

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA



FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

TESI DI LAUREA

PROGETTAZIONE ED INGEGNERIZZAZIONE DEL
FRONT-END PROTONICO DEL PROGETTO SPES

Relatore: Dott. Ing. Giovanni Meneghetti

Correlatori: Dott. Alberto Andrichetto
Ing. Alberto Monetti

Laureando: Enrico Boratto

ANNO ACCADEMICO 2014-2015

Alla mia famiglia

INDICE

Sommario	1
1 - Il progetto SPES ai Laboratori Nazionali di Legnaro: produzione ed utilizzo di fasci di ioni esotici	5
1.1 Introduzione	5
1.2 Il progetto SPES	10
1.2.1 L'acceleratore primario	12
1.2.2 La zona di produzione	13
1.2.3 Separatori elettromagnetici e post accelerazione	24
1.3 Applicazione dei fasci di ioni esotici	26
1.3.1 Applicazioni in fisica nucleare	27
1.3.2 Applicazioni in fisica dello stato solido	29
1.3.3 Applicazioni mediche: la Tomografia ad Emissione Positronica	31
1.3.4 Applicazioni in astrofisica	34
1.4 Conclusioni	35
Bibliografia al Capitolo 1	36
2 - Progettazione e verifica termo-strutturale del collimatore	37
2.1 Introduzione	37
2.2 Descrizione del collimatore	37
2.3 Definizione delle condizioni di progetto iniziali	38
2.4 Definizione dei dischi collimatori	39
2.5 Misura delle caratteristiche del fascio	43
2.6 Analisi termica preliminare	45
2.7 Progettazione dettagliata	49
2.7.1 Sistema di raffreddamento	53
2.8 Analisi termica	61
2.9 Analisi strutturale	67

2.9.1	Modello teorico per la definizione degli elementi elastici	73
2.10	Conclusioni	77
	Bibliografia al Capitolo 2	78
3	Test termico sperimentale del collimatore	79
3.1	Introduzione	79
3.2	Descrizione dell'apparato sperimentale	79
3.2.1	Descrizione del forno	80
3.2.2	Progettazione del sistema ohmico resistivo	84
3.3	Fasi preliminari del test sperimentale	91
3.4	Analisi termo-elettrica	94
3.5	Esecuzione del test sperimentale	99
3.6	Conclusioni	107
	Bibliografia al Capitolo 3	109
4	Progettazione e verifica termo-strutturale della Faraday-Cup	111
4.1	Introduzione	111
4.2	Descrizione della Faraday-Cup	111
4.3	Caratteristiche e parametri di progetto della Faraday-Cup	113
4.4	Sistemi di soppressione: l'elettro-soppressore e i magneti permanenti	116
4.5	Progettazione dettagliata della Faraday-Cup	121
4.5.1	Analisi termica preliminare	122
4.5.2	Sistema di raffreddamento della camera	125
4.5.3	Modellazione e analisi termiche	129
4.5.4	Analisi strutturale	137
4.6	Conclusioni	140
	Bibliografia al Capitolo 4	141

5 - Progettazione preliminare del Beam-Profiler	143
5.1 Introduzione	143
5.2 Descrizione del dispositivo	143
5.2.1 Architettura delle sonde	144
5.2.2 Soluzione a filo rotante	147
5.3 Sviluppo di un modello preliminare	150
5.4 Analisi termica	153
5.5 Valutazione della velocità di rotazione del filo	157
5.6 Progettazione dettagliata	163
5.6.1 Definizione preliminare del sistema di movimentazione	163
5.6.2 Definizione del sistema di acquisizione dei segnali	165
5.7 Conclusioni	168
 Bibliografia al Capitolo 5	 169
 6 - Modellazione del Front-End protonico	 171
6.1 Introduzione	171
6.2 Definizione del sistema di supporto	171
6.3 Definizione del sistema di pompaggio	174
6.4 Definizione del sistema di diagnostica	176
6.2.1 Sviluppo della camera raffreddata	176
6.2.2 Sviluppo del sistema di movimentazione della Faraday-Cup	177
6.3 Analisi termica	180
6.4 Modifiche apportate al sistema multi-collimatore	189
6.5 Assemblaggio del Front-End protonico	192
6.5 Conclusioni	195
 Bibliografia al Capitolo 6	 197
 Conclusioni e Sviluppi Futuri	 199
 Appendice A Trattamenti superficiali finalizzati all'incremento dell'emissività globale dei materiali	 201
Appendice B Allestimento del test sperimentale eseguito nel tripletto	237

Appendice C	Determinazione delle dimensioni teoriche per gli alloggiamenti degli anelli di tenuta O-Ring realizzati in indio	243
Appendice D	Porting del pacchetto software Ansys sull'IGI Grid portal	249
Appendice E	Datasheet dei normalizzati commerciali scelti	267
Appendice F	Listati dei comandi impiegati nelle analisi FEM	281
Appendice G	Tavole costruttive dei componenti sviluppati	347
Ringraziamenti		349

SOMMARIO

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

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

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

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

Gli isotopi prodotti vengono estratti dalla scatola grazie alla linea di trasferimento; attraverso tale dispositivo le particelle vengono indirizzate verso la sorgente di ionizzazione (*ion source*) dove avviene il processo di ionizzazione (ioni I^+). La scelta della sorgente di ionizzazione è di fondamentale importanza, in quanto il suo funzionamento influenza l'intensità e la qualità del fascio radioattivo.

A seconda del tipo di elemento, di cui si vuole produrre il fascio, vengono impiegate sorgenti di ionizzazioni differenti; in particolare si possono avere: sorgenti con ionizzazione superficiale, sorgenti laser (RILIS), sorgenti al plasma (FEBIAD) o la sorgente ECR (*Electron Cyclotron Resonance*). Gli ioni prodotti dalla sorgente di ionizzazione vengono accelerati da un elettrodo estrattore (*electrode*), realizzato in lega di titanio; il quale viene mantenuto ad una differenza di potenziale di 60 kV rispetto alla sorgente. Lo studio della distribuzione di temperatura e delle deformazioni termiche presenti nei componenti che costituiscono il *target*, la linea di trasferimento, la sorgente di ionizzazione e l'elettrodo estrattore è assai complesso. Per tale motivo i Laboratori Nazionali di Legnaro hanno avviato delle strette collaborazioni con l'ENEA (Bologna), i Dipartimenti di Ingegneria Meccanica e di Scienze Chimiche dell'Università degli Studi di Padova, il CERN (Svizzera) ed i Laboratori di Oak Ridge (USA).

In questo elaborato vengono descritte le fasi seguite per lo sviluppo del Front-End protonico del progetto SPES. Questo sistema, adibito al trasporto e al controllo del fascio protonico, permette di conformare il fascio secondo le specifiche richieste e nel contempo permette di rilevare le caratteristiche dello stesso mediante dispositivi di collimazione e strumenti di diagnostica opportunamente definiti e verificati. Per poter fare questo ci si appoggia a dei metodi numerici; in particolare si fa riferimento al metodo degli Elementi Finiti ed al codice di calcolo Ansys® Release 15.0 (con il quale si sono effettuate tutte le analisi esposte nel presente lavoro). La tesi si sviluppa in sei capitoli, il cui contenuto viene di seguito brevemente riassunto:

- **Capitolo 1** Nella prima parte ci si sofferma nella descrizione della metodologia ISOL per la produzione di fasci di ioni radioattivi. Successivamente, si passa ad illustrare le principali caratteristiche del progetto SPES, in fase di sviluppo presso i Laboratori Nazionali di Legnaro. Infine, vengono elencate le principali applicazioni dei fasci di ioni radioattivi nei campi di interesse della fisica nucleare, dell'astrofisica, della scienza dei materiali e della medicina.

- **Capitolo 2** Nel presente capitolo si descrive il sistema multi-collimatore e se ne introduce il principio di funzionamento. In riferimento alle caratteristiche del fascio protonico di riferimento, viene sviluppato un sistema capace di rispondere alle specifiche condizioni operative richieste. Vengono riportate le fasi di modellazione del sistema eseguite nel corso della progettazione dettagliata, con riguardo alle problematiche esistenti; in particolare viene descritta la procedura di dimensionamento del sistema di raffreddamento che si vuole realizzare nella camera. Quindi vengono effettuati alcuni studi, impiegando il metodo degli Elementi Finiti, per la valutazione del comportamento termico e strutturale del sistema, al fine di evidenziare le criticità presenti.
- **Capitolo 3** Viene descritto il test sperimentale del petalo che costituisce il quarto disco del sistema multi-collimatore, condotto in un opportuno apparato sperimentale (sviluppato presso i Laboratori Nazionali di Legnaro). Le misure sperimentali sono necessarie per convalidare i risultati ottenuti nelle analisi FEM svolte, al fine di verificare il comportamento termico e strutturale dell'elemento, simulando le reali condizioni operative dell'elemento.
- **Capitolo 4** In questo capitolo viene descritta la Faraday Cup e se ne introduce il principio di funzionamento, facendo riferimento ad alcune tipologie già esistenti. In riferimento alle caratteristiche del fascio protonico di riferimento, viene sviluppato un sistema capace di rispondere alle specifiche condizioni operative richieste. Sulla base di modelli semplificati vengono effettuati alcuni studi preliminari, impiegando il metodo degli Elementi Finiti, per la valutazione del comportamento termico e strutturale. Vengono riportate le fasi di modellazione del sistema eseguite nel corso della progettazione dettagliata, con riguardo alle problematiche esistenti. Inoltre viene dimensionato un sistema di raffreddamento sulla camera capace di smaltire la potenza termica generata
- **Capitolo 5** In questo capitolo viene descritta la progettazione preliminare del Beam Profiler. Dopo aver descritto il funzionamento del dispositivo, in riferimento alle caratteristiche del fascio protonico di riferimento, viene sviluppato un sistema capace di rispondere alle specifiche condizioni operative richieste. Sulla base di un modello semplificato vengono effettuati alcune analisi termiche per la valutazione delle criticità esistenti e dei parametri funzionali.

- **Capitolo 6** In questo capitolo si propone la modellazione del Front-End protonico comprensivo di tutti i dispositivi sviluppati e descritti nei capitoli precedenti. La progettazione viene fatta con riguardo alle problematiche legate agli ingombri e ai vincoli di carattere geometrico riscontrati nelle operazioni di assemblaggio. Inoltre viene definita la camera di diagnostica che vede la presenza contemporanea della Faraday-Cup e del Beam-Profilers; quindi vengono condotte ulteriori analisi, impiegando il metodo degli Elementi Finiti, per la valutazione del comportamento termico complessivo. La modellazione dell'intero apparato viene eseguita con l'applicativo PTC-Creo®.

CAPITOLO 1

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

1.1 Introduzione

L'atomo è la struttura elementare nel quale è normalmente organizzata la materia; in esso la maggior parte della massa (più del 99,9%) è rappresentata dal nucleo, il quale ne occupa la parte centrale e determina, attraverso la sua carica elettrica, la natura chimica dell'elemento (Figura 1.1).

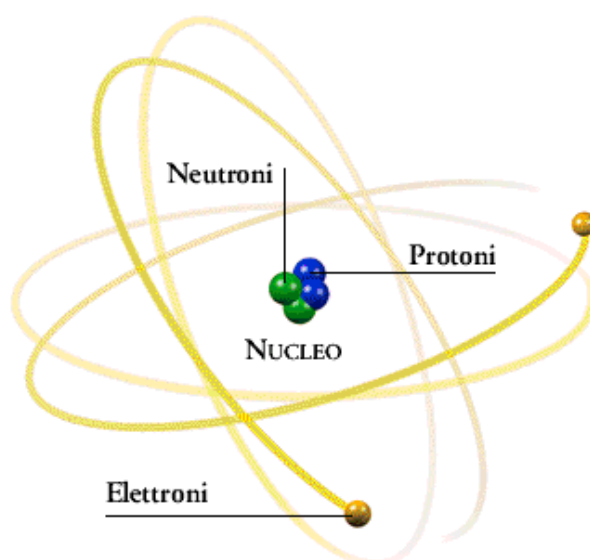


Figura 1.1: Schematizzazione dell'atomo

I nuclei a loro volta sono entità composite costituite da protoni (particelle a carica positiva) e neutroni (particelle elettricamente neutre), chiamati entrambi nucleoni ed aventi massa circa 1800 volte più grande degli elettroni [1].

Tra questi si instaura una forza attrattiva a corto raggio molto intensa, che garantisce la stabilità del nucleo chiamata interazione forte; essa è una delle quattro interazioni fondamentali conosciute, si manifesta tra i nucleoni con efficacia a distanze inferiori alle dimensioni nucleari e bilancia la repulsione elettrostatica tra i protoni carichi positivamente. L'interazione forte vincola però il moto dei nucleoni attorno alla massa nucleare centrale a causa della sua notevole intensità, pertanto la rottura del nucleo richiede molta energia.

La fisica nucleare è la branca della fisica che studia il nucleo atomico nei suoi costituenti e le loro interazioni. I nuclei stabili possiedono, approssimativamente, ugual numero di neutroni e di protoni [2], e costituiscono la cosiddetta “valle di stabilità” nella carta dei nuclidi (vedi Figura 1.2); il motivo fondamentale della maggiore stabilità dei nuclei con numero di protoni uguale al numero di neutroni è da ricercarsi nel fatto che l’interazione neutrone-protone è leggermente più intensa rispetto alle interazioni protone-protone e neutrone-neutrone. Per nuclei con numero di massa $A \geq 40$ (si ricorda che $A=Z+N$, con Z numero di protoni ed N numero di neutroni), la forza coulombiana sposta la linea di stabilità lontano dalla retta in cui giacciono i nuclei con numero di protoni uguale al numero di neutroni, verso nuclei ricchi di neutroni (che essendo privi di carica, non alimentano la forza repulsiva elettrostatica); come se non bastasse, la forza coulombiana limita pure l’esistenza di elementi super pesanti, dato che il corto raggio di azione della forza nucleare forte non permette un’efficace opposizione alla forza elettrostatica, agente invece a più lungo raggio.

I nuclei con eccesso o difetto di neutroni, e quindi lontani dalla valle di stabilità, sono radioattivi e decadono con emissione di particelle (alfa, beta, neutrini...) e raggi γ . Tali nuclei instabili vengono comunemente chiamati “esotici” ed al momento circa 2000 di essi sono stati prodotti e caratterizzati in laboratori di ricerca di tutto il mondo. Calcoli teorici prevedono tuttavia l’esistenza di un numero di nuclei esotici molto più elevato (più di 6000), cosicché è possibile che un gran numero di essi sia presente nella cosiddetta “terra incognita”, che comprende la regione ricca di neutroni (*n-rich*) e quella dei nuclei *superpesanti* (SHE, Super Heavy Elements). La stabilità di questi nuclei è una questione fondamentale nella scienza nucleare e recenti studi hanno dimostrato che l'esistenza di nuclei con numero atomico più grande di 102 è interamente affidata agli effetti quantistici che gli specialisti definiscono «di shell».

La carta dei nuclidi, rappresentata in Figura 1.2, individua e classifica i nuclei in base al numero di protoni (Z) e al numero di neutroni (N).

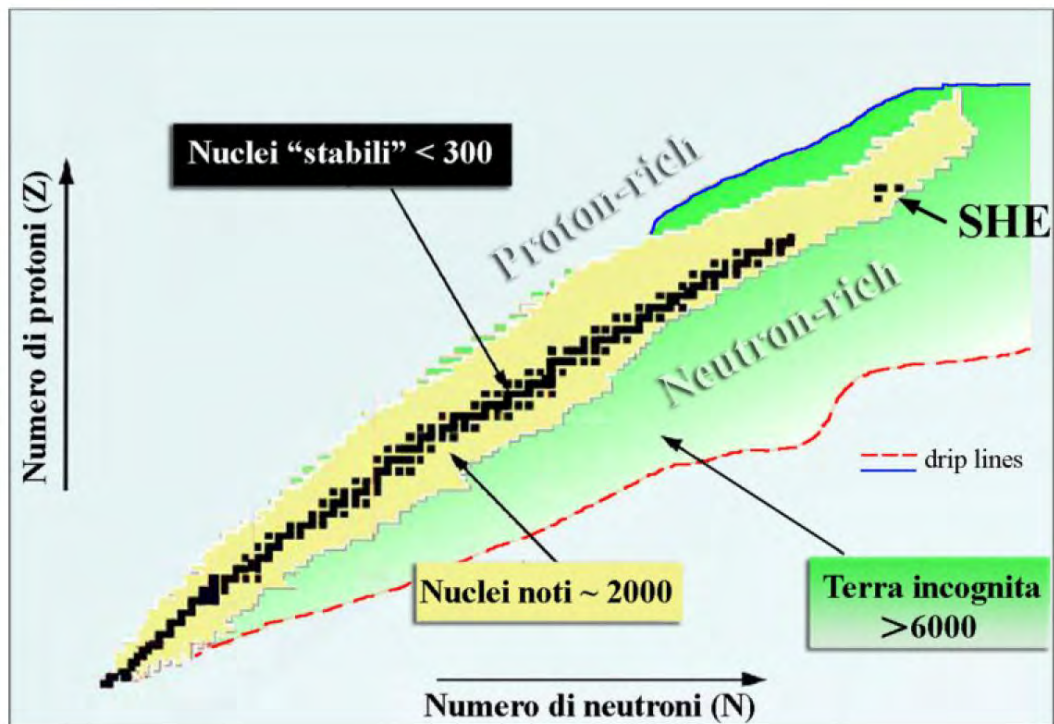


Figura 1.2: Carta dei nuclidi

I nuclei definiti “stabili” (quadrantini neri) sono quelli non radioattivi oppure aventi tempo di decadimento comparabile all'età della terra (o addirittura superiore); la regione di colore giallo è quella dei nuclei artificiali, che possono avere vita più o meno breve a seconda dei casi; aggiungendo neutroni o protoni ad un nucleo ci si allontana dalla valle di stabilità fino a raggiungerne i limiti, detti *drip lines*, caratterizzati da una diminuzione della forza di attrazione tra neutroni e protoni tale da non garantire più la stabilità del nucleo: calcoli teorici hanno dimostrato che al di fuori delle *drip lines* i nuclei emettono nucleoni molto rapidamente per formare nuovi nuclei, con combinazioni di protoni e neutroni tali da poter rientrare nell'area di potenziale stabilità, nella quale l'interazione forte è nuovamente capace di garantire il grado di coesione necessario. La regione indicata in verde, ancora inesplorata, è definita “terra incognita” ed è caratterizzata dalla presenza di nuclei radioattivi con rapporti N/Z molto piccoli o molto grandi; la figura mostra che l'area *proton-rich* è relativamente ben definita teoricamente, mentre quella *neutron-rich* è molto più vasta ed indefinita.

Come vedremo nei paragrafi successivi lo studio dei nuclei instabili, ed in particolare dei nuclei esotici, ha aperto nuovi campi di ricerca in fisica nucleare, ha permesso di confermare precedenti ipotesi di fondamentale importanza ed ha infine suggerito promettenti applicazioni in fisica dello stato solido ed in medicina.

Per l'utilizzo pratico e la produzione di ioni radioattivi di questo tipo è necessaria la costruzione di sistemi acceleratori ed attrezzature (*facilities*) capaci di garantire fasci ionici radioattivi (RIB, *Radioactive Ion Beams*) di elevata purezza, intensità ed energia; sono numerose le *facilities* per la produzione di fasci radioattivi operanti sia in Europa che in altre parti del mondo; la maggior parte di queste sono basate sul metodo ISOL.

La tecnica ISOL (*Isotope Separation On-Line*), schematizzata in Figura 1.3, utilizza la separazione degli isotopi in linea [3]; i principali costituenti di tale tipologia di *facility* sono:

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

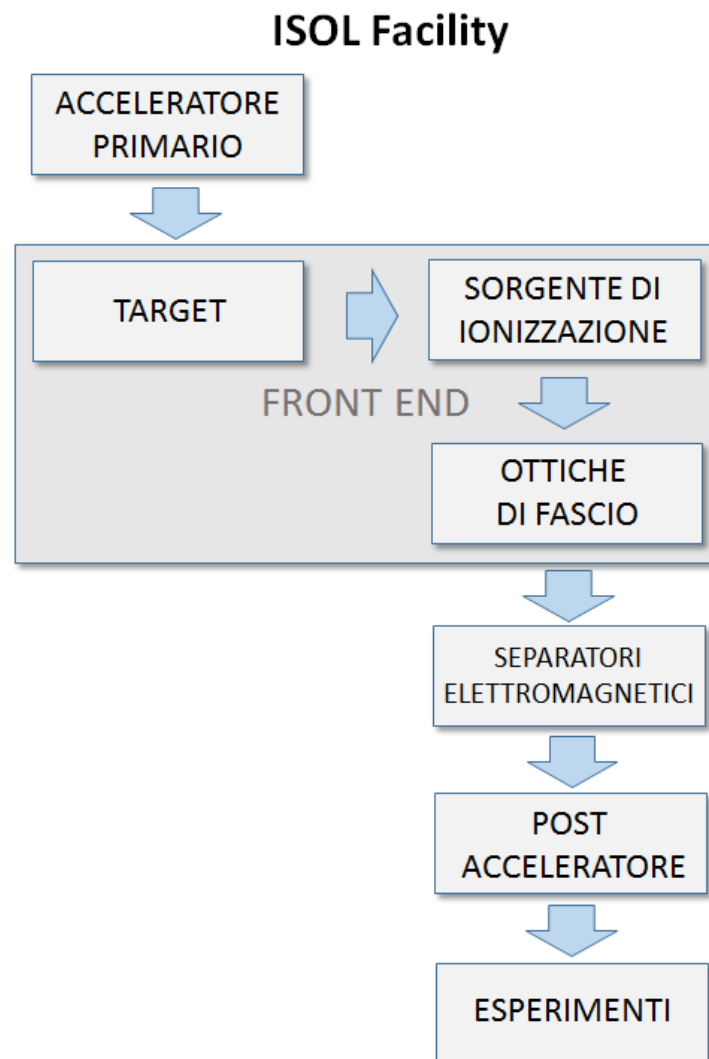


Figura 1.3: Schema di una facility di tipo ISOL per la produzione di fasci di ioni esotici

Un fascio di particelle della voluta energia, proveniente dall'acceleratore primario, viene fatto collidere con un bersaglio (*target*) di materiale fissile; il risultato è la produzione degli isotopi radioattivi tramite reazioni nucleari (fissione, spallazione, frammentazione, ecc...). I radioisotopi prodotti vengono quindi estratti e ionizzati mediante un opportuno sistema, e successivamente accelerati per differenza di potenziale. In particolare il primo stadio di accelerazione avviene nel *front end* che accelera gli ioni e li focalizza. Successivamente una serie di dispositivi elettrostatici permette il trasporto del fascio verso dei separatori elettromagnetici all'interno dei quali il fascio viene opportunamente selezionato e purificato; i separatori sono quindi necessari se si vuole ottenere un fascio chimicamente (elemento) ed isobaricamente (massa) puro. Successivamente, gli ioni vengono post accelerati al livello di energia richiesto dal particolare esperimento.

L'intensità I degli ioni radioattivi prodotti da una facility di tipo ISOL è data dalla seguente relazione (1.1):

$$I = \sigma \cdot \Phi \cdot \tau \cdot \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 \cdot \varepsilon_3 \cdot \varepsilon_4 \quad (1.1)$$

dove:

- σ è la sezione d'urto per le reazioni nucleari d'interesse
- Φ è l'intensità di corrente del fascio primario
- τ è lo spessore sfruttabile del *target*
- ε_1 è l'efficienza della diffusione termica ad alta temperatura dei prodotti di reazione dentro il *target*, del rilascio dalla superficie e della diffusione attraverso la linea di trasferimento dal *target* alla *sorgente*
 - ε_2 è l'efficienza di ionizzazione della *sorgente*
 - ε_3 è l'efficienza di decadimento durante l'intero processo
 - ε_4 è l'efficienza di trasmissione dell'acceleratore finale, del separatore di massa isobarico e delle linee di trasporto sino agli apparati di rivelazione nelle sale sperimentali.

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

I fisici nucleari europei hanno costruito diversi laboratori di grandi dimensioni in varie nazioni della Comunità Europea, al fine di studiare regioni sempre più esotiche della carta dei nuclei, ai limiti della stabilità nucleare. Nella stessa direzione sono orientati anche i Laboratori Nazionali di Legnaro (LNL), nei quali è prevista la costruzione di una *facility* ISOL per la produzione di fasci di ioni esotici: il progetto SPES (*Selective Production of Exotic Species*). Tale programma è coordinato a livello nazionale e prevede la collaborazione tra sei sezioni INFN, l'ENEA (Bologna), i Dipartimenti di Ingegneria Meccanica e di Scienze Chimiche dell'Università degli Studi di Padova e, a livello internazionale, strette collaborazioni con il CERN (Svizzera) ed i Laboratori di Oak Ridge (USA).

1.2 Il progetto SPES

SPES è un progetto multidisciplinare il cui scopo è quello di costruire un apparato sperimentale per la produzione di fasci di ioni radioattivi, il cosiddetto RIB (*Radioactive Ion Beam*), al fine di indagare sui nuclei atomici instabili, oggetto di studio della fisica nucleare, che sono presenti in grandi quantità durante le fasi terminali della vita delle stelle (da cui derivano gran parte degli elementi chimici conosciuti in natura). La maggior parte delle proprietà dei nuclei atomici conosciute oggi derivano dagli studi condotti sui nuclei che si trovano nella cosiddetta *valle di stabilità beta*, oppure da nuclei con carenze di neutroni. Nuclei atomici con combinazioni fortemente asimmetriche di protoni e neutroni si pensa siano in grado di rivelare nuove funzioni della struttura nucleare.

Gli obiettivi del progetto SPES sono suddivisi in 4 aree interdisciplinari distinte:

- **SPES- α** : prevede l'acquisizione, l'installazione e la messa in servizio di un ciclotrone, avente elevata corrente di uscita ($\sim 0,7 \text{ mA}$) ed alta energia erogata (fino a 70 MeV), unitamente alla definizione delle infrastrutture per l'acceleratore e per le stazioni sperimentali. Il ciclotrone sarà dotato di due porte di uscita, una configurazione molto adatta per la duplice missione che si prefigge il progetto, ovvero la ricerca di base e le applicazioni tecnologiche. In particolare uno dei due fasci sarà dedicato alla fisica nucleare (produzione di ioni ricchi di neutroni prodotti dalle collisioni dei protoni su un bersaglio UC_x), mentre la seconda sarà dedicata alla fisica applicata;

- **SPES- β** : prevede lo studio e l'approfondimento di nuove specie prodotte dalle collisioni di elementi ricchi di neutroni accelerati contro opportuni bersagli. Da tali collisioni saranno prodotti nuovi nuclei, estremamente ricchi di neutroni, che sono simili a quelli generati nelle fasi stellari avanzate e che non sono presenti sulla Terra a causa della loro breve vita. L'indagine su tali sistemi è una nuova frontiera della fisica, perché permette di ampliare la nostra conoscenza sui nuclei in condizioni estreme e fornisce un valido contributo alle informazioni di base dello studio dell'evoluzione stellare;
- **SPES- γ** : riguarda la produzione di radionuclidi di interesse medico, che utilizza lo stesso ciclotrone previsto per *SPES- α* . L'obiettivo è la produzione di radiofarmaci innovativi (ad esempio quelli basati sulle combinazioni degli elementi *Sr-82 / Rb-82* e *Ga-68 / Ge-68*), così come la produzione di radionuclidi convenzionali con nuovi approcci che utilizzino l'acceleratore come sorgente.
- **SPES- δ** : prevede lo sviluppo di una fonte di neutroni intensa, che utilizza il ciclotrone e/o un acceleratore lineare ad alta intensità basato sulla tecnologia quadrupolo a radiofrequenza (*RDA*). Applicazioni della sorgente di neutroni gamma ha risvolti notevoli in astrofisica nucleare, per verificare l'elettronica nello spazio, il trattamento dei rifiuti nucleari e in campo medico per i trattamenti sperimentali dei tumori.

La disposizione degli apparati nel nuovo stabile (Figura 1.4) permette di realizzare le due infrastrutture, quella per la produzione del fascio di ioni esotici e la Neutron Facility, oltre a permettere il collegamento alle strutture già esistenti nel complesso dei LNL. Di seguito viene fornita una descrizione dei componenti principali appartenenti alla RIB facility attualmente in fase di costruzione ai Laboratori Nazionali di Legnaro.

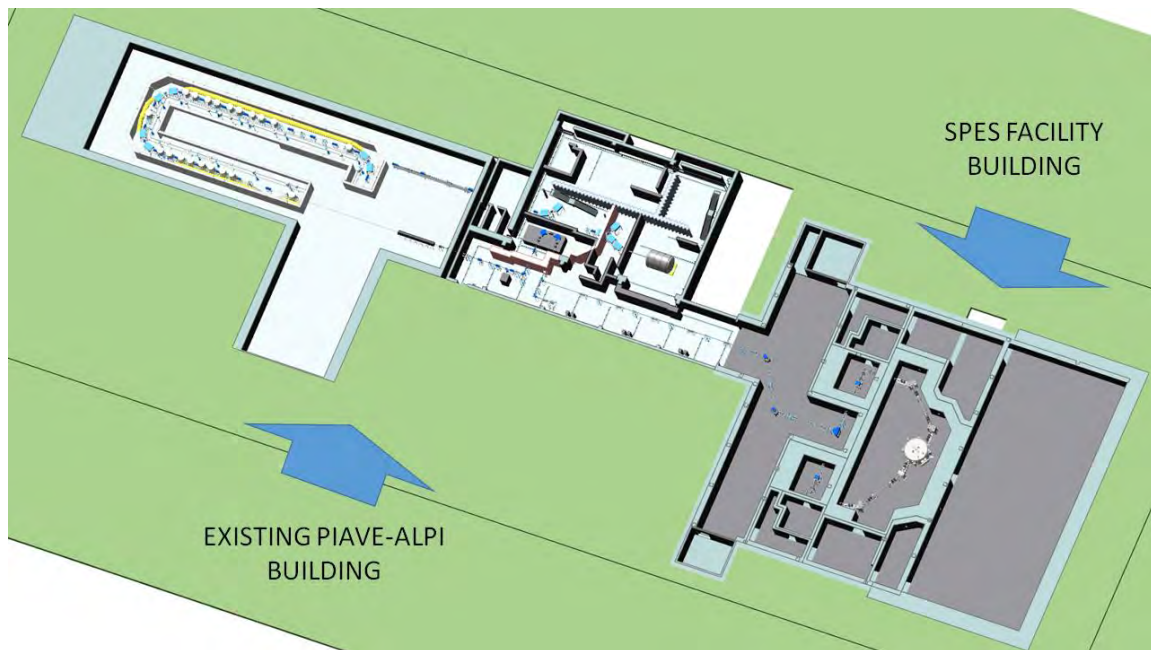


Figura 1.4: : Layout del progetto SPES

1.2.1 L'acceleratore primario

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

La facility SPES utilizzerà come acceleratore primario un Ciclotrone. Il mercato, infatti, offre oggi la possibilità di produrre con soluzioni commerciali fasci di protoni dell'intensità e dell'energia richiesta dal progetto SPES.

Il ciclotrone scelto per il progetto SPES è il BEST 70p, sviluppato dalla BestCyclotron e mostrato in Figura 1.5, il quale è in grado di fornire due fasci di protoni indipendenti (uno per il target del progetto SPES, l'altro per la *Neutron Facility*) fino a 70 MeV di energia e corrente totale di $750\ \mu\text{A}$.

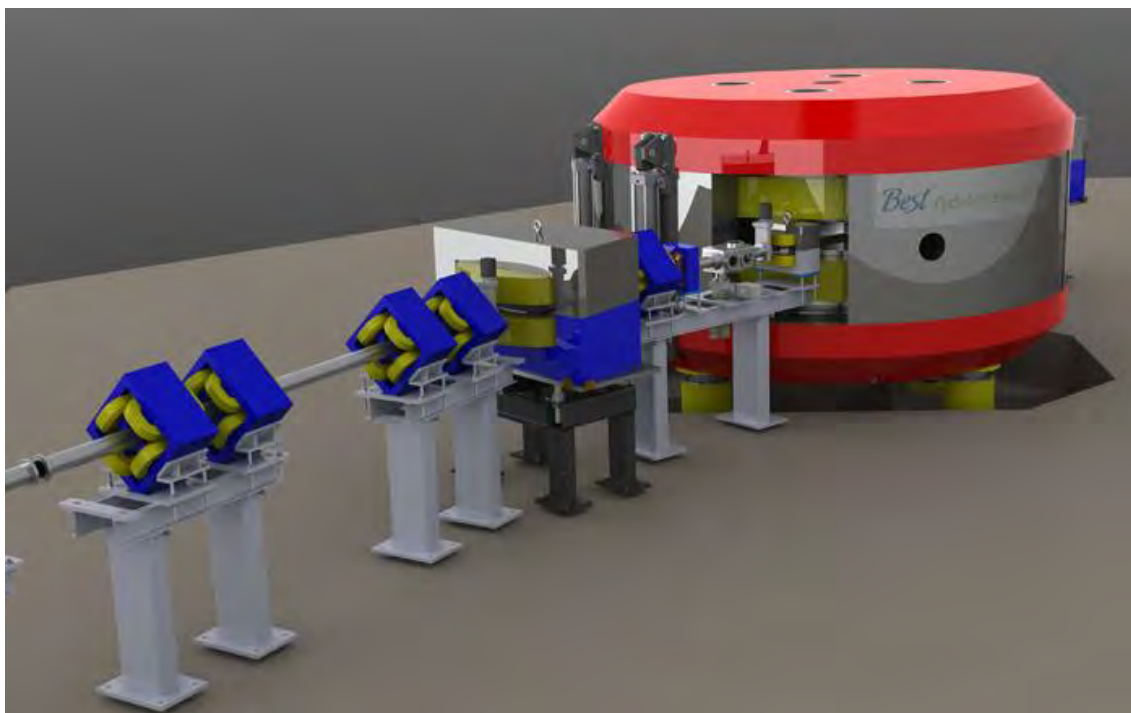


Figura 1.5: Il ciclotrone BEST 70p

1.2.2 La zona di produzione

L'area di produzione del fascio radioattivo si compone essenzialmente di due parti:

- Il Front-End;
- La camera target;

1.2.2.1. Il *Front-End*

Il Front-End (Figura 1.6) è l'insieme di più elementi complementari tra loro e aventi ciascuno una specifica funzione che concorrono allo scopo di consentire la produzione e il trasporto dei fasci di ioni radioattivi. Si compone essenzialmente di due parti: il Front-End protonico (FEP), impropriamente detto canale protonico (il canale protonico in senso stretto corrisponde a tutto ciò che è compreso tra la sorgente di ioni, il ciclotrone, e il Front-End), responsabile del trasporto del fascio protonico; il Front-End radioattivo (FER) responsabile del trasporto del fascio radioattivo e caratterizzato dallo stesso vizio di denominazione chiarito in precedenza.

Il Front-End svolge le seguenti funzioni:

- Garantisce sostegno e stabilità al canale protonico, alla camera target e agli apparati necessari al trasporto del fascio radioattivo;
- Realizza un grado di vuoto sufficientemente spinto per il corretto funzionamento di tutti gli organi al suo interno e a esso collegati;
- Consente un rapido aggancio della camera target;
- Provvede all'apporto verso la camera target di energia elettrica per il riscaldamento del blocco target e di acqua per il raffreddamento della camera stessa.

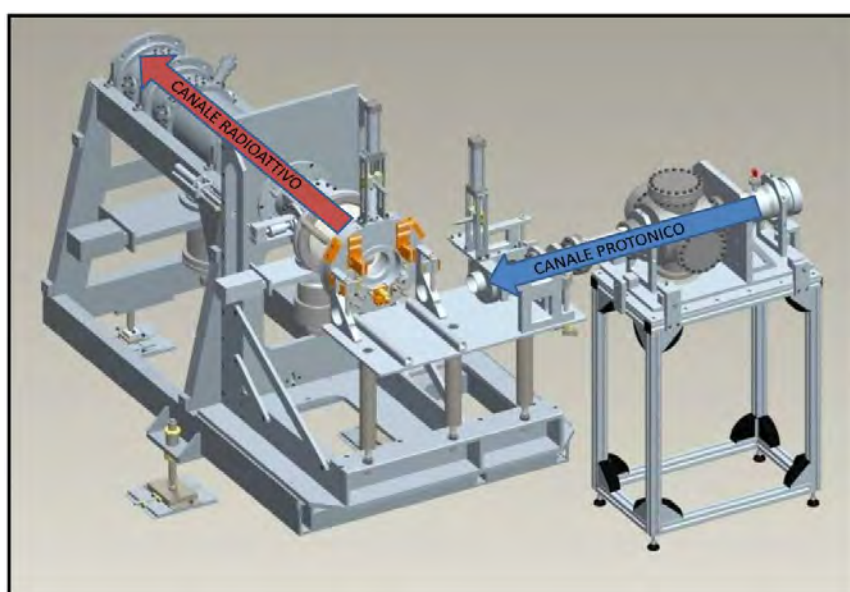


Figura 1.6: Front End

L'alto livello di vuoto, dell'ordine di 10^{-5} mbar, facilita il cammino dei due fasci ed evita l'ossidazione dei componenti del target, aspetto di grande importanza dato che la camera target lavora ad alte temperature. Il vuoto si ottiene in due passaggi: inizialmente una serie di pompe volumetriche tipo scroll raggiungono vuoti dell'ordine di $10^{-2} \div 10^{-3}$ mbar, successivamente, azionando delle pompe turbo-molecolari si raggiungono le pressioni richieste in esercizio. Vuoti superiori a valori di $10^{-5} - 10^{-6}$ mbar non sono raggiungibili per problemi di degassamento superficiali, legati al materiale scelto per la costruzione del Front-End (alluminio), ma soprattutto per il rilascio di atomi da parte dei componenti all'interno della camera target sottoposti ad elevate temperature. L'alluminio è stato preferito all'acciaio poichè quest'ultimo ha la tendenza ad attivarsi in modo significativo e duraturo in presenza di radiazione neutronica.

1.2.2.2. Il canale protonico (FEP)

Il canale protonico collega il ciclotrone alla camera target permettendo l'isolamento elettrico tra le due estremità. Come vedremo infatti, per estrarre il fascio radioattivo è necessario applicare una differenza di potenziale tra il luogo di formazione del fascio e la zona di arrivo di circa 40 kV . Il collimatore (Figura 1.7) è il primo elemento della catena ed è formato da una serie di blocchi di grafite con fori coassiali di diverso diametro: i blocchi sono posti in modo tale che il diametro del foro sia decrescente nel verso del fascio, in questo modo riduce l'area d'impatto del fascio stesso adattandola alla dimensione dei dischi di uranio. Nella struttura esterna, che contiene i dischi di grafite, è stato ricavato un condotto per la circolazione di acqua per il raffreddamento.

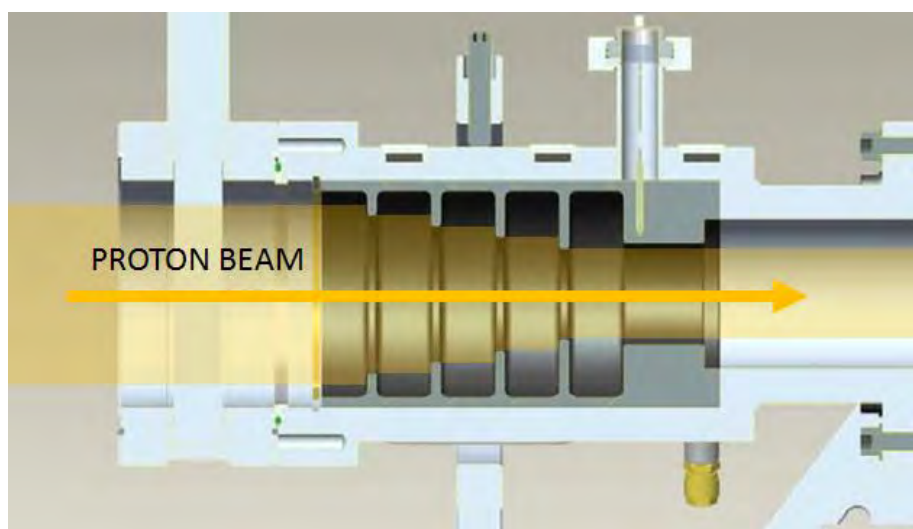


Figura 1.7: Esempio di del vecchio collimatore sviluppato per il progetto SPES

Il blocco di diagnostica consente l'installazione della Faraday cup, uno strumento di misura della corrente del fascio protonico, ed inoltre fissa nell'imbocco sottostante la pompa turbo-molecolare. L'isolatore, in allumina (Al_2O_3), provvede al collegamento degli organi precedenti al Front-End mantenendo l'isolamento elettrico.

1.2.2.3 Il canale radioattivo (FER)

Il canale radioattivo riceve e trasporta il fascio radioattivo. Esso è composto da due parti:

- parte di telaio fissata con il gruppo di quadripoli che controlla il fascio;

- parte di telaio removibile che comprende la tavola di ammaraggio che sostiene la camera target e tutti gli oggetti vicini ad essa.

Le zone più prossime alla camera target sono soggette a un notevole danneggiamento dovuta all'alta dose radioattiva assorbita e proveniente dal target, la quale varia approssimativamente con il quadrato della distanza dalla fonte irradiante. Proprio per questo motivo si stima la sostituzione della camera target ogni 15 giorni di lavoro.

La parte amovibile del telaio contiene i componenti più sollecitati dell'intero Front-End. La sua funzione principale è quella di accoppiare la camera target al Front-End attraverso tutte le connessioni pneumatiche ed elettriche, ed estrarre, attraverso l'elettrodo estrattore, il fascio radioattivo. Questa zona prossima alla camera viene sostituita ogni 7 anni di lavoro, mentre il resto del Front-End (telaio fisso) è a una distanza tale per cui è accettabile il danneggiamento da radiazione. Il telaio fisso è assicurato a terra tramite dei piedini regolabili in altezza che poggiano su basi che consentono un buon allineamento dell'intera struttura al piano di appoggio; qui alloggiavano il gruppo di quadripoli elettrostatici che focalizzano il fascio radioattivo.

1.2.2.4 Il *target* di produzione ed il sistema di estrazione e ionizzazione

Sia il *target* di produzione dei radioisotopi, sia il sistema di estrazione e ionizzazione degli stessi sono contenuti all'interno di una camera di forma cilindrica (camera *target*), la quale viene raffreddata mediante un opportuno circuito, viste le elevate potenze in gioco (vedi Figura 1.8).

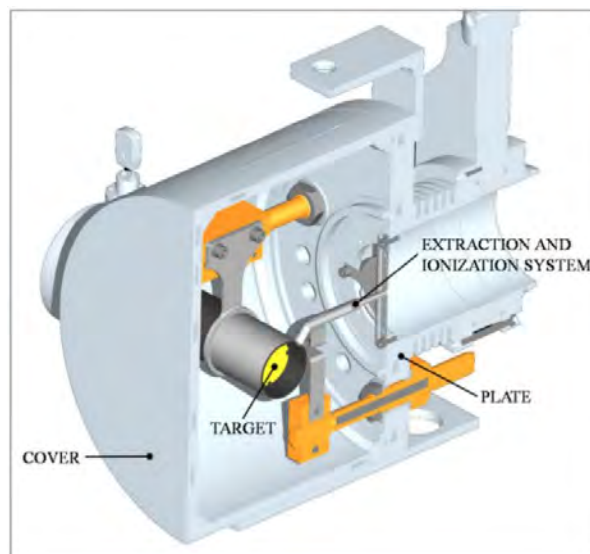


Figura 1.8: Configurazione della camera target

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

Il *target* è composto da sette dischi coassiali in UC_x , aventi 40 mm di diametro e circa 1 mm di spessore ed opportunamente distanziati in direzione assiale, al fine di dissipare attraverso radiazione termica la potenza sviluppata dal fascio di protoni. Essi sono contenuti in una scatola di grafite (*box*), avente un diametro esterno e una lunghezza di 49 e 200 mm rispettivamente (vedi Figura 1.9). Il fascio di protoni, prima di impattare contro i dischi, attraversa due finestre in grafite (*windows*), molto sottili (0.2 mm) per non attenuare l'energia del fascio, ma di fondamentale importanza, in quanto consentono di schermare la zona attiva e di evitare un eccessivo raffreddamento del materiale fissile in corrispondenza dell'ingresso del fascio. Dopo aver investito le due finestre di grafite e i dischi di UC_x , il fascio primario va ad impattare su tre *dumper* e sul fondo scatola (*box base*); questi elementi provvedono sia all'assorbimento definitivo del fascio (che così non va ad impattare sulla camera esterna), sia ad evitare la fuoriuscita di particelle dal lato posteriore del *target* [6].

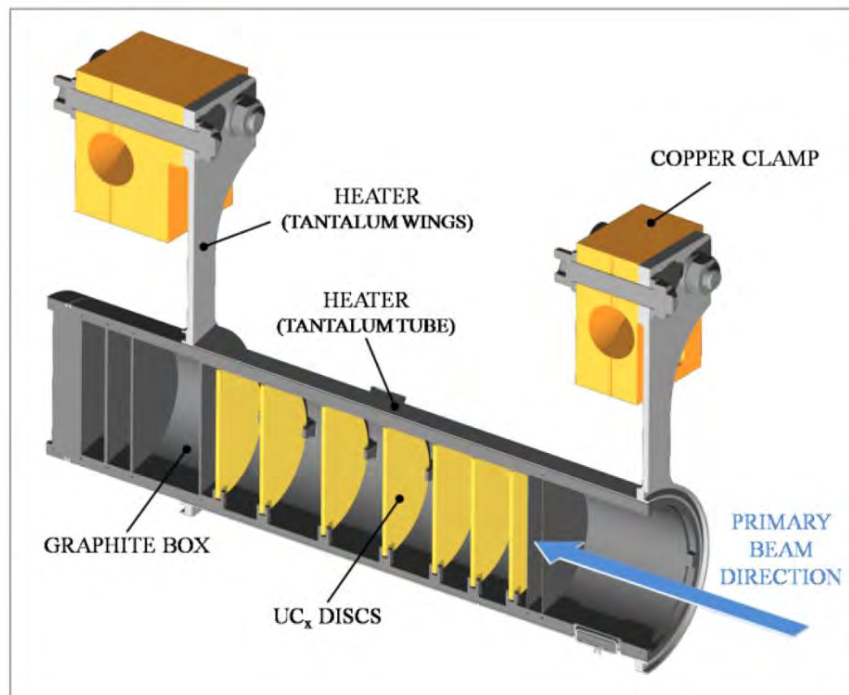


Figura 1.9: Rappresentazione del prototipo di bersaglio diretto del progetto SPES

La scatola deve mantenere la temperatura media di $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$, in modo da migliorare l'estrazione dei prodotti di fissione. Essendo la potenza del fascio di protoni non sufficiente a portare il *target* al livello di temperatura richiesto se non alla massima corrente, è necessario introdurre un dispositivo indipendente avente la funzione di riscaldare e schermare il *target*.

Inoltre, il sistema di riscaldamento supplementare deve essere in grado di sostenere il *target* durante i transitori, evitando improvvisi sbalzi di temperatura molto pericolosi per l'integrità strutturale dei dischi. Il riscaldatore (*heater*) è composto da un tubo molto sottile di 0.2 mm (*tube*) saldato ai bordi a due ali (*wings*) direttamente collegate ai morsetti in rame (*clamps*); attraverso i morsetti è possibile far scorrere elevate intensità di corrente e, quindi, dissipare per effetto Joule il desiderato quantitativo di potenza al riscaldatore. La dissipazione di potenza dovuta all'effetto Joule in aggiunta al calore sviluppato dalla fissione nucleare e alla potenza rilasciata dal fascio protonico, fa in modo che la temperatura del sistema scatola-dischi sia mantenuta al valore di utilizzo. Il materiale scelto per il riscaldatore è il tantalio: si tratta di un metallo altamente resistente alla corrosione, in grado di condurre elettricità e calore e di raggiungere temperature molto elevate.

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

Il processo di estrazione avviene mediante la linea di trasferimento (*transfer line*), attraverso la quale gli isotopi in uscita dal *target* vengono indirizzati verso la sorgente di ionizzazione (*ion source*) dove sono ionizzati positivamente (ioni $+1$). Nell'attuale configurazione la linea di trasferimento (*transfer line*) è un tubo sottile di tantalio saldato al riscaldatore ad un'estremità e connesso meccanicamente alla sorgente di ionizzazione all'estremità opposta (vedi Figura 1.10).

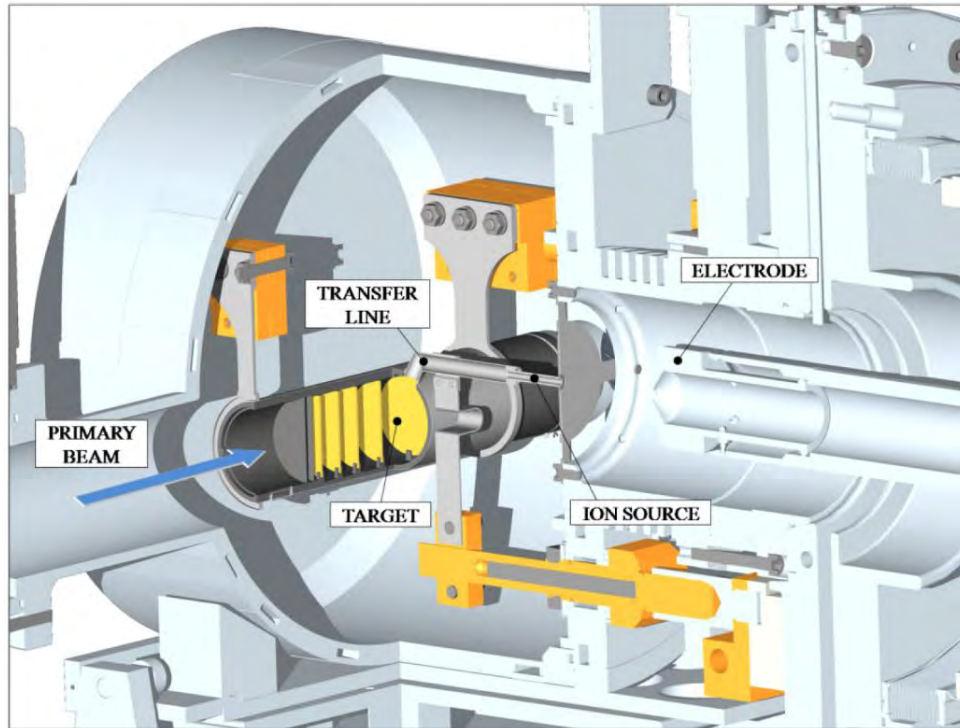


Figura 1.10: Rappresentazione del sistema di estrazione e ionizzazione del progetto SPES

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 2200°C . La camera *target* viene collegata al *front end*; in particolare tra la sorgente e l'elettrodo estrattore è presente una differenza di potenziale (*camera front end*) pari a 60 kV ed è quindi necessario, al fine di evitare il contatto diretto, interporre un isolante elettrico (*electrical insulator*) come rappresentato in Figura 1.11.

La differenza di potenziale presente accelera gli ioni radioattivi estraendoli; in particolare il componente che accoglie gli ioni in uscita dalla sorgente di ionizzazione è un elettrodo (*electrode*) realizzato in lega di titanio (Ti6Al4V) e visibile in Figura 1.10. In questo modo si forma il fascio di ioni radioattivi che verrà, dopo il passaggio attraverso quadrupoli, separatori elettromagnetici ed il post acceleratore ALPI, inviato alle sale sperimentali.

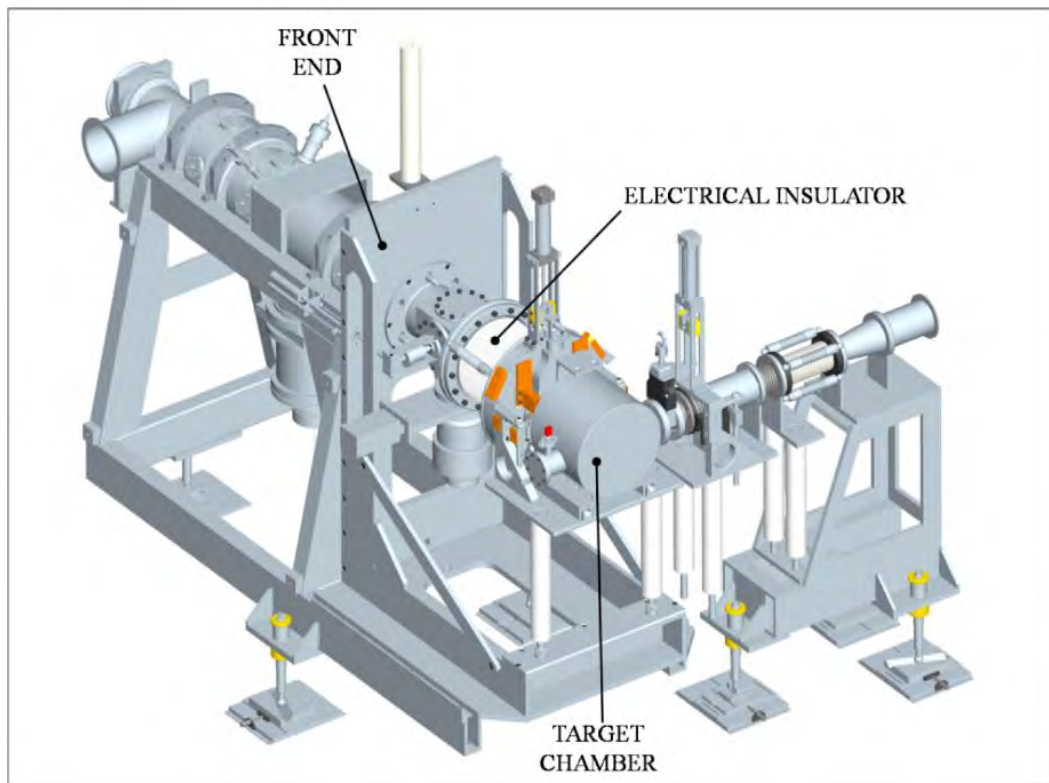


Figura 1.11: Rappresentazione del front end

La scelta della sorgente è di fondamentale importanza, in quanto il suo funzionamento influenza l'intensità e la qualità del fascio radioattivo. La *facility* SPES viene progettata in riferimento a tre diverse tipologie di sorgente: una sorgente con ionizzazione di tipo superficiale (*Surface Ion Source*), una sorgente con ionizzazione laser (RILIS, *Resonant Ionization Laser Ion Source*) e una sorgente di ionizzazione al plasma (FEBIAD, *Forced Electron Beam Induced Arc Discharge Ion Source*) [7]. Per entrambe le tipologie di ionizzazione si fa riferimento alla medesima architettura (mostrata in dettaglio in Figura 1.12); si tratta di uno sviluppo della sorgente *MK1 ISOLDE* sviluppata dal CERN. Il componente principale della sorgente *MK1* è la *hot cavity*, un tubicino in renio all'interno del quale avviene la ionizzazione.

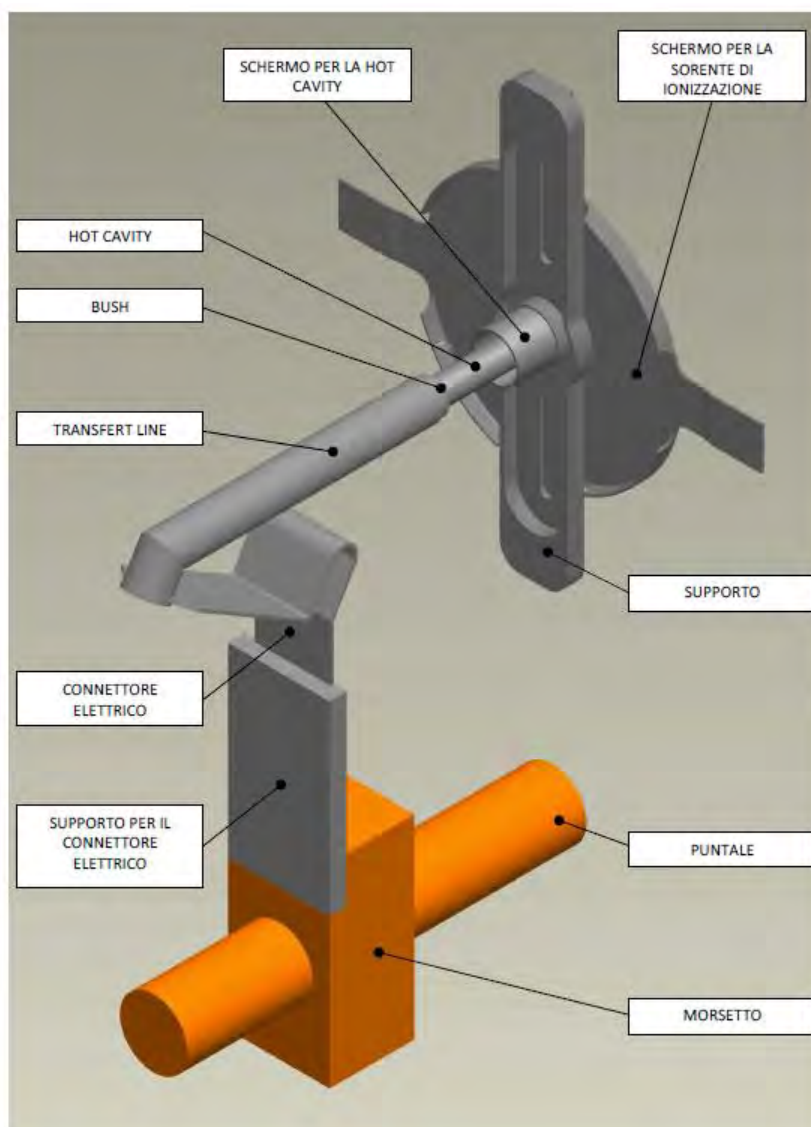


Figura 1.12: Architettura sorgente di ionizzazione MK1

La *hot cavity*, dotata di un opportuno invito conico, viene accoppiata per interferenza al foro centrale del supporto (*support*) in tantalio; la gestione delle tolleranze è tale da impedire qualsiasi movimento relativo tra i due componenti. Dall'altra parte, il collegamento con la linea di trasferimento avviene per mezzo di un tappo (*bush*) in tantalio, sul quale vanno in battuta sia la linea di trasferimento sia la *hot cavity*. Le elevate temperatura raggiunte dalla sorgente di ionizzazione in condizioni di utilizzo, fanno sì che i componenti si saldino tra loro. Il collegamento tra il supporto e la flangia principale avviene mediante 4 viti *DIN912 M5x12*. Tra supporto e flangia principale viene interposto uno schermo (*screen*) in tantalio; si tratta di un componente fondamentale per l'estrazione degli isotopi radioattivi.

Surface Ion Source

Attraverso la Surface Ion Source la ionizzazione è causata dallo strisciamento degli isotopi radioattivi provenienti dal target sulla superficie interna della hot cavity. A causa di tale strisciamento gli isotopi cedono un elettrone e vengono quindi ionizzati positivamente (ioni +1). Questo è possibile se la minima energia necessaria per rimuovere un elettrone da una superficie (funzione di lavoro) è maggiore del potenziale di ionizzazione dell'isotopo. Nel caso in esame si riescono a produrre con elevata efficienza ioni positivi per elementi con potenziale di ionizzazione inferiore alla funzione di lavoro del renio pari a circa 5 eV. L'elevata temperatura a cui si trova la sorgente permette di avere un processo di ionizzazione efficiente; si favorisce infatti il moto Browniano e si incrementano i contatti isotoposuperficie. Lo svantaggio principale di tale metodo sta nel fatto che la ionizzazione non è selettiva, cioè non vengono ionizzati soltanto gli isotopi della specie desiderata. Si devono quindi predisporre dei separatori elettromagnetici in grado di selezionare, in base alla massa, le particelle presenti nel fascio. In ogni caso la purezza del fascio non è garantita; vi sono infatti isotopi di diversa specie tra loro isobari, aventi cioè lo stesso numero di massa atomica A , ma un diverso numero atomico Z (come ad esempio il ^{132}Cs e lo ^{132}Sn). Per separare tali elementi sono necessari dei separatori isobari; tali dispositivi, oltre ad essere molto complicati e costosi sono anche poco affidabili, inoltre riducono notevolmente l'intensità del fascio.

Resonant Ionization Laser Ion Source

Il metodo RILIS (il cui principio di funzionamento è schematizzato in Figura 1.13) è oggi il più potente strumento per la produzione di fasci di ioni radioattivi per le facilities di tipo ISOL, in quanto fornisce un processo di ionizzazione selettiva e garantisce la soppressione di contaminazioni indesiderate a livello della sorgente di ionizzazione. Vale la pena notare che il metodo RILIS utilizza la stessa architettura della tecnica di ionizzazione superficiale. Un laser caratterizzato dalla sovrapposizione di più raggi (due o tre a seconda dell'elemento chimico da ionizzare) aventi lunghezze d'onda differenti, corrispondenti a diversi valori energetici ($E = hf$, dove h è la costante di Planck ed f è la frequenza d'onda), viene proiettato all'interno della hot cavity. Tale laser irradia gli isotopi e fornisce loro l'energia necessaria per far compiere all'elettrone più esterno dei salti quantici verso orbitali più esterni fino alla separazione dall'atomo; in questo modo si ha la formazione di uno ione positivo +1.

La metodologia di ionizzazione RILIS permette di acquisire soltanto ioni radioattivi della specie di interesse e si riesce quindi ad ottenere un fascio nel quale le contaminazioni sono minime. In ogni caso, visto che la sorgente è la medesima di quella superficiale, con il tantalio invece del renio per la sua minore funzione di lavoro, saranno presenti le stesse specie della SIS. Il fascio sarà in ogni caso contaminato da specie non volute. Per risolvere tale inconveniente si può pensare di sostituire il materiale che costituisce la hot cavity; passando al niobio la ionizzazione superficiale viene notevolmente attenuata.

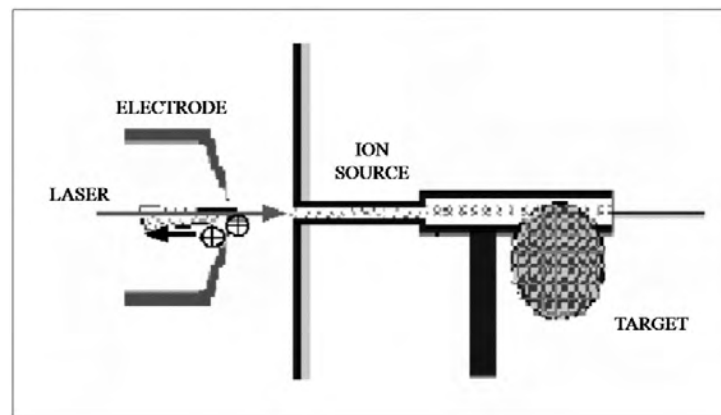


Figura 1.13: Schematizzazione del sistema di ionizzazione RILIS

Per avere un'efficienza di ionizzazione elevata è di fondamentale importanza limitare e controllare il disallineamento della hot cavity causato dall'espansione termica. Se la hot cavity si disallinea, viene a ridursi la zona di azione del laser e di conseguenza anche l'efficienza di ionizzazione si riduce (vedi Figura 1.14).

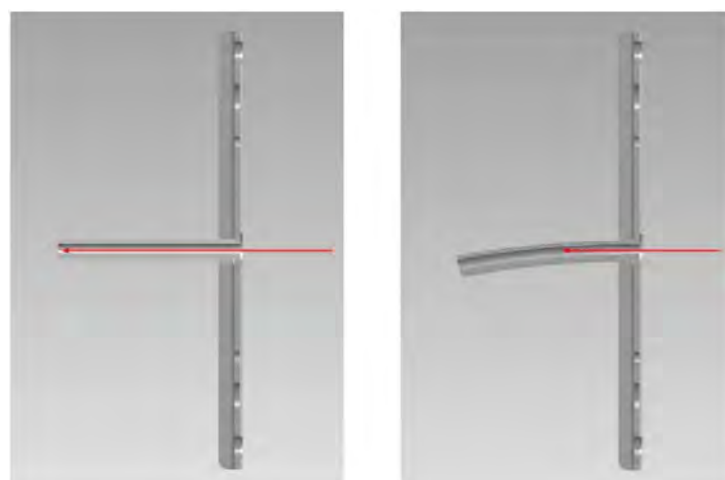


Figura 1.14: Allineamento della hot cavity

Di seguito viene riportata una tavola periodica degli elementi (Figura 1.15) nella quale vengono indicati in rosso gli elementi di cui, attraverso il progetto SPES, è possibile la produzione degli isotopi. In particolare sono evidenziati gli isotopi che possono essere prodotti con le tecniche di ionizzazione superficiale, laser o entrambe; per la produzione degli altri isotopi si dovrà ricorrere alla sorgente al plasma (FEBIAD), in grado di ionizzare qualsiasi tipo di elemento, anche se con efficienze minori rispetto alle tecniche laser e superficiale.

1																	2
H																	He
3	4											5	6	7	8	9	10
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
11	12											13	14	15	16	17	18
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
55	56	L	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86
Cs	Ba		Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
87	88	A	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118
Fr	Ra		Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Uuu	Uub	Uut	Uuq	Uup	Uuh	Uus	Uuo
L	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71		
	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Te	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu		
A	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103		
	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr		

Figura 1.15: Tavola periodica degli elementi

1.2.3 Separatori elettromagnetici e post accelerazione

Il fascio estratto dalla sorgente di ionizzazione viene sottoposto ad una prima fase di purificazione nella quale, attraverso un separatore di massa di tipo Wien Filter, viene selezionata una grande quantità di contaminanti. La risoluzione di tale dispositivo ($M/\Delta M$, dove per M si intende la massa dell'isotopo) è pari a circa 150; si riescono così a separare in base alla massa i vari elementi.

Il separatore di massa è seguito da un separatore isobaro, avente una risoluzione pari a 15000, e che permette quindi di separare gli isotopi come il ^{132}Cs e lo ^{132}Sn tra loro isobari. Per migliorare la capacità di selezione dei separatori isobari è necessario operare con un'energia in ingresso dell'ordine dei 200 keV; questo è possibile perché tale separatore sarà montato su di una piattaforma a tale potenziale negativo.

A questo punto il fascio radioattivo può essere direttamente convogliato alle sale sperimentali (ed utilizzato in esperimenti che richiedono fasci radioattivi di bassissima energia), oppure essere post accelerato. La post accelerazione viene resa possibile mediante l'impiego di un *Charge Breeder* accoppiato al dispositivo RFQ in grado di incrementare la carica degli ioni prima dell'ingresso in ALPI.

Il complesso PIAVE-ALPI è da molti anni in funzione ai LNL, ma negli ultimi tempi è stato sottoposto ad un numero significativo di miglioramenti (Figura 1.16).

In particolare, mentre prima consentiva la produzione di fasci ioni stabili ad elevata energia, ora può essere impiegato come un acceleratore di RIB.



Figura 1.16: Post acceleratore (già esistenti) del progetto SPES: a) PIAVE; b) ALPI

Si ricorda che la corrente finale del fascio radioattivo dipende dall'efficienza di molti processi chimico-fisici (vedi equazione (1.1)); complessivamente ci si aspetta, alle sale sperimentali, un fascio avente circa $10^6 \div 10^9$ isotopi/s (molto inferiore alle 10^{13} fissioni/s date dalla fissione nucleare). Il diagramma di Figura 1.17 mostra l'intensità del fascio radioattivo, calcolata tenendo conto delle efficienze di emissione, di ionizzazione e di accelerazione, per diverse specie di isotopi.

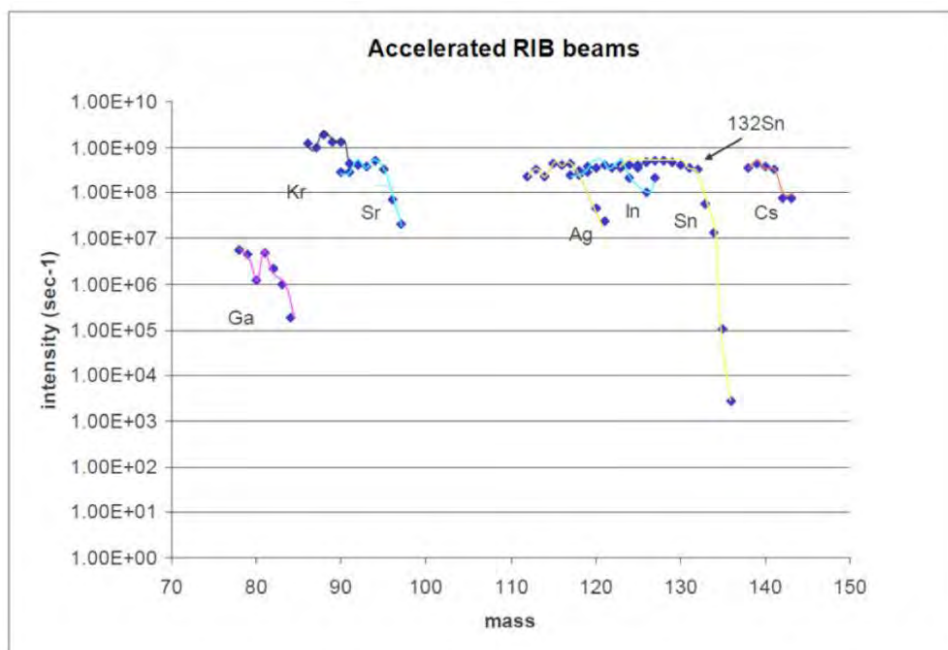


Figura 1.17: Intensità finale del fascio, calcolata tenendo conto delle efficienze di emissione, di ionizzazione e di accelerazione, per diverse specie di isotopi

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

1.3 Applicazione dei fasci dei ioni esotici

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

1.3.1 Applicazioni in fisica nucleare [1]

Miglioramento e verifica del Modello Standard

Il modello standard della fisica delle particelle è una teoria che descrive insieme tre delle quattro forze fondamentali, cioè l'interazione nucleare forte, l'elettromagnetismo e l'interazione nucleare debole (queste ultime due unificate nell'interazione elettrodebole), nonché la funzione e le proprietà di tutte le particelle (note ed osservate) che costituiscono la materia. Nonostante il suo successo, tale modello non è del tutto soddisfacente, poiché dipende in modo sostanziale da alcune assunzioni fatte *ad-hoc*. Elaborati esperimenti di fisica nucleare, suggeriti da convincenti basi teoriche, sono stati ideati allo scopo di chiarire l'origine di queste assunzioni e pervenire così all'unificazione delle interazioni fondamentali.

Tali esperimenti prevedono precise misure delle proprietà di decadimento di alcuni nuclei, che possono essere effettuate proprio utilizzando come sorgente pura di ioni, i fasci di ioni radioattivi prodotti dalle facilities.

Studio della struttura di nuclei complessi

I nucleoni (protoni e neutroni) sono costituiti da subparticelle chiamate quark, esse esercitano un effetto fisico anche oltre i nucleoni nei quali sono confinati: in particolare le interazioni tra i nucleoni all'interno del nucleo sono diverse da quelle esistenti tra due nucleoni liberi, in quanto esse dipendono anche dalla densità di protoni e neutroni associata al particolare tipo di nucleo. Al momento, non esiste una formula generale che consenta di quantificare l'entità delle interazioni nucleari per tutti i nuclei rappresentati nella Figura 1.2, in quanto i calcoli quantomeccanici sono applicabili unicamente ai nuclei più leggeri; l'obiettivo della fisica nucleare è di ottenere una trattazione unitaria che:

- a) permetta di derivare l'effettiva interazione tra le particelle nucleari;
- b) elimini le incongruenze dei modelli correnti;
- c) sia applicabile anche ai nuclei aventi rapporto protoni/neutroni estremo (nuclei esotici).

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

Misura della dimensione del nucleo: i nuclei “halo”

La dimensione del nucleo è legata al numero totale di nucleoni che lo costituiscono dalla semplice relazione $R=R_0A^{1/3}$, dove R è il raggio nucleare ed R_0 una costante pari a 1.2 fermi ($1 \text{ fermi} = 10^{-15} \text{ m}$). Tuttavia, allontanandosi dalla valle di stabilità, si possono incontrare notevoli deviazioni da tale legge, in quanto le energie di legame tra le particelle di uno stesso nucleo possono diventare così piccole da causare la formazione di nuclei particolari, chiamati “ad anello” (nuclei “halo”). I nuclei “halo” sono caratterizzati da una diversa collocazione dei neutroni; tali nuclei possiedono molti più neutroni dei rispettivi isotopi stabili, inoltre uno o due neutroni, essendo debolmente legati al nucleo, orbitano attorno ad esso (neutroni di valenza).

Un esempio di nucleo “halo” è il ^{11}Li ; esso ha una dimensione media del nucleo paragonabile a quella del ^{48}Ca , se però si considera l’alone, racchiuso dalle orbite dei due elettroni di valenza presenti, il nucleo assume dimensioni paragonabili a quelle del ^{208}Pb (vedi Figura 1.18).

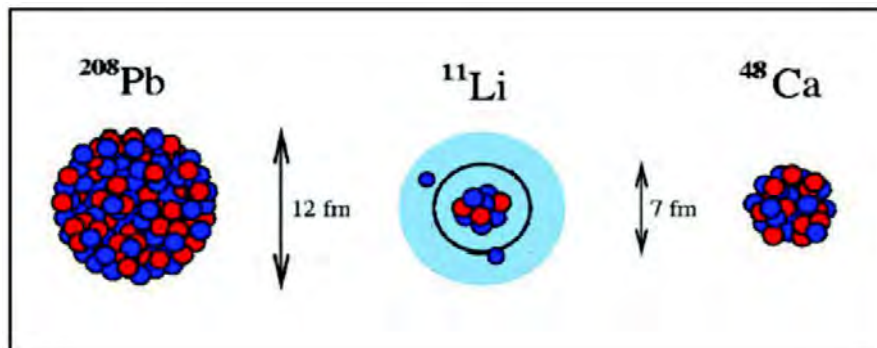


Figura 1.18: Paragone tra la dimensione del nucleo di ^{11}Li e quella di altri nuclei più massivi

Il nucleo ^{11}Li è un sistema a tre corpi (i due neutroni “esterni” ed il core) e rappresenta un esempio naturale di sistema Borromeico (vedi Figura 1.19); in topologia, i tre anelli borromeici sono legati l’un l’altro in modo tale che la rottura di uno permetta la separazione degli altri due.



Figura 1.19: Gli anelli Borromeici

I nuclei ad anello sono anche chiamati “nuclei Borromeici” proprio perché se uno dei loro costituenti viene a mancare, gli altri divengono immediatamente instabili e si possono a loro volta allontanare facilmente. Attualmente, per la misura della distribuzione di protoni, sulla base di esperimenti di spettroscopia atomica, si usano fasci radioattivi di bassa energia e luce laser collineata; per la determinazione della distribuzione di tutti i nucleoni, vengono invece impiegati fasci radioattivi ad alta energia.

Produzione di elementi superpesanti

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

1.3.2 Applicazioni in fisica dello stato solido

La tecnica *Radio Tracer Diffusion*, nata nel 1920, consiste nell’impiantare all’interno di un sistema solido dei nuclei radioattivi e di studiarne il decadimento, rilevando le particelle o la radiazione gamma da essi emessa.

Tale tecnica permette di captare segnali anche da pochissimi atomi e rappresenta uno dei metodi più comuni per studiare i processi di diffusione atomica nei solidi [8]. Il sistema ospitante può essere drogato con i radioisotopi “sonda” per diffusione, tramite reazione nucleare, oppure per impianto ionico; la scelta dell’atomo radioattivo da utilizzare per un determinato esperimento viene fatta in base alla natura chimica e alle proprietà nucleari di quest’ultimo.

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

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

Drogaggio dei semiconduttori

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

Analogamente agli isotopi stabili, gli isotopi radioattivi influenzano le proprietà elettroniche ed ottiche dei semiconduttori in base alla loro natura chimica ed alla loro posizione all’interno del reticolo cristallino: in particolare, poiché le proprietà elettroniche ed ottiche dei semiconduttori dipendono oltre che dal tipo di semiconduttore anche dalle sue dimensioni, si è dimostrato che in semiconduttori molto piccoli tali proprietà possono essere sensibilmente alterate da un difetto presente con concentrazione minore di 10^{12} atomi/cm³. Per controllare in maniera affidabile le prestazioni dei semiconduttori sono quindi necessarie tecniche sperimentali che combinino un’alta sensibilità chimica con un’alta sensibilità per la determinazione di basse concentrazioni di difetti.

Per decenni la principale tecnica di rilevazione delle impurezze all'interno di un cristallo è stata il *channeling*: in tale tecnica un fascio di ioni viene guidato lungo le righe atomiche o lungo i piani del cristallo (canali), tuttavia non è possibile determinare concentrazioni di difetti inferiori a 10^{18} atomi/cm³. La sensibilità di tale tecnica può essere profondamente aumentata impiantando all'interno del cristallo impurezze radioattive che emettono particelle cariche (*emission channeling*). La misura dell'emissione lungo differenti direzioni cristalline permette la determinazione del sito cristallografico dell'atomo emittente con un'accuratezza di pochi decimi di Å (Figura 1.20).

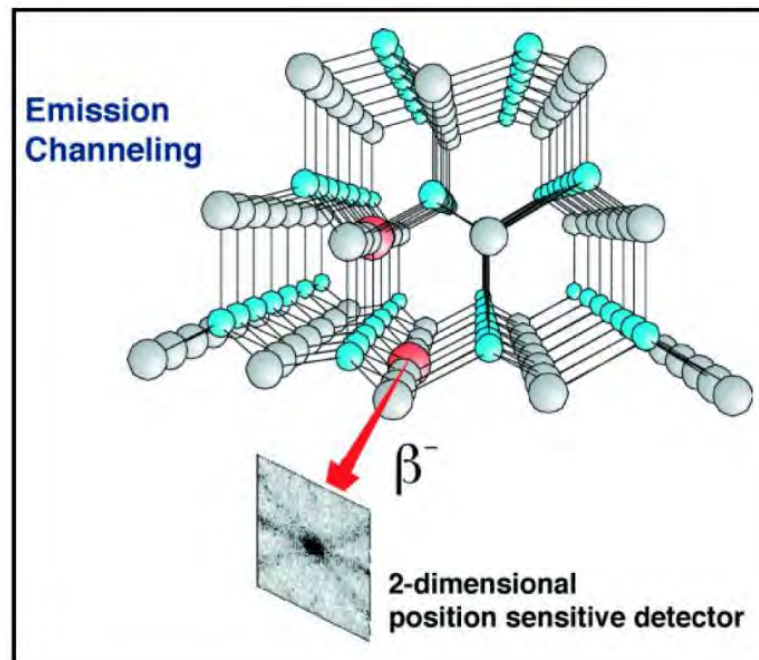


Figura 1.20: Emission channeling degli elettroni emessi da atomi radioattivi

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

Prima di procedere si forniscono alcune fondamentali definizioni:

- L'antimateria è la materia composta da antiparticelle: si tratta di particelle aventi la stessa massa e caratteristiche opposte a quelle che costituiscono la materia ordinaria.
- Il positrone (detto anche antielettrone) è l'equivalente di antimateria dell'elettrone ed ha carica elettrica pari a +1.

Quando un positrone si annichila con un elettrone, la loro massa viene convertita in energia, sotto forma di due fotoni ad altissima energia nella banda dei raggi gamma. Un positrone può essere generato dal decadimento radioattivo con emissione di positroni, o dall'interazione con la materia di fotoni con energia superiore a $1,022 \text{ MeV}$. Sebbene utilizzata principalmente per studiare le interazioni tra particelle elementari, l'antimateria ha anche un'applicazione tecnologica: la Tomografia ad Emissione Positronica (PET, *Positron Emission Tomography*) una tecnica di medicina nucleare e diagnostica medica che utilizza l'emissione di positroni per realizzare immagini tridimensionali o mappe ad alta risoluzione degli organi interni dei pazienti.

La procedura PET inizia con l'iniezione (generalmente per via endovenosa) nel soggetto da esaminare, di un isotopo tracciante di breve vita media, legato chimicamente ad una molecola attiva a livello metabolico. Dopo un tempo di attesa durante il quale la molecola metabolicamente attiva (spesso uno zucchero), raggiunge una determinata concentrazione all'interno dei tessuti organici da analizzare, il soggetto viene posizionato nello scanner (Figura 1.21).



Figura 1.21: Scanner impiegato nella tecnica di rilevazione PET

L'isotopo di breve vita media decade, emettendo un positrone. Dopo un percorso che può raggiungere al massimo pochi millimetri, il positrone si annichila con un elettrone, producendo una coppia di fotoni (di energia paragonabile a quella dei raggi gamma) emessi in direzioni opposte fra loro (sfasate di 180° lungo una stessa retta).

Questi fotoni sono successivamente rilevati dal dispositivo di scansione grazie anche all'impiego di speciali tubi fotomoltiplicatori. Punto cruciale della tecnica è la rilevazione simultanea di coppie di fotoni: i fotoni che non raggiungono il rivelatore in coppia, cioè entro un intervallo di tempo di pochi nanosecondi, non sono presi in considerazione; dalla misurazione della posizione in cui i fotoni colpiscono il rivelatore (ogni coppia di fotoni individua una retta), si può ricostruire la posizione del corpo da cui sono stati emessi (teoricamente con due coppie di fotoni, e dunque con due rette, è possibile individuare il punto di emissione dei fotoni), permettendo la determinazione dell'attività o dell'utilizzo chimico all'interno delle parti del corpo investigate.

Lo scanner utilizza la rilevazione delle coppie di fotoni per mappare la densità dell'isotopo nel corpo; la mappa risultante rappresenta i tessuti in cui la molecola campione si è maggiormente concentrata e viene letta e interpretata da uno specialista in medicina nucleare o in radiologia al fine di determinare una diagnosi ed il conseguente trattamento. Spesso, e sempre più frequentemente, le scansioni della Tomografia a Emissione di Positroni sono raffrontate con le scansioni a Risonanza Magnetica Nucleare, fornendo informazioni sia anatomiche e morfologiche, sia metaboliche (in sostanza, su come il tessuto o l'organo siano conformati e su cosa stiano facendo). La PET è usata estensivamente in oncologia clinica (per avere rappresentazioni dei tumori e per la ricerca di metastasi) e nelle ricerche cardiologiche e neurologiche (Figura 1.22).

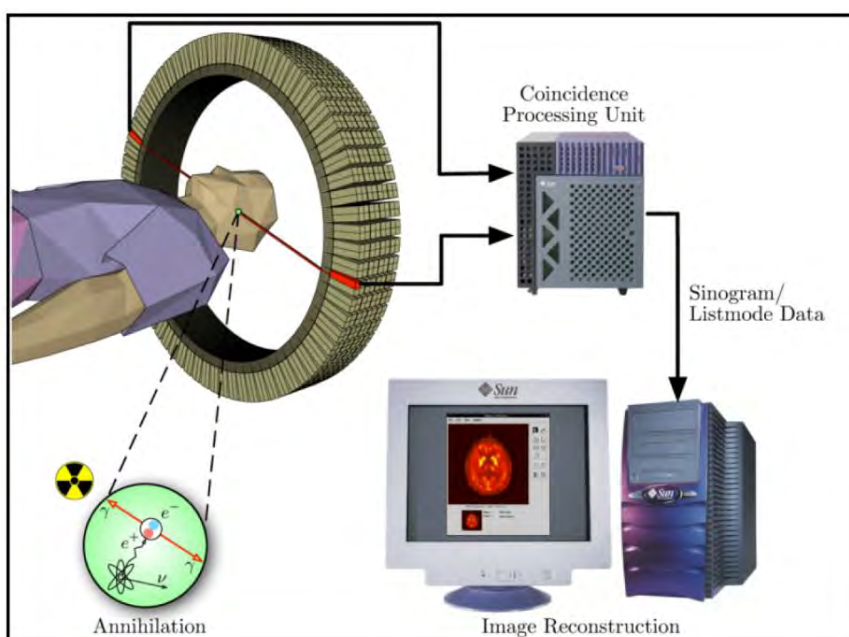


Figura 1.22: Schema riassuntivo della tecnica di analisi PET e modalità di acquisizione e presentazione dei dati.

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

Con una scansione PET è possibile visualizzare e quantificare con discreta precisione il cambio di afflusso sanguigno nelle varie strutture anatomiche (attraverso la misurazione della concentrazione dell'emettitore di positroni iniettato).

I radionuclidi utilizzati nella scansione PET sono generalmente isotopi con breve tempo di dimezzamento, come ^{11}C (~20 min), ^{13}N (~10min), ^{15}O (~2 min) e ^{18}F (~110 min). Per via del loro basso tempo di dimezzamento, i radioisotopi devono essere prodotti da un ciclotrone posizionato in prossimità dello scansionatore PET [8].

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

1.3.4 Applicazioni in astrofisica [1]

L'astrofisica nucleare gioca un ruolo fondamentale nella comprensione della struttura, evoluzione e composizione dell'Universo e dei suoi costituenti. Le stelle generano energia attraverso reazioni nucleari coinvolgenti sia nuclei stabili che radioattivi. A volte, il consumo del carburante nucleare procede stabilmente e dura bilioni di anni, altre volte è esplosivo e dura pochi minuti o pochi secondi. Nelle differenti fasi della consumazione delle stelle vengono sintetizzati nuovi elementi chimici, sia tramite processi di nucleosintesi che seguono strettamente la valle di stabilità, sia attraverso processi che si svolgono in un territorio sconosciuto. Per sviluppare un modello che descriva il meccanismo di nucleosintesi, è necessario misurare le rese delle reazioni nucleari relative ai principali cicli astrofisici e le caratteristiche di decadimento di molti nuclei tuttora sconosciuti.

Queste essenziali informazioni includono i tempi di vita, le masse ed i principali canali di decadimento di un numero di nuclei chiave lontani dalla stabilità. Le reazioni nucleari coinvolgenti nuclei instabili possono essere misurate unicamente con un fascio radioattivo: per tale motivo si prevede che la nuova generazione di facilities per la produzione di fasci radioattivi risulterà di fondamentale importanza per la comprensione della sintesi elementare nell'Universo.

1.4 Conclusioni

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

Il presente lavoro di tesi si inserisce all'interno del progetto SPES; in particolare è stata sviluppata la progettazione completa del sistema collimatore seguita da un'analisi termica-strutturale del modello generato. È quindi di fondamentale importanza, oltre alla conoscenza delle leggi che controllano la fisica del sistema, disporre di uno strumento in grado di prevederne il comportamento nei casi in cui, a causa della complessità del problema, un approccio analitico risulti incapace di fornire risultati soddisfacenti: tale strumento è rappresentato dal metodo degli Elementi Finiti.

BIBLIOGRAFIA

- [¹] M. Manzolaro, *Analisi termica e strutturale del bersaglio diretto per la produzione di fasci radioattivi per il progetto SPES*, Tesi di Laurea Specialistica a. a. 2006-2007, Università degli Studi di Padova.
- [²] G. Diavola, *Fasci di ioni radioattivi ai laboratori nazionali del sud dell'INFN: il progetto EXCYT*, Il Saggiatore, 1999.
- [³] M. Lindroos, *ISOL-type radioactive beam facilities*, EPAC, 2004.
- [⁴] http://www.eurisol.org/site02/doc/brochureEurisol_100709_italian.pdf.
- [⁵] A. Andrighetto et al., *The SPES Project At LNL*, AIP (American Institute of Physics), 2009.
- [⁶] G. Meneghetti, M. Manzolaro, A. Andrighetto, *Design of the SPES Target Heating System: theoretical analyses and comparison with experimental data*, TCN CAE, 2008.
- [⁷] G. Prete, A. Covello, *SPES Technical Design Report*, Laboratori Nazionali di Legnaro, 2008 http://www.lnl.infn.it/~spes/TDR2008/tech_design08_index.htm
- [⁸] M. Deicher, *Radioactive isotopes in solid state physics*, Vol. 33 No 3, Europhysics News, 2002.
- [⁹] <http://wikipedia.org>.

CAPITOLO 2

Progettazione e verifica termo-strutturale del collimatore

2.1 Introduzione

Nel presente lavoro di tesi ci si propone di progettare, costruire e testare un dispositivo capace di collimare il fascio protonico nel target noto con il nome di collimatore; in particolare, dopo aver definito un modello che sarà il risultato di una rigorosa analisi preliminare, verranno eseguite le dovute verifiche termiche e strutturali al fine di garantire la funzionalità dell'oggetto in questione.

Si ritiene necessario fin da subito approfondire la conoscenza di questo dispositivo fornendo le dovute informazioni sullo strumento per poi proseguire con lo studio dettagliato del progetto specifico. La miglior conoscenza delle funzionalità e morfologie del collimatore note dagli studi precedenti permette notevoli vantaggi; infatti si possono individuare, tra le possibili soluzioni, le tipologie più adatte agli obiettivi prefissi, focalizzando l'attenzione e le risorse per la progettazione del collimatore non troppo distanti dal design che assumerà nella sua forma finale.

2.2 Descrizione del collimatore

In generale, un collimatore è un dispositivo in grado di dare la forma desiderata ad un fascio proveniente da una sorgente ed è situato lungo il percorso del fascio principale per modellarlo in funzione delle applicazioni specifiche. In particolare, nel caso in esame, tale dispositivo è collocato nel canale protonico del Front-End ed è utilizzato per ridurre la dispersione angolare del fascio protonico prodotto, dunque funge da vero e proprio schermo di correzione nei confronti delle divergenze che si vengono a formare a monte e nel contempo permette di conferire al fascio una forma voluta a valle (Figura 2.1).

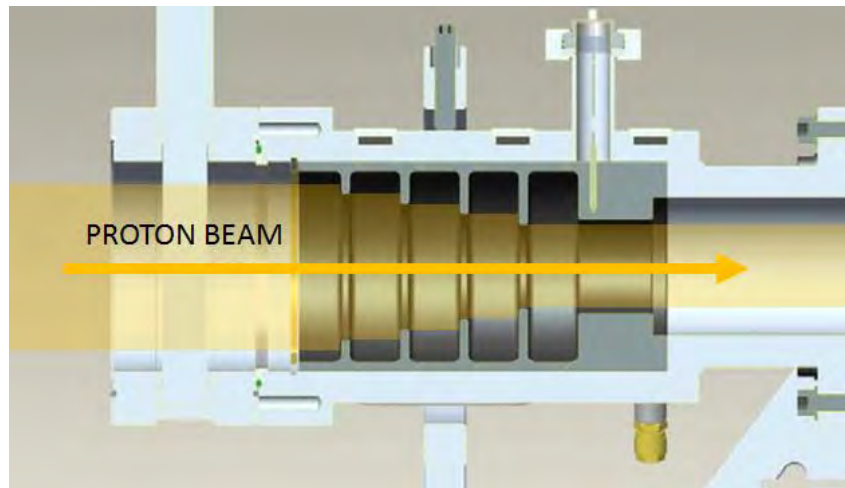


Figura 2.1: vista in sezione del sistema multi-collimatore già esistente [1]

Nella fattispecie più semplice il collimatore è costituito da una camera che può essere realizzata in acciaio o in lega di alluminio opportunamente raffreddata nella quale vengono fissati al suo interno una serie di dischi forati in grafite disposti coassialmente al fine di uniformare il fascio secondo una forma tipicamente circolare. Nel caso in esame, tale dispositivo dev'essere in grado di collimare un fascio avente un'energia specifica di 40 MeV/u ed una potenza di 8 kW .

Nei prossimi paragrafi verranno descritti in maniera dettagliata gli aspetti e le scelte progettuali che hanno portato in primo luogo alla definizione di un modello preliminare del collimatore, per poi giungere ad una configurazione più dettagliata e completa che tiene conto di tutte le funzionalità richieste.

2.3 Definizione delle condizioni di progetto iniziali

Prima di procedere alla progettazione dettagliata del collimatore è necessario definire in maniera sommaria le condizioni al contorno iniziali che porteranno alla definizione di tale dispositivo.

- Potenza termica massima teorica: dal momento che il fascio protonico intercetta parzialmente le superfici dei dischi si avrà inevitabilmente la generazione di una potenza termica netta che dev'essere smaltita. Come dato di progetto si assume che il dispositivo debba essere in grado di smaltire, in misura cautelativa, una potenza termica massima teorica di 3 kW ;

- Condizioni di alto vuoto: il collimatore collocato nel canale protonico deve operare in condizioni di alto vuoto (10^{-8} mbar). Questa condizione risulta essere di fondamentale importanza poichè condiziona fortemente il flusso termico e il campo di temperatura raggiunto dai componenti.
- Ingombri e dimensioni: si cercherà di contenere il più possibile l'estensione assiale dello strumento per poter limitare gli ingombri, e quindi lasciare dei margini in termini di spazio per gli altri componenti presenti nel canale protonico al fine di facilitare le operazioni di assemblaggio. Al riguardo, sono state considerate le dimensioni massime del collimatore preliminare già sviluppato in precedenza e prese come riferimento per la progettazione del nuovo modello.
- Misura di corrente: il sistema dev'essere in grado di misurare la corrente associata al fascio intercettato per poter conoscerne le caratteristiche nel tempo (quali la forma e la posizione nello spazio istante per istante).

2.4 Definizione dei dischi collimatori

Inanzitutto è stato svolto uno studio preliminare per definire una geometria semplificata dei dischi e stimare le dimensioni indicative in base alla massima potenza teorica di riferimento e alle caratteristiche del fascio protonico all'ingresso. Di seguito si richiamano le proprietà del fascio considerato:

Energy	40 MeV/u
Power	8 kW
Spot size	50 mm

Lo spot size è centrato, circolare e con distribuzione di potenza teoricamente gaussiana in uscita dal collimatore (*shaping*). Infatti si può ipotizzare con buona approssimazione una distribuzione gaussiana dell'intensità del fascio protonico in ingresso; transitando poi attraverso il sistema collimatore ne vengono escluse le zone periferiche, di conseguenza le code della distribuzione vengono "tagliate".

La parte del fascio che viene lasciata passare è perciò calibrata, con distribuzione di potenza teoricamente gaussiana. In coordinate polari, la funzione $f(\rho, \theta)$ che rappresenta l'andamento gaussiano è descritto dall'equazione (2.1):

$$f(\rho, \theta) = e^{-\frac{(\rho \cos \theta - m)^2 + (\rho \sin \theta)^2}{2\sigma}} \quad (2.1)$$

dove ρ e θ sono le coordinate che descrivono la posizione di un punto generico rispetto all'origine del sistema di riferimento, m rappresenta lo scostamento dell'asse protonico rispetto all'origine del sistema di riferimento mentre σ definisce lo scarto quadratico medio (Figura 2.2);

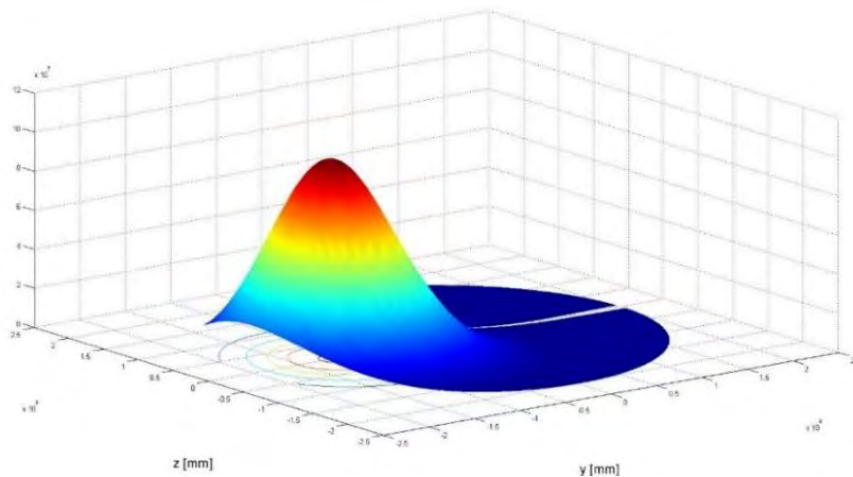


Figura 2.2: profilo del fascio protonico descritto dalla funzione gaussiana

m e σ sono parametri caratteristici della curva gaussiana che descrivono il profilo del fascio e si considerano i seguenti valori di riferimento pervenuti da analisi eseguite precedentemente:

$$m = 8.8 \text{ mm}$$

$$\sigma = 5.6 \text{ mm}$$

Ogni disco collimatore sarà intercettato dal fascio protonico in ingresso e in uscita risulterà conformato secondo un diametro corrispondente al diametro del foro D_i (Figura 2.3).

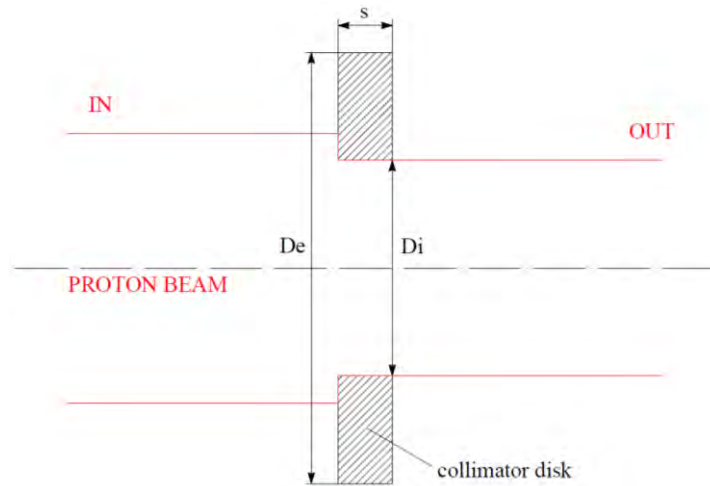


Figura 2.3: schema di funzionamento del disco collimatore

Si è scelto di adottare una serie costituita da 4 dischi collimatori in grafite per poter distribuire nei 4 stadi la potenza termica prodotta, nonché contenere le temperature dei dischi stessi entro valori cautelativi e garantire una dissipazione termica più efficace.

Dunque nota la funzione che descrive il profilo del fascio, l'intensità ad esso associata può essere ricondotta al calcolo di un'integrale (2.2):

$$I(\rho, \theta) = \int_{R_i}^{\infty} \int_0^{2\pi} e^{-\frac{(\rho \cos \theta - m)^2 + (\rho \sin \theta)^2}{2\sigma}} \rho \, d\rho \, d\theta \quad (2.2)$$

in particolare, dovendo definire la geometria dei dischi, viene calcolata dapprima l'intensità del fascio incidente sulla superficie in ingresso di ogni disco e i valori dei raggi R_i vengono scelti in modo tale da ripartire la potenza massima teorica e garantire una distribuzione che sia pressoché equivalente nei 4 dischi, così da prevedere gradienti termici poco dissimili nei diversi stadi.

Inoltre lo spessore dei dischi deve assicurare che le porzioni di fascio intercettate non oltrepassino i dischi stessi per non pregiudicare la funzionalità del collimatore. Al riguardo, tramite il codice di calcolo SRIM è possibile valutare lo spessore minimo sufficiente ad assorbire la radiazione incidente in funzione delle caratteristiche del fascio e delle proprietà del materiale che caratterizzano il bersaglio. Dall'analisi svolta lo spessore minimo sufficiente ad assorbire completamente il fascio radiattivo si aggira attorno a 10 mm ; in misura cautelativa, è stato considerato uno spessore maggiorato pari a 12 mm in vantaggio di sicurezza.

Si perviene dunque ad un modello semplificato del multi-collimatore che vede la camera esterna rappresentata da un cilindro cavo all'interno del quale sono disposti coassialmente i 4 dischi collimatori equispaziati tra loro (Figura 2.4).

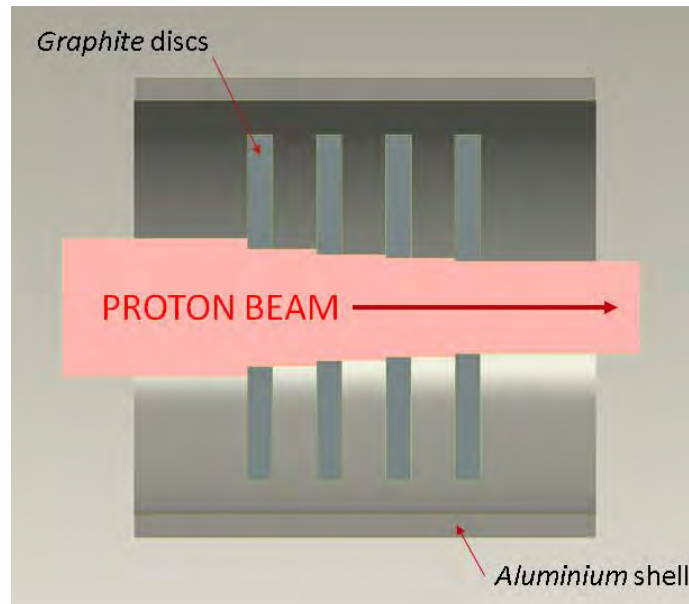


Figura 2.4: schema semplificato del multi-collimatore

La Tabella 2.1 riassume i dati costruttivi adottati, mentre nella Figura 2.5 sono rappresentate le potenze termiche P_i associate ai singoli dischi, calcolate in misura proporzionale alle rispettive porzioni di fascio intercettato ΔI :

	Disco 1	Disco 2	Disco 2	Disco 4
s [mm]	12	12	12	12
De [mm]	150	150	150	150
Di [mm]	40.8	36.8	34.4	32
$I(\rho, \theta)$	3.12	6.78	10.22	14.82
ΔI	3.12	3.66	3.44	4.59
$\Delta I \%$	21.07	24.68	23.25	30.99
P_i [W]	632.12	740.52	697.53	929.83

Tabella 2.1: dati costruttivi adottati per la definizione dei dischi collimatori

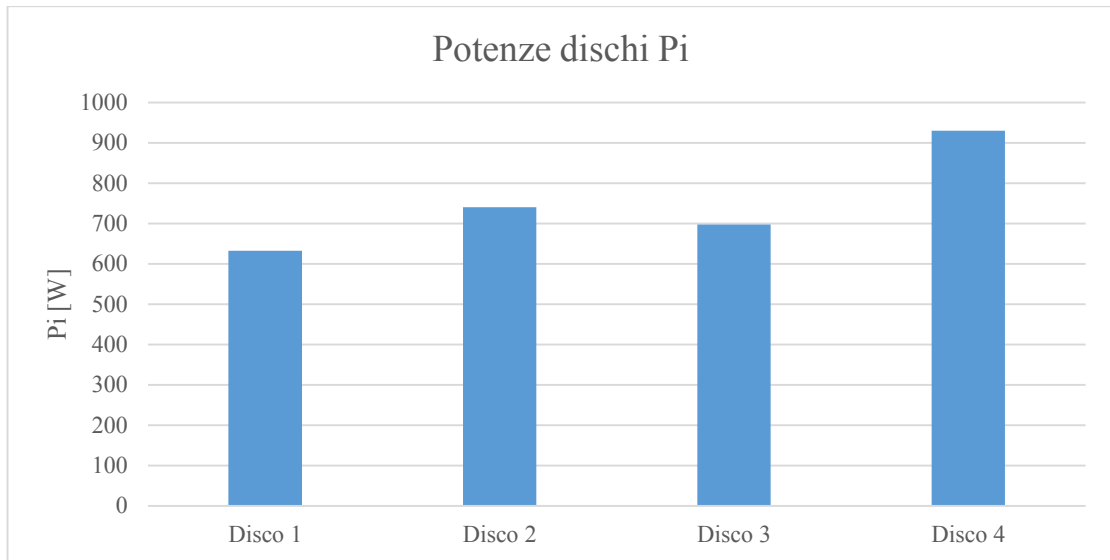


Figura 2.5: potenze P_i assorbite dai dischi collimatori

Dal grafico 2.5 precedente si nota come la potenza associata al disco 4 sia maggiore rispetto ai rimanenti. La ragione per cui si vuole destinare una maggior potenza in questo ultimo disco sta nel fatto che in quest'ultimo si vuole misurare la rotazione del fascio attorno all'asse principale del canale protonico chiamata *wobbling*, dunque in previsione di una misura soddisfacente si destina una maggior potenza per avere una maggior intensità di corrente del segnale misurato.

2.5 Misura delle caratteristiche del fascio

Le caratteristiche che riguardano la forma e la posizione del fascio protonico che va ad insistere sui dischi del sistema multi-collimatore sono descritte dai parametri m e σ , avendo ipotizzato un profilo gaussiano per il fascio stesso [2]. La loro conoscenza valutata nel tempo, permette di conoscere forma e posizione del fascio istante per istante; dunque la misura dell'intensità di corrente si rivela indispensabile in questo caso per risalire alla conoscenza di tali parametri.

E' possibile stimare l'ordine di grandezza delle correnti circolanti richiamando alcune definizioni. L'intensità di corrente I è direttamente proporzionale al numero di atomi al secondo che vengono ionizzati ed accelerati e che colpiscono il bersaglio; la seguente relazione (2.3) è valida per un fascio ionico continuo e stabile in cui ogni ione ha una carica singola:

$$\frac{N}{t} = \frac{I}{e} \quad (2.3)$$

Per cui dalla misura della corrente I è possibile conoscere il numero di ioni N che provengono nella sezione di misura nel tempo t , essendo e la carica elementare dell'elettrone pari $e = 1,602 \cdot 10^{-19} C$.

Questa espressione è molto accurata per via della relazione diretta tra corrente misurata e numero di ioni. Infatti poichè, come è stato detto, la carica elementare di un elettrone è $1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Coulomb}$ ed un *Ampere* corrisponde ad un *Coulomb/sec*, una corrente di 1 nA corrisponde ad un flusso di $6.25 \cdot 10^{19} \text{ elettroni al secondo}$.

$$1 \text{ nA} = 1 \cdot 10^{-9} A = 1 \cdot 10^{-9} C/s = \frac{1 \cdot 10^{-9} C/s}{1,602 \cdot 10^{-19} C/e} = 6.25 \cdot 10^9 e/s$$

La corrente rilevata nei dischi è molto bassa. Infatti facendo riferimento alle caratteristiche del fascio considerato (energia specifica di 40 MeV/u e potenza di 8 kW), si possono stimare il numero di particelle incidenti al secondo e quindi la corrente sviluppata (2.4):

$$1 \text{ eV} = 1.60217733 \cdot 10^{-19} J$$

$$1 \text{ MeV} = 1 \cdot 10^6 \text{ eV} = 1.60217733 \cdot 10^{-13} J$$

$$\frac{8000 W}{40 \text{ MeV/u} \cdot 1.60217733 \cdot 10^{-13} J/MeV} = 1.2483 \cdot 10^{15} \text{ partic/s} \quad (2.4)$$

Con questi dati di progetto, secondo la relazione (2.3), la corrente sviluppata stimata è di:

$$I = \frac{N}{t} \cdot e = 1.2483 \cdot \frac{10^{15} e}{s} \cdot 1.602 \cdot 10^{-19} C = 0.0002 A = 0.2 \text{ mA}$$

Oppure eseguendo la proporzione

$$\frac{1 \text{ nA}}{6.25 \cdot 10^9 e/s} = \frac{I}{1.2483 \cdot 10^{15} e/s} \rightarrow I = 200000 \text{ nA} = 0.2 \text{ mA}$$

Si tratta di correnti deboli che richiedono di essere amplificate prima di poter essere elaborate nella lettura dati. La misura dell'intensità di corrente del fascio nel collimatore ha una duplice importanza:

- Calibratura: E' necessaria per capire se l'impostazione dello strumento è stata fatta nel modo corretto nella fase di allineamento del dispositivo con l'asse del fascio protonico e se i parametri della sorgente di ioni sono stati impostati correttamente;
- Misurazione: E' necessaria per un'accurata valutazione del numero di particelle che transitano; risulta dunque un parametro fondamentale ai fini delle valutazioni statistiche sui dati di processo fisico che si vuole studiare.

2.6 Analisi termica preliminare

Una volta definito un modello semplificato del collimatore (Figura 2.6) tramite modellatore solido PRO-E, è stata eseguita un'analisi termica preliminare al fine di valutare la massima temperatura in esercizio raggiunta nei dischi e nel telaio esterno in base alla potenza termica di progetto assegnata ($3 kW$).

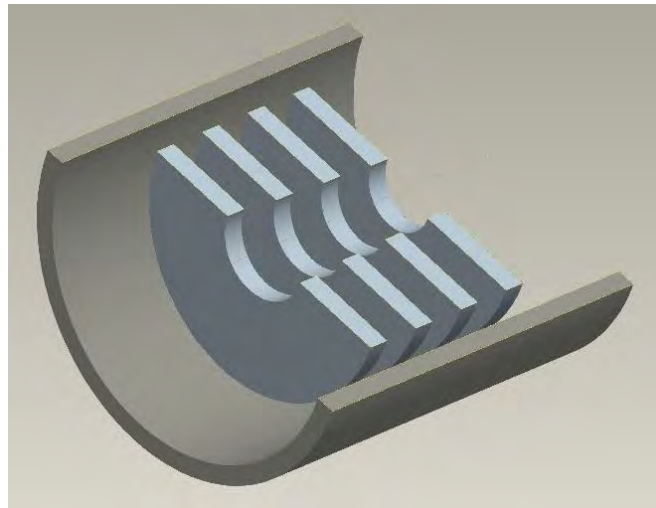


Figura 2.6: sezione del modello semplificato adottato per l'analisi termica preliminare

Tale analisi si rivela di fondamentale importanza poichè risulta essere determinante per la definizione del sistema che si intende realizzare. In particolare le temperature che risultano da tale analisi saranno utilizzate per poter definire in maggior dettaglio il dispositivo nei riguardi dei materiali impiegati, delle forme e delle dimensioni; dunque tale analisi determina l'inizio della progettazione vera e propria.

Nel modello considerato la modalità di trasferimento del calore avviene prevalentemente per irraggiamento, avendo considerato il sistema operante in condizioni di vuoto, e in misura minore per conduzione.

È stato quindi realizzato un programma APDL che riassume i comandi per l'esecuzione dell'analisi mediante il codice di calcolo ANSYS. Quindi, dopo aver importato i files.IGS del modello 3D, sono state importate le caratteristiche dei materiali e definite le emissività delle parti interessate da scambio termico per irraggiamento; in particolare per i dischi sono state implementate le caratteristiche della grafite, caratterizzata dall'aver un'elevata emissività e nel contempo una temperatura di fusione elevata ($T_f = 2800\text{ }^\circ\text{C}$), mentre per il tubo esterno (shell) si è optato per una lega di alluminio *Al 6082*, caratterizzata dall'aver un'elevata conducibilità termica a tutto vantaggio dello smaltimento della potenza termica prodotta. Per consultare il listato dei comandi implementati e le caratteristiche dei materiali si rimanda all'appendice.

Nell'analisi termica si è scelto di discretizzare il modello con l'elemento volumetrico SOLID 90; tale elemento è costituito da 20 nodi, ognuno con un grado di libertà, la temperatura (Figura 2.7).

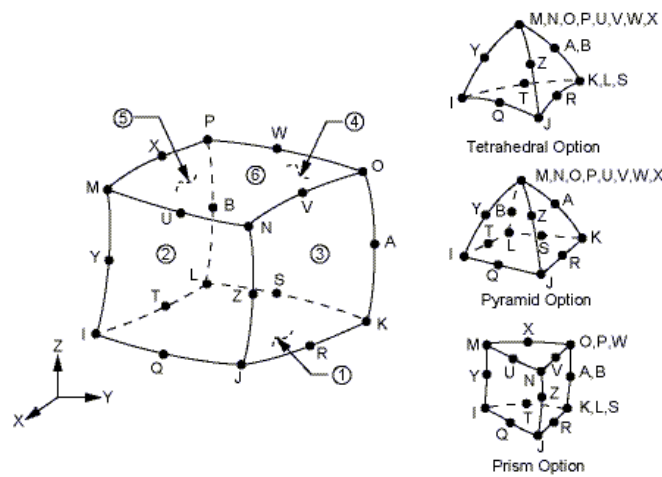


Figura 2.7: geometria dell'elemento SOLID90

Il modello è stato discretizzato con elementi quadrangolari laddove è stato possibile, nei limiti consentiti dalla geometria assialsimmetrica del sistema. Quindi è stata generata una mesh con elementi aventi una dimensione caratteristica $L = 5.5\text{ mm}$ rappresentata in Figura 2.8.

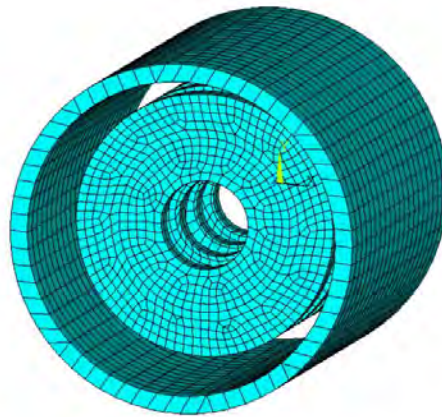


Figura 2.8: rappresentazione della mesh generata ($L=5,5mm$)

I carichi termici sono stati definiti in modo da avere una temperatura costante nel telaio esterno, cautelativa nei confronti dell'alluminio ($50\text{ }^{\circ}\text{C}$ sull'intero volume), in vista di un sistema di raffreddamento che sarà sviluppato successivamente, mentre per ogni disco è stata impostata una generazione di potenza per unità di volume nelle parti intercettate dal fascio protonico in misura proporzionale alle percentuali $\Delta I\%$ definite nei paragrafi precedenti. In particolare in ogni disco sarà applicata una potenza termica P_i in un volume strutturale V_i , calcolato come (2.5):

$$V_i = \frac{\pi}{4} \cdot (D_{b,i}^2 - D_{i,i}^2) \cdot s \quad (2.5)$$

Dove $D_{b,i}$ è il diametro del fascio che irradia il disco i -esimo, $D_{i,i}$ rappresenta il diametro del foro ed s è lo spessore, uguale per tutti i dischi (Figura 2.9).

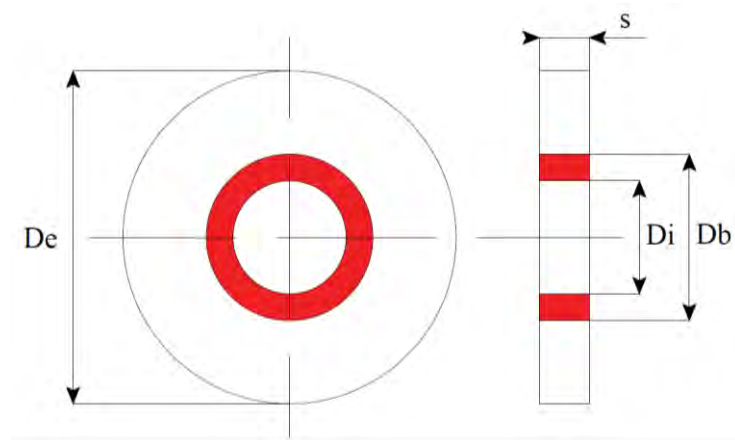


Figura 2.9: rappresentazione del volume strutturale al quale viene applicata la potenza P_i -esima

Le potenze per unità di volume applicate ai dischi risultano dalla seguente espressione (2.6):

$$H_i = \frac{P_i}{V_i} \quad (2.6)$$

La Tabella 2.2 riassume i calcoli fatti per definire il carico termico applicato ai dischi:

	Disco 1	Disco 2	Disco 3	Disco 4
P_i [W]	632.12	740.52	697.53	929.83
V_i [mm ³]	7873.08	2925.45	1610.51	1501.93
H_i [W/mm ³]	0.08	0.25	0.43	0.62

Tabella 2.2: definizione dei carichi termici H_i applicati ai dischi collimatori

Dai risultati delle temperature si può osservare una temperatura massima $T_{max} = 897.5 \text{ } ^\circ\text{C}$ in corrispondenza del terzo disco, in prossimità della superficie irradiata dal fascio protonico (Figura 2.10). Avendo impiegato la grafite come materiale per i dischi collimatori, la temperatura massima registrata è ampiamente al di sotto dei limiti raccomandati presenti in letteratura che si aggirano attorno ai $2000 \text{ } ^\circ\text{C}$; dunque sulla base di questi risultati, sebbene siano indicativi poichè si basano su un modello semplificato, è possibile garantire la verifica termica dei dischi.

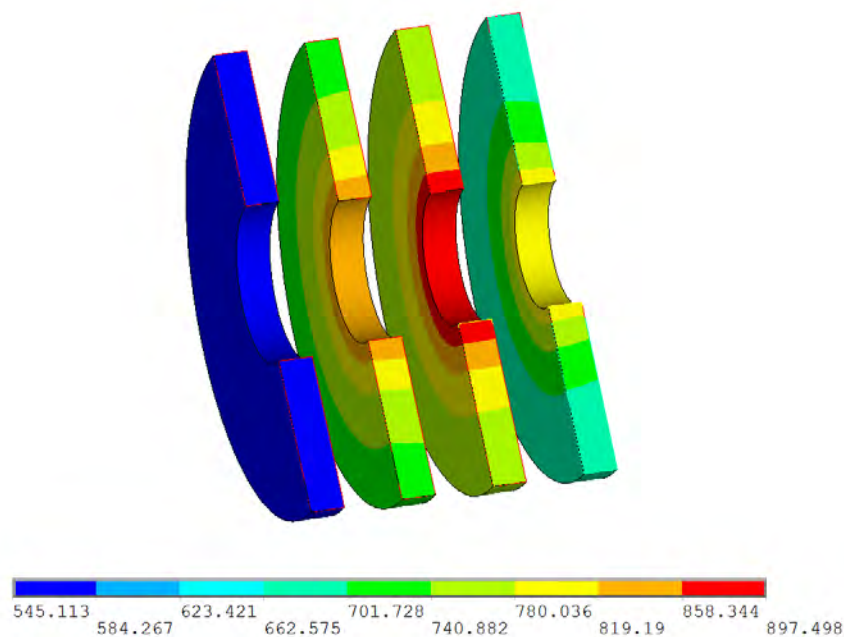


Figura 2.10: andamento delle temperature che risulta dall'analisi termica preliminare [°C]

Da questa prima analisi preliminare è stato possibile stimare il campo di temperature raggiunto nei dischi con un modello estremamente semplificato del sistema multi-collimatore; tuttavia, come accennato precedentemente, risulta essere di enorme importanza per lo sviluppo che seguirà, poichè rappresenta un punto di partenza per la progettazione dettagliata, che comporta la definizione dei materiali, delle geometrie e delle forme adottate per tutti i componenti necessari a garantire il corretto funzionamento del dispositivo in questione.

Nei paragrafi successivi saranno descritte tutte le modifiche apportate nel dispositivo in corso di progettazione opportunamente giustificate, in base alle specifiche di progetto che si intendono perseguire e ai vincoli tecnologici di realizzazione.

2.7 Progettazione dettagliata

Dai risultati ottenuti dall'analisi termica preliminare, è stata sviluppata la geometria del collimatore con maggior dettaglio cercando il più possibile di predominare la semplicità costruttiva, in termini di:

- *compattezza*: minimizzare gli ingombri in vista dell'installazione nel canale protonico;
- *accessibilità*: facilità di assemblaggio e manutenzione;
- *realizzazione*: utilizzo di forme semplici e realizzabili dal punto di vista tecnologico;

La progettazione del sistema multi-collimatore ha visto dapprima la definizione delle geometrie dei dischi in riferimento al modello semplificato descritto nel paragrafo precedente, per poi giungere alla modellazione della camera esterna provvista di un opportuno sistema di raffreddamento.

In riferimento al modello semplificato le temperature raggiunte nei dischi ampiamente al di sotto dei limiti prescritti, hanno permesso di ridurre l'ingombro radiale del sistema realizzando un dispositivo più compatto; in particolare per la camera è stato considerato un profilo tubolare avente diametro interno $D = 100\text{mm}$, mentre per i dischi collimatori si è adottato un diametro esterno $D_e = 95\text{mm}$, realizzando quindi un lasco con la camera di 2.5mm in senso radiale, più che sufficiente per assicurare l'isolamento elettrico.

Per quanto riguarda ciascun disco, la problematica fondamentale ha riguardato la definizione di un opportuno sistema di fissaggio e posizionamento all'interno della camera per le operazioni di calibratura.

Inoltre per ognuno dev'essere garantito l'isolamento elettrico rispetto al tubo esterno, giacchè in esso circolerà una corrente elettrica caratteristica del fascio protonico che dev'essere misurata opportunamente. Tra le diverse alternative proposte è stata considerata la soluzione di seguito rappresentata (Figura 2.11):

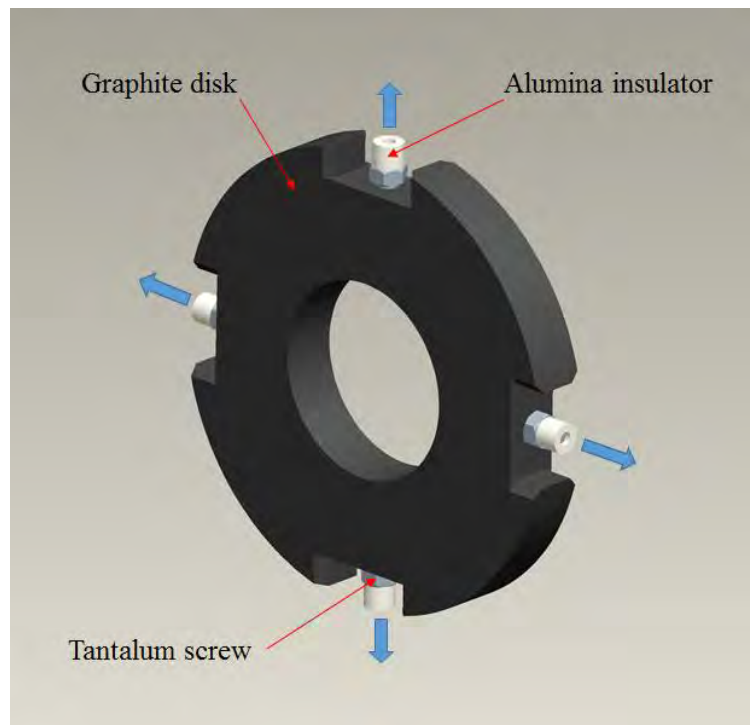


Figura 2.11: particolare del sistema del disco collimatore con sistema di fissaggio

Il sistema di fissaggio adottato è costituito da una serie di viti realizzate in tantalio (Ta), viste le alte temperature raggiunte, avvitate in corrispondenza della superficie esterna del disco in grafite: il fissaggio del disco viene dunque garantito dalla compressione generata dalle viti che insistono nella parete della camera; inoltre una serie di isolatori commerciali in allumina (Al_2O_3) sono utilizzati per isolare il disco elettricamente rispetto al telaio.

E' facile intuire come tale soluzione conferisca al collimatore un'elevata flessibilità per quanto riguarda il montaggio e il posizionamento, in particolare nella calibrazione del singolo disco rispetto all'asse del canale protonico, oltre che presentare una notevole semplicità nella realizzazione pratica.

Basti pensare infatti che ruotando in maniera opportuna le viti diametralmente opposte si ottengono traslazioni nette che permettono di spostare il disco lungo le direzioni assiali delle viti e dunque, con semplici movimenti, si riesce ad orientare in maniera opportuna ogni singolo disco.

Per quanto riguarda il quarto disco collimatore è stata adottata un'architettura diversa; infatti, come accennato nei paragrafi precedenti, in questo si associa una potenza di fascio collimato maggiore per poter misurare l'effetto *wobbling*. Dunque per poter misurare, in termini di intensità di corrente, le componenti rotative caratteristiche del fascio radiativo, si è pensato di suddividere il disco in 4 settori, ognuno dei quali risulti elettricamente isolato per le ragioni viste (Figura 2.12).

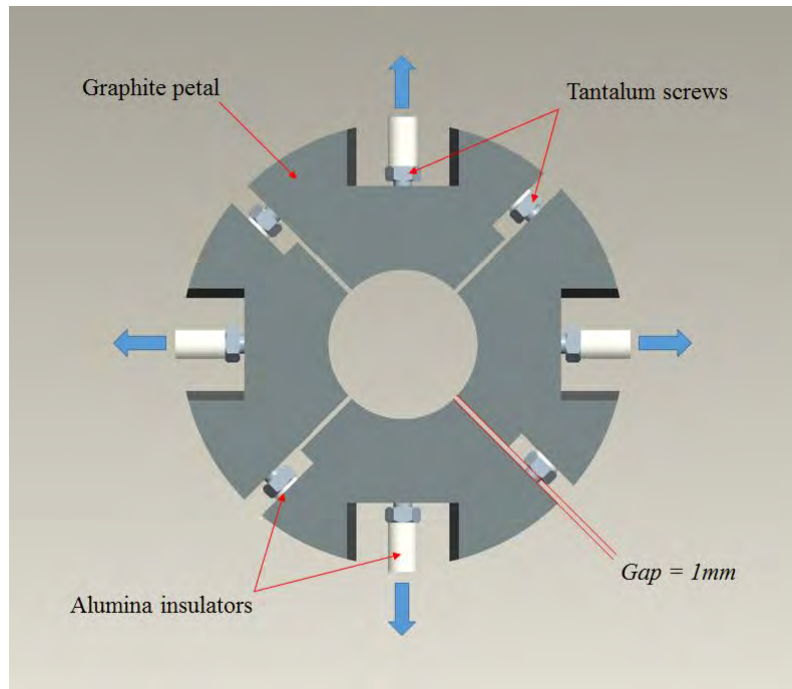


Figura 2.12: particolare del quarto disco collimatore

L'isolamento elettrico mutuo tra i petali che compongono il quarto disco è reso possibile dagli isolatori di allumina che insistono su viti in tantalio opportunamente sagomate.

Per il fissaggio del disco nella camera è stata considerata la stessa architettura adottata per gli altri dischi collimatori mentre per l'accoppiamento mutuo tra i petali si è considerato un sistema analogo costituito da viti in tantalio e isolatori in allumina; tale sistema assicura un completo isolamento elettrico e permette nel contempo di calibrare con ampia flessibilità l'apertura (gap) che si realizza tra le superfici dei petali stessi. Per la soluzione proposta si è scelto di realizzare un gap di riferimento di 1mm.

Tale apertura presenta due aspetti fondamentali:

- realizza l'apertura necessaria per l'isolamento elettrico mutuo tra i petali permettendo di controllare nel contempo la circolarità del foro;

- comporta inevitabilmente una perdita percentuale di energia associata al fascio. Infatti lo spot collimato dal terzo disco nell'attraversare il quarto disco, vista la geometria assunata da quest'ultimo, passerà attraverso le fessurazioni prodotte dal gap; in particolare, con un'apertura di 1mm la frazione di fascio non intercettata dal quarto disco si aggira attorno all'1% (30 W). Dunque il fascio in uscita dovrà essere necessariamente collimato da un ulteriore disco posto a valle al fine di conformarlo in un profilo perfettamente circolare e recuperare l'energia che altrimenti andrebbe perduta.

Aspetto peculiare del quarto disco risiede nella labilità che nasce tra i diversi petali adottando tale soluzione: infatti gli isolatori che insistono nelle rispettive sedi sono accoppiati con un leggero giuoco per poter essere fissati; la rotazione relativa che nasce tra i diversi settori compromette l'integrità strutturale in termini di labilità, giacchè a differenza degli altri dischi, questo non può essere considerato come un corpo unico. Per ovviare a tale problema è possibile per esempio prevedere un secondo isolatore interposto tra i petali che inibisce la rotazione relativa e dunque blocca gradi di libertà, ma l'estensione radiale esigua non lascia spazio per poter aggiungere altri componenti.

Tuttavia tale inconveniente può essere considerato un vantaggio, perchè permette di ottenere una maggior flessibilità durante le operazioni di fissaggio dei petali che compongono il quarto disco e, in un sistema così compatto, dovendo operare su spazi molto ristretti e con componenti di piccole dimensioni, risulta essere di fondamentale importanza in vista dell'assemblaggio e della manipolazione.

Per tutte le viti utilizzate si è cercato di minimizzare il passo in modo tale da avere un miglior controllo nella calibratura (0.5 mm) e le sagome ricavate nei corpi in grafite sono frutto di un'attenta modellazione che tiene conto dei vincoli geometrici dei componenti utilizzati.

La camera esterna (shell), realizzata in lega di alluminio Al 6082, è ricavata da un profilo tubolare avente diametro interno $D_i = 100 \text{ mm}$ e un diametro esterno $D_e = 130 \text{ mm}$ (Figura 2.13)

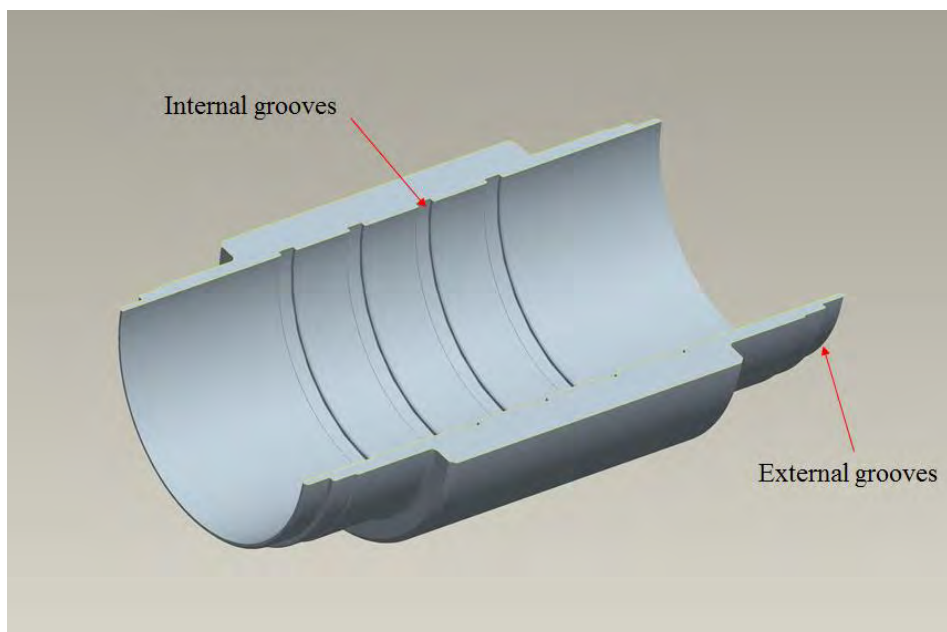


Figura 2.13: sezione della camera esterna

Come si può notare dall'immagine della camera, nel profilo sono previste delle scanalature esterne, realizzate per poter fissare le flange terminali di collegamento, e delle scanalature interne necessarie per il posizionamento e il fissaggio dei dischi collimatori; in particolare la larghezza di queste cave coinciderà, a meno di un giuoco minimo, con i diametri degli isolatori impiegati in modo da agevolare il montaggio dei dischi e garantire nel contempo l'ortogonalità degli stessi rispetto all'asse del canale protonico. Sono inoltre previste delle lavorazioni di riduzione del diametro esterno in corrispondenza delle zone terminali in previsione delle flange di fissaggio e delle viti utilizzate che richiedono un certo ingombro.

2.7.1 Sistema di raffreddamento

Il sistema multi-collimatore considerato deve poter smaltire una potenza termica teorica massima di 3 kW . Dovendo prevedere un sistema di raffreddamento, lo si dimensiona come se dovesse smaltire tutta la potenza termica; questo modo di procedere è in vantaggio di sicurezza nel caso siano presenti altri sistemi di dissipazione del calore che vengono a sovrapporsi, come per esempio lo scambio termico radiativo verso l'ambiente esterno [3].

L'ipotesi di considerare tutto il flusso di calore termico entrante dissipato per convezione attraverso dei canali di raffreddamento si dimostra valida, in quanto il calore dissipato per convezione è prevalente rispetto a quello dissipato per irraggiamento. Infatti in presenza del raffreddamento per sola convezione forzata, la temperatura dell'oggetto viene mantenuta relativamente bassa e perciò l'irraggiamento, che ha dipendenza con la quarta potenza della temperatura, è ininfluenza.

Il fluido vettore utilizzato per il raffreddamento è acqua trattata. Viene ipotizzata la temperatura d'ingresso $t_i = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ e la velocità media di deflusso attraverso i canali:

$$u = 1 \text{ m/s}$$

La velocità è scelta in ragione del fatto che esiste un range consigliato per le velocità di deflusso, che per canali in alluminio è:

$$u_{min} = 1 \text{ m/s} , \quad u_{max} = 1,5 \text{ m/s}$$

Al di sotto di tale range si incorre in pericolo di sporcamento dei canali, mentre al di sopra vi è pericolo di erosione. Nel caso specifico l'acqua di raffreddamento è trattata ai fini di limitare la conduzione e scorre in canali scavati all'interno di un solido pieno.

Si sceglie di realizzare il canale in un unico passaggio evitando le complicazioni fluidodinamiche di divisione delle portate, perciò si sceglie un valore opportuno per la portata in ingresso m :

$$m = 5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s} = 0.05 \text{ l/s} = 180 \text{ l/h}$$

E' quindi possibile stimare la sezione di deflusso A come (2.7)

$$A = \frac{m}{u} = \frac{5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}}{1 \text{ m/s}} = 5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \quad (2.7)$$

Per la sezione rettangolare di deflusso si considera, per semplicità di realizzazione pratica, una larghezza del canale pari al diametro della fresa utilizzata, di conseguenza la profondità della cava è univocamente determinata in base all'area calcolata; in particolare considero le seguenti dimensioni:

$$b = 10 \text{ mm} \rightarrow h = \frac{A}{b} = 5 \text{ mm}$$

A questo punto è possibile calcolare il diametro equivalente d_e , che nel caso specifico vale (2.8):

$$d_e = \frac{2 \cdot b \cdot h}{b + h} = 7 \text{ mm} \quad (2.8)$$

Le proprietà del fluido valutate alla temperatura in ingresso ($t_i = 20 \text{ }^\circ\text{C}$) risultano:

Densità ρ [Kg/m^3]	Conducibilità λ [W/mK]	Viscosità μ [Kg/ms]	Calore specifico c_p [J/KgK]
998.16	0.59842	0.0010016	4184.4

Lo stato medio del fluido è quindi rappresentato dai seguenti numeri dimensionali termo-fluidodinamici (2.9):

$$Re = \frac{d_e \cdot \rho \cdot u}{\mu} = \frac{0.007 \text{ m} \cdot 998.16 \text{ Kg}/\text{m}^3 \cdot 1 \text{ m}/\text{s}}{0.0010016 \text{ Kg}/\text{ms}} = 6643.77$$

$$Pr = \frac{c_p \cdot \mu}{\lambda} = \frac{4184.4 \text{ J}/\text{KgK} \cdot 0.0010016 \text{ Kg}/\text{ms}}{0.59842 \text{ W}/\text{mK}} = 7 \quad (2.9)$$

$$Nu = 0.027 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.33} \cdot 1^{0.14} = 0.027 \cdot 6643.77^{0.8} \cdot 7^{0.33} \cdot 1^{0.14} = 58.65$$

E quindi, dalla definizione del numero di Nusselt $Nu = \alpha \cdot d_e / \lambda$, si ricava il coefficiente di convezione medio (2.10):

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{d_e} = 5264.40 \text{ W}/\text{m}^2 \quad (2.10)$$

In riferimento alla potenza termica da smaltire $Q = 3000 \text{ W}$, dalla relazione fondamentale dello scambio termico $Q = c_p \cdot m \cdot \Delta T$, si può risalire al surriscaldamento subito dal fluido vettore, che risulta essere (2.11):

$$\Delta T = \frac{Q}{c_p \cdot m \cdot \rho} = \frac{3000 \text{ W}}{4184.4 \text{ J/KgK} \cdot 5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s} \cdot 998.16 \text{ Kg/m}^3} = 14,37 \text{ }^\circ\text{C} \quad (2.11)$$

L'acqua dunque entra alla temperatura $T_i = 20^\circ\text{C}$, assorbe la potenza termica prodotta ed esce alla temperatura $T_u = 34.37^\circ\text{C}$. Tuttavia le proprietà dell'acqua sono state valutate alla temperatura d'ingresso; per un calcolo più preciso è opportuno valutarle alla temperatura media tra l'ingresso e l'uscita $T_m = 27.18^\circ\text{C}$; ricalcolando il tutto, considerando T_m come temperatura di riferimento per le proprietà dell'acqua si ottengono valori aggiornati dei termini α , ΔT , T_f e T_m . In particolare dopo 2 iterazioni si raggiunge la convergenza fino alla seconda cifra decimale sulle temperature.

Considerando l'ultima iterazione, alla temperatura $T_m = 27.20^\circ\text{C}$ le proprietà dell'acqua valgono:

Densità ρ [Kg/m ³]	Conducibilità λ [W/mK]	Viscosità μ [Kg/ms]	Calore specifico c_p [J/KgK]
996.39	0.61081	0.0008493	4180.94

e il calcolo fornisce i seguenti valori aggiornati:

Re	7821.26
Pr	5.81
Nu	62.84
α [W/m²]	5757.64
T_u [°C]	34.40
ΔT [°C]	14.40

A questo punto è possibile calcolare la superficie di scambio S richiesta per smaltire la potenza termica di progetto Q (2.12):

$$Q = \alpha \cdot S \cdot \Delta T_{log} \rightarrow S = \frac{Q}{\alpha \cdot \Delta T_{log}} \quad (2.12)$$

Dove ΔT_{log} rappresenta la variazione di temperatura tra ingresso ed uscita che si instaura tra la camera che cede calore e il fluido vettore che lo assorbe, ed è definita come (2.13)

$$\Delta T_{log} = \frac{\Delta T_u - \Delta T_i}{\ln \frac{\Delta T_u}{\Delta T_i}} \quad (2.13)$$

Avendo considerato una temperatura massima cautelativa per l'alluminio $T_{max} = 100^\circ C$ si ha che:

$$\Delta T_u = T_{max} - T_u = 100 - 34.40 = 65.60 \text{ }^\circ C$$

$$\Delta T_i = T_{max} - T_i = 100 - 20 = 80 \text{ }^\circ C$$

$$\Delta T_{log} = 72.56 \text{ }^\circ C$$

Dunque la superficie di scambio S risulta:

$$S = \frac{Q}{\alpha \cdot \Delta T_{log}} = \frac{3000W}{5757.64 \text{ W/m}^2 \cdot 72.56 \text{ }^\circ C} = 0.007181 \text{ m}^2$$

Considerazioni di carattere geometrico permettono di stimare il posizionamento di un canale costituito da 8 piste longitudinali connesse da 7 tratti tangenziali (Figura 2.14).



Figura 2.14: particolare del sistema di raffreddamento

La lunghezza approssimata complessiva del circuito di raffreddamento risulta di $L = 0.842 \text{ m}$. Nella verifica termica, tale valore viene confrontato con la lunghezza minima teorica L_{min} calcolata come (2.14):

$$L_{min} = \frac{S}{2(b+h)} = \frac{0.007181 \text{ m}^2}{2(0.005\text{m} + 0.010\text{m})} = 0.239 \text{ m} \quad (2.14)$$

Dove $2(b+h)$ rappresenta il perimetro della sezione di deflusso.

Si può verificare che $L_{min} < L$, dunque il sistema di raffreddamento ricavato dalla camera è verificato termicamente; è possibile stimare altresì una sorta di coefficiente di sicurezza termico φt che convalida ulteriormente tale verifica, definito come (2.15)

$$\varphi t = \frac{L}{L_{min}} = \frac{0.842\text{m}}{0.239\text{m}} = 3.52 \quad (2.15)$$

Il sistema di raffreddamento completo è rappresentato nella Figura 2.15a. Esso viene realizzato come un unico canale ricavato sulla superficie esterna della camera, e delle ulteriori placche opportunamente sagomate si rendono necessarie per la chiusura del condotto stesso; al riguardo sono previste delle battute di riferimento (Figura 2.15b) al fine di garantire un buon accoppiamento delle placche con la camera in vista delle operazioni di saldatura.

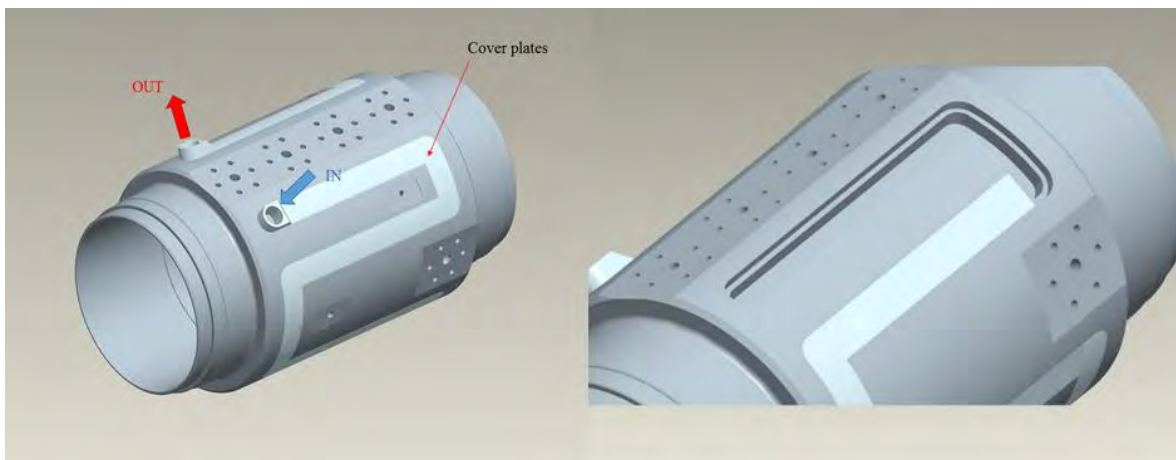


Figura 2.15: a- sistema di raffreddamento; b- particolare delle battute di accoppiamento

Per l'acquisizione dei segnali di corrente che circolano nei diversi dischi vengono utilizzati dei connettori elettrici; nel caso in esame si sono resi necessari dei dispositivi con caratteristiche specifiche per far fronte alle particolari condizioni di lavoro, in particolare:

- Massima corrente circolante $i = 0.2 \text{ mA}$;
- Condizioni di alto vuoto: $p = 10^{-8} \text{ mbar}$;
- Ambiente radioattivo;
- Resistenza alle alte temperature.

Tali aspetti sono stati determinanti per la scelta dei connettori viste le diverse alternative presenti nel mercato. La soluzione finale (Figura 2.16) soddisfa le funzionalità richieste e nel contempo non pregiudica in maniera significativa l'ingombro della camera nel quale andranno alloggiati. Infatti tali connettori sono fissati, mediante opportune flange di accoppiamento, in prossimità di opportune spianature realizzate sulla superficie esterna della camera, mentre degli anelli di tenuta si rendono necessari per garantire le condizioni di vuoto ricercate. Complessivamente sono previsti 7 connettori di cui 4, sfalsati diametralmente di 90° , sono dedicati alle misurazione di corrente nei 4 petali che compongono il quarto disco.

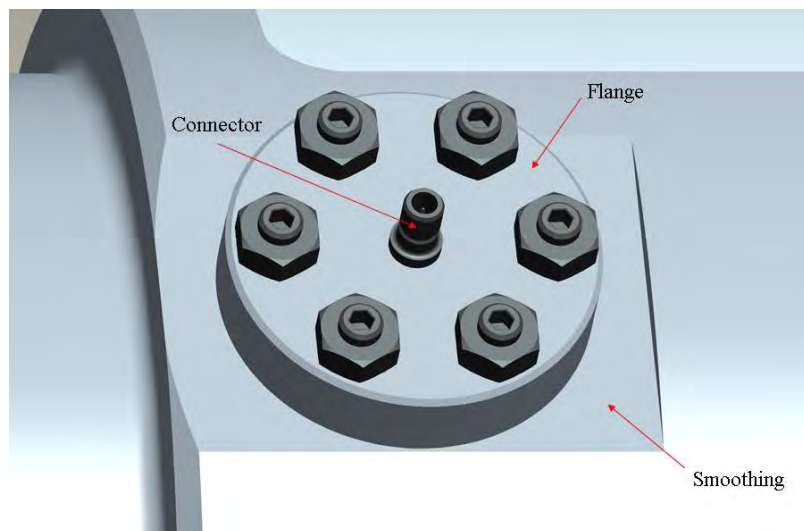


Figura 2.16: particolare del connettore elettrico

Per garantire la massima precisione di allineamento del sistema con l'asse del canale protonico viene utilizzato un sistema di centraggio laser, costituito da una sorgente snodabile e da opportune sfere di riferimento solidali al sistema da calibrare.

Quindi nella camera devono essere fissate opportune bussole di sostegno nel quale vengono accoppiate tali sfere; in vista del loro fissaggio nella superficie della camera dunque sono realizzate ulteriori spianature piane (Figura 2.17).

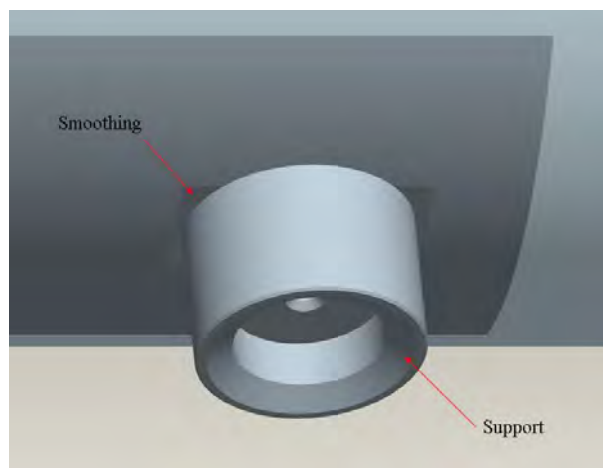


Figura 2.17: particolare della bussola di sostegno

Infine opportune flange terminali si rendono necessarie per l'installazione dell'intero sistema nel canale protonico; in primo luogo, in vista delle successive analisi, sono state adottate flange di accoppiamento realizzate in lega di alluminio *Al 6082*. L'ingombro complessivo del dispositivo dunque risulta essere di *240 mm*, contro i *260 mm* del collimatore concepito nella versione precedente. Si evince dunque come questa soluzione preliminare, rappresentata in Figura 2.18, rispetti i requisiti prefissati in termini di compattezza, accessibilità e realizzazione tecnologica.

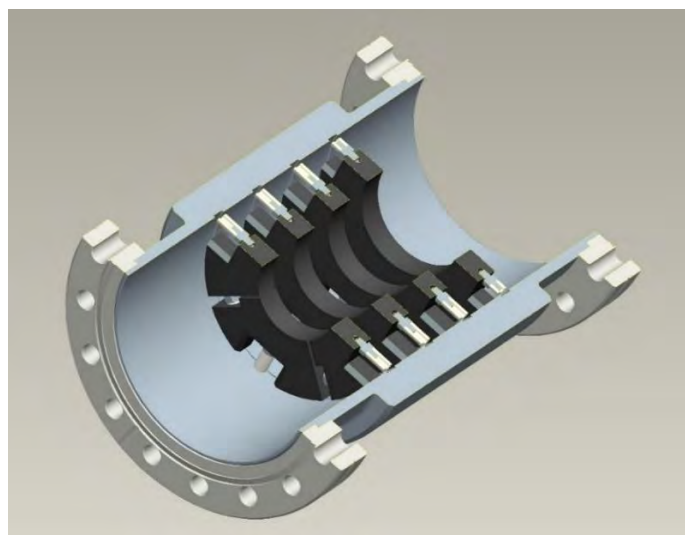


Figura 2.18: sezione del sistema multi-collimatore assemblato

Nei paragrafi successivi verranno avanzate opportune analisi termo-strutturali al fine di verificare la resistenza termica e meccanica dei componenti; ulteriori modifiche di carattere progettuale verranno opportunamente menzionate e giustificate.

2.8 Analisi termica

In riferimento al modello tridimensionale del sistema collimatore (Figura 2.18) sono state eseguite diverse analisi termiche mediante calcolo FEM al fine di determinare le temperature massime raggiunte nei singoli componenti; dunque l'obiettivo fondamentale è quello di verificare la resistenza termica degli stessi e individuare eventuali criticità, giacché il dispositivo per poter funzionare in condizioni di sicurezza deve poter smaltire la potenza termica di progetto (3 kW) senza che i singoli componenti superino la temperatura limite di lavoro, che sarà diversa per ogni materiale impegnato. In particolare la Tabella 2.3 riassume i valori limiti raccomandati presenti in letteratura [4] per i diversi materiali impiegati nel modello:

Materiale	T_{lim} [°C]
Lega di alluminio <i>Al 6082</i>	400
Grafite <i>C</i>	2000
Tantalio <i>Ta</i>	1700
Allumina <i>Al₂O₃</i>	1700
Acciaio <i>AISI 316</i>	600

Tabella 2.3: valori raccomandati delle temperature limite presenti in letteratura

Tali temperature risultano essere inferiori alle temperature di fusione dei singoli materiali considerati, in virtù del fatto che viene tenuto conto dell'effetto subordinato degli altri materiali presenti; la co-presenza di diversi materiali infatti può favorire, in prossimità delle zone di contatto, fenomeni localizzati di interazione che possono compromettere l'integrità strutturale anche a temperature inferiori ai punti di fusione dei singoli materiali; per questo motivo, in misura cautelativa, vengono considerate queste temperature di riferimento come limiti operativi.

Sono stati realizzati dei programmi APDL che riassumono i comandi per l'esecuzione delle analisi termiche mediante codice di calcolo ANSYS. Per consultare il listato dei comandi implementati e le caratteristiche dei materiali si rimanda all'appendice. In tutte le analisi si è scelto di discretizzare il modello con l'elemento volumetrico SOLID 90, già utilizzato e descritto in precedenza nell'analisi termica preliminare. Dunque utilizzando il codice di calcolo ANSYS sono state eseguite diverse analisi termiche con diverso grado di raffinamento della mesh per poter svolgere l'analisi di convergenza.

In particolare, per ogni analisi, sono stati eseguiti dei *path* preferenziali (radiali e longitudinali) che si appoggiano sulla geometria del modello; in questo modo è stato possibile verificare la convergenza dei valori registrati su più punti d'interesse contemporaneamente e poter quindi rafforzare l'attendibilità dei dati ottenuti. Analogamente a quanto fatto nell'analisi termica preliminare è stato applicato un carico termico complessivo di 3 kW , ripartito nelle porzioni dei dischi intercettate dal fascio radiattivo e dei carichi convettivi che riassumono il sistema di raffreddamento a liquido della camera mentre l'ambiente esterno lambisce la superficie esterna della stessa.

Il modello è stato discretizzato con elementi tetragonali e quadrangolari laddove è stato possibile (Figura 2.19). Per la convergenza dei valori ottenuti sono bastate 4 analisi con diverso grado di raffinamento della mesh, sufficienti a garantire un'errore relativo di troncamento $\epsilon < 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Nella Tabella 2.4 sono riportate le dimensioni medie degli elementi utilizzati nella discretizzazione del modello:

Componente	Dimensione media elemento [mm]			
	Analisi B1	Analisi B2	Analisi B3	Analisi B4
Dischi	4	3	2	1
Isolatori	3	2	1	0.5
Viti	3	2	1	0.5
Camera	10	8	6	4
Flange	10	8	6	4

Tabella 2.4: dimensioni medie degli elementi utilizzati nelle diverse analisi

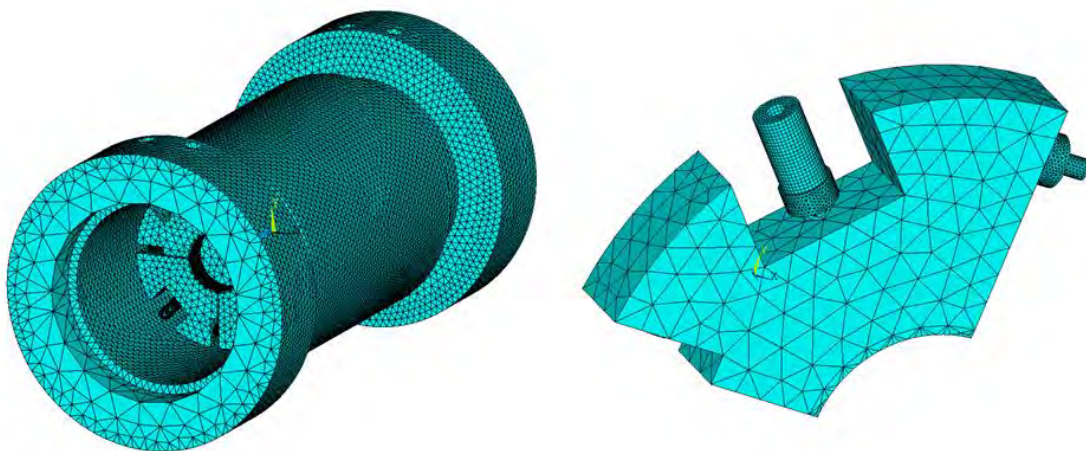


Figura 2.19: : particolari della mesh adottata nell'analisi di convergenza (analisi B4)

Nelle figure seguenti sono rappresentati gli andamenti termici dei diversi componenti che costituiscono il dispositivo, che risultano dall'analisi termica (Figure Figura 2.20, Figura 2.21 e Figura 2.22).

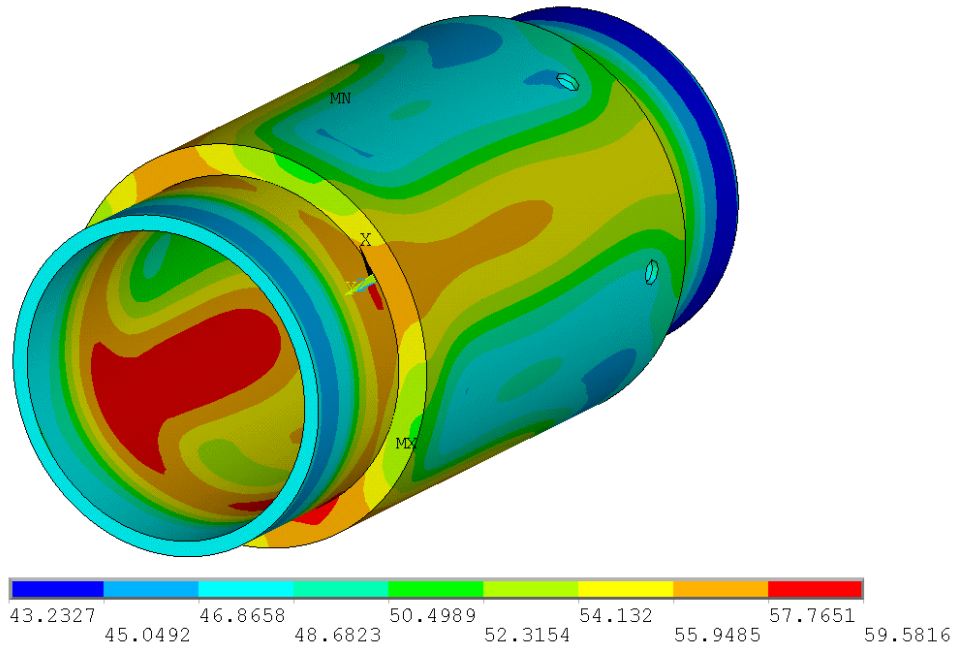


Figura 2.20: campo di temperatura riscontrato nella camera raffreddata [°C]

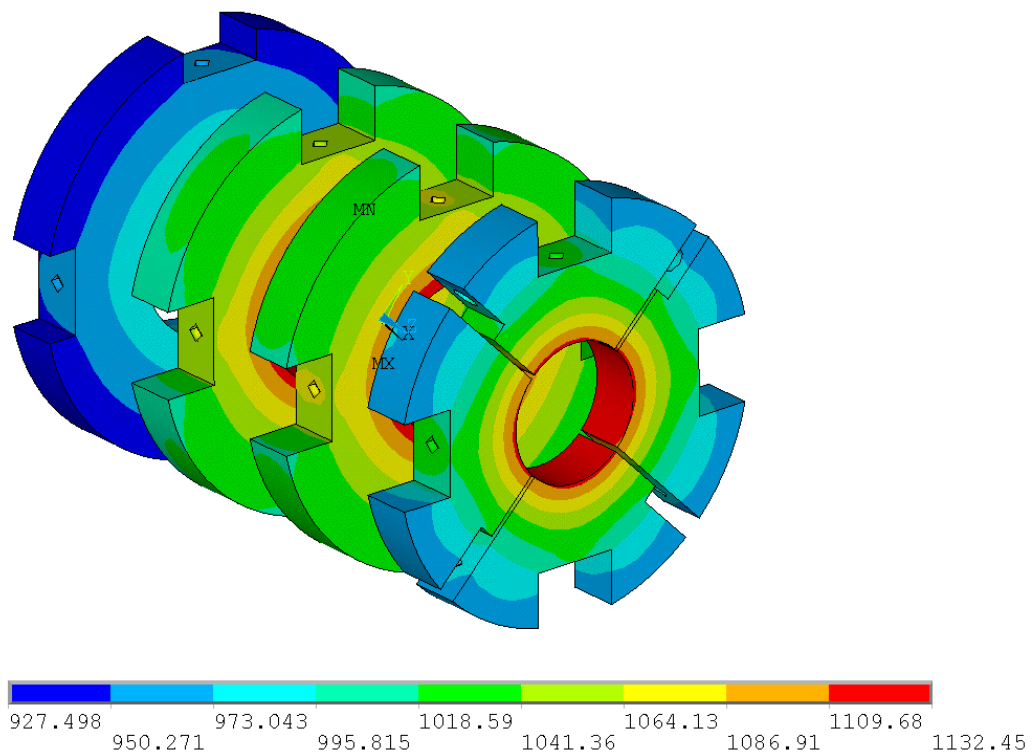


Figura 2.21: campo di temperatura riscontrato nei dischi collimatori [°C]

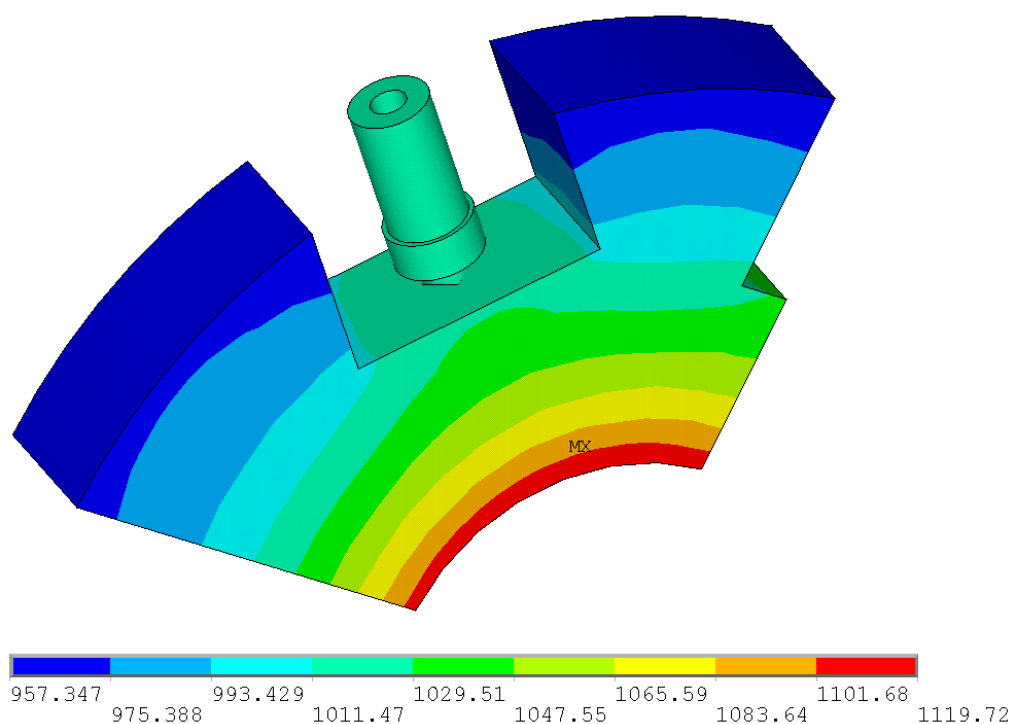


Figura 2.22: campo di temperatura riscontrato nel petalo del quarto disco collimatore [°C]

La Tabella 2.5 riassume i risultati ricercati nelle analisi svolte; in particolare sono riportate le temperature massime registrate nei componenti del modello lungo i percorsi preferenziali tracciati:

Componente	Materiale	Temperature massime [°C]			
		Analisi B1	Analisi B2	Analisi B3	Analisi B4
Petalo disco 4	Grafite	1119.09	1118.09	1118.49	1118.03
Isolatori	Alumina	1022.64	1021.75	1022.20	1021.77
Viti	Tantalio	1031.02	1029.96	1030.41	1030.04
Camera	Alluminio	58.78	58.68	58.78	58.78
Flange	Acciaio	192.31	192.78	193.05	193.20

Tabella 2.5: temperature massime che risultano dalle analisi termiche

Dai valori in tabella si nota come l'errore relativo riscontrato nell'ultima analisi non superi il valore prefissato ($\epsilon = 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$), dunque è possibile covalidare la convergenza dei risultati ottenuti.

Inoltre le temperature massime raggiunte dai componenti risultano ampiamente al di sotto dei limiti raccomandati, dunque il modello proposto risulta verificato termicamente. Tuttavia la temperatura massima raggiunta nelle flange terminali $T_{max} = 193.20 \text{ } ^\circ\text{C}$ risulta essere poco cautelativa nei confronti delle guarnizioni che verranno utilizzate per garantire la tenuta stagna (Figura 2.23).

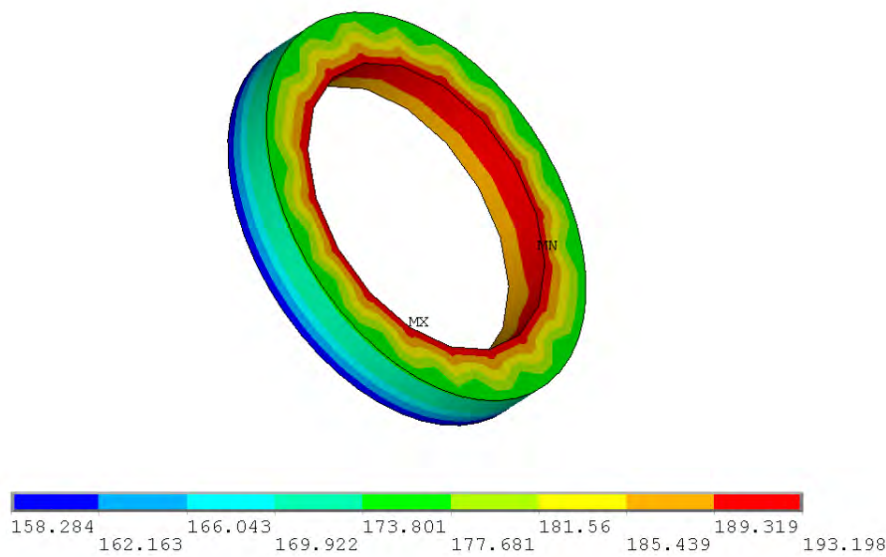


Figura 2.23: Campo di temperatura della flangia normalizzata [$^\circ\text{C}$]

In particolare, per far fronte alle condizioni di vuoto richieste, si utilizzano guarnizioni realizzate in Indio; per la temperatura limite di riferimento viene considerata una temperatura cautelativa $T_{lim} = 100 \text{ } ^\circ\text{C}$ (inferiore alla temperatura di fusione $T_{f:indio} = 156,6 \text{ } ^\circ\text{C}$) e si nota come i risultati FEM relativi alla flangia eccedono tale limite. Quindi per abbassare il campo di temperatura raggiunto dalla flangia entro limiti cautelativi nei confronti delle guarnizioni, viene realizzato un sistema di raffreddamento ricavato nella flangia stessa (Figura 2.24) atto a smaltire in maggior misura la potenza termica prodotta.

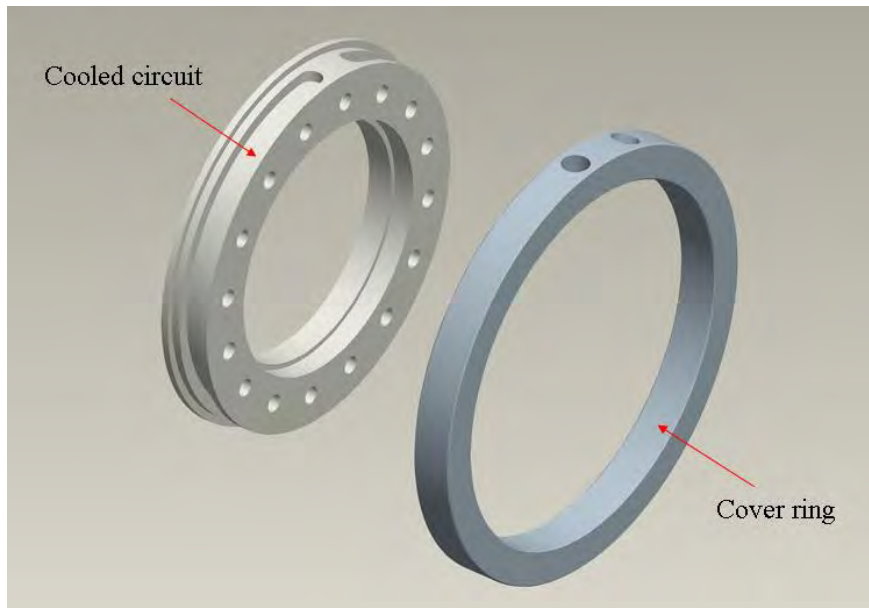


Figura 2.24: : vista esplosa della flangia con circuito di raffreddamento

Il canale circonferenziale prodotto presenta la stessa sezione di attraversamento di quella adottata per la camera e il fluido vettore utilizzato è ancora acqua trattata. Utilizzando gli stessi parametri di velocità e portata del fluido adottati per il sistema di raffreddamento previsto per la camera è stata eseguita un'ulteriore analisi termica considerando, nel modello del collimatore, la flangia nella sua nuova versione realizzata interamente in alluminio con rispettivo sistema di raffreddamento.

Dai risultati ottenuti (Figura 2.25) si evince come tale sistema di raffreddamento si rende indispensabile dal punto di vista funzionale: infatti esso è in grado di smaltire la potenza termica in misura sufficiente per abbattere il campo di temperatura raggiunto nella flangia, facendo pervenire le temperature entro valori ragguardevoli nei confronti delle guarnizioni utilizzate. Nell'ultima soluzione infatti si nota come le temperature massime raggiunte non superano i $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, rispetto ai $190\text{ }^{\circ}\text{C}$ riscontrati nella soluzione precedente.

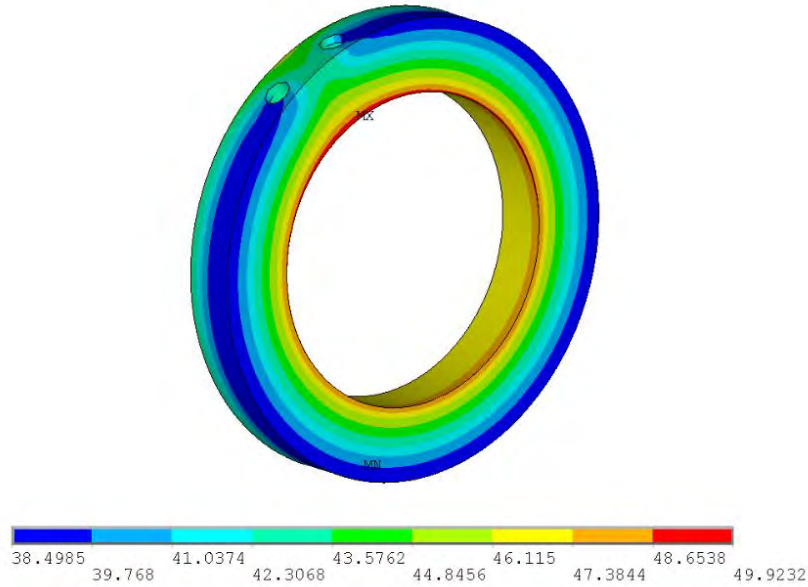


Figura 2.25: Campo di temperatura della flangia raffreddata [°C]

2.9 Analisi strutturale

L'analisi strutturale del collimatore si pone l'obiettivo di valutare le tensioni e le deformazioni dovute ai gradienti termici nascenti, al fine di verificare la resistenza meccanica dei singoli componenti. Lo stato tensionale locale può essere riassunto da una tensione ideale di riferimento σ_{id} ; per esempio secondo l'approccio di Von Mises questa vale (2.16):

$$\sigma_{id,VM} = \sqrt{(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2) - (\sigma_1\sigma_2 + \sigma_1\sigma_3 + \sigma_2\sigma_3)} \quad (2.16)$$

dove σ_1 , σ_2 e σ_3 sono le tensioni principali rispetto a un sistema di riferimento principale.

La verifica strutturale deriva dal confronto diretto delle tensioni massime registrate, riassunte dalle tensioni ideali $\sigma_{id,VM}$, con le tensioni ammissibili σ_{adm} che dipendono dai materiali impiegati; quindi per non compromettere l'integrità fisica del sistema e garantire nel contempo la funzionalità dell'apparato in condizioni di sicurezza è necessario verificare, per ogni componente del sistema, la seguente relazione (2.17):

$$\sigma_{id,VM} < \sigma_{adm} \quad (2.17)$$

Pertanto prima di descrivere l'analisi strutturale è opportuno fornire alcune informazioni riguardanti le proprietà meccaniche dei materiali impiegati nel collimatore [5]:

- *Grafite C*: le proprietà meccaniche di questo materiale sono fortemente influenzate dal numero di difetti ed inclusioni presenti nel volume strutturale e dalla densità. Inoltre, a differenza dei metalli, la grafite presenta la singolare proprietà che le sue caratteristiche meccaniche aumentano sensibilmente con la temperatura (per esempio la resistenza a trazione a $2500\text{ }^{\circ}\text{C}$ è dal 50% al 100% più alta di quella a temperatura ambiente) e tale aspetto risulta essere vantaggioso nel caso in esame dovendo ragionare con temperature elevate prossime ai $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ nelle condizioni operative. Tipicamente il carico di rottura a trazione di questo materiale varia tra 7 MPa e 70 MPa , mentre il carico a compressione oscilla tra 80 e 180 MPa ; considerando una temperatura di riferimento di $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, il valore del carico di rottura della grafite si aggira attorno ai 50 MPa sia per la trazione che per la compressione.
- *Lega Al 6082*: questa lega alluminio-silicio presenta medie proprietà meccaniche e un'ottima saldabilità. Il carico di rottura si aggira attorno ai 270 MPa , mentre il carico di snervamento vale 120 MPa .
- *Allumina Al_2O_3* : l'ossido di alluminio è un materiale ceramico estremamente duro e le proprietà meccaniche sono influenzate dal grado di purezza; presenta una resistenza a compressione estremamente elevata (fino a 4000 MPa) e una buona resistenza a trazione (300 MPa);
- *Tantalio Ta*: è un metallo refrattario; le sue proprietà meccaniche decadono all'aumentare della temperatura e il suo carico di rottura a trazione vale 285 MPa mentre il carico di snervamento vale 170 MPa .

In riferimento alle tensioni di rottura σ_R e di snervamento σ_S presenti in letteratura, è possibile definire dei valori di riferimento per le tensioni ammissibili σ_{adm} dei diversi materiali impiegati, secondo la seguente relazione (2.18):

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_{lim}}{\gamma_s} \quad (2.18)$$

dove γ_s rappresenta il coefficiente di sicurezza (viene assunto in misura cautelativa un valore pari a $1,5$), mentre σ_{lim} fa riferimento alla tensione limite del materiale: in particolare per i materiali avente comportamento fragile come la grafite e l'allumina tale valore viene associato alla tensione di rottura σ_R , mentre per i materiali duttili, come l'alluminio e il

tantalio, si considera come tensione limite di cedimento il carico di snervamento σ_S . La Tabella 2.6 riassume i calcoli fatti nei diversi casi e riporta i valori delle tensioni ammissibili dei diversi materiali:

Materiale	σ_{adm} [MPa]
Grafite <i>C</i>	33
Lega <i>Al 6082</i>	80
Allumina <i>Al₂O₃</i>	200
Tantalio <i>Ta</i>	113

Tabella 2.6: tensioni ammissibili calcolate per i diversi materiali impiegati

E' stato quindi realizzato un programma APDL che riassume i comandi per l'esecuzione dell'analisi strutturale mediante il codice di calcolo ANSYS. Quindi una volta ultimate le analisi termiche precedentemente descritte ed assegnate le caratteristiche meccaniche ai diversi materiali impiegati, noti i campi di temperatura che derivano da queste, è possibile valutare le tensioni e le deformazioni indotte dai gradienti termici nascenti. Inanzitutto si dispone già di un modello discretizzato con elementi termici quindi risulta relativamente semplice e necessaria, ai fini del calcolo strutturale, la conversione degli elementi termici in elementi strutturali; in particolare nel caso in esame gli elementi SOLID90 vengono convertiti in elementi SOLID186: quest'ultimo elemento è costituito da 20 nodi, ognuno con 3 gradi di libertà che rappresentano le 3 traslazioni x,y,z rispetto a un sistema di riferimento principale.

Dunque per tale tipologia di elemento le temperature che risultano dalle analisi termiche precedenti vengono ora assegnate come condizioni al contorno iniziali nell'analisi strutturale. Inoltre è di fondamentale importanza vincolare in modo isostatico il modello evitando la nascita di moti rigidi e gradi di labilità; al riguardo vengono vincolati la camera esterna con opportuni appoggi e i singoli dischi collimatori in corrispondenza delle superfici di appoggio degli isolatori. Per consultare il listato dei comandi implementati e le caratteristiche dei materiali si rimanda all'appendice. Per l'analisi di convergenza, analogamente a quanto fatto per l'analisi termica, sono state utilizzate diverse mesh di riferimento aventi diverse dimensioni dell'elemento al fine di convalidare i valori ottenuti e rafforzare l'attendibilità degli stessi. Nella Tabella 2.7 sono riportate le dimensioni medie degli elementi utilizzati nella discretizzazione del modello:

Componente	Dimensione media elemento [mm]			
	Analisi C1	Analisi C2	Analisi C3	Analisi C4
Dischi	4	3	2	1
Isolatori	3	2	1	0.5
Viti	3	2	1	0.5
Camera	10	8	6	4
Flange	10	8	6	4

Tabella 2.7: dimensioni medie degli elementi utilizzati nelle diverse analisi

Per valutare la convergenza dei risultati sono stati valutati gli sforzi e le deformazioni nei punti lungo gli stessi percorsi generati nell'analisi termica precedente; in particolare per l'arresto della convergenza si considera un errore di troncamento di 30 MPa. Trascurando gli effetti prodotti nella camera esterna e nelle flange, sono risultati i seguenti valori di sforzi e deformazioni (Tabella 2.8):

		$\sigma_{1 MAX}$ [MPa]			
Componente	Materiale	Analisi C1	Analisi C2	Analisi C3	Analisi C4
Petalo disco 4	Grafite	25.44	25.40	25.42	25.41
Isolatori	Alumina	644,34	1701.77	652.87	670.43
Viti	Tantalio	262.44	314.54	288.79	280.27
		$\sigma_{3 MAX}$ [MPa]			
Componente	Materiale	Analisi C1	Analisi C2	Analisi C3	Analisi C4
Petalo disco 4	Grafite	-2.46	-1.67	-1.39	-1.38
Isolatori	Alumina	-773.44	-211.90	-213.62	-219.67
Viti	Tantalio	-249.11	-259.13	-333.45	-347.49
		$\sigma_{VM MAX}$ [MPa]			
Componente	Materiale	Analisi C1	Analisi C2	Analisi C3	Analisi C4
Petalo disco 4	Grafite	25.25	25.21	25.24	25.23
Isolatori	Alumina	1044.27	1474.34	702.56	729.48
Viti	Tantalio	395.91	356.12	316.66	330.94

Componente	Materiale	u_{MAX} [mm]			
		Analisi C1	Analisi C2	Analisi C3	Analisi C4
Petalo disco 4	Grafite	0.2	0.2	0.2	0.2
Isolatori	Alumina	0.09	0.09	0.09	0.09
Viti	Tantalio	0.14	0.14	0.14	0.14

Tabella 2.8: tensioni e deformazioni massime che risultano dalle analisi svolte

Lo scostamento prodotto in termini di tensioni non supera nell'ultima analisi l'errore di troncamento prefissato (30 MPa) che corrisponde ad uno scostamento percentuale massimo del 4% per le tensioni di Von Mises, dunque è possibile confermare la convergenza dei valori ottenuti.

Inoltre i valori registrati in corrispondenza dei vincoli e nelle zone di contatto tra le diverse parti sono stati opportunamente interpretati. Infatti nella generazione del modello, il codice di calcolo interpreta i singoli componenti come facenti parte di un unico volume strutturale. Tuttavia in corrispondenza delle zone di contatto il codice, nel ricostruire la congruenza e garantire la continuità strutturale, va a bloccare dei gradi di libertà che non corrispondono nella realtà e quindi fornisce dei valori poco attendibili ai fini dell'analisi.

Basti pensare all'accoppiamento tra isolatore e vite: due componenti con materiali diversi che si trovano a contatto tra loro vengono interpretati dal calcolatore come due elementi strutturali saldati nella zona di contatto, quando nella realtà sono semplicemente appoggiati. Per questi motivi nei diversi accoppiamenti tra le parti sono state escluse dall'analisi gli effetti di bordo rappresentati dai contatti; in particolare per le viti e gli isolatori sono stati escluse dalle analisi le zone terminali per un'estensione pari al diametro dei componenti stessi (circa 2mm). In maniera analoga, per i vincoli applicati agli isolatori sono stati scartati i valori in prossimità degli incastri poichè poco significativi ai fini dell'analisi. Dal confronto delle tensioni $\sigma_{VM\ MAX}$ ottenute nell'ultima analisi con le tensioni σ_{adm} caratteristiche dei diversi materiali si nota come non sia verificata la resistenza meccanica dei singoli componenti ad eccezione dei dischi in grafite che presentano una tensione ideale $\sigma_{VM\ MAX} = 25,23\text{ MPa}$ inferiore alla tensione ammissibile $\sigma_{adm} = 33\text{ MPa}$.

Le tensioni elevate che si riscontrano negli isolatori e nelle viti sono da imputare principalmente agli spostamenti radiali inibiti dai vincoli imposti; infatti le alte temperature raggiunte nel dispositivo fanno sì che tali componenti si dilatino in senso radiale assieme ai dischi collimatori.

In particolare gli isolatori che insistono sulla superficie interna della camera di alluminio risultano essere gli elementi più sollecitati della catena poichè bloccano le dilatazioni radiali degli altri elementi collegati in serie e non risultano verificati.

Per ovviare al problema si è pensato di adottare un elemento elastico in grado di rilassare le tensioni nascenti negli isolatori e nelle viti in modo da garantire un funzionamento in condizioni di sicurezza. In particolare una possibile soluzione è stata quella di interporre delle placchette di forma rettangolare tra gli isolatori e la camera esterna che sfruttino l'effetto flessionale; tali elementi, assimilabili a travi inflesse caricate in mezzzeria, permettono al sistema di dilatarsi in senso radiale e nel contempo rilassano le tensioni negli elementi terminali entro valori cautelativi.

La definizione dell'elemento elastico in questione comporta:

- Definizione della geometria;
- Scelta del materiale.

La definizione di questi parametri è di fondamentale importanza, poichè entrambi influiscono sulla rigidezza dell'elemento stesso. Nel caso in esame, un elemento rigido si rende necessario per limitare le frecce prodotte dalla dilatazione termica, mentre un elemento flessibile è indispensabile per ovviare al problema delle tensioni prodotte troppo elevate.

Dunque la soluzione ottimale di compromesso sarà quella che soddisfa al meglio entrambi questi aspetti a partire dalla geometria e dalle caratteristiche del materiale.

Al riguardo sono state eseguite diverse analisi per valutare gli sforzi e le dilatazioni che caratterizzano l'elemento elastico considerando geometrie e materiali differenti. Per quanto riguarda la scelta del materiale, sono state confrontate le caratteristiche meccaniche di 2 metalli refrattari candidati: il tantalio e il molibdeno. Si osserva come, alle alte temperature, il molibdeno conservi meglio le proprietà elastiche rispetto al tantalio assieme alle altre caratteristiche di resistenza meccanica; infatti il modulo elastico longitudinale risulta essere maggiore rispetto a quello del tantalio alla temperatura di 1000°C (276 GPa contro 154 GPa), dunque il molibdeno per l'applicazione specifica si rivela più idoneo. Per quanto riguarda la definizione della geometria si è optato per una forma parallelepipedica vista la semplicità di realizzazione e le variazioni dei 3 parametri costruttivi (base, altezza e profondità) incidono sensibilmente sulla rigidezza del componente. Per poter definire con miglior accuratezza la geometria dell'elemento in corso di definizione è stato generato un modello teorico preliminare, descritto nel paragrafo seguente.

2.9.1 Modello teorico per la definizione degli elementi elastici

Al fine di definire i parametri costruttivi che caratterizzano la geometria delle placchette realizzate in molibdeno si è reso necessario uno studio teorico preliminare che tenga presente degli sforzi che nascono per effetto delle dilatazioni termiche prodotte. Il modello teorico approssimato è rappresentato in Figura 2.26 e considera le seguenti ipotesi semplificative:

- Comportamento linearmente elastico del materiale;
- Dilatazioni termiche puramente radiali;

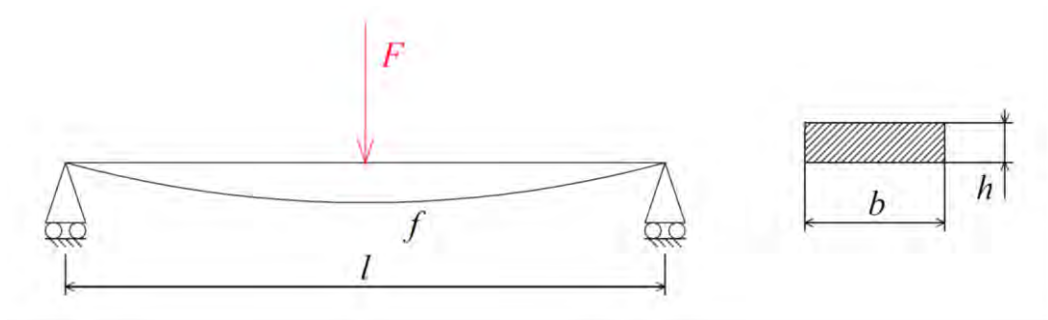


Figura 2.26: schema del modello teorico

Le placchette utilizzate come elementi elastici sono assimilabili a travi inflesse appoggiate agli estremi e caricate in mezzzeria ortogonalmente. I parametri dimensionali che caratterizzano la loro geometria sono:

- h = spessore;
- b = larghezza;
- l = lunghezza.

Note le caratteristiche del materiale e la geometria delle stesse è possibile calcolare la rigidezza trasversale (2.19) come:

$$K_T = \frac{48 EI}{l^3} \quad (2.19)$$

dove E rappresenta il modulo elastico longitudinale, I è il momento d'inerzia della sezione trasversale calcolato rispetto all'asse neutro (2.20):

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad (2.20)$$

A questo punto, nota la rigidità del sistema K_T , è possibile calcolare il carico equivalente F applicato in mezzzeria che riassume l'effetto delle dilatazioni termiche radiali prodotte (2.21):

$$F = K_T \cdot f \quad (2.21)$$

In particolare, sfruttando le analisi strutturali precedentemente svolte e modificando le condizioni di vincolo, è possibile stimare le dilatazioni radiali termiche dei componenti che si avrebbero in assenza di vincolo, e in corrispondenza all'isolatore si riscontra una dilatazione complessiva di 0.317 mm .

Inoltre considerando il contributo della forza peso dei dischi, in favore di sicurezza, si considera una freccia totale teorica f pari a 0.336 mm . Dunque il momento massimo M_{max} misurato nella sezione in mezzzeria dell'elemento trave risulta (2.22)

$$M_{max} = \frac{F \cdot l}{4} \quad (2.22)$$

Pertanto la tensione massima in modulo misurata σ_{max} è valutata come (2.23):

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}}{I} \cdot s/2 \quad (2.23)$$

In condizioni di sicurezza la verifica strutturale della placchetta deve soddisfare la seguente disequaglianza (2.24):

$$\sigma_{max} < \sigma_{adm} \quad (2.24)$$

Le proprietà meccaniche del molibdeno, come quelle degli altri metalli, peggiorano all'aumentare della temperatura; in particolare la tensione di rottura alla temperatura di $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ vale all'incirca 300 MPa . Con questo valore di riferimento, considerando un fattore di sicurezza $\gamma_S = 1.5$, la tensione ammissibile può essere stimata dalla relazione (2.18):

$$\sigma_{adm} = \frac{300}{1.5} = 200 \text{ MPa}$$

Dunque nel modello generato è possibile definire i parametri dimensionali h, b, l della placchetta tali per cui la tensione massima σ_{max} misurata in mezzeria non superi la tensione ammissibile σ_{adm} .

Considerazioni

Considerando per esempio una placchetta in molibdeno aventi dimensioni $10 \times 0.3 \times 18$ mm ($b \times h \times l$), dal calcolo risulta una tensione massima in mezzeria $\sigma_{max} = 516 \text{ MPa} > \sigma_{adm}$, dunque l'elemento in questo caso non risulta verificato; tuttavia mantenendo invariate le dimensioni della sezione trasversale e variando il solo parametro l fino ad una dimensione $l = 33 \text{ mm}$, si misura una tensione massima $\sigma_{max} = 199 \text{ MPa} < \sigma_{adm}$ e il componente risulta in questo caso verificato.

Altresì è possibile considerare un altro materiale tenendo invariata la geometria del componente per valutare l'influenza sugli sforzi. Per esempio considerando il tantalio come materiale ($E = 154 \text{ GPa}$), a parità di geometria, dal calcolo risulta una tensione massima in mezzeria $\sigma_{max} = 135 \text{ MPa} < \sigma_{adm}$ e il componente risulta a maggior ragione verificato. Tuttavia la rigidità del componente in questo caso penalizza in maniera significativa le frecce che nascono in mezzeria, portandole oltre i valori limiti concessi. Infatti in riferimento alla freccia limite tollerabile, nel calcolo si deve tener presente di tre effetti combinati:

1. Dilatazione termica;
2. Effetto del peso dei dischi collimatori;
3. Tensionamento viti di fissaggio.

Dove i primi due effetti sono già stati considerati nel calcolo della freccia teorica f , mentre non si è ancora tenuto conto della deflessione prodotta dal tensionamento delle viti necessaria per il fissaggio dei dischi collimatori. Il margine totale concesso per il tensionamento delle viti dipende dalla lunghezza l della placchetta che si appoggia sulla superficie interna della camera: maggiore è tale lunghezza e maggiore è tale margine; tuttavia all'aumentare di l diminuisce sensibilmente la rigidità trasversale K_T ed aumenta la freccia teorica f oltre i valori limiti concessi.

Per i motivi visti e per ragioni di carattere geometrico sono stati adottati i seguenti parametri dimensionali per la realizzazione delle placchette:

- $h = 0.3$ mm
- $b = 10$ mm
- $l = 18$ mm

Le stesse geometrie sono state opportunamente generate nel modellatore solido e successivamente importate nel calcolatore, unitamente al modello del collimatore già sviluppato, per poter eseguire le verifiche strutturali. Considerando il modello discretizzato nell'ultima analisi di convergenza (C4), sono state aggiunte le placchette in molibdeno in corrispondenza degli isolatori, discretizzate con elementi SOLID226 aventi dimensione medie di 1mm. Le Tabella 2.9 riassume il calcolo strutturale eseguito sull'intero sistema nelle soluzioni con e senza placchette:

Soluzione senza placchette					
Componente	Materiale	$\sigma_{1 MAX}$ [MPa]	$\sigma_{3 MAX}$ [MPa]	$\sigma_{VM MAX}$ [MPa]	u_{MAX} [mm]
Petalo disco 4	Grafite	25.44	-2.46	25.25	0.20
Isolatori	Alumina	644.34	-773.44	1044.27	0.09
Viti	Tantalio	262.44	-249.11	395.91	0.14
Soluzione con placchette					
Componente	Materiale	$\sigma_{1 MAX}$ [MPa]	$\sigma_{3 MAX}$ [MPa]	$\sigma_{VM MAX}$ [MPa]	u_{MAX} [mm]
Petalo disco 4	Grafite	4.36	-9.51	12.35	0.24
Isolatori	Alumina	86.25	-77.41	145.27	0.30
Viti	Tantalio	83.39	-102.35	167.47	0.26

Tabella 2.9: confronto delle tensioni e deformazioni che risultano dalle analisi svolte nelle soluzioni con e senza placchette

Dai risultati ottenuti si evince come l'utilizzo degli elementi elastici si rivela di fondamentale importanza per l'attenuazione dello stato tensionale prodotto dalle dilatazioni termiche e ciò comporta di operare in condizioni di sicurezza, giacchè le tensioni che risultano dall'analisi non superano le tensioni ammissibili, dunque l'intero sistema risulta verificato.

2.10 Conclusioni

In questo capitolo è stata eseguita una progettazione completa del sistema collimatore provvisto di tutte le parti necessarie per le funzioni che deve assolvere. Inoltre sono state eseguite le dovute verifiche termiche e strutturali per poter garantire il funzionamento del dispositivo in condizioni di sicurezza. In particolare nelle verifiche termiche sono state valutate le massime temperature raggiunte nei componenti, mentre nelle verifiche strutturali sono stati applicati i criteri di resistenza in riferimento alle tensioni e alle deformazioni riscontrate nelle zone maggiormente sollecitate.

Nel prossimo capitolo sarà descritto in maniera dettagliata il test termico sperimentale eseguito al collimatore, sviluppato al fine di verificare sperimentalmente la resistenza del dispositivo, nonché confrontare i risultati sperimentali con i valori ottenuti dalle analisi FEM per convalidare le analisi precedentemente eseguite.

BIBLIOGRAFIA

- [¹] Alberto Cavazza, *Progettazione termica e meccanica dell'apparato di produzione di ioni del progetto SPES*, Tesi di Laurea Specialistica a.a 2009-2010, Università degli Studi di Padova.
- [²] Nicolò Padovan, *Progettazione e test di un integratore di carica elettrica per fasci di ioni ad alta intensità per il progetto SPES*, Tesi di Laurea Specialistica a.a 2010-2011, Università degli Studi di Padova.
- [³] L. Rossetto, *Appunti delle lezioni di Termodinamica Applicata*, Università degli Studi di Padova.
- [⁴] B. Wolf, *Handbook of ion sources*, CRC Press, 1995

CAPITOLO 3

Test termico sperimentale del collimatore

3.1 Introduzione

Nel presente capitolo vengono descritte in maniera dettagliata le analisi sperimentali condotte nei petali in grafite che costituiscono il quarto disco collimatore, descritti nel capitolo precedente, al fine di valutare le temperature e le dilatazioni termiche che nascono nelle condizioni d'esercizio, per trovare concordanza con le analisi numeriche svolte e garantire la verifica strutturale degli stessi.

L'attenzione dei test è quindi rivolta ai petali del quarto disco collimatore, essendo questi ultimi maggiormente critici in termini di labilità e gradienti termici riscontrati nelle analisi FEM.

Per la valutazione delle temperature è stato applicato un metodo sperimentale diretto che vede l'utilizzo di un pirometro; tuttavia si possono raccogliere solo distribuzioni di temperatura superficiali poiché risulta impossibile, con tale strumento, la valutazione dei livelli termici interni. Per quanto riguarda la verifica strutturale del sistema invece è stata valutata l'integrità fisica del componente in prossimità dei punti maggiormente sollecitati.

Come si potrà meglio apprendere in seguito, la geometria del petalo ha subito alcune variazioni rispetto alla corrispondente geometria finale per risolvere alcuni inconvenienti occorsi all'allestimento del banco prova; perciò i modelli numerici sono stati reimpostati per poter tener conto delle mutate condizioni al contorno.

3.2 Descrizione dell'apparato sperimentale

In questo paragrafo vengono descritti i componenti che costituiscono l'intero apparato sperimentale utilizzato. In particolare vengono presentati gli elementi che costituiscono il forno, utilizzato per somministrare la potenza termica, il petalo in grafite nella versione modificata e gli elementi di supporto necessari.

3.1.1 Descrizione del forno [1]

Il forno utilizzato è stato progettato per l'esecuzione dei test ad alta temperatura eseguiti su componenti appartenenti alla zona target del progetto SPES (Figura 3.1). Tali test vengono svolti all'interno di un contenitore di forma cilindrica, denominato camera, attraverso il riscaldamento per effetto joule di un elemento, che in questo caso è rappresentato dal petalo in grafite che chiude il circuito elettrico.

Il forno funziona in modalità manuale, mentre la gestione del processo avviene attraverso la gestione di un software dedicato. La macchina è dotata inoltre di opportuni mezzi di sicurezza che nel caso di mal funzionamento, interrompono l'alimentazione di potenza.

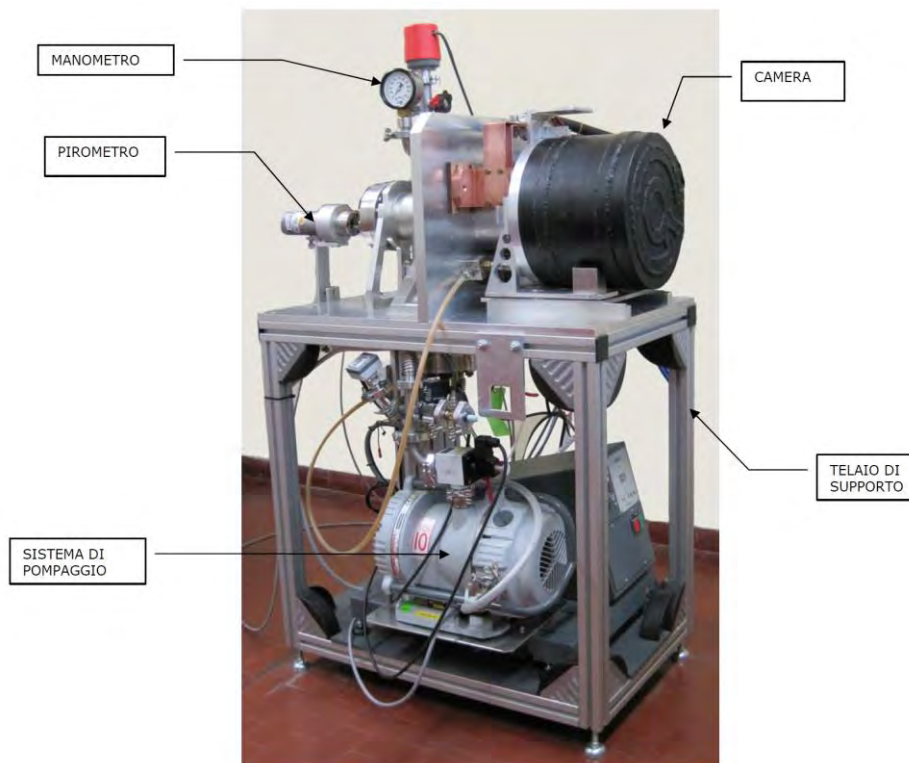


Figura 3.1: schematizzazione del forno

I componenti principali del forno sono:

- Telaio di supporto;
- Camera (con all'interno un sistema di riscaldamento ohmico resistivo);
- Generatore di potenza;
- Sistema da vuoto (gruppo di pompaggio);
- Pirometro ottico;

Telaio di supporto

Esso è costituito da una struttura in profilati di alluminio e funge da supporto alla camera, e alla strumentazione necessaria per il funzionamento, la gestione e il controllo della macchina.

Camera

Essa è costituita da una piastra principale e da un contenitore cilindrico, che vengono accoppiati mediante la spinta esercitata dal grado di vuoto presente nel loro interno. La camera e la piastra sono dotate di canalizzazioni interne; queste ultime sono percorse da acqua, che serve per il raffreddamento della camera e della piastra, durante il funzionamento del sistema.

All'interno della camera fissata alla piastra vi è il sistema di riscaldamento, costituito da tre puntali realizzati in rame e sottoposti ad argentatura superficiale, alle cui estremità viene fissato l'elemento che funge da resistenza, oggetto del test (petalo). I puntali in rame sono collegati ai generatori di corrente e sono percorsi anch'essi da acqua, mediante opportuni circuiti interni, per favorire lo smaltimento del calore generato (Figura 3.2).

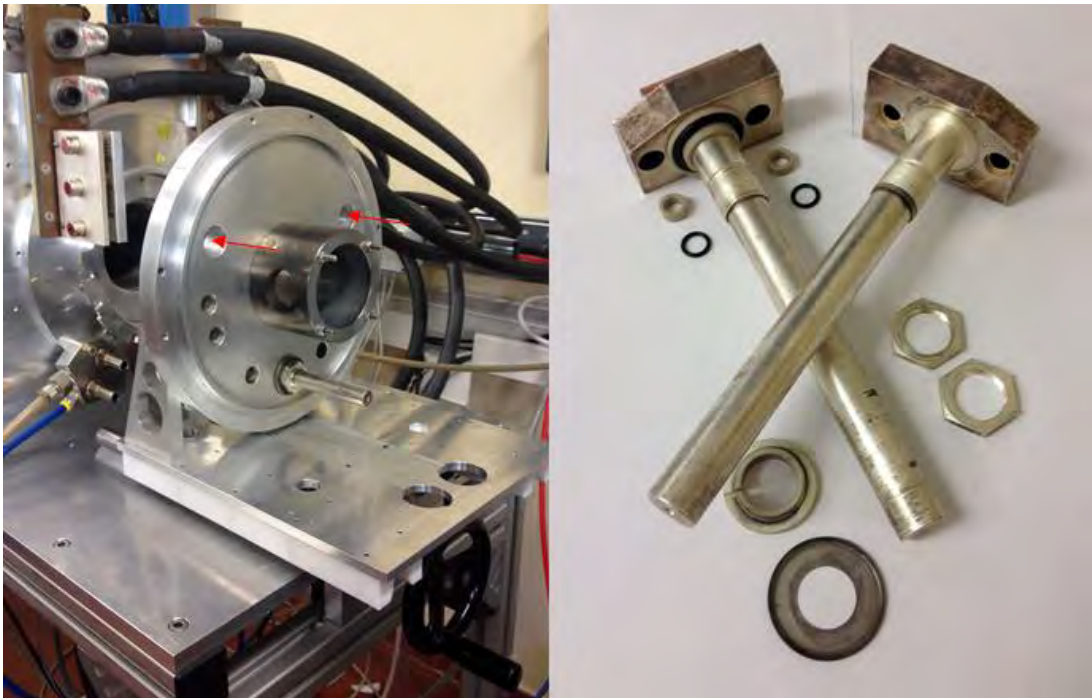


Figura 3.2: particolare della piastra principale (sinistra) e dei puntali elettrici (destra)

Generatore di potenza

Si tratta di un alimentatore LAMBDA da 10V e 1000A controllato manualmente o da un sistema computerizzato esterno (Figura 3.3).



Figura 3.3: vista frontale dell'alimentatore

Gruppo di pompaggio a vuoto

Si tratta di un gruppo per vuoto posto nella parte inferiore del telaio di supporto. Il gruppo per vuoto è costituito da una pompa Scroll a secco EDWARDS XDS 10 e una pompa turbomolecolare ADIXEN ALCATEL TURBO300; tra le due pompe è interposta la valvola di isolamento ISV25.

Inoltre il gruppo di pompaggio è dotato di un misuratore da vuoto BOC-Edwards-Serie TIC a tre canali completo di teste di misura a relè box per il segnale di *sistema in vuoto* (Figura 3.4).



Figura 3.4: vista frontale del gruppo di pompaggio

Impianto elettrico

Esso è realizzato per l'alimentazione del generatore di potenza, del gruppo di pompaggio a vuoto e dell'eventuale strumentazione necessaria per il funzionamento, la gestione e il controllo della macchina; prevede una scatola di derivazione per il collegamento tra la linea e l'alimentazione della macchina. Inoltre il quadro comandi è dotato di un'interfaccia touch screen utilizzata per controllare direttamente il gruppo pompe e per visualizzare eventuali malfunzionamenti dell'intero apparato (Figura 3.5).

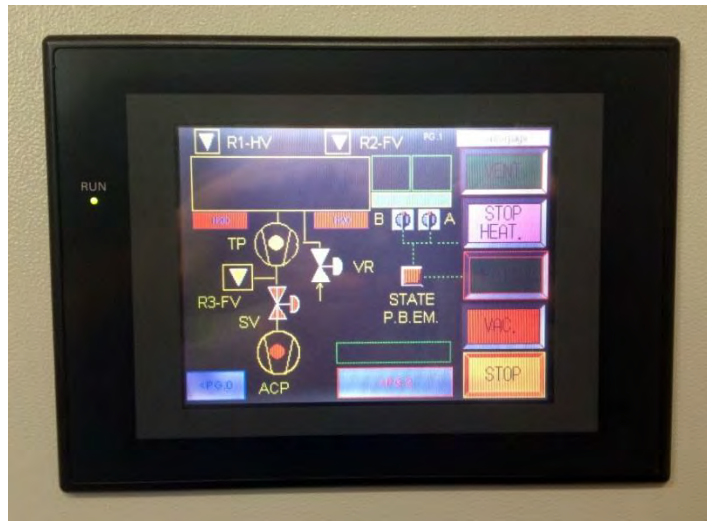


Figura 3.5: pannello di controllo touch screen

Pirometro ottico

Si tratta di un pirometro a infrarosso Ircan Modline 5R-1410 alimentato in *DC 24V* per la misura di temperatura, scala da *600 °C* a *1400 °C* (Figura 3.6)



Figura 3.6: particolare del pirometro ottico

3.1.2 Progettazione del sistema ohmico resistivo

In questo paragrafo viene descritta la procedura seguita per la definizione dei componenti che costituiscono l'oggetto del test, ovvero il petalo in grafite e gli elementi di supporto necessari, in vista della loro realizzazione. Tali elementi sono percorsi da una corrente necessaria a produrre una potenza termica teorica $P = 250W$, sufficiente a riscaldare l'elemento in grafite fino alla temperatura di riferimento $T = 1000^{\circ}C$, temperatura pervenuta nelle analisi FEM precedenti e caratteristica delle condizioni operative. Prima di procedere con la progettazione dettagliata dei suddetti elementi è necessario richiamare brevemente alcuni concetti inerenti alla modalità con cui viene somministrata la potenza termica necessaria, l'effetto joule.

3.1.2.1 Effetto joule

L'energia elettrica può essere convertita facilmente in altre forme di energia, in particolare energia termica. Ciò può essere facilmente osservato in un resistore che quando è percorso da una corrente elettrica si riscalda, ovvero libera o dissipa una parte dell'energia elettrica sotto forma di calore. Anche nella lampadina il principale effetto del passaggio di corrente è il calore, che fa diventare incandescente il filamento, sviluppando di conseguenza energia luminosa.

È detto effetto Joule, dal nome del fisico inglese James Prescott Joule (1818-1889) che lo scoprì, il fenomeno per cui il passaggio di corrente elettrica attraverso un conduttore è accompagnato dallo sviluppo di calore [2].

La potenza dissipata da un resistore percorso da corrente di intensità I e ai cui estremi è applicata una differenza di potenziale ΔV è data da (3.1):

$$P = \Delta V \cdot I \quad (3.1)$$

Dalla prima legge di Ohm si ha (3.2):

$$\Delta V = R \cdot I \quad (3.2)$$

Quindi la potenza si può scrivere (3.3):

$$P = R \cdot I^2 \quad (3.3)$$

La quantità di energia elettrica che viene trasferita al resistore nell'intervallo di tempo Δt è quindi $R \cdot I^2 \cdot \Delta t$. Se tutta questa energia viene trasformata in calore, si ricava la quantità di calore Q prodotto da un conduttore di resistenza R , attraversato da una corrente I , nell'intervallo di tempo Δt (3.4):

$$Q = R \cdot I^2 \cdot \Delta t \quad (3.4)$$

Il calore prodotto per effetto Joule quindi è direttamente proporzionale alla resistenza del conduttore e al quadrato dell'intensità della corrente che lo attraversa. Quindi è possibile definire la resistenza elettrica come l'attitudine di un conduttore a trasformare l'energia elettrica che lo percorre in calore. Quando in un circuito elettrico si richiede che la percentuale di energia elettrica convertita in calore sia molto alta, occorrerà aumentare il più possibile la resistenza. In altri casi invece, è essenziale che venga dispersa meno energia possibile e, benché non sia possibile eliminare completamente l'effetto Joule, si cerca di minimizzare il riscaldamento utilizzando materiali a bassa resistenza, come l'oro, l'argento o il rame. In questo caso l'elevata resistività elettrica della grafite rispetto agli altri elementi conduttori favorisce una maggior produzione di potenza termica a parità di corrente circolante, mentre per i collegamenti di supporto si sceglie di realizzarli con materiali a bassa resistività in modo da favorire il flusso di corrente ed evitare surriscaldamenti localizzati.

A questo punto, ipotizzando che tutta la potenza elettrica sia convertita in potenza termica, è possibile utilizzare le espressioni precedenti per stimare la corrente massima teorica che deve circolare nel petalo affinché si raggiunga la potenza termica voluta; al riguardo si ricorda che l'ultimo disco collimatore deve poter smaltire una potenza complessiva di 1 kW , dunque ad ogni petalo sarà associata una potenza di 250 W . Nota la geometria dell'elemento in grafite, sulla base di un modello semplificato, si calcola dapprima una sezione di riferimento per il flusso di corrente che si instaura (Figura 3.7).

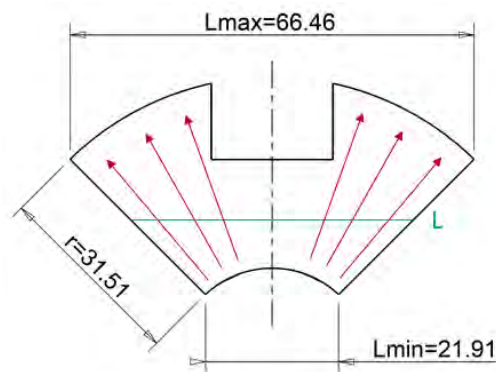


Figura 3.7: schematizzazione semplificata del petalo

Al riguardo, in maniera approssimata, si considera una sezione media A lungo la traiettoria radiale (3.5):

$$A = t \cdot L = 12 \cdot 44.19 = 530.28 \text{ mm}^2 \quad (3.5)$$

dove t rappresenta lo spessore del petalo ed L è la larghezza media del petalo, calcolata come (3.6):

$$L = \frac{L_{min} + L_{max}}{2} = \frac{66.46 + 21.91}{2} = 44.19 \text{ mm} \quad (3.6)$$

Nota la resistività elettrica della grafite alla temperatura di riferimento, è possibile calcolare la resistenza elettrica del componente in riferimento alla sezione media calcolata A e alla traiettoria radiale r percorsa dalla corrente (3.7):

$$\begin{aligned} \rho_{C \ 1000^\circ C} &= 7.0193 \cdot 10^{-6} \Omega m \\ R = \rho_C \cdot \frac{r}{A} &= 7.0193 \cdot 10^{-6} \Omega m \cdot \frac{31.51 \cdot 10^{-3} m}{530.28 \cdot 10^{-6} m^2} = 4.17 \cdot 10^{-4} \Omega \end{aligned} \quad (3.7)$$

Dunque nota la potenza termica P , in riferimento all'espressione (3.3), è possibile calcolare la corrente massima teorica circolante nel petalo I_{max} :

$$I_{max} = \sqrt{\frac{P}{R}} = \sqrt{\frac{250W}{4.17 \cdot 10^{-4} \Omega}} = 774.30 \text{ A}$$

E' bene ricordare che il calcolo eseguito risulta indicativo poiché si basa su un modello semplificato; tuttavia si è rivelato di fondamentale importanza per poter stimare con buona approssimazione la massima corrente circolante nel petalo che si rende necessaria per raggiungere il livello termico desiderato ($T = 1000^\circ C$).

Al riguardo sono state eseguite diverse analisi agli elementi finiti per poter stimare in modo più accurato le temperature raggiunte in base alle correnti circolanti e alla resistenza elettrica prodotta dall'intero apparato; tali analisi verranno descritte nei prossimi paragrafi in maggior dettaglio, dopo che sono stati definiti tutti gli elementi che compongono il sistema ohmico resistivo.

3.1.2.2 Modellazione e realizzazione dell'apparato sperimentale

Il sistema ohmico resistivo facente parte dell'apparato sperimentale è costituito dal petalo in grafite, l'oggetto che si vuole testare, e dai supporti necessari al sostegno dello stesso e al trasporto della corrente. Le geometrie degli elementi già esistenti nella camera hanno rappresentato un vincolo geometrico per la progettazione dettagliata, assieme alla necessità di concepire geometrie semplici, facilmente realizzabili dal punto di vista tecnologico e nel contempo funzionali.

Nella Figura 3.8 sottostante è rappresentata una schematizzazione della soluzione adottata, ottenuta con modellatore solido CREO.

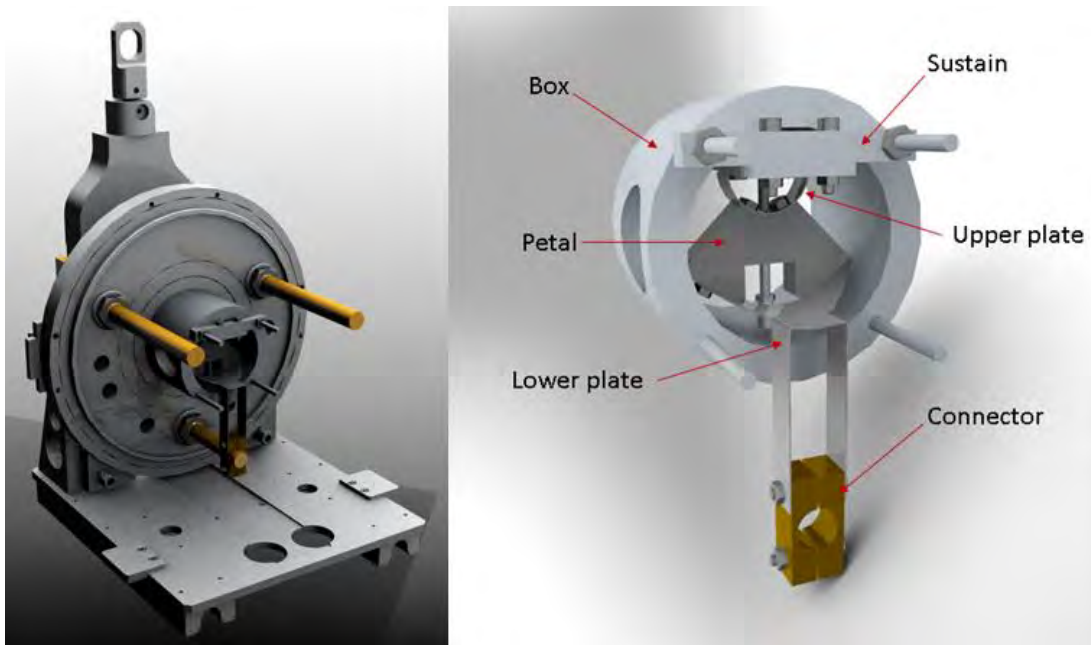


Figura 3.8: vista del sistema completo (sinistra) e del sistema ohmico resistivo (destra)

Come è già stato anticipato, la geometria del petalo concepita nella versione originale è stata modificata per ragioni di carattere funzionale, in riferimento al test sperimentale che si intende eseguire. In particolare, prevedendo in questo elemento un passaggio di corrente in senso radiale, si sono resi necessari degli accoppiamenti con viti in corrispondenza delle superfici curve in modo da assicurare un collegamento saldo dell'elemento con dei terminali elettrici.

Nella Figura 3.9 è rappresentato il petalo in grafite realizzato mediante elettroerosione, nel quale si possono notare i fori filettati in corrispondenza delle superfici curve, la vite di supporto realizzata in tantalio accoppiata e l'isolatore ceramico in allumina Al_2O_3 .



Figura 3.9: vista del petalo in grafite con vite di sostegno ed isolatore

Per quanto riguarda i terminali elettrici si è scelto di realizzarli con lamine di tantalio di spessore pari a 0.3 mm , vista l'elevata lavorabilità e l'elevata resistenza termica di questo materiale, costituite da 2 elementi sovrapposti; queste lamine sono utilizzate unicamente per il trasporto della potenza elettrica, dunque le loro rigidità sono tali da non ostacolare le dilatazioni termiche dell'elemento in grafite per non compromettere i risultati del test.

Quindi le lamine sono state opportunamente sagomate al fine di garantire una buona aderenza con le superfici curve del petalo, in modo da generare un buon contatto elettrico, nonché assicurare continuità al passaggio di corrente. In particolare:

- La lamina superiore è stata fissata ad un supporto opportunamente sagomato e realizzato in acciaio *AISI 316*, mediante accoppiamento con viti (Figura 3.10); a sua volta tale supporto, vincolato alla box in acciaio, risulta solidale alla piastra della camera in alluminio che rappresenta la massa del circuito elettrico assieme al telaio di supporto.

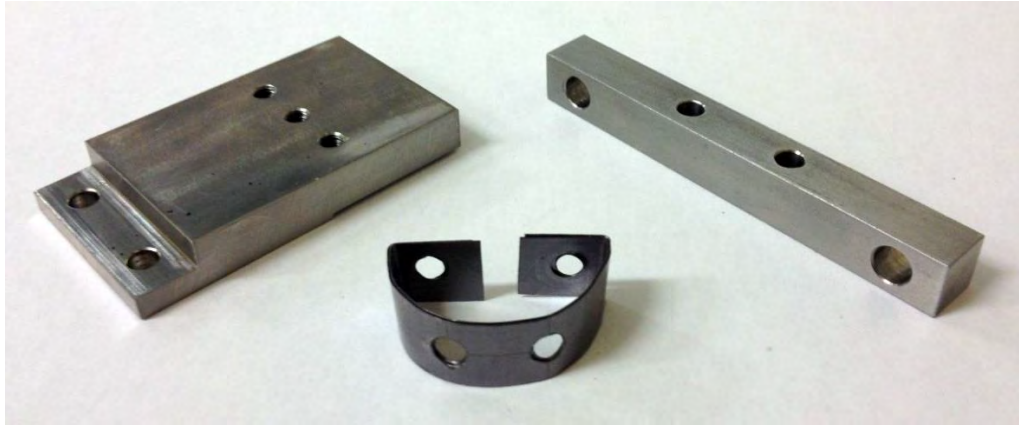


Figura 3.10: vista della lamina superiore e degli elementi di supporto in acciaio

- La lamina inferiore è stata fissata al puntale elettrico inferiore mediante un connettore realizzato in rame opportunamente sagomato (Figura 3.11); il puntale è isolato elettricamente rispetto alla camera e al telaio mediante opportuni isolatori realizzati in *MACOR*, ed è collegato al generatore di potenza che invia la potenza elettrica desiderata.



Figura 3.11: vista della lamina inferiore e del connettore in rame

Il sistema ohmico resistivo assemblato, completo di tutti gli elementi è rappresentato in Figura 3.12. In corrispondenza della lamina superiore si può notare la presenza di un isolatore in battuta con le teste delle viti di collegamento. Questo elemento, accoppiato ad una vite solidale al sostegno superiore, si rende necessario per evitare che la lamina superiore si deformi durante il test (Figura 3.12). In questo modo le dilatazioni termiche radiali prodotte nel petalo mettono in tensione il filetto e l'isolatore sottostanti, simulando le reali condizioni operative, mentre la lamina inferiore conferisce una bassa rigidità al sistema.

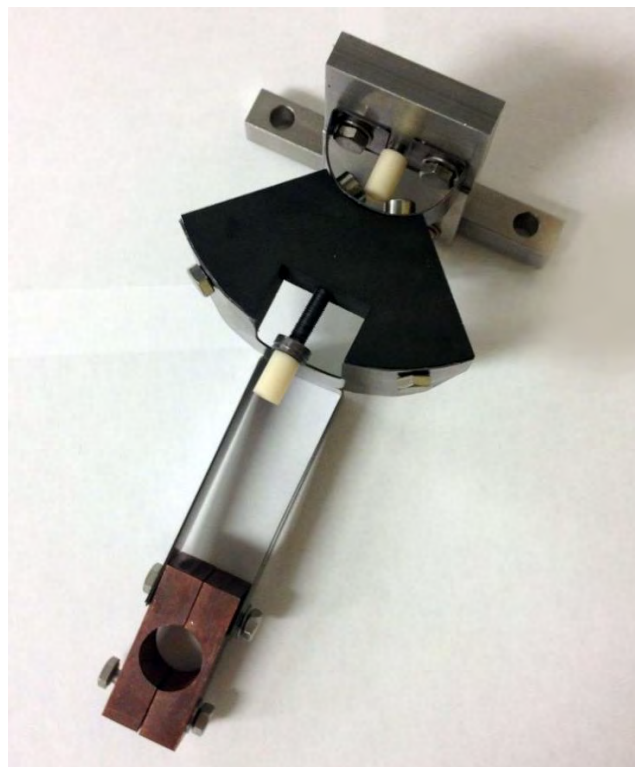


Figura 3.12: vista del sistema ohmico resistivo assemblato

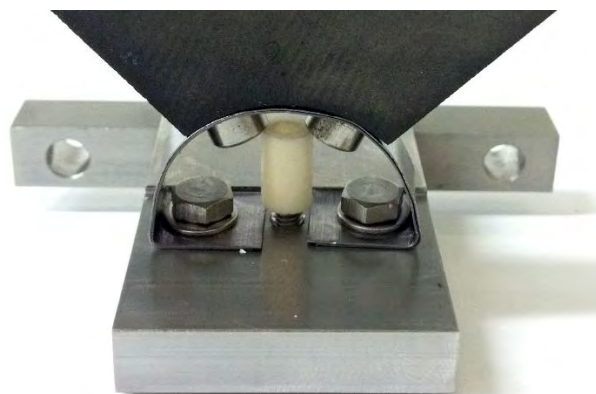


Figura 3.13: particolare dell'isolatore utilizzato nella lamina superiore

3.3 Fasi preliminari del test sperimentale

Una volta verificato l'assemblaggio del sistema ohmico resistivo, è stato smontato ogni singolo elemento assieme a quelli della camera, in vista delle fasi preparatorie di controllo e pulizia.

Durante l'ispezione dei componenti sono stati riscontrati alcuni problemi di carattere geometrico e funzionale che sono stati risolti con successo. Innanzitutto è stato ispezionato lo stato delle guarnizioni realizzate in *VITON*; gran parte di queste hanno riscontrato dei danneggiamenti dovuti agli utilizzi precedenti, quindi sono state sostituite assieme ad alcune viti che presentavano dei danneggiamenti in corrispondenza del gambo filettato.

Durante il collaudo del sistema di raffreddamento si sono riscontrate perdite di liquido in prossimità dei connettori idraulici; queste erano dovute alle erosioni prodotte dall'acqua negli utilizzi precedenti. Ciò è da imputare probabilmente alle portate troppo elevate che localmente, nelle zone ad elevata turbolenza, hanno favorito a lungo andare l'erosione del materiale; dunque sono stati allargati gli alloggiamenti degli anelli elastici in modo da ripristinare la tenuta (Figura 3.14).

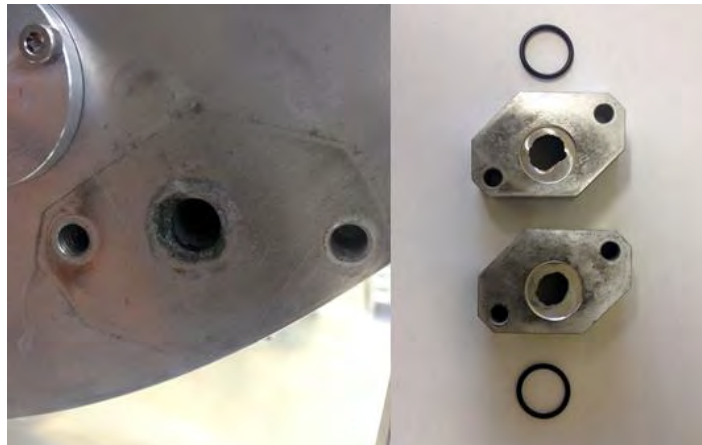


Figura 3.14: particolare dei connettori danneggiati e dell'intervento eseguito (destra)

Sono state eseguite delle lavorazioni di accorciamento dei puntali elettrici della camera per favorire l'accoppiamento degli stessi con i nuovi connettori adottati; inoltre il sistema di movimentazione della camera riscontrava un disallineamento di qualche millimetro con l'asse di innesco, dunque sono state apportate delle modifiche in opera per poter allineare correttamente il sistema e permettere l'inserimento della camera con il sistema portante (Figura 3.15).



Figura 3.15: particolare delle lavorazioni eseguite nei puntali elettrici (sinistra) e dell'innesco dell'apparato sperimentale nel sistema portante (destra)

Dunque tutti gli elementi una volta ispezionati sono stati puliti accuratamente. Il processo di pulizia è di fondamentale importanza per il livello di vuoto che si vuole raggiungere; infatti i contaminanti presenti, le impurezze e i residui di lavorazione, spesso non visibili ad occhio nudo, rappresentano un problema nei confronti del raggiungimento del vuoto desiderato, dunque è particolarmente importante rimuovere il più possibile tali impurezze considerate nocive per l'intero processo; basti pensare che nella manipolazione dei componenti per le operazioni di montaggio si sono utilizzati dei guanti in lattice per non contaminare le parti.

Quindi i componenti più piccoli sono passati in una macchina di lavaggio ad ultrasuoni; si tratta di un dispositivo in grado di rimuovere l'unto e il grasso presente nella parte superficiale dei componenti che si trovano immersi in una soluzione; le micro bolle prodotte dagli ultrasuoni implodono in corrispondenza dei componenti e favoriscono il processo di sgrassatura. Il bagno è rappresentato da una soluzione di acetone C_3H_6O diluito in acqua con rapporto $1:100$; questo viene portato alla temperatura di $60\text{ }^{\circ}C$, grazie ad un riscaldatore incorporato, per favorire ed accelerare l'intero processo (Figura 3.16).



Figura 3.16: particolare della macchina di lavaggio ad ultrasuoni utilizzata

Una volta lasciati ad asciugare, i componenti sono stati puliti nuovamente con acetone mediante fogli di carta assorbente. Quindi sono stati assemblati correttamente fino ad ottenere il sistema rappresentato in Figura 3.17.

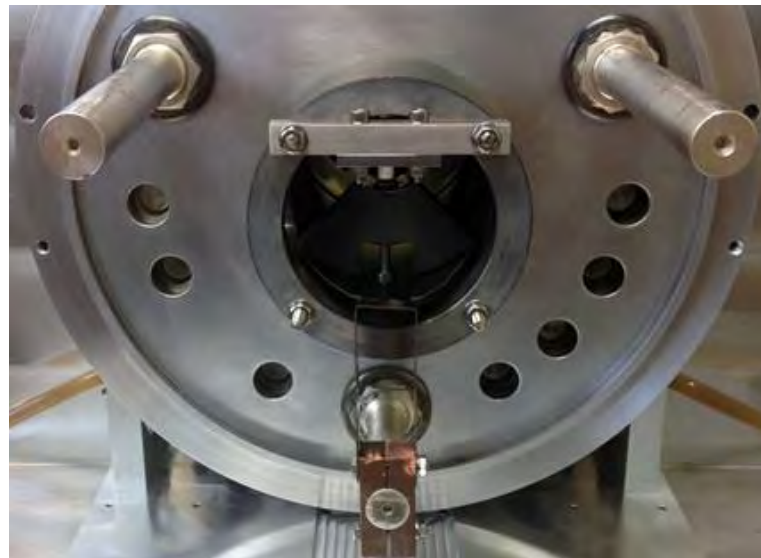


Figura 3.17: vista frontale del sistema assemblato

Prima di procedere con l'esecuzione del test sperimentale, sulla base del modello 3D definito precedentemente, è stata avanzata un'analisi agli elementi finiti che verrà descritta nel prossimo paragrafo, al fine di stimare la massima corrente richiesta per raggiungere il livello termico desiderato, nonché verificare il legame che sussiste tra corrente circolante e temperatura raggiunta nei componenti per poter confrontare i risultati con i valori pervenuti dal test.

3.4 Analisi termo-elettrica

Disponendo di un modello 3D dell'intero assieme, è stato possibile condurre un'analisi termo-elettrica per verificare il legame che sussiste tra la corrente circolante e le temperature raggiunte dai componenti, in base alla resistenza elettrica prodotta dal sistema ohmico resistivo.

In particolare tale analisi si rende necessaria per stimare la massima corrente circolante affinché si raggiunga nel petalo il livello termico desiderato; tuttavia sulla base di un modello teorico approssimato, è già stato stimato un valore indicativo della massima corrente richiesta, ma tale risultato non teneva conto dell'intero sistema dedicato al trasporto della potenza elettrica.

Dunque in questo tipo di analisi si assegna una corrente elettrica come condizione al contorno, assieme ai vincoli di potenziale elettrico, e il calcolatore fornisce in uscita i gradienti termici riscontrati nei componenti dovuti al surriscaldamento per effetto joule, assieme agli andamenti del potenziale elettrico. Per poterlo fare si utilizza l'elemento *SOLID226*, discretizzato con 20 nodi, ognuno dei quali avente 5 gradi di libertà (Figura 3.18).

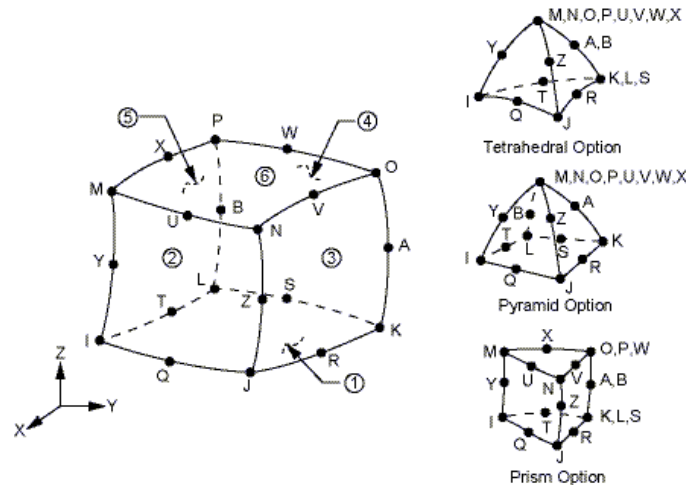
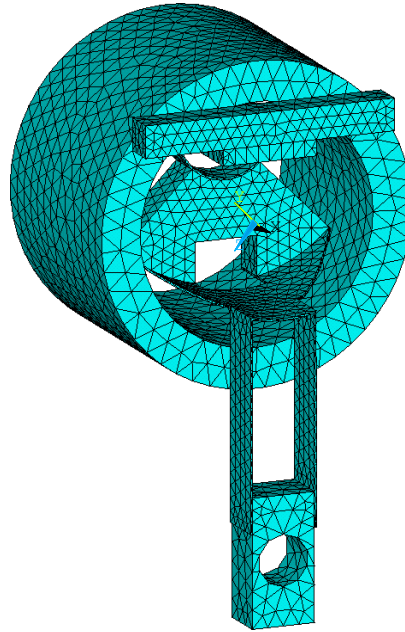


Figura 3.18: schematizzazione dell'elemento *SOLID226*

Quindi è stato generato un programma APDL che contiene i comandi per l'esecuzione dell'analisi; per la consultazione del listato generato si rimanda all'appendice. Sulla base di un modello semplificato è stato discretizzato il sistema ohmico resistivo con elementi tetragonali, definendo una mesh con una dimensione media degli elementi di 4 mm in prossimità del petalo e 6 mm per i componenti rimanenti (Figura 3.19).



total-experimental-analysis

Figura 3.19: mesh utilizzata per la discretizzazione del sistema ohmico resistivo

Dunque sono stati assegnati i carichi termici che riassumono il sistema di raffreddamento; in particolare sono state assegnate delle temperature sulla faccia posteriore della box di acciaio, che si trova a contatto con la piastra raffreddata della camera, e sulle superfici curve del connettore elettrico, in corrispondenza di dove va ad innestarsi il puntale elettrico raffreddato.

Sempre in prossimità delle stesse interfacce sono stati applicati i carichi elettrici; in particolare la box in acciaio è stata vincolata ad un potenziale nullo, essendo quest'ultima a contatto con la camera che rappresenta la massa del circuito elettrico; mentre per quanto riguarda l'assegnazione della corrente, non conoscendola a priori, si è deciso di applicare in corrispondenza del connettore elettrico una grandezza vettoriale variabile. Assegnando dunque una serie di correnti in determinati periodi di tempo, è stato possibile ottenere i rispettivi andamenti di temperatura e potenziale elettrico mediante un'unica condizione di carico assegnata.

Al riguardo sono state assegnate delle correnti rispettivamente di $400A$, $500A$ e $600A$ applicate in periodi di tempo di $2000s$, dovendo raggiungere di volta in volta le condizioni di regime termico e non conoscendo a priori l'inerzia termica del sistema. In seguito sono riportati gli andamenti di temperatura (Figura 3.20) e del potenziale elettrico (Figura 3.21) che risultano dall'analisi nel caso in cui $I=600A$, mentre nella Tabella 3.1 sono riassunti i le temperature massime registrate nei singoli componenti.

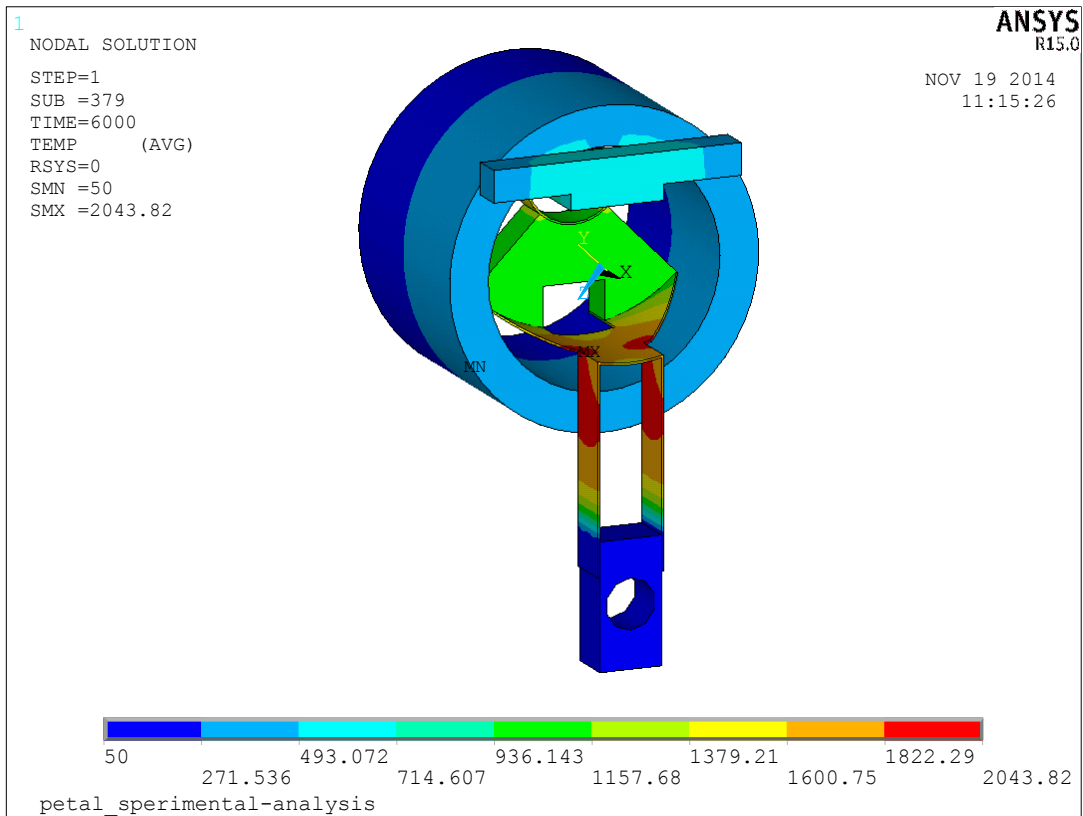


Figura 3.20: andamento delle temperature [°C] che risulta con corrente $I=600A$

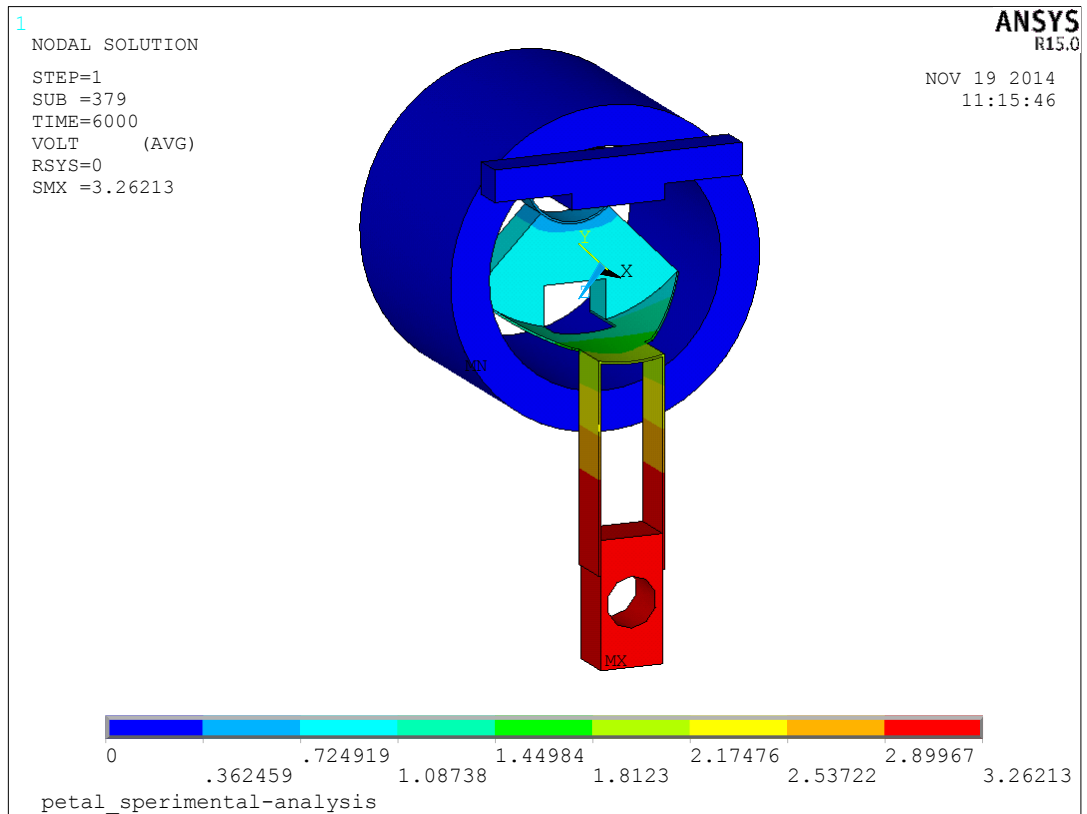


Figura 3.21: andamento del potenziale elettrico [V] che risulta con corrente $I=600^{\circ}$

Componente	Materiale	$T_{\max}(I=400^\circ)[^\circ\text{C}]$	$T_{\max}(I=500^\circ)[^\circ\text{C}]$	$T_{\max}(I=600^\circ)[^\circ\text{C}]$
Box	<i>AISI 316</i>	340.24	451.60	559.00
Sostegno	<i>AISI 316</i>	871.80	1093.61	1309.17
Lamina superiore	Tantalio <i>Ta</i>	989.56	1282.48	1560.91
Lamina inferiore	Tantalio <i>Ta</i>	1521.21	1808.35	2043.79
Connettore	Rame <i>Cu</i>	74.89	85.12	95.12
Petalò	Grafite <i>C</i>	864.89	1050.97	1227.95

Tabella 3.1: temperature massime riscontrate nei componenti per diversi valori di corrente

Le massime temperature raggiunte nei componenti sono indicative, dato che si manifestano su volumi strutturali contenuti. Tuttavia, per attenuare il livello termico dei componenti in acciaio, ritenuti più critici, sono state apportate delle modifiche alle geometrie degli stessi al fine di aumentare la superficie di scambio, in modo da incrementare il flusso di irraggiamento e favorire l'abbassamento delle temperature. Per la determinazione della massima corrente circolante nel petalo, si pone l'attenzione sui livelli termici riscontrati nello stesso (Figura 3.22) e si considerano le temperature medie calcolate, in riferimento ai diversi valori di corrente assegnati (Tabella 3.2):

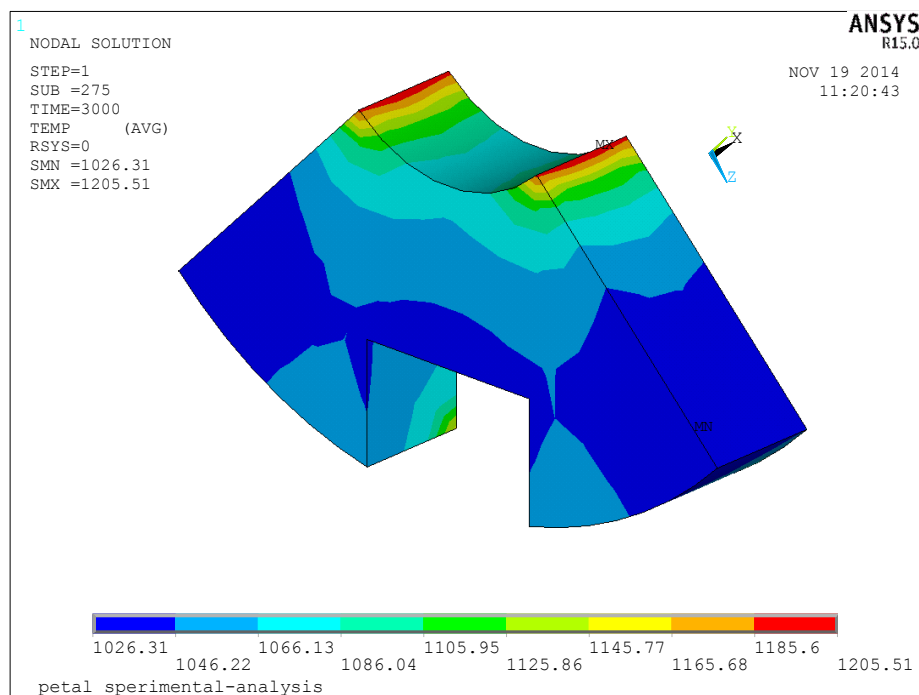


Figura 3.22: andamento delle temperature $[^\circ\text{C}]$ riscontrato nel petalo ($I=600\text{A}$)

$T_m (I=400^\circ)[^\circ\text{C}]$	$T_m (I=500^\circ)[^\circ\text{C}]$	$T_m (I=600^\circ)[^\circ\text{C}]$
807.80	946.05	1072.06

Tabella 3.2: temperature medie calcolate nel petalo per i diversi valori di corrente assegnati

Si osserva come una corrente di 600 A sia sufficiente a portare il petalo alla temperatura di riferimento $T=1000\text{ }^\circ\text{C}$, dunque si è scelto tale valore di corrente come limite superiore da considerare nel test sperimentale.

In seguito è riportato l'andamento della temperatura media del petalo in funzione del tempo (Figura 3.23); i tre scalini rappresentano le 3 correnti assegnate nell'analisi e si nota come il tempo scelto per ogni condizione di carico ($t=2000\text{ s}$) sia sufficiente per portare il sistema in una condizione di regime termico.

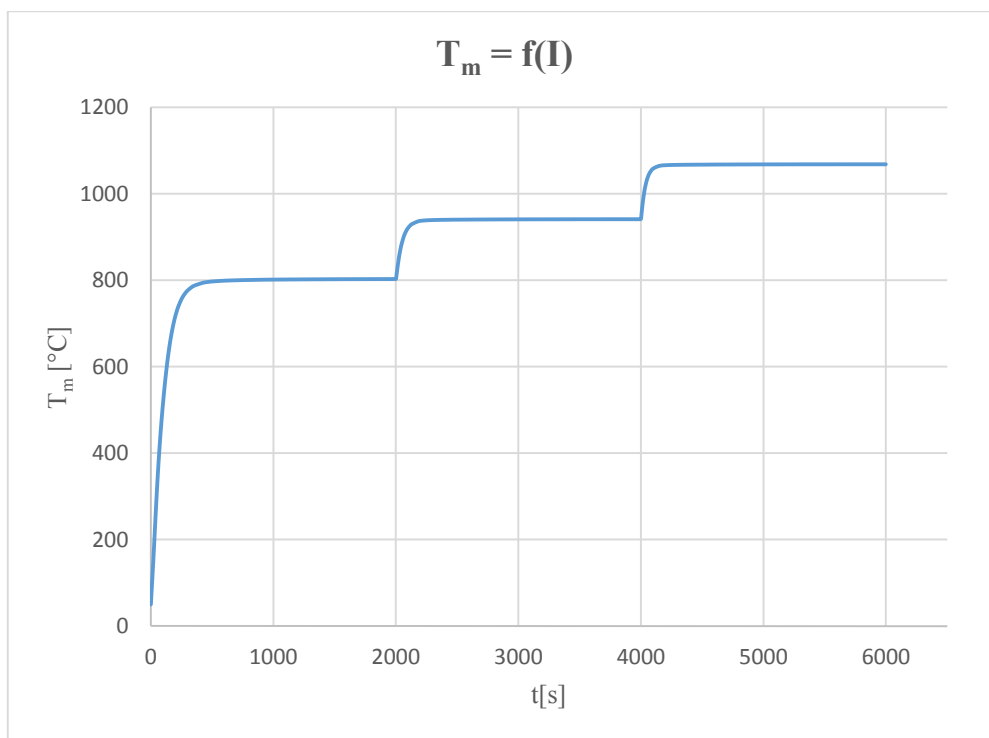


Figura 3.23: andamento della temperatura media del petalo in funzione del tempo

Nel prossimo paragrafo verrà descritta in dettaglio l'esecuzione del test sperimentale.

In concomitanza a questo è stata eseguita un'ulteriore analisi termo-elettrica in riferimento al modello già definito, in modo da poter confrontare i risultati con i valori sperimentali ottenuti, nonché valutare le temperature a parità di corrente assegnata e risalire alle caratteristiche elettriche di resistenza del sistema.

3.5 Esecuzione del test sperimentale

Una volta verificato l'assemblaggio dei componenti, collaudato il sistema di controllo e verificato il funzionamento delle pompe per il raggiungimento di un vuoto soddisfacente ($1,2 \times 10^{-6}$ mbar), è stato eseguito il primo test sperimentale.

Quindi è stata fatta passare una serie di correnti attraverso il corpo di grafite, mentre il pirometro eseguiva misure di temperatura scansionando la parte superficiale dello stesso (Figura 3.24).



Figura 3.24: particolare della zona scansionata dal pirometro per le misure di temperatura (percorso evidenziato in giallo a sinistra) e il pirometro in funzione (a destra)

In riferimento alle analisi FEM relative al petalo (Figura 3.22) osservo che la parte superficiale scansionata dal pirometro lungo il percorso evidenziato presenta una temperatura inferiore rispetto alla temperatura media dell'intero corpo, tuttavia rappresentano dei valori di riferimento indicativi validi per gli obiettivi che si intendono perseguire.

Nell'esecuzione del test è stata impressa una serie di correnti da 0 a 600 A, con un incremento di 50 A ogni 10 minuti per il raggiungimento del regime termico del sistema, mentre un voltmetro si prestava a misurare costantemente la caduta di tensione tra il puntale elettrico e la camera. Quindi è stata eseguita un'ulteriore analisi termo-elettrica, in riferimento al modello già esistente, assegnando gli stessi valori di corrente adottati nel test in modo tale da poter realizzare un confronto diretto con i risultati pervenuti sperimentalmente.

Al riguardo gli elementi utilizzati, le caratteristiche dei materiali, la discretizzazione dei componenti e i carichi termici sono rimasti invariati rispetto all'analisi precedente.

La Tabella 3.3 seguente riassume i risultati ottenuti dall'analisi termo-elettrica, in termini di temperature raggiunte nel petalo e di potenziali elettrici, e sono confrontati con i valori sperimentali. Nella Figura 3.25 sottostante è rappresentato il confronto fra le temperature registrate.

I [A]	V [V]	V _{FEM} [V]	T [°C]	T _{FEM} [°C]	P [mbar]
50	0.40	0.08	-	93.37	1.2E-6
100	0.57	0.19	-	182.00	2.6E-6
150	0.79	0.36	-	315.00	2.4E-6
200	1.12	0.59	605.00	438.00	4.9E-6
250	1.54	0.83	684.00	537.00	5.7E-6
300	2.10	1.10	793.00	622.00	8.7E-6
350	2.65	1.38	881.00	701.00	1.1E-5
400	3.11	1.69	939.00	777.00	8.5E-6
450	3.97	2.02	1022.00	848.00	1.1E-5
500	-	2.36	-	916.00	-
550	-	2.72	-	981.00	-
600	-	3.10	-	1044.00	-

Tabella 3.3: confronto tra i risultati FEM e i risultati sperimentali

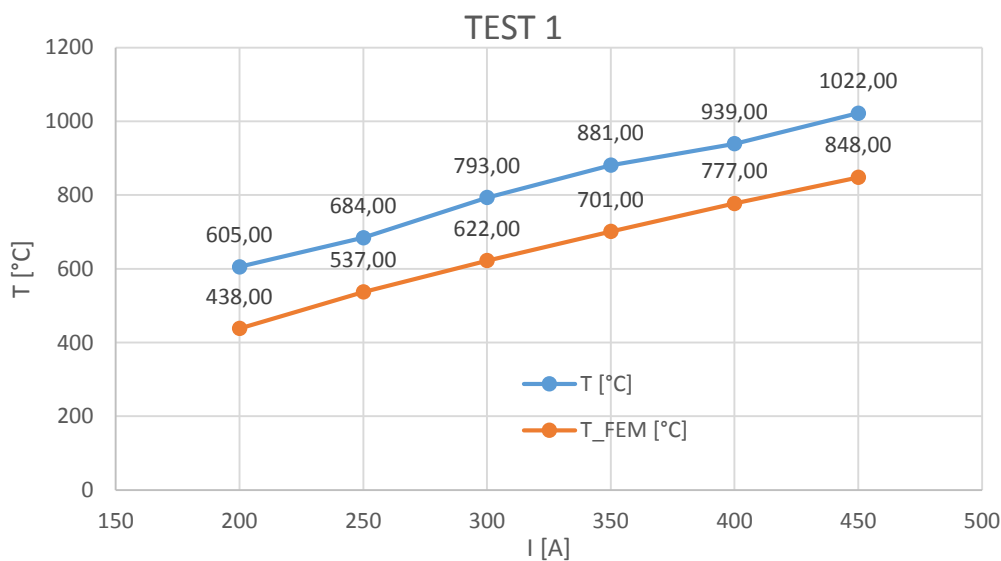


Figura 3.25: confronto tra le temperature registrate

Durante il test, in corrispondenza alla corrente inviata di 450 A , si è verificata la rottura della placca superiore realizzata in tantalio; quest'ultima ha interrotto il circuito elettrico, compromettendo il passaggio di corrente ed obbligando ad interrompere il proseguimento dell'esperimento.

Quindi una volta disabilitato il generatore di potenza e il gruppo di pompaggio è stato possibile estrarre il componente danneggiato per indagare circa l'accaduto (Figura 3.26).



Figura 3.26: particolari della lamina danneggiata

Tuttavia è stato possibile raccogliere una serie di dati significativi prima che si verificasse la rottura del componente che si sono rivelati fondamentali per giustificare la dinamica del guasto.

Infatti dai risultati ottenuti si nota che i valori dei potenziali misurati sperimentalmente, come pure le temperature, risultano essere maggiori dei dati pervenuti dalle simulazioni: questo è da imputare indubbiamente al cattivo contatto elettrico che si instaurava nelle interfacce di collegamento, in particolare nelle superfici curve del petalo con le lamine di tantalio e nei collegamenti filettati delle viti, che inevitabilmente hanno innalzato la resistenza elettrica complessiva (Figura 3.27).



Figura 3.27: vista dei contatti elettrici nella lamina superiore prima del test

Per questo motivo i suddetti componenti, in corrispondenza delle interfacce di collegamento, si sono surriscaldati in maniera significativa al passaggio della corrente (diminuisce la sezione di passaggio al flusso di corrente ed aumenta la resistenza elettrica assieme alla potenza termica prodotta per effetto Joule), fintantochè non si è raggiunto il collasso del materiale. In questo caso il cattivo contatto generato tra il petalo e le lamine ha fatto sì che la resistenza elettrica sia stata tale da innalzare localmente il grado di surriscaldamento dei componenti, portandoli anche oltre il punto di fusione del rispettivo materiale. Tale ipotesi è oltremodo rafforzata dai risultati delle analisi FEM (Figura 3.28): la rottura della placca superiore infatti si è verificata in prossimità dei punti critici riscontrati in termini di temperatura, laddove si registravano i valori massimi, quindi si denota una certa corrispondenza delle analisi FEM con quanto è accaduto.

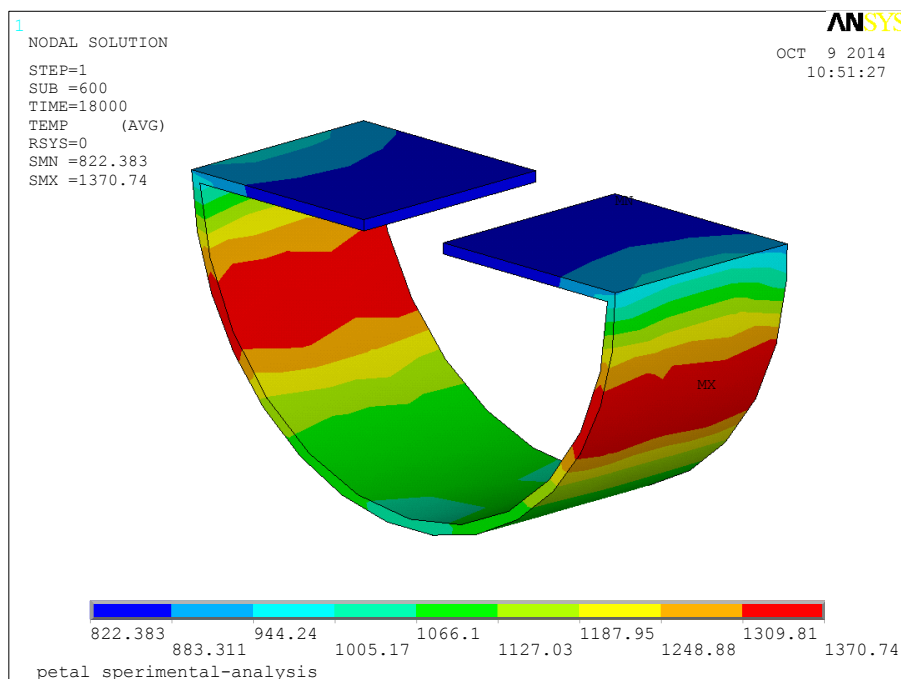


Figura 3.28: campo di temperature del componente danneggiato che risulta dall'analisi FEM [°C]

Si è ripetuto nuovamente il test sperimentale, con l'accortezza di applicare più lamine in tantalio sovrapposte per la placca superiore (4 lamine con spessore 0.3 mm) in modo da aumentare la sezione di flusso alla corrente che vi circola e abbattere il surriscaldamento prodotto (Figura 3.29).

Le modalità e l'esecuzione con il quale è stato eseguito il test sono rimaste invariate, mentre si è cercato di migliorare il più possibile i contatti elettrici in prossimità delle interfacce tra il petalo e le lamine.

Quindi una volta allestito l'apparato sperimentale, raggiunto un livello di vuoto soddisfacente per l'esecuzione del test ed acceso il generatore di potenza, è stata fatta passare nuovamente una corrente variabile da 0 a 600 A , con un incremento di 50 A ogni 10 minuti per il raggiungimento del regime termico del sistema, mentre il pirometro e il voltmetro misuravano rispettivamente la temperatura superficiale del petalo e la differenza di potenziale tra il puntale elettrico e la camera.



Figura 3.29: particolare della placca superiore adottata per il nuovo test

La Tabella 3.4 seguente riassume i risultati ottenuti dal secondo test sperimentale, in termini di temperature e di potenziali elettrici, e confrontati con i valori pervenuti dalle analisi FEM precedenti. Nella Figura 3.30 sottostante è rappresentato il confronto fra le temperature registrate.

I [A]	V [V]	V _{FEM} [V]	T [°C]	T _{FEM} [°C]	P [mbar]
50	0.21	0.08	-	93.37	3.3E-6
100	0.46	0.19	-	182.00	3.1E-6
150	0.75	0.36	-	315.00	6.2E-6
200	1.06	0.59	-	438.00	6.4E-6
250	1.42	0.83	662.00	537.00	6.2E-6
300	1.83	1.10	746.00	622.00	6.4E-6
350	2.31	1.38	830.00	701.00	7.2E-6
400	2.84	1.69	914.00	777.00	8.3E-6
450	3.39	2.02	990.00	848.00	1.2E-5
500	3.94	2.36	1080.00	916.00	6.2E-6
550	-	2.72	-	981.00	-
600	-	3.10	-	1044.00	-

Tabella 3.4: confronto tra i risultati FEM e i risultati sperimentali

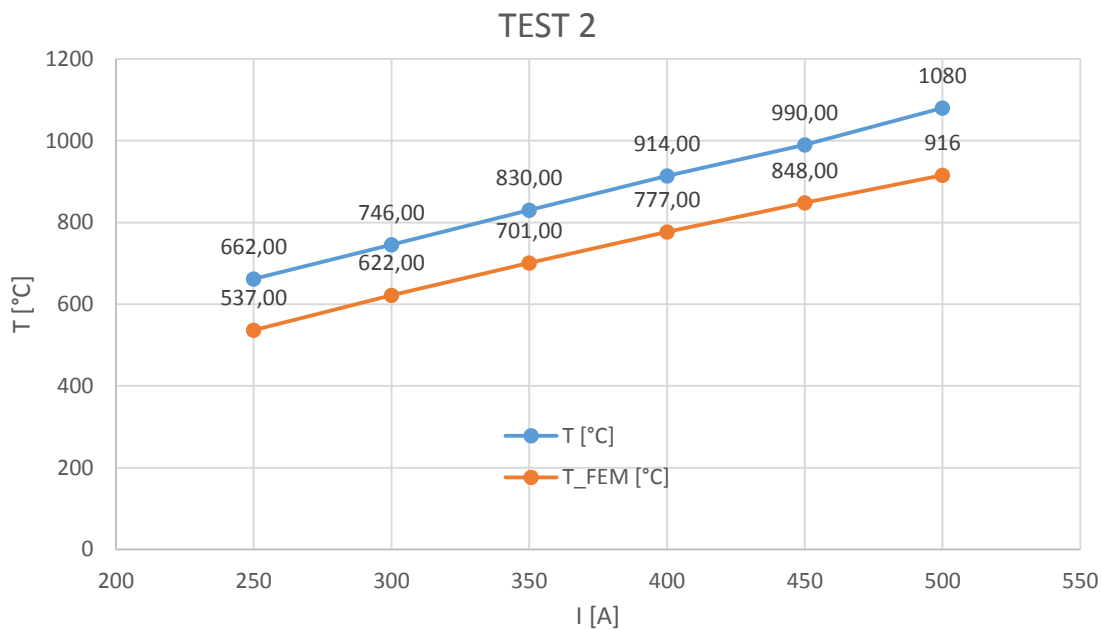


Figura 3.30: confronto tra le temperature registrate

Dai risultati ottenuti si evince come i valori dei potenziali misurati siano leggermente migliorati rispetto al primo test eseguito poichè si avvicinano, seppur di poco, ai valori pervenuti nelle analisi FEM. Tale aspetto giustifica un un miglior contatto elettrico realizzato tra le lamine e il petalo, tuttavia si riscontrano ancora delle differenze importanti nelle temperature rilevate rispetto ai risultati delle analisi.

Inoltre durante l'esecuzione del secondo test si è riscontrata la rottura della lamina inferiore quando nel sistema circolava una corrente di $500 A$ (Figura 3.31).



Figura 3.31: particolari della lamina danneggiata

Analogamente a quanto si è verificato nel primo test, la rottura del componente è da imputare al surriscaldamento prodotto non appena si è compromesso uno dei contatti elettrici. In particolare grazie alla Figura 3.32, ottenuta poco prima della rottura del componente, è stato possibile individuare la causa del danneggiamento prodotto, nonché ipotizzare una possibile dinamica di come sia potuto verificarsi il guasto.

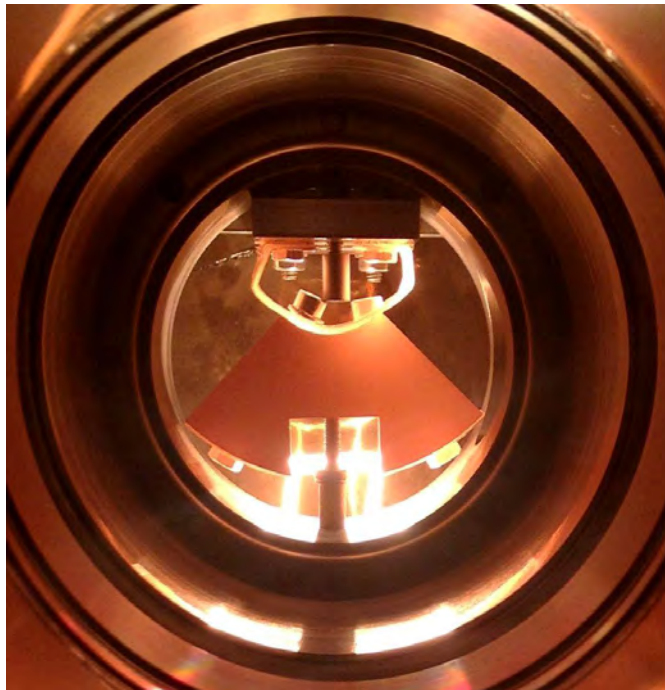


Figura 3.32: foto scattata poco prima della rottura della lamina inferiore

In riferimento alla Figura 3.32 è possibile notare, in corrispondenza alla placca superiore, una maggior luminescenza del materiale nella parte destra; questa è dovuta alla maggior corrente circolante, che preferisce passare attraverso i contatti elettrici che offrono una minor resistenza.

In particolare si osserva come la vite di collegamento in acciaio nella parte destra si sia fusa a ridosso della placca in tantalio, determinando un miglior contatto elettrico rispetto a quella di sinistra.

A questo punto il circuito elettrico è risultato sbilanciato e la corrente inviata è circolata in maniera preponderante nella parte destra del petalo, fintantochè non si è raggiunto il collasso del materiale, questa volta avvenuto per la placca inferiore che è la stessa utilizzata nel test precedente. Tuttavia è stato possibile raccogliere una serie di dati fondamentali per convalidare i valori ottenuti nel test precedente, e per condurre una serie di opportune considerazioni riassunte nel paragrafo conclusivo. Dal valori dei potenziali elettrici ottenuti nei diversi casi è stato possibile calcolare la potenza elettrica, secondo la relazione (3.1), per poter essere confrontate (Figura 3.33).

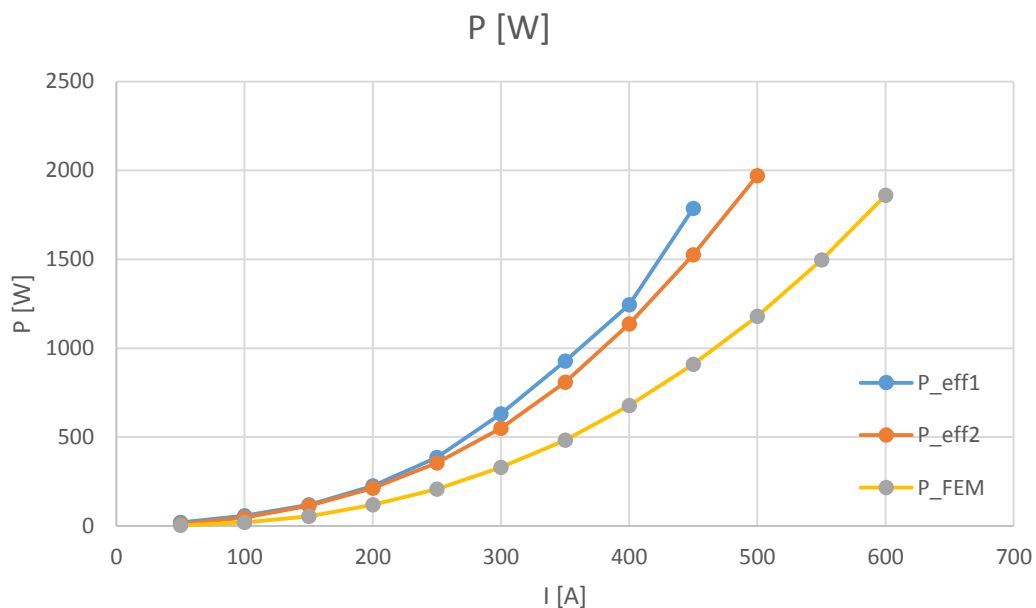


Figura 3.33: confronto delle potenze elettriche calcolate

Si osserva come, a causa della non idealità dei contatti elettrici, la potenza elettrica richiesta a parità di corrente sia risultata superiore nei test sperimentali rispetto a quella teorica ipotizzata.

Inoltre sulla base dei dati ottenuti, è stato possibile calcolare le resistenze elettriche dell'apparato sperimentale R_1 e quella relativa del singolo petalo R_2 , secondo la relazione (3.2), che risultano rispettivamente:

R_1	0.0009 Ω
R_2	0.0080 Ω

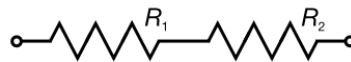


Figura 3.34: schema resistivo dell'intero apparato sperimentale

La resistenza R_1 calcolata è caratteristica dei cavi di collegamento e della camera, e risulta indipendente dalla temperatura, mentre la resistenza R_2 si mantiene sempre superiore rispetto al valore teorico pervenuto dalle analisi FEM (0.0015 Ω); si osserva inoltre come R_2 aumenti al crescere della temperatura, poichè variano le caratteristiche di resistività al variare di questa.

3.6 Conclusioni

L'obiettivo di questi test non è stato quello di cercare una concordanza stretta tra valori teorici e sperimentali pervenuti, bensì quello di verificare la resistenza meccanica dei componenti d'interesse oltre alla temperatura di riferimento di 1000 °C, in particolare:

- È stata verificata la resistenza meccanica del petalo in grafite: le dilatazioni termiche prodotte infatti hanno determinato degli stress di compressione tali per cui non è stata compromessa l'integrità fisica del componente in entrambi i test eseguiti.
- La filettatura nella parte centrale del corpo in grafite, che vede accoppiata l'unica vite effettivamente presente nella realtà, sottoposta a stress di compressione, non è stata minimamente danneggiata.

- Entrambi gli isolatori in allumina sono resistenti agli stress di compressione prodotti, dunque si può eventualmente optare per il NON utilizzo degli elementi elastici definiti nel secondo capitolo, concepiti come *rilassatori* di tensione nei dischi collimatori, così che si avrà un maggior grado di confidenza sull'allineamento dei vari componenti.

Pertanto, nonostante la rottura delle placche in tantalio utilizzate unicamente per l'esecuzione dei test, nonché garantire il trasporto della corrente, gli esiti degli esperimenti eseguiti sono risultati soddisfacenti, poiché hanno permesso di convalidare i criteri di resistenza adottati per i componenti, oltremodo in vantaggio di sicurezza.

Infatti nei suddetti test si è valutata la resistenza del singolo petalo quale unico corpo sollecitato a compressione, mentre nella realtà questo si trova accoppiato assieme ad altri 3 petali analoghi.

Quindi il fatto di considerare il sistema reale costituito da 4 corpi indipendenti, fa sì che le dilatazioni termiche prodotte dagli stessi vengano compensate dalle labilità e dai laschi inevitabilmente presenti. Dunque gli stati di tensioni che si riscontrano nella realtà risulteranno inferiori rispetto a quelli pervenuti sperimentalmente; per queste ragioni il test concepito opera in vantaggio di sicurezza.

BIBLIOGRAFIA

[¹] SPES, *Forno per test ad alta temperatura*, Manuale d'installazione uso e manutenzione, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare di Legnaro, 2008.

[²] P. Mazzoldi, M. Nigro, C. Voci, *Fisica (Volume II)*, EdiSES Napoli, 2001

CAPITOLO 4

Progettazione e verifica termo-strutturale della Faraday-Cup

4.1 Introduzione

In questo capitolo ci si propone di progettare una Faraday Cup per il fascio protonico, un dispositivo capace di intercettare completamente il fascio misurandone l'intensità di corrente. Innanzitutto si ritiene necessario approfondire la conoscenza di questo dispositivo, fornendo le dovute informazioni sullo strumento e le architetture più comunemente adottate nelle applicazioni pratiche prima di proseguire con lo studio di dettaglio del progetto specifico. Inoltre le analisi termo-strutturali eseguite nel dispositivo in fase di sviluppo si rendono necessarie per poter progettare un dispositivo funzionale nelle condizioni operative e non troppo distante dal design che assumerà nella sua forma finale.

4.2 Descrizione della Faraday-Cup [1]

La Faraday Cup è un dispositivo che intercetta un fascio di particelle cariche e ne misura l'intensità di corrente. Il nome è in onore di Michael Faraday (1791 – 1867), chimico e fisico britannico che contribuì ai campi dell'elettromagnetismo e dell'elettrochimica; in particolare egli scoprì il fenomeno della rotazione elettromagnetica, dell'induzione elettromagnetica, del fenomeno del diamagnetismo e dell'effetto magneto-ottico. Nella sua forma più semplice la Faraday Cup consiste in una camera metallica conduttrice elettricamente isolata, che intercetta trasversalmente le particelle del fascio; un cavo elettrico ad essa collegato conduce la corrente che si stabilisce nella coppa verso l'esterno, dove il segnale rilevato viene opportunamente elaborato da strumenti di misura (Figura 4.1).

La rilevazione può avvenire in modo semplice con l'impiego di un amperometro posto tra il cavo conduttore e la terra, oppure mediante un voltmetro od un oscilloscopio che visualizza l'andamento della differenza di potenziale misurata ai capi di un resistore calibrato posto tra il cavo conduttore e la terra.

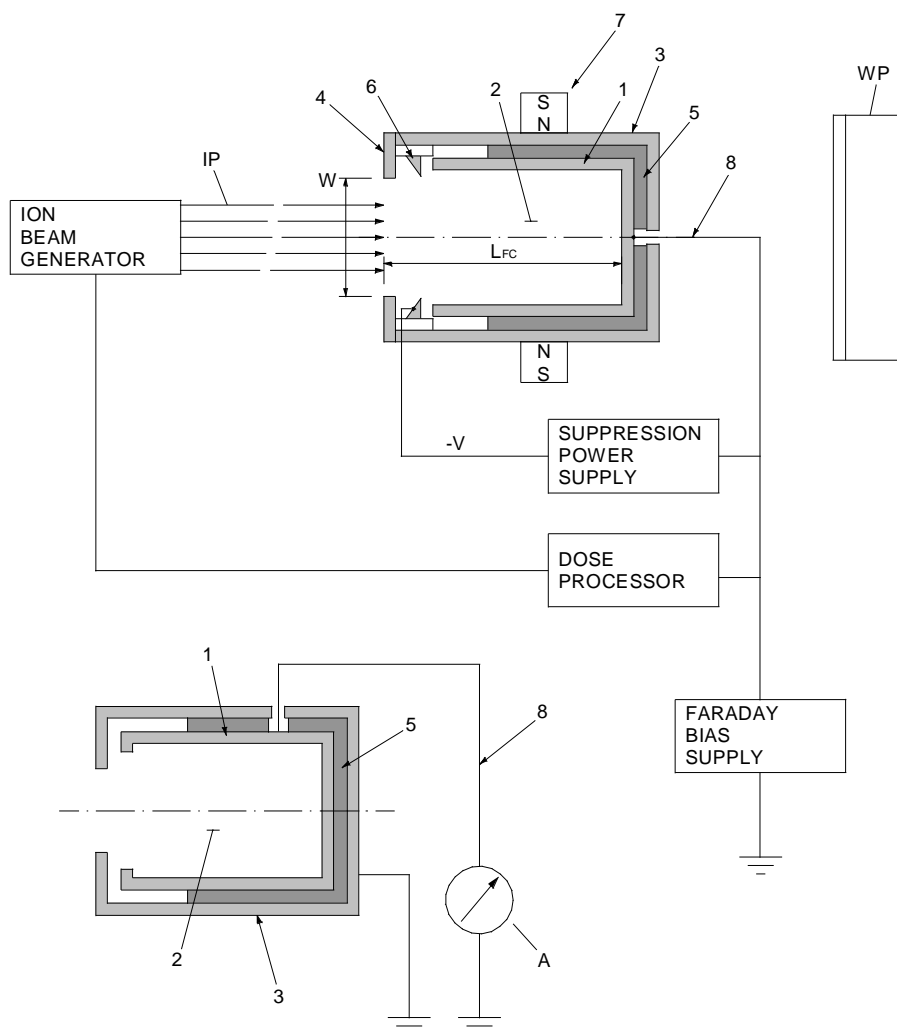


Figura 4.1: schematizzazione della Faraday-Cup

- 1 – Corpo metallico della Faraday Cup;
- 2 – Camera della Faraday Cup (la superficie interna può essere rivestita);
- 3 – Astuccio metallico che avvolge il corpo della Faraday Cup (può essere posto a potenziale negativo e quindi svolgere la funzione di elettro-soppressore quando non è presente l'elettrodo di soppressione);
- 4 – Diaframma o piatto frontale che definisce la sezione di ingresso alla camera;
- 5 – Mezzi isolanti (a bicchiere o ad anello);
- 6 – Elettrodo soppressore ad anello; produce un campo elettrico che respinge all'interno della camera gli elettroni secondari che tenderebbero a sfuggire attraverso l'apertura di ingresso;

7 – *Assemblamento di magneti che producono il campo magnetico all'interno della camera per inibire la fuga degli elettroni in quanto ne costringono la traiettoria. Possono non essere presenti, in quanto rafforzano l'effetto soppressore già realizzato dagli elettrodi soppressori;*

8 – *Cavo conduttore;*

W – *Ampiezza dell'apertura di ingresso della camera;*

LFC – *Lunghezza della Faraday Cup;*

WP – *Workpiece (a seconda delle applicazioni l'utilizzazione può essere: wafer semiconduttore; componenti da saldare con fascio elettronico; altre utilizzazioni)*

IP – *Fascio di ioni primari;*

ES – *Elettroni secondari emessi;*

A – *Amperometro o Elettrometro; apparato rivelatore dell'intensità di corrente elettrica;*

La tazza metallica è la parte sensibile del dispositivo, ed ha come funzione quella di intercettare e raccogliere gli ioni del fascio che si intende analizzare. Per fascio si intende un flusso ordinato di particelle cariche o di ioni; nel caso specifico gli atomi vengono ionizzati ed accelerati in una certa direzione all'interno di una conduttura ad alto vuoto ed hanno carica elettrica negativa se sono dotati di un elettrone in più, oppure positiva se hanno una carenza di un elettrone. Il fascio entra attraverso l'apertura della tazza e quando gli ioni vengono a contatto con la superficie di essa, prelevano l'elettrone di cui necessitano per bilanciare la propria carica. Nella Faraday-Cup, come pure per il collimatore, gli ioni accelerati sono atomi di idrogeno ^1H privati del loro unico elettrone; dunque tali elementi hanno carica positiva e il loro nucleo è formato da soli protoni, per questa ragione il fascio è detto *protonico*.

4.3 Caratteristiche e Parametri di progetto della Faraday Cup [1]

La Faraday Cup rappresenta uno strumento di diagnostica distruttivo in quanto al momento della misura, l'intero fascio è fermato. Si prevede quindi che la Faraday Cup sia movimentata per essere inserita o disinserita dalla linea d'asse del fascio. Nelle costruzioni più semplici e simili all'applicazione richiesta per il progetto SPES, la Faraday Cup è montata su un supporto ad intercettazione azionato da un attuatore pneumatico che la inserisce nella linea d'asse al momento della misura e che la disinserisce quando, aggiustati i parametri, si vuole utilizzare il fascio.

Il alternativa al movimento “*in and out*”, il sistema Faraday Cup può essere mosso in modo continuo o a passi per misurare “*a scansione*” l’uniformità del fascio di ioni. In altre applicazioni la Faraday Cup è posta in posizione fissa adiacente alla linea del fascio ed in prossimità dell’utilizzazione finale (ad esempio per un workpiece costituito tipicamente da un wafer in materiale semiconduttore) ed il fascio è deflesso nel sistema Faraday Cup al momento della misura.

Od ancora, in altre costruzioni la Faraday Cup è disposta su un sistema cartesiano di slitte, tipicamente nelle applicazioni di regolazione e focalizzazione di un fascio elettronico per la saldatura.

Gli scopi per cui è necessario effettuare misurare precise dell’intensità del fascio sono:

- Misura accurata del flusso di particelle di un esperimento, necessaria, ad esempio, per l’esatta determinazione delle dosi ioniche di *implantation*;
- Stima della trasmissione attraverso un sistema di trasporto del fascio;
- Ottimizzazione e diagnostica dei parametri della sorgente di ioni;
- Determinazione dello stato di distribuzione della carica degli ioni;
- Separazione di isotopi;
- Osservazione e ottimizzazione del tempo-struttura in caso di sorgente di ioni pulsanti per minimizzare le oscillazioni del plasma. Il tempo struttura è il tempo strettamente connesso all’intervallo del treno di impulsi del fascio pulsante.

Di seguito si richiamano le proprietà del fascio considerato, già citate nel secondo capitolo:

Energy	40 MeV/u
Power	8 kW
Spot size	32mm

Come si è potuto osservare precedentemente, con le caratteristiche del fascio considerato si possono stimare correnti dell’ordine dei $0,2 \text{ mA}$. Come nel collimatore, anche nella Faraday-Cup la misura dell’intensità di corrente del fascio riveste una duplice importanza:

- Calibratura: E' necessaria per capire se l'impostazione della macchina (*setup*) è stata fatta nel modo corretto e se i parametri della sorgente di ioni sono stati impostati correttamente;
- Misurazione: E' necessaria per una accurata valutazione del numero di particelle che transitano; parametro fondamentale ai fini delle valutazioni statistiche sui dati del processo fisico che si vuole studiare.

Le grandezze che principalmente influenzano la progettazione del 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 struttura e la progettazione della Faraday Cup può essere molto complicata quando è necessario fare misure di impulsi corti o di fasci ad alta energia che potrebbero non essere completamente fermati nello spessore del rivelatore. Inoltre si complica ulteriormente se si prendono in considerazione i seguenti effetti secondari inevitabilmente presenti che possono compromettere la misurazione:

- Emissione di elettroni secondari o di altre particelle cariche;
- Generazione di elettroni o ioni dalla ionizzazione dei gas residui;
- Correnti parassite dovute al deterioramento del materiale isolante per sputtering o per le alte temperature;
- Formazioni galvaniche dovute all'impiego di diversi materiali nelle Faraday Cup raffreddate;
- Correnti parassite derivanti dalla conduttanza dell'acqua di raffreddamento;
- Riscaldamento per fasci ad alto potenziale.

Il fenomeno di disturbo di maggior influenza è l'emissione di elettroni secondari. Infatti è possibile che quando gli ioni colpiscono la coppa, dallo strato superficiale vengono strappati via degli elettroni (*sputtering*) per l'elevata energia liberata nell'impatto degli ioni, dotati di elevata energia cinetica.

Ai fini della misura, ci si ritroverebbe quindi a leggere non solo la corrente dovuta agli elettroni “prelevati” dagli ioni del fascio, ma anche quella dovuta all’emissione secondaria di elettroni che abbandonano la coppa. Per evitare questo effetto indesiderato, si utilizza un dispositivo chiamato *elettro-soppressore*. Nel prossimo paragrafo verranno descritti i principali sistemi di soppressione adottati e i benefici prodotti in termini di misurazione dei segnali.

4.4 Sistemi di soppressione: l’elettro-soppressore e i magneti permanenti [2]

L’elettro-soppressore consiste in un guscio metallico esterno alla Faraday Cup, ma completamente isolato da questa, a cui viene applicato un potenziale negativo (generalmente maggiore o uguale a 300 V). Esso produce un campo elettrico locale di repulsione nella sezione di ingresso che inibisce la fuga degli elettroni dalla camera, in questo modo la maggior parte degli elettroni eventualmente emessi rimangono all’interno della coppa o, se fuoriuscenti, vengono respinti al suo interno dal potenziale soppressore. Il contributo della corrente dovuta all’emissione secondaria viene annullato, lasciando solamente la corrente dovuta agli elettroni “prelevati” dagli ioni che viene perciò misurata.

L’elettro-soppressore può talvolta consistere in un anello metallico posizionato in prossimità dell’apertura della tazza e montato coassialmente a questa mediante opportuni isolatori ceramici. L’anello di soppressione può avere un’apertura di dimensione maggiore di quella dell’ingresso della tazza ed, inoltre, può essere rastremato nel verso affacciato all’apertura della tazza.

Talvolta l’elettro-soppressione viene fatta mediante l’ausilio di magneti permanenti; in alcune costruzioni infatti, all’esterno della Faraday Cup vengono alloggiati due magneti ai lati opposti della tazza per produrre un campo magnetico all’interno della camera per inibire la fuga degli elettroni.

Il campo magnetico che si viene a creare internamente agisce sulla traiettoria degli elettroni con effetto di aumentare il loro percorso durante la fuga ed aumentando la probabilità che essi collidano con le pareti laterali della tazza. Il campo magnetico ha anche funzione di guidare e costringere il fascio nel suo allineamento e nella focalizzazione.

Spesso per migliorare l’efficienza del campo elettrico di repulsione si utilizza l’azione dell’elettro-soppressore combinata con quella del campo magnetico che forza gli elettroni in orbite circolari all’interno dell’apertura della camera.

Il raggio di curvatura della traiettoria degli elettroni sotto l'azione di questi campi è data dalla seguente espressione (4.1) ottenuta con approssimazioni non relativistiche:

$$\rho_e = \frac{\sqrt{2m_e T}}{eB} \approx 3.37 \frac{\sqrt{T[eV]}}{B[mT]} [mm] \quad (4.1)$$

Dove T è l'energia cinetica degli elettroni secondari e B è il campo magnetico prodotto. Ovviamente la temperatura nella zona adiacente ai magneti deve essere limitata. Il sistema Faraday Cup può ulteriormente comprendere un'alimentazione di soppressione per polarizzare l'elettrodo di soppressione al voltaggio di soppressione relativamente al potenziale del corpo della Faraday Cup (Figura 4.2).

In altre costruzioni tutte le parti della superficie interna della Faraday Cup sono rivestite con un materiale che mostra un'emissione di elettroni relativamente bassa. In questi casi la superficie interna della tazza ha un rivestimento di Carbonio oppure in alternativa è costruita interamente in Grafite.

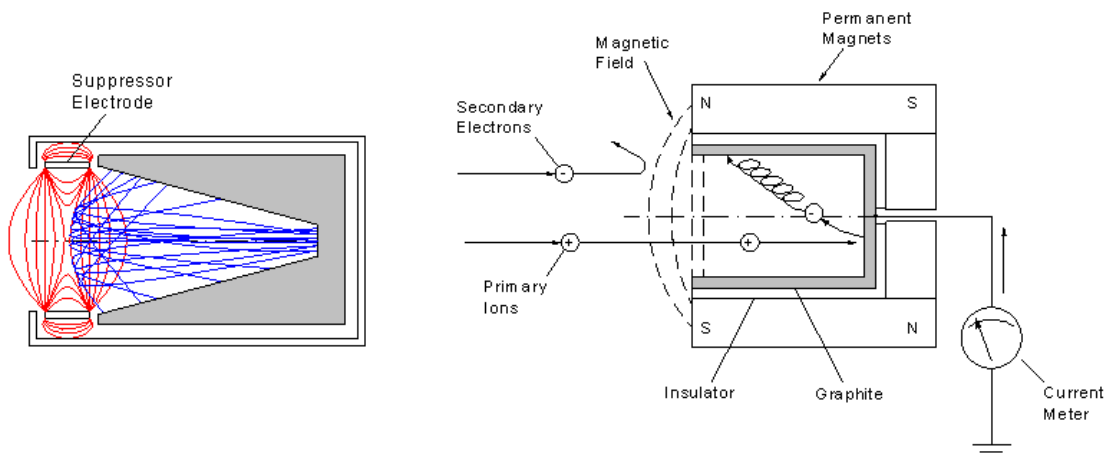


Figura 4.2: sistemi di soppressione con elettrosoppressore (a) e con magneti permanenti (b)

Dalla Fig. 2.4.b si osserva che il campo magnetico agisce sugli elettroni secondari emessi, mentre sugli ioni primari esso apparentemente non ha effetto. In realtà il campo magnetico agisce su tutte le particelle cariche in moto indipendentemente dal loro segno. L'entità della sua azione dipende dalla carica, velocità e traiettoria posseduta dalle particelle ed ovviamente dall'intensità del campo magnetico (legge di Lorentz) (4.2):

$$\begin{aligned}\vec{F} &= q \cdot \vec{v} \times \vec{B} \\ F &= q \cdot v \cdot B \cdot \sin\theta\end{aligned}\tag{4.2}$$

Dove \vec{F} è la forza di Lorentz prodotta dal campo magnetico \vec{B} che agisce sulla carica in moto con velocità \vec{v} e carica q . Si osserva che il modulo della forza di Lorentz dipende dall'angolo θ tra v e B . La forza è dunque nulla se la velocità è parallela al campo magnetico ($\theta = 0, \theta = \pi$) ed è massima, pari a $q \cdot v \cdot B$, quando \vec{v} è ortogonale a \vec{B} ($\theta = \pi/2$). La direzione della forza è ortogonale al piano individuato dai vettori \vec{v} e \vec{B} ed il verso è determinato dalla nota regola del prodotto vettoriale se la carica è positiva, mentre è opposto se la carica è negativa; ricordiamo che il verso del risultato di un prodotto vettoriale è quello di avanzamento di una vite destrorsa che nella sua rotazione porta \vec{v} su \vec{B} (*regola della vite o regola della mano destra*) [3].

Gli ioni primari posseggono una carica positiva mentre gli elettroni secondari emessi posseggono una carica negativa, tuttavia gli ioni posseggono una velocità ed una massa nettamente superiore a quella degli elettroni secondari che sono più leggeri e lenti. E' l'elevata inerzia degli ioni la ragione per cui essi non subiscono nessuna deviazione, a differenza dagli elettroni.

Per fasci con energie inferiori a $2MeV/u$ gli elettroni secondari emessi sono in rapporto $1/10$ rispetto agli elettroni prelevati. Se indichiamo con θ l'angolo che la traiettoria degli elettroni secondari forma con la linea d'asse del fascio, si ha che la porzione f di elettroni che fuoriescono dalla coppa dipende dal rapporto tra l'apertura della tazza R e la lunghezza L_{FC} . Da una semplice stima si ha che:

$$f \approx \frac{\sin^2\theta}{2} = \frac{R^2}{2(R^2 + L_{FC}^2)} \quad \text{con} \quad \theta = \arctan \frac{R}{L_{FC}}$$

Si evince come L_{FC} deve essere necessariamente maggiore di R per ridurre la porzione di elettroni secondari uscenti.

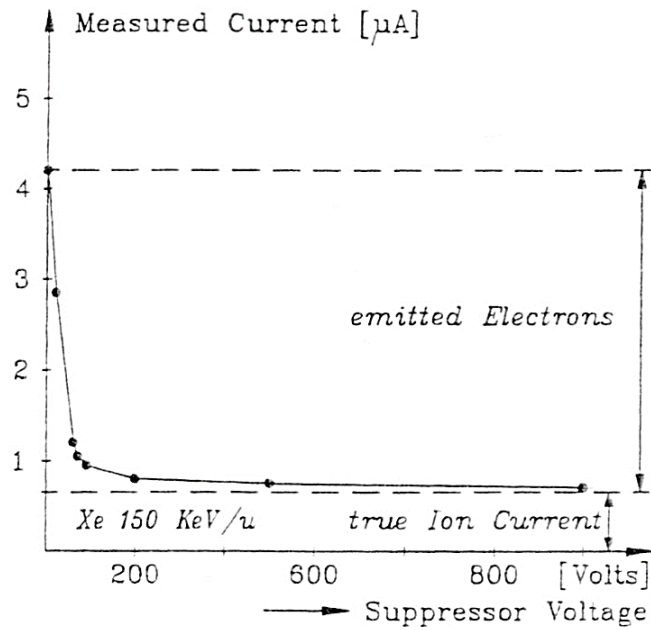


Figura 4.3: Effetto dell'elettro-soppressore nella misura della corrente [2].

Nella Figura 4.3 si osserva come, non disponendo di un elettro-soppressore, i valori di corrente misurata siano notevolmente alti in quanto viene misurata una corrente somma degli effetti della corrente dovuta agli elettroni prelevati dagli ioni del fascio e della corrente dovuta all'emissione di elettroni.

In generale all'aumentare del potenziale di soppressione si osserva una mitigazione dell'effetto secondario indesiderato. Si nota come i benefici ottenuti divengono sempre meno significativi aumentando oltre misura il potenziale di soppressione e che già oltre i $300 V$, nel caso specifico, si sono praticamente annullati gli effetti dell'emissione secondaria.

In seguito vengono rappresentate due architetture schematizzate della Faraday-Cup che vedono l'utilizzo dei sistemi di soppressione citati e opportuni sistemi di raffreddamento per lo smaltimento delle potenza termica prodotta (Figura 4.4 e Figura 4.5).

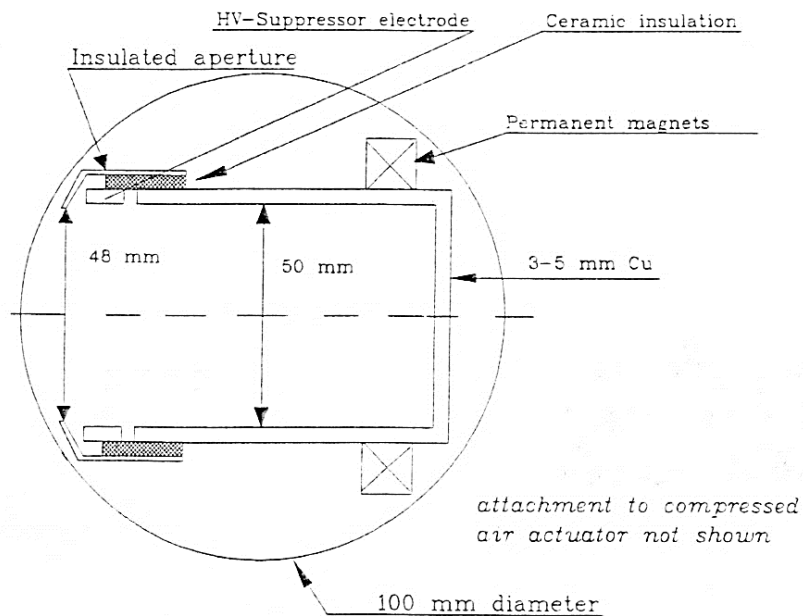


Figura 4.4: Faraday Cup non raffreddata per potenze di fascio di alcune Watt, dotata di elettro-soppressore in combinazione con magneti permanenti. La tazza ha un rapporto R/L_{FC} ragionevole [2].

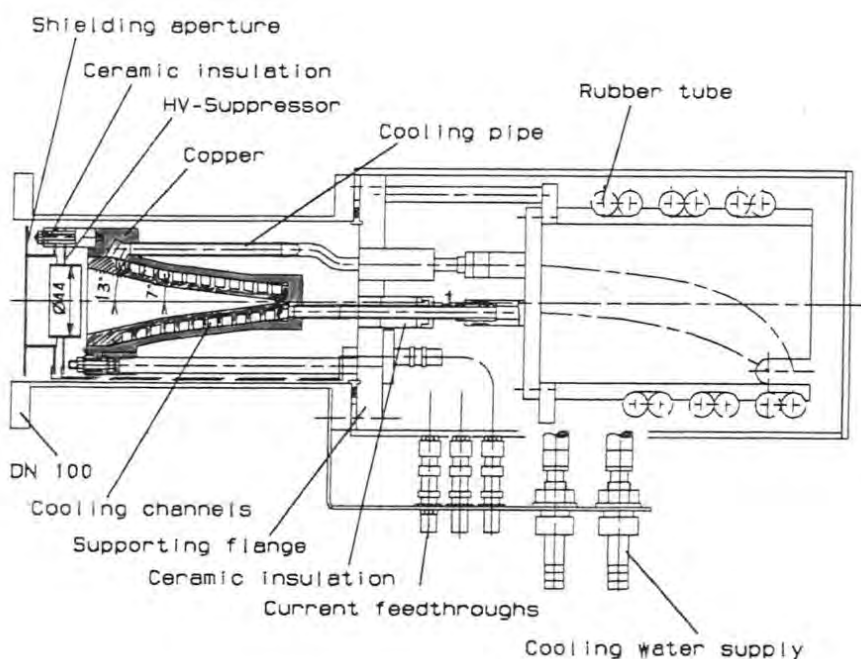


Figura 4.5: Faraday Cup raffreddata per alte potenze di fascio [2].

4.5 Progettazione dettagliata della Faraday-Cup

La progettazione del dispositivo considerato presuppone, come per il collimatore, la definizione delle forme dei componenti e dei materiali impiegati in base alle funzionalità che dovranno assolvere. Quindi è stata eseguita una progettazione dettagliata di un nuovo modello che vede delle differenze radicali rispetto alla soluzione sviluppata precedentemente (Figura 4.6).

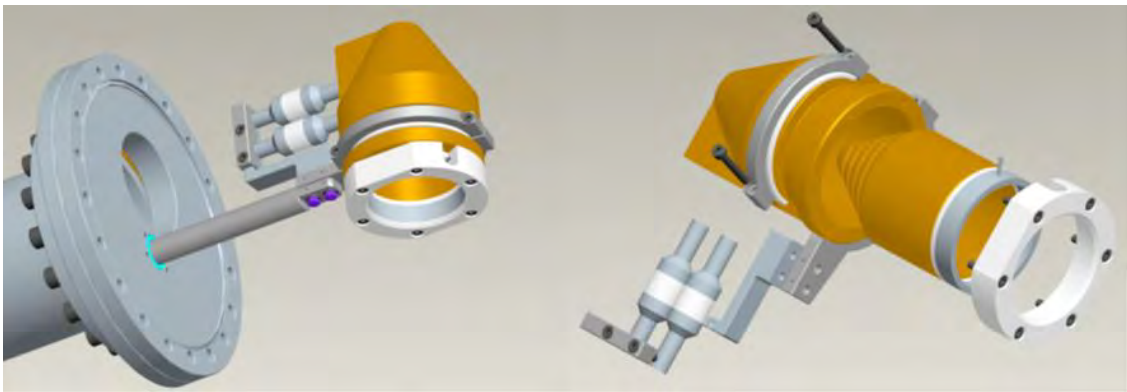


Figura 4.6: Faraday-Cup nella soluzione sviluppata precedentemente

Nella soluzione sviluppata in precedenza il corpo metallico della faraday cup, interamente realizzato in rame, ha una forma tipica a campana atta ad aumentare la superficie di impatto, quindi permette di ridurre la potenza specifica per unità di superficie.

Per mitigare ulteriormente il disturbo prodotto da questi ultimi e nel contempo garantire una misura di corrente affidabile, era stato previsto un sistema di soppressione realizzato da un anello metallico opportunamente isolato, vincolato ad un potenziale negativo. Inoltre dovendo smaltire una potenza termica di 5 kW (dato di progetto) era stato dimensionato un sistema di raffreddamento ricavato direttamente nel corpo conico della coppa, dove una portata di acqua deionizzata permetteva di mantenere il sistema a una temperatura costante.

La progettazione del dispositivo nella nuova soluzione proposta tiene conto dei seguenti aspetti:

- Il corpo della Faraday-Cup sarà realizzato in grafite; questo materiale presenta innanzitutto una minore emissione di elettroni secondari rispetto al rame; tale aspetto è di fondamentale importanza per le funzionalità che deve assolvere poiché, oltre ad abbattere l'effetto subordinato degli elettroni secondari che

compromettono la misura della corrente del fascio, permette di rinunciare alla tipica forma a coppa optando quindi per geometrie cilindriche costruttivamente più semplici. Inoltre l'elevata emissività della grafite (0.9 contro 0.1 del rame), permette di smaltire in maggior misura la potenza termica prodotta verso l'esterno.

- La potenza termica prodotta sulla Faraday-Cup viene smaltita per irraggiamento verso la camera esterna, pertanto un sistema di raffreddamento si rende necessario per limitare le temperature raggiunte nei singoli componenti. In particolare verrà dimensionato un sistema di raffreddamento direttamente nella camera esterna e ciò risulta essere un vantaggio per il sistema di canali e tubazioni utilizzato; in questa soluzione infatti il sistema risulta essere più sicuro in termini di tenuta rispetto alla soluzione precedente, dato che il circuito è situato esternamente e non vi è alcuna possibilità che l'acqua entri in contatto con il volume interno della camera. Inoltre nella versione precedente l'azione del sistema di raffreddamento era limitata al corpo in rame della Faraday-Cup, mentre nella nuova soluzione riguarda l'intera camera, quindi risulta essere più efficace.

4.5.1 Analisi termica preliminare

Come è stato accennato nei paragrafi precedenti, il corpo della Faraday-Cup costituisce essere la parte fondamentale del dispositivo in quanto rappresenta il bersaglio che intercetta trasversalmente il fascio protonico e ne rileva le caratteristiche mediante misure di corrente. Dunque la progettazione di dettaglio è focalizzata innanzitutto sulla definizione della geometria che tale componente dovrà assumere e le modifiche apportate, opportunamente giustificate, sono accompagnate di volta in volta da opportune analisi termo-strutturali al fine di garantire le funzionalità dello strumento in corso di definizione.

Si vuole realizzare tale componente interamente in grafite per i motivi elencati precedentemente, dunque si perviene dapprima ad una geometria semplificata del corpo, rappresentato da un blocco di forma cilindrica. In particolare il diametro dev'essere maggiore del diametro dello spot che caratterizza il fascio ($De = 70 \text{ mm}$), mentre lo spessore del blocco deve assicurare che il fascio intercettato non lo oltrepassi in senso longitudinale, per non pregiudicare il funzionamento del dispositivo stesso.

Al riguardo, tramite il codice di calcolo SRIM è stato possibile valutare lo spessore minimo sufficiente a fermare completamente il fascio a 40 MeV di energia assegnando le proprietà del materiale che caratterizzano il bersaglio.

Dall'analisi svolta, come per il collimatore, è risultato che lo spessore minimo sufficiente ad assorbire completamente il fascio radiattivo si aggira attorno a 10 mm ; in misura cautelativa, è stato considerato uno spessore maggiorato pari a 12 mm in vantaggio di sicurezza.

Quindi sulla base di un modello semplificato, analogamente a quanto fatto per il collimatore, è stata eseguita un'analisi termica preliminare mediante codice di calcolo ANSYS per valutare la massima temperatura raggiunta dal blocco di grafite per effetto dell'irraggiamento prodotto.

Al riguardo è stata modellata una camera esterna in lega di alluminio *Al 6082* rappresentata da un cilindro cavo, alla quale è stata applicata la sola convezione naturale con l'aria ambientale in corrispondenza della superficie esterna, mentre alla faraday cup, rappresentata dal blocco di grafite interno disposto coassialmente, è stata applicata una potenza di 8 kW in prossimità del volume intercettato dal fascio ($D_b = 32 \text{ mm}$). Nell'analisi termica si è scelto di discretizzare il modello con elementi volumetrici SOLID 90 quadrangolari, nei limiti consentiti dalla geometria assialsimmetrica del sistema. Quindi è stata generata una mesh con elementi aventi una dimensione caratteristica $L = 5 \text{ mm}$ per la camera esterna ed $L = 3 \text{ mm}$ per il blocco interno, rappresentata in Figura 4.7.

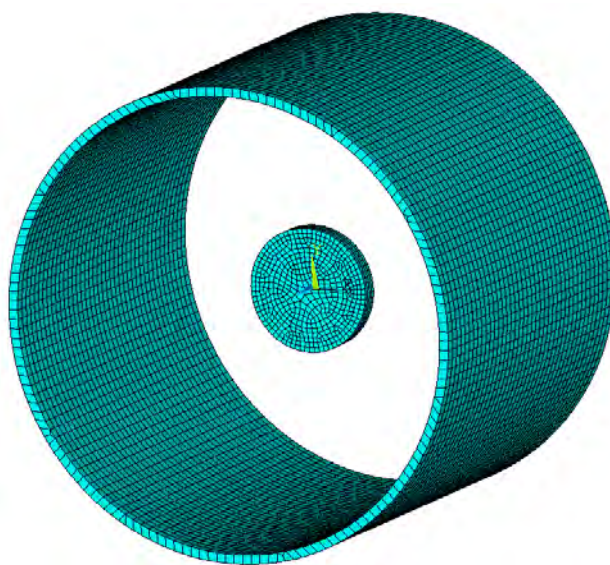


Figura 4.7: mesh utilizzata nel modello semplificato

Dall'analisi termica è risultata una temperatura massima di 2370 °C per il blocco di grafite in corrispondenza della parte centrale, mentre la camera esterna ha raggiunto una temperatura massima di 465 °C. Si evince come un sistema di raffreddamento si riveli necessario per contenere le temperature massime raggiunte; tuttavia è possibile, sulla base del modello appena definito, individuare i parametri che maggiormente influenzano i campi di temperatura raggiunti. Infatti, avendo coinvolto il solo scambio termico per irraggiamento tra la camera e il blocco interno, la legge che regola il flusso termico può essere rappresentata in maniera approssimativa dalla seguente relazione (4.3):

$$q_{12} = \frac{A_1 \cdot \sigma_s \cdot (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \left(\frac{r_1}{r_2}\right) \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right)} \quad (4.3)$$

dove:

q_{12} = flusso termico scambiato;

A_1 = area superficiale del blocco interno;

r_1 = raggio del blocco interno;

r_2 = raggio interno della camera esterna;

ε_1 = emissività emisferica globale del cilindro interno;

ε_2 = emissività emisferica globale del cilindro esterno;

σ_s = costante di Stefan-Boltzmann ($5.67051 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$);

T_1 = temperatura assoluta del cilindro interno;

T_2 = temperatura assoluta del cilindro esterno;

Dunque i parametri che regolano lo scambio termico e che influenzano in maniera significativa le temperature massime raggiunte nella faraday cup, rappresentata dal cilindro interno, sono il rapporto tra i raggi r_1/r_2 e l'emissività della camera esterna ε_2 , ipotizzando costanti l'emissività della grafite ε_1 e il flusso termico scambiato q_{12} .

Nell'analisi preliminare svolta è stata considerata per la camera esterna un valore di riferimento dell'emissività pari a 0,3. Aumentando tale valore, assieme al rapporto r_1/r_2 , è possibile abbattere in maniera significativa le temperature massime raggiunte nella faraday cup entro valori più contenuti, ricordando che per la grafite un valore ragguardevole di riferimento per la temperatura massima limite si aggira intorno ai 2000 °C. Per aumentare il valore dell'emissività della camera in alluminio si ricorrono a trattamenti superficiali localizzati.

Questi sono opportunamente descritti nell'appendice A1 assieme ai risultati ottenuti dalle analisi eseguite per diverse casistiche, al variare delle dimensioni e dell'emissività del modello.

4.5.2 Sistema di raffreddamento della camera

La camera deve poter smaltire una potenza termica teorica massima di 8 kW . Dovendo prevedere un sistema di raffreddamento, lo si dimensiona come se dovesse smaltire tutta la potenza termica; questo modo di procedere è in vantaggio di sicurezza nel caso siano presenti altri sistemi di dissipazione del calore che vengono a sovrapporsi, come per esempio lo scambio termico radiativo verso l'ambiente esterno [4].

L'ipotesi di considerare tutto il flusso di calore termico entrante dissipato per convezione attraverso dei canali di raffreddamento si dimostra valida, in quanto il calore dissipato per convezione è prevalente rispetto a quello dissipato per irraggiamento.

Infatti in presenza del raffreddamento per sola convezione forzata, la temperatura dell'oggetto viene mantenuta relativamente bassa e perciò l'irraggiamento, che ha dipendenza con la quarta potenza della temperatura, è ininfluente. Il fluido vettore utilizzato per il raffreddamento è acqua trattata. Viene ipotizzata la temperatura d'ingresso $t_i = 20^\circ\text{C}$ e la velocità media di deflusso attraverso i canali:

$$u = 1 \text{ m/s}$$

La velocità è scelta in ragione del fatto che esiste un range consigliato per le velocità di deflusso, che per canali in alluminio è:

$$u_{min} = 1 \text{ m/s} \quad , \quad u_{max} = 1,5 \text{ m/s}$$

Al di sotto di tale range si incorre in pericolo di sporcamento dei canali, mentre al di sopra vi è pericolo di erosione. Nel caso specifico l'acqua di raffreddamento è trattata ai fini di limitare l'attivazione e scorre in canali scavati all'interno di un solido pieno. Si sceglie di realizzare il canale in un unico passaggio evitando le complicazioni fluidodinamiche di divisione delle portate, perciò si sceglie un valore opportuno per la portata in ingresso m :

$$m = 5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s} = 0.05 \text{ l/s} = 180 \text{ l/h}$$

E' quindi possibile stimare la sezione di deflusso A come (4.4)

$$A = \frac{m}{u} = \frac{5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}}{1 \text{ m/s}} = 5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \quad (4.4)$$

Per la sezione rettangolare di deflusso si considera, per semplicità di realizzazione pratica, una larghezza del canale pari al diametro della fresa utilizzata, di conseguenza la profondità della cava è univocamente determinata in base all'area calcolata; in particolare considero le seguenti dimensioni:

$$b = 10 \text{ mm} \rightarrow h = \frac{A}{b} = 5 \text{ mm}$$

A questo punto è possibile calcolare il diametro equivalente d_e , che nel caso specifico vale (4.5):

$$d_e = \frac{2 \cdot b \cdot h}{b + h} = 7 \text{ mm} \quad (4.5)$$

Le proprietà del fluido valutate alla temperatura in ingresso ($t_i = 20 \text{ }^\circ\text{C}$) risultano:

Densità ρ [Kg/m^3]	Conducibilità λ [W/mK]	Viscosità μ [Kg/ms]	Calore specifico c_p [J/KgK]
998.16	0.59842	0.0010016	4184.4

Lo stato medio del fluido è quindi rappresentato dai seguenti numeri dimensionali termo-fluidodinamici (4.6):

$$Re = \frac{d_e \cdot \rho \cdot u}{\mu} = \frac{0.007 \text{ m} \cdot 998.16 \text{ Kg}/\text{m}^3 \cdot 1 \text{ m/s}}{0.0010016 \text{ Kg}/\text{ms}} = 6643.77$$

$$Pr = \frac{c_p \cdot \mu}{\lambda} = \frac{4184.4 \text{ J}/\text{KgK} \cdot 0.0010016 \text{ Kg}/\text{ms}}{0.59842 \text{ W}/\text{mK}} = 7 \quad (4.6)$$

$$Nu = 0.027 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.33} \cdot 1^{0.14} = 0.027 \cdot 6643.77^{0.8} \cdot 7^{0.33} \cdot 1^{0.14} = 58.65$$

E quindi, dalla definizione del numero di Nusselt $Nu = \alpha \cdot d_e / \lambda$, si ricava il coefficiente di convezione medio (4.7):

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{d_e} = 5264.40 \text{ W/m}^2 \quad (4.7)$$

In riferimento alla potenza termica da smaltire $Q = 8000 \text{ W}$, dalla relazione fondamentale dello scambio termico $Q = c_p \cdot m \cdot \Delta T$, si può risalire al surriscaldamento subito dal fluido vettore, che risulta (4.8):

$$\Delta T = \frac{Q}{c_p \cdot m \cdot \rho} = \frac{8000 \text{ W}}{4184.4 \text{ J/KgK} \cdot 5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s} \cdot 998.16 \text{ Kg/m}^3} = 38.31 \text{ }^\circ\text{C} \quad (4.8)$$

L'acqua dunque entra alla temperatura $T_i = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, assorbe la potenza termica prodotta ed esce alla temperatura $T_u = 58.31 \text{ }^\circ\text{C}$. Tuttavia le proprietà dell'acqua sono state valutate alla temperatura d'ingresso; per un calcolo più preciso è opportuno valutarle alla temperatura media tra l'ingresso e l'uscita $T_m = 39.15 \text{ }^\circ\text{C}$; ricalcolando il tutto, considerando T_m come temperatura di riferimento per le proprietà dell'acqua si ottengono valori aggiornati dei termini α , ΔT , T_f e T_m . In particolare dopo 2 iterazioni si raggiunge la convergenza fino alla seconda cifra decimale sulle temperature.

Considerando l'ultima iterazione, alla temperatura $T_m = 39.25 \text{ }^\circ\text{C}$ le proprietà dell'acqua valgono:

Densità $\rho \text{ [Kg/m}^3 \text{]}$	Conducibilità $\lambda \text{ [W/mK]}$	Viscosità $\mu \text{ [Kg/ms]}$	Calore specifico $c_p \text{ [J/KgK]}$
996.25	0.62941	0.0006636	4179.58

e il calcolo fornisce i seguenti valori aggiornati:

<i>Re</i>	9988.75
<i>Pr</i>	4.41
<i>Nu</i>	69.75
$\alpha \text{ [W/m}^2 \text{]}$	6584.88
$T_u \text{ [}^\circ\text{C]}$	58.50
$\Delta T \text{ [}^\circ\text{C]}$	38.50

A questo punto è possibile calcolare la superficie di scambio S richiesta per smaltire la potenza termica di progetto Q (4.9):

$$Q = \alpha \cdot S \cdot \Delta T_{log} \rightarrow S = \frac{Q}{\alpha \cdot \Delta T_{log}} \quad (4.9)$$

Dove ΔT_{log} rappresenta la variazione di temperatura tra ingresso ed uscita che si instaura tra la camera che cede calore e il fluido vettore che lo assorbe, ed è definita come (4.10):

$$\Delta T_{log} = \frac{\Delta T_u - \Delta T_i}{\ln \frac{\Delta T_u}{\Delta T_i}} \quad (4.10)$$

Avendo considerato una temperatura massima cautelativa per l'alluminio $T_{max} = 100^\circ C$ si ha che:

$$\Delta T_u = T_{max} - T_u = 100 - 58.50 = 41.50 \text{ }^\circ C$$

$$\Delta T_i = T_{max} - T_i = 100 - 20 = 80 \text{ }^\circ C$$

$$\Delta T_{log} = 58.66 \text{ }^\circ C$$

Dunque la superficie di scambio S risulta:

$$S = \frac{Q}{\alpha \cdot \Delta T_{log}} = \frac{8000W}{6584.88 \text{ } W/m^2 \cdot 58.66 \text{ }^\circ C} = 0.020712 \text{ } m^2$$

Considerazioni di carattere geometrico e costruttivo permettono di realizzare un sistema di raffreddamento costituito da 4 piste longitudinali, rappresentate da 4 fori passanti nel corpo centrale della camera, e da canali circolari e radiali in prossimità delle testate. Il sistema di raffreddamento completo è rappresentato nella Figura 4.8. Inoltre delle ulteriori placche opportunamente sagomate si rendono necessarie per la chiusura del condotto stesso; al riguardo sono previste delle battute di riferimento al fine di garantire un buon accoppiamento delle placche stesse con la camera in vista delle operazioni di saldatura.

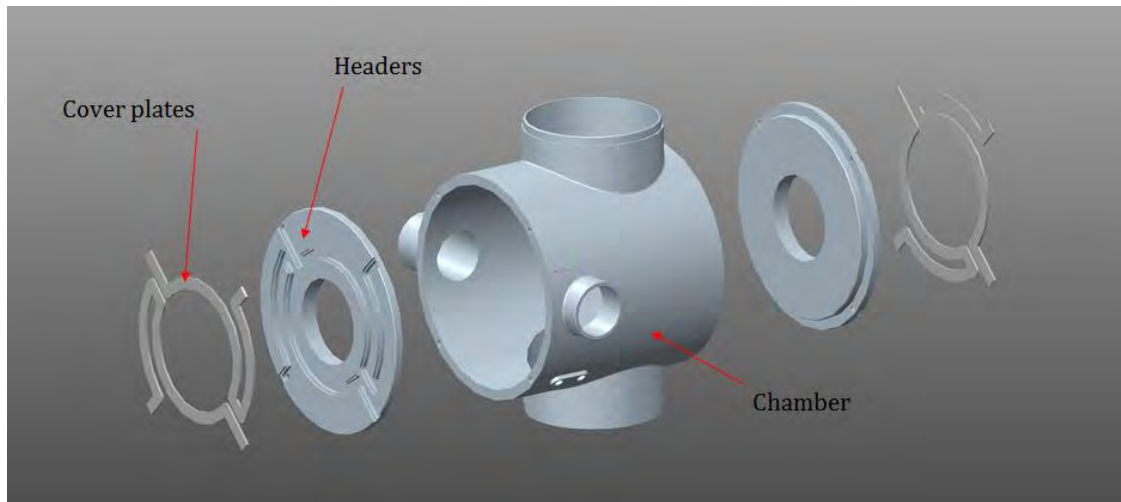


Figura 4.8: vista esplosa della camera con sistema di raffreddamento

La lunghezza approssimata complessiva del circuito di raffreddamento risulta di $L = 3.015 \text{ m}$.

Nella verifica termica, tale valore viene confrontato con la lunghezza minima teorica L_{min} calcolata come (4.11):

$$L_{min} = \frac{S}{2(b + h)} = \frac{0.020712 \text{ m}^2}{2 (0.005\text{m} + 0.010\text{m})} = 0.690 \text{ m} \quad (4.11)$$

Dove $2(b + h)$ rappresenta il perimetro della sezione di deflusso.

Si può verificare che $L_{min} < L$, dunque il sistema di raffreddamento ricavato dalla camera è verificato termicamente; è possibile stimare altresì una sorta di coefficiente di sicurezza termico φ_t che convalida ulteriormente tale verifica, definito come (4.12):

$$\varphi_t = \frac{L}{L_{min}} = \frac{3.015 \text{ m}}{0.690 \text{ m}} = 4.37 \quad (4.12)$$

4.5.3 Modellazione e analisi termiche

Grazie al modellatore solido CREO è stato possibile definire la geometria del modello nella forma che meglio risponde alle esigenze richieste. In particolare dapprima è stato modellato con maggior dettaglio il corpo centrale della Faraday-Cup, quale elemento sensibile dello strumento, per poi passare alla definizione degli elementi di supporto e movimentazione dello stesso all'interno della camera.

In questo senso i risultati ottenuti dall'analisi termica preliminare si sono rivelati di enorme importanza; infatti per quanto riguarda la geometria del blocco di grafite, che nell'analisi termica registrava una temperatura massima di $2370\text{ }^{\circ}\text{C}$, si è pensato di suddividerlo in 10 dischi sottili spessi $1,2\text{ mm}$ coassiali ed equispaziati da opportuni anelli distanziatori, realizzati anch'essi in grafite, al fine di aumentare la superficie di scambio complessiva e poter abbattere i campi di temperatura (Figura 4.9).

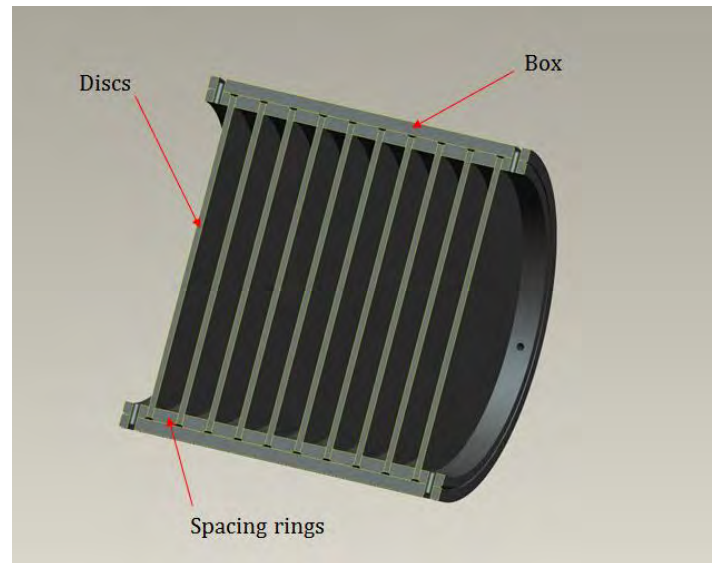


Figura 4.9: vista in sezione del corpo centrale della Faraday-Cup

Una box di grafite si è resa necessaria per il posizionamento dei dischi e degli anelli distanziatori; essi presentano all'interno un giuoco radiale cautelativo di 0.5 mm in vista delle dilatazioni termiche nascenti, che possono indurre a stati di tensione che possono compromettere la resistenza e l'integrità fisica del sistema interamente realizzato in grafite. Per gli stessi motivi si è scelto di posizionare i componenti con un certo lasco in direzione assiale e di bloccarli con opportuni fili in tantalio alle estremità.

Sono stati definiti degli elementi di supporto per la Faraday-Cup (Figura 4.10); in particolare è stato previsto inizialmente di posizionare la box di grafite all'interno di un tubo in tantalio, a sua volta vincolato ad un braccio di supporto. Il sostegno è solidale ad una base realizzata in acciaio *AISI 316* mediante viti, mentre l'isolamento elettrico dello stesso, necessario per eseguire le misure di corrente nella zona adiacente alla box in grafite, è reso possibile da opportuni isolatori ceramici. Infine l'intero sistema è sorretto da un albero realizzato in acciaio, montato a sua volta su un sistema di movimentazione azionato da un motore pneumatico, il quale verrà descritto più in dettaglio nel sesto capitolo.

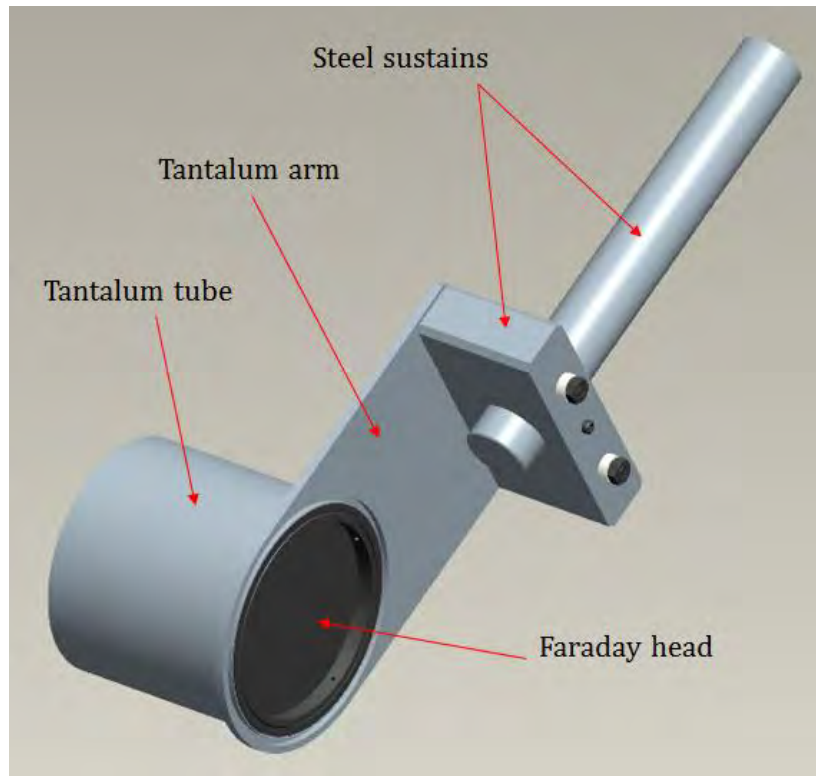


Figura 4.10: particolare del sistema di sostegno della Faraday-Cup

La Faraday-Cup è situata a valle del sistema multi-collimatore e il fascio protonico collimato dal quarto disco collimatore con un diametro $Db=32\text{ mm}$ non risulta perfettamente circolare poiché, come è già stato descritto nel capitolo precedente, una frazione di fascio non viene intercettata dall'ultimo disco collimatore. Per questa ragione si è pensato ad un ulteriore disco collimatore in grafite, interposto coassialmente tra il collimatore e la Faraday-Cup, in grado di collimare lo spot all'ingresso correggendo eventuali divergenze di fascio e recuperando la frazione non intercettata dall'ultimo disco (circa $1\% P_{tot}$). In questo modo il fascio perfettamente circolare giunge all'interno della camera per poi intercettare ortogonalmente il corpo in grafite della Faraday-cup (Figura 4.11).

Al fine di inibire la fuga degli elettroni secondari e favorire la corretta lettura della corrente misurata, è stato concepito in principio un sistema di soppressione realizzato con un disco fisso in tantalio interposto coassialmente tra il disco collimatore e la Faraday cup mobile. In un secondo momento si è pensato di rimuovere tale disco in tantalio, poiché il solo disco collimatore può fungere da soppressore ed assolvere alle funzionalità richieste.

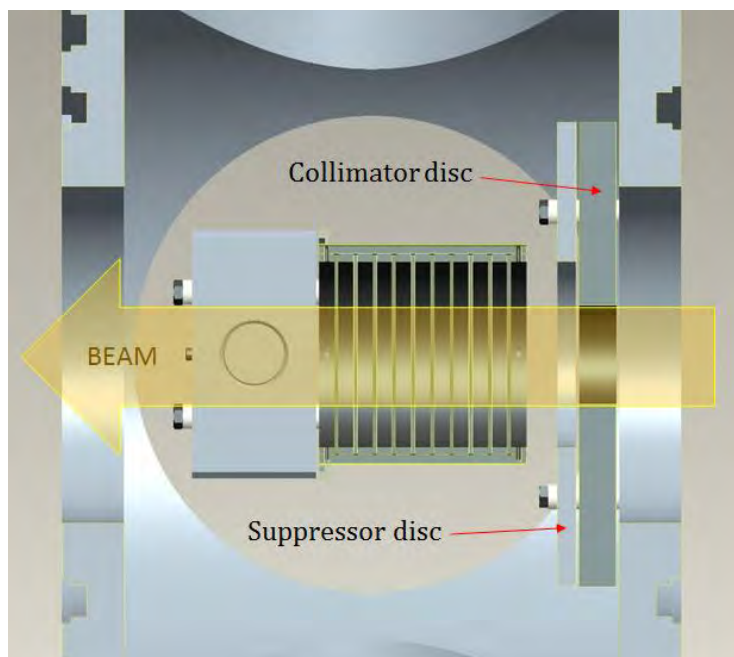


Figura 4.11: particolare del disco collimatore e del disco soppressore

A questo punto è stata eseguita una verifica termica del sistema concepito sulla base di un modello semplificato, mediante il codice agli elementi finiti. È stato quindi realizzato un programma APDL che riassume i comandi per l'esecuzione dell'analisi mediante il codice di calcolo ANSYS. Quindi, dopo aver importato i files.IGS del modello 3D, sono state importate le caratteristiche dei materiali e definite le emissività delle parti interessate da scambio termico per irraggiamento. Per consultare il listato dei comandi implementati e le caratteristiche dei materiali si rimanda all'appendice.

Nel modello è stata applicata una potenza complessiva di 8 kW in corrispondenza del volume intercettato dal fascio protonico ($D_b=32 \text{ mm}$) ed è stata equamente ripartita nei 10 dischi in grafite. In questa simulazione non è stato considerato il sistema di raffreddamento, ma solo il contributo dovuto all'ambiente esterno che lambisce la superficie esterna della camera, al fine di avere un confronto diretto con l'analisi preliminare svolta precedentemente. Nell'analisi termica si è scelto di discretizzare il modello con elementi volumetrici SOLID 90 quadrangolari, nei limiti consentiti dalla geometria del sistema. Quindi è stata generata una mesh (in Figura 4.12) con elementi aventi una dimensione media $L=10 \text{ mm}$ per la camera esterna ed $L=4 \text{ mm}$ per gli elementi interni.

1
ELEMENTS

MAY 8 2014
11:27:33

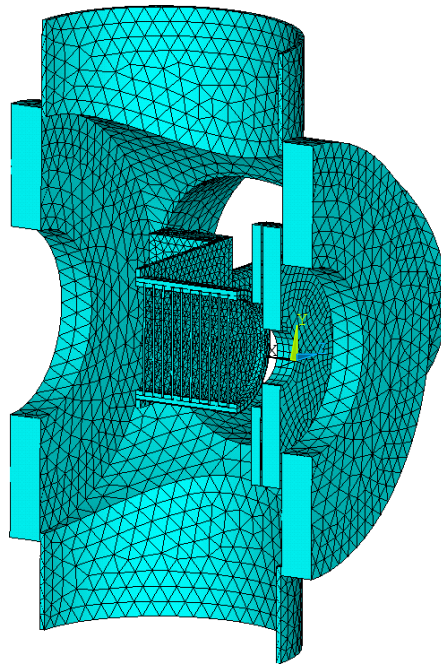


Figura 4.12: vista in sezione della mesh utilizzata

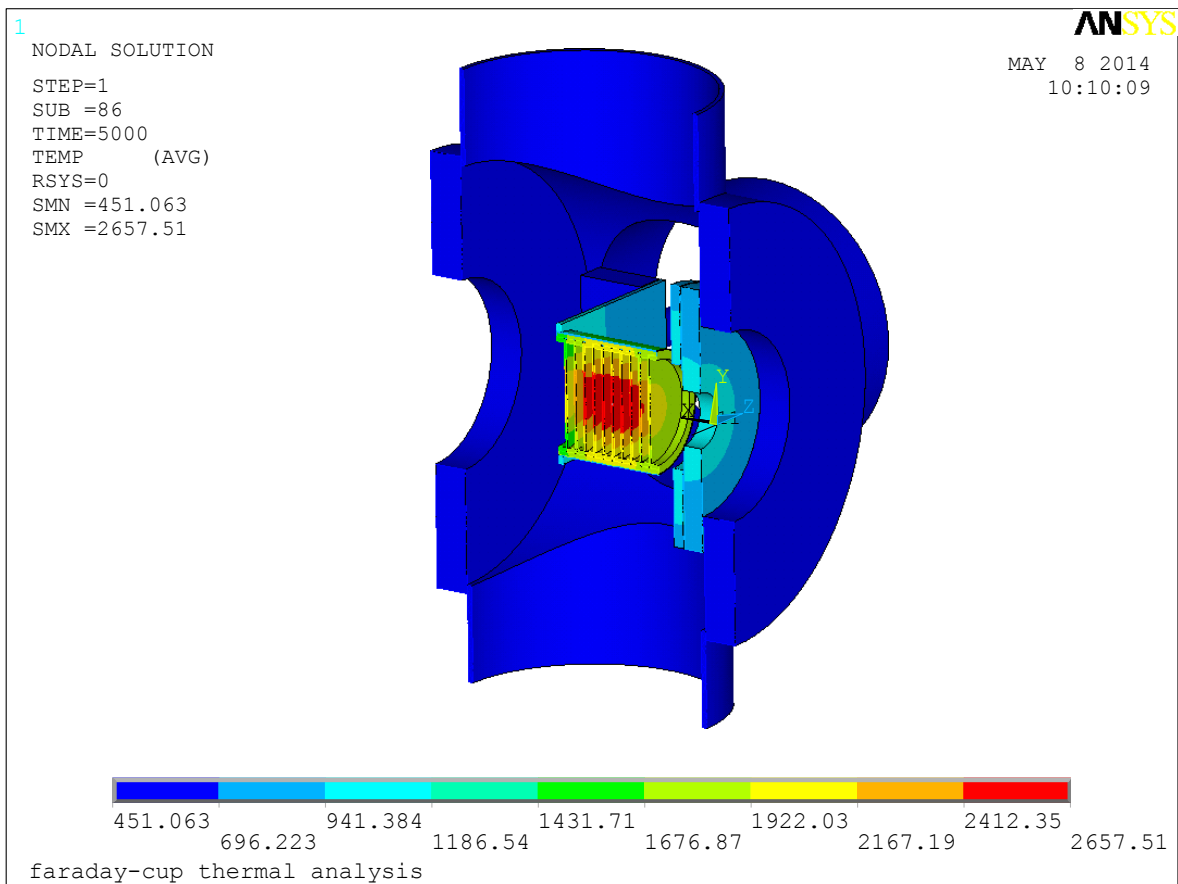


Figura 4.13: andamento delle temperature che risulta dall'analisi termica [°C]

Nella Figura 4.13 sono rappresentati i campi di temperatura che risultano dall'analisi svolta mentre la tabella riassume i valori massimi riscontrati nei diversi componenti:

Componente	Materiale	T _{max} [°C]	T _{lim} [°C]
Dischi	Grafite C	2657.51	2000
Camera esterna	Lega Al 6082	522.11	400
Disco soppressore	Tantalo Ta	983.57	1700
Disco collimatore	Grafite C	1076.44	2000
Sostegno	Acciaio AISI 316	720.89	600

Tabella 4.1: temperature massime registrate nei singoli componenti

Dai risultati si evince come il sistema non risulti verificato termicamente poiché le temperature massime riscontrate nei dischi, nella camera e nei sostegni in acciaio superano i rispettivi valori limiti.

Inoltre si nota come la temperatura della camera esterna sia confrontabile con quella ottenuta dall'analisi preliminare (522 °C contro 465 °C), mentre la temperatura massima raggiunta nei dischi (Figura 4.14) supera quella pervenuta nell'analisi precedente (2658 °C contro 2370 °C), oltre che superare il limite cautelativo suggerito dalla letteratura (2000 °C).

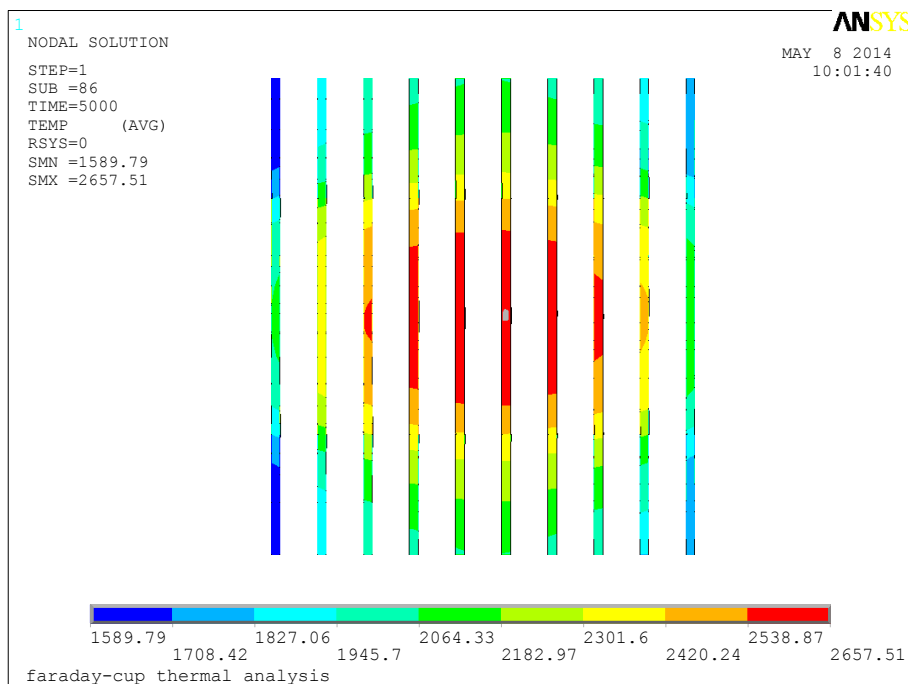


Figura 4.14: vista in sezione - andamento delle temperature nei dischi [°C]

Questo innalzamento di temperatura registrato nei dischi rispetto all'analisi precedente è giustificato dalla presenza del tubo in tantalio che ricopre la box in grafite. Tale ricoprimento infatti funge da schermo nei confronti dell'irraggiamento e la potenza termica prodotta non viene smaltita in maniera efficiente verso l'esterno. Infatti il valore dell'emissività assoluta del tantalio risulta essere notevolmente più basso rispetto a quella della grafite (Tabella 4.2):

$\epsilon_{Ta (1000^{\circ}C)}$	0.146
$\epsilon_C (1000^{\circ}C)$	0.815

Tabella 4.2: confronto fra le emissività assolute del tantalio e della grafite valutate a 1000°C

Per poter smaltire la potenza termica verso la camera esterna in maggior misura è opportuno limitare l'estensione del tubo in tantalio in modo da non ostacolare l'irraggiamento prodotto dalla box in grafite verso la superficie interna del guscio, favorendo così l'abbassamento delle temperature raggiunte dai componenti interni. Dunque è stata modificata la geometria del sostegno in tantalio in modo da lasciar scoperta, per quanto possibile, la superficie della box in grafite per favorire lo scambio termico di irraggiamento (Figura 4.15).

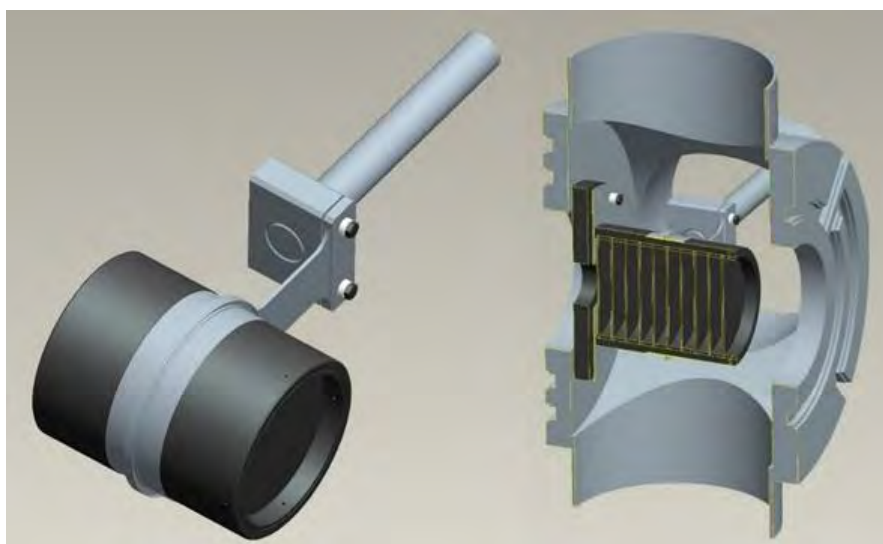


Figura 4.15: particolare della Faraday-Cup modificata (sinistra) e dell'intero sistema in sezione (destra)

Quindi in riferimento al modello modificato è stata eseguita un'ulteriore analisi termica mediante il codice agli elementi finiti.

Gli elementi utilizzati, le caratteristiche della mesh generata e le proprietà dei materiali sono rimaste le stesse dell'analisi termica precedente, mentre in aggiunta ai carichi termici già asseriti è stato tenuto conto del sistema di raffreddamento (Figura 4.16).

ELEMENTS

NOV 4 2014
08:35:09

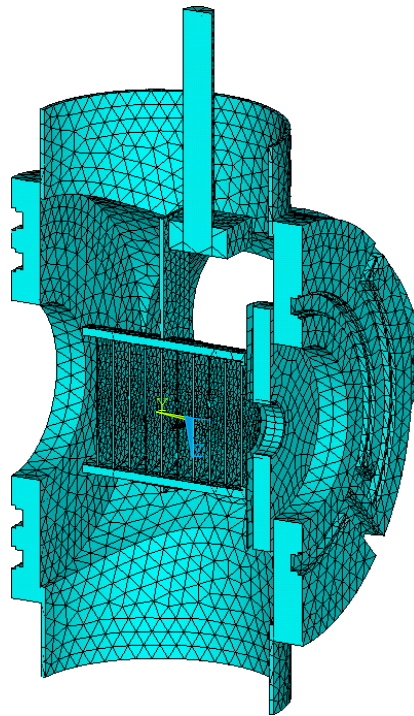


Figura 4.16: mesh utilizzata nell'analisi del modello con il sistema di raffreddamento

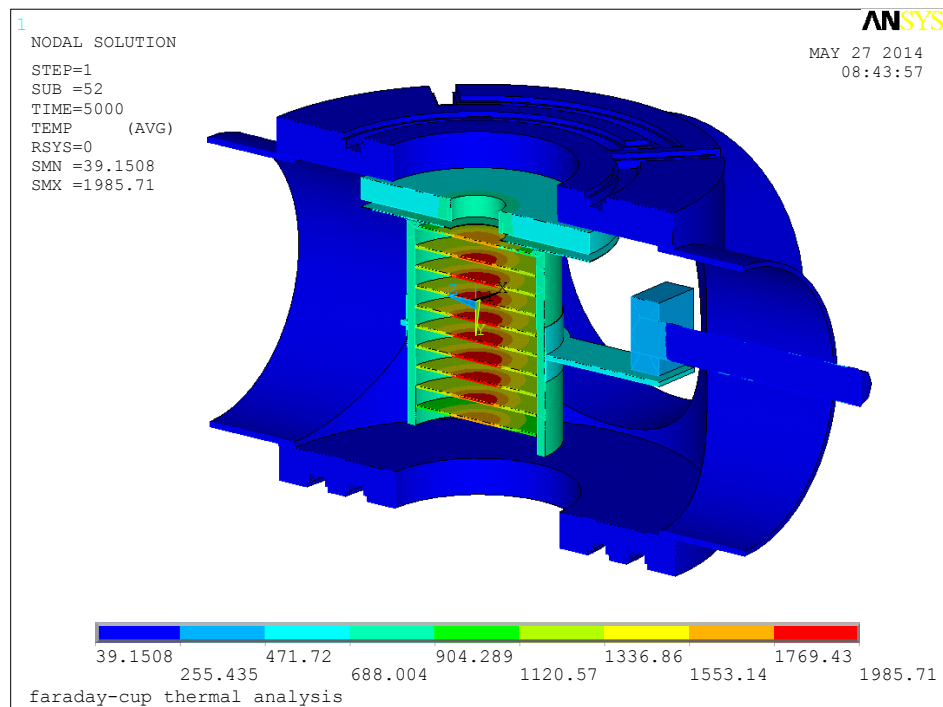


Figura 4.17: andamento delle temperature che risulta dall'analisi termica [°C]

Nella Figura 4.17 sono rappresentati gli andamenti delle temperature che sono risultati dall'analisi termica, mentre la Tabella 4.3 riassume i valori delle temperature massime raggiunte nei singoli componenti:

Componente	Materiale	T _{max} [°C]	T _{lim} [°C]
Dischi	Grafite C	1985.71	2000
Camera esterna	Lega Al 6082	57.73	400
Disco soppressore	Tantalio Ta	873.33	1700
Disco collimatore	Grafite C	736.30	2000
Sostegno	Acciaio AISI 316	274.20	600

Tabella 4.3: temperature massime registrate nei singoli componenti

Dai risultati si nota come le temperature siano risultate complessivamente più basse rispetto all'analisi termica precedente; in particolare per i dischi in grafite si è registrata una temperatura massima di 1986 °C, contro i 2658 °C pervenuti precedentemente. Dunque il modello concepito nell'ultima soluzione, che vede l'utilizzo del sistema di raffreddamento, risulta verificato termicamente poiché le temperature massime registrate risultano inferiori rispetto ai valori limiti (4.13) :

$$T_{max} < T_{lim} \quad (4.13)$$

4.5.4 Analisi strutturale

In riferimento allo stesso modello utilizzato per le analisi termiche descritte precedentemente, è stata eseguita un'analisi strutturale necessaria per valutare le tensioni e le deformazioni nascenti, al fine di verificare la resistenza meccanica dell'intero sistema.

Analogamente a quanto fatto per la verifica strutturale del collimatore, viene considerato l'approccio di Von Mises come criterio di resistenza, secondo cui le tensioni massime registrate, riassunte dalle tensioni ideali $\sigma_{id,VM}$, vengono confrontate con le tensioni ammissibili σ_{adm} che dipendono dai materiali impiegati; quindi per non compromettere l'integrità fisica del sistema e garantire nel contempo la funzionalità dell'apparato in condizioni di sicurezza è necessario verificare, per ogni componente del sistema, la seguente relazione (4.14):

$$\sigma_{id,VM} < \sigma_{adm} \quad (4.14)$$

Per la descrizione del metodo e la consultazione delle tensioni ammissibili calcolate per i diversi materiali $\sigma_{id,VM}$ si rimanda al paragrafo 2.9.

E' stato quindi realizzato un programma APDL che riassume i comandi per l'esecuzione dell'analisi strutturale mediante il codice di calcolo ANSYS; per consultare il listato dei comandi implementati e le caratteristiche dei materiali si rimanda all'appendice.

Quindi una volta ultimate le analisi termiche precedentemente descritte ed assegnate le caratteristiche meccaniche ai diversi materiali impiegati, noti i campi di temperatura che derivano da queste, è possibile valutare le tensioni e le deformazioni indotte dai gradienti termici nascenti. Innanzitutto si dispone già di un modello discretizzato con elementi termici quindi risulta relativamente semplice e necessaria, ai fini del calcolo strutturale, la conversione degli elementi termici in elementi strutturali; in particolare nel caso in esame gli elementi SOLID90 vengono convertiti in elementi SOLID186: quest'ultimo elemento è costituito da 20 nodi, ognuno con 3 gradi di libertà che rappresentano le 3 traslazioni x,y,z rispetto a un sistema di riferimento principale.

Dunque per tale tipologia di elemento le temperature che risultano dalle analisi termiche precedenti vengono ora assegnate come condizioni al contorno iniziali nell'analisi strutturale. Inoltre è di fondamentale importanza vincolare in modo isostatico il modello evitando la nascita di moti rigidi e gradi di labilità: al riguardo vengono vincolati la camera esterna e l'albero di sostegno della Faraday-Cup con opportuni appoggi, mentre i componenti in grafite della coppa rimangono liberi di dilatarsi.

Questi ultimi saranno intuitivamente i componenti maggiormente sollecitati in termini di tensioni interne, dato che dalle analisi termiche in essi si sono registrati i maggiori gradienti di temperatura. Inoltre a priori tali componenti risultano essere critici nei riguardi dell'intera verifica strutturale poiché, di tutti i materiali considerati nell'analisi, la grafite presenta la minor tensione ammissibile calcolata, che ricordo essere $\sigma_{id,VM} = 33 \text{ MPa}$. Proprio per questi motivi ha senso svolgere l'analisi strutturale focalizzando l'attenzione limitatamente ai componenti in grafite che costituiscono la coppa della Faraday-Cup, quali componenti critici per i motivi accennati, dunque tale analisi risulta essere significativa nei riguardi dell'intero sistema.

In particolare la verifica strutturale eseguita focalizza l'attenzione sui 10 dischi in grafite intercettati dal fascio e la box in grafite che li contiene; di seguito verranno riportati i risultati ottenuti dall'analisi strutturale limitatamente a tali elementi.

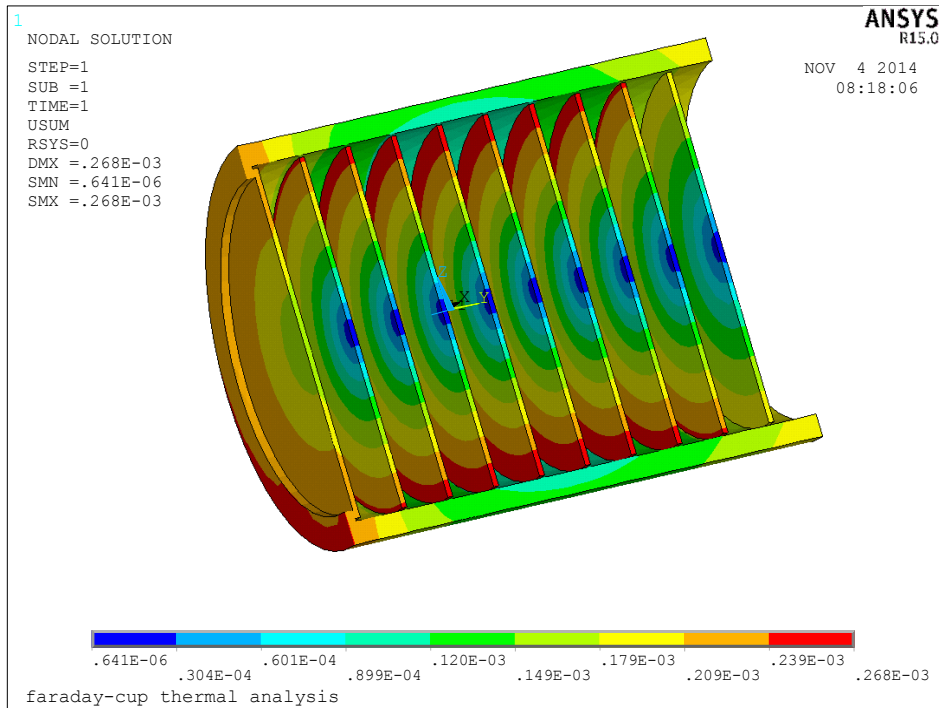


Figura 4.18: campo di deformazione risultante [mm]

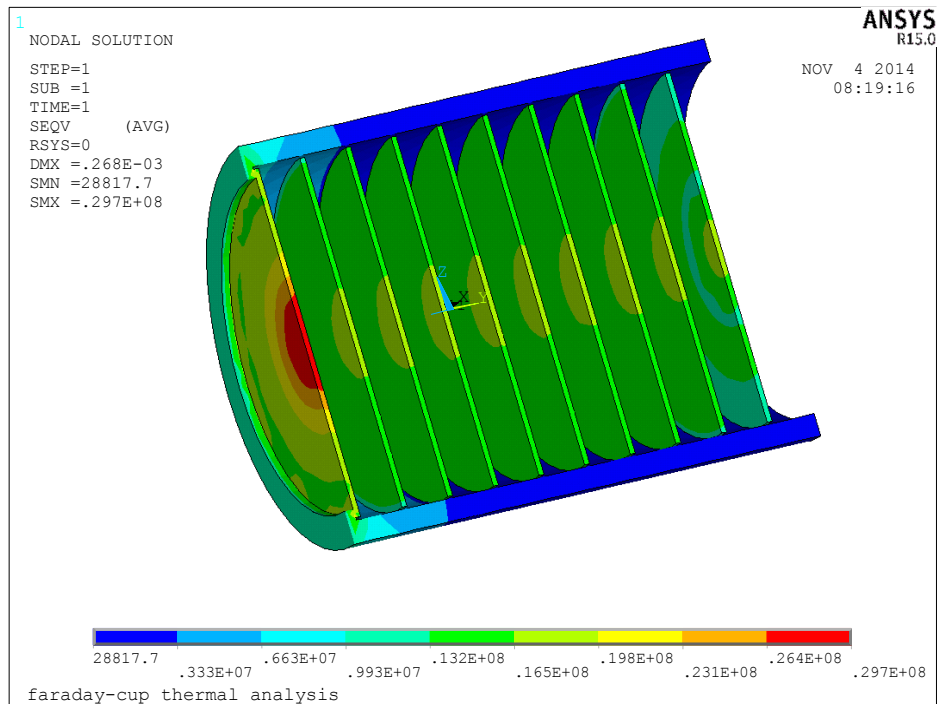


Figura 4.19: tensioni di Von Mises risultanti [Pa]

Dai risultati ottenuti si evince come le dilatazioni radiali massime che si instaurano nei dischi (0.23 mm) siano inferiori al giuoco radiale previsto tra i dischi stessi e la box di grafite, pari a 0.5 mm (Figura 4.18), mentre le tensioni massime di Von Mises riscontrate rimangono al di sotto della tensione ammissibile ($29.7\text{ MPa} < 33\text{ MPa}$), dunque l'intero sistema risulta verificato in termini di tensioni e dilatazioni termiche prodotte.

4.6 Conclusioni

In questo capitolo si è affrontata una progettazione completa della Faraday Cup, partendo da un modello preliminare fino allo sviluppo di un sistema completo e dettagliato. La forma finale è stata definita sulla base dei risultati pervenuti dalle analisi termo-strutturali eseguite, che hanno offerto la possibilità di sviluppare una soluzione che rispetti i requisiti richiesti per un corretto funzionamento.

In particolare:

- Si è visto come l'emissività risulti essere un parametro determinante per il flusso termico di irraggiamento ed influisce in modo significativo sulle temperature raggiunte nei singoli componenti; al riguardo le analisi termiche si sono rivelate utili per quanto riguarda la scelta dei materiali dei componenti, le dimensioni e la loro disposizione all'interno della camera;
- Si è potuto dimensionare e verificare un sistema di raffreddamento in grado di smaltire la potenza termica prodotta nella Faraday-cup ($P = 8\text{ kW}$);
- È stata eseguita un'analisi strutturale necessaria per verificare il sistema in termini di tensioni e dilatazioni termiche, al fine di garantire l'integrità fisica dei componenti nelle condizioni operative.

Altre modifiche di dettaglio inerenti alla Faraday-cup verranno opportunamente menzionate e descritte nel capitolo 6, assieme al sistema di movimentazione utilizzato per l'azionamento della stessa per l'inserimento nella linea d'asse del fascio e l'integrazione con gli altri componenti previsti nel Front-End protonico.

Nel capitolo successivo verrà descritto e progettato uno strumento di diagnostica non distruttivo nei confronti del fascio protonico, in grado di risalire alle caratteristiche del fascio stesso mediante delle letture di corrente. Tale dispositivo è definito come Beam-Profilier.

BIBLIOGRAFIA

- [¹] Nicolò Padovan, *Progettazione e test di un integratore di carica elettrica per fasci di ioni ad alta intensità per il progetto SPES*, Tesi di Laurea Specialistica a.a 2010-2011, Università degli Studi di Padova.
- [²] B. Wolf, *Handbook of ion sources*, CRC Press, 1995
- [³] P. Mazzoldi, M. Nigro, C. Voci, *Fisica (Volume II)*, EdiSES Napoli, 2001
- [⁴] L. Rossetto, *Appunti delle lezioni di Termodinamica Applicata*, Università degli Studi di Padova.

CAPITOLO 5

Progettazione preliminare del Beam-Profiler

5.1 Introduzione

In questo capitolo ci si propone di progettare un dispositivo in grado di intercettare il fascio protonico, misurandone l'intensità di corrente, noto dagli esperti con il nome di Beam Profiler.

Nel progetto SPES tale strumento di diagnostica è collocato lungo l'asse del fascio protonico ed è utilizzato per conoscere le caratteristiche del fascio in maniera preliminare prima che questo intercetti la Faraday-Cup, già definita nel capitolo precedente.

Innanzitutto si ritiene necessario approfondire la conoscenza di questo dispositivo fornendo le dovute informazioni sullo strumento, circa le caratteristiche di funzionamento e le architetture più comunemente adottate nelle applicazioni pratiche prima di proseguire con la progettazione dettagliata del progetto specifico. Inoltre le analisi termiche eseguite nel dispositivo in fase di sviluppo si rendono necessarie per poter progettare uno strumento funzionale, in base alle condizioni operative richieste, e non troppo distante dal design che assumerà nella sua forma finale.

5.2 Descrizione del dispositivo

In generale il beam profiler è un dispositivo di diagnostica utilizzato per risalire alle caratteristiche di un fascio sorgente, mediante l'intercettazione dello stesso ad opera di un'opportuna sonda [1].

A differenza della Faraday-cup tale strumento non si presta a fermare completamente il fascio, dunque non è distruttivo nei confronti di esso, ma si limita ad intercettarlo parzialmente in un certo intervallo di tempo, sufficiente per poter eseguire la scansione dello stesso e risalire alle caratteristiche in termini di forma e posizione.

La sonda del Beam-Profiler è presente in diverse soluzioni di forme e materiali usati; inoltre la scelta di una certa architettura dipende dalle caratteristiche del fascio intercettato e dalle applicazioni specifiche in cui deve operare.

Nel paragrafo successivo verranno analizzate le due configurazioni maggiormente conosciute nel settore per poter essere confrontate, ovvero la soluzione a griglia e quella a filo rotante.

5.2.1 Architettura delle sonde

Le soluzioni comunemente adottate per la sonde del Beam-Profilers sono nelle configurazioni a griglia o a filo rotante. In entrambi i casi viene captato un segnale di corrente elettrica proporzionale all'intensità del fascio intercettato. In particolare, per energie del fascio inferiori ai $2 \text{ MeV}/u$, le particelle sono fermate completamente e il segnale elettrico acquisito dalle sonde risulta proporzionale alle cariche degli ioni fermati; tuttavia nella maggior parte dei casi non è prevista la soppressione degli elettroni secondari, perciò l'effetto di questi può perturbare il segnale acquisito.

La Figura 5.1 mostra un esempio di sonda utilizzata nella configurazione a griglia [2]; essa è costituita da una matrice formata da due serie di fili realizzati in lega di tungsteno-renio $W-Re$, disposti ortogonalmente, aventi un diametro di 0.1 mm e distanziati tra loro di 1 mm ; inoltre nella Figura 5.2 è rappresentato il relativo sistema di movimentazione utilizzato che vede l'utilizzo di un motore pneumatico.



Figura 5.1: esempio di una sonda utilizzata nella configurazione a griglia [2]



Figura 5.2: particolare del sistema di movimentazione utilizzato [2]

La Figura 5.3 mostra invece una soluzione del Beam-Profilor che utilizza il filo rotante [3]; nella soluzione rappresentata lo scanner può ruotare ad una velocità di rotazione di 750 RPM, che corrisponde ad una velocità di scansione di 1.344 mm/ms, e si appresta ad intercettare trasversalmente un fascio avente un diametro di spot pari a 35 mm; il filo, realizzato in tantalio, ha un diametro di 1 mm e corrisponde indicativamente alla risoluzione che può essere raggiunta nella scansione.



Figura 5.3: esempio di un Beam-Profilor nell'architettura a filo rotante [3]

Entrambe le architetture presentano vantaggi e svantaggi in base alle applicazioni specifiche in cui si trovano ad operare:

- Nella configurazione a griglia, l'intensità del fascio viene campionata istante per istante dai diversi fili che la costituiscono mano a mano che questi intercettano il fascio. Pertanto durante la movimentazione della sonda i segnali acquisiti sono sensibili alle variazioni longitudinali e trasversali dell'intensità del fascio misurata nel tempo;
- La soluzione a griglia si rivela più sensibile nei riguardi della sincronizzazione diretta rispetto alla soluzione a filo, in particolar modo nelle applicazioni che vedono la scansione dei fasci pulsati;
- Nei profili a griglia l'integrazione del segnale, ottenuta come somma dei contributi che derivano dai singoli filamenti, migliora il rapporto segnale-rumore dell'intensità misurata del fascio;
- Nella soluzione a filo, le diverse configurazioni angolari assunte dal filo durante la rotazione, permettono di misurare una potenza del fascio superiore rispetto a quella misurata da una griglia statica;
- Il disturbo prodotto nel segnale acquisito causato dall'emissione degli elettroni secondari è minimizzato nella configurazione a filo;
- L'elettronica di acquisizione dati è più conveniente per la soluzione a filo. Infatti per la configurazione a griglia è richiesto un canale dedicato per ogni filamento presente (Figura 5.4); tuttavia in entrambi i casi, se non vi è alcuna necessità di digitalizzare i segnali per l'elaborazione nel computer, i profili possono essere monitorati utilizzando un normale oscilloscopio.

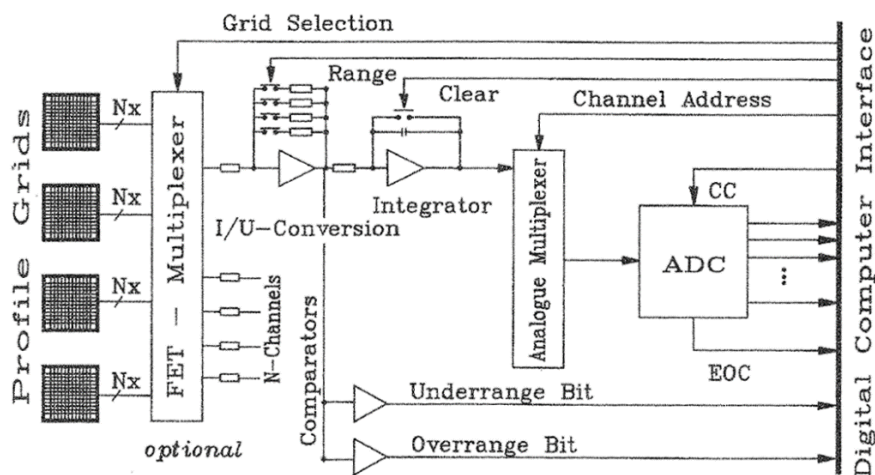


Figura 5.4: diagramma a blocchi del sistema di acquisizione dati per un sistema a griglia [1]

- Il processo di elaborazione del segnale risulta più complesso nella soluzione a filo in quanto la posizione della sonda dev'essere sincronizzata istante per istante;
- Nel profilo a griglia, la massima corrente acquisita è limitata dalla potenza del fascio che si vuole intercettare, onde evitare di compromettere i filamenti, mentre la minima corrente richiesta dev'essere stimata in riferimento alla geometria del sistema, tenendo conto del diametro del fascio e del disturbo prodotto dall'elettronica utilizzata per l'elaborazione del segnale.

Nei paragrafi seguenti verranno analizzate in dettaglio le architetture del Beam-Profilers nella soluzione a filo rotante; tale soluzione risulta più appetibile nel caso specifico, poiché unisce la necessità di avere una soluzione compatta, costruttivamente semplice e al tempo stesso funzionale, che riesce a rispondere alle esigenze richieste.

5.2.2 Soluzione a filo rotante

Il Beam-Profiler nella soluzione a filo rotante è tuttora utilizzato in diversi laboratori per osservare la posizione e la forma dei fasci di particelle provenienti da opportune sorgenti [4]. In questi scanner rotanti le sonde si muovono periodicamente eseguendo movimenti angolari, intercettando il fascio in maniera trasversale in diverse configurazioni angolari.

Quindi la corrente prodotta dagli elettroni secondari generati è amplificata e visualizzata grazie ad un oscilloscopio; quest'ultimo è in grado di generare un profilo dimensionale della distribuzione della densità di corrente del fascio a seconda delle posizioni angolari occupate dal filo nel tempo.

Comunemente sono richiesti 2 fili per la scansione del profilo in 2 dimensioni; tuttavia si può dimostrare che un solo filo, opportunamente sagomato, è comunque in grado di fornire una scansione bi-dimensionale del profilo (Figura 5.5). Tale aspetto semplifica la progettazione del sistema che si intende sviluppare, perché permette di realizzare un dispositivo costruttivamente semplice caratterizzato dall'aver un numero ridotto di componenti.

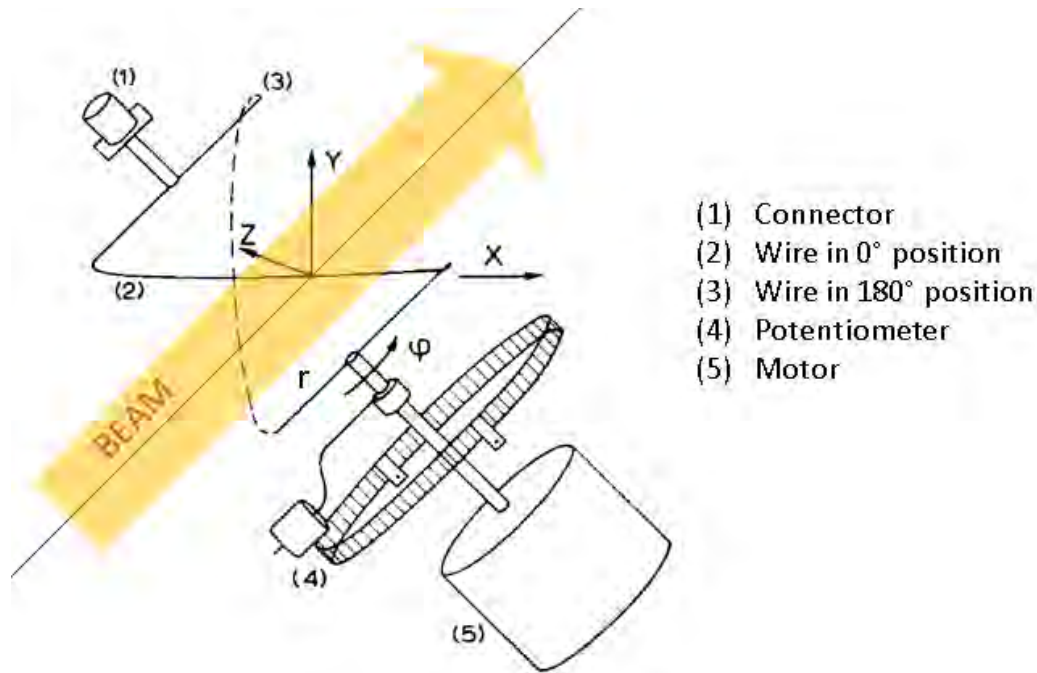


Figura 5.5: schema del Beam Profiler nella soluzione con un solo filo rotante [4]

Quindi per assolvere alla funzione richiesta, il filo dev'essere sagomato secondo una tipica forma elicoidale. In riferimento alla Figura 5.5, l'intercettazione del fascio con il piano zy è rappresentata da un'ellisse avente l'asse z ortogonale all'asse del fascio, a sua volta inclinato di 45° rispetto all'asse x

Quando il filo copre un angolo di 180° rispetto ad una posizione di riferimento, l'ellisse è situata ancora nello stesso piano zy iniziale e durante la rotazione il filo esegue la scansione completa del fascio intercettandolo in diverse configurazioni angolari intermedie. Se r è il raggio dell'elicoidale che rappresenta il filo, è possibile descrivere la dipendenza dello spostamento locale prodotto dal filo nelle coordinate x e y in funzione dell'angolo azimutale φ , mediante le seguenti formule (5.1):

$$\begin{aligned}
 x &= r\sqrt{2} \cdot \cos\left(\frac{1}{2}\varphi\right) \cdot \text{signum}\left(-\text{sen}\frac{1}{2}\varphi\right) \\
 y &= r\sqrt{2} \cdot \sin\left(\frac{1}{2}\varphi\right) \cdot \text{signum}\left(\cos\frac{1}{2}\varphi\right)
 \end{aligned}
 \tag{5.1}$$

Inoltre un potenziometro resistivo, solidale all'asse del sistema rotante, si rende necessario per poter conoscere la posizione effettiva del filo istante per istante, mentre l'oscillogramma si appresta a visualizzare la distribuzione della densità di corrente caratteristica del fascio. Il dispositivo appena descritto è stato adottato e sviluppato con successo nel laboratorio di Heidelberg; in questo esemplare il filo ruota ad una velocità di rotazione pari a 15 RPM , mentre la corrente misurata viene amplificata con un picoamperometro, quindi inviata ad un oscilloscopio.

In seguito sono rappresentate altre soluzioni adottate per il Beam Profiler nella versione a filo rotante che si sono evolute nel tempo e che sono state sviluppate in diversi laboratori (Figura 5.6 e Figura 5.7).

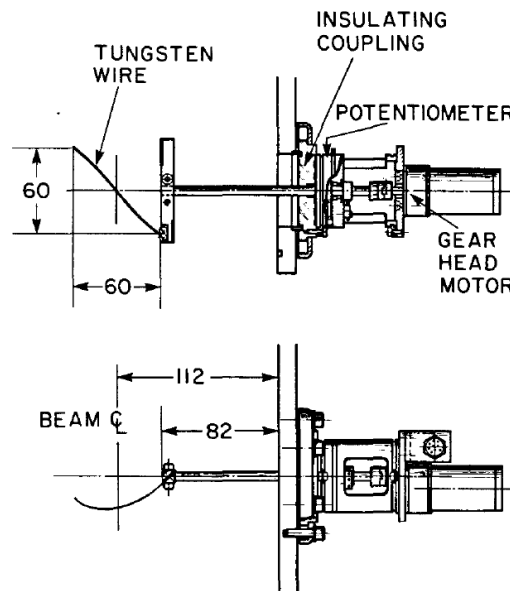


Figura 5.6: soluzione del Beam Profiler sviluppata nel progetto TRIUMF [5]

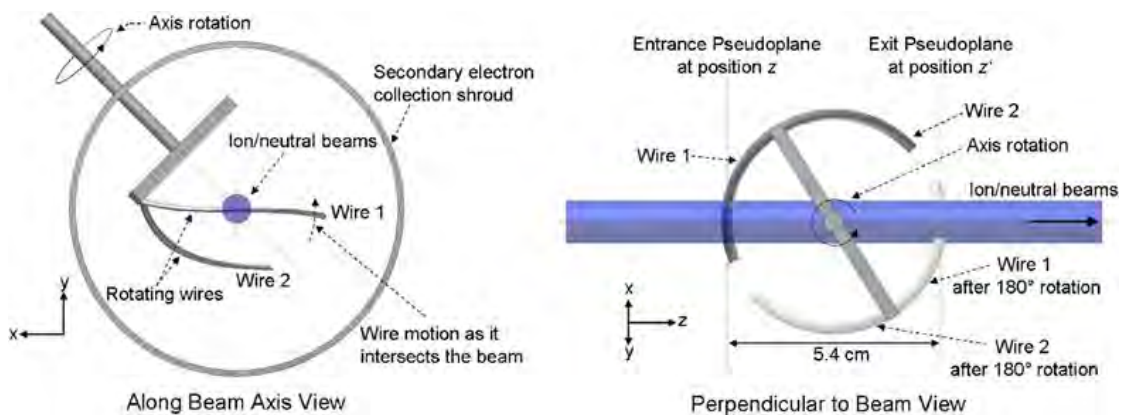


Figura 5.7: particolare del doppio filo rotante sviluppato per ottimizzare la scansione del fascio, ideato dalla National Electrostatics Corporation [6]

Nel prossimo paragrafo verrà descritto lo sviluppo di un modello semplificato del Beam Profiler nella soluzione a filo rotante in grado di assolvere alle specifiche di progetto richieste, in vista di un'analisi termica preliminare atta a valutare le massime temperature raggiunte dai componenti. Seguirà la progettazione dettagliata del modello fino ad ottenere una soluzione che si avvicina alla configurazione che assumerà il dispositivo nella sua forma finale.

5.3 Sviluppo di un modello preliminare

Lo sviluppo di un modello preliminare del dispositivo si rende necessario per poter verificare il funzionamento dello stesso, nonché valutare le temperature massime raggiunte nei componenti, in vista della loro realizzazione. Quindi sulla base dei dati di progetto forniti è stato possibile dimensionare un modello che si appresta ad operare nelle condizioni operative richieste.

Inanzitutto si ricordano le caratteristiche del fascio protonico che si vuole misurare:

Energy	40 MeV/u
Power	8 kW
Spot size	32mm

Il dispositivo si appresta a rilevare le caratteristiche del fascio all'uscita del collimatore; in particolare il Beam-Profiler controlla che le caratteristiche in termini di posizione, forma e potenza specifica, siano conformi con quelle prefissate prima di attivare la Faraday-Cup.

Quindi si è pensato di collocare tale strumento nella stessa camera in cui opera la Faraday-Cup, a valle del collimatore, al fine di limitare l'estensione assiale del canale protonico e semplificare il sistema; in questo modo entrambi gli strumenti di diagnostica condividono la stessa camera raffreddata, opportunamente ridefinita e descritta nel prossimo capitolo.

Il dimensionamento del Beam-Profiler focalizza l'attenzione principalmente sullo studio del filo rotante, quale elemento critico del dispositivo. In particolare la definizione dello stesso coinvolge i seguenti aspetti:

- Scelta del materiale: il filo entra in contatto con il fascio; quindi in base alle caratteristiche del fascio intercettato, il materiale deve poter resistere alle alte temperature, oltre che avere buone proprietà meccaniche, poichè il surriscaldamento prodotto può determinare la sublimazione dello stesso, compromettendo in maniera irreversibile il funzionamento dell'intero sistema;
- Definizione della geometria: la tipica forma elicoidale assunta dal filo si rende necessaria per poter disporre di una moltitudine di configurazioni angolari intercettate dal fascio: tale geometria infatti fa sì che la sezione del filo investita dallo spot varia al variare dell'angolo di rotazione dello stesso; in questo modo è possibile acquisire un numero elevato di segnali durante il processo di scansione. Inoltre la scelta del diametro del filo ha un ruolo fondamentale: infatti da una parte l'esigenza di fermare localmente il fascio porta ad avere degli spessori consistenti che oltremodo aumentano la rigidità del filo; d'altra parte però all'aumentare del diametro aumenta pure la sezione trasversale investita dal fascio, dunque aumenta l'esposizione assieme al livello termico raggiunto dallo stesso; per queste ragioni la scelta ottimale del diametro del filo è un risultato di compromesso che va cercato sulla base delle specifiche condizioni operative.

Dunque per quanto riguarda il materiale si è scelto di realizzare il filo rotante in tungsteno, già riscontrato in applicazioni analoghe. Tale materiale ha un valore di modulo elastico molto alto, una buona resistenza al creep e le massime temperature di applicazione dell'elemento puro vanno dai $1900\text{ }^{\circ}\text{C}$ ai $2500\text{ }^{\circ}\text{C}$. Inoltre le lavorazioni a freddo conferiscono al tungsteno buona resistenza meccanica fortemente direzionata lungo la direzione di lavorazione, mentre la tenacità a temperatura ambiente non è elevata. Se il tungsteno viene trattato termicamente intorno ai $1370\text{ }^{\circ}\text{C}$, si induce una ricristallizzazione che ha come effetto quello di infragilire il materiale; è dunque necessario utilizzare elementi in lega per innalzare la temperatura di ricristallizzazione del tungsteno e rendere così migliori le proprietà alle alte temperature. Alcune delle leghe di tungsteno maggiormente commercializzate vedono come elementi leganti l'ossido di torio, il molibdeno, il renio o il tantalio.

Lo spessore del filo rotante è stato scelto pari a 2 mm , sufficiente a fermare localmente il fascio. Il diametro del profilo elicoidale risulta pari a 35 mm , maggiore del diametro dello spot intercettato per poter prevedere, nelle posizioni di fine corsa, dei punti di lavoro in cui il filo non risulta investito dal fascio (Figura 5.8: geometria del filo rotante sviluppato).

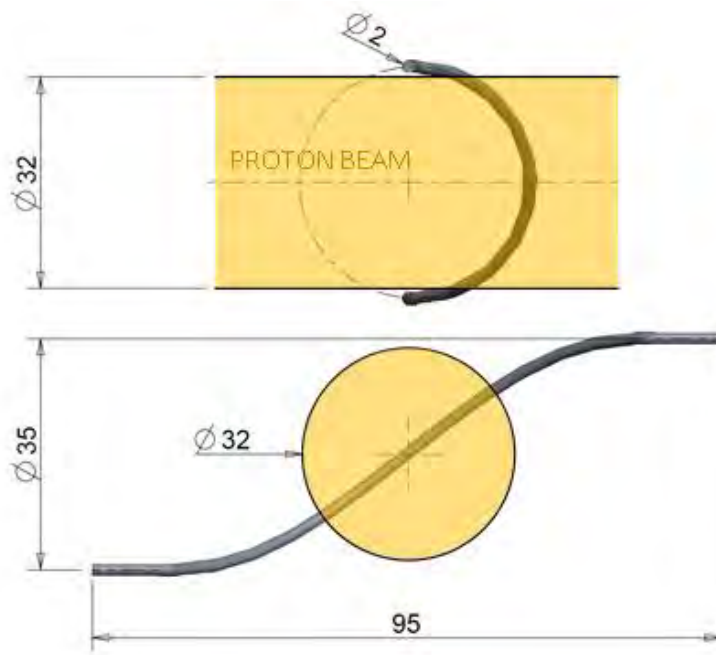


Figura 5.8: geometria del filo rotante sviluppato

A questo punto è stato possibile definire un modello preliminare dell'intero dispositivo (Figura 5.9); al riguardo sono stati sviluppati i componenti dedicati alla movimentazione e al sostegno del filo rotante appena definito.

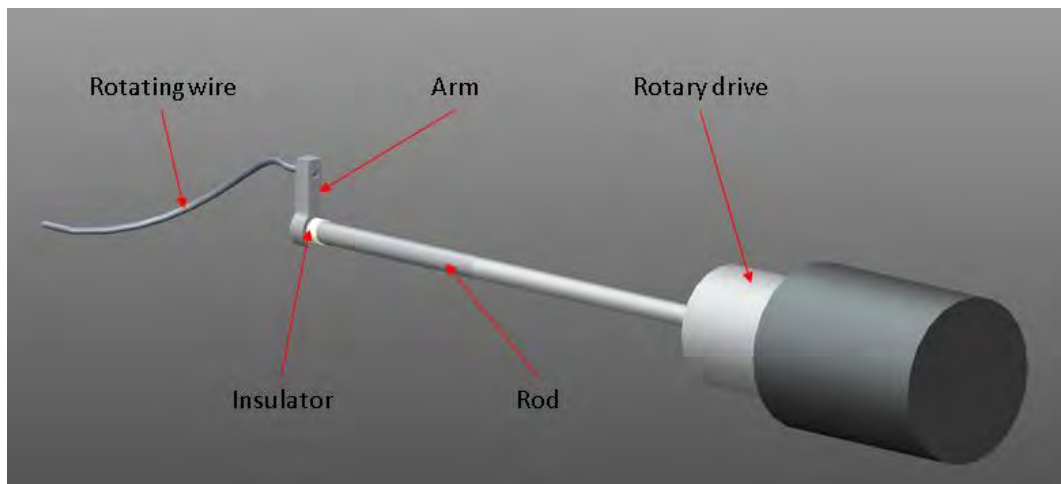


Figura 5.9: schematizzazione del modello preliminare

In particolare il filo rotante è collegato ad un braccio di sostegno opportunamente sagomato e realizzato in tantalio. A sua volta tale sostegno risulta solidale ad un albero rotante, anch'esso in tantalio dovendo resistere alle alte temperature.

Infine un passante rotante da vuoto, solidale alla camera, si rende necessario per poter garantire il moto rotatorio del sistema e nel contempo assicurare la tenuta all'interno della camera stessa; in particolare è stata considerata una soluzione presente nel mercato che risponde alle esigenze specifiche (Figura 5.10), le cui specifiche sono riportate nel datasheet presente in allegato.



Figura 5.10: passante rotante, modello RD-91, VG SCIENTA

Inoltre in maniera preliminare sono stati utilizzati degli isolatori in allumina, analoghi a quelli utilizzati per il collimatore, per isolare elettricamente il filo rotante rispetto alla camera per limitare il passaggio di corrente al dispositivo di acquisizione.

Nel prossimo paragrafo verrà descritta l'analisi termica eseguita al modello appena descritto, eseguita al fine di valutare i livelli termici raggiunti dai singoli componenti, in base alle condizioni operative di funzionamento richieste.

5.4 Analisi termica

L'analisi termica del dispositivo si prefigge l'obiettivo di valutare le massime temperature raggiunte dai componenti che lo costituiscono, per poter simulare le condizioni di funzionamento ed individuare le zone maggiormente sollecitate in termini di gradienti termici.

Quindi sulla base di un modello semplificato è stato realizzato un programma APDL che riassume i comandi per l'esecuzione dell'analisi mediante il codice di calcolo ANSYS. Quindi, dopo aver importato i files.IGS del modello 3D, sono state importate le caratteristiche dei materiali e definite le emissività delle parti interessate da scambio termico per irraggiamento. Per la consultazione dei comandi implementati si rimanda alla lettura del listato presente in appendice.

Nell'analisi termica si è scelto di discretizzare il modello con l'elemento volumetrico *SOLID 90*; tale elemento è costituito da 20 nodi, ognuno con un grado di libertà, la temperatura (Figura 5.11).

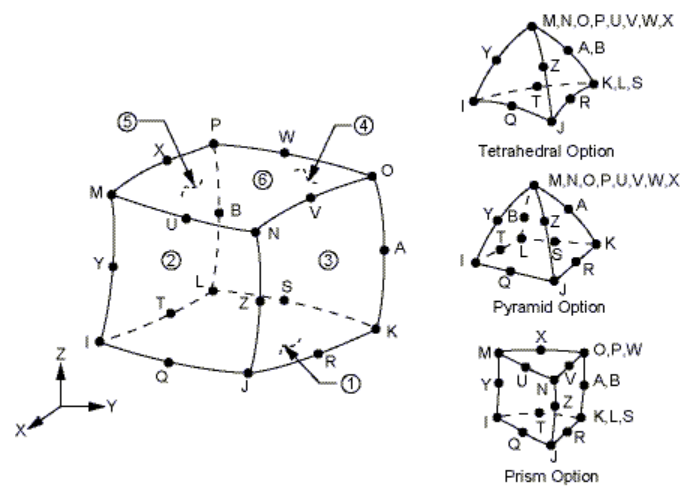


Figura 5.11: geometria dell'elemento *SOLID 90*

Il modello è stato discretizzato con una mesh ad elementi tetragonali, aventi come dimensione caratteristica pari a 1 mm per il filo rotante, e 3 mm per i restanti componenti (Figura 5.12).

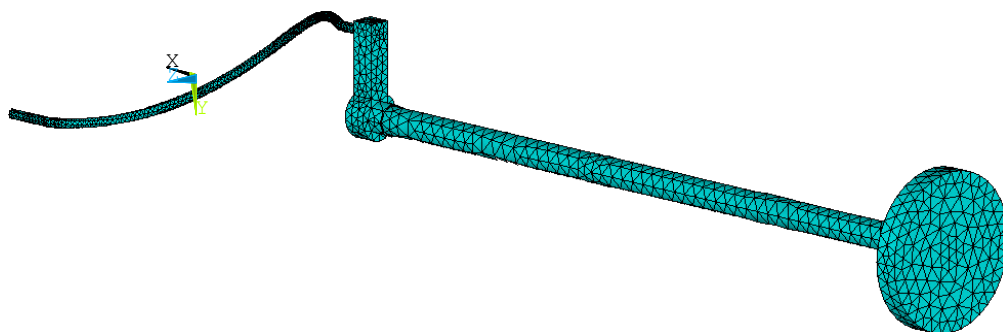


Figura 5.12: rappresentazione della mesh generata

Per quanto riguarda la definizione dei carichi termici, in riferimento al passante rotante, è stata assegnata la temperatura di $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ alla superficie che si trova a contatto con la flangia di collegamento, per poter riassumere il sistema di raffreddamento presente nella camera.

Per quanto riguarda la potenza termica per unità di volume assegnata al filo, in riferimento alla Figura 5.13: particolare della porzione del filo intercettata dal fascio protonico, è stata considerata la porzione intercettata dal fascio protonico. In tale regione è stata ipotizzata una potenza termica proporzionale all'area trasversale investita dal fascio stesso, in favore di sicurezza rispetto alla realtà; in particolare la sezione trasversale del filo intercettata dallo spot rappresenta l'8% della sezione totale, dunque la potenza assegnata alla porzione considerata è pari all'8% della potenza complessiva caratteristica del fascio, ovvero 640 W .

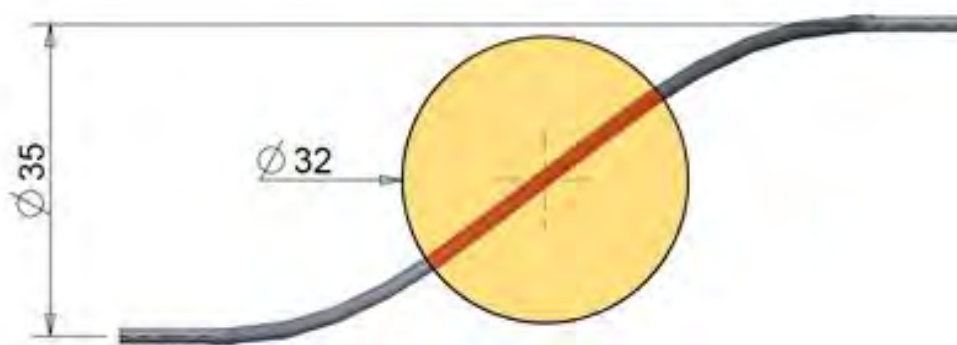


Figura 5.13: particolare della porzione del filo intercettata dal fascio protonico

Nella Figura 5.14 è rappresentato l'andamento termico che risulta dall'analisi svolta, mentre la Tabella 5.1 sottostante riassume le temperature massime registrate nei singoli componenti.

Componente	Materiale	T_{\max} [$^{\circ}\text{C}$]	T_{\lim} [$^{\circ}\text{C}$]
Filo rotante	Tungsteno W	3329.72	2500
Braccio di sostegno	Tantalio Ta	734.40	1700
Isolatore	Allumina Al_2O_3	655.42	1700
Albero	Tantalio Ta	529.83	1700
Passante rotante	Acciaio $316L$	392.29	400

Tabella 5.1: temperature massime registrate nei singoli componenti

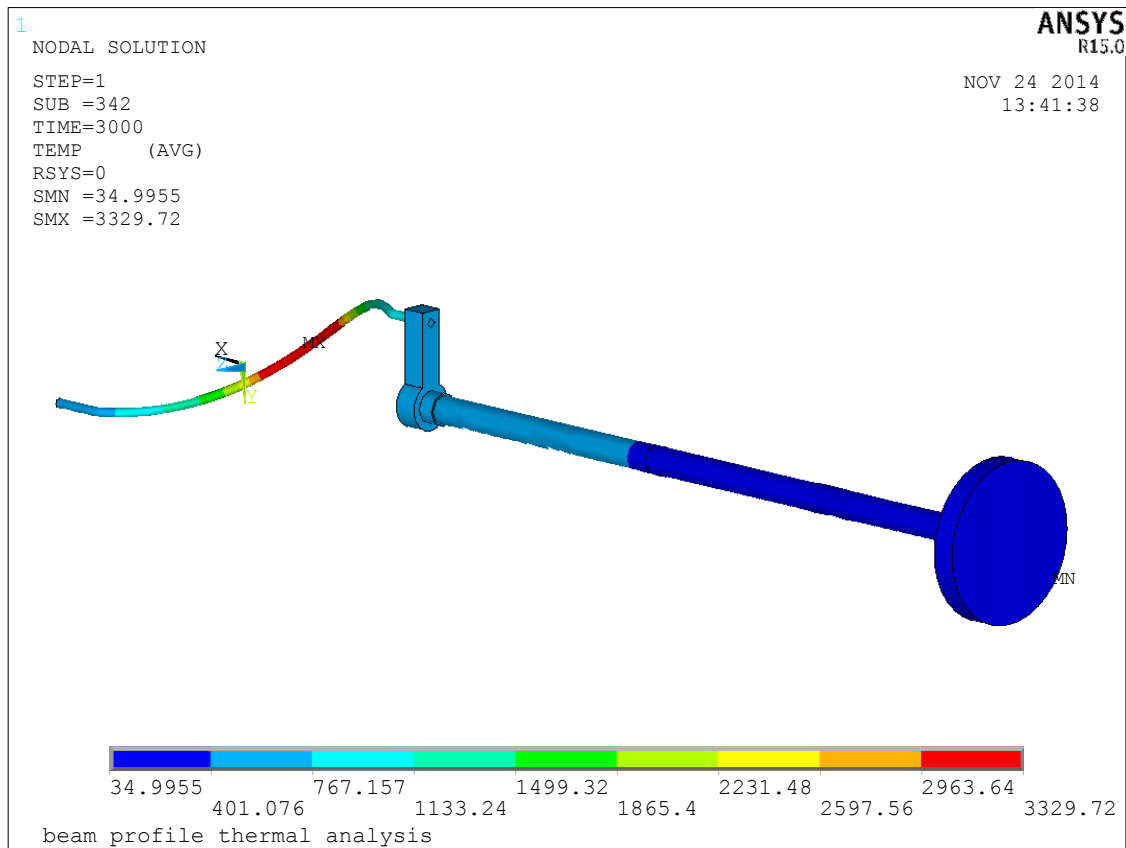


Figura 5.14: andamento delle temperature [°C] che risulta dall'analisi termica

Dalle temperature riscontrate si evince come i componenti di supporto siano termicamente verificati, poiché le temperature massime non superano le rispettive temperature limite.

Per quanto riguarda il filo rotante invece, si nota una temperatura molto elevata in corrispondenza della porzione intercettata dal fascio protonico. Tuttavia tale analisi non tiene conto del movimento rotatorio prodotto dal filo.

Infatti la potenza termica assegnata nella porzione considerata, agisce in un tempo di 3000 secondi, volendo raggiungere una condizione di regime e non conoscendo a priori l'inerzia termica del sistema. Nella realtà invece, il filo compie movimenti angolari ed intercetta trasversalmente il fascio in un tempo molto ridotto, che dipende della velocità di rotazione dello stesso. Tale velocità rappresenta un parametro fondamentale nella progettazione del dispositivo e verrà opportunamente discussa nel prossimo paragrafo.

5.5 Valutazione della velocità di rotazione del filo

La velocità di rotazione del filo rotante risulta essere un parametro di fondamentale importanza poiché influisce in maniera significativa sul funzionamento dell'intero sistema.

La valutazione di un valore ottimale, variabile a seconda delle specifiche condizioni operative, deve tener conto dei seguenti aspetti:

- Surriscaldamento: durante il funzionamento il filo rotante intercetta il fascio protonico surriscaldandosi; la velocità di rotazione minima prevista dev'essere tale da non compromettere l'integrità fisica del componente che può surriscaldarsi in maniera eccessiva, favorendo un fenomeno di infragilimento del materiale alle alte temperature, o addirittura sublimare. Dunque la velocità di rotazione dev'essere sufficientemente elevata per limitare il tempo di permanenza dello stesso nella zona intercettata dal fascio.
- Acquisizione dei segnali: per non compromettere il processo di acquisizione dei valori misurati, si rende necessaria una velocità di rotazione non troppo elevata, in virtù della massima frequenza di campionamento disponibile. In questo senso la velocità massima è limitata dalla frequenza di campionamento del sistema di acquisizione.
- Fenomeni vibratorii: il movimento rotatorio del filo determina la nascita di fenomeni vibratorii inevitabili. In particolare dal momento che l'intero sistema è assimilabile ad una trave inflessa vincolata ad un'estremità, il moto rotatorio unito all'effetto del peso dei componenti, determina la nascita di vibrazioni torsionali e flessionali durante l'esercizio. In questo senso la velocità di rotazione deve poter minimizzare tali fenomeni che rappresentano dei potenziali disturbi nel processo di acquisizione dei segnali. Inoltre occorre limitare le discontinuità che si innescano nei transitori, in prossimità dei punti morti di lavoro (0° e 180°), scegliendo un opportuno profilo di velocità; questo controllo di posizione è reso possibile adottando per esempio un'azione di controllo *proporzionale-integrale-derivativa* (*PID*) dopo che sia stata eseguita un'attenta taratura dei guadagni.

Dunque la valutazione della velocità di rotazione coinvolge diversi aspetti e la scelta del valore ottimale è un risultato di compromesso, che varia a seconda delle specifiche funzioni richieste.

Analizzando la rotazione del filo nel caso specifico (Figura 5.15), il movimento dello stesso inizia da una posizione di riposo in cui non è intercettato dal fascio (0°), quindi prosegue nel movimento per eseguire la scansione fino a raggiungere la posizione finale di riposo a metà dell'angolo giro (180°); nella scansione successiva il filo prosegue nel movimento rotatorio fino a completare un giro completo (360°), oppure può invertire il senso per tornare nella posizione di partenza (0°).

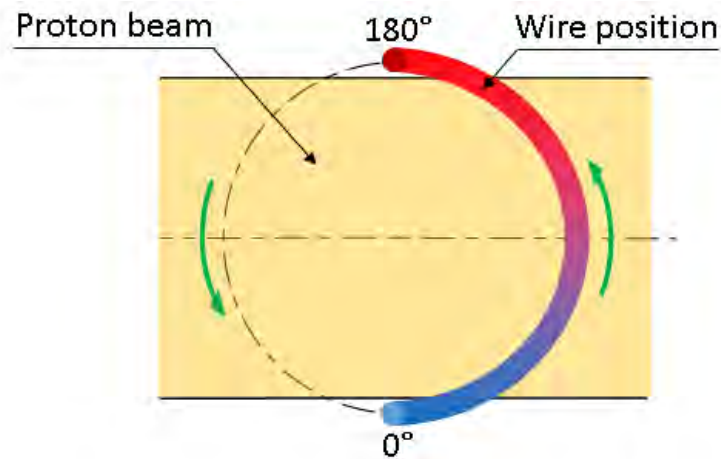


Figura 5.15: schema del percorso seguito dal filo durante il processo di scansione

Per la determinazione della velocità minima di funzionamento si è reso necessario valutare il tempo massimo di surriscaldamento del filo durante il processo di scansione, in riferimento alla temperatura limite di utilizzo del tungsteno; al riguardo è stata condotta un'attenta analisi termica transitoria. Il modello discretizzato è rappresentato dal filo elicoidale e da un blocco cilindrico di grafite che riassume la presenza della Faraday-Cup, dato che entrambi condividono la stessa camera; tale blocco è posizionato in modo coassiale rispetto all'asse protonico e dista 50 mm dal filo rotante. Quindi sulla base del modello è stato realizzato un programma APDL che riassume i comandi per l'esecuzione dell'analisi mediante il codice di calcolo ANSYS; per la consultazione dei comandi implementati si rimanda alla lettura del listato presente in appendice.

Analogamente a quanto fatto precedentemente, si è discretizzato il modello con elementi *SOLID90* e le caratteristiche dei materiali sono rimaste immutate rispetto alle analisi svolte in precedenza. Il sistema è stato discretizzato con una mesh ad elementi tetragonali, aventi come dimensione caratteristica pari a 1 mm per il filo rotante, e 8 mm per il blocco di grafite (Figura 5.16).

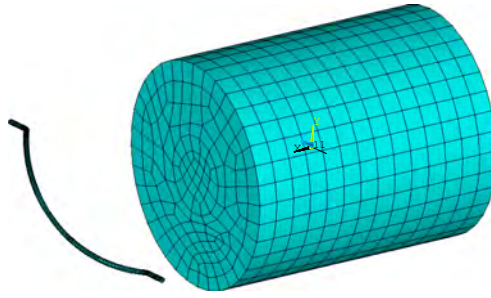


Figura 5.16: rappresentazione della mesh generata

A questo punto sono stati assegnati i carichi termici in prossimità delle porzioni intercettate dal fascio rispettivamente nel blocco in grafite e nel filo rotante.

In particolare, inizialmente è stata assegnata la potenza termica di 8 kW nella zona del blocco investita dal fascio per valutare il grado di surriscaldamento indotto nel filo in una condizione limite; dunque il livello termico ottenuto rappresenta la condizione al contorno iniziale assegnata nell'analisi transitoria. Successivamente è stata applicata la potenza termica di 640 W nella porzione di filo intercettata dal fascio e valutato il tempo massimo necessario per portare la sonda alla temperatura limite di utilizzo, che ricordo essere di 2000 °C . La Figura 5.17 sottostante rappresenta il surriscaldamento del filo prodotto dall'irraggiamento del blocco di grafite nella condizione iniziale dell'analisi transitoria.

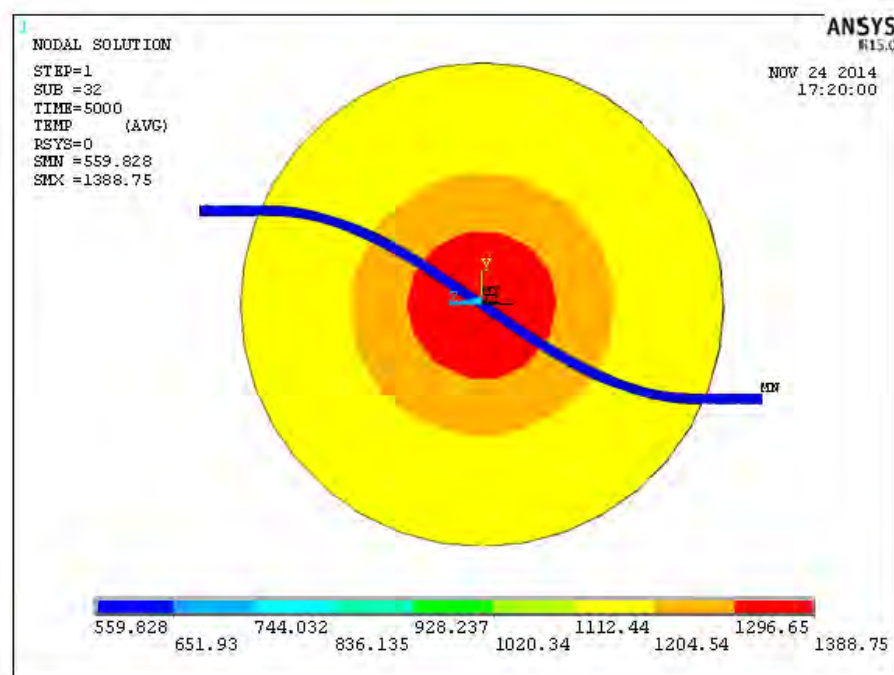


Figura 5.17: andamento di temperatura del sistema [$^{\circ}\text{C}$] nelle condizioni iniziali del transitorio

Quindi tale andamento è stato implementato nell'analisi transitoria per valutare il tempo limite di surriscaldamento. La Figura 5.18 seguente rappresenta l'andamento delle temperature raggiunte dal sistema nelle condizioni di regime, al tempo di 5000 secondi, mentre il grafico rappresentato nella Figura 5.19 mostra l'evoluzione della temperatura massima raggiunta dal filo nel tempo.

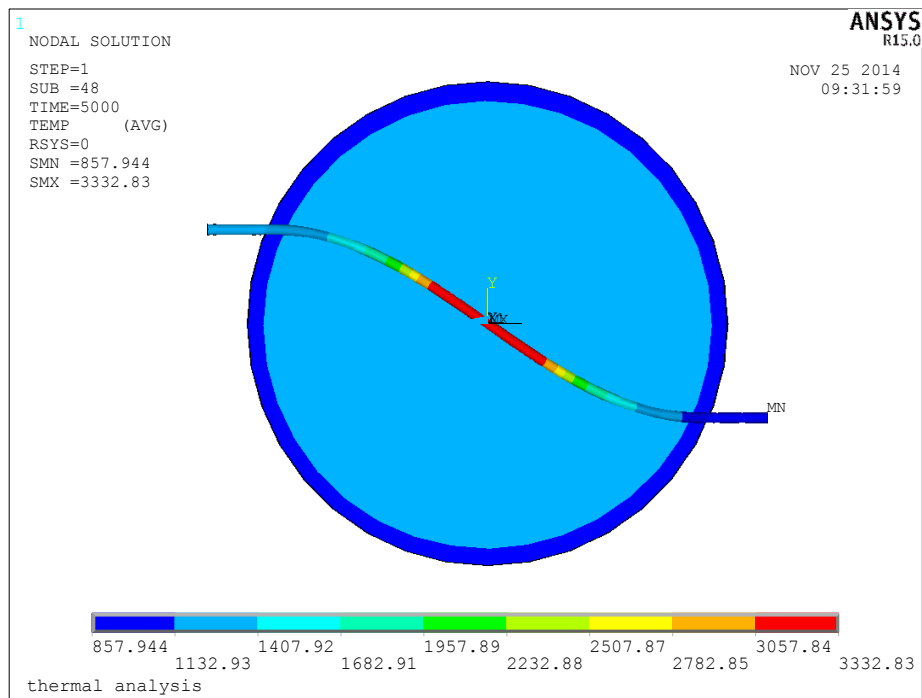


Figura 5.18: andamento di temperatura del sistema [°C] nelle condizioni di regime

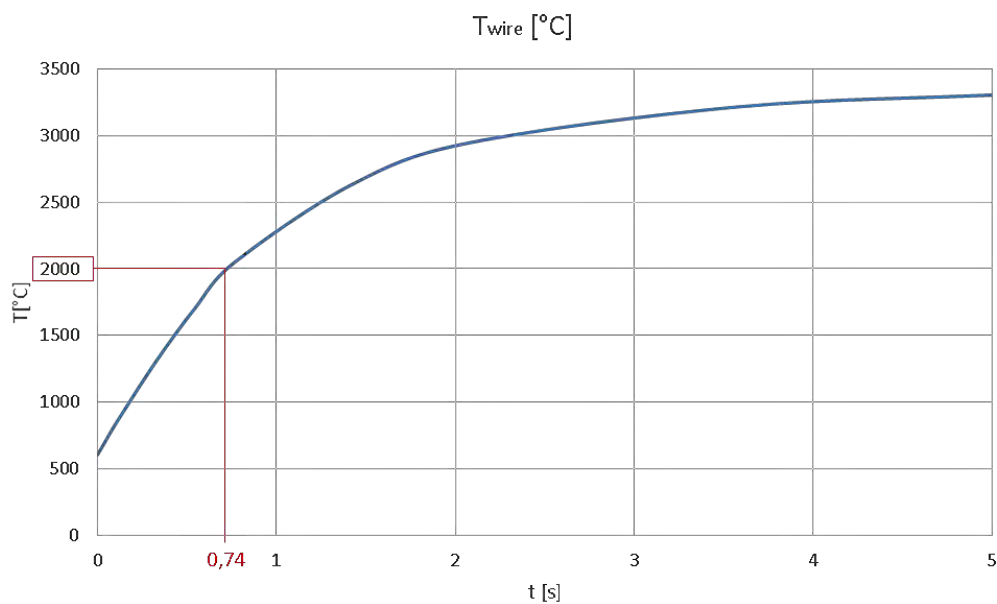


Figura 5.19: andamento della massima temperatura del filo nel tempo

Nella Figura 5.18 si nota come il livello termico massimo raggiunto nel filo si trovi in corrispondenza della porzione intercettata dal fascio; inoltre, rispetto all'analisi termica svolta precedentemente, il filo raggiunge una temperatura massima di $3332,83\text{ }^{\circ}\text{C}$ che, paragonata alla massima temperatura pervenuta precedentemente ($3329,72\text{ }^{\circ}\text{C}$), risulta di poco superiore a causa dell'irraggiamento indotto dalla Faraday-Cup, non presente nell'analisi precedente.

Dai risultati dell'analisi transitoria si nota come il periodo di permanenza del filo nella zona intercettata dal fascio non deve eccedere il tempo massimo di $0,74\text{ s}$ per non superare la temperatura limite di utilizzo, fissata a 2000°C ; inoltre si nota come il raggiungimento del regime termico avvenga in un tempo ridotto e questo giustifica la bassa inerzia termica del componente.

A questo punto è possibile calcolare la velocità di rotazione minima di azionamento che si rende necessaria per garantire un funzionamento del dispositivo in condizioni di sicurezza, sulla base del tempo di azionamento richiesto per eseguire il movimento. In particolare, per ragioni di sicurezza, nei calcoli che seguiranno verrà adottato un tempo di azionamento massimo $t_{max} = 0.7\text{ s}$, al quale corrisponde una temperatura di surriscaldamento del filo pari a $1939.14\text{ }^{\circ}\text{C}$. Per il calcolo della velocità minima di azionamento v_{min} si rende necessario analizzare la cinematica del movimento eseguito durante il processo di scansione (Figura 5.20).

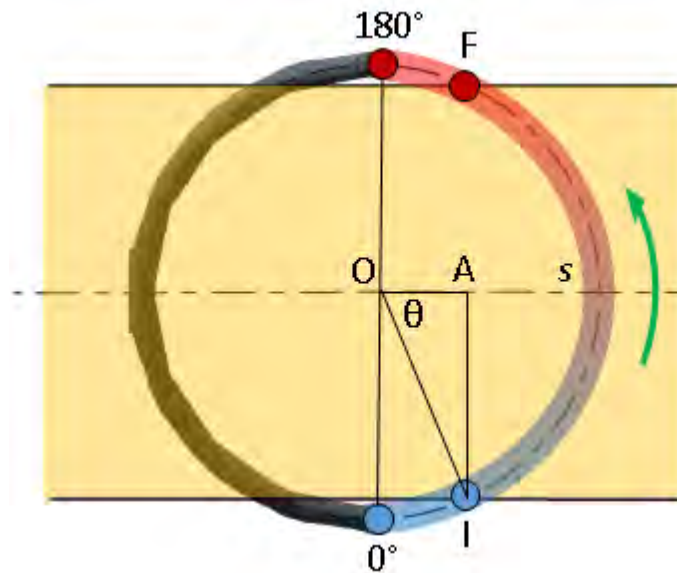


Figura 5.20: schema del movimento eseguito dal filo nel processo di scansione

In riferimento allo schema rappresentato è possibile individuare i punti di lavoro iniziale e finale del filo che caratterizzano il processo di scansione, indicati rispettivamente con le lettere I ed F .

Per determinare lo spazio s percorso dal filo durante tale processo occorre valutare l'angolo θ , sotteso ai segmenti \overline{OA} e \overline{OI} .

In particolare si hanno i seguenti valori per i segmenti indicati (5.2):

$$\begin{aligned}\overline{OI} &= \frac{35}{2} = 17.5 \text{ mm} \\ \overline{AI} &= \frac{32}{2} = 16 \text{ mm} \\ \overline{OA} &= \sqrt{17.5^2 - 16^2} \\ &= 7.1 \text{ mm}\end{aligned}\tag{5.2}$$

Pertanto il valore dell'angolo θ è calcolato come (5.3):

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\overline{AI}}{\overline{OA}} = \tan^{-1} \frac{16 \text{ mm}}{7.1 \text{ mm}} = 66.1^\circ = 1.15 \text{ rad}\tag{5.3}$$

E lo spazio percorso s dal filo nel processo di scansione risulta pari a (5.4):

$$s = \widehat{IF} = 2\theta \cdot \overline{OI} = 2.3 \text{ rad} \cdot 17.5 \text{ mm} = 40.38 \text{ mm}\tag{5.4}$$

Dunque la velocità di azionamento cercata è definita come lo spazio percorso nell'unità di tempo, ovvero secondo la (5.5):

$$v_{min} = \frac{s}{t_{max}} = \frac{40.38 \text{ mm}}{0.7 \text{ s}} = 57.69 \text{ mm/s}\tag{5.5}$$

Che corrisponde ad una velocità di rotazione pari a (5.6):

$$\begin{aligned}\omega_{min} &= \frac{2\theta}{t_{max}} = \frac{2 \cdot 1.15 \text{ rad}}{0.7 \text{ s}} = 3.29 \text{ rad/s} \\ n_{min} &= 31.42 \text{ RPM}\end{aligned}\tag{5.6}$$

Tale risultato rappresenta dunque un valore indicativo di soglia che limita il campo di funzionamento del servomeccanismo utilizzato per l'azionamento richiesto. Inoltre risulta essere un parametro significativo nella scelta del sistema di controllo del movimento e di acquisizione dati, in riferimento alla frequenza di campionamento dei segnali acquisiti nel processo di scansione.

Nel prossimo paragrafo verrà descritta la progettazione dettagliata seguita per lo sviluppo del Beam Profiler, completo di tutti i componenti che si rendono necessari per il processo di scansione.

5.6 Progettazione dettagliata

Una volta verificata la funzionalità della sonda elicoidale, sulla base di modelli semplificati, si rende necessario lo sviluppo di un sistema dettagliato provvisto di tutti i componenti necessari per lo svolgimento delle funzionalità richieste. In particolare nel presente paragrafo verranno descritte in maniera dettagliata le fasi di modellazione seguite per lo sviluppo del sistema di movimentazione e del sistema di acquisizione dei segnali.

5.6.1 Definizione preliminare del sistema di movimentazione

Lo sviluppo del sistema di movimentazione focalizza l'attenzione sulla definizione dei dispositivi utilizzati per eseguire l'azionamento richiesto. In particolare, ricordando che l'ambiente in cui opera il dispositivo è altamente radioattivo, si ritiene opportuno l'utilizzo di un motore pneumatico rotativo in presa diretta con la sonda.

In riferimento al movimento eseguito dal filo rotante durante il processo di scansione (Figura 5.15) sono disponibili diverse architetture di motore in base al massimo angolo di movimentazione richiesto. In particolare si nota come ad ogni scansione sia richiesto al motore di eseguire un movimento angolare di 180° per passare da una posizione di riposo alla successiva; inoltre nella scansione successiva la sonda può raggiungere la nuova posizione di riposo adottando lo stesso verso di avanzamento utilizzato precedentemente, completando un giro completo, oppure invertendolo per tornare nella posizione iniziale.

Nel caso specifico è stato scelto di sviluppare in maniera preliminare, vista la semplicità costruttiva, un attuatore pneumatico rotativo a palette, capace di garantire un movimento angolare di 270° ; una soluzione commerciale di riferimento è rappresentata in Figura 5.21.

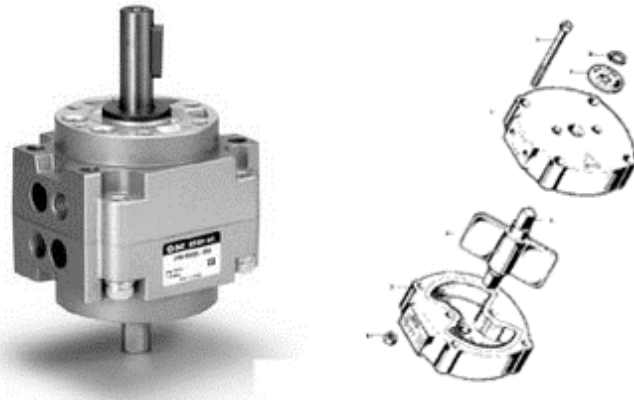


Figura 5.21: particolare di motore pneumatico rotativo commerciale [7] (sinistra) e vista esplosa di una possibile soluzione costruttiva (destra)

La Figura 5.22 mostra la soluzione preliminare del motore rotativo sviluppata per la movimentazione richiesta; essa è costituita da una camera, realizzata da un blocco di alluminio opportunamente sagomato, all'interno del quale viene insufflata dell'aria in pressione; la spinta esercitata dall'aria compressa in corrispondenza del setto mobile, mette in rotazione l'albero di acciaio fino a raggiungere la posizione di fine corsa.

Inoltre le testate terminali sono utilizzate per supportare l'albero nella corretta posizione e delle guarnizioni metalliche opportunamente sagomate si rendono necessarie per sopperire ai trafilementi di portata dell'aria verso l'esterno e garantire la tenuta della camera.

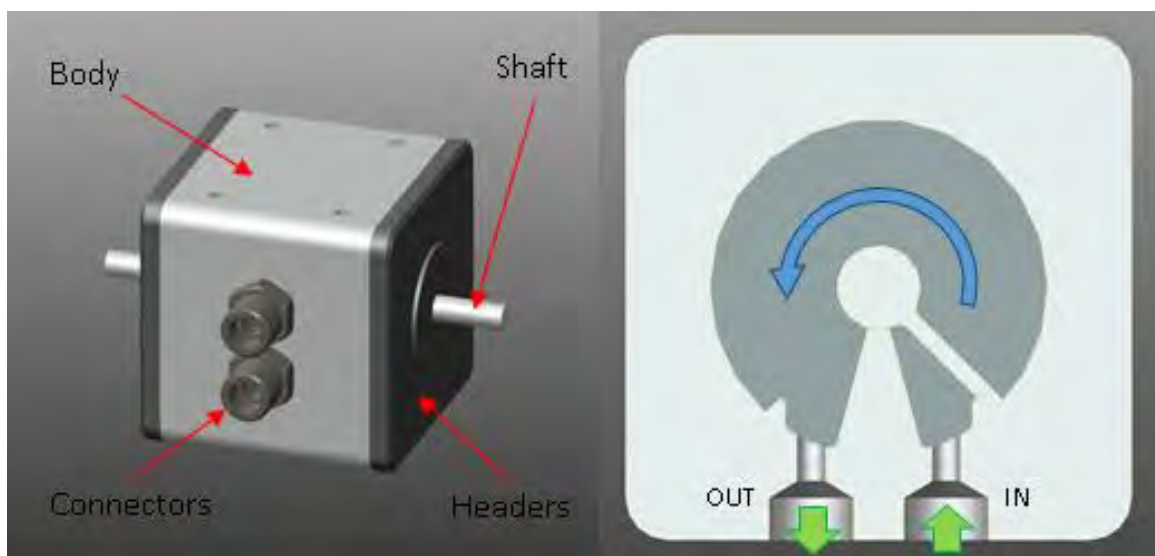


Figura 5.22: rappresentazione del motore rotativo sviluppato

Nella Figura 5.23 è rappresentato il sistema di movimentazione completo, provvisto di tutti i componenti di supporto necessari. L'albero del motore pneumatico presenta due terminali di collegamento, uno dedicato alla movimentazione del passante rotante, il quale risulta solidale al filo rotante, mentre l'altro risulta in presa diretta con un potenziometro resistivo; quest'ultimo, interamente realizzato in metallo, è utilizzato come trasduttore elettrico per risalire istante per istante alla posizione angolare del sistema; per la consultazione delle caratteristiche elettriche del componente scelto si rimanda alla lettura del datasheet presente in allegato.

Inoltre sono stati definiti gli elementi di supporto che sostengono i componenti del sistema, realizzati in lega di alluminio *Al 6082*, ed una flangia di collegamento si rende necessaria per l'accoppiamento del sistema con la camera principale mentre una guarnizione in indio opportunamente sagomata assicura la tenuta della camera stessa.

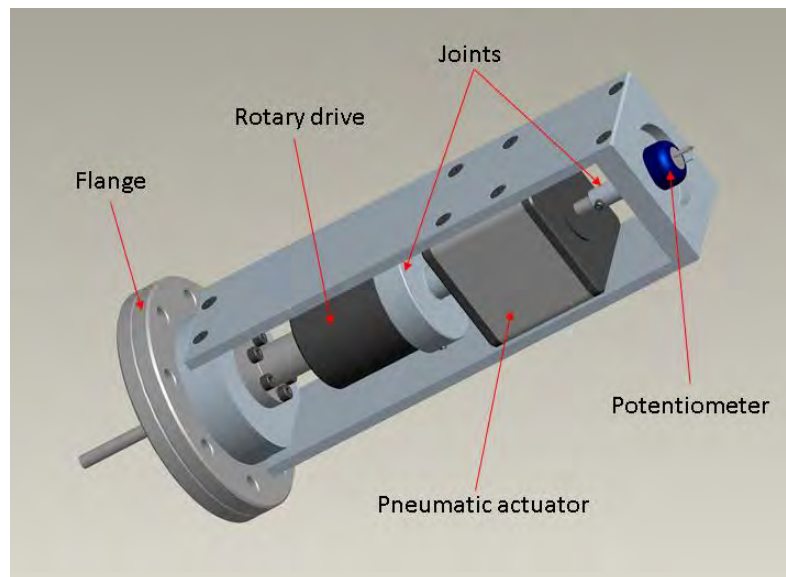


Figura 5.23: vista del sistema di movimentazione completo

5.6.2 Definizione del sistema di acquisizione dei segnali

Il processo di acquisizione dei segnali riguarda la raccolta dei valori di intensità di corrente misurati durante il processo di scansione del fascio protonico. La difficoltà di realizzare un sistema in grado di assolvere alla funzione richiesta sta nel far circolare la corrente rilevata, di bassa intensità, all'interno di un circuito elettrico opportunamente definito all'interno della camera.

La realizzazione di tale circuito richiede di dover isolare elettricamente la sonda dal resto del sistema, dato che tutti i componenti adottati sono buoni conduttori elettrici, oltre che prevedere un contatto elettrico strisciante per garantire, istante per istante, il contatto elettrico della sonda rotante con un terminale fisso.

Nella Figura 5.24 seguente è rappresentata la soluzione sviluppata per il sistema di acquisizione dei segnali. Il sistema è costituito da un braccio di sostegno, realizzato in acciaio *AISI 316*, elettricamente isolato rispetto alla flangia di collegamento mediante l'utilizzo di opportuni isolatori in allumina Al_2O_3 . Tale sostegno realizza il collegamento elettrico tra l'albero rotante e il terminale fisso situato nella flangia di collegamento; inoltre la geometria sviluppata conferisce una maggior rigidità flessionale all'intero sistema, contribuendo a ridurre i fenomeni vibratorii nascenti durante il funzionamento.

Il terminale elettrico è lo stesso utilizzato nello sviluppo del sistema collimatore e le caratteristiche di tale componente sono consultabili nel datasheet presente in appendice. Inoltre il contatto strisciante è garantito da una boccola di grafite opportunamente sagomata, posizionata nella parte terminale del sostegno in acciaio;

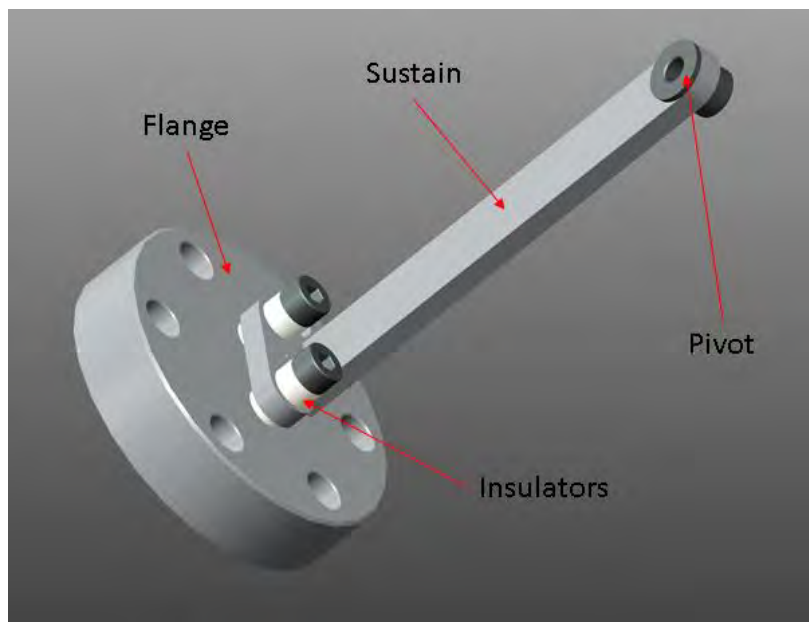


Figura 5.24: vista del sistema di acquisizione nella soluzione sviluppata

Per quanto riguarda l'isolamento elettrico della sonda elicoidale, si è ritenuto necessario l'utilizzo di opportune flange di collegamento, accoppiate mediante l'utilizzo di isolatori realizzati in allumina e posizionate in corrispondenza della zona terminale del passante rotante (Figura 5.25).

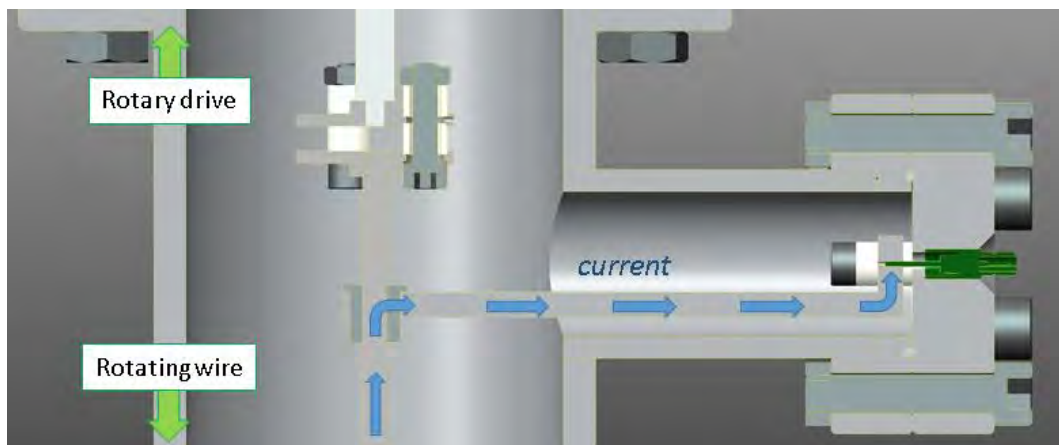


Figura 5.25: particolare del circuito elettrico realizzato

Nelle figure sottostanti (Figura 5.26 e Figura 5.27) sono rappresentate alcune viste del Beam-Profiler nella soluzione finale, completo di tutti gli elementi accoppiati correttamente.

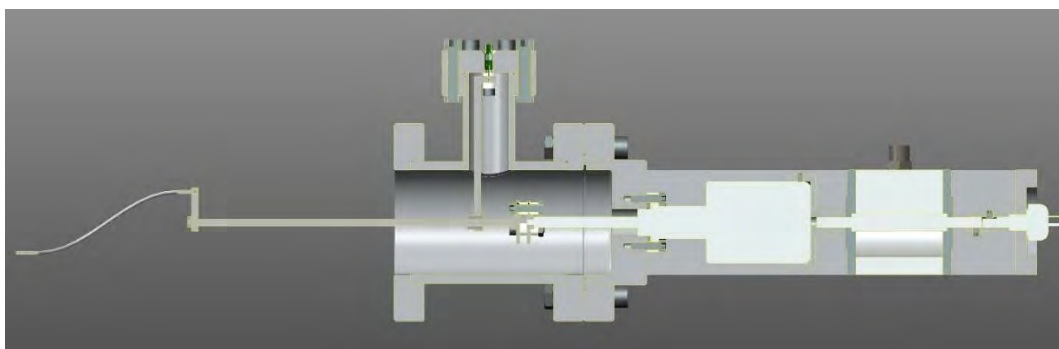


Figura 5.26: vista in sezione del Beam-Profiler nella soluzione finale

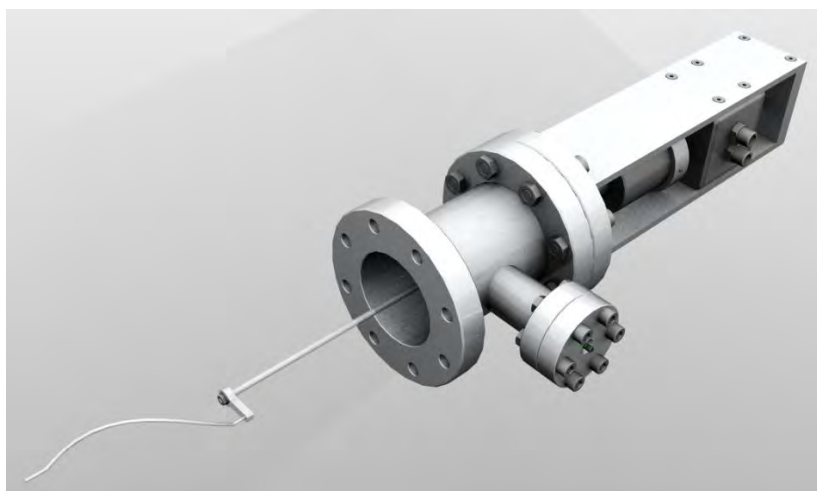


Figura 5.27: render dell'assieme completo sviluppato

I tubi di raccordo modellati sono realizzati in lega di alluminio *Al 6082*, come pure le flange di collegamento e gli elementi di sostegno. Ulteriori analisi termiche verranno avanzate nel prossimo capitolo, al fine di verificare la resistenza degli elementi di collegamento che si trovano accoppiati alla camera di diagnostica, nel quale agiscono contemporaneamente la Farady-Cup e il Beam-Profilers.

5.7 Conclusioni

In questo capitolo si è affrontata una progettazione completa del Beam-Profilers nella soluzione a filo rotante, partendo da un modello preliminare fino allo sviluppo di un sistema completo e dettagliato. La forma finale è stata definita sulla base dei risultati pervenuti dalle analisi termiche eseguite, che hanno offerto la possibilità di sviluppare un sistema non troppo distante dal design che assumerà nella sua forma finale. In particolare:

- L'analisi termica preliminare si è resa necessaria per verificare i livelli termici raggiunti dai componenti che costituiscono il sistema. Quindi è stato sviluppato un modello dettagliato in riferimento alle caratteristiche del fascio protonico considerato nel caso specifico.
- L'analisi termica transitoria si è resa necessaria per determinare il tempo massimo di surriscaldamento della sonda elicoidale, nonché definire la velocità minima di azionamento, in riferimento al movimento eseguito durante il processo di scansione.
- Sono stati definiti i sistemi di movimentazione e di acquisizione dei segnali assieme ai componenti di supporto e collegamento che si rendono necessari per garantire un corretto funzionamento del dispositivo, secondo le funzionalità richieste.

BIBLIOGRAFIA

[¹] B. Wolf, *Handbook of ion sources*, CRC Press, 1995

[²] <http://www.ntg.de/index.php?id=183&L=1>

[³] PET, Physik Elektronik Technik, Smetanaweg 6, D-64291 Darmstadt, Germany

[⁴] G.Hortig, *A beam scanner for two dimensional scanning with one rotating wire*, Nuclear Instruments and Methods 30, 355 (1964)

[⁵] P.Bloemhard, Z.Gelbart, *High current beam profile monitor*, TRIUMF Design note, 1986

[⁶] D.G.Seely, *Rotating dual-wire beam profile monitor optimized for use in merged-beams experiments*, Nuclear Instruments and Methods 69-75, 585 (2008)

[⁷] <http://www.directindustry.it/prod/smc-france/attuatori-pneumatici-rulli-paletta-16465-1225979.html>

CAPITOLO 6

Modellazione del Front-End protonico

6.1 Introduzione

In questo capitolo verranno descritte le fasi di modellazione seguite per lo sviluppo del Front-End protonico, in vista della sua realizzazione; esse prevedono l'accoppiamento dei dispositivi definiti nei capitoli precedenti, oltre che la definizione degli elementi di sostegno e di collegamento necessari. Come si potrà meglio apprendere in seguito, le geometrie degli strumenti definiti hanno subito alcune modifiche marginali per risolvere alcuni inconvenienti occorsi all'accoppiamento tra le parti, che saranno opportunamente giustificate e descritte nei prossimi paragrafi.

Inoltre opportune analisi termiche si rendono necessarie per verificare la resistenza degli elementi presenti nella camera di diagnostica, nel quale agiscono contemporaneamente la Farady-Cup e il Beam-Profilers.

6.2 Definizione del sistema di supporto

Il sistema dedicato al sostegno dei dispositivi, opportunamente descritti nei capitoli precedenti, riveste un'importanza fondamentale in quanto deve soddisfare le seguenti caratteristiche:

- Il sistema di supporto deve assicurare una certa flessibilità di movimento nelle fasi preliminari di allineamento dei dispositivi, per favorire il centraggio degli stessi rispetto all'asse del canale protonico;
- Durante il funzionamento del sistema, i supporti devono assicurare un posizionamento rigido dell'intero apparato, nonché garantire un ancoraggio saldo di tutti i componenti che lo costituiscono;
- L'ingombro massimo del sistema assemblato deve rispettare la massima estensione assiale disponibile, che risulta pari a *2099.50 mm*.

Dunque sulla base degli ingombri prodotti dai singoli elementi, è stato definito un sistema di supporto compatto, capace di rispondere alle specifiche condizioni richieste (Figura 6.1).

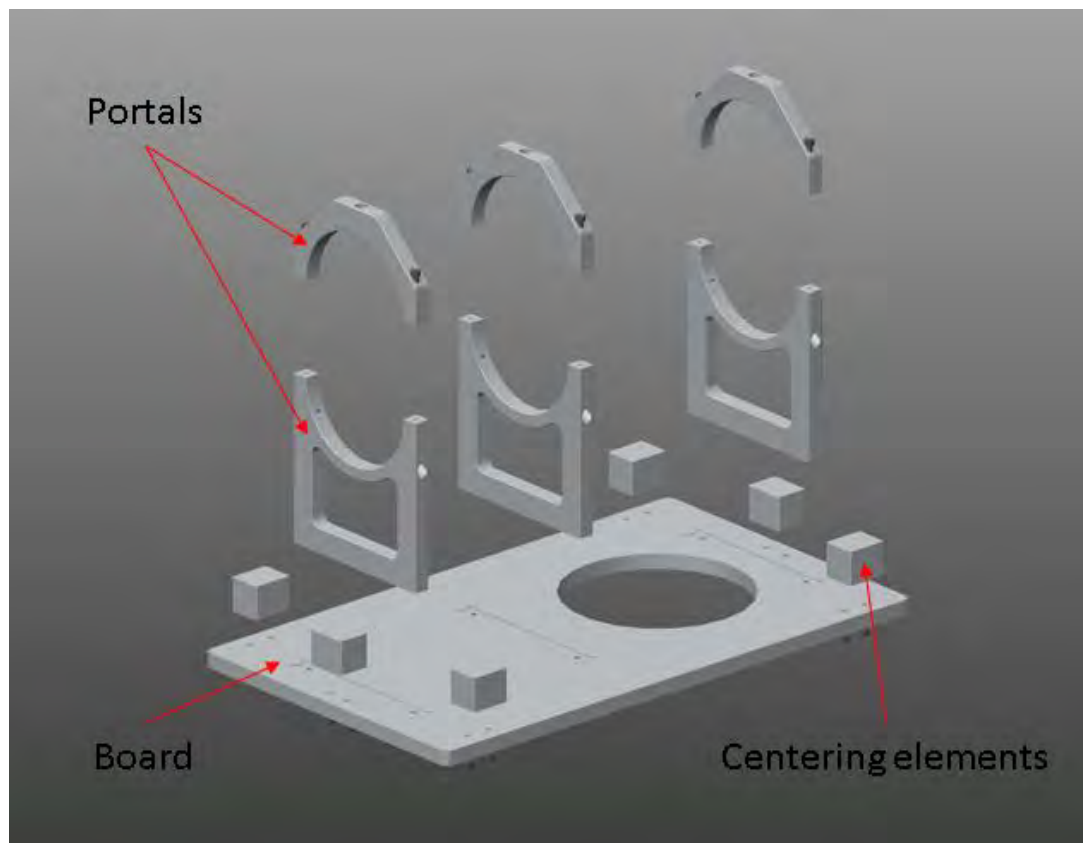


Figura 6.1: vista esplosa del sistema di supporto sviluppato

La soluzione sviluppata è costituita da una tavola flottante, realizzata in lega di alluminio *Al 6082*, nel quale sono realizzate delle tasche di riferimento e dei fori filettati per favorire rispettivamente il posizionamento e l'accoppiamento degli elementi di supporto e di allineamento del sistema.

In particolare tre portali si rendono necessari per realizzare il sostegno dei dispositivi e ciascuno di essi si compone di due parti: una parte fissa è vincolata alla tavola, mentre una parte mobile risulta estraibile per permettere l'installazione dei dispositivi nelle fasi di montaggio e manutenzione.

Gli elementi di centraggio invece, anch'essi solidali alla tavola, sono costituiti da dei blocchi di riferimento realizzati in alluminio, e risultano fondamentali per le operazioni preliminari di allineamento del sistema rispetto all'asse del canale protonico.

Inoltre nella tavola è stato realizzato uno scavo circolare passante per permettere l'accoppiamento della camera di diagnostica con il gruppo di pompaggio, collocato nella parte sottostante della tavola.

Nella Figura 6.2 seguente è rappresentato il sistema di supporto appena descritto vincolato alla struttura portante già esistente, realizzata da profilati in alluminio commerciali opportunamente accoppiati. Gli elementi di allineamento sono realizzati da opportune staffe, collegate rigidamente al telaio, e la regolazione di opportune viti in battuta con gli elementi di centraggio della tavola, rende possibile il movimento del sistema nelle operazioni di centratura.



Figura 6.2: rappresentazione del sistema di supporto accoppiato alla struttura portante

Dunque è stato possibile definire un sistema di supporto in grado di assolvere alle specifiche funzioni richieste, capace di adattarsi perfettamente alla struttura portante preesistente.

Inoltre, come vedremo nei prossimi paragrafi, essa rappresenta una soluzione compatta in grado di contenere l'estensione assiale dell'intero apparato e nel contempo permette unagevole accoppiamento di tutte parti che si rendono necessarie, assicurando margini di flessibilità nelle operazioni di assemblaggio.

6.3 Definizione del sistema di pompaggio

Il sistema di pompaggio utilizzato per il raggiungimento del vuoto necessario (inferiore a 10^{-6} mbar) prevede l'utilizzo di una pompa turbomolecolare (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**), accoppiata ad una pompa secondaria utilizzata per il raggiungimento del pre-vuoto. Considerando l'ingombro complessivo del gruppo di pompaggio, si è ritenuto opportuno collocare l'intero sistema nella parte sottostante della struttura portante visto lo spazio sufficiente presente (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**).

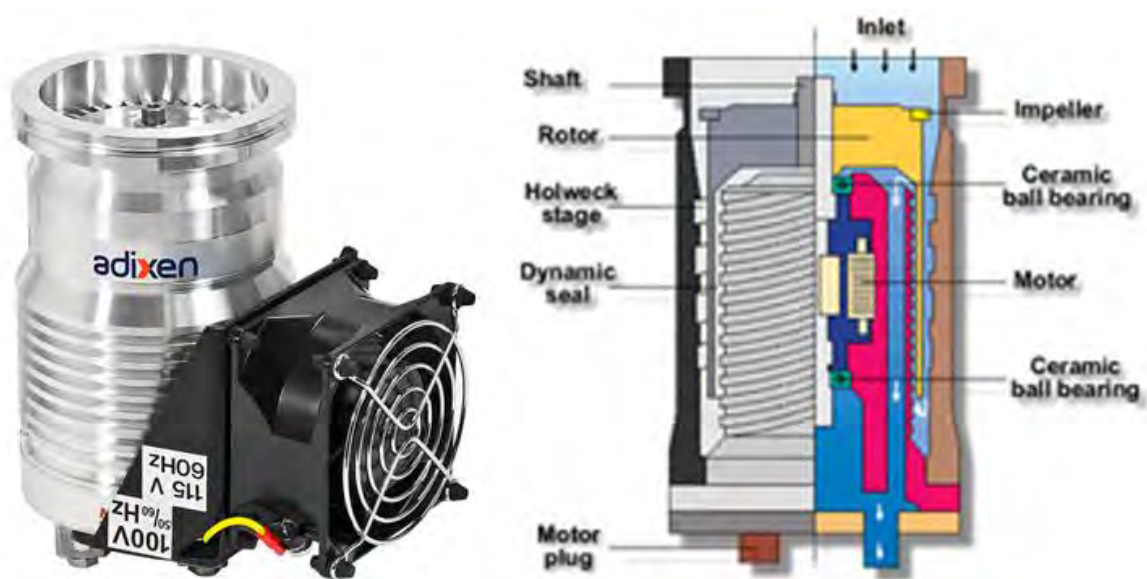


Figura 6.3: pompa turbomolecolare ADIXEN Alcatel (sinistra) e descrizione dei componenti presenti (destra) [1]

Inoltre, collegata alla pompa turbomolecolare, è previsto l'accoppiamento di una valvola in grado di abilitare e disabilitare all'occorrenza il gruppo di pompaggio dal resto del sistema.

La valvola richiesta dev'essere interamente realizzata in metallo, viste le alte dosi di radiazioni presenti, per non compromettere l'integrità fisica dei componenti che la costituiscono, mentre l'azionamento della stessa è garantito da un attuatore pneumatico accoppiato. Dunque la soluzione commerciale che meglio si adatta alle esigenze specifiche è rappresentata in Figura 6.4; per la consultazione delle caratteristiche tecniche si rimanda alla lettura del datasheet presente negli allegati.

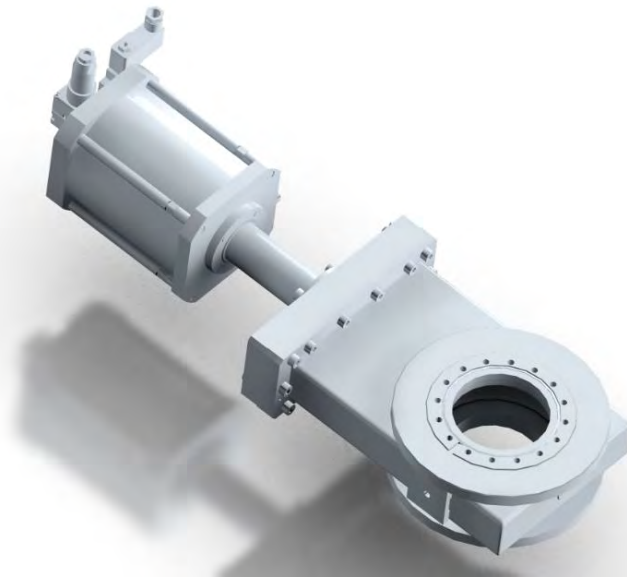


Figura 6.4: vista della valvola utilizzata, VAT-100 all metal gate valve [2]

Dunque è stato modellato il sistema di pompaggio (Figura 6.5) che vede l'accoppiamento della pompa turbomolecolare con la valvola VAT scelta. Inoltre è stato definito un tubo di raccordo, realizzato in lega di alluminio *Al 6082*, che permette l'accoppiamento del sistema di pompaggio con il canale protonico principale in corrispondenza della camera di diagnostica, opportunamente descritta nel prossimo paragrafo. Le guarnizioni in indio sono posizionate in prossimità delle flange di collegamento per garantire la tenuta stagna, mentre viti e bulloni si rendono necessari per il fissaggio relativo delle parti.

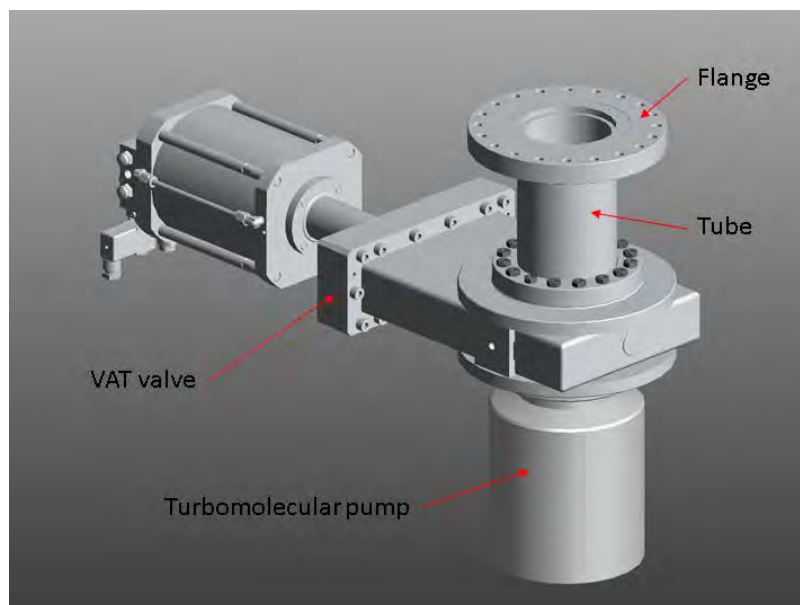


Figura 6.5: vista del sistema di pompaggio sviluppato

6.4 Definizione del sistema di diagnostica

In questo paragrafo vengono descritte le fasi di modellazione eseguite per lo sviluppo della camera di diagnostica, che vede accoppiati insieme la Faraday-Cup e il Beam-Profiler. Quindi risulta opportuno ridefinire la geometria del sistema che contiene entrambi i dispositivi, oltre che sviluppare un sistema di azionamento dedicato alla movimentazione della Faraday-Cup.

6.4.1 Sviluppo della camera raffreddata

In base al modello della camera raffreddata già definita nel capitolo 4, è stato sviluppato un nuovo modello, interamente realizzato in lega di alluminio *Al 6082*, provvisto dei tubi di raccordo necessari per l'accoppiamento del Beam-Profiler, oltre che quelli già definiti per la Faraday-Cup. Il modello della camera nella nuova versione è rappresentata nella Figura 6.6.

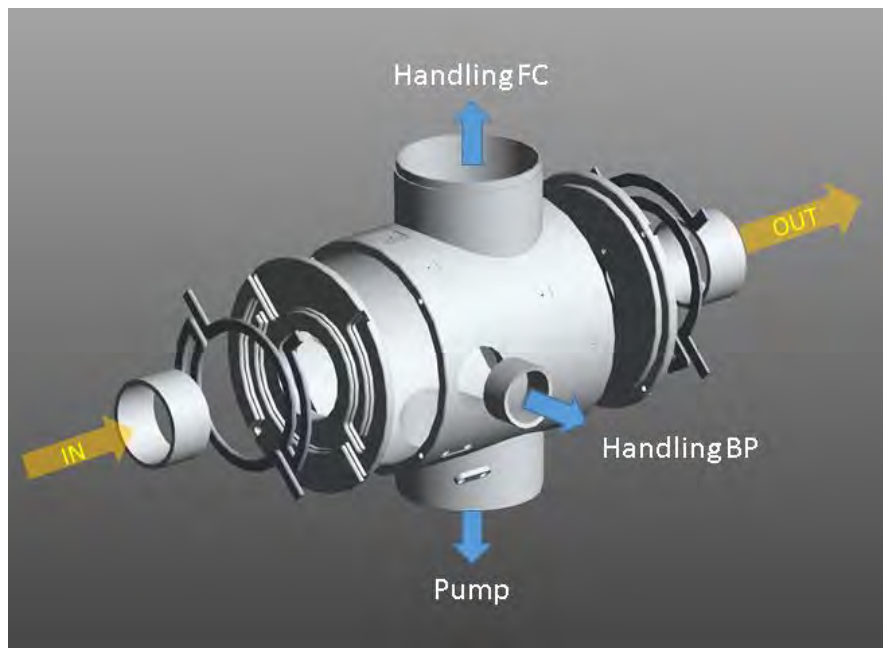


Figura 6.6: vista esplosa della camera adottata nel sistema di diagnostica

Il sistema di raffreddamento adottato è rimasto lo stesso della soluzione precedente; tuttavia le analisi termiche si rendono necessarie per verificare l'efficacia dello stesso, giacché la potenza termica generata questa volta deve tener conto del Beam-Profiler insieme alla Faraday-Cup; tali analisi saranno opportunamente descritte nei prossimi paragrafi.

Inoltre in corrispondenza della superficie esterna della camera sono state praticate delle spianature per poter collocare le bussole di allineamento, analoghe a quelle utilizzate nel collimatore, necessarie nelle fasi preliminari di centratura della camera rispetto all'asse del fascio protonico.

Infine il tubo di collegamento previsto per il Beam Profiler è stato collocato in modo tale che l'asse della sonda rotante sia distante 50 mm rispetto alla faccia anteriore della Faraday-Cup; dunque è stata sviluppata una soluzione compatta della camera capace di contenere entrambi gli strumenti di diagnostica.

6.4.2 Sviluppo del sistema di movimentazione della Faraday-Cup

Come è stato accennato nel capitolo 4, la Faraday-Cup è un dispositivo di diagnostica in grado di eseguire movimenti lineari per poter intercettare il fascio in maniera trasversale. Dunque lo sviluppo di un sistema dedicato alla movimentazione di tale strumento si rende necessario, sulla base delle specifiche funzionalità richieste.

In particolare analizzando il movimento richiesto per garantire un corretto funzionamento del dispositivo (Figura 6.7), si osservano due posizioni di riferimento:

- **A:** posizione di riposo nel quale lo strumento non risulta intercettato dal fascio protonico;
- **B:** posizione di lavoro nel quale lo strumento è intercettato dallo spot per le operazioni di scansione dello stesso.

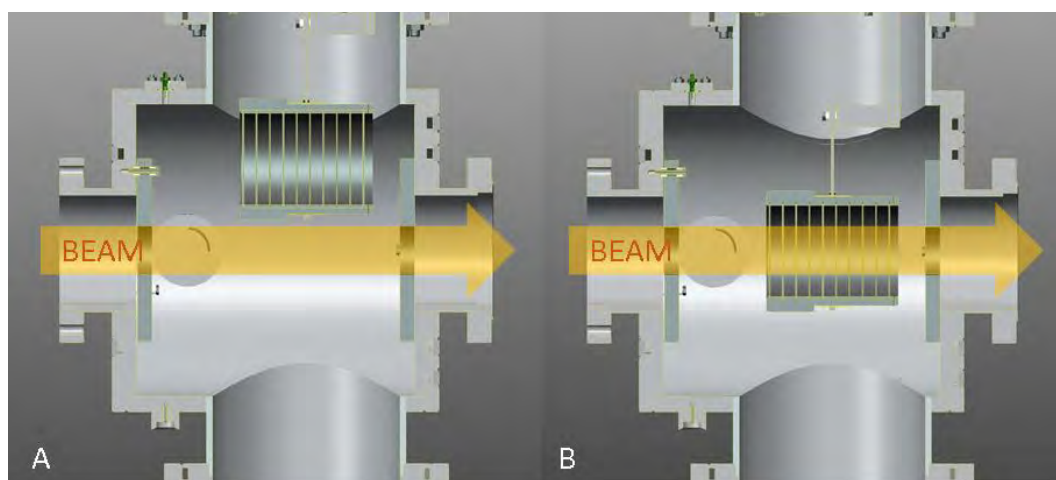


Figura 6.7: analisi del movimento “in – out” eseguito dalla Farady-Cup

La box di grafite deve essere movimentata da una posizione di riposo fintantochè l'asse di riferimento della stessa va a coincidere con l'asse del fascio protonico; in quest'ultima configurazione la coppa della Faraday-Cup risulta completamente intercettata dal fascio protonico e vi rimane nel tempo sufficiente per le operazioni di *scanning*, per poi ritornare nella posizione iniziale di riferimento. Durante le operazioni di movimentazione della coppa, dalla posizione di riposo alla posizione di lavoro, il fascio protonico per qualche istante va ad intercettare le parti di sostegno della stessa, realizzate in tantalio; dunque è stata modificata la geometria della box di grafite al fine di fermare localmente il fascio per schermare tali componenti. La soluzione adottata per il sistema di movimentazione richiesto è rappresentata nella Figura 6.8.

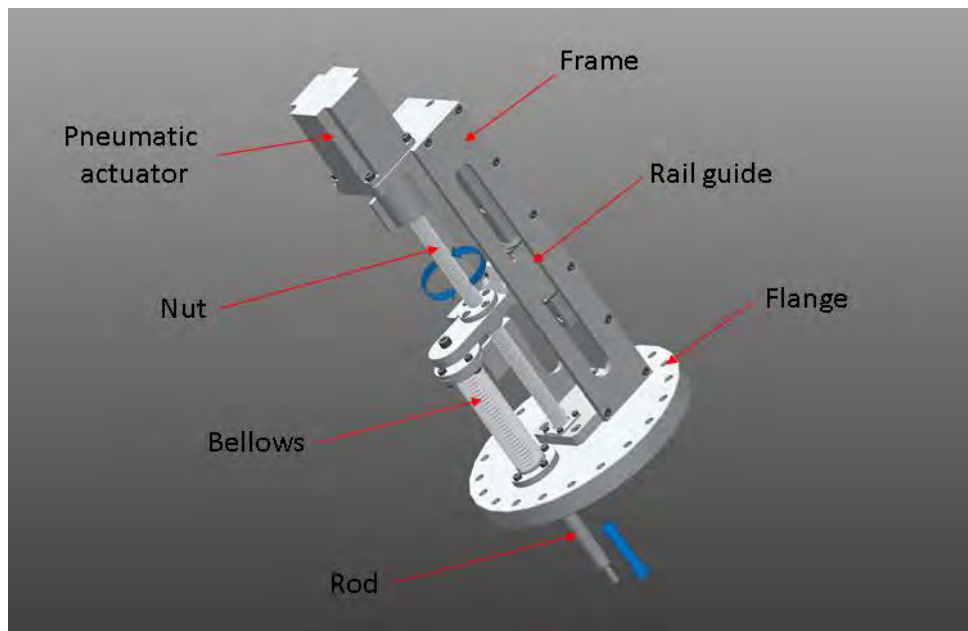


Figura 6.8: vista del sistema di movimentazione adottato

Il dispositivo è costituito da un attuttore pneumatico rotativo in presa diretta con una madrevite, a sua volta supportata alle estremità con opportuni cuscinetti volventi; la scelta di un sistema rotativo si ritiene opportuna per garantire una certa precisione di posizionamento, superiore rispetto a quella conferita da un semplice attuttore lineare; per conoscere le caratteristiche del motore considerato si rimanda alla consultazione del datasheet presente negli allegati.

Dunque una chiocciola si rende necessaria per la trasformazione del moto rotatorio in moto lineare; quest'ultima è fissata ad una guida che si presta a garantire la rettilineità del movimento con un certo grado di precisione.

Sempre nella chiocciola è fissata l'asta di sollevamento al quale è saldamente collegata la Faraday-Cup in corrispondenza dell'estremità libera; un soffiello metallico, assieme alle guarnizioni opportunamente sagomate, si rendono necessari per assecondare il movimento dell'asta e per garantire le condizioni di vuoto in corrispondenza del passante, realizzato nella flangia di accoppiamento.

Inoltre il passo ridotto della madre vite è tale da impedire il moto retrogrado prodotto dal carico ad essa collegato; infatti nell'eventualità in cui venisse a mancare l'alimentazione dell'aria compressa, l'effetto dell'attrito statico che si realizza in corrispondenza del filetto, assicura la Faraday-Cup in una posizione fissa e l'effetto del peso non produrrebbe alcun movimento verticale.

Nella Figura 6.9 seguente è rappresentato il sistema di movimentazione accoppiato correttamente con la Faraday-Cup quando si trova nella posizione di lavoro. L'asta di sollevamento, come pure il blocco di sostegno del dispositivo di diagnostica, è realizzato in acciaio *AISI 316*, mentre la flangia di accoppiamento del sistema di azionamento è realizzata in lega di alluminio *Al 6082*.

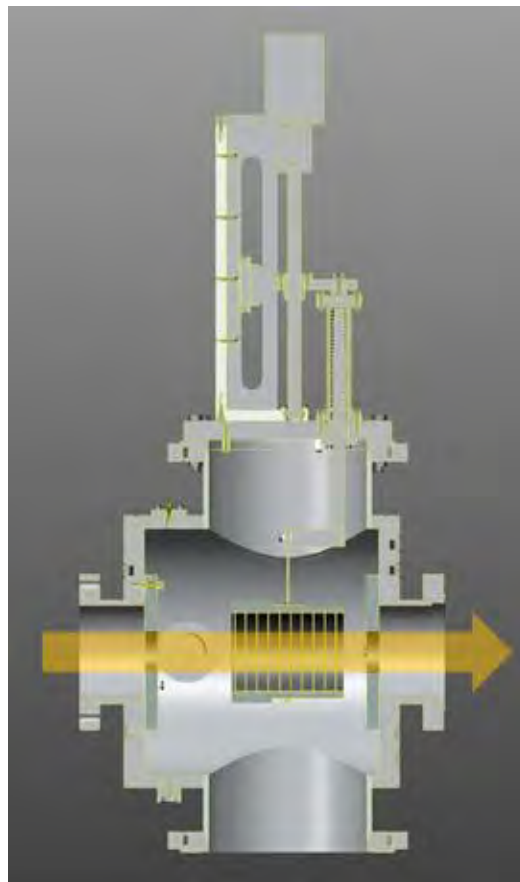


Figura 6.9: vista in sezione della camera di diagnostica

Il sistema di movimentazione sviluppato assicura un corretto funzionamento del dispositivo nelle fasi di azionamento. Nel prossimo paragrafo verranno descritte le analisi termiche condotte nella camera di diagnostica appena definita, al fine di valutare i livelli termici raggiunti nei singoli componenti e verificare il sistema di raffreddamento nella nuova configurazione.

6.5 Analisi termica

Una volta definita la nuova geometria della camera del sistema di diagnostica, è stato possibile eseguire delle analisi termiche per tenere conto dell'effetto combinato prodotto dalla Faraday-Cup e dal Beam-Profiler, al fine di verificare le temperature massime raggiunte nei singoli componenti in riferimento alle temperature limite di utilizzo dei rispettivi materiali.

Al riguardo è stato sviluppato un modello semplificato costituito dalla camera raffreddata, al quale sono accoppiati la Faraday-cup, il Beam-Profiler, il disco soppressore, il disco collimatore e tutti gli elementi di collegamento che si rendono necessari, ovvero i tubi di raccordo e le flange di accoppiamento (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**).

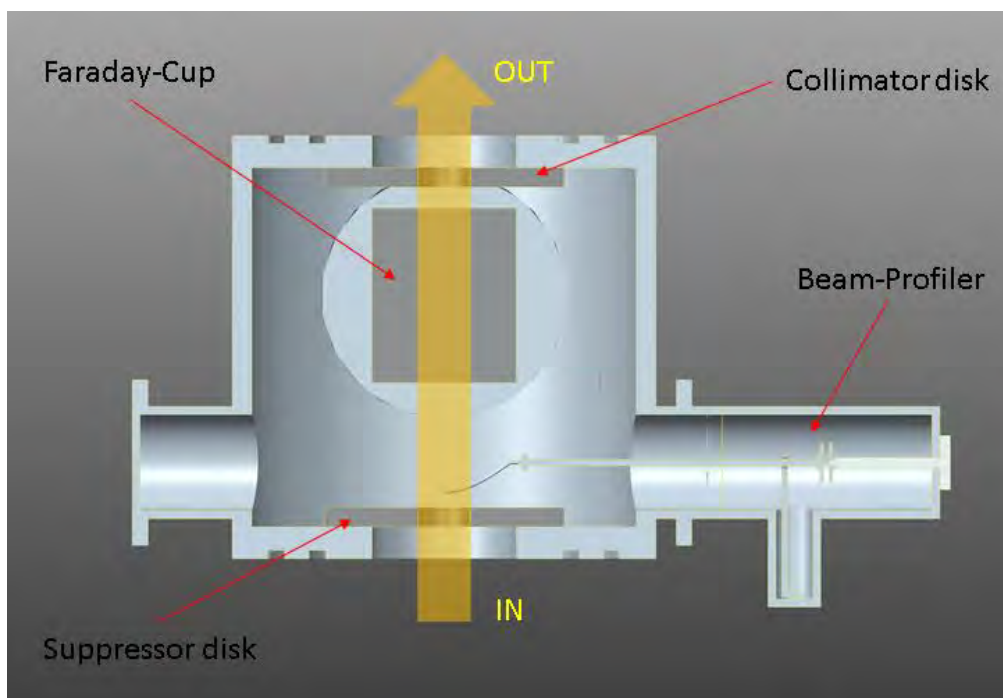


Figura 6.10: vista in sezione del modello considerato nell'analisi termica

Inoltre nei canali di raccordo, in riferimento al modello semplificato, sono stati inseriti degli schermi in grado di contrastare l'irraggiamento prodotto nei riguardi di alcune parti in acciaio ritenute critiche; questi sono realizzati da una serie di dischi in tantalio coassiali, opportunamente distanziati e forati per non ostacolare il raggiungimento del vuoto. In particolare è stato adottato uno schermo in corrispondenza del Beam-Profiler, per contenere le temperature raggiunte nel passante rotante e nel sostegno in acciaio, mentre un altro schermo è stato posizionato in prossimità della pompa turbomolecolare, al fine di limitare i livelli termici delle parti in acciaio.

Sulla base del modello semplificato descritto è stato realizzato un programma APDL che riassume i comandi per l'esecuzione dell'analisi mediante il codice di calcolo ANSYS.

Quindi dopo aver importato i files.IGS del modello 3D, sono state importate le caratteristiche dei materiali e definite le emissività delle parti interessate da scambio termico per irraggiamento. Al riguardo, per la consultazione dei comandi implementati si rimanda alla lettura del listato presente in appendice. Nell'analisi termica si è scelto di discretizzare il modello con l'elemento volumetrico *SOLID 90*; tale elemento è costituito da 20 nodi, ognuno con un grado di libertà, la temperatura (Figura 6.11).

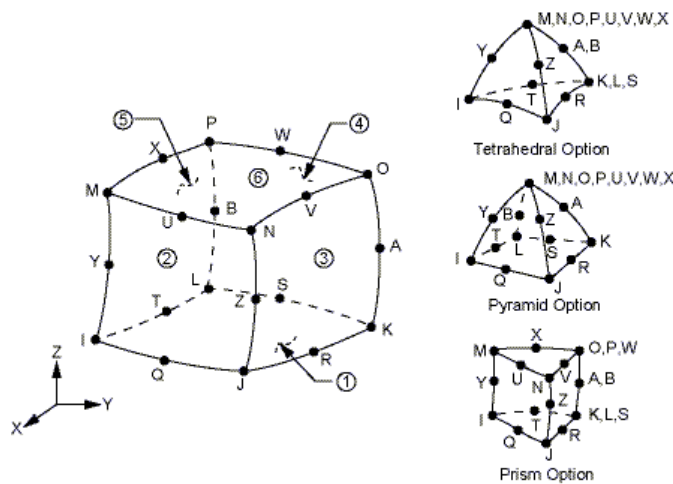


Figura 6.11: geometria dell'elemento *SOLID 90*

Il modello è stato discretizzato con una mesh ad elementi tetragonali, aventi come dimensione caratteristica pari a 8 mm per la camera esterna, 1 mm per la sonda rotante e 3 mm per i restanti componenti (Figura 6.12).

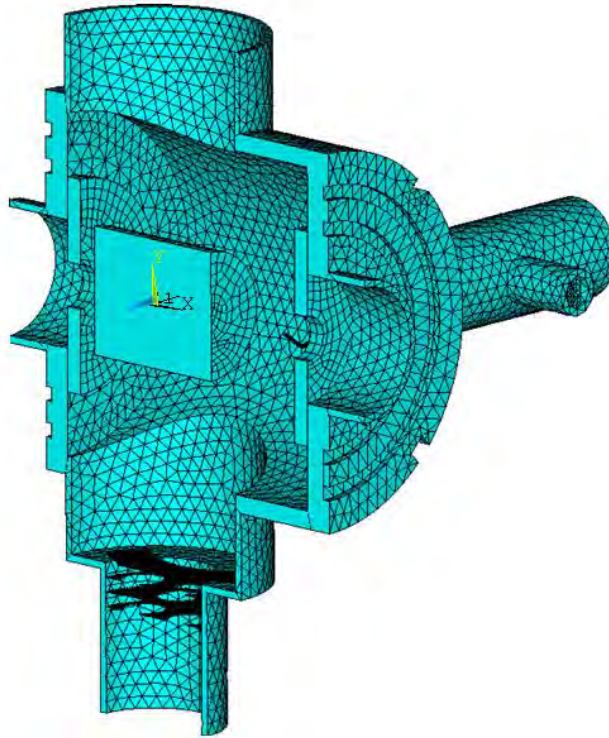


Figura 6.12: rappresentazione della mesh generata

Per quanto riguarda il carico termico che riassume il sistema di raffreddamento della camera, analogamente a quanto fatto nell'analisi termica descritta nel capitolo 4, sono stati applicati dei carichi convettivi in prossimità dei canali della camera al fine di simulare il flusso dell'acqua deionizzata, utilizzata come fluido vettore e vincolata alla temperatura di $35^{\circ} C$.

Analogamente a quanto fatto precedentemente per il Beam-Profilers e per la Faraday-Cup, sono state applicate le potenze per unità di volume nelle porzioni intercettate dal fascio protonico. In particolare è stata assegnata a una potenza di $640 W$ in corrispondenza della porzione di filo intercettata dal fascio e una potenza di $8 kW$ nel blocco di grafite, in prossimità della parte investita dallo spot.

Nella Figura 6.13 è rappresentato l'andamento di temperatura che risulta dall'analisi svolta, mentre nella Tabella 6.1 seguente sono riassunte le temperature massime registrate nei singoli componenti.

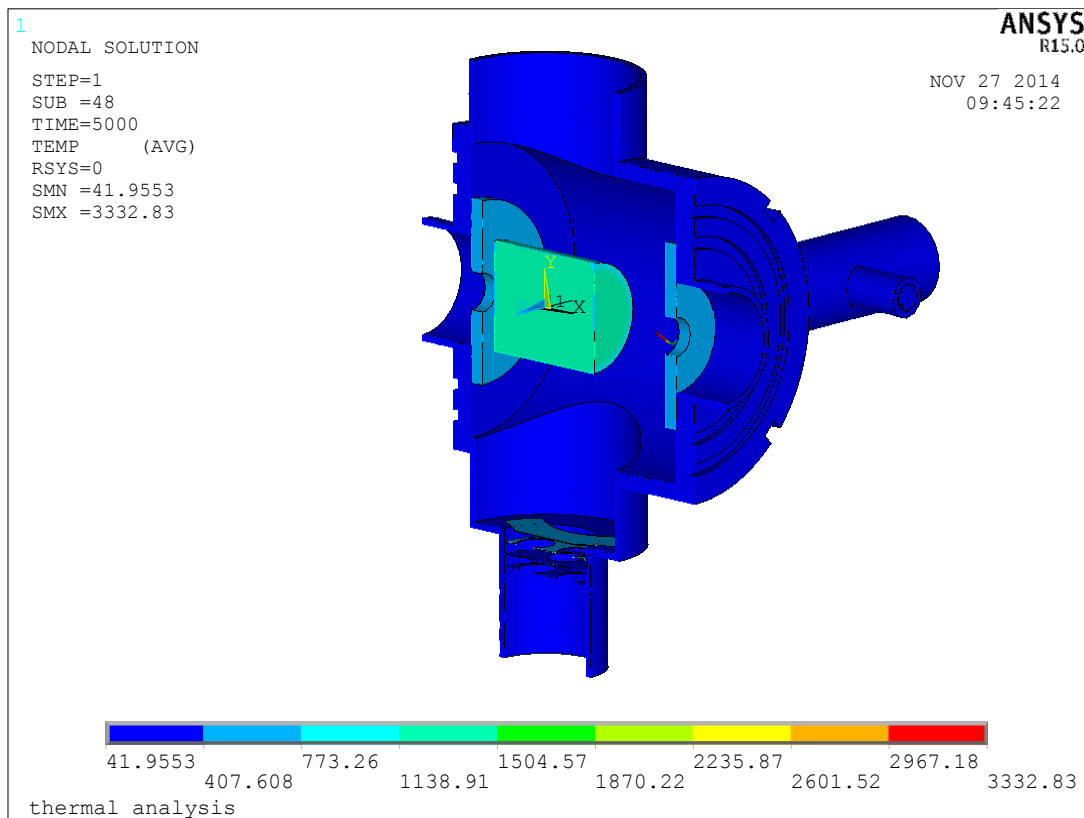


Figura 6.13: andamento delle temperature [°C] che risulta dall'analisi termica

Componente	Materiale	T _{max} [°C]	T _{lim} [°C]
Dischi collimatori	Grafite C	763.59	2000
Camera e tubi di raccordo	Al 6082	192.97	400
Sostegni sonda rotante	Tantalio Ta	873.64	1700
Sostegno Beam-Profilier	AISI 316L	252.67	600
Passante rotante	AISI 316L	66.31	600
Schermo Beam-Profilier	Tantalio Ta	401.24	1700
Schermo lato Pompa	Tantalio Ta	534.84	1700

Tabella 6.1: temperature massime registrate nei singoli componenti

I risultati mostrano come i componenti siano verificati termicamente, giacché le temperature massime riscontrate non superano i rispettivi valori limiti.

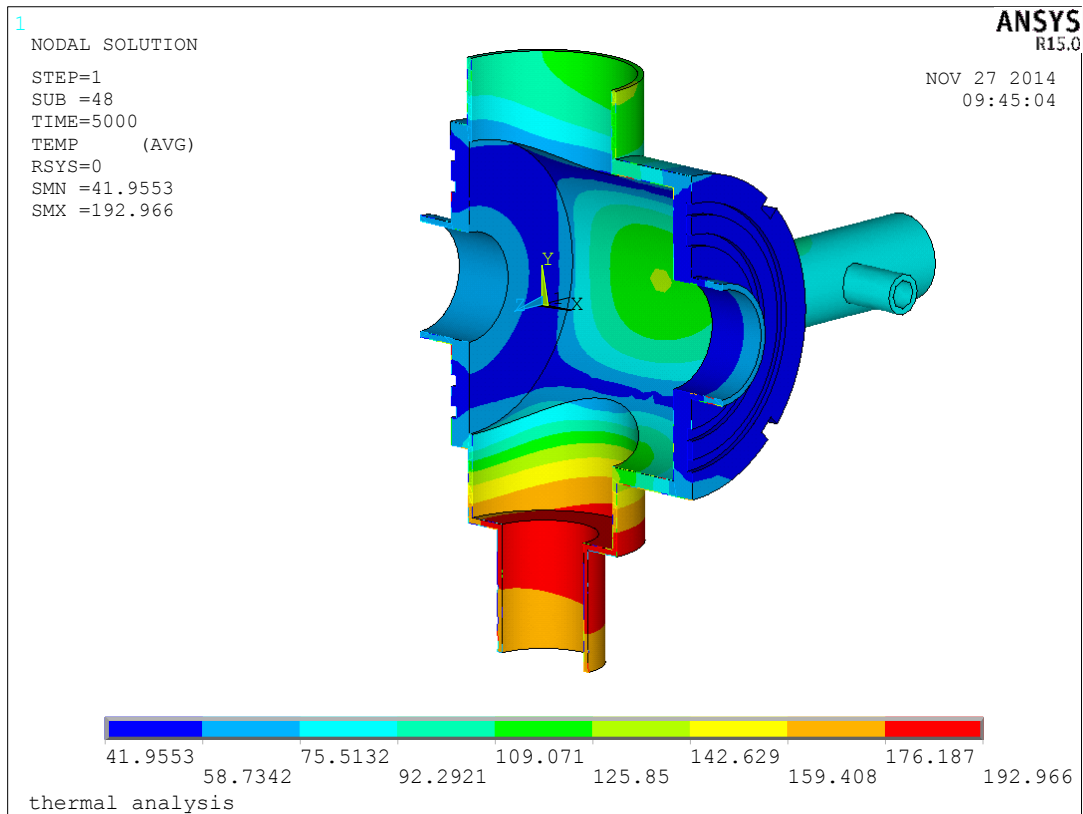


Figura 6.14: andamento della temperatura [$^{\circ}\text{C}$] riscontrato nella camera e nei tubi

Osservando in maggior dettaglio l'andamento delle temperature nella camera e nei tubi di raccordo (Figura 6.14), si notano dei livelli termici elevati in corrispondenza delle flange di accoppiamento dove sono collocate le guarnizioni in indio. Queste ultime hanno una bassa resistenza termica e in misura cautelativa viene considerata per tali componenti una temperatura massima di utilizzo pari a $T_{lim} = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$; per queste ragioni si rendono necessarie delle flange raffreddate per contrastare i livelli termici raggiunti in prossimità di questi. Quindi, sulla base dei risultati ottenuti, il modello di riferimento è stato aggiornato per poter tener conto delle nuove flange raffreddate, posizionate in corrispondenza delle estremità dei tubi di raccordo (Figura 6.15).

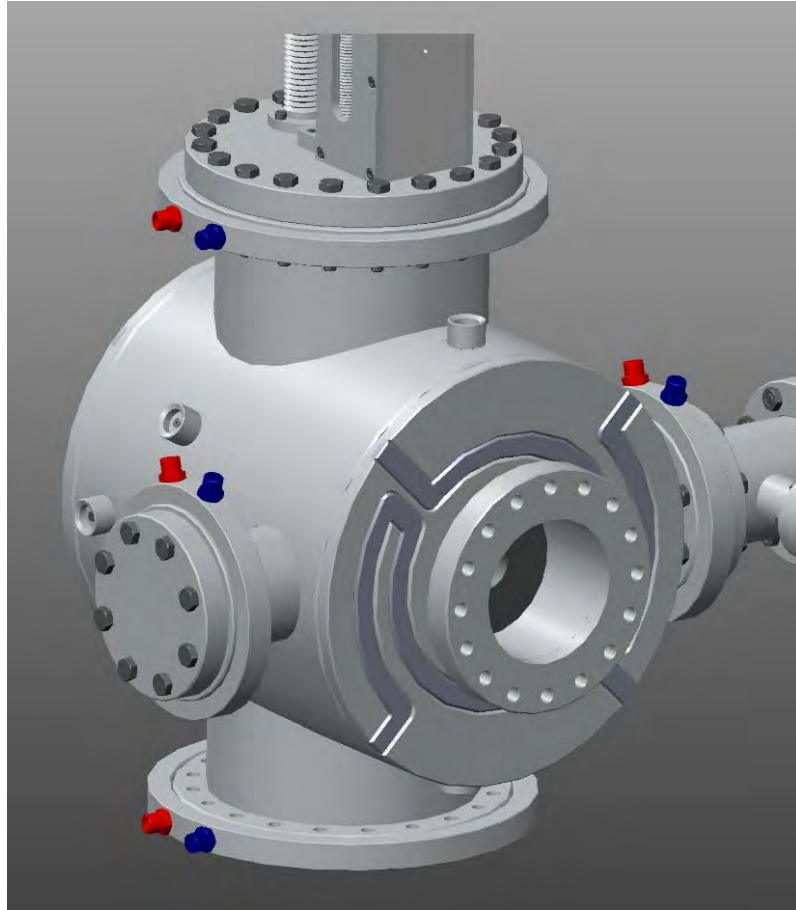


Figura 6.15: particolare delle flange raffreddate solidali alla camera di diagnostica

Dunque è stata condotta un'ulteriore analisi termica in riferimento al modello aggiornato; in particolare sono stati aggiunti i carichi convettivi in corrispondenza delle flange, che riassumono il passaggio del liquido refrigerante, e sono stati aggiunti dei tubi di raccordo lungo l'asse del canale protonico per osservare l'effetto prodotto dall'irraggiamento nei riguardi dei componenti adiacenti.

Le discretizzazione del modello, le proprietà dei materiali e i carichi termici assegnati sono rimasti invariati rispetto all'analisi precedente.

Nella figura è rappresentato l'andamento di temperatura che risulta nella camera e nei tubi di raccordo (Figura 6.16), mentre nella Tabella 6.2 seguente sono riassunti i livelli termici massimi registrati nei singoli componenti.

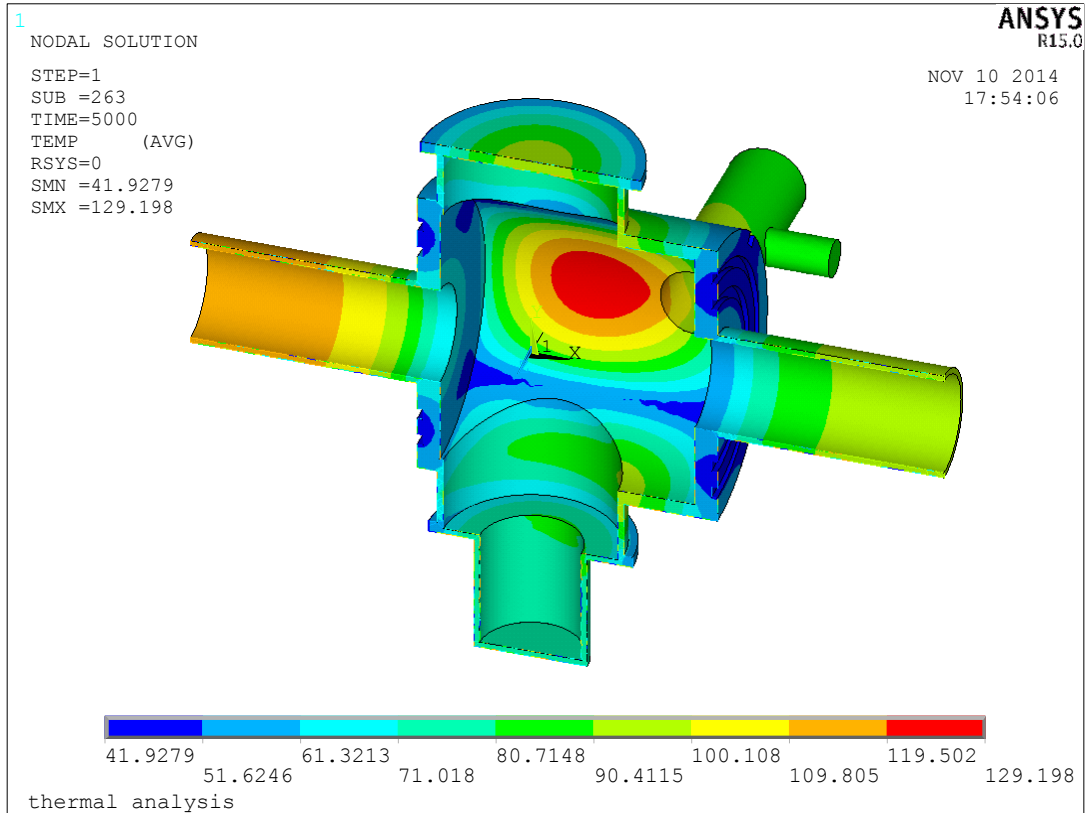


Figura 6.16: andamento della temperatura [°C] riscontrato nella camera e nei tubi

Componente	Materiale	T _{max} [°C]	T _{lim} [°C]
Dischi collimatori	Grafite <i>C</i>	768.1	2000
Camera e tubi di raccordo	<i>Al 6082</i>	129.20	400
Sostegni sonda rotante	Tantalio <i>Ta</i>	875.63	1700
Sostegno Beam-Profiler	<i>AISI 316L</i>	251.35	600
Passante rotante	<i>AISI 316L</i>	87.07	600
Schermo Beam-Profiler	Tantalio <i>Ta</i>	402.59	1700
Schermo lato Pompa	Tantalio <i>Ta</i>	531.32	1700

Tabella 6.2: temperature massime registrate nei singoli componenti

Dai risultati si evince come le temperature raggiunte nei tubi di raccordo, in corrispondenza delle flange, siano scese rispetto al caso precedente; in particolare si registrano temperature inferiori ai 100 °C in corrispondenza delle tenute realizzate in indio, che dunque risultano verificate termicamente.

Inoltre si può osservare un netto abbassamento delle temperatura in prossimità delle zone protette dagli schermi. Questo giustifica l'efficacia prodotta degli stessi nel contrastare l'irraggiamento, nonché permettono di abbassare le temperature dei componenti ritenuti critici. In particolare, osservando il gradiente termico riscontrato nel Beam-Profiler (Figura 6.17), si nota l'efficacia prodotta dallo schermo nei confronti del sostegno e del passante rotante, entrambi realizzati in acciaio.

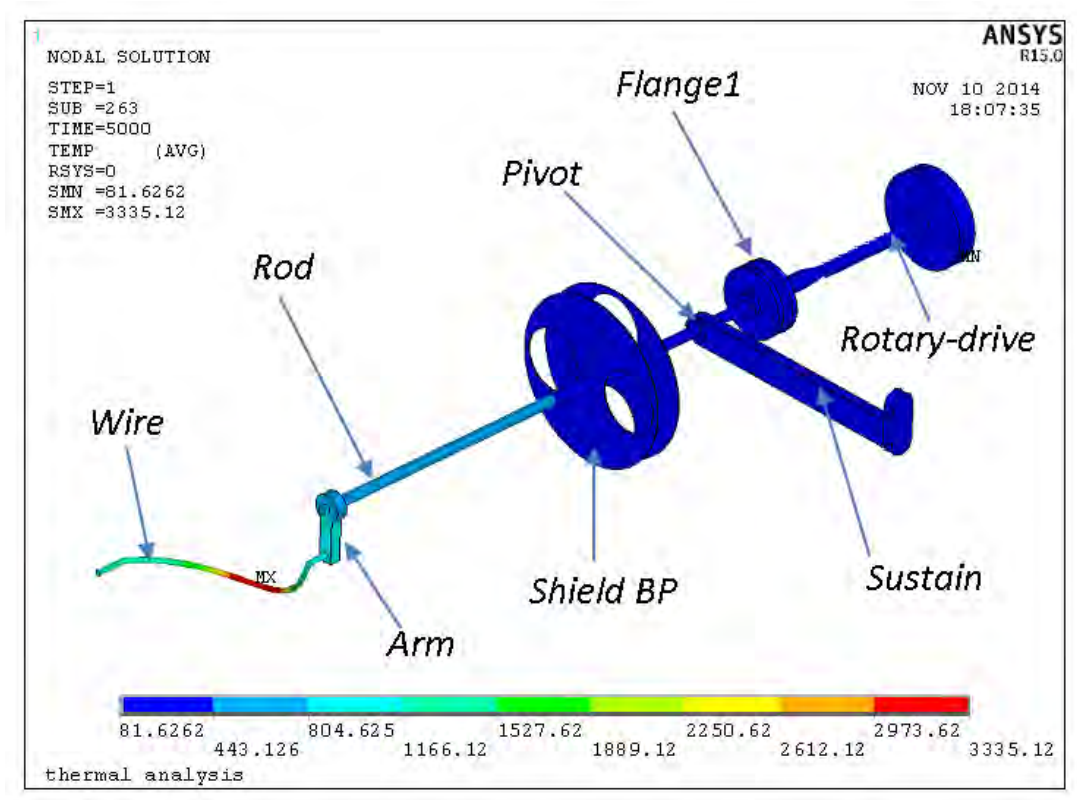


Figura 6.17: andamento della temperatura [°C] riscontrato negli elementi del Beam-Profiler

Inoltre, sulla base dei risultati ottenuti, si è ritenuto opportuno applicare un ulteriore schermo in corrispondenza del sistema di movimentazione per limitare la temperatura raggiunta nella flangia di accoppiamento, dove è fissato il soffietto e la relativa tenuta.

Dunque è stato possibile sviluppare un sistema di diagnostica completo di tutti i componenti necessari per un corretto funzionamento, sulla base delle specifiche condizioni operative (Figura 6.18 e Figura 6.19).

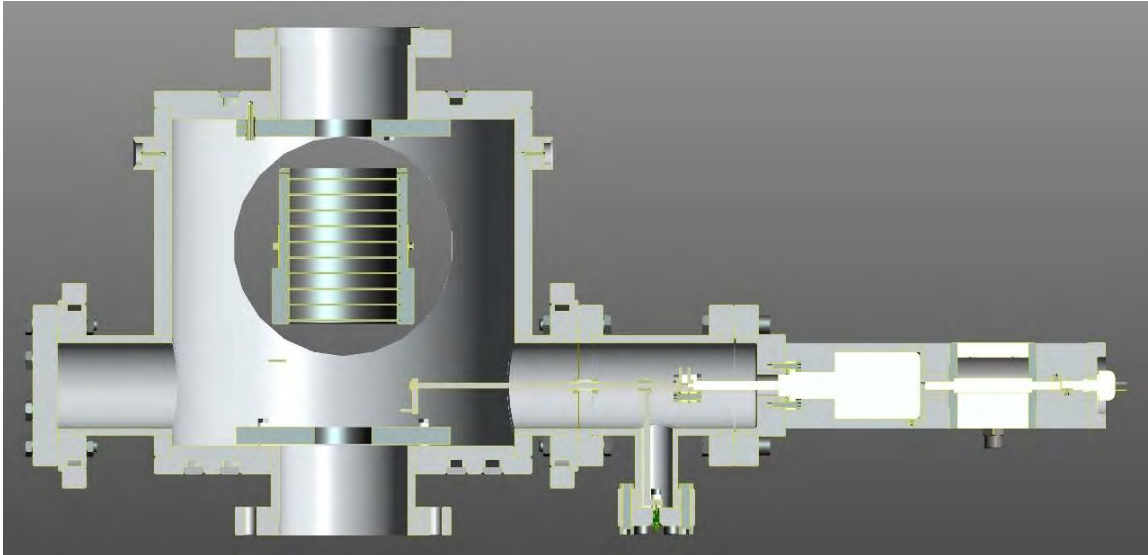


Figura 6.18: : vista in sezione del sistema di diagnostica



Figura 6.19: sistema di diagnostica assemblato

6.6 Modifiche apportate al sistema multi-collimatore

Il sistema multi-collimatore, opportunamente descritto nel capitolo 2, ha subito delle modifiche marginali per poter sopperire ai vincoli di carattere geometrico sorti durante la progettazione dettagliata del Front-End protonico.

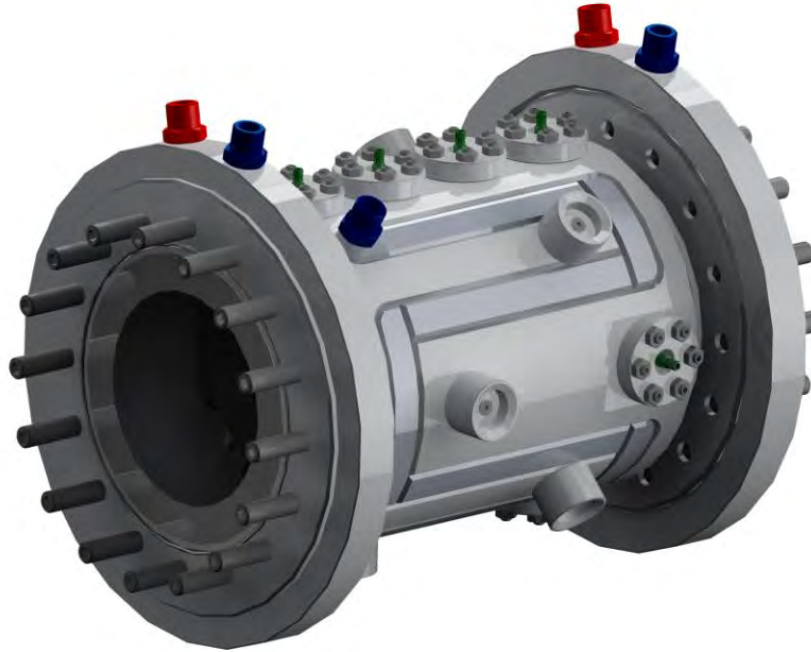


Figura 6.20: vista del sistema multi-collimatore nella versione modificata

Come è possibile notare nella Figura 6.20, in corrispondenza della flange raffreddate sono state inserite delle viti prigioniere. Si è ritenuto opportuno il loro utilizzo rispetto alle viti passanti poichè, oltre che facilitare l'installazione del dispositivo nel Front-End protonico, permettono di ridurre l'ingombro assiale della camera; infatti adottando tale soluzione l'estensione assiale risulta ridotta di 20 mm , passando da 240 mm a 220 mm nella nuova versione.

Inoltre dopo aver eseguito le tavole progettuali dei singoli elementi, in vista della loro realizzazione, si è ritenuto opportuno dare priorità alla realizzazione del quarto disco collimatore per poter verificare l'assemblaggio dello stesso.

In particolare sono stati realizzati i 4 petali che compongono il quarto disco collimatore, mediante lavorazioni di elettroerosione partendo da un blocco grezzo di grafite; quindi sono state realizzate le viti di tantalio opportunamente sagomate, necessarie per il fissaggio del disco all'interno della camera, ed eseguite le sedi necessarie per l'inserimento degli isolatori di allumina.

Nella Figura 6.21 seguente è rappresentata la soluzione del quarto disco collimatore fissato provvisoriamente all'interno di un profilo tubolare, nella prima versione sviluppata.

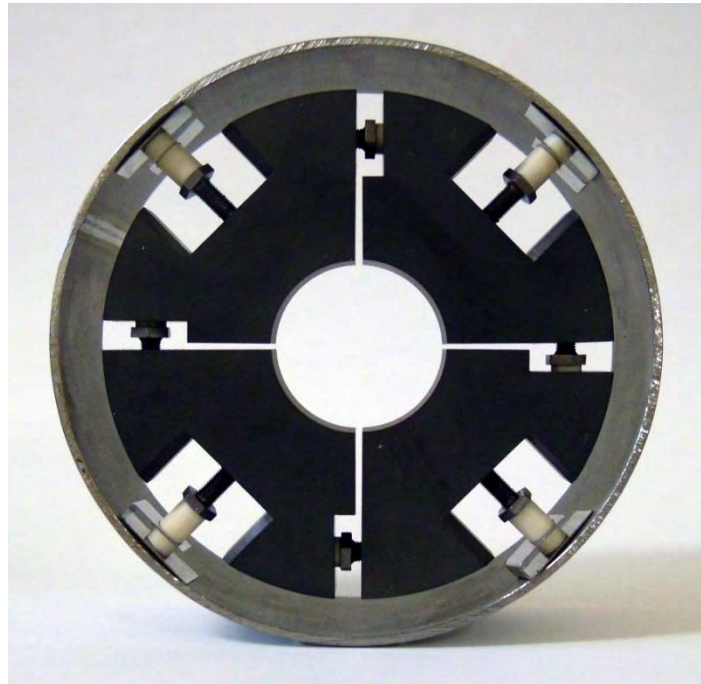


Figura 6.21: vista del quarto disco collimatore nella prima versione

Nella figura si può notare la presenza degli elementi elastici interposti tra gli isolatori e la camera; dai risultati ottenuti precedentemente, è stato possibile optare per il non utilizzo di tali elementi, vista la resistenza strutturale offerta dagli isolatori, verificata durante i test sperimentali eseguiti.

Durante il fissaggio delle viti si sono riscontrati dei problemi nell'inserimento della chiave inglese per le operazioni di avvitaggio; l'inconveniente è stato risolto aumentando l'estensione dello scavo, in modo tale da agevolare l'assemblaggio e avere dei margini maggiori in termini di spazio.

Durante le fasi di assemblaggio il sistema ha riscontrato alcune labilità; infatti in riferimento ad un modello teorico, si osserva come il disco sia composto da 4 corpi indipendenti accoppiati, e i gradi di libertà non vincolati favoriscono delle mobilità indesiderate.

Inoltre lo spazio garantito tra i petali non risulta costante lungo la direzione radiale e le deflessioni riscontrate durante il fissaggio dei componenti compromettono la circolarità del foro collimatore, oltre che compromettere l'isolamento elettrico dei petali se questi venissero in contatto.

Dunque per aumentare l'affidabilità e la rigidità del sistema, si è ritenuto opportuno vincolare le 4 parti utilizzando ulteriori isolatori ceramici (Figura 6.22).

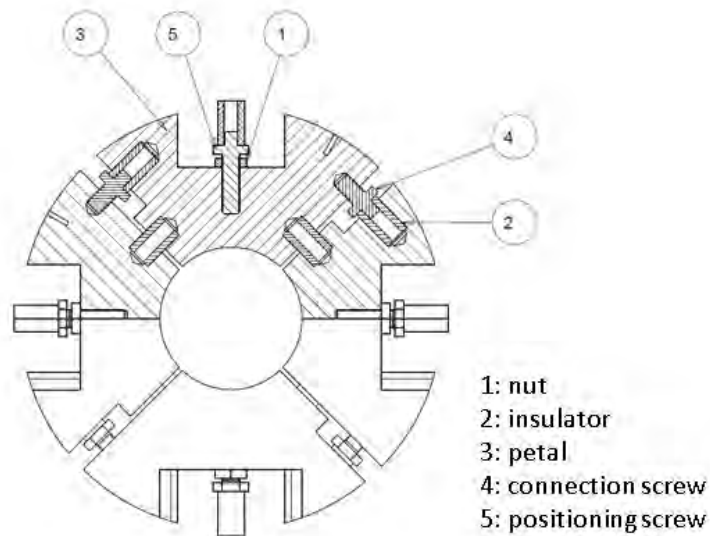


Figura 6.22: vista in sezione del quarto disco collimatore nell'ultima versione sviluppata

Quindi i petali preesistenti hanno subito ulteriori lavorazioni, per poter essere modificati secondo la nuova versione concepita, rappresentata nella Figura 6.23 seguente.

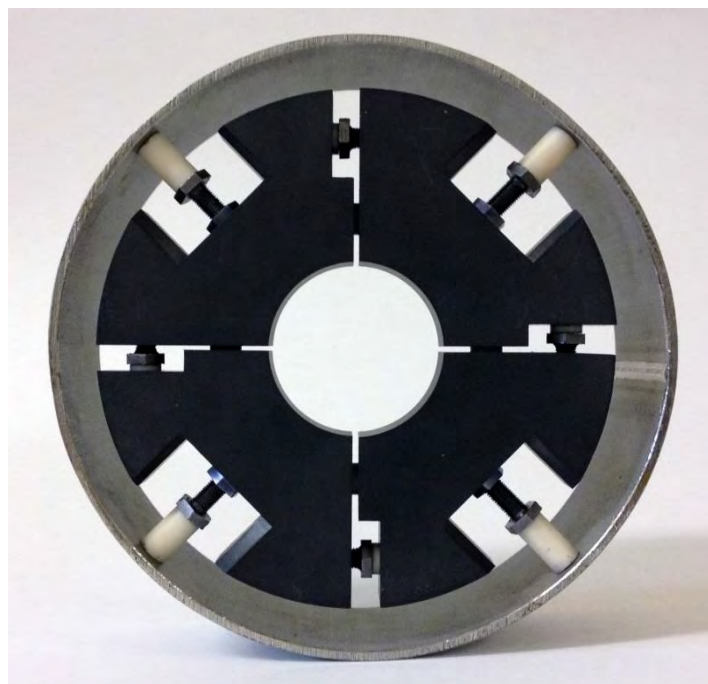


Figura 6.23: vista del quarto disco collimatore nell'ultima versione

La soluzione del quarto disco collimatore nella nuova versione risulta più rigida durante le fasi di assemblaggio e gli isolatori distanziatori garantiscono un buon parallelismo tra le parti affacciate.

6.7 Assemblaggio del Front-End protonico

Dopo aver definito i dispositivi del Front-End protonico, si rende necessario l'accoppiamento delle parti per verificare l'assemblaggio del sistema completo, nonché individuare eventuali problemi durante le operazioni di montaggio, in relazione agli ingombri delle geometrie sviluppate. Quindi nel telaio sono stati accoppiati il sistema di pompaggio, la camera di diagnostica e il sistema multi-collimatore, già sviluppati e descritti precedentemente (Figura 6.24).



Figura 6.24: vista dei dispositivi sviluppati accoppiati al telaio

Per completare la realizzazione dell'assieme rappresentato, si rendono necessari opportuni organi di collegamento all'ingresso e all'uscita del sistema. In particolare tali componenti devono assicurare una certa flessibilità di movimento per favorire le operazioni di allineamento dell'apparato rispetto all'asse del fascio protonico; per questo motivo sono stati adottati dei soffietti metallici commerciali, collegati ad opportune flange di collegamento, in grado di offrire un certo grado di labilità ed agevolare le operazioni preliminari di accoppiamento del sistema.

Al riguardo, per conoscere le caratteristiche degli elementi scelti si rimanda alla consultazione dei rispettivi datasheet presenti negli allegati, mentre nella Figura 6.25 seguente sono rappresentate le soluzioni adottate.



Figura 6.25: rappresentazione dei soffietti di collegamento adottati all'ingresso (sinistra) e all'uscita (destra) del Front-End protonico [3][4]

Come si può notare in Figura 6.25, il soffietto di collegamento posizionato all'uscita del Front-End protonico è accoppiato in maniera coassiale ad un isolatore ceramico; questo si rende necessario per isolare elettricamente l'intero apparato dal sistema successivo a cui è connesso.

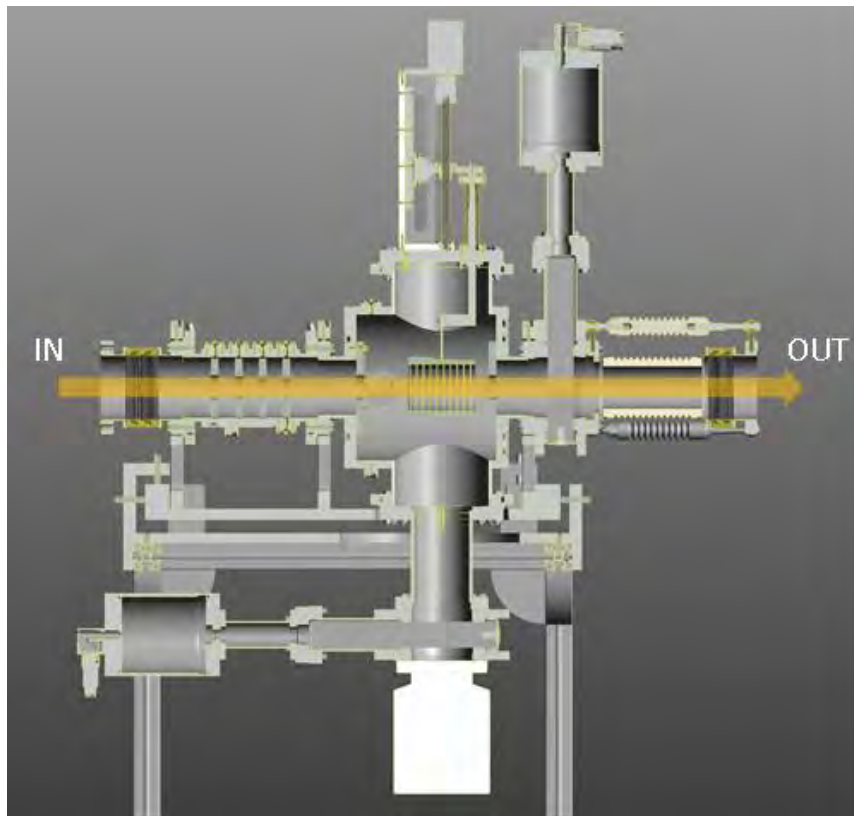


Figura 6.26: vista in sezione del Front-End protonico assemblato

Nella Figura 6.26 è rappresentato il Front-End protonico completo di tutti gli elementi accoppiati correttamente. Inoltre si è ritenuto opportuno adottare un'ulteriore valvola VAT, analoga a quella presente nel sistema di pompaggio, per poter disabilitare all'occorrenza il Front-End protonico dai dispositivi accoppiati a valle; quest'ultima è stata posizionata all'uscita della camera di diagnostica, in prossimità dell'isolatore terminale (Figura 6.27).



Figura 6.27: rappresentazione del Front-End protonico assemblato

L'estensione assiale del sistema assemblato risulta pari a 1074.66 mm , mentre lo spazio massimo disponibile è pari a 2099.50 mm . Dunque in riferimento all'ingombro prodotto, la soluzione sviluppata risulta verificata e nel contempo garantisce un margine operativo di 1024.84 mm in direzione assiale.

Nella Figura 6.28 seguente è rappresentato il Front-End protonico ultimato, accoppiato correttamente nel canale protonico.

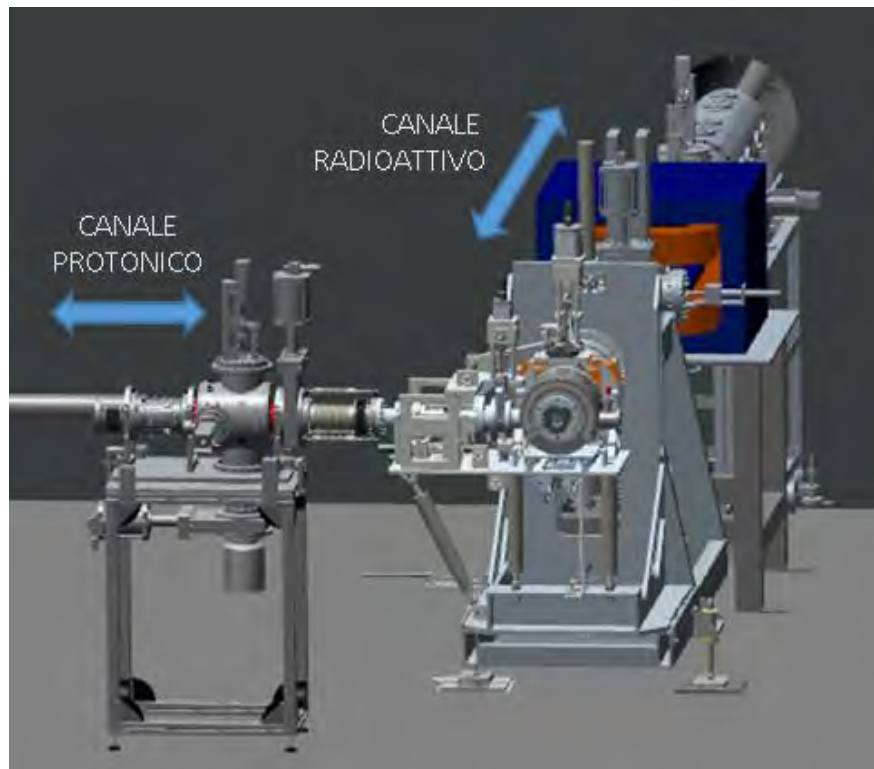


Figura 6.28: vista del canale protonico e del canale radioattivo

6.8 Conclusioni

In questo capitolo sono state riassunte le fasi di modellazioni eseguite per lo sviluppo del Front-End protonico, analizzando e risolvendo le problematiche principali riscontrate nel corso della progettazione dettagliata, fino ad ottenere un sistema non troppo distante dal design che assumerà nella sua forma finale. In particolare:

- Dopo aver definito un telaio di supporto, sono stati accoppiati i dispositivi precedentemente definiti verificando che gli ingombri richiesti dagli stessi non compromettano l'assemblaggio dell'intero sistema.
- È stata riprogettata la camera di diagnostica dove sono accoppiati il Beam-Profilier e la Faraday-Cup; quindi un'analisi termica si è ritenuta necessaria per verificare nuovamente l'efficacia del sistema di raffreddamento nella nuova versione.

- È stato realizzato il quarto disco del sistema multi-collimatore, per verificare la stabilità e l'assemblaggio dello stesso durante le operazioni di montaggio. Sulla base delle problematiche riscontrate, sono state apportate le modifiche necessarie ai modelli di riferimento.
- Una volta ultimato l'intero assieme sono stati rinominati tutti i componenti secondo le codifiche in uso, eseguite le tavole costruttive dei singoli componenti in vista della loro realizzazione, alcune delle quali sono riportate negli allegati.

BIBLIOGRAFIA

[¹] <http://www.adixen.fr>

[²] <http://www.vatvalve.com>

[³] <http://www.comvat.com>

[⁴] <http://www.friatec.com>

CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

Nel presente lavoro di tesi è stato sviluppato il Front-End protonico per il progetto SPES, completo di tutti i dispositivi che si rendono necessari per il trasporto e il controllo del fascio protonico, capace di soddisfare le specifiche condizioni operative.

Sulla base delle caratteristiche del fascio protonico e dei vincoli di carattere funzionale suggeriti dalla letteratura, sono stati definiti i dispositivi di collimazione e i sistemi di diagnostica che si rendono necessari per avere un controllo soddisfacente del fascio considerato, in grado di funzionare in condizioni di sicurezza. Al riguardo il codice di calcolo Ansys si è rivelato un valido strumento nel corso della progettazione dei dispositivi: infatti le analisi agli elementi finiti svolte hanno permesso di verificare la resistenza termica e meccanica dei singoli componenti, simulando le reali condizioni operative, oltre che individuare le criticità riscontrate in corso di definizione.

In particolare è stato definito il sistema multi-collimatore in grado di conformare il fascio secondo un certo diametro di spot e rilevare le caratteristiche dello stesso in termini di forma e posizione, nonché la valutazione delle componenti rotative che lo caratterizzano. Le verifiche termiche e strutturali dei singoli elementi si sono rese necessarie per l'affinazione del modello e i componenti critici maggiormente sollecitati sono stati sottoposti a test sperimentali specifici. Le misure sperimentali ottenute, unitamente ai risultati delle analisi svolte, hanno potuto convalidare la resistenza dell'intero dispositivo per poter garantire un funzionamento in condizioni di sicurezza.

Un importante sviluppo di questo progetto consiste nell'ottimizzare il sistema di rilevazione della corrente che circola nei dischi collimatori prevedendo opportuni schermi soppressori, utilizzati per mitigare l'effetto indesiderato prodotto dagli elettroni secondari.

Inoltre è stato definito un sistema di diagnostica completo, che prevede l'utilizzo di due dispositivi accoppiati nella stessa camera: il Beam-Profilers e la Faraday-Cup. Per il primo è stata proposta una progettazione preliminare nella soluzione a filo rotante, avanzando analisi termiche per simulare le reali condizioni d'esercizio e individuare le criticità presenti. Sulla base dei risultati ottenuti, un importante sviluppo di questo dispositivo consiste nella progettazione dettagliata della sonda rotante che costituisce essere l'elemento critico dell'intero sistema, unitamente al controllo richiesto per la movimentazione e l'acquisizione dei segnali.

Per quanto riguarda la Faraday-cup è stata condotta un'attenta riprogettazione della coppa, proponendo una soluzione realizzata interamente in grafite. In questo senso, le analisi termo-strutturali si sono rese necessarie per verificare l'integrità fisica dei componenti che la costituiscono, sulla base dei dati di progetto considerati.

In riferimento ai risultati ottenuti, un importante sviluppo di questo dispositivo consiste nel collaudare la resistenza dei dischi che intercettano il fascio protonico, oltre che sviluppare il sistema di acquisizione dei segnali per la caratterizzazione dello stesso.

Infine sono stati assemblati e verificati tutti i dispositivi assieme agli organi di collegamento che si rendono necessari per l'accoppiamento delle parti, in riferimento all'ingombro massimo disponibile.

Lo studio ingegneristico del Front-End protonico è stato effettuato e presto verrà costruito il prototipo per i test di accettazione finali.

APPENDICE A

Trattamenti superficiali finalizzati all'incremento dell'emissività globale dei materiali

A.1 Introduzione

In questo capitolo vengono descritti i principali trattamenti superficiali che possono essere eseguiti nelle parti in lega di alluminio interessate da scambio termico al fine di incrementarne l'emissività globale e favorire lo smaltimento delle potenze termiche in gioco nei flussi radianti.

Come è possibile constatare nei capitoli precedenti, la termica gioca un ruolo di fondamentale importanza per il collimatore e la faraday-cup nel progetto SPES; in particolare abbiamo visto che i dischi collimatori raggiungono un livello di temperatura prossimo ai $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, e la faraday cup raggiunge temperature prossime ai 2000°C , ed entrambi i dispositivi in questione vengono mantenuti in vuoto nelle rispettive camere raffreddate; è facile a questo punto dedurre che le modalità di trasmissione del calore che controlleranno il problema saranno la conduzione ed, in maniera preponderante, l'irraggiamento.

La conduzione termica è dovuta alla cessione di energia cinetica da parte di molecole in zona a più alta temperatura, verso altre molecole in zona adiacente a più bassa temperatura; a questa componente di scambio termico nei metalli si aggiunge la componente elettronica dovuta al movimento degli elettroni; da un punto di vista macroscopico, la conduzione si manifesta come scambio di calore all'interno di corpi solidi, liquidi, gassosi, senza movimento apparente di materia. La trasmissione del calore per irraggiamento avviene invece per propagazione di onde elettromagnetiche, nello stesso modo della propagazione della luce; si ha trasmissione per irraggiamento nel vuoto o attraverso sostanze almeno parzialmente trasparenti [1]. Nei prossimi paragrafi, dopo aver definito la modalità di trasmissione di calore per irraggiamento, giacché questa risulta essere la parte dominante nello scambio termico dei casi esaminati, verrà analizzata l'influenza dell'emissività globale sulle temperature dei corpi coinvolti nel flusso radiativo, nonché verranno descritti in generale gli accorgimenti necessari per poter aumentare l'efficienza termica.

A.2 Irraggiamento

Ogni corpo che si trova ad una temperatura superiore allo zero assoluto emette radiazioni elettromagnetiche. Questo fenomeno, detto irraggiamento, dipende da due fattori principali:

- la temperatura alla quale il corpo si trova;
- il materiale di cui il corpo è costituito.

In generale, più è alta la temperatura, maggiore è la potenza che il corpo emette verso l'esterno. L'irraggiamento consente la trasmissione di energia da un corpo ad un altro attraverso onde elettromagnetiche; queste viaggiano alla velocità della luce e non richiedono alcun mezzo per propagare [2]. L'irraggiamento termico interessa una banda ristretta dello spettro delle onde elettromagnetiche e la trasmissione del calore ad esso associata dipende dalla quarta potenza della temperatura assoluta del corpo emittente; per questo motivo le analisi che tengono conto dello scambio termico per irraggiamento sono altamente non lineari.

Nel caso di due superfici (i e j) che si scambiano calore per irraggiamento, il flusso termico può essere calcolato grazie alla formula (A.1) seguente:

$$q_i = \frac{1}{\left(\frac{1 - \varepsilon_i}{A_i \cdot \varepsilon_i} + \frac{1}{A_i \cdot F_{ij}} + \frac{1 - \varepsilon_j}{A_j \cdot \varepsilon_j}\right)} \cdot \sigma_s \cdot (T_i^4 - T_j^4) \quad (A.1)$$

Dove:

q_i = flusso termico scambiato tra le superfici i e j per irraggiamento;

A_i = area della superficie i;

A_j = area della superficie j;

ε_i = emissività emisferica globale della superficie i;

ε_j = emissività emisferica globale della superficie j;

F_{ij} = fattore di forma ij, ovvero frazione della totale potenza radiante che, partendo dalla superficie i, raggiunge direttamente la superficie j;

σ_s = costante di Stefan-Boltzmann;

T_i = temperatura assoluta della superficie i;

T_j = temperatura assoluta della superficie j;

Nel caso in cui la superficie A_j sia molto più grande della superficie A_i , l'equazione precedentemente riportata può essere semplificata e riscritta nel modo seguente (A.2) :

$$q_i = A_i \cdot \varepsilon_i \cdot F_{ij}^* \cdot \sigma_s \cdot (T_i^4 - T_j^4) \quad (A.2)$$

con:

$$F_{ij}^* = \frac{F_{ij}}{F_{ij} \cdot (1 - \varepsilon_i) + \varepsilon_i} \quad (A.3)$$

A.3 Emissività

L'emissività di un materiale (di solito indicata con ε) è la frazione di energia irraggiata da quel materiale rispetto all'energia irraggiata da un corpo nero che sia alla stessa temperatura; è dunque una misura della capacità di un materiale di irraggiare energia.

Si prenda in considerazione un elemento di superficie non nera di area dA alla temperatura T ; l'emissività emisferica globale viene definita come rapporto tra l'emissione globale E di tale porzione superficiale e l'emissione globale E_n relativa alla superficie nera alla stessa temperatura (A.4)

$$\varepsilon = \frac{E}{E_n} \quad (A.4)$$

Per essere precisi è importante dare le definizioni di corpo nero e di emissione globale [1]:

- Una superficie viene detta nera quando, per la fascia di lunghezze d'onda delle radiazioni elettromagnetiche incidenti considerate, questa assorbe la totalità della potenza termica inviata, senza manifestare alcun segno di trasparenza o riflessione; il concetto di superficie nera è molto importante perché, riferita ad essa, le leggi che descrivono l'emissione dell'energia radiante possono essere formulate in modo esatto e semplice; si dimostra inoltre che, a parità di temperatura, nessuna superficie può irradiare una potenza maggiore di quella irradiata dalla superficie nera, che viene per questo definita anche "radiatore ideale".

- L'emissione globale E rappresenta la totale potenza specifica irradiata dal corpo materiale considerato in corrispondenza ad ogni punto della sua superficie perimetrale (A.5):

$$E = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{q_A}{\Delta A} = \frac{\partial}{\partial A} q_A \quad (A.5)$$

dove con q_A si indica il flusso radiativo emesso attraverso la porzione superficiale perimetrale del corpo di area dA , rispetto a tutte le lunghezze d'onda e a tutte le direzioni possibili di emissione.

Il parametro emissività è molto sensibile alle variazioni di temperatura e allo stato di finitura superficiale della porzione di area considerata per lo scambio termico; è possibile al riguardo fissare alcune regole di ordine generale per i diversi materiali^[1]:

- Le emissività dei conduttori metallici sono basse ed essenzialmente proporzionali alla temperatura assoluta: la costante di proporzionalità varia per i diversi metalli con la radice quadrata della resistività elettrica.
- Le emissività dei materiali non conduttori elettrici (in cui vanno inclusi anche gli ossidi metallici) sono molto più alte, e a differenza dell'emissività dei metalli, generalmente diminuiscono all'aumentare della temperatura: l'emissività dei refrattari a 1500°C è ridotta ad 1/3 circa del valore a 1000°C.
- Il valore di emissività dei materiali non metallici è in genere maggiore di 0.8 a temperatura ambiente; compreso tra 0.3 e 0.8 alla temperatura dei refrattari nei forni.
- L'emissività del ferro e dell'acciaio varia fortemente col grado di finitura e di ossidazione della superficie; superfici lucidate e non ossidate hanno emissività compresa tra i valori 0.03 e 0.045 a temperatura ambiente, e tra 0.4 e 0.7 ad alta temperatura (>1000°C); superfici ossidate e grezze hanno invece valori dell'emissività compresi tra 0.6 e 0.9 a temperatura ambiente, e tra 0.9 e 0.95 ad alta temperatura.

Con finitura superficiale si intende sia la rugosità della superficie (valore medio, forma e direzione delle asperità) del corpo che l'eventuale presenza di inclusioni estranee o zone chimicamente o fisicamente alterate. Una rugosità elevata e senza direzioni preferenziali aumenta l'emissività e la rende meno sensibile a variazioni di angolo di emissione. Ne consegue che non è sempre possibile stabilire univocamente l'emissività di un corpo: nel caso ci siano forti variazioni risulta più corretto parlare di emittanza in un dato punto, in una certa direzione, a una certa temperatura e a una data lunghezza d'onda.

Comunque una tipica semplificazione ingegneristica è di considerare che per una stessa superficie l'emissività e il coefficiente di assorbimento non dipendano dalla lunghezza d'onda, così che l'emissività sia una costante. Questa è nota come *ipotesi del corpo grigio*.

Quando si trattano superfici non nere le deviazioni dal comportamento di un corpo nero ideale sono determinate sia dalla struttura geometrica sia dalla composizione chimica, e seguono il principio per cui l'emissività uguaglia il coefficiente di assorbimento (principio conosciuto anche come Legge di Kirchhoff): in questo modo un oggetto che non assorbe tutta la luce incidente emetterà anche meno radiazione rispetto a un corpo nero. Nella Tabella A.1 sono riportati valori tipici di emissività di alcuni materiali ricavati sperimentalmente a diverse temperature mediante termografia [3]:

Materiale	Temperatura (°C)	Emissività ϵ
Acciaio laminato a freddo	93	0.8
Acciaio grezzo	1099	0.61
Acciaio lucido	538	0.14
Acciaio non ossidato	100	0.08
Acciaio ossidato	25	0.8
Acciaio 301 lucido	949	0.55
Acciaio 303 ossidato	1093	0.87
Acciaio 310 laminato	1149	0.81
Acciaio 316 lucido	949	0.66
Acciaio 321	427	0.32
Acciaio 321 lucido	816	0.49
Acciaio 321 semi-ossidato	427	0.76
Acciaio 347 ossidato	1094	0.91
Acciaio 350	427	0.27
Acciaio 350 lucido	982	0.35
Acciaio 446 lucido	816	0.37
Alluminio opaco	17	0.89
Alluminio laminato opaco	27	0.89
Alluminio laminato lucido	-	0.04
Ossido di alluminio	227	0.63
Allumina 10u	1010	0.3

Allumina 50u	1565	0.18
Allumina 100u	1010	0.5
Acqua	-	0.98
Grafite	510	0.98
Molibdeno	1093	0.18
Molibdeno ossidato	427	0.84

Tabella A.1: valori di emissività di alcuni materiali alle temperature di riferimento

Dai valori in tabella si evince come la formazione degli strati ossidati superficiali determinino un'incremento netto di emissività nei diversi materiali. Tale aumento risulta essere particolarmente vantaggioso nelle applicazioni termiche per lo smaltimento di potenze termiche, giacchè consente di migliorare lo scambio termico netto, a parità di geometria e temperatura dei corpi coinvolti dall'irraggiamento.

A.4 Influenza dell'emissività sulle temperature: modello teorico

E' possibile valutare l'influenza dell'emissività ϵ sulla temperatura massima teorica che può essere raggiunta dai corpi interessati da scambio termico per irraggiamento; in particolare, riferendoci allo studio termico eseguito nel collimatore, è possibile stimare la variazione della temperatura media superficiale raggiunta sui dischi di grafite in funzione dell'emissività della camera esterna in lega di alluminio (Al 6083) data una potenza termica da smaltire. Per poterlo fare ci si basa su un modello teorico semplificato che vede il sistema costituito da due cilindri concentrici, entrambi di lunghezza L (Figura A.1):

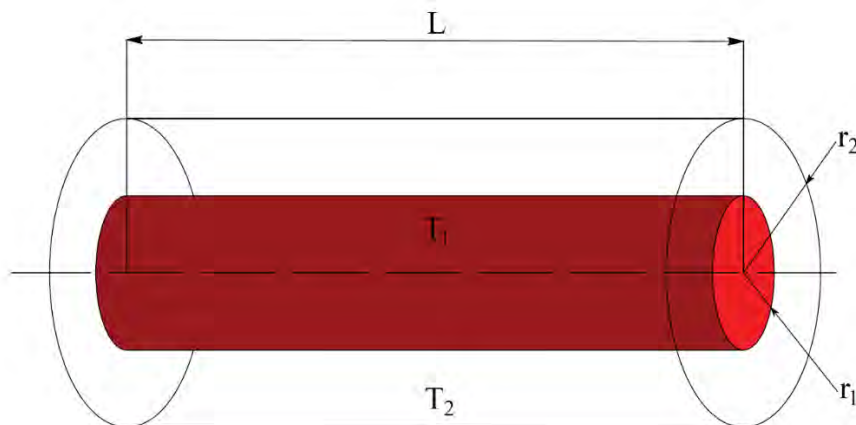


Figura A.1: schema del modello teorico considerato

- il cilindro interno di raggio r_1 rappresenta la superficie esterna dei dischi in grafite; in questo l'emissività viene considerata costante per semplificare il calcolo;
- il cilindro esterno di raggio r_2 rappresenta invece la superficie interna della camera in lega di alluminio.

Nel caso di due cilindri concentrici, ipotizzando che tutta la radiazione emessa dal cilindro interno 1 tenda ad incidere sulla superficie interna del cilindro esterno 2, quindi trascurando gli effetti di bordo, si ha che il fattore di forma F_{ij} tende all'unità; in riferimento all'equazione generale 1 nel caso in esame, avendo che il rapporto delle aree equivale al rapporto dei raggi, il flusso termico scambiato in questo caso risulta (A.6):

$$q_{12} = \frac{A_1 \cdot \sigma_s \cdot (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \left(\frac{r_1}{r_2}\right) \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right)} \quad (A.6)$$

dove:

q_{12} = flusso termico scambiato;

A_1 = area del cilindro interno;

ε_1 = emissività emisferica globale del cilindro interno;

ε_2 = emissività emisferica globale del cilindro esterno;

σ_s = costante di Stefan-Boltzmann ($5.67051 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$);

T_1 = temperatura assoluta del cilindro interno;

T_2 = temperatura assoluta del cilindro esterno;

Scopo del calcolo è quello di valutare, per una fissata potenza termica da smaltire, come varia la temperatura del cilindro interno T_1 in funzione dell'emissività ε_2 del cilindro esterno, una volta che è stata fissata una temperatura T_2 uniforme su tutta la superficie di quest'ultimo; per tale temperatura si fa riferimento alla temperatura massima raggiunta dall'acqua nel circuito di raffreddamento in prossimità dello scarico (35°C).

Dalla relazione precedente si può ricavare l'espressione della temperatura T_1 del cilindro interno, che risulta essere (A.7):

$$T_1 = \sqrt[4]{\left\{ \frac{q_{12}}{A_1 \cdot \sigma_s} \cdot \left[\frac{1}{\varepsilon_1} + \left(\frac{r_1}{r_2}\right) \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right) \right] + T_2^4 \right\}} \quad (A.7)$$

DATI:

$$q_{12} = 3000 \text{ W}$$

$$r_1 = 0.048 \text{ m}$$

$$r_2 = 0.050 \text{ m}$$

$$L = 0.150 \text{ m}$$

$$\varepsilon_{1(1000^\circ\text{C})} = 0.815$$

$$T_2 = 35^\circ\text{C} = 308.15 \text{ K}$$

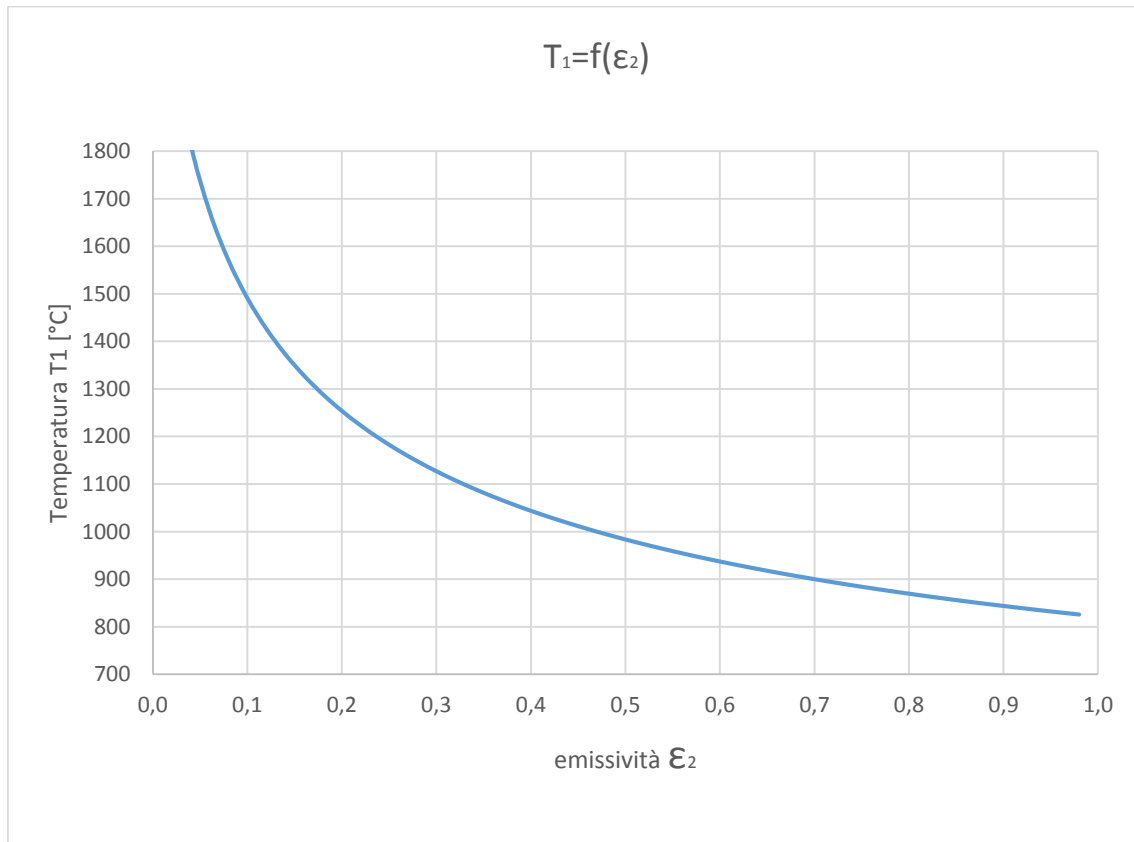
RISULTATI:

Figura A.2: andamento della temperatura T_1 in funzione dell'emissività ε_2

Dalla Figura A.2 si evince come l'emissività della camera esterna influisca in maniera significativa sulla temperatura teorica dei dischi in grafite, in particolare la sensibilità alle variazioni di temperatura risulta essere massima per bassi valori di emissività ε_2 e cala per valori via via più elevati. Nel caso in esame, per la lega di alluminio considerata si può considerare in primo luogo un valore di riferimento di emissività $\varepsilon_2=0.06$; inoltre l'effetto dello sporco prodotto in prossimità della superficie della camera alle alte temperature determina un incremento dell'emissività stessa.

Dunque, tenendo conto di questo aspetto, considerando per esempio un valore indicativo $\epsilon_2=0.3$, si nota un netto calo di temperatura da parte dei dischi ($\Delta T= 670^\circ C$), giustificato dal fatto che viene favorito lo scambio termico verso l'esterno e dunque migliora lo smaltimento del calore prodotto. Analoghe considerazioni sono state fatte per la faraday cup, ovvero riferendoci a un modello teorico semplificato che vede il sistema costituito da due cilindri concentrici che scambiano una potenza termica netta $P= 8 kW$, ci si propone di valutare l'evoluzione della temperatura della faraday cup al variare dell'emissività del tubo esterno in lega di alluminio. In particolare sono state confrontate diverse casistiche relative alle diverse soluzioni preliminari che sono state proposte in corso di progettazione; i rispettivi dati sono riassunti nella Tabella A.2:

DATI:

$$q_{12} = 8000 \text{ W} \quad T_2 = 35^\circ C = 308.15 \text{ K}$$

Caso	FARADAY-CUP			TUBO ESTERNO			L [m]
	Materiale	$\epsilon_1(2000^\circ C)$	r_1 [m]	Materiale	ϵ_2	r_2 [m]	
A	C	0.855	0.033	Al 6083	VAR	0.120	0.200
B	Ta	0.258	0.036	Al 6083	VAR	0.120	0.160
C	C	0.855	0.032	Al 6083	VAR	0.120	0.160
D	C	0.855	0.042	Al 6083	VAR	0.120	0.160

Tabella A.2: Dati di progetto per le casistiche esaminate

RISULTATI:

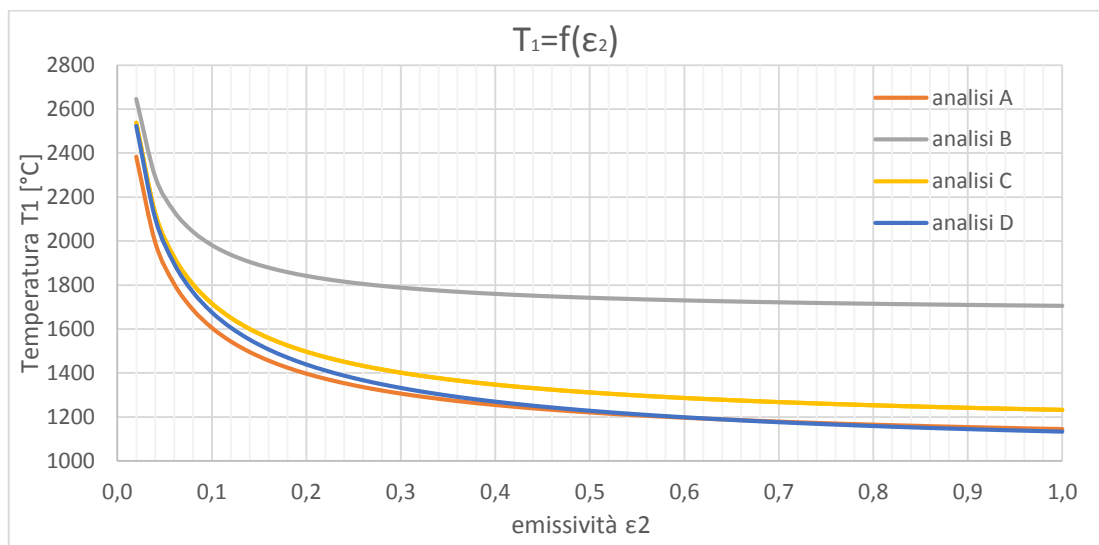


Figura A.3: andamento delle temperature nei diversi casi

Ancora una volta il parametro emissività influenza in modo significativo lo scambio termico radiativo; inoltre nella Figura A.3 si notano differenti andamenti di temperatura per i diversi casi considerati. In particolare nell'analisi B si osservano temperature complessivamente maggiori; tale aspetto è legato alla minor emissività associata al tantalio, pertanto l'utilizzo di questo materiale risulta essere sfavorevole nei confronti dello scambio termico laddove l'obiettivo sia quello di smaltire il calore generato, a differenza della grafite che invece permette di scambiare potenza termica con maggior efficienza e questo giustifica le temperature minori raggiunte nella faraday-cup (analisi A, C e D). Inoltre le temperature elevate che si possono osservare nell'analisi C rispetto alle analisi A e D sono dovute alla minor superficie coinvolta nello scambio termico per irraggiamento e dunque, le variazioni associate a queste ultime 3 analisi sono da imputare esclusivamente a fattori geometrici.

A.5 Trattamenti superficiali

Nei paragrafi seguenti vengono descritti i trattamenti superficiali necessari ad inalzare il valore di emissività globale nelle leghe di alluminio, nonché parametro determinante per lo smaltimento delle potenze termiche in gioco nei flussi radiattivi.

A.5.1 Anodizzazione

L'anodizzazione (detta anche ossidazione anodica) è un processo elettrochimico non spontaneo mediante il quale uno strato protettivo di ossido di alluminio si forma sulla superficie del materiale trattato. Nel materiale avviene una vera e propria trasformazione superficiale: il metallo nudo reagisce con l'ossigeno che si sviluppa durante il processo di elettrodeposizione e forma ossido di alluminio o allumina. Quando una corrente elettrica fornita da un circuito elettrico esterno (catodo) viene fatta circolare attraverso una cella elettrolitica nella quale l'alluminio immerso in una soluzione acquosa, funge da anodo (polo positivo), gli ioni negativi (anioni) formati dalla dissociazione soprattutto dell'ossigeno, migrano, per attrazione tra le cariche opposte, verso l'anodo positivo, l'alluminio, al quale cedono le cariche elettriche che trasportano lo strato depositato sulla superficie risulta essere uno strato di ossido di alluminio formatosi tramite processo elettrolitico (Figura A.4).

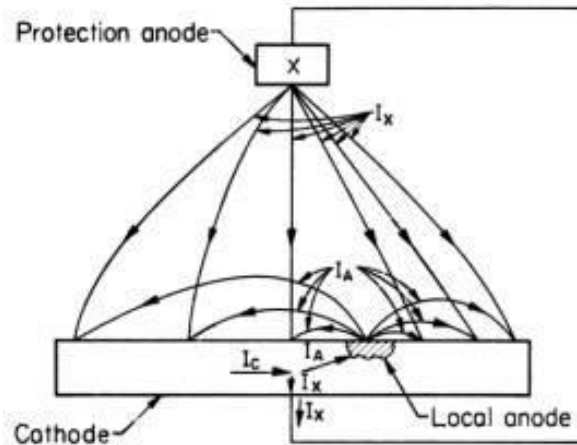


Figura A.4: schema del processo di anodizzazione

Lo strato di materiale formato è variabile (normalmente $10\ \mu\text{m}$), ed esistono due tipi di ossidazione anodica: quella sottile e l'anodizzazione dura. L'anodizzazione sottile comporta uno strato variabile dai 5 ai 20 micron, e quella semi-dura, che comporta uno strato dai 20 ai 30 micron [4].

I trattamenti chimici di conversione superficiale hanno un ruolo molto importante nella tecnologia dell'Alluminio, ma i risultati ottenibili sono globalmente inferiori a quelli ottenuti con il processo di anodizzazione per qualità di finitura, range di applicazioni e protezione alla corrosione [5]. I ricoprimenti ottenuti per via elettrolitica sono superiori anche dal punto di vista meccanico e di resistenza all'abrasione. La natura porosa dei film di ossidi permette anche la produzione di ricoprimenti colorati tramite la deposizione di pigmenti organici e metallici. Quando una corrente elettrica è fatta circolare attraverso una cella elettrolitica nella quale l'Alluminio funge da anodo, gli anioni migrano verso l'anodo, al quale cedono le cariche elettriche che trasportano, e si depositano su di esso. In soluzione acquosa gli anioni sono costituiti in gran parte da Ossigeno, il quale si combina con l'Alluminio. In funzione della solubilità delle specie chimiche che si depositano sul metallo si possono avere quattro condizioni distinte:

- Prodotti insolubili nell'elettrolita: formano uno strato molto adeso e in pratica elettricamente non conduttivo sull'anodo. La crescita del film procede finché la resistenza dello strato non impedisce la circolazione della corrente. Gli spessori degli strati prodotti sono normalmente molto sottili e compatti. Sono ottenuti in soluzioni di sali di borati o tartarati, con l'applicazione di elevati campi elettrici, soprattutto per la protezione di substrati di piccolissimo spessore.

- Prodotti poco solubili nell'elettrolita: formano uno strato ad elevata adesione, isolante se asciutto. In questo caso la crescita del film avviene in contemporanea alla sua parziale dissoluzione, portando alla formazione di porosità che garantisce la circolazione della corrente fino ad un valore limite, al quale il tasso di crescita dell'ossido uguaglia quello della sua dissoluzione e la crescita perciò si arresta. Lo spessore massimo ottenibile dipende da molti fattori, tra i quali la natura dell'elettrolita e la geometria del campo applicato. E' importante notare che la reazione di anodizzazione avviene all'interfaccia Alluminio – Ossido di Alluminio, ovvero il film cresce dall'interno, con conseguente consumo di materiale del substrato, che diventa via via più sottile. Tuttavia le dimensioni totali del manufatto aumentano a causa del maggior volume occupato dallo strato d'ossido. Questa condizione è impiegata nei processi industriali che operano con acido cromico, solforico od ossalico.
- Prodotti di formazione moderatamente solubili: in queste condizioni il risultato dell'operazione è di una pulizia elettrolitica della superficie del metallo, simile nei risultati ad un lavaggio chimico, e generalmente utilizzata come trattamento di preparazione ad operazioni successive.
- Prodotti di formazione solubili: in questa condizione il metallo si dissolve finché non satura la soluzione; avviene in acidi e basi forti. Ne deriva perdita degli strati superficiali dello stesso, che una volta riportato in ambiente naturale si ossida e passiva molto velocemente.

Tipologie di processi di anodizzazione

Nonostante gli innumerevoli elettroliti riportati in letteratura, solo pochi sono di importanza industriale e sono principalmente i processi con acido cromico, solforico od ossalico. Il primo ad essere introdotto è stato il processo con acido cromico, introdotto da Bengough e Stuart nel 1923 per la protezione del Duralluminio usato negli idrovolanti. E' un processo molto usato in Inghilterra ed è particolare per l'andamento del voltaggio nella cella, che varia nel tempo, con specifiche dettate dal Defence Specification DEF 151. E' un processo piuttosto complesso, ma una modificazione americana comporta l'uso di un voltaggio costante, facilitando la conduzione industriale del processo.

Il processo più comune è comunque quello che utilizza acido solforico, presentato nel 1927 da Gower e O'Brien, che oggi viene impiegato con molte varianti e accorgimenti diversi. Il processo ad acido ossalico è stato sviluppato in Giappone e utilizzato per due decenni anche in Germania. Una modifica apportata in Svizzera prevede l'uso di una soluzione di acido ossalico contenente Titanio, Zirconio o Tallio per ottenere un aspetto superficiale non metallico, ma più simile ad una porcellana. I principali parametri di processo nell'anodizzazione dell'Alluminio sono riportati nella

Tabella A.3.

Elettrolita	Acido Cromico	Acido Solforico	Acido Ossalico
Tipo di soluzione acquosa	CrO ₃ , 2.5 – 3 %	H ₂ SO ₄ , 20%	(COOH) ₂ , 5 – 10%
Densità di corrente (A/dm ²)	0.1 - 0.5 (cc)	1 – 2 (cc)	1 – 2 (cc)
Voltaggio (V)	0 – 40	14 – 22	50 – 65
Temperatura (°C)	40	18 – 25	30
Tempo di trattamento (min)	20 – 50	10 – 60	10 – 30
Colore	Grigio opaco	Senza colorazione	Senza colorazione
Spessore del Film (µm)	2 – 15	5 – 35	15
Applicazioni	Protezione	Protezione	Protezione, decorativo
Caratteristiche		Molto duro	

Tabella A.3: Parametri di processo dell'anodizzazione dell'alluminio

Bisogna anche menzionare il processo per la produzione di film più spessi, chiamato Hard Anodizing, condotto a bassa temperatura in acido solforico al 7%, con un voltaggio applicato di 120 V e una corrente circolante che varia dai 2 ai 5 A/dm². Il trattamento viene prolungato nel tempo, fino anche a 3 o 4 ore, per permettere al film di raggiungere spessori dell'ordine dei 250 µm. Il procedimento di anodizzazione ha quindi funzioni sia protettive che decorative, ma è anche la base per applicazioni di vernici organiche e elettrodeposizioni di varia natura che trovano migliore adesione sul substrato creato da questo processo.

Composizione dell'ossido anodico

La composizione dell'ossido superficiale dipende largamente dal tipo di elettrolita utilizzato, ma anche molto dalle condizioni di processo. Generalmente lo strato di ricoprimento è composto di ossido di Alluminio, sia nella forma cristallina di $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ che in stato di materiale amorfo. Lo strato d'ossido anodico si compone di due parti, la zona porosa esterna, che cresce su di uno strato profondo, molto più sottile, denso e dielettricamente compatto, chiamato strato barriera (Barrier Layer). Il suo spessore è al massimo il 2% dello spessore dell'intero strato e la sua natura è la stessa dell'ossido naturale (Figura A.5).

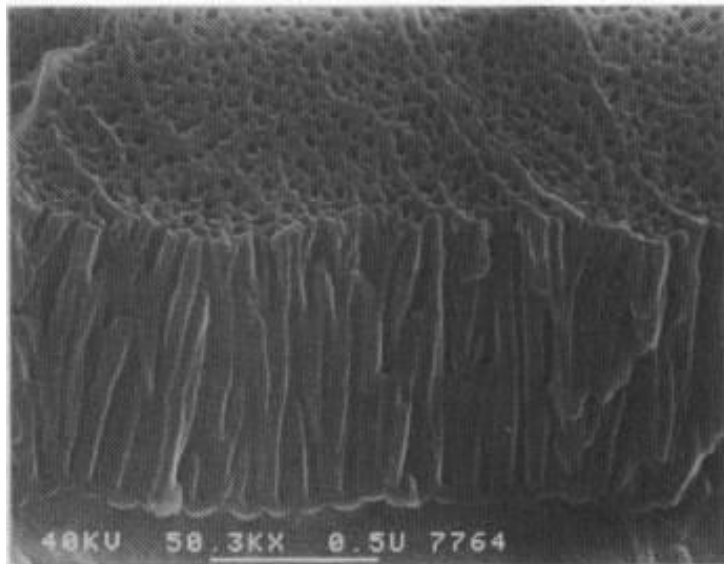


Figura A.5: *particolare dello strato superficiale di ossido anodico*

Durante il processo di anodizzazione è la parte che si forma per prima e lo spessore varia linearmente con il voltaggio applicato crescendo, fino al limite di dissoluzione, di circa 14\AA per Volt applicato; nonostante sia intrinsecamente non conduttivo né poroso, la corrente rimane in circolazione nel circuito in virtù del piccolissimo spessore di questo strato. A seconda dei processi impiegati, il barrier layer possiede le caratteristiche riportate in Tabella A.4.

Trattamento	Temperatura (°C)	Spessore film (Å)	Struttura e Composizione
Aria secca	20	10 – 40	Al ₂ O ₃ amorfa
Aria secca	500	20 – 40	Al ₂ O ₃ amorfa + η-Al ₂ O ₃
Ossigeno	20	10 – 20	Al ₂ O ₃ amorfa
Ossigeno	500	100 – 160	Al ₂ O ₃ amorfa + η-Al ₂ O ₃
Aria umida	20	4 – 10	Boemite + Idrargillite
Aria umida	300	8 – 10	
Acqua bollente	100	2 – 15	Boemite
Autoclave	150	10	Boemite
Ossidazione chimica	70 – 100	2 – 8	Boemite + ione di processo
Anodizzazione normale	18 – 25	100 – 150	Al ₂ O ₃ amorfa + ione di processo
Anodizzazione profonda	-3 – +6	300 - 400	Al ₂ O ₃ amorfa + ione di processo

Tabella A.4: caratteristiche del barrier layer

L'investigazione sullo spessore del barrier-layer può essere condotta attraverso misurazioni sulla rapidità di variazione della corrente circolante al variare del potenziale applicato; infatti la corrente rimane pressoché costante fintantoché il potenziale applicato non supera lo spessore dielettrico dello strato, ma una volta raggiunto quel valore la corrente segue molto rapidamente le variazioni del potenziale.

Il tasso di crescita del barrier-layer è molto veloce nei primi cinque secondi di trattamento, in seguito il tasso di dissoluzione eguaglia quello di formazione e perciò lo spessore rimane costante.

La superficie dello strato a contatto con l'elettrolita è tuttavia in costante modificazione, nel tentativo di raggiungere uno stato di equilibrio più stabile possibile. Questa superficie è perciò sede dei processi di accrescimento dello strato, attraverso meccanismi di trasporto ionico, molto sensibili alle condizioni del pH all'interfaccia e al prodotto di solubilità degli ossidi in formazione.

La struttura dello strato di barriera è quasi sempre completamente amorfa, anche se in particolari processi di laboratorio sono stati prodotti strati contenenti isole di γ - Al_2O_3 cristallina, ottenute con potenziali superiori ai 100 V . Lo strato esterno presenta caratteristiche completamente diverse. È caratterizzato da una struttura microporosa, a crescita colonnare, risultante, secondo le più recenti teorie, da disomogeneità del campo elettrico che si possono generare sulla superficie dello strato barriera. Tali fluttuazioni modificano la direzione delle linee di corrente, che a loro volta promuovono una dissoluzione e deposizione preferenziale, con l'effetto di produrre una struttura curva, sede dei processi di accrescimento locale.

Effetto delle condizioni operative

Le caratteristiche della struttura chimico-fisica dello strato elettro-ossidato dipendono dal tipo di elettrolita impiegato, dalla sua concentrazione, dal tempo di trattamento ma non in particolar modo dalla densità di corrente circolante. Anche la temperatura del bagno generalmente non influenza le caratteristiche del film (Tabella A.5).

Elettrolita	Concentrazione	Temp.(°C)	Spessore unitario (Å/Volt)	Ø pori (µm)
Ac. Fosforico	4 %	25	11.9	330
Ac. Ossalico	2 %	25	9.7	170
Ac. Cromico	3 %	40	10.9	240
Ac. Solforico	15 %	10	8	120

Tabella A.5: principali parametri che influenzano le caratteristiche dello strato ossidato

A potenziale e temperatura costante, lo spessore unitario dell'ossido nel barrier layer raggiunge il valore massimo di 14 Å/Volt a concentrazioni di elettrolita molto basse. All'aumentare della concentrazione il tasso di crescita diminuisce e diviene pressoché nullo a concentrazioni superiori al 90%. Quest'effetto non è dovuto al tasso di dissoluzione perché altri studi hanno dimostrato che la velocità di dissoluzione ionica è massima al 25% di concentrazione.

In prima approssimazione, la corrente ionica circolante tra metallo ed elettrolita è una funzione esponenziale dell'intensità del campo elettrico applicato secondo la relazione (A.8)

$$i_+ = K \frac{dx}{dt} = \alpha e^{\beta F} \quad (A.8)$$

nella quale x è la concentrazione dell'elettrolita, F è l'intensità del campo elettrico, k , α e β costanti; questa relazione è stata adottata da Verwey e tiene conto della velocità alla quale gli ioni migrano da una posizione interstiziale all'altra.

Considerando nello specifico i moti di spostamento che avvengono in superficie, Mott ha ottenuto una relazione che porta a risultati quasi identici, ma partendo da considerazioni di natura quanto-meccanica (A.9):

$$i_+ = Nnq_1 e^{-\frac{U}{kT}} * e^{aq_1 \frac{F}{kT}} \quad (A.9)$$

nella quale N è la densità di atomi in grado di partecipare al movimento, espressa in atomi/cm², n la frequenza delle vibrazioni atomiche, q_1 è la carica posseduta da ogni ione, U lo spessore e F il campo elettrico. Ulteriori modificazioni sono state proposte in vari studi, ma l'andamento della corrente è simile in quasi tutti i casi, in relazione esponenziale con il voltaggio (*Figura A.6*).

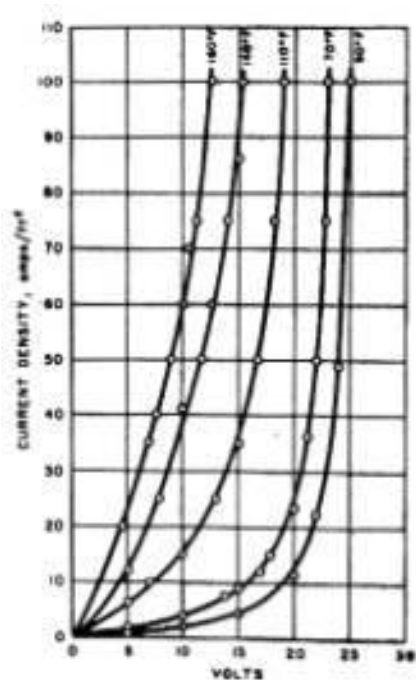


Figura A.6: andamento della corrente ionica in funzione del voltaggio

Porosità

Come lo spessore, anche la porosità del ricoprimento varia con la velocità di dissoluzione e di crescita del film, che a loro volta dipendono dalle condizioni operative e dall'elettrolita. Probabilmente il fattore singolo più importante è il pH della soluzione. Infatti, mentre una soluzione con acido fosforico (pH acido) produce uno strato molto spesso e poroso, una soluzione contenente fosfati genera uno strato compatto e molto sottile (*Figura A.7*).

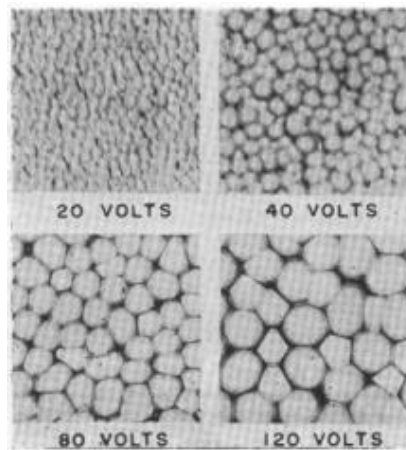


Figura A.7: particolari della porosità dello strato anodizzato per diversi voltaggi

Il massimo diametro dei pori si ottiene industrialmente con un'elettrolita a base di acido fosforico, e questa condizione superficiale è ottimale per successivi trattamenti di elettrodeposizione.

Pori via via più piccoli si ottengono con acido ossalico e solforico, mentre l'acido cromico, in virtù della bassa solubilità dell'ossido formato, produce pori molto piccoli e dispersi.

I pori si trovano al centro di una struttura planare a celle esagonali, con base di forma quasi emisferica sullo strato barriera, create dalla crescita in direzione radiale delle pareti dei pori stessi. Inizialmente, infatti, queste celle si formano in singole file lungo i bordi grano, lungo i quali lo strato barriera offre meno resistenza al passaggio della corrente. A questo punto comincia la crescita longitudinale delle celle, in direzione del campo elettrico applicato, dovuta al trasporto di Ossigeno a causa dei gradienti di concentrazione e temperatura che si instaurano tra il fondo della cella e la superficie esterna a contatto con l'elettrolita. In seguito si raggiunge una situazione di maggior ordine con celle d'uguale diametro e lunghezza.

Le dimensioni delle celle sono di particolare importanza nel determinare la porosità e altre caratteristiche del rivestimento anodico. In generale, all'aumentare del voltaggio applicato, la dimensione delle celle aumenta e perciò il numero di pori diminuisce (Tabella A.6)

Elettrolita	Volt	Densità dei pori (10⁹ pori/cm²)
Acido Solforico, 15%, 10°C	15	76
	20	52
	30	18
Acido Ossalico, 2%, 25°C	20	35
	40	11
	60	6
Acido Cromico, 3%, 50°C	20	22
	40	8
	60	4
Acido Fosforico, 4%, 25°C	20	19
	40	8
	40	4

Tabella A.6: densità dei pori in funzione del voltaggio applicato per diverse soluzioni

Nello sviluppo dell'ossido anodico i pori crescono in dimensioni: il diametro delle celle e dei pori rimane proporzionale al voltaggio, mentre le caratteristiche della base delle celle sono legate all'equilibrio che si instaura tra la crescita per deposizione e la dissoluzione, che può anche essere accelerata da fenomeni di riscaldamento locale.

Comportamento delle varie leghe

Generalmente quasi tutte le leghe d'alluminio mostrano un buon comportamento durante il decorso del processo di anodizzazione (Tabella A.7), anche se la tipologia di trattamento di formatura utilizzato influenza la microstruttura degli strati superficiali e perciò anche il risultato dell'anodizzazione.

Per questo motivo ad esempio le leghe al Silicio – serie 4xxx - sono meno adatte a questo tipo di trattamento data la composizione ricca in Silicio degli strati superficiali. Gli elementi di lega hanno anche un effetto sull'aspetto del prodotto anodizzato, con comportamenti diversi da metallo a metallo. Il fattore determinante è l'omogeneità della lega: un incremento dei costituenti eterogenei ha una grande influenza sulla riflettività, debole sul colore del film. L'effetto della dimensione dei grani sulla qualità dell'anodizzazione varia con la lega in questione e il trattamento applicato. In generale al termine del processo si possono rivelare dei pattern visivi superficiali collegati alla distribuzione dei composti intermetallici presente. Nel caso di pre-trattamenti chimici, come ad esempio un etching superficiale abbastanza profondo, si potrebbero evidenziare anche i bordi grano; nel caso di una successiva lavorazione per deformazione plastica la superficie avrebbe un'apparenza a buccia d'arancia. Per queste ragioni si preferisce applicare il trattamento di anodizzazione solo con grani di dimensioni inferiori ai 100µm.

Anche la storia termica del manufatto influisce sull'aspetto dell'ossido superficiale. Il trattamento di invecchiamento artificiale, prolungato fino al picco di durezza della lega (T6), conferisce generalmente un'apparenza satinata; diversamente il materiale overaged (T52) o invecchiato naturalmente (T4) presenta una superficie più speculare. L'effetto principale degli elementi di lega si manifesta nella finitura superficiale, diretta conseguenza delle interazioni chimiche che si verificano all'interfaccia ossido – elettrolita.

- Ferro: l'effetto principale è quello di scurire notevolmente la superficie ossidata, che passa da una luminosità diffusa a colori tra il grigio scuro e il nero.
- Silicio: ha un comportamento benefico nei confronti del Ferro, ma possiede un'elevata solubilità nelle soluzioni di trattamento.
- Titanio: possiede effetti simili al Ferro, ma produce una grana molto fine sulla superficie del manufatto.
- Magnesio: ha un effetto sbiancante, dovuto all'indice di rifrazione molto simile a quello dell'ossido di Alluminio.
- Rame: a concentrazioni superiori al 3% produce discontinuità cromatiche sulla superficie, l'anodizzazione decorre con fatica e il rivestimento è molto più tenero e meno protettivo.
- Manganese: a concentrazioni minori dell'1% produce ossidi molto brillanti se sottili, che diventano via via più scuri all'aumentare dello spessore o della concentrazione.

- Zinco: forma uno strato molto protettivo, fino al 5% di concentrazione, sia privo di colorazione, che ad apparenza marmorea.
- Cromo: se presente a concentrazioni superiori allo 0,3% produce una colorazione giallastra.

Lega	Anodizzazione di protezione	Anodizzazione e colorazione	Anodizzazione profonda
1080	Ottimo	Ottimo	Ottimo
1050	Ottimo	Molto buono	Ottimo
1200	Molto buono	Molto buono	Ottimo
2011	Medio buono	Medio buono	Buono
2014	Medio	Medio	Buono
2031	Medio	Medio	Buono
3103	Buono	Buono	Buono
3105	Buono	Buono	Buono
4043	Medio	Medio	Buono
5005	Ottimo	Molto buono	Ottimo
5056	Buono	Buono	Ottimo
5083	Buono	Buono	Buono
5154	Molto buono	Molto buono	Ottimo
5251	Molto buono	Molto buono	Ottimo
5454	Molto buono	Molto buono	Ottimo
6061	Molto buono	Buono	Molto buono
6063	Ottimo	Molto buono	Ottimo
6082	Buono	Buono	Buono
6463	Molto buono	Molto buono	Molto buono
7020	Buono	Buono	Buono

Tabella A.7: comportamento di alcune leghe nel processo di anodizzazione

Generalmente si opera determinando direttamente la densità di corrente necessaria, e di conseguenza che il voltaggio applicato per avere un miglior controllo della velocità di ricoprimento. Le diverse leghe richiedono differenti voltaggi per far circolare la stessa densità di corrente.

La corrente richiesta per unità di spessore del film dipende principalmente dall'effetto degli elementi di lega sulla conduttività dello strato stesso. Leghe allo Zinco o Magnesio possiedono alte conduttività, e perciò produrranno a parità di corrente circolante film più spessi di leghe al Rame. In figura è mostrato il rapporto tra il voltaggio di cella da applicare e il tempo necessario per ottenere un film di un certo spessore, con una densità di corrente di $1,3A/dm^2$ in acido solforico al 15%. Leghe diverse si comporteranno perciò in modo diverso; è interessante anche notare che la curva dell'Alluminio puro si posiziona circa a metà della serie. E' possibile perciò distinguere le leghe in due grandi gruppi:

Gruppo 1	Lega eterogenea	Basso voltaggio	Al – Cu
	Lega omogenea	Alto voltaggio	Al – Cu – Mg
Gruppo 2	Lega eterogenea	Alto voltaggio	Al – Mg
	Lega omogenea	Basso voltaggio	Al – Mg – Si e Al – Mg - Zn

Lo spessore massimo ottenibile dipende, oltre che dalla durata del trattamento e dalla corrente impiegata, anche dalla composizione della lega. Generalmente alti spessori si possono ottenere con il metallo puro, mentre con leghe da trattamento termico, ad alto contenuto di alliganti, si ottengono spessori molto minori. Con leghe al Magnesio si nota, dopo un massimo, una riduzione di spessore imputabile alla solubilità degli ossidi formati. Infatti, mentre nei primi secondi di trattamento un aumento della concentrazione di Magnesio provoca un aumento del tasso di crescita dell'ossido, successivamente predomina la dissoluzione degli strati formati e quindi un rallentamento di crescita e successivamente diminuzione di spessore.

Pretrattamenti, ancoraggio, realizzazione pratica

L'anodizzazione richiede un alto grado di pulizia della superficie da trattare, poiché residui di oli o grassi di lavorazione, ma anche solo impronte digitali da manipolazione diminuiscono l'efficacia della soluzione elettrolitica e producono superfici irregolari. Generalmente i manufatti da trattare vengono puliti mediante trattamenti con vapore o emulsioni sgrassanti, spesso seguiti da pulizia finale in soluzione alcalina. Quest'ultima fase è necessaria per rimuovere eventuali film impuri di ossidi che si possono depositare durante le lavorazioni precedenti.

L'operazione di pulizia deve essere condotta con attenzione, evitando un eccessivo prolungamento del trattamento che renderebbe la lega più suscettibile alla corrosione sotto stress. La fase successiva è quella di ancoraggio dei manufatti da trattare su appositi supporti che hanno la duplice funzione di sostegno meccanico e di contatto elettrico.

La scelta della tipologia di ancoraggio è vincolata da molti fattori. In primo luogo, si deve garantire la resistenza meccanica della struttura, che si trova in esercizio in condizioni notevolmente drastiche. La soluzione elettrolitica è, infatti, molto aggressiva nei confronti della maggior parte dei metalli da costruzione, e perciò la scelta dei materiali con cui realizzare i supporti è vincolata da queste duplici considerazioni (Tabella A.8).

	Alluminio	Rame	Bronzi	Titanio
Lavorabilità	Buona	Buona	Media	Difficoltosa
Formabilità	Trattamenti particolari	Buona	Media	Scarsa
Resistenza a trazione	Media	Buona	Eccellente	Buona
Peso	Troppo leggero	Buona	Media	Buona
Comportamento elastico	Creep delle molle	Buona	Scarsa	Eccellente
Conduttività elettrica	Media	Eccellente	Scarsa	Buona

Tabella A.8: caratteristiche di alcuni materiali impiegati per la realizzazione dei supporti

Inoltre la struttura di supporto non deve assorbire troppa corrente a scapito dei manufatti, garantendo allo stesso tempo un buon contatto elettrico. I punti di contatto devono essere scelti con accuratezza, generalmente in zone non in vista, poiché in tali zone non si svilupperà il ricoprimento anodico. La quantità dei punti di contatto dipende in primo luogo dalla necessità di mantenere il bloccaggio durante tutto il trattamento, ma anche dalla considerazione che ogni punto non sia percorso da più di 20A per evitare surriscaldamenti localizzati che modificano le condizioni operative (Figura A.8).

Nella prassi industriale questi supporti sono costruiti, nella parte strutturale, con la stessa lega di Alluminio da anodizzare – quando questo è possibile - adeguatamente protetta con vernici o film polimerici (PVC,PE), mentre i contatti elettrici e la bulloneria di fissaggio sono in Titanio.

Con questo sistema ad esempio è possibile utilizzare gli stessi racks per circa 1000 cicli di trattamento condotti in acido solforico. L'uso di Titanio è invece sconsigliato nei trattamenti con acido cromico.

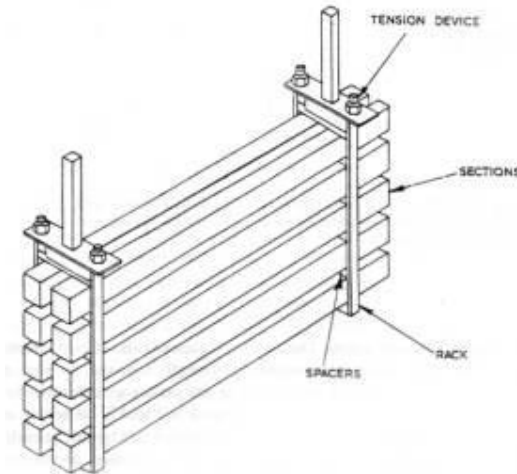


Figura A.8: particolare della struttura di supporto adottata

I supporti devono garantire anche un adeguato spazio tra i manufatti per consentire la corretta circolazione dell'elettrolita. Particolari problemi si verificano nel caso di forme lunghe e cave, come profilati a contorno chiuso. Infatti la disposizione del campo elettrico all'interno della sezione del profilato è tale da non favorire l'ossidazione anodica interna. Una regola operativa usata dagli anodizzatori, è di considerare come area da anodizzare – grandezza legata alla corrente da mantenere in circolazione – quella totale del manufatto addizionata di circa 1/3 dell'area interna. Tuttavia, nel caso di forme cave a geometrie più complesse è necessario ricorrere a catodi aggiuntivi posizionati nei punti chiave di tali cavità. Per quanto riguarda i materiali usati per la costruzione delle vasche, si utilizzano con successo strutture in acciaio adeguatamente isolate elettricamente, rivestite internamente con pellicole polimeriche, come Neoprene, PVC o PE.

La corrente elettrica viene mantenuta in circolazione mediante l'uso di rettificatori, di solito operanti a 24 V, ma anche a 50-70 V, accoppiati a tiristori, dispositivi in silicio a stato solido, che permettono un immediato e preciso controllo delle condizioni operative. Negli ultimi anni si stanno affermando processi che utilizzano corrente alternata, anche con forme d'onda pulsanti, soprattutto quando sono richieste alte densità di corrente come nel trattamento di leghe particolari, difficilmente anodizzabili con i normali processi.

Con la corrente alternata si ottengono ritmi di crescita più alti senza così il pericolo di incorrere nel fenomeno del Burning. Quest'effetto si manifesta con una rottura e dissoluzione locale del film di passività causata da un innalzamento locale della temperatura dell'elettrolita in combinazione con un aumento puntuale della densità di corrente. Il risultato di questo fenomeno è la formazione di fori, più o meno estesi, sulla superficie del manufatto.

Questo fenomeno si manifesta quindi più di frequente nella produzione di rivestimenti ad elevato spessore, in quanto si utilizzano elevati voltaggi e densità di corrente. Studi condotti in Giappone hanno evidenziato come il fenomeno del Burning non si manifesti utilizzando corrente alternata.

Quando lo spessore del ricoprimento raggiunge il valore desiderato, spesso si opera una fase di sigillazione della porosità, ottenuta mediante immersione in acqua calda o vapore, che opera un'idratazione dell'allumina superficiale. L'effetto di questa operazione è quello di rendere più compatta e uniforme la superficie, rendendola impermeabile, garantendo una maggior durata e miglior aspetto superficiale. L'operazione di sigillazione può essere preceduta anche da una fase di colorazione mediante pigmenti dispersi in fase organica.

L'automatizzazione del processo industriale passa perciò attraverso un ciclo di lavorazione che può essere scomposto in tre fasi principali (Figura A.9):

- Pulizia: comprende tutte le sottofasi di lavaggio basico e/o acido, seguite dai rispettivi risciacqui in acqua calda e fredda.
- Anodizzazione: il processo più comune opera con acido solforico al 15%, 12 A/ft², 18-24 V, alla temperatura di 20 °C per 10-60 minuti; questo rivestimento è di solito colorato con prodotti organici o deposizione di metalli e offre un'ampia gamma di applicazioni. Con acidi organici: si usa una soluzione di 90-100 g/litro addizionata di una piccola quantità di acido solforico per incrementare la conduttività; si opera a temperatura ambiente, con 24 A/ft², fino a 75V; produce rivestimenti di colore da ambrato, bronzo a nero, con un'ottima resistenza agli agenti atmosferici.
- Post-processing: Sigillazione e/o Elettrocolorazione.

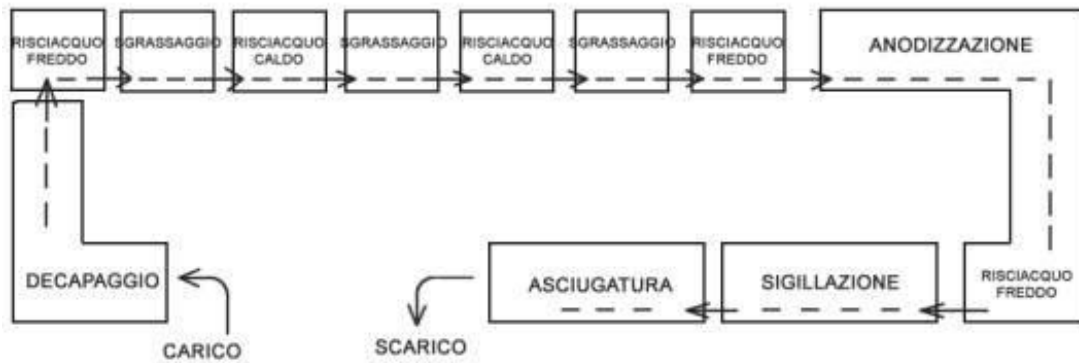


Figura A.9: schema a blocchi del processo di anodizzazione

A.5.2 Alumite

L'alumite è un trattamento galvanico unico per leghe di alluminio che offre eccezionali proprietà di irraggiamento di calore a infrarossi [6]. Uno speciale trattamento superficiale destinato a manufatti in alluminio permette di ottenere lamiere o altre forme con caratteristiche termiche ineguagliabili. Grazie a questo trattamento, denominato Alumite, la superficie del metallo migliora la sua durezza, diventa resistente a picchi istantanei di temperatura molto elevati, oppone una minor resistenza all'attrito e quindi aumenta la resistenza all'usura, e acquista delle proprietà termiche molto interessanti, soprattutto per quanto riguarda l'irraggiamento e la capacità di assorbimento di calore sotto forma di raggi infrarossi. Il prodotto si ottiene facendo formare mediante ossidazione anodica un tipo speciale di Alumite sulla superficie di una lega di alluminio. Collaudato in tante applicazioni in tutto il mondo, l'Alumite offre prestazioni meccaniche simili a quelle dell'acciaio inox sotto molti punti di vista, ma con una maggior capacità di radiazione termica.

Caratteristiche termiche

La conducibilità termica definisce la proprietà di un materiale di trasportare energia termica attraverso la sua massa. L'emissività definisce quanto il materiale assorbe ed emette energia termica sotto forma di irraggiamento. Non è detto che un materiale con una buona conducibilità termica abbia anche una buona emissività: l'alluminio è un classico esempio di questa situazione. L'emissività viene espressa in relazione ad un corpo nero teorico, che si presuppone abbia un perfetto profilo di assorbimento e di emissione.

L'importanza dell'emissività può essere vista riferendosi alla seguente relazione (A.10):

$$Q = \varepsilon \cdot s \cdot A \cdot T \quad (A.10)$$

dove:

Q è l'energia radiante [W/m^2];

ε è l'emissività del materiale;

s è la costante di Boltzmann ($5.67051 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$);

A è la superficie coinvolta nello scambio termico [m^2];

T è la temperatura assoluta del corpo [K];

Se l'emissività è bassa, si possono raggiungere valori più alti di Q solo aumentando l'area della superficie A o la temperatura di funzionamento T . Con un materiale ad alta emissività come l'Alumite, il valore Q è massimizzato senza la necessità di aumentare la dimensione del componente o la temperatura.

La radiazione infrarossa lontana (far-IR) consiste in onde elettromagnetiche aventi lunghezza d'onda compresa fra 2 e 1000 μm . Queste onde sono abbastanza forti da eccitare le vibrazioni molecolari dei materiali e la vibrazioni della griglia di cristalli che determina il riscaldamento. Le onde nella regione compresa fra 2 e 30 μm , e più specificatamente sotto i 10 μm , sono le più importanti nel riscaldamento, nel raffreddamento e nelle applicazioni termiche quali l'essiccazione.

La frequenza intrinseca di una molecola dipende dalla sua struttura; quando questa frequenza si sincronizza con quella della radiazione far-IR, questa viene facilmente assorbita causando un aumento della temperatura del materiale. Molti materiali (resine, polimeri, fibre, cibi, ecc.) riescono ad assorbire facilmente le radiazioni far-IR determinando un riscaldamento ed una essiccazione efficiente; poiché l'Alumite irradia fortemente nella regione far-IR, con una emissività media del 90% sulle lunghezze d'onda compresa tra 2-30 μm , questo risulta essere un materiale ottimale per migliorare l'efficienza e l'alta emissività nella banda far-IR (infrarosso lontano) di questo materiale è un diretto risultato della composizione chimica e della complessa forma fisica del film superficiale anodizzato.

In esso, l'emissione di radiazioni infrarosse è molto simile a quella di un corpo nero in un'ampia gamma di temperatura (tipicamente 50 – 450 °C) e l'emissività è relativamente costante nella stessa gamma di temperature.

Facendo il confronto con l'alluminio non trattato e acciaio, che hanno entrambi valori di emissività intorno al 10-15 %, l'emissività del 90 % caratteristica dell'Alumite fa sì che, contrariamente a quanto avviene con l'alluminio e l'acciaio, il materiale si scalda velocemente e tende a irradiare energia termica in modo molto più efficiente.

Tecnologia e tipi di trattamento

La tecnologia Alumite è stata sviluppata originariamente in Giappone per migliorare il raffreddamento dei cavi di potenza e dei componenti; permette l'utilizzo della maggior parte di leghe di alluminio disponibili commercialmente, con qualche eccezione per quelle ad alto contenuto di rame o di silicio. L'Alumite viene prodotta usando un processo di anodizzazione brevettato.

In particolare, una superficie anodizzata convenzionale è generalmente dura, resistente alla corrosione e contiene circa 100 milioni di pori al mm^2 disposti in una struttura regolare, mentre l'Alumite ha una struttura complessa con pori irregolari.

Anche quando confrontata con un trattamento convenzionale di anodizzazione dura, l'Alumite è unica in quanto mantiene un'alta emissività sotto i 10 μm . Questa è una caratteristica molto importante perché l'intensità dell'energia radiante è inversamente proporzionale alla lunghezza d'onda. Molti materiali assorbono le radiazioni far-IR fortemente sotto i 10 μm - per esempio l'acqua, che ha un forte assorbimento a 2,5-3,0 μm dovuto al componente -OH (ossidrile).

Esistono diversi trattamenti Alumite, che incidono sul comportamento termico del materiale trattato:

- *Trattamento Alumite su due facce:* La lamiera trattata Alumite su due facce permette al calore di attraversarla molto facilmente. Questo porterà ad un raffreddamento della parte più calda e anche ad un riscaldamento della parte più fredda. Quindi la lamiera trattata su due facce risulta molto utile nelle applicazioni di scambio termico, come radiatori e scambiatori calore in genere. Questa lamiera si usa nei forni ad atmosfera controllata, dove l'aria che riscalda il forno deve essere tenuta separata fisicamente da quella contenuta all'interno del forno.

- *Trattamento Alumite su una faccia:* La lamiera trattata Alumite su una sola faccia assorbirà ed emetterà calore prevalentemente su una sola faccia. La faccia non trattata assorbirà ed emetterà poco calore. Il materiale tende a comportarsi come una barriera termica. Se la superficie trattata è più calda di quella non trattata, il calore sarà respinto verso la fonte di calore. Questa situazione si verifica per esempio nei forni, dove il calore viene riflesso e non disperso: in questo caso la lamiera Alumite può essere associata ad un isolante termico, per migliorare sensibilmente la riflessione del calore. Se la superficie trattata è più fredda di quella non trattata, l'irraggiamento di calore viene assorbito in modo più efficiente. Questa caratteristica la rende adatta a rivestimenti interni di frigoriferi e contenitori refrigerati, contenitori per apparecchiature elettroniche o dissipatori di calore.

A.5.3 Sabbiatura

Per incrementare l'emissività nelle leghe di alluminio si può ricorrere ad un trattamento superficiale di sabbiatura. Si tratta di un procedimento meccanico con il quale si erode la parte superficiale di un materiale tramite l'abrasione dovuta ad un getto di sabbia ed aria [7].

Tale trattamento di superficie è applicabile a tutte le leghe e non altera le proprietà chimico-fisiche del materiale base, bensì favorisce l'aumento della rugosità superficiale a seconda delle dimensioni della graniglia utilizzata e della pressione del getto. Inoltre tale trattamento si differenzia dall'anodizzazione e dagli altri trattamenti galvanici di ossidazione che vengono eseguiti a bagno, poiché è possibile lavorare solo le parti che interessano; per questa ragione quest'ultimo risulta un trattamento localizzato e meno invasivo rispetto ai trattamenti chimici visti precedentemente (Figura A.10).



Figura A.10: macchina sabbiatrice presente ai laboratori LNL

A.6 Misure di emissività

Come è già stato accennato precedentemente l'emissività dei materiali risulta essere un parametro significativo per lo scambio termico di irraggiamento. Dalle analisi termiche eseguite sulle camere di alluminio, che ospitano componenti caldi ($T > 1000$ °C), si è potuto osservare un'elevata sensibilità della variazione di temperatura degli stessi al variare dell'emissività (in particolare per valori che variano da 0.1 a 0.6). Dunque al fine di ridurre i gradienti termici prodotti e smaltire la potenza termica di irraggiamento in maggior misura risulta essere particolarmente vantaggioso avere una superficie interna delle camere con elevata emissività.

In questo paragrafo si vuole descrivere il test sperimentale eseguito per determinare l'emissività di un campione di lega di alluminio *Al 6082* sottoposto a sabbiatura superficiale, e successivamente confrontata con l'emissività di un campione dello stesso materiale non trattato. Il materiale dei campioni di riferimento è lo stesso di quello adottato nelle analisi FEM per la discretizzazione delle camere. Per il processo di sabbiatura si è utilizzata una sabbia al *corindone GR80* e la pressione del getto è risultata sufficientemente elevata per favorire l'abrasione superficiale e la formazione di uno strato poroso e uniforme su tutta la superficie del campione (Figura A.11).

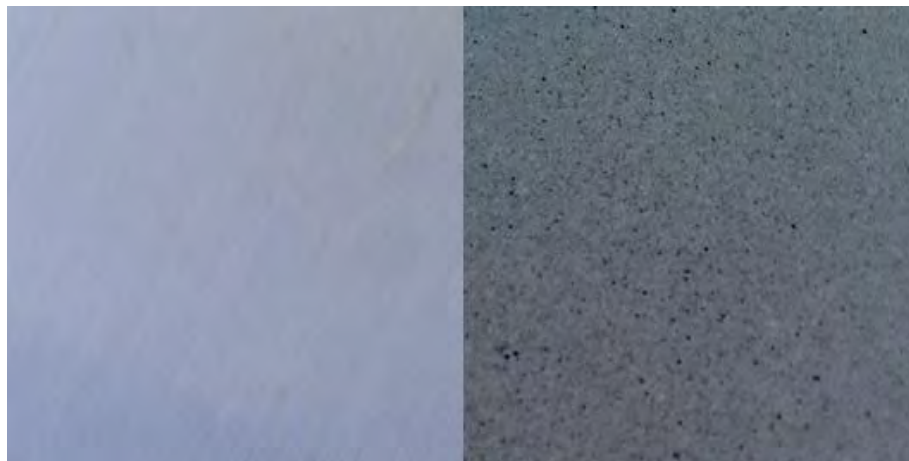


Figura A.11: confronto fra le superfici del campione lucido (sinistra) e il campione sottoposto a sabbiatura (destra)

A.6.1 Metodo termografico sperimentale

Per determinare l'emissività dei campioni considerati si può ricorrere al metodo termografico, secondo cui il parametro considerato viene determinato mediante una termocamera. La termografia è una tecnica diagnostica non distruttiva che consente di determinare e visualizzare la temperatura superficiale di un qualunque corpo mediante la misurazione della radiazione infrarossa da esso emessa. La termografia permette di visualizzare valori e variazioni di temperatura degli oggetti, indipendentemente dalla loro illuminazione nel campo del visibile.

Questa metodica sfrutta un noto principio della Fisica secondo cui qualunque corpo si trovi ad una temperatura maggiore dello zero assoluto ($-273,14\text{ }^{\circ}\text{C}$) emette energia sotto forma di radiazione infrarossa, quindi non visibile. Più precisamente la quantità di radiazione emessa nello spettro infrarosso aumenta proporzionalmente alla quarta potenza della temperatura assoluta del corpo (Legge di *Stefan-Boltzmann*).

Per essere percepita e valutata, questa emissione dev'essere convertita in un segnale digitale che, a sua volta, permetterà di visualizzare i dati in una forma numerica o grafica (scala di falsi colori), così da formare l'immagine termografica visibile all'occhio umano.

Lo strumento che converte la radiazione infrarossa in un segnale digitale è la *termocamera*, che trasforma pertanto le normali foto in mappe di temperatura superficiale (*Figura A.12*).



*Figura A.12: Kit della Termocamera utilizzata:
IRISYS Multi-Purpose Thermal Imagers IRI 4000 Series*

La termografia consente l'interpretazione dei meccanismi che producono irregolarità termiche e pertanto presuppone adeguate conoscenze, sia nel campo della fisica che, per la sua applicazione in meccanica, nel campo della termodinamica. A seguito della valutazione di altri parametri dell'oggetto indagato (ad es. emissività) e dell'ambiente (ad es. temperatura riflessa) è possibile convertire il valore misurato di radiazione infrarossa in valori di temperatura.

Il metodo termografico per la determinazione dell'emissività di un materiale si basa sul confronto diretto fra la temperatura rilevata sulla superficie da ispezionare con quella di un marker di riferimento ad emissività nota.

In particolare la procedura seguita e la strumentazione allestita per l'esecuzione del test sperimentale si può così riassumere:

- Si posizionano sulla superficie dell'oggetto in esame dei marker di riferimento con emissività impostata $\varepsilon = 0,97$.

In particolare nella piastra di riferimento (Figura A.13) sono stati posizionati tre marker in prossimità della superficie sabbiata e altrettanti tre in corrispondenza della superficie lucida in modo tale da abbattere l'errore di ripetibilità nelle misurazioni eseguite e poter stimare una media del valore cercato con un certo margine.

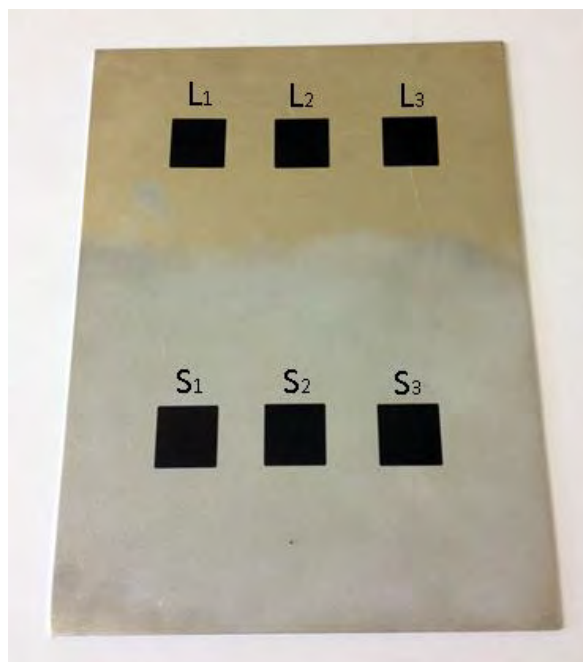


Figura A.13: piastra utilizzata e marker di riferimento disposti nella superficie lucida (L) e sabbiata (S)

- Si provvede a riscaldare l'oggetto da ispezionare ad una temperatura di riferimento e si attende per qualche minuto affinché si raggiunga l'equilibrio termico tra l'oggetto e i marker di riferimento. In questo caso per la somministrazione del calore è stata utilizzata una pistola termica direzionale in grado di portare oggetti metallici oltre i 100 °C (Figura A.14);



Figura A.14: pistola termica utilizzata per la somministrazione del calore

- Mediante la termocamera si rilevano dunque misure di temperatura sui marker di riferimento e sulla superficie di riferimento da ispezionare (Figura A.15);



Figura A.15: misure di temperatura eseguite con la termocamera

- Si regola dunque il valore dell'emissività della superficie scansionata, incognita a priori, in modo da eguagliare le temperatura misurata in superficie con quella misurata nei marker. Dunque l'emissività imposta per il materiale in esame, che si trova alla stessa temperatura dei marker di riferimento, rappresenta una stima dell'emissività ricercata del materiale.

A.6.2 Risultati

Procedendo con il metodo descritto è stato possibile ricavare dei valori di emissività caratteristici del materiale considerato. In particolare per ogni immagine termografica ottenuta sono state eseguite 10 misurazioni di emissività dal confronto delle temperature. Nella Tabella A.9 seguente sono riassunti i valori medi delle emissività misurate nella piastra in corrispondenza ai 6 marker utilizzati, assieme alle temperature di riferimento degli stessi.

T [°C]	Marker	ϵ_m
97	L ₁	0.14
113	L ₂	0.12
121	L ₃	0.11
105	S ₁	0.36
101	S ₂	0.37
93	S ₃	0.41

Tabella A.9: valori delle emissività medie misurate in corrispondenza ai marker

Dai risultati si evince come le emissività misurate in corrispondenza della superficie lavorata siano superiori rispetto a quelle pervenute nella superficie lucida; inoltre si osserva in tutti i casi come i valori misurati diminuiscano all'aumentare della temperatura.

Infine i valori delle emissività misurate convalidano le verifiche termo-strutturali eseguite nel collimatore e nella faraday-cup; infatti nelle rispettive camere raffreddate era stato considerato un valore di riferimento dell'emissività pari a 0.3 nelle analisi, caratteristico dello stato superficiale delle superfici interne per tener conto di un'eventuale fenomeno di sporramento delle pareti.

Ebbene si osserva come tale valore sia inferiore rispetto ai valori misurati sperimentalmente nei casi S_1 , S_2 ed S_3 , dunque i risultati pervenuti nelle analisi risultano in vantaggio di sicurezza. Inoltre un trattamento di sabbiatura interna per le camere dei dispositivi si rende necessario per favorire lo scambio termico di irraggiamento e nel contempo permette di abbassare i livelli termici dei singoli componenti.

BIBLIOGRAFIA

- [¹] C. Bonacina, A. Cavallini, L. Mattarolo, *TRASMISSIONE DEL CALORE*, Cleup editore, 1992.
- [²] G. Meneghetti, M. Manzolaro, *Introduzione all'analisi termica con il codice di calcolo Ansys*
- [³] <http://www.irtermografia.it/TABELLE%20EMISSIVITA%20MATERIALI.pdf>
- [⁴] <http://it.wikipedia.org/wiki/Anodizzazione>
- [⁵] http://www.ing.unitn.it/~colombo/Anodizzazione/cap_4.htm
- [⁶] <http://www.axu.it>
- [⁷] [http://it.wikipedia.org/wiki/Sabbiatura_\(metalli\)](http://it.wikipedia.org/wiki/Sabbiatura_(metalli))

APPENDICE B

Allestimento del test sperimentale eseguito nel tripetto

B.1 Obiettivi del test

Lo scopo del test sperimentale del tripetto consiste nella misurazione sperimentale del massimo vuoto raggiungibile al suo interno, al fine di verificare e convalidare il valore dichiarato dalla casa costruttrice. In secondo luogo, il test si propone di simulare le condizioni operative del dispositivo nelle reali condizioni d'esercizio, in vista della sua installazione nella linea del progetto SPES.

Nella Figura B.1 seguente è riportato lo schema del circuito pneumatico di riferimento per l'allestimento del test sperimentale, opportunamente descritto nel prossimo paragrafo.

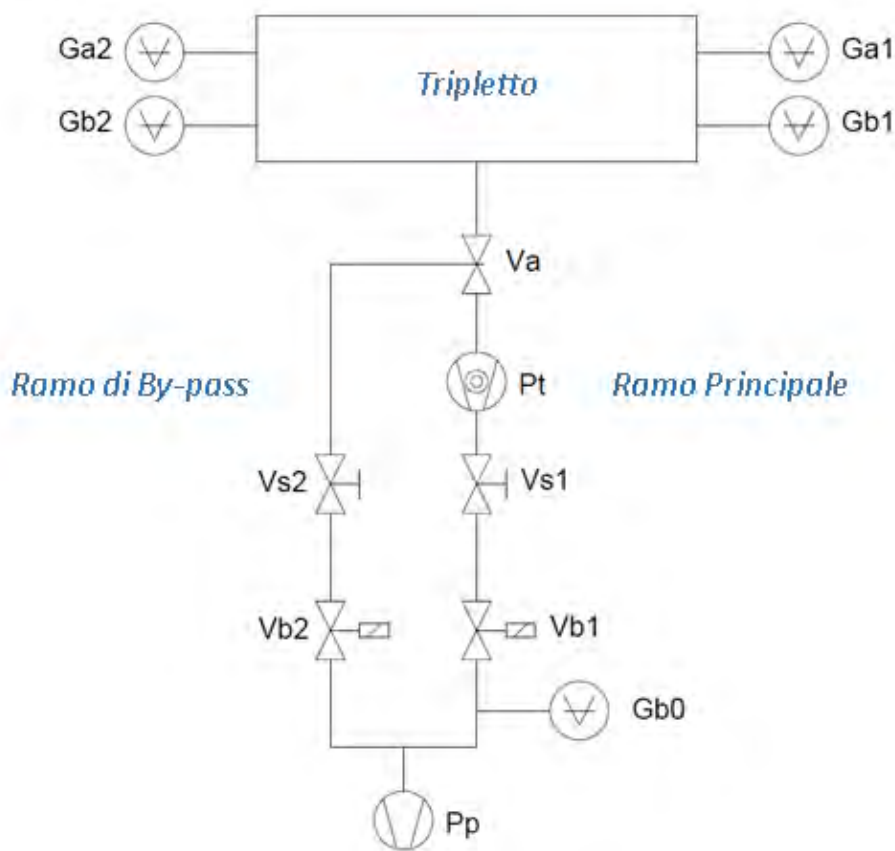


Figura B.1: schema equivalente del circuito pneumatico di riferimento

Pp: pompa primaria (campo di utilizzo = 1bar : 10^{-2} mbar)

Pt: pompa turbomolecolare (campo di utilizzo = 10^{-1} mbar : 10^{-8} mbar)

Vs1, Vs2: valvole di sicurezza manuali

Vb1, Vb2: valvole elettromagnetiche

Va: valvola gate

Gb0, Gb1, Gb2: teste misuratori di basso vuoto

Ga1, Ga2: teste misuratori di alto vuoto

B.2 Descrizione dello schema

A pompe spente, le valvole manuali di sicurezza **Vs1** e **Vs2** risultano aperte, come pure la valvola elettromagnetica **Vb2** nel ramo di by-pass della gate valve, mentre la valvola **Vb1** e la gate valve **Va** nel ramo principale risultano chiuse. In questa configurazione il ramo di by-pass è in collegamento con il volume del tripletto, mentre viene inibito il ramo principale.

- In questa configurazione viene accesa la pompa primaria (Figura B.2); essa permette di raggiungere una pressione a regime teorica di almeno 10^{-2} mbar nel ramo di by-pass e quindi nel tripletto; il basso vuoto così raggiunto è misurato in 3 punti dello schema dai misuratori **Gb0**, **Gb1** e **Gb2**.

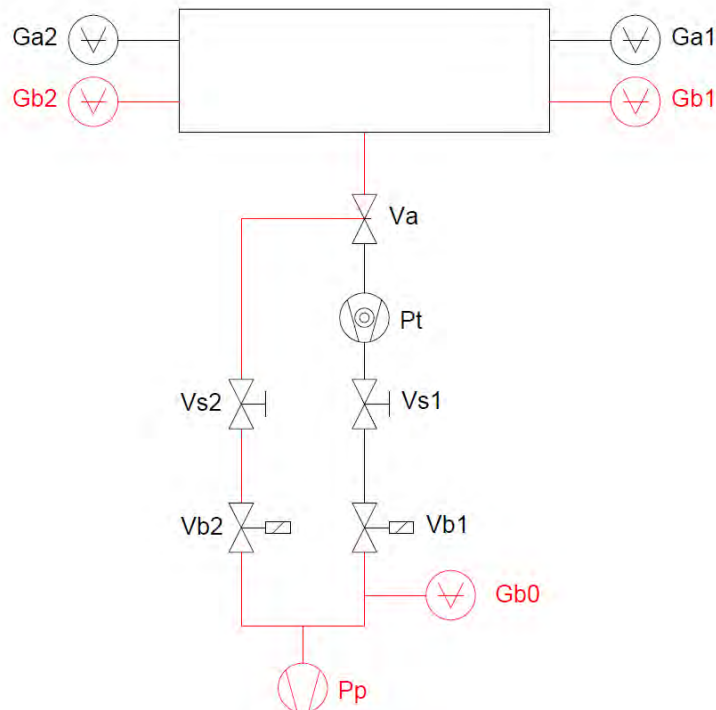


Figura B.2: realizzazione del basso vuoto nelle parti indicate in rosso

- Una volta raggiunto il basso vuoto nei tratti interessati, nelle condizioni di regime viene aperta la valvola **Vb1** e chiusa la valvola **Vb2**, mentre la pompa primaria continua a funzionare. In questo modo si va ad escludere il ramo di by-pass per poter assicurare nel ramo principale le condizioni di basso vuoto alla mandata della pompa turbomolecolare, giacchè quest'ultima può funzionare con una pressione teorica di almeno 10^{-1} mbar allo scarico. Il basso vuoto raggiunto nel tratto del ramo principale viene monitorato dal misuratore **Gb0** (Figura B.3).

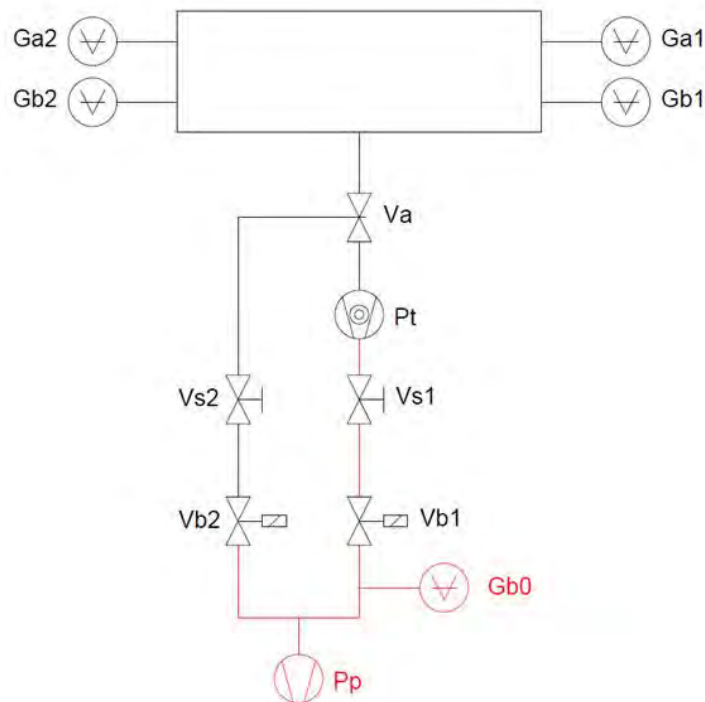


Figura B.3: esclusione del ramo di by-pass e realizzazione del basso vuoto nei tratti indicati in rosso

- Una volta raggiunto il basso vuoto nel tratto del ramo principale (Figura B.4), viene accesa la pompa turbomolecolare che, nelle condizioni di regime, provvede a far raggiungere pressioni nell'ordine dei 10^{-8} mbar all'aspirazione nei condotti interessati (tratti indicati in blu). Quindi, viene aperta la gate valve al fine di inibire il ramo di by-pass e mettere in collegamento l'aspirazione della pompa turbomolecolare con il volume del tripletto. A questo punto, raggiunte le condizioni di regime del sistema, l'alto vuoto raggiunto viene monitorato dagli appositi misuratori **Ga1** e **Ga2** (Figura B.4).

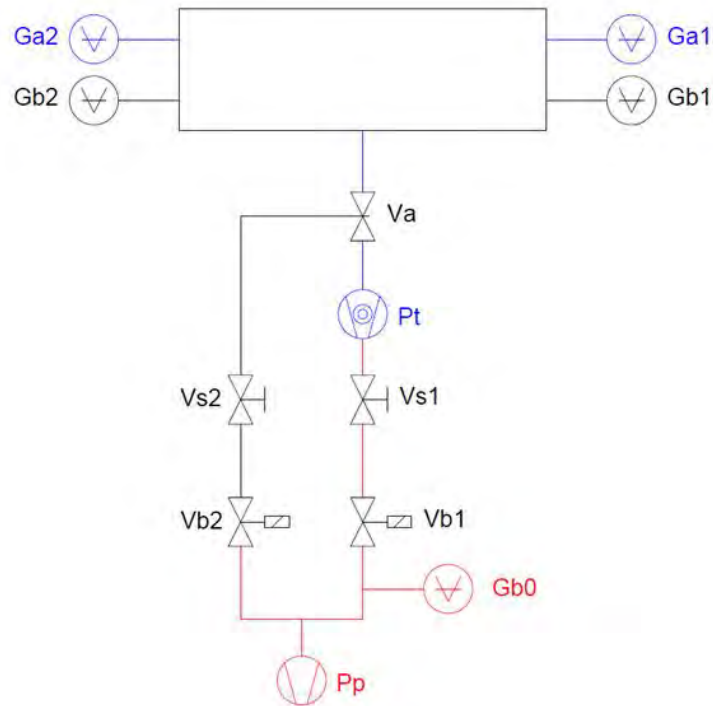


Figura B.4: accensione della pompa turbomolecolare e realizzazione dell'alto vuoto nel tripletto e nei tratti indicati in blu

B.3 Descrizione dell'apparato sperimentale

In riferimento allo schema equivalente esaminato, sono stati reperiti tutti i componenti necessari alla realizzazione dell'apparato sperimentale.

Inizialmente sono stati allestiti il *ramo di by-pass* e il *ramo principale* separatamente, utilizzando tubi di collegamento, anelli di guarnizione, clumps e flange al fine di garantire il collegamento dei componenti e nel contempo di assicurare una tenuta stagna (Figura B.5).

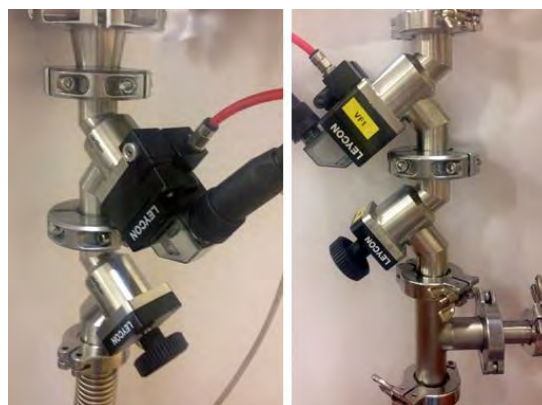


Figura B.5: particolari del ramo di by-pass (sinistra) e del ramo principale (destra)

Successivamente, questi sono stati assemblati alle pompe e alla gate valve mediante opportuni collettori e tubi a T. Per quanto riguarda le teste misuratrici del tripletto, sono state alloggiare in prossimità delle teste flangiate con opportuni canali a T; in particolare il misuratore di alto vuoto è stato fissato nel condotto rettilineo in modo da aver minori variazioni di sezione, curve, occlusioni nel ramo di collegamento con il tripletto; queste infatti possono pregiudicare i valori ottenuti dalla misurazione, mentre il misuratore di basso vuoto, essendo meno sensibile, è stato fissato nel canale secondario (Figura B.6).



Figura B.6: *Misuratori di alto vuoto Ga2 (a sinistra) e di basso vuoto Gb2 (in basso) opportunamente collegati alla testa flangiata del tripletto*

I misuratori sono stati connessi, mediante opportuni cavi elettrici, ad un'unità di controllo adibita alla misurazione delle pressioni registrate (Figura B.7). Un display permette di monitorare in tempo reale i valori misurati delle 4 teste **Ga1,Gb1,Ga2,Gb2**, mentre il monitoraggio della pressione in **Gb0** viene eseguita su un modulo separato analogo al precedente.



Figura B.7: *Unità di controllo con interfaccia display per il monitoraggio delle pressioni registrate*

Infine l'unità di controllo è collegata a sua volta ad un computer adibito alla raccolta dati.

Inoltre, in secondo momento, è stata predisposta una ventola per smaltire il calore prodotto dalla pompa turbomolecolare, e allestite delle fasce termiche alimentate a corrente, per poter abbattere l'umidità dell'aria contenuta nel circuito e favorire il distacco delle particelle a ridosso delle superfici interne; per gli stessi motivi viene utilizzata una pistola termica per riscaldare ulteriormente il volume del tripletto localmente favorendo così livelli più soddisfacenti di vuoto raggiunto.

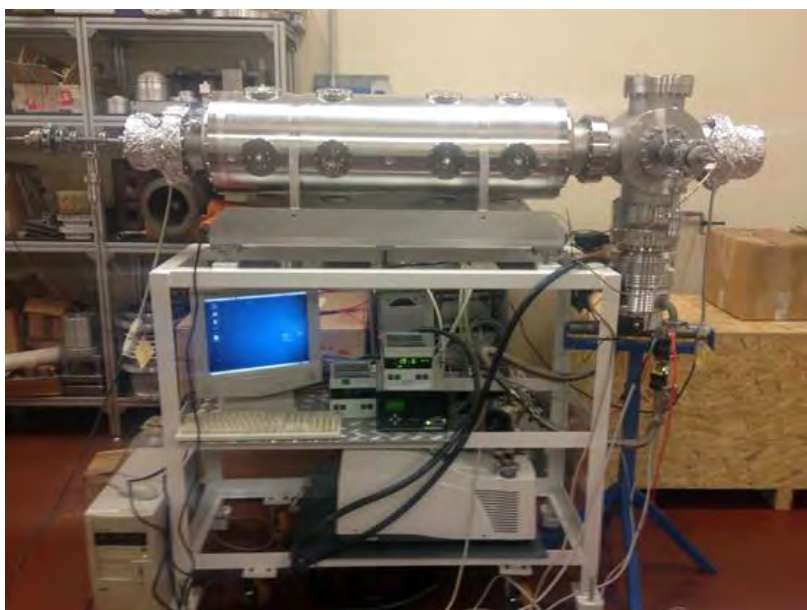


Figura B.8: vista del sistema assemblato

APPENDICE C

Determinazione delle dimensioni teoriche per gli alloggiamenti degli anelli di tenuta O-Ring realizzati in indio

C.1 Introduzione

Nella Figura C.1 seguente è raffigurata una schematizzazione semplificata di come un anello di tenuta o-Ring possa essere alloggiato in una cava opportunamente sagomata al fine di garantire una tenuta stagna nell'accoppiamento tra due parti meccaniche.

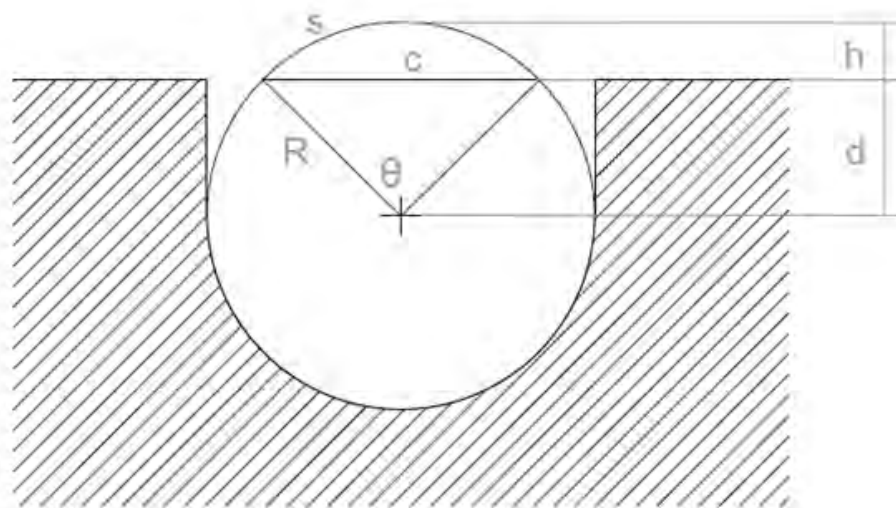


Figura C.1: schematizzazione dell'O-ring e della relativa cava di alloggiamento

Considerando un anello di tenuta realizzato in indio, la letteratura al riguardo fornisce regole tecniche circa la realizzazione dei relativi alloggiamenti, che tuttavia rimangono raccomandazioni indicative basate sull'esperienza e considerate come regole di buona progettazione.

Dunque la necessità di avere un modello standardizzato per poter definire le dimensioni fondamentali degli alloggiamenti in questione risulta uno strumento di enorme utilità nelle fasi di progettazione e realizzazione di tenute meccaniche in indio.

C.2 Descrizione del modello

Molte case che realizzano anelli di tenuta in indio affermano che una buona geometria degli alloggiamenti dovrebbe assicurare alla guarnizione un certo *grado di riempimento*, commisurato dalla porzione di sezione della tenuta stessa che rimane contenuta nella cava considerata. La sezione eccedente sarà interessata invece ad uno schiacciamento localizzato, quindi si deforma plasticamente al fine di garantire la tenuta stagna tra gli elementi accoppiati. Pertanto il valore ottimale del grado di riempimento deriva da risultati sperimentali e dipende dalle condizioni d'esercizio, quali temperatura, pressione e fluidi vettori utilizzati.

Nel caso specifico per le applicazioni di vuoto spinto, i costruttori raccomandano di adottare, in misura cautelativa, un grado di riempimento che varia tra il 60% e l'80%, cosicché la porzione di sezione che eccede dagli alloggiamenti non è mai inferiore al 20% [1] [2]. Inoltre tali valori variano a seconda del diametro del filo che costituisce l'anello: in particolare maggiore è tale diametro e minore sarà la porzione di sezione eccedente prevista, quindi maggiore sarà il coefficiente di riempimento, poichè nella deformazione plastica è coinvolto un maggior volume strutturale rispetto agli spessori più esili che garantiscono la tenuta meccanica adottando coefficienti di riempimento più bassi.

Nello schema rappresentato in Figura C.1 un anello di tenuta O-Ring generico a sezione circolare è alloggiato in una scanalatura circolare di raggio R ad una profondità d rispetto al centro della sezione trasversale.

È stato sviluppato un algoritmo in grado di definire la geometria dell'alloggiamento di tale anello, avente raggio del filo noto pari ad R , in funzione del grado di riempimento F che si desidera ottenere; in particolare il parametro caratteristico che più interessa conoscere è $d=f(R,F)$, inteso come distanza tra il centro della sezione trasversale del filo e la superficie di battuta.

Per poter valutare tale parametro, occorre prima calcolare l'angolo del settore circolare sotteso all'angolo θ . L'area del settore circolare definito dall'angolo θ è così definito (C.1) :

$$A_s = \frac{1}{2} R^2 \theta \quad (C.1)$$

mentre l'area del triangolo isoscele sotteso allo stesso angolo, avente come base la corda c ed altezza h è definita come (C.2):

$$A_T = \frac{1}{2} R^2 \text{sen}\theta \quad (C.2)$$

L'area del segmento circolare A'' sottesa alla corda c e all'arco s è data dalla differenza tra l'area del settore circolare A_s e quella del triangolo isoscele A_T , ovvero (C.3):

$$A'' = \frac{1}{2} R^2 \theta - \frac{1}{2} (R^2 \text{sen}\theta) = \frac{1}{2} R^2 (\theta - \text{sen}\theta) \quad (C.3)$$

Considerando quindi un grado di riempimento pari a F , è quindi possibile definire l'area del segmento circolare A'' come (C.4):

$$A'' = (1 - F) * A = (1 - F) * \pi R^2 \quad (C.4)$$

Uguagliando le due espressioni si ottiene una relazione che esprime la dipendenza dell'angolo θ in funzione del grado di riempimento F (C.5) :

$$\theta - \text{sen}\theta = 2\pi * (1 - F) \quad (C.5)$$

Per poter risalire al valore dell'angolo θ bisogna ricorrere quindi ad un metodo iterativo; al riguardo si può utilizzare il metodo di *Newton Raphson* per stimare la convergenza. Si considera quindi la funzione nella scrittura (C.6):

$$f(\theta) = C - \theta + \text{sen}\theta \quad \text{con} \quad C = 2\pi * (1 - F) \quad (C.6)$$

La derivata prima risulta (C.7):

$$f'(\theta) = -1 + \text{cos}\theta \quad (C.7)$$

Il metodo di *Newton-Raphson* prevede di calcolare l'iterazione successiva come (C.8):

$$\theta_{n+1} = \theta_n - \frac{f(\theta_n)}{f'(\theta_n)} \quad (C.8)$$

partendo da un valore iniziale di tentativo dell'angolo θ .

Sostituendo le espressioni precedenti e semplificando si ottiene la formulazione finale (C.9):

$$\theta_{n+1} = \theta_n - \frac{C - \theta_n + \text{sen}(\theta_n)}{-1 + \text{cos}(\theta_n)} \quad (C.9)$$

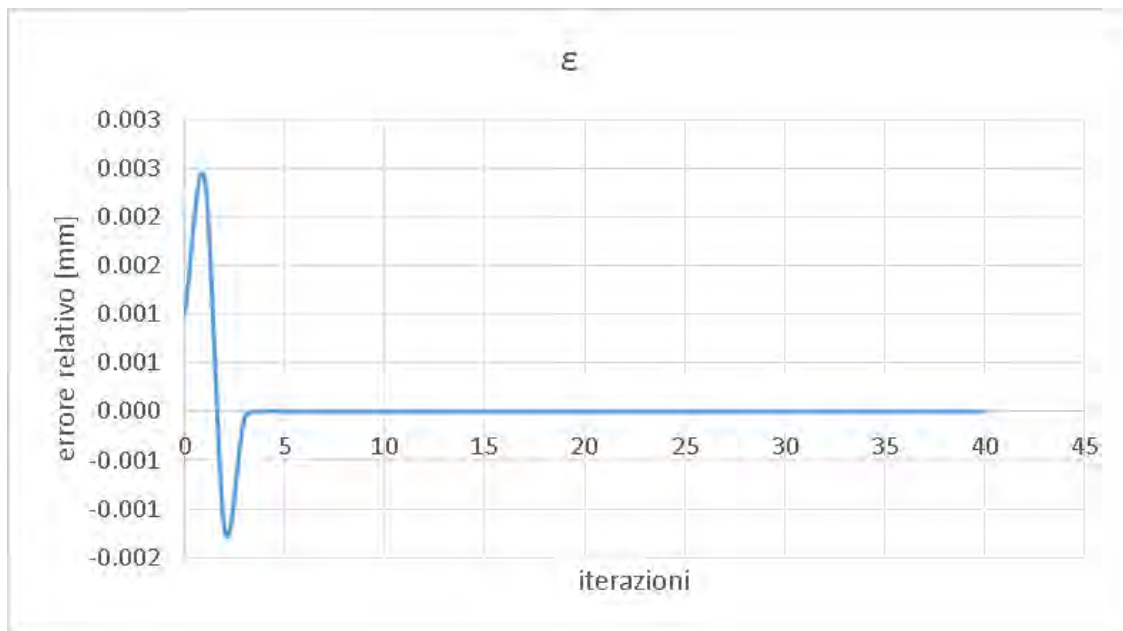


Figura C.2: diagramma di convergenza

Una volta raggiunta la convergenza (Figura C.2) si ottiene un valore dell'angolo θ , che permette di risalire ai parametri costruttivi della cava di alloggiamento (C.10):

$$\begin{aligned} D &= 2R \\ d &= R * \cos \frac{\theta}{2} \\ h &= R - d \\ p &= R + d \end{aligned} \quad (C.10)$$

Quindi in riferimento alla Figura C.3 è possibile calcolare il valore di A'' e A' (C.11):

$$A'' = \frac{1}{2} R^2 (\theta - \text{sen}\theta) \quad (C.11)$$

$$A' = \pi R^2 - A''$$

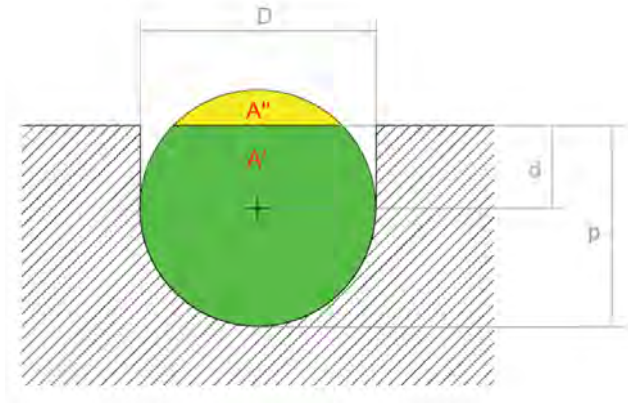


Figura C.3: vista dei parametri costruttivi considerati nell'algoritmo

Infine è possibile calcolare il grado di riempimento F ; tale valore deve coincidere con quello scelto inizialmente (C.12):

$$F = \frac{A'}{\pi R^2} \quad (C.12)$$

Nella Figura C.4 seguente sono riportate le caratteristiche fisico-chimiche e meccaniche dell'indio:

Simbolo	In		
Numero atomico	49		
Peso atomico	114,82		
Densità (g cm ³)	7.310 g. cm ³	a 20° C.	
Temperatura di fusione	156,6 °C	Calore latente di fusione	6.807 cal/g
Temperatura di ebollizione	2.080 °C	Calore latente di ebollizione	468 cal/g
Ritiro di solidificazione	2,5 %		
Resistività elettrica (ohm cm)	superconduttivo	a 3,38 °K	
	9 x 10 ⁻⁶	a 20 °C	
	29,1 x 10 ⁻⁶	a 154 °C	
Coefficiente lineare di espansione termica	24,8 x 10 ⁻⁶	per 1 °C/cm.	
Resistenza a trazione	da 380	a 515 psi	
Resistenza a compressione	310 psi		
Allungamento	da 22 %	a 41 %	
Durezza Brinell	0,9 ÷ 1,0		
Modulo di elasticità	1.570.000 psi		
Pressione di vapore (mm Hg)	1	a 1.249 °C	
	10	a 1.406 °C	
	100	a 1.756 °C	
	400	a 1.982 °C	

Figura C.4: proprietà dell'indio [3]

BIBLIOGRAFIA

[¹] <http://www.indiumwire.com/cryogenicvacuumseals.html>

[²] <http://www.aimspecialty.com/Portals/0/Files/Sealing-With-Indium.pdf>

[³] <http://www.omodeo.it>

APPENDICE D

Porting del pacchetto software Ansys® sull'IGI GRID Portal

D.1 Introduzione

La Grid è una rete planetaria che unisce e utilizza contemporaneamente la potenza di calcolo e la memoria di decine di migliaia di differenti computer sparsi nel mondo. E' stata sviluppata per immagazzinare e rendere accessibili i dati prodotti dall'acceleratore LHC: 15 milioni di gigabyte ogni anno, pari ai dati immagazzinati in una pila di CD di 20 mila metri. Coinvolge 140 centri di calcolo distribuiti in 33 paesi e ha una potenza di calcolo pari a quella di 100000 computer (Figura D.1). L'INFN è uno dei promotori principali del progetto Grid e ospita al CNAF di Bologna uno degli 11 nodi di primo livello della Grid (Figura D.2).

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

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



Figura D.1: nodi della Grid [1]



Figura D.2: nodi della Grid in Italia [1]

Un'interfaccia web per eseguire la simulazione sfruttando i servizi messi a disposizione da Grid è stata assicurata da un portlet dedicato sull'IGI web portal, che è un gateway potente e facile da usare per il calcolo distribuito e la memorizzazione delle risorse.

In un tipico caso d'uso, l'utente fornisce i file di input iniziali e i parametri di configurazione per poi attendere i risultati fino a quando il calcolo è terminato. Questo processo può richiedere diverse ore, anche giorni, utilizzando le risorse disponibili per eseguire questa applicazione. Un aspetto fondamentale delle simulazioni lunghe è la verifica dell'evoluzione dei calcoli in fase di running, quindi è stata creata una struttura che sfrutta i Grid Storage Elements per rendere i file .log temporanei disponibili per la consultazione in fase di running. Nei paragrafi successivi verrà illustrata la procedura per registrarsi al portale.

D.2 Richiesta del certificato INFN CA

Per poter procedere alla richiesta di certificato occorre possedere innanzitutto:

- Un account di posta elettronica INFN (nome.cognome@lnl.infn.it);
- Un documento d'identità valido (carta d'identità);
- Il codice fiscale.

A questo punto è possibile recarsi dalla *Registration Authority* di competenza, un ufficio della sede in cui si è allocati. In caso non si conoscesse l'ubicazione, è necessario collegarsi al sito <https://security.fi.infn.it/CA/RA>, e controllare la lista dei dipartimenti di INFN e cercare il nome delle persone competenti.

Una volta accertata l'identità del richiedente si riceveranno due mail. Nella prima, proveniente da INFN-CA, è contenuto il riepilogo della richiesta di certificato. La seconda è inoltrata dal personale della *Registration Authority* e contiene i dati che si dovranno immettere alla pagina che si apre cliccando sul link seguente: <https://security.fi.infn.it/CA/mgt/restricted/ucert.php>. A questo indirizzo si presenterà una schermata da cui scaricare il certificato della INFN *Certification Authority*. Si devono quindi compilare i campi del modulo con i dati ricevuti nell'e-mail dal personale della *Registration Authority*, compreso il codice identificativo da inserire nella casella ID. Lasciare il *KeySize* come di default, su *High Grade* (Figura D.3)

Organizzazione:	INFN, LNL
Nome e Cognome:	<input type="text"/>
E-mail:	<input type="text"/>
KeySize:	High Grade
ID: rilasciato dalla RA	<input type="text"/>

Figura D.3: richiesta di certificato

Le successive operazioni devono essere eseguite con lo stesso browser con cui si è scaricato il certificato (i passaggi descritti in seguito fanno riferimento al browser Mozilla Firefox). Una volta inviata la richiesta di certificato personale si riceverà una nuova mail da INFN CA con le istruzioni per scaricarlo (questa mail dovrebbe arrivare entro qualche ora). Per assicurarsi di aver svolto correttamente le operazioni, controllare alla voce opzioni del browser utilizzato. Le operazioni successive vanno seguite sullo stesso computer con cui si è cominciata la procedura e utilizzando lo stesso browser, altrimenti alcuni parametri non correttamente impostati possono bloccare il processo di registrazione (ad esempio può essere impossibile scaricare il certificato dal link fornito dalla Registration Authority) ed è così impossibile accedere ai siti qui indicati, questo almeno fino a che non si è ottenuto il certificato personale e lo si è caricato nelle macchine da cui si vuole completare l'operazione (Figura D.4).

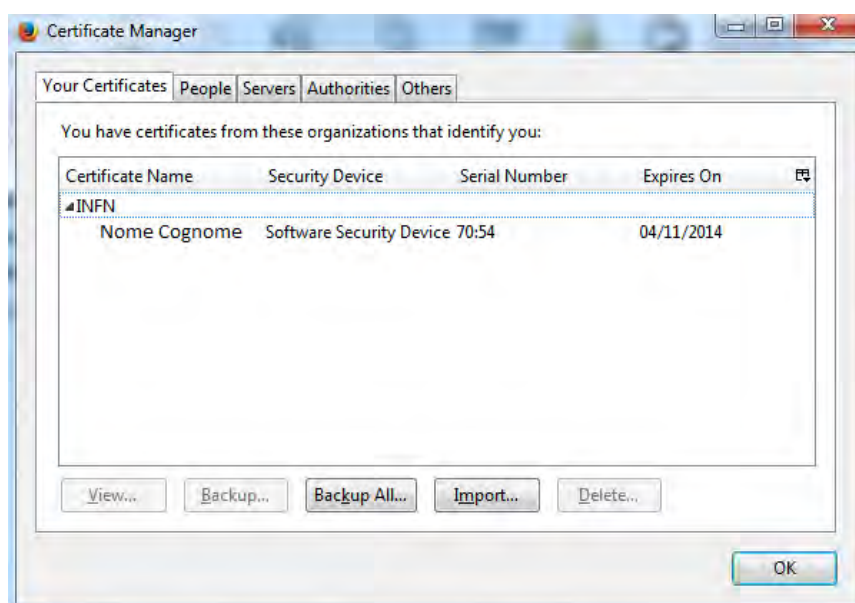


Figura D.4: finestra di controllo dei certificati

Nella scheda di visualizzazione dei certificati, sotto “personali”, dovrebbe apparire il vostro. Con il comando “esporta” o “backup all” si può salvare una copia del certificato inserendo una chiave di sicurezza di almeno dodici caratteri. Si raccomanda di conservare tale copia con la massima cura essendo strettamente personale, possibilmente su un dispositivo rimovibile.

D.3 Registrazione alla VO (Virtual Organization)

voms admin for VO: gridit Current user: CN=Nome Cognome

Home Browse VO Configuration Info Request membership Other VOs on this server

Welcome to the registration page for the gridit VO.

To access the VO resources, you must agree to the VO's Acceptable Usage Policy (AUP) rules. Please fill out all fields in the form below and click on the submit button at the bottom of the page.

IMPORTANT:

By submitting this information you agree that it may be distributed to and stored by VO and site administrators. You also agree that action may be taken to confirm the information you provide is correct, that it may be used for the purpose of controlling access to VO resources and that it may be used to contact you in relation to this activity.

After you submit this request, you will receive an email with instructions on how to proceed. Your request will not be forwarded to the VO managers until you confirm that you have a valid email address by following those instructions.

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

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

Given name:

Family name:

Institution:

Phone number:

Address:

Email address:

The VO AUP:

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

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

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

VOIS Admin version 2.2.0

Figura D.5: inserimento dei dati attraverso la VO

Si può procedere ora alla registrazione alla *Virtual Organization* andando all'indirizzo <https://voms.cnaf.infn.it:8443/voms/gridit/>. Accedere alla pagina, anche se compaiono messaggi di Warning, e autorizzare l'identificazione tramite certificato. Si aprirà una schermata come quella in Figura D.5 in cui immettere i propri dati. Spuntare la casella a fondo pagina sotto le condizioni e procedere con “*submit*”.

Apparirà la schermata di conferma, in cui si comunica l'invio di una mail alla propria casella di posta con le successive istruzioni per procedere (Figura D.6). Nella mail da parte di “*VOMS Admin for VO gridit*” è contenuto un riepilogo della richiesta effettuata e viene chiesto di confermare la procedura cliccando su un link sottostante.

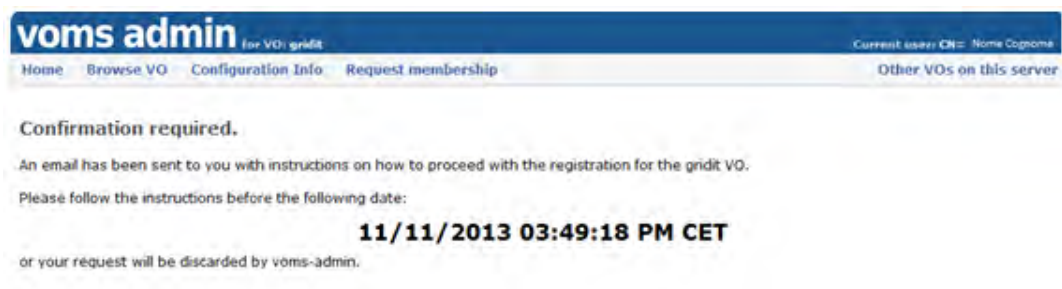


Figura D.6: conferma della richiesta di accesso alla VO

Se si clicca sul link presente nella mail apparirà la schermata di Figura D.7. Dopo un certo periodo arriverà dagli amministratori della VO una mail che conferma l'iscrizione al gruppo. Nel caso tardasse ad arrivare, si può sollecitarne la notifica inviando una mail all'amministratore di competenza (si può chiedere al superiore del proprio ufficio a chi rivolgersi). Quando è stata confermata l'iscrizione, si può passare all'iscrizione al portale Grid. Potrebbe arrivare una mail da un membro del CNAF che richiede di specificare le motivazioni per la registrazione alla VO gridit; si può rispondere scrivendo di essere un tesista presso INFN-LNL e che è necessaria l'iscrizione al gruppo */gridit/ansys* per poter lanciare simulazioni con Ansys®.

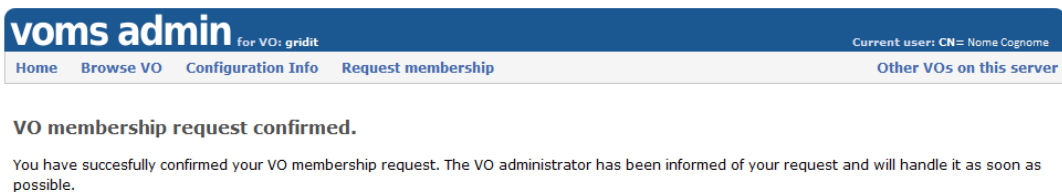


Figura D.7: schermata che informa l'utente della avvenuta richiesta alla VO

D.4 Registrazione al portale GRID

Dopo aver concluso la procedura per l'iscrizione alla VO, si può connettersi al sito <https://portal.italiangrid.it/> e da lì cliccare su "Register Now", in alto a destra sulla schermata. Per prima cosa va inserita l'organizzazione di appartenenza, in questo caso sarà l'Università di Padova (in caso si scelga di registrarsi tramite account INFN, assicurarsi prima di avere completato la procedura di associazione).

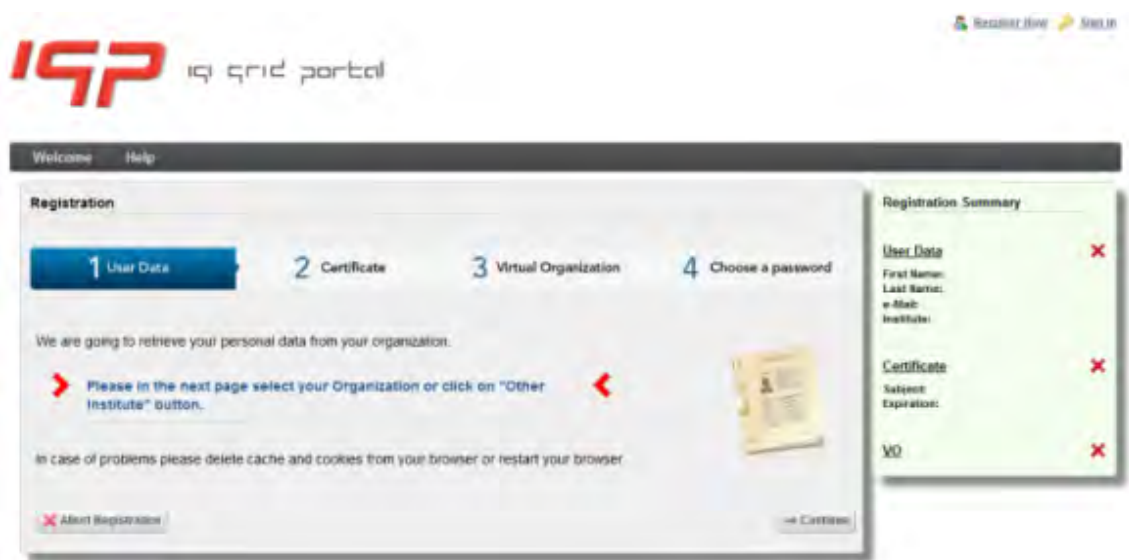


Figura D.8: accesso al portale GRID

Select your organization.

The Service you are trying to reach requires that you authenticate with your home organization, enter the name below.

Enter institution name:

[Show Institute List](#)

Figura D.9: schermata per l'inserimento dell'istituto di appartenenza

Viene richiesto di identificarsi tramite l'account dell'Università oppure tramite INFN, nel qual caso cliccare "X.509 Certificate" e poi ok sulla schermata di identificazione utente.

Figura D.10: login tramite UNIPD

Figura D.11: login tramite INFN

Compilare la schermata successiva con i dati utente e procedere con "Continue". Nella schermata successiva immettere il certificato personale scaricato, con la chiave di sicurezza scelta:

Figura D.12: inserimento del certificato

Viene quindi richiesta una nuova password necessaria per l'aggiornamento del proxy, cliccare poi su "Save".

Please choose a password to encrypt your credentials.
You have to insert this password every time you need to retrieve your credentials, don't forget it because we don't conserve it !!

Insert Password

Confirm Password

Save


 [Technical Information](#)

Figura D.13: inserimento della password per il proxy

Si deve quindi scegliere la propria organizzazione virtuale. Per controllare di essere correttamente registrati alla lista “gridit”, risulta necessario collegarsi al sito della VO Membership Service: <https://voms.cnaf.infn.it:8443/voms/gridit/>. Apparirà una schermata, dove l’ultima voce con la sigla “APPROVED” significa che la registrazione è confermata.

Certificates

Certificate

CN=Nome Cognome
 CN=INFN CA
 Added on: 11/06/2013 02:05:03 PM CET

[Request new certificate](#)

Your groups and roles

/gridit/auger

Group name	Roles
/gridit	pilot <input type="button" value="Request role"/>
/gridit/ansys	pilot <input type="button" value="Request role"/>

Your generic attributes

No attribute classes defined for this VO.

Your AUP acceptance status

The current AUP was last signed 0 days ago. This signature will expire in 364 days.

Your request history

Request type	Info	Status
VO membership request (11)		APPROVED

Figura D.14: riepilogo del proprio status nella VO Gridit

Tornare al portale Grid. Si ricorda che la registrazione può essere interrotta e ripresa andando sul sito <https://portal.italgrid.it/> e cliccando sulla voce “Sign In”. Arrivati al secondo step di questa procedura, cioè il caricamento del certificato, arriverà alla casella di posta con cui si è effettuato l’accesso (account dell’università oppure di INFN) una mail dal “Portal Administrator” del portale Grid che conferma la creazione del profilo sul suddetto portale. Si procede col terzo step selezionando la VO di appartenenza. Ci si troverà di fronte alla seguente schermata, e dopo la voce “Enter your VO’s name” inserire “gridit”.

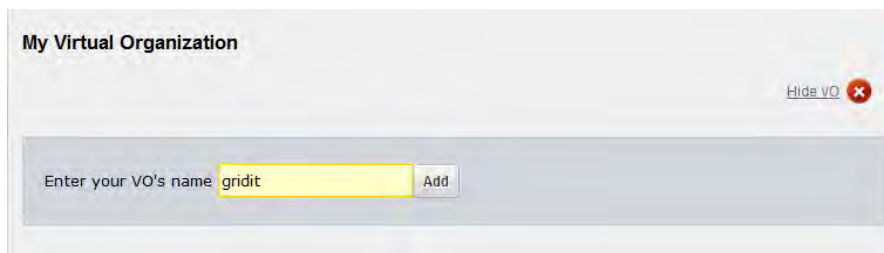


Figura D.15: scelta della propria VO

Per evitare errori, selezionare l’organizzazione corretta dal menù a tendina che apparirà dopo aver inserito le prime lettere del nome della VO. Confermando con il tasto “Add”, si aprirà la schermata di conferma. Cliccare sul tasto “Actions”, e dal menù a tendina che si apre scegliere “Set Role VO” per selezionare il gruppo di appartenenza, ovvero Ansys.

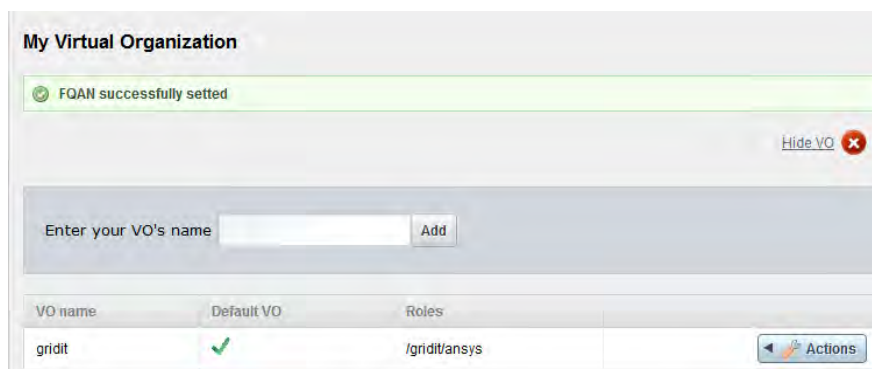


Figura D.16: conferma di appartenenza alla VO

Apparirà una schermata in cui è possibile selezionare il gruppo a cui si interessa accedere per eseguire le simulazioni con Ansys®. Per la selezione scegliere /gridit/ansys dal menù di sinistra, “My available attributes”, e trascinarlo in quello di destra, “Attributes I want to use”.

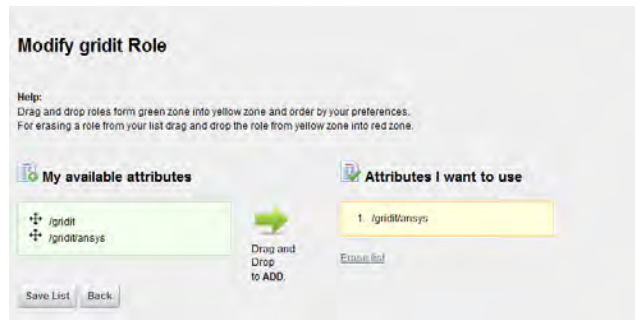


Figura D.17: scelta del gruppo

Uscire dalla procedura premendo il tasto “Registration Terminated”. Per Lanciare le simulazioni è necessario spedire una mail all’indirizzo igi-portal-admin@lists.italiangrid.it richiedendo l’iscrizione al gruppo Ansys. Si consiglia di specificare il ruolo di tesista magistrale presso i Laboratori Nazionali di Legnaro. Dopo aver atteso qualche tempo, sarà possibile accedere al portale <https://portal.italiangrid.it/gruop/ansys1>, utilizzando le credenziali inserite nella procedura di registrazione.

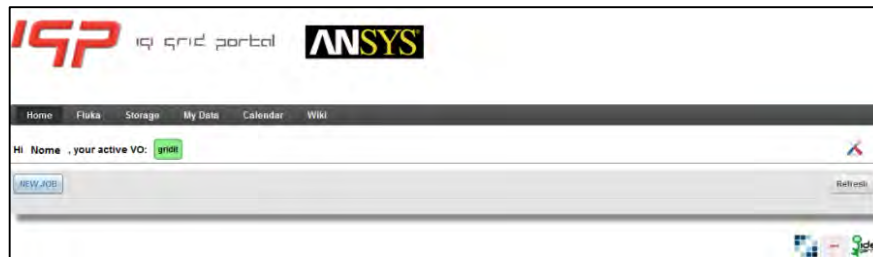


Figura D.18: Accesso al gruppo Ansys

D.5 Tutorial per il lancio di una simulazione

Dopo essersi collegati al sito <https://portal.italiangrid.it/gruop/ansys1> ed aver effettuato il *Login*, prima di eseguire qualsiasi operazione sul portale, è necessario aggiornare il proxy inserendo la propria *password*. Dalla schermata iniziale, riportata in Figura D.19, è possibile sottomettere un Job. E' necessario possedere lo script APDL e un archivio in formato .tar contenente tutti i file necessari all’analisi, cioè i modelli geometrici (.iges/.igs), eventuali macro (.mac), etc. Per creare tale archivio, che non deve essere compresso (opzione “NON COMPRESSO” o “STORE” nel software per gestire gli archivi), si possono utilizzare programmi quali 7zip, scaricabile gratuitamente.

È importante creare un archivio dei file necessari alla simulazione, e non contenere invece la cartella con i file all'interno; inoltre per evitare errore nel lancio dell'analisi e nella gestione dei file sul portale conviene che i nomi di tutti gli oggetti, cioè APDL ed archivio non contengano spazi o punti. Una volta in possesso di questi prerequisiti, si può cliccare sulla voce "NEW JOB" per procedere col caricamento dei file necessari. Comparirà la seguente schermata (Figura D.19):

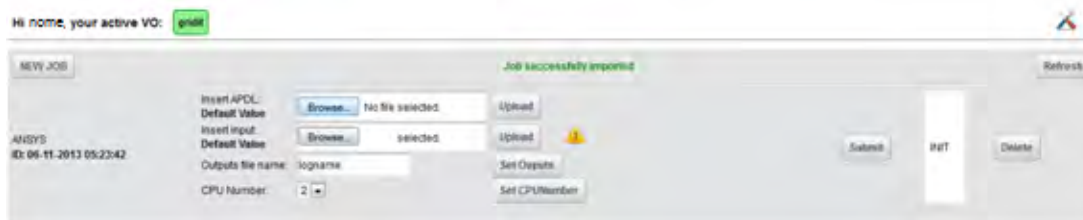


Figura D.19: schermata iniziale per il lancio di una simulazione

Procedere come segue:

1. Cliccare sul tasto "Browse..." alla voce "Insert ADPL". Si aprirà una finestra da cui selezionare il file di testo corretto. Confermare la scelta con il tasto "Upload";
2. Procedere al caricamento dell'archivio .tar: cliccando sul tasto "Browse..." alla voce "Insert Input" è possibile selezionare l'archivio. Confermare con il tasto Upload, come in precedenza;
3. Impostare il nome del file di Output nell'opportuna finestra, premendo su "Set Outputs" per confermare la scelta. Il nome non deve contenere spazi perché il job venga lanciato correttamente;
4. Allo stesso modo si può scegliere il numero di processori da usare in parallelo. Si consiglia comunque di mantenere le impostazioni di default;
5. Si può inviare la simulazione alla centrale di calcolo premendo "Submit".

Una volta eseguita la procedura descritta, è possibile aggiornare la pagina con "Refresh" e controllare i progressi della simulazione. Se tutto è stato eseguito correttamente, la barra bianca sul lato destro dello schermo con lo stato "INIT" dovrebbe diventare arancione e lo stato mutare in "SUBMITTED" (Figura D.20).

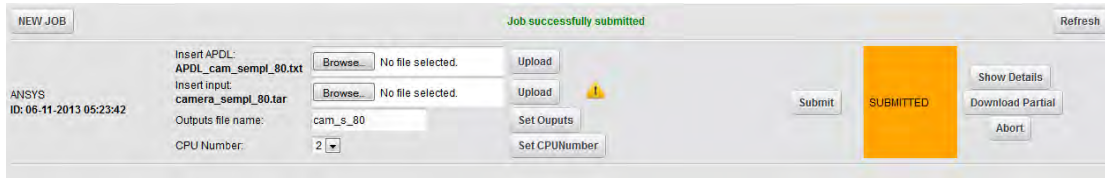


Figura D.20: schermata che avvisa l'utente del corretto invio della simulazione

A destra compaiono dei nuovi pulsanti: con “*Show Details*” si apre una videata con una panoramica su tutte le simulazioni in corso ed il loro stato; con “*Download Partial*” si può aprire il file .log che è emesso in output dal processo in corso, ed è quindi possibile controllare i messaggi di errore e la convergenza dell'analisi; con “*Abort*” si annulla la attuale simulazione. Dopo pochi secondi da quando si è inviata la simulazione, premendo il tasto “*Refresh*” in alto a destra, la schermata aggiornata dovrebbe confermare l'avvio dell'analisi con la comparsa di una barra rossa con lo stato “*RUNNING*” al posto di quella arancione (Figura D.21).

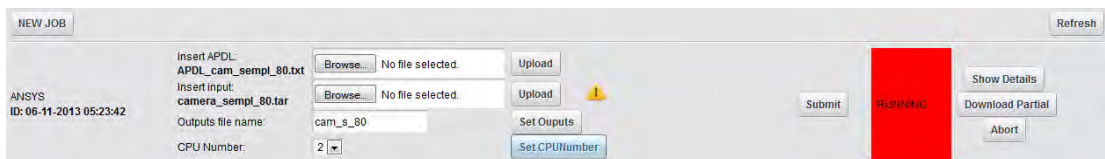


Figura D.21: l'analisi sta procedendo correttamente

E' possibile che la simulazione non venga eseguita in modo corretto oppure si verifichino errori durante l'analisi. In questo caso, dopo ave premuto il tasto “*Refresh*”, la barra rossa diventerà azzurra e comparirà lo status “*ERROR*” (Figura D.22). La comparsa di questo stato non significa che ci siano per forza errori nell'APDL o nell'archivio .tar (eventuali errori dovuti alla simulazione si possono leggere nel file *log*, dove compare il report delle attività che sono svolte da Ansys e dove è possibile leggere i messaggi di errore dati in output dal software come l'eventuale non convergenza della soluzione o la mancata lettura di una macro assente nell'archivio). Lo stato ERROR può dipendere dallo stato del portale o del proxy (ad esempio se non viene aggiornato, in seguito viene spiegato come aggiornarlo).

Per riprendere la simulazione ci sono due possibilità: scegliendo una delle opzioni che appaiono sopra il tasto “*Submit*”, mettendo una spunta nella relativa. E' possibile riavviare da capo l'analisi oppure riprendere il calcolo dall'ultimo substep eseguito.

Se lo status di errore appare pochi secondi dopo che è stata avviata la simulazione e il pulsante “*Download Partial*” rimanda ad una pagina con un messaggio di errore (del tipo *file not found*), si può provare ad aprire le impostazioni del proprio account VO premendo il tasto verde gridit a fianco alla frase “*your active VO*” in alto a sinistra (Figura D.23).

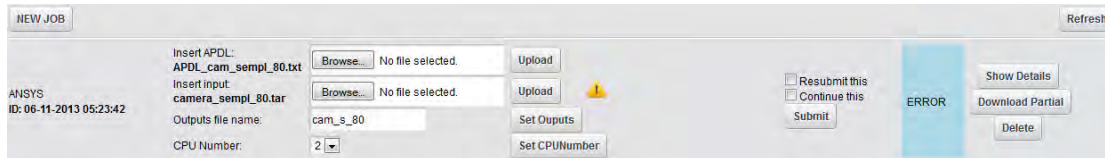


Figura D.22: comparsa dello stato di errore

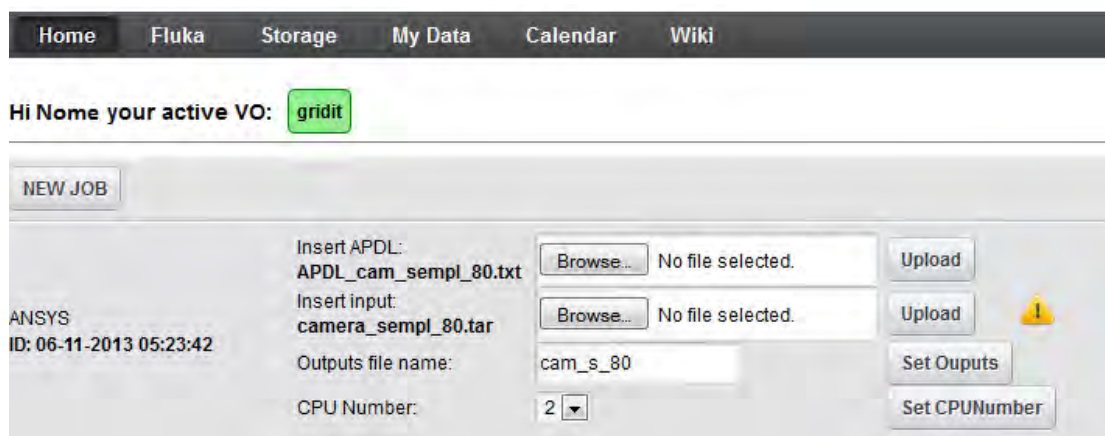


Figura D.23: il tasto verde permette l'accesso alle opzioni sulla propria VO

Si apre un piccolo pop-up con lo stato, cioè “*Role*” e “*Time left*”. Il primo deve essere impostato su /gridit/ansys (dovrebbe essere il valore che si trova automaticamente). Il secondo è il tempo rimanente alla scadenza del proxy. Per settare questi parametri si può premere su pulsante “*Renew Credential*” in basso, dopo aver inserito la propria password (Figura D.25).

Nella schermata che si apre si può far ripartire il contatore del tempo impostare il ruolo corretto nel Grid da un menù a tendina. I dati immessi vanno confermati inserendo la password scelta durante la registrazione e premendo il tasto “*Renew Credentials*”. Una volta eseguito questo passaggio, è consigliabile uscire dal proprio account e rientrare perché le modifiche siano effettive. Le impostazioni sul proxy vanno riaggornate ogni qualvolta il timer sta per azzerarsi (il contatore che segnala il conto alla rovescia è visibile in Figura D.24).

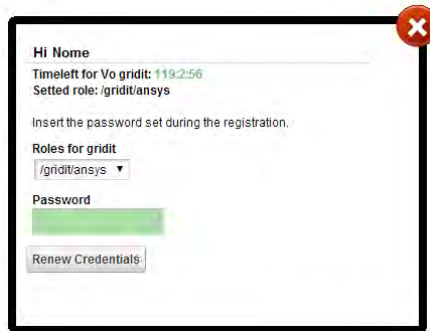


Figura D.24: impostazioni personali e dettagli proxy

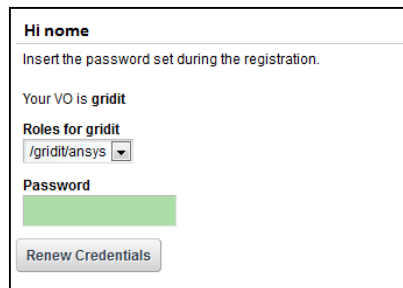


Figura D.25: schermata che permette di reimpostare le proprie credenziali

Terminata una simulazione, premendo il tasto “Refresh” apparirà la barra verde con lo stato “FINISHED” al posto di quella rossa (Figura D.26).

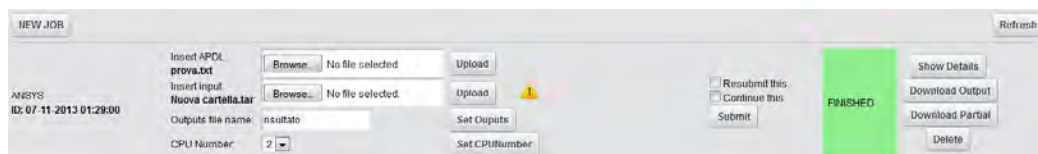


Figura D.26: schermata che informa l’utente dell’avvenuta soluzione

A questo punto è possibile scaricare un archivio contenente il file con i risultati premendo il tasto “Download Outputs” sulla destra. Nell’archivio sarà presente il file database (.db) con cui eseguire il post-processing. Per una corretta gestione del portale è necessario relazionarsi con gli altri membri appartenenti ai LNL che usano tale piattaforma, poiché il numero di licenze di cui i laboratori possono disporre è limitato, perciò non è possibile sottomettere troppe simulazioni per volta, pena la comparsa dello stato ERROR.

Si consiglia in generale di sottomettere sempre in media due simulazioni per volta e di non superare il numero di tre job sul portale.

Nel caso non si rinnovino le impostazioni del proxy prima della scadenza, le simulazioni in corso continueranno fino al termine ma lo stato sarà convertito in ERROR.

Attraverso il tasto “*Download Partial*” si potrà comunque controllare il file log, contenente le informazioni sullo stato di avanzamento del job. Una volta terminata, per poter scaricare i risultati è necessario aprire il file log e modificare l’indirizzo visualizzato sostituendo all’estensione “.log” la stringa “.tar.gz”.

Ad esempio, dal tasto “*Download Partial*” si viene inviati all’indirizzo: http://darkstorm.cnaf.infn.it:8085/webdav/zansys/nwh3rufmyqajsospgl9sx8qxiiu_/logname_20140612113535.log; i risultati potranno essere scaricati inserendo come indirizzo http://darkstorm.cnaf.infn.it:8085/webdav/zansys/nwh3rufmyqajsospgl9sx8qxiiu_/standard_370_20140612113535.gz.tar.

D.6 Accortezze da adottare nei listati di codice APDL di una analisi [1]

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

- Le macro devono essere richiamate con l’istruzione in formato esteso **USE, nome_macro.mac*;
- Il modello deve essere concepito in modo che i carichi siano definiti su elementi geometrici (ad esempio i *keypoint*) e non sui nodi degli elementi;
- È possibile lanciare simulazioni in cui sono definiti più *loadstep*, purché arrivino a convergenza prima della risottomissione (cioè prima di 23 ore); infatti lo script per la risottomissione automatica attualmente non prevede l’istruzione *LSSOVE*. In alternativa è possibile utilizzare un carico progressivo utilizzando un approccio vettoriale;
- Posizionare il comando *SAVE* prima e dopo il comando *SOLVE* senza specificare il *Jobname*, infatti il nome deve essere quello preimpostato "file";
- Per analisi pesanti, cioè che richiedono più di 23 ore, si consiglia di introdurre l’istruzione "*OTRES, NSOL, ALL*" in modo da salvare i risultati al termine di ogni *substep*. Questi verranno automaticamente caricate nell’auto-risottomissione del *Job*;
- È necessario assegnare sempre un tempo per l’applicazione del carico (istruzione *TIME*), tale valore deve essere numerico e non rappresentato da una variabile, pena l’impossibilità di risottomissione automatica dell’analisi e conseguente comparsa dello stato di ERROR. Nel caso di analisi non transitorie è necessario inserire l’istruzione *TIME, 1*.

BIBLIOGRAFIA

- [¹] A. Prevedello, Studio elettro-termico, progettazione meccanica e test del sistema target - sorgente per il progetto SPES, Tesi di Laurea Magistrale, Università degli Studi di Padova, 2012/2013.
- [²] D. Michelotto, Analisi e sviluppo di Web Service orientati alla costruzione di servizi e portali Web per l'autenticazione, l'autorizzazione e la gestione di applicazioni scientifiche in ambiente Grid, Tesi di Laurea Specialistica, Università degli Studi di Ferrara.
- [³] «Guida utilizzo portale per software Ansys,» Indirizzo:
<https://portal.italiangrid.it/group/spes/wiki/-/wiki/Main/FrontPage#section-FrontPage-Guida+utilizzo+portale+per+software+Ansys>.
- [⁴] «ItalianGrid,» Indirizzo: <http://www.italiangrid.it/>.

APPENDICE E

Datasheet dei normalizzati commerciali scelti

E.1 Introduzione

In questa appendice vengono riportati i datasheet dei componenti commerciali presenti nel front-end protonico, dove sono riportate le caratteristiche tecniche e i parametri funzionali di maggior interesse, assieme ai relativi riferimenti bibliografici.

E.2 Connettore elettrico [1]

Azienda: Kurt J.Lesker Company

Codice prodotto: IFTDG012001

Riferimenti: <http://www.lesker.com>



SMB Feedthroughs - Weldable, Single-Ended

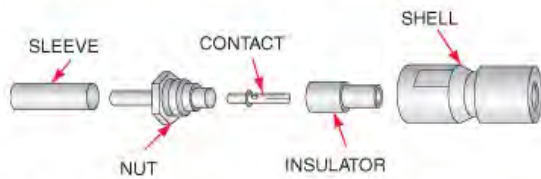
[This Is What a Mother's Body Really Looks Like Without Airbrushing! Continued.](#) | [BuzzWok.com](#) | [The Best Buzzing Stories Frying In One Place](#) (Buzzwok)

These instrumentation feedthroughs have SMB coaxial connectors on the air-side. The alumina insulated 416 stainless steel conductor is rated at 500V with a grounded shield and at 1000V with a floating shield, at a maximum current of 0.5A. An air-side SMB cable plug is included with the feedthrough but vacuum-side connectors are not. Feedthroughs of this type are designed for welding into a suitably prepared through-hole in a flange.

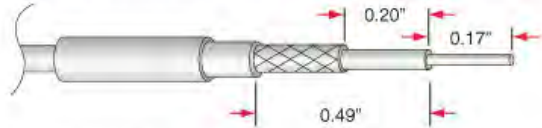
Specifications Table

Conductor Material	Stainless Steel (type 416)
Insulator Material	Alumina
Cable	RG-174U
Connection	Push Clip
Vacuum Application	HV or UHV
Temperature Range (for metal seals)	Weld Adapter, CF: To +450°C
Temperature Range (for elastomer seals)	KF, O-Ring, NPT: To +150°C
Temperature Max. Ramp Rate	25°C/minute
Temperature Range (cable connectors)	Cable Connectors: -65°C to +165°C
Max. Voltage (for floating shields)	Shield-Ground: 1,000V DC Shield-Pin: 500V DC
Max. Voltage (for grounded shields)	500V DC
Max. Current	0.5A

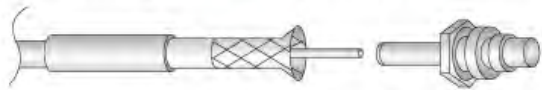
SMB Feedthroughs Cabling Instructions



1) Slide grip sleeve over cable jacket. Cut and strip cable jacket, braid, and the dielectric to dimensions indicated in drawing. Make all cuts square. Do not nick braid, dielectric, or center conductor. Wet conductor using a non-acid core 60–40 tin–lead solder. Do not overheat.



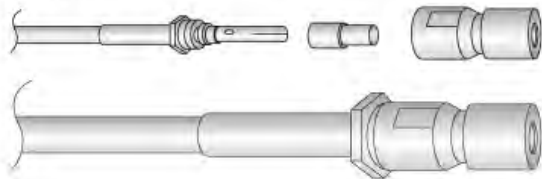
2) Flare braid slightly, but do not fray. Slide nut onto cable so that stem slides under braid. Push until dielectric bottoms out inside nut.



3) Slide grip sleeve forward over braid and butt against nut. Remove all slack in braid. Crimp grip sleeve, keeping cable dielectric bottomed out inside nut. Slide contact in place using non-acid flux. Do not get solder on outside surface of contact.



4) Slide insulator over contact, then slide cable assembly into shell. Screw together with wrench, holding cable assembly stationary while rotating shell.

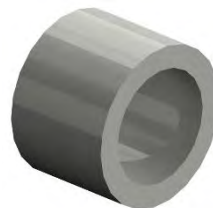


E.3 Isolatore ceramico [2]

Azienda: Alusik

Codice prodotto: type C799 - R207

Riferimenti: <http://www.ingenieurparadies.de>



Technical data

Quality	Dim.	AluSIK-60 ZA 10A	AluSIK-80 GA AluSIK-80 ZA H	AluSIK-60 ZB HE	AluSIK-99 GB AluSIK-99 ZA TEH	CarSIK-70 ZA	CarSIK-90 ZA
Chem./phys. Composition		Mullite	Corundum	Sillimanite	Sintered alumina	Mullite-bonded SiC	Mullite-bonded SiC
Type acc. to DIN VDE 0335		C 610	C 530	-	C 799	-	-
Chem. composition							
AL₂O₃	%	60	80	60	99.7	70 SiC*	90 SiC*
Type of body		impervious	porous	porous	impervious	porous	porous
Bulk density	g/cm ³	2.7	2.4	2.3	3.8	2.1	2.2
Open porosity	%	0	27	22	0	25	25
Limit of application	°C	1600	1500	1400	1750	1400	1450
Thermal expansion 20 – 1000 °C	10 ⁻⁶ K ⁻¹	5.5	5.8	6.5	8	5	5
Thermal conductivity 20 – 100 °C	W/mK	5	2	1.5	25	7	25
Thermal shock resistance		good	very good	good	medium-good	very good	very good
Spec. electric resistance at RT	Ω cm	10 ¹³	-	-	10 ¹⁴	-	-
600 °C		10 ⁶	10 ⁶	10 ⁶	10 ⁸	-	-
Max. production length for tubes	mm	3000	3000	3000	3000	2200	1900

*Addition of SiC to mix

		AluSIK-90 TA	MagSIK-96 TC	ZrSIK-95 TA
Chemical analysis		AL ₂ O ₃ 90%	MgO 96%	ZrO ₂ 95% CaO 4%
Bulk density	g/cm ³	2.5	2.8	4.3
Open porosity	%	27	25	25
Limit of application	°C			
▪ oxidizing		1750	2400	2400
▪ reducing		1600	1700	2100
▪ vacuum		-	1600	2200
Thermal conductivity 20 – 100 °C	W/mK	3	13	2
Thermal expansion 20 – 1000 °C	10 ⁻⁶ K ⁻¹	7.5	-	9.6

Above values were established on test pieces and identify the characteristic data of our products.

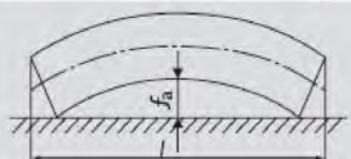
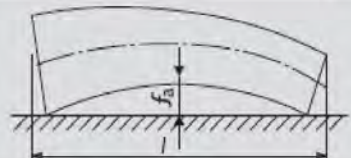
Transfer of these values into practice depends on individual geometry and application of each part.

Diameter tolerances – deflectional tolerances

without grinding to DIN 40 680, issue 1983

Nominal dimensional range for diameter or length in mm	Degree of accuracy		Nominal dimensional range for length in mm	Degree of accuracy	
	coarse Permissible deviation in mm	medium Permissible deviation in mm		coarse Permissible deflection f_a in mm	medium Permissible deflection f_a in mm
up to 4	± 0.4	± 0.15	up to 30	± 1.7	± 0.15
above 4 up to 6	± 0.6	± 0.20	above 30 up to 40	± 1.8	± 0.20
above 6 up to 8	± 0.7	± 0.25	above 40 up to 50	± 1.9	± 0.25
above 8 up to 10	± 0.8	± 0.30	above 50 up to 60	± 2.0	± 0.30
above 10 up to 13	± 1.0	± 0.35	above 60 up to 70	± 2.1	± 0.35
above 13 up to 16	± 1.2	± 0.40	above 70 up to 80	± 2.1	± 0.40
above 16 up to 20	± 1.2	± 0.45	above 80 up to 90	± 2.2	± 0.45
above 20 up to 25	± 1.5	± 0.50	above 90 up to 100	± 2.3	± 0.50
above 25 up to 30	± 1.5	± 0.55	above 100 up to 110	± 2.4	± 0.55
above 30 up to 35	± 2.0	± 0.60	above 110 up to 125	± 2.5	± 0.65
above 35 up to 40	± 2.0	± 0.65	above 125 up to 140	± 2.6	± 0.70
above 40 up to 45	± 2.0	± 0.70	above 140 up to 155	± 2.7	± 0.80
above 45 up to 50	± 2.5	± 0.80	above 155 up to 170	± 2.9	± 0.85
above 50 up to 55	± 2.5	± 0.90	above 170 up to 185	± 3.0	± 0.90
above 55 up to 60	± 2.5	± 1.00	above 185 up to 200	± 3.1	± 1.00
above 60 up to 70	± 3.0	± 1.20	above 200 up to 250	± 3.5	± 1.25
above 70 up to 80	± 3.5	± 1.40	above 250 up to 300	± 3.9	± 1.50
above 80 up to 90	± 4.0	± 1.60	above 300 up to 350	± 4.3	± 1.75
above 90 up to 100	± 4.5	± 1.80	above 350 up to 400	± 4.7	± 2.00
above 100 up to 110	± 5.0	± 2.00	above 400 up to 450	± 5.1	± 2.25
above 110 up to 125	± 5.5	± 2.20	above 450 up to 500	± 5.5	± 2.50
above 125 up to 140	± 6.0	± 2.50	above 500 up to 600	± 6.3	± 3.00
above 140 up to 155	± 6.5	± 2.80	above 600 up to 700	± 7.1	± 3.50
above 155 up to 170	± 7.0	± 3.00	above 700 up to 800	± 7.9	± 4.00
above 170 up to 185	± 7.5	± 3.40	above 800 up to 900	± 8.7	± 4.50
above 185 up to 200	± 8.0	± 3.80	above 900 up to 1000	± 9.5	± 5.00
above 200 up to 250	± 9.0	± 4.20	above 1000	± 1.5+0.8% x L	± 0.5% x L
above 250 up to 300	± 10.0	± 4.60			
above 300 up to 350	± 11.0	± 5.00			
above 350 up to 400	± 12.0	± 5.50			
above 400 up to 450	± 13.0	± 6.10			
above 450 up to 500	± 14.0	± 6.80			
above 500 up to 600	± 15.0	± 7.60			
above 600 up to 700	± 16.0	± 8.30			
above 700 up to 800	± 17.5	± 9.00			
above 800 up to 900	± 19.0	± 9.50			
above 900 up to 1000	± 20.0	± 10.00			
above 1000	± 0.02 x D	± 0.01 x D			
Accuracy					
DIN VDE 0335, Type					
Manufacturing method					
cast, extruded Ø 30 mm and above	•	•	•		
extruded up to Ø 30 mm				•	•

Manufacturing method	Degree of accuracy	
	coarse	medium
Cast and extruded for parts Ø 30 mm and above	application customary	
extruded for parts up to Ø 30 mm		application customary

Owing to a modern process control system we are able to achieve values on diameter, length and bending which are considerably better than standardized. Should you require smaller tolerances, please send us your inquiry. Those data stipulated for the "coarse" degree of accuracy do not apply for the first production, for which instead we have to come to a special agreement.

• Manufacturing method customary

Sintered alumina tubes, AluSIK-99 ZA type C 799 "TEH"

Order No.	Diameter mm
R 200	1 x 0.5
R 201	1.5 x 0.8
R 202	2 x 1
R 203	3 x 1.5
R 204	4 x 2
R 205	5 x 3
R 206	6 x 3
R 207	7 x 4
R 208	8 x 5
R 209	10 x 6
R 210	11 x 7
R 211	12 x 8
R 212	15 x 10
R 213	17 x 12
R 214	20 x 15
R 215	24 x 18
R 216	27 x 20
R 217	30 x 23
R 218	32 x 25
R 219	35 x 27
R 220	38 x 30
R 221	42 x 34
R 222	46 x 38
R 223	50 x 40
R 224	58 x 48
R 225	65 x 55
R 226	70 x 60
R 227	75 x 65



E.4 Motore pneumatico [3]

Azienda: FIAM

Codice prodotto: 28M40R-D10-INFN

Riferimenti: <http://www.fiamairtools.com>





Modelli Reversibili

Modello	Codice	Tipo	Watt	Velocità alla potenza max giri/1'	Coppia alla potenza max Nm	Coppia di spunto Nm	Velocità a vuoto giri/1'	Consumo a regime alla potenza max l/s	Peso Kg
15M1600R-D6	182911100	C	120	8300	0,15	0,20	16000	4,3	0,32
15M440R-D6	182911400	C	120	2200	0,60	0,80	4400	4,3	0,32
15M300R-D6	182911300	C	120	1490	0,75	1,00	3000	4,3	0,32
15M220R-D6	182911200	C	120	1100	1,05	1,50	2200	4,3	0,32
15M120R-D6	182912100	C	120	590	1,90	2,60	1200	4,3	0,43
15M80R-D6	182912800	C	120	410	2,50	3,60	800	4,3	0,43
15M58R-D6	182912500	C	120	300	4,00*	5,50*	580	4,3	0,43
20M1650R-D10	183511100	C	160	9000	0,15	0,25	16500	5,0	0,40
20M400R-D10	183511300	C	160	1950	0,80	1,20	4000	5,0	0,40
20M250R-D10	183511200	C	160	1330	1,40	2,20	2500	5,0	0,40
20M100R-D10	183512900	C	160	550	3,05	4,80	1000	5,0	0,54
20M58R-D10	183512500	C	160	300	5,70*	7,50*	580	5,0	0,54
28M1300R-D10	185811100	C	210	6200	0,27	0,45	13000	5,8	0,58
28M415R-D10	185811400	C	210	2075	0,85	1,2	4150	5,8	0,58
28M345R-D10	185811300	C	210	1675	1,25	1,65	3450	5,8	0,58
28M235R-D10	185811200	C	210	1230	1,8	2,4	2350	5,8	0,58
28M190R-D10	185811110	C	210	855	2,3	2,9	1850	5,8	0,58
28M110R-D10	185812100	C	210	500	3,9	5,1	1100	5,8	0,78
28M90R-D10	185812900	C	210	410	4,7	6,8	900	5,8	0,78
28M70R-D10	185812700	C	210	330	6,2	8	700	5,8	0,78
28M40R-D10	185812400	C	210	190	11,50*	15,50*	395	5,8	0,78
MM45R/2 E	185212401	C	240	210	10,5	21	420	7	1,22
MM32R/2 E	185212301	C	240	145	15,2	30,4	290	7	1,22
MM25R/2 E	185212201	C	240	105	20,9	41,8	210	7	1,22
MM13R/2 E	185213101	C	240	60	36,3	45 ⊕	120	7	1,50
MM9R/2 E	185213901	C	240	32	45 ⊕	45 ⊕	64	7	1,50
MM5R/2 E	185213501	C	240	22	45 ⊕	45 ⊕	44	7	1,50
MN1500R	186210112	C	375	7500	0,5	0,9	15000	10	1,45
MN450R	186211412	C	375	2250	1,6	3,1	4500	10	1,45
MN250R	186211212	C	375	1250	2,8	5,7	2500	10	1,45
MN170R	186211112	C	375	850	3,8	7,5	1700	10	1,45
MN130R	186212112	C	375	650	5	10	1300	10	1,85
MN80R	186212812	C	375	400	8,5	17	800	10	1,85
MN40R	186212412	C	375	200	16	32	400	10	1,85
MN28R	186212312	C	375	140	21	42	280	10	1,85
MN20R	186212212	C	375	100	28	45 ⊕	200	10	1,85
MO1200R	187210102	C	645	6000	1,3	2,5	12000	18	3,3
MO360R	187211302	C	645	1800	4,2	8	3600	18	3,4
MO220R	187211202	C	645	1100	7,7	15	2200	18	3,4
MO110R	187212102	C	645	550	14,3	28	1100	18	4,1
MO70R	187212702	C	645	350	25	49	700	18	4,1
MO32R	187213302	C	645	160	48	90 ⊕	320	18	4,8
MO20R	187213202	C	645	100	77	90 ⊕	200	18	4,8

* La coppia massima consentita, ad uso continuativo, è di 4 Nm per 15M, da 4 a 5 Nm per 20M e 8 Nm per 28M.
 ⊕ La coppia indicata è il massimo valore con cui si può utilizzare il motore, al fine di assicurare la durata degli organi meccanici interni.

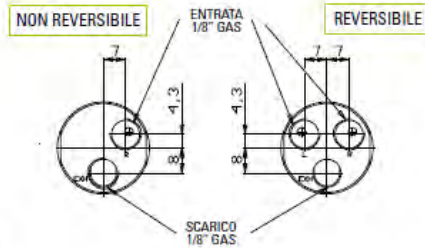
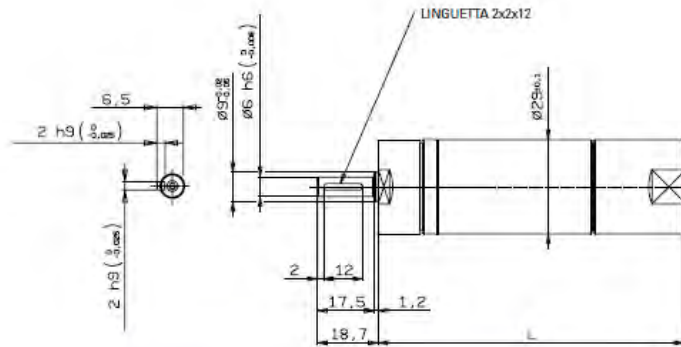
Dimensioni

Modelli con albero di uscita liscio

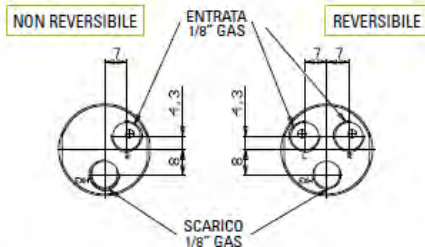
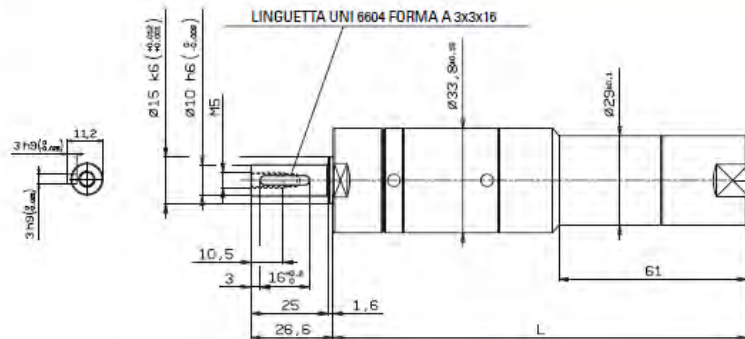
(con linguetta UNI 6604 forma A: Ø 6 mm per 15M; Ø 10 mm per 20M e 28M;
Ø 13 mm per MM; Ø 14 mm per MN; Ø 24 mm per MO)

Dimensioni di ingombro (mm)

Modello	L	L1
15M1900D-D6	94,5	-
15M550D-D6	94,5	-
15M375D-D6	94,5	-
15M260D-D6	94,5	-
15M140D-D6	120	-
15M95D-D6	120	-
15M70D-D6	120	-
15M1600R-D6	94,5	-
15M440R-D6	94,5	-
15M300R-D6	94,5	-
15M220R-D6	94,5	-
15M120R-D6	120	-
15M80R-D6	120	-
15M58R-D6	120	-
20M2000D - D10	103	-
20M430D - D10	103	-
20M260D - D10	103	-
20M105D - D10	134	-
20M60D - D10	134	-
20M1650R - D10	103	-
20M400R - D10	103	-
20M250R - D10	103	-
20M100R - D10	134	-
20M58R - D10	134	-
28M1700D-D10	134,5	111
28M600D-D10	134,5	111
28M480D-D10	134,5	111
28M330D-D10	134,5	111
28M265D-D10	134,5	111
28M165D-D10	165,5	142
28M120D-D10	165,5	142
28M100D-D10	165,5	142
28M55D-D10	165,5	142
28M1300R-D10	134,5	111
28M415R-D10	134,5	111
28M345R-D10	134,5	111
28M235R-D10	134,5	111
28M190R-D10	134,5	111
28M110R-D10	165,5	142
28M90R-D10	165,5	142
28M70R-D10	165,5	142
28M40R-D10	165,5	142



Modelli 15M



Modelli 20M

E.5 Passante rotante [4]

Azienda: VG SCIENTA

Codice prodotto: ZRD-91

Riferimenti: <http://www.vgscienta.com>



2.1 Specification

Speed	500rpm maximum
Torque	0.125 Nm maximum at 500rpm, 0.5Nm maximum at 10rpm
Thrust	10N maximum, axial and radial
Pressure Range	Atmosphere to 10^{-11} mbar
Bakeout Temperature	250°C maximum without dismantling, 400°C after disassembly
Mounting Flange	34mm OD
Angular Range	360° continuous
Angular Resolution	1°

2.2 Construction

The vacuum envelope of the RD91 family of drives is of stainless steel construction which incorporates a metal bellows and wobble drive which are designed for operation in high or ultra-high vacuum environments.

The RD91 has an anodised aluminium handwheel graduated in 50 divisions, a position lock and a 1° vernier scale are fitted as standard (see figure 1).

2.3 Bakeout

2.3.1 Bakeout up to 250°C

The RD91 may be baked at temperatures up to 250°C without any dismantling. Ensure that the position lock is released before bakeout. After bakeout, allow the drive to cool for at least a further 6 hours after the external housing has reached room temperature before operating. The in-vacuum components cool slowly and may be damaged if operated whilst still hot.

2.3.2 High Temperature Bakeout from 250°C to 400°C

Prior to bakeout at temperatures between 250°C and 400°C, some disassembly of the rotary drive is required.

Note:

In order to retain the orientation of the shaft with respect to the handwheel it is necessary that the position lock screw ring, the stainless steel bearing housing beneath it, and the stainless steel flange body all retain their relative orientations to one another. This can be achieved by scribing a line across all three adjoining end faces before dismantling the drive. The three components should be re-aligned on reassembly.

Disassemble as follows:

- 1) Mark a line (if required) as described in the note above.
- 2) Unscrew (3 turns) the three M4 radial grub screws that secure the position lock/ vernier ring to the bearing housing. Move the ring toward the vacuum flange.
- 3) Unscrew (3 turns) the three M4 radial grub screws (now visible) that secure the handwheel bearing assembly to the stainless steel body.
- 4) Ease the handwheel bearing assembly from the drive unit. Note the handwheel orientation relative to the bellows bearing offset.

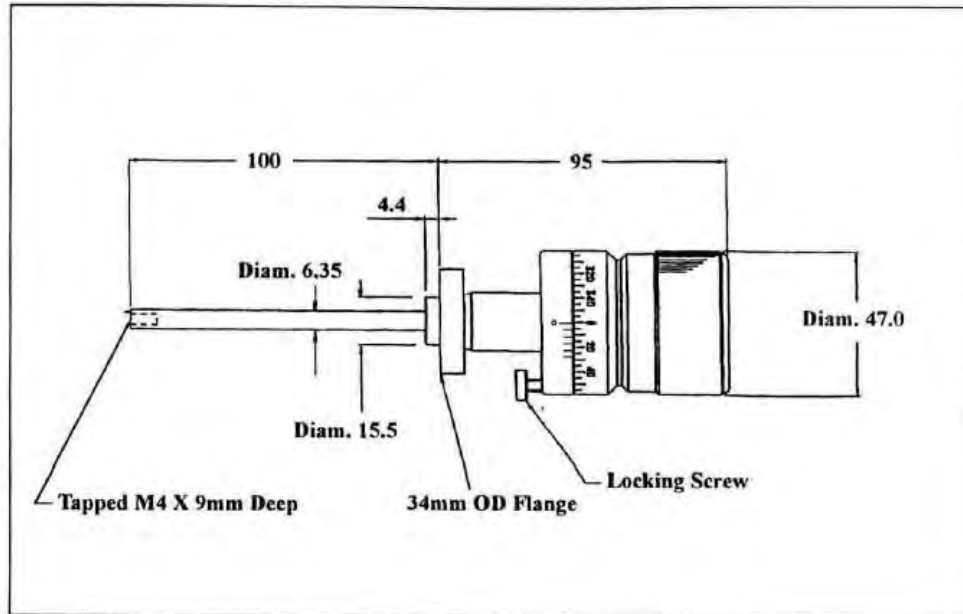


Figure 1 - The RD91 rotary drive

- 5) Remove the position lock ring completely from the drive.
- 6) Remove the circlip and the bearing from the bellows end.
- 7) The drive is now ready for bakeout up to 400°C maximum.

After bakeout, reassemble as follows:

- 8) The bellows end must be at room temperature before reassembly (see section 2.3.1)
- 9) Reassemble the drive following the reverse procedure of items 1) to 6) described above. During reassemble the user should note the following:
 - a) The handwheel orientation relative to the bellows offset should be the same as before removal.
 - b) The items should be assembled with care, and must not be forced together.
 - c) Ensure that the grub screws do not protrude into the bore of the components before refitting the handwheel bearing assembly or the position lock ring.
 - d) Insert the position lock ring over the body before fitting the handwheel assembly.
 - e) Align the scribed line on the stainless steel housing with that on the flange body.
 - f) Do not use excessive force when tightening the grub screws.
 - g) Align the scribed line on the position lock end face with that on the stainless steel bearing housing.

2.4 Maintenance

After repeated or extended bakeout some loss of rotational freedom may occur. This may indicate that the in-atmosphere bearings are in need of re-lubrication. To relubricate, proceed as follows:

- 1) Disassemble as if for high temperature bakeout as described in section 2.3.
- 2) Use Carbaflo lubricant (supplied in the ZHPTSLK lubrication kit) to relubricate the atmosphere bearings; gently rotate the bearing to distribute the lubricant.
- 3) Wipe away any excess lubricant and then reassemble the rotary drive.

If other maintenance or repairs are required, the unit should be returned to VG Scienta service department.

E.6 Soffietti di allineamento [5]

Azienda: COMVAT

Codice prodotto: bellows DN100 – 316L

Riferimenti: <http://www.comvat.com>



Material:

DN:

mm inch

ID:

OD:

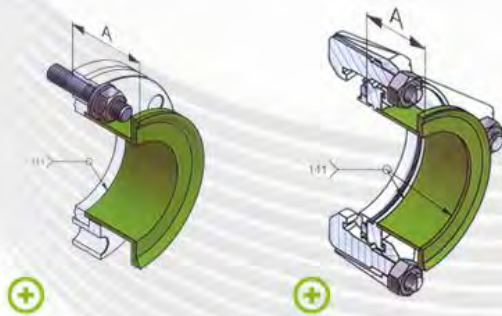
ID Inside diameter
OD Outside diameter
lc Compressed bellows length
lf Free bellows length
z Axial stroke

ID [mm]	OD [mm]	ID [inch]	OD [inch]	lc [mm]	lf [mm]	z [mm]	t [mm]	EA [cm ²]	SRCz [N/mm]	Gr
90	110	3.543	4.331	0.50	1.45	1.40	0.15	80.40	145.00	5
90	120	3.543	4.724	0.60	2.80	2.80	0.15	89.50	70.00	5
90.5	135	3.563	5.315	0.70	4.20	4.20	0.2	105.10	80.00	5
92	149	3.622	5.866	0.85	4.75	4.60	0.25	122.00	95.00	6
100	150	3.937	5.906	0.66	2.20	2.50	0.2	129.30	66.00	5
102	128	4.016	5.039	0.50	1.50	1.90	0.15	106.60	145.00	5
102	132	4.016	5.197	0.60	2.60	3.10	0.15	110.70	75.00	5
102.5	150	4.035	5.906	0.90	4.40	4.60	0.25	131.40	135.00	5

End piece, two-part

DN	ID [mm]	OD [mm]	ID [Inch]	OD [Inch]	Di [mm]	Da [mm]	S [mm]	L CF [mm]	L ISO-K [mm]	A CF [mm]	A ISO-K [mm]
63	65.0	90.0	2.559	3.543	66.0	70.0	5.0	26.5	33.0	36.0	40.0
75	75.0	100.0	2.953	3.937	72.1	76.1	5.0	26.5	33.0	36.0	40.0
100	102.0	132.0	4.016	5.197	104.0	108.0	5.0	30.0	33.0	41.0	40.0
130	127.0	157.0	5.000	6.181	123.0	129.0	5.0	30.5	37.0	42.0	44.0
160	150.0	185.0	5.906	7.283	150.0	156.0	5.0	31.0	37.0	43.0	44.0
200	200.0	235.0	7.874	9.252	200.0	206.0	6.0	38.0	37.0	50.5	44.0
250	250.0	285.0	9.843	11.220	250.0	256.0	6.0	38.5	37.0	51.0	44.0
300	300.0	340.0	11.811	13.386	300.0	306.0	6.0	42.3	44.0	55.0	54.0
350	360.0	440.0	14.173	17.323	350.0	356.0	10.0	47.3	-	60.0	-
400	400.0	480.0	15.748	18.898	400.0	406.0	10.0	44.0	48.0	60.0	58.0
500	520.0	640.0	20.472	25.197	500.0	506.0	15.0	-	52.0	-	62.0
630	690.0	810.0	27.165	31.890	650.0	662.0	15.0	-	55.5	-	68.0

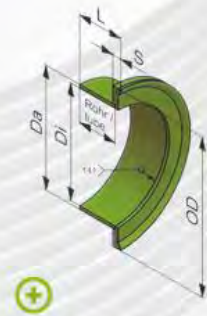
Installation



End piece, with CF flange

End piece, with ISO-K flange

Dimensioning



Endpiece, two-part

E.7 Valvola [6]

Azienda: VAT-VALVE

Codice prodotto: 482, DN100

Riferimenti: <http://www.vatvalve.com>





VAT Vakuumventile AG
CH-9469 Haag, Schweiz

Product data sheet

All-metal gate valve, Series 482, DN 100 (ID 4")

Ordering No. 48240-CE72-0002

Description

Flange		DN 100 CF-F
Actuator		Pneumatic double acting, compact - without solenoid valve - with position indicator
Feed through		Bellows
Option	=	Standard

Technical data

Leak rate	- Valve body - Valve seat	$< 1 \cdot 10^{-10}$ mbar ls ⁻¹ $< 1 \cdot 10^{-10}$ mbar ls ⁻¹
Pressure range		XUHV to 2 bar (abs)
Test pressure		1 bar
Differential pressure on the gate		≤ 2 bar
Differential pressure at opening		≤ 500 mbar, 1 bar with reduced cycle life
Conductance (molecular flow)		1 400 ls ⁻¹
Cycles until first service		20 000
Bake-out temperature (Maximum values: depending on operating conditions and sealing materials)	- Valve body - Actuator - Position indicator	≤ 300 °C ≤ 200 °C (for max. 100h) ≤ 80 °C
Heating and cooling rate		≤ 50 °C h ⁻¹
Material	- Valve body - Flange - Gate - Mechanism - Bellows	1.4435, AISI 316 L 1.4435 ESU, AISI 316 L ESR 1.4435, AISI 316 L 1.4435, AISI 316 L 1.4435, AISI 316 L
Seal	- Bonnet - Gate - Actuator	metal, silver plated metal, silver plated FKM (Viton®)
Mounting position		any
Radiation resistance	- Valve body - Actuator - Position indicators	10 ⁸ Gy (10 ¹⁰ rad) 10 ⁵ Gy (10 ⁷ rad) 10 ⁵ Gy (10 ⁷ rad)
Volume of pneumatic actuator		1.4 l / 0.049 ft ³
Compressed air min. – max. overpressure		4 - 8 bar / 58 - 116 psig
Compressed air connections		R 1/8" (USA: 1/8" NPT)
Actuation time (valid for RT, Ø6mm tubing at 4 bar with flow rate of 400 l/min)	- Closing - Opening	≤ 4.0 sec ≤ 4.0 sec

Weight

27 kg / 60 lbs

Behavior in case of compressed air pressure drop
- Valve closed
- Valve open

Valve remains in closed position
Undefined

Behavior in case of power failure

Depending on control

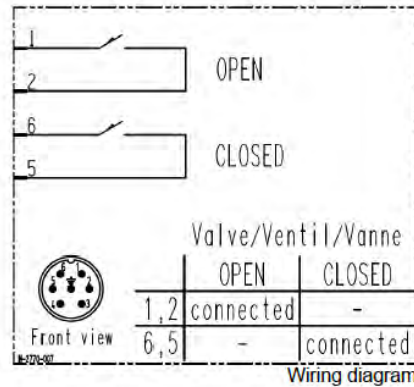
Related documents

Dimensional drawing No. 400589A

Electrical connections

Position indicator

Type micro switch
Voltage ≤ 50 V AC / DC
Current max. ≤ 1.2 A



Design

With compact actuator:
type 48 ... - E7 -

With extended actuator:
type 48 ... - E

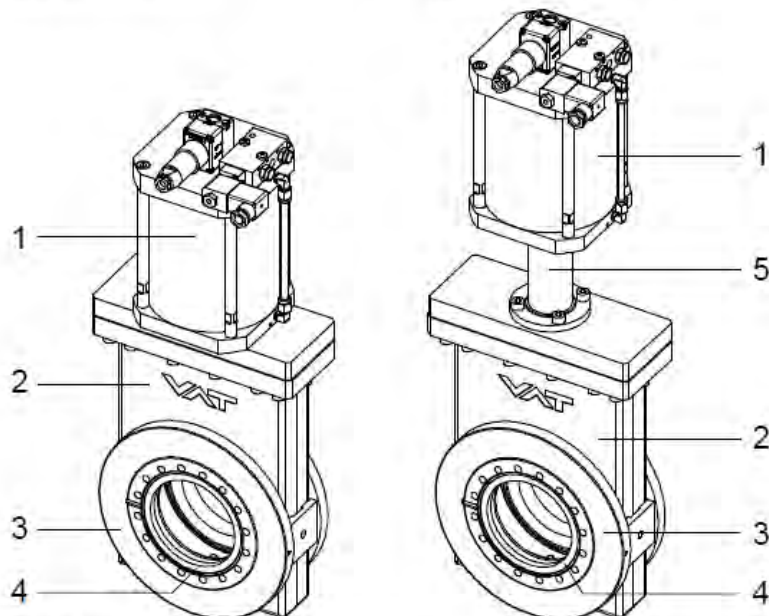


Figure 3-1

- 1 Actuator
- 2 Valve body
- 3 Connecting flange
- 4 Sealing surface
- 5 Distance piece

BIBLIOGRAFIA

[¹] <http://www.lesker.com>

[²] <http://www.ingenieurparadies.de>

[³] <http://www.fiamairtools.com>

[⁴] <http://www.vgscienta.com>

[⁵] <http://www.comvat.com>

[⁶] <http://www.vatvalve.com>

APPENDICE F

Listati dei comandi impiegati nelle analisi FEM

F.1 Introduzione

Nella presente appendice sono riportati i listati dei comandi impiegati nelle analisi FEM eseguite con il codice di calcolo ANSYS:

- analisi termo-strutturale del sistema multi-collimatore (*capitolo 2*);
- analisi termo-elettrica del petalo (*capitolo 3*);
- analisi termo-strutturale della faraday-cup (*capitolo 4*);
- analisi termica del beam-profiler (*capitolo 5*);
- analisi termica camera di diagnostica (*capitolo 6*).

Per le descrizioni delle stesse si rimanda alla lettura dei capitoli indicati.

F.2 Analisi termo-strutturale del sistema multi-collimatore

Parte TERMICA

```
FINISH
/CLEAR,ALL           !Resets the ANSYS database to the conditions at the beginning of the problem
/CONFIG,NRES,1000000 !Assign maximum number of results sets (substeps) allowed on the result file
/TITLE, thermal-structural analysis
!-----
! MATERIALS IMPORT           !define materials propeties from macro files .mac
/PREP7                   !enters the model creation preprocessor
!c: Ta
*USE,M26Ta.mac           !calls the macro for Tantalum           (N=26)
!c: C_ATJ
*USE,M29C_ATJ.mac       !calls the macro for Graphite           (N=29)
!c: Al5083
*USE,M23Al5083_X.mac    !calls the macro for Alluminium alloy (N=23)
!c: M27W
*USE,M27W.mac           !calls the macro for Wolframio         (N=27)
```

!c: M28Cu		
*USE,M28Cu.mac	!calls the macro for Copper	(N=28)
!c: Al2O3		
*USE,M31Al2O3_XX.mac	!calls the macro for Alluminum	(N=31)
!c: SS316		
*USE,M50SS316.mac	!calls the macro for Stainless Steel	(N=50)
!c: Mo		
*USE,M30Mo.mac	!calls the macro for Molibdenum	(N=30)
FINISH	!exits normally from a processor	
!-----		
! DEFINE ELEMENT TYPE		
/PREP7	!enters the model creation preprocessor	
ET,1,SOLID90	!defines a local element type	
FINISH	!exits normally from a processor	
!-----		
! GEOMETRY IMPORT		
/AUX15	!enters the IGES file transfer processor	
IOPTN,IGES,NODEFEAT	!set option for IGES import	
IOPTN,MERGE,YES		
IOPTN,SOLID,YES		
IOPTN,SMALL,YES		
IOPTN,GTOLER,DEFA	!transfers IGES data from a file into ANSYS	
IGESIN,cooled-flange,igs		
IGESIN,cooled-flange_cpy_1,igs		
IGESIN,disk_1,igs		
IGESIN,disk_2,igs		
IGESIN,disk_3,igs		
IGESIN,disk_4,igs		
IGESIN,disk_4_cpy_1,igs		
IGESIN,disk_4_cpy_2,igs		
IGESIN,disk_4_cpy_3,igs		
IGESIN,flangia,igs		
IGESIN,flangia_cpy_1,igs		
IGESIN,guscio,igs		
IGESIN,isolatore_corto,igs		
IGESIN,isolatore_corto_cpy_1,igs		
IGESIN,isolatore_corto_cpy_2,igs		
IGESIN,isolatore_corto_cpy_3,igs		
IGESIN,isolatore_corto_cpy_4,igs		
IGESIN,isolatore_corto_cpy_5,igs		

IGESIN,isolatore_corto_cpy_6,igs
IGESIN,isolatore_corto_cpy_7,igs
IGESIN,isolatore_corto_cpy_8,igs
IGESIN,isolatore_corto_cpy_9,igs
IGESIN,isolatore_corto_cpy_10,igs
IGESIN,isolatore_corto_cpy_11,igs
IGESIN,isolatore_corto_cpy_12,igs
IGESIN,isolatore_corto_cpy_13,igs
IGESIN,isolatore_corto_cpy_14,igs
IGESIN,isolatore_corto_cpy_15,igs
IGESIN,isolatore_lungo,igs
IGESIN,isolatore_lungo_cpy_1,igs
IGESIN,isolatore_lungo_cpy_2,igs
IGESIN,isolatore_lungo_cpy_3,igs
IGESIN,placca,igs
IGESIN,placca_cpy_1,igs
IGESIN,placca_cpy_2,igs
IGESIN,placca_cpy_3,igs
IGESIN,placca_cpy_4,igs
IGESIN,placca_cpy_5,igs
IGESIN,placca_cpy_6,igs
IGESIN,placca_cpy_7,igs
IGESIN,placca_cpy_8,igs
IGESIN,placca_cpy_9,igs
IGESIN,placca_cpy_10,igs
IGESIN,placca_cpy_11,igs
IGESIN,placca_cpy_12,igs
IGESIN,placca_cpy_13,igs
IGESIN,placca_cpy_14,igs
IGESIN,placca_cpy_15,igs
IGESIN,tubo,igs
IGESIN,tubo_cpy_1,igs
IGESIN,tubo_cpy_1,igs
IGESIN,vite_corta,igs
IGESIN,vite_corta_cpy_1,igs
IGESIN,vite_corta_cpy_2,igs
IGESIN,vite_corta_cpy_3,igs
IGESIN,vite_corta_cpy_4,igs
IGESIN,vite_corta_cpy_5,igs
IGESIN,vite_corta_cpy_6,igs

```

IGESIN,vite_corta_cpy_7,igs
IGESIN,vite_lunga,igs
IGESIN,vite_lunga_cpy_1,igs
IGESIN,vite_lunga_cpy_2,igs
IGESIN,vite_lunga_cpy_3,igs
IGESIN,vite_lunga_cpy_4,igs
IGESIN,vite_lunga_cpy_5,igs
IGESIN,vite_lunga_cpy_6,igs
IGESIN,vite_lunga_cpy_7,igs
IGESIN,vite_lunga_cpy_8,igs
IGESIN,vite_lunga_cpy_9,igs
IGESIN,vite_lunga_cpy_10,igs
IGESIN,vite_lunga_cpy_11,igs
FINISH                                !exits normally from a processor
!-----
! PARAMETERS IMPORT
/PREP7                                !enters the model creation preprocessor
*SET,rb,35*1E-3                       !enter the radius of beam      [m]
*SET,r1,20.4*1E-3                     !enter the hole radius of disk 1
*SET,r2,18.4*1E-3                     !enter the hole radius of disk 2
*SET,r3,17.2*1E-3                     !enter the hole radius of disk 3
*SET,r4,16.0*1E-3                     !enter the hole radius of disk 4
*SET,s,12.0*1E-3                       !enter the discs thickness
*SET,p1,632.12                         !enter the power of disk 1    [W]
*SET,p2,740.52                         !enter the power of disk 2
*SET,p3,697.53                         !enter the power of disk 3
*SET,p4,223.54                         !enter the power of disk 4 (petal!)
*SET,pi,3.141592653589793              !pi.greco
*SET,v1,pi*((rb*rb)-(r1*r1))*s         !calculate the entities of volume intersections [m^3]
*SET,v2,pi*((r1*r1)-(r2*r2))*s
*SET,v3,pi*((r2*r2)-(r3*r3))*s
*SET,v4,((pi*((r3*r3)-(r4*r4)))-4.8*1E-6)*(s/4) !volume of petal of disck4
!-----
! SCALING AND GLUE PROCESS
ALLSEL,ALL                            !geometry model scaling
VLSCALE,ALL,,0.001,0.001,0.001,,0,1  !scaling geometry from "mm" to "m"
ALLSEL,ALL
VGLUE,ALL                              !join the selected volumes

NUMCMP,VOLU                            !compressed entity number

```

```

NUMCMP,AREA
NUMCMP,LINE
NUMCMP,KP
!-----
! BEAM INTERSECTION
VSEL,S,VOLU,,67                ! DISK 1
ALLSEL,BELOW,VOLU
CYLIND,0,rb,-0.5,0.5,0,360    ! generate beam with radius "rb"
VSBA,67,ALL,,DELETE,DELETE    ! intersection with disk and splitting volumes
VDELE,71,,,1                  ! delete beam

VSEL,S,VOLU,,68                ! DISK 2
ALLSEL,BELOW,VOLU
CYLIND,0,r1,-0.5,0.5,0,360
VSBA,68,ALL,,DELETE,DELETE
VDELE,67,,,1

VSEL,S,VOLU,,69                ! DISK 3
ALLSEL,BELOW,VOLU
CYLIND,0,r2,-0.5,0.5,0,360
VSBA,69,ALL,,DELETE,DELETE
VDELE,67,,,1

VSEL,S,VOLU,,63                ! DISK 4. Petal 1
ALLSEL,BELOW,VOLU
CYLIND,0,r3,-0.5,0.5,0,360
VSBA,63,ALL,,DELETE,DELETE
VDELE,67,,,1

VSEL,S,VOLU,,64                ! DISK 4. Petal 2
ALLSEL,BELOW,VOLU
CYLIND,0,r3,-0.5,0.5,0,360
VSBA,64,ALL,,DELETE,DELETE
VDELE,63,,,1

VSEL,S,VOLU,,65                ! DISK 4. Petal 3
ALLSEL,BELOW,VOLU
CYLIND,0,r3,-0.5,0.5,0,360
VSBA,65,ALL,,DELETE,DELETE
VDELE,63,,,1

```

```

VSEL,S,VOLU,,66                                ! DISK 4. Petal 4
ALLSEL,BELOW,VOLU
CYLIND,0,r3,-0.5,0.5,0,360
VSBA,66,ALL,,DELETE,DELETE
VDELE,63,,1
FINISH                                          !exits normally from a processor
!-----
! MESHING PROCESS
/PREP7                                         !enters the model creation preprocessor
TYPE,1                                         !sets the element type attribute pointer
MSHAPE,1,3D                                   !1-mesh with tetrahedral-shaped elements when Dimension = 3-D
MSHKEY,0                                       !free meshing
!----- external DISCS
ESIZE,0.004,300                               !length and number of elements division "external discs"
MAT,29                                         !discs material
VSEL,S,VOLU,,73
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,73                                       !mesh selected volume

VSEL,S,VOLU,,74
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,74

VSEL,S,VOLU,,75
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,75

VSEL,S,VOLU,,76
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,76

VSEL,S,VOLU,,77
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,77

VSEL,S,VOLU,,78
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,78

```

```
VSEL,S,VOLU,,79
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,79
!----- internal DISCS
ESIZE,0.004,300
VSEL,S,VOLU,,72
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,72

VSEL,S,VOLU,,71
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,71

VSEL,S,VOLU,,68
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,68

VSEL,S,VOLU,,69
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,69

VSEL,S,VOLU,,67
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,67

VSEL,S,VOLU,,64
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,64

VSEL,S,VOLU,,65
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,65
!----- INSULATORS
ESIZE,0.00025,300
MAT,31
VSEL,S,VOLU,,1
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,1

MAT,31
```

VSEL,S,VOLU,,2
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,2

MAT,31
VSEL,S,VOLU,,3
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,3

MAT,31
VSEL,S,VOLU,,4
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,4

MAT,31
VSEL,S,VOLU,,5
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,5

MAT,31
VSEL,S,VOLU,,6
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,6

MAT,31
VSEL,S,VOLU,,7
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,7

MAT,31
VSEL,S,VOLU,,8
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,8

MAT,31
VSEL,S,VOLU,,9
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,9

MAT,31

VSEL,S,VOLU,,10
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,10

MAT,31
VSEL,S,VOLU,,11
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,11

MAT,31
VSEL,S,VOLU,,12
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,12

MAT,31
VSEL,S,VOLU,,13
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,13

MAT,31
VSEL,S,VOLU,,14
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,14

MAT,31
VSEL,S,VOLU,,15
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,15

MAT,31
VSEL,S,VOLU,,16
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,16

MAT,31
VSEL,S,VOLU,,37
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,37

MAT,31

VSEL,S,VOLU,,38
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,38

MAT,31
VSEL,S,VOLU,,39
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,39

MAT,31
VSEL,S,VOLU,,40
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,40

!----- SCREWS

MAT,26
VSEL,S,VOLU,,53
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,53

MAT,26
VSEL,S,VOLU,,54
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,54

MAT,26
VSEL,S,VOLU,,55
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,55

MAT,26
VSEL,S,VOLU,,56
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,56

MAT,26
VSEL,S,VOLU,,49
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,49

MAT,26

VSEL,S,VOLU,,50
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,50

MAT,26
VSEL,S,VOLU,,51
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,51

MAT,26
VSEL,S,VOLU,,52
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,52

MAT,26
VSEL,S,VOLU,,45
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,45

MAT,26
VSEL,S,VOLU,,46
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,46

MAT,26
VSEL,S,VOLU,,47
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,47

MAT,26
VSEL,S,VOLU,,48
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,48

MAT,26
VSEL,S,VOLU,,41
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,41

MAT,26

VSEL,S,VOLU,,42
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,42

MAT,26
VSEL,S,VOLU,,43
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,43

MAT,26
VSEL,S,VOLU,,44
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,44

MAT,26
VSEL,S,VOLU,,57
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,57

MAT,26
VSEL,S,VOLU,,58
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,58

MAT,26
VSEL,S,VOLU,,59
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,59

MAT,26
VSEL,S,VOLU,,60
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,60

!----- SHELL

ESIZE,0.010,300

MAT,23
VSEL,S,VOLU,,70
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,7

!----- TUBES

ESIZE,0.020,300

MAT,23

VSEL,S,VOLU,,35

ALLSEL,BELOW,VOLU

VMESH,35

MAT,23

VSEL,S,VOLU,,36

ALLSEL,BELOW,VOLU

VMESH,36

!----- FLANGES

ESIZE,0.010,300

MAT,23

VSEL,S,VOLU,,17

ALLSEL,BELOW,VOLU

VMESH,17

MAT,23

VSEL,S,VOLU,,18

ALLSEL,BELOW,VOLU

VMESH,18

MAT,23

VSEL,S,VOLU,,61

ALLSEL,BELOW,VOLU

VMESH,61

MAT,23

VSEL,S,VOLU,,62

ALLSEL,BELOW,VOLU

VMESH,62

!----- PLATES

ESIZE,0.00025,300

MAT,30

VSEL,S,VOLU,,19

ALLSEL,BELOW,VOLU

VMESH,19

MAT,30

VSEL,S,VOLU,,20

ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,20

MAT,30
VSEL,S,VOLU,,21
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,21

MAT,30
VSEL,S,VOLU,,22
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,22

MAT,30
VSEL,S,VOLU,,23
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,23

MAT,30
VSEL,S,VOLU,,24
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,24

MAT,30
VSEL,S,VOLU,,25
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,25

MAT,30
VSEL,S,VOLU,,26
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,26

MAT,30
VSEL,S,VOLU,,27
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,27

MAT,30
VSEL,S,VOLU,,28

ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,28

MAT,30
VSEL,S,VOLU,,29
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,29

MAT,30
VSEL,S,VOLU,,30
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,30

MAT,30
VSEL,S,VOLU,,31
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,31

MAT,30
VSEL,S,VOLU,,32
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,32

MAT,30
VSEL,S,VOLU,,33
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,33

MAT,30
VSEL,S,VOLU,,34
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,34

FINISH !exits normally from a processor

!-----

! HEAT GENERATORS

/PREP7

TUNIF,0 !initial conditions at time = 0 s

BFV,72,HGEN,p1/v1 !heat generator on disk-1 [W/m3]

BFV,71,HGEN,p2/v2 !heat generator on disk-2 [W/m3]

BFV,68,HGEN,p3/v3 !heat generator on disk-3 [W/m3]

```

BFV,69,HGEN,p4/v4          !heat generator on petal-disk-4 [W/m3]
BFV,67,HGEN,p4/v4          !heat generator on petal-disk-4 [W/m3]
BFV,64,HGEN,p4/v4          !heat generator on petal-disk-4 [W/m3]
BFV,65,HGEN,p4/v4          !heat generator on petal-disk-4 [W/m3]
!-----
! IRRADIANCE PROCESS
SPCTEMP,1,50                !defines a free-space ambient temperature for radiation using the Radiosity
method [°C]
RADOPT,,0.001,0,10000,,0.5 !specifies Gauss-Seidel Radiosity Solver options
HEMIOPT,100                 !specifies options for Hemicube view factor calculation
STEF,5.67e-8                !specifies Stefan-Boltzmann radiation constant [W/(m^2*K^4)]
TOFFST,273.15               !specifies the temperature offset from absolute zero to zero [°C]
TUNIF,0
ALLSEL,ALL
VSEL,ALL
VSEL,R,MAT,,Ta
ALLSEL,BELOW,VOLU
SFA,ALL,,RDSF,-Ta,1
ALLSEL,ALL
VSEL,ALL
VSEL,R,MAT,,Al2O3_XX
ALLSEL,BELOW,VOLU
SFA,ALL,,RDSF,-Al2O3_XX,1
ALLSEL,ALL
VSEL,ALL
VSEL,R,MAT,,C_ATJ
ALLSEL,BELOW,VOLU
SFA,ALL,,RDSF,-C_ATJ,1
ALLSEL,ALL
VSEL,ALL
VSEL,R,MAT,,Al5083
ALLSEL,BELOW,VOLU
SFA,ALL,,RDSF,0.3,1
ALLSEL,ALL
VSEL,ALL
VSEL,R,MAT,,SS316
ALLSEL,BELOW,VOLU
SFA,ALL,,RDSF,-SS316,1
ALLSEL,ALL

```

```

ALLSEL,ALL
VSEL,ALL
*GET,nvolu,VOLU,0,COUNT
nn=0
*DO,i,1,nvolu
    nn=vnnext(nn)
    VSEL,ALL
    VSEL,U,VOLU,,nn
    ALLSEL,BELOW,VOLU
    VSEL,S,VOLU,,nn
    ASLV,R
    SFADELE,ALL,,RDSF
    ALLSEL,ALL
*ENDDO
VSEL,ALL
ALLSEL,BELOW,VOLU
ASEL,INVE
ADELE,ALL,,,1
LSEL,INVE
LDELE,ALL,,,1
KSEL,INVE
KDELE,ALL
!-----
! CONVECTION LOADS
! cooled circuit SHELL
*SET,val1,5757.64           !enter "alfa" [W/m2°C]
*SET,val2,34.4             !enter "fluid temperature" [°C]
SFA,161,,CONV,val1,val2
SFA,162,,CONV,val1,val2
SFA,163,,CONV,val1,val2
SFA,164,,CONV,val1,val2
SFA,165,,CONV,val1,val2
SFA,166,,CONV,val1,val2
SFA,167,,CONV,val1,val2
SFA,167,,CONV,val1,val2
SFA,168,,CONV,val1,val2
SFA,169,,CONV,val1,val2
SFA,170,,CONV,val1,val2
SFA,171,,CONV,val1,val2
SFA,172,,CONV,val1,val2

```

SFA,173,,CONV,val1,val2
SFA,174,,CONV,val1,val2
SFA,175,,CONV,val1,val2
SFA,176,,CONV,val1,val2
SFA,177,,CONV,val1,val2
SFA,178,,CONV,val1,val2
SFA,179,,CONV,val1,val2
SFA,180,,CONV,val1,val2
SFA,181,,CONV,val1,val2
SFA,182,,CONV,val1,val2
SFA,183,,CONV,val1,val2
SFA,184,,CONV,val1,val2
SFA,185,,CONV,val1,val2
SFA,186,,CONV,val1,val2
SFA,187,,CONV,val1,val2
SFA,188,,CONV,val1,val2
SFA,189,,CONV,val1,val2
SFA,190,,CONV,val1,val2
!-----
! cooled circuit FLANGES
SFA,17,,CONV,val1,val2
SFA,18,,CONV,val1,val2
SFA,19,,CONV,val1,val2
SFA,20,,CONV,val1,val2
SFA,21,,CONV,val1,val2
SFA,22,,CONV,val1,val2
SFA,23,,CONV,val1,val2
SFA,24,,CONV,val1,val2
SFA,25,,CONV,val1,val2
SFA,26,,CONV,val1,val2
!-----
SFA,7,,CONV,val1,val2
SFA,8,,CONV,val1,val2
SFA,9,,CONV,val1,val2
SFA,10,,CONV,val1,val2
SFA,11,,CONV,val1,val2
SFA,12,,CONV,val1,val2
SFA,13,,CONV,val1,val2
SFA,14,,CONV,val1,val2
SFA,15,,CONV,val1,val2


```

SFA,16,,CONV,VAL1,VAL2
!-----
! external convective loads
*SET,AIR1,5           !enter "alfa" [W/m2°C]
*SET,AIR2,25         !enter "fluid temperature" [°C]
SFA,527,,CONV,AIR1,AIR2   ! tubes
SFA,528,,CONV,AIR1,AIR2
SFA,532,,CONV,AIR1,AIR2
SFA,533,,CONV,AIR1,AIR2
SFA,441,,CONV,AIR1,AIR2   ! flanges
SFA,442,,CONV,AIR1,AIR2
SFA,445,,CONV,AIR1,AIR2
SFA,434,,CONV,AIR1,AIR2
SFA,433,,CONV,AIR1,AIR2
SFA,437,,CONV,AIR1,AIR2
SFA,741,,CONV,AIR1,AIR2
SFA,744,,CONV,AIR1,AIR2
SFA,745,,CONV,AIR1,AIR2
SFA,751,,CONV,AIR1,AIR2
SFA,748,,CONV,AIR1,AIR2
SFA,752,,CONV,AIR1,AIR2
SFA,821,,CONV,AIR1,AIR2   ! shell
SFA,822,,CONV,AIR1,AIR2
SFA,825,,CONV,AIR1,AIR2
SFA,826,,CONV,AIR1,AIR2
SFA,196,,CONV,AIR1,AIR2
SFA,197,,CONV,AIR1,AIR2
SFA,198,,CONV,AIR1,AIR2
SFA,199,,CONV,AIR1,AIR2
FINISH
!-----
! SOLVER PROCESS
/SOLU                 !enters the solution processor
SOLCONTROL,ON        !specifies whether to use optimized nonlinear solution defaults
                     !and some enhanced internal solution algorithms
ANTYPE,TRANS         !specifies the analysis type and restart status
AUTOTS,ON            !use automatic time stepping
KBC,1                !specifies stepped or ramped loading within a load step
DELTIM,0.0001,0.0001,1000 !specifies the time step sizes to be used for this load step
OUTRES,NSOL,ALL      !controls the solution data written to the database

```

```

TIME,5000          !sets the time for a load step
ALLSEL,ALL
SAVE,,,,ALL
SOLVE             !starts a solution
SAVE,,,,ALL       !saves all current database information
FINISH            !exits normally from a processor
!-----
! POST-PROCESS
/INPUT,Temp.txt   !read paths and plot temperature results on "TEMP_results.dat"
/INPUT,Struct.txt !read paths and plot stress and displacement results on "SD_results.dat"

```

POST-PROCESS: Temp.txt

```

! TEMPERATURES PLOT
! See "TEMP_results.dat"
/POST1           !enter the post-processor
SET,last         !consider the last solution step
PATH,1,2,30,30  !SHELL path x,y,z
PPATH,1,,0.000000,0.5500000E-01,0.1305000
PPATH,2,,0.000000,0.5500000E-01,-0.1305000
PDEF,,TEMP      !map temperature onto path
PAGET,shell,table !define table parameter
ALLSEL
*CFOPEN,TEMP_results.dat,,APPEND !write results on file
*VWRITE,'SHELL'
%C
*VWRITE,'Position [m]','Temp [°C]'
%C%10x%C
*VWRITE,shell(1,4),shell(1,5)
%2x%f%15x%f
*CFCLOS

PATH,2,2,30,30  !PETAL path x,y,z
PPATH,1,-0.5000000E-03,0.1599219E-01,0.5250000E-01
PPATH,2,-0.5000000E-03,0.4749737E-01,0.5250000E-01
PDEF,,TEMP
PAGET,petal,table
ALLSEL
*CFOPEN,TEMP_results.dat,,APPEND
*VWRITE,'PETAL'

```

```
%C
*VWRITE,'Position [m]','Temp [°C]'
%C%10x%C
*VWRITE,petal(1,4),petal(1,5)
%2x%f%15x%f
*CFCLOS
```

```
PATH,3,2,30,30
PPATH,1,,0.3090057E-01,0.3090057E-01,0.6150000E-01
PPATH,2,,0.3443610E-01,0.3443610E-01,0.6150000E-01
PDEF,,TEMP
PAGET,insulator,table
ALLSEL
*CFOPEN,TEMP_results,dat,,APPEND
```

!INSULATOR path x,y,z

```
*VWRITE,'INSULATOR'
%C
*VWRITE,'Position [m]','Temp [°C]'
%C%10x%C
*VWRITE,insulator(1,4),insulator(1,5)
%2x%f%15x%f
*CFCLOS
```

```
PATH,4,2,30,30
PPATH,1,,-0.3302189E-01,0.3302189E-01,0.2100000E-01
PPATH,2,,-0.2001112E-01,0.2001112E-01,0.2150000E-01
PDEF,,TEMP
PAGET,screw,table
ALLSEL
*CFOPEN,TEMP_results,dat,,APPEND
```

!SCREW path x,y,z

```
*VWRITE,'SCREW'
%C
*VWRITE,'Position [m]','Temp [°C]'
%C%10x%C
*VWRITE,screw(1,4),screw(1,5)
%2x%f%15x%f
*CFCLOS
```

Parte STRUTTURALE: Struct.txt

! STRUCTURAL ANALYSIS

```
/POST1           !enter the post-processor
SET,last         !consider the last solution step
/PREP7
ALLSEL,ALL
LSCLEAR,ALL     !delete thermal loads BC
ETCHG,TTS       !convert thermal to structural elements
```

```
*USE,M23A15083_X_EB.mac      !call the macros of material properties
*USE,M30Mo.mac
```

```
DK,839,ALL      !displacements on keypoints TUBES
DK,835,ALL
DK,829,ALL
DK,825,ALL
```

```
CSYS,1          !activate Cylindrical with global Cartesian Z as the axis of rotation
NROTAT,ALL
```

```
LSEL,S,LINE,,722    !radial displacements on plates
NSLL,S,1
D,ALL,UX,0
```

```
LSEL,S,LINE,,720
NSLL,S,1
D,ALL,UX,0
```

```
LSEL,S,LINE,,784
NSLL,S,1
D,ALL,UX,0
```

```
LSEL,S,LINE,,786
NSLL,S,1
D,ALL,UX,0
```

```
LSEL,S,LINE,,824
NSLL,S,1
```

D,ALL,UX,0

LSEL,S,LINE,,826

NSLL,S,1

D,ALL,UX,0

LSEL,S,LINE,,864

NSLL,S,1

D,ALL,UX,0

LSEL,S,LINE,,866

NSLL,S,1

D,ALL,UX,0

LSEL,S,LINE,,730

NSLL,S,1

D,ALL,UX,0

LSEL,S,LINE,,732

NSLL,S,1

D,ALL,UX,0

LSEL,S,LINE,,774

NSLL,S,1

D,ALL,UX,0

LSEL,S,LINE,,776

NSLL,S,1

D,ALL,UX,0

LSEL,S,LINE,,814

NSLL,S,1

D,ALL,UX,0

LSEL,S,LINE,,816

NSLL,S,1

D,ALL,UX,0

LSEL,S,LINE,,854

NSLL,S,1

D,ALL,UX,0

LSEL,S,LINE,,856

NSLL,S,1

D,ALL,UX,0

LSEL,S,LINE,,740

NSLL,S,1

D,ALL,UX,0

LSEL,S,LINE,,742

NSLL,S,1

D,ALL,UX,0

LSEL,S,LINE,,764

NSLL,S,1

D,ALL,UX,0

LSEL,S,LINE,,766

NSLL,S,1

D,ALL,UX,0

LSEL,S,LINE,,804

NSLL,S,1

D,ALL,UX,0

LSEL,S,LINE,,806

NSLL,S,1

D,ALL,UX,0

LSEL,S,LINE,,844

NSLL,S,1

D,ALL,UX,0

LSEL,S,LINE,,846

NSLL,S,1

D,ALL,UX,0

LSEL,S,LINE,,750

NSLL,S,1

D,ALL,UX,0

LSEL,S,LINE,,752

NSLL,S,1

D,ALL,UX,0

LSEL,S,LINE,,754

NSLL,S,1

D,ALL,UX,0

LSEL,S,LINE,,756

NSLL,S,1

D,ALL,UX,0

LSEL,S,LINE,,794

NSLL,S,1

D,ALL,UX,0

LSEL,S,LINE,,796

NSLL,S,1

D,ALL,UX,0

LSEL,S,LINE,,834

NSLL,S,1

D,ALL,UX,0

LSEL,S,LINE,,836

NSLL,S,1

D,ALL,UX,0

ALLSEL,ALL

TIME,1

LDREAD,TEMP,LAST,LAST,,0,FILE,RTH !import thermal load

FINISH

/SOLU

SOLVE

!-----

! STRESS PLOT

! See "SD_results.dat"

```

/POST1
SET,last !consider the last solution step
PATH,5,2,30,30 !SHELL path x,y,z
PPATH,1,,0.000000,0.5500000E-01,0.1305000
PPATH,2,,0.000000,0.5500000E-01,-0.1305000
PDEF,,S,1 !map stress 1 onto path
PDEF,,S,2 !map stress 2 onto path
PDEF,,S,3 !map stress 3 onto path
PDEF,,S,EQV !map Von Mises stress onto path
PDEF,,U,X !map displacement X
PDEF,,U,Y !map displacement Y
PDEF,,U,Z !map displacement Z
PDEF,,U,SUM !map displacement SUM

PAGET,shell,table !create a table parameter
ALLSEL

*CFOPEN,SD_results,dat,,APPEND
*VWRITE,'SHELL'
%C
*VWRITE,'Position [m]','Stress 1 [Pa]','Stress 2 [Pa]','Stress 3 [Pa]','Stress VM [Pa]','Disp X [m]','Disp Y
[m]','Disp Z [m]','Disp SUM [m]'
%C%10x%C%17x%C%17x%C%17x%C%17x%C%17x%C%20x%C%20x%C
*VWRITE,shell(1,4),shell(1,5),shell(1,6),shell(1,7),shell(1,8),shell(1,9),shell(1,10),shell(1,11),shell(1,12)
%2x%f%15x%e%15x%e%15x%e%15x%e%15x%e%15x%e%15x%e%15x%e
*CFCLOSE

PATH,6,2,30,30 !PETAL path x,y,z
PPATH,1,-0.5000000E-03,0.1599219E-01,0.5250000E-01
PPATH,2,-0.5000000E-03,0.4749737E-01,0.5250000E-01
PDEF,,S,1
PDEF,,S,2
PDEF,,S,3
PDEF,,S,EQV
PDEF,,U,X
PDEF,,U,Y
PDEF,,U,Z
PDEF,,U,SUM

```


PAGET,petal,table

ALLSEL

*CFOPEN,SD_results,dat,,APPEND

*VWRITE,'PETAL'

%C

*VWRITE,'Position [m]','Stress 1 [Pa]','Stress 2 [Pa]','Stress 3 [Pa]','Stress VM [Pa]','Disp X [m]','Disp Y [m]','Disp Z [m]','Disp SUM [m]'

%C%10x%C%17x%C%17x%C%17x%C%17x%C%17x%C%20x%C%20x%C

*VWRITE,shell(1,4),petal(1,5),petal(1,6),petal(1,7),petal(1,8),petal(1,9),petal(1,10),petal(1,11),petal(1,12)

%2x%f%15x%e%15x%e%15x%e%15x%e%15x%e%15x%e%15x%e%15x%e

*CFCLOS

PATH,7,2,30,30 !INSULATOR path x,y,z

PPATH,1,,0.3090057E-01,0.3090057E-01,0.6150000E-01

PPATH,2,,0.3443610E-01,0.3443610E-01,0.6150000E-01

PDEF,,S,1

PDEF,,S,2

PDEF,,S,3

PDEF,,S,EQV

PDEF,,U,X

PDEF,,U,Y

PDEF,,U,Z

PDEF,,U,SUM

PAGET,insulator,table

ALLSEL

*CFOPEN,SD_results,dat,,APPEND

*VWRITE,'INSULATOR'

%C

*VWRITE,'Position [m]','Stress 1 [Pa]','Stress 2 [Pa]','Stress 3 [Pa]','Stress VM [Pa]','Disp X [m]','Disp Y [m]','Disp Z [m]','Disp SUM [m]'

%C%10x%C%17x%C%17x%C%17x%C%17x%C%17x%C%20x%C%20x%C

*VWRITE,insulator(1,4),insulator(1,5),insulator(1,6),insulator(1,7),insulator(1,8),insulator(1,9),insulator(1,10),insulator(1,11),insulator(1,12)

%2x%f%15x%e%15x%e%15x%e%15x%e%15x%e%15x%e%15x%e%15x%e

*CFCLOS

```

PATH,8,2,30,30          !SCREW path x,y,z
PPATH,1,,-0.3302189E-01,0.3302189E-01,0.2100000E-01
PPATH,2,,-0.2001112E-01,0.2001112E-01,0.2150000E-01
PDEF,,S,1
PDEF,,S,2
PDEF,,S,3
PDEF,,S,EQV
PDEF,,U,X
PDEF,,U,Y
PDEF,,U,Z
PDEF,,U,SUM

PAGET,screw,table
ALLSEL

*CFOOPEN,SD_results,dat,,APPEND
*VWRITE,'SCREW'
%C
*VWRITE,'Position [m]','Stress 1 [Pa]','Stress 2 [Pa]','Stress 3 [Pa]','Stress VM [Pa]','Disp X [m]','Disp Y
[m]','Disp Z [m]','Disp SUM [m]'
%C%10x%C%17x%C%17x%C%17x%C%17x%C%17x%C%20x%C%20x%C
*VWRITE,screw(1,4),screw(1,5),screw(1,6),screw(1,7),screw(1,8),screw(1,9),screw(1,10),screw(1,11),scre
w(1,12)
%2x%f%15x%e%15x%e%15x%e%15x%e%15x%e%15x%e%15x%e%15x%e%15x%e
*CFCLOS

```

F.3 Analisi termo-elettrica del petalo

Parte TERMO-ELETTRICA

```

FINISH
/CLEAR,ALL          !Resets the ANSYS database to the conditions at the beginning of
the problem
/CONFIG,NRES,1000000 !Assign maximum number of results sets (substeps) allowed on the
result file
/TITLE, petal_sperimental_analysis
!-----
! MATERIALS IMPORT          !define materials propeties from macro files .mac

```

```

/PREP7                                !enters the model creation preprocessor
!c: Ta
*USE,M26Ta.mac                        !calls the macro for Tantalum          (N=26)
!c: C_ATJ
*USE,M29C_ATJ.mac                    !calls the macro for Graphite          (N=29)
!c: Al5083
*USE,M23Al5083_X.mac                 !calls the macro for Alluminium alloy (N=23)
!c: M27W
*USE,M27W.mac                        !calls the macro for Wolframio        (N=27)
!c: M28Cu
*USE,M28Cu.mac                      !calls the macro for Copper           (N=28)
!c: Al2O3
*USE,M31Al2O3_XX.mac                !calls the macro for Alluminium       (N=31)
!c: SS316
*USE,M50SS316.mac                  !calls the macro for Stainless Steel  (N=50)
!c: Mo
*USE,M30Mo.mac                      !calls the macro for Molibdenum      (N=30)
FINISH                                !exits normally from a processor
!-----
! DEFINE ELEMENT TYPE
/PREP7                                !enters the model creation preprocessor
ET,1,SOLID226                        !defines a local element type
KEYOPT,1,1,110                      !set element options
FINISH                                !exits normally from a processor
!-----
! GEOMETRY IMPORT
/AUX15                                !enters the IGES file transfer processor
IOPTN,IGES,NODEFEAT                 !set option for IGES import
IOPTN,MERGE,YES
IOPTN,SOLID,YES
IOPTN,SMALL,YES
IOPTN,GTOLER,DEFA
IGESIN,st_pi000_008,igs              !transfers IGES data from a file into ANSYS

IGESIN,anodo,igs
IGESIN,placca_anodo,igs
IGESIN,anodo_b,igs
IGESIN,petal,igs
IGESIN,blocco_rame,igs
IGESIN,lam_catodo,igs

```

```

FINISH !exits normally from a processor
!-----
! SCALING AND GLUE PROCESS
/PREP7 !enters the model creation preprocessor
ALLSEL,ALL !geometry model scaling
VLSCALE,ALL,,0.001,0.001,0.001,,0,1 !scaling geometry from "mm" to "m"
ALLSEL,ALL
VGLUE,ALL !glue selected volumes
NUMCMP,VOLU !compressed entity number
NUMCMP,AREA
NUMCMP,LINE
NUMCMP,KP
FINISH !exits normally from a processor
!-----
! MESHING PROCESS
/PREP7 !enters the model creation preprocessor
TYPE,1 !sets the element type attribute pointer
MSHAPE,1,3D !1-mesh with tetrahedral-shaped elements when
Dimension = 3-D
MSHKEY,0 !free meshing
!----- box esterna
ESIZE,0.006,300 !define element length and number of elements
MAT,50 !define material
VSEL,S,VOLU,,1
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,1 !mesh selected volume
!----- sostegno
ESIZE,0.004,300
MAT,50
VSEL,S,VOLU,,4
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,4
!----- sostegno
ESIZE,0.004,300
MAT,50
VSEL,S,VOLU,,6
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,6
!----- lamina superiore
ESIZE,0.004,300

```

```

MAT,26
VSEL,S,VOLU,,5
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,5
!----- petalo
ESIZE,0.004,300
MAT,29
VSEL,S,VOLU,,2
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,2
!----- lamina inferiore
ESIZE,0.004,300

MAT,26
VSEL,S,VOLU,,7
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,7
!----- connettore elettrico
ESIZE,0.006,300
MAT,28
VSEL,S,VOLU,,3
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,3
!-----
! IRRADIANCE PROCESS
SPCTEMP,1,50          !defines a free-space ambient temperature for radiation using the Radiosity
method [°C]
RADOPT,,0.001,0,10000,,0.5 !specifies Gauss-Seidel Radiosity Solver options
HEMIOPT,100          !specifies options for Hemicube view factor calculation
STEF,5.67e-8         !specifies Stefan-Boltzmann radiation constant [W/(m^2*K^4)]
TOFFST,273.15        !specifies the temperature offset from absolute zero to zero [°C]
!VFOPT,OFF

ALLSEL,ALL

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

```

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

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

VSEL,ALL
VSEL,R,MAT,,Al5083
ALLSEL,BELOW,VOLU
SFA,ALL,,RDSF,0.3,1
ALLSEL,ALL

VSEL,ALL
VSEL,R,MAT,,SS316
ALLSEL,BELOW,VOLU
SFA,ALL,,RDSF,-SS316,1
ALLSEL,ALL

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

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

ALLSEL,ALL
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

VSEL,ALL
ALLSEL,BELOW,VOLU
ASEL,INVE
ADELE,ALL,,,1
LSEL,INVE
LDELE,ALL,,,1
KSEL,INVE
KDELE,ALL
FINISH
!-----
!CURRENT
/PREP7
!DIM,CURRENT,TABLE,24,1,1,TIME
*SET,CURRENT(1,0),0
*SET,CURRENT(1,1),50
*SET,CURRENT(2,0),1500
*SET,CURRENT(2,1),50
*SET,CURRENT(3,0),1501
*SET,CURRENT(3,1),100
*SET,CURRENT(4,0),3000
*SET,CURRENT(4,1),100
*SET,CURRENT(5,0),3001
*SET,CURRENT(5,1),150
*SET,CURRENT(6,0),4500
*SET,CURRENT(6,1),150
*SET,CURRENT(7,0),4501
*SET,CURRENT(7,1),200
*SET,CURRENT(8,0),6000

```

!exits normally from a processor

!define a vector parameter

!enters the model creation preprocessor

```

*SET,CURRENT(8,1),200
*SET,CURRENT(9,0),6001
*SET,CURRENT(9,1),250
*SET,CURRENT(10,0),7500
*SET,CURRENT(10,1),250
*SET,CURRENT(11,0),7501
*SET,CURRENT(11,1),300
*SET,CURRENT(12,0),9000
*SET,CURRENT(12,1),300
*SET,CURRENT(13,0),9001
*SET,CURRENT(13,1),350
*SET,CURRENT(14,0),10500
*SET,CURRENT(14,1),350
*SET,CURRENT(15,0),10501
*SET,CURRENT(15,1),400
*SET,CURRENT(16,0),12000
*SET,CURRENT(16,1),400
*SET,CURRENT(17,0),12001
*SET,CURRENT(17,1),450
*SET,CURRENT(18,0),13500
*SET,CURRENT(18,1),450
*SET,CURRENT(19,0),13501
*SET,CURRENT(19,1),500
*SET,CURRENT(20,0),15000
*SET,CURRENT(20,1),500
*SET,CURRENT(21,0),15001
*SET,CURRENT(21,1),550
*SET,CURRENT(22,0),16500
*SET,CURRENT(22,1),550
*SET,CURRENT(23,0),16501
*SET,CURRENT(23,1),600
*SET,CURRENT(24,0),18000
*SET,CURRENT(24,1),600

```

!-----

! THERMAL AND ELETRICAL LOADS

TUNIF,50

!assigns a uniform temperature to all nodes

[°C]

DA,7,TEMP,50

!defines DOF constraints on areas [°C]

DA,33,TEMP,50

!defines DOF constraints on areas [°C]

DA,34,TEMP,50

!defines DOF constraints on areas [°C]


```

DA,7,VOLT,0                                !defines DOF constraints on areas [V]
!power generation - Joule effect / current load for the main clamp [A]
ASEL,S,AREA,,33,34                          !selects a subset of areas
ALLSEL,BELOW,AREA
NSLA,S,1                                     !selects those nodes associated with the selected
areas
cp,1,volt,all                               !defines (or modifies) a set of coupled degrees
of freedom
ni=kpnex(0)                                 !c: master node definition
FK,ni,AMPS,%CURRENT%                       !specifies force loads at nodes
ALLSEL                                       !selects all entities with a single command
FINISH                                       !exits normally from a processor
!-----
! SOLVER PROCESS
/SOLU                                       !enters the solution processor
SOLCONTROL,ON                               !specifies whether to use optimized nonlinear
solution defaults                           !and some enhanced internal solution algorithms
ANTYPE,TRANS                                !specifies the analysis type and restart status
AUTOTS,ON                                   !use automatic time stepping
KBC,1                                       !specifies stepped or ramped loading within a load
step
DELTIM,0.0001,0.0001,1000                 !specifies the time step sizes to be used for this load
step
OUTRES,NSOL,ALL                             !controls the solution data written to the database
TIME,18000                                  !sets the time for a load step
SAVE,,,ALL
SOLVE                                       !starts a solution
SAVE,,,ALL                                  !saves all current database information
FINISH                                       !exits normally from a processor
!-----

```

Parte STRUTTURALE: Struct.exe

```

! Execute this APDL after thermo-electric solution
/POST1                                       !enter the post-processor
ALLSEL,ALL
SET,LAST
/PREP7                                       !Enter in pre-processor
LSCLEAR,ALL
ET,2,SOLID186                               !Define structural element type

```

```

EMODIF,ALL,TYPE,2                !Modify element type on current mesh
LDREAD,TEMP,LAST,LAST,,0,FILE,RST

*USE,M23A15083_X_EB.mac           !calls macros of material properies
*USE,M50SS316_EB.mac

!-----
! DISPLACEMENTS

TREF,50                           !assigns the reference temperature to calculate strain [°C]
VCLEAR,1                          !clear volumes
VCLEAR,4
VCLEAR,5
VCLEAR,6

DA,7,ALL                          !displacements on areas
DA,28,ALL
DA,29,ALL
DA, ,ALL

! CSYS,1                          !activate Cylindrical with global Cartesian Z as the axis
of rotation
! NROTAT,ALL

! LSEL,S,LINE,,722                !radial displacements on plates
! NSLL,S,1
! D,ALL,UX,0
FINISH                             !exits normally from a processor
!-----
! SOLVER PROCESS
/SOLU                             !enters the solution processor
ANTYPE,0
TOFFST,273.15                     !temperature offset (from K to °C)
AUTOTS,ON                         !use automatic time stepping
NSUBST,100,1000,20               !control the number of substep
OUTRES,ALL,ALL                   !controls the solution data written to the database
TIME,1                             !sets the time for a load step
SAVE,,,,ALL
SOLVE                             !starts a solution
SAVE,,,,ALL                       !saves all current database information

```

FINISH !exits normally from a processor

F.4 Analisi termo-strutturale della Faraday-Cup

Parte TERMICA

```
FINISH
/CLEAR,ALL !Resets the ANSYS database to the conditions at the beginning of the problem
/CONFIG,NRES,1000000 !Assign maximum number of results sets (substeps) allowed on the result file
/TITLE, faraday-cup thermal analysis
!-----
! MATERIALS IMPORT !define materials propeties from macro files .mac
/PREP7 !enters the model creation preprocessor
!c: Ta
*USE,M26Ta.mac !calls the macro for Tantalum (N=26)
!c: C_ATJ
*USE,M29C_ATJ.mac !calls the macro for Graphite (N=29)
!c: Al5083
*USE,M23Al5083_X.mac !calls the macro for Alluminium alloy (N=23)
!c: M27W
*USE,M27W.mac !calls the macro for Wolframio (N=27)
!c: M28Cu
*USE,M28Cu.mac !calls the macro for Copper (N=28)
!c: Al2O3
*USE,M31Al2O3_XX.mac !calls the macro for Alluminum (N=31)
!c: SS316
*USE,M50SS316.mac !calls the macro for Stainless Steel (N=50)
!c: Mo
*USE,M30Mo.mac !calls the macro for Molibdenum (N=30)
FINISH !exits normally from a processor
!-----
! DEFINE ELEMENT TYPE
/PREP7 !enters the model creation preprocessor
ET,1,SOLID90 !defines a local element type
FINISH !exits normally from a processor
!-----
! GEOMETRY IMPORT
/AUX15 !enters the IGES file transfer processor
IOPTN,IGES,NODEFEAT !set option for IGES import
IOPTN,MERGE,YES
```

```

IOPTN,SOLID,YES
IOPTN,SMALL,YES
IOPTN,GTOLER,DEFA           !transfers IGES data from a file into ANSY
IGESIN,braccio,igs
IGESIN,soppressore,igs
IGESIN,shell,igs
IGESIN,tubo,igs
IGESIN,tubo_ext,igs
IGESIN,disco,igs
IGESIN,disco_cpy_1,igs
IGESIN,disco_cpy_2,igs
IGESIN,disco_cpy_3,igs
IGESIN,disco_cpy_4,igs
IGESIN,disco_cpy_5,igs
IGESIN,disco_cpy_6,igs
IGESIN,disco_cpy_7,igs
IGESIN,disco_cpy_8,igs
IGESIN,disco_cpy_9,igs
IGESIN,distanziale,igs
IGESIN,distanziale_cpy_1,igs
IGESIN,distanziale_cpy_2,igs
IGESIN,distanziale_cpy_3,igs
IGESIN,distanziale_cpy_4,igs
IGESIN,distanziale_cpy_5,igs
IGESIN,distanziale_cpy_6,igs
IGESIN,distanziale_cpy_7,igs
IGESIN,distanziale_cpy_8,igs
IGESIN,distanziale_t,igs
IGESIN,disco_coll,igs
IGESIN,blocco,igs
IGESIN,albero,igs
FINISH                       !exits normally from a processor
!-----
! PARAMETERS IMPORT
/PREP7                       !enters the model creation preprocessor
*SET,rc,18*1E-3              !enter the radius of beam at INPUT      [m]
*SET,rb,16*1E-3              !enter the radius of beam collimated
*SET,sc,0.3*1E-3             !enter the disk_collimator thickness
*SET,s,1.2*1E-3              !enter the discs thickness
*SET,pc,30                    !enter the power of disk_collimator     [W]

```

```

*SET,p1,800                                !enter the power of disk 1      [W]
*SET,p2,800                                !enter the power of disk 2      [W]
*SET,p3,800                                !enter the power of disk 3      [W]
*SET,p4,800                                !enter the power of disk 4      [W]
*SET,p5,800                                !enter the power of disk 5      [W]
*SET,p6,800                                !enter the power of disk 6      [W]
*SET,p7,800                                !enter the power of disk 7      [W]
*SET,p8,800                                !enter the power of disk 8      [W]
*SET,p9,800                                !enter the power of disk 9      [W]
*SET,p10,800                               !enter the power of disk 10     [W]
*SET,pi,3.141592653589793                 !pi.greco
*SET,vc,pi*(rc*rc)*sc                     !calculate the entities of volume intersections [m^3]
*SET,v,pi*(rb*rb)*s                       !calculate the entities of volume intersections [m^3]
!-----
! SCALING AND GLUE PROCESS
ALLSEL,ALL                                !geometry model scaling
VLSCALE,ALL,,0.001,0.001,0.001,,0,1      !scaling geometry from "mm" to "m"
ALLSEL,ALL
VGLUE,4,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25    !joint the selected volumes
VGLUE,1,5
VGLUE,27,28
NUMCMP,VOLU                               !compressed entity number
NUMCMP,AREA
NUMCMP,LINE
NUMCMP,KP
!-----
! BEAM INTERSECTION
LOCAL,11,0,0,0,0,0,90,0                   ! rotate coordinate system
WPCSYS,,11                                ! define new coordinate system
VSEL,S,VOLU,,9                             ! DISK collimator
ALLSEL,BELOW,VOLU
CYLIND,0,rc,-0.5,0.5,0,360                ! generate beam with radius "rc"
VSBA,9,ALL,,DELETE,DELETE                 ! intersection with disk and splitting volumes
VDELE,29,,1                                ! delete beam volume

VSEL,S,VOLU,,12                            ! DISK 1
ALLSEL,BELOW,VOLU
CYLIND,0,rb,-0.5,0.5,0,360
VSBA,12,ALL,,DELETE,DELETE
VDELE,9,,1

```

VSEL,S,VOLU,,13 ! DISK 2

ALLSEL,BELOW,VOLU

CYLIND,0,rb,-0.5,0.5,0,360

VSBA,13,ALL,,DELETE,DELETE

VDELE,9,,,1

VSEL,S,VOLU,,14 ! DISK 3

ALLSEL,BELOW,VOLU

CYLIND,0,rb,-0.5,0.5,0,360

VSBA,14,ALL,,DELETE,DELETE

VDELE,9,,,1

VSEL,S,VOLU,,15 ! DISK 4

ALLSEL,BELOW,VOLU

CYLIND,0,rb,-0.5,0.5,0,360

VSBA,15,ALL,,DELETE,DELETE

VDELE,9,,,1

VSEL,S,VOLU,,16 ! DISK 5

ALLSEL,BELOW,VOLU

CYLIND,0,rb,-0.5,0.5,0,360

VSBA,16,ALL,,DELETE,DELETE

VDELE,9,,,1

VSEL,S,VOLU,,17 ! DISK 6

ALLSEL,BELOW,VOLU

CYLIND,0,rb,-0.5,0.5,0,360

VSBA,17,ALL,,DELETE,DELETE

VDELE,9,,,1

VSEL,S,VOLU,,18 ! DISK 7

ALLSEL,BELOW,VOLU

CYLIND,0,rb,-0.5,0.5,0,360

VSBA,18,ALL,,DELETE,DELETE

VDELE,9,,,1

VSEL,S,VOLU,,19 ! DISK 8

ALLSEL,BELOW,VOLU

CYLIND,0,rb,-0.5,0.5,0,360

```
VSBA,19,ALL,,DELETE,DELETE
VDELE,9,,,1
```

```
VSEL,S,VOLU,,11 ! DISK 9
ALLSEL,BELOW,VOLU
CYLIND,0,rb,-0.5,0.5,0,360
VSBA,11,ALL,,DELETE,DELETE
VDELE,9,,,1
```

```
VSEL,S,VOLU,,6 ! DISK 10
ALLSEL,BELOW,VOLU
CYLIND,0,rb,-0.5,0.5,0,360
VSBA,6,ALL,,DELETE,DELETE
VDELE,9,,,1
```

```
FINISH !exits normally from a processor
```

```
!-----
```

```
! MESHING PROCESS
```

```
/PREP7 !enters the model creation preprocessor
```

```
TYPE,1 !sets the element type attribute pointer
```

```
MSHAPE,1,3D !1-mesh with tetrahedral-shaped elements when Dimension = 3-D
```

```
MSHKEY,0 !free meshing
```

```
!----- collimator disk
```

```
ESIZE,0.008,300 ! define element length and number of elements
```

```
MAT,29 ! define material
```

```
VSEL,S,VOLU,,30
```

```
ALLSEL,BELOW,VOLU
```

```
VSWEEP,30 ! mesh selected volume
```

```
ESIZE,0.004,300
```

```
MAT,29
```

```
VSEL,S,VOLU,,31
```

```
ALLSEL,BELOW,VOLU
```

```
VSWEEP,31
```

```
!----- internal DISCS
```

```
ESIZE,0.004,300
```

```
MAT,29
```

```
VSEL,S,VOLU,,29
```

```
ALLSEL,BELOW,VOLU
```

```
VMESH,29
```

VSEL,S,VOLU,,12
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,12

VSEL,S,VOLU,,13
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,13

VSEL,S,VOLU,,14
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,14

VSEL,S,VOLU,,15
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,15

VSEL,S,VOLU,,16
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,16

VSEL,S,VOLU,,17
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,17

VSEL,S,VOLU,,18
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,18

VSEL,S,VOLU,,19
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,19

VSEL,S,VOLU,,11
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,11

!----- external DISCS
ESIZE,0.006,300

VSEL,S,VOLU,,32
ALLSEL,BELOW,VOLU

VMESH,32

VSEL,S,VOLU,,33

ALLSEL,BELOW,VOLU

VMESH,33

VSEL,S,VOLU,,34

ALLSEL,BELOW,VOLU

VMESH,34

VSEL,S,VOLU,,35

ALLSEL,BELOW,VOLU

VMESH,35

VSEL,S,VOLU,,36

ALLSEL,BELOW,VOLU

VMESH,36

VSEL,S,VOLU,,37

ALLSEL,BELOW,VOLU

VMESH,37

VSEL,S,VOLU,,38

ALLSEL,BELOW,VOLU

VMESH,38

VSEL,S,VOLU,,39

ALLSEL,BELOW,VOLU

VMESH,39

VSEL,S,VOLU,,40

ALLSEL,BELOW,VOLU

VMESH,40

VSEL,S,VOLU,,41

ALLSEL,BELOW,VOLU

VMESH,41

!----- tube

ESIZE,0.006,300

```

MAT,29
VSEL,S,VOLU,,28
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,28
!----- tube_ext
ESIZE,0.006,300
MAT,26
VSEL,S,VOLU,,5
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,5
!----- arm
ESIZE,0.006,300
MAT,26
VSEL,S,VOLU,,4
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,4
!----- soppessor
ESIZE,0.008,300
MAT,30
VSEL,S,VOLU,2
ALLSEL,BELOW,VOLU
VSWEEP,2
!----- block
ESIZE,0.008,500
MAT,50
VSEL,S,VOLU,,10
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,10
!----- shaft
ESIZE,0.008,500
MAT,50
VSEL,S,VOLU,,1
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,1
!----- shell
ESIZE,0.010,300
MAT,23
VSEL,S,VOLU,,3
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,3

```

```

!-----
! HEAT GENERATORS
/PREP7                                !enters the model creation preprocessor
TUNIF,0                                !initial conditions at time = 0 s
BFV,31,HGEN,pc/vc                      !heat generator on collimator [W/m3]
BFV,29,HGEN,p1/v                       !heat generator on discs [W/m3]
BFV,12,HGEN,p2/v
BFV,13,HGEN,p3/v
BFV,14,HGEN,p4/v
BFV,15,HGEN,p5/v
BFV,16,HGEN,p6/v
BFV,17,HGEN,p7/v
BFV,18,HGEN,p8/v
BFV,19,HGEN,p9/v
BFV,11,HGEN,p10/v
!-----
! IRRADIANCE PROCESS
SPCTEMP,1,50                          !defines a free-space ambient temperature for radiation using the Radiosity
method [°C]
RADOPT,,0.001,0,10000,,0.5           !specifies Gauss-Seidel Radiosity Solver options
HEMIOPT,100                            !specifies options for Hemicube view factor calculation
STEF,5.67e-8                           !specifies Stefan-Boltzmann radiation constant [W/(m^2*K^4)]
TOFFST,273.15                          !specifies the temperature offset from absolute zero to zero [°C]
!VFOPT,OFF

ALLSEL,ALL

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

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

```

```
VSEL,ALL          ! discs
VSEL,R,MAT,,C_ATJ
ALLSEL,BELOW,VOLU
SFA,ALL,,RDSF,-C_ATJ,1
ALLSEL,ALL
```

```
VSEL,ALL          ! shell
VSEL,R,MAT,,Al5083
ALLSEL,BELOW,VOLU
SFA,ALL,,RDSF,0.3,1
ALLSEL,ALL
```

```
VSEL,ALL          ! block and shaft
VSEL,R,MAT,,SS316
ALLSEL,BELOW,VOLU
SFA,ALL,,RDSF,-SS316,1
ALLSEL,ALL
```

```
VSEL,ALL          ! suppressor
VSEL,R,MAT,,Mo
ALLSEL,BELOW,VOLU
SFA,ALL,,RDSF,-Mo,1
ALLSEL,ALL
```

```
ALLSEL,ALL
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
```

```

VSEL,ALL
ALLSEL,BELOW,VOLU
ASEL,INVE
ADELE,ALL,,,1
LSEL,INVE
LDELE,ALL,,,1
KSEL,INVE
KDELE,ALL
!-----
! CONVECTION LOADS
! external convective loads
*SET,air1,5           !enter "alfa" [W/m2°C]
*SET,air2,25         !enter "fluid temperature" [°C]
SFA,109,,CONV,air1,air2
SFA,110,,CONV,air1,air2
SFA,111,,CONV,air1,air2
SFA,114,,CONV,air1,air2
SFA,115,,CONV,air1,air2
SFA,116,,CONV,air1,air2
SFA,105,,CONV,air1,air2
SFA,106,,CONV,air1,air2
SFA,107,,CONV,air1,air2
SFA,108,,CONV,air1,air2
SFA,126,,CONV,air1,air2
SFA,127,,CONV,air1,air2
SFA,128,,CONV,air1,air2
SFA,129,,CONV,air1,air2
SFA,137,,CONV,air1,air2
SFA,138,,CONV,air1,air2
SFA,139,,CONV,air1,air2
SFA,140,,CONV,air1,air2
!-----
! cooled circuit SHELL
*SET,val1,5757.64    !enter "alfa" [W/m2°C]
*SET,val2,34.4       !enter "fluid temperature" [°C]
SFA,236,,CONV,val1,val2    !shell VOLU. 54
SFA,220,,CONV,val1,val2
SFA,230,,CONV,val1,val2
SFA,191,,CONV,val1,val2
SFA,214,,CONV,val1,val2

```

SFA,215,,CONV,val1,val2
 SFA,175,,CONV,val1,val2
 SFA,176,,CONV,val1,val2

```

FINISH                                !exits normally from a processor
!-----
! SOLVER PROCESS
/SOLU                                  !enters the solution processor
SOLCONTROL,ON                         !specifies whether to use optimized nonlinear solution defaults
                                       !and some enhanced internal solution algorithms
ANTYPE,TRANS                          !specifies the analysis type and restart status
AUTOTS,ON                              !use automatic time stepping
KBC,1                                  !specifies stepped or ramped loading within a load step
DELTIM,0.0001,0.0001,1000            !specifies the time step sizes to be used for this load step
OUTRES,NSOL,ALL                       !controls the solution data written to the database
TIME,5000                              !sets the time for a load step
ALLSEL,ALL
SAVE,,,,ALL
SOLVE                                  !starts a solution
SAVE,,,,ALL                            !saves all current database information
FINISH                                  !exits normally from a processor
!-----
! POST-PROCESS

/INPUT,Temp,txt                       !read paths and plot temperature results on "TEMP_results.dat"
/INPUT,Struct,txt                     !read paths and plot stress and displacement results on "SD_results.dat"

```

POST-PROCESS: Temp.txt

```

! TEMPERATURES PLOT
! See "TEMP_results.dat"

/POST1                                 !enter the post-processor
SET,last                               !consider the last solution step

PATH,1,2,30,30                        !SHAFT path
PPATH,1,,-0.1100000E-01,-0.1020000,0.000000
PPATH,2,,-0.1100000E-01,-0.2520000,0.000000
PDEF,,TEMP                             !map temperature onto path

```

```

PAGET,shaft,table                                !create table parameter
ALLSEL

*CFOPEN,TEMP_results,dat,,APPEND                !write results on file
*VWRITE,'SHAFT'
%C
*VWRITE,'Position [m]','Temp [°C]'
%C%10x%C
*VWRITE,shaft(1,4),shaft(1,5)
(F6.3,13X,F10.2)
!%2x%f%15x%f
*CFCLOS

PATH,3,2,30,30                                  !FRAME path
PPATH,1,,-0.5200000E-01,-0.3181554E-01,-0.5000000E-02
PPATH,2,,0.5000000E-01,-0.3181554E-01,-0.5000000E-02
PDEF,,TEMP
PAGET,frame,table
ALLSEL
*CFOPEN,TEMP_results,dat,,APPEND
*VWRITE,'FRAME'
%C
*VWRITE,'Position [m]','Temp [°C]'
%C%10x%C
*VWRITE,frame(1,4),frame(1,5)
(F6.3,13X,F10.2)
!%2x%f%15x%f
*CFCLOS

PATH,4,2,30,30                                  !DISK path

PPATH,1,,-0.6700000E-01,0.000000,0.1600000E-01
PPATH,2,,-0.6700000E-01,0.000000,0.7500000E-01
PDEF,,TEMP
PAGET,disk,table
ALLSEL
*CFOPEN,TEMP_results,dat,,APPEND
*VWRITE,'DISK'
%C
*VWRITE,'Position [m]','Temp [°C]'

```

```

%C%10x%C
*VWRITE,disk(1,4),disk(1,5)
(F6.3,13X,F10.2)
!%2x%f%15x%f
*CFCLOS

PATH,5,2,30,30          !SUPPRESSOR path
PPATH,1,,-0.6000000E-01,0.000000,0.3000000E-01
PPATH,2,,-0.6000000E-01,0.000000,0.7500000E-01
PDEF,,TEMP
PAGET,suppressor,table
ALLSEL
*CFOOPEN,TEMP_results,dat,,APPEND
*VWRITE,'SUPPRESSOR'
%C
*VWRITE,'Position [m]','Temp [°C]'
%C%10x%C
*VWRITE,suppressor(1,4),suppressor(1,5)
(F6.3,13X,F10.2)
!%2x%f%15x%f
*CFCLOS

```

Parte STRUTTURALE: Struct.exe

```

! STRUCTURAL ANALYSIS
/POST1          !enter the post-processor
SET,last       !consider the last solution STEP
/PREP7
ALLSEL,ALL
LSCLEAR,ALL   !delete thermal loads BC
ETCHG,TTS     !convert thermal to structural elements

*USE,M23A15083_X_EB.mac    !use the macros of material propeties
*USE,M50SS316_EB.mac

!CSYS,1        !activate Cylindrical with global Cartesian Z as the axis of rotation
!NROTAT,ALL

!LSEL,S,LINE,,722    !radial displacements on plates
!NSLL,S,1

```


!D,ALL,UX,0

DA,15,ALL !displacements on selected areas

DA,22,ALL

ALLSEL,ALL

TIME,1

LDREAD,TEMP,LAST,LAST,,0,FILE,RTH !import thermal load

FINISH

/SOLU

SOLVE

F.5 Analisi termica del Beam-Profiler

FINISH

/CLEAR,ALL !Resets the ANSYS database to the conditions at the beginning of the problem

/CONFIG,NRES,1000000 !Assign maximum number of results sets (substeps) allowed on the result file

/TITLE, beam profile thermal analysis

!-----

! MATERIALS IMPORT !define materials properties from macro files .mac

/PREP7 !enters the model creation preprocessor

!c: Ta

*USE,M26Ta.mac !calls the macro for Tantalum (N=26)

!c: C_ATJ

*USE,M29C_ATJ.mac !calls the macro for Graphite (N=29)

!c: Al5083

*USE,M23Al5083_X.mac !calls the macro for Aluminium alloy (N=23)

!c: M27W

*USE,M27W.mac !calls the macro for Wolframio (N=27)

!c: M28Cu

*USE,M28Cu.mac !calls the macro for Copper (N=28)

!c: Al2O3

*USE,M31Al2O3_XX.mac !calls the macro for Alluminum (N=31)

!c: SS316

*USE,M50SS316.mac !calls the macro for Stainless Steel (N=50)

!c: Mo

*USE,M30Mo.mac !calls the macro for Molibdenum (N=30)

```

FINISH                                !exits normally from a processor
!-----
! DEFINE ELEMENT TYPE
/PREP7                                !enters the model creation preprocessor
ET,1,SOLID90                           !defines a local element type
FINISH                                !exits normally from a processor
!-----
! GEOMETRY IMPORT
/AUX15                                !enters the IGES file transfer processor
IOPTN,IGES,NODEFEAT                    !set option for IGES import
IOPTN,MERGE,YES
IOPTN,SOLID,YES
IOPTN,SMALL,YES
IOPTN,GTOLER,DEFA                      !transfers IGES data from a file into ANSYS
IGESIN,isolatore,igs
IGESIN,plate,igs
IGESIN,prt0002,igs
IGESIN,prt0003,igs
IGESIN,rod,igs
IGESIN,rotary_drive,igs
IGESIN,wire,igs
IGESIN,wire_b,igs
FINISH                                !exits normally from a processor
!-----
! SCALING AND GLUE PROCESS
/PREP7                                !enters the model creation preprocessor
ALLSEL,ALL                             !geometry model scaling
VLSCALE,ALL,,0.001,0.001,0.001,,0,1   !scaling geometry from "mm" to "m"
ALLSEL,ALL
VGLUE,ALL                              !joint the selected volumes
NUMCMP,VOLU                            !compressed entity number
NUMCMP,AREA
NUMCMP,LINE
NUMCMP,KP
FINISH                                !exits normally from a processor
!-----
! MESHING PROCESS
/PREP7                                !enters the model creation preprocessor
TYPE,1                                 !sets the element type attribute pointer
MSHAPE,1,3D                            !1-mesh with tetrahedral-shaped elements when Dimension = 3-D

```

```

MSHKEY,0                                !free meshing
!----- rotary_drive

ESIZE,0.003,300                          !define lenght and number of elements division
MAT,50                                    !define material
VSEL,S,VOLU,,3
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,3                                  !mesh selected volumes
!----- rod
ESIZE,0.003,300
MAT,26
VSEL,S,VOLU,,2
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,2
!----- isolatore
ESIZE,0.003,300
MAT,31
VSEL,S,VOLU,,4
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,4
!----- plate
ESIZE,0.002,300
MAT,26
VSEL,S,VOLU,,7
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,7
!----- wire_a
ESIZE,0.001,300
MAT,27
VSEL,S,VOLU,,6
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,6
!----- wire_b
ESIZE,0.001,300
MAT,27
VSEL,S,VOLU,,1
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,1
!----- wire_c
ESIZE,0.001,300

```

```

MAT,27
VSEL,S,VOLU,,5
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,5
!----- pin
ESIZE,0.002,300
MAT,26
VSEL,S,VOLU,,8
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,8
!----- sustain
ESIZE,0.003,300
MAT,26
VSEL,S,VOLU,,9
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,9
!-----
! IRRADIANCE PROCESS
SPCTEMP,1,50      !defines a free-space ambient temperature for radiation using the Radiosity method [°C]
RADOPT,,0.001,0,10000,,0.5      !specifies Gauss-Seidel Radiosity Solver options
HEMIOPT,100      !specifies options for Hemicube view factor calculation
STEF,5.67e-8      !specifies Stefan-Boltzmann radiation constant [W/(m^2*K^4)]
TOFFST,273.15      !specifies the temperature offset from absolute zero to zero [°C]
!VFOPT,OFF

ALLSEL,ALL

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

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

VSEL,ALL

```

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

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

VSEL,ALL
VSEL,R,MAT,,Al5083
ALLSEL,BELOW,VOLU
SFA,ALL,,RDSF,0.3,1
ALLSEL,ALL

VSEL,ALL
VSEL,R,MAT,,SS316
ALLSEL,BELOW,VOLU
SFA,ALL,,RDSF,-SS316,1
ALLSEL,ALL

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

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

ALLSEL,ALL
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
```

```

VSEL,ALL
ALLSEL,BELOW,VOLU
ASEL,INVE
ADELE,ALL,,,1
LSEL,INVE
LDELE,ALL,,,1
KSEL,INVE
KDELE,ALL

```

```
FINISH !exits normally from a processor
```

```
!-----
```

```
! THERMAL AND ELETRICAL LOADS
```

```
/PREP7 !enters the model creation preprocessor
```

```
DA,29,TEMP,35 !defines DOF constraints on areas [°C]
```

```
DA,30,TEMP,35 !defines DOF constraints on areas [°C]
```

```
DA,40,TEMP,35 !defines DOF constraints on areas [°C]
```

```
*SET,air1,5 !enter "alfa" [W/m2°C]
```

```
*SET,air2,25 !enter "fluid temperature" [°C]
```

```
SFA,37,,CONV,air1,air2 !thermal convection on selected areas
```

```
SFA,38,,CONV,air1,air2
```

```
SFA,39,,CONV,air1,air2
```

```
BFV,1,HGEN,6.4E9 !heat generation on selected volume [W/m3]
```

```
FINISH !exits normally from a processor
```

```
!-----
```

```
! SOLVER PROCESS
```

```
/SOLU !enters the solution processor
```

```
SOLCONTROL,ON !specifies whether to use optimized nonlinear solution defaults
```

```
!and some enhanced internal solution algorithms
```

```
ANTYPE,TRANS !specifies the analysis type and restart status
```

AUTOTS,ON	!use automatic time stepping
KBC,1	!specifies stepped or ramped loading within a load step
DELTIM,0.0001,0.0001,1000	!specifies the time step sizes to be used for this load step
OUTRES,NSOL,ALL	!controls the solution data written to the database
TIME,3000	!sets the time for a load step
ALLSEL,ALL	
SAVE,,,,ALL	
SOLVE	!starts a solution
SAVE,,,,ALL	!saves all current database information
FINISH	!exits normally from a processor

F.6 Analisi termica camera di diagnostica

```

FINISH
/CLEAR,ALL          !Resets the ANSYS database to the conditions at the beginning of the problem
/CONFIG,NRES,1000000 !Assign maximum number of results sets (substeps) allowed on the result file
/TITLE, thermal analysis
!-----
! MATERIALS IMPORT          !define materials propeties from macro files .mac
/PREP7                   !enters the model creation preprocessor
!c: Ta
*USE,M26Ta.mac           !calls the macro for Tantalum          (N=26)
!c: C_ATJ
*USE,M29C_ATJ.mac       !calls the macro for Graphite          (N=29)
!c: Al5083
*USE,M23Al5083_X.mac    !calls the macro for Alluminium alloy (N=23)
!c: M27W
*USE,M27W.mac           !calls the macro for Wolframio        (N=27)
!c: M28Cu
*USE,M28Cu.mac         !calls the macro for Copper          (N=28)
!c: Al2O3
*USE,M31Al2O3_XX.mac   !calls the macro for Alluminium      (N=31)
!c: SS316
*USE,M50SS316.mac     !calls the macro for Stainless Steel  (N=50)
!c: Mo
*USE,M30Mo.mac         !calls the macro for Molibdenum      (N=30)
FINISH                  !exits normally from a processor
!-----
! DEFINE ELEMENT TYPE
/PREP7                   !enters the model creation preprocessor

```

```

ET,1,SOLID90                                !defines a local element type
FINISH                                       !exits normally from a processor
!-----
! GEOMETRY IMPORT
/AUX15                                       !enters the IGES file transfer processor
IOPTN,IGES,NODEFEAT                         !set option for IGES import
IOPTN,MERGE,YES
IOPTN,SOLID,YES
IOPTN,SMALL,YES
IOPTN,GTOLER,DEFA                          !transfers IGES data from a file into ANSYS
IGESIN,block,igs
IGESIN,disco_coll,igs
IGESIN,disco_coll_cpy_1,igs
IGESIN,rotary_drive,igs
IGESIN,prt0004,igs
IGESIN,prt0004_cpy_1,igs
IGESIN,rod,igs
IGESIN,prt0006,igs
IGESIN,prt0007,igs
IGESIN,plate,igs
IGESIN,wire,igs
IGESIN,wire_b,igs
IGESIN,prt0048,igs
IGESIN,prt0049,igs
IGESIN,prt0050,igs
IGESIN,prt0051,igs
IGESIN,prt0051_cpy_1,igs
IGESIN,prt0051_cpy_2,igs
IGESIN,shell,igs
FINISH                                       !exits normally from a processor
!-----
! SCALING AND GLUE PROCESS
/PREP7                                       !enters the model creation preprocessor
ALLSEL,ALL                                  !geometry model scaling
VLSCALE,ALL,,0.001,0.001,0.001,,0,1      !scaling geometry from "mm" to "m"
ALLSEL,ALL

VGLUE,11,13,12,10,7,9,8,5                  !joint selected volumes
VGLUE,4,6

```



```

NUMCMP,VOLU                                !compressed entity number
NUMCMP,AREA
NUMCMP,LINE
NUMCMP,KP
!-----
! BEAM INTERSECTION
LOCAL,11,0,0,0,0,0,90,0                    !rotate coordinate system
WPCSYS,,1                                  !define a new coordinate system
VSEL,S,VOLU,,1
ALLSEL,BELOW,VOLU
CYLIND,0,0.016,-0.5,0.5,0,360             !generate a cylinder (beam)
VSBA,1,ALL,,DELETE,DELETE                 !intercept the beam with the selected volumes
VDELE,21,,,1                              !delete beam
FINISH                                     !exits normally from a processor
!-----
! MESHING PROCESS
/PREP7                                     !enters the model creation preprocessor
TYPE,1                                     !sets the element type attribute pointer
MSHAPE,1,3D                               !1-mesh with tetrahedral-shaped elements when Dimension = 3-D
MSHKEY,0                                   !free meshing
!----- SHELL
ESIZE,0.010,300                           !define length and number of element division
MAT,23                                     !define material
VSEL,S,VOLU,,15
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,15                                  !mesh selected volume
!----- DISC_COLL
ESIZE,0.008,300
MAT,29
VSEL,S,VOLU,,2
ALLSEL,BELOW,VOLU
VSWEEP,2
VSEL,S,VOLU,,3
ALLSEL,BELOW,VOLU
VSWEEP,3
!----- FARADAY
ESIZE,0.008,300
VSEL,S,VOLU,,22
ALLSEL,BELOW,VOLU
VSWEEP,22

```

```

VSEL,S,VOLU,,23
ALLSEL,BELOW,VOLU
VSWEEP,23
!----- WIRE
ESIZE,0.001,300
MAT,27
VSEL,S,VOLU,,7
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,7
VSEL,S,VOLU,,8
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,8
VSEL,S,VOLU,,18
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,18
!----- PLATE
ESIZE,0.002,300
MAT,26
VSEL,S,VOLU,,19
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,19
!----- ROD
ESIZE,0.002,300
MAT,26
VSEL,S,VOLU,,20
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,20
!----- FLANGE
ESIZE,0.004,300
MAT,26
VSEL,S,VOLU,,17
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,17
VSEL,S,VOLU,,5
ALLSEL,BELOW,,VOLU
VMESH,5
!----- BUSSOLA
ESIZE,0.002,300
MAT,29
VSEL,S,VOLU,,16

```

```
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,16
!----- SOSTEGNO
ESIZE,0.004,500
MAT,50
VSEL,S,VOLU,,6
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,6
!----- ROTARY_DRIVE
ESIZE,0.004,300
MAT,50
VSEL,S,VOLU,,4
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,4
!----- SCHERMI
ESIZE,0.003,300
MAT,26
VSEL,S,VOLU,,10
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,10

VSEL,S,VOLU,,9
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,9

VSEL,S,VOLU,,11
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,11

VSEL,S,VOLU,,12
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,12

VSEL,S,VOLU,,13
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,13

VSEL,S,VOLU,,14
ALLSEL,BELOW,VOLU
VMESH,14
```

```

!-----
! HEAT GENERATORS
/PREP7                                !enters the model creation preprocessor
/INPUT,IC_stazionario,'dat',,0,1     !read nodal temperatures (initial condition)
BFV,22,HGEN,9.13E7                    !heat generator on collimator [W/m3]
BFV,8,HGEN,6.4E9                      !heat generator on discs [W/m3]
!-----

! IRRADIANCE PROCESS
SPCTEMP,1,50                          !defines a free-space ambient temperature for radiation using the Radiosity
method [°C]
RADOPT,,0.001,0,10000,,0.5           !specifies Gauss-Seidel Radiosity Solver options
HEMIOPT,100                           !specifies options for Hemicube view factor calculation
STEF,5.67e-8                          !specifies Stefan-Boltzmann radiation constant [W/(m^2*K^4)]
TOFFST,273.15                         !specifies the temperature offset from absolute zero to zero [°C]
!VFOPT,OFF

ALLSEL,ALL

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

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

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

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

```

ALLSEL,ALL

VSEL,ALL

VSEL,R,MAT,,Al5083

ALLSEL,BELOW,VOLU

SFA,ALL,,RDSF,0.6,1

ALLSEL,ALL

VSEL,ALL

VSEL,R,MAT,,SS316

ALLSEL,BELOW,VOLU

SFA,ALL,,RDSF,-SS316,1

ALLSEL,ALL

VSEL,ALL

VSEL,R,MAT,,Mo

ALLSEL,BELOW,VOLU

SFA,ALL,,RDSF,-Mo,1

ALLSEL,ALL

VSEL,ALL

VSEL,R,MAT,,Cu

ALLSEL,BELOW,VOLU

SFA,ALL,,RDSF,-Cu,1

ALLSEL,ALL

ALLSEL,ALL

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

```

VSEL,ALL
ALLSEL,BELOW,VOLU
ASEL,INVE
ADELE,ALL,,,1
LSEL,INVE
LDELE,ALL,,,1
KSEL,INVE
KDELE,ALL
FINISH                                !exits normally from a processor
!-----
! CONVECTION LOADS
! external convective loads
/PREP7                                !enters the model creation preprocessor
*SET,air1,5                            !enter "alfa" [W/m2°C]
*SET,air2,25                           !enter "fluid temperature" [°C]
SFA,176,,CONV,air1,air2               !thermal convection on areas
SFA,173,,CONV,air1,air2
SFA,175,,CONV,air1,air2
SFA,174,,CONV,air1,air2
SFA,192,,CONV,air1,air2
SFA,193,,CONV,air1,air2
SFA,247,,CONV,air1,air2
SFA,248,,CONV,air1,air2
SFA,245,,CONV,air1,air2
SFA,249,,CONV,air1,air2
SFA,246,,CONV,air1,air2
SFA,236,,CONV,air1,air2
SFA,239,,CONV,air1,air2
SFA,237,,CONV,air1,air2
SFA,238,,CONV,air1,air2
SFA,25,,CONV,air1,air2
SFA,26,,CONV,air1,air2
SFA,27,,CONV,air1,air2
SFA,229,,CONV,air1,air2
SFA,230,,CONV,air1,air2
SFA,179,,CONV,air1,air2
SFA,177,,CONV,air1,air2
SFA,178,,CONV,air1,air2
SFA,180,,CONV,air1,air2

```

SFA,181,,CONV,air1,air2
SFA,200,,CONV,air1,air2
SFA,201,,CONV,air1,air2
SFA,202,,CONV,air1,air2
SFA,203,,CONV,air1,air2
SFA,199,,CONV,air1,air2
!-----
! cooled circuit SHELL
*SET,val1,5757.64
*SET,val2,34.4
SFA,204,,CONV,val1,val2
SFA,209,,CONV,val1,val2
SFA,205,,CONV,val1,val2
SFA,208,,CONV,val1,val2
SFA,206,,CONV,val1,val2
SFA,210,,CONV,val1,val2
SFA,211,,CONV,val1,val2
SFA,207,,CONV,val1,val2
SFA,213,,CONV,val1,val2
SFA,212,,CONV,val1,val2
SFA,252,,CONV,val1,val2
SFA,253,,CONV,val1,val2
SFA,250,,CONV,val1,val2
SFA,251,,CONV,val1,val2
SFA,255,,CONV,val1,val2
SFA,256,,CONV,val1,val2
SFA,259,,CONV,val1,val2
SFA,258,,CONV,val1,val2
SFA,257,,CONV,val1,val2
SFA,254,,CONV,val1,val2
SFA,225,,CONV,val1,val2
SFA,223,,CONV,val1,val2
SFA,224,,CONV,val1,val2
SFA,216,,CONV,val1,val2
SFA,214,,CONV,val1,val2
SFA,215,,CONV,val1,val2
SFA,217,,CONV,val1,val2
SFA,219,,CONV,val1,val2
SFA,218,,CONV,val1,val2
SFA,220,,CONV,val1,val2

!enter "alfa" [W/m²°C]
!enter "fluid temperature" [°C]

```

SFA,222,,CONV,val1,val2
SFA,221,,CONV,val1,val2
FINISH
! FINISH                                !exits normally from a processor
-----
! SOLVER PROCESS
/SOLU                                    !enters the solution processor
SOLCONTROL,ON                           !specifies whether to use optimized nonlinear solution defaults
                                         !and some enhanced internal solution algorithms
ANTYPE,TRANS                             !specifies the analysis type and restart status
AUTOTS,ON                                 !use automatic time stepping
KBC,1                                     !specifies stepped or ramped loading within a load step
DELTIM,0.0001,0.0001,1000              !specifies the time step sizes to be used for this load step
OUTRES,NSOL,ALL                          !controls the solution data written to the database
TIME,5000                                 !sets the time for a load step
ALLSEL,ALL
SAVE,,,,ALL
SOLVE                                    !starts a solution
SAVE,,,,ALL                              !saves all current database information
FINISH                                    !exits normally from a processor

```

APDL per la generazione del file „stazionario.dat“

```

/POST1                                    !enter the post-processor
SET,LAST                                 !consider the last solution step
ALLSEL,ALL
*GET,ntotnodi,NODE,0,COUNT               !define a parameter
*CFOPEN,IC_stazionario,dat              !generate a file
*VWRITE,'/PREP7'
%c
*VWRITE,'ALLSEL,ALL'
%c
nn=0
*DO,i,1,ntotnodi                         !do cicle
    nn=NDNEXT(nn)
    *GET,ntemp,NODE,nn,TEMP
    *VWRITE,IC,',nn,',TEMP,',ntemp      !write nodal temperature on file
    %c%i%c%f
*ENDDO
*CFCLOS

```


APPENDICE G

Tavole costruttive dei componenti sviluppati

In questa appendice sono riportate le tavole costruttive dei componenti del sistema ohmico resistivo, descritto opportunamente nel *Capitolo 3*. Inoltre sono presenti i principali assiemi dei dispositivi sviluppati nel corso della progettazione del Front-End protonico, ovvero il sistema multi-collimatore, la Faraday-Cup e il Beam-Profilier.

RINGRAZIAMENTI

Un sentito ringraziamento va innanzitutto all'Ing. Alberto Monetti per la disponibilità e il prezioso aiuto arrecato nella realizzazione di questo elaborato, senza il quale non sarebbe stato possibile concretizzarlo. Ringrazio l'Ing. Giovanni Meneghetti per la disponibilità dimostrata nei miei confronti e la fiducia trasmessa nell'intraprendere questa grande sfida. La sua etica professionale e la grande passione che dedica al suo lavoro, da esempio per gli studenti che La seguono, sono stati e continuano ad essere per me dei punti di riferimento importanti per la carriera professionale di ingegnere che intendo ambire.

Ringrazio il Dott. Alberto Andrighetto per aver coordinato il lavoro e per avermi offerto la possibilità di lavorare in un ambiente stimolante ed accogliente. Grazie a tutte le persone dei LNL, in particolar modo alle persone del gruppo SPES che mi hanno accolto caldamente durante la mia permanenza presso i Laboratori. Un grande grazie va a Michele Lollo per le piacevoli conversazioni, la grande esperienza e la passione che dedica al suo lavoro.

Ringrazio di cuore la fidanzata Daniela perché non mi ha mai fatto mancare il suo appoggio, anche nei momenti più difficili. Ringrazio la mia band che mi permette di suonare divertendomi: infatti è grazie a questa che riesco a dare continuità a una delle mie più grandi passioni, la musica! Ringrazio il coro di Sant'Anna Morosina, perché una comunità così piccola mi ha fatto riscoprire i valori delle tradizioni e la forza d'animo che può scaturire da un gruppo così autentico. Ringrazio gli amici vecchi e nuovi per le risate, le discussioni, i consigli e tutte le esperienze trascorse assieme.

Il più grande Grazie va alla mia famiglia a cui è dedicata questa tesi, per l'umiltà, l'essenzialità dei valori trasmessi e l'ottimismo che continuano essere da esempio. Vi ringrazio per la pazienza e la fiducia incrollabile che avete avuto nei miei confronti in tutto questo tempo.

Grazie perché senza di voi tutto questo non sarebbe potuto avvenire.

Enrico Boratto

