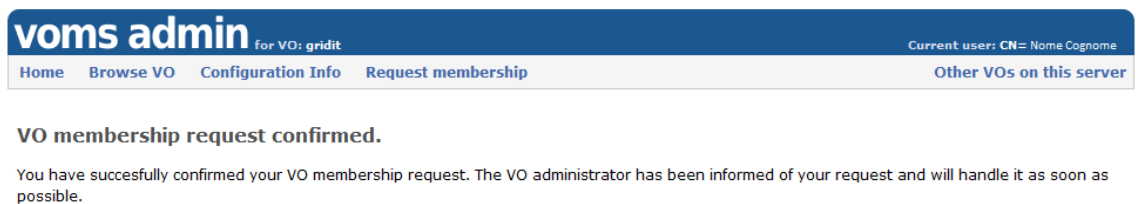


Figura A.7: Schermata che informa l'utente della avvenuta richiesta alla VO.

A.4. Registrazione al portale grid

Dopo aver concluso la procedura per l’iscrizione alla VO, si può connettersi al sito <https://portal.italiangrid.it/> e da lì cliccare su “Register Now”, in alto a destra sulla schermata. Per prima cosa va inserita l’organizzazione di appartenenza, in questo caso sarà l’Università di Padova (in caso si scelga di registrarsi tramite account INFN, assicurarsi prima di avere completato la procedura di associazione).

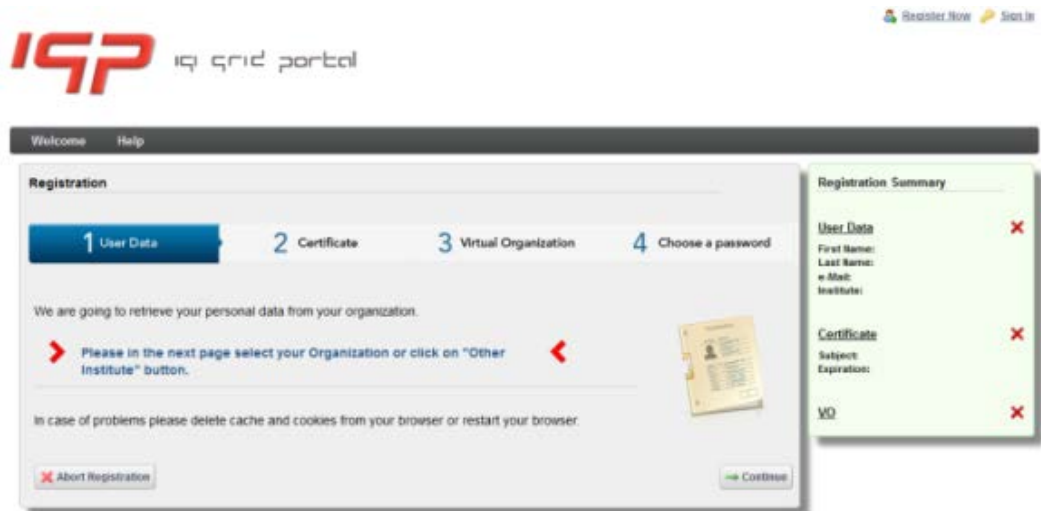


Figura A.8: Accesso al portale Grid.

Select your organization.

The Service you are trying to reach requires that you authenticate with your home organization, enter the name below.

Enter institution name:

[Show Institute List](#)

Figura A.9: Schermata per l'inserimento dell'istituto di appartenenza.

Viene richiesto di identificarsi tramite l'account dell'Università oppure tramite INFN, nel qual caso cliccare "X.509 Certificate" e poi ok sulla schermata di identificazione utente.

AUTENTICAZIONE CENTRALIZZATA SINGLE SIGN ON

Username
 @unipd.it
 @studenti.unipd.it

Password

Figura A.10: Login tramite UNIPD.



Figura A.11: Login tramite INFN.

Compilare la schermata successiva con i dati utente e procedere con "Continue". Nella schermata successiva immettere il certificato personale scaricato, con la chiave di sicurezza scelta:

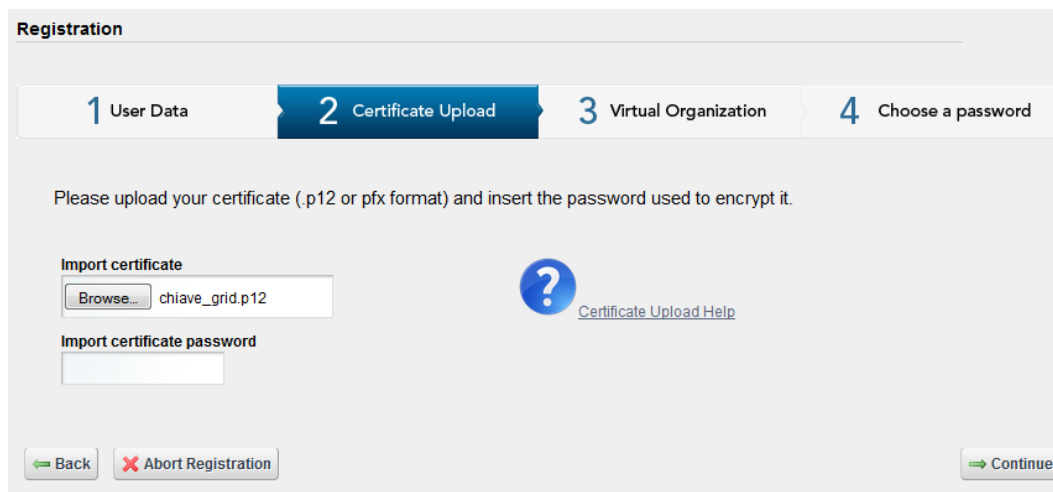


Figura A.12: Inserimento del certificato.

Viene quindi richiesta una nuova password necessaria per l'aggiornamento del proxy, cliccare poi su "Save".

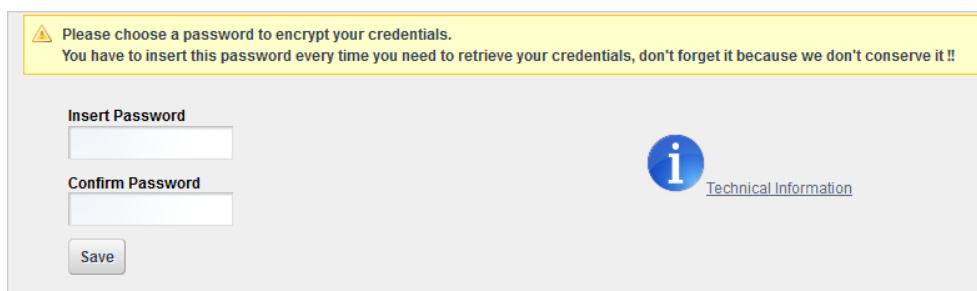


Figura A.13: Inserimento della password per il proxy.

Si deve quindi scegliere la propria organizzazione virtuale. Per controllare di essere correttamente registrati alla lista “gridit”, risulta necessario collegarsi al sito della VO Membership Service: <https://voms.cnaf.infn.it:8443/voms/gridit/>. Apparirà una schermata, dove l’ultima voce con la sigla “APPROVED” significa che la registrazione è confermata.

The screenshot displays the user's status in the VO Gridit. It is divided into several sections:

- Certificates:** Shows a certificate with details: CN=Nome Cognome, CN=INFN CA, Added on: 11/06/2013 02:05:03 PM CET. A button "Request new certificate" is present.
- Your groups and roles:** A dropdown menu is set to "/gridit/auger" with a "Request membership" button. Below, a table lists roles:

Group name	Roles
/gridit	pilot (with "Request role" button)
/gridit/ansys	pilot (with "Request role" button)
- Your generic attributes:** States "No attribute classes defined for this VO."
- Your AUP acceptance status:** States "The current AUP was last signed 0 days ago. This signature will expire in 364 days."
- Your request history:** A table showing request details:

Request type	Info	Status
VO membership request (11)		APPROVED

Figura A.14: Riepilogo del proprio status nella VO Gridit.

Tornare al portale Grid. Si ricorda che la registrazione può essere interrotta e ripresa andando sul sito <https://portal.italgrid.it/> e cliccando sulla voce “Sign In”. Arrivati al secondo step di questa procedura, cioè il caricamento del certificato, arriverà alla casella di posta con cui si è effettuato l’accesso (account dell’università oppure di INFN) una mail dal “Portal Administrator” del portale Grid che conferma la creazione del profilo sul suddetto portale. Si procede col terzo step selezionando la VO di appartenenza. Ci si troverà di fronte alla seguente schermata, e dopo la voce “Enter your VO’s name” inserire “gridit”.

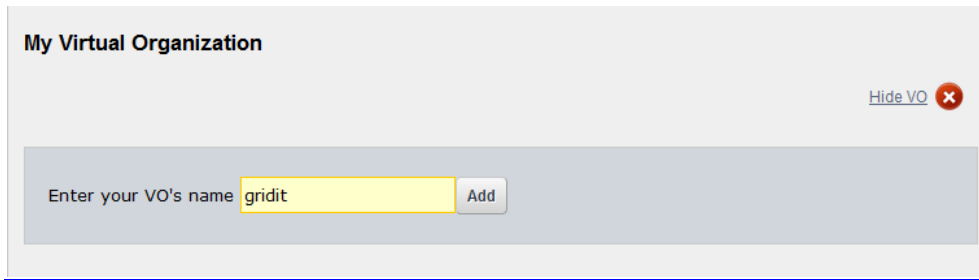


Figura A.15: Scelta della propria VO.

Per evitare errori, selezionare l'organizzazione corretta dal menù a tendina che apparirà dopo aver inserito le prime lettere del nome della VO. Confermando con il tasto "Add", si aprirà la schermata di conferma. Cliccare sul tasto "Actions", e dal menù a tendina che si apre scegliere "Set Role VO" per selezionare il gruppo di appartenenza, ovvero Ansys.

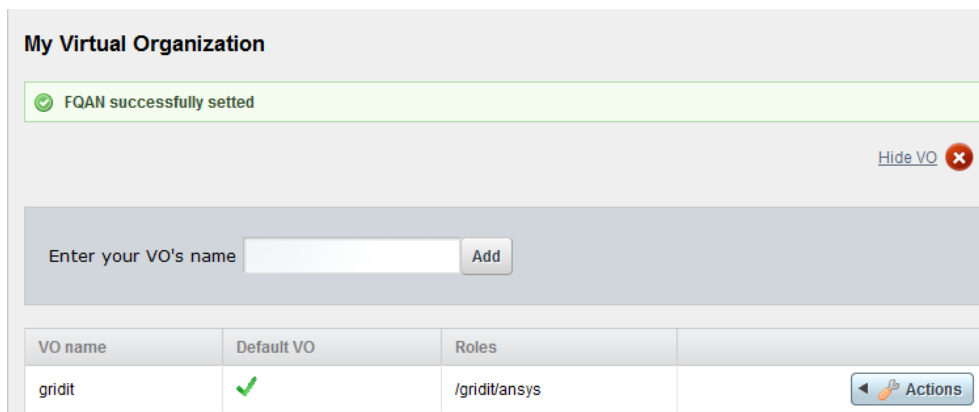


Figura A.16: Conferma di appartenenza alla VO.

Apparirà una schermata in cui è possibile selezionare il gruppo a cui si interessa accedere per eseguire le simulazioni con Ansys®. Per la selezione scegliere /gridit/ansys dal menù di sinistra, "My available attributes", e trascinarlo in quello di destra, "Attributes I want to use".

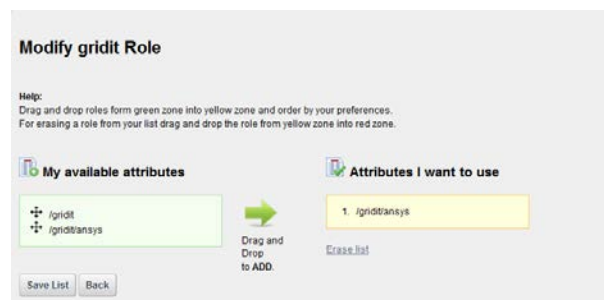


Figura A.17: Scelta del gruppo.

Uscire dalla procedura premendo il tasto “*Registration Terminated*”. Per Lanciare le simulazioni è necessario spedire una mail all’indirizzo igi-portal-admin@lists.italiangrid.it richiedendo l’iscrizione al gruppo Ansys. Si consiglia di specificare il ruolo di tesista magistrale presso i Laboratori Nazionali di Legnaro. Dopo aver atteso qualche tempo, sarà possibile accedere al portale <https://portal.italiangrid.it/gruop/ansys1>, utilizzando le credenziali inserite nella procedura di registrazione.

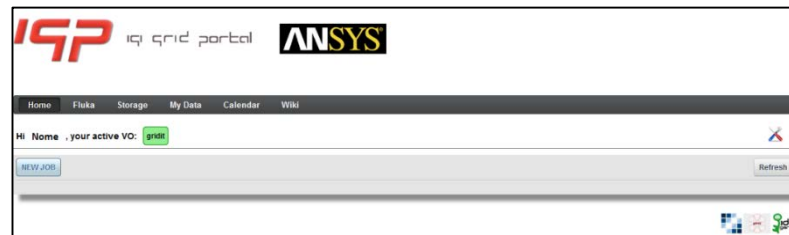


Figura A.18: Accesso al gruppo Ansys.

A.5. Tutorial per il lancio di una simulazione

Dopo essersi collegati al sito <https://portal.italiangrid.it/gruop/ansys1> ed aver effettuato il *Login*, prima di eseguire qualsiasi operazione sul portale, è necessario aggiornare il proxy inserendo la propria *password*. Dalla schermata iniziale, riportata in Figura A.19, è possibile sottomettere un Job. E' necessario possedere lo script APDL e un archivio in formato .tar contenente tutti i file necessari all’analisi, cioè i modelli geometrici (.iges/.igs), eventuali macro (.mac), etc. Per creare tale archivio, che non deve essere compresso (opzione “NON COMPRESSO” o “STORE” nel software per gestire gli archivi), si possono utilizzare programmi quali 7zip, scaricabile gratuitamente. È importante creare un archivio dei file necessari alla simulazione, e non contente invece la cartella con i file all’interno; inoltre per evitare errore nel lancio dell’analisi e nella gestione dei file sul portale conviene che i nomi di tutti gli oggetti, cioè APDL ed archivio non contengano spazi o punti. Una volta in possesso di questi prerequisiti, si può cliccare sulla voce “*NEW JOB*” per procedere col caricamento dei file necessari. Comparirà la seguente schermata:

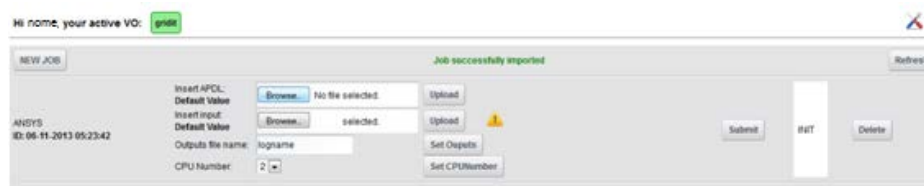


Figura A.19: Schermata iniziale per il lancio di una simulazione.

Procedere come segue:

1. Cliccare sul tasto “Browse...” alla voce “Insert ADPL”. Si aprirà una finestra da cui selezionare il file di testo corretto. Confermare la scelta con il tasto "Upload";
2. Procedere al caricamento dell'archivio .tar: cliccando sul tasto “Browse...” alla voce "Insert Input" è possibile selezionare l'archivio. Confermare con il tasto Upload, come in precedenza;
3. Impostare il nome del file di Output nell'opportuna finestra, premendo su “Set Outputs” per confermare la scelta. Il nome non deve contenere spazi perché il job venga lanciato correttamente;
4. Allo stesso modo si può scegliere il numero di processori da usare in parallelo. Si consiglia comunque di mantenere le impostazioni di default;
5. Si può inviare la simulazione alla centrale di calcolo premendo “Submit”.

Una volta eseguita la procedura descritta, è possibile aggiornare la pagina con “Refresh” e controllare i progressi della simulazione. Se tutto è stato eseguito correttamente, la barra bianca sul lato destro dello schermo con lo stato “INIT” dovrebbe diventare arancione e lo stato mutare in “SUBMITTED”.

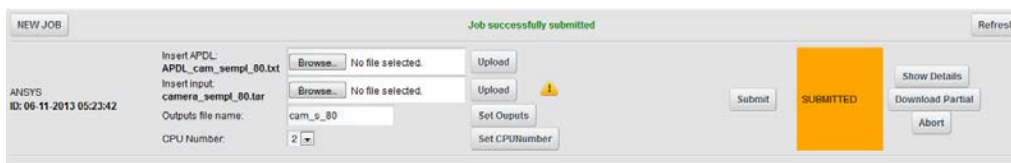


Figura A.20: schermata che avvisa l'utente del corretto invio della simulazione.

A destra compaiono dei nuovi pulsanti: con “Show Details” si apre una videata con una panoramica su tutte le simulazioni in corso ed il loro stato; con “Download Partial” si può aprire il file .log che è emesso in output dal processo in corso, ed è quindi possibile controllare i messaggi di errore e la convergenza dell'analisi; con “Abort” si annulla la attuale simulazione. Dopo pochi secondi da quando si è inviata la simulazione, premendo il tasto “Refresh” in alto a destra, la schermata aggiornata dovrebbe confermare l'avvio dell'analisi con la comparsa di una barra rossa con lo stato “RUNNING” al posto di quella arancione (Figura A.21).



Figura A.21: L'analisi sta procedendo correttamente.

E' possibile che la simulazione non venga eseguita in modo corretto oppure si verifichino errori durante l'analisi. In questo caso, dopo aver premuto il tasto "Refresh", la barra rossa diventerà azzurra e comparirà lo status "ERROR" (vedi Figura A.22). La comparsa di questo stato non significa che ci siano per forza errori nell'APDL o nell'archivio .tar (eventuali errori dovuti alla simulazione si possono leggere nel file *log*, dove compare il report delle attività che sono svolte da Ansys e dove è possibile leggere i messaggi di errore dati in output dal software come l'eventuale non convergenza della soluzione o la mancata lettura di una macro assente nell'archivio). Lo stato ERROR può dipendere dallo stato del portale o del proxy (ad esempio se non viene aggiornato, in seguito viene spiegato come aggiornarlo).

Per riprendere la simulazione ci sono due possibilità: scegliendo una delle opzioni che appaiono sopra il tasto "Submit", mettendo una spunta nella relativa. E' possibile riavviare da capo l'analisi oppure riprendere il calcolo dall'ultimo substep eseguito. Se lo status di errore appare pochi secondi dopo che è stata avviata la simulazione e il pulsante "Download Partial" rimanda ad una pagina con un messaggio di errore (del tipo *file not found*), si può provare ad aprire le impostazioni del proprio account VO premendo il tasto verde grikit a fianco alla frase "your active VO" in alto a sinistra.



Figura A.22: Comparsa dello stato di errore.

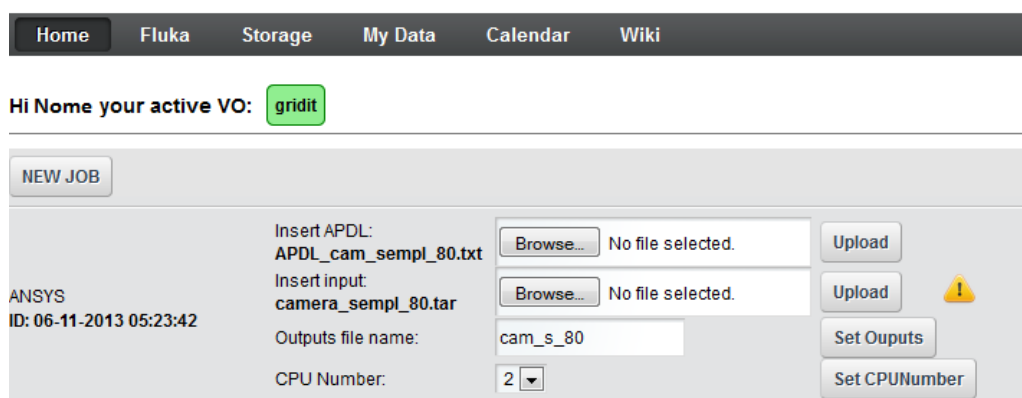


Figura A.23: Il tasto verde permette l'accesso alle opzioni sulla propria VO.

Si apre un piccolo pop-up con lo stato, cioè "Role" e "Time left". Il primo deve essere impostato su /grikit/ansys (dovrebbe essere il valore che si trova automaticamente). Il secondo è il tempo rimanente alla scadenza del proxy. Per settare questi parametri si può

premere su pulsante “Renew Credential” in basso, dopo aver inserito la propria password (vedi). Nella schermata che si apre si può far ripartire il contatore del tempo impostare il ruolo corretto nel Grid da un menù a tendina. I dati immessi vanno confermati inserendo la password scelta durante la registrazione e premendo il tasto “Renew Credentials”. Una volta eseguito questo passaggio, è consigliabile uscire dal proprio account e rientrare perché le modifiche siano effettive. Le impostazioni sul proxy vanno riaggornate ogni qualvolta il timer sta per azzerarsi (il contatore che segnala il conto alla rovescia è visibile in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**).

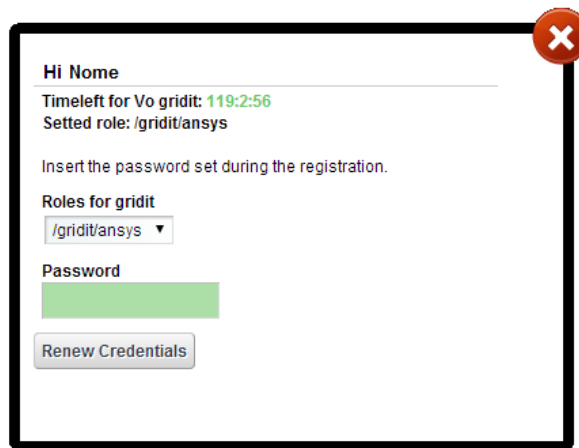


Figura A.24: impostazioni personali e dettagli proxy.

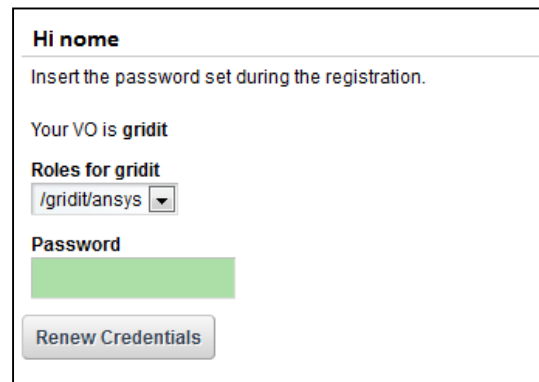


Figura A.25: Schermata che permette di reimpostare le proprie credenziali.

Terminata una simulazione, premendo il tasto “Refresh” apparirà la barra verde con lo stato “FINISHED” al posto di quella rossa.



Figura A.26: Schermata che informa l'utente dell'avvenuta soluzione.

A questo punto è possibile scaricare un archivio contenente il file con i risultati premendo il tasto “*Download Outputs*” sulla destra. Nell’archivio sarà presente il file database (.db) con cui eseguire il post-processing. Per una corretta gestione del portale è necessario relazionarsi con gli altri membri appartenenti ai LNL che usano tale piattaforma, poiché il numero di licenze di cui i laboratori possono disporre è limitato, perciò non è possibile sottomettere troppe simulazioni per volta, pena la comparsa dello stato ERROR. Si consiglia in generale di sottomettere sempre in media due simulazioni per volta e di non superare il numero di tre job sul portale. Nel caso non si rinnovino le impostazioni del proxy prima della scadenza, le simulazioni in corso continueranno fino al termine ma lo stato sarà convertito in ERROR. Attraverso il tasto “*Download Partial*” si potrà comunque controllare il file log, contenente le informazioni sullo stato di avanzamento del job. Una volta terminata, per poter scaricare i risultati è necessario aprire il file log e modificare l’indirizzo visualizzato sostituendo all’estensione “.log” la stringa “.tar.gz”

Ad esempio, dal tasto “*Download Partial*” si viene inviati all’indirizzo: http://darkstorm.cnaf.infn.it:8085/webdav/zansys/nwh3rufmyqajsospgl9sx8qxiiu_/logname_20140612113535.log; i risultati potranno essere scaricati inserendo come indirizzo http://darkstorm.cnaf.infn.it:8085/webdav/zansys/nwh3rufmyqajsospgl9sx8qxiiu_/stand_ard_370_20140612113535.gz.tar.

A.6. Accortezze da adottare nei listati di codice APDL di una analisi [1]

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 nel seguito:

- 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 (ad esempio i *keypoint*) e non sui nodi degli elementi;
- È possibile lanciare simulazioni in cui sono definiti più *loadstep*, purché arrivino a convergenza prima della risottomissione (cioè prima di 23 ore); infatti lo script per la risottomissione automatica attualmente non prevede l’istruzione *LSSOVE*. In alternativa è possibile utilizzare un carico progressivo utilizzando un approccio vettoriale;

- 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 "*OTRES,NSOL,ALL*" in modo da salvare i risultati al termine di ogni *substep*. Questi verranno automaticamente caricate nell'auto-risottomissione del *Job*;
- 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. Nel caso di analisi non transitorie è necessario inserire l'istruzione *TIME,1*.

Bibliografia

- [1]. A. Prevedello, Studio elettro-termico, progettazione meccanica e test del sistema target - sorgente per il progetto SPES, Tesi di Laurea Magistrale, Università degli Studi di Padova, 2012/2013.
- [2]. 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.
- [3]. «Guida utilizzo portale per software Ansys,» Indirizzo:
<https://portal.italiangrid.it/group/spes/wiki/-/wiki/Main/FrontPage#section-FrontPage-Guida+utilizzo+portale+per+software+Ansys>.
- [4]. «ItalianGrid,» Indirizzo: <http://www.italiangrid.it/>.

APPENDICE B

MONTAGGIO DELLA SORGENTE DI IONIZZAZIONE AL PLASMA

B.1. Introduzione

La Sorgente di ionizzazione tipo FEBIAD studiata durante lo svolgimento di questa tesi è un dispositivo complesso e composto da un insieme di componenti (elencati nel Capitolo 2) che devono essere collegati fra loro, come visto, per garantire un corretto funzionamento dal punto di vista della conduzione di corrente elettrica e del comportamento termico. Le soluzioni progettuali adottate nelle prime versioni del dispositivo non sono state pensate sulla base di una facilità di assemblaggio, ma per garantire un corretto comportamento dal punto di vista fisico, in particolare per quanto riguarda gli aspetti di isolamento elettrico fra le parti, oltre a ionizzazione ed estrazione del fascio. Per questo l'operazione di montaggio può risultare complessa, e, se non viene affrontata con una particolare cura, può influenzare il corretto funzionamento della Sorgente al Plasma e può portare a fenomeni come zone a temperatura maggiore di quella prevista nel caso di elementi di due componenti in contatto precario, riduzioni dell'efficienza nel caso di posizionamenti sbagliati dei componenti (come ad esempio la posizione relativa tra anodo e catodo), o il non funzionamento (inteso come il non verificarsi della ionizzazione delle particelle) nel caso in cui ci siano punti non isolati dalla corrente (in particolare per l'anodo) o conduttori elettrici non a contatto. Inoltre se non si esegue una corretta revisione mano a mano che si procede con le varie fasi di montaggio, si rischia di dover smontare e quindi rimontare il dispositivo più volte, con grande perdita di tempo e il rischio di errore o di contaminazioni dei componenti. Ecco il perché si è voluto raccogliere in questa appendice l'esperienza conseguita durante le prove sperimentali, per fornire a chi si approccia allo studio o alla messa in opera della Sorgente al Plasma un riferimento iniziale che semplifichi le operazioni di montaggio.

B.2. Verifica dei componenti e montaggio preliminare

La prima fase dell'assemblaggio di qualsiasi sistema complesso è la raccolta e la verifica dei vari componenti. Nel nostro caso, la sorgente al plasma è composta dai seguenti sotto-assemblati:

- Sistema per il trasporto della corrente di linea che serve a riscaldare il catodo e canale per il passaggio del gas da ionizzare nelle prove off-line;
- Sistema di supporto e di ionizzazione, che altro non è che la zona di ionizzazione vera e propria.

Come già accennato, la descrizione in dettaglio di ogni elemento è reperibile nel Capitolo 2 della tesi, dove sono anche descritte le varie funzioni di ognuno di essi.

Le parti della camera e di accoppiamento della sorgente al Front-End (come elettrodo estrattore, camera da vuoto, cavi per il trasporto di corrente, ecc.) non vengono considerate in questa sezione, anche se è opportuno in fase di montaggio controllare che siano presenti tutti i dispositivi per connettere la Sorgente alla camera e quindi alla linea.

I modelli CAD dei sottosistemi elencati sono mostrati in Figura B.1. Si ricorda che nel caso la sorgente sia accoppiata al sistema “bersaglio”, la linea di trasporto elettrico è di geometria differente.

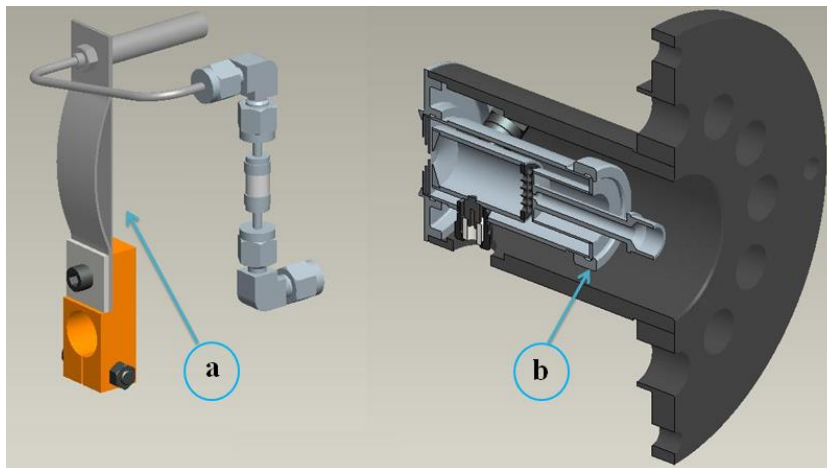


Figura B.1: sotto-assiemi per assemblaggio della Sorgente al Plasma. a) linea di trasporto della corrente per il riscaldamento del catodo e condotto per l'alimentazione del gas da ionizzare (nelle prove off-line); b) sistema di supporto e di ionizzazione del fasci

Questi sotto-insiemi a loro volta sono composti ognuno da più componenti, tutti necessari per montare e far funzionare la Sorgente di Ionizzazione. I componenti per il canale di passaggio del gas naturalmente vanno trattati come i componenti della sorgente per quanto riguarda la pulizia, e vanno montati facendo attenzione a non pizzicare o

deformare eccessivamente i tubi o i condotti dove deve scorrere il gas, così da non inficiare il risultato delle prove di efficienza.

Si ricorda soltanto in questa sezione che occorrono:

- Due adattatori Swagelock;
- Un canale di collegamento per collegare i due adattatori;
- Il tubo in Tantalio per portare il gas fino al tappo di fissaggio finale.

Oltre a questi componenti, sulla camera andrà posizionato il filtro del gas da insufflare (“*leak*”) con relativo alloggiamento.

La linea di trasferimento della corrente poi è composta da:

- Un morsetto di Rame che collega il sistema con il puntone della camera da vuoto per trasmettere la corrente; la camera sarà tenuta a potenziale nullo;
- Un foglio di Tantalio spesso 0.5 mm a cui è appoggiata una serie di dieci lamelle, sempre in Tantalio, spesse ognuna 0.1 mm, che hanno la funzione di portare la corrente al dal collegamento in Rame al resto del sistema;
- Una piastrina di Acciaio Inossidabile che assieme ad una vite fissa il foglio e le lamelle di Tantalio al morsetto di Rame;
- Il dado di tenuta in Tantalio o Molibdeno;
- Il tappo di chiusura finale (“*end cap*”) che essendo forato in senso assiale permette il passaggio dei gas da ionizzare;
- La linea di trasferimento in Tantalio che si accoppia geometricamente col tappo di chiusura e verrà poi fissato al catodo.

Prima di cominciare l’assemblaggio è bene lavare una prima volta i componenti per evitare la presenza di contaminanti dopo aver messo in vuoto il dispositivo, cosa che può portare a misure di efficienza errate nelle prove con sistema senza bersaglio radioattivo (vedi Capitolo 6). Per il lavaggio si utilizza una lavatrice ad ultra-suoni come quella mostrata in Figura B.2. La lavatrice ad ultrasuoni permette di rimuovere meccanicamente eventuali residui presenti sui pezzi, ad esempio lubrificanti lasciati durante la lavorazione dei pezzi, polvere, ecc. I pezzi in materiale ceramico non devono essere lavati, altrimenti si rischia che l’acqua sia assorbita per la porosità e non si riesca ad ottenere un’asciugatura efficace.



Figura B.2: Lavaggio dei componenti nella lavatrice ad ultrasuoni presente presso i laboratori nazionali di Legnaro

Dopo il lavaggio è necessario asciugare i componenti per rimuovere anche l'acqua, così da diminuire ancora la presenza di contaminanti. Per svolgere questa operazione è stato usato un forno elettrico in cui la temperatura è mantenuta costante a 60°C. Per asciugare completamente i componenti è necessaria qualche ora, inoltre è opportuno che i componenti vengano lavati e asciugati mentre sono disassemblati, per ottenere un risultato migliore.



Figura B.3: forno nel quale vengono asciugati i componenti

Dopo l'asciugatura è possibile completare la pulizia passando i pezzi con della carta assorbente imbevuta di acetone. Per mantenere i componenti puliti per tutta la fase di montaggio è consigliabile lavare le superfici su cui si lavora e usare dei guanti per toccare i componenti in modo da evitare la contaminazione. L'igiene delle superfici di lavoro è fondamentale e si riflette direttamente sui contaminanti che saranno poi ionizzati e rilavati nelle prove, per avere il la situazione migliore si è fatto uso di carta assorbente per ricoprire i piani dove sono stati appoggiati i pezzi e su cui avveniva il montaggio.

La fase di montaggio preliminare qui descritta in dettaglio è necessaria per verificare che tutti i componenti si accoppino fra di loro correttamente e che

Per prima cosa si può eseguire il montaggio della linea di trasporto della corrente: per trattare questi componenti si consiglia di partire dal tappo di chiusura (“*end cap*”), accoppiando il foglio e le lamelle di Tantalio e serrandole col dado dello stesso materiale. I fori sul foglio e sulle lamelle potranno essere allargati con una lima successivamente in modo che, quando si completa il montaggio del dispositivo, questi siano in posizione più verticale possibile in modo da evitare eccessive distorsioni per via dell’espansione termica. A questo punto, aiutandosi con la piastrina in Acciaio, si può collegare il morsetto di Rame. La linea di trasferimento può essere accoppiata successivamente. Queste operazioni sono semplici e non occorrono accorgimenti particolari per montare il tutto senza problemi; tuttavia il Tantalio è un materiale con proprietà plastiche elevate e se non si fa attenzione si corre il rischio di rovinare le filettature dei pezzi rendendoli inutilizzabili e di doverli lavorare nuovamente.

Si può quindi eseguire l’assemblaggio preliminare della sorgente vera e propria: la camicia e la flangia di supporto possono essere in Acciaio o Grafite; nel primo caso i due componenti vengono saldati assieme così da formare un unico corpo di supporto in cui andranno inseriti tutti gli altri, mentre se sono nel secondo è previsto un accoppiamento per mezzo di una zona filettata. Per assemblare i componenti interni si possono scegliere i materiali in base all’adesione che essi hanno alle alte temperature: come conduttori elettrici si usano Tantalio e Molibdeno, che hanno buone proprietà elettriche, termiche e meccaniche alle alte temperature, ma se ad esempio due componenti dello stesso materiale sono a contatto e vengono riscaldati a temperature vicine a 2000°C, e magari sono forzati l’uno contro l’altro, può nascere una zona di adesione tra i due che rende impossibile o molto complicato il disaccoppiamento: ciò non è un problema nel caso di utilizzo della sorgente per l’estrazione di isotopi radioattivi, visto che questa deve restare integra per il periodo di lavoro e poi, una volta smantellata e non deve più essere utilizzata, ma durante le prove può essere necessario smontare la sorgente per un’ispezione o per modificare un componente. Perciò è consigliabile non mettere due pezzi dello stesso materiale a contatto a meno che non si possa fare altrimenti. Detto questo, il passo successivo è l’assemblaggio dell’anodo il quale è composto da tre parti (vedi Figura B.4):

- Griglia (“*grid*”);
- Scarico (“*outlet*”);

- Camera di anodo (“*anode*”).

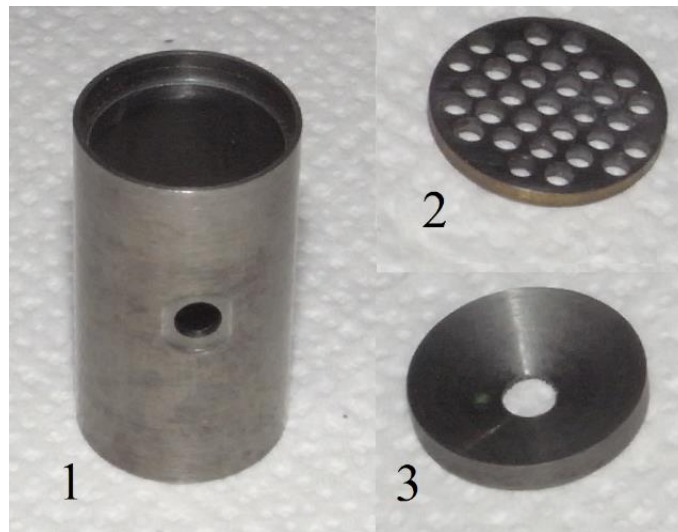


Figura B.4: 1) camera di anodo; 2) griglia, 3) flangia di scarico. I tre componenti vanno collegati tra loro.

La griglia e lo scarico vanno inseriti forzandoli nella camera di anodo: il procedimento richiede molta attenzione perché l’allineamento delle facce incide sul comportamento della sorgente e la griglia va accoppiata con interferenza. Per riuscire ad unire i componenti si consiglia di usare uno strumento per premere la griglia tenendo la camera di anodo in verticale appoggiata a una superficie orizzontale e liscia (se si usa un oggetto morbido, ad esempio di gomma come un martelletto, adoperato con molta cautela, si corrono minori rischi di rovinare le superfici dei componenti). Nella camera di anodo sono ricavate le sedi per alloggiare scarico e griglia e che rendono possibile l’inserimento nella corretta posizione.

Una volta che l’anodo è stato assemblato, si può passare alla parte più delicata del procedimento, cioè l’assemblaggio dello stesso alla camera di scarica (“*discharge chamber*”). Si può utilizzare uno strumento appositamente realizzato formato da una cava dove inserire la camera di anodo. L’esterno è lavorato in modo che la camera di scarica si possa inserire, così da fornire un sostegno mentre si procede col montaggio. Si possono quindi adagiare, uno alla volta, i puntali di supporto degli isolatori e gli isolatori stessi, in Allumina, e infine fissare tutto coi dadi di supporto. Nella Figura B.5 si può notare un particolare della fase di montaggio; tenendo la cava per l’inserimento del puntalino di supporto sempre in verticale rivolta verso l’altro, si è facilitati nell’inserimento e nella chiusura dei dadi.



Figura B.5: Camera di scarica a cui sta venendo montato l'anodo, sostenuta dall'utensile appositamente costruito. Sotto l'isolatore di allumina bianco è presente il puntalino di supporto, e sopra andrà posto il dado di chiusura. Regolando la chiusura dei tre dadi presenti alla fine, si otterrà un corretto allineamento dell'anodo.

Bisogna fare attenzione che i tre componenti siano allineati correttamente, perché se così non fosse potrebbe venire meno l'isolamento termico che causerebbe il mancato funzionamento della sorgente. Per assicurarsi un corretto centraggio della camera di anodo si può cercare inizialmente di eseguire un controllo visivo; successivamente, per essere sicuri del corretto posizionamento, si può usare lo strumento di montaggio infilandolo in entrambi i versi nella camera di scarica: se l'anodo è accoppiato correttamente dovrebbe entrare nella cava nei due sensi, mentre se ci sono interferenze bisogna cercare di raddrizzare il corpo regolando i dadi di supporto (i dadi possono essere stretti a mano oppure con l'ausilio di una chiave, non vanno comunque stretti eccessivamente). Per questa operazione occorre del tempo, e dev'essere eseguita con particolare cura. Il dettaglio critico di questa operazione sta nel fatto che uno dei parametri fondamentali da controllare per monitorare il comportamento della sorgente al plasma è la distanza anodo - catodo, cioè la distanza fra le superfici affacciate dell'anodo e della griglia; per comprendere l'importanza che ha questo parametro sul comportamento della sorgente, ed in particolare della corrente elettronica (arco) che viene accelerato verso l'anodo, basta fare riferimento alla legge di Child-Langmuir (vedi Capitolo 2). La distanza fra le due superfici considerate può essere misurata in fase di montaggio con un calibro: si misura la distanza tra la griglia e il bordo della camera di scarica su cui sarà appoggiato il catodo (z_1), quindi si misura la distanza della faccia del catodo dal suo collarino, che andrà in battuta sulla camera di scarica (z_2). Si ha quindi la distanza cercata d dalla relazione: $d = z_1 - z_2$ (vedi Figura B.6).

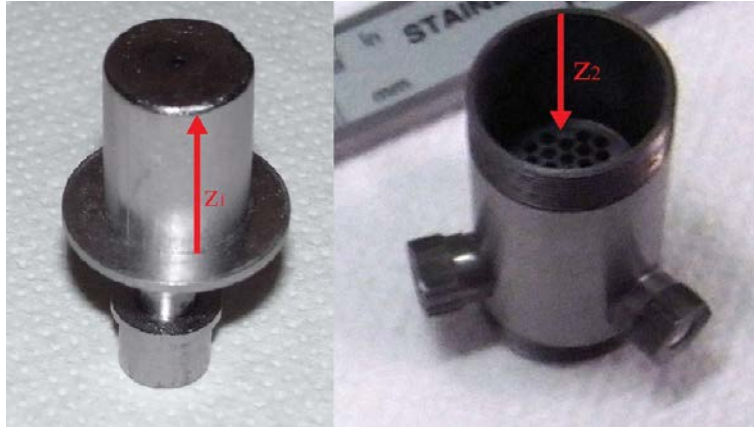


Figura B.6: Nella foto sono riportate le due distanze z_1 e z_2 da misurare: da queste, è possibile ricavare la distanza anodo - catodo.

I valori di z_1 e z_2 devono essere misurati più volte (nelle esperienze svolte durante lo svolgimento di questa tesi si è acquisito un campione da 6 a 10 elementi per ogni parametro), e la d diventa in tal caso la differenza fra le medie. Per un corretto funzionamento della sorgente d deve avere un valore compreso tra gli 0.9 mm e gli 1.4 mm. Valori più alti sono sconsigliati poiché tendono a causare una riduzione dell'efficienza al crescere della temperatura, mentre il valore ottimale è tra 1.0 e 1.2 mm [1]. Se nelle rilevazioni di z_1 si nota una grande variabilità fra i valori misurati, si consiglia di ripetere la centratura del corpo dell'anodo per avere un assemblaggio più accurato. Nel caso il valore di d sia minore di 0.9 mm, si possono usare degli anelli distanziatori in Molibdeno fatti fare su misura per regolare la posizione del catodo, mentre se il valore è maggiore, si può tornire il bordo della camera di scarica su cui si appoggia il catodo, per avere una distanza controllata. Comunque sia, provando a ripetere il posizionamento dei puntali nella camera di anodo e orientando i corpi verso l'alto o verso il basso nella fase di montaggio, si potrà osservare che si può modificare la z_1 anche di qualche decimo di millimetro, consentendo così il corretto posizionamento senza componenti aggiuntivi o senza ulteriori lavorazioni; questo punto è il più delicato e quello che occupa più tempo. Se comunque si rende necessaria una lavorazione, si consiglia di ripetere l'operazione di tornitura togliendo poco materiale, visto che il montaggio stesso della camera di anodo comporta un diverso posizionamento dei pezzi e che quindi se toglie troppo materiale è possibile che da un valore oltre agli 1.4 mm di distanza massima, si arrivi a un valore inferiore di 0.9; la misurazione va eseguita ogni volta che si assembla la camera di anodo. Naturalmente la lavorazione dei pezzi comporta una contaminazione, e quindi richiede un successivo lavaggio. Finita questa regolazione si può passare al montaggio

preliminare, collegando il catodo alla camera di scarica col dado di tenuta apposito, e fissare la flangia di chiusura dopo aver posizionato gli scudi termici nella maniera corretta con i relativi anelli distanziatori (Figura B.7). Anche in questo caso bisogna fare attenzione all'allineamento, in particolar modo del disco con il foro più piccolo.

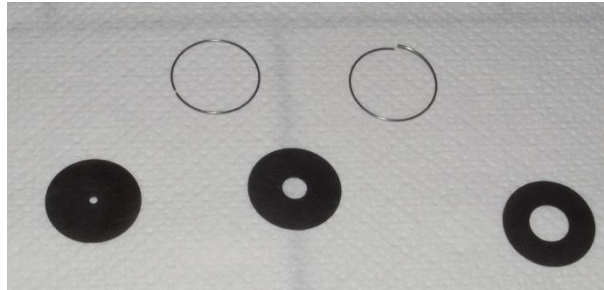


Figura B.7: Scudi termici da inserire nella flangia di chiusura con anelli distanziatori, per consentire il corretto posizionamento.

Infine si può assemblare il piatto di chiusura alla camera di supporto, già assemblata con la flangia che la collega alla camera. Avvitando può accadere che il canale per il passaggio del cavo di potenziale dell'anodo non coincida col foro sulla camera di supporto: in questo caso occorre un'ulteriore processo di foratura, avendo l'attenzione di posizionare il foro abbastanza distante da quelli eventualmente già presenti, per non rovinare eccessivamente il componente, e fare in modo che dopo il fissaggio della flangia di supporto sulla camera, il filo percorra meno distanza per andare a inserirsi nel collegamento elettrico, così da evitare eventuali cortocircuiti. Nella nuova versione della sorgente questo problema è stato risolto inserendo una ghiera per il sostegno del piatto di chiusura, così il sistema camera di scarico – camera di anodo può essere orientato in modo opportuno e non occorre ricorrere al processo di foratura successivo.

Completata questa operazione e verificato che tutti i componenti siano in buono stato, si può passare al montaggio vero e proprio.

B.3. Montaggio definitivo della sorgente e collegamento alla camera

Una volta terminata la fase di montaggio preliminare, si può passare ad unire gli elementi in maniera definitiva. Per prima cosa, è opportuno disaccoppiare i componenti rimasti assemblati dalle operazioni precedenti per effettuare un lavaggio definitivo nella lavatrice a ultrasuoni. Sarebbe opportuno usare un solvente come alcool o acetone in cui immergere i pezzi: tale solvente potrebbe essere posto in un bicchiere che a sua volta è immerso nell'acqua della lavatrice a ultrasuoni: se si tiene il livello del solvente e

dell'acqua alla pari, la pulizia meccanica data dagli ultrasuoni e unita all'effetto chimico del solvente, ottenendo così una maggiore pulizia. Se ciò non è possibile, si possono passare i pezzi con carta assorbente imbevuta di alcool etilico dopo il lavaggio in acqua (i pezzi in materiale ceramico, come gli isolatori in Allumina, non vanno lavati in acqua poiché tendono ad assorbirla) oppure immergere i componenti completamente nell'acetone in modo che il solvente rimuova le impurità che non si riescono a rimuovere meccanicamente; se si procede con l'immersione dei pezzi in un liquido bisogna aver cura di far asciugare i pezzi prima di metterli in vuoto. Da questo punto in poi è necessario avere particolare attenzione alla pulizia dei componenti (occorre utilizzare sempre i guanti mentre si maneggia le varie parti ed è meglio lavorare su superfici che siano state precedentemente pulite.

Quindi si può eseguire l'assemblaggio definitivo, dopo aver asciugato i pezzi, seguendo le stesse indicazioni fornite per il montaggio preliminare. Si ricorda di porre particolare cura all'allineamento della camera di anodo con la camera di scarica. Inoltre bisogna allineare in modo soddisfacente anche gli scudi termici, in particolare quello col foro più piccolo, in modo da avere una buona estrazione del fascio. Per fare questa procedura si consiglia di stringere al flangia di chiusura alla camera di scarica in modo da fissare in modo blando i componenti, regolare il centraggio degli scudi termici con uno strumento a punta (come un piccolo cacciavite o del filo di ferro) tenendo il sistema in verticale, e infine serrare in maniera definitiva la flangia e la camera. Quando questa operazione è stata eseguita con un tester bisogna verificare l'isolamento dell'anodo, collegando uno dei puntali ai puntalini che sostengono la camera di anodo (possibile grazie al foro negli isolatori di Allumina e nei dadi che fissano i supporti alla camera di scarica) e l'altro ad uno qualunque dei componenti in contatto elettrico col catodo (Figura B.8). Una volta unito il tutto all'assieme camera e flangia di supporto, si può connettere il filo che porta la tensione all'anodo attraverso il puntale di supporto: bisogna essere sicuri che il cavo sia forzato dento al vano del puntale, altrimenti durante il trasporto della camera o il collegamento del sistema al Front End, è possibile che si stacchi, perciò il sistema va maneggiato con cura.

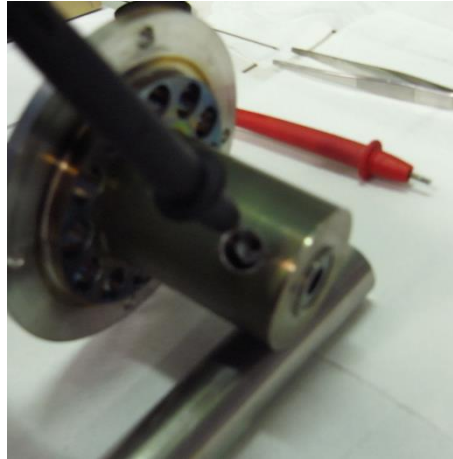


Figura B.8: Nella foto è rappresentata la prova con il tester per la verifica dell'isolamento dell'anodo. Il puntale rosso che nell'immagine non è ancora stato appoggiato su un corpo andrà posto a contatto con la flangia di supporto o, per maggiore sicurezza, col catodo.

Nella nuova versione della sorgente è presente un sistema di allineamento che consiste in quattro sostegni formati da un grano M6 lavorato, un isolatore di Allumina, un supporto in Tantalio in cui è inserito un puntalino in Tungsteno. Il montaggio di questo sistema è abbastanza complesso, e si consiglia di operare facendosi aiutare da una seconda persona: dopo aver collegato catodo e linea di trasferimento si possono inserire i grani, e, mentre uno degli operatori sostiene il catodo e con una pinza il sistema isolatore – puntale, l'altro procede nell'avvitare il grano finché il sostegno non arriva ad appoggiarsi sul bordo del catodo su cui si appoggia la linea di trasferimento. Si consiglia di montare dopo il primo sostegno, quello diametralmente opposto, ed infine gli altri due. Conclusa questa operazione si può collegare la connessione elettrica e quindi il tubo di Tantalio per il trasporto del gas al dado di chiusura, ed infine si può mettere il sistema in vuoto (Figura B.9).

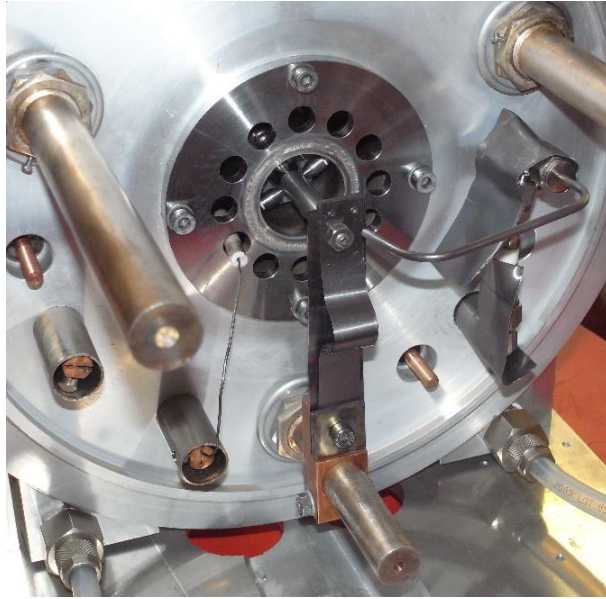


Figura B.9: Sorgente con croce di allineamento montata alla camera; dopo aver collegato il tubo di Tantalio al dado cavo, sarà pronta per essere messa in vuoto. pronta per essere messa in vuoto.

Un'operazione che potrebbe essere necessaria e che deve essere svolta prima di chiudere la camera, è schermare tutti i sistemi o i componenti di materiali che non resistono bene alle alte temperature o che potrebbero rovinarsi a causa del calore che riceverebbero per irraggiamento con dei fogli di Tantalio piegati. Ad esempio, nelle prove eseguite durante lo svolgimento di questo tesi la linea di trasmissione del gas è stata sempre protetta perché un eventuale deterioramento di questo sistema a causa di temperature troppe alte avrebbe compromesso il calcolo del valore dell'efficienza della Sorgente (vedi Figura B.10).

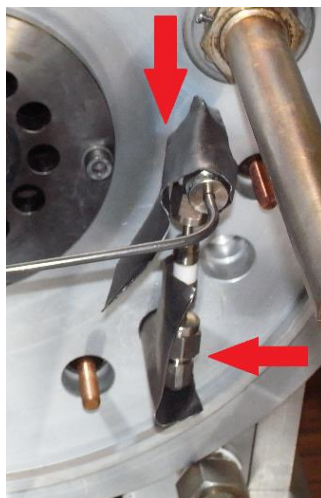


Figura B.10: Particolare della linea di trasporto del gas posta all'interno della camera. Si nota come gli elementi siano stati coperti con un foglio di Tantalio (indicato dalle frecce rosse) per evitare di rovinarli a causa del flusso termico radiativo.

B.4. Sostituzione del “leak” per l’immissione di gas nella Sorgente al Plasma

Un componente che richiede molta attenzione quando si effettuano le prove di efficienza sulla Sorgente al Plasma è il “leak”, cioè il filtro che permettere di mandare il gas da ionizzare all’interno della sorgente in quantità controllata (la descrizione dettagliata del funzionamento di tale componente si trova nel Capitolo 5, poiché la quantità di atomi di gas che vengono insufflati nel dispositivo è il punto di partenza per il calcolo dell’efficienza). La pulizia di questo componente è fondamentale per garantire la corretta affluenza del gas alla Sorgente e va sostituito nel caso si presume possa essersi sporcato o rovinato; se i valori di efficienza ottenuti durante le prove risultino minori delle aspettative una delle possibili cause potrebbe essere il cattivo stato di questo componente. Il “leak” non è altro che un filtro, un componente metallico di forma cilindrica che serve a modulare la quantità di gas che viene immessa per restituire in uscita un flusso controllato il cui valore viene fornito dal produttore in $mbar \cdot l \cdot s^{-1}$ (Figura B.11).

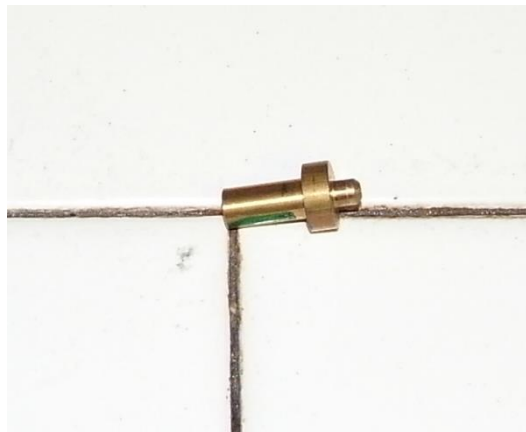


Figura B.11: Foto del leak prima del montaggio.

Viene posizionato con delle guarnizioni all’interno di un puntone in Acciaio all’inizio della linea di trasporto del gas; questo puntone fa da tramite fra il piatto della camera rimuovibile e il canale di passaggio del gas fissato sul Front-End e consente l’alloggiamento del filtro (vedi Figura B.12); il canale poi attraverso il sistema composto dai due connettori Swagelock e il tubo in Tantalio arriva alla sorgente (vedi Figura B.13).

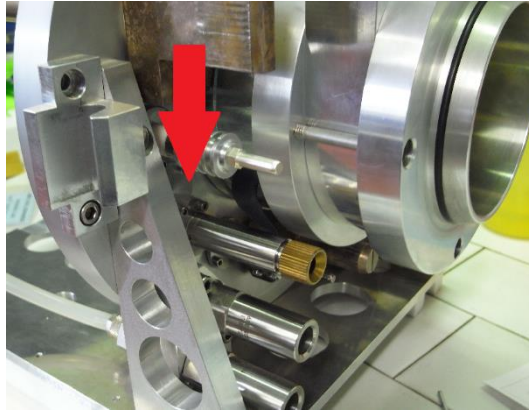


Figura B.12: Retro della camera da vuoto. La freccia rossa indica la zona in cui il puntone contenente il leak viene collegato al sistema.



Figura B.13: Sorgente con linea di trasferimento del gas collegata al piatto della camera da vuoto. La freccia rossa indica la zona in cui si trova la cava del piatto entro cui viene posizionato il leak.

Per sostituire il componente quindi bisogna smontare il puntone (componente AC_0003 nelle tavole costruttive, Figura B. 14) svitando i bulloni che lo vincolano al piatto ed estrarlo dalla cava, svitandolo dal supporto collegato al tubo in Acciaio Inox che a sua volta è fissato ad uno dei due connettori Swagelock. A questo punto si può procedere alla sostituzione del leak, che si trova all'interno, sfilando quello vecchio dalla sua sede e reinserendo quello nuovo al suo posto facendo attenzione che le guarnizioni mantengano la giusta posizione (vedi Figura B.15).

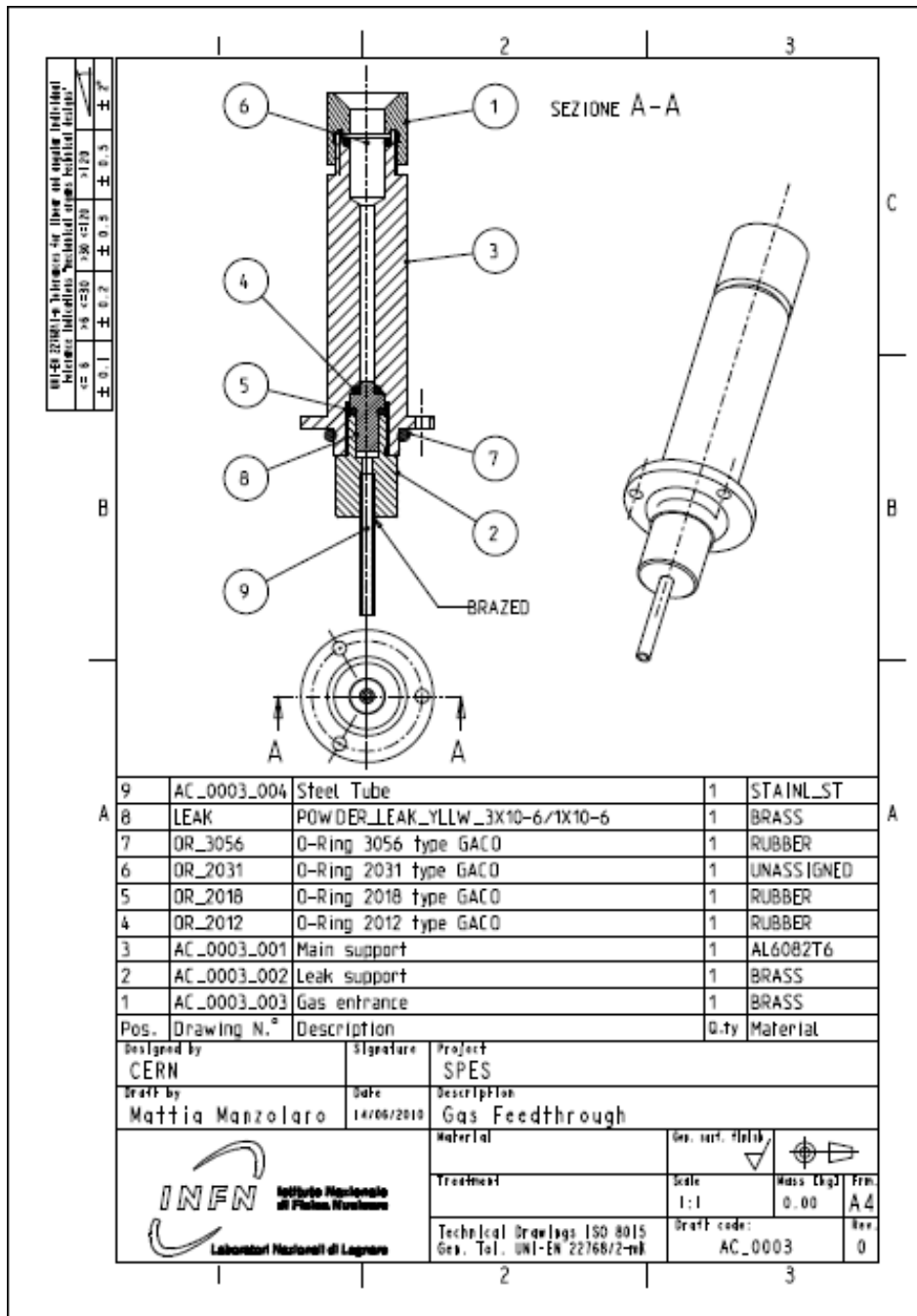


Figura B. 14: Tavola costruttiva del puntone contenente il leak.



Figura B.15: Inserimento del nuovo leak nel suo alloggiamento.

Per sfilare il vecchio leak si può ricorrere ad una pinzetta, mentre per inserire correttamente quello nuovo si può procedere manualmente, ricordandosi di posizionare le guarnizioni nel modo corretto, altrimenti si avrebbe sia dispersione di gas da ionizzare che infiltrazioni di aria all'interno del canale, e quindi contaminazione di Azoto e Ossigeno e altri elementi nel fascio che si estrae attraverso la sorgente.

Una volta compiute le operazioni precedenti, è possibile riposizionare il puntone avvitalo nuovamente al supporto ed infine riposizionando i bulloni che lo collegano alla camera. È possibile che nel nuovo montaggio il sistema assuma una posizione leggermente diversa per via della deformabilità dei alcuni componenti (come ad esempio le guarnizioni in gomma) causando una differenza nella posizione del puntone avvitato al supporto, impedendo che i fori per i bulloni sulla flangia del puntone si allineino in modo corretto per potersi avvitare con i fori sulla camera; in questo caso basta svitare leggermente il puntone, sempre controllando che le guarnizioni in gomma siano comunque soggette ad uno certo schiacciamento in modo che la tenuta sia garantita, per riottenere l'allineamento desiderato. Quando infine si accoppierà la camera al Front-End, bisognerà esaminare che l'accoppiamento del puntone con il canale di trasporto del gas avvenga in modo corretto, per avere la certezza che tutti gli elementi del sistema lavorino correttamente.

B.5. Montaggio del sistema di bloccaggio della linea di trasferimento

Per simulare la presenza del bersaglio radioattivo durante le prove senza dover gestire la complicazione della presenza di molti altri componenti è stato sviluppato un sistema che vincola il bordo della linea di trasferimento che si accoppia con la linea di trasporto della corrente. Come descritto nel Capitolo 4, è formato da una parte che comprende tre componenti in acciaio inossidabile, cioè due flange che formano un morsetto al cui interno viene sostenuto il componente di supporto, e un disco con delle cave di alleggerimento in Tantalio che va ad accoppiarsi con la vite di chiusura della linea di trasferimento (vedi Figura B.16 e Figura B.17).



Figura B.16: componenti del sistema di bloccaggio in acciaio durante la fase di montaggio.



Figura B.17: disco in Tantalio con alleggerimenti e foro lamato centrale per consentire l'accoppiamento con la linea di trasporto della corrente già esistente.

La parte in acciaio e quella in Tantalio vengono collegate da quattro barre filettate M3, anch'esse in acciaio inossidabile, e fermate con dei dadi. Grazie a questo sistema si eviti che l'espansione in senso assiale dei componenti ad alta temperatura si scarichi sulla linea di connessione elettrica invece che sulla faccia frontale del catodo, come avviene appunto nella configurazione bersaglio e sorgente di ionizzazione (il bersaglio radioattivo funziona circa come un vincolo con rigidità infinita).

La necessità di avere le due flange che fungono da morsetto è dovuta all'isolamento elettrico: per consentire che la corrente riscaldante segua il giusto percorso attraverso il

catodo fra i due componenti della morsa e il supporto centrale vengono inseriti degli isolatori cilindrici di Allumina, alloggiati in apposite cave.

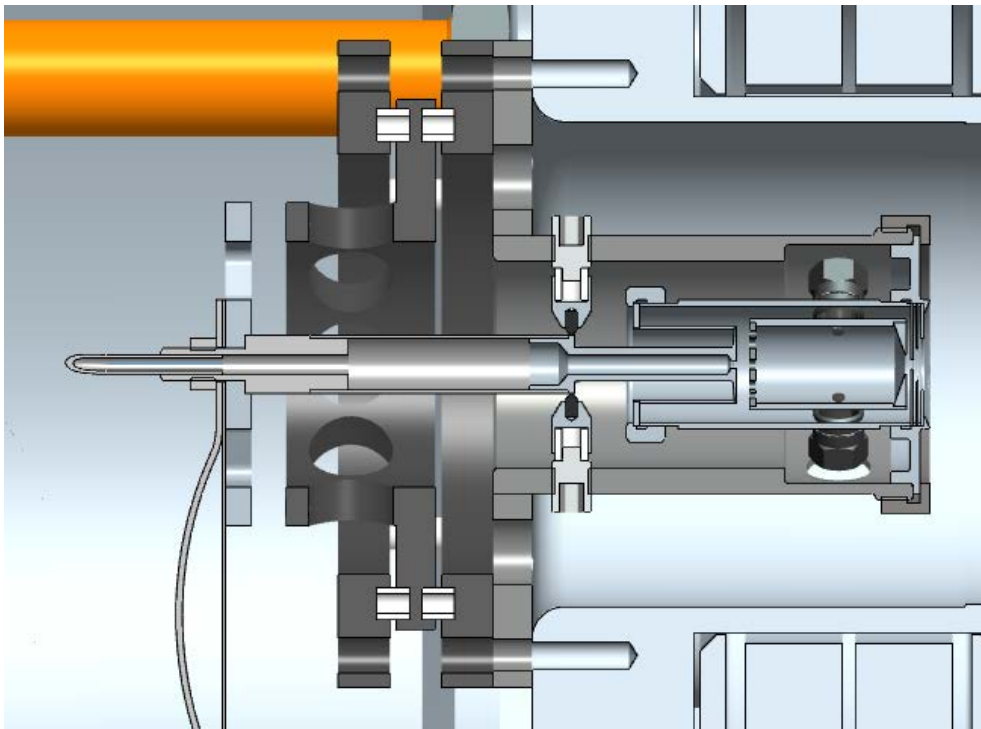


Figura B.18: modello CAD del sistema montato. Sono visibili le cave dove alloggiare gli isolatori in materiale ceramico. Gli isolatori possono essere da otto a tre, a seconda della scelta dell'operatore, ma bisogna mettere in conto che più se ne usano maggiore sarà la complicazione in fase di montaggio. Il numero ottimale consigliato è quattro isolatori.

Si capisce che la difficoltà nel montare questo sistema è dovuta al fatto che gli isolatori e i componenti in acciaio sono solo appoggiati, quindi potrebbero scivolare durante gli spostamenti. Inoltre ci vuole tempo e precisione per allineare tutti gli isolatori con le cave dei tre componenti in acciaio: si consiglia l'utilizzo di uno strumento sottile per regolare la posizione di ogni isolatore: se i vari pezzi non sono ben allineati si corre il rischio che il vincolo assiale non sia rigido, provocando spostamenti indesiderati. Una volta pronta la parte in acciaio, questa va afferrata con entrambe le mani, facendo in modo il più uniforme possibile su tutte le zone dove sono presenti gli isolatori: se infatti si sollecita il sistema in punto solo si rischia che le flange si sfilino dai cilindri in Allumina, costringendo l'operatore a ripetere il montaggio.

L'oggetto va infilato in tre barre filettate precedentemente collegate alla camera, sempre tenendo chiuso il morsetto; per il quarto punto di collegamento è preferibile usare una vite M5 della giusta lunghezza poiché bisogna non intralciare il posizionamento della linea di connessione elettrica.

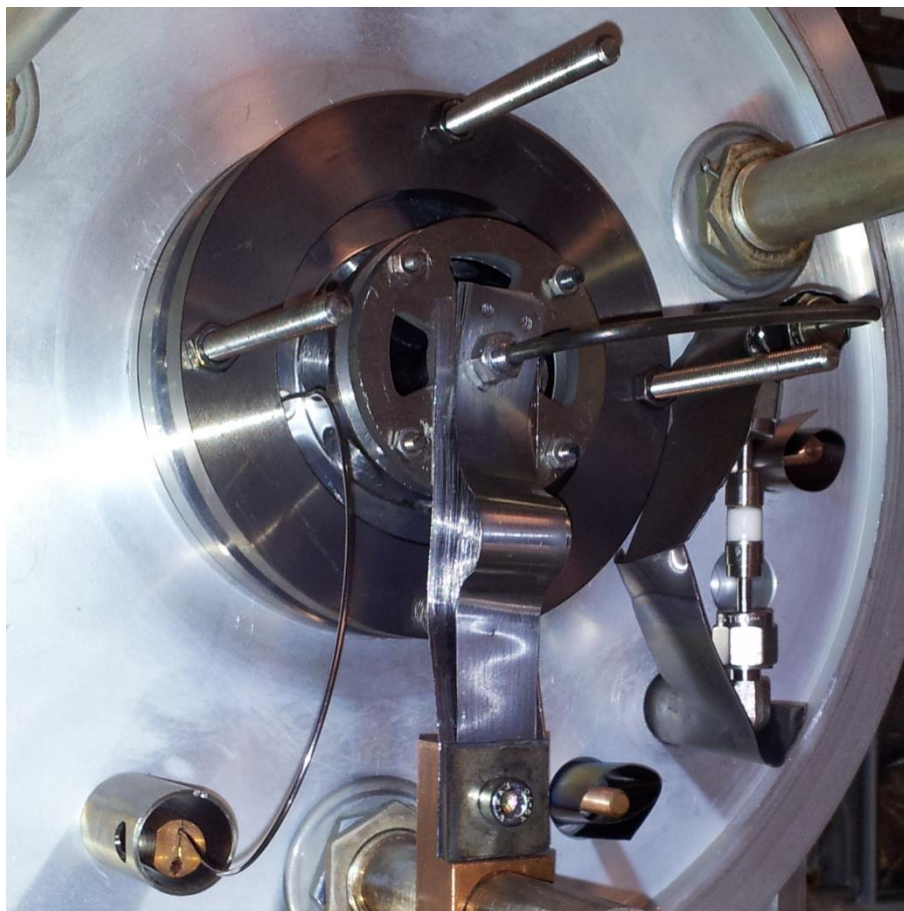


Figura B.19: sorgente al plasma montata con bloccaggio assiale della linea di trasferimento. Si nota l'uso di tre barre filettate ed una vite per il collegamento alla camera.

Prima di fissare la sorgente alla camera con dei dadi, bisogna passare il cavo che garantisce il potenziale dell'anodo (filo di Tantalio da 1 mm di diametro) attraverso i fori sulle varie flange, garantendo l'isolamento infilandolo in altri isolatori dello stesso tipo di quelli usati in precedenza. Fatto questo può essere collegato il tubo di trasporto del gas e il morsetto della connessione elettrica.

B.6. Conclusioni

In questa sezione è stata presentata una guida dettagliata che consenta ad un ricercatore inesperto di procedere al montaggio della Sorgente al Plasma senza incorre in errori o disattenzione che potrebbero costare il fallimento delle prove sperimentali o ancor peggio il mal funzionamento del dispositivo in linea. Nel caso si registrassero dei valori inattesi durante le prove inoltre, confrontando le operazioni eseguite in fase di montaggio con quelle qui descritte, sarà possibile escludere come cause per i risultati ottenuti possibili disattenzioni eseguite montando la Sorgente stessa. Un occhio di riguardo è stato posto

sulle fasi più critiche dell'operazione di assemblaggio, perché chi si appresta ad eseguirla possa ridurre al massimo eventuali problemi o perdite di tempo. Inoltre si è voluto sottolineare come la distanza anodo – catodo sia un parametro da monitorare molto attentamente prima di avviare il dispositivo.

Bibliografia

- [1]. Mattia Manzolaro, Study, design and test of the Target – Ion Source system for the INFN SPES facility, Tesi di Dottorato, Università degli Studi di Padova, 2010.
- [2]. D. Stracener, Guideline for assembly of Electron-Beam Plasma Ion Source, internal report, HRIBF, ORNL (US Department Of Energy).

APPENDICE C

PROPRIETÀ DEI MATERIALI

C.1. Introduzione

In questa appendice vengono raccolti i listati APDL relativi ai materiali usati durante le simulazioni numerica della sorgente FEBIAD. I materiali in esame sono Tantalio, Molibdeno, Acciaio AISI 316L (le proprietà termiche sono state ritenute simili per l'acciaio AISI 304L), Allumina (AL_2O_3), lega di Alluminio 5083.

Per tutti sono stati usati dei codici sviluppati nel corso degli anni presso i ricercatori di INFN, mentre per il Tantalio sarà dedicato uno spazio maggiore poiché nel corso di questa tesi è stata creata una macro apposita con le informazioni necessarie per le analisi termo-eletto-strutturali in campo elasto-plastico.

Nel codice APDL il testo inserito dopo il simbolo ("!") viene letto da Ansys® come un commento, perciò non è un comando che viene eseguito. Alcune proprietà nelle macro sono appunto segnate come commento, e spesso si è approssimata una caratteristica dipendente dalla temperatura con un valore costante.

C.2. Tantalio

Le proprietà di questo materiale sono fondamentali per le simulazioni numeriche della sorgente FEBIAD, in particolare per quanto riguarda l'aspetto strutturale, poiché il calcolo delle deformazioni sul catodo è come si è visto un aspetto fondamentale del nostro studio.

Il Tantalio non può essere considerato un materiale con comportamento lineare elastico, nemmeno a temperatura ambiente poiché ha delle elevate capacità di deformarsi plasticamente. È quindi importante, nella valutazione delle deformazioni dei componenti per l'effetto termico, considerare le curve vere sforzo - deformazione e usarle per immettere in Ansys® le proprietà elasto-plastiche del materiale.

Inoltre in generale le caratteristiche di questo elemento che si trovano in letteratura non sono rilevate per valori di temperatura superiori ai $2000^{\circ}C$.

È quindi necessario stimare, anche solo in maniera approssimativa, i dati di nostro interesse, poiché ricavare sperimentalmente le proprietà necessarie sarebbe un procedimento lungo e molto costoso, che renderebbe il vantaggio del modello numerico nullo rispetto ai metodi analitici o sperimentali.

Si è quindi pensato di riportare i dati presenti in letteratura in diagrammi: si sono rappresentati gli andamenti della proprietà di interesse rispetto alla temperatura. I valori per campi termici elevati sono stati semplicemente estrapolati dalle curve ottenute attraverso un'interpolazione dei dati già in nostro possesso. Le proprietà esaminate in questo modo sono quelle elettriche, meccaniche ed anche termiche, in altre parole tutte quelle di cui in letteratura non si sono trovate indicazioni fino a circa 2900°C . È chiaro che nelle analisi effettuate non si è mai arrivati a temperature superiori ai 2500°C , tuttavia il codice è stato scritto pensando che un oggetto in Tantalio possa essere scaldato al limite della sua temperatura di fusione, che si ricorda è di poco superiore ai 3000°C .

Di seguito è riportato il diagramma che rappresenta l'estrapolazione dei dati riguardanti il modulo elastico (Grafico C. 1).

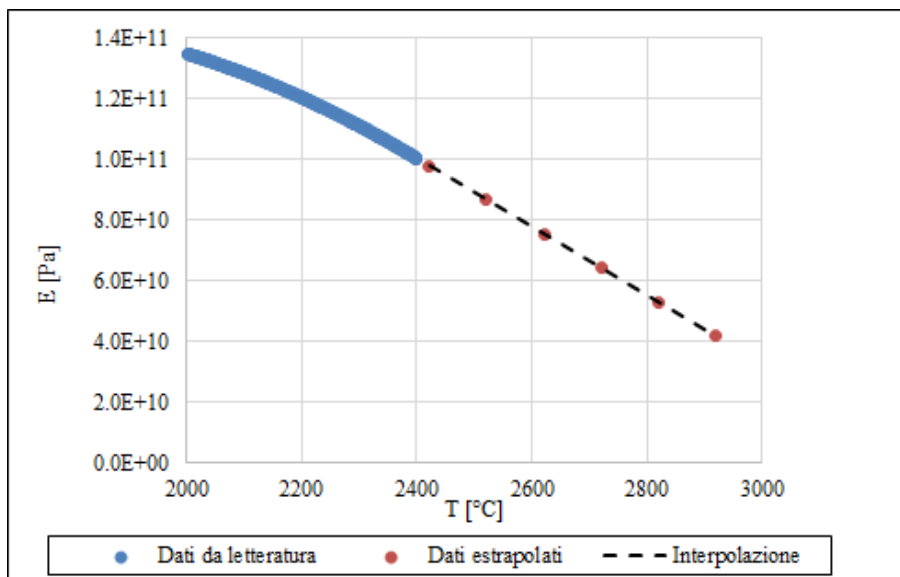


Grafico C. 1: estrapolazione dei dati riguardanti il modulo elastico del Tantalio per temperature superiori a 2400°C .

Di seguito si riportano le funzioni con cui sono stati calcolate le proprietà del materiale:

- Modulo elastico: $E(T) = -1.12385 * 10^8 T + 3.6996 * 10^{11}$, per $T > 2400^{\circ}\text{C}$.
- Modulo di Poisson: $\nu(T) = 1.87759 * 10^{-6} T + 0.27741$, per $T > 700^{\circ}\text{C}$.

- Densità: $\rho(T) = -7 * 10^{-9}T^3 - 5 * 10^{-5}T^2 - 0.2967T + 16597$, per $T > 2600^{\circ}C$.

Le curve sforzo deformazione meritano un discorso più approfondito. Ansys® infatti permette di scegliere fra svariati modelli per la simulazione di un materiale con comportamento non lineare, che si differenziano in particolare per il metodo di calcolo dell'energia di deformazione.

Nel nostro caso interessa unicamente il calcolo delle deformazioni, è stato quindi scelto il modello “cinematico multi-lineare” (*multilinear kinematic*). In pratica la curva sforzo - deformazione reale del materiale viene approssimata con una spezzata che collega i punti forniti al codice.

Per calcolare l'effetto della plasticità alle alte temperature, quindi, si sono scelti alcuni valori di deformazione e si è costruito un diagramma sforzo – temperatura analogo alle proprietà precedenti. Quindi per ogni ϵ si è calcolata la σ reale alla temperatura cercata.

Di seguito si riporta l'esempio di un diagramma ottenuto per un certo valore di ϵ , la macro del materiale dove sono stati scritte tutte le proprietà. Si vuole soltanto sottolineare che l'andamento scelto per l'interpolazione delle curve σ - ϵ che dava una miglior correlazione era quello logaritmico, che però rendeva negativi i valori di σ per temperature superiori ai $1500^{\circ}C$. Siccome non è una situazione possibile in realtà ed Ansys® accetta solo valori positivi in questo tipo di proprietà, si è sostituito il valore negativo con $1 Pa$. In altre parole il materiale subirà deformazioni plastiche con sforzi minimi ad alte temperature, il campo elastico diventa trascurabile nel nostro modello.

Prima di mostrare la macro sviluppata, nel Grafico C.2 viene fatto un esempio dell'estrapolazione dei valori di σ a ϵ costante al variare della temperatura.

Le curve sono state ricavate per un intervallo di ϵ che va da 0 a 0.25 , con incrementi di 0.02 fra un punto ed il successivo nel diagramma (tranne per l'ultimo incremento che vale 0.01).

Per concludere, il Grafico C.3 mostra alcune delle curve che vengono fornite al codice come proprietà del materiale: si deve ricordare che per temperature inferiori ai $1000^{\circ}C$ i dati sono stati recuperati in letteratura, mentre per l'intervallo successivo sono stati stimati col procedimento descritto con gli andamenti di Tabella C.1.

ε	Andamento	ε	Andamento
0	$\sigma = -156.7 \ln x + 1135.1$	0.14	$\sigma = -156.7 \ln x + 1369.4$
0.02	$\sigma = -156.7 \ln x + 1268.9$	0.16	$\sigma = -156.7 \ln x + 1408.9$
0.04	$\sigma = -156.7 \ln x + 1305.8$	0.18	$\sigma = -156.7 \ln x + 1420.4$
0.06	$\sigma = -156.7 \ln x + 1332.0$	0.20	$\sigma = -156.7 \ln x + 1430.5$
0.08	$\sigma = -156.7 \ln x + 1351.9$	0.22	$\sigma = -156.7 \ln x + 1439.7$
0.10	$\sigma = -156.7 \ln x + 1368.3$	0.24	$\sigma = -156.7 \ln x + 1448.8$
0.12	$\sigma = -156.7 \ln x + 1382.9$	0.25	$\sigma = -156.7 \ln x + 1453.9$

Tabella C.1: andamenti ricavati dall'interpolazione dei dati per la stima delle curve vere sforzo – deformazione. Si ricorda che per il calcolo dei valori dello sforzo a deformazione nulla è stato posto una σ unitaria nel caso la funzione avesse fornito risultati nulli o negativi.

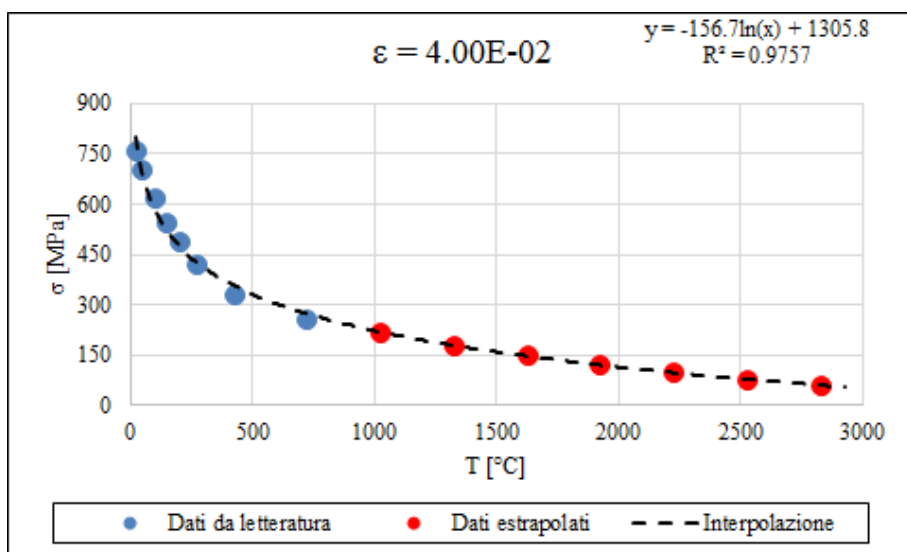


Grafico C.2: esempio dell'estrapolazione dei dati relativi alle curve vere sforzo – deformazione del Tantalio per temperature a partire da 1000°C, per $\varepsilon = 0.04$.

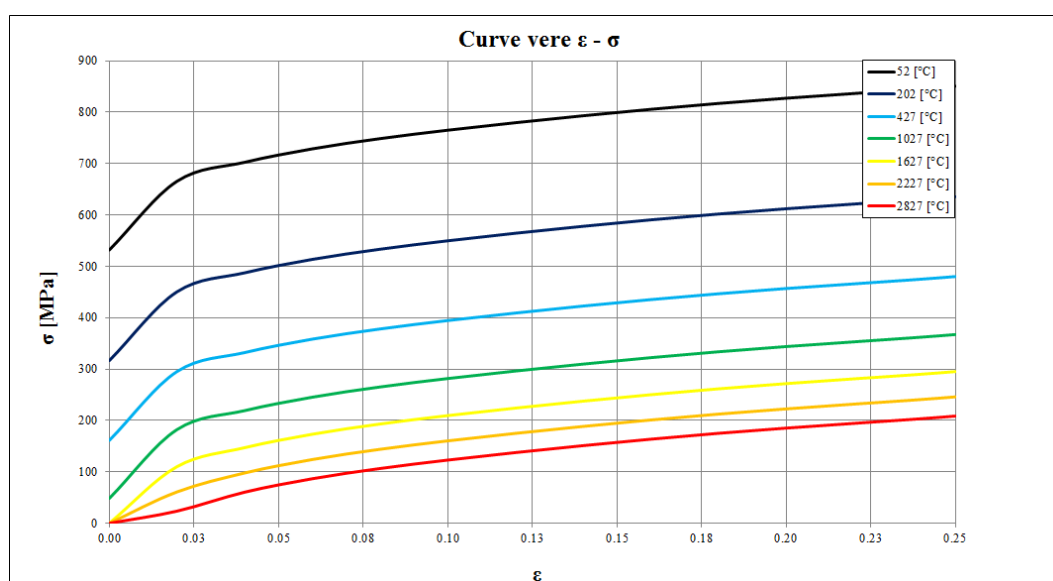


Grafico C.3: andamento delle curve vere $\sigma - \varepsilon$ del Tantalio ricavate per punti secondo gli andamenti riportati in Tabella C.1.

Viene quindi riportata la macro sviluppata ed usata per il calcolo delle deformazioni del catodo in regime elasto-plastico.

```

!macro: Tantalio per analisi elastoplastiche

/prep7          !entro nel pre-processore

Ta=26           !Numero del materiale nella libreria di ansys
MPDELE,all,Ta

!1 - proprietà meccaniche
!2 - proprietà termiche
!3 - proprietà elettriche
!nb: le proprietà espresse in K sono riferite a
!differenze di temperatura, perciò non occorre convertire in °C

!1:
!densità
!fonti: F.C. Nix, D. MacNair, Physical Review e A.G. Worthing, Physical
Review
!calcolati dall'espansione lineare
!Tabella temperatura [°C]
MPTEMP,,,,,,,, ! cancella la tabella precedente
!          n          T [°C]
MPTEMP,    1,    25.85
MPTEMP,    2,    125.85
MPTEMP,    3,    225.85
MPTEMP,    4,    325.85
MPTEMP,    5,    425.85
MPTEMP,    6,    525.85
MPTEMP,    7,    625.85
MPTEMP,    8,    725.85
MPTEMP,    9,    825.85
MPTEMP,   10,    925.85
MPTEMP,   11,   1025.85
MPTEMP,   12,   1125.85
MPTEMP,   13,   1225.85
MPTEMP,   14,   1325.85
MPTEMP,   15,   1425.85
MPTEMP,   16,   1525.85
MPTEMP,   17,   1625.85
MPTEMP,   18,   1725.85
MPTEMP,   19,   1825.85
MPTEMP,   20,   1925.85
MPTEMP,   21,   2025.85
MPTEMP,   22,   2125.85
MPTEMP,   23,   2225.85
MPTEMP,   24,   2325.85
MPTEMP,   25,   2425.85
MPTEMP,   26,   2526.85
MPTEMP,   27,   2625.85
MPTEMP,   28,   2725.85
MPTEMP,   29,   2825.85

!densità [kg/m^3]
MPDATA,  DENS,  Ta,  1,  16597
MPDATA,  DENS,  Ta,  2,  16567
MPDATA,  DENS,  Ta,  3,  16532

```

MPDATA,	DENS,	Ta,	4,	16496
MPDATA,	DENS,	Ta,	5,	16463
MPDATA,	DENS,	Ta,	6,	16428
MPDATA,	DENS,	Ta,	7,	16393
MPDATA,	DENS,	Ta,	8,	16358
MPDATA,	DENS,	Ta,	9,	16322
MPDATA,	DENS,	Ta,	10,	16285
MPDATA,	DENS,	Ta,	11,	16249
MPDATA,	DENS,	Ta,	12,	16211
MPDATA,	DENS,	Ta,	13,	16174
MPDATA,	DENS,	Ta,	14,	16136
MPDATA,	DENS,	Ta,	15,	16098
MPDATA,	DENS,	Ta,	16,	16059
MPDATA,	DENS,	Ta,	17,	16020
MPDATA,	DENS,	Ta,	18,	15980
MPDATA,	DENS,	Ta,	19,	15941
MPDATA,	DENS,	Ta,	20,	15900
MPDATA,	DENS,	Ta,	21,	15860
MPDATA,	DENS,	Ta,	22,	15819
MPDATA,	DENS,	Ta,	23,	15778
MPDATA,	DENS,	Ta,	24,	15736
MPDATA,	DENS,	Ta,	25,	15695
MPDATA,	DENS,	Ta,	26,	15652
MPDATA,	DENS,	Ta,	27,	15600
MPDATA,	DENS,	Ta,	28,	15559
MPDATA,	DENS,	Ta,	29,	15517

!modulo elastico E

!fonti: R. Farraro e R.B. McLellan, Metall. Trans. e

!P.E. Armstrong, H.L. Brown, Trans. AIME

!tabella temperatura

MPTEMP,,,,,,,, ! cancella la tabella precedente

! n T [°C]

MPTEMP,	1,	20.85
MPTEMP,	2,	120.85
MPTEMP,	3,	220.85
MPTEMP,	4,	320.85
MPTEMP,	5,	420.85
MPTEMP,	6,	520.85
MPTEMP,	7,	620.85
MPTEMP,	8,	720.85
MPTEMP,	9,	820.85
MPTEMP,	10,	920.85
MPTEMP,	11,	1020.85
MPTEMP,	12,	1120.85
MPTEMP,	13,	1220.85
MPTEMP,	14,	1320.85
MPTEMP,	15,	1420.85
MPTEMP,	16,	1520.85
MPTEMP,	17,	1620.85
MPTEMP,	18,	1720.85
MPTEMP,	19,	1820.85
MPTEMP,	20,	1920.85
MPTEMP,	21,	2020.85
MPTEMP,	22,	2120.85
MPTEMP,	23,	2220.85
MPTEMP,	24,	2320.85
MPTEMP,	25,	2420.85
MPTEMP,	26,	2520.85
MPTEMP,	27,	2620.85
MPTEMP,	28,	2720.85

MPTEMP, 29, 2820.85

!modulo elastico [Pa]

MPDATA,	EX,	Ta,	1,	1,82750E+11
MPDATA,	EX,	Ta,	2,	1,81760E+11
MPDATA,	EX,	Ta,	3,	1,78030E+11
MPDATA,	EX,	Ta,	4,	1,71030E+11
MPDATA,	EX,	Ta,	5,	1,65440E+11
MPDATA,	EX,	Ta,	6,	1,61460E+11
MPDATA,	EX,	Ta,	7,	1,59110E+11
MPDATA,	EX,	Ta,	8,	1,57870E+11
MPDATA,	EX,	Ta,	9,	1,56630E+11
MPDATA,	EX,	Ta,	10,	1,55360E+11
MPDATA,	EX,	Ta,	11,	1,54060E+11
MPDATA,	EX,	Ta,	12,	1,52740E+11
MPDATA,	EX,	Ta,	13,	1,51390E+11
MPDATA,	EX,	Ta,	14,	1,50010E+11
MPDATA,	EX,	Ta,	15,	1,48600E+11
MPDATA,	EX,	Ta,	16,	1,47170E+11
MPDATA,	EX,	Ta,	17,	1,45710E+11
MPDATA,	EX,	Ta,	18,	1,44220E+11
MPDATA,	EX,	Ta,	19,	1,42700E+11
MPDATA,	EX,	Ta,	20,	1,38860E+11
MPDATA,	EX,	Ta,	21,	1,33480E+11
MPDATA,	EX,	Ta,	22,	1,26680E+11
MPDATA,	EX,	Ta,	23,	1,18470E+11
MPDATA,	EX,	Ta,	24,	1,08850E+11
MPDATA,	EX,	Ta,	25,	9,789267E+10
MPDATA,	EX,	Ta,	26,	8,665418E+10
MPDATA,	EX,	Ta,	27,	7,541570E+10
MPDATA,	EX,	Ta,	28,	6,417721E+10
MPDATA,	EX,	Ta,	29,	5,293872E+10

!modulo di Poisson v

!fonti: R. Farraro e R.B. McLellan, Metall. Trans. calcolato da

!modulo di Young e modulo di taglio

!Tabella temperatura

MPTEMP,,,,,,,, ! cancella la tabella precedente

! n T [°C]

MPTEMP,	1,	20.85
MPTEMP,	2,	120.85
MPTEMP,	3,	220.85
MPTEMP,	4,	320.85
MPTEMP,	5,	420.85
MPTEMP,	6,	520.85
MPTEMP,	7,	620.85
MPTEMP,	8,	720.85
MPTEMP,	9,	820.85
MPTEMP,	10,	920.85
MPTEMP,	11,	1020.85
MPTEMP,	12,	1120.85
MPTEMP,	13,	1220.85
MPTEMP,	14,	1320.85
MPTEMP,	15,	1420.85
MPTEMP,	16,	1520.85
MPTEMP,	17,	1620.85
MPTEMP,	18,	1720.85
MPTEMP,	19,	1820.85
MPTEMP,	20,	1920.85
MPTEMP,	21,	2020.85
MPTEMP,	22,	2120.85

```

MPTEMP, 23, 2220.85
MPTEMP, 24, 2320.85
MPTEMP, 25, 2420.85
MPTEMP, 26, 2520.85
MPTEMP, 27, 2620.85
MPTEMP, 28, 2720.85
MPTEMP, 29, 2820.85

```

!modulo di Poisson

```

MPDATA, PRXY, Ta, 1, 0.277450000
MPDATA, PRXY, Ta, 2, 0.277640000
MPDATA, PRXY, Ta, 3, 0.277820000
MPDATA, PRXY, Ta, 4, 0.278010000
MPDATA, PRXY, Ta, 5, 0.278200000
MPDATA, PRXY, Ta, 6, 0.278390000
MPDATA, PRXY, Ta, 7, 0.278570000
MPDATA, PRXY, Ta, 8, 0.278761650
MPDATA, PRXY, Ta, 9, 0.278949409
MPDATA, PRXY, Ta, 10, 0.279137167
MPDATA, PRXY, Ta, 11, 0.279324926
MPDATA, PRXY, Ta, 12, 0.279512685
MPDATA, PRXY, Ta, 13, 0.279700443
MPDATA, PRXY, Ta, 14, 0.279888202
MPDATA, PRXY, Ta, 15, 0.280075961
MPDATA, PRXY, Ta, 16, 0.280263719
MPDATA, PRXY, Ta, 17, 0.280451478
MPDATA, PRXY, Ta, 18, 0.280639236
MPDATA, PRXY, Ta, 19, 0.280826995
MPDATA, PRXY, Ta, 20, 0.281014754
MPDATA, PRXY, Ta, 21, 0.281202512
MPDATA, PRXY, Ta, 22, 0.281390271
MPDATA, PRXY, Ta, 23, 0.281578030
MPDATA, PRXY, Ta, 24, 0.281765788
MPDATA, PRXY, Ta, 25, 0.281953547
MPDATA, PRXY, Ta, 26, 0.282141306
MPDATA, PRXY, Ta, 27, 0.282329064
MPDATA, PRXY, Ta, 28, 0.282516823
MPDATA, PRXY, Ta, 29, 0.282704581

```

! curve vere sforzo-deformazione plastica

!fonti: S.R. Chen, G.T. Gray III, Metall. Mater. Trans.

!per T da 25°C a 727°C. Le curve per T maggiori sono state estrapolate

!dai dati precedenti

TB, KINH, Ta, 15, 14, PLASTIC

!Temperature [°C]

TBTEMP, 25.0

```

!      stress[Pa]      strain
TBPT,, 0.00000000, 5.8618E+08
TBPT,, 2.0000E-02, 7.2004E+08
TBPT,, 4.0000E-02, 7.5696E+08
TBPT,, 6.0000E-02, 7.8311E+08
TBPT,, 8.0000E-02, 8.0296E+08
TBPT,, 1.0000E-01, 8.1937E+08
TBPT,, 1.2000E-01, 8.3398E+08
TBPT,, 1.4000E-01, 8.4750E+08
TBPT,, 1.6000E-01, 8.6005E+08
TBPT,, 1.8000E-01, 8.7146E+08
TBPT,, 2.0000E-01, 8.8162E+08

```

```

TBPT,, 2.2000E-01, 8.9077E+08
TBPT,, 2.4000E-01, 8.9989E+08
TBPT,, 2.5000E-01, 9.0499E+08

```

```
!Temperature [°C]
```

```
TBTEMP,52.0
```

```
!
stress[Pa]      strain
TBPT,, 0.00000000, 5.3179E+08
TBPT,, 2.0000E-02, 6.6555E+08
TBPT,, 4.0000E-02, 7.0247E+08
TBPT,, 6.0000E-02, 7.2862E+08
TBPT,, 8.0000E-02, 7.4847E+08
TBPT,, 1.0000E-01, 7.6488E+08
TBPT,, 1.2000E-01, 7.7949E+08
TBPT,, 1.4000E-01, 7.9301E+08
TBPT,, 1.6000E-01, 8.0556E+08
TBPT,, 1.8000E-01, 8.1697E+08
TBPT,, 2.0000E-01, 8.2713E+08
TBPT,, 2.2000E-01, 8.3628E+08
TBPT,, 2.4000E-01, 8.4540E+08
TBPT,, 2.5000E-01, 8.5050E+08

```

```
!Temperature [°C]
```

```
TBTEMP,102.0
```

```
!
stress[Pa]      strain
TBPT,, 0.00000000, 4.4535E+08
TBPT,, 2.0000E-02, 5.7916E+08
TBPT,, 4.0000E-02, 6.1607E+08
TBPT,, 6.0000E-02, 6.4223E+08
TBPT,, 8.0000E-02, 6.6207E+08
TBPT,, 1.0000E-01, 6.7848E+08
TBPT,, 1.2000E-01, 6.9309E+08
TBPT,, 1.4000E-01, 7.0662E+08
TBPT,, 1.6000E-01, 7.1917E+08
TBPT,, 1.8000E-01, 7.3058E+08
TBPT,, 2.0000E-01, 7.4073E+08
TBPT,, 2.2000E-01, 7.4989E+08
TBPT,, 2.4000E-01, 7.5900E+08
TBPT,, 2.5000E-01, 7.6411E+08

```

```
!Temperature [°C]
```

```
TBTEMP,152.0
```

```
!
stress[Pa]      strain
TBPT,, 0.00000000, 3.7457E+08
TBPT,, 2.0000E-02, 5.0844E+08
TBPT,, 4.0000E-02, 5.4535E+08
TBPT,, 6.0000E-02, 5.7151E+08
TBPT,, 8.0000E-02, 5.9135E+08
TBPT,, 1.0000E-01, 6.0776E+08
TBPT,, 1.2000E-01, 6.2237E+08
TBPT,, 1.4000E-01, 6.3590E+08
TBPT,, 1.6000E-01, 6.4845E+08
TBPT,, 1.8000E-01, 6.5986E+08
TBPT,, 2.0000E-01, 6.7001E+08
TBPT,, 2.2000E-01, 6.7917E+08
TBPT,, 2.4000E-01, 6.8828E+08
TBPT,, 2.5000E-01, 6.9339E+08

```

```
!Temperature [°C]
```

```
TBTEMP,202.0
```

```
!
stress[Pa]      strain

```

TBPT,,	0.00000000,	3.1663E+08
TBPT,,	2.0000E-02,	4.5040E+08
TBPT,,	4.0000E-02,	4.8731E+08
TBPT,,	6.0000E-02,	5.1347E+08
TBPT,,	8.0000E-02,	5.3331E+08
TBPT,,	1.0000E-01,	5.4972E+08
TBPT,,	1.2000E-01,	5.6433E+08
TBPT,,	1.4000E-01,	5.7786E+08
TBPT,,	1.6000E-01,	5.9040E+08
TBPT,,	1.8000E-01,	6.0181E+08
TBPT,,	2.0000E-01,	6.1197E+08
TBPT,,	2.2000E-01,	6.2113E+08
TBPT,,	2.4000E-01,	6.3024E+08
TBPT,,	2.5000E-01,	6.3535E+08

!Temperature [°C]

TBTEMP,277.0

!	stress[Pa]	strain
TBPT,,	0.00000000,	2.4881E+08
TBPT,,	2.0000E-02,	3.8257E+08
TBPT,,	4.0000E-02,	4.1949E+08
TBPT,,	6.0000E-02,	4.4564E+08
TBPT,,	8.0000E-02,	4.6548E+08
TBPT,,	1.0000E-01,	4.8189E+08
TBPT,,	1.2000E-01,	4.9651E+08
TBPT,,	1.4000E-01,	5.1003E+08
TBPT,,	1.6000E-01,	5.2258E+08
TBPT,,	1.8000E-01,	5.3399E+08
TBPT,,	2.0000E-01,	5.4415E+08
TBPT,,	2.2000E-01,	5.5330E+08
TBPT,,	2.4000E-01,	5.6241E+08
TBPT,,	2.5000E-01,	5.6752E+08

!Temperature [°C]

TBTEMP,427.0

!	stress[Pa]	strain
TBPT,,	0.00000000,	1.6135E+08
TBPT,,	2.0000E-02,	2.9521E+08
TBPT,,	4.0000E-02,	3.3213E+08
TBPT,,	6.0000E-02,	3.5828E+08
TBPT,,	8.0000E-02,	3.7812E+08
TBPT,,	1.0000E-01,	3.9453E+08
TBPT,,	1.2000E-01,	4.0915E+08
TBPT,,	1.4000E-01,	4.2267E+08
TBPT,,	1.6000E-01,	4.3522E+08
TBPT,,	1.8000E-01,	4.4663E+08
TBPT,,	2.0000E-01,	4.5679E+08
TBPT,,	2.2000E-01,	4.6594E+08
TBPT,,	2.4000E-01,	4.7506E+08
TBPT,,	2.5000E-01,	4.8016E+08

!Temperatura [°C]

TBTEMP,727.0

!	stress[Pa]	strain
TBPT,,	0.00000000,	8.7024E+07
TBPT,,	2.0000E-02,	2.2079E+08
TBPT,,	4.0000E-02,	2.5770E+08
TBPT,,	6.0000E-02,	2.8385E+08
TBPT,,	8.0000E-02,	3.0370E+08
TBPT,,	1.0000E-01,	3.2011E+08
TBPT,,	1.2000E-01,	3.3472E+08

```

TBPT,, 1.4000E-01, 3.4825E+08
TBPT,, 1.6000E-01, 3.6079E+08
TBPT,, 1.8000E-01, 3.7220E+08
TBPT,, 2.0000E-01, 3.8236E+08
TBPT,, 2.2000E-01, 3.9152E+08
TBPT,, 2.4000E-01, 4.0063E+08
TBPT,, 2.5000E-01, 4.0574E+08

```

!da qui i valori sono stati estrapolati

!Temperatura [°C]

```

TBTEMP,1027.0
!      stress[Pa]      strain
TBPT,, 0.00000000, 4.8480E+07
TBPT,, 2.0000E-02, 1.8228E+08
TBPT,, 4.0000E-02, 2.1918E+08
TBPT,, 6.0000E-02, 2.4538E+08
TBPT,, 8.0000E-02, 2.6528E+08
TBPT,, 1.0000E-01, 2.8168E+08
TBPT,, 1.2000E-01, 2.9628E+08
TBPT,, 1.4000E-01, 3.0978E+08
TBPT,, 1.6000E-01, 3.2228E+08
TBPT,, 1.8000E-01, 3.3378E+08
TBPT,, 2.0000E-01, 3.4388E+08
TBPT,, 2.2000E-01, 3.5308E+08
TBPT,, 2.4000E-01, 3.6218E+08
TBPT,, 2.5000E-01, 3.6728E+08

```

!Temperatura [°C]

```

TBTEMP,1327.0
!      stress[Pa]      strain
TBPT,, 0.00000000, 8.3200E+06
TBPT,, 2.0000E-02, 1.4212E+08
TBPT,, 4.0000E-02, 1.7902E+08
TBPT,, 6.0000E-02, 2.0522E+08
TBPT,, 8.0000E-02, 2.2512E+08
TBPT,, 1.0000E-01, 2.4152E+08
TBPT,, 1.2000E-01, 2.5612E+08
TBPT,, 1.4000E-01, 2.6962E+08
TBPT,, 1.6000E-01, 2.8212E+08
TBPT,, 1.8000E-01, 2.9362E+08
TBPT,, 2.0000E-01, 3.0372E+08
TBPT,, 2.2000E-01, 3.1292E+08
TBPT,, 2.4000E-01, 3.2202E+08
TBPT,, 2.5000E-01, 3.2712E+08

```

!Temperatura [°C]

```

TBTEMP,1627.0
!      stress[Pa]      strain
TBPT,, 0.00000000, 1.00000000
TBPT,, 2.0000E-02, 1.1018E+08
TBPT,, 4.0000E-02, 1.4708E+08
TBPT,, 6.0000E-02, 1.7328E+08
TBPT,, 8.0000E-02, 1.9318E+08
TBPT,, 1.0000E-01, 2.0958E+08
TBPT,, 1.2000E-01, 2.2418E+08
TBPT,, 1.4000E-01, 2.3768E+08
TBPT,, 1.6000E-01, 2.5018E+08
TBPT,, 1.8000E-01, 2.6168E+08
TBPT,, 2.0000E-01, 2.7178E+08
TBPT,, 2.2000E-01, 2.8098E+08

```

```
TBPT,, 2.4000E-01, 2.9008E+08
TBPT,, 2.5000E-01, 2.9518E+08
```

```
!Temperatura [°C]
```

```
TBTEMP,1927.0
```

```
!      stress[Pa]      strain
TBPT,, 0.00000000, 1.00000000
TBPT,, 2.0000E-02, 0.8367E+08
TBPT,, 4.0000E-02, 1.2057E+08
TBPT,, 6.0000E-02, 1.4677E+08
TBPT,, 8.0000E-02, 1.6667E+08
TBPT,, 1.0000E-01, 1.8307E+08
TBPT,, 1.2000E-01, 1.9767E+08
TBPT,, 1.4000E-01, 2.1117E+08
TBPT,, 1.6000E-01, 2.2367E+08
TBPT,, 1.8000E-01, 2.3517E+08
TBPT,, 2.0000E-01, 2.4527E+08
TBPT,, 2.2000E-01, 2.5447E+08
TBPT,, 2.4000E-01, 2.6357E+08
TBPT,, 2.5000E-01, 2.6867E+08
```

```
!Temperatura [°C]
```

```
TBTEMP,2227.0
```

```
!      stress[Pa]      strain
TBPT,, 0.00000000, 1.00000000
TBPT,, 2.0000E-02, 0.6099E+08
TBPT,, 4.0000E-02, 0.9789E+08
TBPT,, 6.0000E-02, 1.2409E+08
TBPT,, 8.0000E-02, 1.4399E+08
TBPT,, 1.0000E-01, 1.6039E+08
TBPT,, 1.2000E-01, 1.7499E+08
TBPT,, 1.4000E-01, 1.8849E+08
TBPT,, 1.6000E-01, 2.0099E+08
TBPT,, 1.8000E-01, 2.1249E+08
TBPT,, 2.0000E-01, 2.2259E+08
TBPT,, 2.2000E-01, 2.3179E+08
TBPT,, 2.4000E-01, 2.4089E+08
TBPT,, 2.5000E-01, 2.4599E+08
```

```
!Temperatura [°C]
```

```
TBTEMP,2527.0
```

```
!      stress[Pa]      strain
TBPT,, 0.00000000, 1.00000000
TBPT,, 2.0000E-02, 0.4119E+08
TBPT,, 4.0000E-02, 0.7809E+08
TBPT,, 6.0000E-02, 1.0429E+08
TBPT,, 8.0000E-02, 1.2419E+08
TBPT,, 1.0000E-01, 1.4029E+08
TBPT,, 1.2000E-01, 1.5519E+08
TBPT,, 1.4000E-01, 1.6869E+08
TBPT,, 1.6000E-01, 1.8119E+08
TBPT,, 1.8000E-01, 1.9269E+08
TBPT,, 2.0000E-01, 2.0279E+08
TBPT,, 2.2000E-01, 2.1199E+08
TBPT,, 2.4000E-01, 2.2109E+08
TBPT,, 2.5000E-01, 2.2619E+08
```

```
!Temperatura [°C]
```

```
TBTEMP,2827.0
```

```
!      stress[Pa]      strain
TBPT,, 0.00000000, 1.00000000
```

```

TBPT,, 2.0000E-02, 0.2361E+08
TBPT,, 4.0000E-02, 0.6051E+08
TBPT,, 6.0000E-02, 0.8671E+08
TBPT,, 8.0000E-02, 1.0661E+08
TBPT,, 1.0000E-01, 1.2301E+08
TBPT,, 1.2000E-01, 1.3761E+08
TBPT,, 1.4000E-01, 1.5111E+08
TBPT,, 1.6000E-01, 1.6361E+08
TBPT,, 1.8000E-01, 1.7511E+08
TBPT,, 2.0000E-01, 1.8521E+08
TBPT,, 2.2000E-01, 1.9441E+08
TBPT,, 2.4000E-01, 2.0351E+08
TBPT,, 2.5000E-01, 2.0861E+08

```

!2:

!Conducibilità termica

!fonti: C.Y. Ho, R.W. Powell, P.E. Liley, J. Phys.Chem. Ref. Data

!Tabella temperatura [°C]

MPTEMP,,,,,,,, ! cancella la tabella precedente

! n T [°C]

```

MPTEMP, 1, 25.85
MPTEMP, 2, 125.85
MPTEMP, 3, 225.85
MPTEMP, 4, 325.85
MPTEMP, 5, 425.85
MPTEMP, 6, 525.85
MPTEMP, 7, 625.85
MPTEMP, 8, 725.85
MPTEMP, 9, 825.85
MPTEMP, 10, 925.85
MPTEMP, 11, 1025.85
MPTEMP, 12, 1125.85
MPTEMP, 13, 1225.85
MPTEMP, 14, 1325.85
MPTEMP, 15, 1425.85
MPTEMP, 16, 1525.85
MPTEMP, 17, 1625.85
MPTEMP, 18, 1725.85
MPTEMP, 19, 1825.85
MPTEMP, 20, 1925.85
MPTEMP, 21, 2025.85
MPTEMP, 22, 2125.85
MPTEMP, 23, 2225.85
MPTEMP, 24, 2325.85
MPTEMP, 25, 2425.85
MPTEMP, 26, 2525.85
MPTEMP, 27, 2625.85
MPTEMP, 28, 2725.85
MPTEMP, 29, 2825.85

```

!Conducibilità termica [W/mK]

```

MPDATA, KXX, Ta, 1, 5.746800E+01
MPDATA, KXX, Ta, 2, 5.779200E+01
MPDATA, KXX, Ta, 3, 5.819700E+01
MPDATA, KXX, Ta, 4, 5.859400E+01
MPDATA, KXX, Ta, 5, 5.899500E+01
MPDATA, KXX, Ta, 6, 5.939700E+01
MPDATA, KXX, Ta, 7, 5.979900E+01
MPDATA, KXX, Ta, 8, 6.020200E+01
MPDATA, KXX, Ta, 9, 6.060400E+01
MPDATA, KXX, Ta, 10, 6.100500E+01

```

```

MPDATA, KXX, Ta, 11, 6.140400E+01
MPDATA, KXX, Ta, 12, 6.180100E+01
MPDATA, KXX, Ta, 13, 6.219300E+01
MPDATA, KXX, Ta, 14, 6.258100E+01
MPDATA, KXX, Ta, 15, 6.296200E+01
MPDATA, KXX, Ta, 16, 6.333600E+01
MPDATA, KXX, Ta, 17, 6.370000E+01
MPDATA, KXX, Ta, 18, 6.405300E+01
MPDATA, KXX, Ta, 19, 6.439400E+01
MPDATA, KXX, Ta, 20, 6.471900E+01
MPDATA, KXX, Ta, 21, 6.502700E+01
MPDATA, KXX, Ta, 22, 6.531600E+01
MPDATA, KXX, Ta, 23, 6.558400E+01
MPDATA, KXX, Ta, 24, 6.582600E+01
MPDATA, KXX, Ta, 25, 6.604300E+01
MPDATA, KXX, Ta, 26, 6.622900E+01
MPDATA, KXX, Ta, 27, 6.638200E+01
MPDATA, KXX, Ta, 28, 6.650000E+01
MPDATA, KXX, Ta, 29, 6.657900E+01

```

!emissività - fonte: Thermophysical Properties of Matter, v7,
!Y.S. Touloukian & D.P. DeWitt, 1970, IFI/Plenum, NY, NY
!vedi tesi Marco Marin

!Tabella temperatura [°C]

MPTEMP,,,,,,,, ! cancella la tabella precedente

! n T [°C]

```

MPTEMP, 1, 726.9
MPTEMP, 2, 825.0
MPTEMP, 3, 925.0
MPTEMP, 4, 1025.0
MPTEMP, 5, 1125.0
MPTEMP, 6, 1225.0
MPTEMP, 7, 1325.0
MPTEMP, 8, 1425.0
MPTEMP, 9, 1525.0
MPTEMP, 10, 1625.0
MPTEMP, 11, 1725.0
MPTEMP, 12, 1825.0
MPTEMP, 13, 1925.0
MPTEMP, 14, 2025.0
MPTEMP, 15, 2125.0
MPTEMP, 16, 2225.0
MPTEMP, 17, 2325.0
MPTEMP, 18, 2425.0
MPTEMP, 19, 2525.0
MPTEMP, 20, 2625.0
MPTEMP, 21, 2725.0
MPTEMP, 22, 2825.0
MPTEMP, 23, 2925.0
MPTEMP, 24, 2996.9

```

!emissività [adimensionale]

```

MPDATA, EMIS, Ta, 1, 1.081100E-01
MPDATA, EMIS, Ta, 2, 1.222300E-01
MPDATA, EMIS, Ta, 3, 1.361700E-01
MPDATA, EMIS, Ta, 4, 1.496800E-01
MPDATA, EMIS, Ta, 5, 1.627400E-01
MPDATA, EMIS, Ta, 6, 1.753700E-01
MPDATA, EMIS, Ta, 7, 1.875500E-01
MPDATA, EMIS, Ta, 8, 1.993000E-01
MPDATA, EMIS, Ta, 9, 2.106000E-01

```

```

MPDATA, EMIS, Ta, 10, 2.214600E-01
MPDATA, EMIS, Ta, 11, 2.318900E-01
MPDATA, EMIS, Ta, 12, 2.418700E-01
MPDATA, EMIS, Ta, 13, 2.514100E-01
MPDATA, EMIS, Ta, 14, 2.605100E-01
MPDATA, EMIS, Ta, 15, 2.691800E-01
MPDATA, EMIS, Ta, 16, 2.774000E-01
MPDATA, EMIS, Ta, 17, 2.851800E-01
MPDATA, EMIS, Ta, 18, 2.925200E-01
MPDATA, EMIS, Ta, 19, 2.994200E-01
MPDATA, EMIS, Ta, 20, 3.058800E-01
MPDATA, EMIS, Ta, 21, 3.119000E-01
MPDATA, EMIS, Ta, 22, 3.174800E-01
MPDATA, EMIS, Ta, 23, 3.226200E-01
MPDATA, EMIS, Ta, 24, 3.260400E-01

```

```

!Calore specifico - fonte: MPDB e I. Barin,
!Thermochemical Data of Pure Substances, pub. VCH, Weinheim (1993)
! per l'ultimo dato, vedi tesi Marco Marin
!Tabella temperatura [°C]

```

```

MPTEMP,,,,,,,, ! cancella la tabella precedente

```

```

!      n      T [°C]
MPTEMP, 1, 25.85
MPTEMP, 2, 125.85
MPTEMP, 3, 225.85
MPTEMP, 4, 325.85
MPTEMP, 5, 425.85
MPTEMP, 6, 525.85
MPTEMP, 7, 625.85
MPTEMP, 8, 725.85
MPTEMP, 9, 825.85
MPTEMP, 10, 925.85
MPTEMP, 11, 1025.85
MPTEMP, 12, 1125.85
MPTEMP, 13, 1225.85
MPTEMP, 14, 1325.85
MPTEMP, 15, 1425.85
MPTEMP, 16, 1525.85
MPTEMP, 17, 1625.85
MPTEMP, 18, 1725.85
MPTEMP, 19, 1825.85
MPTEMP, 20, 1925.85
MPTEMP, 21, 2025.85
MPTEMP, 22, 2125.85
MPTEMP, 23, 2225.85
MPTEMP, 24, 2325.85
MPTEMP, 25, 2425.85
MPTEMP, 26, 2525.85
MPTEMP, 27, 2625.85
MPTEMP, 28, 2725.85
MPTEMP, 29, 2825.85

```

```

!calore specifico [J/kgK]

```

```

MPDATA, C, Ta, 1, 1.3965E+02
MPDATA, C, Ta, 2, 1.4273E+02
MPDATA, C, Ta, 3, 1.4564E+02
MPDATA, C, Ta, 4, 1.4804E+02
MPDATA, C, Ta, 5, 1.5012E+02
MPDATA, C, Ta, 6, 1.5195E+02
MPDATA, C, Ta, 7, 1.5357E+02
MPDATA, C, Ta, 8, 1.5504E+02

```

```

MPDATA, C, Ta, 9, 1.5642E+02
MPDATA, C, Ta, 10, 1.5774E+02
MPDATA, C, Ta, 11, 1.5906E+02
MPDATA, C, Ta, 12, 1.6043E+02
MPDATA, C, Ta, 13, 1.6188E+02
MPDATA, C, Ta, 14, 1.6347E+02
MPDATA, C, Ta, 15, 1.6522E+02
MPDATA, C, Ta, 16, 1.6719E+02
MPDATA, C, Ta, 17, 1.6940E+02
MPDATA, C, Ta, 18, 1.7188E+02
MPDATA, C, Ta, 19, 1.7469E+02
MPDATA, C, Ta, 20, 1.7783E+02
MPDATA, C, Ta, 21, 1.8131E+02
MPDATA, C, Ta, 22, 1.8488E+02
MPDATA, C, Ta, 23, 1.8882E+02
MPDATA, C, Ta, 24, 1.9328E+02
MPDATA, C, Ta, 25, 1.9834E+02
MPDATA, C, Ta, 26, 2.0414E+02
MPDATA, C, Ta, 27, 2.1079E+02
MPDATA, C, Ta, 28, 2.1842E+02
MPDATA, C, Ta, 29, 2.2715E+02

```

```

!coefficiente di espansione termica - fonte:
!Thermophysical Properties of Matter, v12,
!Y.S. Touloukian, R.K. Kirby, R.E. Taylor & P.D. Desai,
!1975, IFI/Plenum, NY, NY, vedi tesi Marco Marin

```

```

!Tabella temperatura [°C]

```

```

MPTEMP,,,,,,,, ! cancella la tabella precedente
!          n          T [°C]
MPTEMP, 1, 25.0
MPTEMP, 2, 125.0
MPTEMP, 3, 225.0
MPTEMP, 4, 325.0
MPTEMP, 5, 425.0
MPTEMP, 6, 525.0
MPTEMP, 7, 625.0
MPTEMP, 8, 725.0
MPTEMP, 9, 825.0
MPTEMP, 10, 925.0
MPTEMP, 11, 1025.0
MPTEMP, 12, 1125.0
MPTEMP, 13, 1225.0
MPTEMP, 14, 1325.0
MPTEMP, 15, 1425.0
MPTEMP, 16, 1525.0
MPTEMP, 17, 1625.0
MPTEMP, 18, 1725.0
MPTEMP, 19, 1825.0
MPTEMP, 20, 1925.0
MPTEMP, 21, 2025.0
MPTEMP, 22, 2125.0
MPTEMP, 23, 2225.0
MPTEMP, 24, 2325.0
MPTEMP, 25, 2425.0
MPTEMP, 26, 2525.0
MPTEMP, 27, 2625.0
MPTEMP, 28, 2725.0
MPTEMP, 29, 2825.0

```

```

!coefficiente di espansione termica [1/°C]

```

```

MPDATA, ALPX, Ta, 1, 6.3264E-06
MPDATA, ALPX, Ta, 2, 6.5783E-06
MPDATA, ALPX, Ta, 3, 6.7778E-06
MPDATA, ALPX, Ta, 4, 6.9338E-06
MPDATA, ALPX, Ta, 5, 7.0549E-06
MPDATA, ALPX, Ta, 6, 7.1499E-06
MPDATA, ALPX, Ta, 7, 7.2275E-06
MPDATA, ALPX, Ta, 8, 7.2966E-06
MPDATA, ALPX, Ta, 9, 7.3659E-06
MPDATA, ALPX, Ta, 10, 7.4442E-06
MPDATA, ALPX, Ta, 11, 7.5401E-06
MPDATA, ALPX, Ta, 12, 7.6625E-06
MPDATA, ALPX, Ta, 13, 7.8201E-06
MPDATA, ALPX, Ta, 14, 8.0216E-06
MPDATA, ALPX, Ta, 15, 8.2759E-06
MPDATA, ALPX, Ta, 16, 8.5917E-06
MPDATA, ALPX, Ta, 17, 8.9777E-06
MPDATA, ALPX, Ta, 18, 9.4427E-06
MPDATA, ALPX, Ta, 19, 9.9955E-06
MPDATA, ALPX, Ta, 20, 1.0645E-05
MPDATA, ALPX, Ta, 21, 1.1399E-05
MPDATA, ALPX, Ta, 22, 1.2268E-05
MPDATA, ALPX, Ta, 23, 1.3259E-05
MPDATA, ALPX, Ta, 24, 1.4382E-05
MPDATA, ALPX, Ta, 25, 1.5645E-05
MPDATA, ALPX, Ta, 26, 1.7057E-05
MPDATA, ALPX, Ta, 27, 1.8628E-05
MPDATA, ALPX, Ta, 28, 2.0364E-05
MPDATA, ALPX, Ta, 29, 2.2276E-05

```

!3:

!resistività elettrica

!fonti: P.D. Desai, T.K. Chu, H.M. James, C.Y. Ho, J. Phys. Ref. Data

!Nota:

!dati sotto 60K sono per Ta con resistività residua

!di 0.1 x 10E-8 ohm-m; non corretti per l'espansione termica

!Tabella temperatura [°C]

MPTEMP,,,,,,,, ! cancella la tabella precedente

!	n	T [°C]
MPTEMP,	1,	25.85
MPTEMP,	2,	125.85
MPTEMP,	3,	225.85
MPTEMP,	4,	325.85
MPTEMP,	5,	425.85
MPTEMP,	6,	525.85
MPTEMP,	7,	625.85
MPTEMP,	8,	725.85
MPTEMP,	9,	825.85
MPTEMP,	10,	925.85
MPTEMP,	11,	1025.85
MPTEMP,	12,	1125.85
MPTEMP,	13,	1225.85
MPTEMP,	14,	1325.85
MPTEMP,	15,	1425.85
MPTEMP,	16,	1525.85
MPTEMP,	17,	1625.85
MPTEMP,	18,	1725.85
MPTEMP,	19,	1825.85
MPTEMP,	20,	1925.85
MPTEMP,	21,	2025.85

```

MPTEMP, 22, 2125.85
MPTEMP, 23, 2225.85
MPTEMP, 24, 2325.85
MPTEMP, 25, 2425.85
MPTEMP, 26, 2525.85
MPTEMP, 27, 2625.85
MPTEMP, 28, 2725.85
MPTEMP, 29, 2825.85

```

```
!resistività elettrica [ohm m]
```

```

MPDATA, RSVX, Ta, 1, 1.3488E-07
MPDATA, RSVX, Ta, 2, 1.8237E-07
MPDATA, RSVX, Ta, 3, 2.2841E-07
MPDATA, RSVX, Ta, 4, 2.7307E-07
MPDATA, RSVX, Ta, 5, 3.1641E-07
MPDATA, RSVX, Ta, 6, 3.5850E-07
MPDATA, RSVX, Ta, 7, 3.9941E-07
MPDATA, RSVX, Ta, 8, 4.3919E-07
MPDATA, RSVX, Ta, 9, 4.7792E-07
MPDATA, RSVX, Ta, 10, 5.1568E-07
MPDATA, RSVX, Ta, 11, 5.5249E-07
MPDATA, RSVX, Ta, 12, 5.8844E-07
MPDATA, RSVX, Ta, 13, 6.2360E-07
MPDATA, RSVX, Ta, 14, 6.5802E-07
MPDATA, RSVX, Ta, 15, 6.9175E-07
MPDATA, RSVX, Ta, 16, 7.2495E-07
MPDATA, RSVX, Ta, 17, 7.5752E-07
MPDATA, RSVX, Ta, 18, 7.8970E-07
MPDATA, RSVX, Ta, 19, 8.2142E-07
MPDATA, RSVX, Ta, 20, 8.5281E-07
MPDATA, RSVX, Ta, 21, 8.8394E-07
MPDATA, RSVX, Ta, 22, 9.1483E-07
MPDATA, RSVX, Ta, 23, 9.4563E-07
MPDATA, RSVX, Ta, 24, 9.7628E-07
MPDATA, RSVX, Ta, 25, 1.0069E-06
MPDATA, RSVX, Ta, 26, 1.0376E-06
MPDATA, RSVX, Ta, 27, 1.0684E-06
MPDATA, RSVX, Ta, 28, 1.0994E-06
MPDATA, RSVX, Ta, 29, 1.1306E-06

```

C.3. Molibdeno

```

!*****
!Molibdenum
!*****
!create by Nicola Baccini University of Padova
!Phone: +39 3289455733
!e-mail: nicola.baccini@yahoo.it
!*****
!Ver. 1.0 - 9 Sept 2009
!*****

/PREP7
Mo=30 !material number in the ANSYS library
MPDELE,ALL,Mo

!*****
!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)
!*****

!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,

!Electrical resistivity table [ohm m]

MPDATA,RSVX,Mo, 1, 4.9147E-08, 7.3993E-08, 9.9298E-08,
MPDATA,RSVX,Mo, 4, 1.2505E-07, 1.5122E-07, 1.7780E-07,
MPDATA,RSVX,Mo, 7, 2.0478E-07, 2.3214E-07, 2.5986E-07,
MPDATA,RSVX,Mo, 10, 2.8792E-07, 3.1632E-07, 3.4503E-07,
MPDATA,RSVX,Mo, 13, 3.7404E-07, 4.0333E-07, 4.3288E-07,
MPDATA,RSVX,Mo, 16, 4.6269E-07, 4.9273E-07, 5.2299E-07,
MPDATA,RSVX,Mo, 19, 5.5345E-07, 5.8410E-07, 6.1492E-07,
MPDATA,RSVX,Mo, 22, 6.4589E-07, 6.7700E-07, 7.0823E-07,

!*****

!THERMAL CONDUCTIVITY

!Composition: 99.95%

!Note: well-annealed with residual resistivity of 0.167 uohm-cm;

!error is 4% near RT, 4-10% at others

!Reference: Thermophysical Properties of Matter, v1,

!Y.S. Touloukian, R.W. Powell, C.Y. Ho & P.G. Klemens, 1970, IFI/Plenum,
NY, NY

!*****

!Temperature table [°C]

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

!Thermal conductivity table [W/m°C]

MPDATA,KXX,Mo, 1, 1.3904E+02, 1.3505E+02, 1.3106E+02,
MPDATA,KXX,Mo, 4, 1.2711E+02, 1.2322E+02, 1.1944E+02,
MPDATA,KXX,Mo, 7, 1.1578E+02, 1.1228E+02, 1.0895E+02,
MPDATA,KXX,Mo, 10, 1.0580E+02, 1.0285E+02, 1.0012E+02,
MPDATA,KXX,Mo, 13, 9.7601E+01, 9.5305E+01, 9.3229E+01,
MPDATA,KXX,Mo, 16, 9.1369E+01, 8.9720E+01, 8.8270E+01,
MPDATA,KXX,Mo, 19, 8.7006E+01, 8.5910E+01, 8.4962E+01,
MPDATA,KXX,Mo, 22, 8.4138E+01, 8.3411E+01, 8.2750E+01,

!*****

!HEMISPHERICAL TOTAL EMISSIVITY

!note: polished; 25% error

!Reference: Thermophysical Properties of Matter, v7,

!Y.S. Touloukian & D.P. DeWitt, 1970, IFI/Plenum, NY, NY

!*****

```

!Temperature table [°C]
MPTEMP      !erase previous table
MPTEMP,    1,    200,    300,    400,
MPTEMP,    4,    500,    600,    700,
MPTEMP,    7,    800,    900,    1000,
MPTEMP,   10,   1100,  1200,  1300,
MPTEMP,   13,   1400,  1500,  1600,
MPTEMP,   16,   1700,  1800,  1900,
MPTEMP,   19,   2000,  2100,  2200,

!Emissivity table
MPDATA,EMIS,Mo,  1,  6.2388E-02,  7.3011E-02,  8.3558E-02,
MPDATA,EMIS,Mo,  4,  9.4030E-02,  1.0443E-01,  1.1475E-01,
MPDATA,EMIS,Mo,  7,  1.2499E-01,  1.3516E-01,  1.4525E-01,
MPDATA,EMIS,Mo, 10,    1.5527E-01,  1.6521E-01,  1.7508E-01,
MPDATA,EMIS,Mo, 13,    1.8487E-01,  1.9459E-01,  2.0423E-01,
MPDATA,EMIS,Mo, 16,    2.1379E-01,  2.2328E-01,  2.3269E-01,
MPDATA,EMIS,Mo, 19,    2.4203E-01,  2.5129E-01,  2.6048E-01,

!*****!DENSITY
!calculated from the linear expansion
!*****
!Temperature table [°C]
!MPTEMP      !erase previous table
!MPTEMP,    1,    0,    100,    200,
!MPTEMP,    4,    300,    400,    500,
!MPTEMP,    7,    600,    700,    800,
!MPTEMP,   10,    900,    1000,  1100,
!MPTEMP,   13,   1200,  1300,  1400,
!MPTEMP,   16,   1500,  1600,  1700,
!MPTEMP,   19,   1800,  1900,  2000,
!MPTEMP,   22,   2100,  2200,  2300,

!Density table [Kg/m^3]
!MPDATA,DENS,Mo,  1,  1.0203E+04,  1.0188E+04,  1.0172E+04,
!MPDATA,DENS,Mo,  4,  1.0156E+04,  1.0140E+04,  1.0124E+04,
!MPDATA,DENS,Mo,  7,  1.0107E+04,  1.0089E+04,  1.0071E+04,
!MPDATA,DENS,Mo, 10,  1.0052E+04,  1.0033E+04,  1.0012E+04,
!MPDATA,DENS,Mo, 13,  9.9907E+03,  9.9681E+03,  9.9444E+03,
!MPDATA,DENS,Mo, 16,  9.9194E+03,  9.8931E+03,  9.8654E+03,
!MPDATA,DENS,Mo, 19,  9.8362E+03,  9.8055E+03,  9.7732E+03,
!MPDATA,DENS,Mo, 22,  9.7392E+03,  9.7035E+03,  9.6660E+03,

! --- constant value assigned ---
MP,DENS,Mo,9.7732E+03  !density [kg/m^3]
! --- constant value assigned ---

!*****
!SPECIFIC HEAT
!Note: for the non-superconducting state; 1.5% to 3% error
!Reference: P.D. Desai, J. Phys. Chem. Ref. Data, v16(1), p91 (1987)
!*****

!Temperature table [°C]
!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,
```

```
!Specific Heat table
```

```
!MPDATA,C,Mo, 1, 2.4386E+02, 2.5699E+02, 2.6611E+02,
!MPDATA,C,Mo, 4, 2.7284E+02, 2.7841E+02, 2.8334E+02,
!MPDATA,C,Mo, 7, 2.8804E+02, 2.9290E+02, 2.9817E+02,
!MPDATA,C,Mo, 10, 3.0406E+02, 3.1069E+02, 3.1810E+02,
!MPDATA,C,Mo, 13, 3.2626E+02, 3.3504E+02, 3.4426E+02,
!MPDATA,C,Mo, 16, 3.5363E+02, 3.6282E+02, 3.7388E+02,
!MPDATA,C,Mo, 19, 3.8675E+02, 4.0055E+02, 4.1529E+02,
!MPDATA,C,Mo, 22, 4.3128E+02, 4.4910E+02, 4.6967E+02,
```

```
! --- constant value assigned ---
MP,C,Mo,4.1529E+02 !specific heat [J/kg°C]
! --- constant value assigned ---
```

```
!*****
```

```
!COEFFICIENT OF THERMAL EXPANSION
```

```
!Note: the reference temperature is 20C; 3% error below 900K, 5% above 900K
```

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

```
!*****
```

```
!Temperature table [°C]
```

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

```
!Coefficient of thermal expansion table
```

```
!MPDATA,ALPX,Mo, 1, 4.7229E-06, 4.8771E-06, 5.0508E-06,
!MPDATA,ALPX,Mo, 4, 5.2420E-06, 5.4486E-06, 5.6683E-06,
!MPDATA,ALPX,Mo, 7, 5.8990E-06, 6.1386E-06, 6.3849E-06,
!MPDATA,ALPX,Mo, 10, 6.6358E-06, 6.8732E-06, 7.1020E-06,
!MPDATA,ALPX,Mo, 13, 7.3632E-06, 7.6622E-06, 8.0045E-06,
!MPDATA,ALPX,Mo, 16, 8.3955E-06, 8.8407E-06, 9.3454E-06,
!MPDATA,ALPX,Mo, 19, 9.9151E-06, 1.0555E-05, 1.1271E-05,
!MPDATA,ALPX,Mo, 22, 1.2069E-05, 1.2952E-05, 1.3929E-05,
```

```
!*****
```

```
!ELASTIC MODULUS
```

```
!Composition: commercially pure
!Note: values below 298K were decreased by 2% to match the high
temperature values
```

```
!Reference: ASM Handbook, vol 2, 10th edition, ASM International (1992);
!below 273K W. Koester, Z. Metallkde., v39(1), p1 (1948) (in German)
```

```
!*****
```

```
!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,

!Elastic modulus table
!MPDATA,EX,Mo, 1, 3.2827E+11, 3.2179E+11, 3.1602E+11,
!MPDATA,EX,Mo, 4, 3.1080E+11, 3.0596E+11, 3.0135E+11,
!MPDATA,EX,Mo, 7, 2.9681E+11, 2.9219E+11, 2.8731E+11,
!MPDATA,EX,Mo, 10, 2.8203E+11, 2.7619E+11, 2.6963E+11,
!MPDATA,EX,Mo, 13, 2.6218E+11, 2.5370E+11, 2.4402E+11,
!MPDATA,EX,Mo, 16, 2.3299E+11, 2.2044E+11, 2.0623E+11,
!MPDATA,EX,Mo, 19, 1.9018E+11, 1.7215E+11,

!*****
!POISSON'S RATIO
!Note: calculated from E and G; errors may be large
!Reference: see E and G
!*****

!Temperature table [°C]
!MPTEMP !erase previous table
!MPTEMP, 1, 25, 100, 150,
!MPTEMP, 4, 200, 250, 300,
!MPTEMP, 7, 350, 400, 450,
!MPTEMP, 10, 500, 550, 600,
!MPTEMP, 13, 650, 700, 750,
!MPTEMP, 16, 800, 850,

!Poisson's ratio table
!MPDATA,PRXY,Mo, 1, 3.6861E-01, 3.6036E-01, 3.5627E-01,
!MPDATA,PRXY,Mo, 4, 3.5321E-01, 3.5112E-01, 3.4992E-01,
!MPDATA,PRXY,Mo, 7, 3.4955E-01, 3.4992E-01, 3.5097E-01,
!MPDATA,PRXY,Mo, 10, 3.5263E-01, 3.5482E-01, 3.5748E-01,
!MPDATA,PRXY,Mo, 13, 3.6052E-01, 3.6389E-01, 3.6749E-01,
!MPDATA,PRXY,Mo, 16, 3.7128E-01, 3.7516E-01,

```

C.4. Acciaio inossidabile AISI 316L

```

!*****
!Stainless Steel 316
!*****
!create by
!Mattia Manzolaro
!INFN
!Phone: +39 349 2824765
!e-mail: mattia.manzolaro@lnl.infn.it
!*****
!Ver. 1.0 - 30/11/2012
!*****

/PREP7

SS316=50 !material number in the ANSYS library
MPDELE,ALL,SS316

!*****!ELECTRICAL
RESISTIVITY

```

```

!Composition: bal. Fe, 16.8 Cr, 11.66 Ni, 2.2 Mo, 1.6 Mn, 0.1 C, 0.26
Si (wt%)
!Note: Allegheny Ludlum Corp.
!Reference: M. Rouby and P. Blanchard, Physical and Mechanical Properties
of
!Stainless Steels, Stainless Steels, les editions de physique, p111-158,
(1993)
!and A.F. Clark, G.E. Childs and G.H. Wallace, Cryogenics, v10, p295
(1970)
!*****

```

```

!Temperature table [°C]
MPTEMP      !erase previous table
MPTEMP,    1,    0,    100,  200,
MPTEMP,    4,   300,  400,  500,
MPTEMP,    7,   600,

```

```

!Electrical resistivity table [ohm m]
MPDATA,RSVX,SS316,  1, 7.33E-07,  8.01E-07,  8.64E-07,
MPDATA,RSVX,SS316,  4, 9.24E-07,  9.81E-07,  1.03E-06,
MPDATA,RSVX,SS316,  7, 1.08E-06,

```

```

!*****
!THERMAL CONDUCTIVITY
!Composition: bal. Fe, 16.8 Cr, 11.66 Ni, 2.2 Mo, 1.6 Mn, 0.1 C, 0.26
Si (wt%)
!Note: material below 110K is reported as 316LN; Allegheny Ludlum Corp.
!Reference: below 110K O. Umezawa and K. Ishikawa, Cryogenics, v32(10),
p873 (1992);
!above 135K Lucks, C.F., Thompson, H.B., Smith, A.R., Curry, F.P., Deem,
H.W. and
!Bing, G.F., USAF TR 6145, I, p1-127, 1951 [ATI 117 715]
!*****

```

```

!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,

```

```

!Thermal conductivity table [W/m°C]
MPDATA,KXX,SS316,  1,  1.29E+01,  1.45E+01,  1.60E+01,
MPDATA,KXX,SS316,  4,  1.74E+01,  1.87E+01,  2.00E+01,
MPDATA,KXX,SS316,  7,  2.13E+01,  2.24E+01,  2.35E+01,
MPDATA,KXX,SS316, 10,  2.46E+01,

```

```

!*****!HEMISPHERI
CAL TOTAL EMISSIVITY (!NORMAL TOTAL EMISSIVITY!)
!Composition: bal. Fe, 16.8 Cr, 11.66 Ni, 2.2 Mo, 1.6 Mn, !0.1 C, 0.26
Si (wt%)
!Note: cleaned as-received; 30% error; Allegheny Ludlum Corp.
!Reference: Thermophysical Properties of Matter, v7, Y.S.
!Touloukian & D.P. DeWitt, 1970, IFI/Plenum, NY, NY
!*****

```

```

!Temperature table [°C]
MPTEMP      !erase previous table
MPTEMP,    1,   100,  200,  300,
MPTEMP,    4,   400,  500,  600,
MPTEMP,    7,   700,  800,  900,

```

```

!Emissivity table
MPDATA,EMIS,SS316,      1,      2.91E-01,      3.02E-01,      3.10E-01,
MPDATA,EMIS,SS316,      4,      3.18E-01,      3.32E-01,      3.57E-01,
MPDATA,EMIS,SS316,      7,      3.96E-01,      4.56E-01,      5.41E-01,

!*****
!DENSITY
!calculated from the linear expansion
!*****

! --- constant value assigned ---
MP,DENS,SS316,8000      !density [kg/m^3]
! --- constant value assigned ---

!*****
!SPECIFIC HEAT
!Note: for the non-superconducting state; 1.5% to 3% error
!Reference: P.D. Desai, J. Phys. Chem. Ref. Data, v16(1), p91 (1987)
!*****

! --- constant value assigned ---
      MP,C,SS316,600      !specific heat [J/kg°C]
! --- constant value assigned ---

```

C.5. Alumina

```

!*****
!Al2O3_XX (alpha)
!*****!create by
!Nicola Baccini
!University of Padova
!Phone: +39 3289455733
!e-mail: nicola.baccini@yahoo.it
!*****
!Ver. 1.0 - 9 Sept 2009
!*****

/PREP7

Al2O3_XX=31      !material number in the ANSYS library
MPDELE,ALL,Al2O3_XX

!*****
!THERMAL CONDUCTIVITY
!Composition: 99.5 Al2O3_XX
!Note: 98% dense; error is 6% from 500-1000K, 6-10% at others; alpha
!Reference: Thermophysical Properties of Matter, v2,
!Y.S. Touloukian, R.W. Powell, C.Y. Ho & P.G. Klemens, 1970, IFI/Plenum,
NY, NY
!*****

!Temperature table [°C]
MPTEMP      !erase previous table
MPTEMP,      1,      0,      100,      200,
MPTEMP,      4,      300,      400,      500,
MPTEMP,      7,      600,      700,      800,
MPTEMP,      10,      900,      1000,      1100,
MPTEMP,      13,      1200,      1300,      1400,

```

MPTEMP, 16, 1500, 1600, 1700,
MPTEMP, 19, 1800

!Thermal conductivity table [W/m°C]
MPDATA,KXX,Al2O3_XX,1,3.9486E+01,2.8637E+01,2.1662E+01,
MPDATA,KXX,Al2O3_XX,4,1.6899E+01,1.3406E+01, 1.0908E+01,
MPDATA,KXX,Al2O3_XX,7,9.3546E+00,8.1919E+00, 7.3374E+00,
MPDATA,KXX,Al2O3_XX,10, 6.7210E+00,6.2846E+00,5.9824E+00,
MPDATA,KXX,Al2O3_XX,13,5.7812E+00,5.6599E+00,5.6097E+00,
MPDATA,KXX,Al2O3_XX,16,5.6342E+00, 5.7491E+00,5.9828E+00,
MPDATA,KXX,Al2O3_XX,19,6.3756E+00,

!*****
!HEMISFERICAL TOTAL EMISSIVITY
!Composition: 52,9 Al, 47,1 O (wt%)
!Note: sapphire; depends on purity; alpha
!Reference: R.J. Tiernan and J.E. Saunders, J. Applied Physics, v 64(2),
p459 (1988)
!*****

!Temperature table [°C]
MPTEMP !erase previous table
MPTEMP, 1, 750, 800, 850,
MPTEMP, 4, 900, 950, 1000,
MPTEMP, 7, 1050, 1100, 1150,
MPTEMP, 10, 1200,

!Emissivity table [-]
MPDATA,EMIS,Al2O3_XX,1,2.6511E-01,2.5020E-01,2.3588E-01,
MPDATA,EMIS,Al2O3_XX,4,2.2216E-01,2.0903E-01,1.9649E-01,
MPDATA,EMIS,Al2O3_XX,7,1.8454E-01,1.7319E-01,1.6243E-01,
MPDATA,EMIS,Al2O3_XX,10,1.5227E-01,

!*****
!ELECTRICAL RESISTIVITY
!Composition:
!Note:
!Reference:
!*****

!Temperature table [°C]
MPTEMP !erase previous table
MPTEMP, 1, 0, 500, 600,
MPTEMP, 4, 700, 800, 900,
MPTEMP, 7, 1000, 1100, 1200,
MPTEMP, 10, 1300

!Electrical resistivity table [Kg/m^3]
MPDATA,RSVX,Al2O3_XX,1,1E+14,5.012E+13,2.09E+13,
MPDATA,RSVX,Al2O3_XX,4,1.585E+13,1.7380E+12,7.586E+10,
MPDATA,RSVX,Al2O3_XX,7,1.38E+09,5.012E+07,3.02E+06,
MPDATA,RSVX,Al2O3_XX,10,2.884E+05,

!*****
!DENSITY
!Composition: 52,9 Al, 47,1 O (wt%)
!Note: alpha
!Reference: calculated from the linear expansion
!*****

```

!Temperature table [°C]
MPTEMP      !erase previous table
MPTEMP,    1,    0,      100,      200,
MPTEMP,    4,    300,    400,      500,
MPTEMP,    7,    600,    700,      800,
MPTEMP,   10,    900,    1000,   1100,
MPTEMP,   13,   1200,  1300,  1400,
MPTEMP,   16,   1500,  1600,

!Density table [Kg/m^3]
MPDATA,DENS,Al2O3_XX,1,3.9896E+03,3.9826E+03,3.9745E+03,
MPDATA,DENS,Al2O3_XX,4,3.9656E+03,3.9560E+03,3.9460E+03,
MPDATA,DENS,Al2O3_XX,7,3.9356E+03, 3.9250E+03,3.9142E+03,
MPDATA,DENS,Al2O3_XX,10,3.9032E+03,3.8922E+03,3.8810E+03,
MPDATA,DENS,Al2O3_XX,13,3.8696E+03,3.8579E+03,3.8459E+03,
MPDATA,DENS,Al2O3_XX,16,3.8333E+03,3.8201E+03,

!*****!SPECIFIC HEAT
!Composition: 52,9 Al, 47,1 O (wt%)
!Note: less than 1% error; alpha
!Reference: D.A. Archer, J. Phys. Chem. Ref. Data, v22(6), p1441 (1993)
!*****

!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,

!Specific Heat table

MPDATA,C,Al2O3_XX,1,7.1784E+02,9.0600E+02,1.0187E+03,
MPDATA,C,Al2O3_XX,4,1.0885E+03,1.1357E+03,1.1701E+03,
MPDATA,C,Al2O3_XX,7,1.1948E+03,1.2157E+03,1.2336E+03,
MPDATA,C,Al2O3_XX,10,1.2493E+03,1.2634E+03,1.2762E+03,
MPDATA,C,Al2O3_XX,13,1.2883E+03,1.2998E+03,1.3110E+03,
MPDATA,C,Al2O3_XX,16,1.3220E+03,1.3329E+03, 1.3435E+03,
MPDATA,C,Al2O3_XX,19,1.3537E+03,1.3633E+03,

!*****
!COEFFICIENT OF THERMAL EXPANSION
!Composition: 52,9 Al, 47,1 O (wt%)
!Note: the reference temperature is 20C; 3% error; alpha
!Reference: Thermophysical Properties of Matter, v13,
!Y.S. Touloukian, R.K. Kirby, R.E. Taylor & T.Y.R. Lee, 1977, IFI/Plenum,
NY, NY
!*****

!Temperature table [°C]
MPTEMP      !erase previous table
MPTEMP,    1,    0,      100,      200,
MPTEMP,    4,    300,    400,      500,
MPTEMP,    7,    600,    700,      800,
MPTEMP,   10,    900,    1000,   1100,
MPTEMP,   13,   1200,  1300,  1400,

```

```

MPTEMP,      16,      1500, 1600,

!Coefficient of thermal expansion table
MPDATA,ALPX,A12O3_XX,  1,5.0548E-06,6.8436E-06,7.4041E-06,
MPDATA,ALPX,A12O3_XX,  4,7.7599E-06,8.1000E-06,8.4243E-06,
MPDATA,ALPX,A12O3_XX,  7,8.7329E-06,9.0257E-06,9.3027E-06,
MPDATA,ALPX,A12O3_XX, 10,9.5640E-06,9.8095E-06,1.0039E-05,
MPDATA,ALPX,A12O3_XX, 13,1.0253E-05,1.0452E-05,1.0634E-05,
MPDATA,ALPX,A12O3_XX, 16,1.0801E-05,1.0952E-05,

!*****
!ELASTIC MODULUS
!Composition: 52,9 Al, 47,1 O (wt%)
!Note: average of hot-pressed (from Avco) and sintered samples (from
GE),
!      >99% pure, >99% dense; the modulus decreases by approx. !5% per 1%
of density;
!dynamic method; alpha
!Reference: N. Soga and O.L. Anderson, J. American Ceramic Society,
v49(7), p355, (1966)
!*****

!Temperature table [°C]
MPTEMP      !erase previous table
MPTEMP,     1,      50,      100,      200,
MPTEMP,     4,      300,     400,      500,
MPTEMP,     7,      600,     700,     800,
MPTEMP,    10,      900,    1000,    1100,

!Elastic modulus table
MPDATA,EX,A12O3_XX,  1,3.9110E+11,3.8866E+11,3.8373E+11,
MPDATA,EX,A12O3_XX,  4,3.7874E+11,3.7368E+11,3.6855E+11,
MPDATA,EX,A12O3_XX,  7,3.6336E+11,3.5811E+11,3.5278E+11,
MPDATA,EX,A12O3_XX, 10,3.4740E+11,3.4194E+11,3.3642E+11,

!*****
!POISSON'S RATIO
!Composition: 52,9 Al, 47,1 O (wt%)
!Note: calculated from E and G; errors may be large; alpha
!Reference: see E and G
!*****

!Temperature table [°C]
MPTEMP      !erase previous table
MPTEMP,     1,      50,      100,     200,
MPTEMP,     4,      300,     400,     500,
MPTEMP,     7,      600,     700,     800,
MPTEMP,    10,      900,    1000,    1100,

!Poisson's ratio table
MPDATA,PRXY,A12O3_XX, 1,2.2849E-01,2.2932E-01,2.3093E-01,
MPDATA,PRXY,A12O3_XX, 4,2.3249E-01,2.3401E-01,2.3547E-01,
MPDATA,PRXY,A12O3_XX, 7,2.3689E-01,2.3825E-01,2.3957E-01,
MPDATA,PRXY,A12O3_XX,10,2.4084E-01,2.4205E-01,2.4322E-01,

```

C.6. Lega di Alluminio 5083

```
!*****!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
!*****

MP,DENS,Al5083,2670          !density [kg/m^3]

!*****!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)

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,A15083,17,1.455195e+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)
!*****
MP,C,A15083,950          !specific heat [J/kg K]

!*****!Hemispheri
cal 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, A15083, 1,0.1

```


APPENDICE D

CODICI APDL E MATLAB® PER LE ANALISI NUMERICHE E L'ELABORAZIONE D'IMMAGINE

D.1. Introduzione

In questa appendice vengono riportati degli esempi dei codici APDL usati per le analisi numeriche in campo elettro-termico accoppiato sulla sorgente FEBIAD, per quanto riguarda le fasi di pre-processamento e soluzione. Inoltre saranno inseriti anche dei codici usati per la fase di post-processamento ed analisi risultati. Anche per le analisi strutturali sarà mostrato il codice del modello numerico sviluppato, ed inoltre sarà spiegato come è stato ricavato il campo termico (dalla soluzione dell'analisi elettro-termica) usato come carico.

Infine sarà riportato il codice usato con il programma Matlab® scritto per la misura automatica delle deformazioni dalle fotografie del catodo ad alta temperatura. Si ricorda che l'uso di questo codice è facoltativo, anzi i dati vanno confrontati con delle rilevazioni eseguite manualmente per poter essere certi che il codice stia leggendo i dati corretti.

D.2. APDL per analisi in campo elettro-termico della sorgente FEBIAD

Si ricorda che il simbolo "!" prima di una stringa rappresenta un commento che non viene letto dal programma.

Nel caso nel modello geometrico vengano aggiunte o tolte delle entità (come aree nel caso dello studio sul catodo, o volumi nel caso di presenza della camera) bisognerà correggere manualmente l'assegnazione delle etichette sui comandi di discretizzazione e di assegnazione dei carichi e dei vincoli, poiché la numerazione automatica di Ansys® assegna delle etichette ad ogni entità che può cambiare al variare della geometria.

```

!Modello FEM per lo studio della temperatura della !superficie di
interfaccia del catodo, la temperatura media !della superficie
interna dell'anodo e della temperatura massima.
!comando *use per richiamare le macro
!necessario per la soluzione con grid
!Macro usate in questo codice:
!"M23Al5083.mac"
!"M26Ta.mac"
!"M30Mo.mac"
!"M31Al2O3_XX.mac"
!"M50SS316.mac"
!"remove_radial_load.mac"
!---avvio e selezione del titolo---
FINISH
/CLEAR, START
/TITLE,PIS study
/CONFIG,NRES,100000
!assegno un valore
!ai parametri di
!configurazione !di
!ANSYS (max substep)

!-----
!PARAMETRI PRINCIPALI
T_par = 50
!temperatura di
!vincolo[°C]
I_LINE = 350
!corrente
!riscaldante [A]
FINISH
!uscita dal
!processore

!-----
/PREP7
!entro nel
!processore !di
!creazione del
!modello
!definizione tramite macro delle proprietà dei materiali
*USE,M26Ta.mac
!macro per il
!Tantalio
*USE,M30Mo.mac
!macro per il
!Molibdeno
*USE,M31Al2O3_XX.mac
!macro per Allumina
*USE,M50SS316.mac
!macro per l'Acciaio
*USE,Al508316.mac
!macro per il
!Alluminio 5083

!-----
!MODELLO ELETTRICO-TERMICO
!-----
!selezione del tipo di elemento
ET,1,SOLID226
!definisco il tipo
!di !elemento
KEYOPT,1,1,110
!specifico le
!impostazioni !per
!l'analisi in campo
!elettrotermico

!Costruzione del modello geomterico
!Importo le geometrie
FINISH
!uscita dal
!processore
/AUX15
!entro nel
!processore per !la
!gestione dei CAD
!IGES

```

```

IOPTN,IGES,NODEFEAT           !opzioni per
IOPTN,MERGE,YES               !l'importazione dei
IOPTN,SOLID,YES               !modelli CAD
IOPTN,SMALL,YES
IOPTN,GTOLER,0.00001
!connessione elettrica: importazione
IGESIN,'electrical_connection','igs'      !trasferimento IGES
! vite di chiusura: importazione
IGESIN,'end_cap','igs'                  !trasferimento IGES
!c: linea di trasferimento: importazione
IGESIN,'trasfert_line','igs'           !trasferimento IGES
!catodo: importazione
IGESIN,'cathode_standard','igs'         !trasferimento IGES
!ghiera di supporto: importazione
IGESIN,'retainer_nut','igs'             !trasferimento IGES
!camera di scarica: importazione
IGESIN,'discharge_chamber','igs'       !trasferimento IGES
!flangia di chiusura: importazione
IGESIN,'end_flange','igs'              !trasferimento IGES
!scudo termico: importazione
IGESIN,'anode_shield_1','igs'          !trasferimento IGES
!scudo termico: importazione
IGESIN,'anode_shield_2','igs'          !trasferimento IGES
!scudo termico: importazione
IGESIN,'anode_shield_3','igs'          !trasferimento IGES
!camera di supporto: importazione
IGESIN,'support_housing','igs'         !trasferimento IGES
!flangia di supporto: importazione
IGESIN,'support_housing_flange','igs'   !trasferimento IGES
!anodo: importazione
IGESIN,'anode','igs'                  !trasferimento IGES
!flangia di scarico: importazione
IGESIN,'outlet','igs'                 !trasferimento IGES
!griglia: importazione
IGESIN,'anode_grid','igs'             !trasferimento IGES
!isolatore: importazione
IGESIN,'anode_support_insulator','igs'  !trasferimento IGES
!isolatore: importazione
IGESIN,'anode_support_insulator_cpy_1','igs' !trasferimento IGES
!isolatore: importazione
IGESIN,'anode_support_insulator_cpy_2','igs' !trasferimento IGES
!se occorre il modello con camera attivare i comandi seguenti
!camera: importazione
!IGESIN,'camera_sempl','igs'          !trasferimento IGES
FINISH                               !uscita dal
                                        processore
/PREP7                               !entro nel
                                        processore !di
                                        creazione del
                                        !modello

!gli effetti termici dei contatti non sono considerati
!tutti i componenti sono considerati come saldati perfettamente
VGLUE,ALL                            !incollo i volumi
!scalo le geometrie da "mm" a "m"
VLSCALE,ALL,,,0.001,0.001,0.001,,0,1 !genero una nuova
                                        !serie di volumi
                                        !scalati dagli
                                        !originali
                                        !rinumero le entità

NUMCMP,VOLU
NUMCMP,AREA
NUMCMP,LINE

```

```

NUMCMP,KP

! Fine della modellazione geometrica
!-----
! Avvio della costruzione del modello FEM

!discretizzazione dei volumi

!mesh di ANODO (SOLID226 per analisi elettro-termiche)

MAT,Ta                                !seleziono il
                                       !materiale
TYPE,1                                !seleziono il tipo
                                       !di elemento
MSHAPE,1,3D                           !specifico la forma
                                       !degli elementi
MSHKEY,0                               !specifico se usare
                                       !una meshatura
                                       !libera o mappata
VSEL,S,,,13                            !selezione dei
                                       !volumi
ALLSEL,BELOW,VOLU                     !seleziono le entità
                                       !collegate ai volumi
AESIZE,ALL,0.0013                     !taglia
                                       !dell'elemento
VMESH,ALL                              !sull'area [mm]
                                       !discretizzo la
                                       !geometria
ALLSEL                                 !seleziono tutte le
                                       !entità
!mesh di CAMERA DI SUPPORTO (SOLID226 per analisi elettro-termiche)

MAT,SS316                              !seleziono il
                                       !materiale
TYPE,1                                !seleziono il tipo
                                       !di elemento
MSHAPE,1,3D                           !specifico la forma
                                       !degli elementi
MSHKEY,0                               !specifico se usare
                                       !una meshatura
                                       !libera o mappata
VSEL,S,,,12                            !selezione dei
                                       !volumi
ALLSEL,BELOW,VOLU                     !seleziono le entità
                                       !collegate ai volumi
AESIZE,ALL,0.0058                     !taglia
                                       !dell'elemento
VMESH,ALL                              !sull'area [mm]
                                       !discretizzo la
                                       !geometria
ALLSEL                                 !seleziono tutte le
                                       !entità
!mesh di FLANGIA DI SUPPORTO (SOLID226 per analisi elettro-termiche)

MAT,SS316                              !seleziono il
                                       !materiale
TYPE,1                                !seleziono il tipo
                                       !di elemento
MSHAPE,1,3D                           !specifico la forma
                                       !degli elementi

```

```

MSHKEY,0                                !specifico se usare
                                           !una meshatura
                                           !libera o mappata
VSEL,S,,,14                              !selezione dei
                                           !volumi
ALLSEL,BELOW,VOLU                       !seleziono le entità
                                           !collegate ai volumi
AESIZE,ALL,0.0058                       !taglia
                                           !dell'elemento
                                           !sull'area [mm]
VMESH,ALL                                !discretizzo la
                                           !geometria
ALLSEL                                    !seleziono tutte le
                                           !entità
!mesh di ISOLATORI (SOLID226 per analisi elettro-termiche)

MAT,Al2O3_XX                             !seleziono il
                                           !materiale
TYPE,1                                    !seleziono il tipo
                                           !di elemento
MSHAPE,1,3D                              !specifico la forma
                                           !degli elementi
MSHKEY,0                                !specifico se usare
                                           !una meshatura
                                           !libera o mappata
VSEL,S,,,4                                !selezione dei
VSEL,A,,,5                                !volumi
VSEL,A,,,6

ALLSEL,BELOW,VOLU                       !seleziono le entità
                                           !collegate ai volumi
AESIZE,ALL,0.0018                       !taglia
                                           !dell'elemento
                                           !sull'area [mm]
VMESH,ALL                                !discretizzo la
                                           !geometria
ALLSEL                                    !seleziono tutte le
                                           !entità
!mesh di GRIGLIA (SOLID226 per analisi elettro-termiche)

MAT,Mo                                    !seleziono il
                                           !materiale
TYPE,1                                    !seleziono il tipo
                                           !di elemento
MSHAPE,1,3D                              !specifico la forma
                                           !degli elementi
MSHKEY,0                                !specifico se usare
                                           !una meshatura
                                           !libera o mappata
VSEL,S,,,18                              !selezione dei
                                           !volumi
ALLSEL,BELOW,VOLU                       !seleziono le entità
                                           !collegate ai volumi
AESIZE,ALL,0.0017                       !taglia
                                           !dell'elemento
                                           !sull'area [mm]
VMESH,ALL                                !discretizzo la
                                           !geometria
ALLSEL                                    !seleziono tutte le
                                           !entità
!mesh di CONN. ELETTRICA (SOLID226 per analisi elettro-termiche)

```

```

MAT,Ta                                !seleziono il
                                        !materiale
TYPE,1                                !seleziono il tipo
                                        !di elemento
MSHAPE,1,3D                           !specifico la forma
                                        !degli elementi
MSHKEY,0                                !specifico se usare
                                        !una meshatura
                                        !libera o mappata
VSEL,S,, ,8                            !selezione dei
                                        !volumi
ALLSEL,BELOW,VOLU                     !seleziono le entità
                                        !collegate ai volumi
AESIZE,ALL,0.0060                     !taglia
                                        !dell'elemento
                                        !sull'area [mm]
VMESH,ALL                              !discretizzo la
                                        !geometria
ALLSEL                                  !seleziono tutte le
                                        !entità
!mesh di LINEA TRASFERIMENTO (SOLID226 per analisi elettro-termiche)

MAT,Ta                                !seleziono il
                                        !materiale
TYPE,1                                !seleziono il tipo
                                        !di elemento
MSHAPE,1,3D                           !specifico la forma
                                        !degli elementi
MSHKEY,0                                !specifico se usare
                                        !una meshatura
                                        !libera o mappata
VSEL,S,, ,10                           !selezione dei
                                        !volumi
ALLSEL,BELOW,VOLU                     !seleziono le entità
                                        !collegate ai volumi
AESIZE,ALL,0.0032                     !taglia
                                        !dell'elemento
                                        !sull'area [mm]
VMESH,ALL                              !discretizzo la
                                        !geometria
ALLSEL                                  !seleziono tutte le
                                        !entità
!mesh di VITE DI CHIUSURA (SOLID226 per analisi elettro-termiche)

MAT,Ta                                !seleziono il
                                        !materiale
TYPE,1                                !seleziono il tipo
                                        !di elemento
MSHAPE,1,3D                           !specifico la forma
                                        !degli elementi
MSHKEY,0                                !specifico se usare
                                        !una meshatura
                                        !libera o mappata
VSEL,S,, ,11                           !selezione dei
                                        !volumi
ALLSEL,BELOW,VOLU                     !seleziono le entità
                                        !collegate ai volumi
AESIZE,ALL,0.0020                     !taglia
                                        !dell'elemento
                                        !sull'area [mm]

```

```

VMESH,ALL                                !discretizzo la
                                           !geometria
ALLSEL                                    !seleziono tutte le
                                           !entità
!mesh di CATODO (SOLID226 per analisi elettro-termiche)

MAT,Ta                                    !seleziono il
                                           !materiale
TYPE,1                                    !seleziono il tipo
                                           !di elemento
MSHAPE,1,3D                              !specifico la forma
                                           !degli elementi
MSHKEY,0                                  !specifico se usare
                                           !una meshatura
                                           !libera o mappata
VSEL,S,,,16                              !selezione dei
                                           !volumi
ALLSEL,BELOW,VOLU                        !seleziono le entità
                                           !collegate ai volumi
AESIZE,ALL,0.0014                        !taglia
                                           !dell'elemento
                                           !sull'area [mm]
VMESH,ALL                                !discretizzo la
                                           !geometria
ALLSEL                                    !seleziono tutte le
                                           !entità
!mesh di GHIERA DI SUPPORTO (SOLID226 per analisi elettro-termiche)

MAT,Ta                                    !seleziono il
                                           !materiale
TYPE,1                                    !seleziono il tipo
                                           !di elemento
MSHAPE,1,3D                              !specifico la forma
                                           !degli elementi
MSHKEY,0                                  !specifico se usare
                                           !una meshatura
                                           !libera o mappata
VSEL,S,,,9                               !selezione dei
                                           !volumi
ALLSEL,BELOW,VOLU                        !seleziono le entità
                                           !collegate ai volumi
AESIZE,ALL,0.0032                        !taglia
                                           !dell'elemento
                                           !sull'area [mm]
VMESH,ALL                                !discretizzo la
                                           !geometria
ALLSEL                                    !seleziono tutte le
                                           !entità
!mesh di CAMERA DI SCARICA (SOLID226 per analisi elettro-termiche)

MAT,Ta                                    !seleziono il
                                           !materiale
TYPE,1                                    !seleziono il tipo
                                           !di elemento
MSHAPE,1,3D                              !specifico la forma
                                           !degli elementi
MSHKEY,0                                  !specifico se usare
                                           !una meshatura
                                           !libera o mappata
VSEL,S,,,17                              !selezione dei
                                           !volumi

```

```

ALLSEL,BELOW,VOLU      !seleziono le entità
                        !collegate ai volumi
AESIZE,ALL,0.0030      !taglia
                        !dell'elemento
VMESH,ALL              !sull'area [mm]
                        !discretizzo la
ALLSEL                 !geometria
                        !seleziono tutte le
                        !entità
!mesh di SCUDI TERMICI (SOLID226 per analisi elettro-termiche)

MAT,Ta                 !seleziono il
                        !materiale
TYPE,1                 !seleziono il tipo
                        !di elemento
MSHAPE,1,3D           !specifico la forma
                        !degli elementi
MSHKEY,0               !specifico se usare
                        !una meshatura
                        !libera o mappata
VSEL,S,,1             !selezione dei
VSEL,A,,2             !volumi
VSEL,A,,3

ALLSEL,BELOW,VOLU      !seleziono le entità
                        !collegate ai volumi
AESIZE,ALL,0.0018      !taglia
                        !dell'elemento
VMESH,ALL              !sull'area [mm]
                        !discretizzo la
ALLSEL                 !geometria
                        !seleziono tutte le
                        !entità
!mesh di FLANGIA FINALE (SOLID226 per analisi elettro-termiche)

MAT,Ta                 !seleziono il
                        !materiale
TYPE,1                 !seleziono il tipo
                        !di elemento
MSHAPE,1,3D           !specifico la forma
                        !degli elementi
MSHKEY,0               !specifico se usare
                        !una meshatura
                        !libera o mappata
VSEL,S,,15            !selezione dei
                        !volumi
ALLSEL,BELOW,VOLU      !seleziono le entità
                        !collegate ai volumi
AESIZE,ALL,0.0033      !taglia
                        !dell'elemento
VMESH,ALL              !sull'area [mm]
                        !discretizzo la
ALLSEL                 !geometria
                        !seleziono tutte le
                        !entità
!mesh di FLANGIA DI SCARICO (SOLID226 per analisi elettro-termiche)

MAT,Ta                 !seleziono il
                        !materiale
TYPE,1                 !seleziono il tipo
                        !di elemento

```

```

MSHAPE,1,3D !specifico la forma
!degli elementi
MSHKEY,0 !specifico se usare
!una meshatura
!libera o mappata
VSEL,S,,,7 !selezione dei
!volumi
ALLSEL,BELOW,VOLU !seleziono le entità
!collegate ai volumi
AESIZE,ALL,0.0016 !taglia
!dell'elemento
!sull'area [mm]
VMESH,ALL !discretizzo la
!geometria
ALLSEL !seleziono tutte le
!entità
!se occorre il modello con camera attivare i comandi seguenti
!mesh di CAMERA (SOLID226 per analisi elettro-termiche)

MAT,A15083 !seleziono il
!materiale
TYPE,1 !seleziono il tipo
!di elemento
MSHAPE,1,3D !specifico la forma
!degli elementi
MSHKEY,0 !specifico se usare
!una meshatura
!libera o mappata
VSEL,S,,,11 !selezione dei
!volumi
ALLSEL,BELOW,VOLU !seleziono le entità
!collegate ai volumi
AESIZE,ALL,0.0058 !taglia
!dell'elemento
!sull'area [mm]
VMESH,ALL !discretizzo la
!geometria
ALLSEL !seleziono tutte le
!entità

! definizione delle superfici radianti (singolo ENCLOSURE)

!CAMERA DI SUPPORTO (superfici radianti)
VSEL,S,,,12 !selezione dei
!volumi
ALLSEL,BELOW,VOLU !seleziono le entità
!collegate ai volumi
SFA,ALL,,RDSF,-SS316,1 !specifico il carico
!sulle superfici
ALLSEL !seleziono le entità
!collegate ai volumi

!FLANGIA DI SUPPORTO (superfici radianti)
VSEL,S,,,14 !selezione dei
!volumi
ALLSEL,BELOW,VOLU !seleziono le entità
!collegate ai volumi
SFA,ALL,,RDSF,-SS316,1 !specifico il carico
!sulle superfici
ALLSEL !seleziono le entità
!collegate ai volumi

!CAMERA DI SUPPORTO (superfici radianti)

```

VSEL,S,,12	!selezione dei volumi
ALLSEL,BELOW,VOLU	!seleziono le entità collegate ai volumi
SFA,ALL,,RDSF,-SS316,1	!specifico il carico sulle superfici
ALLSEL	!seleziono le entità collegate ai volumi
!CAMERA DI SUPPORTO (superfici radianti)	
VSEL,S,,12	!selezione dei volumi
ALLSEL,BELOW,VOLU	!seleziono le entità collegate ai volumi
SFA,ALL,,RDSF,-SS316,1	!specifico il carico sulle superfici
ALLSEL	!seleziono le entità collegate ai volumi
!ISOLATORI (superfici radianti)	
VSEL,S,,4	!selezione dei volumi
VSEL,S,,5	
VSEL,S,,6	
ALLSEL,BELOW,VOLU	!seleziono le entità collegate ai volumi
SFA,ALL,,RDSF,-Al2O3_XX,1	!specifico il carico sulle superfici
ALLSEL	!seleziono le entità collegate ai volumi
!GRIGLIA (superfici radianti)	
VSEL,S,,10	!selezione dei volumi
ALLSEL,BELOW,VOLU	!seleziono le entità collegate ai volumi
SFA,ALL,,RDSF,-Mo,1	!specifico il carico sulle superfici
ALLSEL	!seleziono le entità collegate ai volumi
!CONNESSIONE ELETTRICA (superfici radianti)	
VSEL,S,,8	!selezione dei volumi
ALLSEL,BELOW,VOLU	!seleziono le entità collegate ai volumi
SFA,ALL,,RDSF,-Ta,1	!specifico il carico sulle superfici
ALLSEL	!seleziono le entità collegate ai volumi
!LINEA DI TRASFERIMENTO (superfici radianti)	
VSEL,S,,10	!selezione dei volumi
ALLSEL,BELOW,VOLU	!seleziono le entità collegate ai volumi
SFA,ALL,,RDSF,-Ta,1	!specifico il carico sulle superfici
ALLSEL	!seleziono le entità collegate ai volumi
!VITE DI CHIUSURA (superfici radianti)	
VSEL,S,,11	!selezione dei volumi
ALLSEL,BELOW,VOLU	!seleziono le entità collegate ai volumi

SFA,ALL,,RDSF,-Ta,1	!specifico il carico
	!sulle superfici
ALLSEL	!seleziono le entità
	!collegate ai volumi
!CATODO (superfici radianti)	
VSEL,S,,,16	!selezione dei
	!volumi
ALLSEL,BELOW,VOLU	!seleziono le entità
	!collegate ai volumi
SFA,ALL,,RDSF,-Ta,1	!specifico il carico
	!sulle superfici
ALLSEL	!seleziono le entità
	!collegate ai volumi
!GHIERA DI SUPPORTO (superfici radianti)	
VSEL,S,,,9	!selezione dei
	!volumi
ALLSEL,BELOW,VOLU	!seleziono le entità
	!collegate ai volumi
SFA,ALL,,RDSF,-Ta,1	!specifico il carico
	!sulle superfici
ALLSEL	!seleziono le entità
	!collegate ai volumi
!CAMERA DI SCARICA (superfici radianti)	
VSEL,S,,,17	!selezione dei
	!volumi
ALLSEL,BELOW,VOLU	!seleziono le entità
	!collegate ai volumi
SFA,ALL,,RDSF,-Ta,1	!specifico il carico
	!sulle superfici
ALLSEL	!seleziono le entità
	!collegate ai volumi
!SCUDI TERMICI (superfici radianti)	
VSEL,S,,,1	!selezione dei
VSEL,S,,,2	!volumi
VSEL,S,,,3	
ALLSEL,BELOW,VOLU	!seleziono le entità
	!collegate ai volumi
SFA,ALL,,RDSF,-SS316,1	!specifico il carico
	!sulle superfici
ALLSEL	!seleziono le entità
	!collegate ai volumi
!FLANGIA FINALE (superfici radianti)	
VSEL,S,,,15	!selezione dei
	!volumi
ALLSEL,BELOW,VOLU	!seleziono le entità
	!collegate ai volumi
SFA,ALL,,RDSF,-Ta,1	!specifico il carico
	!sulle superfici
ALLSEL	!seleziono le entità
	!collegate ai volumi
!FLANGIA DI SCARICO (superfici radianti)	
VSEL,S,,,7	!selezione dei
	!volumi
ALLSEL,BELOW,VOLU	!seleziono le entità
	!collegate ai volumi
SFA,ALL,,RDSF,-Ta,1	!specifico il carico
	!sulle superfici
ALLSEL	!seleziono le entità
	!collegate ai volumi
!ANODO (superfici radianti)	

```

VSEL,S,,13 !selezione dei
!volumi
ALLSEL,BELOW,VOLU !seleziono le entità
!collegate ai volumi
SFA,ALL,,RDSF,-Ta,1 !specifico il carico
!sulle superfici
ALLSEL !seleziono le entità
!collegate ai volumi
se occorre il modello con camera attivare i comandi seguenti
!CAMERA (superfici radianti)
VSEL,S,,11 !selezione dei
!volumi
ALLSEL,BELOW,VOLU !seleziono le entità
!collegate ai volumi
SFA,ALL,,RDSF,-A15083,1 !specifico il carico
!sulle superfici
ALLSEL !seleziono le entità
!collegate ai volumi
! rimozione del carico radiante dalle superfici in comune tra due
!volumi (macro by A. Monetti)
*USE,delete_rad_surface.mac !richiamo la macro
!per rimuovere !il
!carico radiante
!dalle superfici in
!comune fra !due
!volumi

!-----
!Macro delete_rad_surface.mac:
!ALLSEL !seleziono le entità
!collegate ai volumi
!*GET,nvolu,VOLU,0,COUNT !scrivo una
!variabile che conta
!il numero di
!volumi

!nn=0 !creo un parametro
!che pongo nullo
!*DO,i,1,nvolu !ciclo iterativo che
!si ripete nn volte
!nn=VLNEXT(nn) !nn è uguale al
!numero del volume
!successivo
!VSEL,ALL !seleziono tutti i
!volumi
!VSEL,U,VOLU,,nn !deseleziono nn
!ALLSEL,BELOW,VOLU !seleziono le entità
!collegate ai volumi
!VSEL,S,VOLU,,nn !seleziono il volume
!nn
!ASLV,R !seleziono le aree
!dal sottoinsieme
!corrente
!SFADELE,ALL,,RDSF !canello il carico
radiativo
!ALLSEL,ALL !seleziono tutte le
!entità
!*ENDDO !chiudo il ciclo do
!-----

```

```

!Condizioni iniziali
TUNIF,T_par                                     !assegno una
                                                !temperatura
                                                !uniforme a tutti i
                                                !nodi

!Carichi termici
!CONNESSIONE ELETTRICA vincolo termico
DA,11,TEMP,T_par                                !definisco un vicolo
                                                !sul GDL temperatura
                                                !sulla superficie

!FLANGIA DI SUPPROTO vincolo termico
DA,121,TEMP,T_par                               !definisco un vicolo
                                                !sul GDL temperatura
                                                !sulla superficie

!attivare i seguenti comandi nel caso di simulazioni con camera
!CAMERA (superficie esterna) vincolo termico

!DA,159,TEMP,T_par
!DA,160,TEMP,T_par
!DA,161,TEMP,T_par
!DA,162,TEMP,T_par
!DA,163,TEMP,T_par
!DA,164,TEMP,T_par                               !definisco un vicolo
                                                !sul GDL temperatura
                                                sulla !superficie

!Carichi elettrici
!attivare i seguenti comandi nel caso di simulazioni con camera
!CAMERA vincolo sul potenziale
!VSEL,S,,,11                                     !selezione dei
                                                !volumi
!ALLSEL,BELOW,VOLU                              !seleziono le entità
                                                !collegate ai volumi
!D,all,VOLT,0                                    !definisco un vicolo
                                                !sul GDL potenziale
                                                !sui nodi
                                                !selezionati

! FLANGIA DI SUPPORTO vincolo sul potenziale
DA,121,VOLT,0                                   !definisco un vicolo
                                                !sul GDL potenziale
                                                !sulla superficie

!Generazione di potenza - Effetto Joule
!Carico di corrente [A]
ASEL,S,AREA,,11,11                              !seleziono le aree
NSLA,S,1                                         !seleziono i nodi
                                                !sull'area
CP,1,VOLT,ALL                                   !pongo il potenziale
                                                !di tutti i nodi
                                                !uguale
ni=NDNEXT(0)                                    !assegno al parametro
                                                !ni il valore del
                                                !numero del primo
                                                !nodo selezionato

F,ni,AMPS,I_LINE                               !specifico il carico
                                                !di corrente
ALLSEL                                           !seleziono tutte le
                                                !entità

!OPZIONI DI SOLUZIONE
!Definizione della temperatura dello spazio
!(enclosure aperto)

```

```

SPCTEMP,1,T_par                                !definisco una
                                                !temperatura dello
                                                !spazio aperto per
                                                !la radiazione
                                                !usando il metodo
                                                !"Radiosity Solver"

!Definisco le opzioni del solutore
STEF,5.67e-8                                    !costante di Stefan-
                                                !Boltzmann
                                                ![W/(m^2*K^4)]
RADOPT,,0.001,0,20000,0.1,0.1                !specifico le
                                                !opzioni per il
                                                !Gauss-Seidel
                                                !Radiosity Solver
TOFFST,273.15                                  !specifico lo
                                                !scostamento della
                                                !temperatura !dallo
                                                !0 assoluto: le
                                                !temperature
                                                !precedenti vanno
                                                !esprese tutte in
                                                !°C

!Definizione delle opzioni per il fattore di vista
HEMIOPT,100                                    !specifico le
                                                !opzioni per il
                                                !calcolo del
                                                !Hemicube view
                                                !factor
VFOPT,OFF                                       !specifica opzioni
                                                !per il file dei
                                                !fattori di vista
FINISH                                          !uscita dal
                                                !processore

!SOLUTORE
/SOLU                                          !entro nel
                                                !processore di
                                                !soluzione
SOLCONTROL,ON                                  !specifico se usare
                                                !l'ottimizzazione
                                                !per la soluzione
                                                !del problema non
                                                !lineare e alcuni
                                                !algoritmi
ANTYPE,TRANS                                   !analisi in
                                                !transitorio
AUTOTS,ON                                       !ANSYS calcola
                                                !automaticamente
                                                !l'incremento del
                                                !tempo
KBC,1                                           !carico imposto a
                                                !gradino
DELTIM,0.0001,0.00005,100                    !controllo
                                                !dell'incremento del
                                                !tempo dei substep
OUTRES,NSOL,ALL                                !scrittura di tutti
                                                !i risultati nel
                                                !database
TIME,5000                                       !tempo totale
                                                !dell'analisi
SAVE,, ,ALL                                    !salvo i risultati
SOLVE                                          !lancio la soluzione

```

```

SAVE,ALL                                !salvo i risultati
FINISH                                   !uscita dal
                                           !processore

```

D.3. APDL per analisi in campo strutturale del catodo

```

! Modello FEM per lo studio delle deformazioni termiche del catodo
! Macro in questo file:
! "M26Ta_mlep.mac"
!---avvio e scelta del titolo---
FINISH
/CLEAR, START
/TITLE,PIS study
/CONFIG,NRES,100000                                !assegno un valore
                                                    !ai parametri di
                                                    !configurazione !di
                                                    !ANSYS (max substep)

FINISH
/PREP7
!definisco le proprietà del materiale
*USE,M26Ta_mlep.mac                                !richiamo la macro
                                                    !con le proprietà
                                                    !elasto-plastiche
                                                    !del Tantalio

!-----
!MODELLO TERMO-STRUTTURALE
!-----
!definizione del tipo di elementop
ET,1,PLANE223                                     !scelgo l'elemento e
KEYOPT,1,1,11                                    !lo imposto per
KEYOPT,1,3,1                                     !geometrie
                                                    !assialsimmetriche
                                                    !ed analisi termo-
                                                    !strutturali

! Costruzione della geometria
FINISH
/PREP7
!modello i keypoint
K,1,4E-3,0,0
K,2,4.5E-3,0,0
K,3,4.5E-3,41E-3,0
K,4,2.6E-3,41E-3,0
K,5,2.6E-3,65.2E-3,0
K,6,2.75E-3,65.2E-3,0
K,7,2.75E-3,65.35E-3,0
K,8,5.5E-3,65.69E-3,0
K,9,5.5E-3,50E-3,0
K,10,8.5E-3,50E-3,0
K,11,8.5E-3,51E-3,0
K,12,6E-3,51E-3,0
K,13,6E-3,0.066,0
K,14,0.6E-3,66E-3,0
K,15,0.6E-3,65.15E-3,0
K,16,1.5E-3,64.63E-3,0
K,17,1.5E-3,40E-3,0
K,18,3.25E-3,38.5E-3,0
K,19,3.25E-3,34E-3,0
K,20,4E-3,34E-3,0
K,21,4.5E-3,34E-3,0

```

K,22,4.5E-3,38.5E-3,0
K,23,5.5E-3,66E-3,0
K,24,5.5E-3,51E-3,0
K,25,4E-3,38.5E-3,0
K,26,3.25E-3,41E-3,0
K,27,4E-3,41E-3,0
K,28,2.6E-3,63.2E-3,0
K,29,6E-3,65.69E-3,0
K,30,6E-3,50E-3

!modello le linee

L,1,2
L,2,21
L,21,22
L,22,3
L,3,27
L,27,26
L,26,4
L,4,28
L,28,5
LARC,5,7,6,0.00015
L,7,8
L,8,24
L,24,9
L,9,30
L,30,10
L,10,11
L,11,12
L,12,29
L,29,13
L,13,23
L,23,14
L,14,15
L,15,16
L,16,17
L,17,18
L,18,19
L,19,20
L,20,1
L,20,21
L,20,25
L,18,25
L,25,22
L,25,27
L,18,26
L,17,4
L,16,28
L,15,5
L,14,7
L,23,8
L,8,29
L,24,12
L,12,30

!modello le aree

AL,15,16,17,42
AL,13,14,41,42
AL,12,18,40,41
AL,19,20,39,40
AL,11,39,21,38
AL,10,22,37,38
AL,9,23,36,37
AL,8,24,36,35

```

AL,25,34,35,7
AL,31,33,6,34
AL,32,33,4,5
AL,26,27,30,31
AL,29,30,32,3
AL,1,2,28,29
!divido le linee in base al numero di elementi per la discretizzazione
LESIZE,16,,,3,1
LESIZE,42,,,3,1
LESIZE,13,,,3,1
LESIZE,40,,,2,1
LESIZE,14,,,2,1
LESIZE,40,,,2,1
LESIZE,20,,,2,1
LESIZE,15,,,5,1
LESIZE,17,,,5,1
LESIZE,19,,,4,1
LESIZE,39,,,4,1
LESIZE,38,,,4,1
LESIZE,37,,,4,1
LESIZE,36,,,4,1
LESIZE,35,,,4,1
LESIZE,34,,,4,1
LESIZE,33,,,4,1
LESIZE,4,,,4,1
LESIZE,5,,,1,1
LESIZE,32,,,1,1
LESIZE,29,,,1,1
LESIZE,1,,,1,1
LESIZE,2,,,35,1
LESIZE,28,,,35,1
LESIZE,3,,,8,1
LESIZE,30,,,8,1
LESIZE,26,,,8,1
LESIZE,27,,,2,1
LESIZE,31,,,2,1
LESIZE,6,,,2,1
LESIZE,25,,,3,1
LESIZE,7,,,3,1
LESIZE,8,,,20,1
LESIZE,24,,,20,1
LESIZE,9,,,6,0.3
LESIZE,23,,,6,1
LESIZE,10,,,4,1
LESIZE,22,,,4,1
LESIZE,11,,,12,1
LESIZE,21,,,12,1
LESIZE,18,,,18,1
LESIZE,12,,,18,1
!discretizzazione del modello
MAT,Ta
TYPE,1
MSHAPE,0,2D
MSHKEY,1
AMESH,1,6,1
AMESH,8,14,1
!imposto il
!materiale
!imposto il tipo di
!elemento
!imposto la forma
!degli elementi (4
!lati)
!scelgo la mesh di
!tipo mappata
!discretizzo le aree

```

```

MSHAPE,1,2D           !genero elementi
                      !triangolari
MSHKEY,0              !scelgo la mesh di
                      !tipo libero
AMESH,7               !discretizzo le aree

!condizioni iniziali termiche
TREF,50               !assegno la
                      !temperatura alla
                      !quale le
                      !deformazioni
                      !termiche sono nulle

!carichi termici
!DL,all,,TEMP,2000   !attivo questo
                      !comando se voglio
                      !un campo di
                      !temperatura
                      !costante

!chiamo attraverso macro le tabelle con i carichi termici
*USE,temp_kp.mac      !imposto i vincoli
*USE,tab_1.mac        termici sul bordo
DL,1,,TEMP,%tab1%    dell'oggetto
*USE,tab_2.mac
DL,8,,TEMP,%tab2%
*USE,tab_3.mac
DL,1,,TEMP,%tab3%
*USE,tab_4.mac
DL,1,,TEMP,%tab4%
!vincoli strutturali
DL,1,14,UY,0.719E-3 !impongo uno
                      !spostamento
                      !iniziale per
                      !simulare la
                      !deformazione a
                      !freddo del catodo

DL,16,1,UY,0         !vincoli sulle linee
DL,16,1,UX,0
FINISH

!SOLUTORE
/SOLU                 !entro nel
                      !processore di
                      !soluzione

ANTYPE,0              !analisi in
                      !stazionario
AUTOTS,ON             !ANSYS calcola
                      !automaticamente
                      !l'incremento del
                      !tempo
TOFFST,273.15        !specifico lo
                      !scostamento della
                      !temperatura !dallo
                      !0 assoluto: le
                      !temperature
                      !precedenti vanno
                      !esprese tutte in
                      !°C
NSUBST,100,100,100  !controllo del
                      !numero dei substep

```

```

OUTRES,ALL,ALL                                !scrittura di tutti
                                                !i risultati nel
                                                !database
TIME,1                                         !tempo totale
                                                !dell'analisi
SAVE,,,ALL                                    !salvo i risultati
SOLVE                                         !lancio la soluzione
SAVE,ALL                                      !salvo i risultati
FINISH                                        !uscita dal
                                                !processore

```

Di seguito viene inserito un esempio di definizione di tabella per l'assegnazione dei vincoli di temperatura sui bordi del catodo.

```

!inserisco la tabella con i valori di temperatura da assegnare

*DIM,tab1,TABLE,11,1,1,Y,,,0                !creo la tabella
tab1(1,0)=0                                  !assegno ad ogni
tab1(1,1)=1102.7                             cella il valore
                                                della coordinata e
                                                della temperatura

tab1(2,0)=0.0041
tab1(2,1)=1164.0

tab1(3,0)=0.0082
tab1(3,1)=1297.9

tab1(4,0)=0.0123
tab1(4,1)=1421.7

tab1(5,0)=0.0164
tab1(5,1)=1508.0

tab1(6,0)=0.0205
tab1(6,1)=1573.0

tab1(7,0)=0.0246
tab1(7,1)=1619.9

tab1(8,0)=0.0827
tab1(8,1)=1657.3

tab1(9,0)=0.0328
tab1(9,1)=1695.8

tab1(10,0)=0.0369
tab1(10,1)=1724.7

tab1(11,0)=0.041
tab1(11,1)=1748.4

```

Per l'assegnazione della temperatura ad un keypoint invece si usa il comando:

```
DK,1,TEMP,1103.59
```

D.4. Elaborazione dei risultati

Vengono ora riportati alcuni codici APDL relativi al processore di analisi dati (*post-processor*). In particolare gli esempi riguardano la definizione di un andamento di temperatura lungo un percorso definito (*path*) e la stampa in un documento di testo delle temperature nodali su alcune entità. Durante la tesi per l'elaborazione di questi dati si è poi fatto ricorso a Microsoft® Excel. Si ricorda che per scrivere i dati in un documento Ansys® accetta solo il codice se caricato col comando “*Read Input From...*”, altrimenti, se per esempio si copiano le stringhe nella barra di esecuzione, compariranno messaggi di errore ed il file finale non sarà scritto.

```
FINISH                                     !entro nel
/POST1                                    !post-processore
!selezione delle temperature dei nodi giacenti su un'area
ASEL,S,,45                                !seleziono l'area
NSLA,S,1                                  !selezioni i nodi
                                           !collegati all'area
*GET,ndnodi,NODE,0,COUNT                  !creo un vettore
*GET,ndnodi,NODE,0,COUNT                  !definisco le
                                           !dimensioni del
                                           !vettore
nn=0                                       !creo una variabile
*DO,j,1,ndnodi                            !ciclo in cui
    nn=NDNEXT(nn)                         !assegno al vettore
    *GET,ntemp,NODE,nn,TEMP                !numero del nodo e
    tcath(j,1)=nn                         !temperatura nodale
    tcath(j,2)=ntemp
*ENDDO
ALLSEL                                     !seleziono tutto
*CFOPEN,t_cath,dat                        !apro un documento
*VWRITE,'node','Temp [°C] '               !di testo in cui
%C%10x%C                                  !scrivo il vettore
*VWRITE,tcath(1,1),tcath(1,2)
%2x%i%15x%e
*CFCLOSE

FINISH                                     !entro nel
/POST1                                    !post-processore
!definizione del path: temperatura vs distanza radiale sul catodo
ALLSEL                                     !seleziono tutto
PATH,t_rad_cath,2,60,60                  !definisco nome e
                                           !parametri del path
PPATH,1,,-0.3160000E-01,-0.6E-02,0      !definisco il path
                                           !dalle coordinate
                                           !(primo punto)
PPATH,2,,-0.3160000E-01,0.6E-02,0       !definisco il path
                                           !dalle coordinate
                                           !(secondo punto)
PDEF,t_rad_cath,TEMP                     !definisco la
                                           !variabile da
                                           !scrivere nel path
!PLPATH,t_rad_cath                       !stampo il grafico
                                           !sulla schermata
                                           !(opzionale)
```

```

!PRPATH,t_rad_cath                                !stampo la lista dei
                                                    !punti ottenuti
                                                    !(opzionale)
ALLSEL                                             !seleziono tutto
PAGET,t_rad_cath, TABLE                         !creo un vettore con
                                                    !i dati del path
*CFOPEN,t_rad_cath,dat,,APPEND                   !apro il file dei
                                                    !risultati
*VWRITE,'t_rad_cath'                              !imposto il titolo
%C
*VWRITE,'R [m]','Temp [°C]'                       !imposto i nomi dei
                                                    !parametri

%C%10x%C%17x%C
*VWRITE,t_rad_cath(1,4),t_rad_cath(1,5)          !scrivo i dati dal
                                                    !vettore selezionato

%2x%f%15x%e
*CFCLOS                                           !chiudo il file dei
                                                    !risultati

FINISH

```

D.5. Codice Matlab® per il calcolo delle deformazioni sulla faccia del catodo

Viene presentato un esempio del codice per il calcolo automatico delle deformazioni della frontale del catodo ad alta temperatura.

Naturalmente il programma dovrà fare riferimento ai file delle fotografie, che dovranno essere presenti nella cartella di lavoro e rinominati secondo il valore del parametro I_{LINE} del momento in cui sono state rilevate. La gestione dei filtri per l'elaborazione delle immagini, in particolare per quanto riguarda i parametri di soglia e la selezione dell'area della foto di interesse deve essere regolata manualmente per ogni serie di misura. Le foto devono essere in binco e nero, altrimenti va aggiunto un comando di conversione.

In Matlab®, il simbolo che indica che una stringa rappresenta un commento e che quindi non viene eseguito dal programma è “%”.

```

%programma per il calcolo

%comandi di pulitura ed avvio
clear all;
close all;
clc;

%Fase 1: carico la figura di taratura ed evidenzio i bordi
%imread carica l'immagine in una matrice
I_tar = imread('tar1.jpg');
%taglio la matrice: i valori vanno impostati in modo opportuno
Icut_tar = I_tar(1380:1780,1920:2070);
%matrice_taglio = matrice(Iriga,Iicolonna)
%visualizzo l'immagine ritagliata
figure(); colormap(gray(256)); image(Icut_tar);

%filtraggio e cancellazione bordi inutili su figura di taratura

```

```

%filtro di Canny
fil_canny = edge(Icut_tar,'canny',[]);
%filtro di Sobel
[fil_sobel_or,thres] = edge(fil_canny,'sobel',0.2,'horizontal');
%cancello tutte le aree più piccole
fil_aree_tar = bwareaopen(fil_sobel_or, 150);
%ritaglio la zona di interesse
fil_aree_tar(100:350,:)=0;%tolgo i bordi che non mi interessano
%visualizzo l'immagine filtrata
figure(), imshow(fil_aree_tar);

% i colonne (orizzontale)
% j righe (verticale)
%il filtro derivativo (Sobel) mi costringe a cercare il bordo tra i due
%contorni, perciò uso una serie di condizioni per calcolare la coordinata
index=0;
for i = 70:100 %scelgo un'intervallo di colonne
    index = index +1;;
    for j = 2:200 % scelgo un'intervallo di righe (limite superiore)
        if (fil_aree_tar(j,i) == 0)
            if (fil_aree_tar(j-1,i) == 1)
                if (fil_aree_tar(j+1,i) == 1)
                    ply = j;
                end
            end
        end
    end
    for j = (201:401)
        if (fil_aree_tar(j,i) == 0)
            if (fil_aree_tar(j-1,i) == 1)
                if (fil_aree_tar(j+1,i) == 1)
                    p2y = j;
                    dist = abs (p2y - ply);
                    A(index) = dist;
                end
            end
        end
    end
end
end

%per imperfezioni nell'immagine, alcuni valori di A possono essere nulli:
%non li considero
l1 = length(A);
av = 0;
cont = 0;
for x = 1:l1
    if A(x) > 0
        av = av + A(x);
        cont = cont + 1;
    end
end
av1 = av/cont;

% indico il file di input con le misure delle dimensioni del catodo
par = load('mis_cath.txt','rt');
par1 = mean(par);
%calcolo il fattore di scala
scale_factor = par1/av1;

%termine della Fase 1 di taratura
%fase intermedia: calcolo della deformazione a freddo

```

```

%non è necessaria se il catodo non ha subito deformazioni plastiche
%filtro l'immagine iniziale per evidenziare i bordi verticali
[fil_sobel_vt,thres] = edge(fil_canny,'sobel',0.33,'vertical');
%pulizia l'immagine
fil_aree_vt = bwareaopen(fil_sobel_vt, 50);
%tolgo i bordi che non mi interessano
fil_aree_vt(:,1:25)=0;
fil_aree_vt(:,30:151)=0;
fil_aree_vt(1:25,:)=0;
%figure(), imshow(fil_aree_vt);
%ho evidenziato il bordo della faccia del catodo
j = 200 %scelgo una riga orizzontale
%cerco il bordo verticale analizzando l'immagine
for i=(2:150)
    if (fil_aree_vt(j,i) == 0)
        if (fil_aree_vt(j,i+1) == 1)
            if (fil_aree_vt(j,i-1) == 1)
                plx = i;
            end
        end
    end
end

%filtro l'immagine iniziale per evidenziare i bordi verticali
indeformati
[fil_sobel_f,thres] = edge(fil_canny,'sobel',0.33,'vertical');
%pulizia l'immagine
fil_aree_f = bwareaopen(fil_sobel_f, 100);
%tolgo i bordi che non mi interessano
fil_aree_f(:,1:25)=0;
fil_aree_f(:,45:151) = 0;
fil_aree_f(:,1:35) = 0;
fil_aree_f(1:40,:) = 0;
figure(), imshow(fil_aree_f);
%ho evidenziato il bordo della faccia del catodo

%cerco il bordo verticale analizzando l'immagine
for i=(2:150)
    if (fil_aree_f(j,i-1) == 1)
        pfx = i;
    end
end

%calcolo la deformazione in pixel e mm
d_pix_f = abs(pfx - plx);
d_f = scale_factor*d_pix_f;

%Fase 2: confronto fra immagini di catodo freddo e riscaldato
%filtro l'immagine iniziale per evidenziare i bordi verticali
[fil_sobel_vt,thres] = edge(fil_canny,'sobel',0.33,'vertical');
%figure(), imshow(fil_sobel_vt);
fil_aree_vt = bwareaopen(fil_sobel_vt, 50);%pulizia l'immagine
fil_aree_vt(:,1:25)=0;%tolgo i bordi che non mi interessano
fil_aree_vt(:,30:151)=0;
fil_aree_vt(1:25,:)=0;
%figure(), imshow(fil_aree_vt);
%ho evidenziato il bordo della faccia del catodo

%cerco il bordo verticale analizzando l'immagine
for i=(2:150)
    if (fil_aree_vt(j,i) == 0)

```

```

        if (fil_aree_vt(j,i+1) == 1)
            if (fil_aree_vt(j,i-1) == 1)
                plx = i;
            end
        end
    end
end
%scrivo in plx la coordinata del pixel nell'immagine indeformata
%se ho calcolato la deformazione a freddo conosco già plx

index1 = 1 %indice per la scrittura dei risultati

%creo un ciclo per caricare le immagini automaticamente (immagini vanno
nominated a seconda della I_LINE a cui è stata fatta la rilevazione)

for index1= 1:22
    ampl = (index1+15)*10;
    %carico l'immagine della deformata
    immagine = strcat(num2str(ampl),'.jpg');
    I_amp = imread(immagine);
    figure(1); colormap(gray(256)); image(I_amp);
    I_amp_cut = I_amp(1380:1780,1920:2070);
    figure(2); colormap(gray(256)); image(I_amp_cut);

    %filtro l'immagine per evidenziare i bordi verticali
    fil_canny = edge(I_amp_cut,'canny',[]);
    figure(3), imshow(fil_canny);
    [fil_sobel,thres] = edge(fil_canny,'sobel',[],'vertical');
    %figure(4), imshow(fil_sobel);
    fil_aree = bwareaopen(fil_sobel, 200);%pulizia l'immagine
    fil_aree(:,25:151)=0;%tolgo i bordi che non mi interessano
    %figure(5), imshow(fil_aree);
    %ho evidenziato il bordo della faccia del catodo

    %confronto fil_aree_vt e fil_aree
    for i=(2:150)
        if (fil_aree(j,i) == 0)
            if (fil_aree(j,i+1) == 1)
                if (fil_aree(j,i-1) == 1)
                    p2x = i;
                end
            end
        end
    end
    end
    d_pix = abs(p2x-plx);
    amp(index1) = ampl;
    D(index1) = scale_factor*d_pix;
end

% scrivo i risultati ottenuti
data_1 = fopen('deformazioni.txt','w');
fprintf(data_1,'%s\t','I_LINE [A]');
fprintf(data_1,'%s\n','Deformazione [mm]');
fprintf(data_1,'%f\t',0);
fprintf(data_1,'%f\n',d_f);
for i =1:22
    fprintf(data_1,'%f\t',amp(i));
    fprintf(data_1,'%f\n',D(i));
end
fclose(data_1);
%%

```

APPENDICE E

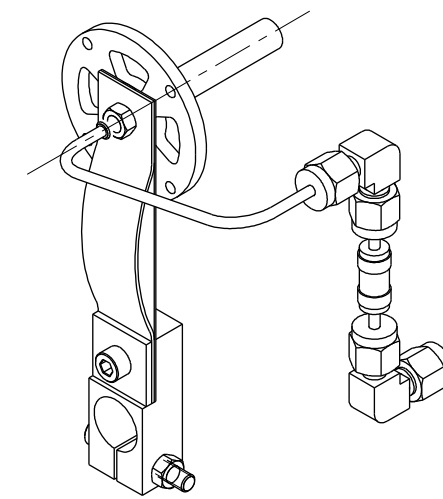
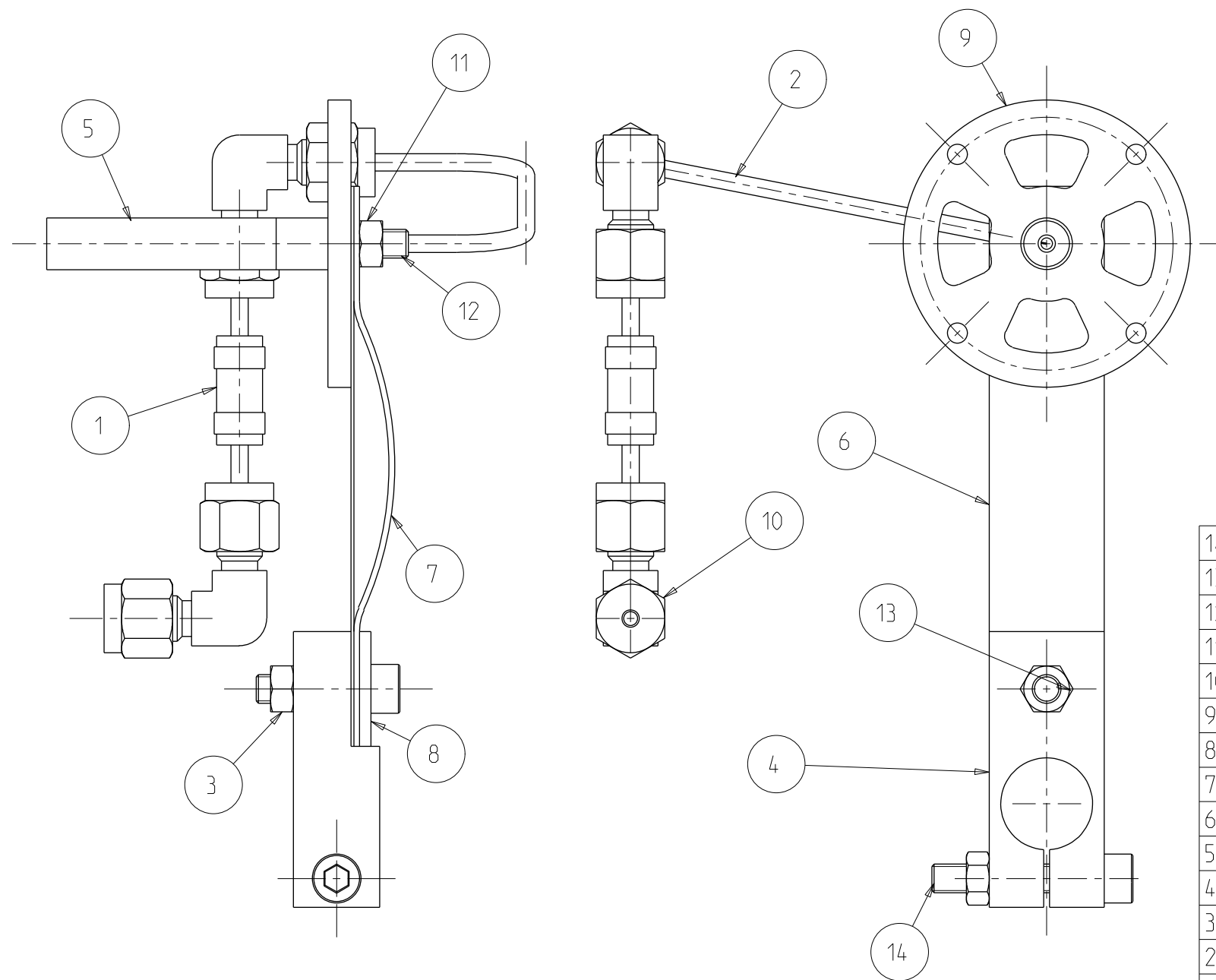
DISEGNI TECNICI DEI COMPONENTI PROGETTATI

E.1. Introduzione

In questa Appendice saranno presentati i disegni tecnici dei vari pezzi utilizzati durante le prove sulla sorgente al plasma e progettati durante lo svolgimento della tesi.

In particolare si possono osservare le tavole relative al catodo ottimizzato (ST_PI100A) e alla nuova versione di sorgente contenente i miglioramenti descritti nel Capitolo 6 (ST_PI000A).

UNI-EN 22768/1-m Tolerances for linear and angular individual tolerance indications mechanical organs "technical designs"			
<= 6	>6 <=30	>30 <=120	>120
± 0.1	± 0.2	± 0.3	± 0.5
			± 2°



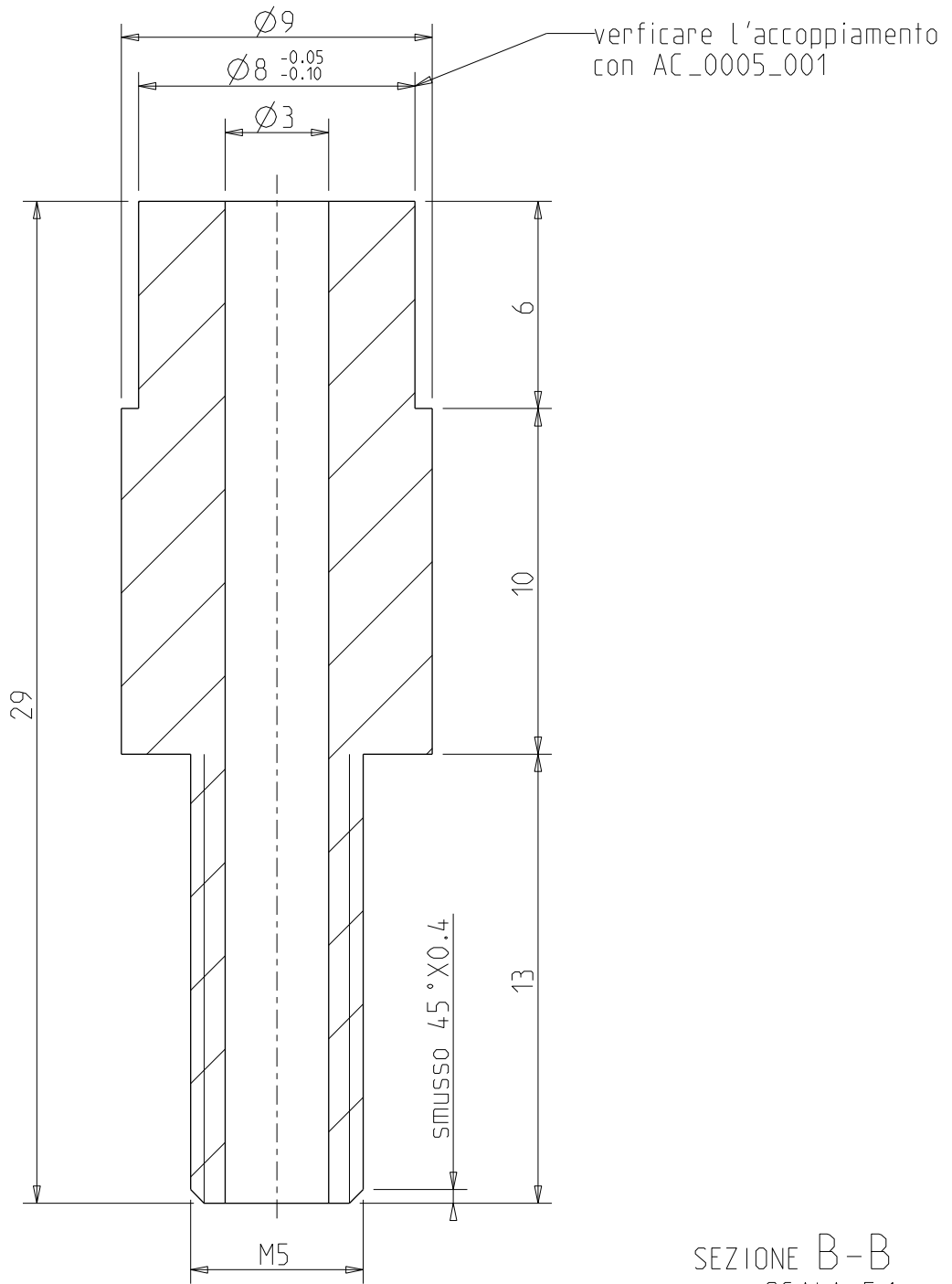
SCALA 1:2



14	DIN912_M5X30	Vite TCEI DIN 912 M5	1	STAINL_ST
13	DIN912_M5X20	Vite TCEI DIN 912 M5	1	STAINL_ST
12	AC_0005_002A	Vite di chiusura	1	TA
11	AC_0005_005	Tantalum Nut DIN 934 M5	1	TA
10	SS-3M0-9	Swagelok 90°Elbow	2	STAINL_ST
9	AC_0005_FB	Supporto bloccaggio T_LINE	1	TA
8	AC_0005_007	Ion Source Test - Thickness	1	STAINL_ST
7	AC_0005_004	Ion Source Test - Sheet 2	1	TA
6	AC_0005_003	Ion Source Test - Sheet 1	1	TA
5	AC_0005_001	Ion Source Test - Linea di trasferimento	1	TA
4	AC_0005_006	Ion Source Test - Clamp	1	CU_ETP
3	DIN934_M5	hexagonal nut DIN934 M5 - A6	2	STAINL_ST
2	AC_0005_008	Gas Transfer Tube	1	TA
1	CYB3-SW	CABURN Electrical Break	1	STAINL_ST
Pos.	Drawing N.°	Description	Q.ty	Material

Designed by: Mattia Manzolaro	Signature	Project SPES
Drawn by: Gianluca Vivian	Date 26/05/2014	Description Collegamento per test della sorgente al plasma
Material		Gen. surf. finish <input checked="" type="checkbox"/>
Treatment		Scale 1:4
Technical Drawings ISO 8015 Gen. Tol. UNI-EN 22768/2-mK		Mass [kg] Frm. A3
Drawing N° AC_0005		Rev. 0

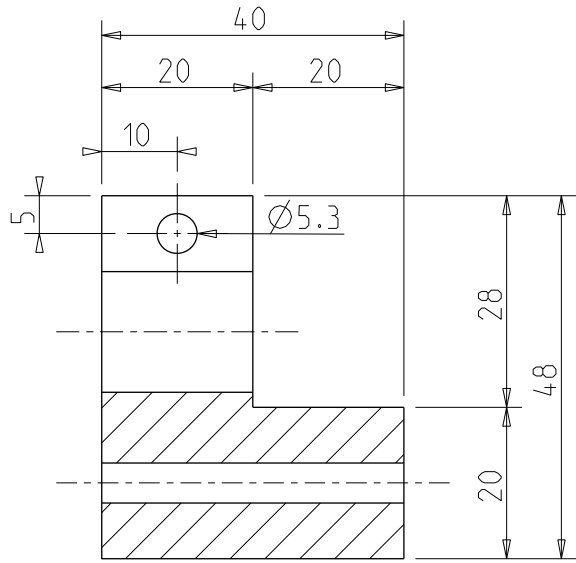
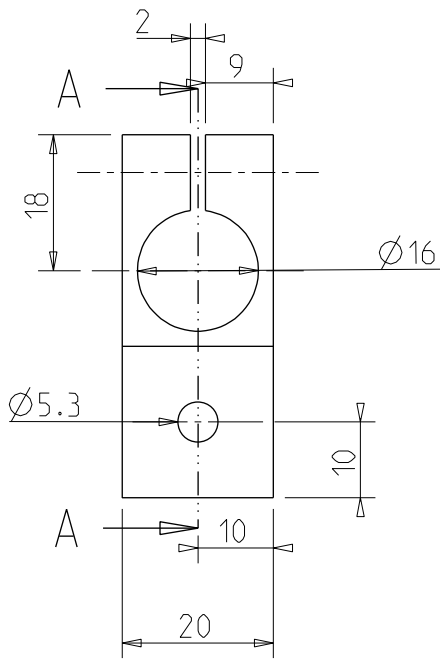
INFN Istituto Nazionale
di Fisica Nucleare
Laboratori Nazionali di Legnaro

UNI-EN 22768/1-m Tolerances for linear and angular individual tolerance indications "mechanical organs technical designs"			
<= 6	>6 <=30	>30 <=120	>120
± 0.1	± 0.2	± 0.3	± 0.5
			± 2°

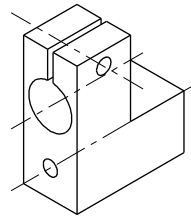


Designed by Gianluca Vivian	Signature	Project SPES
Draft by Gianluca Vivian	Date 26/05/2014	Description Vite di chiusura
 Istituto Nazionale di Fisica Nucleare Laboratori Nazionali di Legnaro	Material TA	Gen. surf. finish 1.6 
	Treatment	Scale 5:1
	Technical Drawings ISO 8015 Gen. Tol. UNI-EN 22768/2-mK	Draft code: AC_0005_002A
		Mass [kg] 0.01
		Frm. A4
		Rev. 0

UNI-EN 22768/1-m Tolerances for linear and angular individual tolerance indications "mechanical organs technical designs"			
<= 6	>6 <=30	>30 <=120	>120
± 0.1	± 0.2	± 0.3	± 0.5
			± 2°


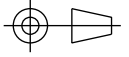


SEZIONE A-A



SCALA 1:2

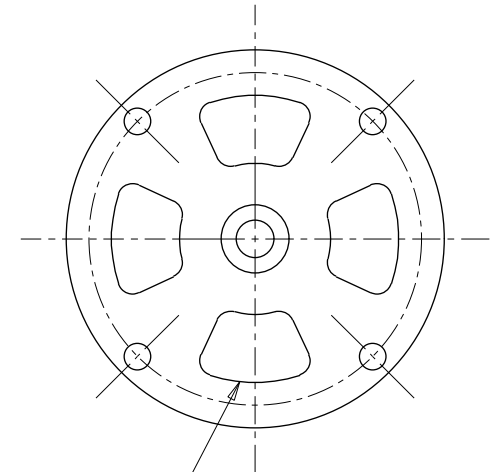
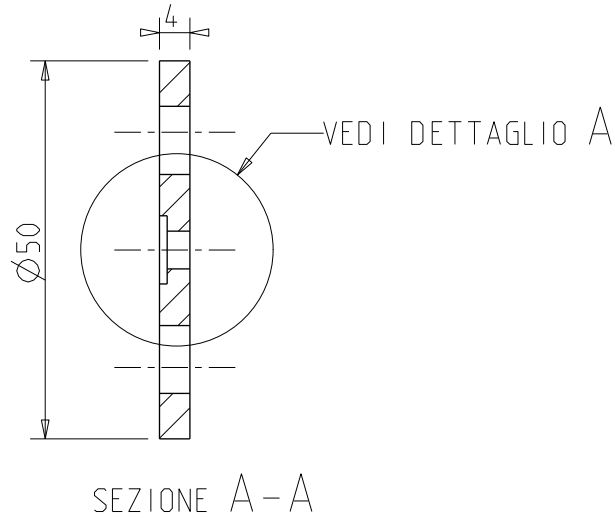
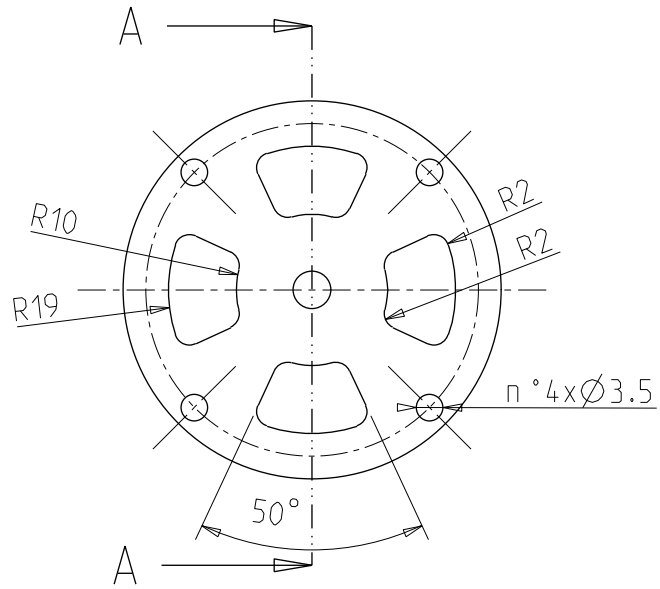
Prolunga da utilizzare in AC_0005 al posto di AC_0005_006 se necessario

Designed by Gianluca Vivian	Signature	Project SPES		
Draft by Gianluca Vivian	Date 26/05/2014	Description Morsetto elettrico modificato		
 Istituto Nazionale di Fisica Nucleare Laboratori Nazionali di Legnaro	Material CU	Gen. surf. finish 1.6		
	Treatment	Scale 1:4	Mass [kg]	Frm. A4
	Technical Drawings ISO 8015 Gen. Tol. UNI-EN 22768/2-mK	Draft code: AC_0005_006MOD		Rev.

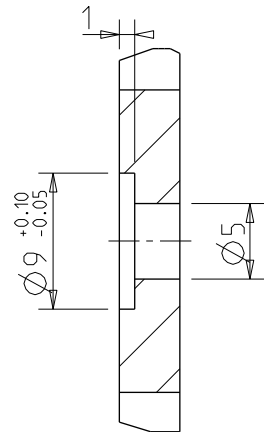
UNI-EN 22768/1-m Tolerances for linear and angular individual tolerance indications "mechanical organs technical designs"				
<= 6	>6 <=30	>30 <=120	>120	
± 0.1	± 0.2	± 0.3	± 0.5	± 2°

A

B



Serie di 4 cave per l'alleggerimento del pezzo



DETTAGLIO A
SCALA 2:1

Designed by Gianluca Vivian	Signature	Project SPES		
Draft by Gianluca Vivian	Date 26/05/2014	Description Supporto bloccaggio T_LINE		
		Material TA	Gen. surf. finish 1.6	
		Treatment	Scale 1:4	
		Technical Drawings ISO 8015 Gen. Tol. UNI-EN 22768/2-mK		Draft code: AC_0005_FB

A

B

C

1

2

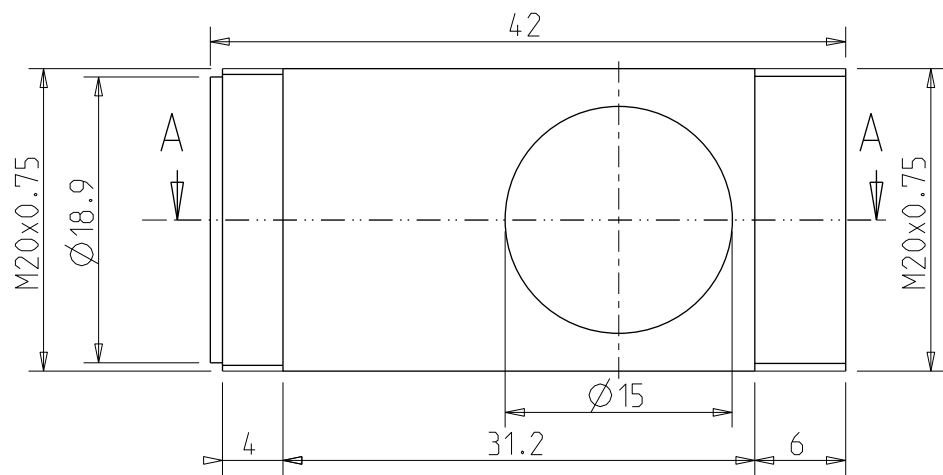
3

1

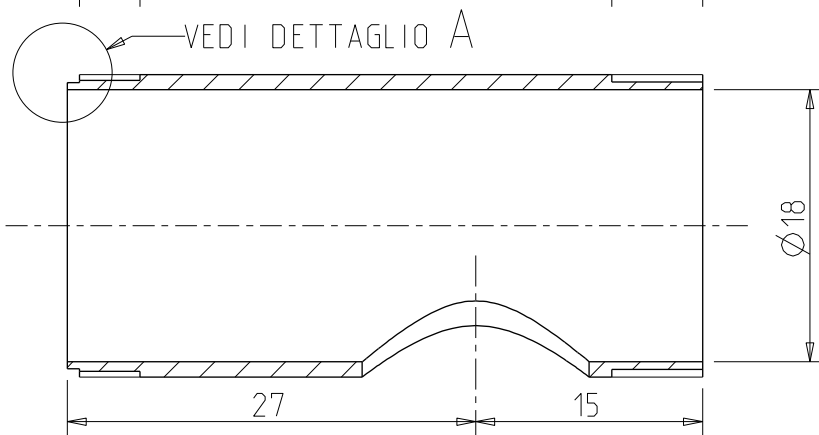
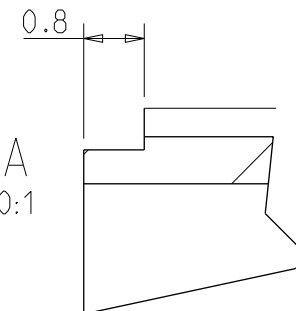
2

3

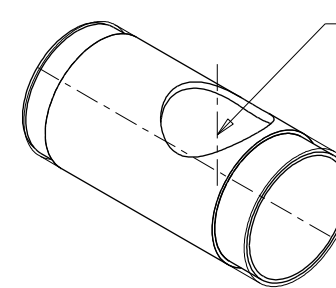
UNI-EN 22768/1-m Tolerances for linear and angular individual tolerance indications "mechanical organs technical designs"				
<= 6	>6 <=30	>30 <=120	>120	
± 0.1	± 0.2	± 0.3	± 0.5	± 2°



DETTAGLIO A
SCALA 10:1



SEZIONE A-A



Foro per l'osservazione della temperatura sul catodo non previsto nel modello originale. Lavorazione da fare in opera dopo verifica posizione post-montaggio

SCALA 1:1

Designed by Gianluca Vivian	Signature	Project SPES		
Draft by Gianluca Vivian	Date 13/05/2010	Description Camera di scarica modificata		
		Material MO	Gen. surf. finish 0.8	
		Treatment	Scale 2:1	Mass [kg] 0.02
		Technical Drawings ISO 8015 Gen. Tol. UNI-EN 22768/2-mK	Draft code: ST_PI000_004M	Frm. A4
				Rev. 0

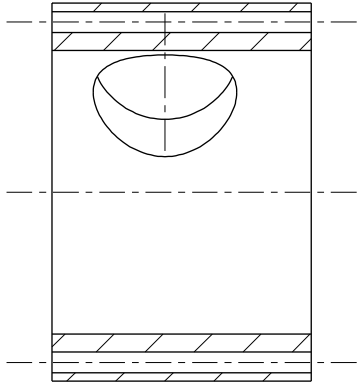
A

B

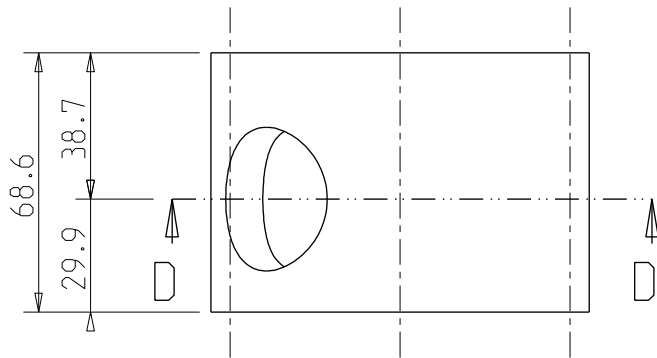
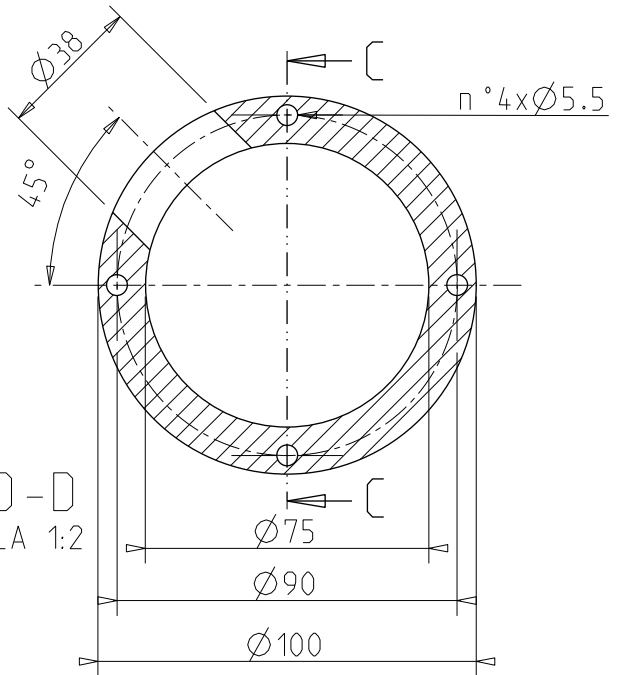
C


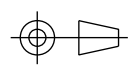
UNI-EN 22768/1-m Tolerances for linear and angular individual tolerance indications "mechanical organs technical designs"			
<= 6	>6 <=30	>30 <=120	>120
± 0.1	± 0.2	± 0.3	± 0.5
			± 2°

SEZIONE C-C

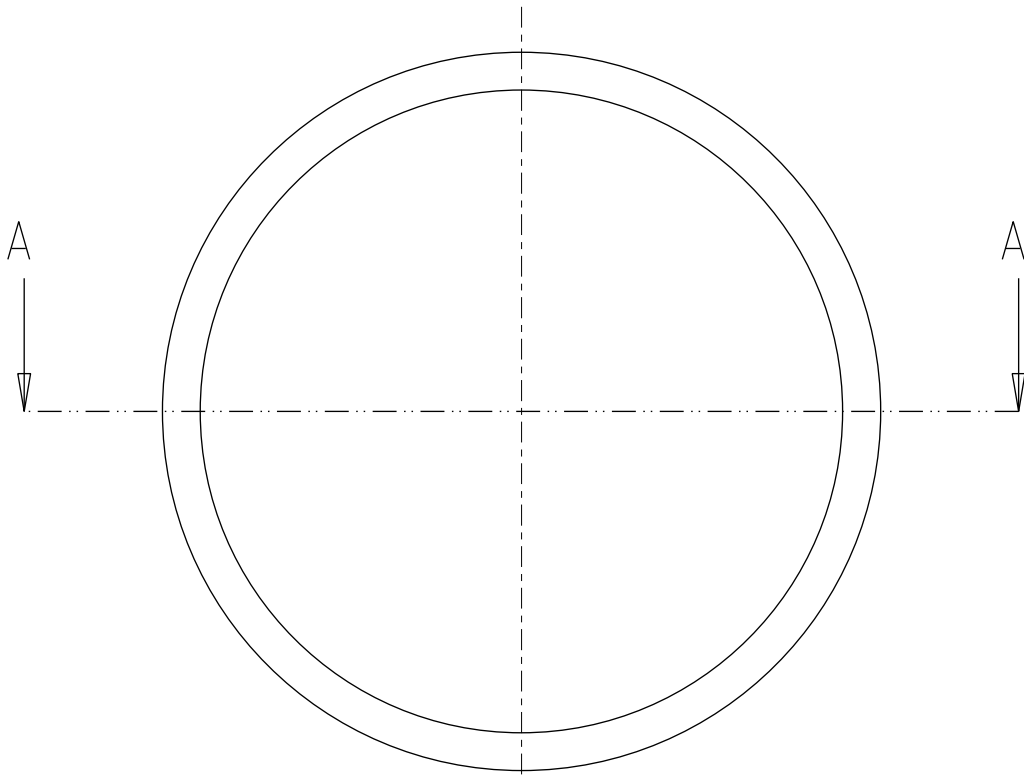


SEZIONE D-D
SCALA 1:2



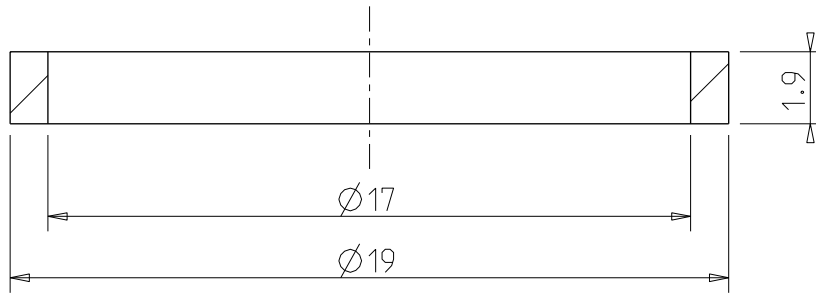
Designed by Gianluca Vivian	Signature	Project SPES		
Draft by Gianluca Vivian	Date 26/05/2014	Description Distanziale di supporto per l'osservazione della temperatura		
 Istituto Nazionale di Fisica Nucleare Laboratori Nazionali di Legnaro	Material SS316L	Gen. surf. finish 1.6		
	Treatment	Scale 1:2	Mass [kg]	Frm. A4
	Technical Drawings ISO 8015 Gen. Tol. UNI-EN 22768/2-mK	Draft code: ST_P1000_008		Rev.



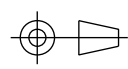
UNI-EN 22768/1-m Tolerances for linear and angular individual tolerance indications "mechanical organs technical designs"			
<= 6	>6 <=30	>30 <=120	>120
± 0.1	± 0.2	± 0.3	± 0.5
			± 2°



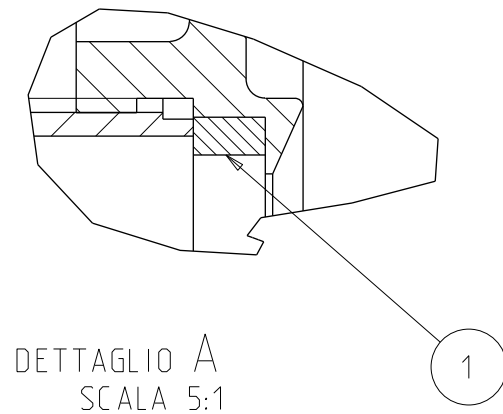
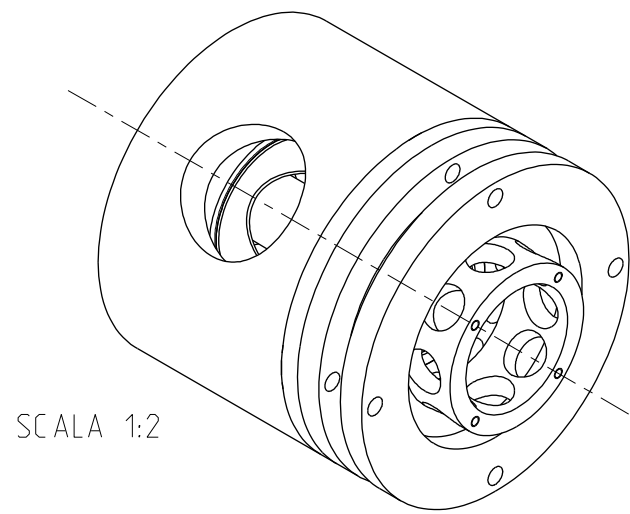
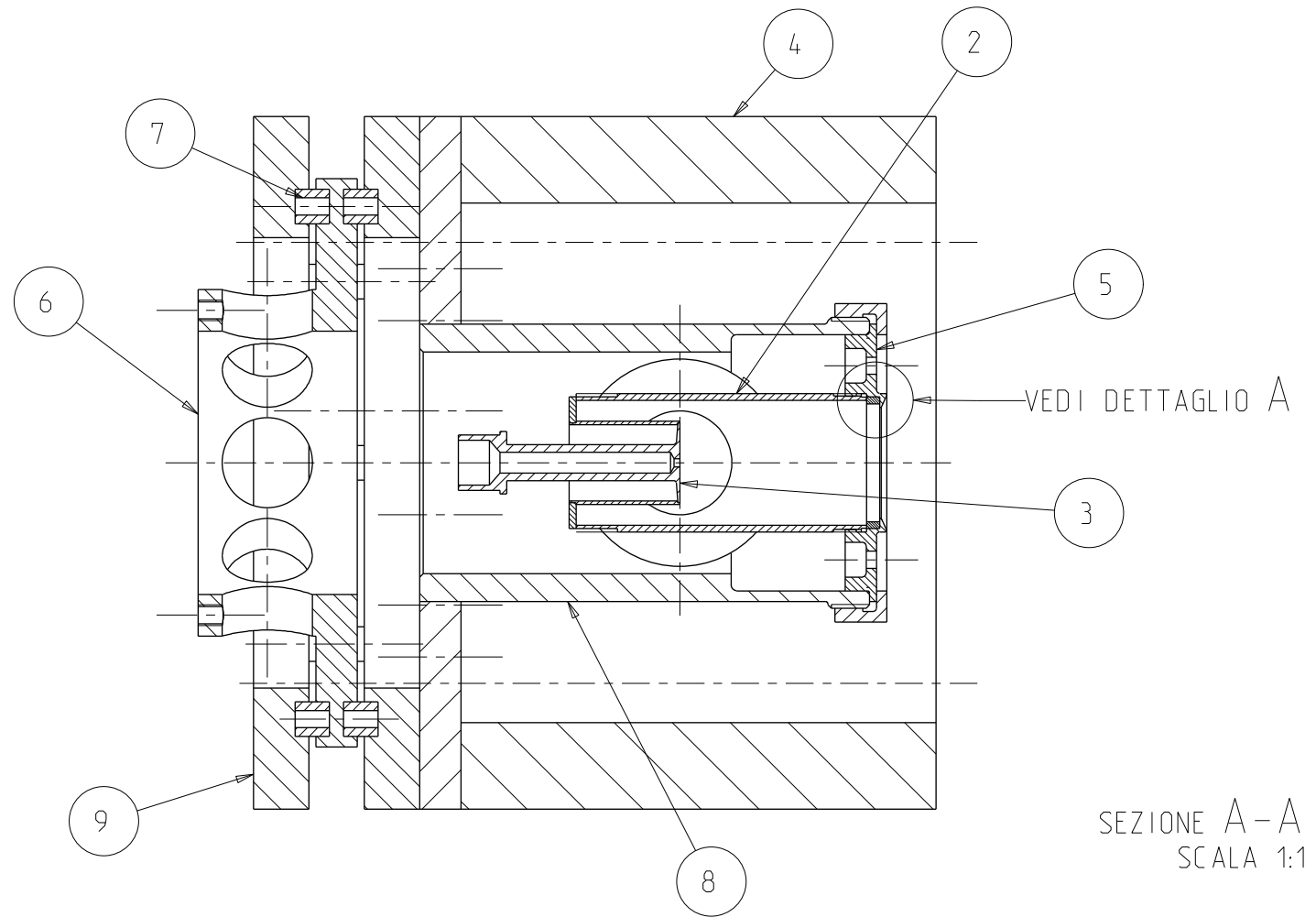
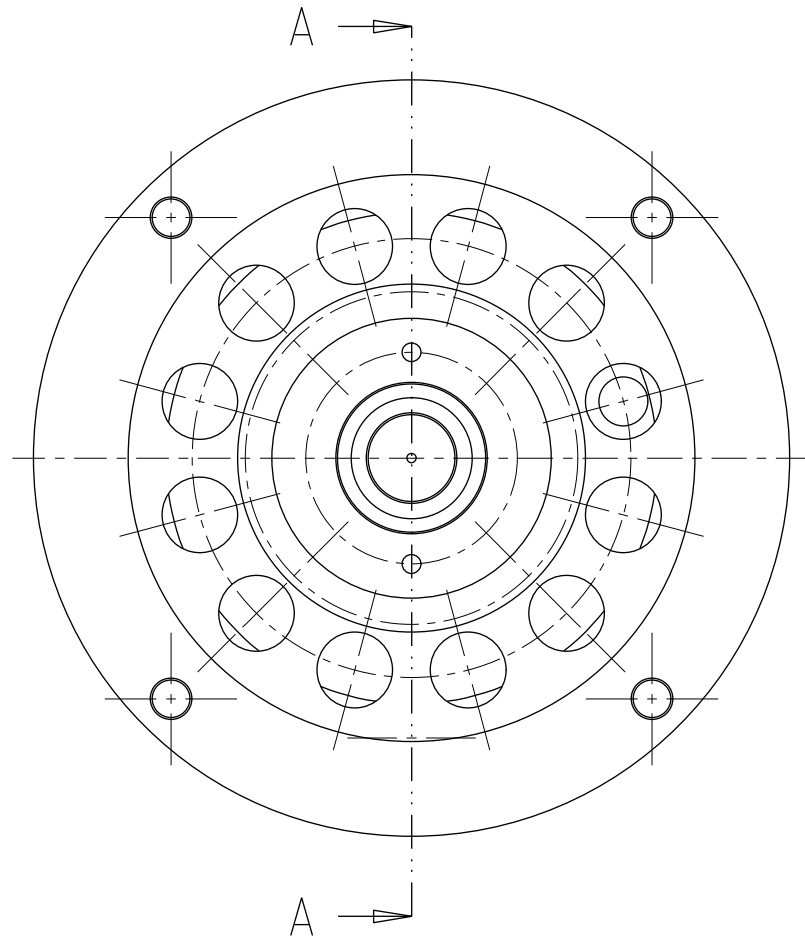
SCALA 5:1

SEZIONE A-A




Designed by Gianluca Vivian	Signature	Project SPES		
Draft by Gianluca Vivian	Date 26/05/2024	Description Anello distanziatore		
 Istituto Nazionale di Fisica Nucleare Laboratori Nazionali di Legnaro	Material MO	Gen. surf. finish 1.6 		
	Treatment	Scale 5:1	Mass [kg]	Frm. A4
	Technical Drawings ISO 8015 Gen. Tol. UNI-EN 22768/2-mK	Draft code: ST_P1000_009		Rev.

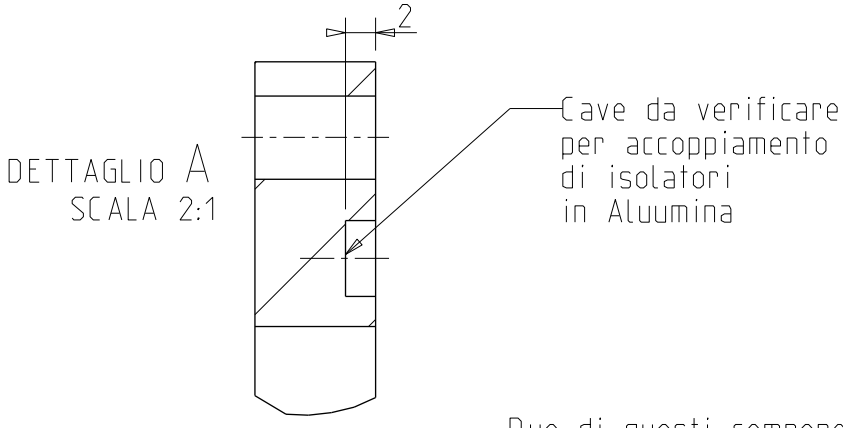
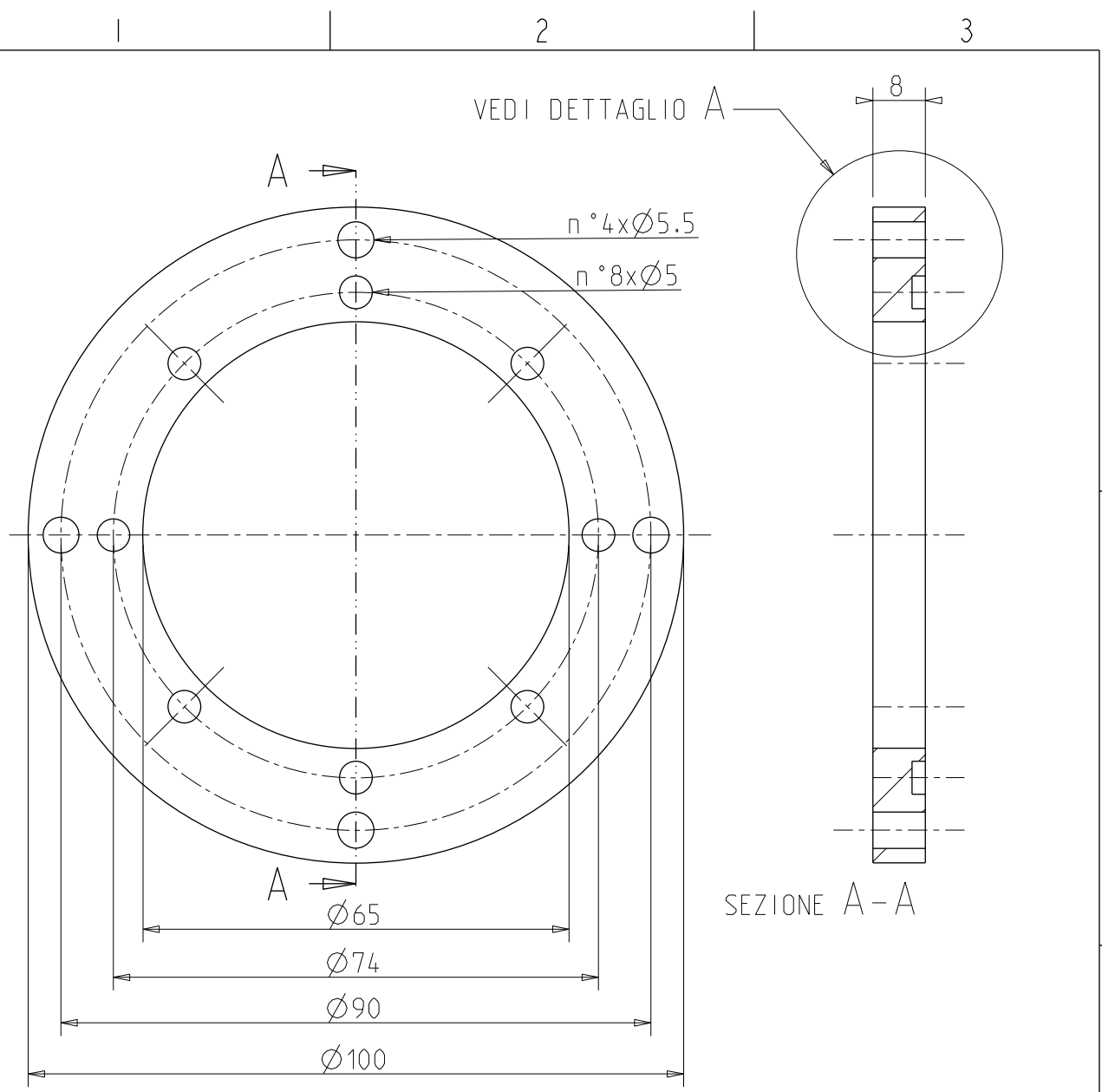
UNI-EN 22768/1-m Tolerances for linear and angular individual tolerance indications mechanical organs "technical designs"			
<= 6	>6 <=30	>30 <=120	>120
± 0.1	± 0.2	± 0.3	± 0.5
			± 2°



Pos.	Drawing N.°	Description	Q.ty	Material
9	ST_PI000_VF1	Supporto per bloccaggio T_LINE	2	SS304L
8	ST_PI400P	Sistema di supporto	1	
7	ST_PI000_002	Isolatore	16	AL203
6	ST_PI000_VF2	Flangia per bloccaggio T_LINE	1	SS304L
5	ST_PI300_001A	Flangia di chiusura	1	TA
4	ST_PI000_008	Distanziale di supporto per l'osservazione della temperatura	1	SS316L
3	ST_PI100	Catodo	1	
2	ST_PI000_004M	Camera di scarica modificata	1	MO
1	ST_PI000_009	Anello distanziatore	1	MO

Designed by: Gianluca Vivian	Signature	Project SPES
Drawn by: Gianluca Vivian	Date 26/05/2014	Description Configurazione PIS per osservazione catodo
Material		Gen. surf. finish <input checked="" type="checkbox"/>
Treatment		Scale 1:1
Technical Drawings ISO 8015 Gen. Tol. UNI-EN 22768/2-mK		Drawing N° ST_PI000_PROVA
 Istituto Nazionale di Fisica Nucleare Laboratori Nazionali di Legnaro		Mass [kg] Frm. A3 Rev.

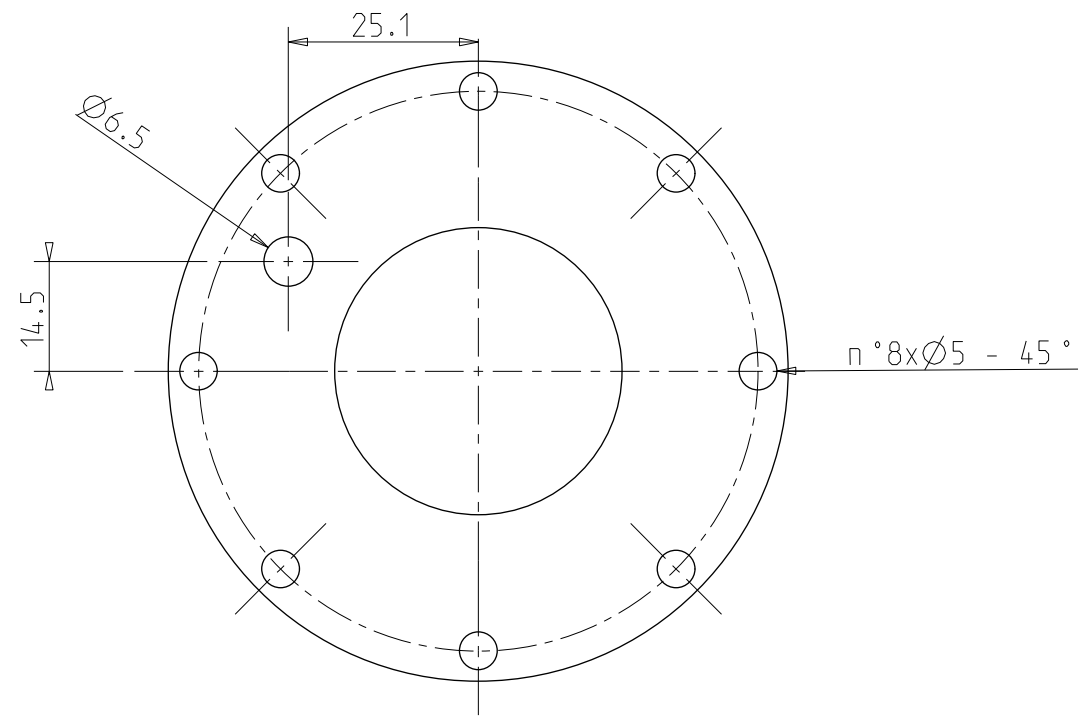
UNI-EN 22768/1-m Tolerances for linear and angular individual tolerance indications "mechanical organs technical designs"		
<= 6	> 6 <= 30	> 30 <= 120
± 0.1	± 0.2	± 0.3
		± 0.5
		± 2°



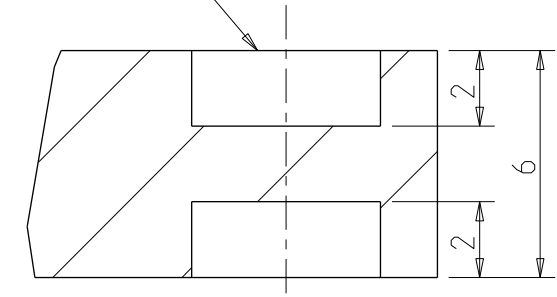
Due di questi componenti per montare il sistema

Designed by Gianluca Vivian	Signature	Project SPES	
Draft by Gianluca Vivian	Date 26/05/2014	Description Supporto per bloccaggio T_LINE	
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare Laboratori Nazionali di Legnaro	Material SS304L	Gen. surf. finish 1.6	
	Treatment FALSO	Scale 1:4	
	Technical Drawings ISO 8015 Gen. Tol. UNI-EN 22768/2-mK	Draft code: ST_P1000_VF1	
		Mass [kg]	Frm. A4
			Rev.

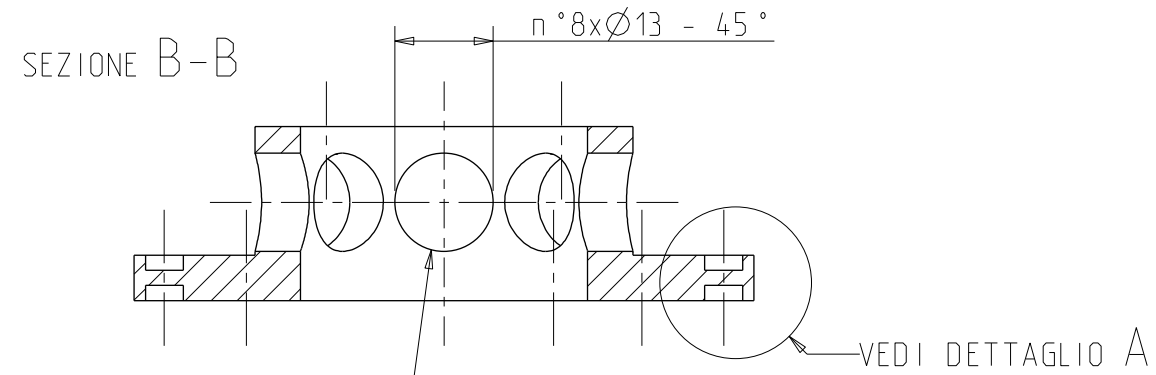
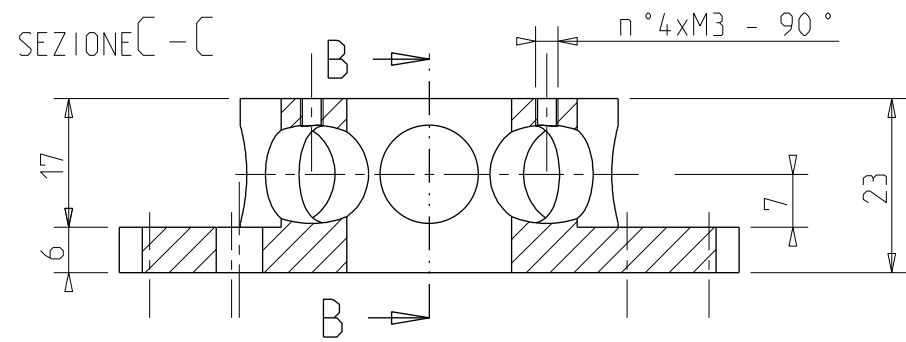
UNI-EN 22768/1-m Tolerances for linear and angular individual tolerance indications mechanical organs technical designs	
<= 6	> 6
± 0.1	± 0.2
± 0.3	± 0.5
> 30 <= 120	> 120
± 0.3	± 0.5
± 2°	± 2°



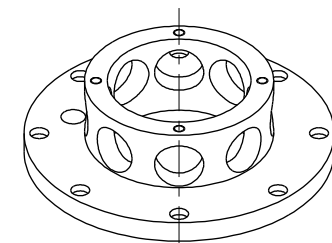
Cave da controllare per alloggiamento di isolatori in Allumina



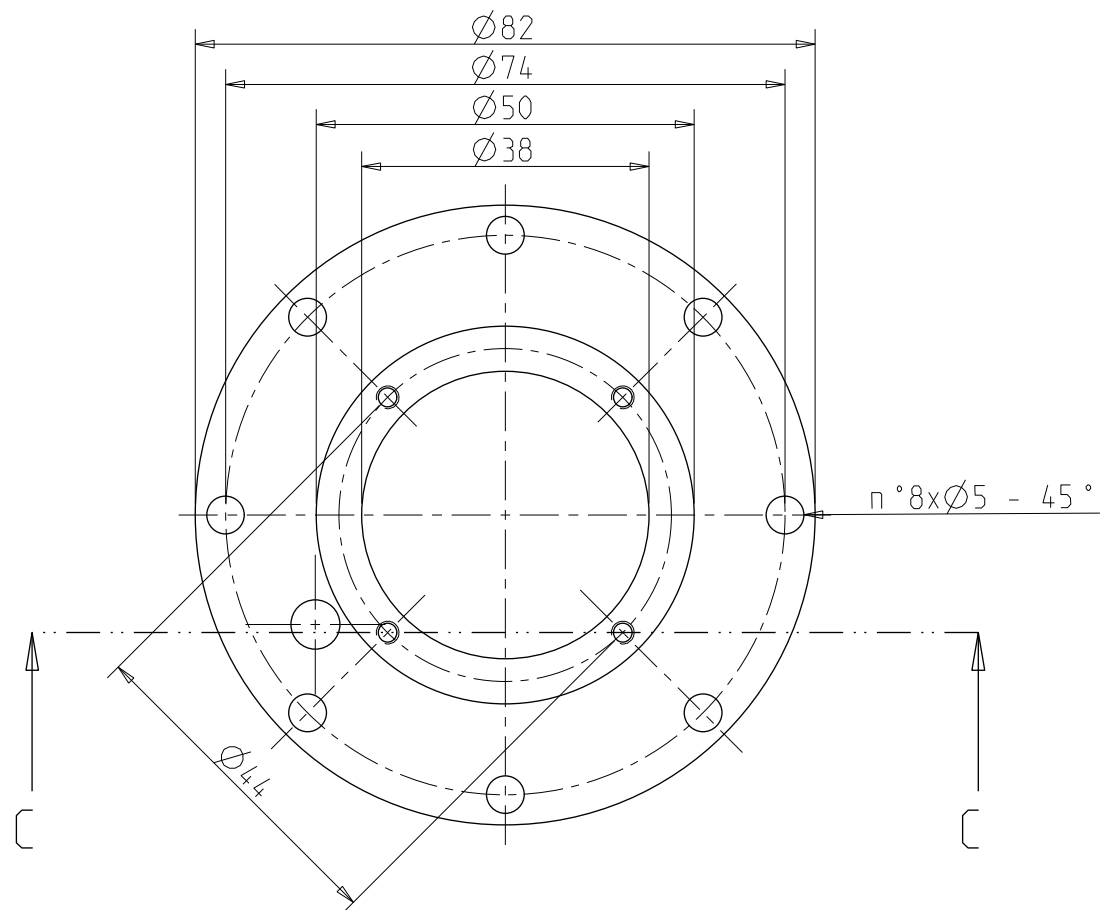
DETTAGLIO A
SCALA 5:1




Serie di 8 fori per alleggerimento e per garantire il vuoto

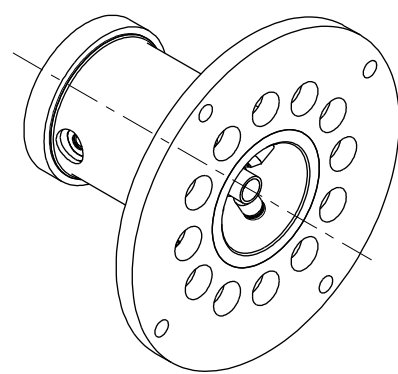
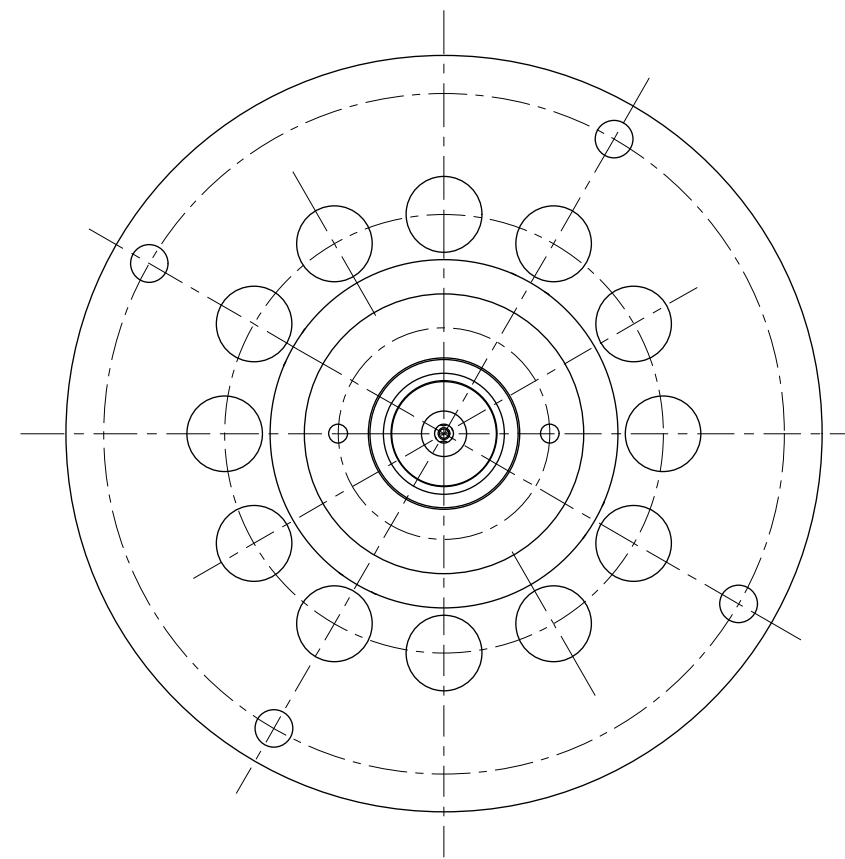
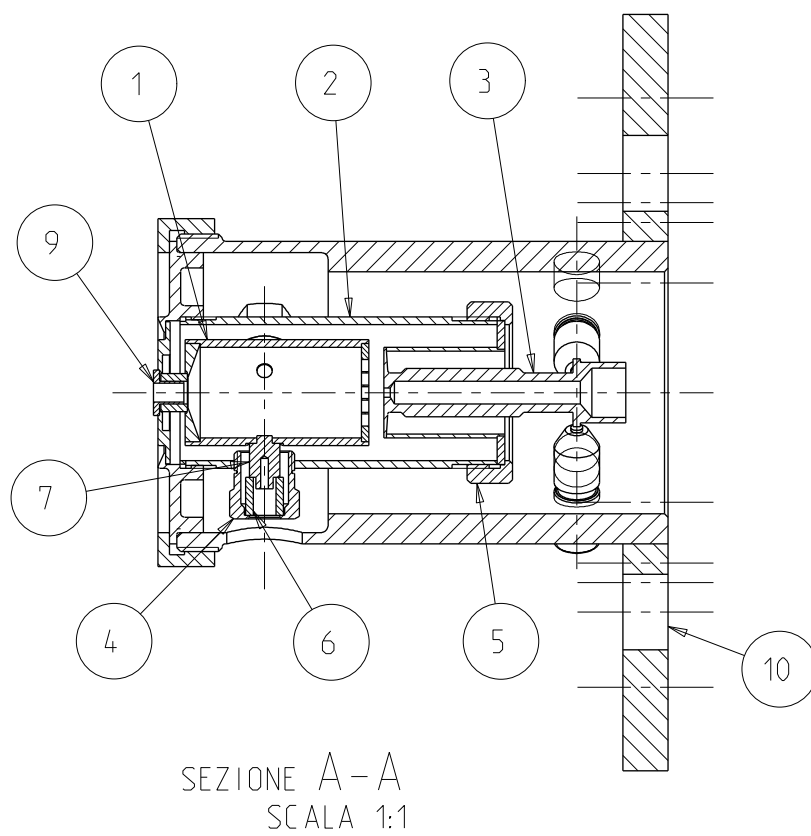
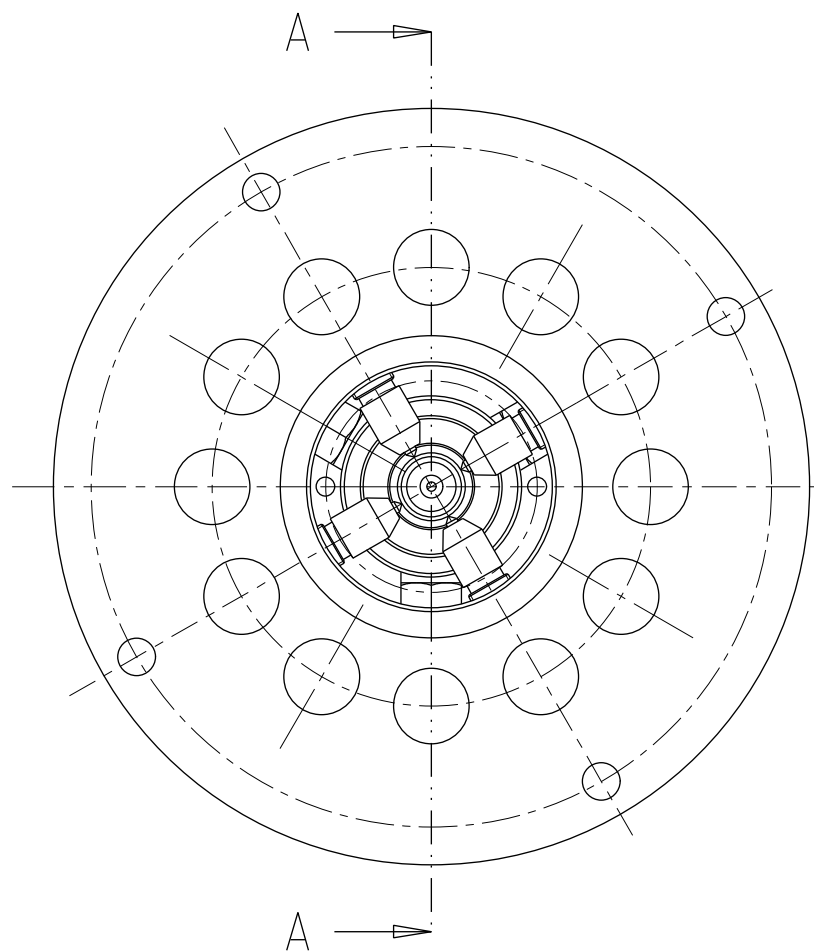


SCALA 1:2



Designed by: Gianluca Vivian	Signature	Project SPES
Drawn by: Gianluca Vivian	Date 26/05/2014	Description Flangia per bloccaggio T_LINE
 Istituto Nazionale di Fisica Nucleare Laboratori Nazionali di Legnaro	Material SS304L	Gen. surf. finish 1.6
	Treatment	Scale 1:4
	Technical Drawings ISO 8015 Gen. Tol. UNI-EN 22768/2-mK	Drawing N° ST_PI000_VF2
		Mass [kg] Frm. A3
		Rev.

UNI-EN 22768/1-m Tolerances for linear and angular individual tolerance indications mechanical organs "technical designs"			
<= 6	>6 <=30	>30 <=120	>120
± 0.1	± 0.2	± 0.3	± 0.5
			± 2°




SCALA 1:2

10	ST_PI400	Sistema di supporto	1	
9	ST_PI300	Sistema di estrazione	1	
8	ST_PI500	Sistema di bloccaggio radiale del catodo	4	
7	ST_PI000_001	Puntale di supporto dell'anodo	3	MO
6	ST_PI000_002	Isolatore	3	AL203
5	ST_PI000_005	Ghiera di supporto del catodo	1	MO
4	ST_PI000_003	Dado di supporto dell'anodo	3	MO
3	ST_PI100A	Catodo ottimizzato per sorgente di ionizzazione al plasma	1	
2	ST_PI000_004	Camera di scarica	1	MO
1	ST_PI200A	Camera di anodo	1	
Pos.	Drawing N.°	Description	Q.ty	Material

Designed by: CERN/Manzolaro/Monetti/Vivian	Signature	Project SPES
Drawn by: Gianluca Vivian	Date 26/05/2014	Description Sorgente di ionizzazione al plasma

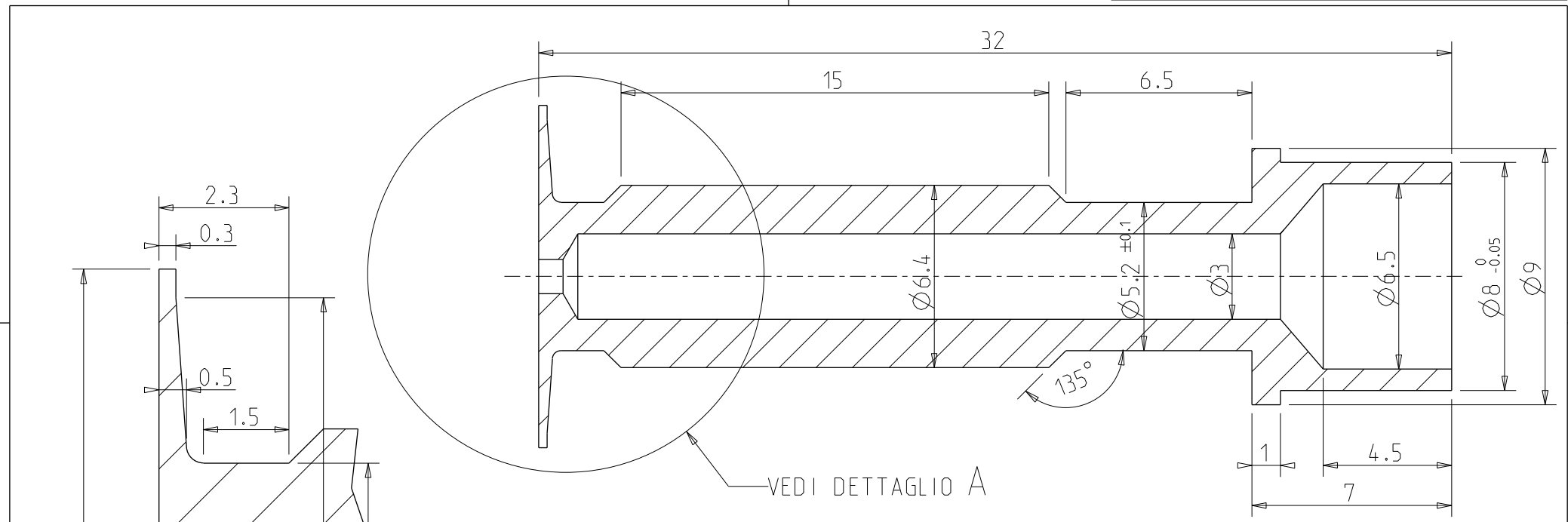


Material	Gen. surf. finish	
Treatment	Scale 1:4	
Technical Drawings ISO 8015 Gen. Tol. UNI-EN 22768/2-mK	Drawing N° ST_PI000A	Mass [kg] 0.00 Frm. A3 Rev. 0

UNI-EN 22768/1-m Tolerances for linear and angular individual tolerance indications "mechanical organs technical designs"				
<= 6	>6 <=30	>30 <=120	>120	
± 0.1	± 0.2	± 0.3	± 0.5	± 2°

A

B



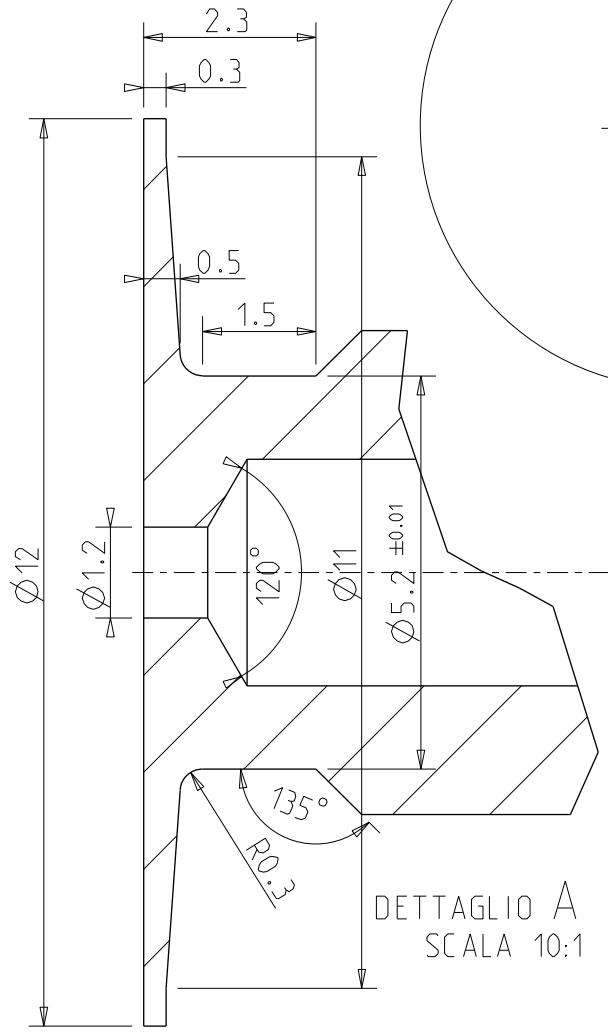
VEDI DETTAGLIO A

SEZIONE A-A
SCALA 5:1



1

2

3



DETTAGLIO A
SCALA 10:1

Designed by CERN	Signature	Project SPES			
Draft by Gianluca Vivian	Date 26/05/2014	Description Corpo centrale del catodo ottimizzato			
 Istituto Nazionale di Fisica Nucleare Laboratori Nazionali di Legnaro		Material TA	Gen. surf. finish 1.6 		
		Treatment	Scale 5:1	Mass [kg]	Frm. A4
		Technical Drawings ISO 8015 Gen. Tol. UNI-EN 22768/2-mK		Draft code: ST_PI100_001A	Rev. 0

A

B

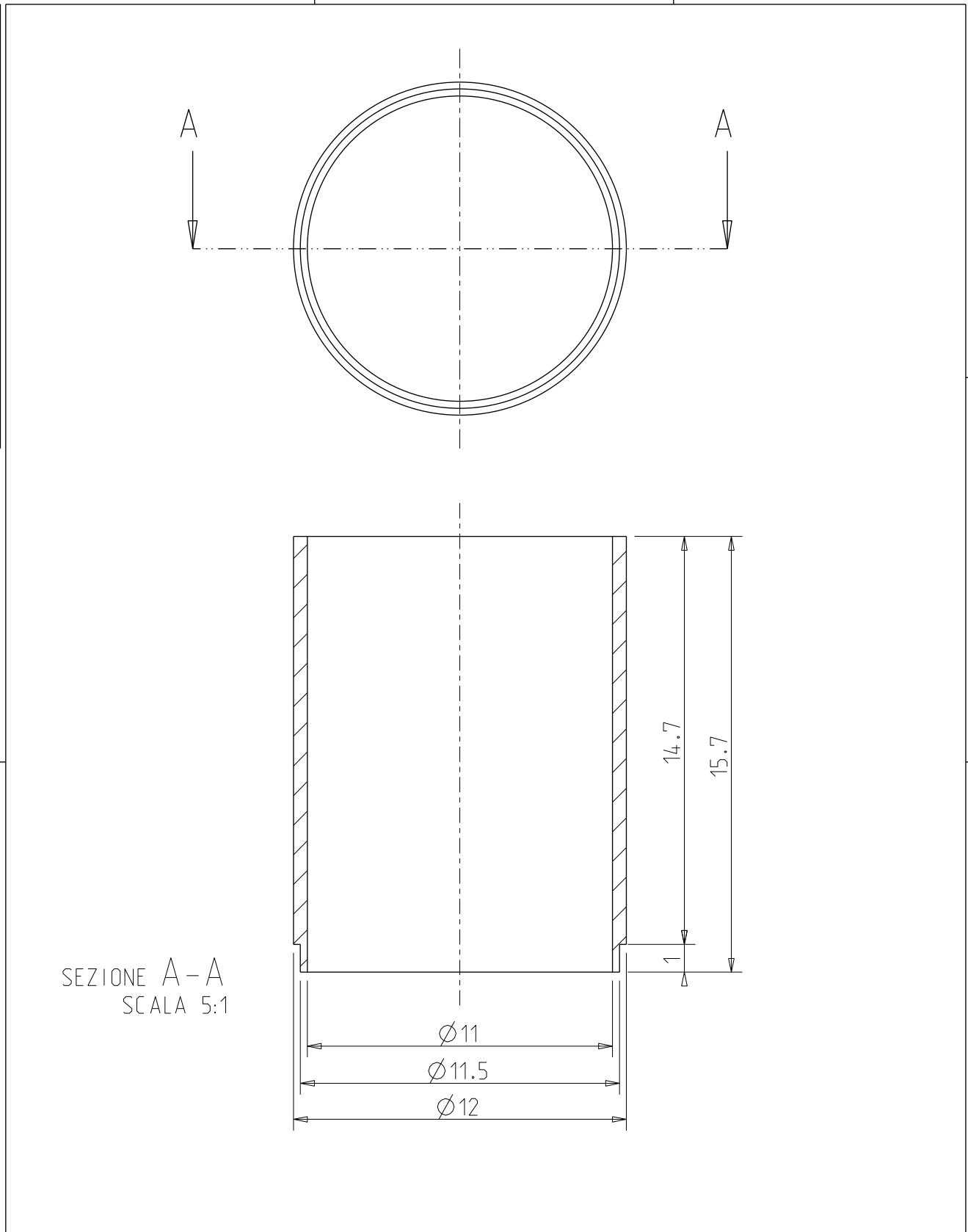
C

1



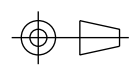
2

3

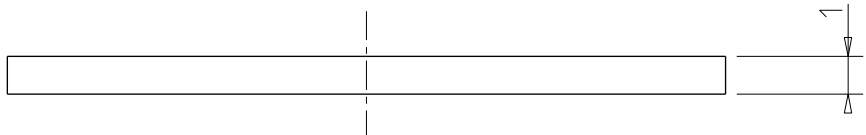
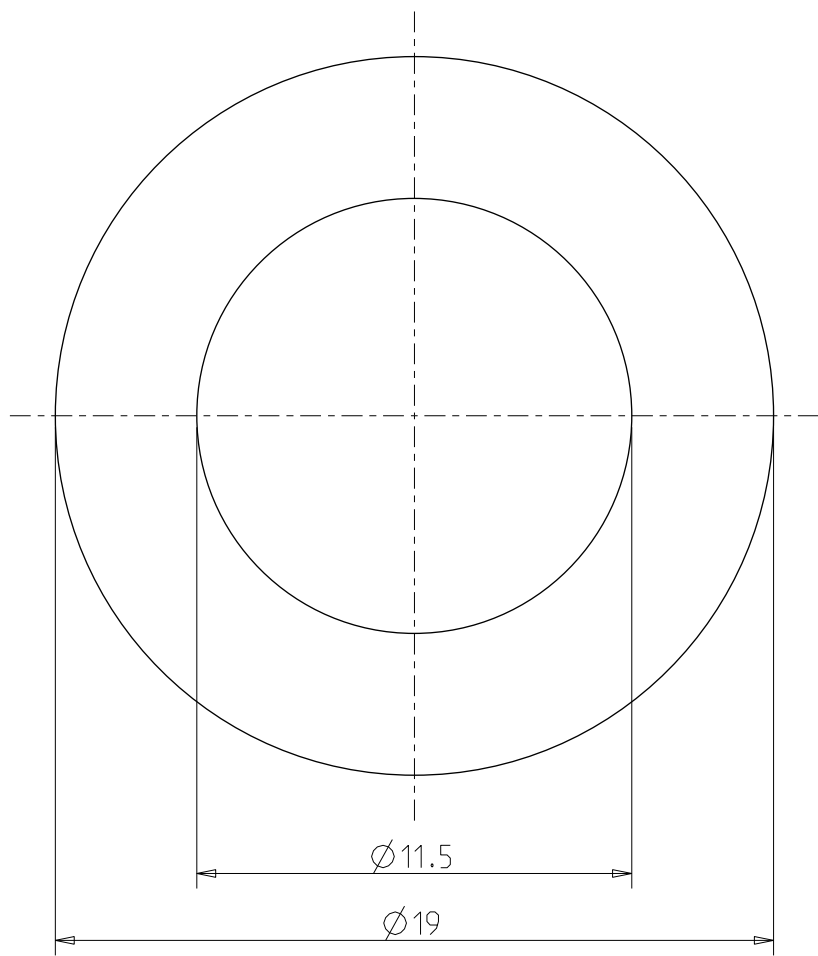
UNI-EN 22768/1-m Tolerances for linear and angular individual tolerance indications "mechanical organs technical designs"			
<= 6	>6 <=30	>30 <=120	>120
± 0.1	± 0.2	± 0.3	± 0.5
			± 2°





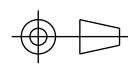
SEZIONE A-A
SCALA 5:1

Designed by CERN	Signature	Project SPES		
Draft by Gianluca Vivian	Date 26/05/2014	Description Collare di sostegno		
 Istituto Nazionale di Fisica Nucleare Laboratori Nazionali di Legnaro	Material TA	Gen. surf. finish 1.6 		
	Treatment	Scale 5:1	Mass [kg]	Frm. A4
	Technical Drawings ISO 8015 Gen. Tol. UNI-EN 22768/2-mK		Draft code: ST_P1100_002A	

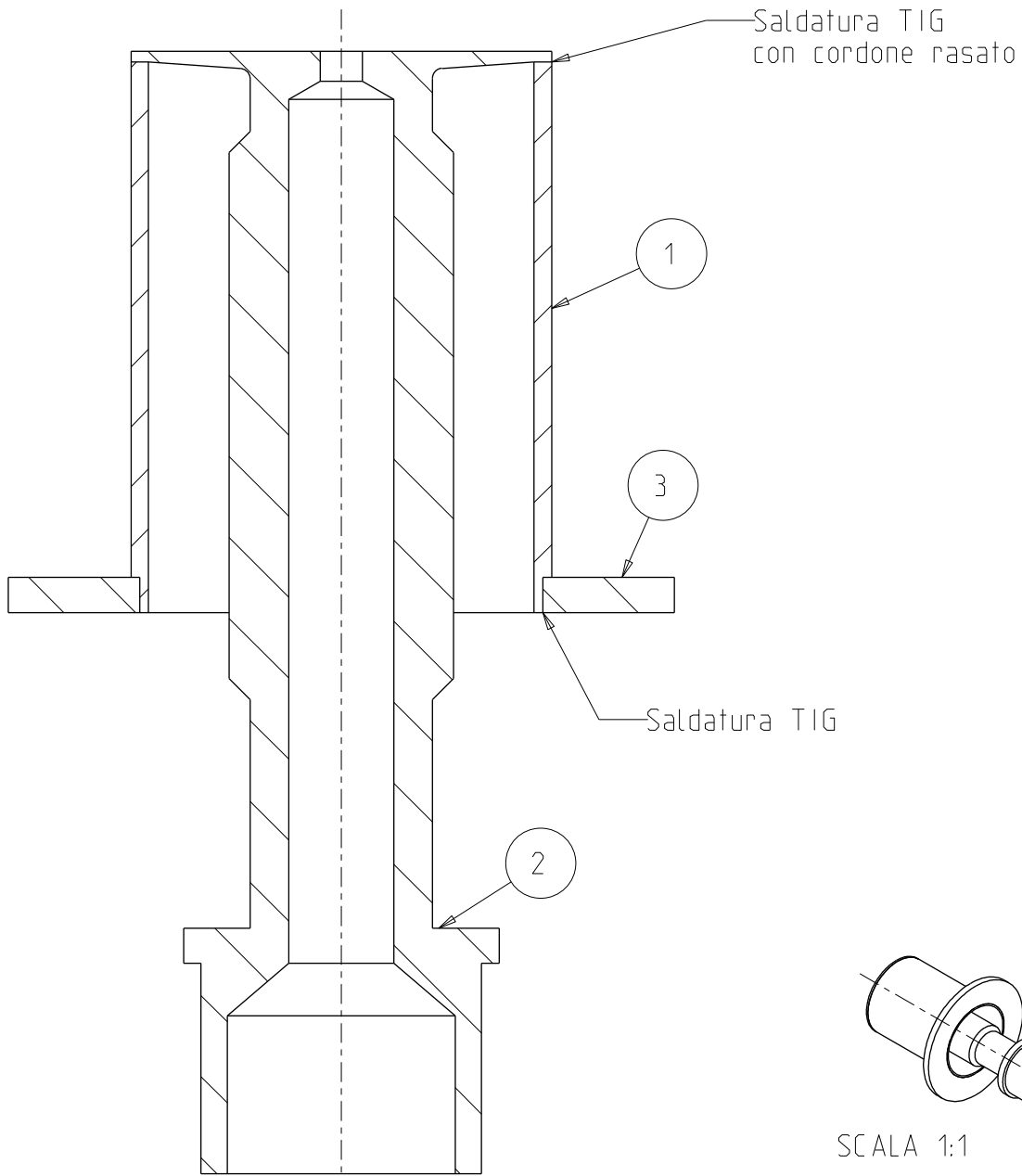
UNI-EN 22768/1-m Tolerances for linear and angular individual tolerance indications "mechanical organs technical designs"			
<= 6	>6 <=30	>30 <=120	>120
± 0.1	± 0.2	± 0.3	± 0.5
			± 2°



SCALA 5:1


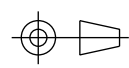
Designed by CERN	Signature	Project SPES		
Draft by Gianluca Vivian	Date 26/05/2014	Description Flangia di sostegno		
 Istituto Nazionale di Fisica Nucleare Laboratori Nazionali di Legnaro	Material TA	Gen. surf. finish 1.6 		
	Treatment	Scale 5:1	Mass [kg] 0.00	Frm. A4
	Technical Drawings ISO 8015 Gen. Tol. UNI-EN 22768/2-mK		Draft code: ST_P1100_003	


UNI-EN 22768/1-m Tolerances for linear and angular individual tolerance indications "mechanical organs technical designs"			
<= 6	>6 <=30	>30 <=120	>120
± 0.1	± 0.2	± 0.3	± 0.5
			± 2°



SEZIONE A-A
SCALA 5:1

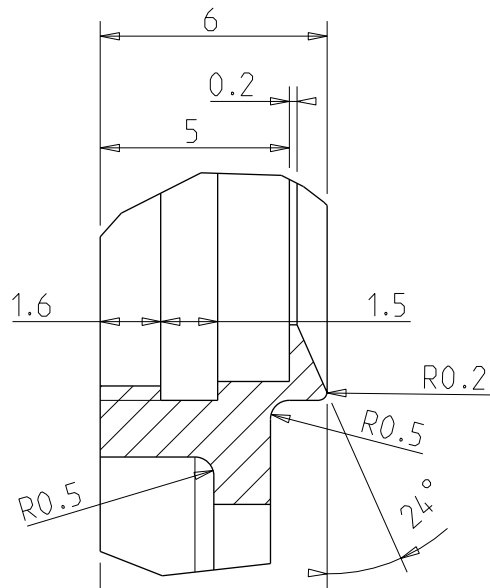
3	ST_PI100_003	Flangia di sostegno	1	TA
2	ST_PI100_001A	Corpo centrale del catodo ottimizzato	1	TA
1	ST_PI100_002A	Collare di sostegno	1	TA
Pos.	Drawing N.°	Description	Q.ty	Material

Designed by Gianluca Vivian		Signature	Project SPES	
Draft by Gianluca Vivian		Date 26/5/2014	Description Catodo ottimizzato per sorgente di ionizzazione al plasma	
 Istituto Nazionale di Fisica Nucleare Laboratori Nazionali di Legnaro		Material	Gen. surf. finish	
		Treatment	Scale 5:1	Mass [kg] 0.00
		Technical Drawings ISO 8015 Gen. Tol. UNI-EN 22768/2-mK		Draft code: ST_PI100A
			Rev. 0	

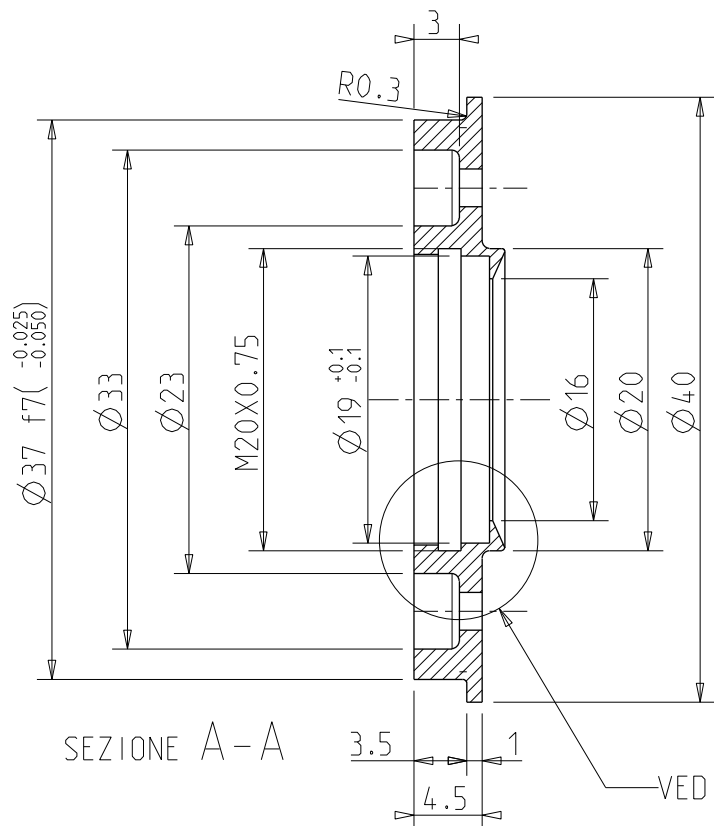
UNI-EN 22768/1-m Tolerances for linear and angular individual tolerance indications "mechanical organs technical designs"				
<= 6	>6 <=30	>30 <=120	>120	
± 0.1	± 0.2	± 0.3	± 0.5	± 2°

A

B

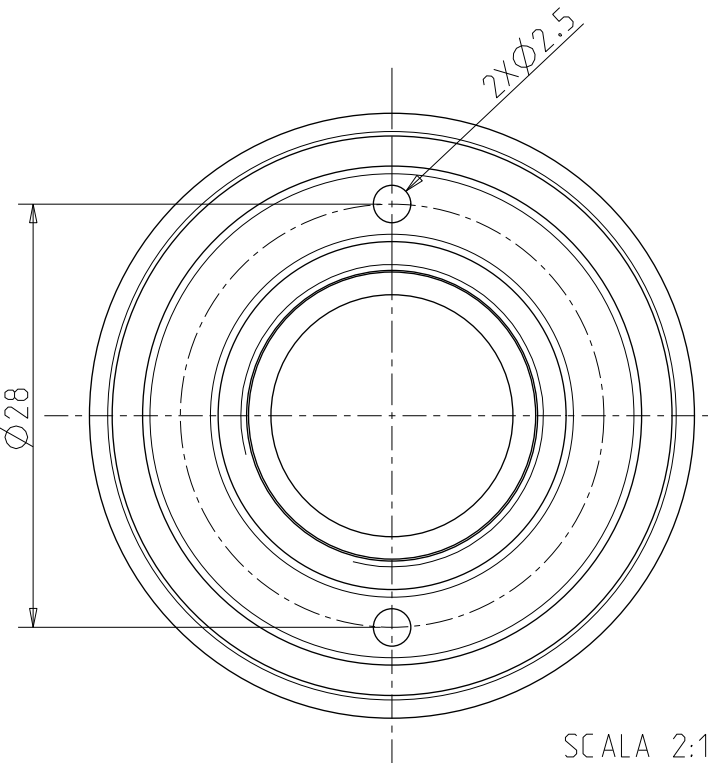


DETTAGLIO A
SCALA 5:1

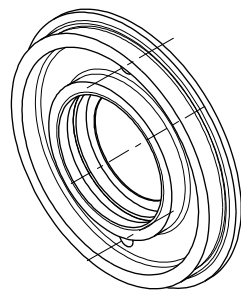


SEZIONE A-A

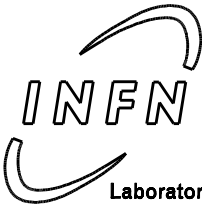
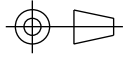
VEDI DETTAGLIO A



SCALA 2:1




SCALA 1:1

Designed by Gianluca Vivian	Signature	Project SPES		
Draft by Gianluca Vivian	Date 26/05/2014	Description Flangia di chiusura		
 Istituto Nazionale di Fisica Nucleare Laboratori Nazionali di Legnaro		Material MO	Gen. surf. finish 0.8	
		Treatment	Scale 2:1	Mass [kg] 0.03
		Technical Drawings ISO 8015 Gen. Tol. UNI-EN 22768/2-mK	Draft code: ST_P1300_001A	Frm. A4

A

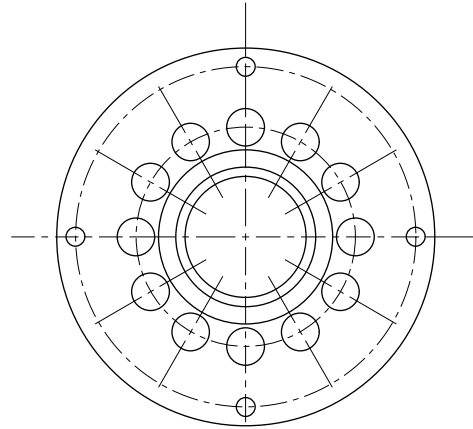
B

C

UNI-EN 22768/1-m Tolerances for linear and angular individual tolerance indications "mechanical organs technical designs"				
<= 6	>6 <=30	>30 <=120	>120	
± 0.1	± 0.2	± 0.3	± 0.5	± 2°

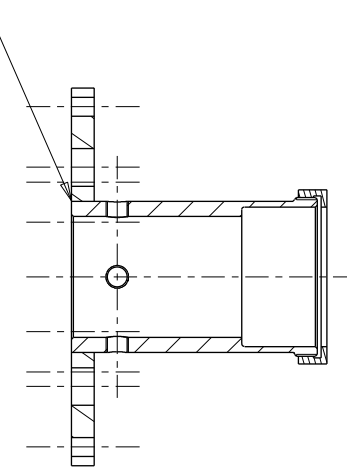
A

B

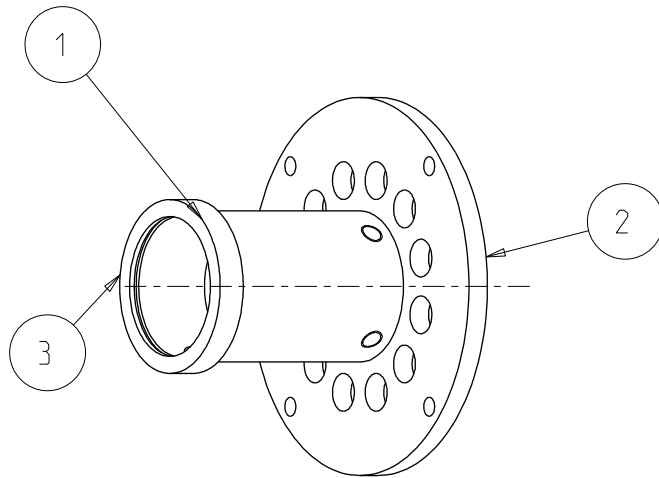


SCALA 1:2

ST_PI500_001
e ST_PI500_002
sono saldati



SEZIONE A-A



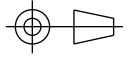


SCALA 1:2

3	ST_PI400_003	Ghiera di bloccaggio	1	INOX_304L
2	ST_PI400_001	Flangia di supporto	1	INOX_304L
1	ST_PI400_002	Camera di supporto	1	INOX_304L
Pos.	Drawing N.°	Description	Q.ty	Material

Designed by Gianluca Vivian	Signature	Project SPES
--------------------------------	-----------	-----------------

Draft by Gianluca Vivian	Date 26/05/2014	Description Sistema di supporto
-----------------------------	--------------------	------------------------------------

 Istituto Nazionale di Fisica Nucleare Laboratori Nazionali di Legnaro	Material	Gen. surf. finish 	 Mass [kg] Frm. A4
	Treatment	Scale 1:2	
	Technical Drawings ISO 8015 Gen. Tol. UNI-EN 22768/2-mK	Draft code: ST_PI400	Rev. 0

A

B

C

1

2

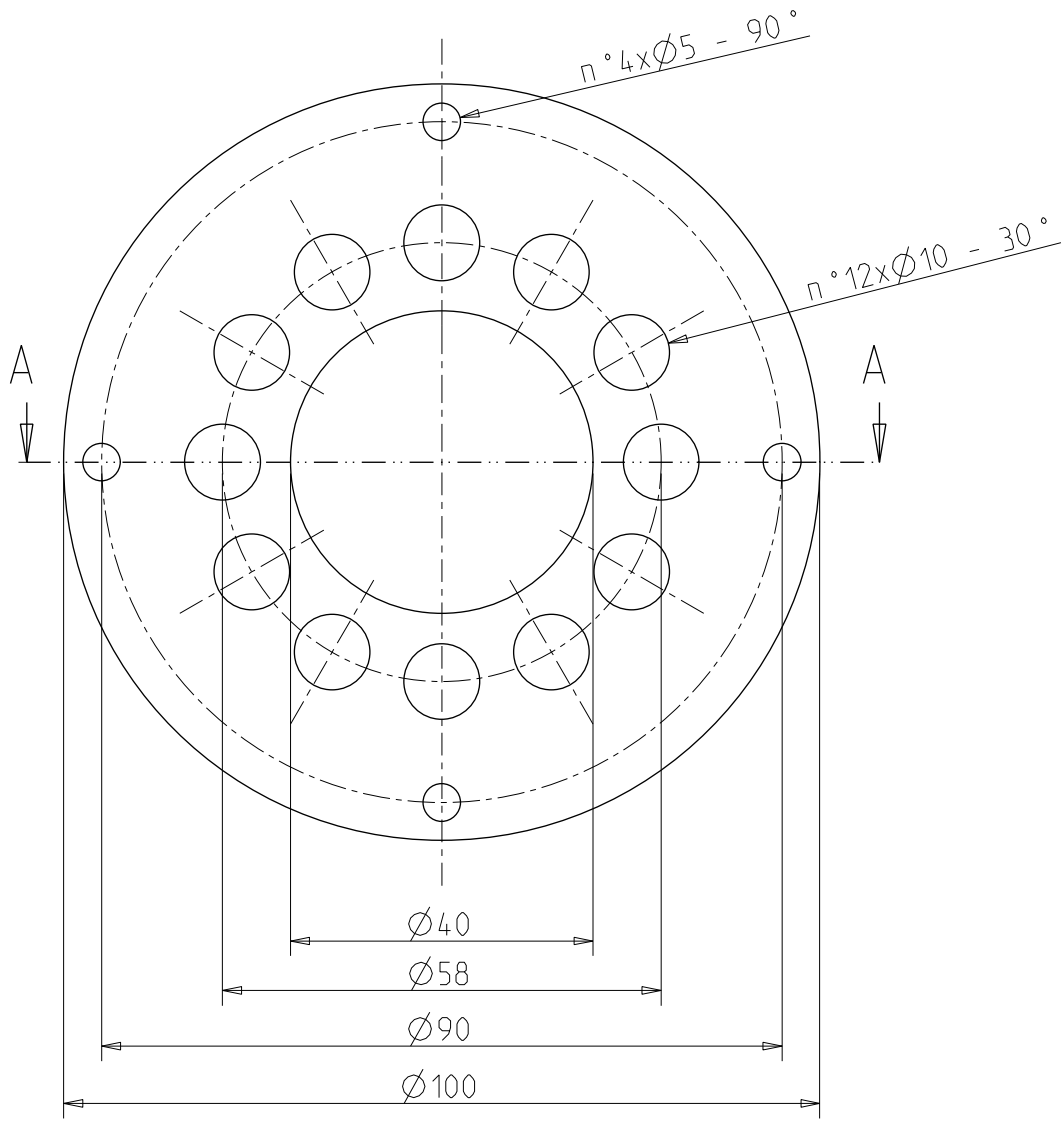
3

1

2

3

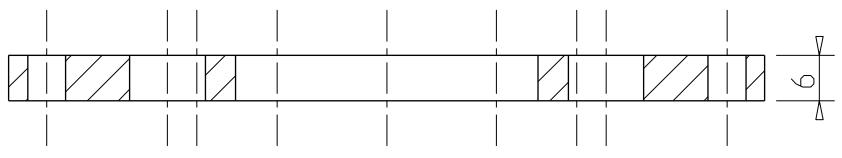
UNI-EN 22768/1-m Tolerances for linear and angular individual tolerance indications "mechanical organs technical designs"			$\pm 2^\circ$
≤ 6	$> 6 \leq 30$	$> 30 \leq 120$	> 120
± 0.1	± 0.2	± 0.3	± 0.5



B

A

SEZIONE A-A



Designed by Gianluca Vivian	Signature	Project SPES
Draft by Gianluca Vivian	Date 25/05/2014	Description Flangia di supporto
INFN Istituto Nazionale di Fisica Nucleare Laboratori Nazionali di Legnaro	Material INOX_304L	Gen. surf. finish 0.8
	Treatment	Scale 1:1
	Technical Drawings ISO 8015 Gen. Tol. UNI-EN 22768/2-mK	Mass [kg] 0.26
		Draft code: ST_PI400_001
		Frm. A4
		Rev. 0

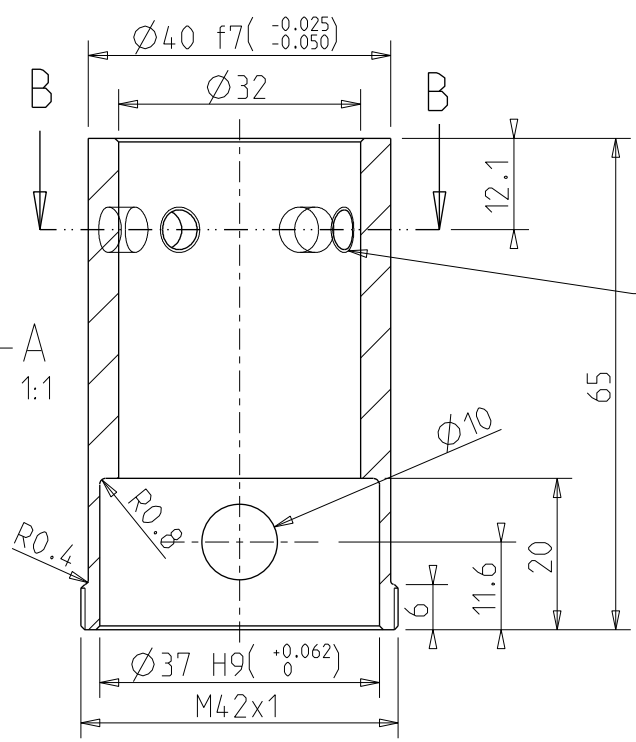
1

2

3

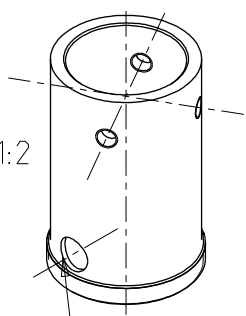
UNI-EN 22768/1-m Tolerances for linear and angular individual tolerance indications "mechanical organs technical designs"	
<= 6	± 0.1
> 6 <= 30	± 0.2
> 30 <= 120	± 0.3
> 120	± 0.5
± 2°	

SEZIONE A-A
SCALA 1:1

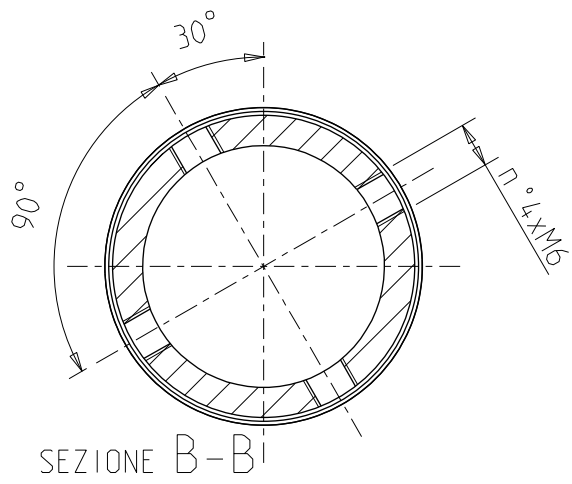


Fori da realizzare in opera

SCALA 1:2





Asse del foro ruotato 30° rispetto agli assi dei fori filettati M6

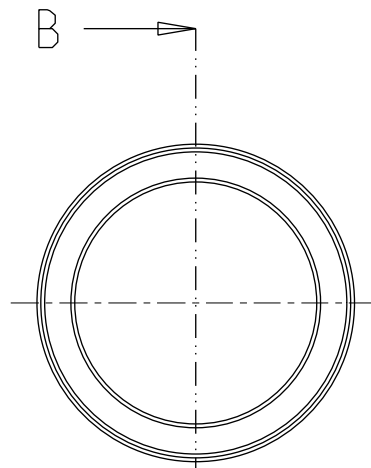


SEZIONE B-B

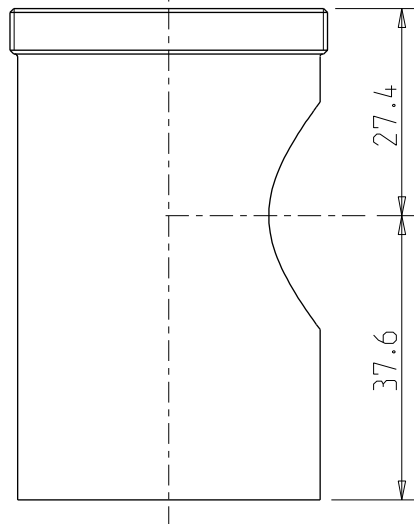
Smussi non quotati 0.5X45°

Designed by Gianluca Vivian	Signature	Project SPES
Draft by Gianluca Vivian	Date	Description Camera di supporto
 Istituto Nazionale di Fisica Nucleare Laboratori Nazionali di Legnaro	Material INOX_304L	Gen. surf. finish 0.8 
	Treatment	Scale 1:1
	Technical Drawings ISO 8015 Gen. Tol. UNI-EN 22768/2-mK	Draft code: ST_PI400_002
		Mass [kg] 0.19
		Frm. A4
		Rev. 0

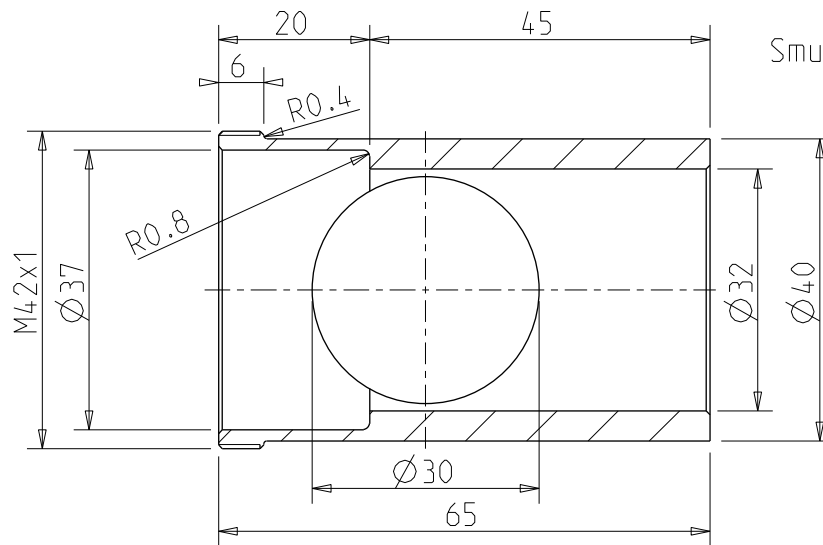
UNI-EN 22768/1-m Tolerances for linear and angular individual tolerance indications "mechanical organs technical designs"				
<= 6	>6 <=30	>30 <=120	>120	
± 0.1	± 0.2	± 0.3	± 0.5	± 2°



B



A



Smussi non quotati 0.5x45°

SEZIONE B-B
SCALA 1:1


Da usare in ST_PI400 per prove di temperatura sostituendolo con ST_PI400_002

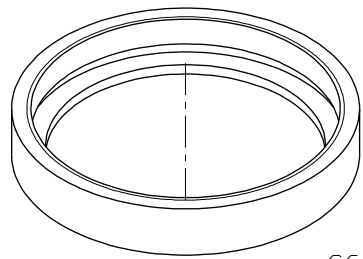
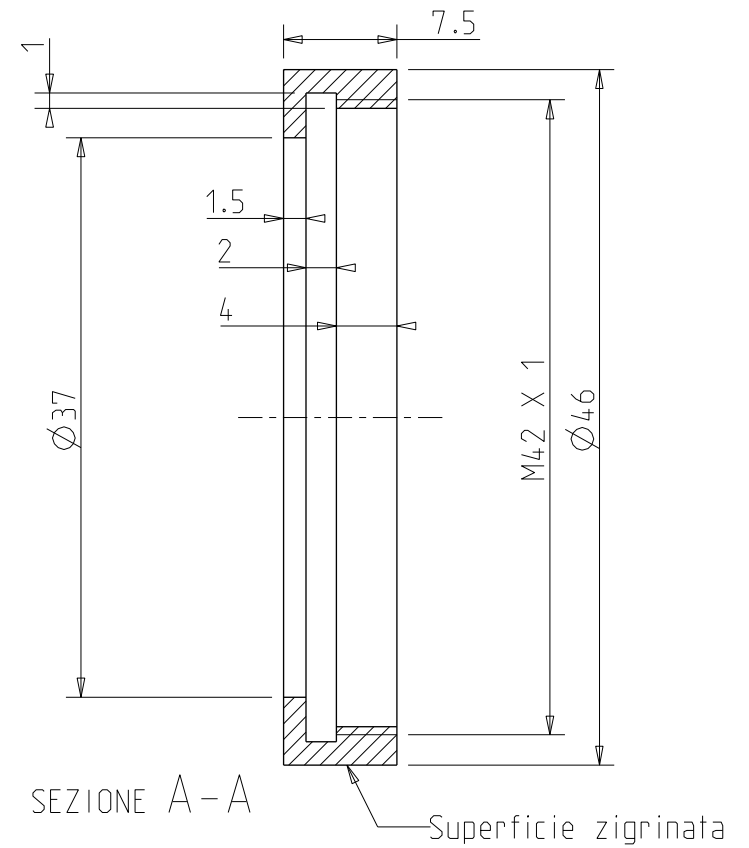
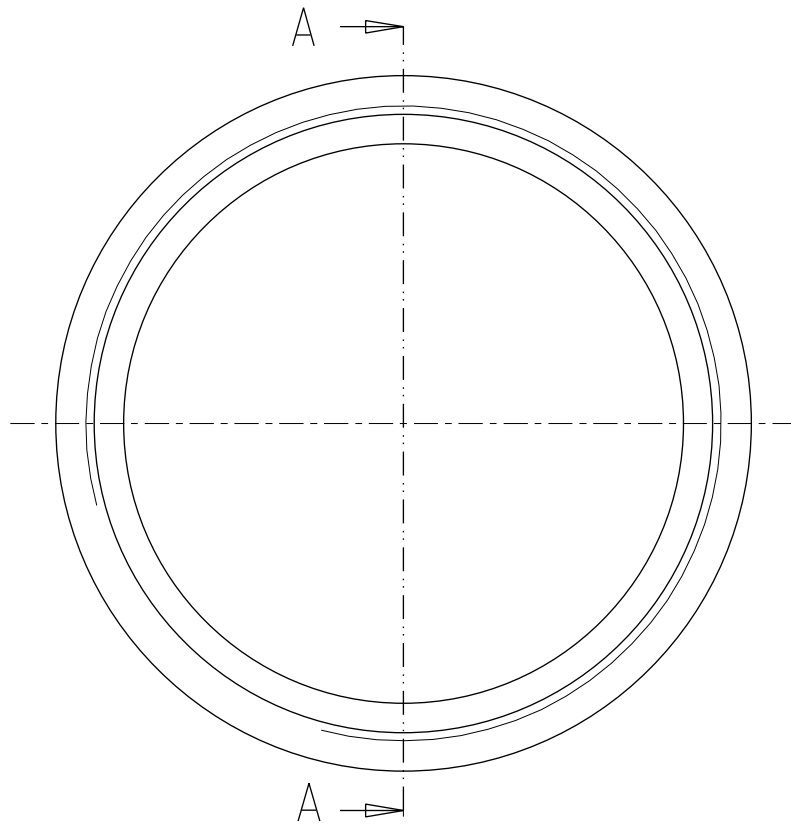
Designed by Gianluca Vivian	Signature	Project SPES
Draft by Gianluca Vivian	Date 26/05/2014	Description Camera di supporto forata
	Material INOX_304L	Gen. surf. finish 0.8
	Treatment	Scale 1:1
	Technical Drawings ISO 8015 Gen. Tol. UNI-EN 22768/2-mK	Draft code: ST_PI400_002P
		Mass [kg] 0.17
		Frm. A4
		Rev. 0

A


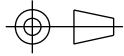
B

C

UNI-EN 22768/1-m Tolerances for linear and angular individual tolerance indications "mechanical organs technical designs"				
<= 6	>6 <=30	>30 <=120	>120	
± 0.1	± 0.2	± 0.3	± 0.5	± 2°



SCALA 1:1

Designed by Gianluca Vivian	Signature	Project SPES			
Draft by Gianluca Vivian	Date 26/05/2014	Description Ghiera di bloccaggio			
 Istituto Nazionale di Fisica Nucleare Laboratori Nazionali di Legnaro		Material INOX_304L	Gen. surf. finish 1.6		
		Treatment	Scale 2:1	Mass [kg] 0.02	Frm. A4
		Technical Drawings ISO 8015 Gen. Tol. UNI-EN 22768/2-mK	Draft code: ST_PI400_003		Rev. 0

A

B

C

UNI-EN 22768/1-m Tolerances for linear and angular individual tolerance indications "mechanical organs technical designs"			
<= 6	>6 <=30	>30 <=120	>120
± 0.1	± 0.2	± 0.3	± 0.5
			± 2°

B

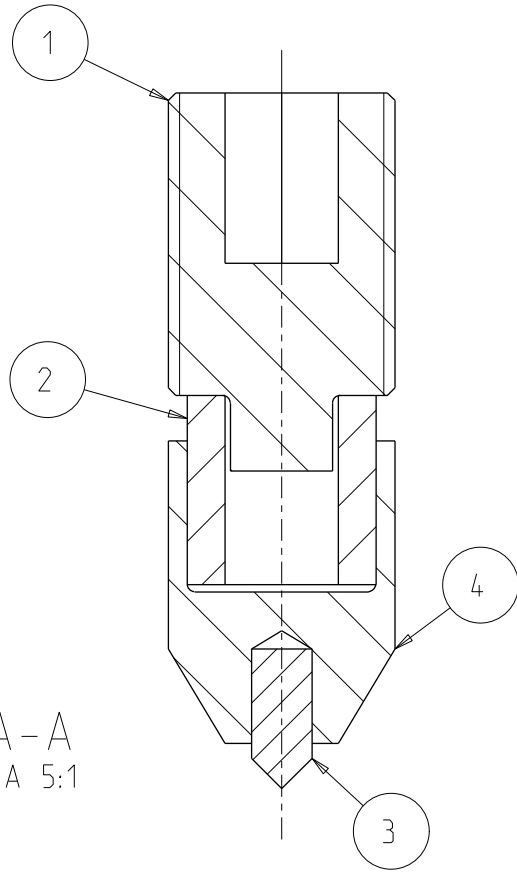
A

C

B

A

SEZIONE A-A
SCALA 5:1


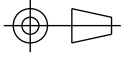


N° 4 pezzi per assemblare la sorgente

4	ST_PI500_002	Supporto del puntale	1	TA
3	ST_PI500_003	Puntale	1	TUNGSTEN
2	ST_PI000_002	Isolatore	1	AL203
1	ST_PI500_001	Grano M6 modificato	1	SS
Pos.	Drawing N.°	Description	Q.ty	Material

Designed by Gianluca Vivian	Signature	Project SPES
--------------------------------	-----------	-----------------

Draft by Gianluca Vivian	Date 26/05/2014	Description Sistema di bloccaggio radiale del catodo
-----------------------------	--------------------	---

 Istituto Nazionale di Fisica Nucleare Laboratori Nazionali di Legnaro	Material	Gen. surf. finish	
	Treatment	Scale 5:1	
	Technical Drawings ISO 8015 Gen. Tol. UNI-EN 22768/2-mK	Draft code: ST_PI500	Frm. A4

1

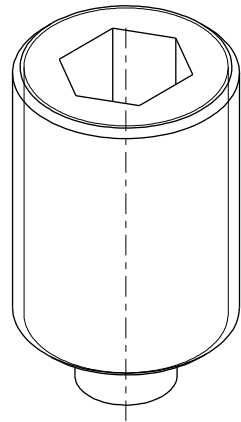
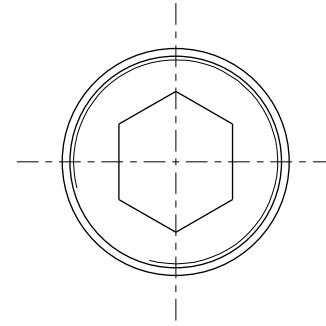
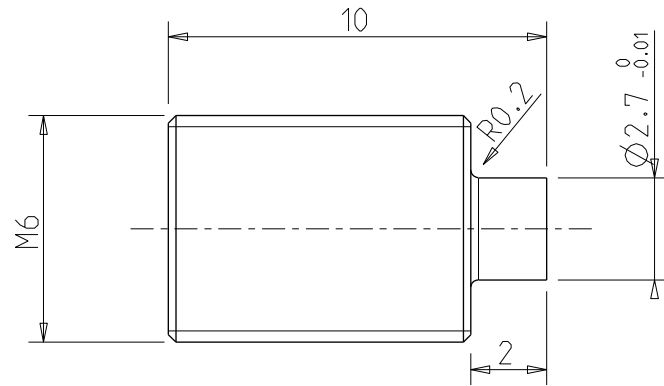
2

3

UNI-EN 22768\1-m Tolerances for linear and angular individual tolerance indications "mechanical organs technical designs"				
<= 6	>6 <=30	>30 <=120	>120	
± 0.1	± 0.2	± 0.3	± 0.5	± 2°

A

B



Designed by Gianluca Vivian	Signature	Project SPES			
Draft by Gianluca Vivian	Date 26/05/2014	Description Grano M6 modificato			
		Material STAINL_ST	Gen. surf. finish 1.6		
		Treatment	Scale 5:1	Mass [kg]	Frm. A4
		Technical Drawings ISO 8015 Gen. Tol. UNI-EN 22768/2-mK	Draft code: ST_PI500_001	Rev.	

A

B

C

1


2

3

1

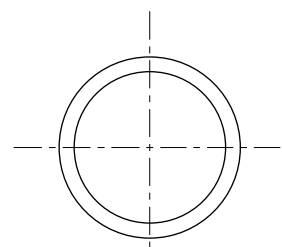
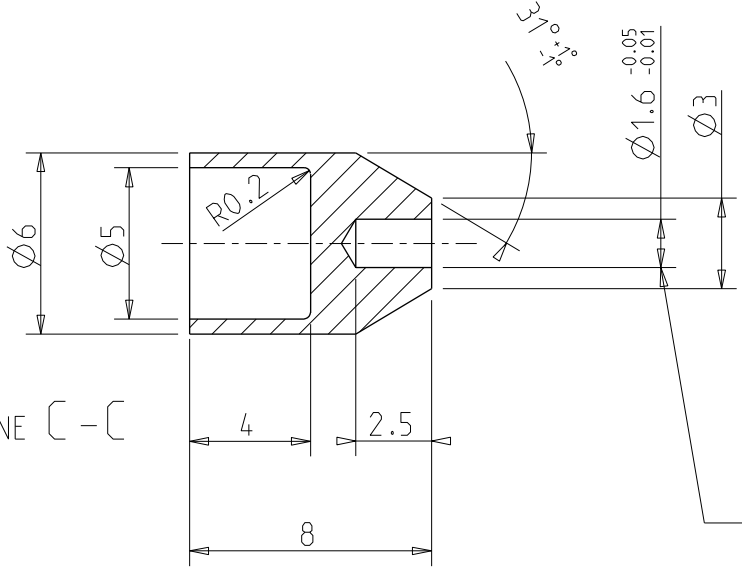
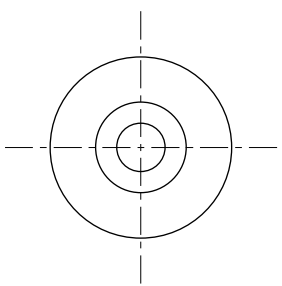
2

3

UNI-EN 22768/1-m Tolerances for linear and angular individual tolerance indications "mechanical organs technical designs"				
<= 6	>6 <=30	>30 <=120	>120	
± 0.1	± 0.2	± 0.3	± 0.5	± 2°

A

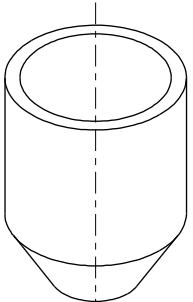
B



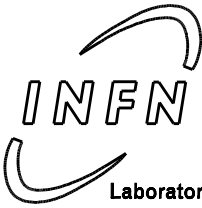
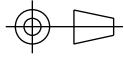
SCALA 4:1

SEZIONE C - C

Verificare l'accoppiamento con interferenza con ST_PI600_003



SCALA 4:1

Designed by Gianluca Vivian	Signature	Project SPES			
Draft by Gianluca Vivian	Date 26/05/2014	Description Supporto del puntale			
 Istituto Nazionale di Fisica Nucleare Laboratori Nazionali di Legnaro		Material TA	Gen. surf. finish 1.6		
		Treatment	Scale 4:1	Mass [kg]	Frm. A4
		Technical Drawings ISO 8015 Gen. Tol. UNI-EN 22768/2-mK	Draft code: ST_PI500_002	Rev. 0	

A

B

C

1


2

3

1

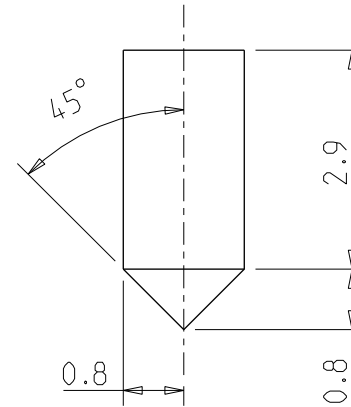
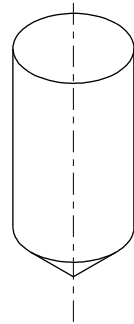
2

3

UNI-EN 22768/1-m Tolerances for linear and angular individual tolerance indications "mechanical organs technical designs"				
<= 6	>6 <=30	>30 <=120	>120	
± 0.1	± 0.2	± 0.3	± 0.5	± 2°

A

B



1

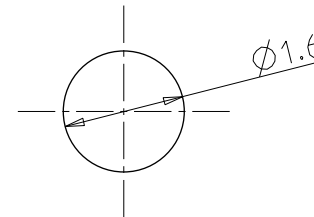
1

2

2



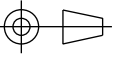
Cilindro tagliato da elettrodo per saldatura TIG
da lavorare a mola

Da accoppiare con interferenza a ST_PI600_002



3

3

Designed by Gianluca Vivian	Signature	Project SPES		
Draft by Gianluca Vivian	Date 26/05/2014	Description Puntale		
		Material TUNGSTEN	Gen. surf. finish 	
		Treatment	Scale 10:1	Mass [kg] A4
		Technical Drawings ISO 8015 Gen. Tol. UNI-EN 22768/2-mK	Draft code: ST_PI500_003	Rev.

A

B

C