

ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITA' DI BOLOGNA

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA
Sede di Forlì

Corso di Laurea in
INGEGNERIA MECCANICA
Classe L-9

**ELABORATO FINALE DI LAUREA
IN FISICA SPERIMENTALE**

**UPGRADE DELLA TEST STATION PER 54 MAGNETI
CORRETTORI DI HO (ALTO ORDINE) DI HILUMI-LHC
CON PREDISPOSIZIONE DEL SISTEMA PER LE
MISURE MAGNETICHE**

CANDIDATO
Nicholas Lusa

RELATORE
Prof. Dott. Domenico Galli

CORRELATORE
Prof. Ing. Giangiacomo Minak

CORRELATORE
Dott. Ing. Marco Statera

Anno Accademico 2017/2018

Ringraziamenti

Prima di tutto, vorrei esprimere la mia gratitudine al mio correlatore, il Dr. Marco Statera, il quale mi ha coinvolto in un'attività i cui esiti saranno fondamentali per il raggiungimento degli obiettivi prefissati per Hi-Lumi, il tutto all'interno di un laboratorio tecnologico molto sviluppato ed in costante miglioramento. Vorrei ringraziarlo, inoltre, per avermi insegnato come valutare i differenti scambi di calore che si manifestano all'interno di un criostato in atmosfera di elio liquido e per essersi impegnato in prima persona a creare un ambiente di lavoro stimolante.

Vorrei ringraziare anche il responsabile del laboratorio, il Dr. Massimo Sorbi per avermi dato l'opportunità di lavorare nel contesto di un progetto molto ambizioso ed importante quale è Hi-Lumi e per gli utili consigli ricevuti durante la redazione della tesi.

Vorrei ringraziare anche le persone dello staff che mi hanno aiutato, attraverso attività di brain-storming a capire gli aspetti più delicati da valutare per la realizzazione del progetto e per avermi aiutato a reperire le informazioni necessarie. Vorrei ringraziare in particolare: Maurizio Todero per avermi messo a disposizione i disegni meccanici e per le utili osservazioni manifestate nell'ambito della parte criogenica e di progettazione, Danilo Pedrini per avermi spiegato le criticità riguardanti il montaggio dello strumento di misura, Mauro Quadrio per avermi spiegato il funzionamento del sistema elettrico di protezione del magnete durante il test, Gianpietro Spada per il supporto informatico e Samuele Mariotto per avermi spiegato il principio di funzionamento delle misure magnetiche eseguite su magneti superconduttori.

Un importante ringraziamento va al mio relatore, il Dr. Domenico Galli per la disponibilità dimostrata durante questi mesi e per gli utili consigli forniti nell'ambito dei calcoli termici ed anche al mio correlatore, il Dr. Giangiacomo Minak per l'interesse e la disponibilità manifestati per questo elaborato.

Questi ringraziamenti non possono terminare senza ringraziare Herve Prin, al quale mi lega un rapporto speciale sia umano che lavorativo, iniziato durante la mia esperienza lavorativa al CERN e consolidatosi nei mesi. La dedizione, l'impegno e le competenze tecniche ed ingegneristiche che si rispecchiano nella sua persona, sono per me una fonte d'ispirazione e fanno di lui un modello da seguire.

I ringraziamenti più profondi vanno ai miei genitori, mio padre Claudio Lusa e mia madre Marinella Grandini, senza i quali non sarei mai arrivato a questo traguardo. Non

finirò mai di ringraziarli per l'incoraggiamento ed il supporto datomi durante questi anni. È difficile trovare le parole giuste per esprimere tutti i miei pensieri, però vorrei che il raggiungimento di questo mio traguardo, per quanto possibile, fosse un premio anche per loro e per i sacrifici che hanno fatto. Un infinito grazie per esserci sempre, per sostenermi, per avermi insegnato ciò che è "giusto" e ciò che non lo è. Senza di loro certamente non sarei la persona che sono. Queste poche righe vogliono essere un piccolo riconoscimento del fatto che per me sono un punto di riferimento in questo mondo in continua evoluzione e del fatto che rappresentano il mio bene più prezioso. Vorrei ringraziare anche mio fratello, Christopher Lusa, per il supporto morale durante questi anni e per i momenti di svago che abbiamo passato insieme.

Non posso non ringraziare i miei nonni, sia materni che paterni: so per certo che durante il periodo degli esami ognuno di loro ha avuto pensieri per me, in particolare mio nonno Nino Grandini il quale prima di ogni esame cercava di tranquillizzarmi con l'atteggiamento che solo un nonno sa avere.

Vorrei fare un ringraziamento speciale alla mia morosa Eleni Baggini per avermi sopportato e supportato durante questi anni di studio: se da una parte non è facile studiare, non lo è neanche stare vicino ad uno studente che decide di lavorare e studiare allo stesso tempo e posso affermare che se sono arrivato a questo traguardo è anche merito suo.

Vorrei inoltre ringraziare la famiglia della mia morosa, che mi ha sempre incoraggiato e supportato nei momenti più delicati della mia carriera accademica. Un pensiero speciale va al nonno Michele Monti, che nonostante sia venuto a mancare l'anno scorso, è ben presente nella mia memoria per le partite a scala 40 nei momenti di pausa dallo studio e per la serenità che riusciva ad infondermi nei pochi minuti di gioco.

INDICE

<i>1. Introduzione</i>	<i>1</i>
<i>2. High Luminosity LHC</i>	<i>3</i>
<i>3. I magneti correttori di alto ordine</i>	<i>5</i>
<i>4. Introduzione sulle misure magnetiche e sugli strumenti di misura</i>	<i>12</i>
<i>5. Stazione di misura esistente</i>	<i>21</i>
5.I Descrizione generale dell'impianto criogenico.....	21
5.II Installazione dei magneti nel discendente.....	26
5.III Connessioni elettriche e monitoraggio parametri.....	28
<i>6. Progettazione del sistema di fissaggio per l'apparato di misure magnetiche</i>	<i>32</i>
6.I Requisiti funzionali e vincoli progettuali.....	32
6.II Sonda per le misure magnetiche	33
6.III Progettazione	34
6.III.a Calcolo delle contrazioni termiche	44
6.III.b Calcolo degli scambi di calore	66
<i>7. Conclusioni e possibili migliore future.....</i>	<i>80</i>
<i>8. Bibliografia</i>	<i>81</i>

1. Introduzione

L'attività di ricerca alla base della presente tesi è stata svolta al laboratorio LASA (Laboratori Acceleratori e Superconduttività Applicata) dell'INFN di Milano e ha per oggetto l'upgrade della nuova stazione di test per i magneti superconduttori correttori di alto ordine per l'acceleratore di particelle HiLumi-LHC al CERN di Ginevra, con predisposizione del sistema per le misure magnetiche.

I magneti vengono testati ad una temperatura di 4.2 K, pertanto la progettazione deve considerare le contrazioni termiche conseguenti al raggiungimento di temperature così prossime allo zero assoluto.

In particolare il lavoro di tesi riguarda la predisposizione del sistema per le misure magnetiche, che consiste nell'inserimento/integrazione di una sonda per le misure magnetiche e della relativa interfaccia di controllo (DAQ) nello schema di un generico apparato di misura. La progettazione è soggetta a stringenti vincoli: i materiali utilizzati non devono essere magnetici, per evitare distorsioni del campo, devono possedere buone caratteristiche a temperature criogeniche (non devono divenire fragili), devono essere caratterizzati da uno specifico coefficiente di contrazione termica per evitare deformazioni plastiche alla temperatura di test; inoltre il sistema di fissaggio dell'apparato di misure magnetiche deve essere compatibile con l'utilizzo di sonde di misura aventi diverse dimensioni ed ingombri, infine, per ottenere misure precise, l'allineamento sonda-magnete deve avere una tolleranza estremamente limitata.

Nel *Capitolo 2* si descrive l'acceleratore HiLumi-LHC al CERN di Ginevra, nel quale saranno installati i magneti. Il progetto si propone di aumentare sensibilmente la luminosità dell'acceleratore oggi operante, onde aumentare la statistica degli eventi di fisica particellare di alta energia prodotti nei punti d'interazione.

Il *Capitolo 3* descrive i magneti correttori di alto ordine e ne descrive la funzione nell'acceleratore di particelle.

Il *Capitolo 4* introduce le misure magnetiche che dovranno essere effettuate e gli strumenti di misura disponibili per effettuarle.

Il *Capitolo 5* presenta la stazione di misura esistente, descrivendo nel dettaglio l'impianto criogenico, l'installazione dei magneti, le connessioni elettriche e il sistema di monitor dei parametri.

Nel *Capitolo 6* è descritto nel dettaglio il progetto, evidenziando i requisiti funzionali e i vincoli progettuali, il calcolo delle contrazioni termiche, il calcolo degli scambi di calore e la loro verifica dei dati sperimentali con le stime calcolate.

Infine nel *Capitolo 7* sono presentate le possibili migliorie future e le attività programmate per i prossimi mesi.

2. High Luminosity LHC

Il Large Hadron Collider (Grande Collisore di Adroni), abbreviato LHC, è il più grande e potente acceleratore di particelle al mondo. È stato avviato per la prima volta il 10 settembre 2008 e costituisce l'aggiunta più recente agli acceleratori già presenti al CERN. L'LHC è un acceleratore di tipo circolare che consiste in un anello di magneti superconduttori lungo 26.6 chilometri al quale sono affiancate strutture complementari atte ad aumentare l'energia delle particelle lungo il tragitto.

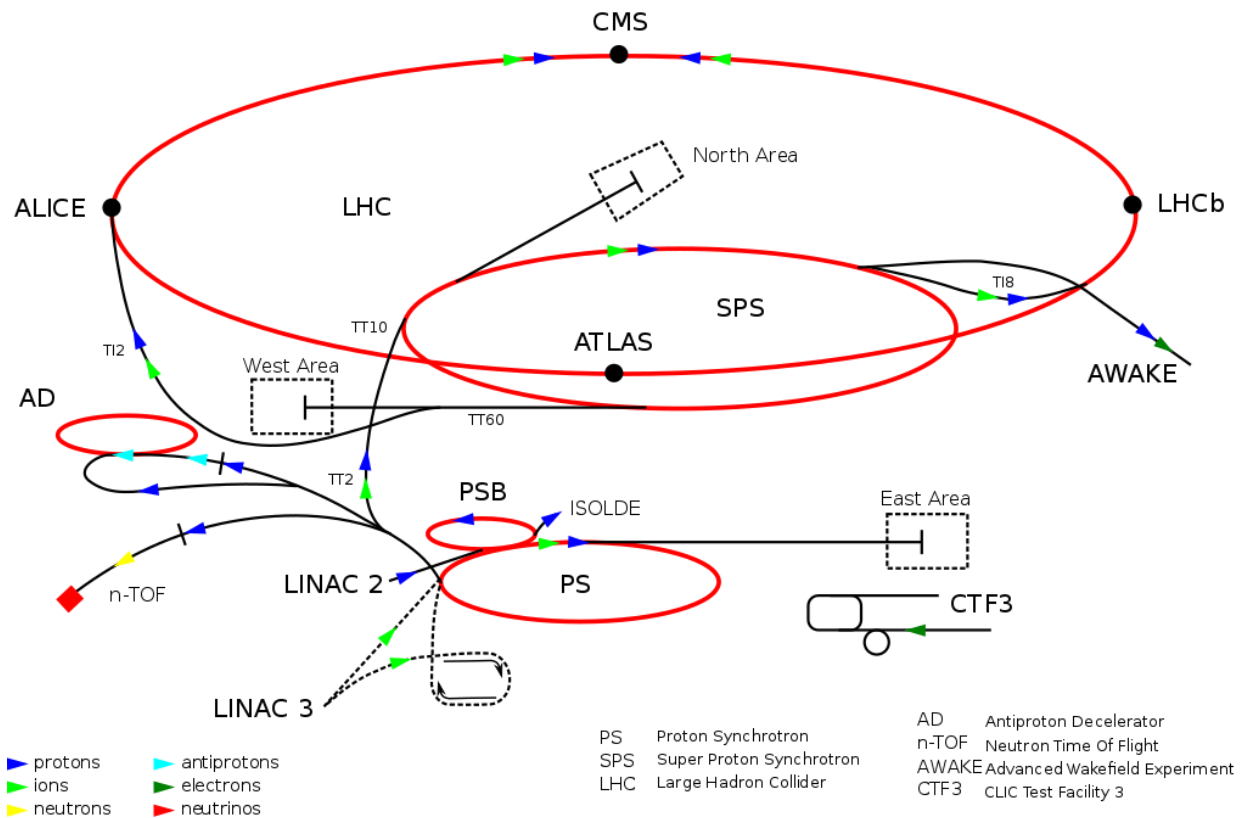


Figura 1. Schema rappresentante la rete di strutture ed acceleratori presenti presso il CERN di Ginevra per l'accelerazione dei fasci di particelle [8].

Il Large Hadron Collider necessita di una catena di accelerazione Linac-PS-SPS-LHC ed altri anelli ad alto campo per guidare i fasci contro-rotanti di protoni con un'energia fino a 7 TeV ed una velocità pari al 99,9999991% della velocità della luce. Il complesso dei magneti che costituisce LHC è formato da 1232 magneti dipolari superconduttori e da 386 magneti quadrupolari principali insieme a circa 20 magneti di diverso tipo per l'inserzione e la correzione del fascio. L'unico modo per ottenere un campo magnetico di dipolo nominale di 8.3 T, con un cavo superconduttore in lega di niobio-titanio (Nb-

Ti), è di raffreddare i magneti fino a 1.9 K inferiore alla cosiddetta temperatura critica, temperatura alla quale la lega superconduttiva non oppone resistenza al passaggio della corrente ed alla quale l'elio entra nello stato superfluido (HeII) caratterizzato da viscosità nulla e da una grande conducibilità termica [12]. Lo scopo di questa macchina è quello di far collidere i due fasci di particelle in quattro punti lungo il percorso, in corrispondenza di caverne nelle quali il tunnel si allarga per lasciare spazio a grandi sale sperimentali. In queste stazioni vi sono i quattro principali esperimenti di fisica particellare: ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS), CMS (Compact Muon Solenoid), LHCb (LHC-beauty) e ALICE (A Large Ion Collider Experiment). Si tratta di enormi apparati costituiti da numerosi rilevatori che utilizzano molteplici tecnologie ed operano intorno al punto in cui i fasci collidono. Nelle collisioni vengono prodotte, grazie alla trasformazione di una parte dell'altissima energia in massa, numerosissime particelle le cui proprietà vengono misurate dai rilevatori [8].

Il progetto High Luminosity LHC (Hi-Lumi), iniziato nel 2011, si propone di aumentare la luminosità integrata del collisore LHC di un ordine di grandezza, portandola dai 300 fb^{-1} integrati che si otterranno nel 2022 fino a oltre 3000 fb^{-1} integrati nei successivi 10 anni di operazione. Tale upgrade dell'acceleratore, che coinvolge numerosi aspetti innovativi dal punto di vista tecnologico, risulta necessario per l'aumento della statistica legata agli eventi di fisica particellare di ultra alta energia prodotti nei quattro punti d'interazione. Questo upgrade ha tre obiettivi principali:

- effettuare misurazioni più precise delle nuove particelle scoperte attraverso l'utilizzo di LHC;
- osservare processi rari previsti dal Modello Standard o da altre teorie da confermare;
- estendere i limiti dell'energia di frontiera, quindi estendere i limiti delle possibili scoperte.

Per far fronte a questo sviluppo tecnologico necessario per l'upgrade, è in corso un'intensa attività svolta dal CERN e da collaboratori esterni, che si concluderà nel 2021 con la sostituzione della linea di fascio nelle due zone principali d'interazione dei due fasci contro-rotanti di LHC, corrispondenti agli esperimenti ATLAS e CMS. Dal punto di vista dei magneti superconduttori, HI-Lumi è un progetto tecnologico che prevede l'utilizzo di magneti in Nb_3Sn , linee di powering in MgB_2 crab cavities in Nb

e la sostituzione dei quadrupoli di focalizzazione finale “low-beta”, dei dipoli di deflessione del fascio, del sistema di collimazione e di altri componenti di macchina tra cui i correttori. A tale scopo è stata costituita una collaborazione internazionale tra CERN ed istituti europei, tra cui la sezione di Milano dell’INFN tramite il laboratorio LASA (Laboratori Acceleratori e Superconduttività Applicata), diversi laboratori nazionali americani e il KEK in Giappone [11].

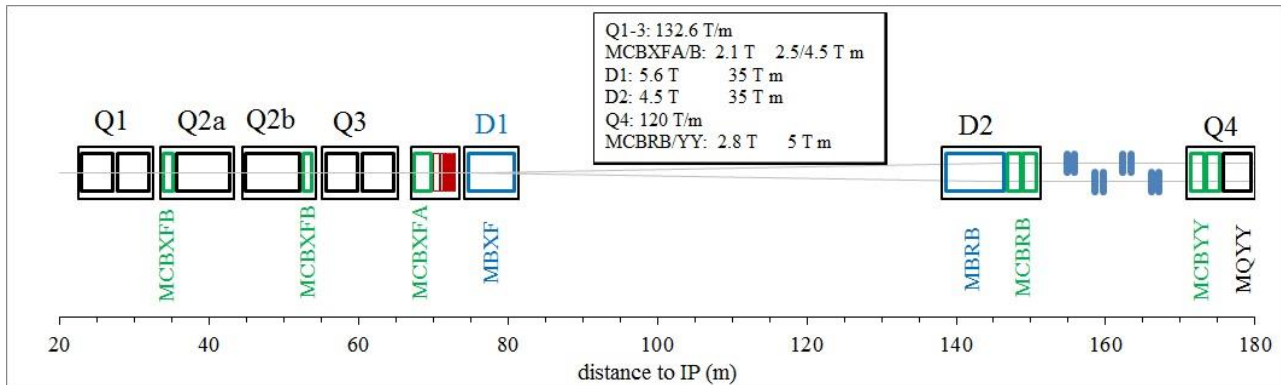


Figura 2. Nuovo layout dei magneti nei punti d'intersezione.

Il gruppo di Milano (sezione di Milano dell’INFN, tramite i laboratori del LASA) è responsabile della progettazione, costruzione e collaudo dei magneti correttori multipolari di alto ordine di questa nuova linea di focalizzazione nel contesto del progetto MAGIX. Tali magneti superconduttivi correggono le imperfezioni di campo dei magneti principali (quadrupoli “low beta” e dipoli di deflessione), sono stati progettati all’interno dei laboratori LASA. Di questi magneti correttori di alto ordine, sono previste cinque tipologie: quadrupolo skew, sestupolo normale/skew, ottupolo normale/skew, decapolo normale/skew e dodecapolo normale/skew [14].

3. I magneti correttori di alto ordine

Il progetto "High Luminosity Large Hadron Collider" (HL-LHC) si propone di aumentare la prestazione di LHC dopo il 2025, innalzando così il probabilità di nuove scoperte nella fisica delle particelle elementari. L'obiettivo è di aumentare la luminosità integrata di un fattore 10 rispetto all’attuale valore di LHC. La luminosità è un indicatore importante della prestazione di un acceleratore infatti è proporzionale al numero di eventi generati in un determinato periodo di tempo. Quanto più alta è la

luminosità, tanti più dati gli esperimenti possono raccogliere, per consentire quindi di osservare processi rari ed inaccessibili al livello di sensibilità attuale dell’LHC. Questo progetto di upgrade, consentirà studi precisi delle nuove particelle osservate mediante LHC, come il bosone di Higgs. Ad esempio, High Luminosity LHC produrrà fino a 15 milioni di bosoni di Higgs all'anno, rispetto agli 1,2 milioni prodotti nei due anni 2011 e 2012 [11].

Il gruppo magneti LASA partecipa al programma HL-LHC occupandosi del design, della costruzione e del collaudo dei prototipi e della serie di diversi tipi di magneti superconduttori: i correttori di alto ordine. Sono magneti speciali necessari per correggere le imperfezioni della qualità di campo degli altri magneti principali, in quanto il campo di induzione magnetica generato da elettromagneti reali differisce da quello ideale a causa di tre principali sorgenti di errori:

- errori di campo dovuti alla geometria;
- errori di campo dovuti alla non linearità dei materiali (superconduttori e ferromagnetici);
- errori di campo dovuti alle correnti indotte durante i transitori elettrodinamici [2].

I magneti correttori in questione sono il quadrupolo skew, il sestupolo normale e skew, l’ottupolo normale e skew, il decapolo normale e skew ed il dodecapolo normale e skew [15].

I requisiti che devono avere questi magneti sono riassunti in *Tabella 1*. L’apertura è 150 mm mentre la lunghezza dipende dal tipo di magnete (da 200 mm fino a 576 mm). La temperatura di lavoro è 1.9 K e la massima quantità di radiazioni ipotizzata (dose integrata) durante la vita utile di HL-LHC è di 15 MGy al raggiungimento della luminosità integrata di 4000 fb^{-1} . La qualità di campo deve essere inferiore alle 100 unità (ovvero l’1% rispetto all’armonica principale) in corrispondenza del raggio di riferimento di 50 mm. Uno schema concettuale della sezione del magnete è rappresentato in *Figura 3* [14]. Il design si basa sul concetto di magneti superferrici con una massa fredda magnetica e bobine superconduttive in lega di Nb-Ti che raggiungono un picco di campo tra $2/3 \text{ T}$ in condizioni operative. Con magneti superferrici si intendono magneti nei quali il campo magnetico viene generato sia dalle bobine superconduttive sia dai poli in ferro, in cui il contributo del ferro è paragonabile

a quello delle bobine. Questi magneti si differenziano sia dai magneti resistivi tradizionali nei quali il campo magnetico viene generato solo dalla saturazione del ferro sia dai magneti superconduttori in cui il campo magnetico viene generato solo dalle bobine mentre il ferro ha la funzione di chiudere le linee di campo.

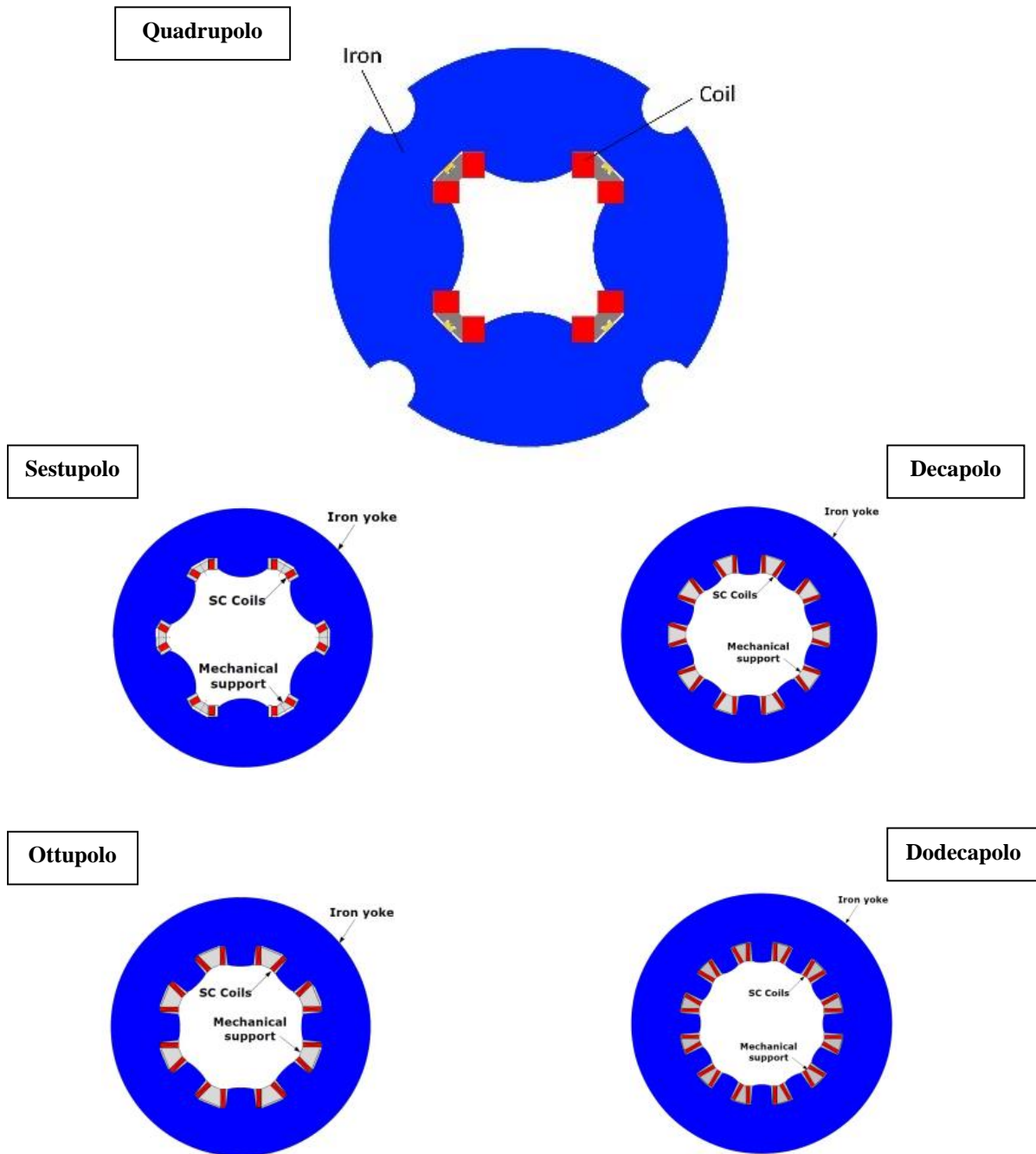


Figura 3. Schema concettuale delle sezioni dei magneti correttori di alto ordine: quadrupolo skew, sestupolo normale/skew, ottupolo normale/skew, decapolo normale/skew, dodecapolo normale/skew (quest'ultimi hanno stessa sezione ma lunghezza diversa) [14].

Tabella 1. Requisiti funzionali richiesti per i vari tipi di magneti correttore.

		4-poli skew MQCXF	6-poli MCSXF/ MCSSXF	8-poli MCOXF/ MCOSXF	10-poli MCDXF/ MCDSXF	12-poli skew MCTSXF	12-poli normale MCTXF
Ordine		2	3	4	5	6	6
Orientamento		Skew	Normale/ Skew	Normale/ Skew	Normale/ Skew	Skew	Normale
Diametro apertura	mm	150	150	150	150	150	150
Campo magnetico integrato a $R_{rif} = 50$ mm	T · m	0.700	0.095	0.069	0.037	0.017	0.086
Lunghezza meccanica	mm	540.4	263.6	246.2	246.2	205.6	582.6
Diametro esterno del magnete	mm	460	320	320	320	320	320
Temperatura di lavoro	K	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9
Corrente nominale	A	± 182	± 105	± 105	± 105	± 105	± 105
Margine di carico	%	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50
Qualità campo a $R_{rif} = 50$ mm	unità	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100
Resistenza alle radiazioni	MGy	15	15	15	15	15	15
Unità necessarie nell'acceleratore		4	8	8	8	4	4
Scorta		2	4	4	4	2	2

In base alle specifiche generali e funzionali, presso i laboratori del LASA, sono state sviluppate e progettate le sei tipologie di magneti. Nelle figure che seguono sono riportate le viste 3D dei modelli dei vari magneti correttori.

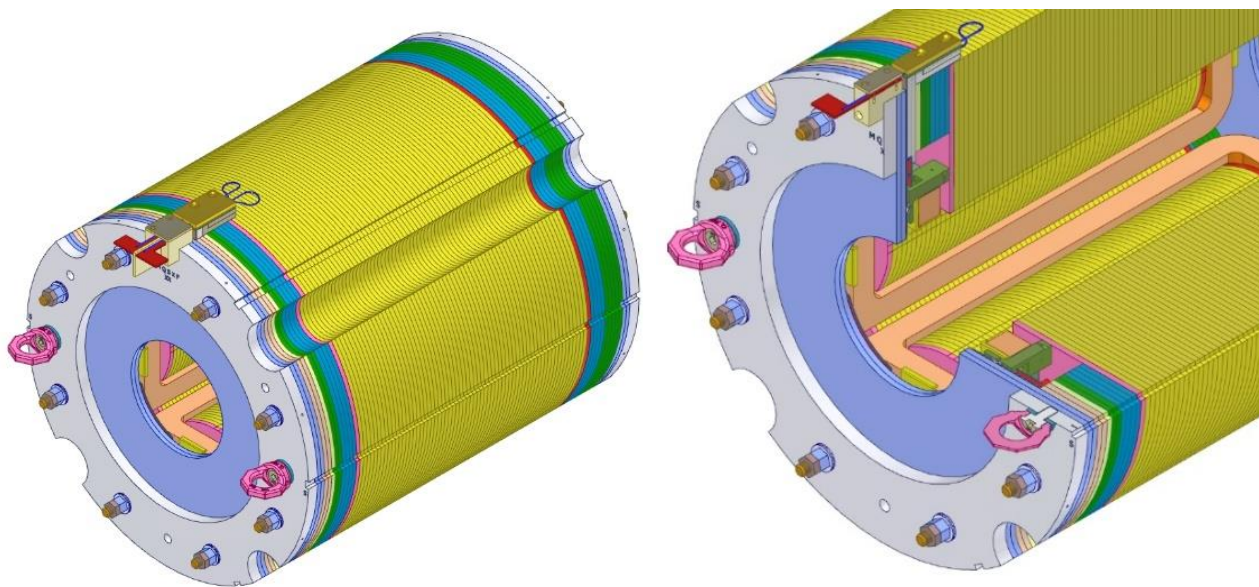


Figura 4. Vista 3D (sinistra), vista interna (destra) del quadrupolo skew (cortesia di M.Todero INFN Milano).

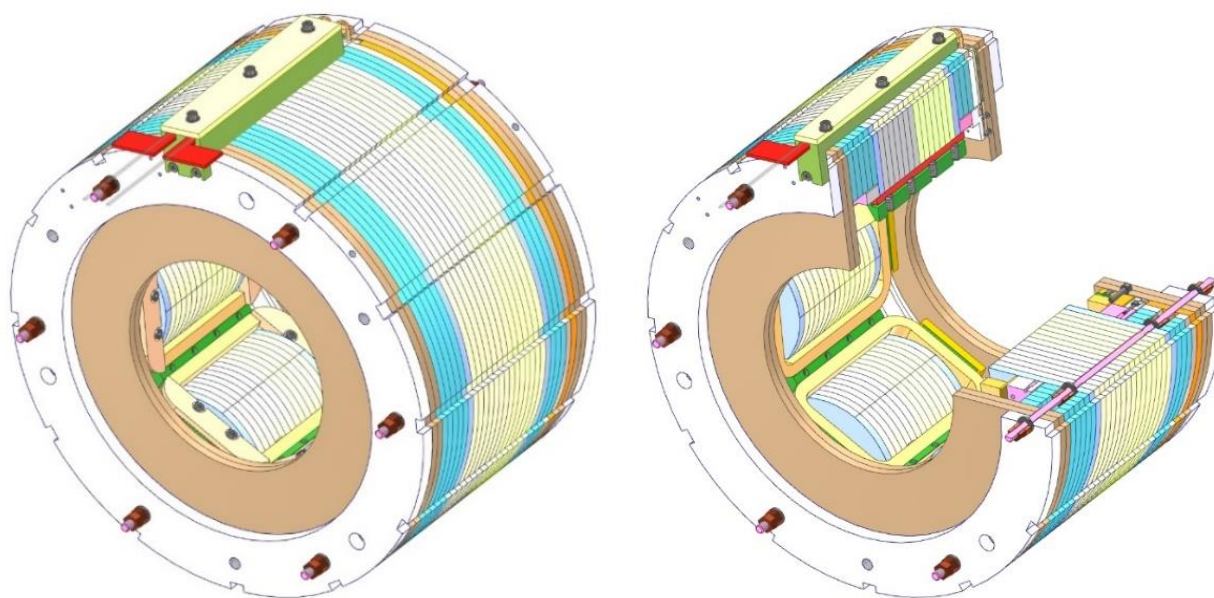


Figura 5. Vista 3D (sinistra) e vista interna (destra) di un sestupolo normale/skew (cortesia di M.Todero INFN Milano).

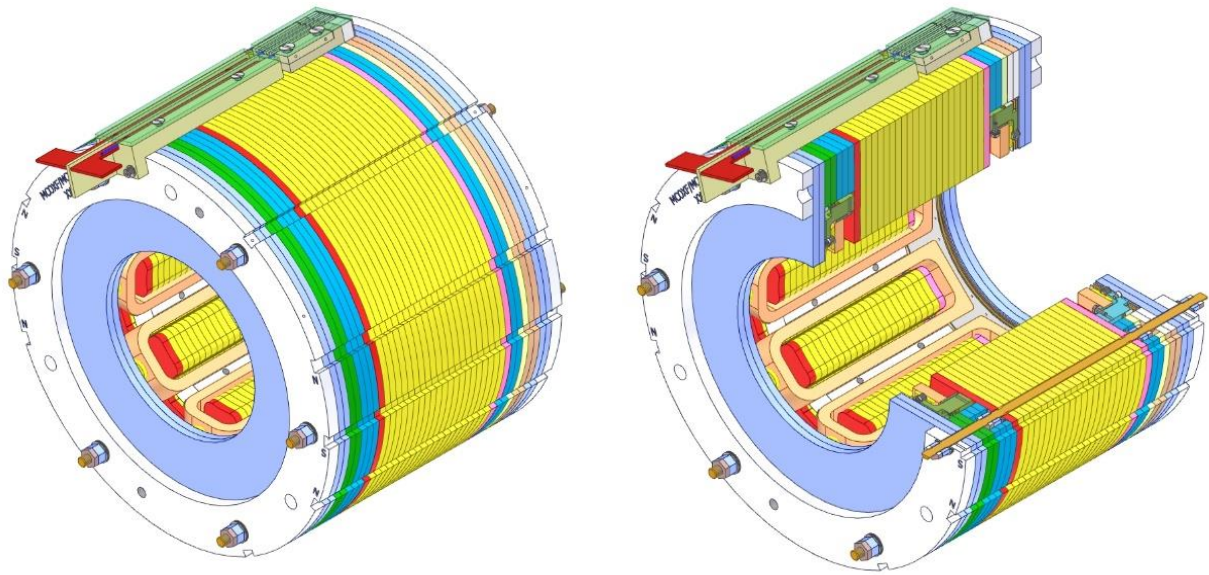


Figura 6. Vista 3D (sinistra) e vista interna (destra) di un ottupolo normale/skew (cortesia di M.Todero INFN Milano).

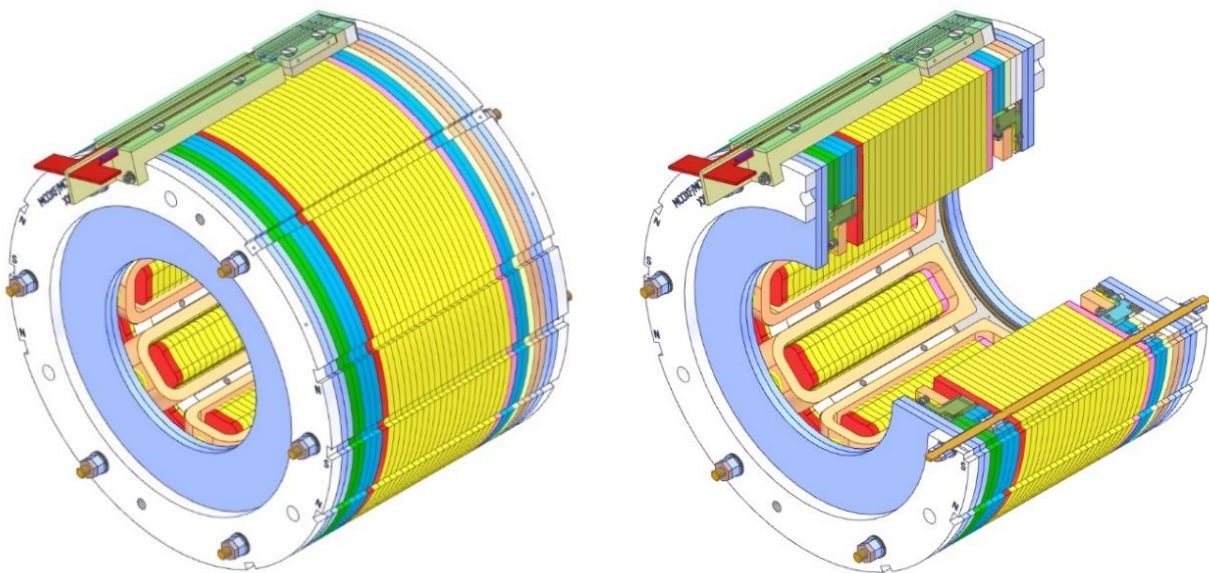


Figura 7. Vista 3D (sinistra) e vista interna (destra) di un decapolo normale/skew (cortesia di M.Todero INFN Milano).

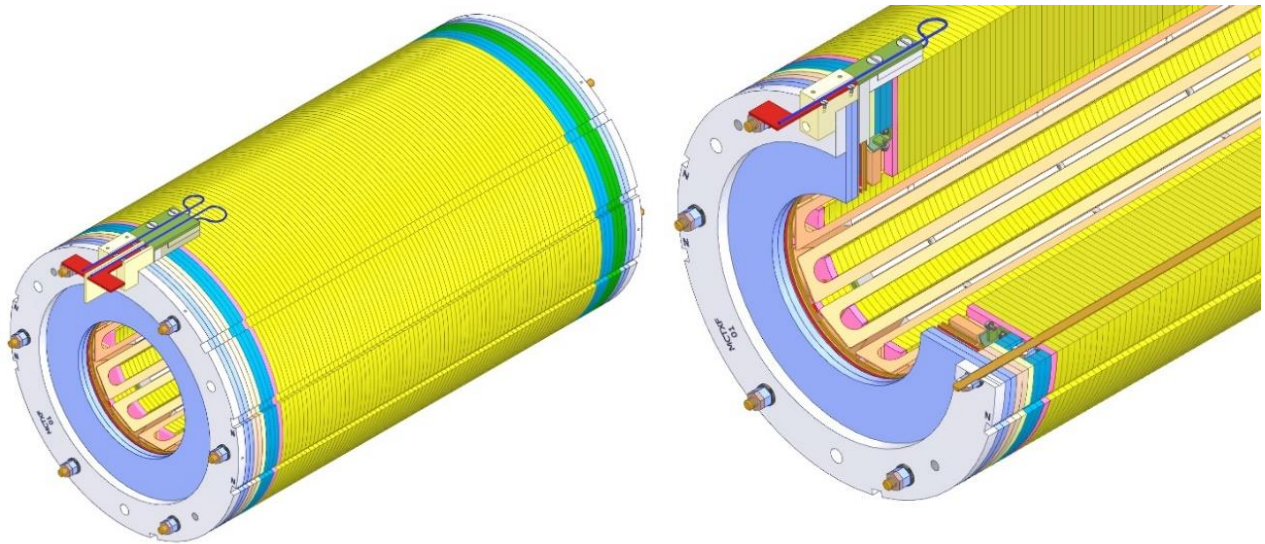


Figura 8. Vista 3D (sinistra) e vista interna (destra) di un dodecapolo normale (cortesia di M.Todero INFN Milano).

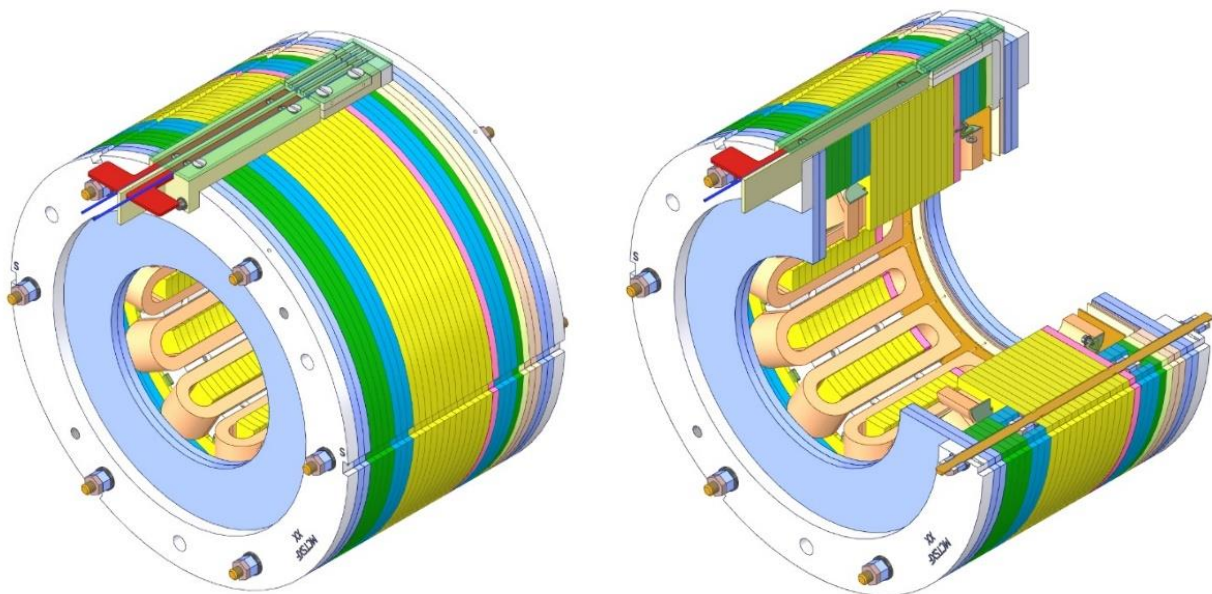


Figura 9. Vista 3D (sinistra) e vista interna (destra) di un dodecapolo skew (cortesia di M.Todero INFN Milano).

4. Introduzione sulle misure magnetiche e sugli strumenti di misura

Le misure di campo magnetico sono spesso la verifica finale della progettazione e del processo di fabbricazione di un apparato magnetico e sono necessarie per verificare il campo prodotto da un magnete e per misurare la sua uniformità. In molti casi la prova deve essere svolta in un bagno di elio liquido, in altri casi invece il criostato può essere progettato in modo tale da misurare elevati campi magnetici a temperatura ambiente. I sistemi magnetici sono progettati attraverso strumenti computazionali molto potenti grazie ai quali si ottengono notevoli precisioni. Tuttavia, a causa delle tolleranze e degli effetti delle grandi forze in gioco, è necessaria una misurazione diretta. Infatti, è l'unica soluzione adottabile per ottenere una misura con un'accuratezza dell'ordine di 100 ppm o migliore e stabilire con certezza se i requisiti progettuali sono stati conseguiti. Questo è particolarmente vero nel caso di magneti superconduttori, nei quali le proprietà dei materiali così come la geometria del campo magnetico prodotto sono incerte a temperatura di lavoro a causa del raffreddamento delle forze che si sviluppano una volta energizzati. Inoltre, il campo magnetico può essere fortemente distorto dal comportamento non lineare di alcuni materiali superconduttori e ferromagnetici. Sono disponibili diversi metodi per la misura del campo magnetico in relazione alle caratteristiche di campo che devono essere rilevate, occorre scegliere quello più adatto. Infine, l'ambiente di misurazione può imporre condizioni stringenti come per esempio vincoli di temperatura e/o geometrici che possono determinare la selezione del metodo di misura [1].

I principali strumenti per effettuare misure magnetiche sono:

1. Sonda di Hall;
2. Bobine induttive;
3. Magneto-resistenze;
4. NMR (Nuclear Magnetic Resonance);
5. SQUID (Superconducting Quantum Interference Devices).

1. Sonda di Hall:

Le sonde di Hall sono strumenti disponibili in commercio e costituiscono l'approccio più diffuso per la misura del campo magnetico. In un sensore di Hall, una corrente elettrica viene fatta scorrere in una piccola lamina in materiale conduttore o semiconduttore posta nella regione di spazio dove il campo magnetico B deve essere rilevato. Assumendo che lo spessore della lamina sia trascurabile rispetto alle altre due dimensioni, consideriamo la componente normale del campo magnetico $B \cos(\theta)$, come rappresentato in *Figura 10*. Gli elettroni di conduzione muovendosi nel materiale sono soggetti ad una forza F normale alla direzione della corrente elettrica, avente un'intensità data dalla relazione:

$$F = qvB\cos(\theta)$$

Equazione 1

dove q è la carica dell'elettrone e v è la velocità di deriva dell'elettrone. Questa forza tende ad incurvare la direzione del flusso di elettroni e causa la polarizzazione dei materiali nella direzione di F . Man mano che gli elettroni si muovono, gli accumuli di carica aumentano fino ad arrivare ad una condizione di equilibrio dinamico delle forze tra il campo elettrico longitudinale risultante e la forza di Lorentz:

$$qE = qvB\cos(\theta)$$

Equazione 2

L'intensità della tensione di Hall V_H è proporzionale alla componente normale del campo magnetico alla superficie della lamina ed alla corrente elettrica I che la eccita:

$$V_H = GR_H IB\cos(\theta)$$

Equazione 3

dove θ è l'angolo tra la direzione del campo magnetico e la direzione perpendicolare alla lamina, R_H è il coefficiente di Hall che caratterizza il materiale della sonda e G è un fattore geometrico che dipende dalla grandezza e dalla forma della sonda stessa [1]. È una caratteristica utile (semplice da utilizzare) la differenza di potenziale in uscita dal sensore di Hall che risulta direttamente proporzionale al flusso magnetico passante attraverso il materiale in direzione perpendicolare al piano della lamina metallica della sonda, dunque è necessario prestare attenzione all'orientamento con cui si posiziona il sensore perché il voltaggio in uscita varia con il coseno dell'angolo tra il campo magnetico e la normale alla lamina di Hall [6].

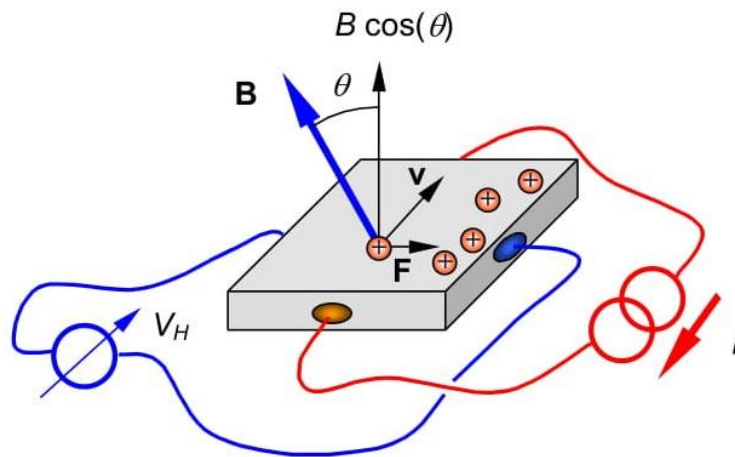


Figura 10. Rappresentazione schematica delle forze agenti sugli elettroni nella sonda di Hall [1].

I sensori di Hall progettati per funzionare a temperature criogeniche hanno una vita utile finita misurata in termini numero di cicli criogenici (di solito 50/100 cicli termici) a causa dei coefficienti di espansione termica dei materiali accoppiati. Questi sensori sono molto delicati e facilmente danneggiabili, per questo motivo durante l'installazione occorre minimizzare gli stress meccanici che verrebbero accentuati in fase di raffreddamento. Le tipiche modalità di rottura sono due:

- rottura del sensore a causa della frattura della lamina dovuta ai primi cicli termici;
- risultato di continue micro fratture durante ciascuno dei cicli termici, questo comporta errori nella misura.

La sensibilità alla temperatura è molto bassa con cambiamenti di pendenza dell'ordine di $\pm 0.5\%$ tra 4.2 e 300 K. Tutte le sonde di Hall sono leggermente non lineari, in particolare in presenza di campi magnetici superiori a 5 T ed a temperature inferiori a 10 K, ma entro un range di $\pm 1\%$. Per avere un'accuratezza superiore della misura è necessaria la calibrazione a temperatura prossima a quella di misurazione [1].

2. Bobine induttive:

Il flussimetro basa il proprio funzionamento sulla legge di induzione magnetica nella sua forma integrata. Se consideriamo una bobina ideale *Figura 11* costituita da filamenti avvolti che presenta un contorno Γ , il flusso magnetico φ associato alla bobina è:

Equazione 4

$$\varphi = \int_S B dS$$

dove B è il campo magnetico, S è un'arbitraria superficie di confine il cui contorno è Γ e dS è la normale alla superficie. Una variazione nel tempo del flusso associato alla bobina, induce una caduta di tensione proporzionale alla variazione stessa:

Equazione 5

$$V = -\frac{d\varphi}{dt}$$

Un flussimetro rileva questo voltaggio e lo usa per misurare la variazione di flusso, quindi il campo magnetico nell'area racchiusa dalla bobina può essere ricavato attraverso la misura del flusso.

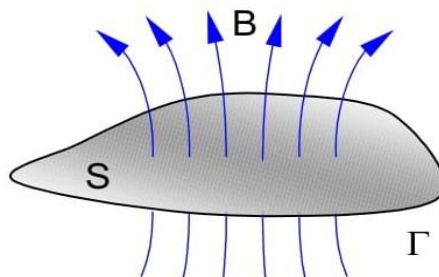


Figura 11. Flusso passante attraverso una bobina induttiva ideale. Il contorno Γ della bobina definisce la superficie S . Il flusso è definito come l'integrale della componente normale del campo magnetico B alla superficie S [1].

Il flussimetro costituisce un metodo relativamente semplice e lineare per la misura del campo magnetico che richiede una bobina induttiva ed una misura della tensione, inoltre fornisce misurazioni molto precise della direzione del campo magnetico che nel caso degli acceleratori è molto importante. Come mostrato nelle due equazioni

precedenti, una tensione può essere indotta nella bobina o attraverso una variazione del campo magnetico dB/dt , o attraverso un cambiamento dell'orientazione della bobina dS/dt .

In caso di variazione nel tempo del campo magnetico, la bobina viene di solito mantenuta statica, ed il flussimetro fornisce una misura della variazione del flusso in due istanti. La seconda metodologia consiste nella movimentazione continua della bobina in un campo magnetico statico. In questo caso la misura del campo dipende anche dalla precisione del movimento, per questa ragione i movimenti più utilizzati sono: la traslazione semplice, una rotazione di 180° oppure una rotazione continua attorno ad un solo asse. Queste metodologie vengono utilizzate anche per misurazioni a temperature criogeniche ma presentano il limite di non rilevare campi statici e segnali piccoli.

Le bobine vengono avvolte utilizzando un conduttore isolato di piccolo diametro su di un supporto diamagnetico e non conduttore. Supporti idonei sono i materiali compositi come la resina epossidica rinforzata con fibra di vetro, o materiali amorfi come il vetro e la ceramica. La rigidità meccanica e la bassa dilatazione termica dei supporti sono requisiti fondamentali per garantire una buona e stabile calibrazione della bobina. Le bobine possono presentare diverse geometrie in relazione alla forma del campo che deve essere misurato. Spesso l'avvolgimento è progettato in modo da compensare il gradiente del campo così da ottenere una buona misurazione dell'intensità media del campo magnetico in un punto o in una sezione. Le bobine possono essere classificate in base alla loro forma e voluminosità come segue:

- bobine puntuali, utilizzate per la misurazione del campo magnetico in un piccolo punto nello spazio, idealmente un punto infinitesimo *Figura 12*;
- bobine lineari o areali, usate per la misurazione del campo integrato lungo una linea o su una regione piana di spazio *Figura 13*;
- bobine armoniche, ottenute in generale come assieme di bobine lineari o areali e progettate per essere sensibili a particolari armoniche del campo [1].

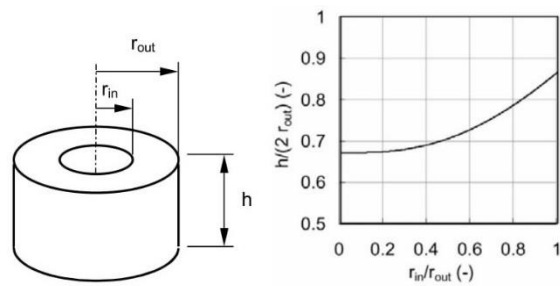


Figura 12. Rappresentazione di una bobina puntuale cilindrica. Il grafico mostra il rapporto tra raggio interno e raggio esterno che cancella la terza armonica spaziale del campo, in funzione del rapporto tra altezza e raggio esterno della bobina [1].



Figura 13. Esempi di tipiche bobine induttive usate per misurazioni negli acceleratori. Le bobine hanno una lunghezza compresa tra 25 cm e 2 m e presentano una larghezza della sezione tra 10 mm e 50 mm [1].

Le bobine rotanti sono una delle metodologie più utilizzate per la misura del campo magnetico e della qualità del campo negli acceleratori, oggi ampiamente utilizzata per magneti aventi apertura cilindrica. La bobina induttiva viene posta su di un supporto circolare e posta in rotazione all'interno del campo da rilevare. La posizione angolare della bobina è misurata attraverso un encoder, rigidamente connesso al supporto rotante. Siccome la bobina ruota in un campo, essa interseca le linee di flusso e questo induce una differenza di potenziale ai suoi terminali. Utilizzando predefinite tecniche è possibile ottenere il cambiamento di flusso in funzione della posizione angolare integrando il voltaggio indotto tra precisi angoli come mostrato in *Figura 14* [1]:

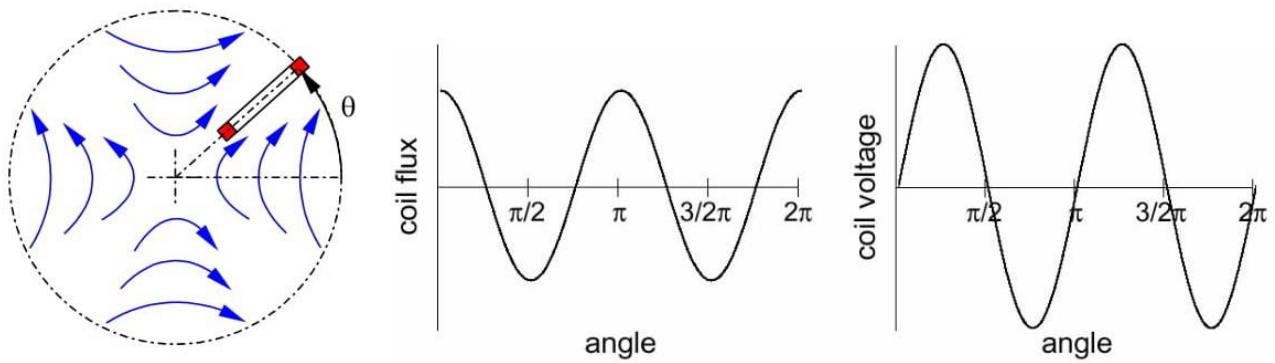


Figura 14. Principio del metodo delle bobine rotanti, viene rappresentata una bobina induttiva che ruota in un campo quadrupolare ed il corrispondente flusso e voltaggio indotto in funzione della posizione angolare θ [1].

3. Magneto-resistenze:

I materiali conduttori presentano un cambio di resistività se esposti ad un campo magnetico e questa proprietà viene sfruttata per la misura dell'intensità del campo magnetico. La variazione di resistenza è dovuta a due contributi, uno fisico legato alle proprietà conduttive intrinseche del materiale ed uno geometrico dovuto alla deflessione del percorso degli elettroni causato dalle forze magnetiche. Le magneto-resistenze, realizzate con un cavo in rame puro, sono progettate e costruite facendo attenzione a minimizzare le sue dimensioni, la sensibilità alla temperatura e gli stress meccanici. Le grandi dimensioni di questi sensori ne limitano il loro utilizzo. La dipendenza dalla temperatura della resistività pone dei problemi a meno che la magneto-resistenza non venga calibrata alla stessa temperatura di utilizzo. Presentano un'accuratezza superiore a 0.1% nel caso di campi magnetici maggiori di 3 T, inoltre non riescono a rilevare la direzione del campo [7].

4. NMR (Nuclear Magnetic Resonance):

L'utilizzo di questo fenomeno (risonanza magnetica nucleare) consente di ottenere le più affidabili misure di omogeneità del campo magnetico con una precisione pari o superiore a 0.1 ppm in condizioni controllate, per questo motivo NMR viene utilizzato come strumento primario da utilizzare per la calibrazione [1].

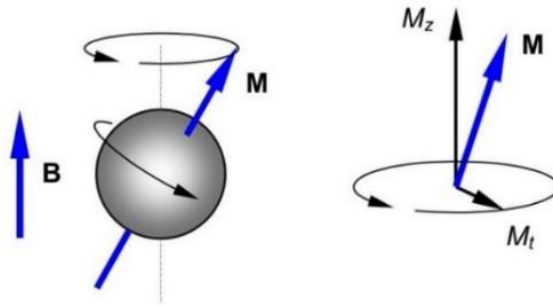


Figura 15. Rappresentazione di una particella con momento magnetico posta in un campo magnetico. La particella possiede un moto di precessione di frequenza f . Il momento magnetico ha una componente M_z in direzione parallela al campo esterno B ed una componente rotazionale M_t nel piano perpendicolare al campo magnetico [1].

Il principio di funzionamento della misura di un campo magnetico può essere spiegato osservando che quando una particella, avente momento magnetico e momento angolare, viene posta in campo magnetico di intensità B , essa precessa attorno alla direzione del campo *Figura 15*. La frequenza f del moto di precessione, chiamata frequenza di Larmor, è proporzionale al campo magnetico:

Equazione 6

$$f = \gamma B$$

dove la costante di proporzionalità γ è il rapporto giromagnetico. La risonanza magnetica è molto sensibile ai valori locali del campo magnetico e quindi al gradiente del campo del campione. Una variazione del campo locale nel campione causa un cambiamento della frequenza di risonanza (vedi equazione precedente). Questa proprietà viene utilizzata per ottenere la codifica della posizione spaziale sapendo il gradiente del campo nella risonanza magnetica [1].

5. SQUID (*Superconducting Quantum Interference Device*):

Questo dispositivo presenta la più alta sensibilità al campo magnetico ed il massimo campo misurabile è solo $1 \mu\text{T}$. La parte attiva è costituita da un piccolo anello superconduttore interrotto da uno o due collegamenti isolanti (giunzioni Josephson) *Figura 16*. La presenza di un materiale superconduttore ne limita la temperatura massima di utilizzo a 100 K . Inoltre, questi sensori sono molto sensibili al rumore e richiedono sofisticati sistemi elettronici per poter funzionare correttamente [1].

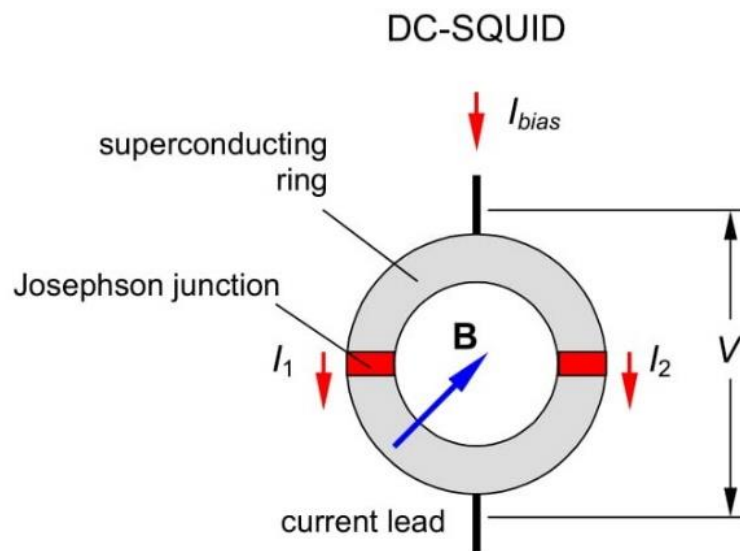


Figura 16. Schematizzazione della geometria di un dispositivo SQUID in corrente continua costituito da un anello superconduttore con due giunzioni Josephson [1].

5. Stazione di misura esistente

5.1 Descrizione generale dell'impianto criogenico

La stazione di misura presente presso i laboratori del LASA, facente parte del progetto Magix, è composta da un criostato, collegato ad una linea per l'immissione e l'evacuazione di elio liquido e gassoso e da una postazione computerizzata per l'acquisizione ed il monitoraggio dei dati (forniti dalle varie sonde) durante il test dei magneti.

Il criostato è collocato all'interno di un recipiente aperto, che funge da supporto, entro una buca di dimensioni 7.00 m x 10.50 m e profonda 6.42 m [13].

Tabella 2. Dati tecnici del criostato.

Pressione max ammissibile [bar]	8
Pressione camicia a vuoto	Full vacuum
Temperatura [K]	3 / 313
Volume [l]	650
Fluido	Elio liquido / gassoso
Peso a vuoto [Kg]	680

All'interno del criostato sono installati i magneti correttori superconduttori, in diverse configurazioni e sino ad un massimo di 4, immersi nel bagno di elio liquido per l'esecuzione delle prove. Sono collegati in parallelo ed alimentati elettricamente ma testati singolarmente. Il contenitore interno del criostato è isolato termicamente da uno schermo in rame, raffreddato per conduzione ed inserito all'interno di una camera a vuoto che isola il criostato rispetto all'ambiente esterno. Lo schermo è dotato di un rivestimento di 24 strati di superisolamento in Mylar alluminato di spessore totale pari a 16 mm, mentre il recipiente interno è dotato di un rivestimento di 15 strati, di spessore totale pari a 10 mm. Il criostato, costruito in acciaio inox di tipo austenitico (AISI 304L) adatto alle basse temperature di lavoro, è composto da due virole a sezione circolare su cui sono saldati un fondo ellittico ed una flangia dotata di coperchio piano bullonato sulla quale viene realizzata tenuta attraverso O-Ring in silicone. Sul fondo inferiore della camera esterna è saldata una gonna di sostentamento atta anche al fissaggio a

terra del criostato. Il fondo piano bullonato presenta alcune uscite di servizio per il fluido di lavoro. Il criostato è stato progettato per contenere la pressione interna di targa ed il vuoto nell'intercapedine esterna [13].

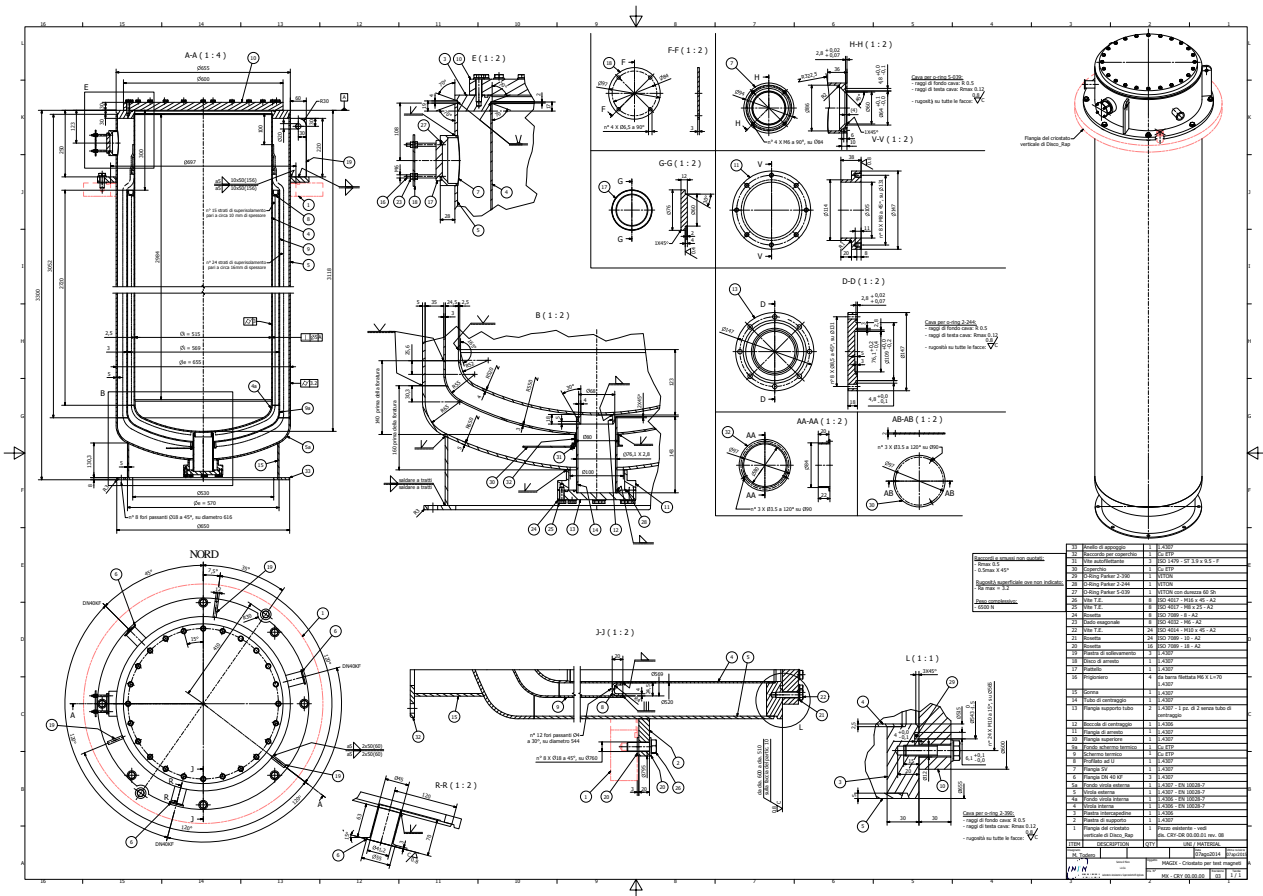
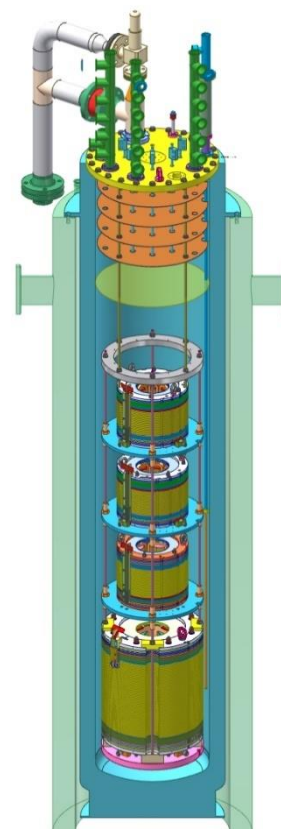
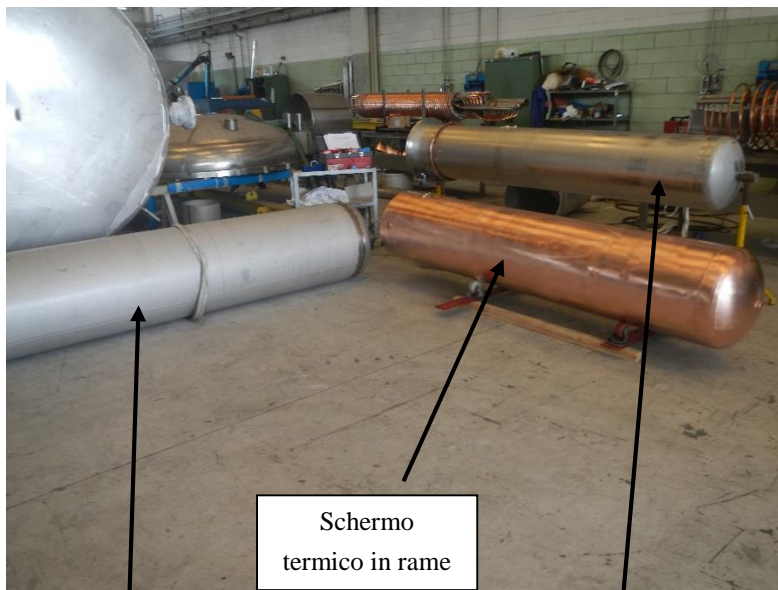


Figura 17. Disegno costruttivo del criostato in uso nella test station per i magneti correttori [13] e vista in sezione del criostato nella configurazione di test (cortesia di M. Todero INFN Milano).





Virola esterna

Schermo termico in rame

Virola interna



Saldatura dello schermo termico alla virola interna



Figura 18. Vista delle virole costituenti il criostato e dello schermo di rame (cortesia di D.Pedrini INFN Milano).

Nella prima fase del cool-down, da T_{amb} sino a 77 K, i magneti vengono raffreddati con azoto liquido o gassoso, evacuato prima di introdurre l'elio liquido attraverso apposite tubazioni direttamente all'esterno. Quest'ultimo andrà a completare il cool-down sino a 4.2 K e successivamente si raggiungerà il livello massimo di riempimento per poter eseguire i test.

Il criostato riceve l'elio liquido da Dewar di servizio, alcuni mobili (vedi *Figura 20.*) ed uno fisso, ubicati all'interno del capannone, mentre l'azoto liquido è fornito da un serbatoio criogenico posizionato all'esterno del capannone, dotato di due valvole di sicurezza e di un disco di rottura.

L'impianto criogenico del laboratorio LASA è composto da un sistema di produzione di elio liquido, in grado di produrne circa 40 litri/ora a 4.5 K. Il sistema funziona grazie ad una macchina frigorigena che, sfruttando la successiva compressione ed espansione di gas elio e la riduzione dell'energia interna del gas stesso, tramite turbine ad altissima velocità, permette di raffreddare il gas fino ad una temperatura sufficientemente bassa (inferiore al punto d'inversione) per ché una successiva espansione adiabatica (Joule-Thompson) ne permetta la liquefazione. Tutto l'apparato (turbine, scambiatori di calore, filtri, sistema di espansione adiabatica, ecc...) è contenuto in un'unica unità chiamata "cold box".

Il gas necessario al processo proviene dal sistema di stoccaggio di gas ad alta pressione: dai bomboloni di elio, attraverso un opportuno sistema di riduzione della pressione, esso viene inviato al liquefattore con una pressione di circa 16 bar, pressione di operazione della macchina frigorigena. Un serbatoio detto "Buffer", che opera alla stessa pressione di 16 bar, viene impiegato come polmone e scorta del gas necessario per la macchina frigorigena.

Il gas liquefatto all'interno della "cold box" viene poi trasferito, tramite speciali tubazioni ad altissimo isolamento termico (isolamento multistrato e condizioni di alto vuoto), in diversi (contenitori) Dewar. L'elio liquido è, infatti, caratterizzato da un bassissimo calore di evaporazione (0.0845 KJ/mol contro 2.7928 KJ/mol dell'azoto liquido) che impone che tutte le operazioni di travaso e tutti i sistemi di conservazione del liquido stesso debbano essere caratterizzati da un bassissimo carico termico per evitare la rapida evaporazione del liquido stesso.

Il gas che evapora dagli apparati sperimentali, ormai a temperatura vicina a quella ambiente ed a pressione atmosferica, viene convogliato da tubazione verso un pallone di tela gommata che funge da volume di recupero (100 m^3). Una volta raggiunta una quantità stabilita di elio gassoso nel pallone, uno o più compressor di recupero si attivano trasferendo il gas verso i serbatoi ad alta pressione ($P = 220 \text{ bar}$), localizzati all'esterno dell'edificio.

Il ciclo, dopo l'operazione di pulizia e di purificazione del gas elio per ridurre le

impurità ed i contaminanti, continua con il trasferimento di elio puro negli appositi bomboloni. Il ciclo si chiude con il trasferimento di elio “pulito” dai serbatoi ad alta pressione verso il circuito della macchina frigorigena, attraverso un opportuno riduttore di pressione [13].

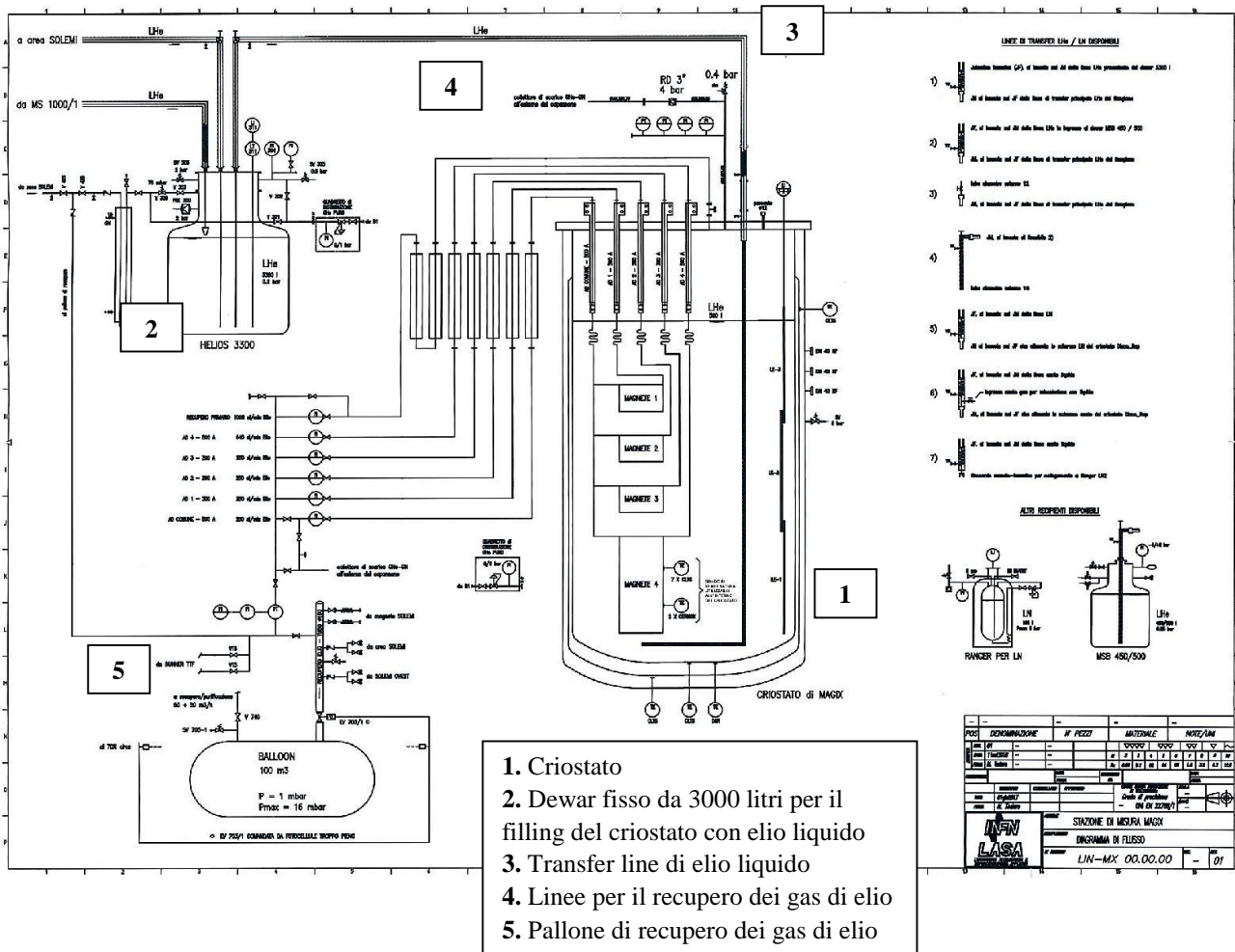


Figura 19. Diagramma di flusso riguardante il criostato in uso nella test station per i magneti correttori [13].

Figura 20. Dewar mobile da 500 litri per il trasporto dell'elio liquido nel laboratorio.



5.II Installazione dei magneti nel discendente

I magneti correttori superconduttori vengono posizionati in una struttura chiamata “discendente” in grado di poter ospitarne fino ad un massimo di 4 secondo delle predefinite configurazioni *Figura 21*. Attraverso questa struttura è possibile introdurre i magneti all’interno del criostato e testarli singolarmente.

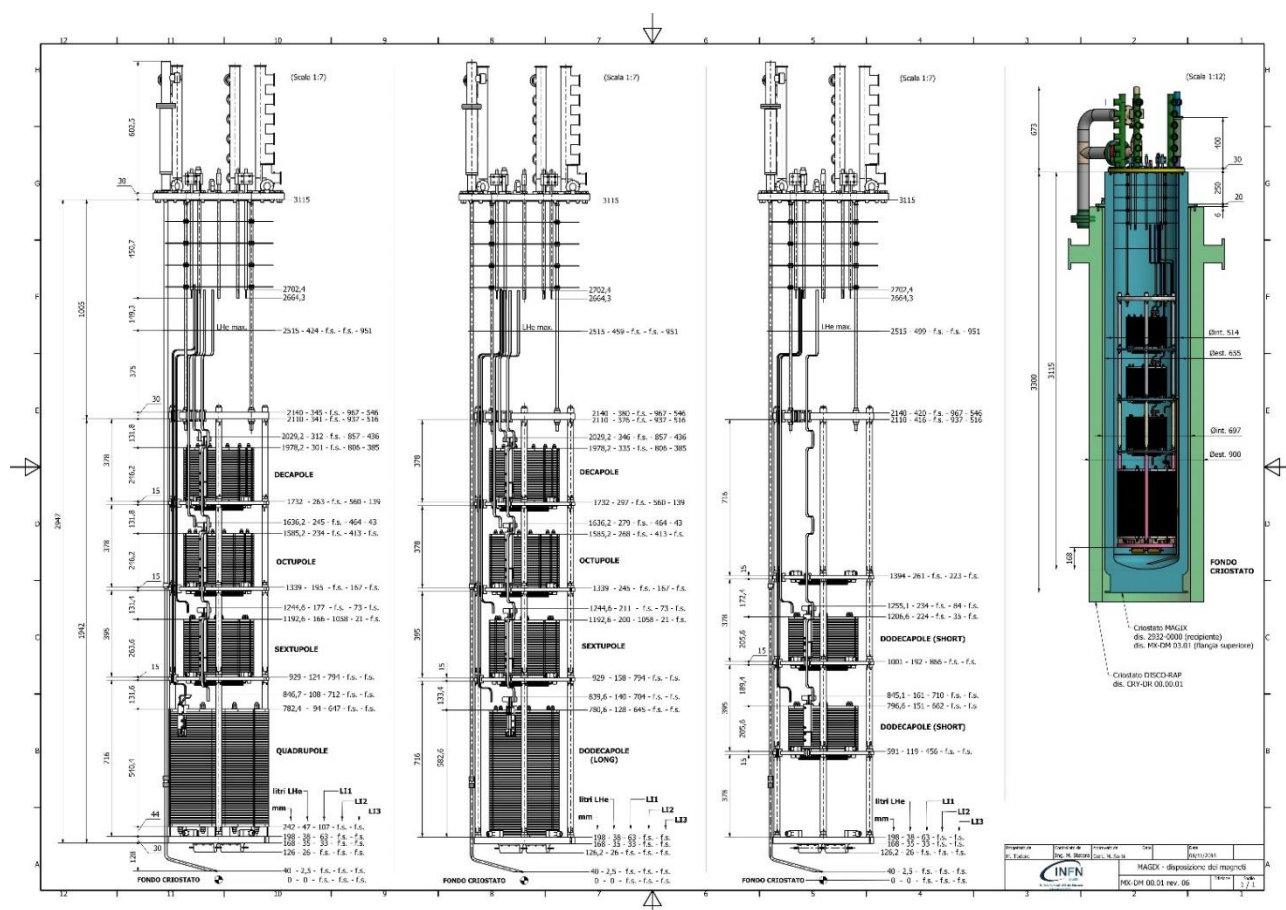


Figura 21. Schema rappresentante le diverse configurazioni possibili per il test dei magneti correttori superconduttori all’interno del criostato.

Il discendente (*Figura 22*) è costituito da una serie di piastre circolari: quattro in rame per aumentare l’isolamento termico con l’esterno in quanto riducono la potenza termica sul bagno di elio liquido e costituiscono dei punti a temperatura intermedia (pozzi termici) ed altre in alluminio 6082-T6 per il posizionamento e l’allineamento dei vari magneti rispetto all’asse della struttura. Tutte le piastre sono collegate tra di loro mediante 4 barre filettate. Alla piastra superiore, a sua volta, sono fissate altre 4 barre filettate per collegare la struttura alla flangia bullonata d’estremità. Questa flangia, detta “top plate” (*Figura 22* e *Figura 23.*), è realizzata in acciaio inossidabile di tipo austenitico (AISI 304L) e presenta 45 fori, utilizzati per l’introduzione e l’evacuazione

di azoto liquido, per l'introduzione di elio liquido, per l'evacuazione dei vapori di elio che si formano a causa del non perfetto isolamento e per dissipazione di potenza durante i test (per evitare sovrappressioni), per il passaggio dei cavi di strumentazione collegati alle varie sonde applicate ai magneti e per gli adduttori di potenza. Tale flangia presenta, inoltre, una valvola di sicurezza ed un disco di rottura che intervengono in caso di anomalia di funzionamento, prima delle condizioni di pericolo.

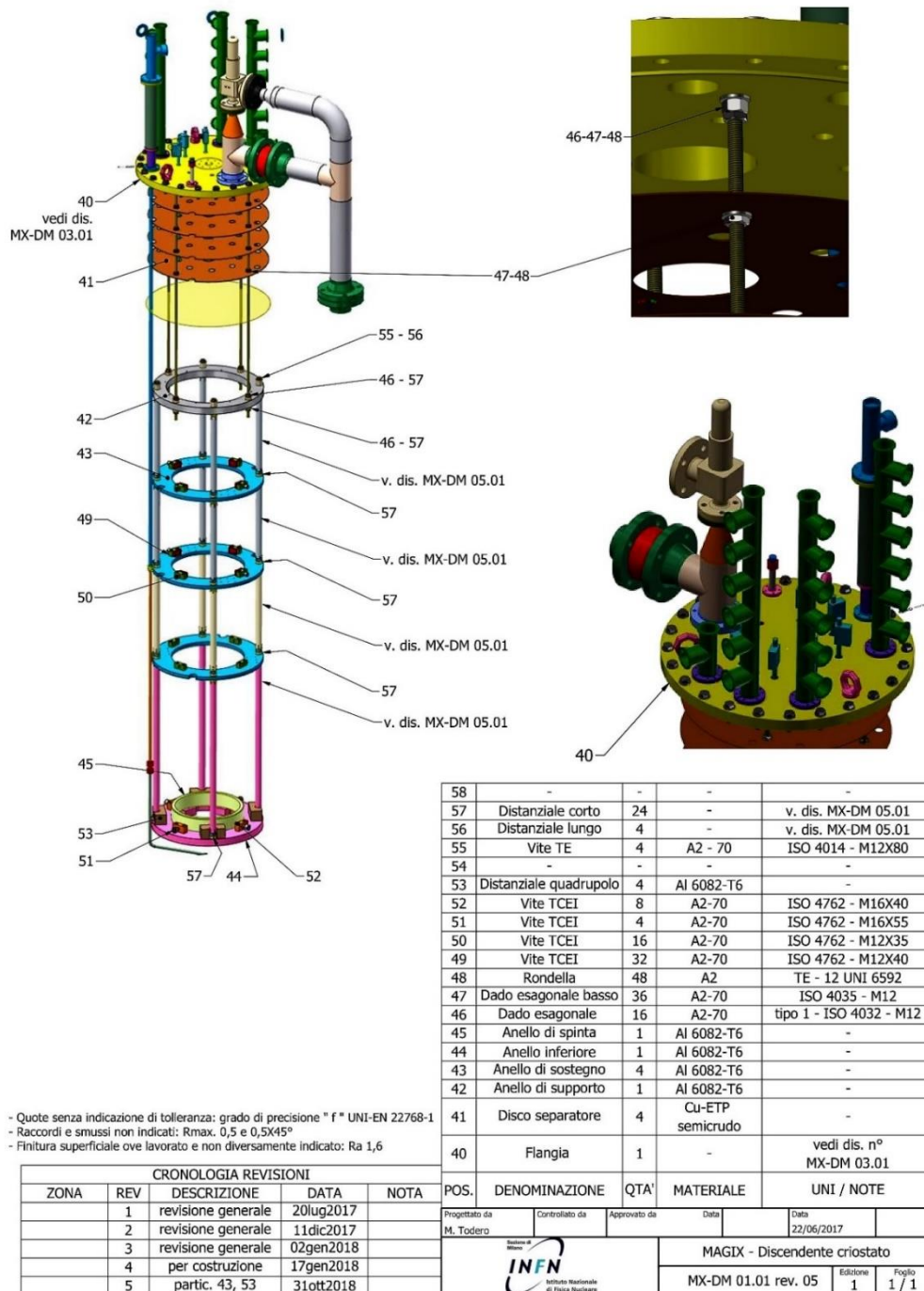


Figura 22. Disegno 3D del discendente e del top plate (cortesia di M.Todero INFN Milano).

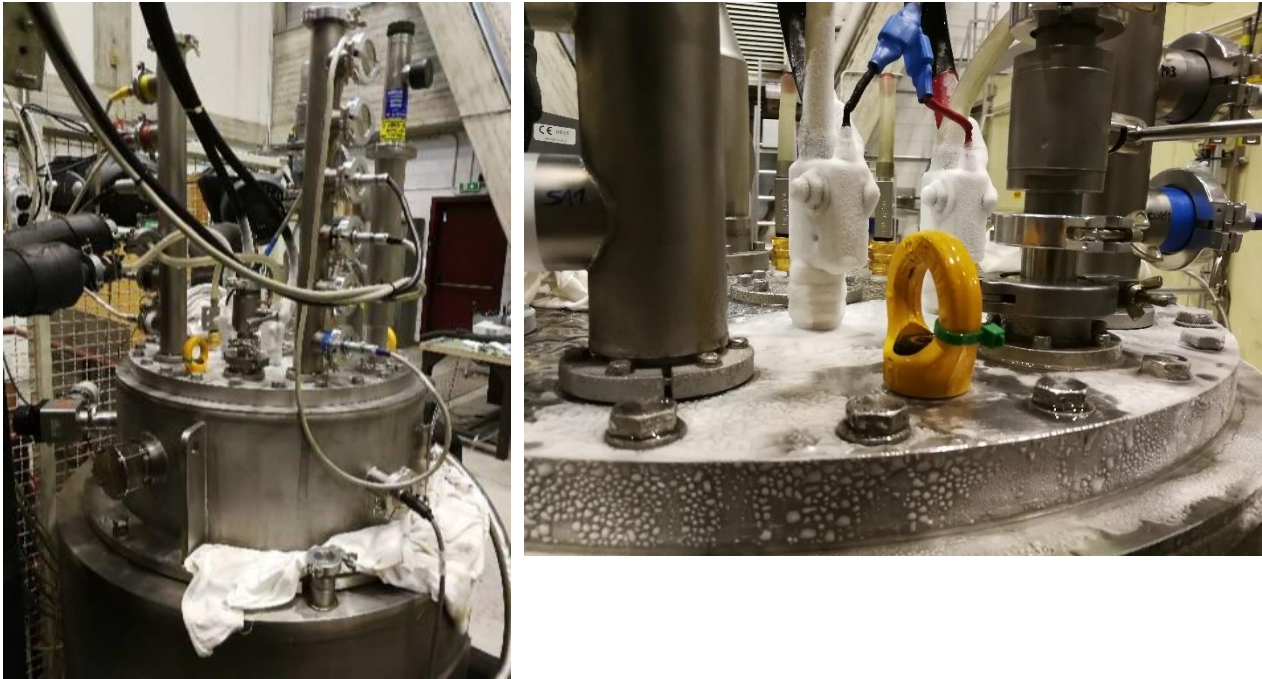


Figura 23. Elementi installati sul top plate del criostato (a sinistra) e dettaglio della suddetta flangia durante il test dei magneti in elio liquido (a destra).

5.III Connessioni elettriche e monitoraggio parametri

Come già anticipato, il discendente, oltre a fornire un supporto meccanico per il posizionamento dei magneti all'interno del criostato, presenta una serie di componenti elettronici atti a garantire che durante il test non si danneggi il magnete stesso. Infatti, sia durante la fase di raffreddamento sia durante la fase di riscaldamento occorre monitorare che il gradiente di temperatura in diversi punti del magnete non superi determinati valori ovvero 100 K/m (H. Prin) altrimenti si incorrerebbe in tensioni indotte che potrebbero causare il danneggiamento delle bobine superconduttive. Questo è dovuto al fatto che i magneti sono costituiti da una serie di materiali diversi, ognuno dei quali ha un differente coefficiente di dilatazione termica:

- Rame + Resina + Lega Nb-Ti;
- Ferro ARMCO;
- Acciaio inox austenitico 304L;
- Lega Cu-Be.

Una volta posizionati i magneti nel discendente, si passa quindi all'installazione dei sensori in prestabilite posizioni ed alla loro connessione a determinate schede di controllo.

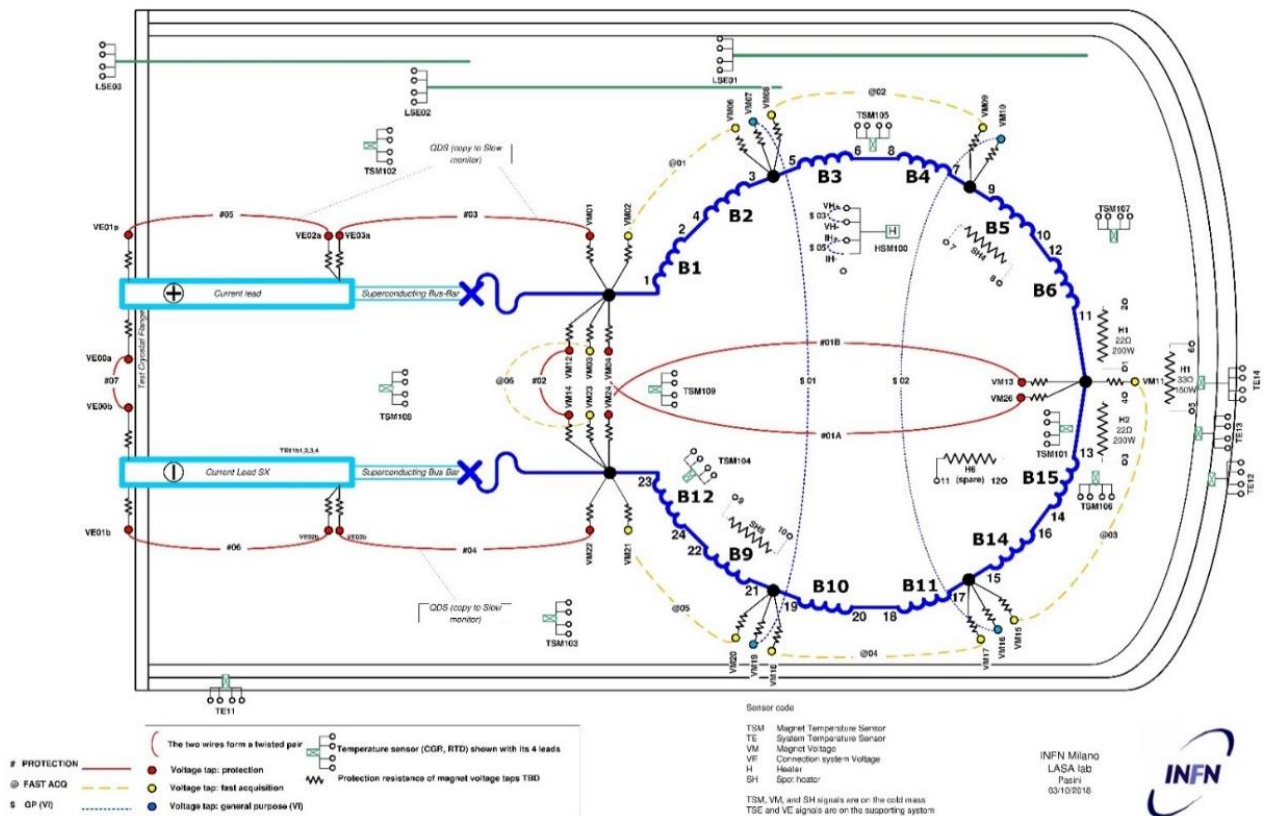


Figura 24. Schema che riporta la mappa dei prelievi per un magnete correttore dodecapolo (cortesia di M. Quadrio INFN Milano).

Il controllo del magnete viene realizzato attraverso tre sistemi ed un'interfaccia grafica apposita realizzata:

- slow control: permette di verificare il funzionamento di tutta la test station attraverso il controllo di parametri preimpostati con una frequenza di campionamento pari a circa 1 Hz;
- fast DAQ: è un sistema interamente progettato e realizzato al LASA che permette di campionare alcuni segnali (tipicamente I e V di quench) con una frequenza di molto alta (KHz) per vedere nel dettaglio il comportamento del magnete;
- quench protection: è un sistema autonomo, costituito da un insieme di componenti elettronici che serve per evitare che si danneggi il magnete in caso di quench.

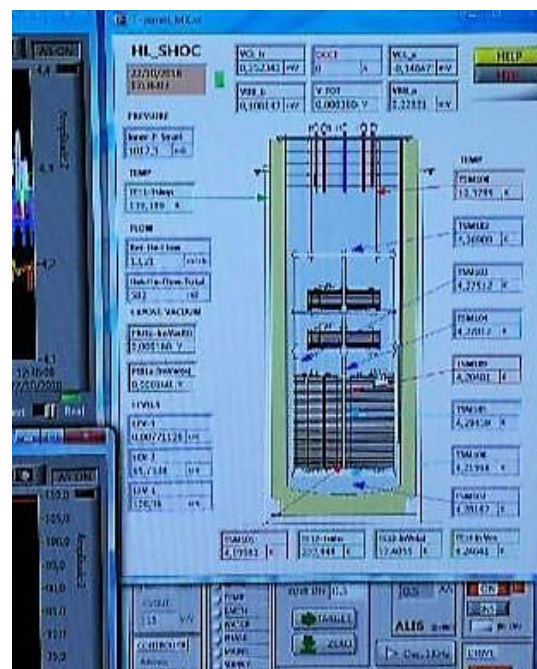
Il test prevede che si eseguano diverse prove:

- test di stabilità, che prevede l'alimentazione del magnete fino a portarlo alla corrente ultimate per un prestabilito intervallo di tempo al fine di verificare la stabilità di funzionamento del magnete;
- condizionamento (training), per verificare il comportamento del magnete durante la rampa di salita della corrente fino alla ultimate;
- test al 108% della corrente nominale per un determinato intervallo di tempo (circa 1 ora);
- test al 150% della corrente nominale, per valutare il comportamento del magnete in condizioni di sovraccarico (circa 30 minuti).



Figura 25. Stazione di controllo computerizzata e strumenti elettronici di misurazione e protezione del sistema.

Figura 26. Interfaccia grafica che mostra lo stato generale del sistema (le temperature rilevate dai sensori installati sul magnete, sul discendente e sulle parti del criostato precedentemente citate ed il livello di elio liquido all'interno del criostato).



Durante queste prove è possibile variare alcuni parametri (come l'intensità di corrente, la velocità di salita in corrente, il valore di potenza delle resistenze utilizzate per il riscaldamento) attraverso programmi appositamente sviluppati presso il LASA, ed ottenere e registrare i dati per poterli confrontare i risultati delle simulazioni.

Infine, per meglio monitorare le condizioni di temperatura all'interno del criostato sono stati installati 4 sensori di temperatura in particolari zone: 2 all'esterno della virola interna in corrispondenza del fondo ellittico e 2 all'esterno dello schermo termico in rame locati rispettivamente sul fondo ed in prossimità della saldatura che collega lo schermo con il contenitore interno (*Figura 27*).

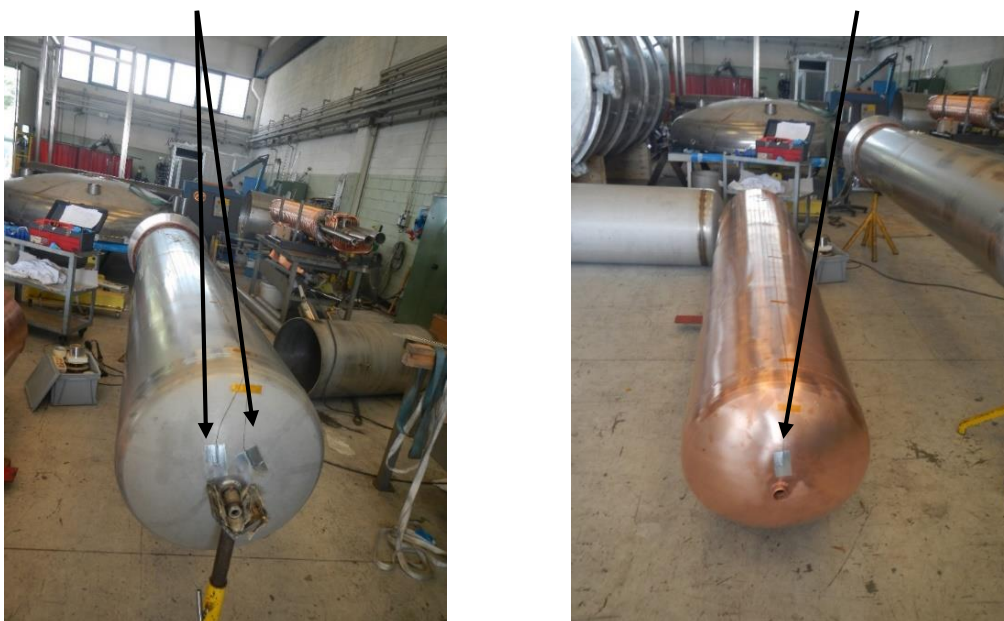
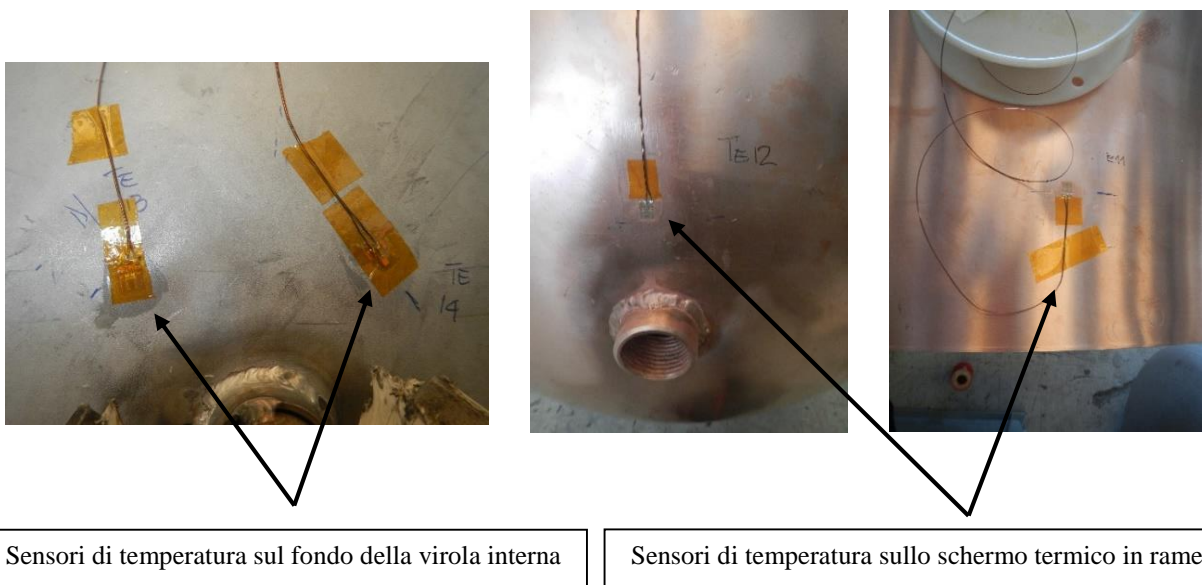


Figura 27. Posizione delle sonde di temperatura installate all'esterno del contenitore interno e nello schermo di rame.

6. Progetto

L'oggetto di questo elaborato è la presentazione del lavoro svolto presso il LASA riguardante l'upgrade della test station per i 54 magneti correttori di HO (alto ordine) di HiLumi-LHC, in particolare la predisposizione del sistema per le misure magnetiche. Ciò consiste nell'inserimento/integrazione di una sonda per le misure magnetiche e della relativa interfaccia di controllo (DAQ) nello schema di un generico apparato di misura.

6.1 Requisiti funzionali e vincoli progettuali

I vincoli che hanno guidato la progettazione del sistema di fissaggio dell'apparato di misure magnetiche da installare al discendente sono elencati di seguito:

- i materiali utilizzabili per la realizzazione delle flange e piastre di supporto non devono essere magnetici per evitare di introdurre distorsioni nel campo generato e nelle forze e devono possedere buone caratteristiche a temperature criogeniche (cioè non infragilire), dunque la scelta è circoscritta a: acciaio inox austenitico (304L, 316L), leghe di alluminio (in particolare 6082 T6), leghe di rame (in particolare rame-berillio), ottone, resina epossidica rinforzata con fibra di vetro (G10, G11) e titanio (TiAl6V4);
- i materiali utilizzati per realizzare i vari componenti sono caratterizzati da uno specifico coefficiente di contrazione termica per tanto occorre verificare gli accoppiamenti in modo tale che non si formino deformazioni plastiche alla temperatura di test (vedi paragrafo successivo);
- il sistema di fissaggio dell'apparato di misure magnetiche deve essere compatibile con l'utilizzo di sonde di misura aventi diverse dimensioni ed ingombri;
- allineamento sonda-magnete: per ottenere delle misure precise, occorre che la sonda per le misure magnetiche sia allineata rispetto all'asse dei vari magneti con una tolleranza di ± 1 mm, pertanto bisogna prevedere un sistema di regolazione della posizione radiale della sonda e di bloccaggio della stessa;

6.II Sonda per le misure magnetiche

La sonda per le misure magnetiche, in seguito chiamata anche “shaft di misura”, che verrà utilizzata per mettere a punto il sistema ed eseguire le prime misure magnetiche, sarà fornita dal CERN e non coinciderà con la sonda in fase di sviluppo prevista per i magneti della serie.

Tale shaft di misura riportata in *Figura 28* è composta da diversi circuiti stampati su di una lamina piana, collegati in serie in modo da formare un avvolgimento che presenta un determinato numero di spire, le quali vanno a campionare il campo magnetico prodotto dal magnete. Durante il test, i vari circuiti stampati sono sensibili alle variazioni di flusso del campo magnetico prodotto dal magnete e forniscono in uscita un segnale di tensione ai capi della bobina che varia in maniera sinusoidale al variare dell'angolo. La sinusoide rilevata sarà di ordine pari all'ordine del campo magnetico prodotto e dall'analisi di questo segnale, tramite armoniche, si può verificare la presenza di imperfezioni che si manifestano come ordini di armoniche diverse da quelle in esame. Il campo magnetico viene, quindi, analizzato attraverso espansioni in serie di Fourier (*Equazione 7*):

Equazione 7

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{+\infty} \left[a_n \cos\left(\frac{2\pi}{T} nT\right) + b_n \sin\left(\frac{2\pi}{T} nT\right) \right]$$

grazie all'utilizzo di questo strumento matematico una qualsiasi funzione periodica continua si può scomporre nella somma di un termine costante a_0 , che rappresenta il valore medio dell'ampiezza della funzione in un periodo e di infinite sinusoidi di frequenza multipla della frequenza della funzione [15].

Queste ultime sono conseguenza di imperfezioni che possono essere dovute ad errori di lavorazione dei pezzi che compongono il magnete, ad errori di assemblaggio dei vari componenti e ad errori nel posizionamento non perfettamente allineato della shaft. La sonda viene incapsulata all'interno di un tubo in vetronite (G10) per preservarne l'integrità strutturale durante la movimentazione e per consentirne il fissaggio.

Il moto rotatorio viene fornito da un motore/encoder elettrico, posizionato sul top plate del criostato, e trasmesso alla shaft di misura grazie ad un albero di connessione attraverso cui passano i cavi elettrici da connettere alla sonda stessa. Inoltre, tra il motore elettrico e l'albero di connessione è presente un ulteriore connettore.

Dal disegno di *Figura 28* si evince il diametro esterno della capsula in vetronite pari a 103 mm, lo spessore della capsula di 2.5 mm e la lunghezza totale di 1528 mm. Per quanto riguarda, invece, l'albero di connessione che presenta i soffietti compensatori, in questo caso è necessario realizzarne uno nuovo a causa dei diversi ingombri e vincoli che presenta la stazione di misura presente presso il LASA rispetto quella presente al CERN.

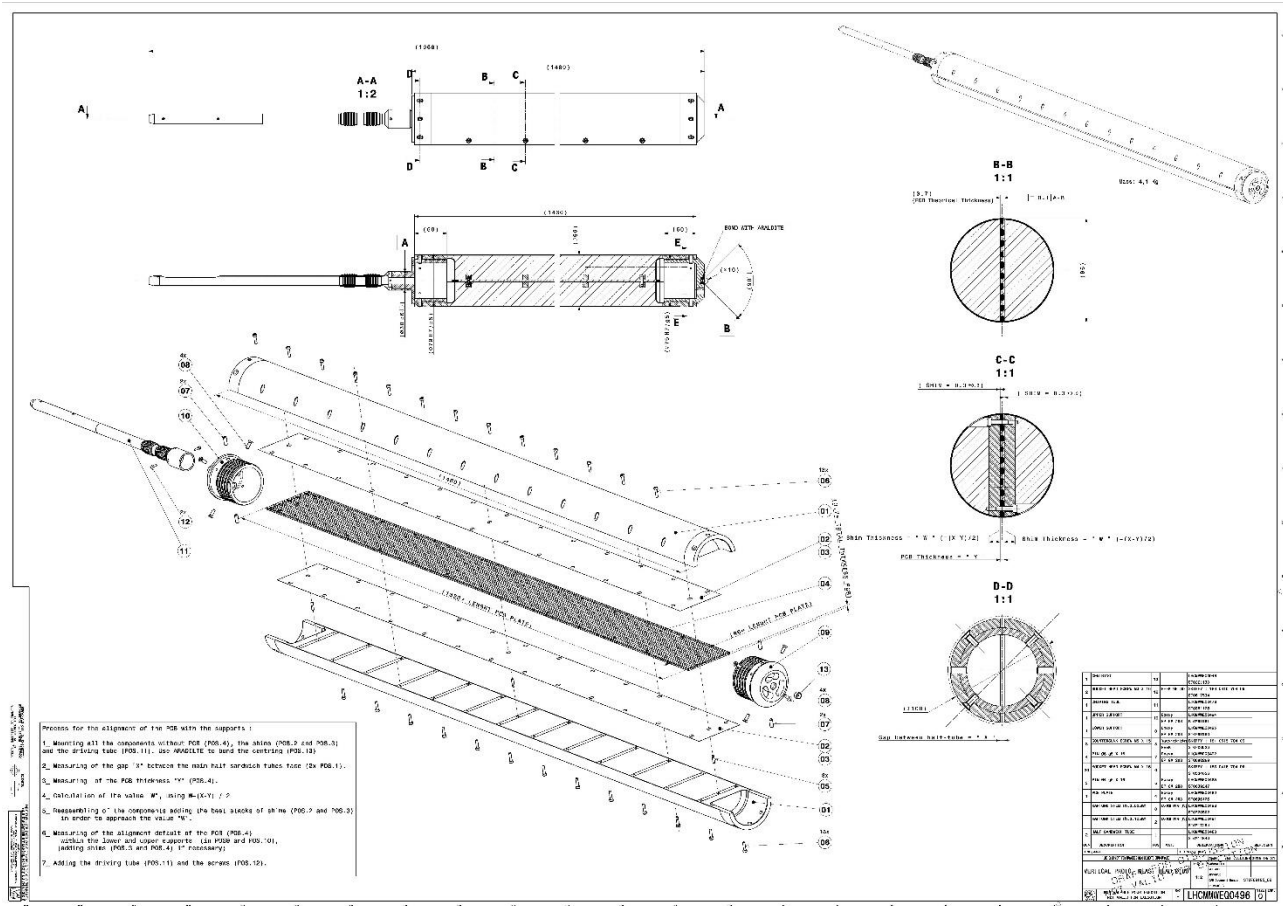


Figura 28. Disegno della shaft di misura fornita dal CERN per eseguire le prime misure magnetiche (cortesia di L. Fiscarelli CERN).

6.III Progettazione

Le informazioni e le specifiche riguardanti il suddetto strumento di misura e gli elementi complementari atti a garantirne un buon funzionamento sono elencati di seguito:

- l'albero che collega il motore/encoder elettrico alla sonda di misura rotante presenta diversi soffietti compensatori per poter assorbire le contrazioni

termiche e permettere un leggero disassamento tra l'asse della sonda e l'elemento di tenuta esterno;

- vi è un elemento esterno, fissato sul “top plate”, che soddisfa due funzioni: la prima è quella di supporto alla rotazione in quanto presenta dei cuscinetti per la rotazione dell'albero di connessione alla sonda, la seconda è quella di realizzare la tenuta sia con l'albero rotante sia con l'ambiente esterno attraverso delle apposite guarnizioni;
- la sonda di misura impiegata per i test preliminari di validazione di questo sistema, fornita dal CERN, non coincidente con quella che verrà utilizzata per la serie, è quella rappresentata in *Figura 28*.

Come primo passo, per meglio capire la procedura d'installazione e di test dei magneti svolte nel laboratorio e come integrarle con il sistema da progettare, mi sono dedicato a:

- consultazione dei disegni costruttivi degli elementi già installati sul discendente per capire come interfacciare i nuovi componenti a quelli presenti, per verificare il bisogno di realizzare delle lavorazioni nelle piastre di alluminio;
- consultazione dei disegni forniti dal CERN riguardante la strumentazione che ci invieranno per testare il sistema;
- attività di brain-storming con i tecnici di laboratorio per capire se, in fase di assemblaggio dei magneti sul discendente, vi siano delle esigenze particolari da soddisfare che potrebbero influire sul design dei componenti (per esempio l'esecuzione di fresature per il passaggio dei cavi elettrici o la predisposizione di fori filettati per il fissaggio di sonde).

Finita questa fase di studio preliminare, mi sono dedicato alla realizzazione dei disegni 3D dei componenti costituenti il sistema in oggetto, attraverso l'utilizzo del software Inventor. L'idea principale che ha guidato la progettazione è stata quella di realizzare un sistema compatibile con altre shaft di misura.

Nella *Figura 29* seguente è riportato uno schema di massima rappresentante l'apparato di misure magnetiche comprensivo di tutti i suoi componenti:

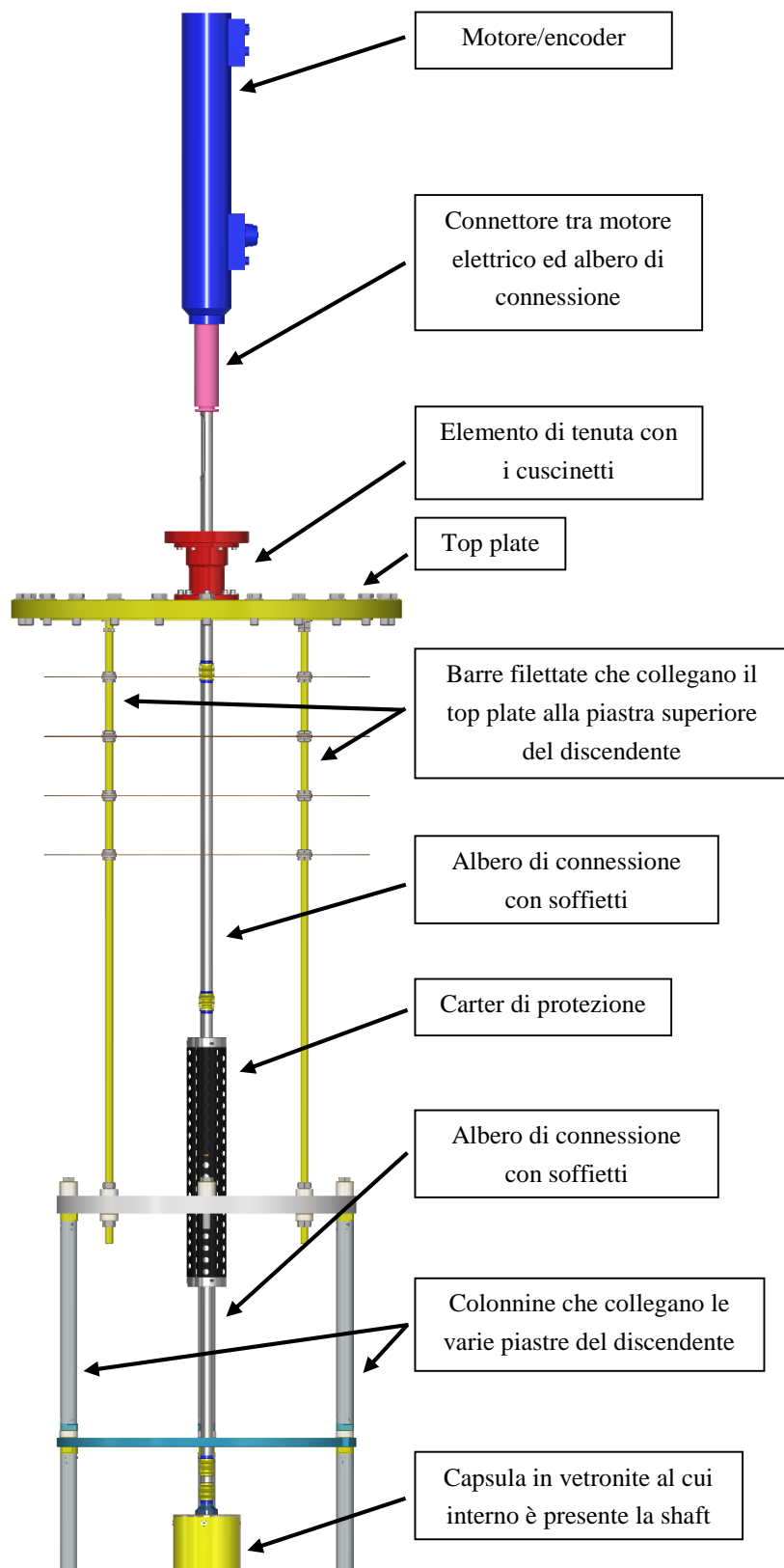


Figura 29. Schema del sistema per le misure magnetiche comprensivo di capsula in vetronite (al cui interno è presente la shaft di misura), due alberi di connessione con soffietti compensatori, carter di protezione per la connessione elettrica, elemento di tenuta sul top plate, connettore tra motore elettrico ed albero ed infine motore/encoder elettrico.

Dopo aver preso visione dei modelli, in fase di progettazione al CERN, della sonda di misura che verrà fornita al LASA per i test dei 54 magneti correttori prodotti per HiLumi-LHC, ho ottenuto diverse informazioni tra cui quella riguardante il massimo diametro esterno pari a 136 mm (*Figura 30*).

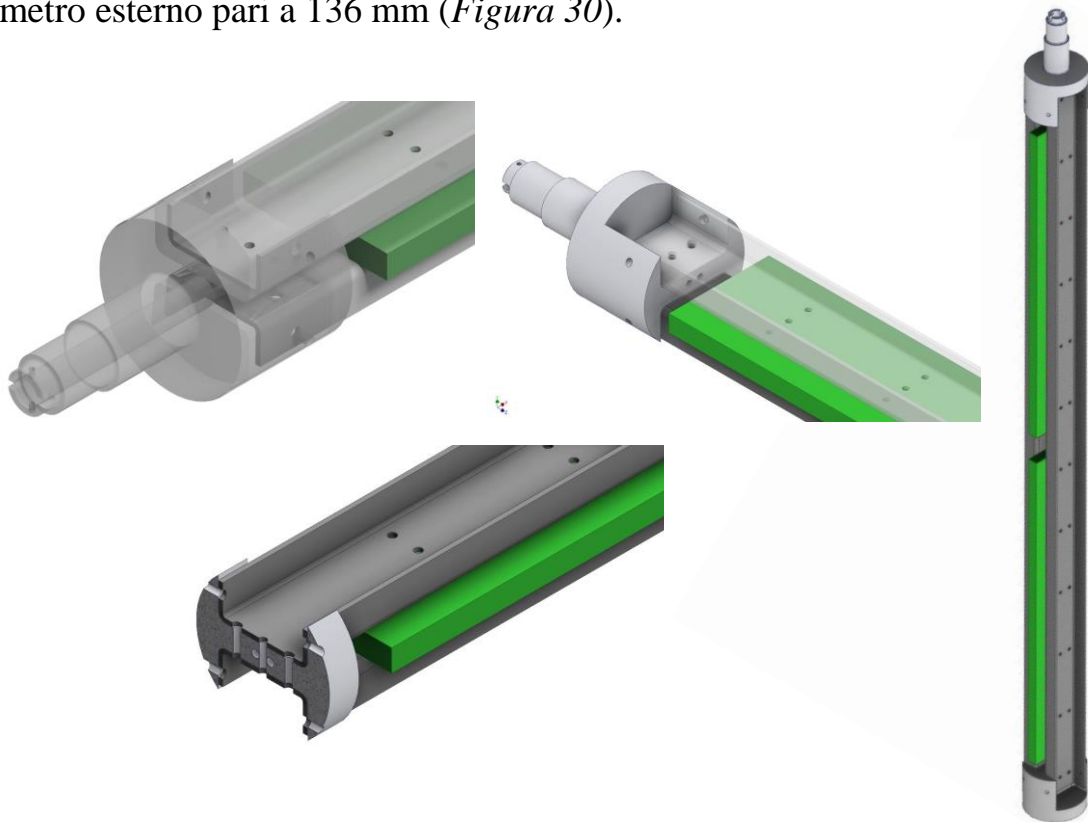


Figura 30. Modello 3D della shaft di misura in fase di progettazione per i magneti della serie [5].

Di seguito ho riportato i modelli 3D dei disegni da me eseguiti. In particolare vengono rappresentati due assiemi:

- uno da fissare ad una delle piastre intermedie del discendente chiamato “assieme superiore” *Figura 31*;
- uno da fissare alla piastra inferiore del discendente per questo chiamato “assieme inferiore” *Figura 33*.

Per quanto riguarda l’assieme superiore, esso è costituito da una flangia principale da fissare sulla piastra del discendente attraverso 4 viti M6x25 mm, la quale presenta al centro un foro passante di 152 mm (che tiene conto del massimo ingombro della shaft di misura che verrà utilizzata per i magneti della serie e del gioco necessario per eseguire la regolazione della posizione radiale dello strumento) ed una lamatura di diametro 182 mm e profondità 8 mm, sulla cui superficie sono realizzati 4 fori passanti

filettati M5 in modo tale da poter fissare una seconda flangia intermedia. La flangia principale presenta, inoltre, un bordo rialzato nel quale sono ricavati 4 fori passanti filettati M6 attraverso i quali, mediante 4 viti di regolazione, è possibile effettuare il centraggio della sonda.

La flangia intermedia rappresenta l'interfaccia tra la shaft di misura e la flangia principale, quindi a seconda della sonda da utilizzare occorre installarne una diversa. Il bloccaggio è garantito da 4 viti a testa cilindrica con esagono incassato M5x8 mm. Il bloccaggio della shaft di misura in posizione è realizzato da un elemento cedevole che viene stretto attorno alla capsula in vetronite con un idoneo precarico attraverso un collare realizzato in due parti tenute insieme da due viti M6, che assicura il contatto tra i due componenti anche alla temperatura di lavoro. Questo elemento deve essere montato ad una certa altezza del tubo e poi posto in battuta sull'assieme formato da flangia principale e flangia intermedia. Inoltre, serve per centrare lo strumento di misura rispetto all'asse dei magneti in quanto le viti di regolazione agiscono sulla sua superficie laterale, evitando quindi il danneggiamento della capsula in vetronite.

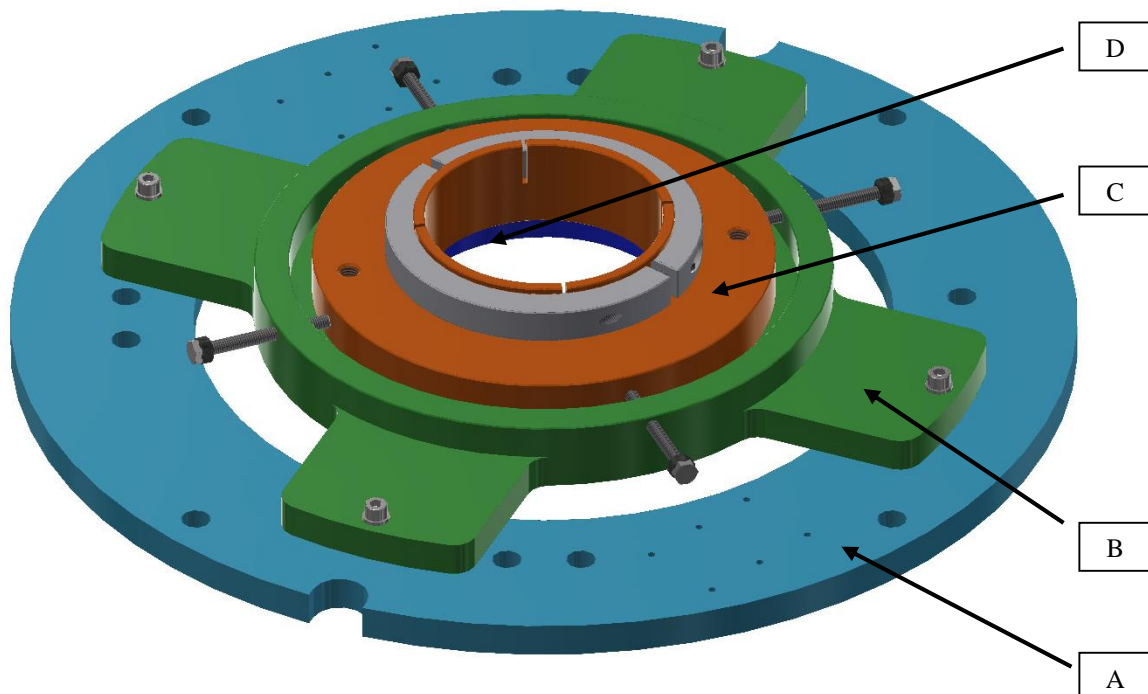


Figura 31. Modello 3D dell'assieme superiore fissato alla piastra superiore del discendente.

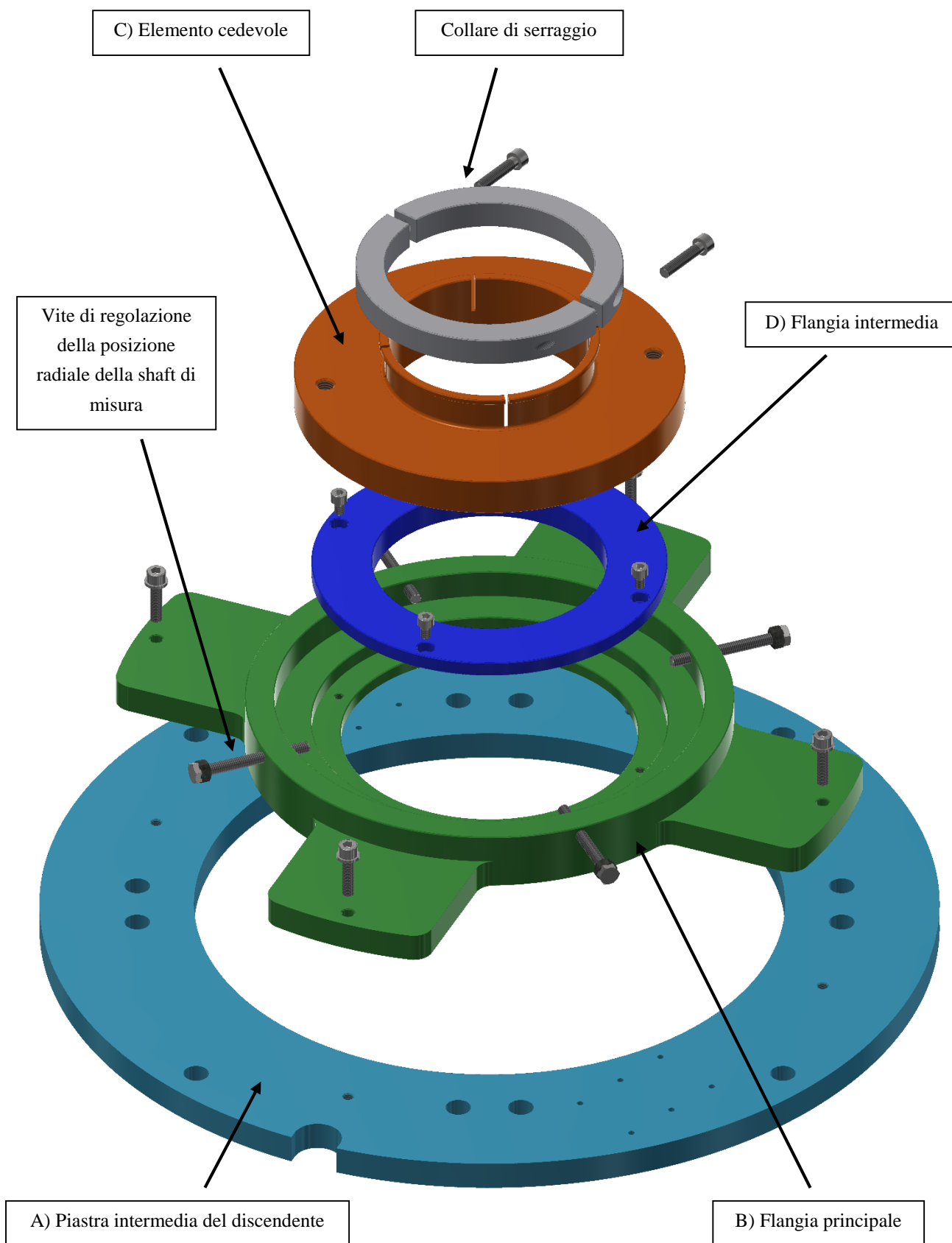


Figura 32. Vista esplosa dell'assieme superiore.

Per quanto riguarda l'assieme inferiore, esso è costituito da una flangia principale da fissare sulla piastra del discendente attraverso 4 viti M6x40 mm, la quale presenta al centro un foro passante di 152 mm (per tenere conto del massimo ingombro della shaft di misura che verrà utilizzata per i magneti della serie) ed una lamatura di diametro 182 mm e profondità 8 mm, sulla cui superficie sono realizzati 4 fori passanti filettati M5 in modo tale da poter fissare una seconda flangia intermedia. La flangia principale presenta un bordo rialzato nel quale sono ricavati 3 fori passanti filettati M6 attraverso i quali, mediante 3 viti di regolazione, è possibile effettuare il centraggio della sonda quindi regolare la posizione radiale.

La flangia intermedia, anche in questo caso, rappresenta l'interfaccia tra la shaft di misura e la flangia principale ed il bloccaggio è garantito da 4 viti a testa cilindrica con esagono incassato M5x8 mm.

Diversamente da quanto avviene nella parte alta del discendente, inferiormente la shaft di misura è libera di traslare verticalmente e di adeguarsi alle contrazioni dei materiali alla temperatura di lavoro. Questo aspetto è di fondamentale importanza in quanto, se il sistema fosse iperstatico si potrebbero formare delle tensioni pericolose dovute alle differenti contrazioni termiche tali da danneggiare lo strumento di misura. Lasciando del gioco, al momento dell'assemblaggio, tra l'elemento cedevole fissato attorno alla capsula e la flangia principale, questo evento risulta evitato (vedi dettagli nel paragrafo seguente). Anche in questo caso, le viti di regolazione utilizzate per il centraggio dello strumento di misura agiscono sulla superficie laterale dell'elemento cedevole per evitare di danneggiare la capsula in vetronite.

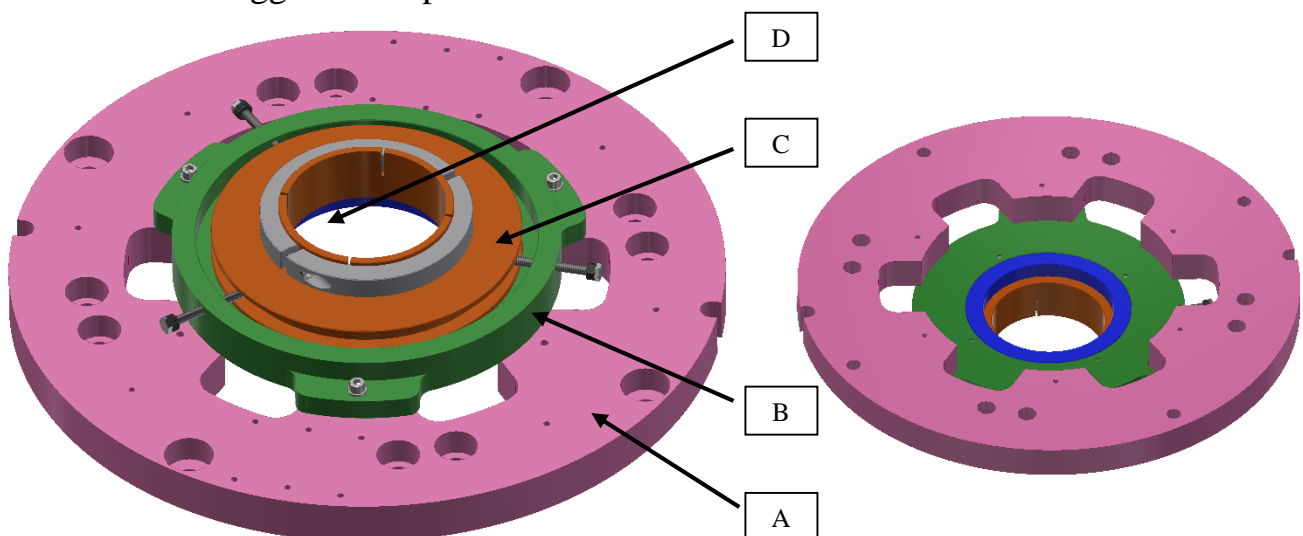


Figura 33. Modello 3D dell'assieme inferiore fissato alla piastra inferiore del discendente.

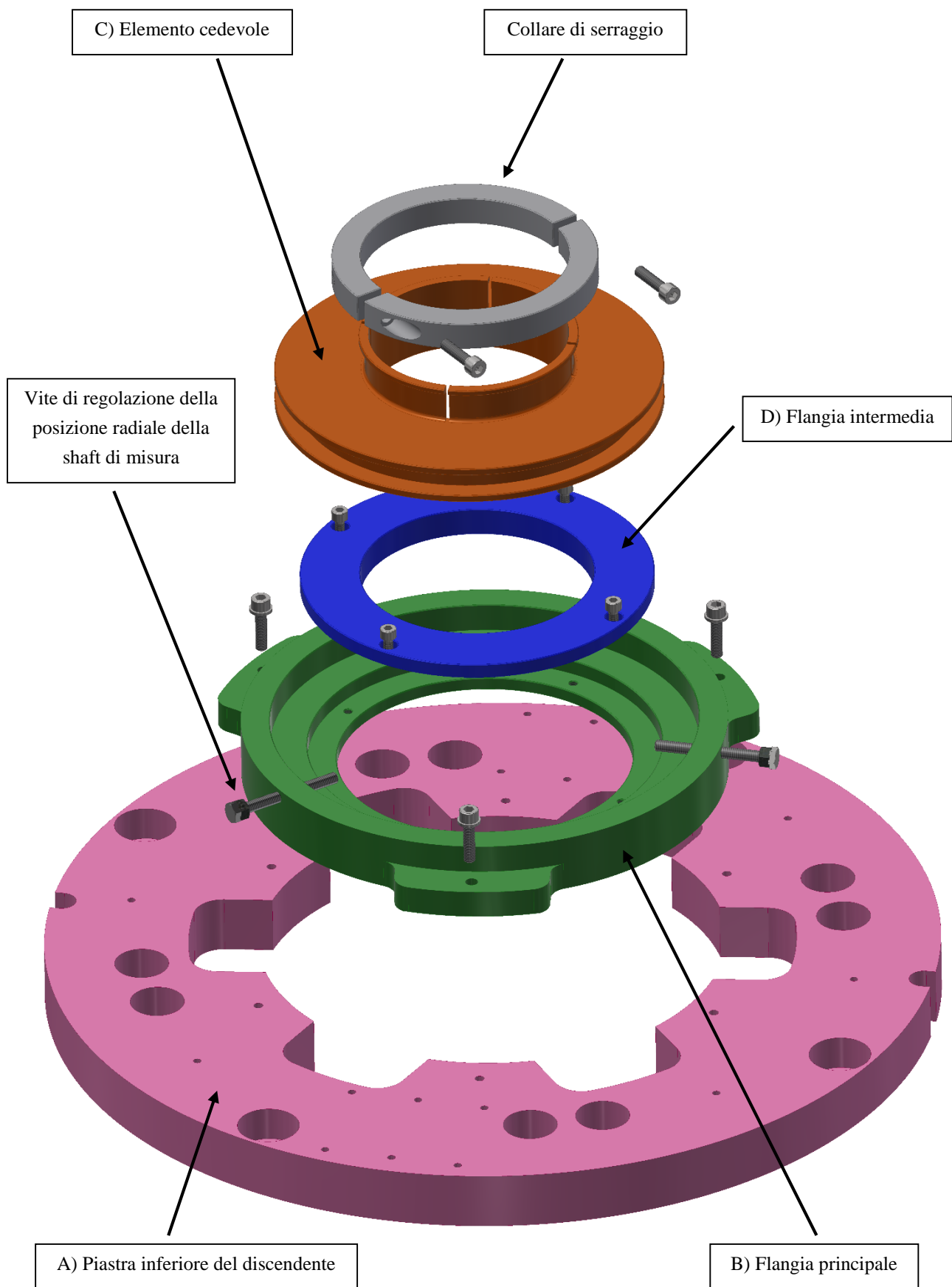


Figura 34. Vista esplosa dell'assieme inferiore.

Oltre al sistema di fissaggio per l'apparato di misure magnetiche, mi sono occupato anche della progettazione del carter protettivo per la connessione elettrica tra l'albero passante l'elemento di tenuta che arriva all'interno del criostato e l'albero che si connette alla shaft di misura. Il suddetto carter ha un'altra funzione oltre a quella di proteggere la connessione elettrica, ovvero quella di connettere rigidamente i due alberi, recuperando una eventuale mancanza di lunghezza, e di trasmettere il moto rotatorio tra i due elementi. Dopo un'attenta verifica degli ingombri e conoscendo le dimensioni della shaft di misura che verrà fornita dal CERN per mettere a punto il sistema, ho progettato il componente.

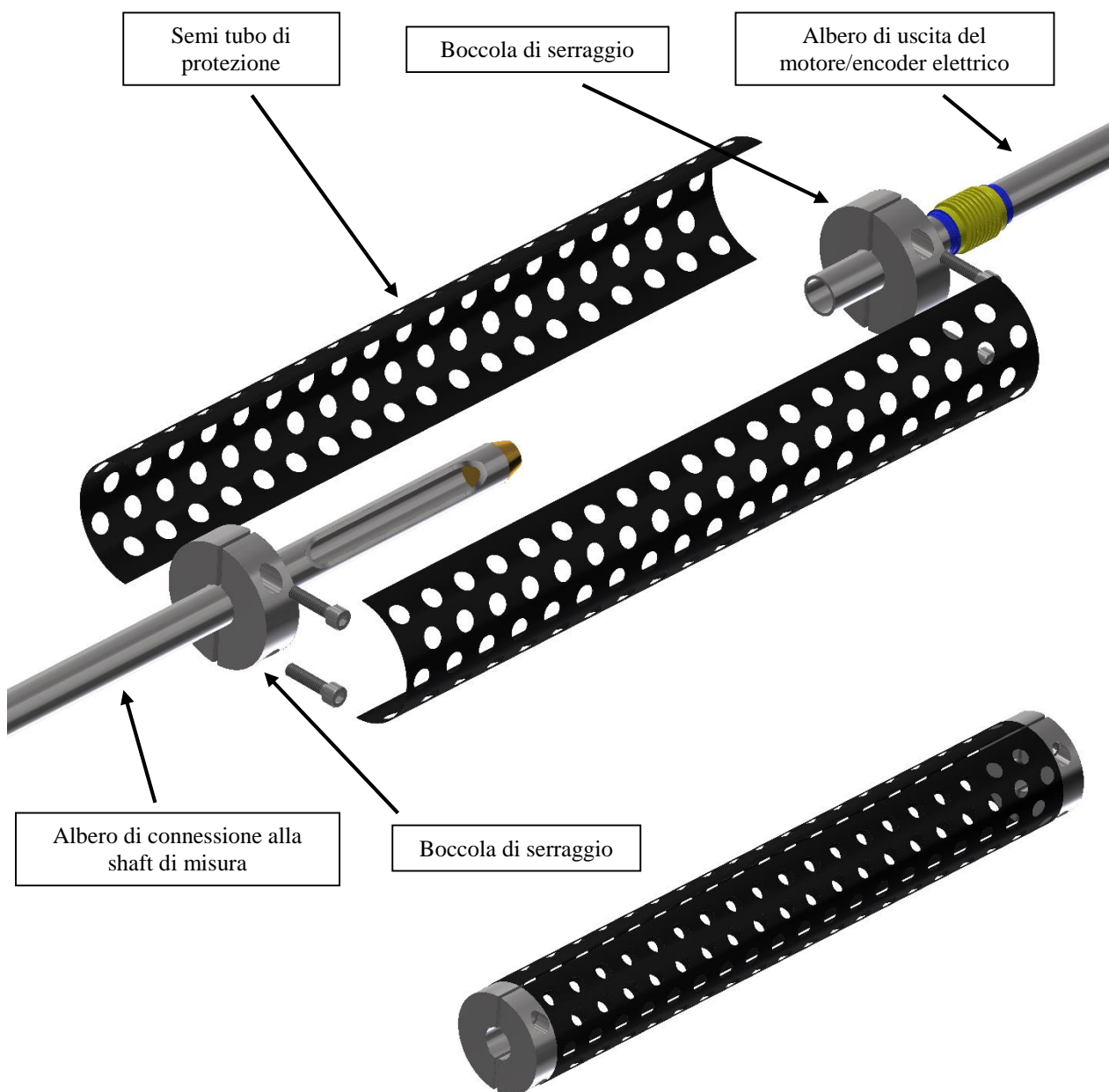


Figura 35. Modello 3D del carter di connessione/protezione tra i due alberi.

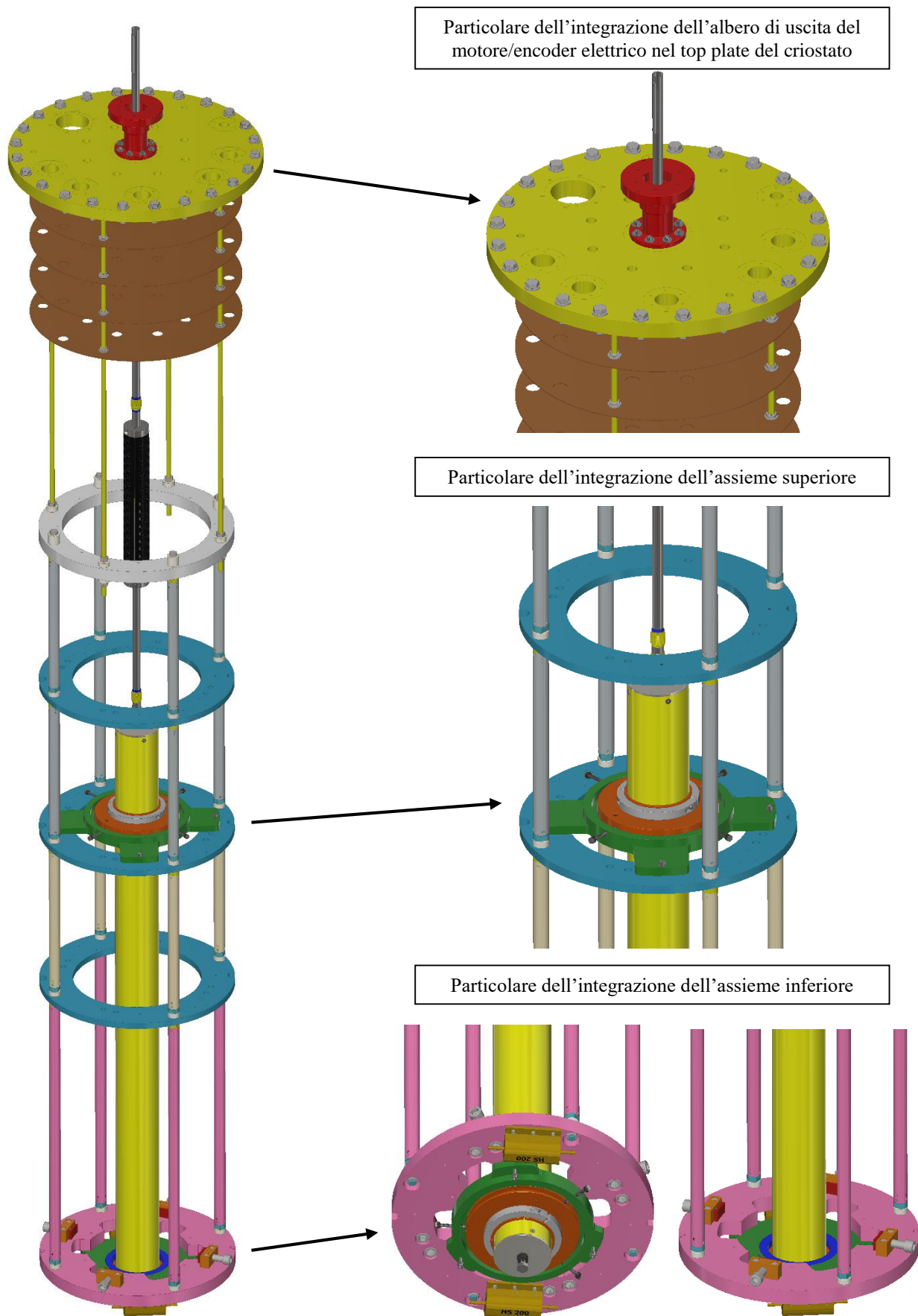


Figura 36. Integrazione del sistema di fissaggio dell'apparato di misure magnetiche alla struttura discendente.

6.III.a Calcolo delle contrazioni termiche

La fase, mi sono dedicato alla scelta dei materiali da utilizzare per la realizzazione dei componenti basando le varie scelte sul calcolo delle contrazioni termiche.

Dato che tutta la struttura viene immersa in un bagno di elio liquido e portata alla temperatura di 4.2 K, si deve tenere conto delle contrazioni termiche. Per valutare questi valori viene utilizzata la seguente equazione [4]:

Equazione 8

$$\frac{\Delta l}{l} = \alpha \Delta T \text{ in cui } \alpha = \frac{\int_{T_1}^{T_2} \alpha(T) dT}{\Delta T}$$

dove α rappresenta la media integrale del coefficiente di dilatazione termica che caratterizza ciascun materiale, $\alpha(T)$ è fortemente non lineare.

I materiali che mi sono soffermato ad analizzare sono:

- acciaio inox austenitico AISI 304;
- alluminio 6082 T6;
- lega di rame-berillio;
- ottone.

In *Tabella 3* sono riportati i valori riguardanti l'espansione lineare in funzione della temperatura per i più comuni materiali utilizzati per la fabbricazione di magneti superconduttori in ambito criogenico:

Tabella 3. Espansioni lineari in funzione della temperatura [3].

Materiali	$\int_4^{100} dl/l$	$\int_{100}^{293} dl/l$	$\int_4^{293} dl/l$
Acciaio inox	35×10^{-5}	296×10^{-5}	331×10^{-5}
Rame	44×10^{-5}	326×10^{-5}	370×10^{-5}
Alluminio	47×10^{-5}	415×10^{-5}	462×10^{-5}
Ferro	18×10^{-5}	198×10^{-5}	216×10^{-5}
Ottone	57×10^{-5}	326×10^{-5}	383×10^{-5}
Resina epossidica rinforzata con fibra di vetro (G10)	47×10^{-5}	279×10^{-5}	326×10^{-5}

Parlando dell'assieme superiore, di seguito sono riportati i diversi casi analizzati con riferimento alla *Figura 37* che mostra i versi delle contrazioni subite dai componenti coinvolti. Indicando con:

- 1, l'assieme composto da flangia principale e flangia intermedia;
- 2, la parte della vite non in presa nella madrevite (lunghezza libera dalla filettatura) in battuta con la superficie laterale dell'elemento 3;
- 3, l'elemento cedevole che viene stretto attorno alla capsula in vetrovite.

Per determinare se durante il raffreddamento della struttura viene a crearsi interferenza o gioco tra le viti e la superficie laterale dell'elemento cedevole, ho ragionato sulle contrazioni subite dai componenti nella sezione radiale, riferendo i valori al raggio. Inizialmente ho calcolato la contrazione subita dall'elemento 1 sul quale sono avvitate le viti, dopodiché ho calcolato la contrazione subita dalle viti stesse considerando la lunghezza della parte filettata non in presa ed infine mi sono occupato della contrazione subita dall'elemento 3 considerando il diametro esterno.

Ottenuti questi valori, ho verificato se la contrazione subita dall'elemento 1 fosse maggiore o minore del gioco che si forma tra gli elementi 2 e 3:

$$\Delta = \Delta_{el1} - (\Delta_{el2} + \Delta_{el3}) \begin{cases} > 0 \text{ (allora) interferenza;} \\ < 0 \text{ (allora) gioco.} \end{cases} \quad \text{Equazione 9}$$

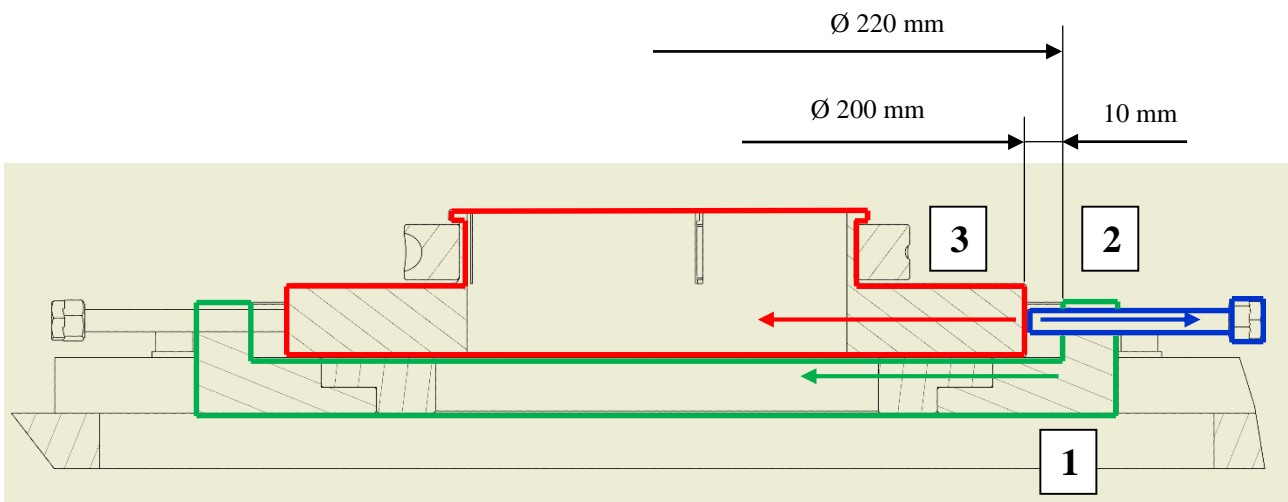


Figura 37. Schema riportante i versi delle contrazioni dei componenti coinvolti e le quote d'interesse per i calcoli.

In tutti i casi che seguono ho considerato di realizzare la flangia principale in alluminio 6082 T6 cioè con lo stesso materiale della piastra superiore del discendente in modo tale che durante il raffreddamento i due elementi subiscano la stessa contrazione termica e le viti di fissaggio non vengano sottoposte a taglio.

Analizzo per casi in modo da trovare la soluzione più adatta.

1. Flangia principale in alluminio 6082 T6, viti in acciaio inox austenitico 304 ed elemento cedevole in acciaio inox austenitico 304:

Per quanto riguarda la flangia principale, il diametro d'interesse è quello interno che delimita il bordo rialzato pari a 220 mm, vedi *Figura 37*. Utilizzando l'*Equazione 8* $\Delta = \Delta_{el1} - (\Delta_{el2} + \Delta_{el3}) > 0$ (allora) interferenza precedentemente scritta ottengo una contrazione sul diametro di 1.016 mm:

$$\Delta l = \alpha \Delta T l \rightarrow \Delta l = (462 * 10^{-5}) * 220 = 1.016 \text{ mm}$$

che corrispondono a 0.508 mm sul raggio:

$$\Delta l_{RF} = \frac{\Delta l}{2} \rightarrow \Delta l_{RF} = \frac{1.016}{2} = 0.508 \text{ mm}$$

Per calcolare la contrazione che subisce ogni vite, considero la lunghezza libera dalla filettatura. Le viti in oggetto sono M6x60 mm la cui parte non in presa è di 10 mm:

$$\Delta l_V = (331 * 10^{-5}) * 10 = 0.033 \text{ mm}$$

L'elemento cedevole per il bloccaggio della capsula in vetronite ha un diametro esterno di 200 mm, vedi *Figura 37*, che subisce una contrazione di 0.662 mm sul diametro:

$$\Delta l = (331 * 10^{-5}) * 200 = 0.662 \text{ mm}$$

che corrisponde a 0.331 mm sul raggio:

$$\Delta l_{RC} = \frac{0.662}{2} = 0.331 \text{ mm}$$

A questo punto è possibile verificare l'interferenza o il gioco che viene a formarsi durante il raffreddamento a causa delle contrazioni differenziali. Ricordando la *Figura 37* e l'*Equazione 9*, in questo caso si ottiene:

$$\Delta = \Delta l_{RF} - (\Delta l_V + \Delta l_{RC}) \rightarrow \Delta = 0.508 - (0.033 + 0.331) = 0.144 \text{ mm}$$

Questo risultato mostra che, utilizzando i materiali indicati, durante il raffreddamento si forma un'interferenza di 0.144 mm tra le viti e la superficie laterale dell'elemento cedevole. A questo punto, con il valore appena ottenuto, è possibile verificare se la tensione dovuta all'interferenza rimane nel limite elastico del materiale oppure se provoca una deformazione plastica.

Tabella 4. Proprietà dell'acciaio inox AISI 304 [10] e dati per i calcoli.

Allungamento Δ	0.144 mm
Modulo di Young E	193000 MPa
Tensione elastica σ_{el}	215 MPa
Lunghezza sporgente L_s	10 mm

Per calcolare la tensione è possibile utilizzare la seguente espressione:

Equazione 10

$$\sigma = E \varepsilon$$

dove ε rappresenta la deformazione relativa calcolata come rapporto tra Δl e l . In questo caso si ottiene una deformazione relativa pari a:

Equazione 11

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$$

$$\varepsilon = \frac{0.144}{10} = 0.0144$$

La tensione risultante, vedi *Equazione 10*, vale:

$$\sigma = 193000 * 0.0144 = 2779.20 \text{ MPa}$$

che risulta ampiamente superiore alla tensione limite di deformazione elastica sopportata dal materiale, quindi la scelta di questi materiali non conforme alle specifiche.

2. Flangia principale in alluminio 6082 T6, viti in acciaio inox austenitico 304 ed elemento cedevole in alluminio 6082 T6:

Essendo la flangia principale realizzata in alluminio 6082 T6, in tutti i casi, per la

motivazione precedentemente spiegata, d'ora in poi mi limito a riportare solo il valore della contrazione sul raggio per questo componente:

$$\Delta l_{RF} = \frac{1.016}{2} = 0.508 \text{ mm}$$

La contrazione che subisce ogni vite è pari a:

$$\Delta l_V = (331 * 10^{-5}) * 10 = 0.033 \text{ mm}$$

L'elemento cedevole per il bloccaggio della capsula in vetronite si contrae di:

$$\Delta l = (462 * 10^{-5}) * 200 = 0.924 \text{ mm}$$

che corrisponde a 0.462 mm sul raggio:

$$\Delta l_{RC} = \frac{0.924}{2} = 0.462 \text{ mm}$$

A questo punto verifico l'interferenza o il gioco che viene a formarsi durante il raffreddamento a causa delle contrazioni differenziali. Ricordando la *Figura 37* e l'*Equazione 9*, si ottiene:

$$\Delta = 0.508 - (0.033 + 0.462) = 0.013 \text{ mm}$$

Questo risultato mostra che, utilizzando i materiali indicati, durante il raffreddamento si forma una leggera interferenza di 0.013 mm tra le viti e la superficie laterale dell'elemento cedevole. Con il valore appena ottenuto, verifico se la tensione dovuta all'allungamento differenziale rimane nel limite elastico del materiale oppure se provoca una deformazione plastica.

Tabella 5. Proprietà dell'acciaio inox AISI 304 [10] e dati per i calcoli.

Allungamento Δ	0.013 mm
Modulo di Young E	193000 MPa
Tensione elastica σ_{el}	215 MPa
Lunghezza sporgente L_s	10 mm

Calcolo la deformazione relativa ϵ attraverso l'*Equazione 11*, utile per determinare in seguito la tensione:

$$\varepsilon = \frac{0.013}{10} = 0.0013$$

Utilizzando l'Equazione 10, la tensione risulta quindi:

$$\sigma = 193000 * 0.0013 = 250.90 \text{ MPa}$$

Essendo la tensione appena calcolata superiore alla tensione limite di deformazione elastica sopportata dal materiale, la scelta di questi materiali si dimostra non conforme alle specifiche.

3. Flangia principale in alluminio 6082 T6, viti in alluminio 6082 T6 ed elemento cedevole in alluminio 6082 T6:

Per quanto riguarda la flangia principale:

$$\Delta l_{RF} = \frac{1.016}{2} = 0.508 \text{ mm}$$

Le viti subiscono una contrazione pari a:

$$\Delta l_V = (462 * 10^{-5}) * 10 = 0.046 \text{ mm}$$

L'elemento cedevole per il bloccaggio della capsula in vetronite subisce una contrazione di 0.924 mm sul diametro:

$$\Delta l = (462 * 10^{-5}) * 200 = 0.924 \text{ mm}$$

che corrisponde a 0.462 mm sul raggio:

$$\Delta l_{RC} = \frac{0.924}{2} = 0.462 \text{ mm}$$

L'interferenza o il gioco che viene a formarsi durante il raffreddamento a causa delle contrazioni differenziali è pari a:

$$\Delta = 0.508 - (0.046 + 0.462) = 0.000 \text{ mm}$$

Questo risultato mostra che, utilizzando i materiali indicati, teoricamente l'insieme rimane nelle condizioni di montaggio a caldo. Questo vuol dire che nel caso in cui venga adottata questa scelta occorre verificare la necessità di imprimere un precarico.

4. Flangia principale in alluminio 6082 T6, viti in alluminio 6082 T6 ed elemento cedevole in acciaio inox austenitico 304:

Per quanto riguarda la flangia principale:

$$\Delta l_{RF} = \frac{1.016}{2} = 0.508 \text{ mm}$$

Le viti subiscono una contrazione pari a:

$$\Delta l_V = (462 * 10^{-5}) * 10 = 0.046 \text{ mm}$$

L'elemento cedevole per il bloccaggio della capsula in vetronite subisce una contrazione di 0.662 mm sul diametro:

$$\Delta l = (331 * 10^{-5}) * 200 = 0.662 \text{ mm}$$

che corrisponde a 0.331 mm sul raggio:

$$\Delta l_{RC} = \frac{0.662}{2} = 0.331 \text{ mm}$$

L'interferenza o il gioco che viene a formarsi durante il raffreddamento a causa delle contrazioni differenziali è pari a:

$$\Delta = 0.508 - (0.046 + 0.331) = 0.131 \text{ mm}$$

Questo risultato mostra che, utilizzando i materiali indicati, durante il raffreddamento si forma un'interferenza di 0.131 mm tra le viti e la superficie laterale dell'elemento cedevole. Con il valore appena ottenuto, verifico se la tensione dovuta all'allungamento differenziale rimane nel limite elastico del materiale oppure se provoca una deformazione plastica.

Tabella 6. Proprietà dell'alluminio 6082 T6 [10] e dati per i calcoli.

Allungamento Δ	0.131 mm
Modulo di Young E	69000 MPa
Tensione elastica σ_{el}	250 MPa
Lunghezza sporgente L_s	10 mm

Calcolo la deformazione relativa ϵ , vedi *Equazione 11*:

$$\varepsilon = \frac{0.131}{10} = 0.0131$$

La tensione risulta, attraverso l'Equazione 10, quindi:

$$\sigma = 69000 * 0.0131 = 903.90 \text{ MPa}$$

superiore alla tensione limite di deformazione elastica sopportata dal materiale, quindi la scelta di questi materiali non conforme alle specifiche.

5. Flangia principale in alluminio 6082 T6, viti in ottone ed elemento cedevole in alluminio 6082 T6:

Per quanto riguarda la flangia principale:

$$\Delta l_{RF} = \frac{1.016}{2} = 0.508 \text{ mm}$$

Utilizzando un materiale diverso, in questo caso le viti subiscono una contrazione differente:

$$\Delta l_V = (383 * 10^{-5}) * 10 = 0.038 \text{ mm}$$

L'elemento cedevole per il bloccaggio della capsula in vetronite subisce una contrazione di 1.016 mm sul diametro:

$$\Delta l = (462 * 10^{-5}) * 200 = 0.924 \text{ mm}$$

che corrisponde a 0.462 mm sul raggio:

$$\Delta l_{RC} = \frac{0.924}{2} = 0.462 \text{ mm}$$

A questo punto verifico l'interferenza o il gioco che viene a formarsi durante il raffreddamento a causa delle contrazioni differenziali:

$$\Delta = 0.508 - (0.038 + 0.462) = 0.008 \text{ mm}$$

Questo risultato mostra che, utilizzando i materiali indicati, durante il raffreddamento si forma una leggera interferenza di 0.008 mm tra le viti e la superficie laterale dell'elemento cedevole che di fatto garantisce che gli elementi rimangano in contatto. Essendo il valore molto piccolo, nel caso in cui venga adottata questa scelta occorre verificare la necessità di imprimere un precarico. Con il valore appena ottenuto,

verifico se la tensione dovuta all'allungamento differenziale rimane nel limite elastico del materiale oppure se provoca una deformazione plastica.

Tabella 7. Proprietà dell'ottone [10] e dati per i calcoli.

Allungamento Δ	0.008 mm
Modulo di Young E	105000 MPa
Tensione elastica σ_{el}	97 MPa
Lunghezza sporgente L_s	10 mm

Calcolo la deformazione relativa ε , vedi *Equazione 11*:

$$\varepsilon = \frac{0.008}{10} = 0.0008$$

Utilizzando l'Equazione 10, la tensione risulta quindi:

$$\sigma = 105000 * 0.0008 = 84 \text{ MPa}$$

Essendo la tensione appena calcolata inferiore alla tensione limite di deformazione elastica sopportata dal materiale, la scelta di questi materiali si dimostra conforme alle specifiche.

Tabella 8. Riassunto dei risultati ottenuti per l'assieme superiore.

	Flangia principale	Viti	Elemento cedevole	Interferenza/gioco
Caso 1	Alluminio	Acciaio inox	Acciaio inox	Interferenza 0.144 mm
Caso 2	Alluminio	Acciaio inox	Alluminio	Interferenza 0.013 mm
Caso 3	Alluminio	Alluminio	Alluminio	0.000 mm
Caso 4	Alluminio	Alluminio	Acciaio inox	Interferenza 0.131 mm
Caso 5	Alluminio	Ottone	Alluminio	Interferenza 0.008 mm

Parlando dell'assieme inferiore, di seguito sono riportati i diversi casi analizzati con riferimento allo schema che mostra i versi delle contrazioni subite dai componenti coinvolti. Indicando con:

- 1, l'assieme composto da flangia principale e flangia intermedia;
- 2, la parte della vite non in presa in battuta con la superficie laterale dell'elemento 3;
- 3, l'elemento cedevole che viene stretto attorno alla capsula in vetronite.

Per determinare se durante il raffreddamento della struttura viene a crearsi interferenza o gioco tra le viti e la superficie laterale dell'elemento cedevole, ho ragionato sulle contrazioni subite dai componenti in una sezione radiale, riferendo i valori al raggio. Inizialmente ho calcolato la contrazione subita dall'elemento 1 sul quale sono avvitate le viti, dopodiché ho calcolato la contrazione subita dalle viti stesse considerando la lunghezza della parte filettata non in presa ed infine mi sono occupato della contrazione subita dall'elemento 3 considerando il diametro interno della gola.

Ottenuti questi valori, occorre verificare che la contrazione subita dall'elemento 1 sia maggiore o minore del gioco che si forma tra gli elementi 2 e 3:

$$\Delta = \Delta_{el1} - (\Delta_{el2} + \Delta_{el3}) \begin{cases} > 0 \text{ allora interferenza;} \\ < 0 \text{ allora gioco.} \end{cases}$$

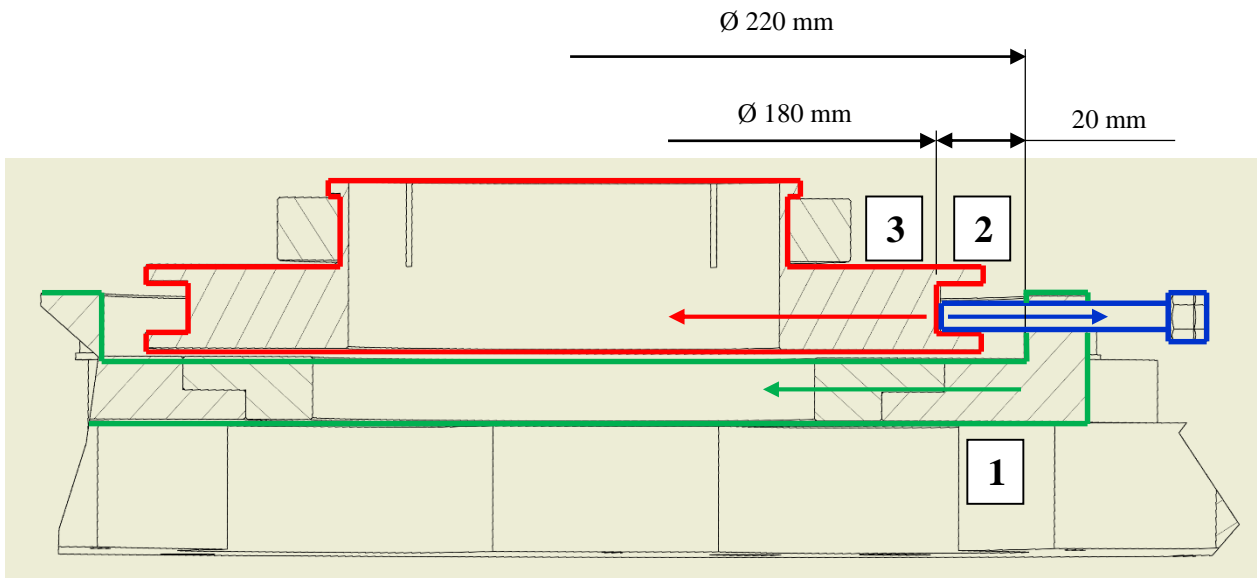


Figura 38. Schema riportante i versi delle contrazioni dei componenti coinvolti e le quote d'interesse per i calcoli.

In tutti i casi che seguono ho considerato di realizzare la flangia principale in alluminio 6082 T6 cioè con lo stesso materiale della piastra superiore del discendente in modo tale che durante il raffreddamento i due elementi subiscano la stessa contrazione

termica e le viti di fissaggio non vengano sottoposte a taglio.

1. Flangia principale in alluminio 6082 T6, viti in acciaio inox austenitico 304 ed elemento cedevole in acciaio inox austenitico 304:

Per quanto riguarda la flangia principale, il diametro d'interesse è quello interno che delimita il bordo rialzato pari a 220 mm, vedi *Figura 38*. Utilizzando l'*Equazione 8* ottengo una contrazione sul diametro di 1.155 mm:

$$\Delta l = \alpha \Delta T l \rightarrow \Delta l = (462 * 10^{-5}) * 220 = 1.016 \text{ mm}$$

che corrispondono a 0.5775 mm sul raggio:

$$\Delta l_{RF} = \frac{\Delta l}{2} \rightarrow \Delta l_{RF} = \frac{1.016}{2} = 0.508 \text{ mm}$$

Per calcolare la contrazione che subisce ogni vite, considero la lunghezza della parte filettata sporgente. Le viti in oggetto sono M6x60 mm la cui parte non in presa è di 25 mm:

$$\Delta l_V = (331 * 10^{-5}) * 20 = 0.066 \text{ mm}$$

L'elemento cedevole per il bloccaggio della capsula in vetronite ha un diametro interno della gola di 180 mm, che subisce una contrazione di 0.596 mm sul diametro:

$$\Delta l = (331 * 10^{-5}) * 180 = 0.596 \text{ mm}$$

che corrisponde a 0.298 mm sul raggio:

$$\Delta l_{RC} = \frac{0.596}{2} = 0.298 \text{ mm}$$

A questo punto è possibile verificare l'interferenza o il gioco che viene a formarsi durante il raffreddamento a causa delle contrazioni differenziali. Ricordando la *Figura 38* e l'*Equazione 9*, in questo caso si ottiene:

$$\Delta = \Delta l_{RF} - (\Delta l_V + \Delta l_{RC}) \rightarrow \Delta = 0.508 - (0.066 + 0.298) = 0.144 \text{ mm}$$

Questo risultato mostra che, utilizzando i materiali indicati, durante il raffreddamento si forma un'interferenza di 0.144 mm tra le viti e la superficie laterale dell'elemento cedevole. Nella parte inferiore, l'assieme composto da elemento cedevole serrato attorno al tubo in vetronite deve poter traslare verticalmente a seguito della contrazione

termica per evitare di avere un sistema iperstatico quindi non è tollerabile il valore d'interferenza trovato con questi materiali. Ciò, infatti, provocherebbe delle tensioni che potrebbero introdurre errori nell'allineamento dello strumento di misura.

2. Flangia principale in alluminio 6082 T6, viti in acciaio inox austenitico 304 ed elemento cedevole in alluminio 6082 T6:

Essendo la flangia principale realizzata in alluminio 6082 T6, in tutti i casi, per la motivazione precedentemente spiegata, d'ora in poi mi limito a riportare solo il valore della contrazione sul raggio per questo componente.

$$\Delta l = (462 * 10^{-5}) * 220 = 1.016 \text{ mm}$$

che corrispondono a 0.508 mm sul raggio:

$$\Delta l_{RF} = \frac{1.016}{2} = 0.508 \text{ mm}$$

La contrazione che subisce ogni vite è pari a:

$$\Delta l_V = (331 * 10^{-5}) * 20 = 0.066 \text{ mm}$$

L'elemento cedevole per il bloccaggio della capsula in vetronite subisce una contrazione di 0.832 mm sul diametro:

$$\Delta l = (462 * 10^{-5}) * 180 = 0.832 \text{ mm}$$

che corrisponde a 0.416 mm sul raggio:

$$\Delta l_{RC} = \frac{0.832}{2} = 0.416 \text{ mm}$$

L'interferenza o il gioco che viene a formarsi durante il raffreddamento a causa delle contrazioni differenziali è pari a:

$$\Delta = 0.508 - (0.066 + 0.416) = 0.026 \text{ mm}$$

Questo risultato mostra che, utilizzando i materiali indicati, durante il raffreddamento si forma una leggera interferenza di 0.026 mm tra le viti e la superficie laterale dell'elemento cedevole. Questa potrebbe rappresentare una buona soluzione perché di fatto trattasi di un valore molto piccolo, ma rimane comunque da verificare.

3. Flangia principale in alluminio 6082 T6, viti in alluminio 6082 T6 ed elemento cedevole in alluminio 6082 T6:

Per quanto riguarda la flangia principale:

$$\Delta l_{RF} = \frac{1.016}{2} = 0.508 \text{ mm}$$

Le viti subiscono una contrazione pari a:

$$\Delta l_V = (462 * 10^{-5}) * 20 = 0.092 \text{ mm}$$

L'elemento cedevole per il bloccaggio della capsula in vetronite subisce una contrazione di 0.832 mm sul diametro:

$$\Delta l = (462 * 10^{-5}) * 180 = 0.832 \text{ mm}$$

che corrisponde a 0.416 mm sul raggio:

$$\Delta l_{RC} = \frac{0.832}{2} = 0.416 \text{ mm}$$

L'interferenza o il gioco che viene a formarsi durante il raffreddamento a causa delle contrazioni differenziali è pari a:

$$\Delta = 0.508 - (0.092 + 0.416) = 0.000 \text{ mm}$$

Questo risultato mostra che, utilizzando i materiali indicati, durante il raffreddamento tutti gli elementi subiscono una contrazione tale da rimanere nella configurazione di assemblaggio a temperatura ambiente, garantendo quindi l'allineamento della sonda.

4. Flangia principale in alluminio 6082 T6, viti in ottone ed elemento cedevole in acciaio inox austenitico 304:

Per quanto riguarda la flangia principale:

$$\Delta l_{RF} = \frac{1.016}{2} = 0.508 \text{ mm}$$

Le viti subiscono una contrazione pari a:

$$\Delta l_V = (383 * 10^{-5}) * 20 = 0.077 \text{ mm}$$

L'elemento cedevole per il bloccaggio della capsula in vetronite subisce una

contrazione di 0.662 mm sul diametro:

$$\Delta l = (331 * 10^{-5}) * 180 = 0.596 \text{ mm}$$

che corrisponde a 0.298 mm sul raggio:

$$\Delta l_{RC} = \frac{0.596}{2} = 0.298 \text{ mm}$$

L'interferenza o il gioco che viene a formarsi durante il raffreddamento a causa delle contrazioni differenziali è pari a:

$$\Delta = 0.508 - (0.077 + 0.298) = 0.133 \text{ mm}$$

Questo risultato mostra che, utilizzando i materiali indicati, durante il raffreddamento si forma un'interferenza di 0.133 mm tra le viti e la superficie laterale dell'elemento cedevole. Analogamente al primo caso, questo valore d'interferenza non è quindi tollerabile.

5. Flangia principale in alluminio 6082 T6, viti in ottone ed elemento cedevole in alluminio 6082 T6:

Per quanto riguarda la flangia principale:

$$\Delta l_{RF} = \frac{1.016}{2} = 0.508 \text{ mm}$$

Le viti subiscono una contrazione pari a:

$$\Delta l_V = (383 * 10^{-5}) * 20 = 0.077 \text{ mm}$$

L'elemento cedevole per il bloccaggio della capsula in vetronite subisce una contrazione di 0.924 mm sul diametro:

$$\Delta l = (462 * 10^{-5}) * 180 = 0.832 \text{ mm}$$

che corrisponde a 0.416 mm sul raggio:

$$\Delta l_{RC} = \frac{0.832}{2} = 0.416 \text{ mm}$$

A questo punto verifico l'interferenza o il gioco che viene a formarsi durante il raffreddamento a causa delle contrazioni differenziali:

$$\Delta = 0.508 - (0.077 + 0.416) = 0.015 \text{ mm}$$

Questo risultato mostra che, utilizzando i materiali indicati, durante il raffreddamento si forma una leggera interferenza di 0.015 mm tra le viti e la superficie laterale dell'elemento cedevole. Questa potrebbe rappresentare una buona soluzione perché di fatto trattasi di un valore molto piccolo, tuttavia occorre eseguire una verifica.

Tabella 9. Riassunto dei dati ottenuti per l'assieme inferiore.

	Flangia principale	Viti	Elemento cedevole	Interferenza/gioco
Caso 1	Alluminio	Acciaio inox	Acciaio inox	Interferenza 0.144 mm
Caso 2	Alluminio	Acciaio inox	Alluminio	Interferenza 0.026 mm
Caso 3	Alluminio	Alluminio	Alluminio	0.000 mm
Caso 4	Alluminio	Ottone	Acciaio inox	Interferenza 0.133 mm
Caso 5	Alluminio	Ottone	Alluminio	Interferenza 0.015 mm

Verificate le entità delle contrazioni che subirebbero i componenti utilizzando i materiali presi in esame, risulta opportuno eseguire un'ulteriore verifica. Occorre, infatti, verificare che durante il raffreddamento l'elemento cedevole rimanga serrato attorno alla capsula in vetronite garantendone il sostentamento nonostante le diverse contrazioni subite dai due componenti. Ciò che segue vale sia per l'assieme superiore sia per l'assieme inferiore. I materiali presi in esame sono:

- alluminio 6082 T6 per l'elemento cedevole (elemento 1);
- vetronite (resina epossidica rinforzata con fibra di vetro) per la capsula (elemento 2).

Per quanto riguarda l'elemento 1 ho considerato come materiale soltanto l'alluminio in quanto dai risultati ottenuti precedentemente, risulta la scelta più opportuna. Per questa verifica ho calcolato le contrazioni radiali subite dall'elemento cedevole e dal tubo in vetronite, poi ho sottratto questi due valori tra di loro. In base ai risultati ho potuto dimostrare quanto segue:

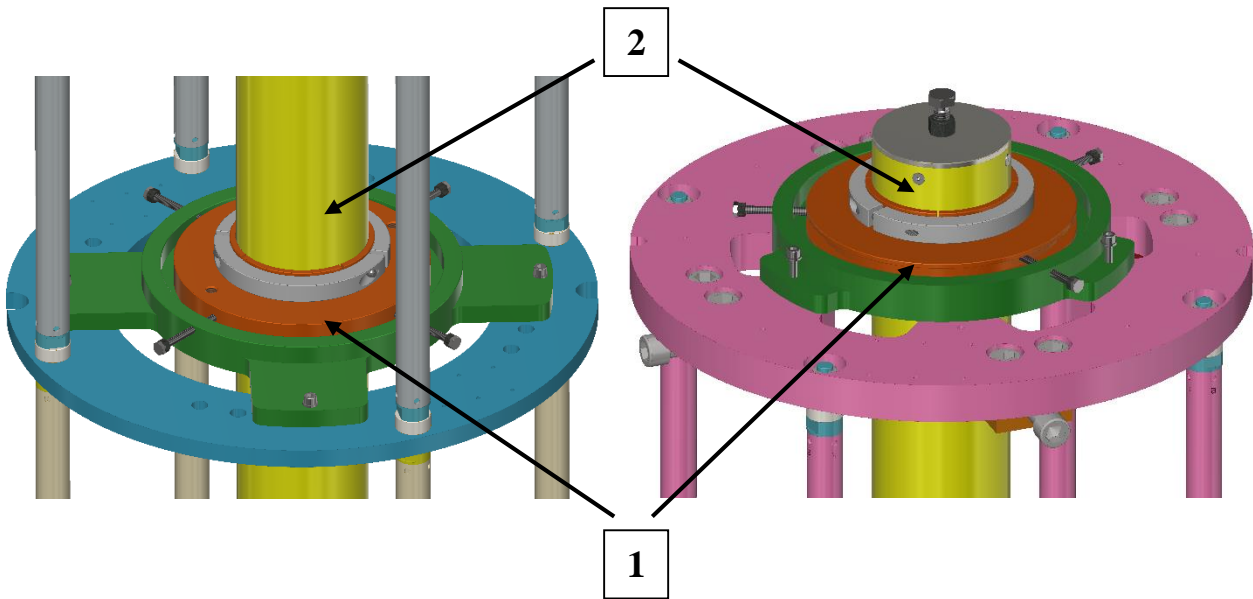


Figura 39. Schema raffigurante l'elemento cedevole serrato attorno alla capsula in vetronite sia nell'assieme superiore (sinistra) sia nell'assieme inferiore (destra).

1. Elemento cedevole in alluminio 6082 T6 e capsula in vetronite:

L'elemento cedevole presenta un diametro interno pari a 103 mm, il quale a seguito del raffreddamento subisce una contrazione pari a 0.476 mm (vedi *Equazione 8*):

$$\Delta l = \alpha \Delta T l \rightarrow \Delta l = (462 * 10^{-5}) * 103 = 0.476 \text{ mm}$$

che corrisponde a 0.238 mm sul raggio.

$$\Delta l_{RC} = \frac{0.476}{2} = 0.238 \text{ mm}$$

Il tubo in vetronite, essendo caratterizzato da un diverso coefficiente di contrazione termica si contrae di 0.336 mm sul diametro:

$$\Delta l = (326 * 10^{-5}) * 103 = 0.336 \text{ mm}$$

ovvero di 0.168 mm sul raggio.

$$\Delta l_{RT} = \frac{0.336}{2} = 0.168 \text{ mm}$$

A questo punto è possibile verificare se i due elementi rimangono in contatto durante il raffreddamento nonostante le contrazioni differenziali:

$$\Delta = \Delta l_{RC} - \Delta l_{RT} \rightarrow \Delta = 0.238 - 0.168 = 0.070 \text{ mm}$$

Questo risultato dimostra che, utilizzando i materiali indicati, durante il raffreddamento si forma un'interferenza di 0.070 mm tra l'elemento cedevole ed il tubo in vetronite.

Verifico, quindi, la resistenza a compressione del tubo in vetronite per garantire la sua integrità in fase di test:

Tabella 10. Proprietà del G10 [10] e dati per i calcoli.

Allungamento Δ	0.070 mm
Modulo di Young E	16500 MPa
Resistenza alla compressione σ_c	448 MPa
Raggio R	51.50 mm

Calcolo la deformazione relativa ε attraverso l'Equazione 10, utile per determinare la tensione:

$$\varepsilon = \frac{0.070}{51.50} = 0.001359$$

Utilizzando l'Equazione 10, la tensione di compressione esercitata dall'elemento cedevole attorno alla capsula risulta quindi:

$$\sigma_c = 16500 * 0.001359 = 22.42 \text{ MPa}$$

Essendo il valore appena calcolato ampiamente inferiore alla tensione limite di resistenza a compressione sopportata dal materiale, possiamo affermare che il coefficiente di sicurezza è elevato. La scelta di questi materiali si dimostra conforme alle specifiche.

Per poter valutare la pressione risultante agente sulla capsula in vetronite, posso utilizzare le formule riguardanti un tubo cilindrico sottoposto ad uno sforzo in direzione radiale, quindi risulta:

$$P = \frac{\sigma_c * 2s}{D} = \frac{22.42 * 2 * 2.5}{98} = 1.14 \text{ MPa}$$

Riepilogando i risultati ottenuti dai calcoli delle contrazioni differenziali, posso affermare che per quanto riguarda l'assieme superiore i materiali più indicati per realizzare i componenti progettati sono:

Tabella 11. Materiali conformi alle specifiche per la realizzazione dei componenti dell'assieme superiore.

Componente	Materiale	
	Scelta 1	Scelta 2
Flangia principale	Alluminio 6082 T6	Alluminio 6082 T6
Viti di regolazione	Alluminio 6082 T6	Ottone
Elemento cedevole	Alluminio 6082 T6	Alluminio 6082 T6

Per quanto riguarda, invece, l'assieme inferiore le scelte sono le seguenti:

Tabella 12. Materiali conformi alle specifiche per la realizzazione dei componenti dell'assieme inferiore.

Componente	Materiale	
	Scelta 1	Scelta 2
Flangia principale	Alluminio 6082 T6	Alluminio 6082 T6
Viti di regolazione	Alluminio 6082 T6	Ottone
Elemento cedevole	Alluminio 6082 T6	Alluminio 6082 T6

Come ultima verifica effettuo il calcolo delle contrazioni termiche in direzione verticale.

Per eseguire questi calcoli possiamo ipotizzare quanto segue:

- in prima approssimazione, posso considerare che la regione di spazio compresa tra il top plate e la piastra superiore del discendente sia tutta a 4.2 K invece di considerare il gradiente di temperatura presente tra la zona in cui vi è elio liquido ed il top plate, questo perché i componenti che considero “vedono” la stessa temperatura. Così facendo considero il caso in cui si hanno le massime contrazioni, quindi il caso peggiore;
- la prima ipotesi mi consente, inoltre, di poter affermare a priori che la differenza tra le contrazioni differenziali ottenute per gli elementi considerati sarà piccola

in quanto i valori integrati di $\int_4^{293} dl/l$ per i materiali in esame sono quasi uguali (vedi *Tabella 3*).

Anche in questo caso, suddivido l'insieme in due parti:

- la parte superiore che comprende i componenti tra il top plate e la piastra superiore del discendente, in cui la capsula in vetronite è vincolata (*Figura 40*);
- la parte inferiore che comprende i componenti tra la piastra superiore del discendente e la piastra inferiore del discendente, per determinare il gioco minimo, da lasciare tra elemento cedevole e flangia principale, tale da garantire una traslazione senza vincoli (*Figura 41*).

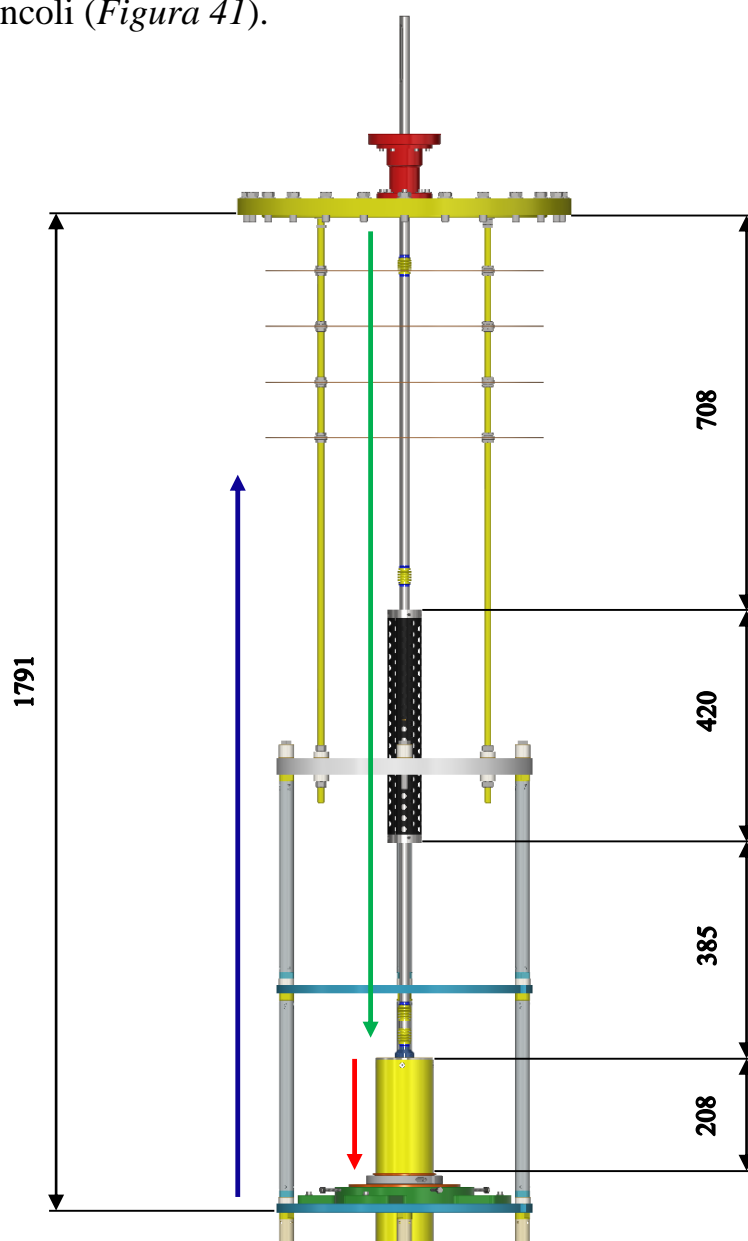


Figura 40. Schema raffigurante gli elementi considerati, le quote d'interesse ed i versi delle contrazioni.

In *Figura 40* sono rappresentati i versi delle contrazioni termiche subite dai componenti presi in esame considerando i punti in cui sono vincolati. Nella parte superiore ho considerato i seguenti elementi:

- le barre filettate: consentono di collegare il discendente al top plate, a cui sono avvitate. Contraendosi tutta la struttura viene tralata nel verso indicato dalla freccia di colore blu;
- la capsula in vetronite: essendo fissata dal sistema di bloccaggio presente su una delle piastre intermedie del discendente può essere considerata vincolata in questo punto, di conseguenza la contrazione termica subita avrà il verso indicato dalla freccia di colore rosso;
- l'insieme composto dai due alberi di connessione con soffietti compensatori e dal carter di protezione/connessione: essendo fissato alla shaft di misura, a sua volta connessa alla capsula, a seguito del raffreddamento subirà una contrazione verso il basso, indicata dalla freccia color verde;

Ricordando le ipotesi precedentemente espote ed i valori riportati in *Tabella 3*, posso calcolare le contrazioni che i vari elementi subiscono a causa del raffreddamento.

Facendo riferimento alle quote presenti in *Figura 40* ed all'*Equazione 8*, il sistema di barre filettate e di colonnine in acciaio inox austenitico AISI 304 subiscono una contrazione pari a:

$$\Delta l = \alpha \Delta T l \rightarrow \Delta l_{BF} = (331 * 10^{-5}) * 1791 = 5.928 \text{ mm}$$

Per quanto riguarda l'insieme composto dai due alberi di connessione con soffietti compensatori e dal carter in acciaio inox austenitico AISI 304, si ottiene una contrazione di:

$$\Delta l_{AC} = (331 * 10^{-5}) * (708 + 420 + 385) = 5.008 \text{ mm}$$

Parlando del tubo in vetronite, esso presenta una lunghezza di 208 mm tra l'estremità superiore ed il punto in cui è serrato dall'elemento cedevole, dunque, si contrae di:

$$\Delta l_T = (326 * 10^{-5}) * 208 = 0.678 \text{ mm}$$

La contrazione totale subita dall'insieme composto è data dalla somma di questi due contributi:

$$\Delta l_{TOT} = 5.008 + 0.678 = 5.686 \text{ mm}$$

Per determinare la contrazione differenziale tra le barre filettate e l'assieme composto dagli altri elementi considerati eseguo la differenza:

$$\Delta = \Delta l_{BF} - \Delta l_{TOT} \rightarrow \Delta = 5.928 - 5.686 = 0.242 \text{ mm}$$

Questo risultato rispecchia ciò che mi aspettavo in quanto i valori integrati di $\int_4^{293} dl/l$ per acciaio inox e G10 sono quasi uguali.

Avere una differenza pari a 0.242 mm significa che il sistema di barre filettate e colonnine subiscono una contrazione maggiore rispetto a quella subita dall'assieme composto dagli alberi di connessione + carter e capsula, di conseguenza tutta la struttura collegata a tale piastra trasla verso il top plate. Questo valore non pone problemi di funzionamento in quanto possiamo pensare che venga assorbita dai soffietti compensatori presenti nell'albero di connessione alla shaft.

Di seguito è riportato lo schema che riguarda la parte inferiore in cui ho suddiviso l'assieme:

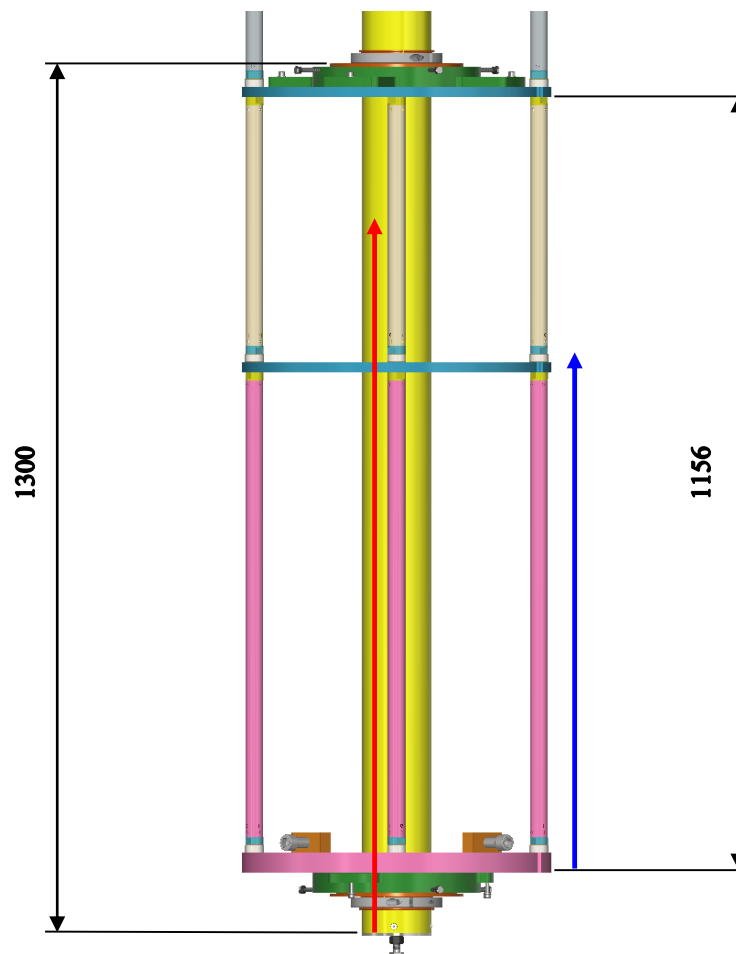


Figura 41. Schema raffigurante gli elementi considerati, le quote d'interesse ed i versi delle contrazioni.

In questo caso, invece, la verifica delle contrazioni differenziali è di fondamentale importanza ai fini della valutazione del gioco da lasciare al momento dell'assemblaggio tra l'elemento cedevole e la flangia principale e per capire quanto più larga deve essere la gola nella quale agiscono le viti di regolazione per l'allineamento dello strumento di misura. Tale gioco è indispensabile per consentire al tubo di contrarsi senza avere vincoli che potrebbero compromettere la sua integrità. Ricordando le osservazioni precedentemente esposte ed i valori riportati in *Tabella 3*, posso calcolare le contrazioni che i vari elementi subiscono a causa del raffreddamento. Facendo riferimento alle quote presenti in *Figura 41* ed all'*Equazione 8*, le colonnine in acciaio inox austenitico AISI 304 che collegano la piastra intermedia del discendente a quella inferiore subiscono una contrazione pari a:

$$\Delta l_{BF} = (331 * 10^{-5}) * 1156 = 3.826 \text{ mm}$$

Per quanto riguarda, invece, il tubo in vetronite, esso presenta una lunghezza di 2087 mm tra il punto in cui è serrato dall'elemento cedevole e l'estremità inferiore, dunque, si contrae di:

$$\Delta l_T = (326 * 10^{-5}) * 1300 = 4.238 \text{ mm}$$

La contrazione differenziale che si ottiene tra i due elementi considerati è data dalla differenza tra i valori ricavati:

$$\Delta = \Delta l_{BF} - \Delta l_T \rightarrow \Delta = 3.826 - 4.238 = - 0.412 \text{ mm}$$

Anche in questo caso, il risultato rispecchia ciò che mi aspettavo in quanto i valori integrati di $\int_4^{293} dl/l$ per acciaio inox e G10 sono quasi uguali.

Avere una differenza pari a 0.412 mm (in valore assoluto) significa che le colonnine subiscono una contrazione leggermente inferiore rispetto a quella subita dal tubo in vetronite, di conseguenza devo poter consentire la traslazione verticale del tubo rispetto alla piastra inferiore del discendente. Ciò viene realizzato attraverso un'accortezza da osservare al momento dell'assemblaggio: si tratta, infatti, di lasciare 2 mm di gioco (in modo tale da avere del margine) tra l'elemento cedevole, serrato attorno alla capsula, e la flangia principale, fissata alla piastra inferiore. Tale gioco deve essere lasciato anche nella gola dell'elemento cedevole in cui agiscono le viti di regolazione.

6.III.b Calcolo degli scambi di calore

Finita la fase di calcolo delle contrazioni termiche e di progettazione del sistema di fissaggio dell'apparato di misure magnetiche, sono passato al calcolo della potenza termica scambiata sia per conduzione e sia per irraggiamento al bagno di elio liquido. Infatti, una volta riempito il criostato di elio liquido fino al livello massimo prestabilito, inizia la sua evaporazione naturale a causa di due motivi principali:

- introduzione di potenza termica per conduzione attraverso elementi che fungono da ponti termici tra l'ambiente e l'interno del criostato;
- introduzione di potenza termica per irraggiamento a causa del non perfetto isolamento termico del criostato.

La determinazione della potenza termica scambiata costituisce un dato molto importante per poter valutare quanto evaporato di elio si forma per ora di attività e di conseguenza per poter stimare l'autonomia oraria di test prima di dover reintrodurre elio liquido all'interno del criostato.

Di seguito sono riportati i calcoli suddivisi in due parti:

1. una prima parte di validazione delle assunzioni fatte e di verifica dei consumi misurati durante il test di un magnete correttore (dodecapolo);
2. una seconda parte di previsione dei consumi dovuti alla potenza termica aggiuntiva che viene introdotta nel bagno di elio liquido a causa dello strumento per le misure magnetiche.

Verifica dei consumi misurati:

Potenza termica trasmessa per conduzione:

La conduzione è il trasferimento di energia che si verifica per effetto dell'interazione delle particelle di una sostanza dotate di maggiore energia con quelle adiacenti dotate di minor energia.

La potenza termica trasmessa per conduzione è data dalla legge di Fourier [16]:

$$\dot{Q} = \frac{A}{L} \int_{T_c}^{T_h} \lambda dT$$

Equazione 12

dove λ indica la conducibilità termica caratteristica del materiale misurata in $[W/mK]$, T_c indica il valore a più bassa temperatura mentre T_h quello a più alta temperatura, entrambe in $[K]$. Ragionando in termini monodimensionali, A indica l'area perpendicolare al flusso di calore ed L rappresenta lo spessore dell'elemento considerato.

La trasmissione di calore in un liquido o in un gas è dovuta allo scambio di energia cinetica tra molecole dotate di moto casuale ma anche di moti vibratorii e rotazionali. Nei solidi la trasmissione di calore per conduzione è dovuta alle vibrazioni delle molecole all'interno del reticolo ed al trasporto di energia da parte degli elettroni liberi [16].

In *Tabella 13* sono riportati i valori integrati della conducibilità termica λ per i più comuni materiali utilizzati in ambito criogenico:

Tabella 13. Valori integrati della conducibilità termica [16].

T [K]	Rame ETP [W cm ⁻¹]	Alluminio 1100 [W cm ⁻¹]	Acciaio inox aust. [W cm ⁻¹]	Vetro [mW cm ⁻¹]	PTFE [mW cm ⁻¹]	G10 Composito [mW cm ⁻¹]	Grafite [W cm ⁻¹]
10	33.2	6.1	0.0293	6.81	4.4	0.31	0.025
20	140	27.6	0.163	20.2	16.4	1.56	0.15
30	278	59.2	0.424	36.8	32.3	4.23	0.48
40	406	96.2	0.824	58.6	50.8	9.04	1.1
50	508	134	1.35	84.6	71.6	17.1	2.9
60	587	170	1.98	115	93.6	29.3	4.6
70	651	202	2.70	151	116	48.4	6.9
80	707	232	3.49	194	139	67.5	9.8
90	756	258	4.36	240	163		13
100	802	284	5.28	292	187	130	22
120	891	330	7.26	408	237		32
140	976	376	9.39	542	287		45
160	1060	420	11.7	694	338		59
180	1140	464	14.1	858	390		74
200	1220	508	16.6	1030	442	900	99
250	1420	618	23.4	1500	572		133
300	1620	728	30.6	1990	702	2650	251

Nella *Figura 42* viene riportato uno schema semplificato del criostato con le quote d'interesse utilizzate per i calcoli:

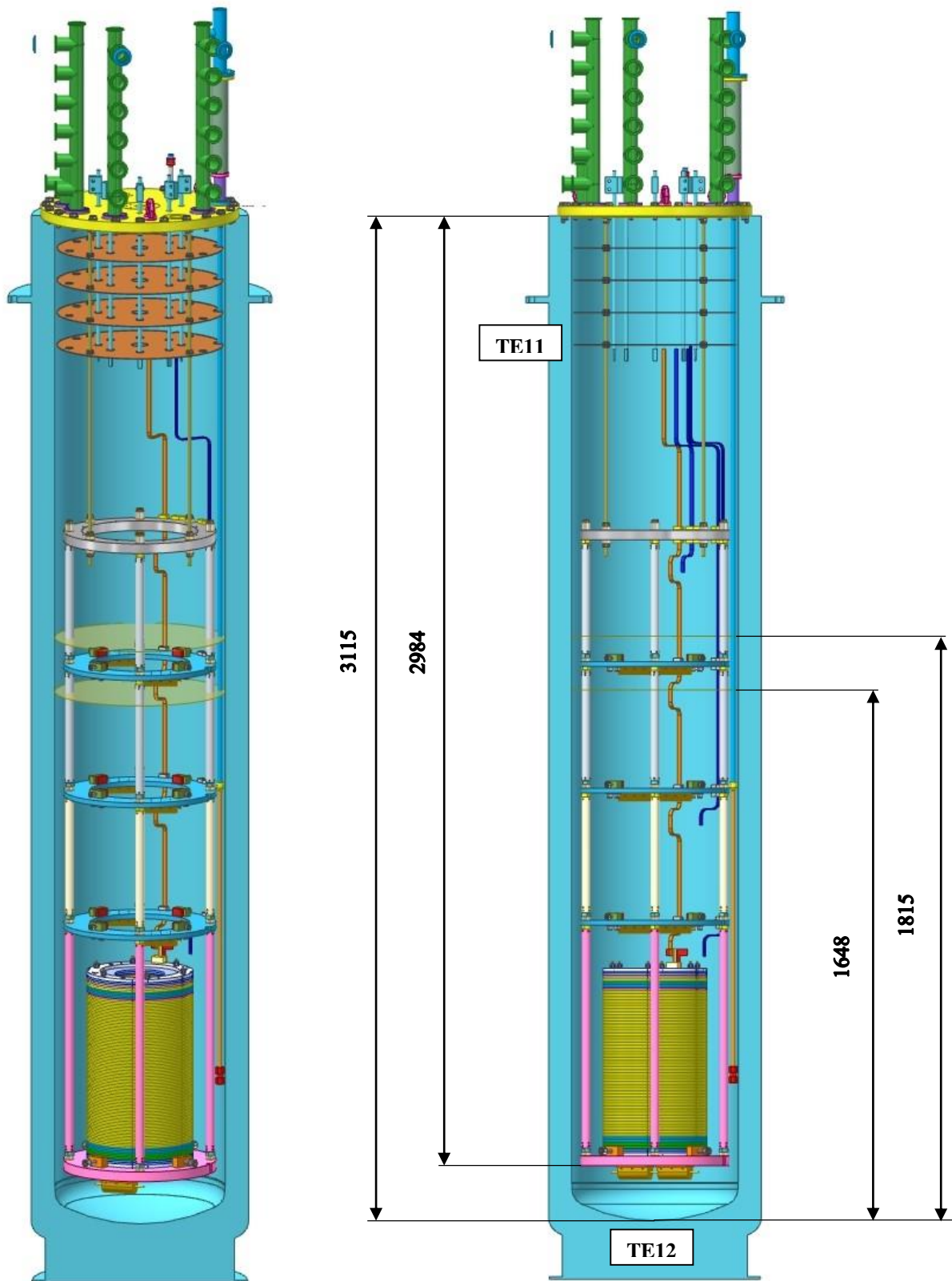


Figura 42. Schema semplificato del test eseguito con relative quote d'interesse ed indicazioni sulla posizione delle sonde di temperatura considerate.

Tabella 14. Dati riepilogativi del test effettuato.

Livello He misurato LI₂ inizio test [mm]	645
Livello He misurato LI₂ fine test [mm]	478
Durata test [ore]	3.75
Consumo di He misurato [l/ora]	10.5
Temperatura schermo termico TE11 inizio test [K]	140
Temperatura schermo termico TE11 fine test [K]	140
Temperatura schermo termico TE12 inizio test [K]	220
Temperatura schermo termico TE12 fine test [K]	190

Calcolo la potenza termica trasmessa per conduzione attraverso le 4 barre filettate all'interno del criostato nel bagno di elio liquido. Le ipotesi che farò nel seguito saranno tutte semplificative in quanto non ho a disposizione dati a sufficienza per poter valutare la reale distribuzione della temperatura all'interno del criostato.

In base a quanto riportato in *Tabella 14* il livello di elio liquido misurato ad inizio test dal misuratore di livello LI₂ era pari a 645 mm mentre quello rilevato a fine test era pari a 478 mm. Per comodità di ragionamento, decido di convertirlo in altezza dal fondo del criostato utilizzando i dati riportati in *Figura 43*:

Per 1620 mm dal fondo corrisponde un valore misurato da LI₂ di 450 mm quindi:

$$1620 + (645 - 450) = 1815 \text{ mm dal fondo ad inizio test}$$

$$1620 + (478 - 450) = 1648 \text{ mm dal fondo a fine test}$$

Supponendo per semplicità di avere le barre filettate che dal top plate arrivano fino alla piastra inferiore del discendente e di utilizzare come livello di He la media tra i due valori appena calcolati, allora la lunghezza d'interesse è pari a:

$$L_{BF} = 3115 - \left(\frac{1815 + 1648}{2} \right) = 1383 \text{ mm}$$

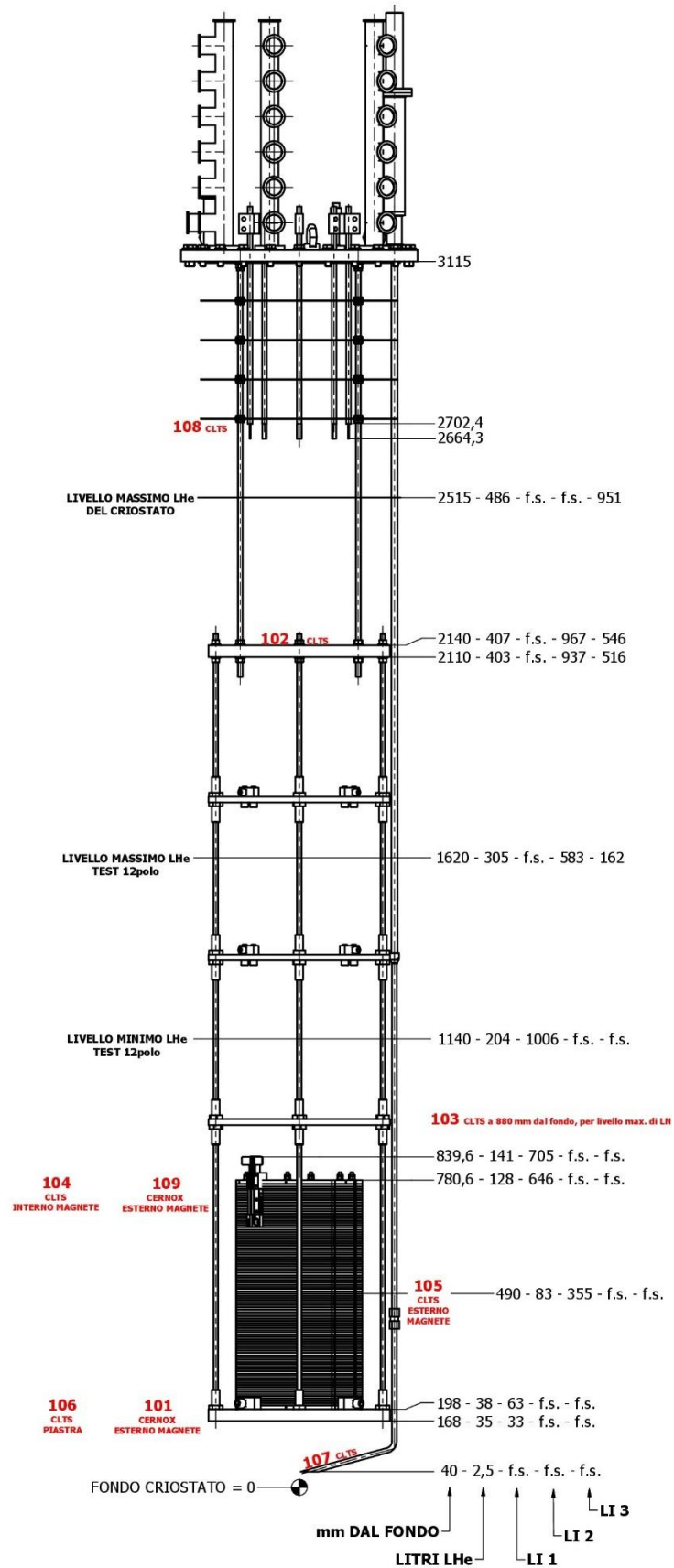


Figura 43. Configurazione di test del dodecapolo con indicazioni sui livelli di elio liquido dal fondo e valori misurati dalle tre sonde di livello.

Tabella 15. Caratteristiche delle 4 barre filettate e temperature estreme.

Materiale	Acciaio inox austenitico 304
Diametro di nocciolo [mm]	11.546
Lunghezza [mm]	1383
T_c [K]	10
T_h [K]	300

Essendo le barre filettate a sezione circolare, l'area perpendicolare al flusso termico può essere calcolata attraverso:

$$A = \frac{\pi}{4} D^2 \rightarrow A = \frac{\pi}{4} 1.1546^2 = 1.047 \text{ cm}^2 \quad \text{Equazione 13}$$

Facendo riferimento alla Tabella 13, ricavo il valore integrato della conducibilità termica rispetto alle temperature d'interesse:

$$\int_{10}^{300} \lambda dT = 30.60 - 0.0293 = 30.5707 \text{ W/cm}$$

La potenza termica scambiata per conduzione attraverso una barra filettata è data dall' $Q = \frac{A}{L} \int_{T_c}^{T_h} \lambda dT$:

$$\dot{Q}_{1BF} = \frac{1.047}{138.3} * 30.5707 = 0.231 \text{ W}$$

Essendo 4 le barre filettate, la potenza termica totale trasmessa attraverso questi 4 elementi risulta:

$$\dot{Q}_{4BF} = 0.231 * 4 = 0.924 \text{ W}$$

Risulta nota la potenza termica trasmessa per conduzione attraverso i 2 adduttori di corrente a pieno carico, nel bagno di elio liquido:

$$\dot{Q}_{AC} = 0.6 * 2 = 1.2 \text{ W}$$

La potenza termica trasmessa per conduzione, tenuto conto anche di questo contributo, risulta:

$$\dot{Q}^I = \dot{Q}_{4BF} + \dot{Q}_{AC} \rightarrow \dot{Q}^I = 0.924 + 1.2 = 2.124 \text{ W}$$

Considero anche il calore che viene trasmesso per conduzione al bagno di elio nella zona in cui lo schermo in rame è saldato alla virola interna del criostato. Dai dati forniti dalle sonde di temperatura fissate allo schermo otteniamo una temperatura di 140 K che supponiamo costante. Considero che il calore proveniente dal top plate in funzione del salto di temperatura, tra l'ambiente esterno e 140 K, venga assorbito dal gas di elio che si scalda sulla parte superiore. Invece, da 140 K fino a 4.2 K del bagno di elio liquido, si ottiene il valore integrato della conducibilità termica che vale, da *Tabella 13*:

$$\int_{10}^{140} \lambda dT = 9.39 - 0.0293 = 9.3607 \text{ W/cm}$$

In questo caso l'area della corona circolare è data dalla seguente relazione:

$$A = \frac{\pi}{4} (52^2 - 51.4^2) = 48.73 \text{ cm}^2$$

Mentre la lunghezza da considerare è data dalla differenza di quota tra la saldatura dello schermo ed il livello di elio liquido, ovvero $L = (3115 - 329) - 1732 = 1054 \text{ mm}$. La potenza termica scambiata per conduzione attraverso la saldatura dei due elementi è data dall'*Equazione 11*:

$$\dot{Q}_s = \frac{48.73}{105.4} * 9.3607 = 4.328 \text{ W}$$

La potenza termica totale trasmessa per conduzione, tenuto conto anche di questo contributo, risulta:

$$\dot{Q}_{TOT_COND} = \dot{Q}^I + \dot{Q}_s \rightarrow \dot{Q}_{TOT_COND} = 2.124 + 4.328 = 6.452 \text{ W}$$

Potenza termica trasmessa per irraggiamento:

L'irraggiamento è il trasferimento di energia che avviene attraverso le onde elettromagnetiche prodotte da variazioni nelle configurazioni elettroniche degli atomi o molecole. Non richiede la presenza di un mezzo interposto diversamente dalla conduzione e convezione, avviene alla velocità della luce e non subisce attenuazioni nel vuoto.

La potenza termica netta scambiata per irraggiamento tra due superfici è data dalla legge di Stefan-Boltzmann [16]:

$$\dot{Q} = \sigma \varepsilon A (T_h^4 - T_c^4)$$

dove A è l'area della superficie, $\sigma = 5.67 * 10^{-8} W/m^2K^4$ è la costante di Stefan-Boltzmann, ε è l'emissività della superficie ($0 \leq \varepsilon \leq 1$) mentre T_h e T_c sono le due temperature assolute.

Come già anticipato nel *Capitolo 5*, il contenitore interno del criostato è isolato rispetto a quello esterno interponendo tra i 2 uno schermo in rame, raffreddato per conduzione. Facendo riferimento alla *Figura 17*, si può notare la presenza di due camere a vuoto che permettono un migliore isolamento termico rispetto all'ambiente esterno. In queste due intercapedini è presente un isolamento multi-strato (MLI), ovvero schermi riflettenti interposti tra superficie calda e superficie fredda che riducono effettivamente il flusso termico per irraggiamento tra due superfici, costituiti da un insieme di film riflettenti (alluminio) separati da spaziatori isolanti (fibra di vetro) in modo tale che i punti in cui si verifica scambio termico per conduzione siano pochi [9].

Supponendo la stessa emissività delle due superfici affiancate e di avere n schermi, si dimostra che il flusso termico viene ridotto di un fattore $(n + 1)$.

Il criostato nella test station presenta 24 strati di MLI tra virola esterna e schermo in rame e 15 strati di MLI tra virola interna e schermo in rame.

Nel caso di sfere o cilindri interfacciati, con $A_1 < A_2$, vale [16]:

$$E = \frac{\varepsilon_1 * \varepsilon_2}{\varepsilon_2 + \frac{A_1}{A_2} * (1 - \varepsilon_2) * \varepsilon_1}$$

dove A_1 e A_2 sono le superfici attraverso cui si ha il passaggio di potenza termica e ε_1 e ε_2 le rispettive emissività.

Posso quindi calcolare le superfici laterali dei 3 elementi che si interfacciano rappresentati in *Figura 42*:

$$A = \pi * D * L$$

$$A_I = \pi * D_I * L \rightarrow A_I = \pi * 0.520 * 1.732 = 2.829 m^2$$

$$A_R = \pi * D_R * L \rightarrow A_R = \pi * 0.569 * 1.732 = 3.096 m^2$$

Nella *Tabella 16* sono riportati i valori di emissività di alcuni materiali in base alla temperatura ed al grado di finitura superficiale, utili per il calcolo dell'emissività

risultante:

Tabella 16: Valori di emissività dei materiali in funzione della temperatura e del grado di finitura superficiale [16].

	Irraggiamento da 290 K a 77 K	Irraggiamento da 77 K a 4.2 K
Acciaio inox grezzo	0.34	0.12
Acciaio inox lucidato mecc.	0.12	0.07
Acciaio inox lucidato elettr.	0.10	0.07
Acciaio inox + foglio alluminio	0.05	0.01
Alluminio grezzo	0.12	0.07
Alluminio lucidato mecc.	0.10	0.06
Alluminio lucidato elettr.	0.08	0.04
Rame grezzo	0.12	0.06
Rame lucidato mecc.	0.06	0.02

Considero, la potenza termica trasmessa per irraggiamento tra lo schermo in rame ed il contenitore interno, quindi calcolo l'emissività risultante con l'Equazione 15:

$$E_{RI} = \frac{\varepsilon_I * \varepsilon_R}{\varepsilon_R + \frac{A_I}{A_R} * (1 - \varepsilon_R) * \varepsilon_I}$$

$$E_{RI} = \frac{0.12 * 0.06}{0.06 + \frac{2.826}{3.096} * (1 - 0.06) * 0.12} = 0.0444$$

Essendo $\varepsilon_R = 0.06$ e $\varepsilon_I = 0.12$ i valori di emissività ricavati da *Tabella 16*.

Dato che le temperature dei due sensori TE11 e TE12 sono molto diverse tra di loro, considero una media delle temperature riportate in *Tabella 14*:

$$T = \frac{\left(\frac{140 + 140}{2}\right) + \left(\frac{220 + 190}{2}\right)}{2} = 170 \text{ K}$$

Sapendo quindi che la temperatura dello schermo in rame vale circa 170 K e che la temperatura interna vale 4.2 K, calcolo la potenza termica attraverso l'Equazione 14:

$$\dot{Q} = 5.67 * 10^{-8} * 0.0444 * 2.829 * (170^4 - 4.2^4) = 5.895 \text{ W}$$

Dato che tra le due pareti è interposto un isolamento multi strato MLI costituito da 15

fogli di Mylar, per le considerazioni precedentemente esposte, la potenza termica trasmessa per irraggiamento tra questi due elementi vale:

$$\dot{Q}_{LAT_INT} = \frac{\dot{Q}}{n + 1} \rightarrow \dot{Q}_{LAT_INT} = \frac{5.895}{15 + 1} = 0.368 \text{ W}$$

Un altro contributo da considerare per l'irraggiamento è dato dalla potenza termica trasmessa dal top plate fino al bagno di elio liquido. In questo caso devo considerare la presenza dei dischi di rame presenti nella parte alta del discendente quindi nei calcoli utilizzo la temperatura fornita dalla sonda presente sul disco più vicino al bagno di elio liquido. Considero inoltre, il fatto che i dischi di rame presentano un diametro esterno di 500 mm mentre il vessel interno è di 514 mm di conseguenza una parte di radiazione finisce direttamente nel bagno di elio senza essere schermata dai dischi.

Calcolo l'area della regione di spazio tra la virola interna ed i dischi di rame:

$$A = \frac{\pi}{4} (0.514^2 - 0.500^2) = 0.01115 \text{ m}^2$$

Da *Tabella 16* ricavo i valori di emissività dell'acciaio inox austenitico lucidato meccanicamente che vale:

$$\varepsilon_{290K \div 4.2K} = 0.12 + 0.07 = 0.19$$

Considerando come temperatura del top plate $T = 273 \text{ K}$ perché durante il test si forma ghiaccio sulla superficie, il primo contributo della potenza termica trasmessa per irraggiamento attraverso il top plate vale:

$$\dot{Q}_{TOP_PLATE} = 5.67 * 10^{-8} * 0.19 * 0.01115 * (273^4 - 4.2^4) = 0.667 \text{ W}$$

La potenza termica totale trasmessa per irraggiamento risulta:

$$\dot{Q}_{TOT_IRR} = \dot{Q}_{TOP_PLATE} + \dot{Q}_{LAT_INT}$$

$$\dot{Q}_{TOT_IRR} = 0.667 + 0.368 = 1.035 \text{ W}$$

La potenza termica totale trasmessa al bagno di elio liquido per conduzione e per irraggiamento è data dalla somma dei due contributi:

$$\dot{Q}_{TOT} = \dot{Q}_{TOT_COND} + \dot{Q}_{TOT_IRR} \rightarrow \dot{Q}_{TOT} = 6.452 + 1.035 = 7.487 \text{ W}$$

Sapendo che vale la relazione:

Equazione 17

$$1 W = 1.4 \text{ l}_{He}/\text{ora}$$

La potenza termica appena calcolata causa un'evaporazione oraria di elio pari a:

$$X_{He} = 7.487 * 1.4 = 10.48 \text{ l}_{He}/\text{ora}$$

Da *Figura 43* *Figura 21* è possibile ricavare una relazione che esprime l'equivalenza tra litri e millimetri di elio liquido all'interno del criostato. Supponendo di avere solo il discendente all'interno del criostato, considero due punti riassunti nella *Tabella 17*:

Tabella 17. Dati riguardanti i punti considerati per l'equivalenza tra litri di elio liquido e millimetri.

A	B
2110 mm	1620 mm
408 l _{He}	305 l _{He}

Con i dati di *Tabella 17* posso calcolare quanto segue:

Equazione 18

$$\frac{2110 - 1620}{408 - 305} = 4.76 \text{ mm}_{He}/\text{l}_{He}$$

Calcolo, quindi, quanti millimetri di elio liquido evaporano per ora di attività all'interno del criostato, a causa della potenza termica trasmessa per conduzione:

$$\Delta L_{He} = X_{He} * 4.76 \rightarrow \Delta L_{He} = 10.48 * 4.76 = 49.88 \text{ mm}_{He}/\text{ora}$$

Confronto con dati sperimentali:

Sapendo che il valore del dislivello misurato dai sensori durante il test vale:

$$\Delta L_{He_MIS} = 167 \text{ mm}_{He}$$

e che i test sono iniziati alle ore 13:00 e terminati alle ore 16:45, ovvero sono durati 3.75 ore. Posso quindi verificare se le mie stime sul consumo teorico di elio coincidono con il valore sperimentale misurato:

$$\Delta L_{He_STIM} = \Delta L_{He} * 3.75 \rightarrow \Delta L_{He_STIM} = 49.88 * 3.75 = 187 \text{ mm}_{He}$$

Il risultato ottenuto è buono e ciò conferma le assunzioni fatte ed i calcoli eseguiti. Il valore calcolato, infatti, risulta sovrastimato perché ho considerato che per tutta la durata del test, al magnete venga fornita piena corrente con una conseguente maggiore dissipazione di potenza termica nel bagno di elio liquido. In realtà, il magnete viene testato a pieno carico solo per alcuni intervalli di tempo quindi il valore ottenuto risulta molto buono. Inoltre il valore di consumo orario di elio riportato in *Tabella 14* è stato ottenuto per interpolazione lineare della curva di consumo di elio, registrata durante il test, ciò vuol dire che tale valore ha un errore intrinseco.

Previsione dei consumi aggiuntivi:

A questo punto posso calcolare la potenza termica aggiuntiva che viene trasmessa per conduzione al bagno di elio liquido attraverso lo strumento per le misure magnetiche nella stessa configurazione di test utilizzata per il dodecapolo (vedi *Figura 44*).

Supponendo di avere un unico albero che collega il motore elettrico a temperatura ambiente con la shaft di misura, si faccia riferimento alla *Tabella 18*:

Tabella 18. Caratteristiche dell'albero di connessione alla shaft di misura e temperature estreme.

Materiale	Acciaio inox austenitico 304
Diametro esterno [mm]	19
Diametro interno [mm]	16.1
Lunghezza [mm]	1513
T_c [K]	10
T_h [K]	300

Posso considerare in prima approssimazione che questo elemento sia un tubo a sezione costante, la cui area è data da:

$$A = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) \rightarrow A = \frac{\pi}{4} (1.90^2 - 1.61^2) = 0.80 \text{ cm}^2$$

Facendo riferimento alla *Tabella 13*, ricavo il valore integrato della conducibilità termica:

$$\int_{10}^{300} \lambda dT = 30.60 - 0.0293 = 30.5707 \text{ W/cm}$$

La potenza termica scambiata per conduzione attraverso l'albero di connessione alla shaft è data dall'*Equazione 11*:

$$\dot{Q}_{CS} = \frac{0.80}{151.3} * 30.5707 = 0.162 \text{ W}$$

Un'estremità dell'albero di connessione rimane nel bagno di elio liquido in base ai valori riportati in *Tabella 14*, questo vuol dire che la capsula in vetronite e la shaft di misura sono interamente a bagno di elio liquido.

Conseguentemente a ciò posso affermare che la potenza termica aggiuntiva per conduzione dovuta alla presenza dello strumento per le misure magnetiche è data dalle perdite causate dalle tenute non perfette dell'elemento con cuscinetti posto sul top plate e dal contributo appena calcolato, quindi:

$$\dot{Q}_{SIST_MIS} = \dot{Q}_{CS} = 0.162 \text{ W}$$

Ricordando l'*Equazione 17*, tale potenza provoca un'evaporazione di elio liquido pari a:

$$X_{He} = 0.162 * 1.4 = 0.227 \text{ l}_{He}/ora$$

Ovvero:

$$\Delta L_{He} = 0.227 * 4.76 = 1.08 \text{ mm}_{He}/ora$$



Figura 44. Schema dell'installazione del sistema di misure magnetiche all'interno del criostato con magneti dodecapolo in posizione.

7. Conclusioni e possibili migliore future

Le attività di upgrade della test station per i magneti correttori della serie per Hi-Lumi presso il laboratorio L.A.S.A. nel contesto del progetto MAGIX, sono già in corso. Per quanto riguarda l'integrazione del sistema di misure magnetiche alla struttura esistente, entro il mese di febbraio si terrà la presentazione del progetto da me effettuato. Nel caso in cui non dovessero essere riscontrati problemi tecnici, procederò alla realizzazione dei disegni costruttivi in modo tale da avere i documenti necessari per richiedere un'offerta alle ditte produttrici.

Per la seconda metà di febbraio è previsto il primo test del quadrupolo in occasione del quale si eseguiranno solamente i test descritti nel *Capitolo 5.III* mentre in occasione del secondo test, durante l'estate, verranno eseguite per la prima volta le misurazioni di campo magnetico. Ciò consentirà di testare la procedura per l'installazione dello strumento di misura nel discendente ed i supporti da me progettati una volta ultimato il raffreddamento in elio liquido. Inoltre, fornirà importanti feedback da analizzare per l'esecuzione di eventuali modifiche da apportare alla struttura per avere il sistema pronto a fine anno per testare i magneti della serie con la sonda di misura definitiva.

Per quanto riguarda le previsioni sui consumi di elio, per avere un profilo di temperatura definito lungo la coordinata verticale del criostato, proporrò di installare qualche sonda di temperatura in più in punti strategici dell'insieme in modo tale da poter affinare il modello di calcolo realizzato ed ottenere stime migliori. Inoltre, in previsione dei test per i magneti della serie, date le configurazioni riportate in *Figura 43*, occorre considerare ulteriori elementi: i current leads che alimenteranno i magneti saranno 5, i quali costituiranno 5 ponti termici (a differenza dei 2 current leads considerati nel caso precedente), inoltre il riempimento del criostato con elio liquido sarà maggiore e ciò comporterà un incremento della potenza termica introdotta per conduzione all'interno del bagno di elio.

8. Bibliografia

- [1] L. Bottura, K. N. Henrichsen, *Field Measurements in CAS Cern Accelerator School Superconductivity and cryogenics for accelerators and detectors*, ISBN 92-9083-230-4, CERN-2004-008, URL: <https://cds.cern.ch/record/503603/>.
- [2] M. Breschi, *Errori di Campo Magnetico*, URL: <http://campus.unibo.it/id/eprint/116635>.
- [3] A. Devred, H. Desportes, F. Kircher, C. Lesmond, C. Meuris, J. M. Rey, J. L. Duchateau, *Superconducting Magnet Technology*, in *Handbook of Cryogenic Engineering*, ISBN 1-56032-332-9, edited by J. G. Weisend II.
- [4] V. Arp, J. Hust, *Program EXPAK Thermal Expansion of 55 Solid Materials at Low Temperatures*, version 1.2, copyright by Cryodata, distributed by Horizon Technologies.
- [5] L. Fiscarelli, *Magnetic Measurements for WP3: strategy and planning*, URL: <https://indico.cern.ch/event/709777/contributions/2916191/attachments/1620496>.
- [6] Wikipedia, *Hall generator*, in *Magnetohydrodynamic generator*, URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Magnetohydrodynamic_generator#Hall_generator.
- [7] D. S. Holmes, S. S. Courts, *Cryogenic Instrumentation*, in *Handbook of Cryogenic Engineering*, ISBN 1-56032-332-9, edited by J. G. Weisend II.
- [8] Wikipedia, *Large Hadron Collider*, URL: https://it.wikipedia.org/wiki/Large_Hadron_Collider.
- [9] G. McIntosh, *Cryostat Design*, in *Handbook of Cryogenic Engineering*, ISBN 1-56032-332-9, edited by J. G. Weisend II.
- [10] MatWeb, *Online Materials Information Resource*, URL: <http://www.matweb.com>.
- [11] L. Rossi, *High-Luminosity Large Hadron Collider (HL-LHC) Preliminary Design Report*, ISBN 978-92-9083-423-6, CERN-2015-005, URL:

<https://cds.cern.ch/record/2116337/files/CERN-2015-005.pdf>.

- [12] S. Russenschuck, *Electromagnetic Design of Superconducting Accelerator Magnets*, in *CAS Cern Accelerator School Superconductivity and cryogenics for accelerators and detectors*, ISBN 92-9083-230-4, CERN-2004-008, URL: <https://cds.cern.ch/record/503603/>.
- [13] Sezione INFN di Milano Laboratorio LASA, *Relazione Tecnica – Criostato Criotec matr. 16011 Esperimento MAGIX*.
- [14] M. Sorbi, M. Statera, *Technical Specification for the production of 54 superconducting magnets High Order Correctors for the High Luminosity upgrade of LHC (HL-LHC)*, URL: <https://servizi-dac.infn.it/index.php/gestioneavvisi/downloadAllegato/094e810e-2fec-4607-af92-32398e7ddf82;1.0/7614270660-Allegato4-Capitolato%20tecnico.pdf>.
- [15] A. W. Chao, M. Tigner, *Handbook of Accelerator Physics and Engineering*, 2nd Printing, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., ISBN 9810235005.
- [16] G. Vandoni, *Heat Transfer*, in *CAS Cern Accelerator School Superconductivity and cryogenics for accelerators and detectors*, ISBN 92-9083-230-4, CERN-2004-008, URL: <https://cds.cern.ch/record/503603/>.