



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA

# UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

Progettazione meccanica, simulazione e test sperimentali dell'integratore di corrente per le prove di accettazione del bersaglio SPES

**Relatore:** Prof. GIOVANNI MENEGHETTI

**Correlatori:** Ing. Alberto Monetti

Ing. Mattia Manzolaro

Dott. Alberto Andrighetto

**Laureanda:** LISA CENTOFANTE

Matricola: 1129645

ANNO ACCADEMICO 2017-2018



*A Luca*  
*Alla mia famiglia*



# INDICE

<b>INTRODUZIONE .....</b>	<b>1</b>
<b>CAPITOLO 1.....</b>	<b>3</b>
<b>Il progetto SPES a Laboratori Nazionali di Legnaro: produzione ed utilizzo di fasci di ioni esotici</b>	
1.1 Introduzione.....	3
1.2 Produzione di RIB: il metodo ISOL .....	4
1.3 Il progetto SPES ai Laboratori Nazionali di Legnaro .....	6
1.4 Configurazione della <i>facility</i> .....	6
1.4.1 L'acceleratore primario .....	8
1.4.2 Il Front-end.....	9
1.4.2.1 Il Front-end protonico.....	10
1.4.2.2 Il target di produzione e il sistema di estrazione e di ionizzazione .....	10
1.4.2.3 Le sorgenti di ionizzazione .....	12
1.4.2.4 Il Front-End radioattivo [3] .....	15
1.4.3 I sistemi di movimentazione.....	16
1.5 Applicazioni dei fasci di ioni esotici [7].....	17
1.5.1 Applicazioni in fisica nucleare .....	17
1.5.1.1 Miglioramento e verifica del Modello Standard.....	17
1.5.1.2 Studio della struttura dei nuclei complessi .....	17
1.5.1.3 Produzione di elementi superpesanti .....	18
1.5.2 Applicazioni in fisica dello stato solido.....	19
1.5.2.1 La tecnica Radio Tracer Diffusion.....	19
1.5.2.2 Drogaggio di semiconduttori .....	19
1.5.3 Applicazioni in astrofisica .....	20
1.5.4 Applicazioni in medicina nucleare .....	20
1.5.4.1 La produzione di radiofarmaci.....	20
1.5.4.2 La tomografia ad emissione positronica .....	20
1.6 Conclusioni.....	22
<b>CAPITOLO 2.....</b>	<b>23</b>
<b>Deposizione di potenza con il codice di calcolo ANSYS</b>	
2.1 Introduzione.....	23
2.2 Caratteristiche del fascio radioattivo .....	23
2.3 Applicazione del carico .....	24
2.3.1 Deposizione di potenza con il codice FLUKA [3].....	25
2.3.2 Deposizione di potenza con andamento Gaussiano .....	26
2.4 Simulazioni e risultati .....	26
2.4.1 Geometria cilindrica .....	26
2.4.2 Geometria conica .....	31
2.5 Conclusioni.....	36
<b>CAPITOLO 3.....</b>	<b>37</b>
<b>Progettazione della Faraday Cup</b>	
3.1 Introduzione [3].....	37
3.2 Criticità nella progettazione della Faraday Cup [6].....	38

3.3	Dimensionamento preliminare.....	39
3.4	Analisi termo-strutturali e ottimizzazione della geometria.....	40
3.5	Dimensionamento dei soppressori.....	44
3.6	Modellazione tridimensionale e alloggiamento.....	45
3.7	Analisi termo-strutturali tridimensionali.....	49
3.8	Determinazione del tempo di intervento in caso di malfunzionamento.....	53
3.9	Conclusioni.....	61
<b>CAPITOLO 4.....</b>		<b>63</b>
<b>Progettazione di un setup per prove di compressione</b>		
4.1	Introduzione.....	63
4.2	Layout di primo tentativo.....	63
4.3	Ottimizzazione della geometria.....	66
4.3.1	La camera e il sistema di riscaldamento.....	66
4.3.2	Il trasferimento della forza.....	68
4.3.3	L'albero mobile e il soffietto.....	70
4.3.1	L'albero fisso.....	74
4.3.2	L'isolamento elettrico.....	74
4.4	Scelta della cella di carico.....	75
4.5	L'assemblaggio finale.....	79
<b>CAPITOLO 5.....</b>		<b>83</b>
<b>Test sperimentali di compressione di provini in grafite</b>		
5.1	Introduzione.....	83
5.2	Geometria del provino.....	83
5.3	Densità e temperatura.....	87
5.4	Superfici di contatto.....	88
5.5	Test sperimentali.....	88
5.6	Risultati.....	93
5.7	Problemi riscontrati e sviluppi futuri.....	102
<b>CONCLUSIONI.....</b>		<b>105</b>
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>		<b>107</b>
<b>APPENDICE A: Esempi di listati APDL utilizzati.....</b>		<b>109</b>
<b>APPENDICE B: Confronto numerico-sperimentale della temperatura massima e del potenziale ai capi del provino.....</b>		<b>117</b>
<b>APPENDICE C: Proprietà della grafite POCO EDM-3.....</b>		<b>119</b>
<b>APPENDICE D: Dati della cella di carico HBM U9C-10kN.....</b>		<b>123</b>

# INTRODUZIONE

La fisica nucleare esplora la natura della materia, studiando il nucleo atomico nei suoi costituenti e le loro interazioni. Lo sviluppo di tante e tali ricerche ha richiesto il supporto di apparecchiature sempre più sofisticate e complesse. Nel corso degli anni l'Europa ha assunto la leadership nel campo della ricerca nucleare e sta pianificando la costruzione di una nuova generazione di facility per la produzione di fasci radioattivi, con lo scopo di esplorare la materia esotica e di fornire un valido strumento per applicazioni di tipo medico ed industriale. All'interno del programma partecipa attivamente, con il progetto SPES (*Selective Production of Exotic Species*), anche l'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN) di Legnaro; tale progetto prevede la costruzione di una *facility* per la produzione di fasci di ioni radioattivi ricchi di neutroni e di alta qualità.

La ricerca fondamentale in questi settori richiede l'uso di tecnologie e strumenti di ricerca d'avanguardia che l'INFN sviluppa sia nei propri laboratori sia in collaborazione con il mondo dell'industria. Attualmente, nell'ambito del progetto SPES, si prevede di iniziare i test di accettazione della macchina acceleratrice di fasci radioattivi. Al fine di raggiungere tale obiettivo è necessario costruire e studiare degli apparati in grado di far fronte a questa fase di collaudo. Con il presente lavoro di tesi verrà sviluppato un sistema meccanico, chiamato Faraday Cup, da inserire nella Camera target per la misura della corrente del fascio protonico di 8kW di potenza. Lo studio del comportamento termico del sistema avverrà tramite analisi accoppiate elettro-termo-strutturali, con il codice di calcolo ad Elementi Finiti ANSYS, e modellazione tridimensionale dei componenti tramite il software CREO PARAMETRICS.

Con l'obiettivo di testare la linea del fascio protonico, saranno poi svolte delle analisi relative alla sicurezza all'interno della camera: si andrà quindi a determinare il tempo di intervento, in caso di malfunzionamento, necessario per fermare il fascio con un *dump* in grafite.

Per la realizzazione del sistema Faraday Cup verrà utilizzata la grafite POCO EDM-3: a causa dell'elevata intensità del fascio, il materiale raggiungerà temperature di esercizio elevate. La mancanza di dati riguardanti la resistenza a compressione del materiale alle alte temperature rende necessaria la realizzazione di un setup per prove di compressione in temperatura. I dati ottenuti dalle prove sperimentali saranno quindi utilizzati per la verifica della progettazione della Faraday Cup.

In particolare, nel primo capitolo verranno introdotti i nuclei esotici e la produzione di fasci radioattivi attraverso il metodo ISOL. Verrà quindi presentato il progetto SPES dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN), una delle nuove *facilities* incoraggiate dalla comunità scientifica europea. In particolare, dopo una breve descrizione della struttura e degli elementi che la compongono, saranno esposti i possibili campi di ricerca coinvolti.

Nel secondo capitolo verranno presentate delle simulazioni di deposizione di potenza al variare della dimensione del modello e dell'applicazione del carico, per poter validare i risultati ottenuti con ipotesi semplificative. La validazione di simulazioni bidimensionali, unite alle considerazioni sull'applicazione del carico, permettono un significativo guadagno in termini di tempo di simulazione.

Nel terzo capitolo verrà affrontata la progettazione della Faraday Cup, da utilizzare in fase di preparazione del fascio, ogni qualvolta avvenga una modifica della linea a monte della camera. Il dimensionamento avverrà attraverso calcoli analitici e simulazioni termo-strutturali con il codice di calcolo agli Elementi Finiti ANSYS. Verranno nuovamente valutate le ipotesi semplificative presentate nel capitolo precedente. È proposta inoltre un'analisi elettrica, necessaria al dimensionamento di soppressori in grado di fornire il potenziale di schermatura richiesto. Un modello tridimensionale sviluppato con il software CREO PARAMETRIC 2.0 permetterà di organizzare l'alloggiamento all'interno della camera target e sarà utilizzato per un'ulteriore analisi termo-strutturale. Verrà infine considerato un malfunzionamento del ciclotrone, al fine di valutare il tempo di intervento necessario per fermare completamente il fascio con un *dump* in grafite.

Nel capitolo quattro verrà presentata la progettazione di un layout per prove di compressione ad alte temperature, necessarie per caratterizzare completamente la grafite POCO EDM-3. Le prove saranno svolte in vuoto e le alte temperature saranno raggiunte per effetto Joule, grazie al passaggio di corrente attraverso i puntali in rame. Una geometria di primo tentativo sarà utilizzata per implementare analisi termiche al fine di

valutare le temperature in gioco. I risultati aiuteranno ad individuare i materiali più idonei per i vari componenti e definire così il setup definitivo per il sistema.

Nel capitolo cinque verranno definite varie geometrie per i provini. Le prove sperimentali avranno come obiettivo la valutazione di vari fattori in grado di influenzare i risultati quali temperatura, forma del provino, densità del materiale e superfici di contatto. Verranno quindi analizzati i risultati delle prove e proposte alcune ottimizzazioni del sistema.

# CAPITOLO 1

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

### 1.1 Introduzione

La materia è costituita da atomi aggregati tra loro in modo da formare unità fondamentali dette molecole, che conservano tutte le proprietà fisico-chimiche della sostanza cui appartengono. L'atomo contiene un denso nucleo formato da neutroni (elettricamente neutri) e protoni (carichi positivamente). La maggior parte della massa di un atomo è contenuta proprio nel nucleo, che è circondato da uno spazio extranucleare, molto più ampio, contenente gli elettroni (carichi negativamente). La presenza di una forza di attrazione molto intensa, detta interazione forte, garantisce la stabilità del nucleo: tale forza bilancia la repulsione elettronica tra i protoni. La fisica nucleare è la branca della fisica che si occupa dello studio del nucleo atomico nei suoi costituenti e nelle loro interazioni. La carta dei nuclidi (Figura 1.1) individua e classifica i nuclei in base al numero di neutroni (N) e protoni (Z).

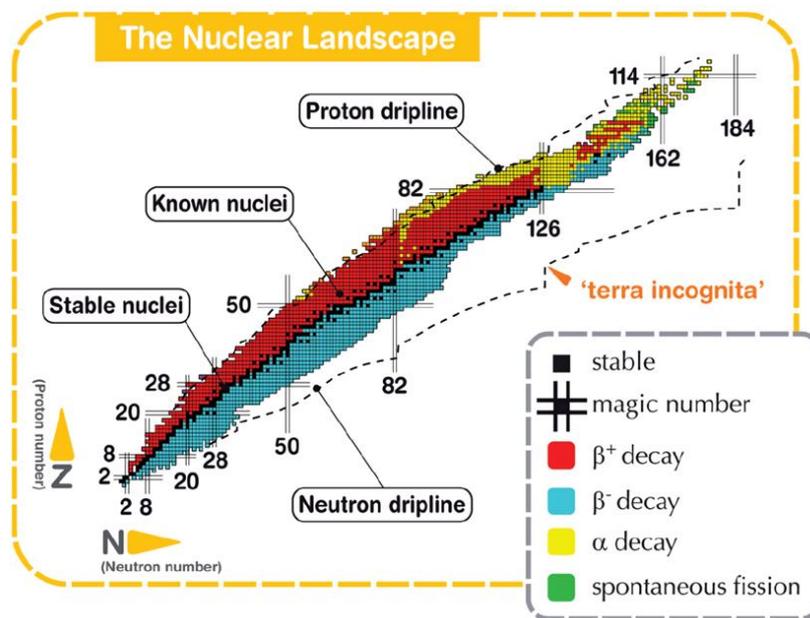


Figura 1.1 La carta dei Nuclidi [1].

I nuclei che possiedono, approssimativamente, ugual numero di neutroni e protoni sono detti stabili e nella carta dei nuclidi rappresentano la “valle di stabilità”.

La stabilità di questi nuclei deriva dalla maggiore intensità dell'interazione neutrone-protone rispetto alle altre interazioni presenti. Analizzando attentamente la carta dei nuclidi si noteranno, inoltre, anche vari nuclei instabili, chiamati comunemente “esotici”. Con il termine instabile si definisce un nucleo che spontaneamente subisce una trasformazione per raggiungere uno stato più stabile. In questo modo, nuclei che nel piano N-Z presentano un eccesso di protoni rispetto a quanto previsto nella curva di stabilità, tenderanno a “trasformare” un protone in un neutrone. I nuclei con un eccesso di neutroni tenderanno a comportarsi in maniera opposta. I nuclei instabili sono radioattivi e decadono emettendo diversi tipi di particelle o radiazioni elettromagnetiche a seconda della loro natura. Le trasformazioni spontanee più comuni sono:

- Decadimento  $\alpha$ : il nucleo emette una particella ‘alfa’, equivalente ad un nucleo di  $^4\text{He}$ . Questo tipo di decadimento è caratteristico di atomi con  $Z > 83$ .

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

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

## 1.2 Produzione di RIB: il metodo ISOL

La tecnica ISOL (*Isotope Separation On-Line*), schematizzata in Figura 1.2, utilizza la separazione degli isotopi in linea. I principali costituenti di tale tipologia di *facility* sono:

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

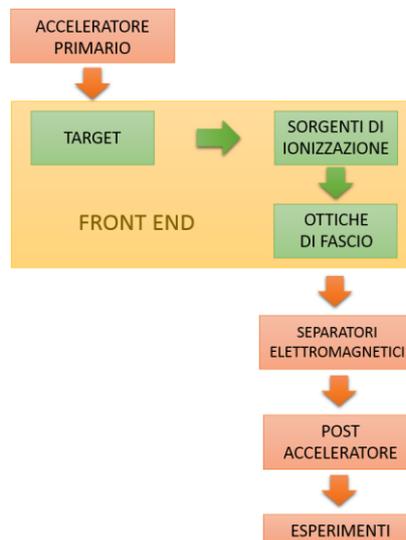


Figura 1.2 Schema della configurazione di una facility di tipo ISOL.

L'acceleratore primario è costituito da una sorgente ionica, che inietta protoni o atomi ionizzati a bassa energia, e da un acceleratore, in grado di accelerare tali particelle. Il fascio primario della voluta energia viene quindi fatto collidere con il complesso target-sorgente, nel quale avviene la produzione degli isotopi radioattivi tramite reazioni nucleari. Gli isotopi prodotti sono a questo punto purificati grazie a dei separatori elettromagnetici, e successivamente post-accelerati al fine di ottenere il livello di energia richiesto.

L'intensità del fascio radioattivo prodotto è usualmente descritta dall'equazione (1.1):

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

dove  $\sigma$  è la sezione d'urto per le reazioni nucleari, ossia la possibilità che avvenga una certa reazione nucleare;  $\varphi$  è l'intensità del fascio primario;  $N$  è lo spessore del target;  $\varepsilon_1$  è l'efficienza di rilascio del target;  $\varepsilon_2$  è l'efficienza di ionizzazione;  $\varepsilon_3$  è l'efficienza del processo di estrazione e trasporto.

Una *facility* di tipo ISOL deve essere correttamente dimensionata, a livello del complesso target-sistema di estrazione e ionizzazione, per ottenere un efficiente funzionamento. Si vuole infatti massimizzare la produzione senza deterioramento della purezza del fascio, e ridurre il tempo di ritardo, dovuto alla relativa lentezza dei processi di diffusione, effusione, ionizzazione ed estrazione dei nuclidi. La separazione dei prodotti radioattivi dal substrato del target e l'estrazione dei nuclei esotici, sono processi fortemente dipendenti dalla temperatura; all'aumentare del livello termico, infatti, la diffusione delle particelle risulta accelerata. Ciò risulta importante soprattutto per atomi radioattivi a breve emivita<sup>1</sup>, in quanto un rapido rilascio evita una perdita di questi atomi per decadimento. Per questo motivo il sistema deve essere mantenuto alla maggior temperatura possibile.

La comunità internazionale di fisica nucleare ha riconosciuto come priorità la realizzazione di nuove *facilities* per la produzione di fasci di ioni radioattivi e l'ampliamento di quelle già esistenti. Ciò deriva dalla crescente necessità di ottenere informazioni affidabili sui nuclei lontani dalla zona di stabilità. In ambito europeo la comunità scientifica ha proposto quindi la costruzione di un'unica grande *facility* europea di tipo ISOL, chiamata EURISOL. L'iniziativa coinvolge i principali laboratori nucleari europei ed è dedicata allo studio e alla progettazione di una struttura per la produzione di fasci di ioni radioattivi di qualità significativamente superiore a quella attualmente disponibile. In tale direzione sono orientati anche i Laboratori Nazionali di Legnaro (LNL), presso i quali è in corso la costruzione di una *facility* ISOL: il progetto SPES (*Selective Production of Exotic Species*). Tale progetto è coordinato a livello nazionale da INFN, ENEA (Bologna), Dipartimenti di Ingegneria Meccanica e di Scienze Chimiche dell'Università degli Studi di Padova e a livello internazionale prevede strette collaborazioni con CERN (Svizzera) ed i Laboratori di Oak Ridge (USA).

I principali membri di EURISOL (Figura 1.3) sono GANIL-SPIRAL2, ISOLDE e INFN-SPES. La *facility* ISOL@MYRRHA rappresenta un futuro candidato e varie collaborazioni sono state strette con le *facilities* di FAIR (Darmstadt, Germany), ALTO (Orsay, France) e JYFL (Jyväskylä, Finland).



Figura 1.3 Dislocazione dei principali membri di EURISOL [2].

<sup>1</sup> L'emivita (o tempo di dimezzamento) di un isotopo radioattivo è definita come il tempo occorrente perché la metà degli atomi di un campione puro dell'isotopo decadano in un altro elemento. Misura la stabilità di un isotopo: più breve è l'emivita, meno stabile è l'atomo.

### 1.3 Il progetto SPES ai Laboratori Nazionali di Legnaro

Fondati nel 1968, i Laboratori Nazionali di Legnaro sono un centro internazionale per la fisica del nucleo e per le applicazioni di tecnologie nucleari. I punti di forza dei Laboratori sono la realizzazione di acceleratori di particelle nucleari e lo sviluppo di rilevatori di radiazioni gamma: in particolare sono presenti tre grandi acceleratori di particelle: TANDEM, PIAVE e ALPI.

Il progetto SPES (*Selective Production of Exotic Species*) prevede lo sviluppo e l'installazione di una *facility* ISOL con lo scopo principale di produrre fasci di ioni radioattivi, chiamati RIB (*Radioactive Ion Beam*), per studi di fisica nucleare e per lo studio di nuclei atomici instabili. Tali nuclei non sono presenti naturalmente, ma sono prodotti durante le fasi conclusive della vita delle stelle, dalle quali sono generati tutti gli elementi.

Al giorno d'oggi la maggior parte delle conoscenze a proposito delle proprietà nucleari deriva dallo studio dei nuclei localizzati nella valle di stabilità o dei nuclei con una carenza di neutroni. Si ritiene che lo studio di nuclei atomici con un largo eccesso di neutroni (*neutron-rich*) o protoni (*proton-rich*) possa consentire la scoperta di nuove proprietà della struttura nucleare.

Sono state previste quattro fasi per il progetto:

- SPES  $\alpha$ : questa fase prevede l'acquisizione, l'installazione e la messa in opera di un ciclotrone ad alte prestazioni, con un'elevata corrente in uscita e ad alta energia (fino a 70 MeV). Il ciclotrone sarà provvisto di due porte di uscita per consentire la realizzazione della doppia missione del laboratorio: la ricerca di base e le applicazioni tecnologiche. Uno dei due fasci sarà dedicato alla *facility* di fisica nucleare, per la produzione di ioni ricchi di neutroni per collisione di protoni su un target di UC<sub>x</sub>, il secondo sarà dedicato a studi di fisica applicata.
- SPES  $\beta$ : prevede l'accelerazione di specie *neutron-rich* verso target adatti. Nelle collisioni verranno prodotti nuclei nuovi, con un largo eccesso di neutroni, simili a quelli generati nelle fasi terminali della vita delle stelle e che non sono presenti sulla Terra, a causa della loro brevissima vita. La ricerca in questo ambito rappresenta una nuova frontiera della fisica per estendere la conoscenza di nuclei in condizioni estreme e per fornire informazioni di base nello studio dell'evoluzione stellare.
- SPES  $\gamma$ : questa fase riguarda la produzione di radionuclidi di interesse medico mediante l'uso del ciclotrone. L'obiettivo è la produzione di radiofarmaci innovativi e di radionuclidi convenzionali con nuovi approcci basati sull'uso dell'acceleratore.
- SPES  $\delta$ : prevede lo sviluppo di un'intensa sorgente neutronica, dal ciclotrone e/o da un acceleratore lineare ad alta intensità basato sulla *Radio-Frequency Quadrupole technology* (RFQ). Applicazioni della sorgente neutronica si estendono dall'astrofisica nucleare, alla caratterizzazione dei rifiuti nucleari o a trattamenti sperimentali di tumori.

### 1.4 Configurazione della *facility*

Lo studio delle caratteristiche dei nuclei instabili, attraverso i loro decadimenti ed interazioni, richiede un processo di fissione nucleare. Questa viene indotta bombardando un bersaglio, realizzato in carburo di uranio, con un fascio di protoni da 40 MeV a 200  $\mu$ A di corrente (per una potenza totale di 8 kW). Essendo il livello di radioattività stimato nel target di produzione molto elevato, è necessaria la progettazione di speciali infrastrutture in maniera tale da garantire la sicurezza in termini di radio protezione.

In Figura 1.4 e Figura 1.5 viene rappresentata la struttura dei laboratori: il fascio primario viaggia lungo il canale protonico e, una volta entrato nel bunker SPES, è indirizzato al target in UC<sub>x</sub>, ospitato in una camera in vuoto opportunamente progettata ed installata nel Front-End di SPES. Qui le specie esotiche vengono prodotte, ionizzate, accelerate e separate mediante un sistema di ionizzazione ed estrazione e un *Wien Filter*<sup>2</sup>, che costituisce la prima fase di separazione di massa. Il fascio è quindi portato ad un *Beam Cooler* (BC), un dispositivo utilizzato per diminuire l'emittanza longitudinale e trasversale. Per purificare il fascio dalle masse isobariche indesiderate, è previsto un HRMS (*High Resolution Mass Separator*).

---

<sup>2</sup> Dispositivo costituito da campi elettrici e magnetici perpendicolari che può essere utilizzato come filtro di velocità per particelle cariche [4]

A questo punto, il fascio può essere portato alle utenze, per gli esperimenti che richiedono basse energie, o iniettato in un *Charge Breeder* (CB), dispositivo in grado di aumentare la carica del fascio. Un ulteriore separatore di massa verrà installato per selezionare lo stato di carica più intenso; il fascio è quindi iniettato in un *Radio Frequency Quadrupole* (RFQ) e raggiunge infine l'acceleratore ALPI.

Si ricorda che la corrente finale del fascio radioattivo dipende dall'efficienza di molti processi fisico-chimici: complessivamente ci si aspetta, alle sale sperimentali, un fascio con rapporto di circa  $10^6 - 10^9$  isotopi/s (molto inferiore alle  $10^{13}$  fissioni/s date dalla fissione nucleare).

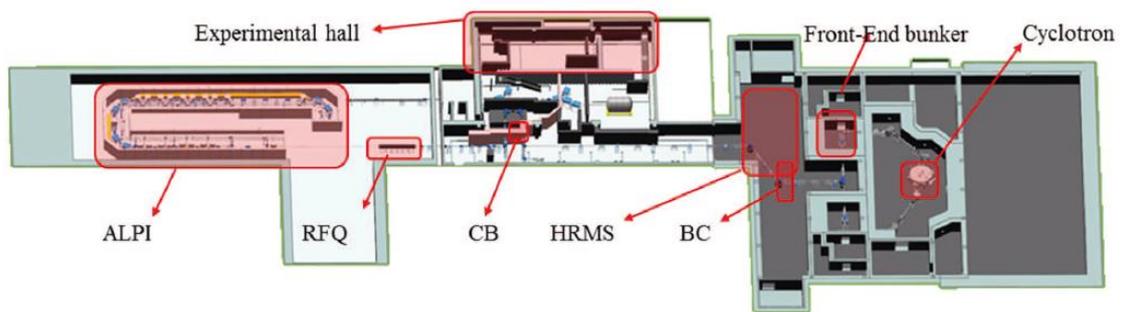


Figura 1.4 Rappresentazione della struttura dei laboratori esistenti con l'integrazione del progetto SPES [3].

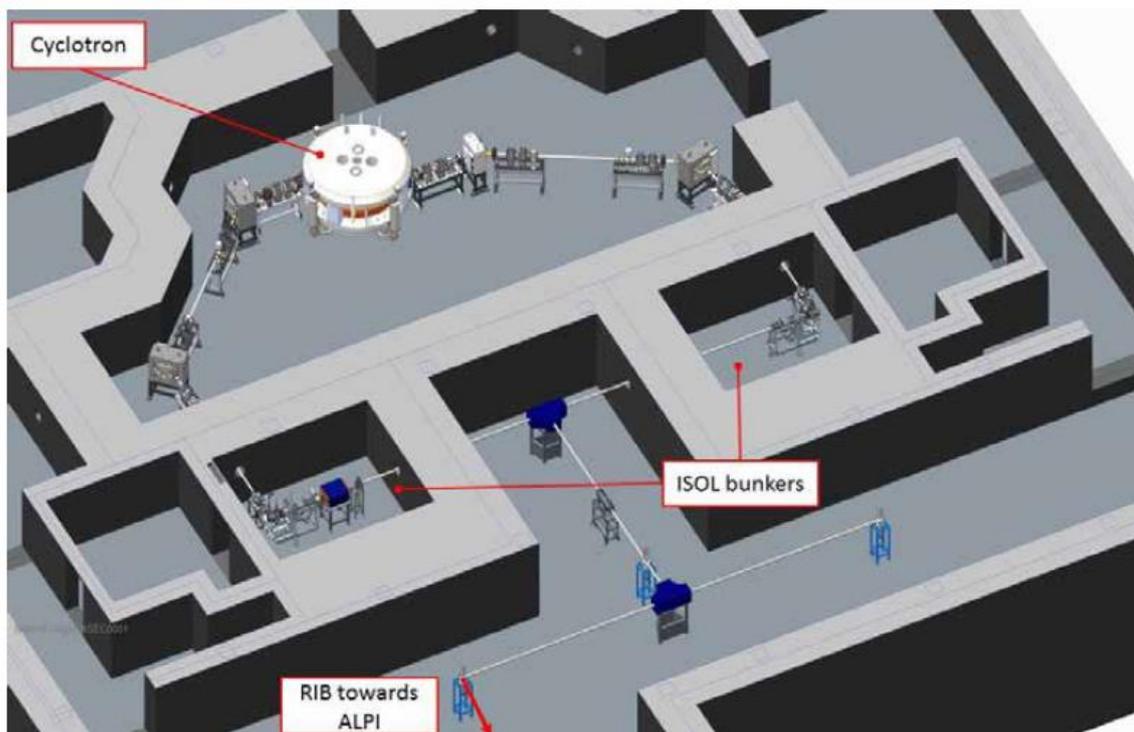


Figura 1.5 Layout del progetto SPES [3].

I principali elementi che compongono la *facility* sono di seguito descritti.

### 1.4.1 L'acceleratore primario

L'acceleratore primario ha il compito di produrre un fascio protonico in grado di colpire il target di uranio in cui avviene la reazione di fissione nucleare. Nella *facility* SPES viene utilizzato come acceleratore un ciclotrone: i fasci sono accelerati utilizzando una corrente alternata ad alta frequenza ed alta tensione, in associazione con un campo magnetico perpendicolare. La traiettoria percorsa dalle particelle è a spirale a partire dal centro. Raggiunto il bordo esterno della macchina il fascio fuoriesce ad alta velocità (Figura 1.6).

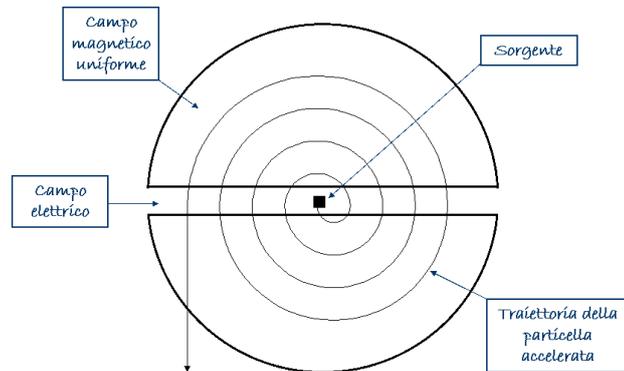


Figura 1.6 Schema di funzionamento di un ciclotrone [4].

Tale dispositivo, oltre a garantire le performance richieste per la produzione di ioni esotici, offre la possibilità di utilizzare una seconda linea di fascio in modo indipendente.

Il ciclotrone scelto per il progetto SPES è il BEST 70p (Figura 1.7), sviluppato dalla BestCyclotron, in grado di fornire due fasci di protoni indipendenti fino a 70 MeV di energia e aventi corrente massima di 750  $\mu$ A.



Figura 1.7 Il ciclotrone BEST 70p presente all'interno della facility SPES [5].

## 1.4.2 Il Front-end

Con il termine Front-End si indica l'insieme dei diversi dispositivi che concorrono alla produzione ed al trasporto dei fasci di ioni radioattivi. Permette di realizzare un grado di vuoto sufficientemente spinto per il corretto funzionamento di tutti gli organi al suo interno e ad esso collegati. L'alto livello di vuoto, dell'ordine di  $10^{-6}$  mbar, facilita il cammino dei due fasci ed evita l'ossidazione dei componenti del target. Il vuoto si ottiene in due passaggi: inizialmente una serie di pompe volumetriche raggiungono vuoti dell'ordine di  $10^{-2}$  –  $10^{-3}$ , successivamente l'azionamento di pompe turbo-molecolari permette di ottenere le pressioni richieste.

Il Front-End del Progetto SPES, rappresentato in Figura 1.8 e Figura 1.9, si compone essenzialmente di due parti:

- Il Front-End protonico (FEP), responsabile del trasporto del fascio protonico fino all'ingresso alla camera target;
- Il Front-End radioattivo (FER), responsabile del trasporto e dell'accelerazione del fascio radioattivo.

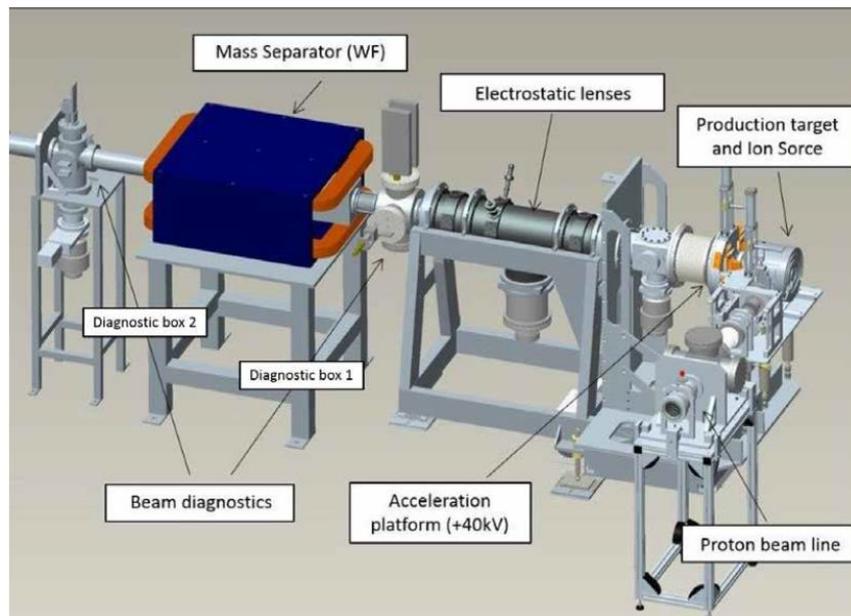


Figura 1.8 Il Front-End del progetto SPES [6].

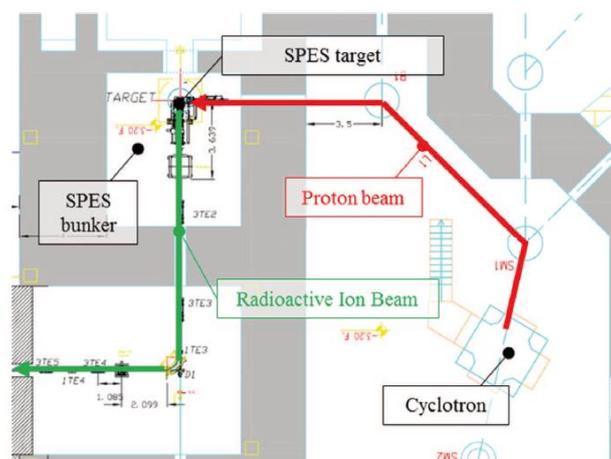


Figura 1.9 Distinzione tra fascio protonico e fascio radioattivo all'interno del bunker SPES [3].

### 1.4.2.1 Il Front-end protonico

È importante prevedere una diagnostica sicura ed efficiente della linea protonica, per essere in grado di gestire correttamente il fascio. Il diagramma a blocchi dell'architettura sviluppata per il Front-End SPES è presentata in Figura 1.10.

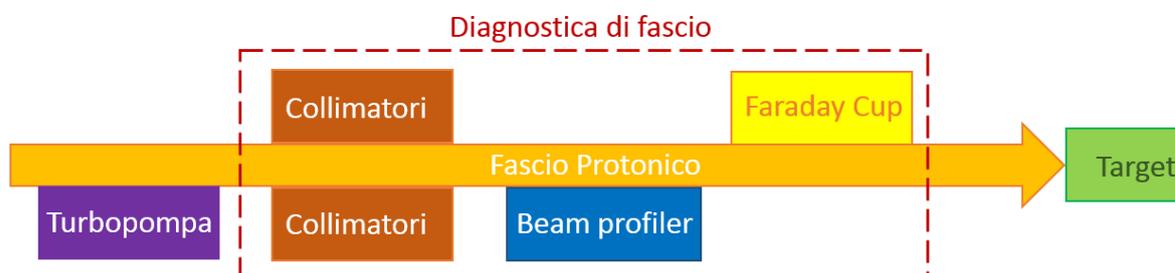


Figura 1.10 Diagramma a blocchi della linea del fascio protonico.

I collimatori sono i primi elementi previsti nella diagnostica di fascio poiché ne controllano la direzione, individuando eventuali disallineamenti durante il funzionamento. Sono inoltre essenziali per determinare la dimensione del fascio protonico ed evitare che questo colpisca altri elementi lungo la linea. Sostanzialmente fermano le particelle esterne del fascio protonico, definendo così la sua forma. È quindi previsto un *beam profiler*, per valutare il profilo del fascio, e una Faraday Cup, per misurarne l'intensità. Questi dispositivi sono sempre utilizzati per preparare e settare il sistema prima dell'irraggiamento del target.

### 1.4.2.2 Il target di produzione e il sistema di estrazione e di ionizzazione

Sia il target di produzione dei radioisotopi, sia il sistema di estrazione e ionizzazione degli stessi, sono contenuti all'interno di una camera di forma cilindrica (*camera target*), raffreddata mediante un opportuno circuito dell'acqua per le elevate potenze in gioco (Figura 1.11). Come detto, per evitare l'ossidazione dei componenti presenti, causata dalle alte temperature, l'interno della camera viene mantenuto in condizioni di alto vuoto (con pressioni dell'ordine dei  $10^{-6}$  mbar). 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*.

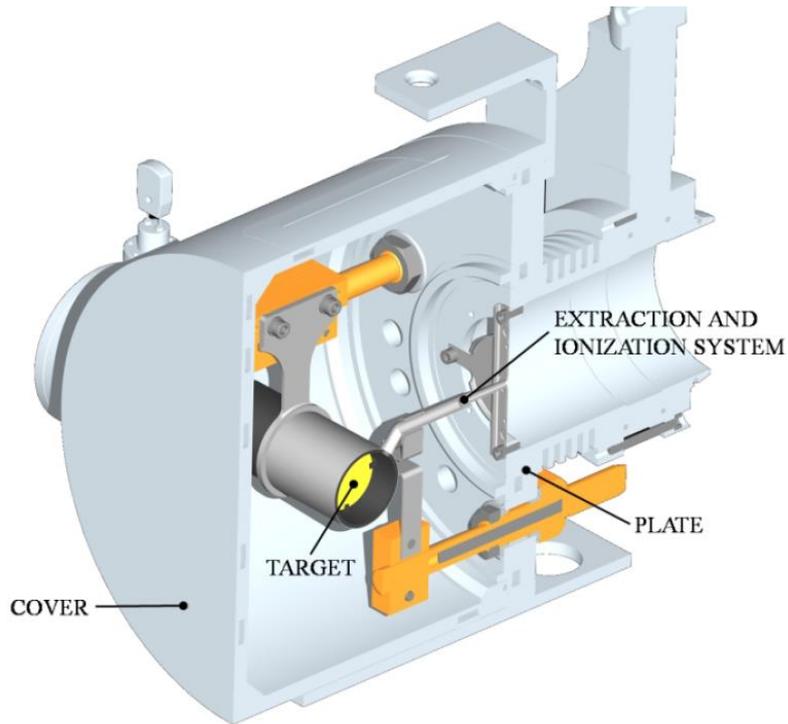


Figura 1.11 Sezione della camera target [7].

Il target è composto da sette dischi coassiali in  $UC_x$ , con diametro di 40 mm e circa 1 mm di spessore, opportunamente distanziati in direzione assiale, al fine di dissipare attraverso radiazione termica la potenza sviluppata dal fascio di protoni. I dischi sono contenuti in un tubo cavo di grafite (*box*), avente un diametro esterno e una lunghezza di 49 e 200 mm rispettivamente (Figura 1.12).

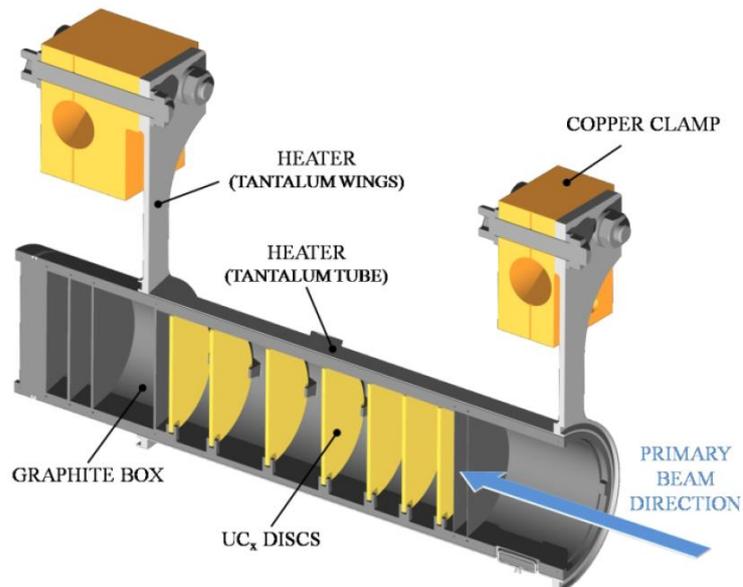


Figura 1.12 Sezione del target: si possono facilmente individuare i dischi di uranio all'interno della box in grafite e il sistema riscaldante [7].

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, che 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<sub>x</sub>, il fascio primario va a impattare su tre *dumper* e sul fondo scatola (*box base*); grazie a questi elementi è garantito l'assorbimento definitivo del fascio, al fine di evitare l'attivazione della camera esterna, ed è impedita la fuoriuscita di particelle dal lato posteriore del target. Per migliorare l'estrazione dei prodotti di fissione risulta necessario mantenere una temperatura media di 2000°C all'interno della *box* in grafite. Ciò è reso possibile dall'introduzione di un dispositivo indipendente, il riscaldatore (*heater*), che si occupa del riscaldamento e della schermatura del target: la potenza del fascio non risulta infatti sufficiente per portare il target al livello di temperatura richiesto. Questo sistema permette inoltre di evitare bruschi sbalzi di temperatura, che risulterebbero inevitabilmente dannosi per l'integrità strutturale dei dischi.

Il riscaldatore è composto da un tubo molto sottile (*tube*) saldato ai bordi a due ali (*wings*) direttamente collegate a morsetti in rame (*clamps*); attraverso i morsetti il riscaldatore è in grado di dissipare per effetto Joule il desiderato quantitativo di potenza. La temperatura del sistema *box*-dischi è quindi mantenuta al valore di utilizzo grazie al calore sviluppato durante la fissione nucleare e alla potenza dissipata per effetto Joule. Per questo, 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.

Quando il fascio di protoni investe i sette dischi di carburo di uranio si innesca il processo di fissione con la conseguente produzione di nuclei radioattivi aventi massa compresa tra gli 80 e i 160 uma. A questo punto la specie esotica deve essere estratta dal target e ionizzata: il processo richiede del tempo e per questo 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). 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.

Il processo di ionizzazione è necessario per accelerare i nuclei radioattivi, sfruttando una differenza di potenziale: l'intensità e la qualità del fascio radioattivo sono dunque fortemente influenzate dalla scelta della sorgente di ionizzazione.

La camera target, contenente sia il bersaglio sia il sistema di estrazione e ionizzazione, viene collegata al front end: tra i due componenti è presente una differenza di potenziale ( $V_{camera} - V_{front-end}$ ) di circa 40 kV, che attira gli ioni radioattivi. Risulta quindi necessaria la presenza di un isolante elettrico (*electrical insulator*) per evitare il contatto diretto. Gli ioni vengono accolti da un elettrodo (*electrode*) realizzato in lega di Titanio (Ti6Al4V). In questo modo si forma il fascio di ioni radioattivi che passerà attraverso i separatori elettromagnetici ed il post acceleratore, fino ad arrivare alle sale sperimentali.

### 1.4.2.3 Le sorgenti di ionizzazione

La scelta della sorgente dipende dall'energia necessaria per portare un elettrone dalla sfera di valenza ad una distanza infinita dall'atomo: dipende dunque dal potenziale di ionizzazione.

Sorgenti di ionizzazione superficiale (SIS – *Surface Ionization Source*) sono adatte ad elementi con bassi potenziali di ionizzazione, che richiedono quindi una contenuta energia. Una sorgente di ionizzazione laser (RILIS - *Resonant Ionization Laser Ion Source*) è in grado di ionizzare selettivamente elementi con medio potenziale. Infine, elementi con elevato potenziale richiedono una sorgente di ionizzazione al plasma (PIS – *Plasma Ionization Source*), senza però la possibilità di ionizzazione selettiva. In Figura 1.13 viene visualizzata la tavola degli elementi, con i corrispondenti metodi di ionizzazione scelti.

I sistemi di ionizzazione SIS e LIS fanno riferimento alla medesima architettura (Figura 1.14), frutto di una riprogettazione della sorgente "MK1 ISOLDE" sviluppata al C.E.R.N. di Ginevra. Il componente principale di questa sorgente è la *hot cavity*: un piccolo tubo di tantalio all'interno del quale avviene la ionizzazione. Viene accoppiata per interferenza al foro centrale del supporto in tantalio mentre, dall'altra parte, il collegamento con la linea di trasferimento avviene tramite un tappo (*bush*) in tantalio. Le elevate temperature in gioco durante l'utilizzo provocano la realizzazione di una saldatura tra i componenti.

		<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="width: 15px; height: 15px; background-color: yellow; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></div> surface ionization mechanism  <div style="width: 15px; height: 15px; background-color: lightgreen; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></div> laser ionization mechanism  <div style="width: 15px; height: 15px; background-color: red; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></div> electron impact ionization mechanism  <div style="width: 15px; height: 15px; background-color: lightblue; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></div> not extracted         </div>																	
1	2	1											13	14	15	16	17	18	
1	2	1	2											13	14	15	16	17	18
		3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18		
2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19		
		21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36		
3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20		
4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21		
5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22		
6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23		
7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24		
		104	105	106	107	108	109	110	Main fission (p-> <sup>238</sup> U) fragments									110	

Figura 1.13 Tavola Periodica degli elementi con i rispettivi meccanismi di ionizzazione [6].

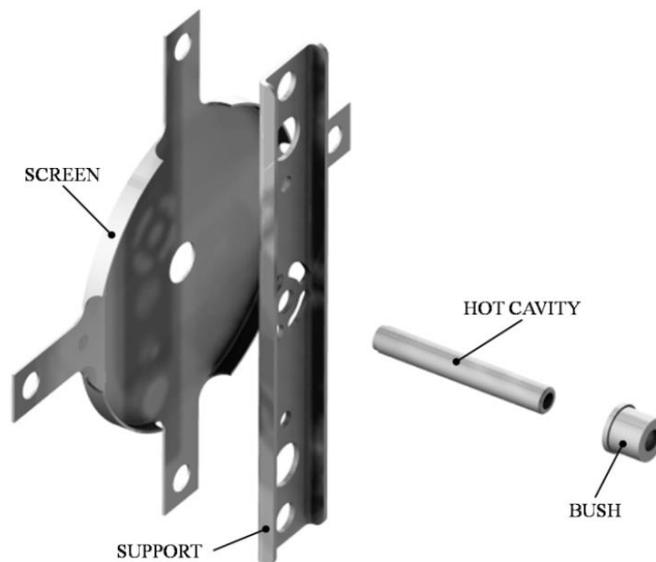


Figura 1.14 Rappresentazione della sorgente di ionizzazione di tipo SIS (Surface Ion Source [3]).

Nella **Surface Ion Source (SIS)**, la ionizzazione è causata dall'impatto degli isotopi radioattivi provenienti dal target sulla superficie interna della *hot cavity*. L'elevata temperatura a cui si trova la sorgente permette un processo di ionizzazione efficiente e selettivo ma soltanto per gli elementi del primo e del secondo gruppo. Devono inoltre essere previsti dei separatori elettromagnetici (*mass separator*) in grado di selezionare gli isotopi desiderati in base alla massa. Ad ogni modo, la purezza del fascio non è garantita a causa della presenza di isotopi isobari, aventi cioè lo stesso numero di massa  $A$  ma diverso numero atomico  $Z$ . In questo caso si rendono necessari separatori isobari, dispositivi complicati, costosi e poco affidabili che causano, inoltre, una notevole riduzione dell'intensità del fascio.

Il metodo **RILIS (Resonant Ionization Laser Ion Source)** è oggi il più potente strumento per la produzione di fasci di ioni radioattivi per le *facilities* di tipo ISOL, in quanto permette un processo di ionizzazione selettiva e garantisce la soppressione di contaminazioni indesiderate a livello della sorgente di ionizzazione. Il metodo

RILIS utilizza la stessa architettura della tecnica di ionizzazione superficiale (SIS) e prevede di proiettare un laser all'interno della *hot cavity* (Figura 1.15).

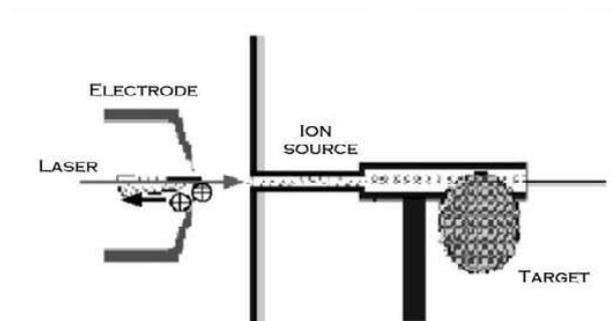


Figura 1.15 Schema di funzionamento del Sistema di Ionizzazione RILIS (Resonant Ionization Laser Ion Source) [7].

Tale laser è composto dalla sovrapposizione di più raggi (due o tre a seconda dell'elemento chimico da ionizzare) aventi lunghezze d'onda e quindi frequenze differenti, corrispondenti a diversi valori energetici dei fotoni emessi. Esso irradia gli isotopi e fornisce loro energia necessaria per far compiere all'elettrone più esterno dei salti quantici verso orbitali ancor più lontani dal nucleo, fino alla separazione dell'atomo. In questo modo si ha la formazione di uno ione positivo  $1+$ . La metodologia RILIS permette di acquisire soltanto ioni radioattivi della specie di interesse producendo un fascio nel quale le contaminazioni sono minime. Per avere un'efficienza di ionizzazione elevata è di fondamentale importanza limitare e controllare il disallineamento della *hot cavity* causato dall'espansione termica. Se infatti questa si disallinea viene a ridursi la zona di azione del laser e, di conseguenza, diminuisce l'efficienza di ionizzazione (Figura 1.16).

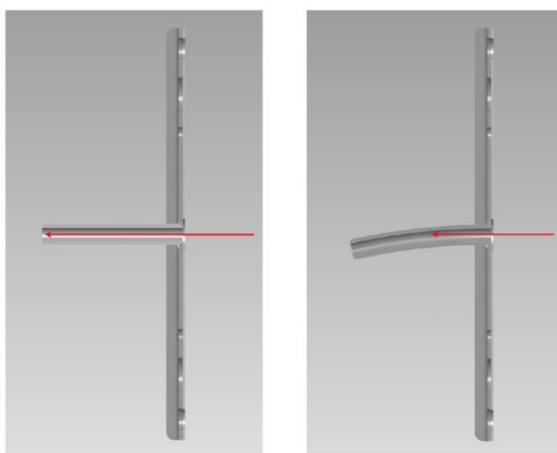


Figura 1.16 Disallineamento della *hot cavity* [7].

Con la sorgente **Plasma Ion Source (PIS)** gli atomi vengono ionizzati dall'impatto con elettroni accelerati per effetto termoionico. Il processo avviene in una struttura costituita da un catodo e da un anodo. Il catodo viene riscaldato grazie al passaggio di una corrente continua di 330-340 A e si porta ad alta temperatura. Questa conferisce agli elettroni un'energia superiore a quella di legame con l'atomo, tanto che si verifica l'emissione di elettroni da parte del catodo in una camera che funge da anodo. All'interno di questa camera gli elettroni rilasciati dal catodo, che vengono accelerati da una differenza di potenziale tipicamente di 150V, vengono a contatto con gli atomi da ionizzare: l'impatto elettronico causa la perdita di un elettrone da parte degli atomi dell'anodo (ioni positivi) creando quindi un plasma. In Figura 1.17 si rappresenta il principio di funzionamento della ionizzazione PIS.

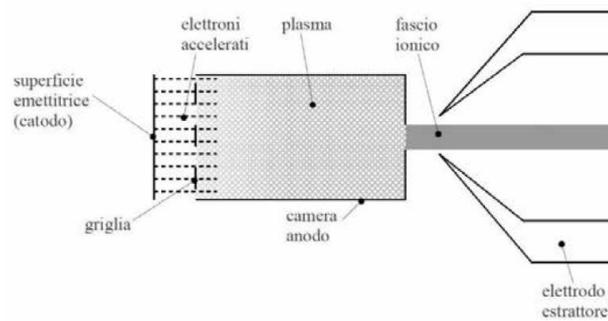


Figura 1.17 Schema di funzionamento del Sistema di Ionizzazione di tipo PIS (Plasma Ion Source) [7]

Nella *facility* ISOLDE del CERN viene usata una sorgente di ionizzazione al plasma di tipo FEBIAD chiamata MK5. Nell'ambito del progetto SPES un prototipo di questa sorgente è stato realizzato, testato e ottimizzato dal punto di vista elettro-termico. Questo tipo di sorgente è in grado di ionizzare qualsiasi tipo di elemento, anche se con efficienze inferiori rispetto alle tecniche laser e superficiale.

#### 1.4.2.4 Il Front-End radioattivo [3]

Il Front-End radioattivo ospita la camera del target e della sorgente di ionizzazione, fornisce la potenza e i segnali richiesti, ed infine estrae, separa e trasporta il fascio ionico radioattivo fuori dal bunker. È composto da vari sub apparati, visibili in Figura 1.18. La sua progettazione non è critica quanto quella del Front-End protonico, dal punto di vista termico e strutturale, ma il numero di dispositivi qui installati la rendono molto complicata. In particolare, vi sono tre principali elementi responsabili del trasporto del fascio:

- I deflettori: utilizzati per correggere disallineamento del fascio, causato da inevitabili imprecisioni nei processi di produzione, di assemblaggio, di controllo etc.
- I tripletti: i dispositivi maggiormente utilizzati per il trasporto del fascio, sono composti da tre quadripoli. Saranno installati due tripletti nel bunker SPES: il primo è utilizzato per fornire il fascio corretto al Wien Filter, mentre il secondo trasporterà il fascio fuori dal bunker.
- Il Wien Filter: è un separatore di velocità, ma nel progetto SPES è utilizzato come separatore di massa.

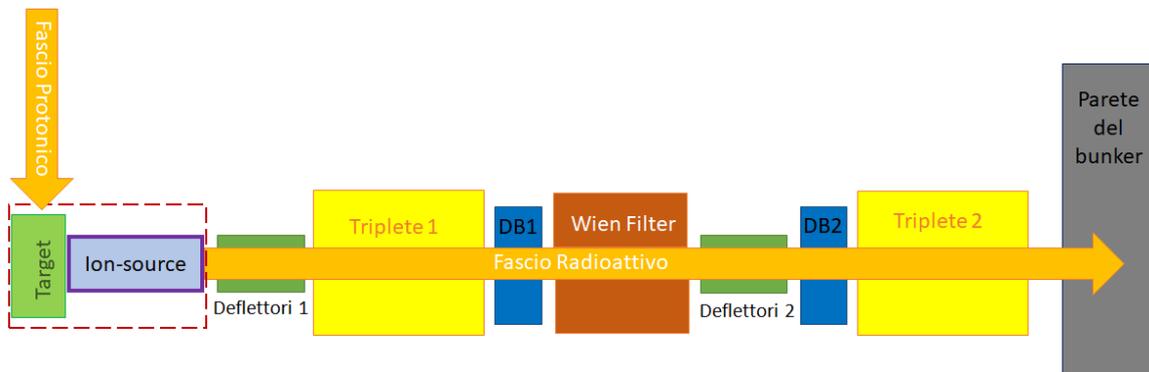


Figura 1.18 Diagramma a blocchi della linea di fascio radioattivo.

Il controllo finale avverrà nelle diagnostiche di fascio, ospitate in DB1 e DB2 (Figura 1.18). La prima è utilizzata per controllare la dimensione e l'allineamento prima dell'ingresso al Wien Filter. La seconda è fondamentale per settare correttamente il Wien Filter, per intercettare il fascio indesiderato e misurarne le dimensioni. Entrambi i box diagnostici sono provvisti di una Faraday Cup, un dispositivo che misura l'intensità del fascio, e un Beam Profiler, utilizzato per stimarne la dimensione.

I deflettori (o *steerers*) sono sostanzialmente composti da due piatti, con una forma opportuna, mantenuti ad un certo potenziale. Solitamente, uno degli elettrodi è posto a potenziale positivo, l'altro a potenziale negativo, come presentato in Figura 1.19, così da creare un campo elettrico uniforme e costante. Utilizzando due coppie di *steerers*, è possibile eliminare completamente il disallineamento del fascio (in posizione e angolazione): il primo deflettore corregge la traiettoria, il secondo allinea il fascio al centro dell'asse.

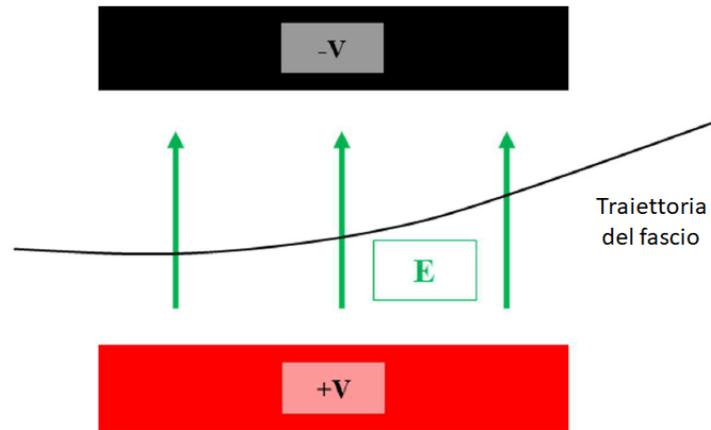


Figura 1.19 Rappresentazione schematica di un deflettore.

Il tripletto è un dispositivo che permette di controllare la dimensione del fascio lungo la linea. È costituito da una terzina di quadripoli, la cui sezione ideale è rappresentata in Figura 1.20. Qui il profilo ideale ad iperbole di un quadripolo infinito crea linee isopotenziali.

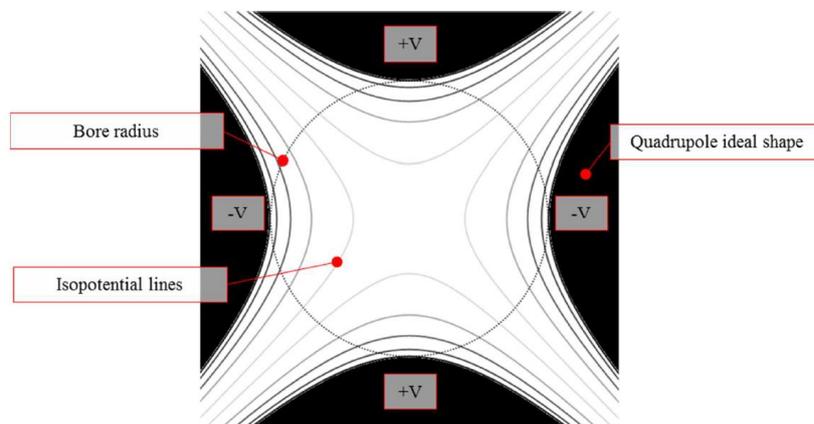


Figura 1.20 Sezione di un quadripolo ideale [3].

### 1.4.3 I sistemi di movimentazione

L'insieme dei componenti del Front-End rimangono fissi all'interno del bunker e sono sottoposti ad una manutenzione programmata. Le zone prossime alla camera target sono però soggette ad un notevole danneggiamento dovuto all'elevata dose radioattiva assorbita, proveniente dal target. Per questo motivo si stima la sostituzione della camera target ogni 15 giorni di lavoro. Per escludere ogni intervento umano all'interno del bunker, i sistemi di movimentazione per la sostituzione della camera sono progettati in modo da poter eseguire le varie operazioni in modo completamente automatizzato.

Le fasi necessarie alla movimentazione della camera sono:

- Deposito della nuova camera target sulla tavola di ammaraggio (*coupling table*), sulla quale è appoggiato il dispositivo contenente il bersaglio di produzione;
- Movimentazione della camera posizionata sulla tavola di ammaraggio;
- Prelievo della camera irradiata e posizionamento all'interno di un componente chiamato sarcofago, progettato per contenerla una volta rimossa dal front end;
- Stoccaggio del sarcofago contenente la camera irradiata.

Le fasi di prelievo o deposito della camera target sulla o dalla *coupling table* sono gestite da due sistemi di movimentazione, in fase di progettazione, denominati sistema di movimentazione orizzontale (SMO) e sistema di movimentazione verticale (SMV). Il sistema di movimentazione orizzontale raggiunge la zona di produzione

del fascio partendo dalla zona fredda, situata sullo stesso piano del bunker. In caso di malfunzionamento, sarà possibile raggiungere il bunker utilizzando il sistema di movimentazione verticale dal primo piano dell'edificio SPES (Figura 1.21). Le movimentazioni della camera sulla tavola di ammaraggio sono gestite dal rispettivo sistema di movimentazione pneumatico. Infine per lo stoccaggio del sarcofago è in fase di progettazione un nuovo sistema di movimentazione interno al magazzino temporaneo (*temporary storage*).

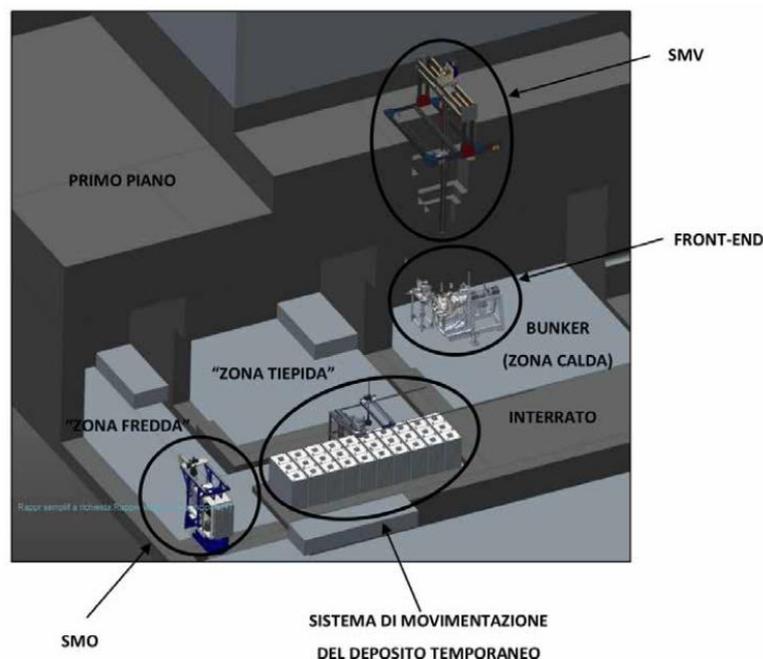


Figura 1.21 Sistemi di movimentazione all'interno dell'edificio SPES [6].

## 1.5 Applicazioni dei fasci di ioni esotici [7]

I campi di applicazione dei fasci di ioni esotici sono molteplici, non solo per quanto riguarda la fisica nucleare e dello stato solido ma anche in ambito medico e astrofisico. Di seguito vengono brevemente illustrate le applicazioni di maggiore interesse nei vari ambiti di ricerca.

### 1.5.1 Applicazioni in fisica nucleare

#### 1.5.1.1 Miglioramento e verifica del Modello Standard

L'attuale modello su cui si basa la fisica nucleare comprende tre delle quattro interazioni fondamentali: l'interazione nucleare forte, l'elettromagnetismo e l'interazione nucleare debole. E' inoltre in grado di descrivere le proprietà di tutte le particelle note ed osservate che costituiscono la materia. Ciò nonostante, il modello è basato su delle assunzioni non ancora pienamente verificate: partendo da basi di natura teorica, complessi esperimenti di fisica nucleare sono stati ideati per validarle. La messa in opera di tali procedure sperimentali richiede però precise misure sul tempo di decadimento di alcuni isotopi, ottenibili utilizzando i fasci radioattivi prodotti nelle *facilities* come sorgenti pure di ioni.

#### 1.5.1.2 Studio della struttura dei nuclei complessi

I fasci di ioni radioattivi possono fornire un prezioso contributo anche nello studio della struttura dei nuclei complessi. I nucleoni (protoni e neutroni) sono costituiti da sub particelle chiamate quark che esercitano un effetto fisico anche oltre i nucleoni che le contengono. Le interazioni tra i nucleoni all'interno del nucleo sono infatti diverse da quelle esistenti tra due nucleoni liberi, in quanto dipendenti dalla densità di protoni e neutroni

associati al particolare tipo di nucleo. Attualmente non è stata ancora identificata una formula generale in grado di quantificare l'entità delle interazioni nucleari per tutti i tipi di nuclei, in quanto calcoli di natura quantomeccanica sono applicabili solamente ai nuclei più leggeri. La fisica nucleare quindi si è posta l'obiettivo di ottenere una trattazione unitaria in grado di:

- Permettere di determinare l'effettiva interazione tra le particelle nucleari;
- Eliminare le incongruenze presenti nel modello corrente;
- Essere applicabile anche ai nuclei esotici, ossia quelli con rapporto protoni/neutroni estremo.

### 1.5.1.3 Produzione di elementi superpesanti

I fasci prodotti nelle *facilities* forniscono inoltre un importante contributo per la misura delle dimensioni del nucleo. Queste sono direttamente correlate al numero di nucleoni che costituiscono il nucleo stesso, ovvero al numero di massa ( $A$ ). Tale correlazione è espressa dalla formula:

$$R = R_0 A^{\frac{1}{3}} \quad (1.2)$$

dove  $R$  rappresenta il raggio del nucleo,  $R_0$  è una costante pari a 1.2 fermi (1fermi= $10^{-15}$ m) e  $A$  indica il numero di massa.

In condizioni lontane dalla stabilità è però possibile incontrare notevoli deviazioni dalla legge: se le interazioni tra i nucleoni diventano troppo piccole, può non essere garantita la formazione di un nucleo sotto forma di aggregato. Si possono quindi formare nuclei ad anello, detti nuclei "halo": questi nuclei presentano una sovrabbondanza di neutroni rispetto al corrispondente isotopo stabile. Inoltre uno o due di questi neutroni risentono di una debole interazione con il nucleo, orbitandovi intorno e rimanendo così separati da esso (neutroni di valenza). Un esempio di nucleo "halo" è l'isotopo  $^{11}\text{Li}$ , il cui nucleo presenta due neutroni di valenza. In questo nuclide la dimensione media del nucleo è paragonabile a quella dell'isotopo  $^{48}\text{Ca}$ : se però si considera anche l'alone racchiuso dalle orbite dei due neutroni di valenza, le dimensioni diventano confrontabili con quelle del nucleo molto più massivo dell'isotopo  $^{208}\text{Pb}$  (Figura 1.22).

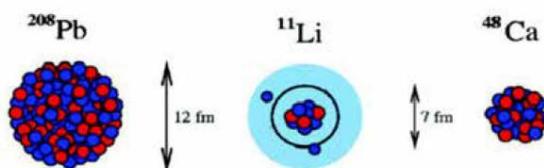


Figura 1.22 Paragone tra le dimensioni del nucleo di  $^{11}\text{Li}$  e quella di altri nuclei più massivi [1].

Il nucleo  $^{11}\text{Li}$  è un sistema a tre corpi (i due neutroni "esterni" ed il *core*) e rappresenta un esempio naturale di sistema Borromaiico (Figura 1.23): i tre anelli borromaiici sono legati l'un l'altro in modo tale che la rottura di uno permetta la separazione degli altri due. I nuclei ad anelli sono anche chiamati "nuclei Borromaiici" proprio perché se uno dei loro costituenti viene a mancare, gli altri divengono immediatamente instabili e si possono a loro volta allontanare facilmente. Attualmente, per la misura della distribuzione di protoni, sulla base di esperimenti di spettroscopia atomica, si usano fasci radioattivi di bassa energia e luce laser collineata. Per la determinazione della distribuzione di tutti i nucleoni, vengono invece impiegati fasci radioattivi ad alta energia.



Figura 1.23 Gli anelli Borromaiici [1].

La recente disponibilità di fasci ad alta energia, costituiti da nuclei instabili ricchi di neutroni, accoppiati a target stabili, anch'essi ricchi di neutroni, potrebbe inoltre aprire definitivamente la strada ad uno studio accurato sulla produzione di elementi superpesanti. Gli elementi naturali sono circa 90: dall'Idrogeno all'Uranio. Negli ultimi anni però, 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 peso atomico 112 e prospettando un'ulteriore estensione a 116. Sembra che questi elementi, chiamati appunto superpesanti, riescano a formarsi attorno alla cosiddetta "Isola di Stabilità" (una combinazione di 114 protoni e 184 neutroni che pare garantire la stabilità del nucleo).

## 1.5.2 Applicazioni in fisica dello stato solido

### 1.5.2.1 La tecnica Radio Tracer Diffusion

La tecnica Radio Tracer Diffusion, ideata nel 1920, consiste nell'impiantare in un sistema solido nuclei radioattivi, per poi studiarne il decadimento rilevando le particelle e le radiazioni gamma che vengono emesse. Questa tecnica risulta particolarmente utilizzata per lo studio dei processi di diffusione all'interno dei sistemi solidi, essendo possibile rilevare anche il segnale di pochissimi atomi. Il sistema ospitante può essere drogato con radioisotopi sonda sia per diffusione, mediante reazione nucleare, sia per impianto ionico. La scelta dello specifico isotopo radioattivo da utilizzare viene effettuata in base alle sue caratteristiche fisico-chimiche e proprietà nucleari.

L'utilizzo di questa tecnica consente di:

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

### 1.5.2.2 Drogaggio di 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/cm<sup>3</sup>. 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/cm<sup>3</sup>. La sensibilità di tale tecnica può essere profondamente aumentata mediante l'*emission channeling*, ovvero impiantando all'interno del cristallo impurezze radioattive che emettono particelle cariche (Figura 1.24). 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.

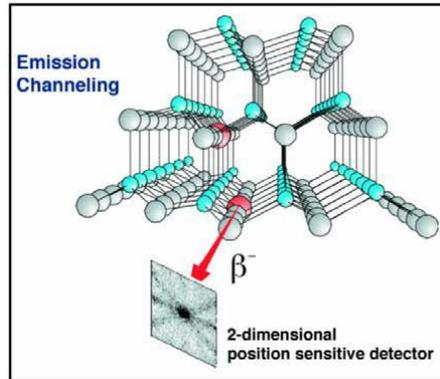


Figura 1.24 Emission channeling degli elettroni emessi da atomi radioattivi situati in una riga atomica del reticolo [6].

### 1.5.3 Applicazioni in astrofisica

L'astrofisica nucleare si prefigge di comprendere i meccanismi di produzione di energia nelle stelle, in tutte le fasi di evoluzione stellare, e di spiegare le abbondanze di tutti gli isotopi degli elementi che osserviamo in natura. Questi aspetti sono strettamente connessi in quanto i processi nucleari sono stati identificati come responsabili sia della produzione di energia nelle stelle, sia della creazione di elementi via via più pesanti a partire dagli elementi più leggeri. [8]

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.

### 1.5.4 Applicazioni in medicina nucleare

#### 1.5.4.1 La produzione di radiofarmaci

I fasci di ioni radioattivi possono avere interessanti applicazioni mediche sia nel campo della diagnosi sia nel campo del trattamento di patologie tumorali. Nell'ambito del progetto SPES è in fase di studio la possibilità di produzione di radioisotopi utili per applicazioni di medicina nucleare. In tale ambito la ricerca è molto viva e nell'ottica di una collaborazione tra i laboratori di fisica nucleare e gli ospedali, si stanno studiando i possibili radiofarmaci producibili. Ciò che rende questo studio significativo è la possibilità di produrre radiofarmaci ad altissima purezza, privi di contaminanti.

#### 1.5.4.2 La tomografia ad emissione positronica

La Tomografia ad Emissione Protonica (PET, *Positron Emission Tomography*) è 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.

Il positrone (detto anche antielettrone) è l'equivalente di antimateria dell'elettrone e presenta carica elettrica +1. L'antimateria è la materia composta da antiparticelle, ovvero particelle aventi la stessa massa e caratteristiche opposte a quelle che costituiscono la materia.

Quando un positrone si annichila con un elettrone, la loro massa viene convertita in energia sottoforma di due fotoni ad altissima energia e 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.

La procedura PET (Figura 1.25) inizia con l'iniezione nel soggetto di un isotopo tracciante di breve vita media, legato chimicamente ad una molecola attiva a livello metabolico. Quando la molecola metabolicamente attiva (spesso uno zucchero) raggiunge una determinata concentrazione all'interno dei tessuti organici da analizzare, può iniziare la scansione. L'isotopo di breve vita decade, emettendo un positrone. Dopo un breve percorso (al massimo pochi millimetri), il positrone si annichila con un elettrone, producendo una coppia di fotoni emessi in direzioni opposte tra loro. Questi fotoni sono quindi rilevati dal dispositivo di scansione grazie all'impiego di speciali tubi fotomoltiplicatori. Sono presi in considerazione solamente fotoni che raggiungono il rivelatore in coppia, cioè entro un intervallo di tempo di pochi nanosecondi. Dalla misurazione della posizione in cui i fotoni colpiscono il rivelatore (ogni coppia di fotoni individua una retta), si può ricostruire la posizione del corpo da cui sono stati emessi, permettendo così la determinazione dell'attività o dell'utilizzo chimico all'interno delle parti del corpo investigate.

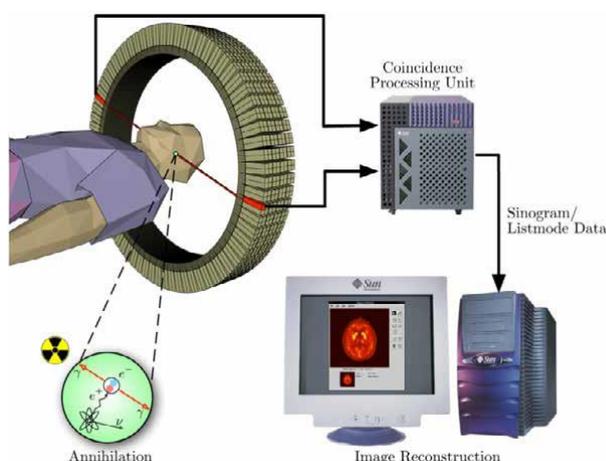


Figura 1.25 Schema riassuntivo della tecnica di analisi PET e modalità di acquisizione e presentazione dei dati [7].

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 rendendo così possibile una diagnosi ed il conseguente trattamento da parte di specialisti in medicina nucleare.

Spesso le scansioni della Tomografia a Emissione Positronica sono confrontate con le scansioni a Risonanza Magnetica Nucleare, fornendo informazioni sulla conformazione e sull'attività dell'organo o del tessuto oggetti di studio. La PET trova ampia diffusione in oncologia clinica (per ottenere rappresentazioni dei tumori e per la ricerca di metastasi) e nelle ricerche cardiologiche e neurologiche.

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.

I radionuclidi utilizzati nella scansione PET sono generalmente isotopi con breve tempo di dimezzamento, come  $^{11}\text{C}$  (circa 20 minuti),  $^{13}\text{N}$  (circa 10 minuti) e  $^{15}\text{O}$  (circa 2 minuti). A causa del loro ridotto tempo di dimezzamento, i radioisotopi devono essere prodotti da un ciclotrone posizionato in prossimità dello scansionatore PET.

La PET gioca un ruolo sempre maggiore nella verifica della risposta alla terapia, specialmente in particolari terapie anti-cancro; trova inoltre ampia diffusione in cardiologia e neurologia. Si prospettano per essa applicazioni e sviluppi sempre maggiori.

## 1.6 Conclusioni

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

Attualmente, nell'ambito del progetto SPES, si prevede di iniziare i test di accettazione della macchina acceleratrice di fasci radioattivi. Al fine di raggiungere tale obiettivo è necessario costruire e studiare degli apparati in grado di far fronte a questa fase di collaudo. Con il presente lavoro di tesi verrà sviluppato un sistema meccanico, chiamato Faraday Cup, da inserire nella Camera target per la misura della corrente del fascio protonico di 8kW di potenza. Lo studio del comportamento termico del sistema avverrà tramite analisi accoppiate elettro-termo-strutturali, con il codice di calcolo ad Elementi Finiti ANSYS, e modellazione tridimensionale dei componenti, tramite il software CREO PARAMETRICS.

Con l'obiettivo di testare la linea del fascio protonico, saranno poi svolte delle analisi relative alla sicurezza all'interno della camera: si andrà quindi a determinare il tempo di intervento, in caso di malfunzionamento, necessario per fermare il fascio con un *dump* in grafite.

Per la realizzazione del sistema Faraday Cup verrà utilizzata la grafite POCO EDM-3: a causa dell'elevata intensità del fascio, il materiale raggiungerà temperature di esercizio elevate. La mancanza di dati riguardanti la resistenza a compressione del materiale alle alte temperature ha reso necessaria la realizzazione di un setup per prove di compressione in temperatura. I dati ottenuti dalle prove sperimentali saranno quindi utilizzati per la verifica della progettazione della Faraday Cup.

## CAPITOLO 2

### Deposizione di potenza con il codice di calcolo ANSYS

#### 2.1 Introduzione

Il fascio rappresenta la maggiore concentrazione di potenza dell'intera *facility*: risulta quindi fondamentale un controllo molto accurato al fine di evitare la perforazione del canale protonico. In tal caso, infatti, gli effetti sarebbero molto problematici: l'aria in ingresso nel canale e, di conseguenza, nella camera target, potrebbe causare la combustione dei dischi in UC<sub>x</sub>, con il conseguente rilascio di gas radioattivi all'interno del bunker. Questo evento può essere provocato da una mancanza di alimentazione non prontamente diagnosticata, una cattiva gestione del canale protonico o un controllo insufficiente delle caratteristiche del fascio. Per questi motivi è importante prevedere una diagnostica sicura ed efficiente.

In quest'ottica si inserisce la progettazione della Faraday Cup, un dispositivo che intercetta il fascio di particelle cariche (fascio ionico) e ne misura l'intensità di corrente. Al fine di valutare il comportamento termo-strutturale al quale sarà sottoposto il sistema meccanico, si sono rese necessarie delle verifiche preliminari con il codice di calcolo agli Elementi Finiti ANSYS. In questo capitolo verranno presentate delle simulazioni di deposizione di potenza al variare della dimensione del modello e dell'applicazione del carico, per poter validare i risultati ottenuti con ipotesi semplificative. È possibile infatti sfruttare l'assialsimmetria della geometria (anche in termini di carichi, vincoli e proprietà del materiale), per ridurre la dimensione e la complessità del modello. La validazione di simulazioni bidimensionali, unite alle considerazioni sull'applicazione del carico presentate nel prossimo paragrafo, permettono un significativo guadagno in termini di tempo di simulazione.

#### 2.2 Caratteristiche del fascio radioattivo

Il target descritto nel Capitolo 1 è stato progettato per lavorare con fasci ad alta potenza ( $E = 40$  MeV,  $I = 234$   $\mu$ A,  $P = 9.4$  kW). Si assume un fascio circolare con una distribuzione di intensità gaussiana simmetrica in entrambe le direzioni e rotante, con uno scostamento dell'asse protonico rispetto all'origine del sistema si riferimento pari a  $m$ .

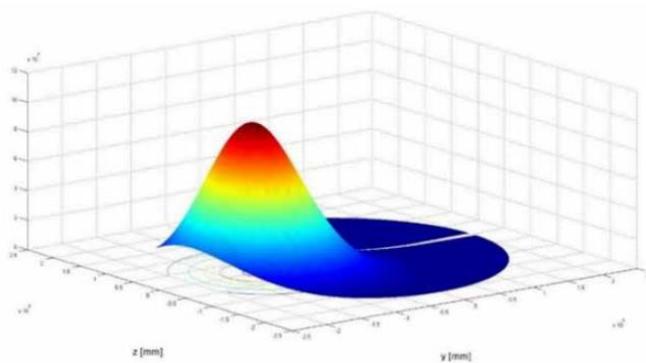


Figura 2.1 Rappresentazione del profilo del fascio protonico con raggio di rotazione  $m$  rispetto all'origine del sistema di riferimento. [6]

A causa della presenza di collimatori lungo la linea protonica, che trattengono parte del fascio, si avrà però una perdita di potenza. Le caratteristiche del fascio, quando entra nella camera e colpisce il target, risultano quindi:

- Energia  $E = 40$  MeV;
- Intensità  $I = 200$   $\mu$ A.
- Deviazione standard  $\sigma_x = \sigma_y = 7$  mm
- Raggio di rotazione  $m = 11$  mm

È stato inoltre studiato un secondo target, di dimensioni ridotte rispetto al primo, caratterizzato da dischi di diametro pari a 13 mm. Questo target è detto di bassa potenza in quanto le condizioni di lavoro a cui sarà sottoposto prevedono una diminuzione della potenza del fascio incidente e quindi della dissipazione termica totale dovuta alle reazioni nucleari che avvengono quando i protoni incidono sui dischi. Lavorando con fasci a bassa intensità, il target sarà caratterizzato da minore radioattività e verrà quindi irraggiato per primo durante la fase dei test. Date le dimensioni ridotte rispetto al fascio precedente, non si avrà perdita di potenza sui collimatori presenti lungo la linea. Quando entra nella camera le caratteristiche del fascio risultano allora:

- Energia  $E = 40 \text{ MeV}$ ;
- Intensità  $I = 35 \text{ }\mu\text{A}$ .
- Deviazione standard  $\sigma_x = \sigma_y = 4.75 \text{ mm}$
- Raggio di rotazione  $m = 0 \text{ mm}$

Per il target di bassa potenza è però previsto un collimatore all'ingresso della camera: il fascio che raggiunge il target presenterà quindi un'intensità pari a  $I = 20 \text{ }\mu\text{A}$ . La dissipazione di potenza su questo target risulta pari a circa 800 W, ovvero 10 volte inferiore a quella prevista per il precedente.

In Figura 2.2 è rappresentata una schematizzazione dei due tipi di fascio.

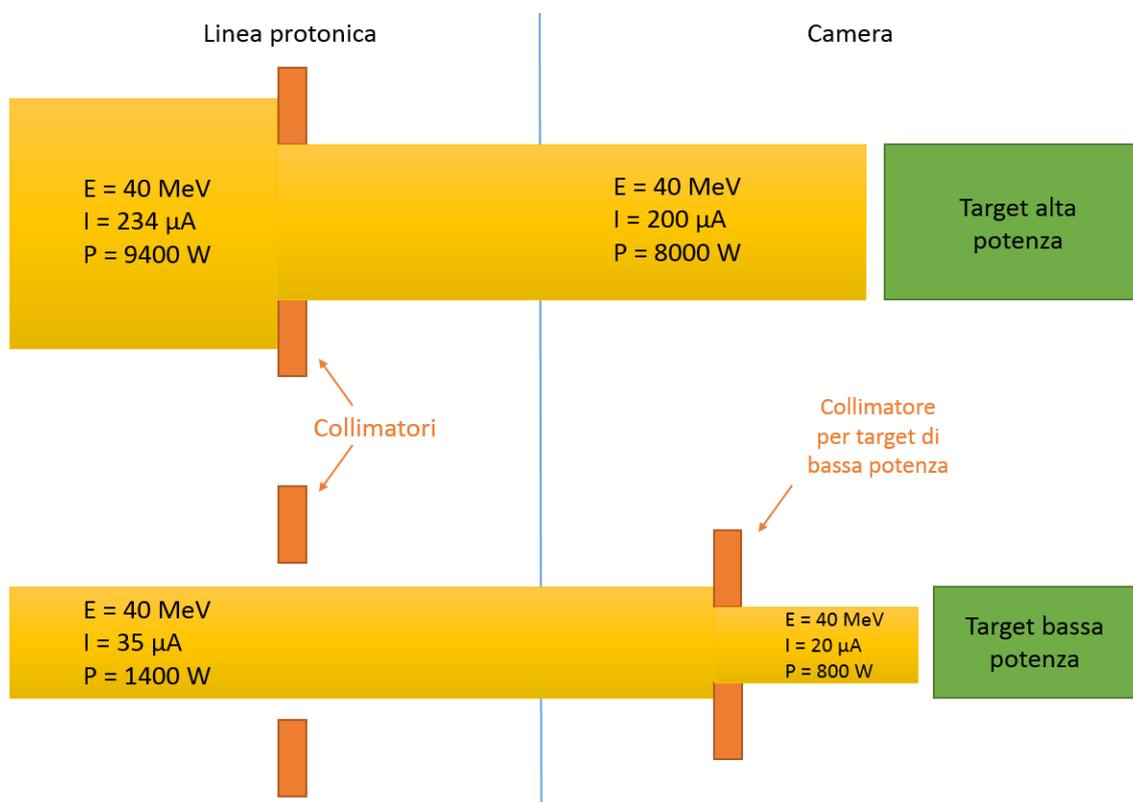


Figura 2.2 Rappresentazione schematica delle caratteristiche del fascio per il target di alta e bassa potenza.

### 2.3 Applicazione del carico

È necessario prestare molta attenzione alla definizione della deposizione di potenza, che rappresenta la condizione al contorno più critica nella progettazione della Faraday Cup. Esistono vari codici in grado di simulare il trasporto e l'interazione di particelle e nuclei con la materia: nel presente lavoro si utilizza il codice Monte Carlo FLUKA. Definite le caratteristiche del fascio e della geometria di impatto, è possibile ricavare la deposizione di potenza sul modello. I dati sono quindi utilizzati come input per simulazioni termo-strutturali con il codice agli Elementi Finiti ANSYS. La procedura appena descritta comporta inevitabilmente un elevato tempo di simulazione. Si è resa quindi necessaria l'introduzione di ipotesi semplificative sulla distribuzione della deposizione di potenza: in particolare, si suppone una distribuzione gaussiana, costante lungo l'asse della geometria. Il confronto tra i risultati ottenuti, presentati nei prossimi paragrafi, permette la validazione dell'ipotesi semplificativa.

### 2.3.1 Deposizione di potenza con il codice FLUKA [3]

La potenza del fascio può essere semplificata con una distribuzione gaussiana:

$$p(x, y, t) = \frac{P}{2\pi\sigma^2} \cdot \exp\left(-\frac{((x - r_w \cdot \cos(\omega t))^2 + (y - r_w \cdot \sin(\omega t))^2)}{2\sigma^2}\right) \quad (2.1)$$

Dove  $\sigma$  è la deviazione standard del fascio (assunta uguale sul piano x e sul piano y),  $r_w$  e  $\omega$  sono rispettivamente il raggio di rotazione e la sua frequenza angolare,  $t$  è il tempo,  $x$  e  $y$  la posizione,  $P$  la potenza totale del fascio (assumendo nulle le perdite) e  $p$  la densità di potenza per area.

Un esempio del profilo del fascio è presentato in Figura 2.3:

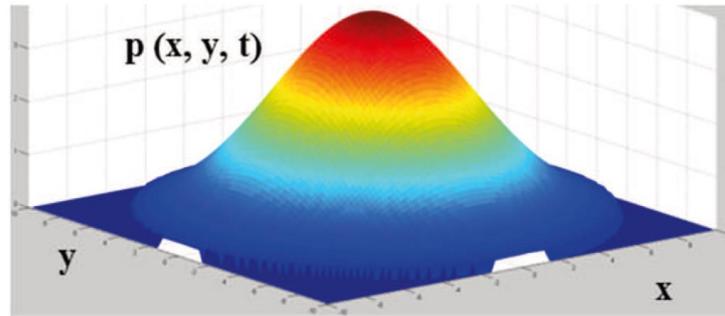


Figura 2.3 Esempio di distribuzione gaussiana usata nel modello della potenza del fascio protonico ( $r_w=0$ ). [3]

Per semplificare il controllo, si modella il profilo del fascio come una gaussiana, caratterizzata da un certa deviazione standard, rotante attorno all'asse della geometria. Il *wobbler*, il dispositivo che permette la rotazione del fascio, è fondamentale per la distribuzione della potenza sulle superfici. Si osservi come queste considerazioni siano valide indipendentemente dal fatto che nella camera sia presente il target o la Faraday Cup.

A titolo di esempio, si considerino i due profili di fascio presentati in Figura 2.4 che colpiscono i dischi del target (vedi paragrafo 1.4.2.1). Senza *wobbling* (rotazione attorno all'asse), il picco di potenza al centro del disco risulta maggiore di circa il 50%, con un conseguente aumento della differenza di temperatura tra il centro e il bordo del disco, e quindi maggiori tensioni. Inoltre, un fascio di minori dimensioni, concentrato sui bordi del disco grazie al *wobbler*, comporta la diminuzione della temperatura massima, e quindi delle tensioni, al centro del disco.

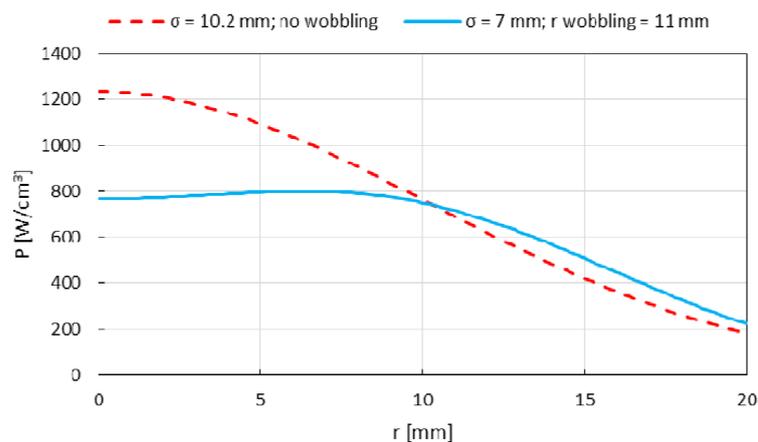


Figura 2.4 Densità di potenza nel primo disco del target, con o senza wobbling [3].

Entro limiti ragionevoli, risulta evidente che le migliori condizioni di esercizio si ottengano all'aumentare del raggio di rotazione e al diminuire della dimensione del fascio. Le condizione limite è rappresentata proprio dalla dimensione del fascio, direttamente dipendente dall'emittanza e dalla linea di trasporto. Nel nostro caso, la BEST Company conferma una deviazione standard massima di 7 mm per il fascio che colpisce il target. Inoltre le perdite di potenza del fascio sui collimatori aumentano con il raggio di rotazione. Un buon

compromesso tra perdite e condizioni di esercizio, con una deviazione standard di 7 mm, si traduce in un raggio di rotazione di 11 mm, con un 15% di potenza persa sui collimatori.

Una volta inserite le caratteristiche del fascio protonico in ambiente FLUKA, è possibile calcolare la deposizione di potenza sulla geometria considerata. I dati saranno quindi utilizzati come input per le simulazioni termo-strutturali in ANSYS. In particolare, i risultati sono forniti come *table*: la geometria viene discretizzata lungo la direzione assiale e radiale e per ogni coppia di coordinate viene assegnato un valore di potenza depositata. Saranno svolte varie analisi con discretizzazione diverse per valutare le condizioni migliori.

### 2.3.2 Deposizione di potenza con andamento Gaussiano

La possibilità di poter imporre direttamente in ANSYS una distribuzione di potenza con andamento gaussiano, senza la necessità di una precedente simulazione FLUKA, comporta un notevole risparmio di tempo. Utilizzando le medesime caratteristiche di fascio in termini di deviazione standard, raggio di rotazione e potenza, ma assumendo un raggio di rotazione  $m = 0$ , si impone una distribuzione gaussiana costante lungo l'asse:

$$p(r) = \left( \frac{P}{2\pi\sigma^2} \cdot \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right) \right) \quad (2.2)$$

Dove  $P$  è la potenza del fascio,  $\sigma$  la deviazione standard,  $r$  la posizione radiale e  $p$  la densità di potenza normalizzata sullo spessore. Nel caso in cui il raggio di rotazione  $m$  sia diverso da zero, è necessario integrare numericamente il seguente integrale:

$$p(r) = \frac{P}{2\pi\sigma^2} \cdot \int_0^{2\pi} \exp\left(-\frac{(r \cdot \cos\theta - m)^2 + r \cdot \sin\theta^2}{2\sigma^2}\right) r dr \quad (2.3)$$

## 2.4 Simulazioni e risultati

Le simulazioni, necessarie alla validazione del modello bidimensionale e dell'ipotesi di deposizione di potenza con andamento gaussiano, sono state eseguite su due geometrie differenti, una cilindrica e una conica. Per completare il modello, è stata introdotta nella simulazione la camera, rappresentata da una sfera di dimensioni paragonabili a quelle reali. Si osservi come sia stata considerata una potenza maggiore nell'applicazione del fascio a bassa potenza, in favore di sicurezza. Viene inoltre valutata la discretizzazione migliore in ambiente FLUKA.

### 2.4.1 Geometria cilindrica

Il modello è costituito da un cilindro in grafite di raggio 25 mm e spessore 12 mm, contenuto in una sfera di raggio interno 250 mm e raggio esterno 255 mm, rappresentati in Figura 2.5. Il cilindro viene investito da un fascio protonico con le seguenti caratteristiche:

- Energia  $E = 40$  MeV
- Corrente  $I = 200$   $\mu$ A
- Deviazione standard  $\sigma_x = \sigma_y = 4.75$  mm
- Raggio di rotazione  $m = 0$  mm

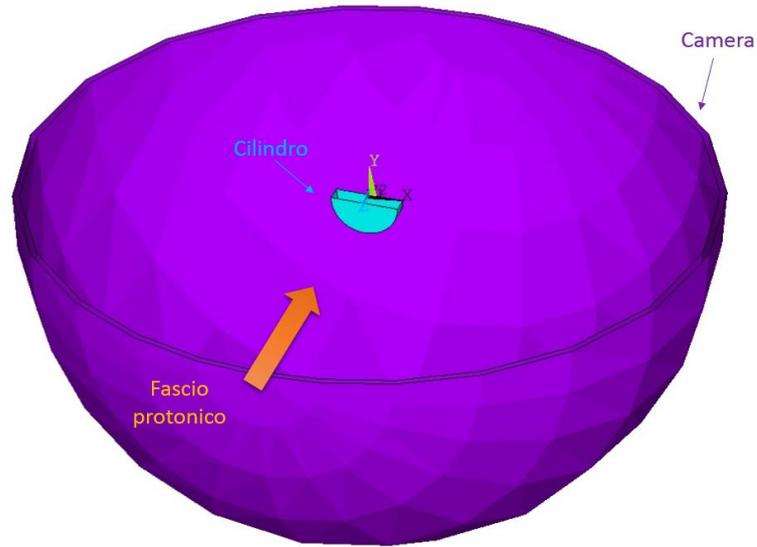


Figura 2.5 Sezione del modello tridimensionale della geometria cilindrica.

Sono state svolte analisi termo-strutturali con modelli tridimensionali e bidimensionali, applicando come carico la deposizione di potenza ottenuta da simulazioni FLUKA (Figura 2.6). Si osservi come la penetrazione protonica raggiunga il picco di Bragg ad uno spessore di circa 10 mm. Mano a mano che il fascio rallenta, infatti, si avrà una maggiore deposizione di potenza: aumentano le interazioni coulombiane delle particelle cariche che penetrano la materia, e di conseguenza aumenta l'energia rilasciata per effetto del blocco degli elettroni.

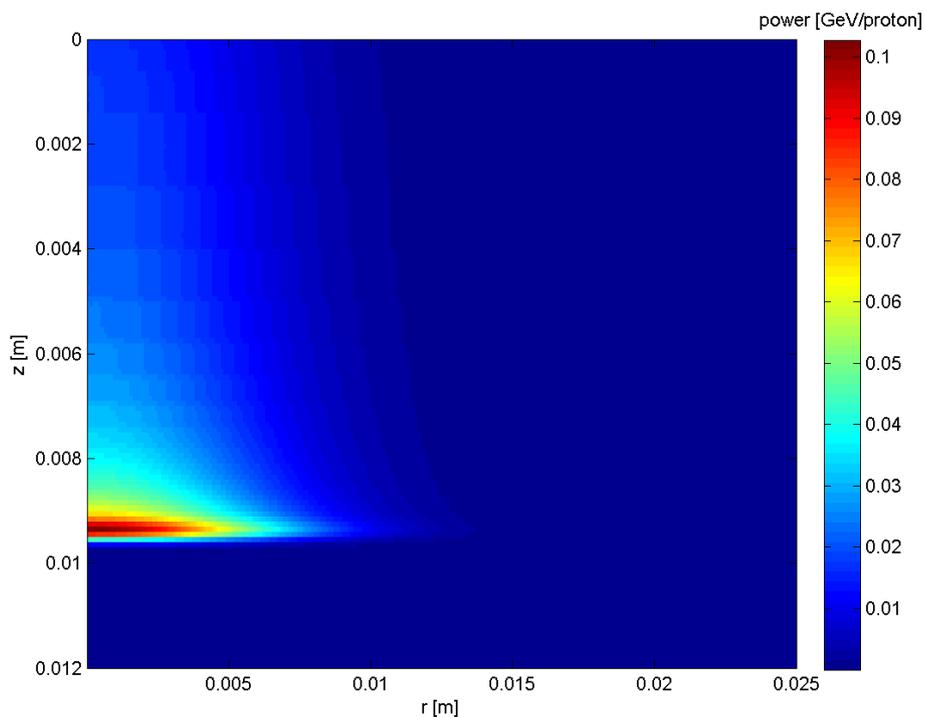


Figura 2.6 Deposizione di potenza su geometria cilindrica ottenuta da simulazione FLUKA, con un fascio da 40 MeV. L'asse della geometria si sviluppa lungo la direzione  $z$ , mentre  $r$  rappresenta la posizione radiale.

In Tabella 2.1 vengono presentati i dati ottenuti dalle simulazioni termiche e strutturali. In Figura 2.7 è inoltre possibile confrontare l'andamento delle temperature per il modello tridimensionale e quello bidimensionale (visualizzazione ottenuta tramite rotazione attorno l'asse di simmetria).

	<i>Simulazioni 3D</i>	<i>Simulazioni 2D</i>
<i>Temperatura max [°C]</i>	4051	4053
<i>Temperatura min [°C]</i>	1680	1681
<i><math>\sigma_{von\ mises\ max}</math> [MPa]</i>	72	71.7
<i><math>\sigma_1\ max</math> [MPa]</i>	33.7	33.6
<i><math>\sigma_2\ max</math> [MPa]</i>	22.2	22.1
<i><math>\sigma_3\ min</math> [MPa]</i>	-89.8	-89.7

Tabella 2.1 Confronto dei risultati termo-strutturali ottenuti da simulazioni tridimensionali e bidimensionali, applicando la deposizione di potenza ottenuta con FLUKA.

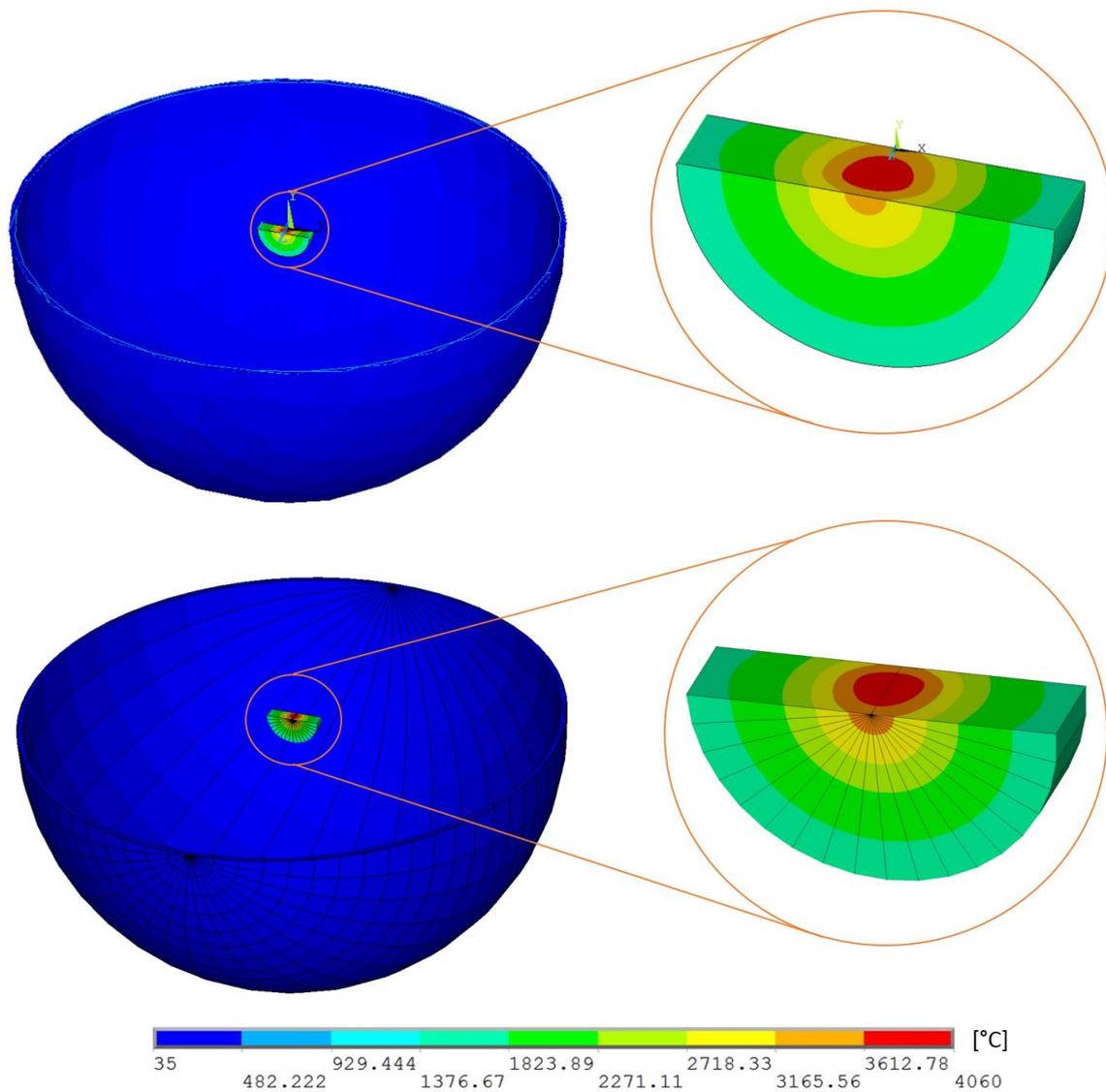


Figura 2.7 Andamento delle temperature nel modello tridimensionale (in alto) e bidimensionale (in basso).

Dal confronto dei dati, risulta validato il modello bidimensionale: la differenza tra i valori è infatti inferiore all'1%. Per quanto riguarda la discretizzazione in ambiente FLUKA, le condizioni ottimali si ottengono quando le dimensioni della discretizzazione sono simili alla dimensioni della mesh ANSYS.

Ulteriori analisi bidimensionali sono state quindi eseguite per valutare l'ipotesi di andamento gaussiano. In particolare, mantenendo costanti le caratteristiche del fascio, si è imposta una deposizione di potenza costante lungo l'asse, entro uno spessore di circa 10 mm (corrispondente alla posizione del picco di Bragg nelle simulazioni ottenute con FLUKA). In Figura 2.8 è rappresentata la deposizione nei due differenti casi.

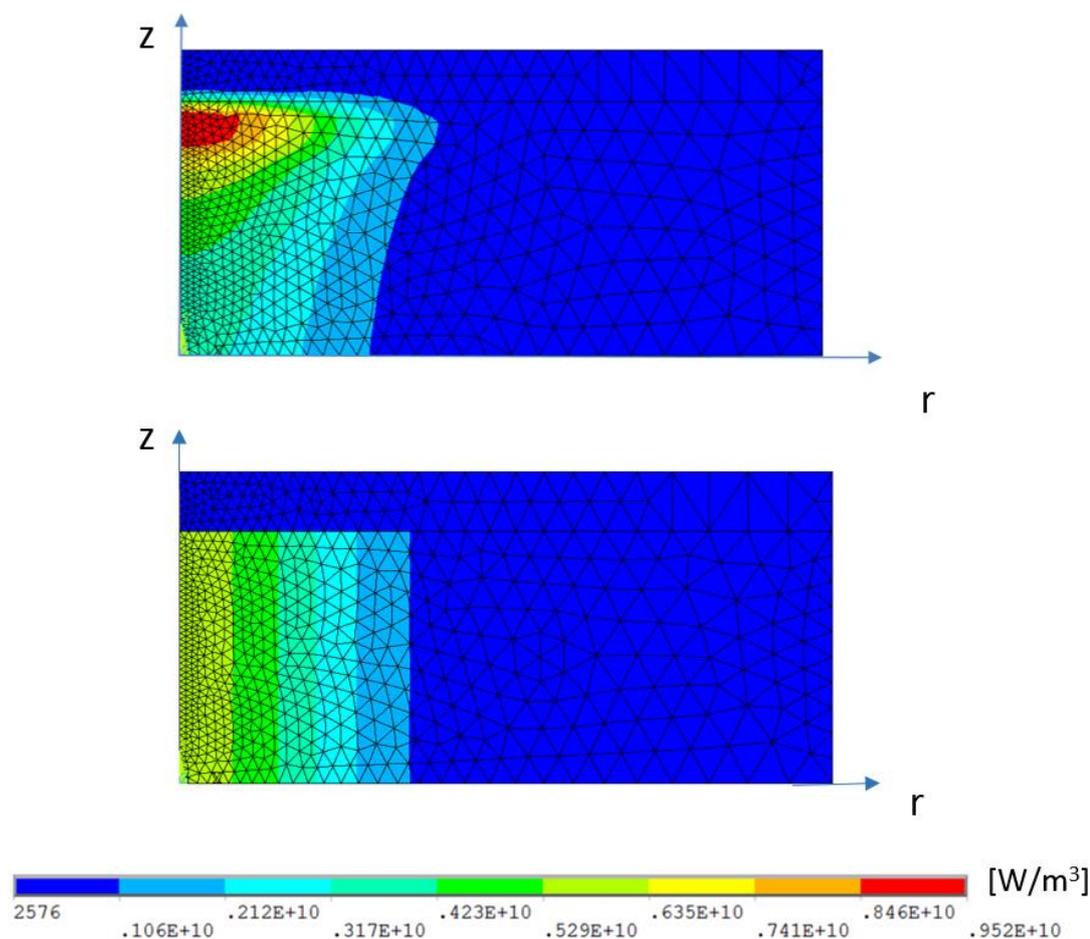


Figura 2.8 Rappresentazione della deposizione di potenza ottenuta con simulazioni FLUKA (in alto) e con l'ipotesi di andamento gaussiano costante lungo l'asse (in basso)

Anche in questo caso è stato possibile confrontare i dati di temperature e tensioni, riportati in Tabella 2.2 e rappresentati in Figura 2.9 e Figura 2.10.

	FLUKA	Andamento gaussiano
Temperatura max [°C]	4053	4050
Temperatura min [°C]	1681	1680
$\sigma_{von\ mises\ max}$ [MPa]	71.7	70.9
$\sigma_1\ max$ [MPa]	33.6	35.9
$\sigma_2\ max$ [MPa]	22.2	16
$\sigma_3\ min$ [MPa]	-89.6	-88.8

Tabella 2.2 Confronto dei dati ottenuti applicando la deposizione di potenza ricavata da simulazioni FLUKA e assumendo un andamento gaussiano costante lungo l'asse.

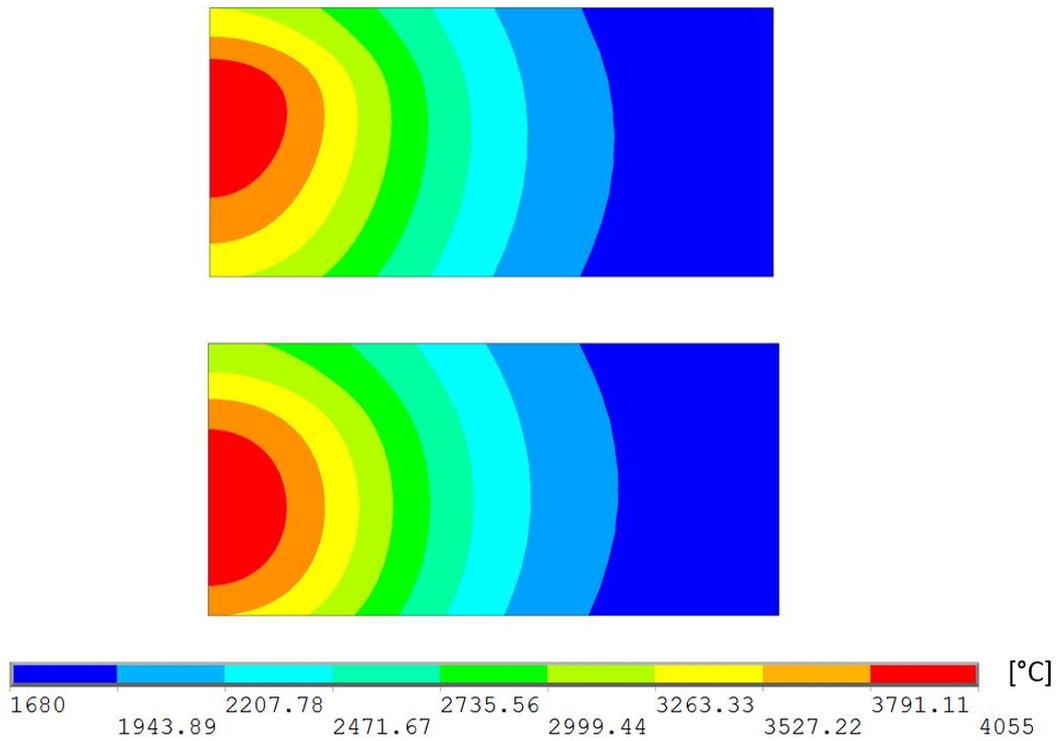


Figura 2.9 Confronto dell'andamento delle temperature [°C] applicando la deposizione di potenza ricavata da FLUKA (in alto) e assumendo un andamento gaussiano costante lungo l'asse (in basso).

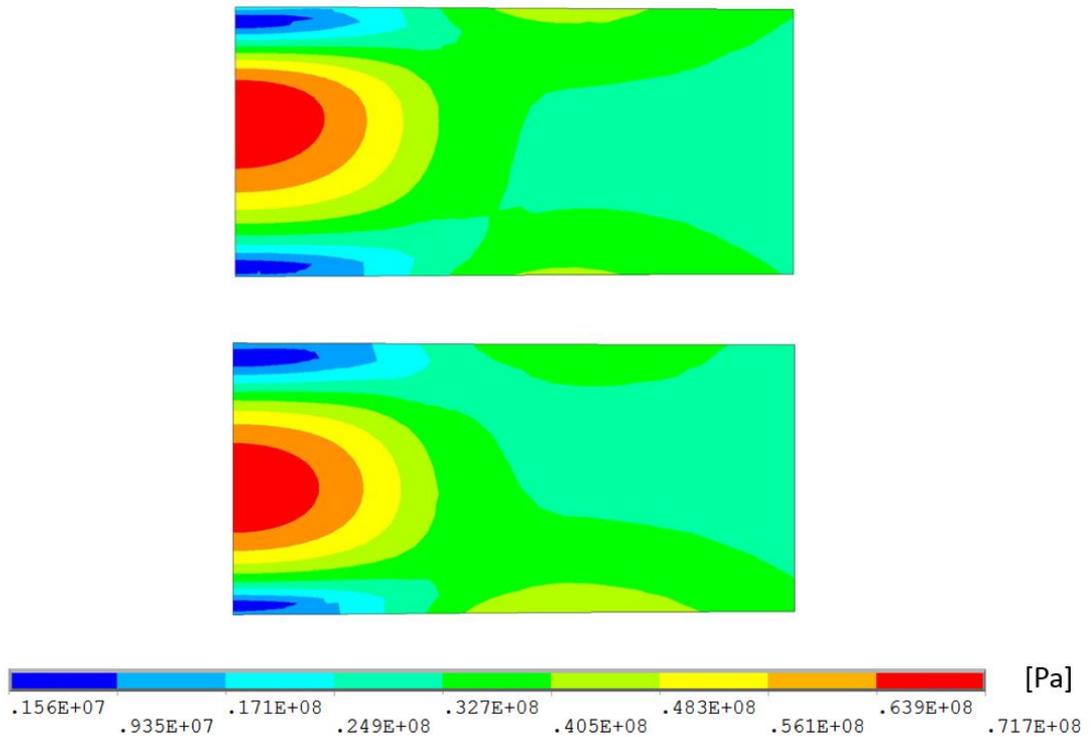


Figura 2.10 Confronto dell'andamento della tensione di Von Mises [Pa] ottenuta applicando la deposizione di potenza ricavata da FLUKA (in alto) e assumendo un andamento gaussiano costante lungo l'asse (in basso).

Come si può evincere dai risultati delle simulazioni, l'ipotesi di deposizione di potenza con distribuzione gaussiana sembra ben descrivere il comportamento termo-strutturale del materiale investito dal fascio. Al fine di verificare la validità dell'ipotesi semplificativa, sono però necessarie ulteriori simulazioni di confronto, su una geometria conica, simile a quella della Faraday Cup. Le analisi saranno svolte sfruttando l'assialsimmetria, con un modello bidimensionale.

## 2.4.2 Geometria conica

La geometria è costituita da un cono capovolto in grafite, con sviluppo assiale di 120 mm, contenuto in una sfera di raggio interno 80 mm e raggio esterno 100 mm (Figura 2.11).

Le simulazioni sono svolte ipotizzando due diverse condizioni di carico:

- Prima condizione di carico:
  - Energia  $E = 40$  MeV
  - Corrente  $I = 200$   $\mu$ A
  - Deviazione standard  $\sigma_x = \sigma_y = 5$  mm
  - Raggio di rotazione  $m = 0$  mm
- Seconda condizione di carico:
  - Energia  $E = 40$  MeV
  - Corrente  $I = 200$   $\mu$ A
  - Deviazione standard  $\sigma_x = \sigma_y = 7$  mm
  - Raggio di rotazione  $m = 8.8$  mm

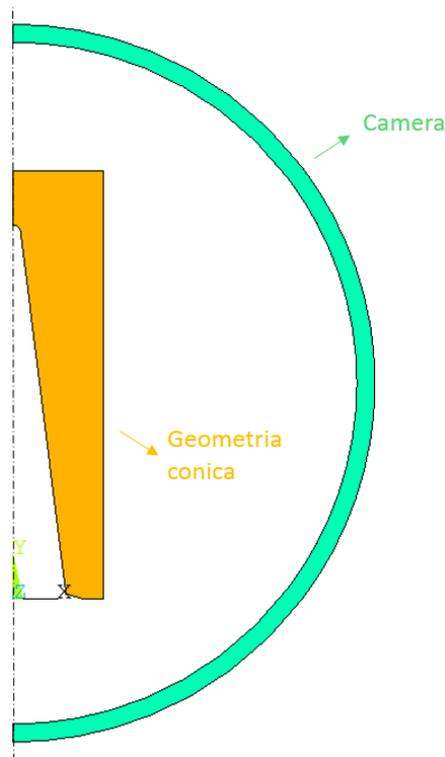


Figura 2.11 Modello bidimensionale della geometria conica.

Si sono confrontati i risultati ottenuti utilizzando la deposizione di potenza ricavata da simulazioni FLUKA o applicando una distribuzione gaussiana. In quest'ultimo caso la potenza viene depositata entro uno spessore di circa 10 mm, pari alla penetrazione protonica per un fascio di 40 MeV (paragrafo 2.4.1).

Di seguito vengono riportati i dati ottenuti.

**Prima condizione di carico** ( $\sigma_x = \sigma_y = 5 \text{ mm}$ ,  $m = 0 \text{ mm}$ )

Come è possibile notare in Figura 2.11, la geometria utilizzata per le simulazioni ANSYS presenta un raggio di raccordo all'apice del cono rovesciato. Inizialmente si è voluto quindi valutare l'influenza di questo dettaglio nei risultati delle simulazioni: in particolare, in ambiente FLUKA sono state modellate la geometria effettiva, con raccordo, e una geometria semplificata, terminante con una superficie piana. Si sono poi confrontati i risultati ottenuti applicando le due diverse deposizioni di potenza al modello ANSYS. I risultati delle analisi termo-strutturali differiscono leggermente, con una differenza di temperatura massima di 20 gradi (inferiore all'1%) e variazioni di tensione che non superano i 3 MPa (intorno al 5%).

Analizzando poi i risultati delle simulazioni ottenute applicando un andamento gaussiano della deposizione della potenza, è possibile notare una sensibile differenza tra i risultati (Tabella 2.3, Figura 2.12, Figura 2.13 e Figura 2.14). Ciò nonostante, per quanto riguarda la temperatura massima e la tensione di compressione (la maggiore, in valore assoluto), ipotizzando un andamento gaussiano si è in favore di sicurezza. Considerando inoltre l'importante semplificazione della simulazione, l'ipotesi di andamento gaussiano della deposizione di potenza può essere considerata valida.

	<i>FLUKA</i>	<i>Andamento gaussiano</i>
<i>Temperatura max [°C]</i>	2198	2259
<i>Temperatura min [°C]</i>	1096	1195
<i><math>\sigma_{von\ mises\ max}</math> [MPa]</i>	65.3	69.4
<i><math>\sigma_1\ max</math> [MPa]</i>	23	21.4
<i><math>\sigma_2\ max</math> [MPa]</i>	22.8	21.1
<i><math>\sigma_3\ min</math> [MPa]</i>	-74	-78

*Tabella 2.3 Confronto dei dati ottenuti applicando la deposizione di potenza ricavata da simulazioni FLUKA e assumendo un andamento gaussiano costante lungo l'asse, per la geometria conica con un fascio caratterizzato da  $\sigma_x = \sigma_y = 5 \text{ mm}$  e  $m = 0 \text{ mm}$ .*

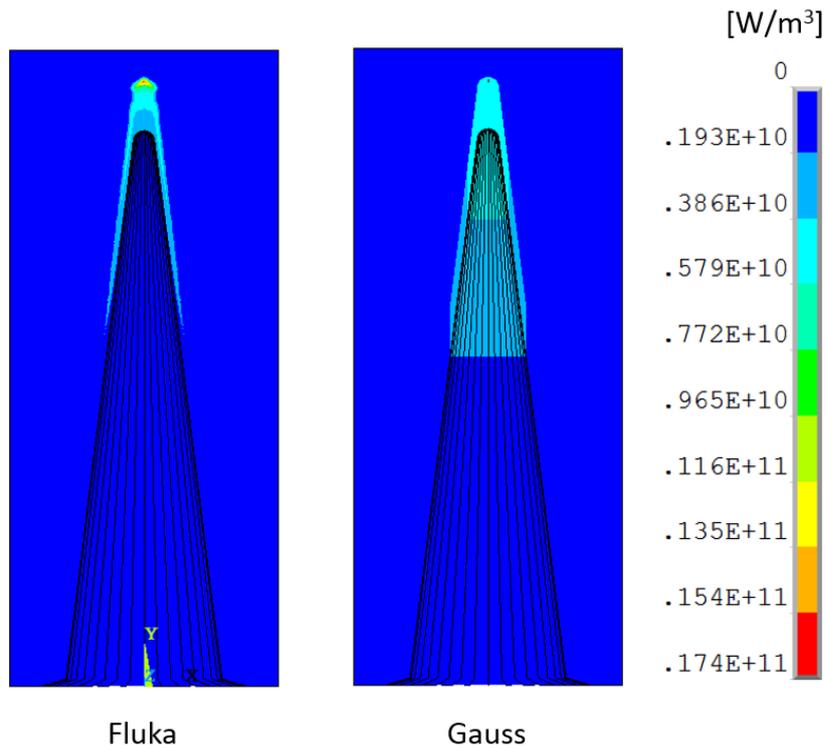


Figura 2.12 Rappresentazione della deposizione di potenza ottenuta con simulazioni FLUKA (a sinistra) e con l'ipotesi di andamento gaussiano costante lungo l'asse (a destra), per la geometria conica con un fascio di  $\sigma_x = \sigma_y = 5 \text{ mm}$  e  $m = 0 \text{ mm}$

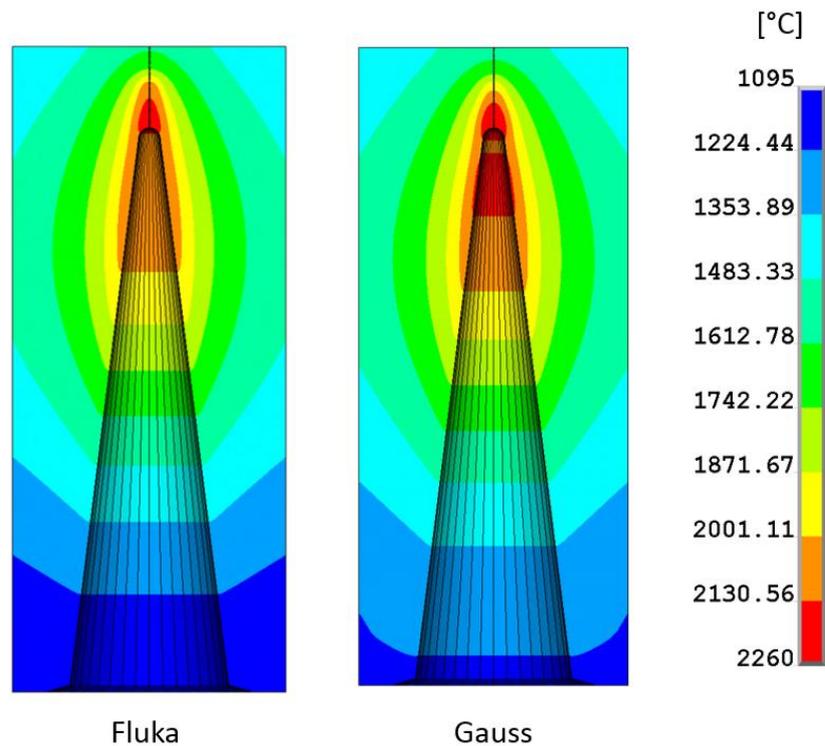


Figura 2.13 Confronto dell'andamento delle temperature ottenuto applicando la deposizione di potenza ricavata da FLUKA (a sinistra) e assumendo un andamento gaussiano costante lungo l'asse (a destra), per la geometria conica con un fascio di  $\sigma_x = \sigma_y = 5 \text{ mm}$  e  $m = 0 \text{ mm}$ .

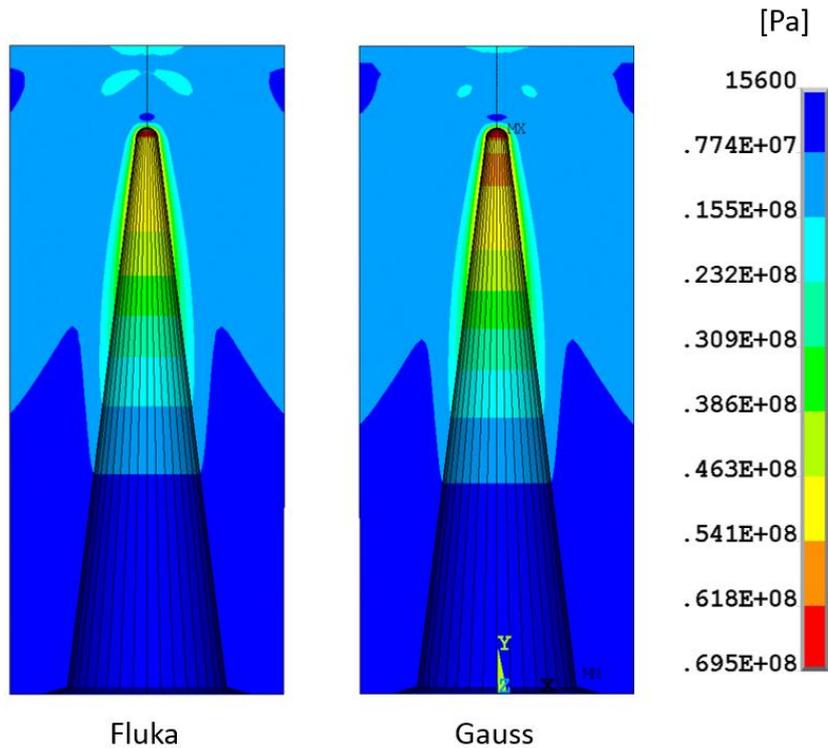


Figura 2.14 Confronto dell'andamento della tensione di Von Mises ottenuta applicando la deposizione di potenza ricavata da FLUKA (a sinistra) e assumendo un andamento gaussiano costante lungo l'asse (a destra), per la geometria conica con un fascio di  $\sigma_x = \sigma_y = 5 \text{ mm}$  e  $m = 0 \text{ mm}$ .

Le analisi precedenti sono state effettuate con due diverse discretizzazioni in ambiente FLUKA: in particolare si è considerato un incremento lungo gli assi di 1 mm o di 0.1 mm. La discretizzazione più grossolana tuttavia non sembra in grado di seguire correttamente la geometria, fornendo risultati poco precisi.

**Seconda condizione di carico** ( $\sigma_x = \sigma_y = 7 \text{ mm}$ ,  $m = 8.8 \text{ mm}$ )

Sebbene la deposizione di potenza ottenuta assumendo un andamento gaussiano non rispecchi fedelmente l'andamento ottenuto da simulazioni FLUKA (Figura 2.15), i risultati delle analisi termo-strutturali nei due diversi casi risultano confrontabili (Tabella 2.4). In particolare, in Figura 2.16 e Figura 2.17, è possibile confrontare l'andamento delle temperature e della tensione di Von Mises. La visualizzazione tridimensionale è ottenuta per rotazione del modello bidimensionale attorno all'asse di simmetria.

	FLUKA	Andamento gaussiano
Temperatura max [°C]	1680	1816
Temperatura min [°C]	1102	1100
$\sigma_{\text{von mises max}}$ [MPa]	13.2	13.5
$\sigma_1 \text{ max}$ [MPa]	8.7	8.6
$\sigma_2 \text{ max}$ [MPa]	5.8	6
$\sigma_3 \text{ min}$ [MPa]	-14	-14

Tabella 2.4 Confronto dei dati ottenuti applicando la deposizione di potenza ricavata da simulazioni FLUKA e assumendo un andamento gaussiano costante lungo l'asse, per la geometria conica con un fascio caratterizzato da  $\sigma_x = \sigma_y = 7 \text{ mm}$ ,  $m = 8.8 \text{ mm}$ .

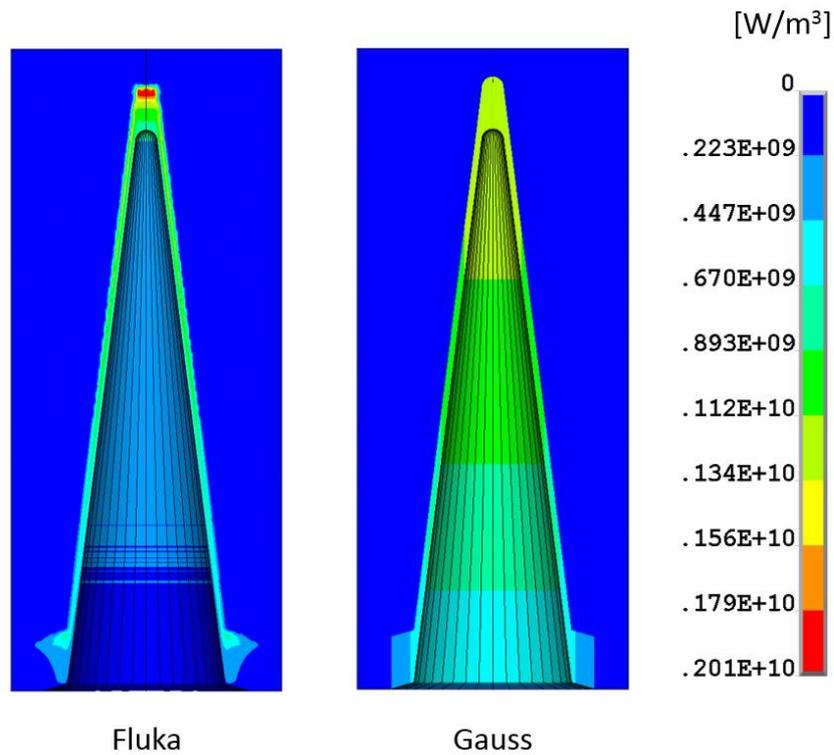


Figura 2.15 Rappresentazione della deposizione di potenza ottenuta con simulazioni FLUKA (a sinistra) e con l'ipotesi di andamento gaussiano costante lungo l'asse (a destra), per la geometria conica con un fascio di  $\sigma_x = \sigma_y = 7 \text{ mm}$  e  $m = 8.8 \text{ mm}$ .

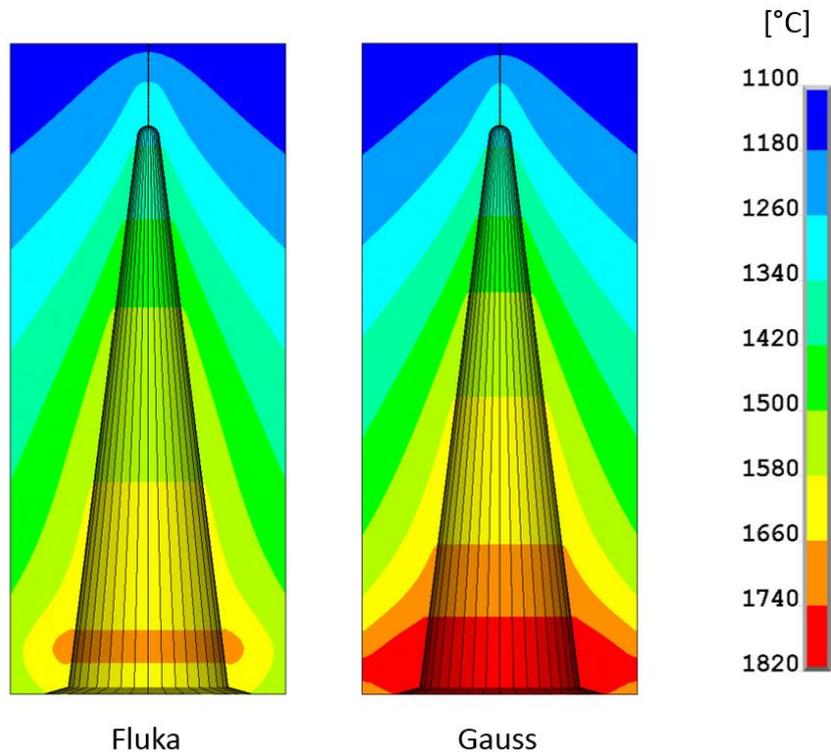


Figura 2.16 Confronto dell'andamento delle temperature applicando la deposizione di potenza ricavata da FLUKA (a sinistra) e assumendo un andamento gaussiano costante lungo l'asse (a destra), per la geometria conica con un fascio di  $\sigma_x = \sigma_y = 7 \text{ mm}$  e  $m = 8.8 \text{ mm}$ .

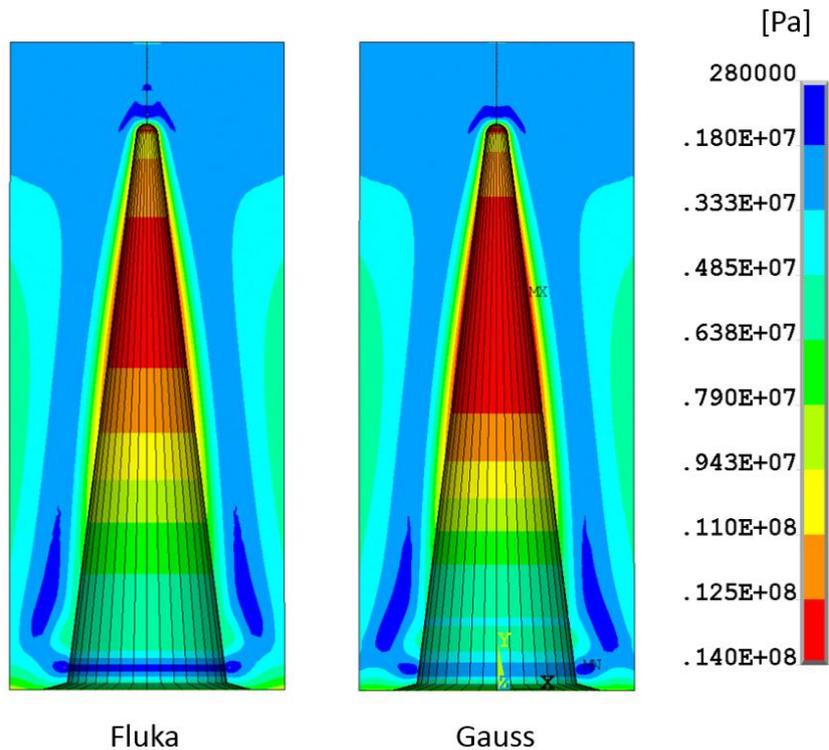


Figura 2.17 Confronto dell'andamento della tensione di Von Mises ottenuta applicando la deposizione di potenza ricavata da FLUKA (a sinistra) e assumendo un andamento gaussiano costante lungo l'asse (a destra), per la geometria conica con un fascio di  $\sigma_x = \sigma_y = 7 \text{ mm}$  e  $m = 8.8 \text{ mm}$ .

Anche in questo caso, utilizzando l'ipotesi di andamento gaussiano, la simulazione si semplifica notevolmente e ci si trova in favore di sicurezza.

## 2.5 Conclusioni

Obiettivo del presente capitolo era la validazione di alcune ipotesi semplificative, al fine di diminuire il tempo di simulazione. Sono state svolte simulazioni tridimensionali e bidimensionali con la stessa deposizione di potenza su una geometria cilindrica: i valori di temperatura e tensioni hanno presentato differenze inferiori all'1% e hanno permesso di validare il modello bidimensionale. Sono stati quindi confrontati i risultati ottenuti applicando la deposizione di potenza ricavata da simulazioni FLUKA o supponendo un andamento gaussiano costante lungo l'asse. Sebbene i dati di temperatura differiscano leggermente, l'errore nella stima delle tensioni è sempre inferiore al 4%. I valori maggiori sono inoltre ottenuti ipotizzando un andamento gaussiano: si è quindi in favore di sicurezza. Perciò è possibile ritenere valida anche questa seconda ipotesi semplificativa. Le simulazioni presentate nel capitolo successivo, necessarie al dimensionamento vero e proprio della Faraday Cup, verranno quindi svolte con modelli bidimensionali: sarà comunque effettuata un'ulteriore verifica sulla deposizione di potenza con andamento gaussiano con la geometria definitiva.

## CAPITOLO 3

### Progettazione della Faraday Cup

#### 3.1 Introduzione [3]

La diagnostica di fascio è un elemento fondamentale per ogni acceleratore, in grado di assicurarne un corretto e sicuro utilizzo. Permette di soddisfare tre principali necessità:

- Rapido controllo dell'efficienza generale e del settaggio dell'apparato;
- Controllo giornaliero delle performance dell'acceleratore e della sua stabilità;
- Collaudo e sviluppo di nuove parti dell'acceleratore per migliorarne le prestazioni.

L'importanza di una buona diagnostica risulta evidente durante l'utilizzo dell'acceleratore e del Front-End. Infatti, l'accesso al bunker durante le operazioni on-line sarà permesso solo se strettamente necessario e dopo alcuni giorni/settimane di raffreddamento radioattivo.

I principali parametri del fascio sono:

- Intensità, espressa in termini di numero di particelle per secondo;
- Profilo, distribuzione dell'intensità del fascio nello spazio;
- Posizione;
- Energia;
- Numero di stato di carica e massa;
- Emittanza;
- Struttura temporale.

La diagnostica di fascio è basata sui seguenti principi fisici:

- Influenza elettro-magnetica di cariche in movimento, secondo l'elettrodinamica classica;
- L'emissione di fotoni dalle particelle;
- L'interazione Coulombiana delle particelle del fascio durante la penetrazione nella materia;
- L'interazione nucleare tra e particelle durante la collisione;
- L'interazione delle particelle con i fotoni.

Nel caso del bunker SPES, la diagnostica è basata essenzialmente sul terzo principio ed è costituita da dispositivi interposti al fascio. Nel caso dei collimatori o delle Faraday Cup, il fascio è completamente fermato e il segnale, letto da un amperometro, rappresenta la corrente depositata. Per questi componenti, è essenziale sopprimere l'emissione di elettroni secondari, espulsi quando una particella dotata di energia sufficiente (tipicamente qualche eV) impatta contro un metallo o una superficie conduttiva. La quantità di elettroni emessi dipende dalla loro energia e dalla specie degli ioni; ad ogni modo, la massima energia dell'elettrone può essere assunta approssimativamente pari a qualche decina di eV. Utilizzando un elettrodo a potenziale negativo, gli elettroni emessi possono essere respinti verso il target. Questo aspetto risulta evidente in Figura 3.1, dove la corrente del target raggiunge valori stabili per un voltaggio di soppressione di circa -90 V.

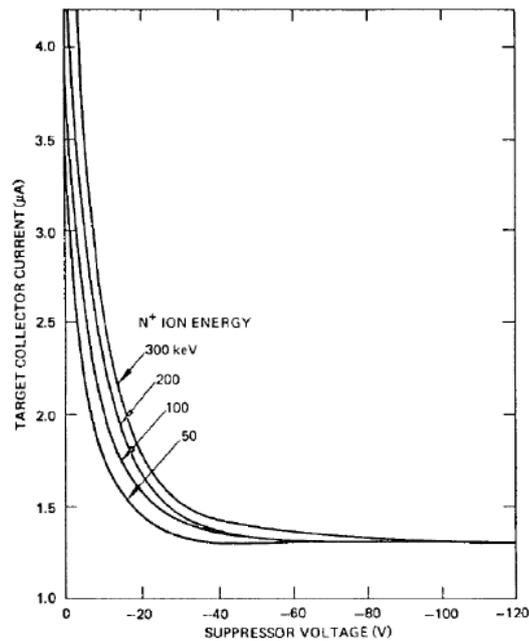


Figura 3.1 Corrente misurata al target in funzione del potenziale di soppressione, per differenti energie di un fascio ionico  $N^+$  [3]

In questo capitolo verrà affrontata la progettazione di una Faraday Cup che non sarà utilizzata in modo continuativo ma solo in fase di preparazione del fascio, ogni qualvolta avvenga una modifica della linea a monte della camera. Il dimensionamento avverrà attraverso calcoli analitici e simulazioni termo-strutturali con il codice di calcolo agli Elementi Finiti ANSYS. Verranno nuovamente valutate le ipotesi semplificative presentate nel capitolo precedente, riguardanti la dimensione del modello e la deposizione di potenza. È proposta inoltre un'analisi elettrica, necessaria al dimensionamento di soppressori in grado di fornire il potenziale di schermatura richiesto. Un modello tridimensionale sviluppato con il software CREO PARAMETRIC 2.0 permetterà di organizzare l'alloggiamento all'interno della camera target e sarà utilizzato per un'ulteriore analisi termo-strutturale. Verrà infine considerato un malfunzionamento del ciclotrone, al fine di valutare il tempo di intervento necessario per fermare completamente il fascio con un dump in grafite.

### 3.2 Criticità nella progettazione della Faraday Cup [6]

Le grandezze che influenzano la progettazione di questo dispositivo di misura sono:

- Energia del fascio (MeV);
- Range delle intensità che deve essere coperto;
- Potenza del fascio (kW);
- Tempo-struttura che deve essere monitorato e rispettato per fasci pulsanti.

La progettazione della Faraday Cup, tuttavia, può risultare notevolmente più complicata quando è necessario misurare fasci ad alta energia, che potrebbero non essere completamente fermati nello spessore del rilevatore. Ulteriori complicazioni sorgono prendendo in considerazione i seguenti effetti secondari, inevitabilmente sempre presenti, che possono compromettere la misurazione:

- Emissione di elettroni secondari;
- Generazione di elettroni o ioni dalla ionizzazione dei gas residui;
- Correnti parassite dovute al deterioramento del materiale isolante per sputtering o per alte temperature;
- Riscaldamento per fasci ad alta potenza.

Tra quelli citati, il disturbo di maggiore influenza è l'emissione di elettroni secondari, fenomeno che si verifica quando una particella accelerata colpisce una superficie (paragrafo 3.1). Per evitare questo effetto indesiderato, si utilizza un dispositivo chiamato elettrodo-soppressore. Scegliendo inoltre come geometria della Faraday Cup un cono rovesciato (Figura 3.2), la maggior parte degli elettroni secondari verranno emessi verso la faccia

opposta. La scelta di questa forma comporta un ulteriore vantaggio: l'angolo di inclinazione delle pareti aumenta infatti la superficie di deposizione della potenza.

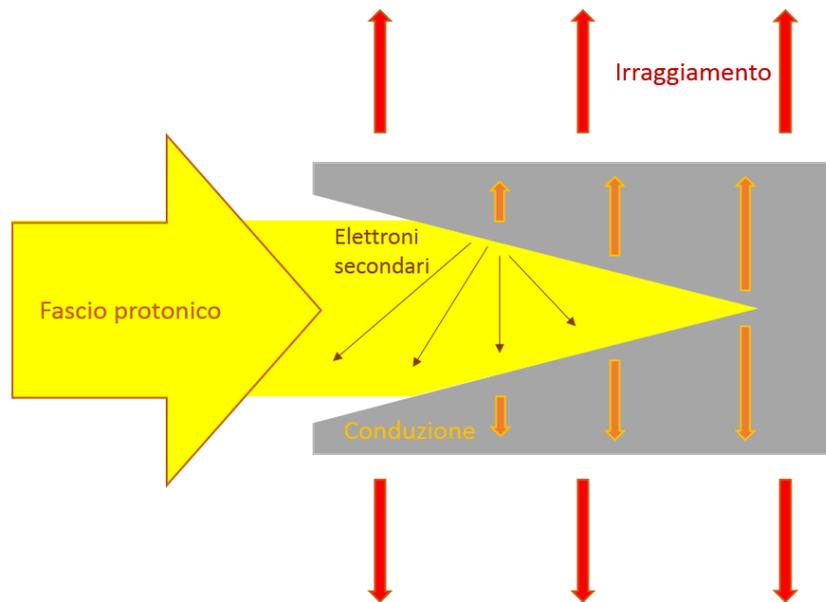


Figura 3.2 Rappresentazione schematica della Faraday Cup.

Il sistema meccanico deve essere in grado di verificare sia il fascio ad alta potenza che quello a bassa potenza. Per questo motivo saranno previste due distinte Faraday Cup, coassiali ma di dimensioni diverse, entrambe alloggiata all'interno della camera. Variando la potenza del fascio, varierà anche la porzione di corrente depositata su ciascuno dei due dispositivi e sarà quindi possibile ottenere le informazioni richieste in entrambi i casi.

### 3.3 Dimensionamento preliminare

Si considerano due differenti condizioni di carico, relative rispettivamente al fascio di alta e bassa potenza:

- Fascio di alta potenza ( $P = 8000 \text{ W}$ ):
  - Energia  $E = 40 \text{ MeV}$
  - Corrente  $I = 200 \mu\text{A}$
  - Deviazione standard  $\sigma_x = \sigma_y = 7 \text{ mm}$
  - Raggio di rotazione  $m = 11 \text{ mm}$
- Fascio di bassa potenza ( $P = 1400 \text{ W}$ ):
  - Energia  $E = 40 \text{ MeV}$
  - Corrente  $I = 35 \mu\text{A}$
  - Deviazione standard  $\sigma_x = \sigma_y = 5 \text{ mm}$
  - Raggio di rotazione  $m = 0 \text{ mm}$

È possibile ricavare l'ordine di grandezza della potenza depositata su ciascuna Faraday Cup ipotizzando un andamento gaussiano e calcolando l'integrale della funzione, per ciascuna condizione di carico e al variare dei principali parametri geometrici. Partendo dalla funzione in coordinate cartesiane (3.1):

$$f(x, y) = \int \frac{P}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} dx dy \quad (3.1)$$

È possibile passare a coordinate polari:

$$f(\rho, \vartheta) = \int_0^{2\pi} \int_0^r \frac{P}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{(\rho\cos\theta)^2 + (\rho\sin\theta)^2}{2\sigma^2}} \rho d\rho d\theta \quad (3.2)$$

E ricavare così l'integrale della potenza cumulativa fino al raggio  $r$ :

$$P(r) = P[-e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} + 1] \quad (3.3)$$

L'unico parametro geometrico fissato è il raggio del cono della Faraday Cup di minori dimensioni (Figura 3.3): è infatti posto uguale al raggio del target di bassa potenza, ovvero  $r_2 = 6.5$  mm. Viene quindi fatto variare il raggio del secondo dispositivo,  $r_1$ , così da riuscire a depositare l'intera potenza caratterizzante il fascio.

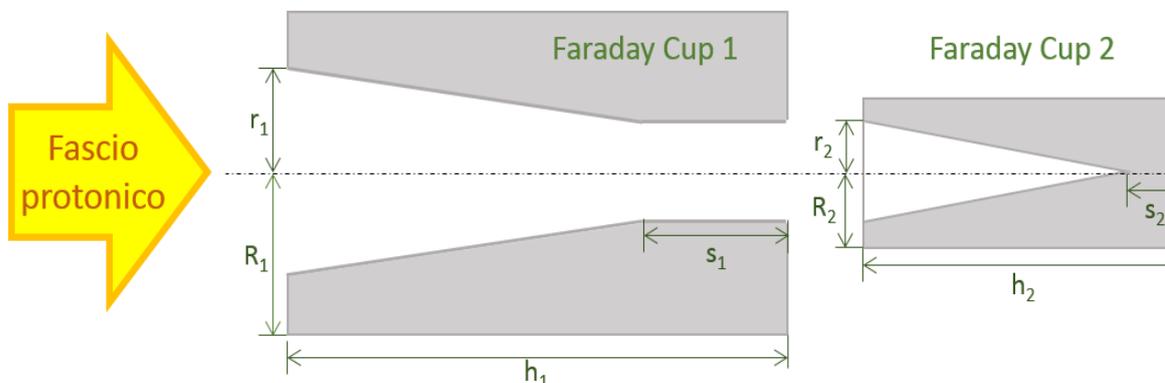


Figura 3.3 Rappresentazione schematica delle due Faraday Cup, necessarie per le misure di corrente rispettivamente sul target di alta e bassa potenza.

Si osservi come, in questa fase preliminare, sia possibile equiparare le caratteristiche di un fascio di alta potenza, caratterizzato da  $\sigma = 7$  mm e  $m = 11$  mm, con quelle di un fascio con  $\sigma = 10.2$  mm e  $m = 0$  mm. Infatti, a causa della presenza dei collimatori lungo la linea protonica, la potenza che arriva al target sarà la stessa in entrambi i casi. Considerando le nuove caratteristiche di fascio ( $\sigma = 10.2$  mm e  $m = 0$  mm), è possibile utilizzare l'equazione (3.3) per il calcolo della potenza. In Tabella 3.1 sono presentati alcuni risultati preliminari:

<b><math>P_{TOT} = 1400</math> W, <math>I = 35</math> <math>\mu</math>A, <math>\sigma = 5</math> mm, <math>m = 0</math> mm</b>	
$r_1 = 6.5$ mm $\rightarrow P = 800$ W	$r_2 = 10$ mm $\rightarrow P = 1210$ W
	$r_2 = 15$ mm $\rightarrow P = 1384$ W
	$r_2 = 20$ mm $\rightarrow P = 1400$ W
<b><math>P_{TOT} = 8000</math> W, <math>I = 200</math> <math>\mu</math>A, <math>\sigma = 10.2</math> mm, <math>m = 0</math> mm</b>	
$r_1 = 6.5$ mm $\rightarrow P = 1470$ W	$r_2 = 10$ mm $\rightarrow P = 3050$ W
	$r_2 = 15$ mm $\rightarrow P = 5300$ W
	$r_2 = 20$ mm $\rightarrow P = 6800$ W

Tabella 3.1 Ripartizione della potenza sulle due Faraday Cup al variare dei parametri geometrici.

Analizzando i dati in tabella, è possibile individuare nel fascio ad alta potenza la condizione vincolante per determinare il raggio minimo d'ingresso della prima Faraday Cup, che sarà quindi fissato a  $r_2 = 20$  mm.

Un'ulteriore considerazione geometrica di cui tener conto riguarda la fine del cono della seconda Faraday Cup: deve infatti essere previsto un raggio di raccordo di 2 mm onde evitare una concentrazione degli sforzi dovuta all'intaglio (con un tornio raggi minori su una tale geometria sono difficilmente realizzabili).

### 3.4 Analisi termo-strutturali e ottimizzazione della geometria

Vengono eseguite simulazioni termo-strutturali al variare dei parametri presentati in Figura 3.3: obiettivo dell'analisi è ottimizzare la geometria per ottenere valori contenuti di temperature e tensioni massime. Sfruttando l'assialsimmetria, viene scelto un modello bidimensionale (validato nel capitolo precedente); la deposizione di potenza viene applicata ipotizzando un andamento gaussiano, in un'area di circa 10 mm

(paragrafo 2.4.1). Come materiale per la progettazione delle Faraday Cup viene scelta la grafite POCO EDM-3.

Analizzando i risultati delle simulazioni, è possibile notare come i valori di temperatura e tensioni diminuiscano:

- Aumentando la lunghezza totale  $h_2$ ;
- Diminuendo il raggio interno  $r_1$ ;
- Diminuendo il raggio esterno  $R_1$ ;
- Aumentando la lunghezza  $s_1$ ;

Viene quindi proposta una geometria di primo tentativo, mostrata in Figura 3.4, utilizzata per un'ulteriore validazione dell'ipotesi di deposizione di potenza con andamento gaussiano. I risultati della simulazione vengono infatti confrontati con quelli ottenuti applicando il carico calcolato con analisi in ambiente FLUKA. L'analisi viene svolta con entrambi i fasci: per ragioni di sicurezza, per l'alta potenza viene considerato un fascio di 10 kW, mentre per la bassa potenza un fascio da 2 kW.

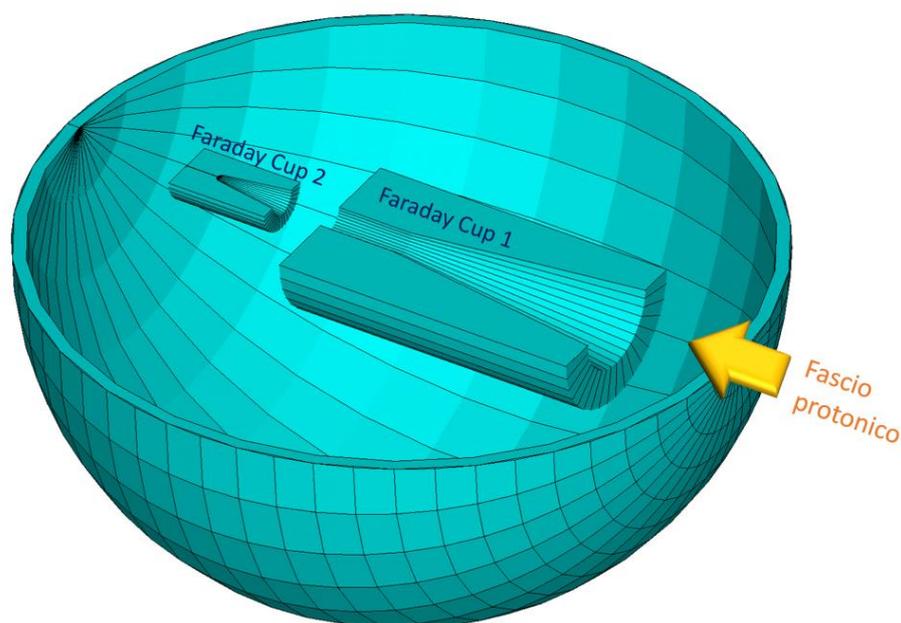


Figura 3.4 Rappresentazione della geometria di primo tentativo, utilizzata per la validazione dell'ipotesi di andamento gaussiano della deposizione di potenza (visualizzazione ottenuta per rotazione del modello bidimensionale attorno all'asse di simmetria).

In Tabella 3.2 sono riportati i risultati nel caso di fascio di alta potenza (10kW), mentre in Tabella 3.3 quelli ottenuti utilizzando il fascio di bassa potenza (2kW)

	Simulazioni Fluka		Distribuzione gaussiana	
	Faraday Cup 1	Faraday Cup 2	Faraday Cup 1	Faraday Cup 2
Temperatura max [°C]	1485	1477	1563	1531
Temperatura min [°C]	1031	1219	1055	1233
$\sigma_{\text{von mises max}}$ [MPa]	28	16.9	32.4	18.5
$\sigma_1$ max [MPa]	13.3	8.6	15.3	9.2
$\sigma_2$ max [MPa]	10.7	6.2	12.3	6.8
$\sigma_3$ min [MPa]	-30	-19.3	-34.6	-21.1

Tabella 3.2 Confronto dei dati ottenuti applicando la deposizione di potenza ricavata da simulazioni FLUKA e assumendo un andamento gaussiano costante lungo l'asse, per la geometria di primo tentativo con un fascio da 10 kW.

	Simulazioni Fluka		Distribuzione gaussiana	
	Faraday Cup 1	Faraday Cup 2	Faraday Cup 1	Faraday Cup 2
Temperatura max [°C]	724	1466	683	1425
Temperatura min [°C]	562	1237	538	1224
$\sigma_{\text{von mises max}}$ [MPa]	3.9	11.4	4.6	12.8
$\sigma_1$ max [MPa]	1.2	4.4	1.4	4.8
$\sigma_2$ max [MPa]	0.77	3.8	0.9	3.6
$\sigma_3$ min [MPa]	-4.5	-13.1	-5.2	-14.7

Tabella 3.3 Confronto dei dati ottenuti applicando la deposizione di potenza ricavata da simulazioni FLUKA e assumendo un andamento gaussiano costante lungo l'asse, per la geometria di primo tentativo con un fascio da 2 kW.

Come è possibile notare analizzando i dati in tabella, i risultati presentano leggere differenze: tuttavia, considerando valida l'ipotesi di distribuzione gaussiana della deposizione di potenza, si è in favore di sicurezza. Dato l'enorme vantaggio in termini di tempo di simulazione, per le successive simulazioni verrà considerata valida tale ipotesi semplificativa.

La geometria viene quindi ulteriormente modificata, al fine di ottenere temperature e tensioni minori. Il modello finale prevede una variazione del diametro esterno della Faraday Cup 1, così da permettere un migliore scambio termico.

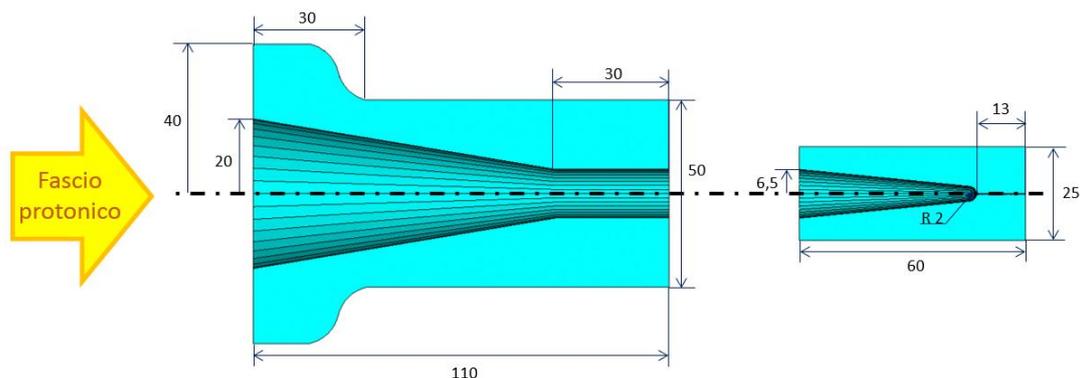


Figura 3.5 Dimensionamento delle due Faraday Cup, al fine di ottenere temperature e tensioni minori. Le misure sono espresse in millimetri.

Viene ora presa in considerazione l'assegnazione della potenza del fascio in ambiente Ansys. Il carico infatti può essere espresso in due differenti modi:

- come generazione di calore nel volume: è possibile considerare il profilo di potenza lungo la direzione del fascio protonico. Il calore è depositato vicino all'area di impatto e deve essere dissipato verso la superficie esterna. Più complicato.
- come flusso di calore su una superficie. Il calore viene depositato su un volume di profondità nulla. Più semplice.

Si osservi come, in un modello bidimensionale, le due modalità di applicazione del carico risultino rispettivamente una generazione di calore su un'area (BFA, HGEN in comandi Ansys) e un flusso di calore su una linea (SFL, HFLUX). Poiché la penetrazione protonica nella grafite è di circa 10 mm, fino ad ora è stato ritenuto più corretto depositare la potenza su un'area. Si è voluto però valutare la differenza con la seconda modalità di applicazione del carico per poter semplificare in modo significativo la geometria 3D del modello: in questo caso bisognerà tener conto della diversa angolazione delle superfici. In particolare, la funzione gaussiana sarà moltiplicata per il seno dell'angolo di inclinazione per le superfici coniche e verrà divisa per  $\pi/2$  in corrispondenza del raggio di raccordo finale della seconda Faraday Cup.

Di seguito vengono riportati i risultati di confronto.

	Generazione di calore su area (BFA)		Flusso di calore su una linea (SFL)	
	Faraday Cup 1	Faraday Cup 2	Faraday Cup 1	Faraday Cup 2
Temperatura max [°C]	1798	1458	1798	1483
Temperatura min [°C]	1227	1217	1194	1182
$\sigma_{\text{von mises max}}$ [MPa]	28.73	11.8	30	24
$\sigma_1$ max [MPa]	19.2	5.6	19.2	4.9
$\sigma_2$ max [MPa]	14	4.4	13.4	4
$\sigma_3$ min [MPa]	-30.4	-13.7	-31.5	-24

Tabella 3.4 Confronto dei dati ottenuti applicando la potenza del fascio come generazione di calore su un'area (BFA) o come flusso di calore su una linea (SFL).

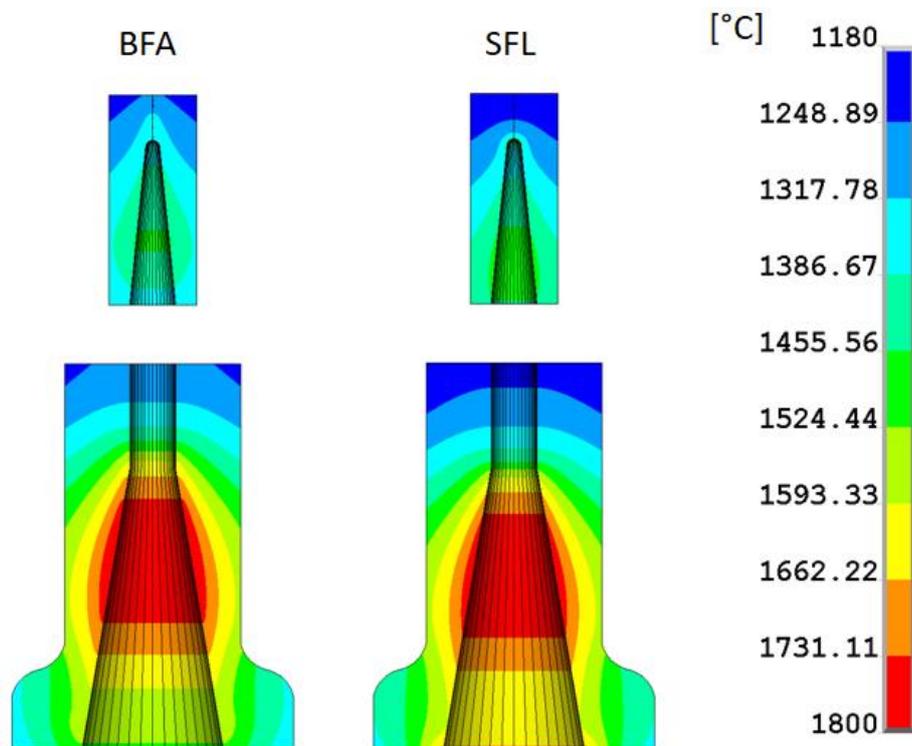


Figura 3.6 Confronto dell'andamento della temperatura, ottenuta applicando la potenza del fascio come generazione di calore su un'area (a sinistra) o come flusso di calore su una linea (a destra).

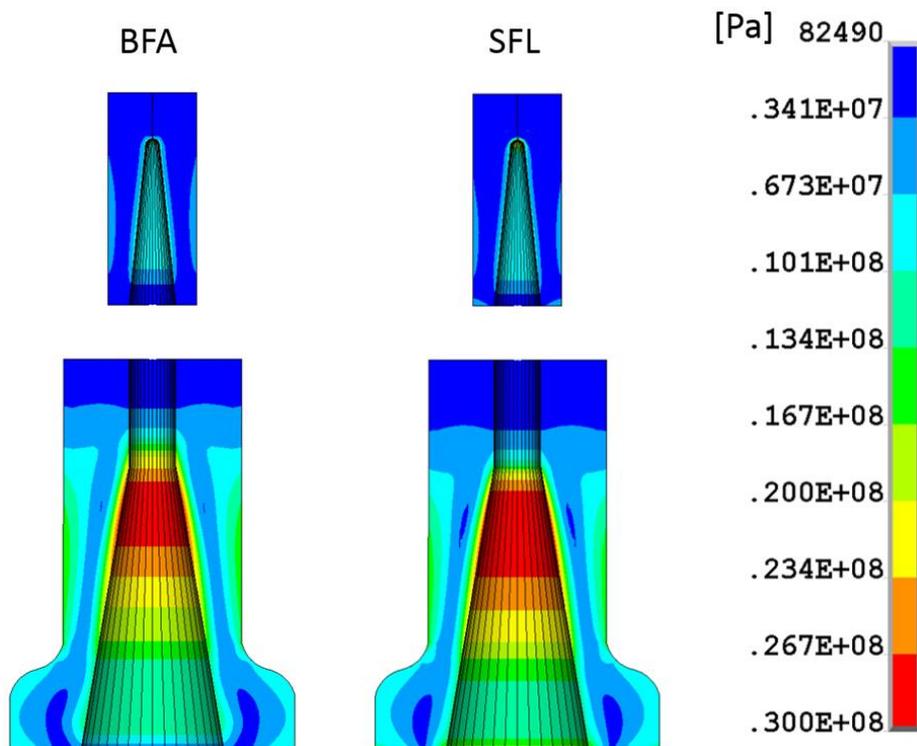


Figura 3.7 Confronto dell'andamento della tensione di Von Mises, ottenuta applicando la potenza del fascio come generazione di calore su un'area (a sinistra) o come flusso di calore su una linea (a destra).

Dai risultati appare evidente come i valori presentino leggere differenze nei due casi: ciò nonostante, in termini di temperatura massima e tensione di compressione, utilizzando il flusso di calore su una linea ci si trova in favore di sicurezza. Queste considerazioni torneranno molto utili quando si andrà a confrontare il modello definitivo tridimensionale con quello bidimensionale. Poter applicare la potenza su un'area piuttosto che su un volume comporterà infatti notevoli vantaggi in termini di semplicità di calcolo.

### 3.5 Dimensionamento dei soppressori

Come presentato al paragrafo 3.1, la soppressione degli elettroni secondari è fondamentale per calcolare la corrente del fascio. Si è visto come -100 V riescano a fornire uno scudo potenziale sufficiente: si è quindi implementata una simulazione elettrica per dimensionare due soppressori di geometria circolare. In particolare, le pareti dei soppressori sono state poste ad un potenziale di -1 V e si è andati a valutare l'efficienza di schermatura lungo l'asse delle Faraday Cup. Supponendo di applicare ai soppressori un potenziale di -500 V limite che permette specifiche molto più semplici per tutta la catena elettrica (cavi, connettori, ecc), la geometria degli stessi viene scelta in modo da ottenere un'efficienza di almeno 0.2 così da ottenere i determinati 100 V di soppressione. In Tabella 3.5 vengono riportate le dimensioni ottenute dopo varie analisi elettriche: si indica con il numero 1 il soppressore posto davanti alla prima Faraday Cup, con il numero 2 quello che precede la Faraday Cup di dimensioni inferiori. In Figura 3.8 è rappresentata l'efficienza di potenziale lungo l'asse della geometria, con la relativa distribuzione.

	Soppressore 1	Soppressore 2
Raggio interno [mm]	70	27
Raggio esterno minimo [mm]	90	57
Spessore [mm]	8	4

Tabella 3.5 Dimensionamento soppressori.

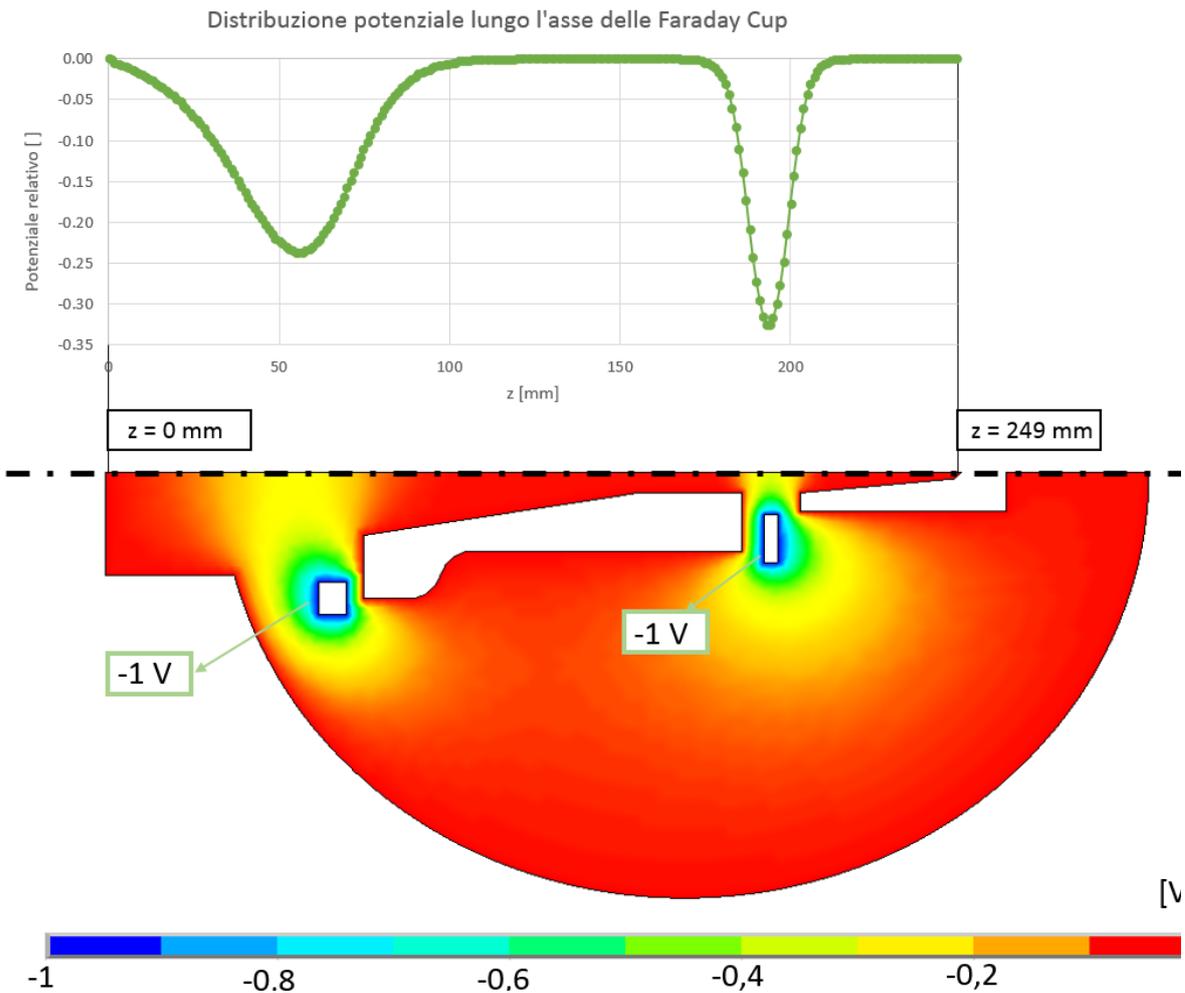


Figura 3.8 Distribuzione potenziale lungo l'asse delle Farady Cup.

### 3.6 Modellazione tridimensionale e alloggiamento

L'alloggiamento delle Faraday Cup all'interno della camera target è definito grazie alla modellazione tridimensionale in CREO Parametric 2.0. Il modello verrà inoltre utilizzato per implementare simulazioni di confronto al fine di validare le analisi bidimensionali finora svolte.

La camera, già descritta al paragrafo 1.4.2.2 e rappresentata in Figura 3.9, ha forma cilindrica con un diametro di 279 mm e 200 mm di profondità. Sono presenti tre puntali in rame caratterizzati da un raggio di 9 mm: i due superiori sono lunghi 151.7 mm mentre quello inferiore 91.7 mm. Per l'alloggiamento delle Faraday Cup saranno utilizzati i due puntali superiori: il sostegno sarà permesso grazie a due morsetti in rame, collegati da due aste in acciaio. Le Faraday Cup sono sostenute da dei supporti in tantalio: date le buone proprietà di questo materiale, le alte temperature di esercizio non saranno un problema. L'isolamento dei supporti è fornito da dei cilindri in allumina, un materiale che sopporta le alte temperature ed è resistente alle radiazioni. Il soppressore della prima Faraday Cup è fissato ad uno dei morsetti, mentre il secondo è sostenuto direttamente dalle aste. Entrambi vengono realizzati in tantalio. Di seguito vengono presentate le soluzioni costruttive adottate per l'alloggiamento con la relativa procedura di montaggio.

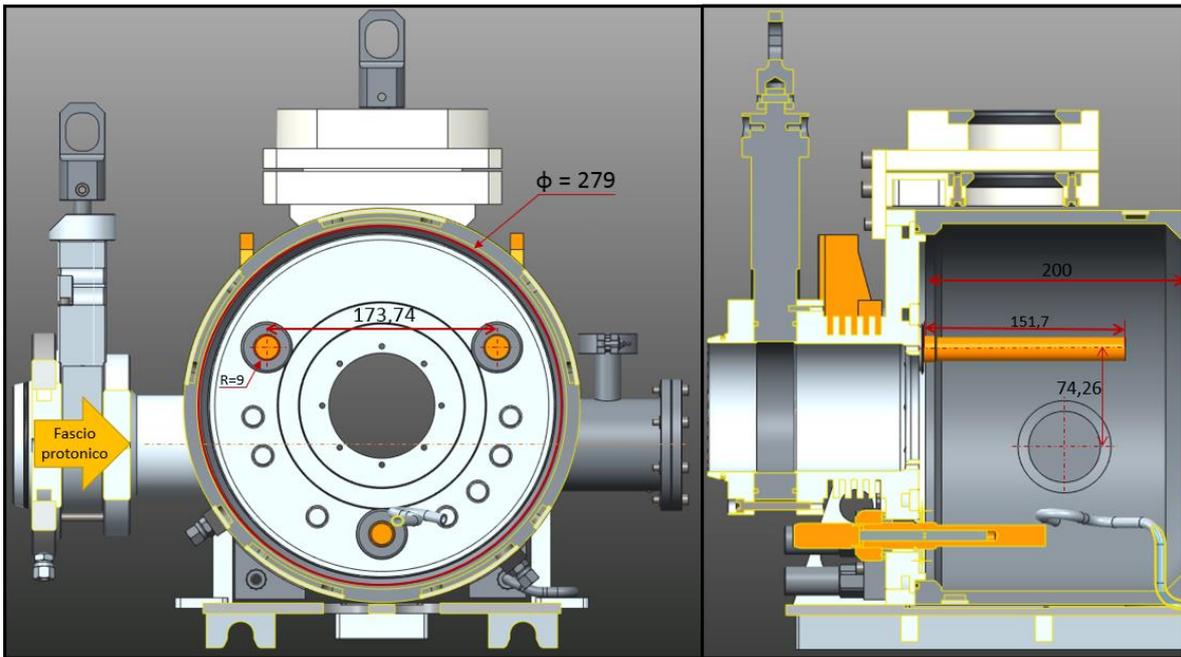


Figura 3.9 Sezioni della camera target con i principali ingombri. Le misure sono espresse in millimetri.

Per prima cosa vengono montati i morsetti in rame ai puntali. È quindi possibile procedere al fissaggio del primo soppressore, opportunamente isolato mediante i cilindri di allumina (Figura 3.10)

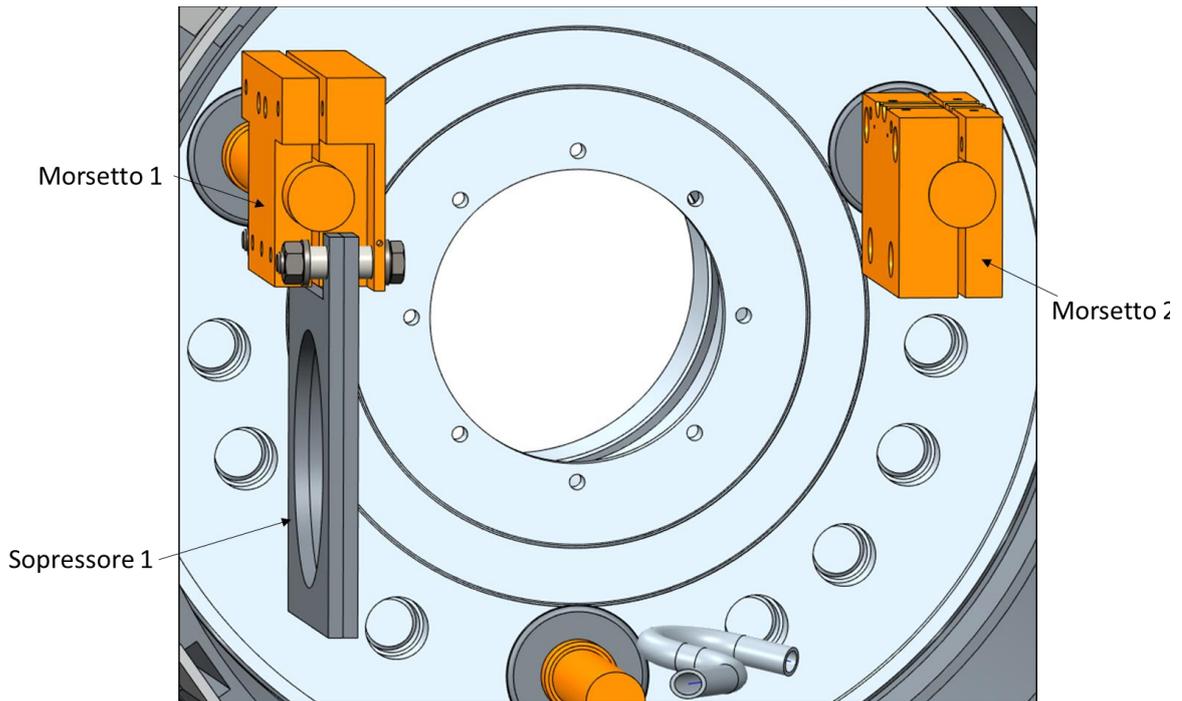
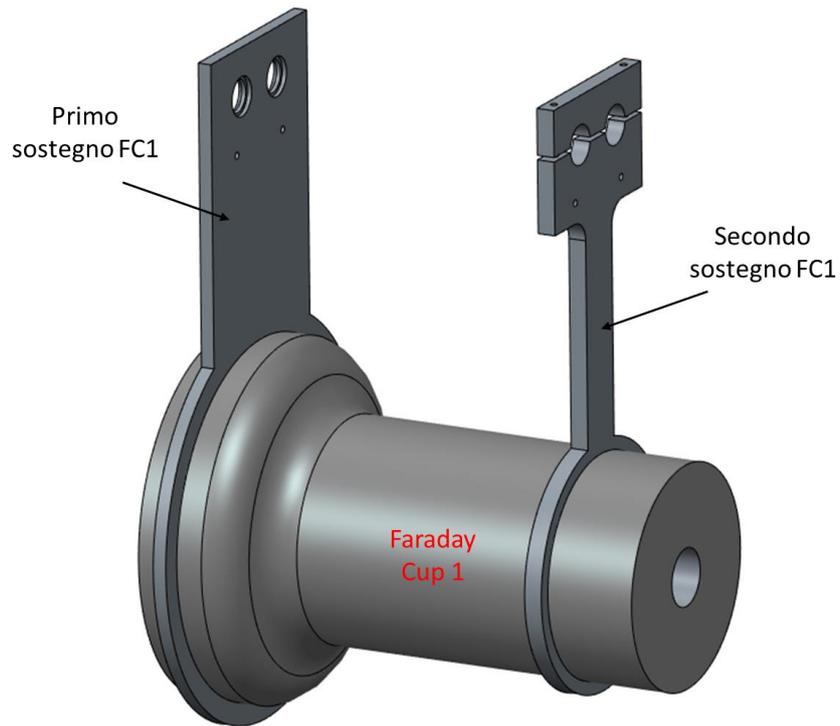
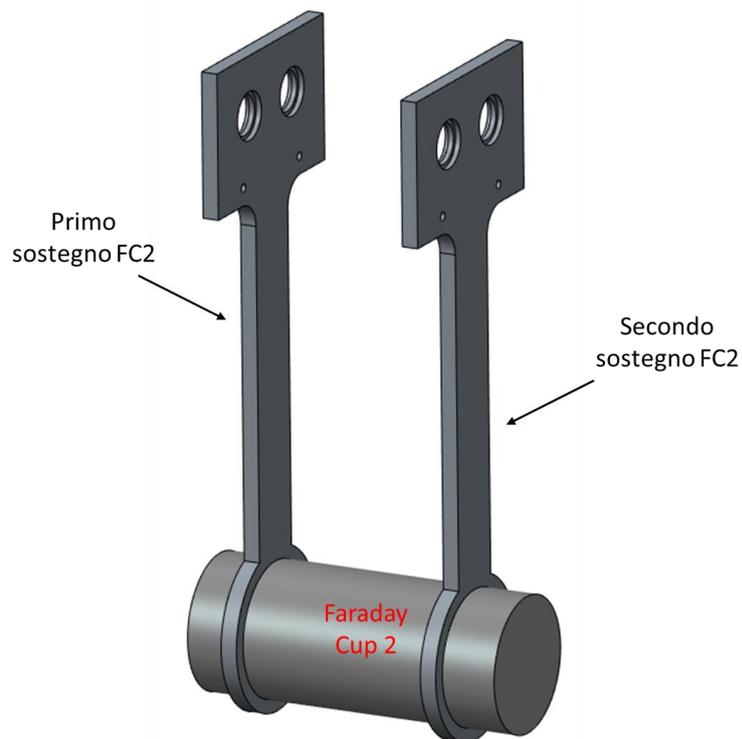


Figura 3.10 Fissaggio dei morsetti e del primo soppressore ai puntali di rame.

Si procede quindi con l'assemblaggio delle due Faraday Cup e dei relativi sostegni in tantalio (Figura 3.11 e Figura 3.12). Date le alte temperature di esercizio ci si aspetta una possibile saldatura nella zona di contatto tra la grafite e i sostegni.



*Figura 3.11 Faraday Cup 1 con relativi sostegni in tantalio.*



*Figura 3.12 Faraday Cup 2 con relativi sostegni in tantalio.*

Le Faraday Cup e il secondo soppressore vengono quindi sostenuti dalle due aste in acciaio, opportunamente isolati mediante i cilindri in allumina (Figura 3.13). A questo punto è possibile fissare tutto l'assemblaggio ai morsetti della camera.

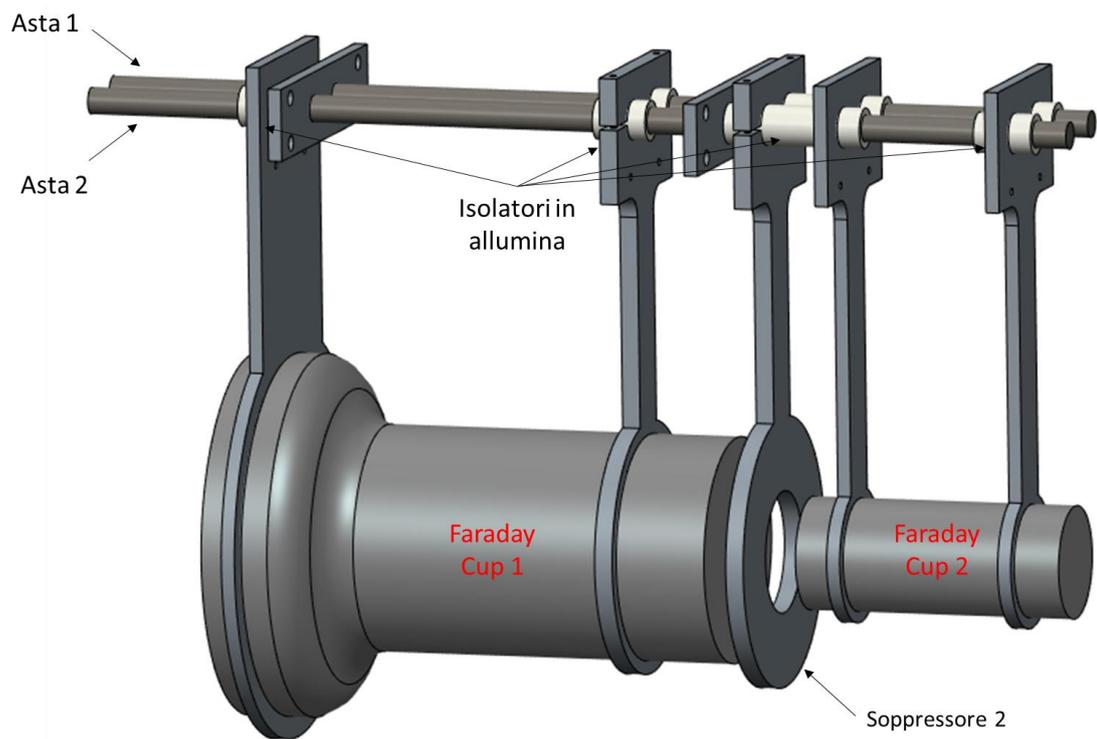


Figura 3.13 Montaggio dei sostegni e delle Faraday Cup alle aste di supporto con gli isolatori in allumina.

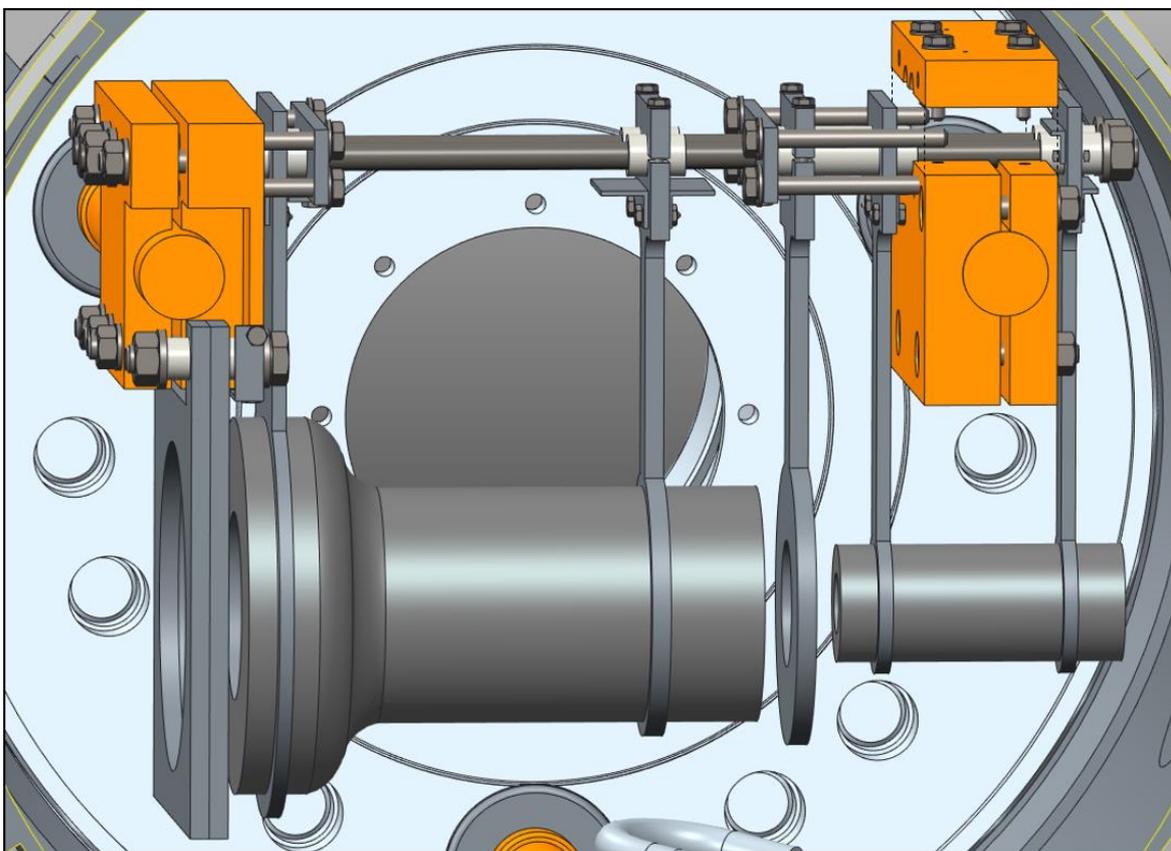


Figura 3.14 Alloggiamento completo all'interno della camera.

### 3.7 Analisi termo-strutturali tridimensionali

Il modello tridimensionale sviluppato in CREO Parametric viene ora importato in ANSYS per valutare temperature e tensioni in gioco (Figura 3.15). Si impone un fascio di alta potenza di 10 kW con le seguenti caratteristiche:

- Energia  $E = 40 \text{ MeV}$
- Corrente  $I = 200 \mu\text{A}$
- Deviazione standard  $\sigma_x = \sigma_y = 7 \text{ mm}$
- Raggio di rotazione  $m = 11 \text{ mm}$

Le simulazioni vengono implementate utilizzando un andamento gaussiano della distribuzione di potenza: l'ipotesi è stata infatti validata nel precedente capitolo per varie geometrie e condizioni di carico. In Figura 3.15 viene riportato il plot di temperatura ottenuto dall'analisi termica, mentre in Tabella 3.6 sono riportati i valori minimi e massimi per i componenti principali.

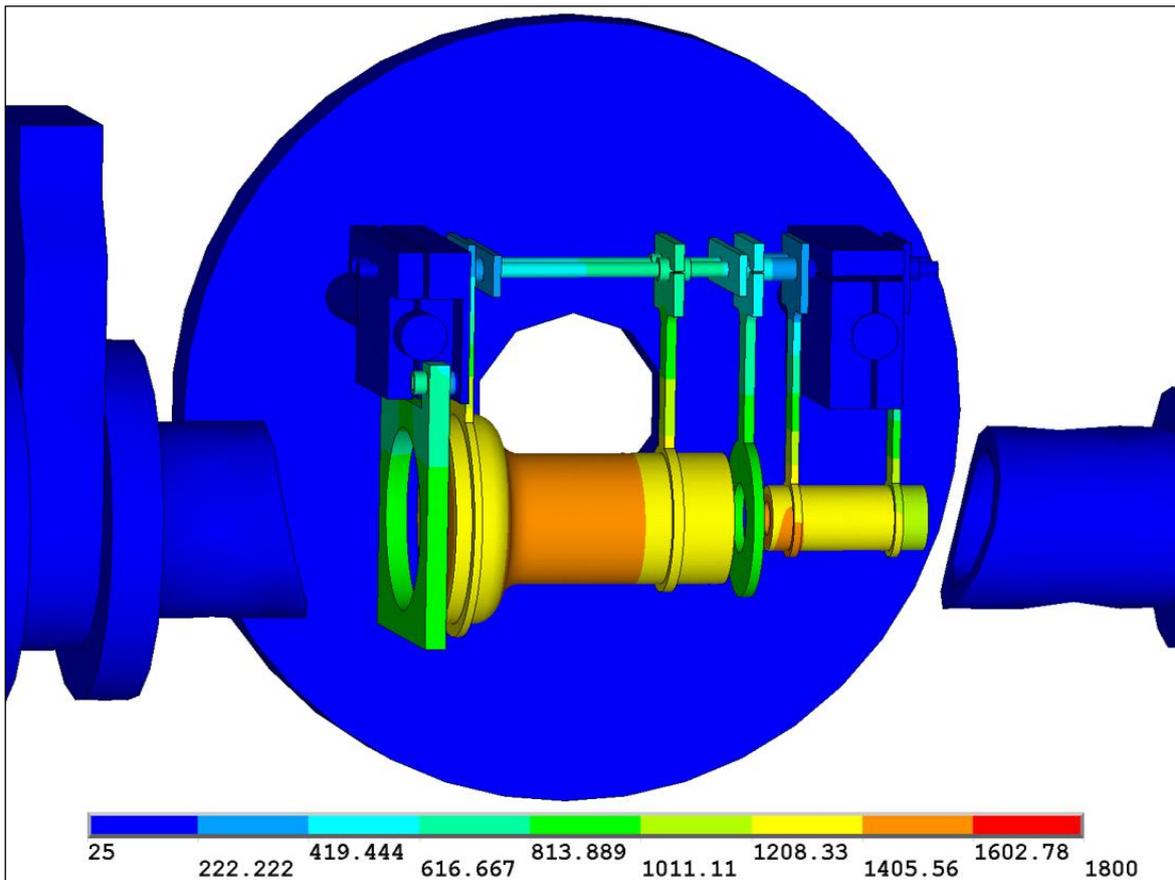


Figura 3.15 Importazione del modello tridimensionale in ambiente ANSYS e analisi termica.

Componente	Materiale	Temperatura minima	Temperatura massima
Faraday Cup 1	Grafite POCO EDM-3	1213°C	1800°C
Faraday Cup 2	Grafite POCO EDM-3	1144°C	1492°C
Soppressore 1	Tantalio	548°C	963°C
Soppressore 2	Tantalio	540°C	997°C
Primo supporto FC1	Tantalio	281°C	1399°C
Secondo supporto FC1	Tantalio	757°C	1332°C
Primo supporto FC2	Tantalio	212°C	1418°C
Secondo supporto FC2	Tantalio	98°C	1222°C

Asta 1	Acciaio	37°C	736°C
Asta 2	Acciaio	36°C	735°C
Morsetto 1	Rame	32°C	86°C
Morsetto 2	Rame	28°C	70°C
Anelli isolanti	Allumina	38°C	773°C
Plate	Alluminio	29°C	41°C
Cover	Alluminio	27°C	66°C

Tabella 3.6 Risultati dell'analisi termica del modello tridimensionale.

Sono necessarie alcune considerazioni sull'applicazione del carico. In questo caso, poiché la penetrazione protonica nella grafite è di circa 10 mm, probabilmente sarebbe preferibile utilizzare una generazione di calore su un volume. Ciò nonostante, con il modello bidimensionale è stato dimostrato come una deposizione di potenza su una linea, piuttosto che su un'area, fornisca comunque risultati validi (paragrafo 3.4). Anche nel modello tridimensionale, quindi, la potenza verrà applicata alle superfici interne delle Faraday Cup, ottenendo in questo modo una semplificazione della simulazione. Sarà comunque necessario tener conto dell'inclinazione delle superfici coniche e del raggio di raccordo della seconda Faraday Cup: nel primo caso la funzione gaussiana verrà moltiplicata per il seno dell'angolo di inclinazione, nel caso del raggio di raccordo verrà divisa per  $\pi/2$ .

I risultati della simulazione ottenuta importando il modello tridimensionale sono confrontati con quelli ottenuti utilizzando il modello bidimensionale con deposizione di potenza su una linea. Di seguito sono riportati i dati termo-strutturali e i relativi andamenti.

	Modello tridimensionale		Modello bidimensionale (SFL)	
	Faraday Cup 1	Faraday Cup 2	Faraday Cup 1	Faraday Cup 2
Temperatura max [°C]	1800	1492	1798	1483
Temperatura min [°C]	1213	1144	1194	1182
$\sigma_{\text{von mises max}}$ [MPa]	30.9	23.8	30	24
$\sigma_1$ max [MPa]	20.2	5.4	19.2	4.9
$\sigma_2$ max [MPa]	13.6	4.7	13.4	4
$\sigma_3$ min [MPa]	-33.3	-25.6	-31.5	-24

Tabella 3.7 Confronto dei dati ottenuti utilizzando un modello bidimensionale e tridimensionale.

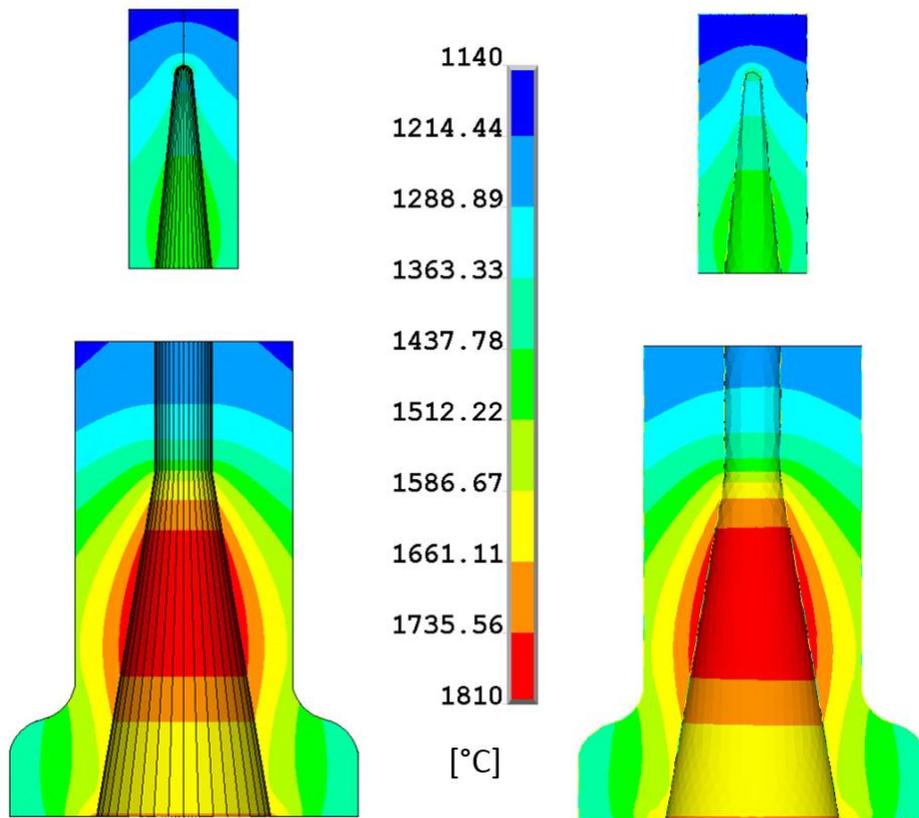


Figura 3.16 Confronto dell'andamento di temperatura, ottenuta utilizzando il modello bidimensionale (a sinistra) e il modello tridimensionale (a destra).

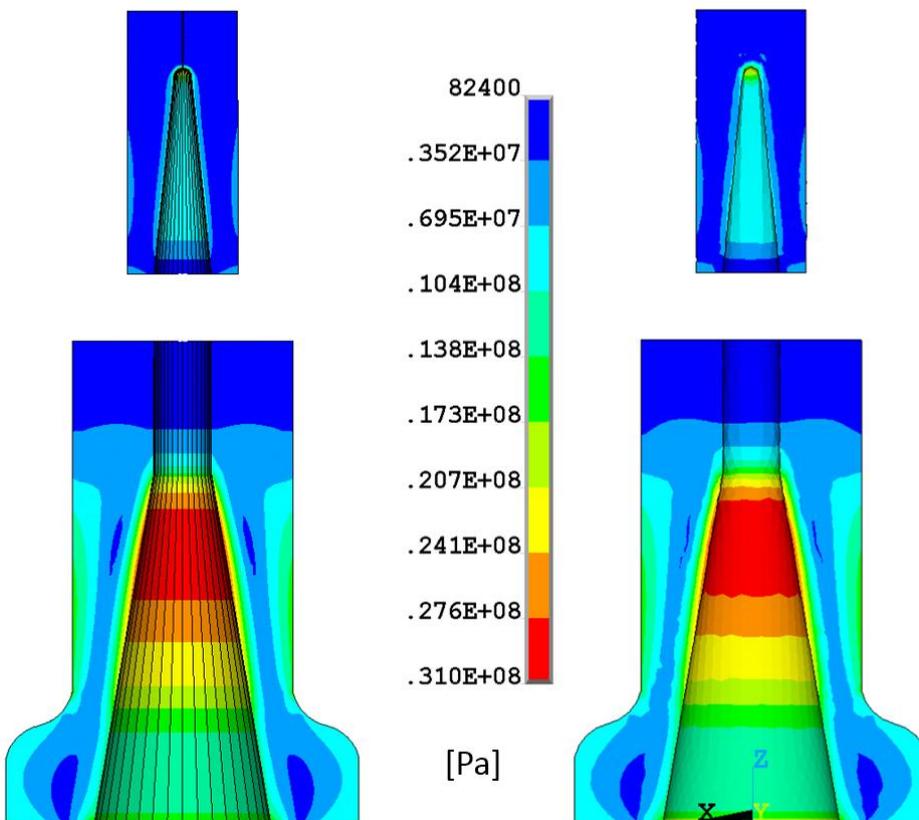


Figura 3.17 Confronto dell'andamento della tensione di Von Mises, ottenuta utilizzando il modello bidimensionale (a sinistra) e il modello tridimensionale (a destra).

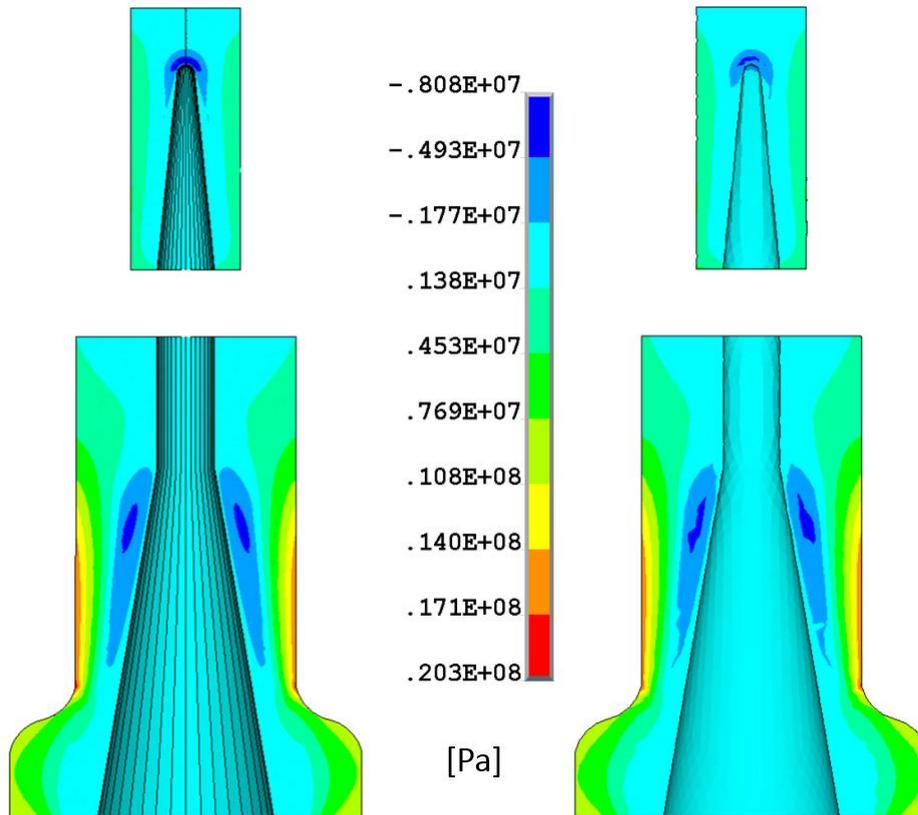


Figura 3.18 Confronto dell'andamento della tensione di trazione, ottenuta utilizzando il modello bidimensionale (a sinistra) e il modello tridimensionale (a destra).

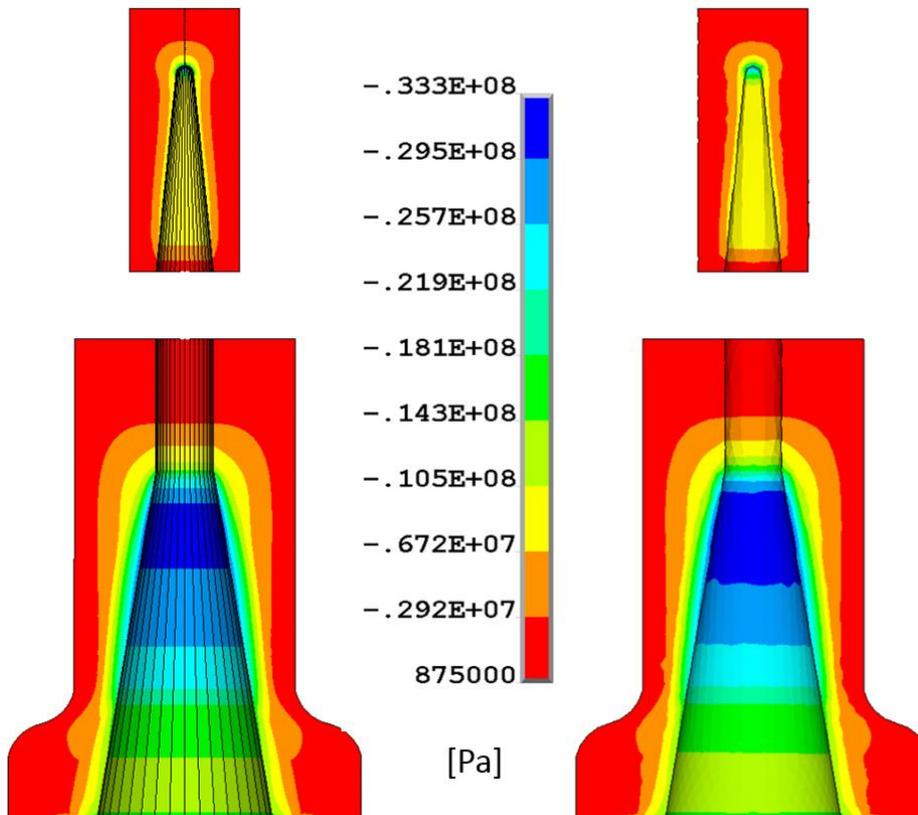


Figura 3.19 Confronto dell'andamento della tensione di compressione, ottenuta utilizzando il modello bidimensionale (a sinistra) e il modello tridimensionale (a destra).

Come risulta evidente dall'analisi dei risultati, le differenze tra modello tridimensionale e bidimensionale sono minime. Ciò valida le analisi 2D finora implementate e permette di ricavare alcune considerazioni sulla resistenza termica e strutturale dei componenti. La temperatura massima che viene raggiunta dal sistema meccanico non rappresenta un problema per il materiale utilizzato. La grafite POCO EDM-3, infatti, presenta un ottimo comportamento alle alte temperature, con un generale incremento delle principali proprietà meccaniche fino a circa 2700°C. Oltre questa temperatura, l'influenza di processi di *creep* diventa predominante, comportando un crollo strutturale del materiale. Con il fascio ad alta potenza la temperatura massima di esercizio (circa 1800°C) risulta ben inferiore a questo limite termico, che non rappresenta quindi un problema per la progettazione del sistema. Per quanto riguarda il comportamento strutturale, l'EDM Industry fornisce la curva di resistenza a trazione in temperatura del materiale (Figura 3.20). Già a temperatura ambiente la grafite presenta una resistenza di circa 60 MPa, tre volte superiore ai massimi valori di tensione di trazione registrati nelle simulazioni. Inoltre, come già annunciato in precedenza e come risulta evidente in Figura 3.20, il limite di rottura è destinato a crescere con l'aumento della temperatura. Il sistema risulta quindi verificato per quanto riguarda la trazione.

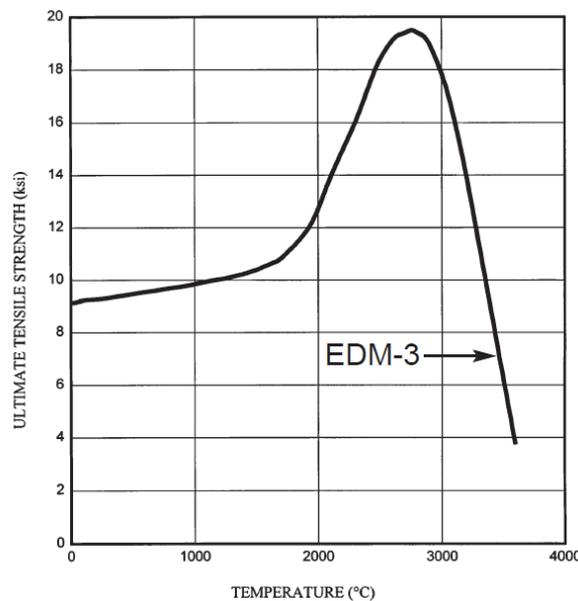


Figura 3.20 Resistenza a trazione della grafite POCO EDM-3 in funzione della temperatura [9]. Si ricorda che  $1 \text{ ksi} \approx 6.9 \text{ MPa}$ .

Un discorso a parte è riservato alla resistenza a compressione: le analisi registrano in questo caso i valori maggiori di tensione ma non si dispone della curva di resistenza in temperatura. Tuttavia l'azienda riporta un incremento della tensione di compressione a rottura fino a circa 2700°C, con un aumento della resistenza tra il 15% e il 50% al variare del tipo di grafite [9]. Vari studi eseguiti con differenti grafiti ([10], [11]) confermano questo comportamento generale. Risulta comunque necessario effettuare delle prove sperimentali al fine di caratterizzare con sicurezza il materiale scelto per la progettazione delle Faraday Cup.

### 3.8 Determinazione del tempo di intervento in caso di malfunzionamento

Finora è stato dimensionato un sistema di misura in grado di valutare il centraggio e le performance del fascio in condizioni di normale esercizio. In caso di un malfunzionamento del ciclotrone, però, le Faraday Cup possono non essere in grado di fermare completamente il fascio. Per questo motivo si vuole determinare il tempo di intervento necessario per rilevare eventuali problemi e bloccare il ciclotrone. I principali parametri che influenzano il tempo di azione riguardano le caratteristiche del fascio: in particolare si considerano dimensione e potenza, in termini di corrente ed energia. Anche il materiale e la geometria della superficie di impatto risultano determinanti. Vengono quindi implementate varie analisi in ambiente Ansys al fine di studiare un *dump* molto semplice, ovvero un dispositivo in grado di assorbire completamente l'energia senza rompersi.

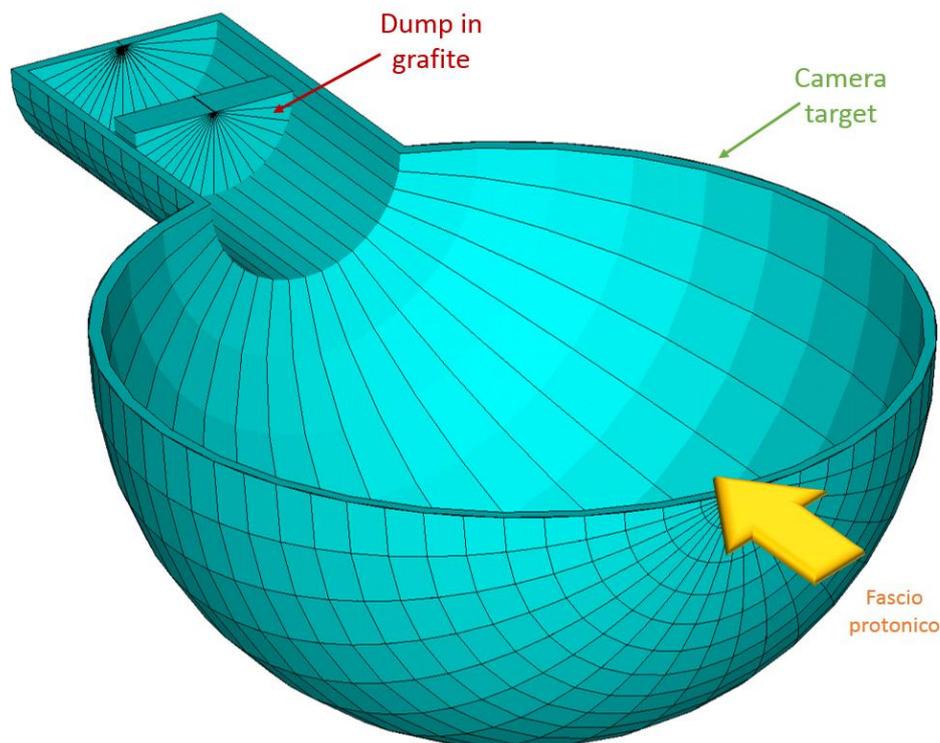
Come condizioni di carico si considerano le caratteristiche che determinano il minor tempo di intervento ovvero:

- Minima dimensione di fascio  $\sigma_x = \sigma_y = 4.75 \text{ mm}$
- Massima corrente  $I = 750 \text{ }\mu\text{A}$
- Assenza di dispositivi precedenti al dump che assorbino la potenza di fascio

Corrente e dimensione del fascio sono infatti i parametri che determinano il picco di densità di energia. La deposizione di potenza viene calcolata in ambiente FLUKA e assegnata come carico termico nelle simulazioni termo-strutturali implementate in Ansys.

Si sottolinea anche l'ultimo punto in quanto dà un carattere molto generale allo studio: il dump infatti potrà essere utilizzato anche per altri componenti, come ad esempio il target SPES, garantendo comunque il tempo di intervento fissato.

Si sceglie un dump di forma cilindrica, ad una temperatura iniziale di  $800^\circ\text{C}$ , per simulare il riscaldamento dovuto ad altri componenti come il target. Per porsi inoltre nelle condizioni peggiori, si considera la camera vuota, senza alcun componente che possa intercettare il fascio prima del dump. In Figura 3.21 è rappresentato il modello utilizzato nelle analisi: come geometria di primo tentativo si fissa il diametro esterno del cilindro in grafite a  $45 \text{ mm}$  e lo spessore a  $20 \text{ mm}$ . La camera è rappresentata da una sfera di dimensioni paragonabili.



*Figura 3.21 Rappresentazione della geometria utilizzata nelle simulazioni Ansys, ottenuta per rotazione del modello bidimensionale attorno all'asse di simmetria.*

Il materiale scelto per la progettazione è la grafite POCO EDM-3. Il carico di rottura a trazione in funzione della temperatura è ricavato da [9] e riportato in Figura 3.22. Come già accennato al paragrafo precedente, le proprietà meccaniche di questa grafite tendono ad incrementare fino a circa  $2700^\circ\text{C}$ , per poi subire un crollo drastico (Figura 3.20). Per quanto riguarda il carico a rottura in compressione, si fa riferimento al valore limite a temperatura ambiente pari a  $\sigma_R \approx -124 \text{ MPa}$ , fornito in [12] e riportato in Figura 3.23. Ci si aspetta comunque un incremento di questo valore con l'aumento di temperatura.

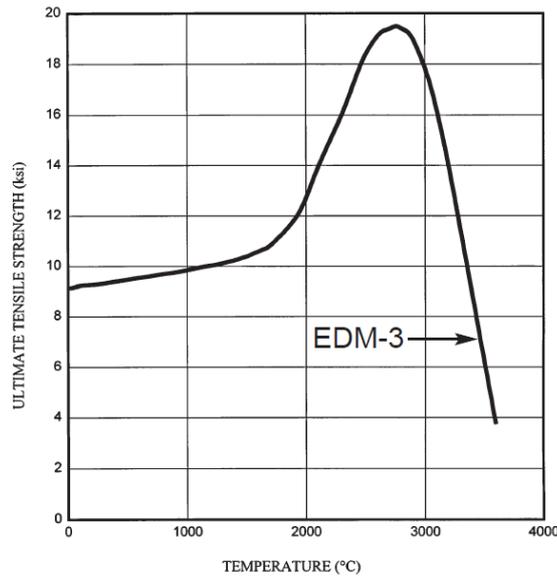
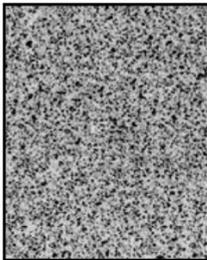


Figura 3.22 Carico di rottura a trazione in funzione della temperatura per la grafite POCO EDM-3 [9].

#### EDM-3®



POCO's EDM-3 is an isotropic Ultrafine grain graphite which offers high strength with outstanding wear and fine surface finish characteristics easily machined to thicknesses of 0.1mm or less.

#### Typical Value

Average Particle Size:  
<5 microns

Flexural Strength:  
935 kg/cm<sup>2</sup>

Compressive Strength:  
1,273 kg/cm<sup>2</sup>

Hardness: 73 Shore

Electrical Resistivity:  
15.6 μΩm

#### Applications

- EDMing of fine detailed electrodes
- Punch & die sets
- Plastic injection molds
- Threading electrodes
- Use in aerospace metal cutting

Figura 3.23 Principali proprietà della grafite POCO EDM-3, scelta per la progettazione [12].

Vengono implementate analisi termo-strutturali al variare dei parametri geometrici e dell'energia di fascio. In particolare vengono variati:

- Lo spessore del cilindro: da 10 mm a 50 mm;
- Il diametro del cilindro: da 40mm a 50 mm;
- L'energia del fascio: da 40 MeV a 70 MeV.

Analizzando l'incremento di temperatura, si può notare come questo sia determinato solamente dalle dimensioni e dalla corrente del fascio. Già a qualche decimo di secondo, infatti, la grafite raggiunge temperature critiche per l'integrità strutturale. In prima analisi si può notare come in questo breve intervallo di tempo, né la geometria del dump, né l'energia del fascio influenzano l'aumento di temperatura (Figura 3.24).

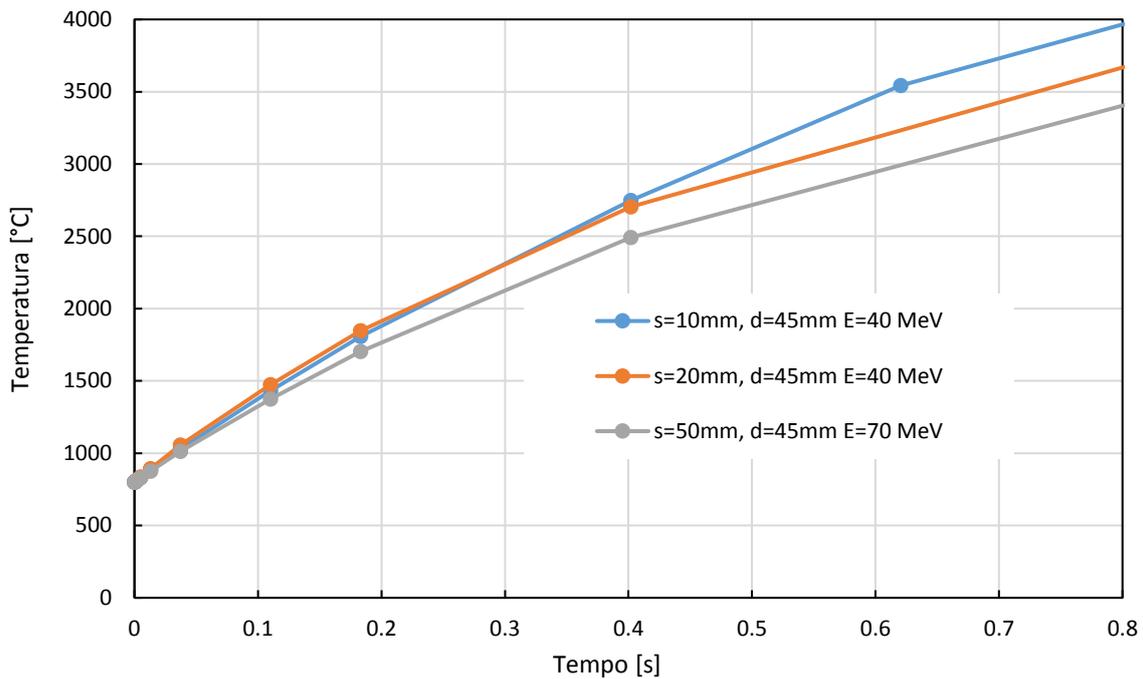


Figura 3.24 Incremento di temperatura al variare dell'energia del fascio e dei principali parametri geometrici.

Si considera ora l'incremento delle tensioni di trazione e compressione nel dump (Figura 3.25). Innanzitutto è possibile notare come la tensione di compressione determini la rottura del componente. Si raggiungono infatti tensioni di compressione critiche ben prima di arrivare al carico di rottura a trazione. Analogamente a quanto visto precedentemente per l'aumento di temperatura, anche in questo caso il valore della tensione di compressione non è influenzata dall'energia del fascio. Inoltre, oltre un certo spessore del dump (circa 10 mm oltre il picco di Bragg), nemmeno i parametri geometrici sono influenti.

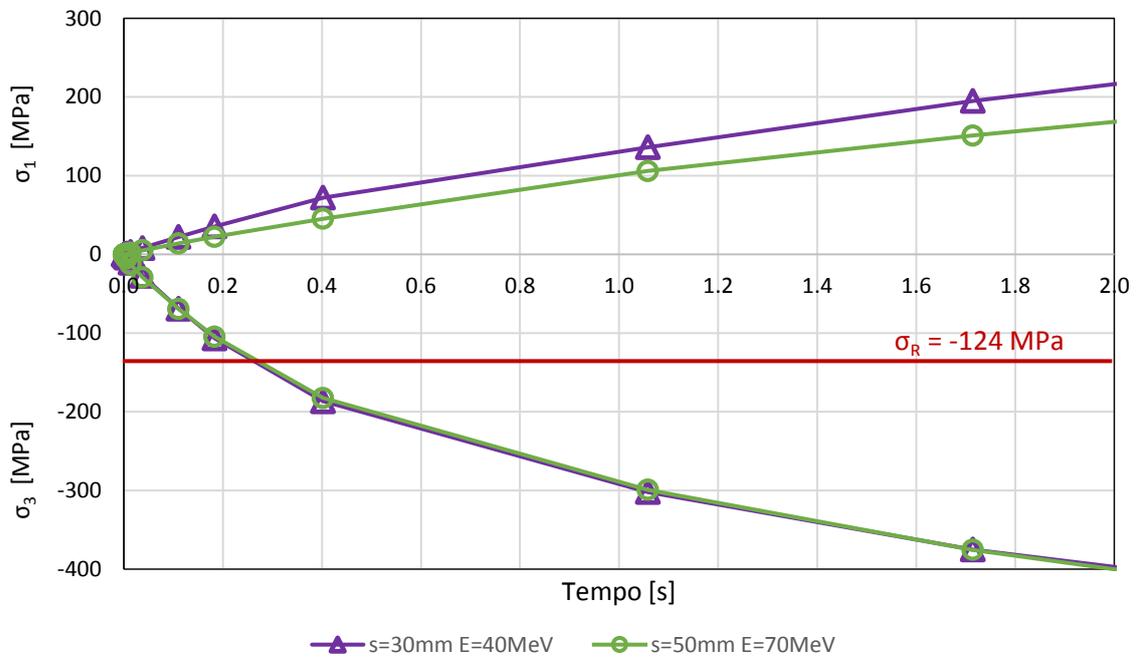


Figura 3.25 Andamento delle tensioni al variare dell'energia di fascio e dei principali parametri geometrici.

A titolo di esempio si riporta l'analisi termo-strutturale relativa ad un dump con spessore 20 mm e diametro 45 mm, investito da un fascio di 40 MeV. Nel grafico di Figura 3.26 è rappresentato l'incremento di temperatura

nel tempo: viene quindi riportata la distribuzione termica dopo circa 0.4 secondi (Figura 3.27). Risulta evidente come dopo questo breve intervallo di tempo si siano già raggiunte temperature molto elevate.

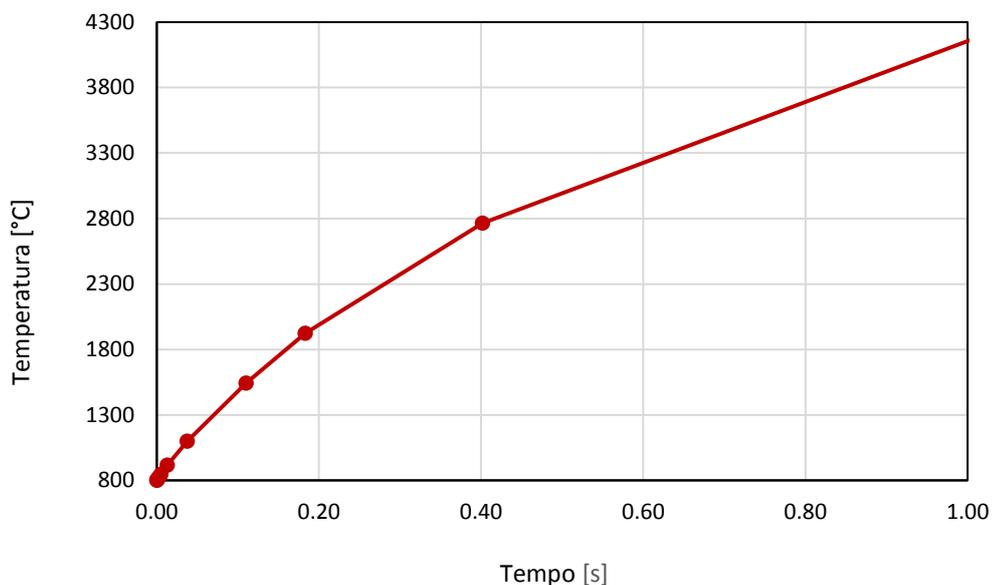


Figura 3.26 Incremento di temperatura in un dump con spessore 20 mm e diametro 45 mm, investito da un fascio di 40 MeV.

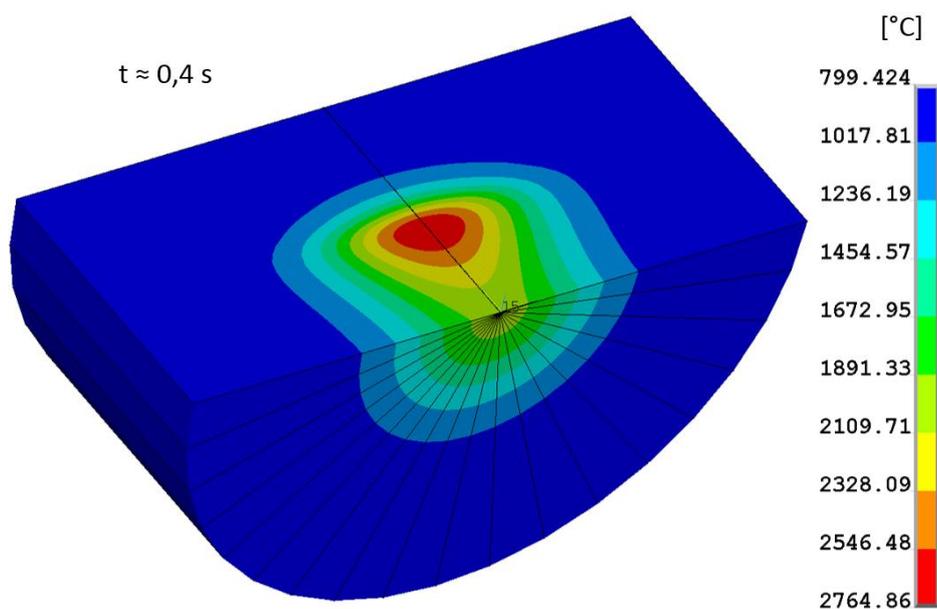


Figura 3.27 Distribuzione di temperatura a  $t=0.4s$  (con  $s=20 \text{ mm}$ ,  $d=40\text{mm}$ ,  $E=40\text{MeV}$ ).

Il tempo di intervento risulta di conseguenza inferiore a 0.4 secondi. Si valutano quindi le tensioni al tempo 0.18 secondi. La tensione di trazione raggiunge il valore massimo di 36.2 MPa ad una temperatura di 1404°C. Analizzando il grafico in Figura 3.28 è possibile constatare come ci si trovi ben al di sotto del limite di rottura. Per quanto riguarda la tensione di compressione (Figura 3.29), si registra un valore pari a -109 MPa. Anche in questo caso la tensione risulta inferiore al carico di rottura a temperatura ambiente. Considerando inoltre che la resistenza a compressione aumenta all'aumentare della temperatura, è possibile affermare che a 0.18 s l'integrità strutturale del dump è garantita.

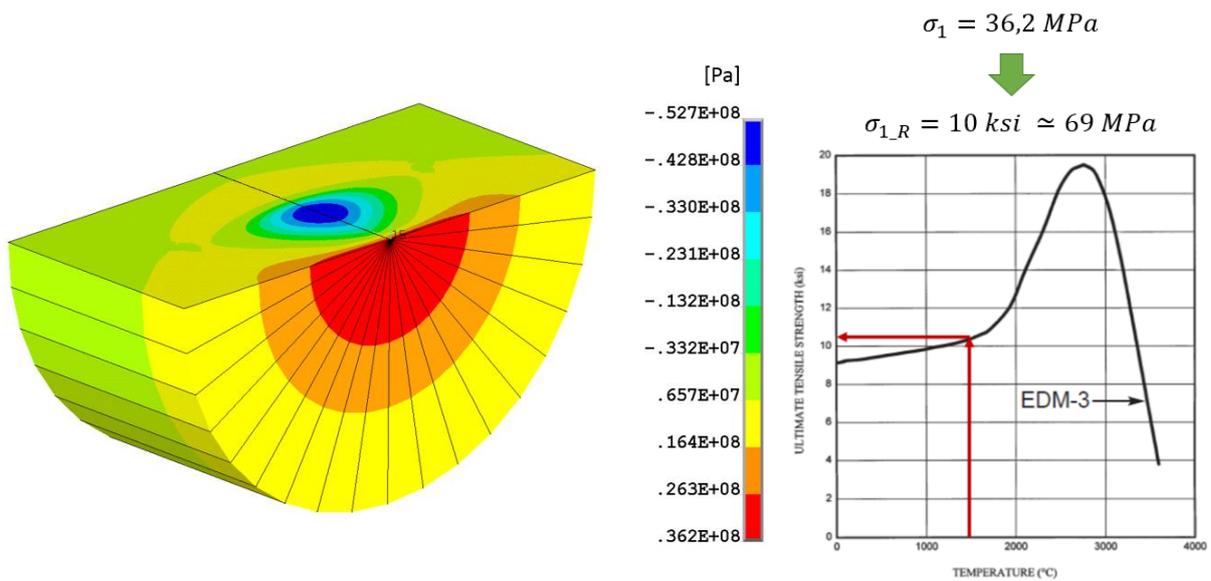


Figura 3.28 Tensione di trazione nel dump al tempo  $t = 0.18 \text{ s}$  [9].

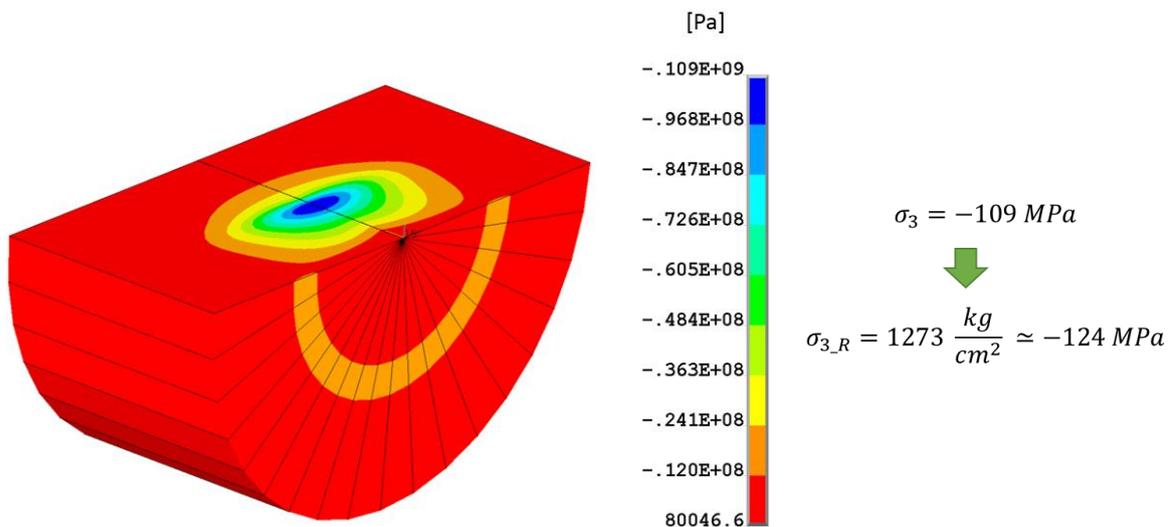


Figura 3.29 Tensione di compressione nel dump al tempo  $t = 0.18 \text{ s}$  [12].

Si è visto come l'energia del fascio non influenzi né l'innalzamento della temperatura, né il valore delle tensioni massime all'interno del dump. Determina però la posizione del picco di potenza depositata, come è possibile notare in Figura 3.30 e Figura 3.31. Ad energia costante e variando la geometria, la posizione del picco di Bragg si mantiene costante a circa 10 mm. Quando però si passa al fascio da 70 MeV, lo spessore interessato dalla deposizione di potenza aumenta fino a circa 27 mm. Si può quindi concludere che lo spessore minimo del dump sia determinato dalla posizione del picco con il fascio a maggiore energia.

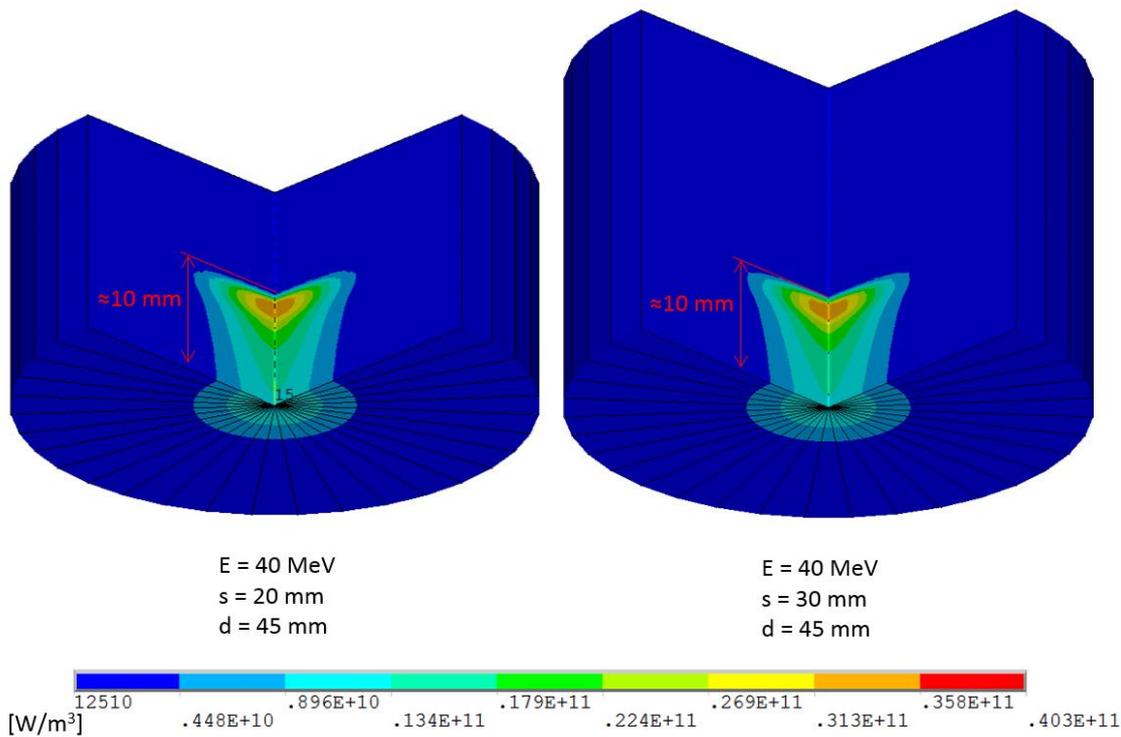


Figura 3.30 Posizione del picco di potenza per un fascio da 40 MeV. Si noti come al variare della geometria la posizione non cambi.

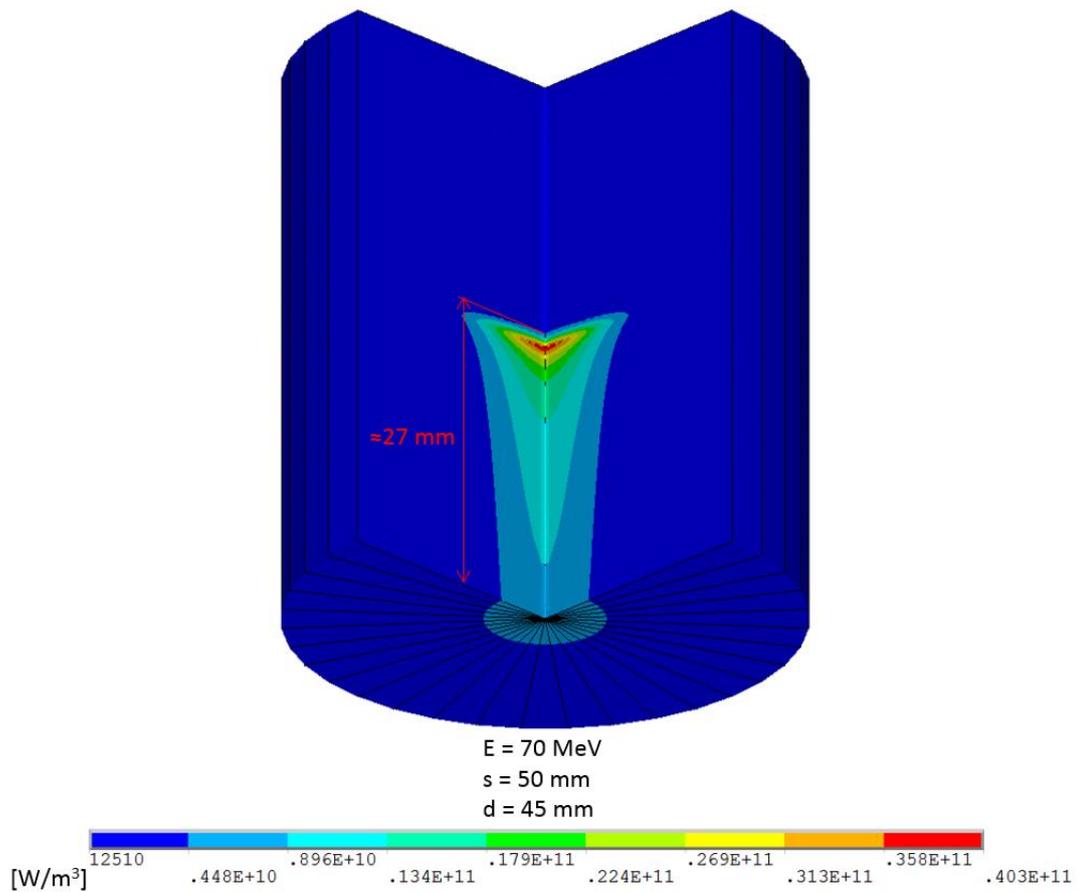


Figura 3.31 Posizione del picco di potenza per un fascio da 70 MeV.

Un altro interessante aspetto da considerare è la potenza massima depositata. Questo valore è infatti determinato dalla corrente (posta al valore massimo di  $750 \mu\text{A}$ ) ma risulta praticamente indipendente dal valore dell'energia del fascio. Il tempo di intervento è direttamente dipendente dal massimo valore di potenza.

Dalle precedenti osservazioni su temperatura e tensioni, è possibile ricavare due importanti considerazioni:

- Lo spessore minimo del dump è determinato dal fascio con maggiore energia. Viene fissato uno spessore minimo di 30 mm;
- Il tempo di intervento dipende dalla massima deposizione di potenza. Viene fissato un tempo di intervento pari a 0.18 secondi.

Si ricorda che le precedenti osservazioni sono relative ad un fascio con una corrente di  $750 \mu\text{A}$  e dimensioni pari a  $\sigma_x = \sigma_y = 4.75 \text{ mm}$ . Il carico è stato applicando imponendo la deposizione di potenza ricavata da FLUKA. Si è infatti visto come il tempo di intervento dipenda dalla massima deposizione: la distribuzione gaussiana, come già evidenziato nei precedenti capitoli e in particolare al paragrafo 2.4.1, ben descrive il comportamento termo-strutturale del componente a regime ma risulta poco precisa nel transitorio. Presenta infatti un valore massimo di deposizione di potenza inferiore rispetto alla deposizione ottenuta con FLUKA (Figura 3.32). Ciò comporta tensioni e temperature inferiori, che determinerebbero inevitabilmente un errore nel calcolo del tempo di intervento. Nei grafici di Figura 3.33 e Figura 3.34 è possibile confrontare i dati termo-strutturali per un dump avente diametro 45 mm e spessore 20 mm, investito da un fascio da 40 MeV, utilizzando la simulazione di Fluka o imponendo una distribuzione gaussiana.

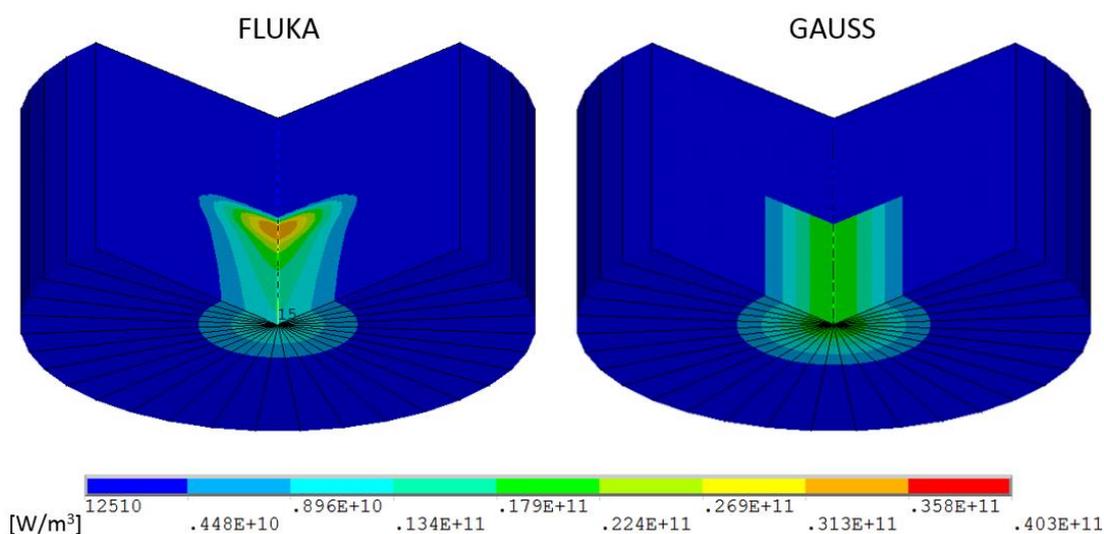


Figura 3.32 Deposizione di potenza ottenuta tramite simulazione FLUKA (a sinistra) o ipotizzando una distribuzione gaussiana costante lungo l'asse (a destra).

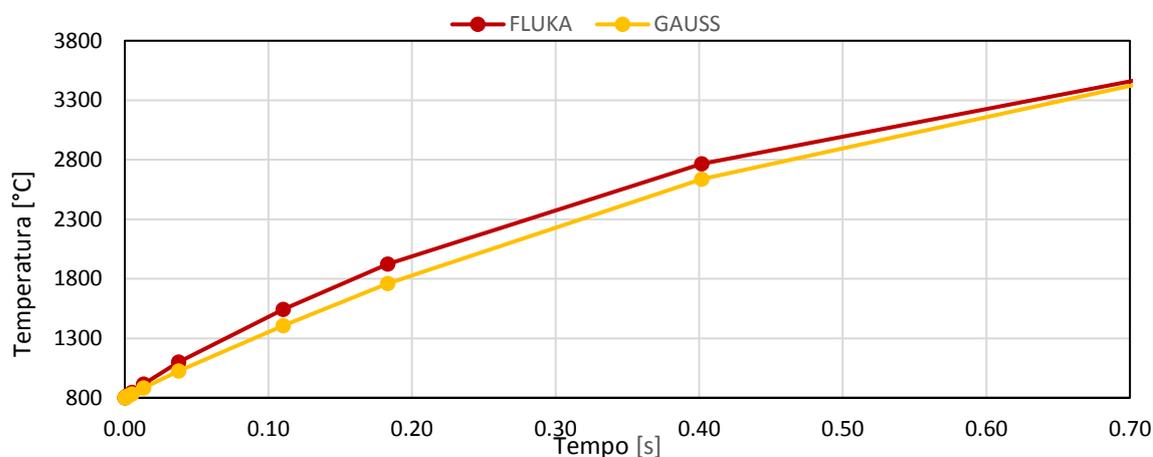


Figura 3.33 Incremento di temperatura imponendo la deposizione di potenza ricavata da FLUKA o ipotizzando una distribuzione gaussiana costante lungo l'asse.

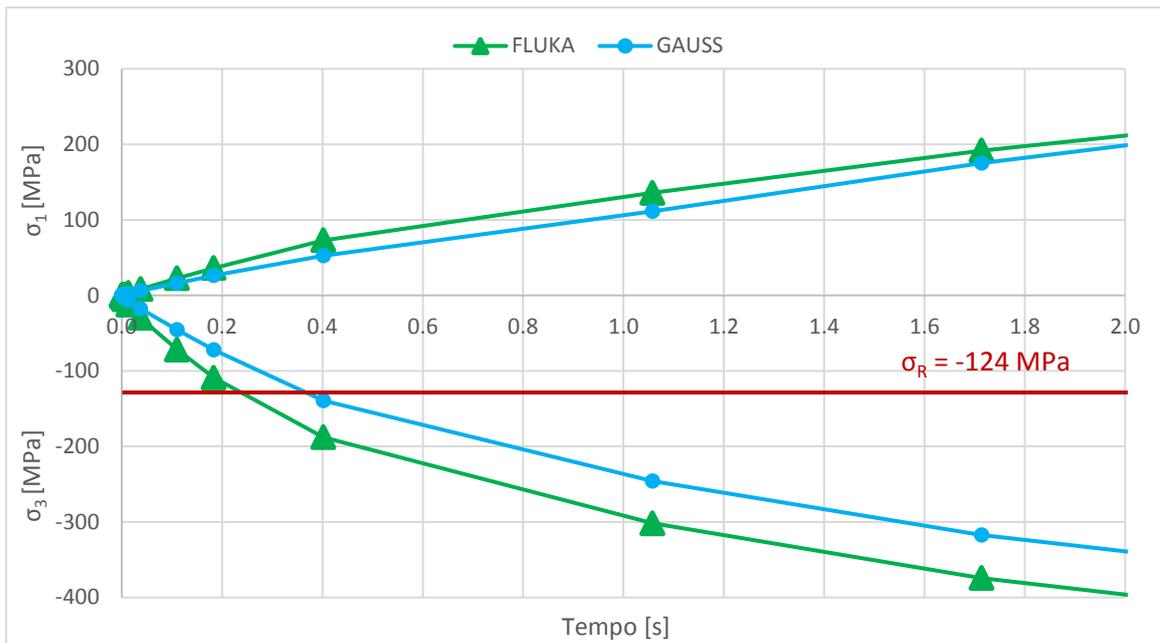


Figura 3.34 Andamento tensioni imponendo la distribuzione di potenza ricavata da FLUKA o ipotizzando una distribuzione gaussiana costante lungo l'asse.

### 3.9 Conclusioni

In questo capitolo è stata affrontata la progettazione della Faraday Cup. Il dimensionamento è stato reso possibile grazie a simulazioni termo-strutturali con il codice di calcolo agli Elementi Finiti ANSYS. Sono state validate le ipotesi semplificative presentate nel capitolo precedente, riguardanti la dimensione del modello e la deposizione di potenza. In particolare, l'utilizzo di un modello bidimensionale con deposizione di potenza con andamento gaussiano ha permesso di progettare due distinte Faraday Cup, in grado di realizzare misure di corrente sia per un fascio di alta potenza che di bassa potenza. Inoltre, attraverso delle analisi elettriche, si sono dimensionati due soppressori in grado di fornire il potenziale di schermatura richiesto. Il modello tridimensionale, sviluppato con il software CREO Parametric 2.0, ha permesso infine di organizzare l'alloggiamento all'interno della camera target ed è stato utilizzato per validare le precedenti simulazioni. Dall'analisi dei risultati è risultato evidente come temperatura e tensione di trazione massime non rappresentino un problema per l'integrità strutturale del sistema meccanico. Si è infine valutato il tempo di intervento in caso di malfunzionamento del ciclotrone. Il fascio deve essere fermato con un dump in grafite con uno spessore di almeno 30 mm entro 0.18 secondi.

L'assenza di dati precisi riguardanti il comportamento a compressione alle alte temperature ha però evidenziato la necessità di relative prove sperimentali, al fine di caratterizzare completamente la grafite POCO EDM-3, scelta per il progetto. Il setup delle prove di compressione sarà l'oggetto del prossimo capitolo.



## CAPITOLO 4

### Progettazione di un setup per prove di compressione

#### 4.1 Introduzione

La resistenza a compressione è definita come la capacità di un materiale di resistere a carichi monoassiali di compressione [13]. Vari materiali impiegati nella costruzione di elementi meccanici hanno proprietà differenti se sottoposti a trazione o a compressione. Tipicamente i materiali fragili hanno un carico di rottura a compressione nettamente superiore a quello di trazione. Si ricorda infatti che le tensioni di trazione tendono a fare propagare le discontinuità nel materiale (fratture, difetti) mentre quelle di compressione tendono a chiuderle. Bisogna prestare particolare attenzione ai provini di compressione: se sono troppo lunghi, infatti, si può indurre una flessione spuria o si può verificare un caso di instabilità. Al contrario, se il provino è troppo corto, l'attrito alle estremità può rendere lo stato di tensione più complesso di quello monoassiale richiesto [14]. La normativa ASTM C695-15 definisce i metodi standard per le prove di resistenza a compressione per carbonio e grafite.

Come visto nel capitolo precedente, si è registrata l'assenza di dati riguardanti la resistenza a compressione in temperatura della grafite POCO EDM-3, materiale scelto per la progettazione meccanica delle Faraday Cup e del dump. Ciò ha evidenziato la necessità di prove sperimentali al fine di ottenere i dati mancanti. Uno degli aspetti più importanti da considerare nella progettazione del layout per prove di compressione riguarda la combustione del materiale all'aumentare della temperatura: ciò implica che le prove debbano per forza essere effettuate in vuoto, al fine di evitare un deterioramento delle proprietà del materiale. Si lavorerà quindi all'interno della camera target: un soffiutto metallico si occuperà di mantenere il vuoto. Le alte temperature saranno raggiunte per effetto Joule, grazie al passaggio di corrente attraverso i puntali in rame. Una geometria di primo tentativo sarà utilizzata per implementare analisi termiche al fine di valutare le temperature in gioco. I risultati aiuteranno a definire i materiali più idonei per i vari componenti. Il setup viene quindi ottimizzato e si procede con la scelta del trasduttore di forza e alla relativa taratura.

#### 4.2 Layout di primo tentativo

Un aspetto certamente da considerare inizialmente nella definizione del layout di primo tentativo è la necessità di effettuare le prove in vuoto. Con le comuni apparecchiature per test di compressione e trazione, infatti, non è possibile raggiungere alte temperature a causa dell'ossidazione della grafite in aria. Si sceglie quindi di sviluppare l'apparato di misura all'interno della camera target, già predisposta per lavorare in vuoto. La camera, rappresentata in Figura 4.1, presenta due flange coassiali disposte orizzontalmente: il loro asse determinerà quindi la direzione di compressione.

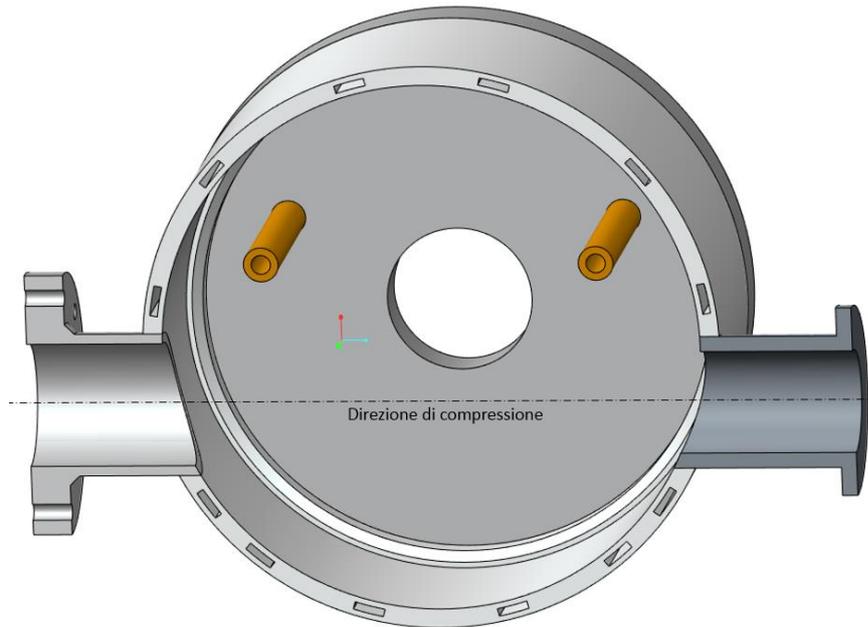


Figura 4.1 Sezione della camera: la direzione di compressione è determinata dall'asse delle due flange.

La compressione del provino sarà ottenuta dalla battuta di un albero libero di scorrere assialmente contro un albero fissato ad una delle due flange. Un soffietto permetterà la tenuta in vuoto. Come già accennato, le alte temperature verranno raggiunte per effetto Joule, mediante il passaggio di corrente. Due morsetti di rame, fissati ai puntali, sostengono delle lamine in tantalio. Le lamine hanno il compito di mantenere il provino in posizione e permettere il passaggio di corrente.

Ciò comporterà la necessità di un isolamento elettrico degli alberi. Si utilizzano quindi dei dischi in Macor, un materiale che fornisce un ottimo isolamento termico ed elettrico, resistente alle alte temperature fino a 1000°C e con una resistenza a compressione pari a 345 MPa.

La misura della forza sarà affidata ad una cella di carico, compressa mediante una vite senza fine. La geometria di primo tentativo appena descritta (Figura 4.2) viene modellata in Creo Parametric 2.0 ed utilizzata per analisi termiche in ambiente Ansys. Si vogliono infatti valutare le temperature in gioco al fine di assegnare i materiali più opportuni ai vari componenti.

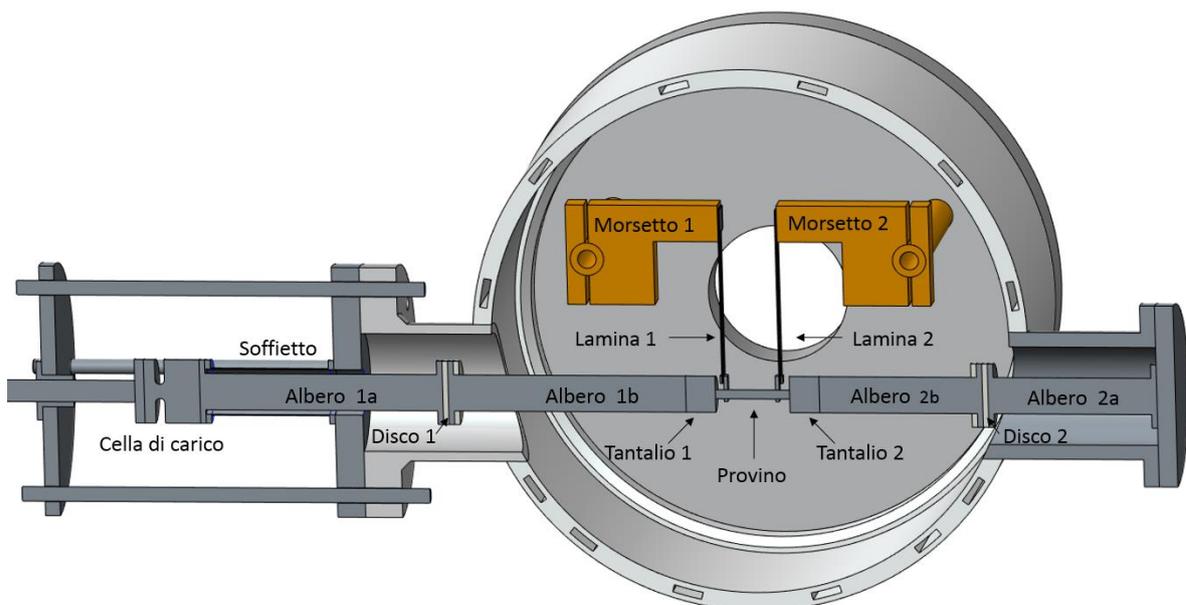


Figura 4.2 Layout di primo tentativo utilizzato per le analisi termiche in Ansys.

Nella simulazione (Figura 4.3) si utilizza un provino cilindrico con diametro di 5 mm e lunghezza 40 mm. Viene fatta passare una corrente di 200 A.

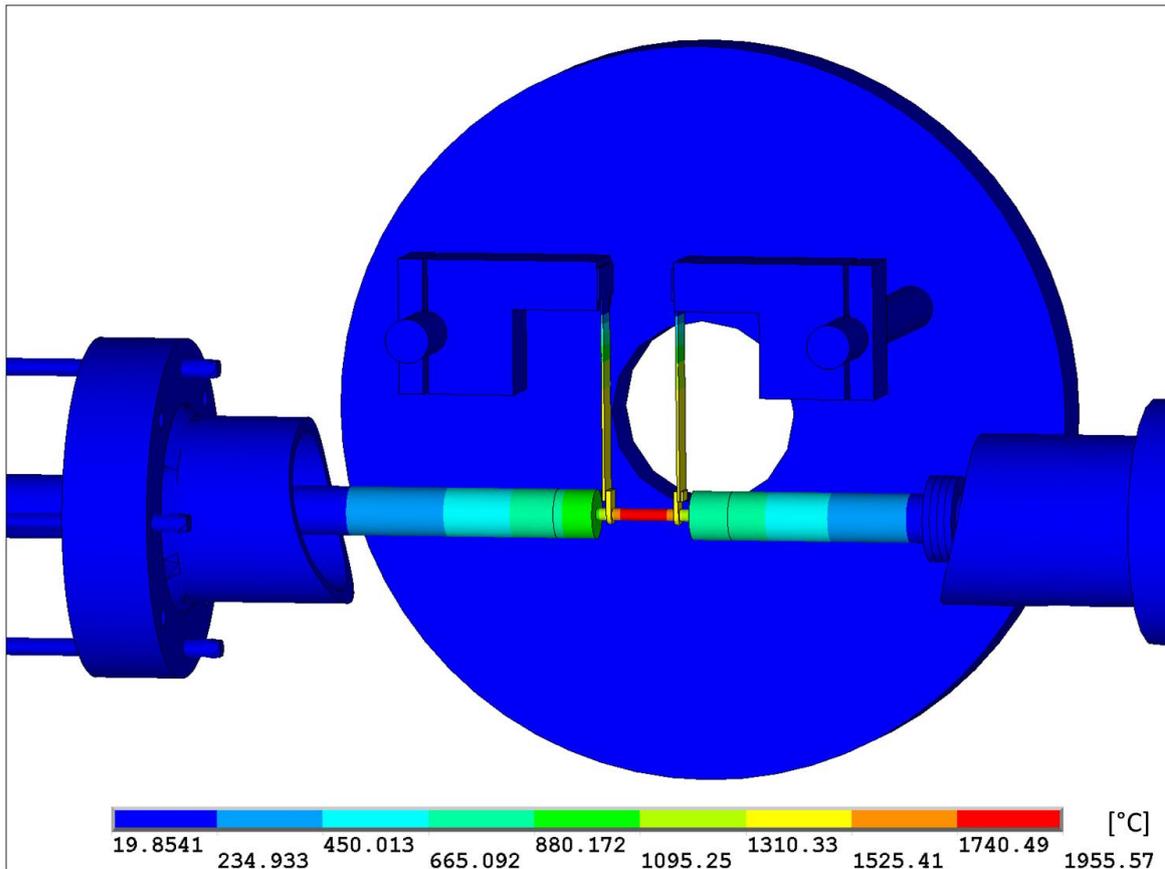


Figura 4.3 Analisi termica della geometria di primo tentativo.

Nella tabella seguente vengono riportati i risultati dell'analisi termica:

Componente	Materiale	Temperatura minima	Temperatura massima
Provino	Grafite POCO EDM-3	954 °C	1955°C
Tantalo 1	Tantalo	869°C	1023°C
Tantalo 2	Tantalo	840°C	987°C
Lamina 1	Tantalo	40°C	1434°C
Lamina 2	Tantalo	40°C	1438°C
Morsetto 1	Rame	27°C	60°C
Morsetto 2	Rame	27°C	60°C
Albero 1b	Acciaio	87°C	871°C
Disco 1	Macor	65°C	98°C
Albero 1a	Acciaio	43°C	67°C
Albero 2b	Acciaio	138°C	843°C
Disco 2	Macor	84°C	162°C
Albero 2a	Acciaio	36°C	88°C

Tabella 4.1 Risultati della simulazione termica della geometria di primo tentativo.

I risultati termici validano la scelta dei materiali per i singoli componenti. In particolare si evidenzia la necessità di alberi in acciaio con estremità in tantalio. Inoltre, viste le temperature che caratterizzano i due duchi isolanti, sarà eventualmente possibile scegliere il Peek in sostituzione al Macor.

### 4.3 Ottimizzazione della geometria

Analizzate le temperature in gioco e assegnati i materiali dei principali componenti, è possibile procedere con la definizione del layout definitivo. Innanzitutto si opta per uno sviluppo verticale anziché orizzontale: ciò permette di appoggiare il provino all'albero inferiore, senza la necessità di sostenerlo con le lamine. Queste saranno comunque fissate alle due estremità in tantalio così da permettere il passaggio di corrente e di conseguenza il riscaldamento del provino durante la compressione.

#### 4.3.1 La camera e il sistema di riscaldamento

Come già accennato, il riscaldamento avviene per effetto Joule: la corrente passa dai puntali al provino attraverso dei morsetti in rame e delle lamine in tantalio.

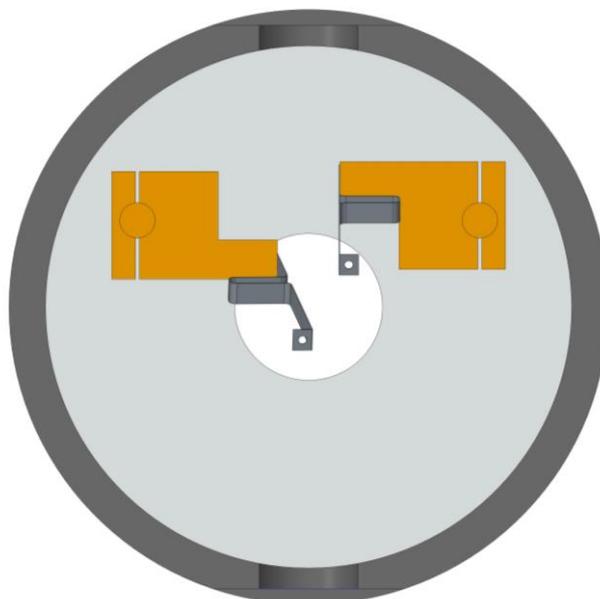


Figura 4.4 Disposizione dei morsetti e delle lamine all'interno della camera.

Per il dimensionamento delle lamine è stata considerata l'uguaglianza tra la potenza elettrica generata dal passaggio di corrente e quella termica dissipata per irraggiamento. La legge di Joule afferma che in un componente elettrico, avente una resistenza  $R$ , in cui circola una certa corrente  $I$ , si sviluppa sotto forma di calore una certa potenza che è uguale al prodotto della sua resistenza per il quadrato della corrente che lo attraversa. La formula che esprime tale concetto è la seguente:

$$P_{el} = R \cdot I^2 = \rho \cdot \frac{l}{A} \cdot I^2 \quad (4.1)$$

Dove  $\rho$  è la resistività elettrica,  $l$  la lunghezza delle lamine e  $A$  la loro sezione.

La potenza termica emessa per irraggiamento è definita dall'equazione (4.2)

$$P_{irr} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot 2P \cdot l \cdot (T^4 - T_m^4) \quad (4.2)$$

Dove  $\varepsilon$  è l'emissività del materiale,  $\sigma$  è la costante di Stefan Boltzmann,  $2P$  il perimetro della sezione,  $l$  la lunghezza delle lamine,  $T$  la temperatura raggiunta e  $T_m$  la temperatura ambiente. Imponendo l'uguaglianza tra le due potenze si avrà allora:

$$\rho \cdot \frac{l}{A} \cdot I^2 = \varepsilon \cdot \sigma \cdot 2P \cdot l \cdot (T^4 - T_m^4) \quad (4.3)$$

Si noti come sia la resistività, sia l'emissività, dipendono dalla temperatura (Figura 4.5 e Figura 4.6). Le due grandezze sono state quindi parametrizzate in funzione di questa variabile.

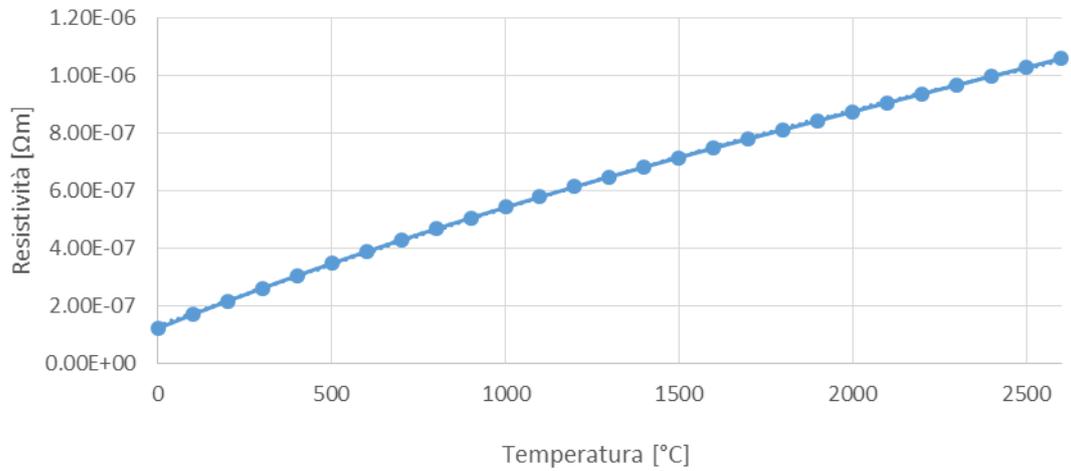


Figura 4.5 Resistività elettrica del tantalio in funzione della temperatura.

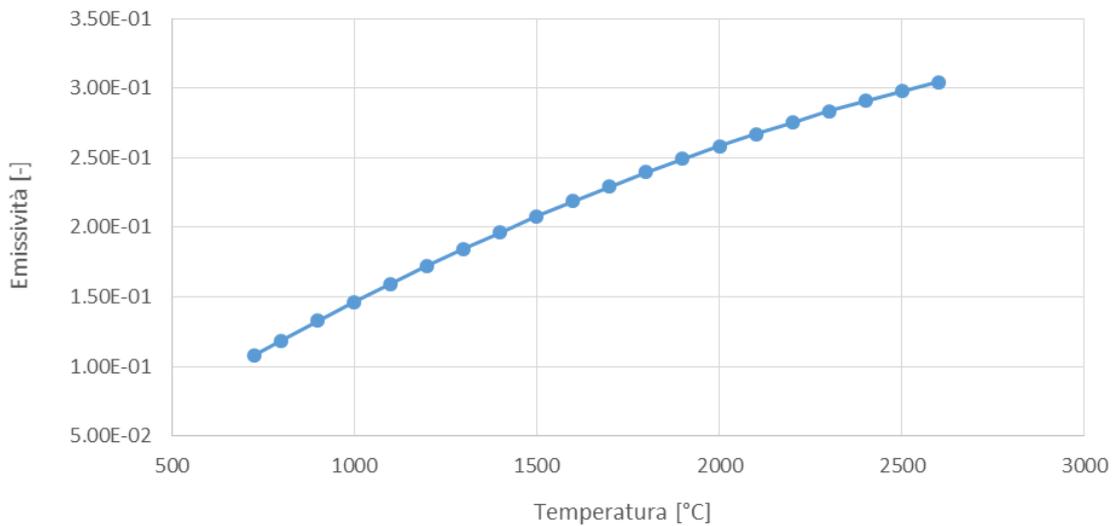


Figura 4.6 Emissività del tantalio in funzione della temperatura.

Fissando il valore della corrente e variando i parametri geometrici che caratterizzano le lamine, è quindi possibile trovare la temperatura che risolve l'uguaglianza, attraverso un procedimento iterativo.

Attraverso questo procedimento sono state dimensionate sei lamine in tantalio, lunghe 215 mm e spesse 0.25 mm, che collegano i morsetti in rame all'estremità degli alberi in tantalio. Lo spessore ridotto conferisce la flessibilità necessaria per non influire sulla prova di compressione.



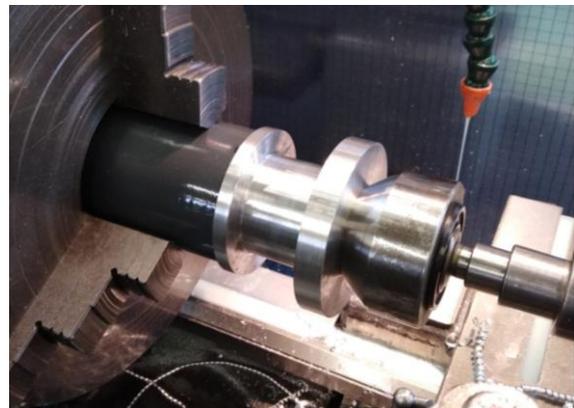
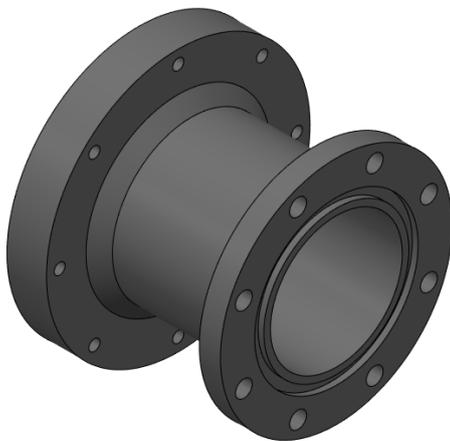
*Figura 4.7 Una delle lamine in tantalio utilizzate per riscaldare il provino.*

Per favorire il fissaggio delle lamine agli alberi, sono state previste delle spianature sulle estremità in tantalio. Le lamine verranno fissate con una vite M3, sempre in tantalio.



*Figura 4.8 Particolare delle spianature delle estremità in tantalio.*

Due flange in alluminio permetteranno l'assemblaggio di tutti gli altri componenti alla camera. Anche in questo caso delle guarnizioni si occuperanno di mantenere il vuoto, necessario per le misure in temperatura.



*Figura 4.9 Modello CAD della flangia inferiore e relativa lavorazione.*

### **4.3.2 Il trasferimento della forza**

Per imprimere la forza di compressione si utilizza una movimentazione già a disposizione, rappresentata in Figura 4.10.

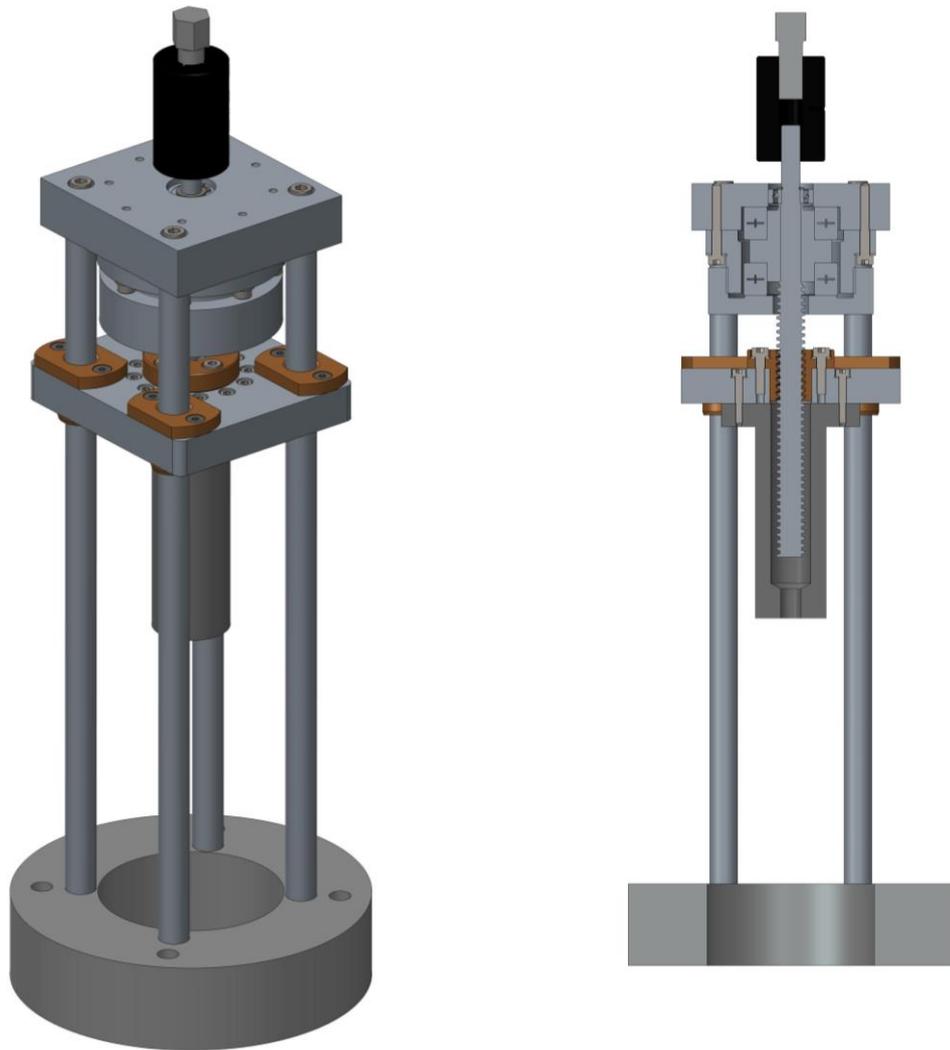


Figura 4.10 Movimentazione utilizzata per il trasferimento del carico.

Un giunto permette la rotazione di una vite trapezia avente passo 3 mm e lunghezza filettata di 118 mm. La vite è saldobrasata ad un componente in acciaio che carica due cuscinetti assiali: uno verrà caricato quando la forza è rivolta verso il basso, l'altro quando la forza ha verso opposto. Un cuscinetto radiale assorbirà eventuali sforzi radiali. Un sistema di boccole fissate ad una piastra permette di trasferire il movimento rotatorio della vite in movimento traslatorio. Un componente cilindrico, coassiale alle vite, si occuperà di trasferire il carico al trasduttore di forza e al resto del sistema. La movimentazione è progettata per lavorare con un motore pneumatico da 20 Nm e dimensionata per carichi che raggiungono quasi le 4 tonnellate. La coppia motrice effettivamente necessaria per le prove di compressione sarà di molto inferiore rispetto al limite di progettazione. Si assume infatti una forza massima di 10 kN: considerando il passo della vite pari a 3 mm e un rendimento dell'azionamento pari a 0.8, la coppia motrice può essere calcolata come:

$$M_d = \frac{F_{ax} \cdot p}{2000 \cdot \pi \cdot \mu} = \frac{10000 \text{ N} \cdot 3 \text{ mm}}{2000 \cdot \pi \cdot 0.8} \approx 5.9 \text{ Nm} \quad (4.4)$$

Dove  $F_{ax}$  è la forza assiale totale,  $p$  è il passo e  $\mu$  è il rendimento.

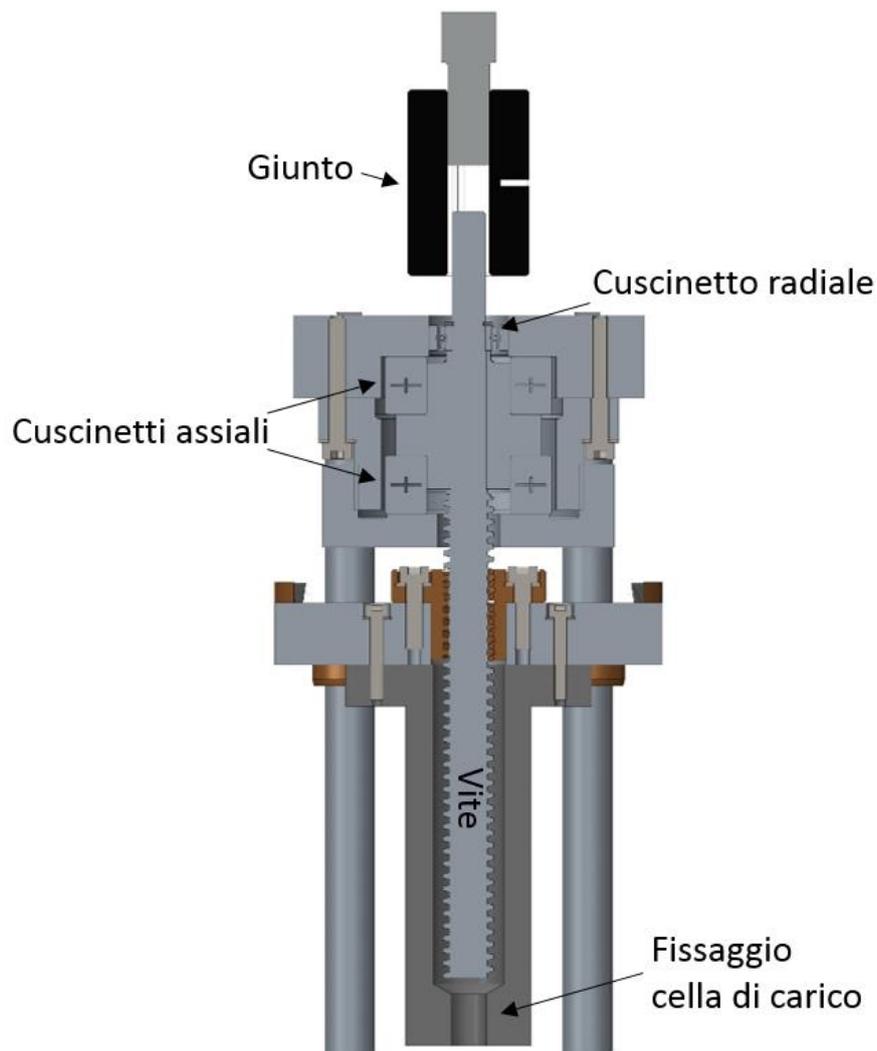
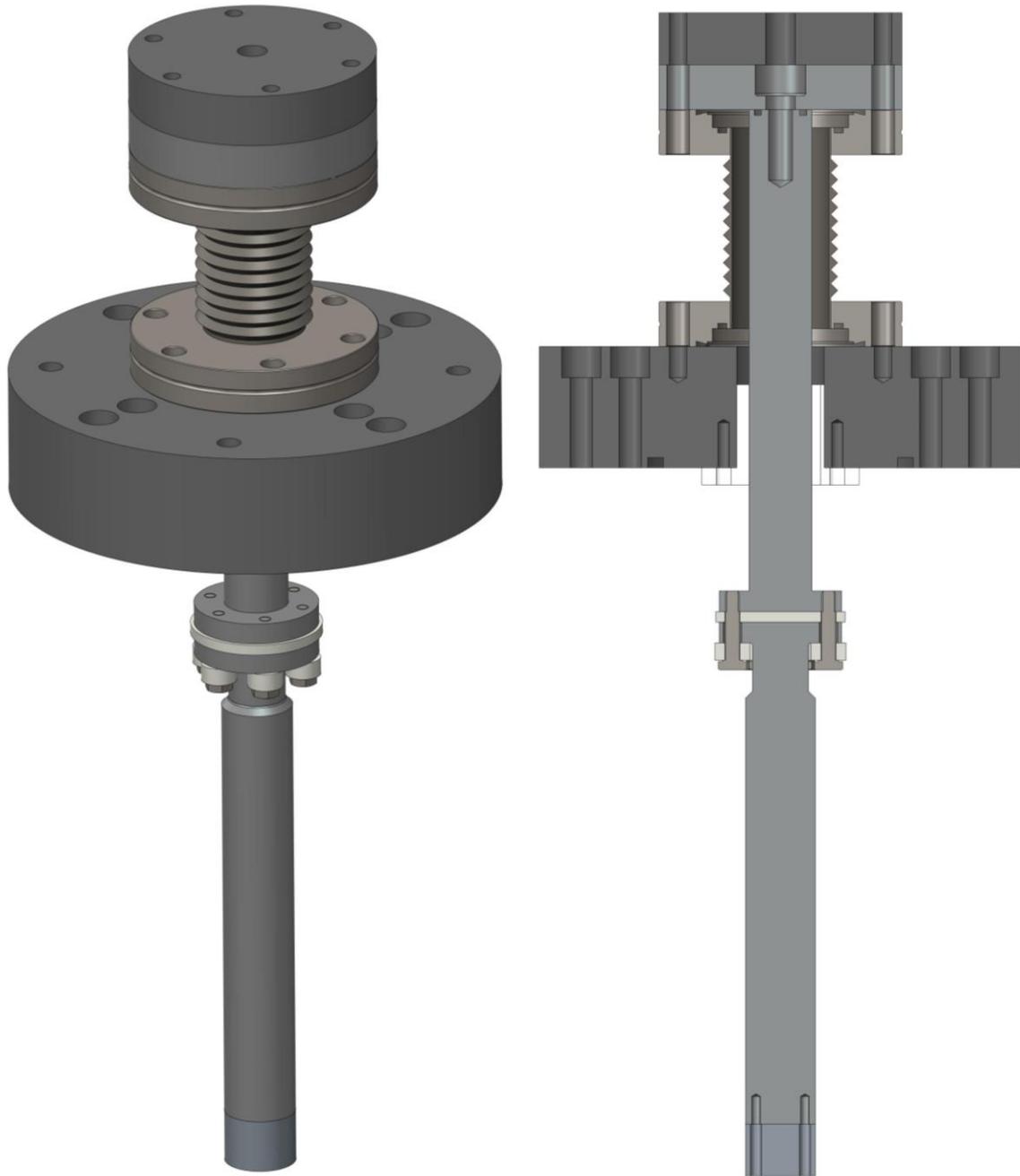


Figura 4.11 Particolare della movimentazione per il trasferimento del carico.

### 4.3.3 L'albero mobile e il soffietto

L'albero scorrevole è mantenuto in asse da una boccia in PEEK. Il soffietto metallico viene saldato a due flange standard CF 40: quella inferiore è fissata ad una flangia più grande che permette il collegamento della movimentazione alla camera. Quella superiore viene serrata con altre due flange: la prima, opportunamente dimensionata, è fissata all'albero da una vite centrale. L'altra presenta un foro filettato centrale dedicato all'assemblaggio della cella di carico.



*Figura 4.12 Soluzione costruttiva adottata per l'albero mobile.*

Il soffietto, che a riposo misura 115 mm, può essere compresso fino a 40 mm. Il vuoto viene mantenuto grazie ad una guarnizione sulla testa dell'albero: viene così prevista una cava dedicata con diametro esterno di 15 mm e diametro interno 11 mm. Altre due guarnizioni sono previste per le flange del soffietto.

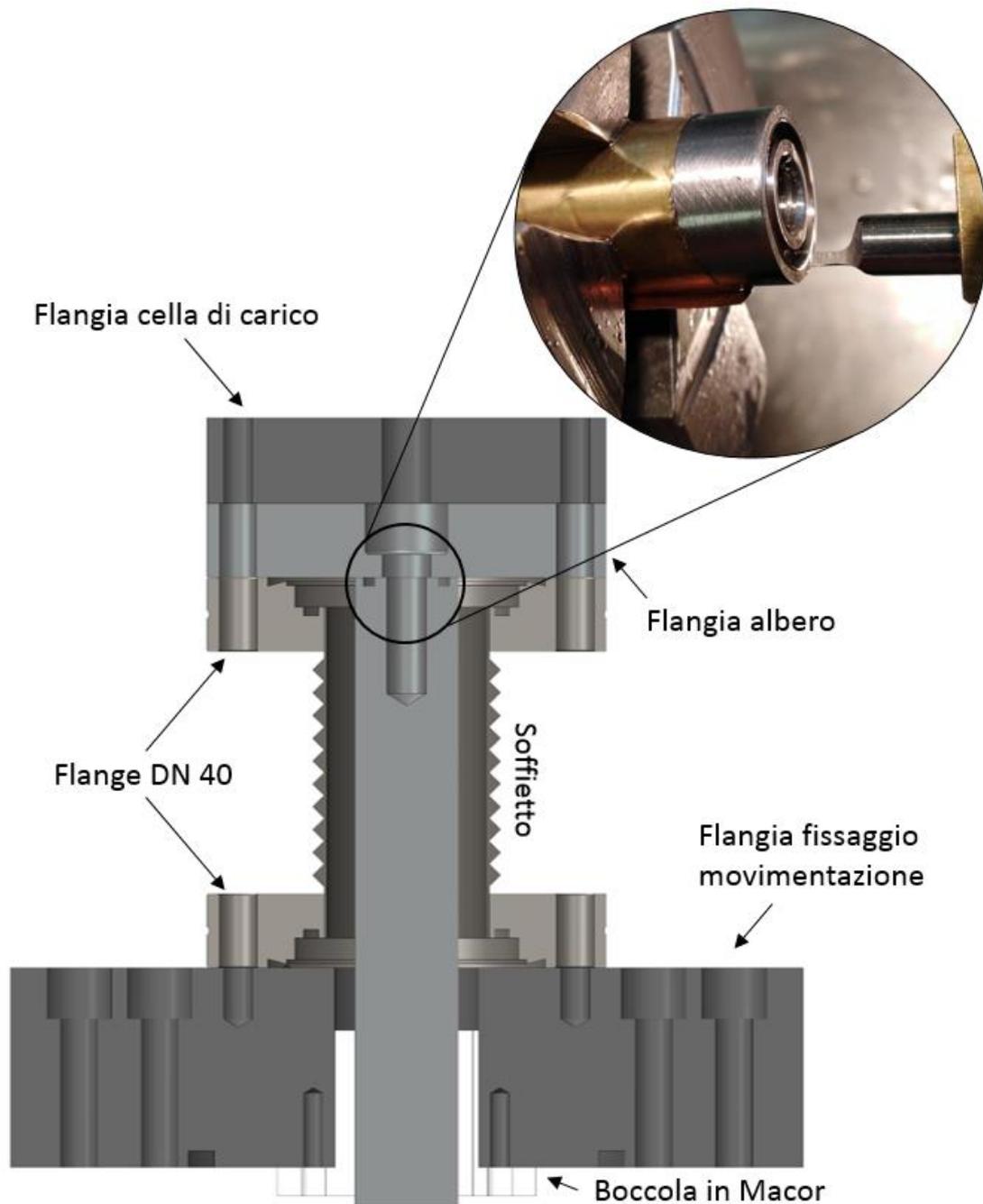


Figura 4.13 Particolare dell'assemblaggio, con lavorazione della cava.

Si osservi come la flangia che si occupa del fissaggio della movimentazione presenti due serie di viti concentriche: ciò permetterà il fissaggio anche alla flangia originale della camera, caratterizzata da un diametro maggiore.

La vite M8 che permette il fissaggio dell'albero alla flangia è in acciaio austenitico, incrudito, con carico di rottura minimo di 700 N/mm<sup>2</sup>. Per il dimensionamento è stata ipotizzata una forza massima di 10 kN: tenendo conto della classe di resistenza della vite, è stata così calcolata l'area della sezione del nocciolo minima secondo la formula della verifica a trazione:

$$F_{t,Ed} \leq F_{t,Rd} = \frac{0.9 \cdot A_{res} \cdot f_{tb}}{\gamma_{M2}} \quad (4.5)$$

Dove  $F_{t,Ed}$  è la forza agente sul bullone,  $F_{t,Rd}$  è la resistenza di calcolo a trazione del bullone,  $A_{res}$  è l'area della sezione di nocciolo della vite,  $f_{tb}$  è la resistenza a rottura del materiale della vite e  $\gamma_{M2}$  è il coefficiente di sicurezza pari a 1.25 [15]. Risulta un'area resistente minima pari a 19.84 mm<sup>2</sup>, che corrisponderebbe ad una

vite M6 (area resistente pari a 20.1 mm). In favore di sicurezza è stata scelta una vite M8. In maniera analogo è stata verificata la tenuta di tutte le altre bullonature presenti nell'assemblaggio.

Particolare attenzione è stata posta alla lamatura per la vite: attraverso simulazioni agli Elementi Finiti con il codice di calcolo Ansys è stata infatti calcolata la tensione di compressione agente al variare del raggio di lamatura R e dello spessore s (figura)

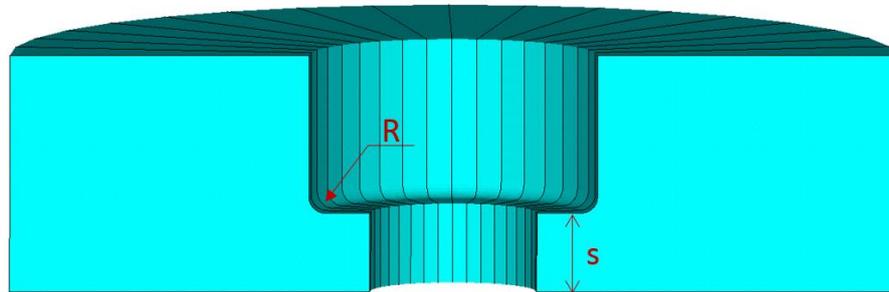


Figura 4.14 Parametri geometrici utilizzati per il dimensionamento della lamatura.

Tenendo conto della cava ricavata per la guarnizione, l'area di contatto tra flangia e albero risulta essere pari alla somma delle due corone circolari. Considerando una forza agente di 10000 N si è così ricavata una tensione pari a:

$$\sigma = \frac{F}{A_1 + A_2} = \frac{10000 \text{ N}}{93 \text{ mm}^2} = 107.53 \text{ MPa} \quad (4.6)$$

Nelle simulazioni Ansys si è considerata l'intera tensione concentrata sulla corona più vicino alla lamatura. Si sono quindi fatti variare il raggio R e lo spessore s al fine di valutare la tensione di Von Mises agente. In tabella sono riportati i risultati del dimensionamento.

s [mm]	R [mm]	$\sigma_{\text{VON MISES}}$ [MPa]
2	0.3	615
2	2	252
4	2	110
4	1	145
4	0.75	164
4	0.8	158

Tabella 4.2 Tensione massima di Von Mises al variare dei parametri geometrici.

La flangia è progettata in Acciaio AISI 316, con carico di snervamento pari a  $\sigma_y = 290 \text{ MPa}$  e carico di rottura di  $\sigma_R = 580 \text{ MPa}$ . Si sceglie quindi uno spessore di 4 mm e un raggio di 0.8 mm. In Figura 4.15 è rappresentata la distribuzione di tensione di Von Mises corrispondente.

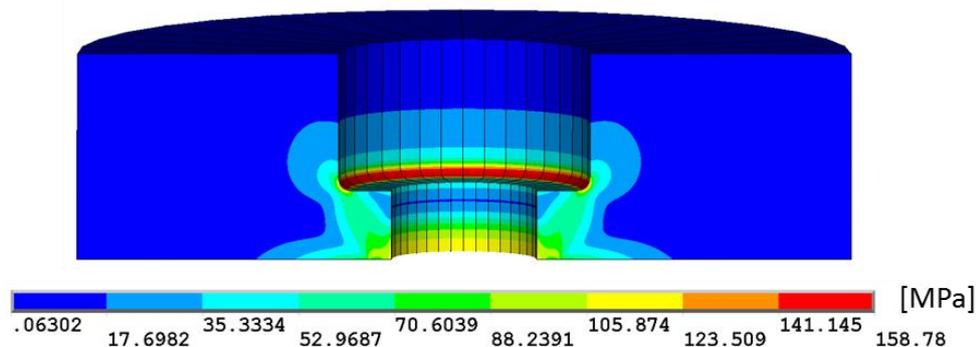
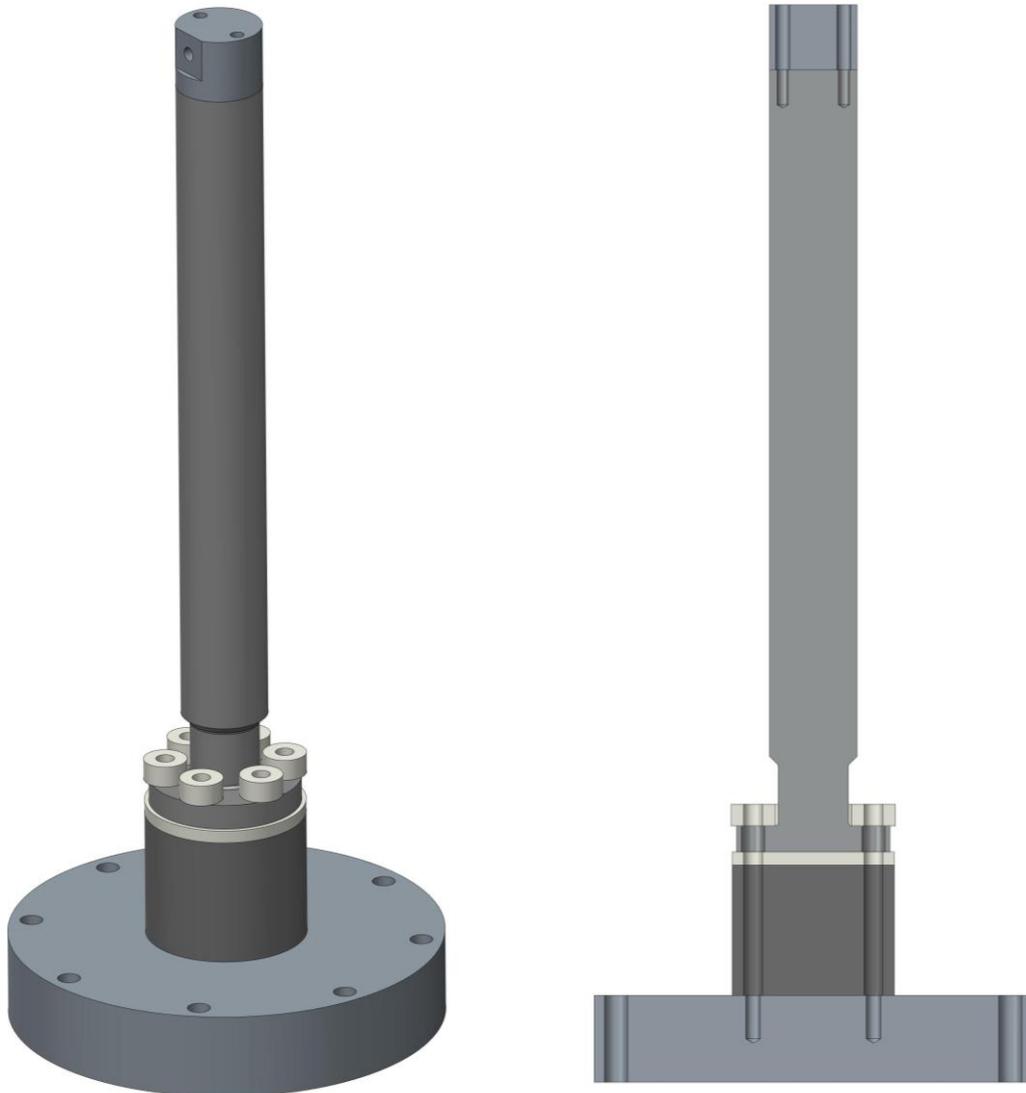


Figura 4.15 Distribuzione della tensione di Von Mises con uno spessore di 4 mm e un raggio di lamatura di 0.8 mm.

### 4.3.1 L'albero fisso

Data la disposizione verticale dell'assemblaggio, il provino verrà appoggiato sull'estremità in Tantalio dell'albero fisso. Questo è fissato alla flangia della camera mediante una flangia spessa 20 mm. Rispetto alla geometria di primo tentativo, è stato allungato l'albero centrale, così da allontanare il disco di isolante dalla zona ad alta temperatura.



*Figura 4.16 Soluzione costruttiva adottata per l'albero fisso.*

### 4.3.2 L'isolamento elettrico

Come precedentemente accennato, vista la modalità di riscaldamento del provino per effetto Joule, è necessario prevedere un isolamento elettrico per gli alberi. L'analisi termica ha evidenziato la possibilità di utilizzare, in alternativa al Macor, il Peek, polimero termoplastico semicristallino con eccellenti proprietà meccaniche e chimiche di resistenza che vengono mantenute fino a circa 250 °C. Il disco isolante dell'albero fisso viene quindi allontanato ulteriormente dal provino e progettato in Peek; l'altro disco, più vicino alla zona ad alta temperatura, sarà invece mantenuto in Macor. Non meno importante, inoltre, è il basso coefficiente d'attrito riscontrato tra l'acciaio e il PEEK in alcuni test effettuati ai Laboratori [16]. In figura viene mostrata la soluzione costruttiva adottata per permettere l'isolamento. Per favorire l'alloggiamento delle rondelle in Macor e delle viti, nell'albero centrale viene previsto uno scarico del diametro.

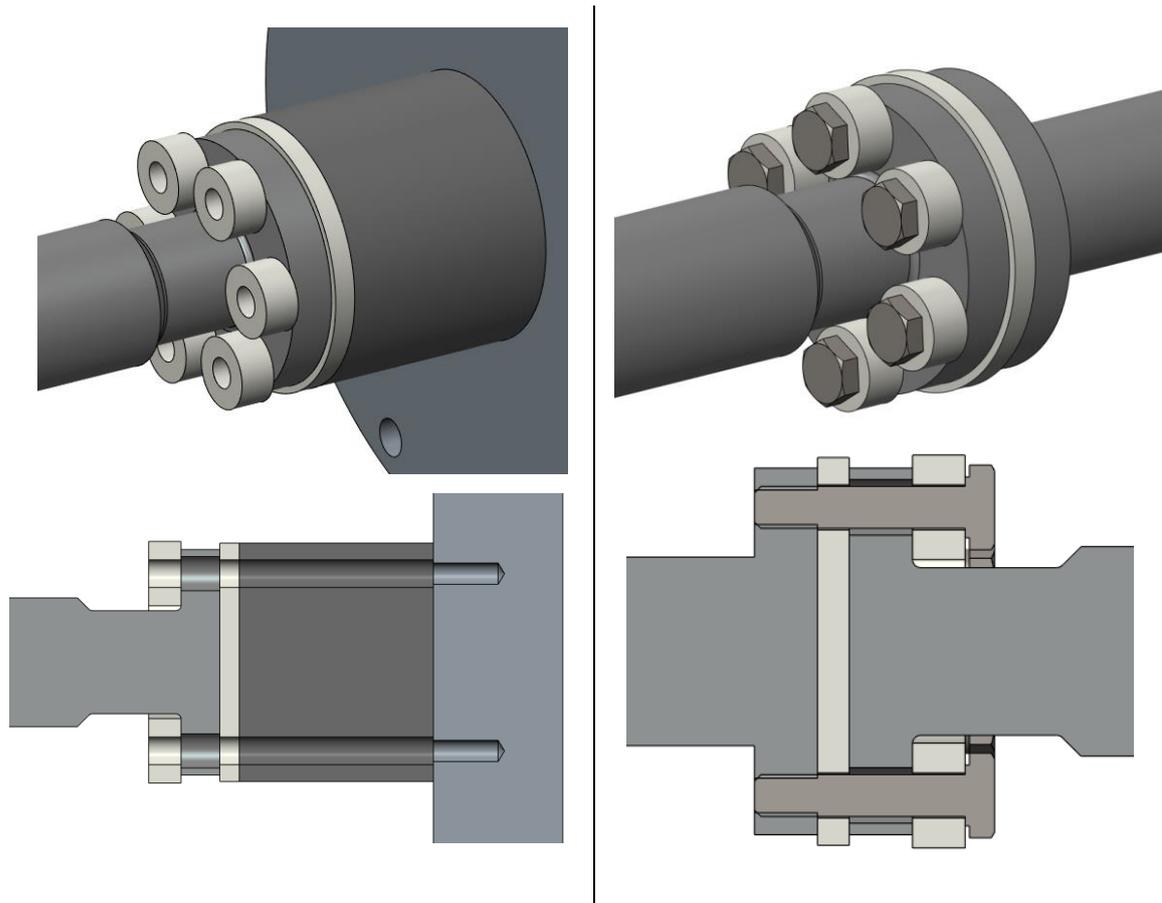


Figura 4.17 Soluzione costruttiva adottata per l'isolamento elettrico dell'albero fisso (a sinistra) e dell'albero mobile (a destra).

I dischi isolanti, così come tutti gli altri componenti, sono stati verificati a compressione imponendo una forza massima agente di 10000 N. La tensione agente risulta allora pari a

$$\sigma_{max} = \frac{F_{max}}{A} \quad (4.7)$$

In tutti i casi è stato verificato che la tensione massima fosse inferiore alla tensione di snervamento del materiale.

#### 4.4 Scelta della cella di carico

La cella di carico è il dispositivo che permette di misurare la forza di compressione durante i test sperimentali. Sono disponibili diversi trasduttori di forza, a seconda delle necessità e delle condizioni di esercizio. Le celle di carico possono essere classificate analizzando vari aspetti:

- Direzione del carico: si distinguono in questo caso celle di carico a tensione, compressione, alternate o a flessione.
- Precisione: basandosi sulla precisione, si possono avere celle ultra precise, precise, standard e a scopo generale.
- Forma del materiale elastico;
- Tenuta dell'aria;
- Forma esterna.

In particolare, nella scelta della cella di carico si è tenuto conto delle seguenti caratteristiche operative:

- Forza massima pari a 10000 N;
- Tensione di alimentazione pari a 5 V;

- Direzione di carico a trazione/compressione: per le prove sarebbe stata sufficiente una cella di carico puramente in compressione. In vista di applicazioni e sviluppi futuri, si è però preferito optare per un trasduttore operante in entrambe le direzioni di carico.
- Sensibilità di almeno 1 mV/V, per poter amplificare correttamente il segnale;
- Non è richiesta particolare resistenza alla temperatura: la cella di carico è infatti posta all'esterno della camera in vuoto;
- Montaggio per collegamento filettato;

Considerati i molteplici aspetti operativi, la scelta è ricaduta su una cella di carico della HBM, in particolare sul modello U9C-10kN. Il modello CAD del trasduttore, fornito dalla casa produttrice, è riportato in Figura 4.18



Figura 4.18 Modello CAD della cella di carico HBM U9C-10kN, scelta per le prove sperimentali.

La casa produttrice HBM fornisce il rapporto di taratura della cella di carico in trazione:

**Prüfergebnisse:**

test results / résultats d'essai

Eingangsgröße des Messbereichs [%]

input quantity / échelle d'essai

Ausgangsgröße [mV/V]

output quantity / résultats

Zug

tension / traction

0	0.0000
50	-0.5005
100	-1.0018
50	-0.5006
0	-0.0001

Figura 4.19 Rapporto di taratura in trazione fornito dall'azienda produttrice.

Dai dati di taratura è possibile ricavare una sensibilità pari a 1.0018 mV/V. Data una variazione pari a 0.001 mV in uscita alla cella di carico, è quindi possibile ottenere il corrispondente valore di forza in [N] secondo l'equazione:

$$U = U_0 \cdot c \cdot \frac{F}{F_{nom}} \quad (4.8)$$

Dove  $U$  è la tensione in uscita alla cella di carico [mV],  $U_0$  è la tensione di alimentazione pari a 5 V,  $c$  è la sensibilità [mV/V],  $F_{nom}$  è la forza nominale pari a 10000 N e  $F$  è la forza corrispondente allo sbilanciamento  $U$ , espressa in N.

Si vuole comunque verificare la taratura fornita dal produttore, vista anche la natura a compressione della prova. La taratura statica sarà eseguita applicando alla cella di carico dei valori noti, grazie alla conoscenza del peso delle masse applicate. Tramite il sistema di acquisizione, collegato al trasduttore, verranno quindi messi in relazione il valore di tensione in uscita con i carichi applicati. Questa serie di valori sarà quindi interpolata da una retta che costituirà la retta di taratura statica della cella di carico.

La cella viene fissata a due flange, come mostrato in Figura 4.20: dei dischi in rame precedentemente pesati sono quindi gradualmente caricati sulla flangia della cella di carico. Dei sostegni regolabili prevengono eventuali flessioni laterali che potrebbero danneggiare lo strumento di misura.

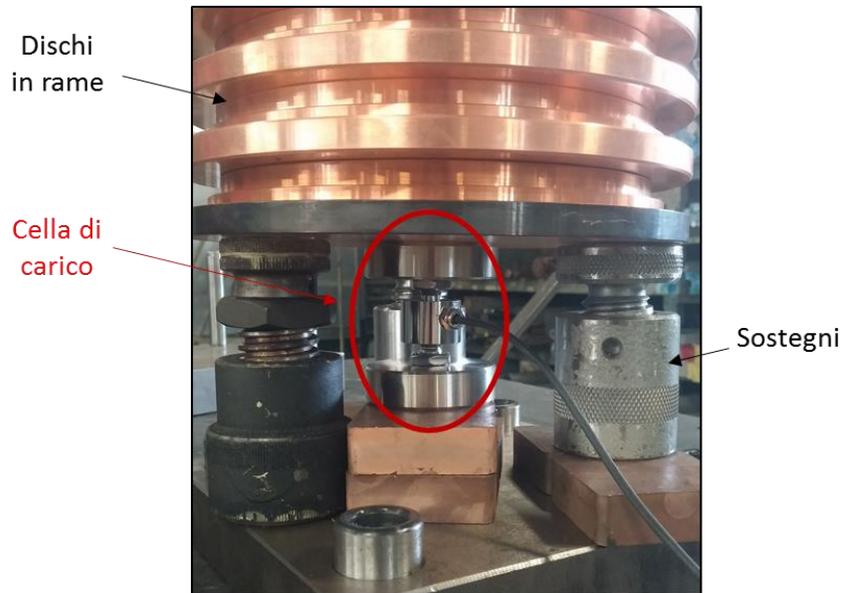


Figura 4.20 Un istante del processo di taratura della cella di carico.

Il trasduttore è collegato ad un alimentatore programmabile (Tektronik PWS4305), illustrato in Figura 4.21, che fornisce la tensione di alimentazione al ponte di Wheatstone e permette la lettura diretta della tensione di sbilanciamento del ponte.



Figura 4.21 Alimentatore programmabile Tektronik PWS4000 Series, utilizzato per le prove sperimentali.

In Tabella 4.3 vengono riportati i punti di calibrazione ottenuti imponendo gli ingressi noti ed impostando una tensione di alimentazione pari a 5 V. I dati sono quindi utilizzati per risalire alla retta di taratura (Figura 4.22).

P [kg]	$\Delta V$ [mV]
0	-0.148
5.15	-0.121
10.15	-0.096
15.15	-0.069
20.35	-0.044
25.45	-0.017
30.65	0.009
35.75	0.035
40.85	0.061
45.9	0.087
51	0.113
57	0.142
64.5	0.179
70	0.208

Tabella 4.3 Risultati del processo di taratura.

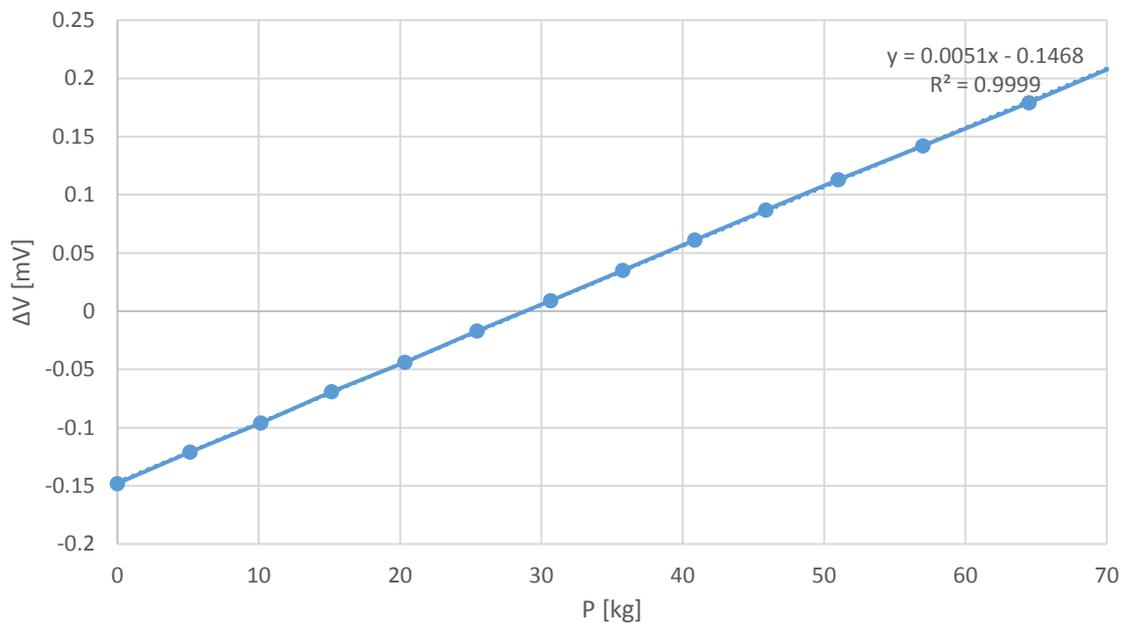


Figura 4.22 Retta di taratura della cella di carico.

L'equazione della retta di taratura permette di ricavare una sensibilità pari a 1.0049 mV/V. La differenza rispetto al valore fornito dall'HBM è imputabile all'incertezza di misura delle masse imposte come input nel processo di taratura. Per le prove sperimentali verrà quindi considerata una sensibilità pari a 1.0018 mV/V.

## 4.5 L'assemblaggio finale

Per prima cosa sui puntali del *plate* vengono fissati i morsetti in rame, e su questi le lamine in tantalio (Figura 4.23).

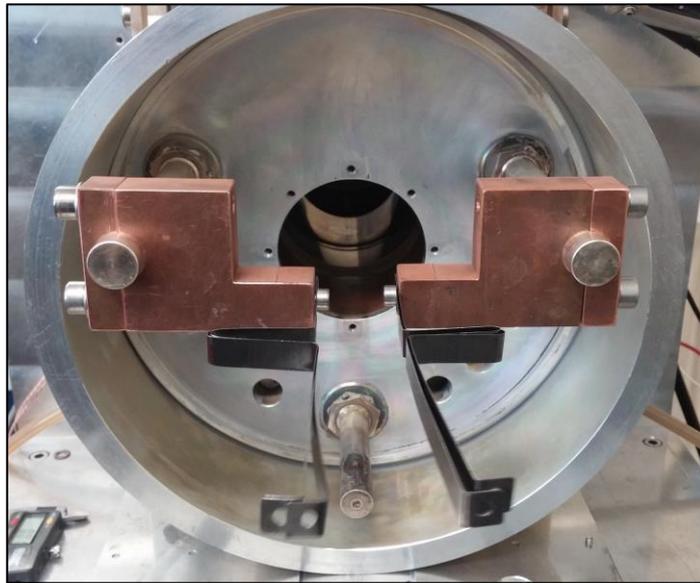


Figura 4.23 Montaggio dei morsetti in rame e delle lamine in tantalio.

Le due flange vengono montate sulla camera in alluminio e si procede con il fissaggio degli alberi ai rispettivi assiemi di montaggio. La cella di carico viene collegata alla movimentazione per il trasferimento del carico e fissata alla relativa flangia. La camera è posta su un banco di sostegno (Figura 4.24): per permettere lo sviluppo verticale dell'assemblaggio, una giunzione in alluminio è posta tra la camera e il *plate*. Un'ulteriore giunzione con finestra è frapposta tra la camera e la *cover*. Come verrà presentato al prossimo capitolo, la presenza della finestra permetterà le misure di temperatura dei provini mediante un pirometro.

La tenuta di tutti i componenti è garantita dal vuoto, che raggiunge l'ordine dei  $10^{-5}$  mbar.

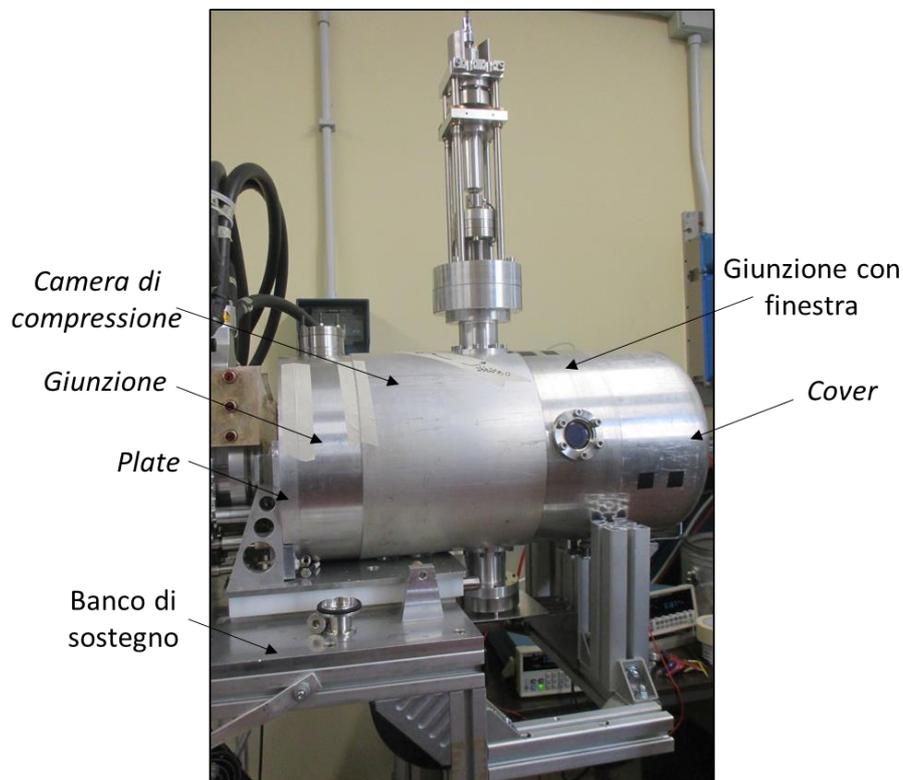
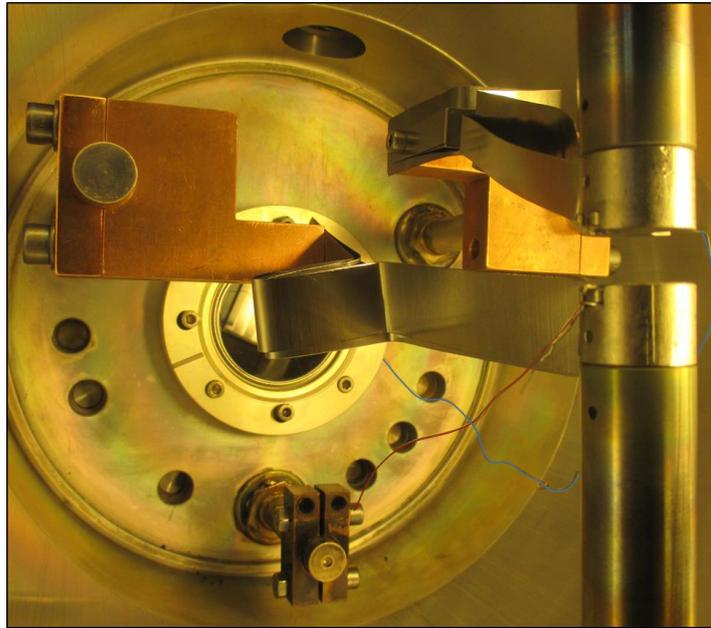


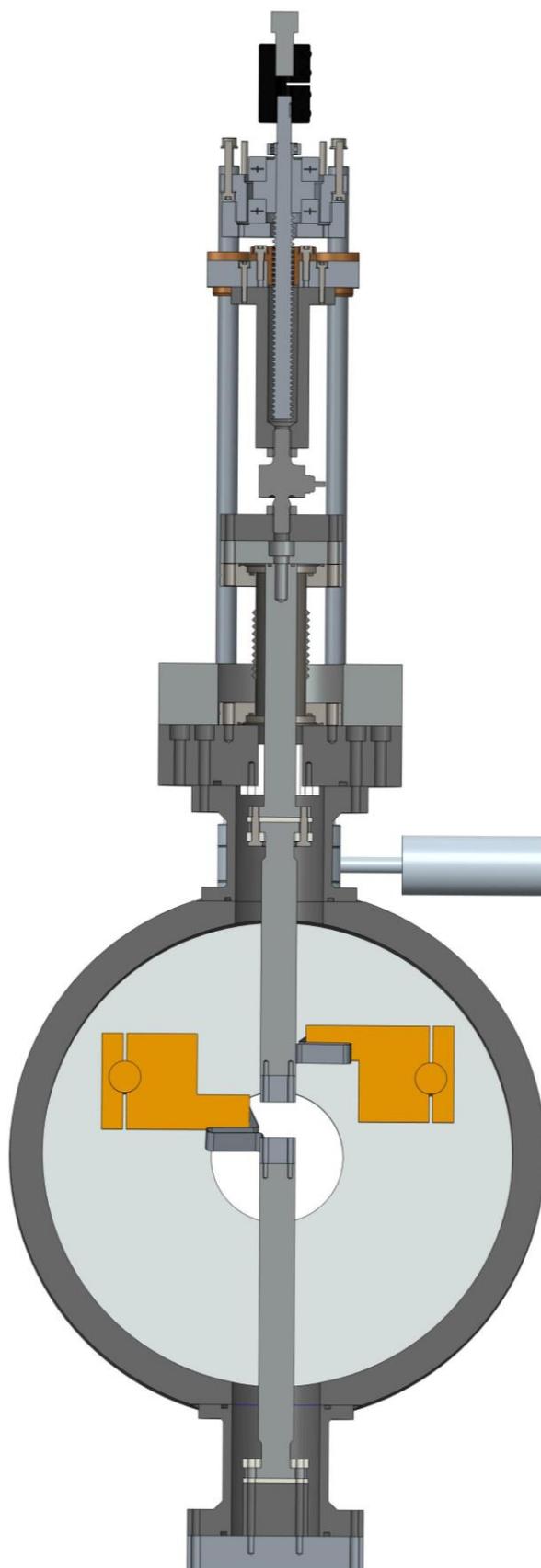
Figura 4.24 Assemblaggio finale.

Una volta allineata la camera, si procede con il fissaggio delle lamine alle estremità in tantalio. Per misurare il potenziale ai capi del provino, due fili in Molibdeno con diametro pari a 0.5 mm vengono collegati alle estremità degli alberi. Uno dei due sarà quindi fissato al puntale inferiore, mentre l'altro verrà fatto passare attraverso l'apertura presente sul plate. In Figura 4.25 sono evidenziati i due fili in Molibdeno.



*Figura 4.25 Fissaggio dei fili in Molibdeno per la lettura del potenziale ai capi del provino.*

In Figura 4.26 è riportato il modello CAD dell'assieme completo di montaggio.



*Figura 4.26 Sezione dell'assemblaggio della camera di compressione.*



# CAPITOLO 5

## Test sperimentali di compressione di provini in grafite

### 5.1 Introduzione

Il setup progettato al capitolo precedente presenta l'enorme vantaggio di poter eseguire le prove anche a temperature elevate. La possibilità di raggiungere un vuoto dell'ordine di  $10^{-5}$  mbar elimina infatti il problema dell'ossidazione della grafite intorno ai 400°C. Come già accennato, la grafite dovrebbe aumentare la propria resistenza meccanica all'aumentare della temperatura fino a circa 2500°C. Con questa campagna di prove sperimentali si vuole verificare il comportamento a compressione della grafite POCO EDM-3, utilizzata per la progettazione della Faraday Cup. Oltre alla temperatura si prendono in considerazione altri parametri in grado di influenzare la resistenza del materiale. L'azienda produttrice, ad esempio, fornisce differenti valori di resistenza al variare della densità. Particolare attenzione richiede inoltre la definizione della geometria del provino. Infatti fin dall'inizio del secolo scorso sono state adottate forme differenti, al fine di definire la geometria più idonea. Un provino cilindrico con rapporto altezza/diametro pari a uno è fortemente influenzato dall'attrito nella superficie di contatto con i punzoni della macchina. A causa dell'effetto Poisson infatti, nella zona di attrito tra punzone e provino, gli sforzi aumentano a causa del contrasto tra la libertà di deformazione della sezione centrale e la limitazione delle estremità. Questi sforzi sono però trascurabili nel caso di provini molto snelli: passando ad un provino con rapporto altezza/diametro pari a due, dovrebbe essere garantita una rottura lontana dalla zona di contatto. Molti provini di questo tipo, però, hanno la tendenza a rompersi proprio alle estremità, rendendo difficile la determinazione dell'effettivo valore di resistenza. In particolare si è visto come, nella maggior parte dei provini cilindrici, il pattern di rottura segua un andamento a clessidra a causa degli sforzi di taglio. Come già suggerito da alcuni studi presenti in letteratura, un provino con una geometria a clessidra potrebbe risolvere i problemi sopracitati, ovvero potrebbe portare ad una rottura indipendente dalle condizioni di contatto [17].

Le prove sperimentali verranno effettuate con varie geometrie, sia cilindriche che a clessidra, così da individuare la più idonea. Attraverso analisi termo-elettriche con il codice di calcolo agli Elementi Finiti ANSYS, inoltre, verrà valutata la distribuzione di temperatura nei provini. Le prove, inizialmente avranno come obiettivo la valutazione di alcuni fattori che potrebbero essere in grado di influenzare i risultati:

- Forma del provino
- Densità del materiale
- Superfici di contatto con materiale interposto (SiC, grafite, Tungsteno)

Infine si andrà a valutare l'andamento della tensione di compressione all'aumentare della temperatura, con prove eseguite a temperatura ambiente, a 1000°C e a 2000°C.

### 5.2 Geometria del provino

Come introdotto al paragrafo precedente, particolare attenzione è rivolta alla geometria del provino. Secondo la normativa ASTM C695-15, i provini di grafite dovrebbero presentare una geometria cilindrica, con un rapporto tra altezza e diametro pari a due. Inoltre un provino cilindrico garantirebbe maggiore uniformità nella distribuzione di temperatura. Si hanno però forze in gioco più elevate e il provino deve essere ben dimensionato per evitare problemi di instabilità dovuti al carico di punta.

I provini a clessidra presentano numerosi vantaggi. Innanzitutto la rottura avviene in prossimità della sezione ridotta. Si limita in questo modo l'influenza degli effetti di bordo, come l'attrito con la superficie del punzone [17]. La geometria permette inoltre di raggiungere temperatura più elevate a parità di corrente, sebbene la distribuzione sia meno uniforme rispetto al provino cilindrico. Tuttavia la forma a clessidra introduce dei problemi di triassialità delle tensioni: si andrà quindi a valutare il carico di rottura con il criterio di Von Mises.

In letteratura sono presenti vari studi per individuare la geometria più idonea per i test di compressione, sebbene riguardino altri tipi di materiali. Lankford (1982) ha eseguito prove di compressione monoassiali con provini

di Allumina e Carburo di Silicio a varie tensioni e temperature. In questi test sono stati utilizzati provini cilindrici con facce perfettamente parallele e lucidate. Dischi sottili di acciaio ad alta resistenza sono stati posti tra il provino e i punzoni per ridurre l'effetto di barreling. Il barreling indica una deformazione maggiore delle sezioni più lontane dai punti di applicazione dello sforzo. La deformazione non uniforme è dovuta proprio all'attrito sulla superficie di applicazione del carico [18]. Dunlay (1989) ha eseguito prove di compressione quasi statiche su tipi differenti di materiali ceramici. In particolare sono stati utilizzati due tipi di carburo di silicio. Per migliorare il test sono stati utilizzati due punzoni in carburo di tungsteno, caratterizzato da elevata resistenza a compressione (-4.5 GPa). Sono state imposte inoltre severe condizioni di parallelismo e tolleranze di allineamento. I provini a clessidra, caratterizzati da una sezione ridotta, hanno permesso di aumentare il rapporto tra tensione di compressione e gli sforzi di trazione radiali e circonferenziali. Anche Cosculluela (1992) ha testato varie tipologie di provini. Sono stati compressi provini di allumina con punzoni in carburo di tungsteno. Dai risultati è emersa una resistenza a compressione inferiore nel caso di provini cilindrici rispetto a quella ottenuta in caso di provini a clessidra [19]. Per riassumere, sembra che le precauzioni prese per l'interfaccia tra provino e punzone abbiano una significativa influenza sulla resistenza a compressione ricavata. La geometria a clessidra, quindi, aumentando il rapporto tra la massima forza assiale di compressione e gli sforzi di trazione radiali e circonferenziali, permette di ridurre l'influenza della zona di contatto.

Alla luce di ciò verranno considerati in questo lavoro differenti tipologie di provini. Sono testate sia geometrie cilindriche che a clessidra. Al fine di definire i parametri geometrici, vengono implementate delle simulazioni termo-elettriche con il codice di calcolo agli Elementi Finiti ANSYS. In particolare si vuole valutare la distribuzione di temperatura lungo il provino. Le misure di temperatura durante le prove saranno infatti affidate ad un pirometro. Questo strumento necessita di una zona con temperatura uniforme di circa 3 mm per poter fornire una misura corretta. A titolo d'esempio, vengono di seguito riportati i risultati delle simulazioni per un provino a clessidra e uno cilindrico. In entrambi i casi si è imposta una corrente pari a 150 A.

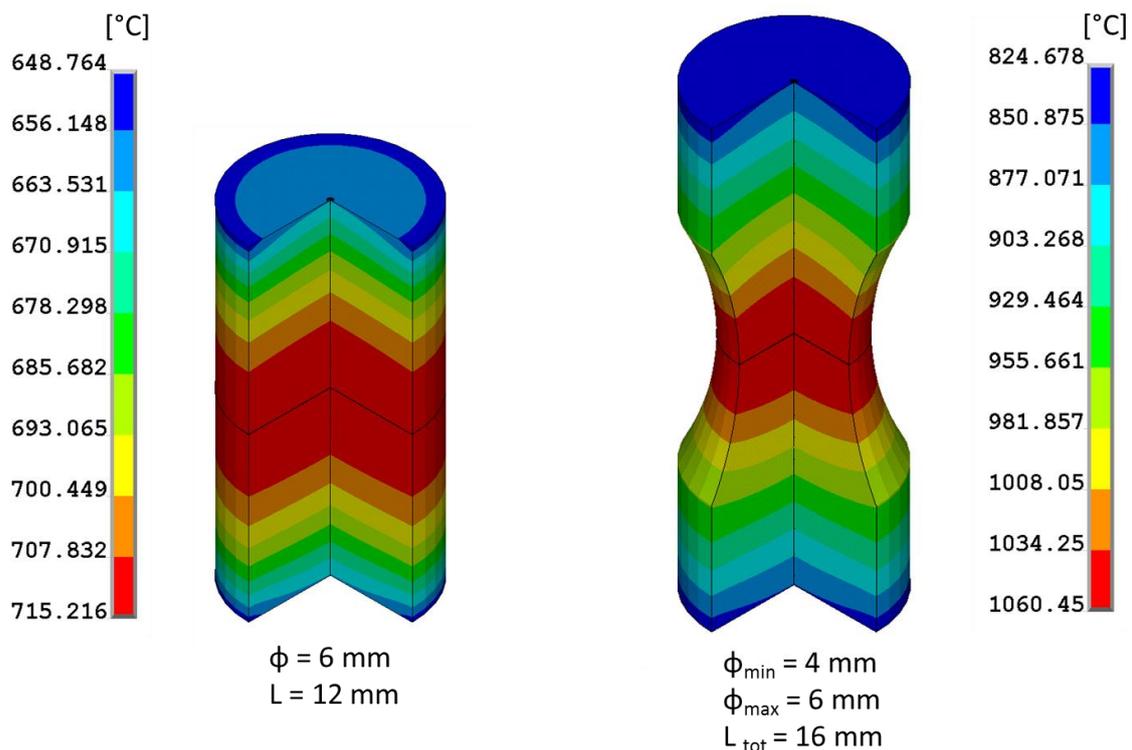


Figura 5.1 Distribuzione di temperatura per due differenti geometrie di provini, imponendo una corrente di 150 A.

Come è possibile notare dai risultati, il provino a clessidra presenta i valori di temperatura maggiori. Le simulazioni confermano inoltre la maggiore uniformità di temperatura tipica dei provini cilindrici. Assimilate queste informazioni, sono stati variati i parametri geometrici al fine di ottenere il giusto compromesso tra temperature elevate ma sufficientemente uniformi per permettere la misura con il pirometro. Queste analisi hanno inoltre permesso di valutare la temperatura raggiunta dalle estremità in tantalio e dagli alberi in acciaio. Per garantire l'integrità strutturale dei componenti, infatti, si considera come temperatura massima per il tantalio 2000°C e per l'acciaio AISI316 1100°C. In Figura 5.2 è riportata l'analisi termica imponendo una

corrente pari a 250 A. Verosimilmente durante le prove sperimentali non si supererà di molto questo amperaggio.

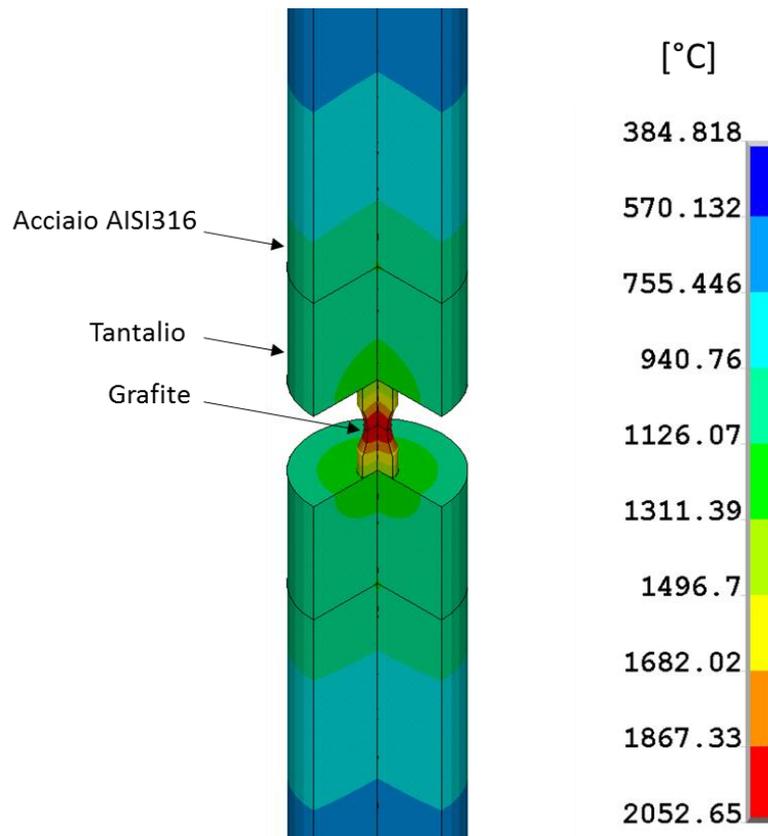


Figura 5.2 Valutazione delle temperature raggiunte dagli alberi in acciaio e le estremità in tantalio con una corrente pari a 250 A.

Un altro aspetto da considerare riguarda la stabilità flessionale del provino: l'esperienza mostra che quando un corpo solido è molto lungo rispetto alla sua sezione trasversale, se viene caricato a compressione può manifestare la tendenza a flettersi. In questo caso, per valutare la stabilità a compressione, verranno utilizzate le equazioni di Eulero. Il carico critico che non deve essere superato per evitare la flessione laterale è definito come:

$$P = \frac{EJ\pi^2}{l^2} \quad (5.1)$$

Dove P è il carico critico [N], E è il modulo di elasticità [MPa], J è il momento d'inerzia [mm<sup>4</sup>], ed l la lunghezza libera di inflessione dipendente dai vincoli (Figura 5.3). Il provino viene semplicemente appoggiato sulla superficie del punzone e non è previsto alcun sistema di afferraggio. Si considera quindi una lunghezza di inflessione l uguale alla lunghezza totale del provino (schema di vincolo B in Figura 5.3).

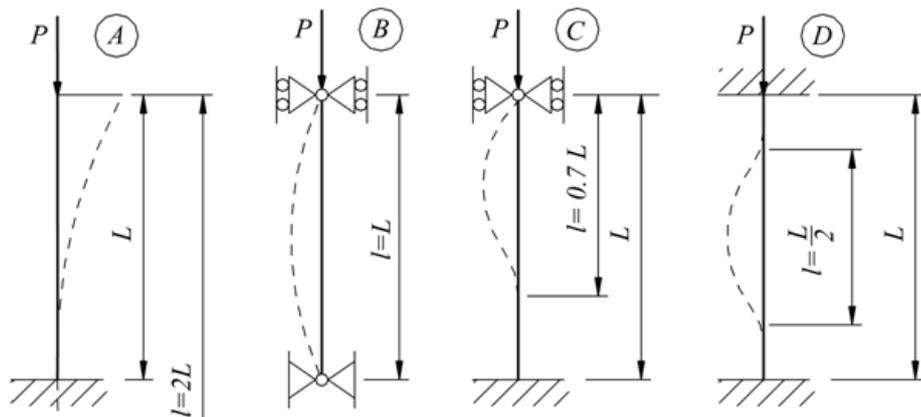
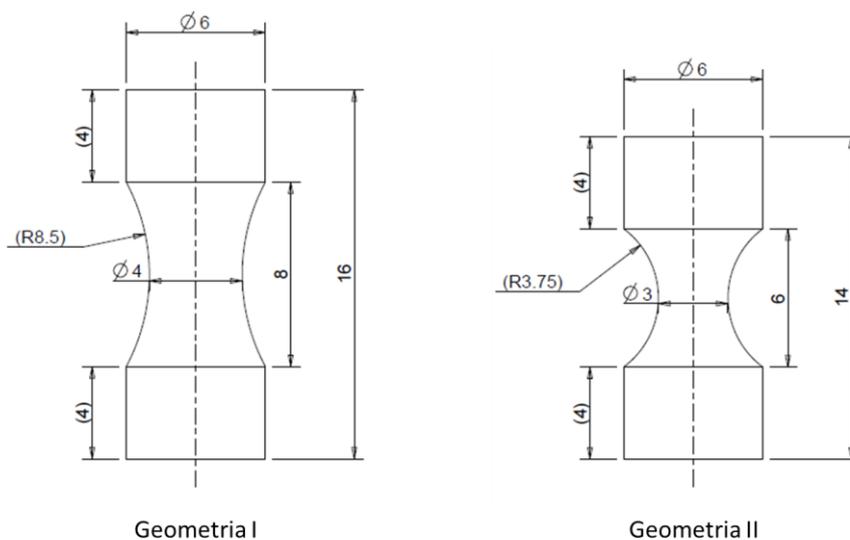


Figura 5.3 Possibili schemi di vincolo e relativa lunghezza libero di inflessione  $l$  [20].

Al variare dei parametri geometrici, è necessario verificare che il carico agente non superi il carico critico di inflessione.

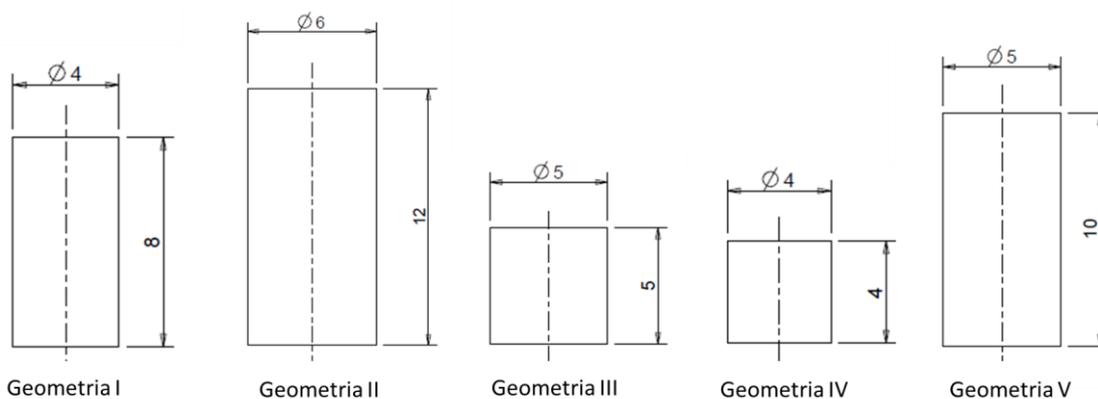
Vengono di seguito proposte le varie geometrie di provino scelte al termine delle analisi termoelettriche e delle considerazioni sulla stabilità flessionale. In Figura 5.4 sono riportati i provini a clessidra mentre in Figura 5.5 quelli cilindrici.



Geometria I

Geometria II

Figura 5.4 Geometrie adottate per i provini a clessidra.



Geometria I

Geometria II

Geometria III

Geometria IV

Geometria V

Figura 5.5 Geometrie adottate per i provini cilindrici.

### 5.3 Densità e temperatura

Come molte altre proprietà della grafite, la resistenza a compressione dipende dalla densità del materiale. Maggiore è la densità, maggiore sarà il carico che porta a rottura. La relazione specifica tra densità e resistenza a compressione per la grafite della POCO è riportata in Figura 5.6.

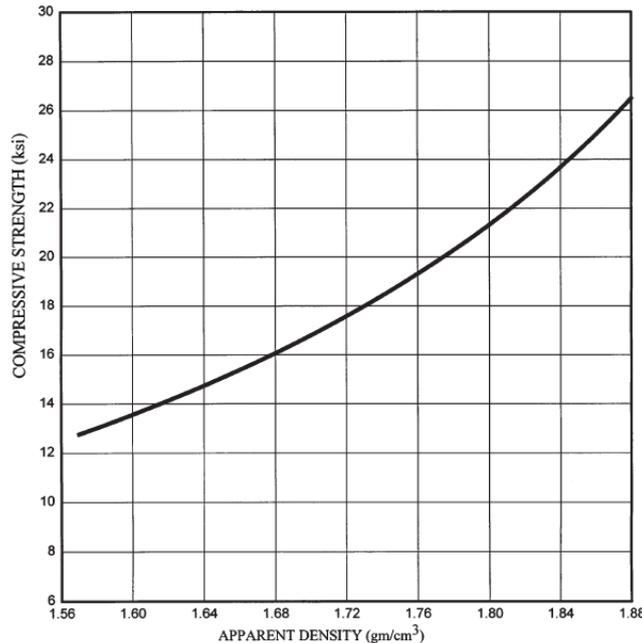


Figura 5.6 Resistenza a compressione per la grafite POCO EDM, al variare della densità [9]. Si ricorda che  $1 \text{ ksi} \approx 6.9 \text{ MPa}$ .

Per la realizzazione dei provini si sono utilizzati due lotti differenti. Il primo è lavorato a barre con un diametro di 10 mm e una lunghezza di 30 mm. Il secondo lotto è invece lavorato a piastre rettangolari, spesse 15 mm, di larghezza 30 mm e altezza 20 mm.

La densità del materiale è calcolata come rapporto tra la sua massa e il suo volume, secondo l'equazione:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (5.2)$$

Si considera un campione per ogni lotto: di seguito sono riportati i dati ottenuti.

	Volume [cm³]	Massa [g]	Densità [g/cm³]
Lotto 1 (barre)	1.468	2.463	1.677
Lotto 2 (piastre)	18.705	32.223	1.723

Tabella 5.1 Risultati delle misurazioni di densità per i due lotti di materiale utilizzati per i provini.

Si osservi come le misure abbiano il solo scopo di individuare il lotto con la densità maggiore, al fine di confermare la relazione con la resistenza a compressione. Risulta una densità maggiore per il lotto 2: si prevedono quindi valori di resistenza maggiori.

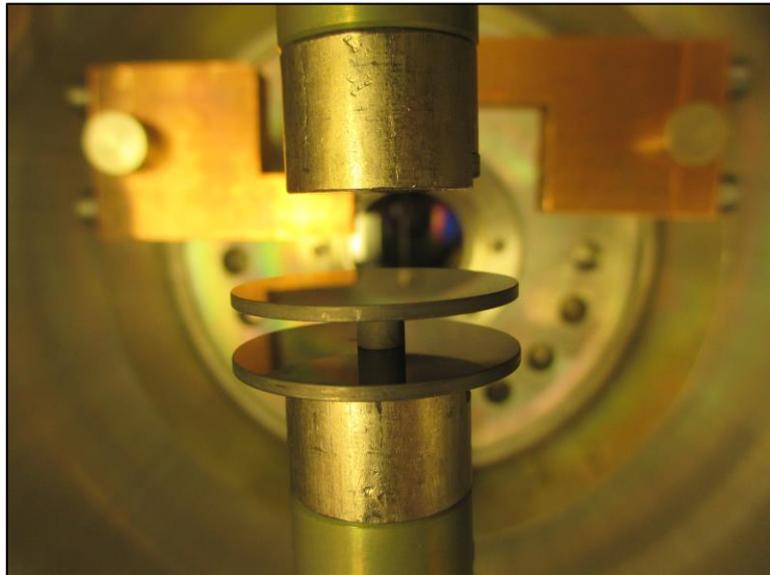
Come precedentemente introdotto, un altro parametro che influenza fortemente la resistenza a compressione della grafite è la temperatura. Con l'aumento della temperatura ci si aspetta infatti un aumento della resistenza fino a circa 2500°C. Questo comportamento è particolarmente importante per tutte quelle applicazioni dove il materiale è soggetto sia ad alte temperature che ad elevate tensioni. A seconda del tipo di grafite, il valore di resistenza a 2500°C sarà tra il 15% e il 50% maggiore rispetto a quello che si ottiene a temperatura ambiente [9]. Le prove sperimentali verranno quindi svolte a varie temperature, al fine di confermare questo comportamento. In particolare si lavorerà a temperatura ambiente, a 1000°C e a 2000°C. Compatibilmente con l'attrezzatura a disposizione, si proverà inoltre a raggiungere i 2500°C.

## 5.4 Superfici di contatto

Come visto al paragrafo 5.2, l'attrito nella zona di contatto ricopre un ruolo molto importante in una prova di compressione. Sono previste inoltre elevate temperature di funzionamento: un deterioramento delle estremità in tantalio potrebbe quindi aver luogo. Per questi motivi alcune prove verranno eseguite frapponendo dei dischi di diverso materiale tra il provino e il punzone. Vengono utilizzati dischi in:

- Carburo di Silicio
- Grafite
- Tungsteno

I dischi in Carburo di Silicio (Figura 5.7), molto resistenti sia per le geometrie cilindriche che a clessidra, non possono essere utilizzati per le prove ad elevate temperature in quanto l'elevata resistività elettrica del materiale rende infatti impossibile il riscaldamento del provino per effetto Joule.



*Figura 5.7 Dischi in Carburo di Silicio, utilizzati per i test a temperatura ambiente.*

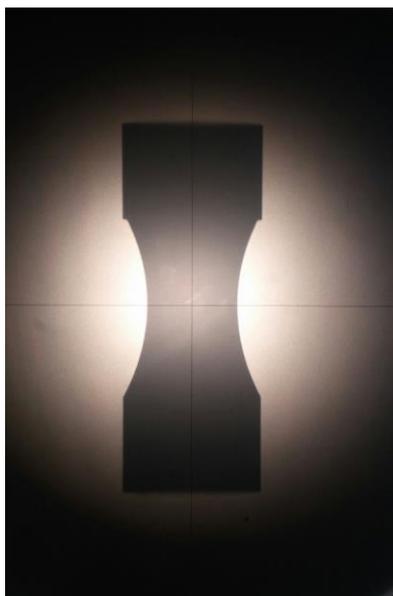
I dischi in grafite non presentano problemi di resistività e sono quindi adatti ai test alle alte temperature. Di contro, non sono adatti a provini cilindrici: potrebbero infatti rompersi prima del provino.

I dischi in tungsteno sembrerebbero risolvere entrambi i problemi, ma sono difficilmente lavorabili. Sono comunque necessari ulteriori test per una valutazione definitiva.

Con i dati ricavati dalla campagna prove, si cercherà di valutare l'eventuale influenza del materiale dei dischi sulla resistenza a compressione della grafite.

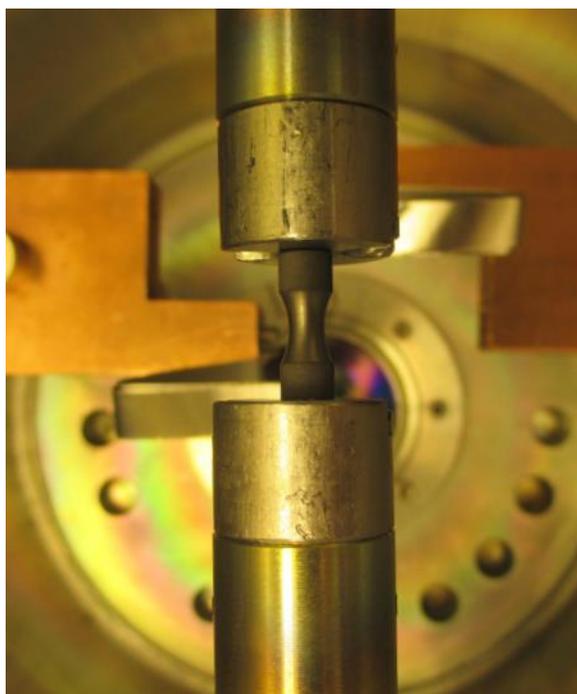
## 5.5 Test sperimentali

Una volta definite le geometrie, i provini vengono ricavati dai due lotti a disposizione attraverso una lavorazione al tornio. Prima di iniziare le prove, ciascun campione viene misurato accuratamente con l'ausilio di un profilometro ottico (Figura 5.8).



*Figura 5.8 Immagine del provino ottenuta al profilometro con un ingrandimento 20x.*

Il provino viene quindi posizionato all'interno della camera, appoggiato all'estremità in tantalio dell'albero fisso o, se previsti, ai dischi in diverso materiale sopra citati.



*Figura 5.9 Posizionamento del provino all'inizio della prova.*

La camera di compressione è quindi chiusa con la *cover* e viene accesa la pompa rotativa. Una volta raggiunto un livello di vuoto pari a circa  $10^{-2}$  mbar, viene fatta partire la pompa turbomolecolare, in grado di portare il vuoto fino a circa  $10^{-5}$  mbar. Prima di iniziare il riscaldamento è necessario imprimere al provino una minima compressione, di circa 20 MPa sulla sezione netta. Questa leggera pressione permette infatti di diminuire la resistenza elettrica delle superfici del provino e facilitare il passaggio di corrente.

A questo punto vengono accesi gli alimentatori ed è possibile iniziare a somministrare la potenza riscaldante desiderata, in modo lento e graduale. Un pirometro ad infrarossi, allineato alla finestra d'osservazione, permette di monitorare la temperatura del provino durante la prova. La costituzione basilare di un sensore di tal tipo è realizzata da una lente che direziona l'energia infrarossa su un ricevitore la cui funzione è di convertire l'energia infrarossa in un segnale elettrico. Tale segnale viene visualizzato in termini di temperatura. Questa configurazione permette la misura della temperatura a distanza senza contatto con l'oggetto da misurare

[21]. Per ottenere una misurazione corretta, il puntatore del pirometro deve essere focalizzato sulla sezione ristretta, come rappresentato in figura.

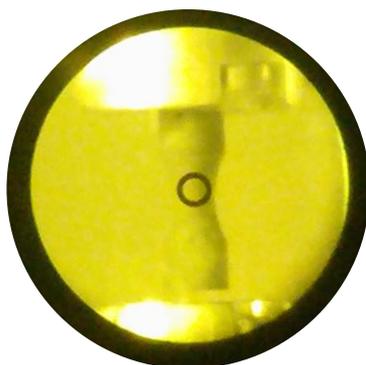


Figura 5.10 Puntamento del pirometro sulla sezione ristretta del provino.

Una volta raggiunta la temperatura desiderata e mantenuto il provino in questa condizione per qualche minuto, come suggerito da normativa, è possibile cominciare ad imporre una compressione lenta e graduale fino a rottura. Il valore di tensione della cella di carico permetterà di risalire alla tensione di rottura a compressione.

Particolare attenzione deve però essere posta alla forma a clessidra, a causa degli effetti di triassialità degli sforzi precedentemente accennati. Per calcolare il valore di tensione che ha portato a rottura i provini è quindi necessario implementare delle analisi strutturali in ambiente ANSYS, al fine di valutare il grado di concentrazione degli sforzi. Le formule tipicamente utilizzate per il calcolo della tensione sono infatti valide per componenti con sezione costante. La presenza di una sezione ridotta comporta una variazione della semplice distribuzione degli sforzi mostrata in Figura 5.11.

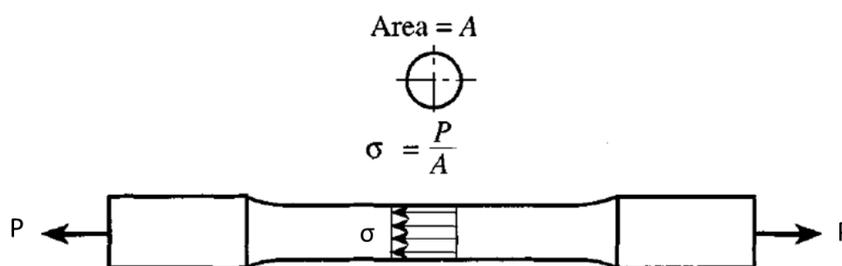


Figura 5.11 Distribuzione di tensione elementare per un provino con sezione costante o variazione graduale della sezione [22].

Nel provino a clessidra si avrà allora una diversa distribuzione di tensione, con una concentrazione degli sforzi localizzata alla sezione ridotta e misurata dal fattore di concentrazione degli sforzi,  $K_t$ , secondo l'equazione:

$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nom}} \quad (5.3)$$

Dove  $\sigma_{max}$  rappresenta la massima tensione nel provino caricato e  $\sigma_{nom}$  è la tensione nominale di riferimento.

In ANSYS viene quindi implementata un'analisi strutturale, sfruttando le simmetrie del provino. Dopo aver imposto i vincoli di simmetria, all'estremità superiore viene bloccato lo spostamento orizzontale e si impone il parallelismo tra i nodi. Come carico si considera una pressione pari a 1 MPa. In Figura 5.12 vengono rappresentati i vincoli utilizzati per l'analisi strutturale e i relativi risultati in termini di tensione di Von Mises per la geometria a clessidra I. Si osservi come l'assialsimmetria sia già imposta nelle opzioni dell'elemento strutturale utilizzato per l'analisi.

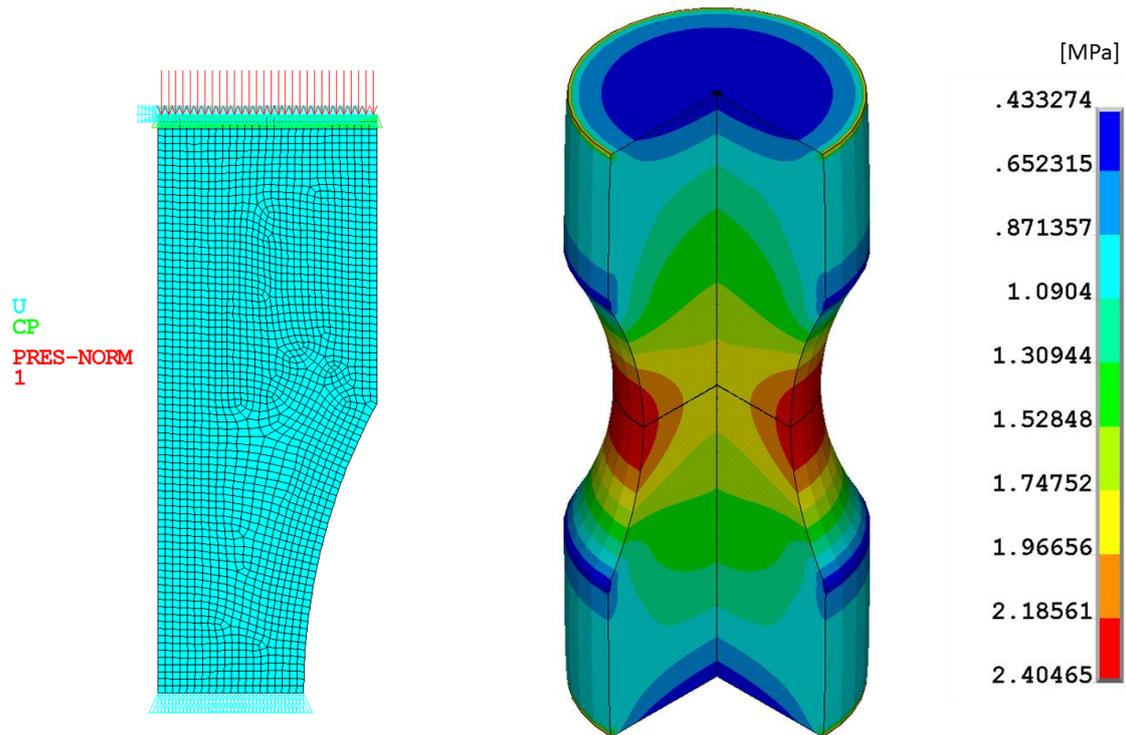


Figura 5.12 Vincoli imposti nella simulazione strutturale per il calcolo del  $K_t$  (a sinistra) e distribuzione della tensione di Von Mises (a destra) per la geometria a clessidra I.

Si ricava in questo modo un  $K_t$  pari a:

$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nom}} = \frac{2.40465}{2.25} = 1.069 \quad (5.4)$$

Ripetendo la simulazione anche per la seconda geometria a clessidra si otterrà un  $K_t$  pari a:

$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nom}} = \frac{4.45561}{4} = 1.114 \quad (5.5)$$

Alla luce di queste considerazioni, per facilitare la raccolta dei valori di rottura a compressione, viene utilizzata una maschera dati come quella rappresentata in Figura 5.13.

Provino	<u>a CLESSIDRA</u>	→	GEOMETRIA	<u>I (d4_l8)</u>																														
Provino n°	<u>9</u>		<table border="1"> <tr> <td>d= 4.0 mm</td> <td>D= 6.00 mm</td> </tr> <tr> <td>l= 7.74 mm</td> <td>L= 16.01 mm</td> </tr> </table>	d= 4.0 mm	D= 6.00 mm	l= 7.74 mm	L= 16.01 mm	lotto D4M673760 Ø5C772379																										
d= 4.0 mm	D= 6.00 mm																																	
l= 7.74 mm	L= 16.01 mm																																	
A=πd <sup>2</sup> /4= <u>12.56 mm<sup>2</sup></u>																																		
0,001 mV= 1.996 N → σ <sub>nom</sub> = F/A = 1.966/12.56 = 0.159 MPa																																		
σ <sub>max</sub> = K <sub>t</sub> * σ <sub>nom</sub> = 1,069 * 0.159 MPa 0.169 MPa																																		
→ <u>ROTTURA IN TEMPERATURA A 1000°C</u>																																		
zero in <u>vuoto</u> = -0.186 mV																																		
20 MPa	=	-0.067 mV	Precarico di partenza																															
50 MPa	=	0.110 mV	Valore da non superare																															
<table border="1"> <thead> <tr> <th>I [A]</th> <th>V [V]</th> <th>T [°C]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>10</td><td>0.4</td><td></td></tr> <tr><td>20</td><td>0.8</td><td></td></tr> <tr><td>40</td><td>1.45</td><td></td></tr> <tr><td>60</td><td>1.93</td><td></td></tr> <tr><td>80</td><td>2.4</td><td></td></tr> <tr><td>100</td><td>3.55</td><td></td></tr> <tr><td>110</td><td>3.97</td><td>857</td></tr> <tr><td>120</td><td>4.29</td><td>936</td></tr> <tr><td>134</td><td>4.7</td><td>1000</td></tr> </tbody> </table>					I [A]	V [V]	T [°C]	10	0.4		20	0.8		40	1.45		60	1.93		80	2.4		100	3.55		110	3.97	857	120	4.29	936	134	4.7	1000
I [A]	V [V]	T [°C]																																
10	0.4																																	
20	0.8																																	
40	1.45																																	
60	1.93																																	
80	2.4																																	
100	3.55																																	
110	3.97	857																																
120	4.29	936																																
134	4.7	1000																																
<table border="1"> <tr> <td>Rottura a</td> <td>F = 2210 N</td> </tr> <tr> <td>0.921 mV</td> <td>σ = 188.1 MPa</td> </tr> </table>					Rottura a	F = 2210 N	0.921 mV	σ = 188.1 MPa																										
Rottura a	F = 2210 N																																	
0.921 mV	σ = 188.1 MPa																																	

Figura 5.13 Maschera utilizzata per la raccolta dati durante le prove.

Noto il valore di tensione alla rottura, la forza viene calcolata invertendo l'equazione di sbilanciamento della cella di carico (4.8). Risulta allora:

$$F_r = \frac{U}{U_0 \cdot c} \cdot F_{nom} \quad (5.6)$$

Dove  $F_r$  è la forza che ha portato a rottura il provino [N],  $U$  è la tensione di sbilanciamento della cella di carico [mV],  $U_0$  è la tensione di alimentazione [V],  $c$  è la sensibilità [mV/V], e  $F_{nom}$  è la forza nominale del trasduttore, pari a 10000 N.

A questo punto la tensione di compressione può essere calcolata tenendo conto del fattore di concentrazione degli sforzi secondo l'equazione:

$$\sigma_r = \sigma_{nom} \cdot K_t = \frac{F_r}{A} \cdot K_t \quad (5.7)$$

Dove  $\sigma_r$  è la tensione di compressione che ha portato a rottura [MPa],  $\sigma_{nom}$  è la tensione nominale [MPa],  $K_t$  è il fattore di concentrazione degli sforzi,  $F_r$  la forza che ha portato a rottura [N], e  $A$  la sezione ristretta del provino [mm<sup>2</sup>].

## 5.6 Risultati

In Tabella 5.2 sono riportati i dati raccolti durante i test sperimentali, in ordine di esecuzione. Si ricorda che al valore di tensione letto alla cella di carico al momento della rottura, è necessario sommare il valore corrispondente allo zero di inizio prova. Il valore cambia a seconda che la prova sia svolta in aria o in vuoto. In particolare si avrà:

- Zero in aria: -0.146 mV
- Zero in vuoto: -0.186 mV

N°	lotto	Dati Geometrici			Dati di rottura						
		Forma	Geom	Provino	Temperatura [°C]	Tensione [mV]	Forza [N]	d [mm]	A [mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_R$ [MPa]	Superfici di contatto
1	1	Clessidra	I	1	T <sub>amb</sub>	0.680	1649.0	4	12.57	140.3	Tantalo
2	1	Clessidra	II	1	T <sub>amb</sub>	0.430	1149.9	3.3	8.55	147.9	Tantalo
3	1	Cilindrico	I	1	T <sub>amb</sub>	0.521	1331.6	3.99	12.50	106.5	Tantalo
4	1	Cilindrico	II	1	T <sub>amb</sub>	1.303	2892.8	6	28.27	102.3	Tantalo
5	1	Cilindrico	II	2	T <sub>amb</sub>	1.360	3006.6	5.98	28.09	107.0	Tantalo
6	1	Cilindrico	II	3	1000	1.262	2890.8	5.95	27.81	104.0	Tantalo
7	1	Clessidra	I	2	T <sub>amb</sub>	0.660	1609.1	3.99	12.49	137.7	Tantalo
8	1	Clessidra	I	3	1000	0.744	1856.7	3.97	12.38	160.3	Tantalo
9	1	Clessidra	I	4	1000	0.783	1934.5	4	12.57	164.6	Tantalo
10	1	Clessidra	I	5	2000	0.796	1960.5	3.95	12.25	171.0	Tantalo
11	1	Clessidra	I	6	2000	0.787	1942.5	3.92	12.10	171.6	Tantalo
12	2	Clessidra	I	7	T <sub>amb</sub>	0.841	1970.5	4.02	12.69	166.0	Tantalo
13	2	Cilindrico	III	1	T <sub>amb</sub>	1.164	2615.3	5.03	19.87	131.6	Tantalo
14	2	Cilindrico	IV	1	T <sub>amb</sub>	0.716	1720.9	4.07	13.01	132.3	Tantalo
15	2	Clessidra	I	8	T <sub>amb</sub>	0.840	1968.5	4	12.57	167.5	Tantalo
16	2	Clessidra	I	9	1000	0.921	2210.0	4	12.57	188.0	Tantalo
17	2	Clessidra	I	10	1000	0.939	2246.0	3.99	12.55	191.3	Tantalo
18	2	Clessidra	I	11	2000	1.003	2373.7	3.99	12.54	202.3	Tantalo
19	2	Clessidra	I	12	2000	0.915	2198.0	4.01	12.63	186.1	Tantalo
20	2	Clessidra	I	13	T <sub>amb</sub>	0.760	1808.7	3.95	12.25	157.8	Tantalo
21	2	Clessidra	I	14	T <sub>amb</sub>	0.828	1944.5	3.96	12.32	168.8	SiC
22	2	Clessidra	I	15	T <sub>amb</sub>	0.831	1950.5	4.02	12.69	164.3	SiC
23	2	Cilindrico	III	2	T <sub>amb</sub>	1.159	2605.3	5	19.63	132.7	SiC
24	1	Cilindrico	III	3	T <sub>amb</sub>	1.241	2769.0	5.02	19.79	139.9	SiC
25	2	Cilindrico	III	4	T <sub>amb</sub>	1.162	2611.3	4.99	19.56	133.5	Tantalo
26	1	Cilindrico	III	5	T <sub>amb</sub>	0.964	2216.0	4.98	19.48	113.8	Tantalo
27	2	Cilindrico	V	1	T <sub>amb</sub>	1.090	2467.6	5.03	19.87	124.2	SiC
28	2	Cilindrico	V	2	T <sub>amb</sub>	1.055	2397.7	5.03	19.87	120.7	Tantalo
29	1	Cilindrico	III	6	T <sub>amb</sub>	1.239	2765.0	5.03	19.87	139.1	SiC
30	2	Cilindrico	III	7	T <sub>amb</sub>	1.195	2677.2	5.03	19.90	134.5	Tantalo
31	2	Clessidra	I	16	T <sub>amb</sub>	0.854	1996.4	3.97	12.37	172.6	Grafite
32	2	Clessidra	I	17	T <sub>amb</sub>	0.817	1922.5	3.92	12.07	170.3	Grafite
33	2	Clessidra	I	18	2000	1.058	2483.5	3.92	12.07	220.0	Grafite
34	2	Clessidra	I	19	2000	1.001	2369.7	3.96	12.32	205.7	Grafite
35	2	Clessidra	I	20	2200	1.050	2467.6	3.94	12.19	216.4	Grafite
36	2	Cilindrico	IV	2	T <sub>amb</sub>	0.743	1774.8	4.11	13.27	133.8	Tungsteno

Tabella 5.2 Dati geometrici e di resistenza dei provini utilizzati durante le prove sperimentali.

Nei grafici in Figura 5.14 e Figura 5.15 sono riportati i dati di resistenza per i provini cilindrici a temperatura ambiente, suddivisi tra i due lotti considerati. Viene inoltre posto in evidenza il materiale della superficie di contatto, al fine di valutare possibili influenze. In entrambi i grafici sono riportati in arancio i dati dei provini che presentano un rapporto altezza/diametro pari a due e in azzurro i dati delle geometrie con rapporto altezza/diametro pari a uno.

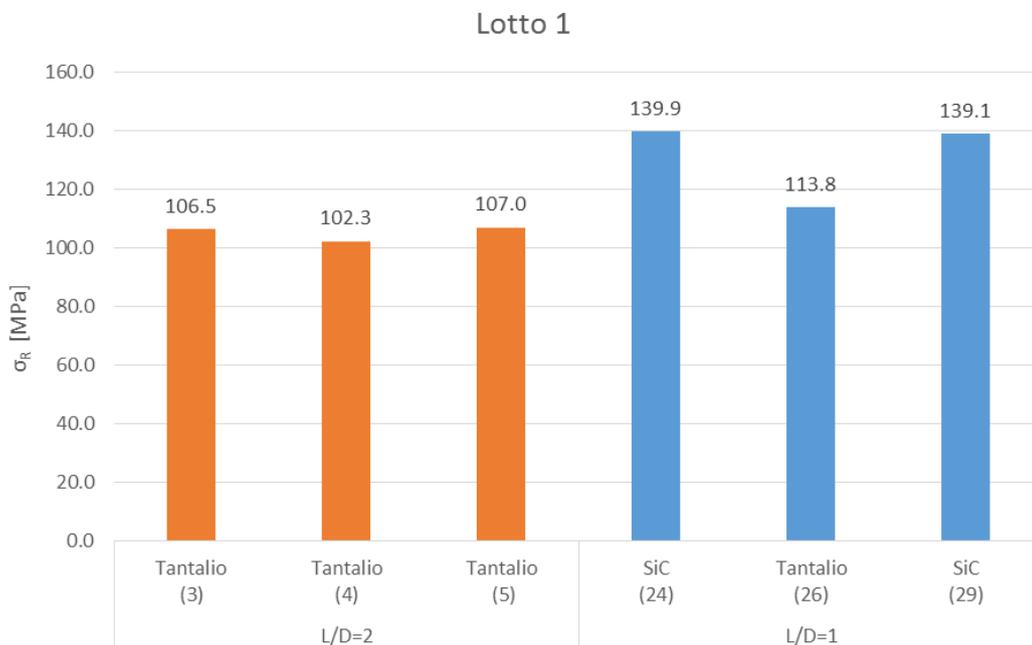


Figura 5.14 Dati di resistenza per provini cilindrici a temperatura ambiente, ottenuti con la grafite del primo lotto. In arancio sono riportati i dati per provini con rapporto altezza/diametro pari a due e in azzurro i dati per provini con rapporto altezza/diametro pari a uno.

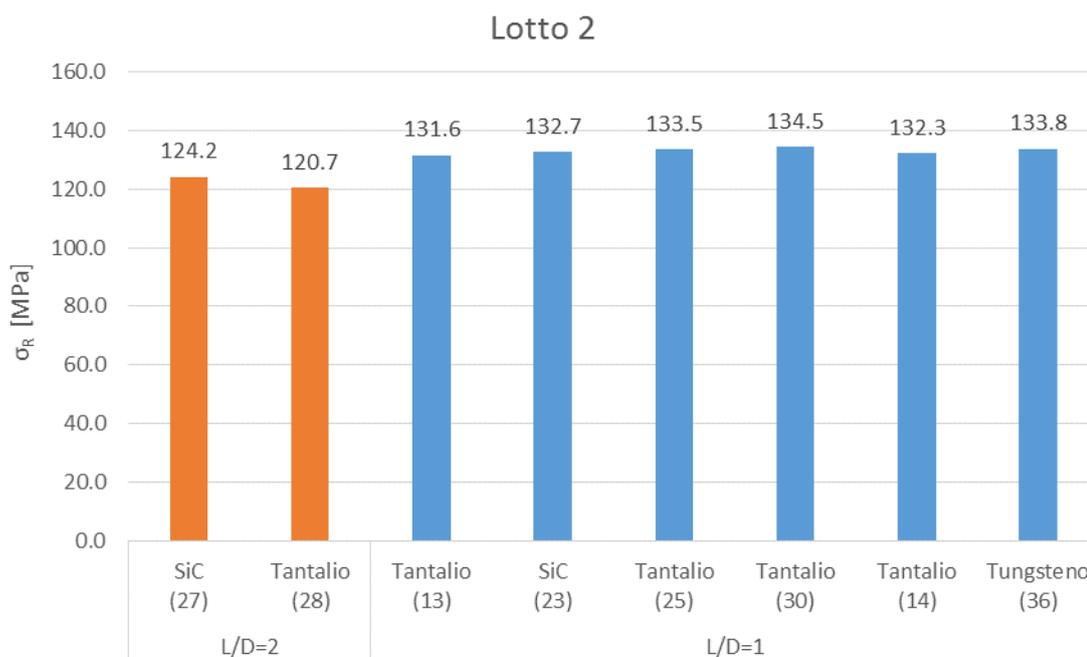


Figura 5.15 Dati di resistenza per provini cilindrici a temperatura ambiente, ottenuti con la grafite del secondo lotto. In arancio sono riportati i dati per provini con rapporto altezza/diametro pari a due e in azzurro i dati per provini con rapporto altezza/diametro pari a uno.

I provini con rapporto altezza/diametro pari a uno sembrano meglio comportarsi rispetto ai provini con rapporto pari a due. Questo comportamento pare verificato per entrambi i lotti considerati. D'altra parte, sebbene il

secondo lotto non sembri influenzato dal materiale della superficie di contatto, per quanto riguarda il primo lotto si registrano forti variazioni di resistenza quando la prova è eseguita con i dischi in Carburo di Silicio. Vista l'assenza di ipotesi migliori, ciò è probabilmente imputabile ad una differenza di attrito tra la coppia di superfici grafite-SiC e grafite-Ta che non è però riscontrata con il secondo lotto. Ulteriori test sperimentali sono comunque auspicabili, al fine di valutare meglio il fenomeno.

Considerando solamente i dati dei provini portati a rottura con superfici in Tantalio, onde evitare possibili influenze del materiale di contatto, è possibile inoltre apprezzare una maggiore resistenza del secondo lotto rispetto al primo.

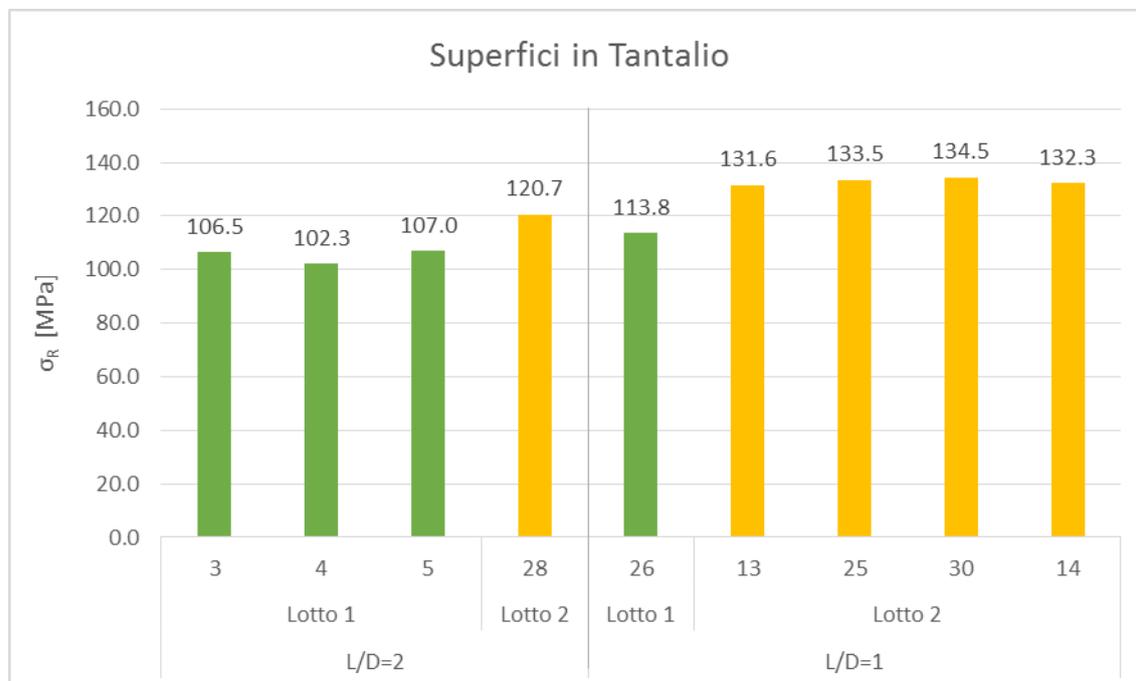


Figura 5.16 Dati di resistenza per provini cilindrici a temperatura ambiente, ottenuti da prove con superfici di contatto in Tantalio. In verde sono riportati i dati del primo lotto, in giallo quelli del secondo.

Ciò è riconducibile alla differenza di densità tra i due: il lotto con maggiore densità sembra resistere di più rispetto al lotto meno denso. I risultati sono in linea con il comportamento annunciato dalla casa produttrice. Si sottolinea, però, che comparando i due lotti a parità di geometria, le differenze sono ancora più accentuate.

Si analizzano ora i dati relativi ai provini a clessidra (Geometria I). In questo caso le prove sono state eseguite a temperatura ambiente, a 1000°C e a 2000°C. In Figura 5.17 è riportato l'andamento medio della resistenza a compressione al variare della temperatura.

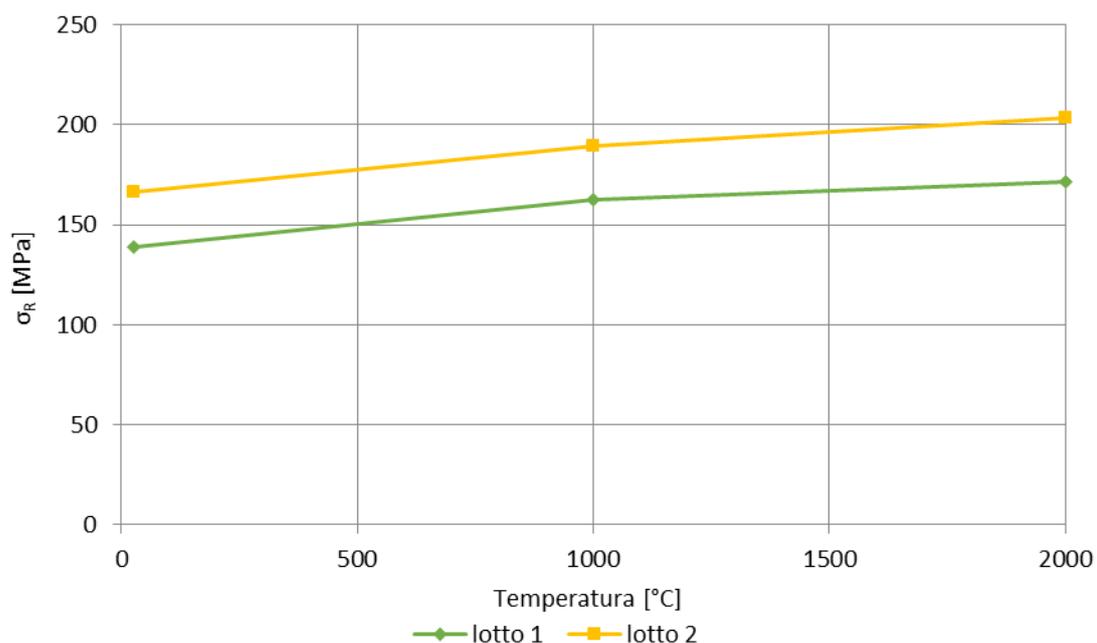


Figura 5.17 Andamento della resistenza a compressione (valori medi) per provini a clessidra, al variare della temperatura.

In primo luogo appare evidente l'aumento di resistenza con la temperatura. Questo comportamento, già confermato per la resistenza a trazione della grafite, rispecchia le indicazioni fornite dalla POCO. Altro aspetto rilevante è la differenza di resistenza al variare del lotto. In particolare, anche aumentando la temperatura, vi è un netto incremento di resistenza utilizzando campioni del secondo lotto, a densità maggiore.

Analizzando nel dettaglio i valori a temperatura ambiente è possibile apprezzare ulteriormente la differenza di resistenza al variare della densità. Appare inoltre evidente come le superfici di contatto non influenzino in modo significativo il carico di rottura nel caso di provini a clessidra del lotto 2. Sono anche in questo caso necessari ulteriori test sperimentali per valutare il comportamento del primo lotto.

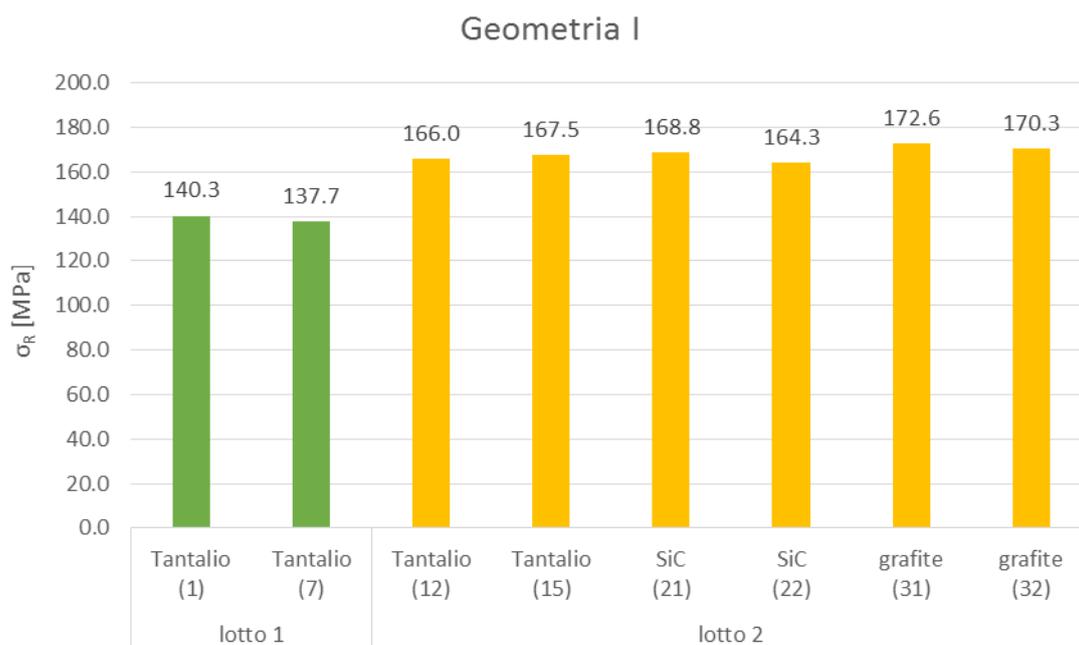


Figura 5.18 Resistenza a compressione per provini a clessidra del primo lotto (in verde) e del secondo lotto (in giallo), a temperatura ambiente, al variare delle superfici di contatto.

Un altro aspetto molto importante è la differenza di resistenza a compressione tra provini cilindrici e provini a clessidra. Nei grafici di Figura 5.19 e Figura 5.20 vengono confrontati i dati a temperatura ambiente delle due diverse geometrie, a parità di lotto.

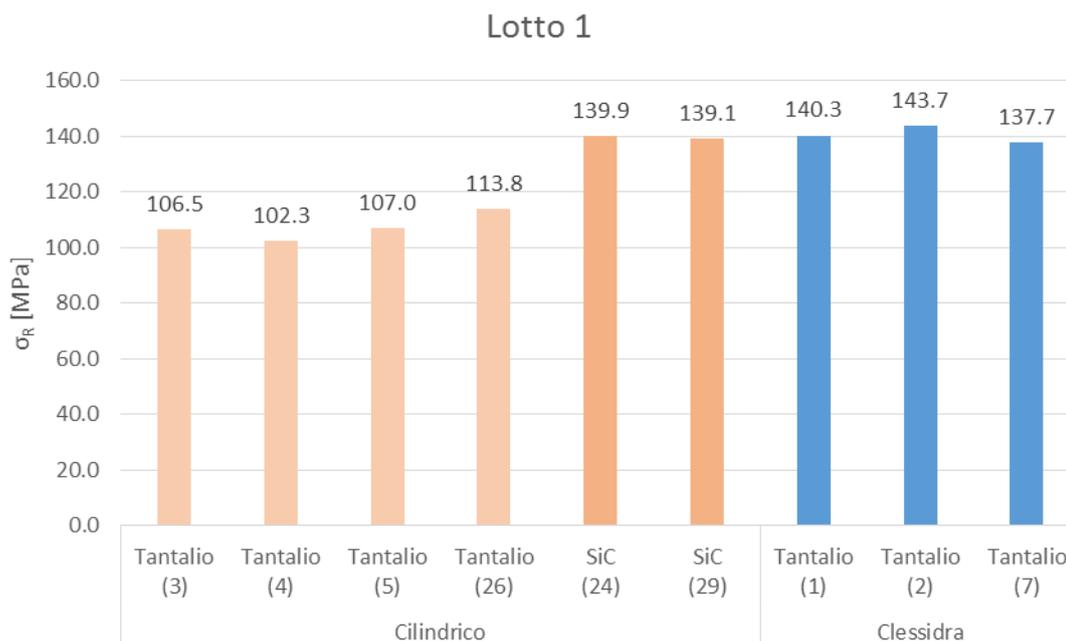


Figura 5.19 Resistenza a compressione a temperatura ambiente per provini del lotto 1, cilindrici (in arancio) e a clessidra (in azzurro), al variare della superficie di contatto.

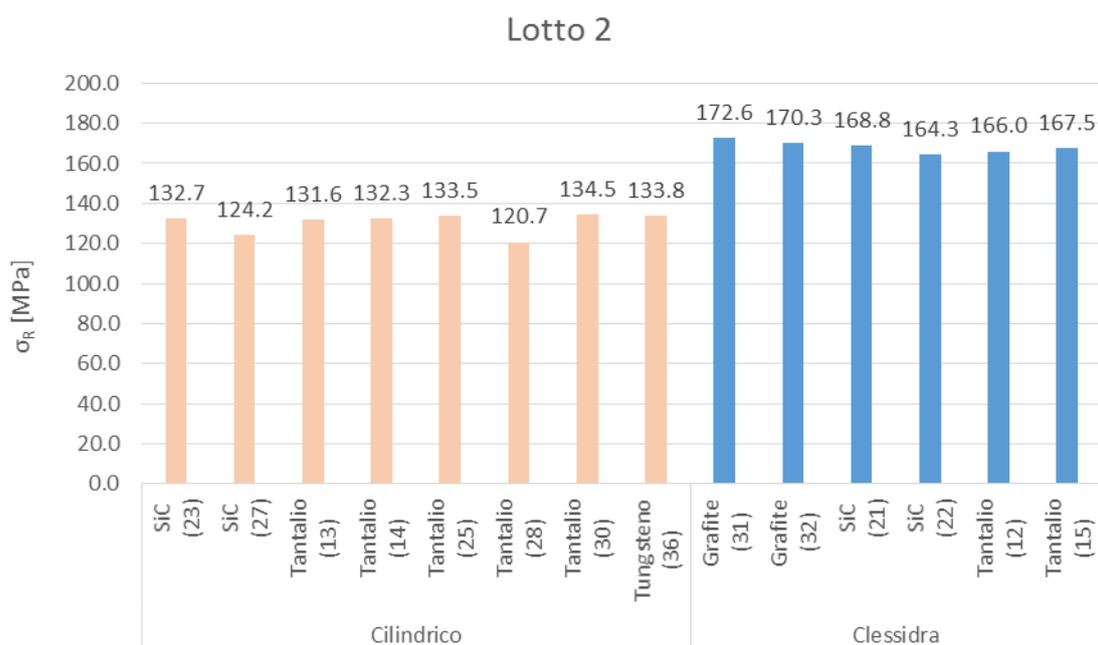
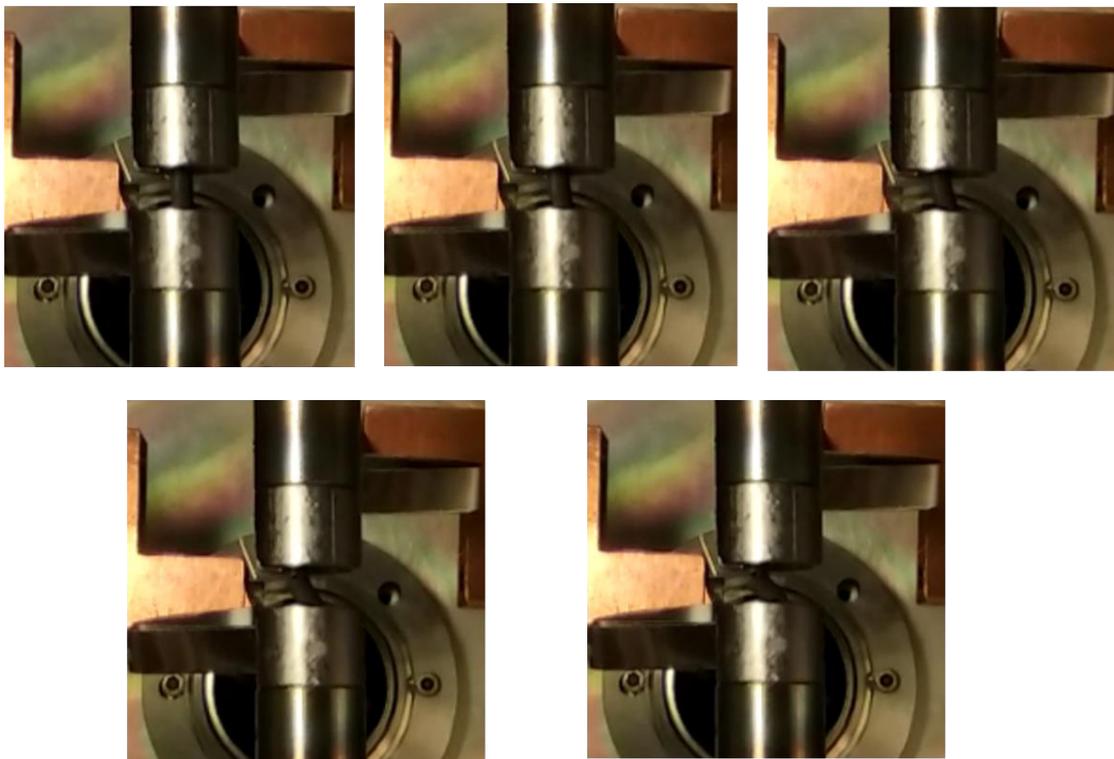


Figura 5.20 Resistenza a compressione a temperatura ambiente per provini del lotto 2, cilindrici (in arancio) e a clessidra (in azzurro), al variare della superficie di contatto.

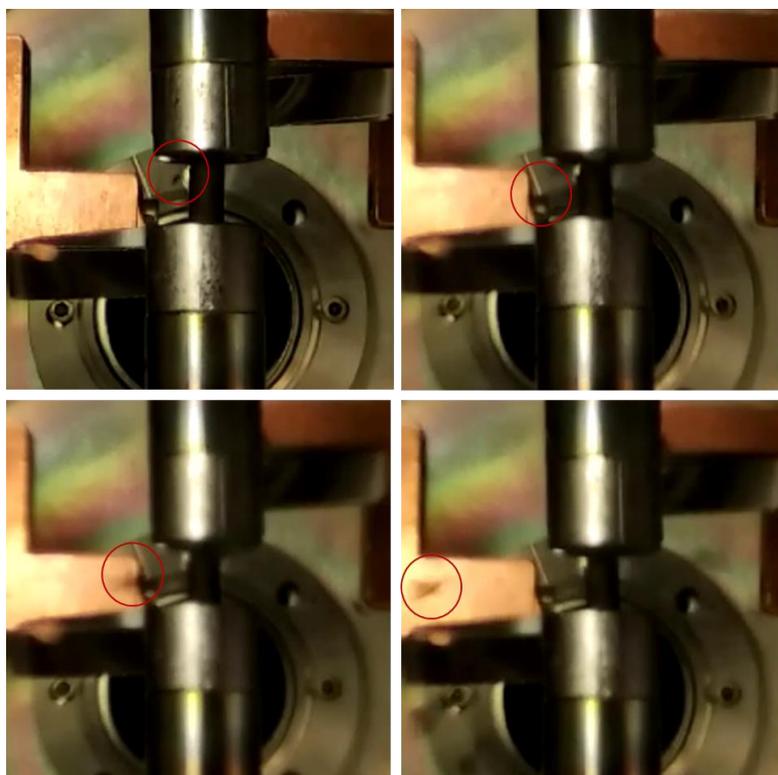
Si nota, in generale, una maggiore resistenza dei provini a clessidra rispetto ai provini cilindrici. Si osserva come, nel caso del primo lotto, la presenza dei dischi in Carburo di Silicio permetta di raggiungere valori simili a quelli ottenuti con provini a clessidra.

La minore resistenza dei provini cilindrici rispetto a quelli a clessidra è probabilmente riconducibile a problemi di flessione durante le prove di compressione (Figura 5.21), anche se la concentrazione delle tensioni sul bordo

della superficie di contatto, con espulsione di frammenti e conseguente diminuzione della sezione resistente (Figura 5.22) non è certo da escludere come fenomeno che innesca la rottura.

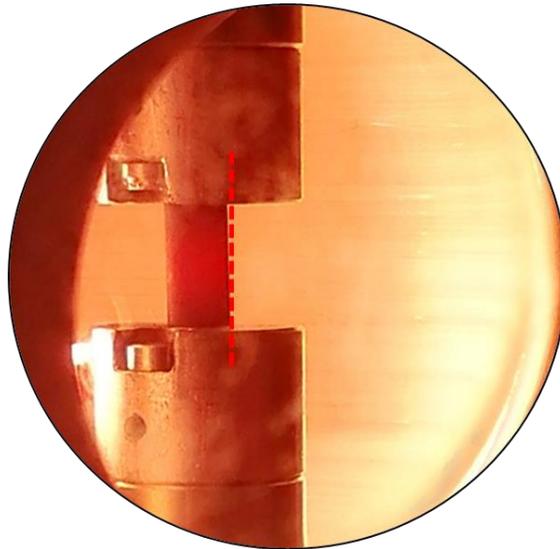


*Figura 5.21 Partendo dall'alto, sequenza di rottura di un provino cilindrico (1) con rapporto altezza/diametro pari a due. Risulta evidente la rottura per flessione.*



*Figura 5.22 Sequenza di rottura di un provino cilindrico (2) per diminuzione della sezione di contatto a causa di frammenti che partono dal bordo del provino a contatto con l'albero.*

Portando il provino a temperatura sembrano riproporsi gli stessi problemi. In figura è rappresentato un provino cilindrico a 1000°C, qualche istante prima della rottura. Anche in questo caso è apprezzabile una leggera flessione.



*Figura 5.23 Provino cilindrico (3) a 1000°C qualche istante prima della rottura.*

I provini cilindrici con rapporto altezza/diametro pari a uno sembrano soffrire meno di queste componenti flessionali. La rottura però avviene spesso in maniera distruttiva e non è stato possibile raccogliere molti dati sulla modalità di rottura. Nei casi in cui la rottura non ha portato alla distruzione del provino è stato possibile apprezzare un percorso di frattura che ricorda una forma a clessidra. Ciò è dovuto agli sforzi di taglio che si generano, con fratture orientate a 45° rispetto alla direzione di carico.



*Figura 5.24 Rottura di un provino cilindrico con rapporto altezza/diametro pari a 1. È possibile apprezzare un percorso di frattura che ricorda una forma a clessidra.*

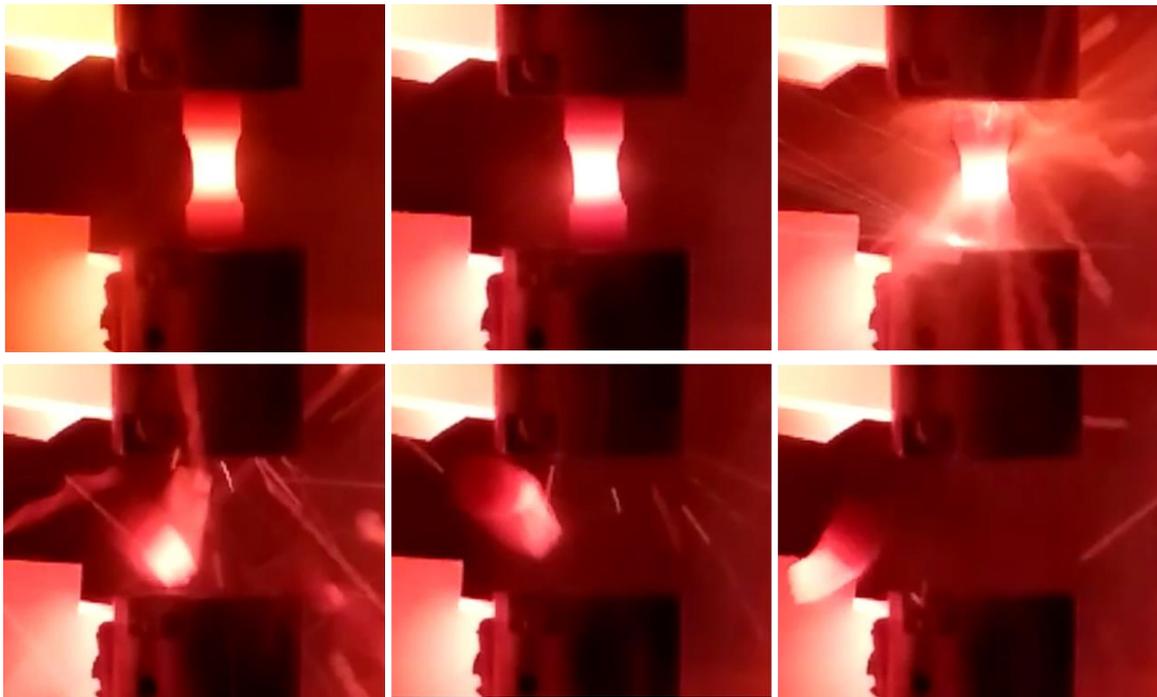
Nel caso di provini cilindrici ( $l/d=2$ ) rotti a temperatura ambiente con l'ausilio di dischi in Carburo di Silicio, i dati di resistenza sono comunque risultati confrontabili con quelli ottenuti da macchine più avanzate [23]. Si suppone quindi che i problemi riscontrati per i provini cilindrici siano tipici di prove a compressione con questo tipo di geometria.

Nel caso di provini a clessidra, la frattura è sempre avvenuta in corrispondenza della sezione centrale ristretta, nella maggior parte dei casi con un'inclinazioni di 45° (Figura 5.25).



*Figura 5.25 Rottura caratteristica dei provini a clessidra, in corrispondenza della sezione ristretta.*

Ciò nonostante, non è escluso che anche per i provini a clessidra subentri una componente flessionale, soprattutto per prove ad alta temperatura. In figura è riportata la sequenza di rottura per il provino (9) a 1000°C. Si può in questo caso notare una leggera flessione prima della rottura anche se, comunque, la zona che viene rotta corrisponde alla sezione netta e non all'interfaccia tra punzone e provino.



*Figura 5.26 Dall'alto, sequenza di rottura di un provino cilindrico (9) a 1000°C.*

Nel tentativo di evidenziare qualche eventuali differenti metodi di rottura dei provini, sono state eseguite analisi al microscopio elettronico a scansione (SEM) su provini a clessidra e cilindrici portati a rottura a varie temperature (Figura 5.27 e Figura 5.28).

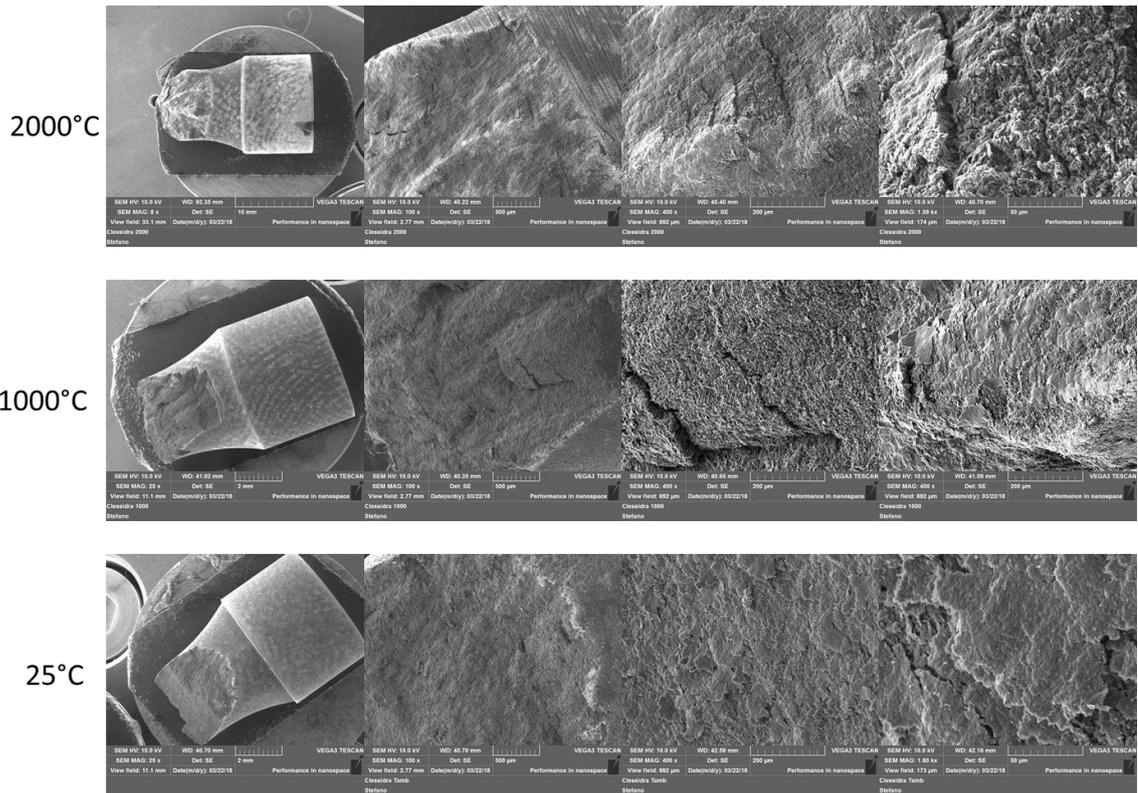


Figura 5.27 Analisi al microscopio elettronico a scansione di tre provini a clessidra. Partendo da sinistra, ingrandimenti 25x, 100x, 400x, 1600x

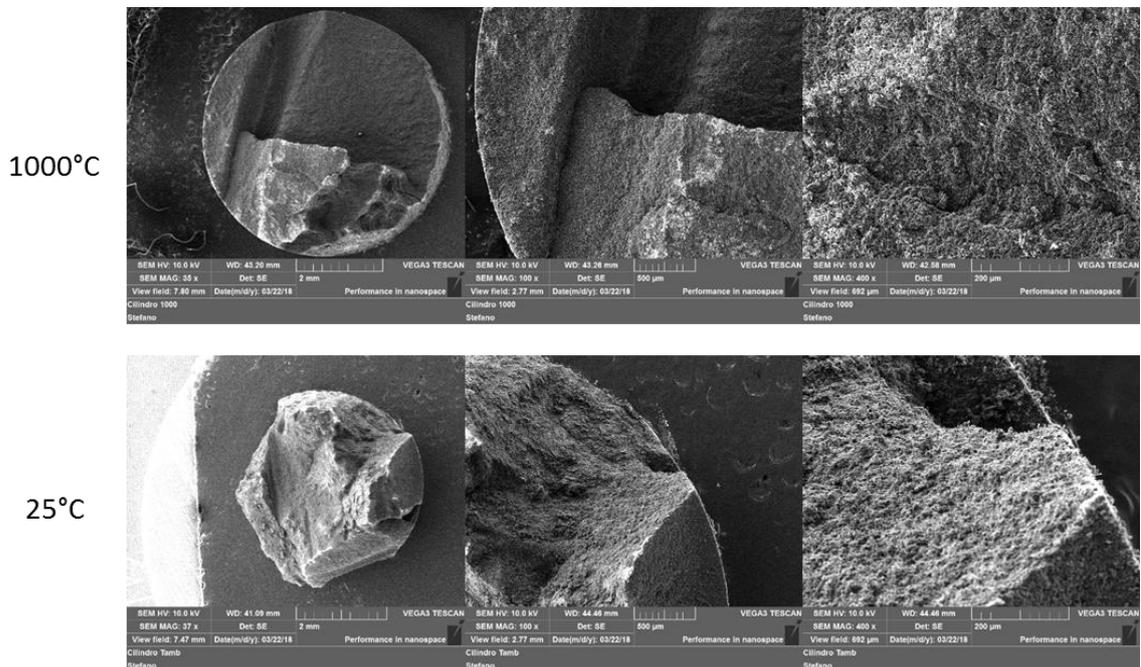


Figura 5.28 Analisi al microscopio elettronico a scansione di due provini cilindrici. Partendo da sinistra, ingrandimenti 37x, 100x, 400x.

Non sono state riconosciute significative differenze tra i tipi di provini alle varie temperature.

## 5.7 Problemi riscontrati e sviluppi futuri

Uno dei principali problemi riscontrati durante le prove è rappresentato dalla flessione di alcuni provini, in particolare di quelli cilindrici, durante la compressione. Ciò è probabilmente causato da un problema di allineamento dell'albero superiore, all'aumentare della forza impressa (Figura 5.29).

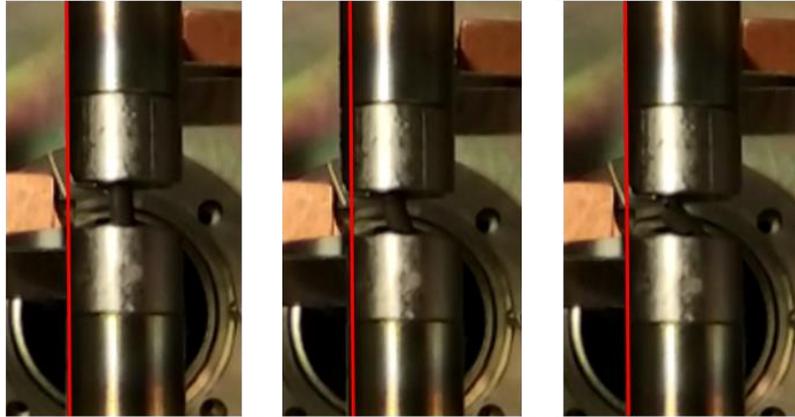


Figura 5.29 Sequenza di rottura di un provino cilindrico (1). Nel secondo fotogramma è possibile apprezzare il disallineamento dell'albero scorrevole, qualche istante prima della rottura definitiva.

Al fine di ottenere risultati significativi anche per le geometrie cilindriche è quindi auspicabile sviluppare un sistema di allineamento per l'albero superiore più performante: la sola boccia in PEEK, prevista in questa prima fase di progettazione, non sembra infatti essere sufficiente all'aumentare delle forze in gioco.

Un altro problema riscontrato è stata la formazione di un "impronta" del provino sulle estremità in Tantalio, in seguito ad alcune prove a 2000°C, eseguite in successione.

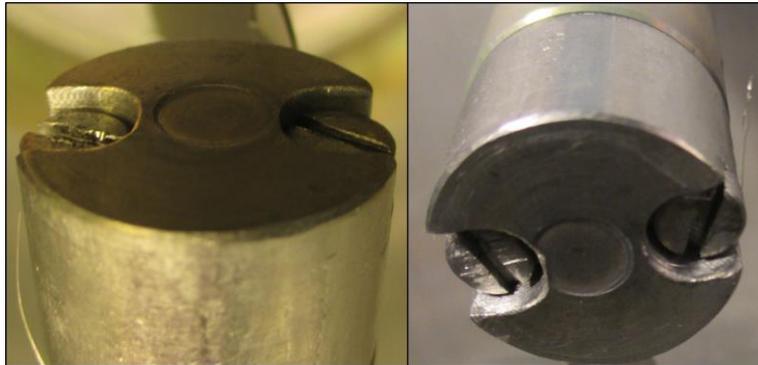


Figura 5.30 Formazione dell'impronta del provino sull'estremità in Tantalio dell'albero fisso (a sinistra) e scorrevole (a destra).

L'impronta si presentava per entrambi gli alberi leggermente inclinata rispetto alla direzione orizzontale: ciò ha comportato una rottura anticipata dei due provini testati successivamente (indicati in rosso in Tabella 5.2). L'utilizzo di dischi in altro materiale, come Carbuo di Silicio, Grafite o Tungsteno, permette di ovviare al problema. Come visto al paragrafo precedente però, al variare della geometria del provino e della temperatura della prova, varia anche il materiale più idoneo da utilizzare come superficie di contatto. Risulta perciò opportuno sviluppare delle estremità in differenti materiali, facilmente interscambiabili, così da poter adattare il sistema al tipo di prova desiderata. Ciò permetterebbe inoltre di approfondire l'influenza della superficie di contatto sul valore di resistenza registrato.

Vista inoltre la capacità della cella di carico di lavorare in entrambe le direzioni di carico, lo sviluppo di afferraggi per prove a trazione rappresenterebbe un importante upgrade del sistema. Sarebbe così possibile caratterizzare vari materiali sia a trazione che a compressione a temperature molto elevate.

La prova eseguita a temperatura maggiore è stata ottenuta a 2200°C. Durante la prova di sono superati i 2500°C ma non è stato possibile mantenere tale temperatura durante la compressione perché si era raggiunto il massimo valore di voltaggio disponibile agli alimentatori. L'utilizzo di ulteriori lamine in Tantalio permetterebbe di abbassare il potenziale da erogare a parità di corrente e di mantenere temperature più elevate durante le prove. Sarebbe inoltre importante migliorare il sistema di misura del potenziale ai capi del provino.

L'ottenimento di temperature più elevate grazie alle modifiche suggerite comporta la necessità di un migliore monitoraggio della temperatura raggiunta dai vari componenti del sistema. In particolare, delle termocoppie potrebbero essere necessarie al fine di valutare l'integrità dalle estremità in tantalio. Inoltre, una finestra di controllo posta più vicino al provino, possibilmente su flangia raffreddata, garantirebbe misure di temperatura più semplici e precise.

Inoltre, per valutare la scelta del criterio di Von Mises per gestire la triassialità delle tensioni nei provini a clessidra, sarebbe opportuno ripetere le prove con una geometria di provino differente. Ci si aspetterà quindi un diverso fattore di concentrazione degli sforzi ma si dovrebbe comunque ottenere lo stesso valore di resistenza a parità di materiale e condizioni di prova.

L'acquisizione in modo automatico della misura di tensione e di temperatura, invece, potrebbe rendere il sistema di più facile utilizzo.

Infine, sviluppi molto più onerosi potrebbero invece essere i successivi:

- Cambiando la meccanica si potrebbe rendere l'applicazione del carico automatica e programmabile. Inoltre l'erogazione della corrente necessaria alla prova potrebbe essere resa una procedura automatica e non manuale come effettuato attualmente;
- Sarebbe davvero ottimo, ma probabilmente un ambizioso e oneroso compito, poter misurare la deformazione dei provini in modo da ricostruire la curva sforzo deformazione del materiale.



# CONCLUSIONI

Obiettivo del presente lavoro di Tesi era lo sviluppo di un sistema meccanico, chiamato Faraday Cup, da inserire nella camera target per la misura della corrente del fascio protonico. Lo studio del comportamento termo-strutturale del sistema richiedeva simulazioni con il codice di calcolo agli Elementi Finiti ANSYS. Al fine di semplificare e velocizzare l'analisi, sono state svolte delle simulazioni su alcune geometrie semplificate. In particolare si volevano validare alcune ipotesi semplificative, riguardo la dimensione del modello e la deposizione di potenza. Sono state svolte analisi tridimensionali e bidimensionali con la stessa deposizione di potenza su una geometria cilindrica: i valori di temperatura e tensioni hanno presentato differenze inferiori all'1% e hanno permesso di validare il modello bidimensionale. Sono stati quindi confrontati i risultati ottenuti applicando la deposizione di potenza ricavata da analisi in ambiente FLUKA o supponendo un andamento gaussiano costante lungo l'asse. Sebbene i dati di temperatura differiscano leggermente, l'errore nella stima delle tensioni è sempre inferiore al 4%. I valori maggiori sono inoltre ottenuti ipotizzando un andamento gaussiano: si è quindi in favore di sicurezza. Perciò è possibile ritenere valida anche questa seconda ipotesi semplificativa. Le simulazioni necessarie al dimensionamento vero e proprio della Faraday Cup sono state quindi svolte con modelli bidimensionali. In particolare, l'utilizzo di un modello bidimensionale con deposizione di potenza con andamento gaussiano ha permesso di progettare due distinte Faraday Cup, in grado di realizzare misure di corrente sia per un fascio di alta potenza che di bassa potenza. Inoltre, attraverso delle analisi elettriche, si sono dimensionati due soppressori in grado di fornire il potenziale di schermatura richiesto. Il modello tridimensionale, sviluppato con il software CREO Parametric 2.0, ha permesso infine di organizzare l'alloggiamento all'interno della camera target ed è stato utilizzato per validare ulteriormente le precedenti simulazioni. Inoltre, è stato dimensionato un sistema di misura in grado di valutare il centraggio e le performance del fascio in condizioni di normale esercizio. In caso di un malfunzionamento del ciclotrone, però, le Faraday Cup possono non essere in grado di fermare il fascio alla massima potenza erogabile dal ciclotrone. Per questo motivo si è voluto determinare il tempo di intervento necessario per rilevare eventuali problemi e bloccare il ciclotrone. Sono state quindi implementate varie analisi in ambiente Ansys al fine di studiare un *dump* molto semplice, ovvero un dispositivo in grado di assorbire completamente l'energia senza rompersi. Come condizioni di carico si sono considerate le caratteristiche che determinano il minor tempo di intervento ovvero minima dimensione di fascio, massima corrente e assenza di dispositivi precedenti al dump in grado di assorbire la potenza. Si sono implementate analisi termo-strutturali al variare dei parametri geometrici e dell'energia di fascio. In particolare sono stati variati lo spessore e il diametro del cilindro e l'energia del fascio. Si è visto come lo spessore minimo del dump sia determinato dal fascio con maggiore energia. In particolare, viene fissato uno spessore minimo pari a 30 mm. Il tempo di intervento dipende invece dalla massima deposizione di potenza. Viene fissato un tempo di intervento pari a 0.18 secondi.

Dall'analisi dei risultati è risultato evidente come, per questi casi, temperatura e tensione di trazione massime non rappresentassero un problema per l'integrità strutturale del sistema meccanico. L'assenza di dati precisi riguardanti il comportamento a compressione alle alte temperature ha però evidenziato la necessità di relative prove sperimentali, al fine di caratterizzare completamente la grafite POCO EDM-3, scelta per il progetto. È stato quindi sviluppato un setup per prove di compressione: onde evitare problemi legati all'ossidazione della grafite intorno ai 400°C, il sistema è stato progettato per lavorare in vuoto. In seguito ad analisi termiche eseguite su un layout di primo tentativo, sono stati individuati i materiali più idonei per i vari componenti. In particolare, l'isolamento elettrico è stato affidato ad elementi in PEEK o in Macor. Gli alberi sono stati realizzati in acciaio e sono state previste estremità in Tantalio per far fronte alle elevate temperature raggiunte durante le prove. Le misure di forza sono state affidate ad una cella di carico della HBM, in grado di lavorare sia in trazione che in compressione, opportunamente tarata prima dell'utilizzo. Ci si è quindi soffermati sulla geometria dei provini da utilizzare: in particolare sono state realizzate diverse tipologie di provini cilindrici e a clessidra. Le prove volevano inoltre valutare alcuni fattori in grado di influenzare i valori di resistenza. Un altro fattore in grado di influenzare i valori ottenuti nelle prove sperimentali è rappresentato dalla densità del materiale. Provini ottenuti da due differenti lotti hanno confermato una maggiore resistenza nel materiale con maggiore densità. Sarà necessario, quindi, misurare la densità della grafite che si andrà ad utilizzare per realizzare la Faraday Cup. Particolare attenzione va rivolta anche alle superfici di contatto utilizzate durante le prove. In particolare, sono stati utilizzati dischi in diversi materiali, quali Carburo di Silicio, grafite e Tungsteno, al fine di valutare l'influenza dell'attrito. Ulteriori test sono necessari per evidenziare o meno una

dipendenza significativa con la superficie di contatto. Infatti, i provini ottenuti da uno dei due lotti non mostravano apprezzabili variazioni di resistenza al variare del materiale del disco utilizzato; si sono però registrati sensibili incrementi di resistenza nei provini dell'altro lotto durante prove effettuate con Carburo di Silicio. Si sono infine riscontrati problemi di flessione nel caso di provini cilindrici, soprattutto in quelli caratterizzati da un rapporto altezza/diametro pari a due. In conclusione, però, si è visto come all'aumentare della temperatura, aumenti anche il carico di rottura a compressione. Questo andamento, già noto per la resistenza a trazione, ha permesso di validare completamente la progettazione della Faraday Cup. Era stato infatti considerato come carico di rottura a compressione il valore di resistenza a temperatura ambiente. Per poter allora ottimizzare il sistema risulta necessario migliorare l'allineamento dell'albero scorrevole, possibile responsabile della flessione durante le prove. Sono state inoltre proposte ulteriori modifiche in grado di rendere più efficiente il sistema. Una finestra più grande e più vicina, possibilmente raffreddata, permetterebbe infatti di ottenere misure di temperatura più precise. Lo sviluppo di afferraggi per la trazione consentirebbe inoltre di rendere il sistema molto interessante per caratterizzare diversi tipi di materiali alle alte temperature.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] F. Borgna, Potenzialità della tecnologia 'Isotope Separation On-Line' (ISOL) per la realizzazione di un radiofarmaco a base di Sr-89 e preliminare sviluppo tecnologico della forma farmaceutica, Padova, 2014.
- [2] «EURISOL, distributed facility,» [Online]. Available: [http://www.eurisol.org/eurisol\\_df/](http://www.eurisol.org/eurisol_df/).
- [3] A. Monetti, Design and development of the target-ion source system for the SPES project, Padova, 2017.
- [4] «Wikipedia,» [Online]. Available: <https://www.wikipedia.org/>.
- [5] «Laboratori Nazionali di Legnaro,» [Online]. Available: <http://www.lnl.infn.it/index.php/en/>.
- [6] L. Martin, Progettazione meccanica delle box di diagnostica del front-end del progetto SPES, Padova, 2015.
- [7] A. Monetti, Studio, simulazione e test di un apparato per la produzione di fasci radioattivi, Padova, 2012.
- [8] «INFN LNGS,» [Online]. Available: <https://www.lngs.infn.it/astrofisica-nucleare>.
- [9] POCO GRAPHITE, INC., Properties and Characteristics of Graphite, Poco Graphite, Inc, 2002.
- [10] L. Gillin, «Deformation characteristics of nuclear grade praphites,» *Journal of Nuclear Materials*, vol. 23, n. 3, pp. 280-288, 1967.
- [11] L. Green, «High Temperature Compression Tests on Graphite,» North American Aviation, Inc., 1952.
- [12] POCO EDM Graphite Selection Guide, POCO GRAPHITE, INC., 2013.
- [13] ASTM C695-15, *Standard Test Method for Compressive Strength of Carbon and Graphite*, American Society for Testing Materials, 2018.
- [14] G. Petrucci, Lezioni di Costruzione di Macchine.
- [15] S. Baragetti, *Costruzioni di macchine*, Università degli Studi di Bergamo.
- [16] A. Sandrin, Progettazione di un banco prova per test e sviluppo di motori pneumatici per il progetto SPES, Padova, 2015-2016.
- [17] U. Bezerra, S. Alves, N. Barbosa e S. Torres, «Hourglass-shaped specimen: compressive strength of concrete and mortar,» *Revista Ibracon de Estruturas e materiais*, vol. 9, n. 4, pp. 510-524, 2016.
- [18] L. Lutterotti, *Tecnologie e sistemi di lavorazione I*, 2005-2006.
- [19] P. Forquin, C. Denoual, C. Cottenot e F. Hild, «Experiments and modelling of the compressive behaviour of two SiC ceramics,» *Mechanics of Materials*, vol. 35, pp. 987-1002, 2003.
- [20] «Edutecnica,» [Online]. Available: <http://www.edutecnica.it/meccanica/peakload/peakload.htm>.
- [21] «Omega,» [Online]. Available: <https://it.omega.com/prodinfo/termometri-ad-infrarosso.html>.
- [22] W. Pilkey, Peterson's stress cncentration factors, New York: John Wiley & Sons, Inc, 1997.
- [23] M. Sturaro, Caratterizzazione termo-strutturale di materiali ceramici per applicazioni in fisica e medicina nucleare, Padova, 2017-2018.
- [24] D. Bof, Disegno, realizzazione e test di componenti per il target di bassa potenza del progetto SPES, Padova, 2017.
- [25] F. Nicolin, Studio elettro-termo-strutturale, progettazione meccanica e test del bersaglio di produzione di bassa potenza per il progetto SPES, Padova, 2014.



# APPENDICE A

## Esempi di listati APDL utilizzati

In questa appendice verranno presentati degli esempi di comandi APDL utilizzati per la creazione e la risoluzione dei modelli numerici descritti in questo lavoro di tesi. Verrà considerato il caso particolare dell'analisi numerica presentata nel Capitolo 3, relativa alla simulazione tridimensionale della Faraday Cup con andamento della deposizione di potenza di tipo Gaussiano. Verrà quindi riportato il listato utilizzato per l'analisi termoelettrica, utilizzata per il dimensionamento dei provini impiegati al Capitolo 5.

### A.1 Comandi APDL utilizzati per l'analisi termica del modello tridimensionale della Faraday Cup

```
FINISH
/CLEAR,ALL

/PREP7

ET,1,SOLID90
ET,2,SOLID226

KEYOPT,2,1,110

pi=3.141592653589793

!-----
!Proprietà dei Materiali
!-----

M10C_EDM3
!chiama la macro
della grafite
M27Al6082_X
!chiama la macro
dell'Alluminio 6082
M28Cu
!chiama la macro
del Rame
M26Ta
!chiama la macro
del Tantalio
M32Al2O3_XX
!chiama la macro
dell'Allumina

!-----
!Importazione volumi
!-----

/AUX15
IOPTN,IGES,NODEFEAT
IOPTN,MERGE,NO

IOPTN,SMALL,YES
IOPTN,GTOLER,DEFA
IGESIN,CAMERA_SEMPLIFICATA,igs
IGESIN,faraday_cup,igs

/PREP7

ALLSEL,ALL

!-----
!VGLUE
!-----

!Camera
VSEL,S,,,1,9,1
ALLSEL,BELOW,VOLUME
BTOL,0.01
VGLUE,ALL
ALLSEL,ALL

!Faraday Cup
VSEL,S,,,10,50,1
ALLSEL,BELOW,VOLUME
BTOL,0.01
VGLUE,ALL
ALLSEL,ALL

!-----
! MESH
!-----

MSHAPE,1,3D
!mesh a elementi

tetraedrici
MSHKEY,0
!mesh tipo free

TYPE,1

!--GRAFITE
```

```

!Faraday Cup 1
MAT,C_EDM3
VSEL,S,VOLU,,79
ESIZE,3
VMESH,ALL
ALLSEL,ALL

!Faraday Cup
MAT,C_EDM3
VSEL,S,VOLU,,75
ESIZE,3
VMESH,ALL
ALLSEL,ALL

!Dump e 'finale'
MAT,C_EDM3
VSEL,S,VOLU,,12
ESIZE,10
VMESH,ALL
ALLSEL,ALL

VSEL,S,VOLU,,54
ESIZE,23
VMESH,ALL
ALLSEL,ALL

!--TANTALIO
!Soppressore1
MAT,Ta
VSEL,S,VOLU,,80
VSEL,A,VOLU,,82
ESIZE,3
VMESH,ALL
ALLSEL,ALL

!Soppressore2
MAT,Ta
VSEL,S,VOLU,,25
VSEL,A,VOLU,,30
ESIZE,3
VMESH,ALL
ALLSEL,ALL

!Sostegni faraday cup 1 e 2
MAT,Ta
VSEL,S,VOLU,,81
VSEL,A,VOLU,,76
VSEL,A,VOLU,,83,84,1
VSEL,A,VOLU,,29,30,1
ESIZE,3
VMESH,ALL
ALLSEL,ALL

!barre e piastre di fissaggio
MAT,Ta
VSEL,S,VOLU,,86,87,1
VSEL,A,VOLU,,71,72,1
ESIZE,3
VMESH,ALL
ALLSEL,ALL

!--RAME
!Morsetti
MAT,Cu
VSEL,S,VOLU,,77,78,1
VSEL,A,VOLU,,73,74,1
ESIZE,4
VMESH,ALL

ALLSEL,ALL

VSEL,S,VOLU,,85
ALLSEL,BELOW,VOLU
AESIZE,553,1
ESIZE,4
VMESH,ALL
ALLSEL,ALL

!Puntali
VSEL,S,VOLU,,1,2,1
ALLSEL,BELOW,VOLU
AESIZE,436,2
AESIZE,443,2
ESIZE,3
VMESH,ALL
ALLSEL,ALL

!--ALLUMINA
!Cilindri allumina
MAT,Al2O3_XX
VSEL,S,VOLU,,60,70,1
VSEL,A,VOLU,,3,9,1
ESIZE,2
VMESH,ALL
ALLSEL,ALL

!--ALLUMINIO
!Camera
MAT,Al6082
VSEL,S,VOLU,,57
ALLSEL,BELOW,VOLU
LESIZE,38,14
LESIZE,39,14
LESIZE,55,14
LESIZE,56,14
ESIZE,25
VMESH,ALL
ALLSEL,ALL

MAT,Al6082
VSEL,S,VOLU,,51,53,1
VSEL,A,VOLU,,55,56,1
VSEL,A,VOLU,,58,59
ESIZE,25
VMESH,ALL
ALLSEL,ALL

!-----
!Riduzione di scala da mm a m
VLSCALE,ALL,,0.001,0.001,0.001,,0,1
!-----

!-----
!CONDIZIONI AL CONTRONO
!-----
Traff=25
TUNIF=20

angolo1 = 9.57842292
angolo2 = 5.71059314

CLOCAL,15,1,0.0,0.0,0.0,0,0,0
!creo il sistema di coordinate
polari per le condizioni al contorno

!-----

```

```

!IRRAGGIAMENTO
!-----

RADOPT,,0.001,0,10000,,0.5
HEMIOPT,100
SPCTEMP,1,Tamb
STEF,5.67e-8
TOFFST,273.15
TUNIF,Traff

!Grafite
VSEL,ALL
VSEL,R,MAT,,C_EDM3
ALLSEL,BELOW,VOLU
SFA,ALL,,RDSF,-C_EDM3,1
ALLSEL,ALL

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

!Alluminio
VSEL,ALL
VSEL,R,MAT,,Al6082
ALLSEL,BELOW,VOLU
SFA,ALL,,RDSF,-Al6082,1
ALLSEL,ALL

!Allumina
VSEL,ALL
VSEL,R,MAT,,Al2O3_XX
ALLSEL,BELOW,VOLU
SFA,ALL,,RDSF,-Al2O3_XX,1
ALLSEL,ALL

!Tantalio
VSEL,ALL
VSEL,R,MAT,,Ta
ALLSEL,BELOW,VOLU
SFA,ALL,,RDSF,-Ta,1
ALLSEL,ALL

!Rimozione radiazione da superfici a
contatto
VSEL,ALL
*GET,nvolu,VOLU,0,COUNT
nn=0
*DO,i,1,nvolu
  nn=vlnext(nn)
  VSEL,ALL
  VSEL,U,VOLU,,nn
  ALLSEL,BELOW,VOLU
  VSEL,S,VOLU,,nn
  ASLV,R
  SFADELE,ALL,,RDSF
  ALLSEL,ALL
*ENDDO
ALLSEL,ALL

!Rimozione radiazione da canali di
raffreddamento
ASEL,S,,,242,329,1
ASEL,A,,,424,435,1
ASEL,A,,,440,442,1

ASEL,A,,,389,394,1

SFADELE,ALL,,RDSF
ALLSEL,ALL

!Rimozione radiazione pareti interne
camera
ASEL,S,,,232,236,1
ASEL,A,,,238
ASEL,A,,,41
ASEL,A,,,52
ASEL,A,,,331,332,1
ASEL,A,,,334,336,1
ASEL,A,,,14,15,1
ASEL,A,,,17,18,1

SFADELE,ALL,,RDSF
ALLSEL,ALL

!Applicazione radiazione con
emissività 0.3 pareti interne camera
ASEL,S,,,232,236,1
ASEL,A,,,238
ASEL,A,,,41
ASEL,A,,,52
ASEL,A,,,331,332,1
ASEL,A,,,334,336,1
ASEL,A,,,14,15,1
ASEL,A,,,17,18,1
ALLSEL,BELOW,AREA
SFA,ALL,,RDSF,0.3,1
ALLSEL,ALL

!-----
!CONVEZIONE FORZATA
!-----
!Convezione attraverso circuiti di
raffreddamento

!Circuito di raffreddamento camera
ET,30,SURF152
KEYOPT,30,8,2
alfacam=7876
! [W/m^2°C]
ASEL,S,,,242,329,1
NSLA,S,1
ESLN,S,0
TYPE,30
ESURF
ESEL,R,TYPE,,30
SFE,ALL,,CONV,0,alfacam
SFE,ALL,,CONV,2,Traff
ALLSEL,ALL

!Circuito di raffreddamento plate
ET,31,SURF152
KEYOPT,31,8,2
alfaplate=6793
! [W/m^2°C]
ASEL,S,,,424,435,1
NSLA,S,1
ESLN,S,0
TYPE,31
ESURF
ESEL,R,TYPE,,31
SFE,ALL,,CONV,0,alfaplate
SFE,ALL,,CONV,2,Traff
ALLSEL,ALL

```

```

!Circuito di raffreddamento puntali
ET,32,SURF152
KEYOPT,32,8,2
alfapun=15825
! [W/m^2°C]
ASEL,S,,,440,442,1
ASEL,A,,,447,449,1
NSLA,S,1
ESLN,S,0
TYPE,32
ESURF
ESEL,R,TYPE,,32
SFE,ALL,,CONV,0,alfapun
SFE,ALL,,CONV,2,Traff
ALLSEL,ALL

!Circuito di raffreddamento
flange_vat_caff
ET,33,SURF152
KEYOPT,33,8,2
alfaflange=8765
! [W/m^2°C]
ASEL,S,,,389,394,1
NSLA,S,1
ESLN,S,0
TYPE,33
ESURF
ESEL,R,TYPE,,33
SFE,ALL,,CONV,0,alfaflange
SFE,ALL,,CONV,2,Traff
ALLSEL,ALL

!-----
!CONVEZIONE NATURALE
!-----

!Cover e plate
ET,20,SURF152
KEYOPT,20,8,2
alfa=10
! [W/m^2°C]
ASEL,S,AREA,,40
!cover
ASEL,A,AREA,,43
ASEL,A,AREA,,333
ASEL,A,AREA,,418
!plate
ASEL,A,AREA,,50
ASEL,A,AREA,,51
NSLA,S,1
ESLN,S,0
TYPE,20
ESURF
ESEL,R,TYPE,,20
SFE,ALL,,CONV,0,alfa
SFE,ALL,,CONV,2,Traff
ALLSEL,ALL

!Canale fascio
ET,21,SURF152
KEYOPT,21,8,2
alfa=10
! [W/m^2°C]
ASEL,S,AREA,,413,414,1
!tube_dn63

```

```

ASEL,A,AREA,,6
!cf_dn63_b
ASEL,A,AREA,,407,408,1
ASEL,A,AREA,,12
!conic_entrance
ASEL,A,AREA,,401,405,1
ASEL,A,AREA,,44,46,1
!flange_vat_caff
ASEL,A,AREA,,49
ASEL,A,AREA,,35,38,1
!prt0001
ASEL,A,AREA,,378,382,1
ASEL,A,AREA,,376
ASEL,A,AREA,,25,27,1
!flange_cover
ASEL,A,AREA,,354,356,1
ASEL,A,AREA,,21,22,1
NSLA,S,1
ESLN,S,0
TYPE,21
ESURF
ESEL,R,TYPE,,21
SFE,ALL,,CONV,0,alfa
SFE,ALL,,CONV,2,Traff
ALLSEL,ALL

!St_cr30_001b
ET,22,SURF152
KEYOPT,22,8,2
alfa=10
! [W/m^2°C]
ASEL,S,AREA,,16
ASEL,A,AREA,,338,341,1
ASEL,A,AREA,,19
NSLA,S,1
ESLN,S,0
TYPE,22
ESURF
ESEL,R,TYPE,,22
SFE,ALL,,CONV,0,alfa
SFE,ALL,,CONV,2,Traff
ALLSEL,ALL

!-----
!CARICO DI POTENZA SU FARADAY CUP
!-----

sigma=7/1000
!sigma fascio
media=11/1000
r_max=35/1000
!raggio massimo di
deposizione di potenza
potenza=9730
!potenza
ndr=36
!numero divisioni
radiali
!spes=9.73/1000
!spessore
ndtet=64
!numero di
divisioni circolari (poi
sparisce)
drtoll=1E-4
!tolleranza per
fermare il fascio

```

```

!-----
-----
!OTTENGO IL PROFILO DI POTENZA
WOBBLERATO
*DIM,integ,ARRAY,ndr,ndtet,1
*DIM,potrar,ARRAY,ndr,1,1
*DIM,potr1,TABLE,ndr+1,1,1,X,,,15
*DIM,potr2,TABLE,ndr+1,1,1,X,,,15
*DIM,potr3,TABLE,ndr+1,1,1,X,,,15
*DIM,potr4,TABLE,ndr+1,1,1,X,,,15
*DIM,rr,ARRAY,ndr+1,1,1

*DO,i,1,ndr
  ri=r_max/(ndr-1)*(i-1)
  rr(i)=ri
  *DO,j,1,ndtet
    ti=2*pi/(ndtet)*(j-1)
    xx=ri*cos(ti)
    yy=ri*sin(ti)

    integ(i,j)=potenza/(2*pi*sigma
**2)*exp(-(xx-
media)**2+yy**2)/(2*sigma**2)

    potrar(i)=potrar(i)+integ(i,j)
  *ENDDO
  potrar(i)=potrar(i)/ndtet
*ENDDO
rr(ndr+1)=r_max+drtoll

!effettuo l'integrale nel cerchio di
raggio r_max
dr=r_max/(ndr-1)
integpot=0
*DO,i,1,ndr
  integpot=integpot+potrar(i)*dr
*rr(i)
*ENDDO
integpot=integpot*2*pi

!NORMALIZZO LA POTENZA IN MODO DA
AVERE IN r_max LA POTENZA "Potenza"
!TOLGO QUI LO SPESSORE
*DO,i,1,ndr
  potrar(i)=potrar(i)/integpot*p
otenza
*ENDDO

!SCRIVO GLI ARRAY
*DO,i,1,ndr
  potrl(i,0)=r_max/(ndr-1)*(i-1)
  potrl(i,1)=potrar(i)
*ENDDO
potrl(ndr+1,0)=r_max+drtoll
potrl(ndr+1,1)=0

*DO,i,1,ndr
  potrl(i,0)=r_max/(ndr-1)*(i-1)
  potrl(i,1)=potrar(i)*SIN(angol
o1/180*pi)
*ENDDO
potrl(ndr+1,0)=r_max+drtoll
potrl(ndr+1,1)=0

*DO,i,1,ndr
  potrl(i,0)=r_max/(ndr-1)*(i-1)
  potrl(i,1)=potrar(i)*SIN(angol
o2/180*pi)
*ENDDO
potrl(ndr+1,0)=r_max+drtoll
potrl(ndr+1,1)=0

ASEL,S,AREA,,691
SFA,ALL,,HFLUX,%potrl%
!FC1

ASEL,S,AREA,,689,690,1
SFA,ALL,,HFLUX,%potr2%
!FC1

ASEL,S,AREA,,681,682,1
SFA,ALL,,HFLUX,%potr3%
!FC2

ASEL,S,AREA,,679,680,1
SFA,ALL,,HFLUX,%potr4%
!FC2

ALLSEL,ALL

!-----
!SOLUTION
!-----

/SOLU
SOLCONTROL,ON
ANTYPE,TRANS
AUTOTS,ON
KBC,1
DELTIM,0.001,0.0001,2000
TIME,10000

VPLOT

SAVE,,,,ALL

SOLVE

FINISH

SAVE

```

## A.2 Comandi APDL utilizzati per l'analisi termo-elettrica dei provini in grafite

```

/PREP7                                MPDATA,KXX,aisi, 1, 14.39, 14.76,
FINISH                                14.89
/CLEAR,ALL                            MPDATA,KXX,aisi, 4, 15.79, 16.61
/CONFIG,NRES,1000000
/TITLE, electrical analysis           !DENSITA'
                                       MP,DENS,aisi,7940

/PREP7

!-----
!PARAMETRI PER LA GEOMETRIA
dp=6/1000 !diametro provino          K,1,0,0,0
lp=16/1000 !lunghezza provino        K,2,dp/2,0,0
larp=8/1000 !lunghezza del tratto a   K,3,dp/2,lp/2,0
clessidra                                     K,4,0,lp/2,0
dris=4/1000 !diametro della           K,5,0,lp/2+lta,0
sezione ristretta                             K,6,da/2,lp/2+lta,0
da=26/1000 !lunghezza albero         K,7,da/2,lp/2,0
lta=20/1000 !lunghezza albero        K,8,da/2,lp/2+lta+lac,0
tantalio                                       K,9,0,lp/2+lta+lac,0
lac=200/1000 !lunghezza albero       K,10,dp/2,larp/2,0
acciaio                                       K,11,dris/2,0,0

I=200 !intensità di corrente         L,1,11
applicata                                     L,10,3
Lmis=2/1000 !lunghezza della zona di  L,3,4
misura                                       L,4,1
                                       L,3,7
rcle=((dp-dris)**2+larp**2)/(4*(dp-    L,7,6
dris)) !raggio                         L,6,5
della clessidra                             L,5,4
                                       L,6,8
!termoelectric                             L,8,9
ET,1,PLANE223                               L,9,5
KEYOPT,1,1,110                             LARC,11,10,2,rcle
KEYOPT,1,3,1                                AL,1,12,2,3,4
                                       AL,3,5,6,7,8
                                       AL,7,9,10,11

!!termica
!ET,1,PLANE230                             MSHAPE,0,2D
!KEYOPT,1,3,1                             MSHKEY,0
                                       TYPE,1
*USE,M26Ta.mac                             MAT,C_EDM3
!emissività tantalio                       ESIZE,0.0001
emTa=0.5                                    AMESH,1

*USE,M10C_EDM3.mac                         MAT,Ta
                                       ESIZE,0.001
                                       AMESH,2

!-----
!PROPRIETA' AISI304L
aisi=1                                       MAT,aisi
!CONDUTTIVITA' ELETTRICA                  ESIZE,0.002
!http://dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/    AMESH,3
a129160.pdf PAG.25, AISI304L
MPTEMP, 1, -0.15, 19.85, 26.85           !CONDIZIONI AL CONTORNO
MPTEMP, 4, 76.85, 126.85                 DL,1,,VOLT,0
MPDATA,RSVX,aisi, 1, 6.96E-7, 7.13E-7   FK,5,AMPS,I
7, 7.19E-7                                !LSEL,S,LINE,,1,2 !PER CONTROLLO
MPDATA,RSVX,aisi, 4, 7.60E-7, 7.98E-7   SIMULAZIONE PROVINO LISCIO
7                                           !LSEL,S,LINE,,1
!emissività acciaio                       !NSLL,S,1
emaisi=0.2                                !CP,1,VOLT,ALL

!CONDUTTIVITA' TERMICA                     ALLSEL,ALL
!http://dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/
a129160.pdf PAG.25, AISI304L
MPTEMP, 1, -0.15, 19.85, 26.85
MPTEMP, 4, 76.85, 126.85
!-----
!IRRAGGIAMENTO TOTALE
!-----

```

```
TUNIF,25
RADOPT,,0.001,0,10000,,0.5
HEMIOPT,100
SPCTEMP,1,25
STEF,5.67e-8
TOFFST,273.15
V2DOPT,1
```

```
ALLSEL,ALL
```

```
!emissività acciaio
LSEL,S,LINE,,9
SFL,ALL,RDSF,emaisi,,1
ALLSEL,ALL
```

```
!emissività tantalio
LSEL,S,LINE,,5,6
SFL,ALL,RDSF,-Ta,,1
```

```
ALLSEL,ALL
```

```
!emissività grafite
LSEL,S,LINE,,2
LSEL,A,LINE,,12
SFL,ALL,RDSF,-C_EDM3,,1
ALLSEL,ALL
```

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



## APPENDICE B

### Confronto numerico-sperimentale della temperatura massima e del potenziale ai capi del provino

Utilizzando il codice APDL riportato all'Appendice A, è stato possibile valutare la distribuzione di temperatura nei provini durante il riscaldamento. Si riporta di seguito il confronto tra la massima temperatura ottenuta dall'analisi termo-elettrica e quella sperimentale, misurata durante i test.

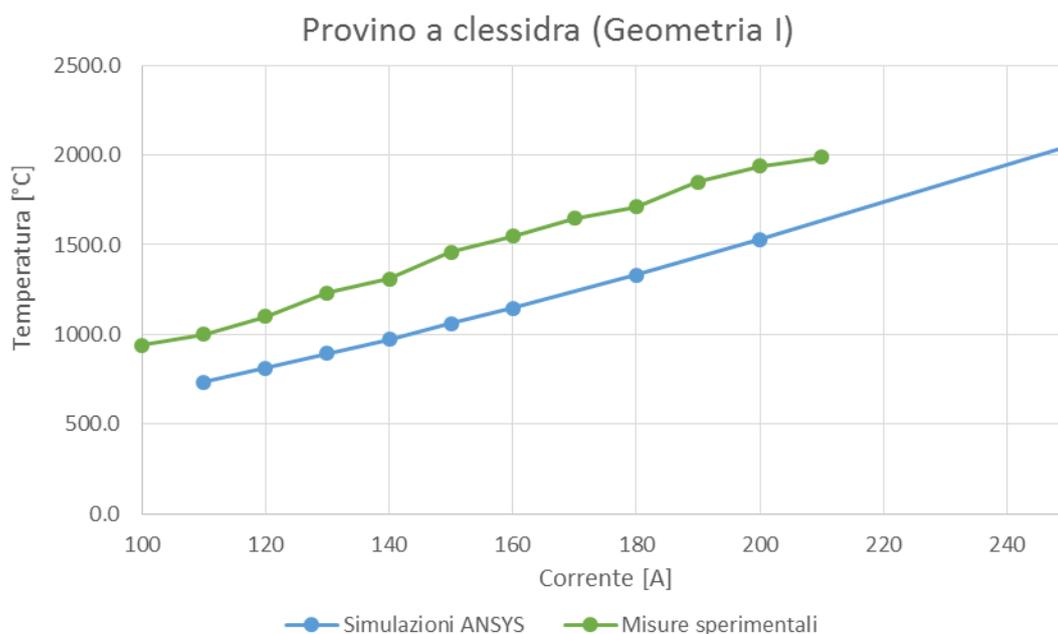


Figura B. 1 Confronto tra le temperature massime ottenute dalle analisi termo-elettriche e misurate sperimentalmente per un provino a clessidra (Geometria I).

Dal confronto dei dati relativi al provino a clessidra risultano evidenti importanti discordanze: ciò è probabilmente dovuto a problemi di contatto. La differenza tra i valori sembra diminuire nel caso di provini cilindrici.

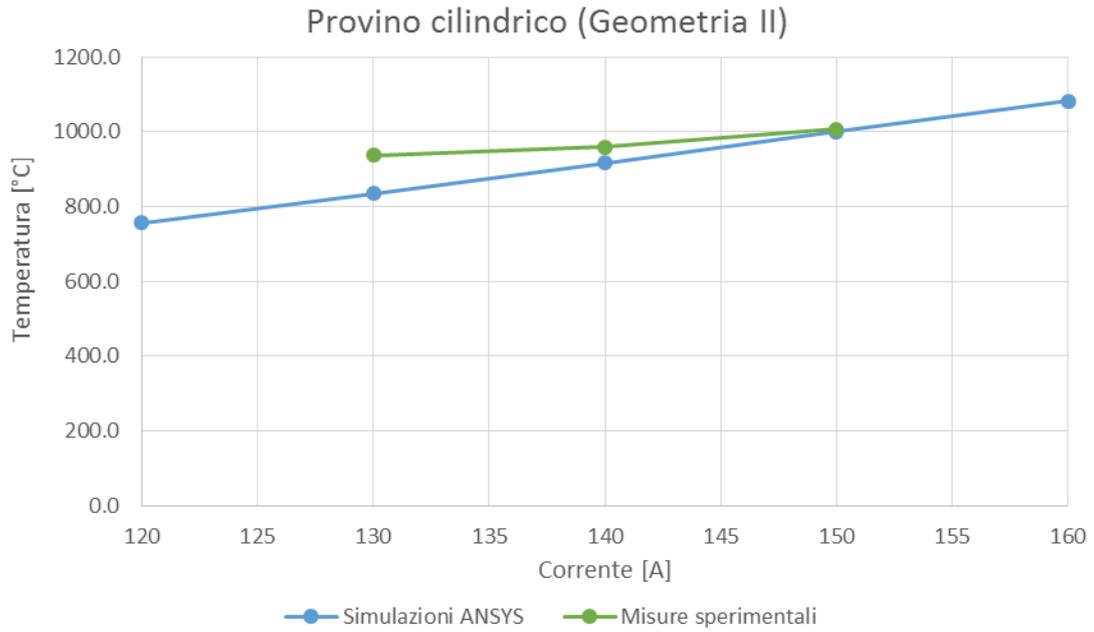


Figura B. 2 Confronto tra le temperature massime ottenute dalle analisi termo-elettriche e misurate sperimentalmente per un provino cilindrico (Geometria II).

Risulta interessante confrontare anche la differenza di potenziale ai capi del provino. In particolare, si considera un provino a clessidra (Geometria I).

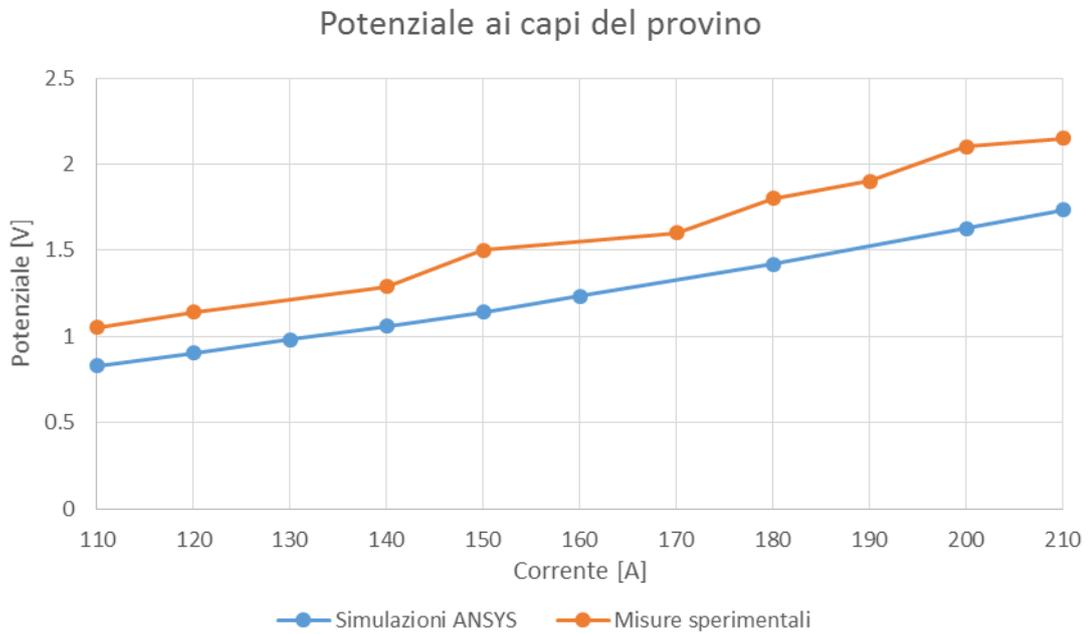


Figura B. 3 Confronto tra il potenziale ai capi del provino ottenuto dalle analisi termo-elettriche e misurate sperimentalmente per un provino a clessidra (Geometria I).

## APPENDICE C

### Proprietà della grafite POCO EDM-3

Viene di seguito riportata la macro della grafite POCO EDM-3, utilizzata durante le simulazioni. La macro consente di introdurre all'interno del codice APDL le proprietà del materiale considerato. Viene quindi riportata la guida di selezione fornita dall'azienda, con le principali proprietà

```
!-----
!EDM-3 graphite
!Composition: isotropic ultrafine grain graphite

!-----
!Version 1.0 (May 2015) by
!Fabio D'Agostini
!University of Padova
!Master's Thesis Work at INFN - LNL
!-----
!
!Ver. 1.0 - May 2015
!-----

/prep7
!
C_EDM3=10          !Material number in the ANSYS library
MPDELE,all,C_EDM3
!

!-----
!ELECTRICAL RESISTIVITY
!
!NOTE 1 - Data are taken from:
! Properties and Characteristics of Graphite for the EDM Industry, Poco Graphite,
! Decatur, 2002.
!
!NOTE 2 - The S.I. system of units is used.
!-----

!Temperature table [°C]
MPTEMP ! erase previous table
MPTEMP,      1,      12.4,      157.5,      206.2,
MPTEMP,      4,      265.9,      314.9,      391.2,
MPTEMP,      7,      440.3,      555.1,      615.4,
MPTEMP,     10,      719.4,      889.4,      977.1,
MPTEMP,     13,     1015.5,     1114.3,     1174.7,
MPTEMP,     16,     1262.6,     1339.5,     1405.5,
MPTEMP,     19,     1465.9,     1553.9,     1608.8,
MPTEMP,     22,     1707.8,     1762.8,     1856.2,
MPTEMP,     25,     1911.2,     2004.6,     2109.0,
MPTEMP,     28,     2202.4,     2251.9,     2312.4,

!Electrical resistivity table [ohm m]
MPDATA,RSVX , C_EDM3 , 1, 1.318E-05, 1.081E-05, 1.032E-05,
MPDATA,RSVX , C_EDM3 , 4, 9.861E-06, 9.550E-06, 9.181E-06,
MPDATA,RSVX , C_EDM3 , 7, 9.006E-06, 8.754E-06, 8.676E-06,
MPDATA,RSVX , C_EDM3 , 10, 8.579E-06, 8.579E-06, 8.618E-06,
MPDATA,RSVX , C_EDM3 , 13, 8.638E-06, 8.735E-06, 8.812E-06,
MPDATA,RSVX , C_EDM3 , 16, 8.948E-06, 9.084E-06, 9.206E-06,
```

```

MPDATA,RSVX , C_EDM3 , 19, 9.317E-06, 9.511E-06, 9.627E-06,
MPDATA,RSVX , C_EDM3 , 22, 9.860E-06, 9.977E-06, 1.017E-05,
MPDATA,RSVX , C_EDM3 , 25, 1.029E-05, 1.044E-05, 1.062E-05,
MPDATA,RSVX , C_EDM3 , 28, 1.081E-05, 1.091E-05, 1.106E-05,

```

!-----

!THERMAL CONDUCTIVITY

!

!NOTE 1 - Data are taken from:

! Properties and Characteristics of Graphite for the EDM Industry, Poco Graphite, Decatur, 2002.

!

!NOTE 2 - Data are valid for all POCO "Ultrafine" graphite (average grain size <=5µm).

!

!NOTE 3 - Above 1653.1°C data refer to POCO AXM-5Q (average grain size =5µm) and are taken from:

! Taylor, R. E., & Groot, H. Thermophysical Properties of POCO Graphite. (West Lafayette, Indiana: Purdue University, July 1978. [NTIS No.ADA060419]), p.16.

!

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

!

!-----

!Temperature table [°C]

MPTEMP ! erase previous table

MPTEMP,	1,	25.9,	39.3,	66.2,
MPTEMP,	4,	126.7,	207.6,	298.8,
MPTEMP,	7,	393.3,	508.2,	623.2,
MPTEMP,	10,	734.8,	843.0,	954.7,
MPTEMP,	13,	1056.3,	1161.2,	1266.1,
MPTEMP,	16,	1377.8,	1486.2,	1581.0,
MPTEMP,	19,	1635.1,	1728.0,	1878.6,
MPTEMP,	22,	1979.8,	2076.9,	2128.5,

!Thermal conductivity table [W/m°C]

MPDATA,KXX , C_EDM3 , 1,	119.027,	116.132,	111.304,
MPDATA,KXX , C_EDM3 , 4,	102.611,	94.876,	89.066,
MPDATA,KXX , C_EDM3 , 7,	81.808,	75.268,	69.932,
MPDATA,KXX , C_EDM3 , 10,	66.043,	61.432,	58.266,
MPDATA,KXX , C_EDM3 , 13,	55.584,	52.4203,	49.256,
MPDATA,KXX , C_EDM3 , 16,	47.536,	45.094,	43.137,
MPDATA,KXX , C_EDM3 , 19,	41.434,	41.32,	40.66,
MPDATA,KXX , C_EDM3 , 22,	39.88,	39.31,	39.12,

!-----

!EMISSIVITY (hemispherical total emittance)

!

!NOTE 1 - Data are taken from:

! Properties and Characteristics of Graphite for the EDM Industry, Poco Graphite, Decatur, 2002.

!

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

!

!-----

!Temperature table [°C]

MPTEMP ! erase previous table

MPTEMP,	1,	1426.85,	1526.85,	1626.85,
MPTEMP,	4,	1726.85,	1826.85,	1926.85,
MPTEMP,	7,	2026.85,	2126.85,	2226.85,
MPTEMP,	10,	2326.85,	2426.85,	2526.85,
MPTEMP,	13,	2626.85,		

!Emissivity table [-]

MPDATA,EMIS , C_EDM3 , 1,	0.833,	0.835,	0.837,
MPDATA,EMIS , C_EDM3 , 4,	0.840,	0.842,	0.844,
MPDATA,EMIS , C_EDM3 , 7,	0.846,	0.849,	0.851,
MPDATA,EMIS , C_EDM3 , 10,	0.853,	0.856,	0.858,
MPDATA,EMIS , C_EDM3 , 13,	0.86,		

!-----

!DENSITY

!

!NOTE 1 - Data are taken from:

! Properties and Characteristics of Graphite for the EDM Industry, Poco Graphite,  
Decatur, 2002.

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

!-----

!Temperature table [°C]  
MPTEMP ! erase previous table  
MPTEMP, 1, 20,

!Density table [kg/m^3]  
MPDATA,DENS , C\_EDM3 , 1, 1810,

!-----

!SPECIFIC HEAT  
!

!NOTE 1 - Data are taken from:  
! Properties and Characteristics of Graphite for the EDM Industry, Poco Graphite,  
Decatur, 2002.

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

!-----

MPTEMP ! erase previous table  
MPTEMP, 1, 25.1, 128.0, 224.8,  
MPTEMP, 4, 327.2, 423.5, 525.6,  
MPTEMP, 7, 627.5, 729.3, 825.1,  
MPTEMP, 10, 926.8, 1028.4, 1130.0,  
MPTEMP, 13, 1225.6, 1327.2, 1428.7,  
MPTEMP, 16, 1530.2, 1631.7, 1727.2,  
MPTEMP, 19, 1828.7, 1930.2, 2031.6,  
MPTEMP, 22, 2133.1, 2228.6, 2330.0,  
MPTEMP, 25, 2431.5, 2527.0, 2628.4,  
MPTEMP, 28, 2729.9,

!Specific heat table [J/kg°C]  
MPDATA,C , C\_EDM3 , 1, 711.332, 956.655, 1184.858,  
MPDATA,C , C\_EDM3 , 4, 1367.325, 1509.815, 1623.712,  
MPDATA,C , C\_EDM3 , 7, 1714.752, 1782.936, 1845.428,  
MPDATA,C , C\_EDM3 , 10, 1896.469, 1936.082, 1969.980,  
MPDATA,C , C\_EDM3 , 13, 1998.188, 2026.373, 2048.842,  
MPDATA,C , C\_EDM3 , 16, 2065.599, 2082.355, 2099.134,  
MPDATA,C , C\_EDM3 , 19, 2115.890, 2126.933, 2137.975,  
MPDATA,C , C\_EDM3 , 22, 2149.017, 2160.082, 2171.124,  
MPDATA,C , C\_EDM3 , 25, 2182.166, 2193.230, 2198.558,  
MPDATA,C , C\_EDM3 , 28, 2209.600,

!-----

!COEFFICIENT OF THERMAL EXPANSION  
!

!NOTE 1 - Data are taken from:  
! Properties and Characteristics of Graphite for the EDM Industry, Poco Graphite,  
Decatur, 2002.

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

!-----

!Temperature table [°C]  
MPTEMP ! erase previous table  
MPTEMP, 1, 100, 200, 300,  
MPTEMP, 4, 400, 500, 600,  
MPTEMP, 7, 700, 800, 901,  
MPTEMP, 10, 1000, 1100, 1200,  
MPTEMP, 13, 1300, 1400, 1500,  
MPTEMP, 16, 1600, 1700, 1800,  
MPTEMP, 19, 1900, 2000, 2100,  
MPTEMP, 22, 2200, 2300, 2400,  
MPTEMP, 25, 2500,

!Secant coefficient of thermal expansion [1/°C]  
MPDATA,ALPX , C\_EDM3 , 1, 7.27E-06, 7.34E-06, 7.44E-06,  
MPDATA,ALPX , C\_EDM3 , 4, 7.51E-06, 7.60E-06, 7.68E-06,  
MPDATA,ALPX , C\_EDM3 , 7, 7.77E-06, 7.86E-06, 7.95E-06,  
MPDATA,ALPX , C\_EDM3 , 10, 8.03E-06, 8.10E-06, 8.20E-06,  
MPDATA,ALPX , C\_EDM3 , 13, 8.29E-06, 8.38E-06, 8.46E-06,

```

MPDATA,ALPX , C_EDM3      , 16,      8.53E-06,      8.62E-06,      8.71E-06,
MPDATA,ALPX , C_EDM3      , 19,      8.79E-06,      8.88E-06,      8.96E-06,
MPDATA,ALPX , C_EDM3      , 22,      9.03E-06,      9.10E-06,      9.20E-06,
MPDATA,ALPX , C_EDM3      , 25,      9.27E-06,

```

```

!-----
!ELASTIC MODULUS
!
!NOTE 1 - Data are taken from:
!   Properties and Characteristics of Graphite for the EDM Industry, Poco Graphite,
!   Decatur, 2002.
!
!NOTE 2 - The S.I. system of units is used.
!-----

```

```

!Temperature table [°C]
MPTEMP ! erase previous table
MPTEMP,      1,      20.,

!Elastic modulus [Pa]
MPDATA,EX , C_EDM3      , 1,      1.03E+10,

```

```

!-----
!POISSON'S RATIO
!
!NOTE 1 - Data are taken from:
!   Seisson, Gabriel, et al. "Dynamic cratering of graphite: Experimental results and
!   simulations." International Journal of Impact Engineering 63 (2014): 18-28.
!
!-----

```

```

!Temperature table [°C]
MPTEMP ! erase previous table
MPTEMP,      1,      20.,

!Poisson's ratio [-]
MPDATA,PRXY , C_EDM3      , 1,      3.0E-01,

```

## **APPENDICE D**

### **Dati della cella di carico HBM U9C-10kN**

In questa appendice viene riportato il prospetto dati della cella di carico U9C-10kN della HBM, utilizzata durante le prove di compressione. Viene quindi riportato il rapporto di taratura fornito dall'azienda.

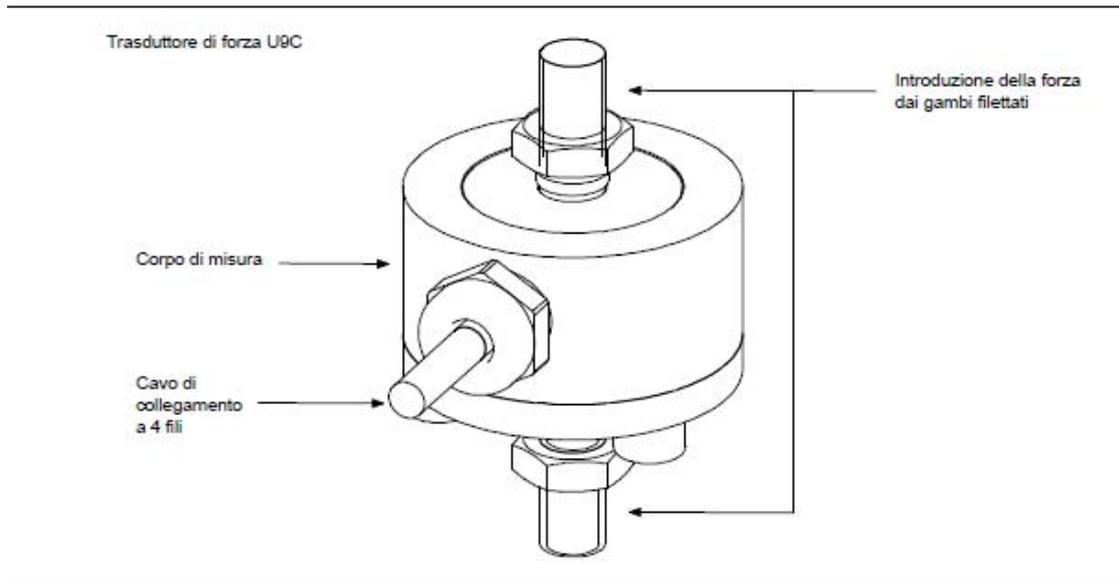


## U9C

Trasduttore di Forza

### Caratteristiche salienti

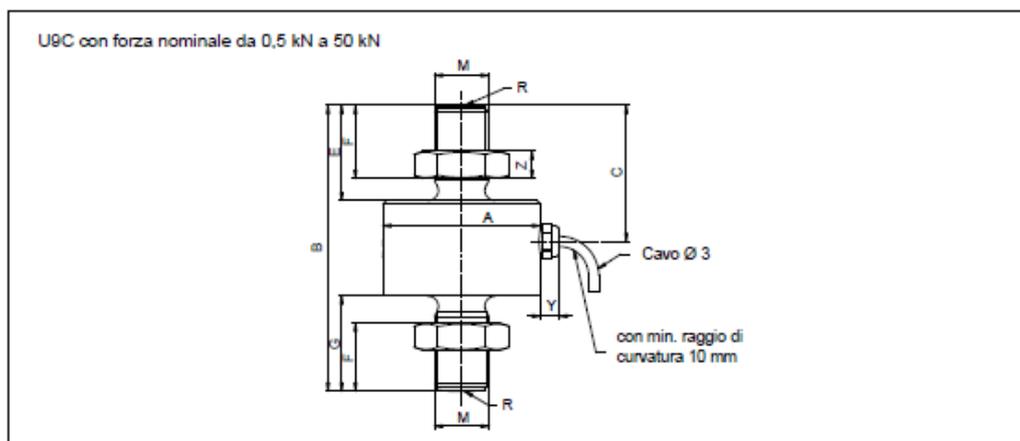
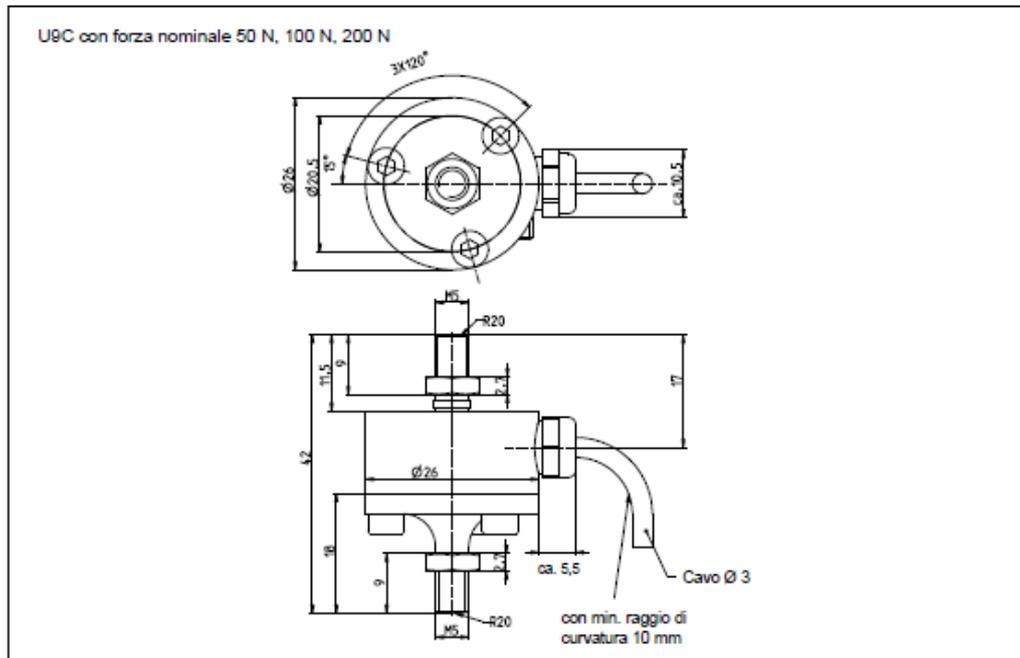
- Trasduttore in trazione-/compressione
- Classe di precisione 0,2
- Forza nominale 50N...50KN
- Acciaio inox, Grado di protezione IP67
- Configurabile con diverse lunghezze del cavo, su richiesta con spina montata e TEDS
- Elevata rigidità, ottimamente idoneo per compiti di misurazione dinamici



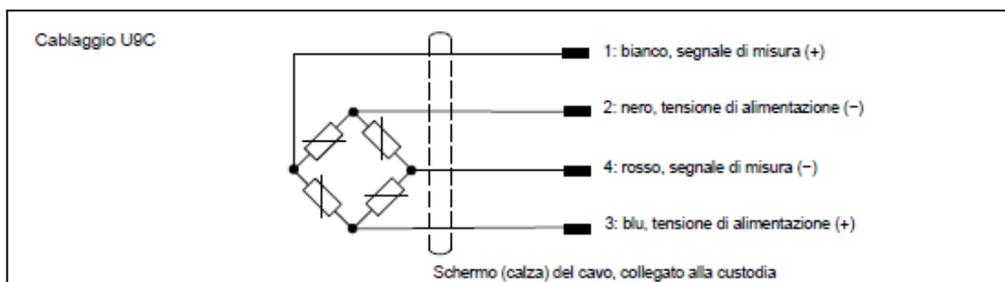
B3811-1.1 it



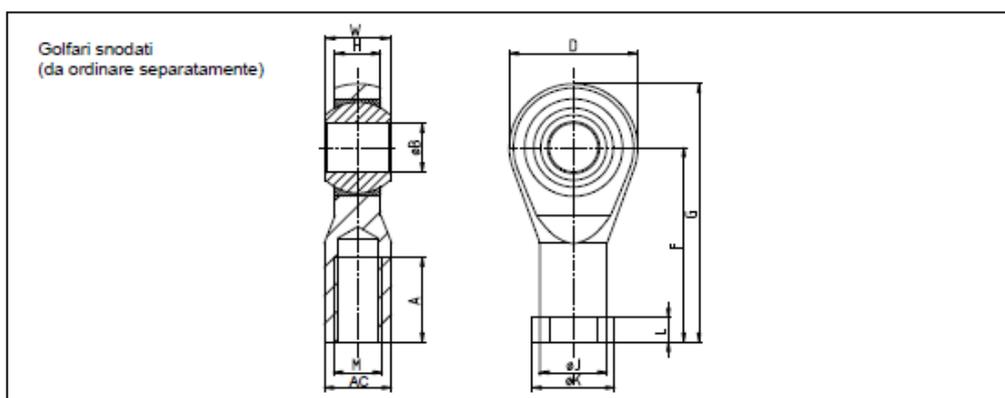
## Dimensioni (in mm)



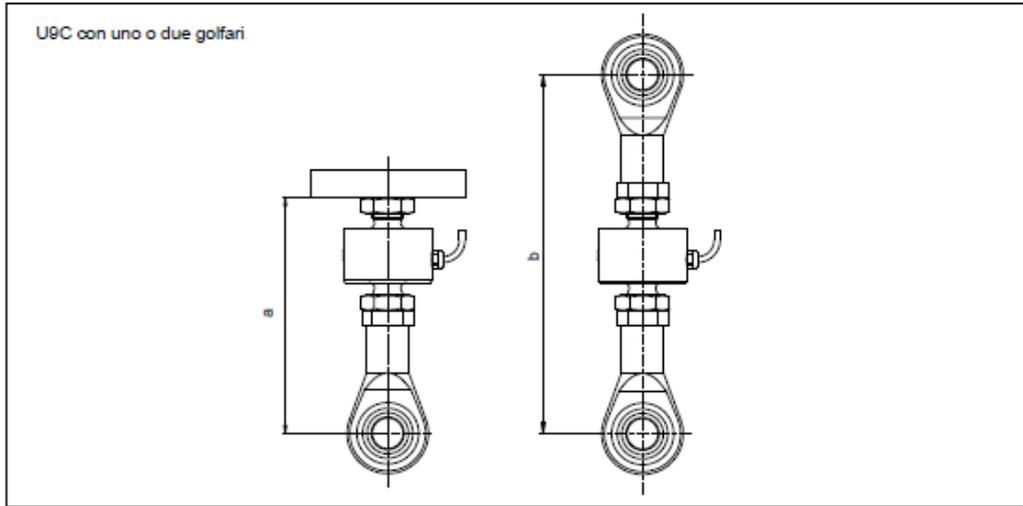
Forza nominale del trasduttore U9C	A <sub>0,1</sub>	B	C	E	F	G	M	R	Y	Z
	[mm]									
da 0,5 kN ad 1 kN	26	44,5	29,5	13	9,9	13,5	M5	20	ca. 5,5	2,7
da 2 kN a 20 kN	26	60	28,5	21	16	21	M10	40	ca. 5,5	5
50 kN	46	84	40	28	21,5	28	M16x1,5	80	ca. 5,5	8



### Accessori per montaggio (dimensioni in mm)



Forza nominale	Numero di Catalogo	A	B <sup>H7</sup>	D	F	G	H	J	K	L	M	AC	W
		[mm]											
da 50 N ad 1 kN	1-Z8/100kg/ZGW	10	5	18	27	36	6	9	11	4	M5	9	8
2 kN ... 20 kN	1-U9/20kN/ZGWR	20	10	28	43	57	10,5	15	19	6,5	M10	17	14
50 kN	1-U9a/50kN/ZGW	28	16	42	64	85	15	22	27	8	M16x1,5	22	21



Forza nominale	$a_{min}$	$a_{max}$	$b_{min}$	$b_{max}$
	[mm]			
50 ... 20 N	55	59	82	86
0,5 ... 1 kN	56	61	83	88
2 ... 20 kN	79	82	122	125
50 kN	116	116	180	180

*Dimensioni di montaggio del trasduttore U9C con i golfari*

## Dati tecnici

Forza nominale	F <sub>nom</sub>	N kN	50	100	200							
						0,5	1	2	5	10	20	50
<b>Precisione</b>												
Classe di precisione			0,2									
Ampiezza relativa per posizione di montaggio invariata	b <sub>10</sub>	%	< 0,2									
Isteresi relativa	v <sub>0,5</sub>	%	< 0,2									
Deviazione della linearità	d <sub>lin</sub>	%	< 0,2									
Scorrimento relativo (a 30 minuti)	d <sub>cr,F</sub>	%	< 0,2			< 0,1						
Effetto del momento flettente al 10% di F <sub>nom</sub> + 10 mm (tipico)	d <sub>mb</sub>	%	0,066	0,045	2,35					2,45	0,5	
<b>Influenza della temperatura sulla sensibilità</b>												
nel campo di temperatura nominale	TK <sub>C</sub>	%/10K	0,2									
nel campo della temperatura di esercizio	TK <sub>C</sub>	%/10K	< 0,5									
<b>Influenza della temperatura sul segnale di zero</b>												
nel campo di temperatura nominale	TK <sub>0</sub>	%/10K	< 0,2									
nel campo della temperatura di esercizio	TK <sub>0</sub>	%/10K	< 0,50									
<b>Valori caratteristici elettrici</b>												
Sensibilità nominale	C <sub>nom</sub>	mV/V	1									
Deviazione relativa del segnale di zero	d <sub>z,0</sub>	mV/V	+/- 0,2									
Deviazione della sensibilità	d <sub>c</sub>	%	< +/-1 trazione, < +/-2 compressione									
Differenza della sensibilità fra trazione e compressione	d <sub>zd</sub>	%	< 2									
Resistenza di ingresso	R <sub>e</sub>	Ω	250 - 400			300 - 450						
Resistenza di uscita	R <sub>o</sub>	Ω	200 - 400			145 - 450						
Resistenza di isolamento	R <sub>i2</sub>	Ω	> 1*10 <sup>9</sup>									
Campo di esercizio della tensione di alimentazione	B <sub>u,gt</sub>	V	0,5...12									
Tensione di alimentazione di riferimento	U <sub>ref</sub>	V	5									
Collegamento			Circuito a 4 fili									
<b>Temperatura</b>												
Temperatura di riferimento	t <sub>ref</sub>	°C	23									
Campo nominale di temperatura	B <sub>t,nom</sub>	°C	-10...+70									
Campo della temperatura di esercizio	B <sub>t,g</sub>	°C	-30...+85									
Campo della temperatura di magazzino	B <sub>t,s</sub>	°C	-30...+85									
<b>Grandezze caratteristiche meccaniche</b>												
Massima forza di esercizio	F <sub>0</sub>		200			150						
Forza limite	F <sub>L</sub>	% di F <sub>nom</sub>	> 200			> 150						
Forza di rottura	F <sub>B</sub>		> 400									
Coppia limite		Nm	1,7	3,4	2,5	3,7	4,5	28	23	11	11	35
Momento flettente limite per carico alla forza nominale		Nm	0,17	0,7	1,5	3,7	3,8	10,2	14,4	8,2	8,6	28,5
Forza laterale statica per carico alla forza nominale <sup>2)</sup>	F <sub>q</sub>	% di F <sub>nom</sub>	100				50	100	50	18	6	8
Deflessione nominale		mm	0,008			0,018		0,03	0,05	0,09	0,14	
Frequenza di risonanza propria		kHz	6,5	9,1	12,6	15,3	15,9	13,2	14,5	14,6	14,6	7,2
Ampiezza di vibrazione relativa		% di F <sub>nom</sub>	70				80				70	
<b>Dati generali</b>												
Grado di protezione secondo EN 60529 <sup>1)</sup>			IP67									
Materiale del corpo elastico			Acciaio									
Massa di riempimento			Silicone									
Cavo			Circuito a 4 fili, Isolamento - PUR									
Lunghezza del cavo		m	1,5; 3; 7; 12									
Peso		g	75			100					400	

<sup>1)</sup> 1 m colonna d'acqua; 0,5 h

<sup>2)</sup> Pura forza laterale senza momento flettente

## Versioni e Numeri di Catalogo

Codice	Campo di misura	Numero di Catalogo
0050	50 N	1-U9C/50N
0100	100 N	1-U9C/100N
0200	200 N	1-U9C/200N
00K5	0,5 kN	1-U9C/0.5KN
01k0	1 kN	1-U9C/1KN
02k0	2 kN	1-U9C/2kN
05k0	5 kN	1-U9C/5kN
10k0	10 kN	1-U9C/10kN
20k0	20 kN	1-U9C/20KN
50k0	50 kN	1-U9C/50KN

I numeri di catalogo in grigio sono i tipi preferenziali di rapida consegna. Tutti i trasduttori di forza con cavo lungo 1,5 m, estremità libera e senza TEDS.

Il No. Cat. dei tipi preferenziali è 1-U9C

Il No. Cat. dei tipi specifici cliente è K-U9C-

L'ulteriore No. Cat. di esempio sotto mostrato K-U9C-05k0-12m0-F-T è un: U9C, forza nominale 5 kN con cavo lungo 12 m, spina Sub-D a 15 poli e TEDS

Lunghezza del cavo	Versione con spina	Identificazione trasduttore
1,5 m 01m5	Estremità libera Y	con TEDS T
3 m 03m0	Spina Sub-D a 15 poli F	senza TEDS S
5 m 05m0	Spina MS3106PEMV N	
6 m 06m0	Spina Sub-HD a 15 poli Q	
7 m 07m0		
12 m 12m0		

K-U9C-	05k0-	12m0-	F-	T
--------	-------	-------	----	---

Tutte le spine si possono montare su cavi di qualsiasi lunghezza.

TEDS si può ordinare solo con l'opzione della spina montata. La combinazione TEDS con cavo ad estremità libera non è possibile.

© HBM Italia srl  
Riserva di modifica Tutti i dati descrivono i nostri prodotti in forma generica. Pertanto essi non costituiscono alcuna garanzia formale e non possono essere la base di alcuna nostra responsabilità.

**HBM Italia srl**

Via Pordenone, 8 - I 20132 Milano - MI - Italy  
Tel.: +39 02 45471616 - Fax: +39 02 45471672  
Email: info@it.hbm.com - www.hbm.com/it



measure and predict with confidence

EG011-1.1.it

# Prüfprotokoll

test record / protocole d'essai



Typ: type / type	U9C	Auftrag: order no / commission	801294625
Nennmessbereich: range / portée	10 kN	Prüfer: examiner / contrôleur	Fink
IdentNr: serial no / N° ident	214710745	Datum: test date / date d'essai	2017-12-08

## Prüfergebnisse:

test results / résultats d'essai

Eingangsgröße des Messbereichs [%] input quantity / échelle d'essai	Ausgangsgröße [mV/V] output quantity / résultats
	Zug tension / traction
0	0.0000
50	-0.5005
100	-1.0018
50	-0.5006
0	-0.0001

## Aus den Prüfergebnissen berechnete messtechnische Kenngrößen:

Metrological characteristic quantities computed from the test results.  
Grandeurs caractéristiques de mesure calculées à partir des résultats d'essai.

Kennwert C [mV/V] sensitivity / sensibilité	-1.0018
Linearitätsabweichung [%vC] linearity deviation / linéarité (Abweichung von der bestpassenden Geraden durch das Nullsignal) (déviation from bestfit through zero / écart par rapport à la meilleure droite passant par le zéro)	-0.027
Relative Umkehrspanne 0,5 Fnom [%vC] relative hysteresis / hystérésis relatif	0.007

Alle aus den Messergebnissen ermittelten Kenngrößen entsprechen den Spezifikationen gemäß Datenblatt.  
All characteristic quantities determined from the measurement results correspond to the specifications per datasheet.  
Toutes les grandeurs caractéristiques obtenues à partir des résultats de mesure correspondent aux spécifications selon les caractéristiques techniques.

## Allgemeine Zusatzinformationen:

general information / informations complémentaires

Alle weiteren messtechnischen Eigenschaften des Aufnehmers sind durch Typprüfungen und laufende Produktaudits des Qualitätswesens abgesichert.  
All other metrological characteristics of the transducer are verified by type testing and regular product audits of the quality department.  
Toutes les autres caractéristiques techniques du capteur sont garanties par le Service Qualité, au moyen d'essais et d'audits suivis sur le produit.

Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Im Tiefen See 45, 64293 Darmstadt, Germany | www.hbm.com  
Registered as GmbH (German limited liability corporation) in the commercial register at the local court of Darmstadt, HRB 1147  
Company domiciled in Darmstadt | CEO: Andreas Hüllhorst | Chairman of the board: Eoghan O'Leary

Zertifiziert nach ISO 9001 und ISO 14001 / ISO 9001 and ISO 14001 certified / Certification selon ISO 9001 et ISO 14001

Nr: 231

HBM: Business document

VB 2/SC-T/11.17

Seite / Page 1 (1)