



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in INGEGNERIA MECCANICA

A.a. 2022/2023

Sessione di Laurea Luglio 2023

**Verifica delle funzionalità e ottimizzazione
di un sistema di slitte per il controllo
dell'accettanza dello spettrometro
nell'esperimento di fisica nucleare
NUMEN**

Relatore:

Carlo Ferraresi (DIMEAS)

Candidata:

Ginevra Grossi

Correlatori:

Carlo De Benedictis (DIMEAS)

Daniela Calvo (INFN)

Diego Sartirana (INFN)

Indice

1	Il progetto NUMEN	3
1.1	Teoria alla base del progetto NUMEN	3
1.2	Descrizione del progetto NUMEN	5
1.3	Aggiornamento e integrazione dei nuovi dispositivi	7
2	Studio del sistema camera slitte	17
2.1	Caratteristiche del nuovo sistema	18
2.1.1	La regolazione dell'accettanza	19
2.1.2	Le slitte mobili	20
2.1.3	La scelta dei materiali	22
2.1.4	Il nuovo sistema di movimentazione	26
2.2	Procedura di montaggio	32
3	Test preliminari e ottimizzazione del sistema	43
3.1	Circuito di controllo del sistema di movimentazione	43
3.2	Valutazione degli ingombri effettivi	47
3.3	Simulazione del funzionamento in alto vuoto	51
3.4	Realizzazione dei tappi per il trasporto delle slitte	54
3.5	Test di movimentazione delle slitte	59
4	Funzionalità ed ottimizzazione del sistema	64
4.1	La macchina di misura a coordinate	64
4.2	Descrizione delle procedure di misura	68
4.2.1	Procedura di misura per le slitte e le pepperpot	70
4.2.2	Procedura di misura per lo schermo fisso	71
4.2.3	Procedura di misura per la camera	73
4.3	Analisi dei risultati	75
4.3.1	Test su slitte mobili e pepperpot	75

4.3.2	Test sullo schermo fisso	84
4.3.3	La modifica dello schermo fisso	86
4.3.4	Test sulla camera	88
4.3.5	Calibrazione preliminare del sistema	90
4.3.6	Calibrazione finale del sistema	97
Riferimenti bibliografici		102
A Circuito elettrico		104
B Messa in tavola		105

Introduzione

Il seguente lavoro di tesi si inserisce nel progetto di ricerca sperimentale NUMEN e si pone l'obiettivo di studiare, ottimizzare e verificare le funzionalità del sistema di slitte che esegue il controllo dell'accettanza dello spettrometro MAGNEX. L'esperimento di fisica nucleare NUMEN è stato sviluppato dall'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN) ed è finalizzato allo studio di particolari reazioni di doppio scambio di carica tra ioni pesanti al fine di ricavare informazioni rilevanti per lo studio del doppio decadimento beta senza neutrini, il quale rappresenta il miglior strumento per determinare la natura del neutrino. Il progetto prevede il rinnovamento e l'ampliamento dell'infrastruttura di ricerca preesistente presso i Laboratori Nazionali del Sud (LNS) di Catania. Infatti, l'utilizzo di fasci di ioni con intensità molto elevate ha richiesto la progettazione e l'integrazione meccanica di nuovi dispositivi e la gestione dei problemi legati all'aumento delle radiazioni. Numerosi ricercatori ed enti esterni collaborano all'esperimento, tra cui il Politecnico di Torino che si occupa di studiare e sviluppare componentistica meccanica utile al funzionamento dell'apparato. Durante l'attività di tesi è stato studiato nello specifico il sistema camera slitte. Dapprima sono state analizzate le caratteristiche di questo nuovo sistema, descrivendo i componenti principali, la loro funzione e in che modo viene effettuata la regolazione dell'accettanza. In secondo luogo, è stata stilata una dettagliata procedura di montaggio per facilitare il lavoro di coloro che si occuperanno dell'installazione del sistema presso Catania. Successivamente è stato analizzato il sistema di movimentazione delle slitte con il relativo circuito elettrico di controllo ed è stata condotta un'attività preliminare di movimentazione con l'obiettivo di verificare l'affidabilità dei collegamenti che consentono la trasmissione del moto. Segue una descrizione delle soluzioni applicate laddove siano stati rilevati problemi di interruzione del moto. Inoltre, poiché il sistema di slitte lavorerà in alto vuoto, è stato effettuato un test per simulare una simile condizione al fine di valutare la bontà delle tenute e del montaggio eseguito. Sono stati poi realizzati dei dispositivi per la protezione delle slitte in previsione della loro spedizione dalla sezione di Torino ai LNS di Catania. In seguito, un'importante attività di controllo è stata svolta per verificare la precisione con cui sono stati realizzati i componenti principali del

sistema in esame. L'ispezione dimensionale e geometrica è stata eseguita mediante la macchina di misura a coordinate (CMM) installata presso il laboratorio della sezione di Torino dell'INFN. L'analisi dei risultati aveva l'obiettivo sia di accertare il rispetto delle tolleranze definite in fase di progetto, sia di risolvere i problemi legati ai difetti rilevati e che avrebbero compromesso il corretto funzionamento del sistema durante l'esperimento. Infine, sono state eseguite delle prove per valutare l'effettivo posizionamento delle slitte nella camera e, di conseguenza, effettuare la calibrazione dei sistemi di attuazione.

Capitolo 1

Il progetto NUMEN

Il progetto NUMEN (NUclear Matrix Elements for Neutrinoless double beta decay) nasce con l'obiettivo di determinare le probabilità di transizione nucleare che caratterizzano il processo di doppio decadimento beta senza neutrini ($0\nu\beta\beta$) mediante opportune reazioni nucleari di doppio scambio di carica (DCE). In particolare, lo scopo è quello di misurare le sezioni d'urto assolute delle reazioni HI – DCE (Heavy – Ion Double Charge Exchange) indotte tramite fasci di ioni pesanti, a diverse energie incidenti, su isotopi specifici di interesse per il decadimento $0\nu\beta\beta$. Nel caso in cui si osservasse il doppio decadimento beta senza neutrini si dimostrerebbe che il neutrino e la sua antiparticella coincidono. Ciò dimostrerebbe che il neutrino è una particella di Majorana, e non di Dirac come afferma l'attuale “modello standard”. Tale risultato aprirebbe nuove frontiere nello studio delle particelle elementari, conducendo allo sviluppo di una nuova “Teoria Unificata”.

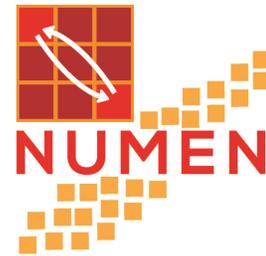


Figura 1.1: Logo del progetto NUMEN.

1.1 Teoria alla base del progetto NUMEN

La teoria alla base del progetto NUMEN richiama il modello teorico sviluppato agli inizi degli anni '30 dal fisico Ettore Majorana. Egli teorizzò l'esistenza di particolari particelle, dette fermioni o particelle di Majorana, le quali coincidono con la propria antiparticella. Il neutrino potrebbe essere una particella di Majorana o una particella di Dirac, la quale invece è distinguibile dalla propria antiparticella. Secondo la teoria di Dirac neutrino e antineutrino

sono due particelle distinte, con la stessa massa ma carica opposta. Al fine di verificare queste ipotesi, sono attualmente in corso numerosi esperimenti alla ricerca del doppio decadimento beta senza neutrini.

Il doppio decadimento beta è un decadimento radioattivo raro in cui un nucleo atomico decade in un altro con lo stesso numero di massa. Il doppio decadimento beta appena descritto avviene con l'emissione di due neutrini (o due antineutrini). Ad esempio, nel doppio decadimento β^- , due neutroni decadono in due protoni, con l'emissione di due elettroni e due antineutrini. Tuttavia, se i soli prodotti emessi nel processo fossero due elettroni significherebbe che neutrino e antineutrino sono la stessa particella e cioè si osserverebbe il doppio decadimento beta senza neutrini.

Tuttavia, il doppio decadimento beta senza emissione di neutrini non è mai stato osservato. Il processo è molto difficile da esplorare a causa di reazioni naturali e processi di fondo che inquinano il segnale ricercato e ne rendono difficile la rivelazione. Invece, le reazioni DCE sono più facilmente realizzabili. Quindi, la tecnica proposta da NUMEN prevede di studiare indirettamente il decadimento $0\nu\beta\beta$ mediante opportune reazioni nucleari DCE, sfruttando le analogie tra i due processi.

Una reazione DCE (Double Charge Exchange) è indotta da un proiettile "a" su un bersaglio "A" ed è un processo in cui due neutroni (protoni) del bersaglio vengono convertiti in due protoni (neutroni) e il numero di massa rimane invariato; contemporaneamente nel proiettile si verifica una transizione opposta. La descrizione più convenzionale considera il meccanismo DCE come un processo a due stadi, cioè caratterizzato da due singoli eventi di scambio di carica non correlati tra loro.

Nonostante le reazioni DCE e il decadimento $0\nu\beta\beta$ siano due processi innescati rispettivamente dall'interazione forte e debole, essi presentano rilevanti somiglianze tra loro. In entrambi i meccanismi si manifestano la coincidenza tra gli stati quantistici iniziali e finali dei nuclei coinvolti e la somiglianza formale degli operatori di transizione. Invece, una differenza tra i due processi è rappresentata dal trasferimento di più nucleoni, il quale è presente nelle reazioni DCE ed è assente nel decadimento $0\nu\beta\beta$. In pratica però è stato dimostrato che tale contributo risulta trascurabile nelle condizioni sperimentali previste nell'esperimento NUMEN, il che è interessante per la connessione tra le reazioni DCE e il decadimento $0\nu\beta\beta$. Quindi, misurando le sezioni d'urto delle reazioni DCE è possibile estrarre informazioni quantitative sugli elementi della matrice nucleare (NME) che caratterizzano l'espressione del tempo di vita del doppio decadimento beta senza neutrini. Ciò permetterebbe di valutare la massa effettiva del neutrino e quindi di stabilire se la sua natura è di Majorana o di Dirac.

1.2 Descrizione del progetto NUMEN

Gli esperimenti per l'analisi del doppio decadimento beta senza neutrini sono eseguiti presso i laboratori Nazionali del Gran Sasso, dove, grazie alla presenza di una montagna, è possibile abbattere notevolmente il fondo. Invece, le reazioni DCE vengono studiate presso le strutture dei Laboratori Nazionali del Sud dell'INFN (Fig. 1.2) a Catania, dove vengono generati i fasci di ioni.



Figura 1.2: Laboratori Nazionali del Sud presso Catania.

Negli esperimenti il ciclotrone a superconduzione accelera il fascio di ioni che viene trasportato, tramite dei magneti, fino alla sala sperimentale dove è installato l'attuale spettrometro MAGNEX (Fig. 1.3). Qui il fascio entra nella camera di scattering e colpisce il bersaglio (target), ovvero l'isotopo oggetto di studio. A questo punto gli eiettili prodotti dall'interazione fascio – target vengono indirizzati verso il rivelatore di piano focale (Focal Plane Detector FPD), il quale è costituito da un rivelatore di traiettoria, denominato tracker, riempito con isobutano a bassa pressione. Il passaggio degli ioni nel rivelatore genera dei segnali elettrici che vengono acquisiti e successivamente analizzati. Invece, gli ioni del fascio che non hanno reagito vengono deviati a fianco del rivelatore al fine di evitare danneggiamenti.

Il progetto NUMEN è nato nel 2014 con una prospettiva temporale a lungo termine ed è suddiviso in quattro fasi principali. Nel 2023 è iniziata la Fase 3 con l'installazione dei primi componenti necessari per l'aggiornamento di MAGNEX nei LNS di Catania per le campagne di misura di NUMEN. Invece, l'attività sperimentale relativa alle prime due fasi è stata già svolta.

Durante la Fase 1 è stato eseguito “L'esperimento pilota” mediante il quale sono stati rilevati i prodotti della reazione DCE ($^{18}\text{O}, ^{20}\text{Ne}$), utilizzando un fascio di ioni ^{18}O su un bersaglio

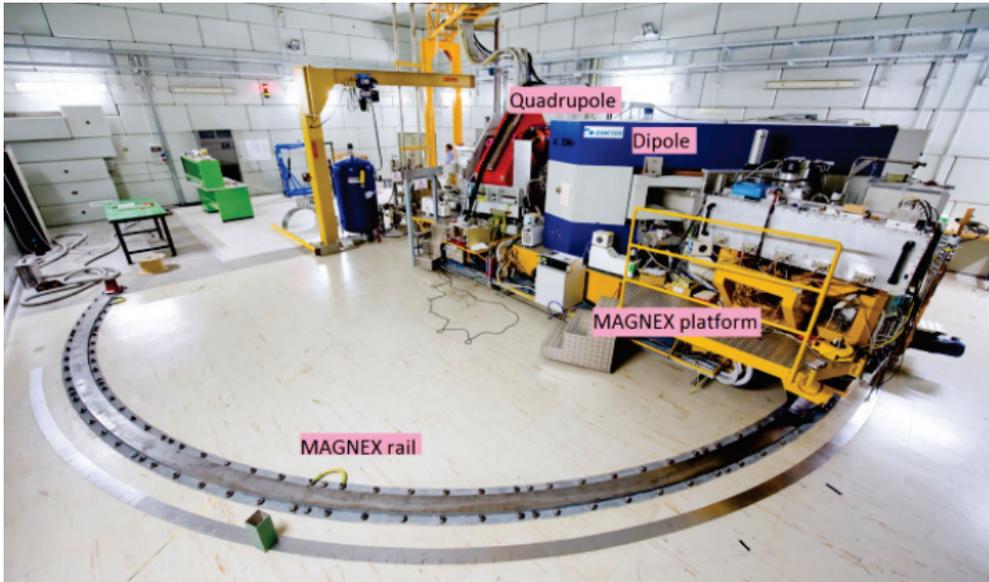


Figura 1.3: Spettrometro MAGNEX attualmente presente [4].

arricchito con l'isotopo ^{40}Ca . La realizzazione di questo test ha permesso di ottenere per la prima volta dei dati sperimentali statisticamente validi, con un'elevata risoluzione di massa, energetica ed angolare. In pratica, questa prima campagna sperimentale ha confermato che è possibile accedere ad informazioni quantitative rilevanti con misure molto accurate delle sezioni d'urto assolute. Per l'estrazione degli elementi della matrice nucleare (NME) è stata adottata l'ipotesi secondo cui il processo del doppio scambio di carica avvenga in due fasi ottenendo risultati compatibili con quelli noti in letteratura.

Nella Fase 2 il lavoro si è concentrato sull'estensione degli esperimenti verso i casi "caldi", cioè gli isotopi favorevoli per lo studio sistematico del decadimento $0\nu\beta\beta$ (ad esempio ^{116}Cd , ^{130}Te , ^{76}Ge). Presso l'attuale struttura, quindi, sono stati realizzati diversi esperimenti al fine di acquisire risultati con risoluzione energetica e spaziale adeguata. Ad esempio, la campagna sperimentale condotta con il fascio di ioni ^{20}Ne per rilevare i prodotti della reazione DCE ($^{20}\text{Ne}, ^{20}\text{O}$) sull'isotopo ^{116}Cd ha fornito risultati incoraggianti con misure piuttosto accurate della sezione d'urto. Parallelamente è stata portata avanti l'attività di R&S per aggiornare materiali, strumentazione e tecnologie per la rivelazione degli eiettili, la manipolazione del target, l'estrazione e il trasporto dei fasci. Infatti, le campagne future di prese dati prevedono l'utilizzo di fasci di ioni ad elevata intensità (tre ordini di grandezza superiore a quelli esistenti e usati nei run pilota). Questa situazione è richiesta per poter acquisire la statistica necessaria nelle misurazioni delle sezioni d'urto generate dalle reazioni in studio e tali condizioni sperimentali richiederanno tecnologie adeguate. Inoltre, la risoluzione

energetica di MAGNEX per l'identificazione degli ioni pesanti non è sufficiente ed è anche necessaria la rilevazione di raggi gamma, in particolare intorno al bersaglio. In conclusione, l'aggiornamento sostanziale dell'infrastruttura preesistente è indispensabile affinché si possa lavorare con fasci di ioni le cui correnti siano superiori di due o tre ordini di grandezza rispetto a quella attuale. Solo in questo modo sarà possibile eseguire indagini significative e ottenere misure accurate con una buona significatività statistica.

Nella Fase 3, la cui durata stimata è di 24 – 30 mesi, si prevede di eseguire il rinnovamento dell'intera infrastruttura di ricerca presso l'INFN – LNS di Catania installando un nuovo ciclotrone ed effettuando tutte le variazioni richieste su MAGNEX anche grazie all'introduzione di nuovi componenti. Contemporaneamente verrà eseguita l'analisi dei dati sperimentali raccolti nella Fase 2 e saranno condotti, presso altri laboratori, i test sulle reazioni DCE non ancora esplorate.

Infine, la Fase 4 consisterà in una campagna di presa dati con l'impianto potenziato che sarà in grado di fornire e gestire fasci ad alta intensità. Saranno eseguiti numerosi test con diverse energie incidenti sugli isotopi di interesse al fine di determinare le sezioni d'urto generate dalle reazioni DCE.

1.3 Aggiornamento e integrazione dei nuovi dispositivi

L'utilizzo di fasci di ioni con intensità molto elevate ha richiesto la progettazione e l'integrazione meccanica dei nuovi dispositivi con quelli già esistenti. In particolare, nel nuovo spettrometro MAGNEX sarà installata una camera di scattering, all'interno della quale sarà alloggiato un innovativo sistema per la gestione e il raffreddamento del target costituito dall'isotopo di interesse. Un altro problema è rappresentato dall'elevato livello di radiazioni all'interno della camera, con conseguente attivazione dei materiali presenti. L'irraggiamento potrebbe causare il deterioramento delle caratteristiche meccaniche dei componenti, limitandone la stabilità e la durata nel tempo. Per tale motivo è stata posta molta attenzione nella scelta dei materiali, soprattutto le guarnizioni di tenuta per il vuoto che in particolari punti non possono essere inserite in metallo. Inoltre, il livello delle radiazioni è tale per cui gli operatori non possono avvicinarsi alla zona sperimentale dove si trova la camera di scattering per i periodi necessari alla disattivazione dei materiali. A tal proposito è stata prevista l'integrazione di un sistema automatizzato per la manipolazione del target - holder.

Il target e il suo sistema [1]

È indispensabile che il target risulti sufficientemente sottile da garantire una buona risoluzione per la misura dell'energia degli ioni emessi dalle reazioni; allo stesso tempo il target deve avere dimensioni tali da assicurare che la sezione del fascio sia completamente contenuta. Il problema cruciale riguardante il target è il suo surriscaldamento con conseguente fusione a causa delle interazioni con il fascio ad elevata intensità. Quindi, bisogna cercare di asportare velocemente il calore generato dall'interazione target-fascio integrando un sistema di raffreddamento.

A tal proposito è stata proposta una soluzione secondo cui viene depositato un film isotopico [1], omogeneo e sottile poche centinaia di nanometri, su un foglio di grafite pirolitica altamente orientata (HOPG), sottile $2 \mu m$ e caratterizzato da un'elevata conducibilità termica nel piano. Il sistema prevede che il substrato in grafite venga pinzato con il porta-bersaglio in rame che viene posizionato e avvitato ad un adattatore conico, anch'esso in rame, il quale è infine collegato ad un cryo-cooler a singolo stadio che garantisce il raffreddamento del target.



(a) Il sistema completo [1].

(b) Gripper, target holder e dito freddo [4].

(c) Gripper e target holder [1].

Figura 1.4: Il sistema del target.

Il porta-target ha la particolarità di presentare dei fori, ognuno con una sua specifica funzione: quella più in basso ospita il target e quella immediatamente sopra contiene uno strato di

HOPG per valutare il contributo del substrato di grafite da sottrarre alle misure eseguite con l'isotopo depositato sulla grafite; poi è presente un foro vuoto per valutare eventuali interferenze tra il fascio e il supporto; infine, nella fessura più in alto c'è uno strato di allumina utilizzato per garantire la centratura del fascio. Nel sistema è presente un attuatore automatico che consente il movimento verticale del cryo-cooler e, di conseguenza, del porta-target; la corsa è garantita da un soffietto ed è gestita mediante l'integrazione di finecorsa e arresti meccanici. L'insieme di cryo-cooler, soffietto e attuatore è avvolto all'interno di una struttura cilindrica posizionata al di sotto della camera di scattering e fissata integralmente ad essa in maniera tale da garantire la tenuta e il livello di vuoto richiesto. Questo risultato è ottenuto grazie ad una serie di flange che ospitano guarnizioni per il vuoto.

Per mappare il campo termico del target, monitorare la sua temperatura e tenere sotto controllo la degradazione della grafite si utilizza una termocamera. Infine, se è necessario misurare la corrente del fascio una Faraday Cup verrà inserita lungo l'asse del fascio, altrimenti essa verrà posizionata su un lato della camera con una rotazione di 90° .

Il sistema del target è solidale con il pavimento, quindi, è necessario ruotare indipendentemente il target sulla parte superiore del dito freddo affinché sia perpendicolare alla linea del fascio in funzione della configurazione in esame. Infatti, come è possibile osservare in Fig. 1.5, si può lavorare in due diverse configurazioni, una con il fascio a bassa intensità (LI) e una con il fascio ad alta intensità (HI).

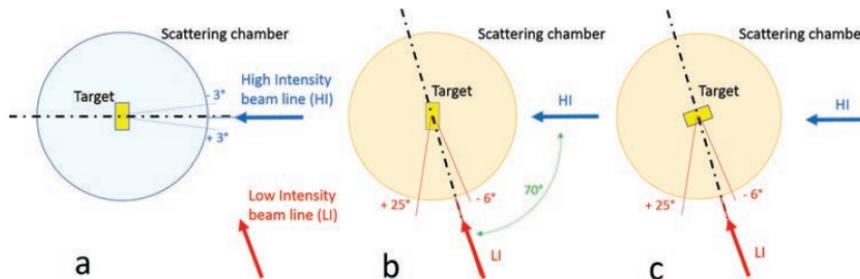


Figura 1.5: Schema delle configurazioni: alta intensità HI (a) e bassa intensità LI (c). La figura (b) rappresenta la situazione in cui il target non è stato ancora ruotato nella configurazione LI [4].

Inoltre, è necessario progettare e installare un sistema automatizzato per la sostituzione del target a seguito della sua attivazione o del suo deterioramento. In pratica, un manipolatore automatico, posizionato a fianco della camera di scattering, muove il porta-target ed effettua la sua sostituzione quando il target si degrada. Il manipolatore è costituito da un cilindro pneumatico, alla cui estremità è collegato il polso robotico con il gripper pneumatico.

Il polso ha due gradi di libertà, cioè può effettuare due rotazioni per le operazioni di presa e rilascio del target-holder. È presente una gate-valve (valvola a saracinesca), la cui apertura permette al manipolatore di entrare o uscire dalla camera per eseguire il bloccaggio e lo sbloccaggio del target holder sul dito freddo del cryo-cooler tramite un aggancio a baionetta. In pratica, a seguito della rimozione, i target attivati o deteriorati devono essere trasportati e immagazzinati in un sistema di stoccaggio, cioè un contenitore schermato con piombo (storage verticale con 6 stazioni per i bersagli). Poiché i gradi di libertà del manipolatore non consentono il posizionamento dei target-holder utilizzati nel magazzino verticale, è stato installato un secondo sistema di manipolazione, costituito da un altro cilindro pneumatico a cui è collegato un gripper pneumatico. Una volta riempito completamente, lo storage verticale può essere sganciato e rimosso dalla zona sperimentale. Successivamente il manipolatore principale si dirige verso il piano di stoccaggio orizzontale, posizionato di fronte la gate-valve, per afferrare e movimentare un nuovo porta-target che, una volta trasferito nella camera di scattering, verrà agganciato al dito freddo. Anche questo storage ha una capacità di 6 target-holder.

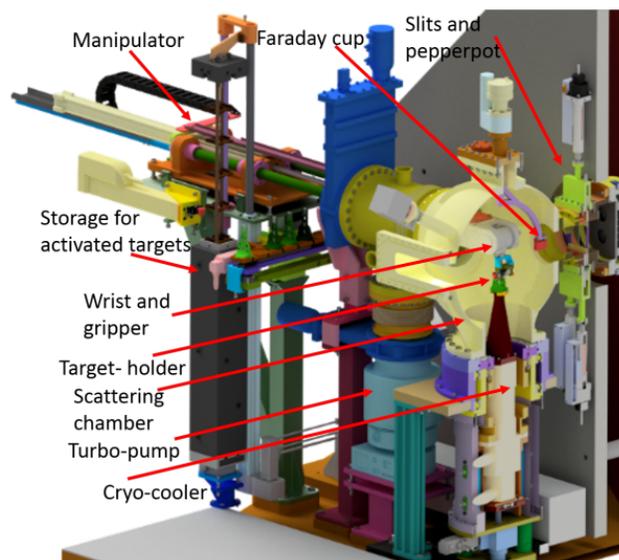


Figura 1.6: Il sistema del target e la camera di scattering. Il manipolatore del target si trova a sinistra della camera di scattering [2].

La camera di scattering [1]

È stata studiata, progettata e realizzata una nuova camera di scattering in grado di soddisfare i nuovi requisiti di NUMEN. La nuova camera è realizzata in alluminio (lega di alluminio

5083), presenta una forma sferica con diametro pari a 230 mm, ha uno spessore di 6 mm ed è supportata dal cilindro contenente il sistema di raffreddamento. Un opportuno sistema di pompaggio limita la pressione nel volume interno della camera in un range compreso tra 10^{-6} e 10^{-7} mbar. Il sistema per l'alto vuoto è costituito da una pompa per il basso vuoto (fino a 10^{-2} mbar) e da una pompa turbo-molecolare per l'alto vuoto. Inoltre, la camera deve ruotare intorno al proprio asse verticale, coincidente con l'asse del bersaglio e per tale motivo è posizionata in modo opportuno sulla piattaforma MAGNEX.

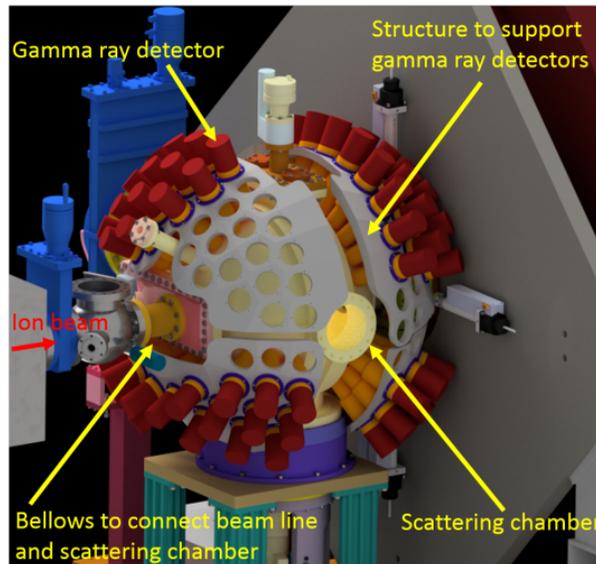


Figura 1.7: La camera di scattering e G-NUMEN [2].

G - NUMEN [1]

Attorno alla camera di scattering sarà installato G – NUMEN, un array di rivelatori di raggi gamma introdotto perché, con fasci la cui energia sia $> 30\text{MeV}/u$ o con nuclei deformati del target, la risoluzione energetica di MAGNEX non risulta sufficientemente alta. I rivelatori di G – NUMEN sono in grado di fornire la necessaria discriminazione tra stati energetici con una risoluzione energetica $< 3\text{--}25\%$ e una risoluzione temporale migliore di 1 ns. Il supporto dei rivelatori ha una forma sferica, è realizzato in alluminio con uno spessore di 5 mm e presenta un numero totale di 110 scintillatori in Bromuro di Lantanio drogato con Cerio $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$, ognuno con il suo fotomoltiplicatore. Sono stati scelti scintillatori inorganici in grado di tollerare le radiazioni presenti intorno al bersaglio. Il supporto copre il 20% dell'angolo solido totale ed è suddiviso in ottanti e quadranti che saranno movimentati da appositi sistemi semiautomatici in modo tale da garantire lo spostamento da e verso la camera di

scattering. Infatti, la manipolazione di queste parti non può essere eseguita manualmente in quanto la zona intorno la camera di scattering è affollata con apparecchiature, strumentazione e numerosi componenti meccanici (pompe da vuoto, camera slitte, ingresso del quadrupolo, sistema di raffreddamento del target e braccio robotico per la sua sostituzione, ecc...), oltre a presentare un elevato livello di radiazioni.

La camera slitte

A valle del target, tra la camera di scattering e il quadrupolo, verrà installata la camera slitte che ha la funzione di regolare l'accettanza dello spettrometro. Un sistema simile era già presente ed era posto all'interno della vecchia camera di scattering prima della flangia di uscita della beam line. Il sistema è stato riprogettato al fine di garantire una migliore precisione. Nel nuovo sistema le slitte sono realizzate in tantalio e ciascuna di esse viene movimentata da un apposito driver lineare. In pratica, il sistema di slitte ha il compito di modificare la finestra di accettanza dello spettrometro, definita come una piramide con vertice nel bersaglio e con angoli di apertura ben definiti.

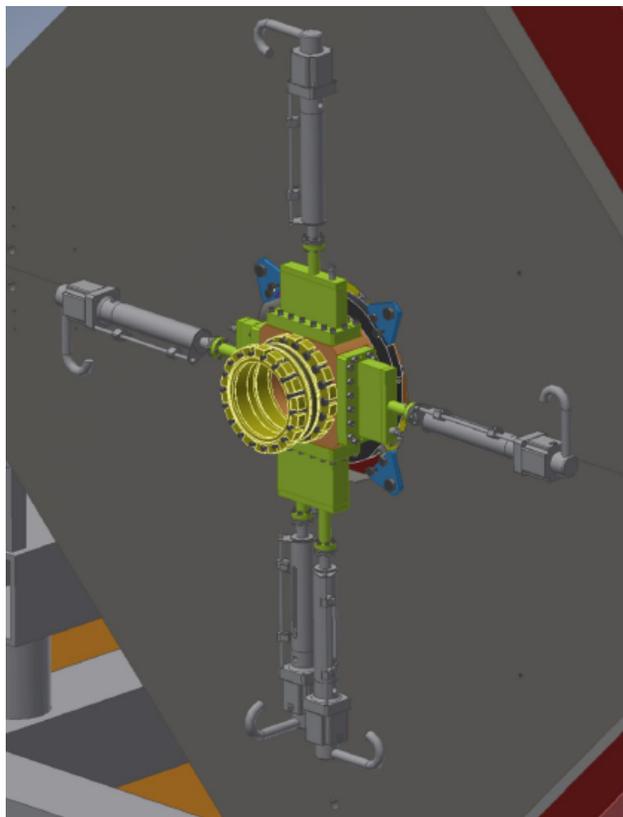


Figura 1.8: La camera slitte.

Gli elementi magnetici di MAGNEX e il CS [4]

Lo spettrometro magnetico a grande accettazione MAGNEX per la rilevazione degli eiettili è costituito da due magneti di grande apertura: un quadrupolo che concentra e focalizza il fascio in direzione verticale e un dipolo che effettua la dispersione e focalizza il fascio in direzione orizzontale. Chiaramente, fasci altamente energetici e intensi non sono gestibili con l'attuale struttura e richiedono una maggiore rigidità magnetica del quadrupolo e del dipolo di MAGNEX, i cui campi magnetici verranno aumentati del 20% rispetto ai valori attuali, cioè rispettivamente fino a 1.139 T e 1.380 T.

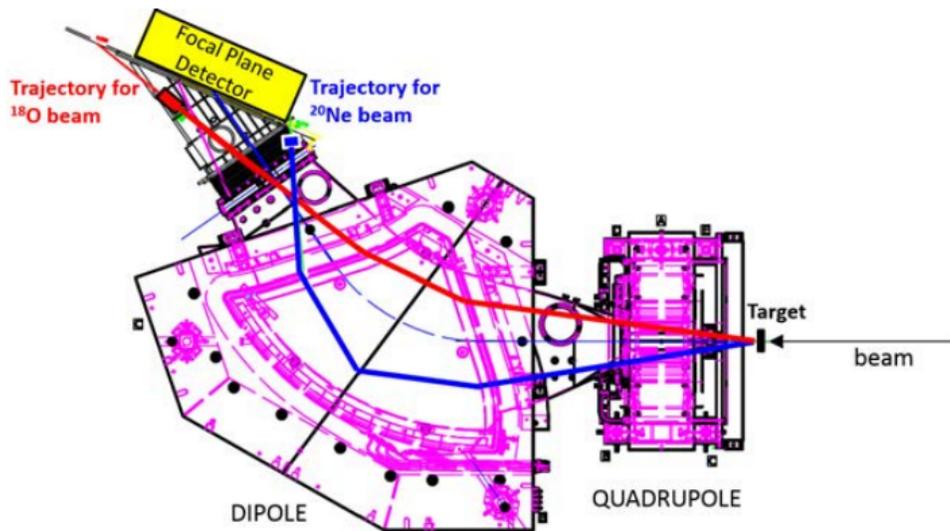
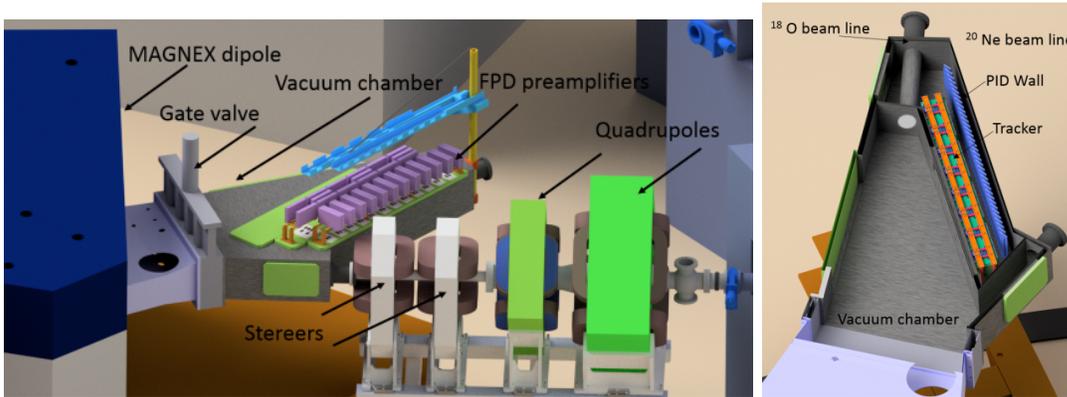


Figura 1.9: Il quadrupolo e il dipolo di MAGNEX. La figura mostra le traiettorie dei fasci di ^{18}O e ^{20}Ne [4].

Anche il ciclotrone a superconduzione circolare K800 deve essere completamente ristrutturato in modo tale da fornire fasci di ioni con energie in un intervallo abbastanza ampio (da 15 a 80 MeV/u), intensità fino a 10^{13} pps. L'attuale acceleratore di particelle presenta tre stadi e sfrutta bobine superconduttrici che consentono di generare un campo magnetico variabile tra 2.2 e 4.8 T nel centro. Per migliorare l'efficienza di estrazione del fascio, il CS verrà sostituito e aggiornato con un nuovo canale progettato per implementare la tecnologia di estrazione tramite strappaggio al posto di utilizzare dei deflettori elettrostatici (ED). Inoltre, per ridurre al minimo le perdite indesiderate e fornire una migliore conduttanza nel vuoto la camera di accelerazione dovrà essere ingrandita.

La camera ad alto vuoto [2]

A valle degli elementi magnetici di MAGNEX è presente la camera ad alto vuoto, la quale è collegata al dipolo tramite una gate – valve (valvola a saracinesca). La nuova camera deve resistere meccanicamente al vuoto (pressione tra 10^{-5} e 10^{-6} mbar) e deve permettere il trasporto di ciò che rimane degli ioni che non hanno reagito con il bersaglio. In pratica, dopo aver attraversato il quadrupolo e il dipolo, gli eiettili generati dalle reazioni nucleari attraversano un sottilissimo foglio di Mylar (spessore variabile da 1,5 a 6 μm) e raggiungono l'FPD contenente isobutano a bassa pressione (pressione assoluta tra 10 e 100 mbar). Invece i fasci di ^{18}O e ^{20}Ne scorrono nella camera di vuoto per poi entrare nelle linee di dump corrispondenti agli stessi.



(a) La camera ad alto vuoto, i due magneti steerers e i due (b) Il rivelatore di piano
quarupoli [2]. focale [2].

Figura 1.10: La camera ad alto vuoto.

Il nuovo rivelatore di piano focale (FPD) non potrà più traslare lungo la direzione dell'asse ottico per affinare la messa a fuoco degli eiettili. Invece, in passato un soffietto permetteva il movimento del sistema in direzione perpendicolare alla gate – valve. La traslazione sarà impedita dalla presenza degli elementi magnetici che si trovano a valle della camera stessa per cui bisogna eseguire una focalizzazione fine degli eiettili tramite un dipolo potenziato. A causa del più alto rate degli eiettili atteso sul FPD è necessario un aggiornamento del tracciatore di traiettorie di ioni (tracker) poiché l'attuale rivelatore si limita a lavorare con rate di ioni minori di 1 kHz; nelle nuove condizioni sperimentali è richiesto un rate di 50 kHz/cm. Il nuovo tracker deve fornire un'alta risoluzione spaziale dei parametri sul piano focale, in modo tale da determinare la quantità di moto in modo preciso, e una risoluzione temporale migliore di 2 ns.

Infine, è presente il Particle Identification Detector (PID), cioè una parete che funge da rivelatore per identificare le particelle degli eiettili generati dalla reazione. La parete PID è formata da 36 circuiti, ciascuno dei quali ospita 20 telescopi. La soluzione adottata prevede l'utilizzo di due sensori per ciascun telescopio: i prodotti di reazione attraversano il primo sensore realizzato in Carburo di Silicio (SiC), che misura la perdita di energia, e poi si arrestano nel secondo sensore realizzato in Ioduro di Cesio drogato con Tallio CsI(Tl), che misura l'energia residua. La parete PID deve fornire una risoluzione energetica accettabile (2 %) e presentare una buona resistenza alle radiazioni.

Le nuove linee e il beam dump [4]

Il fascio incidente dovrà essere trasportato nella sala sperimentale tramite due linee diverse, una a bassa intensità (LI) e un'altra ad alta intensità (HI). Di conseguenza è richiesta l'installazione di una nuova linea per il trasporto del fascio all'ingresso dello spettrometro MAGNEX. La nuova linea (HI) è costituita dalla tripletta di quadrupoli preesistente, due nuovi dipoli (MADP01 e MADP02) e tre nuovi quadrupoli.

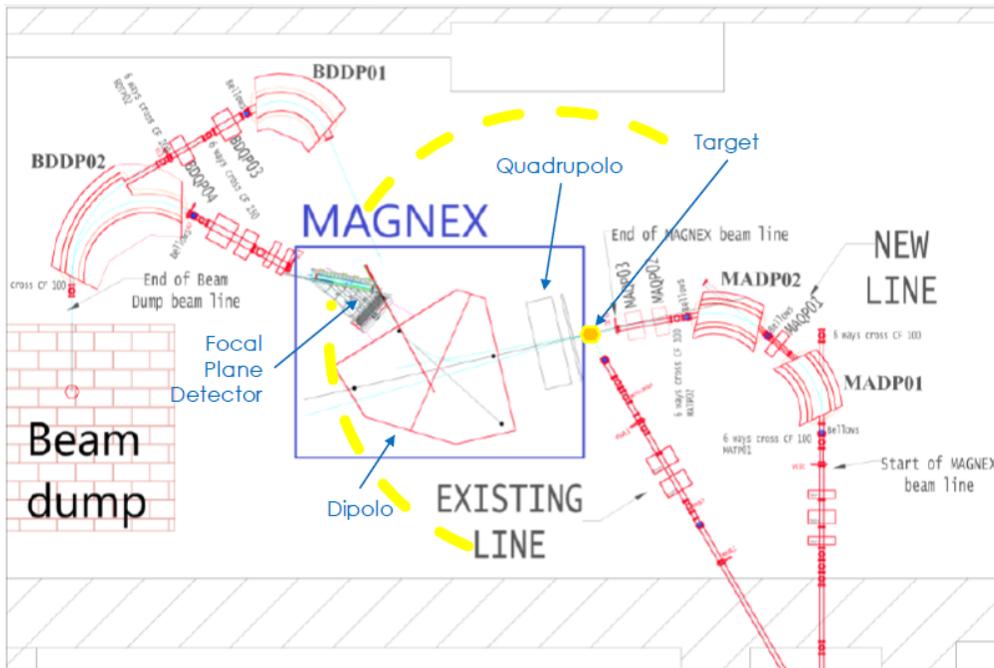


Figura 1.11: La nuova area sperimentale con le nuove linee e il beam dump [4].

Lo spettrometro MAGNEX è collocato su una piattaforma che consente la rotazione continua, utilizzando una guida circolare, di tutti gli elementi dell'apparato (camera di scattering, quadrupolo, dipolo e FPD). In particolare, lo spettrometro può ruotare in un intervallo tra

-20° e $+90^\circ$ attorno al target, che invece deve essere sempre perpendicolare alla linea del fascio. Nella configurazione HI la piattaforma rotante ottimizza il posizionamento angolare dello spettrometro rispetto al target in funzione del fascio di ioni in ingresso (^{18}O o ^{20}Ne) con un angolo di $\pm 3^\circ$. Inoltre, la piattaforma rende possibile il collegamento con la linea del fascio di ioni a bassa intensità (LI) preesistente con una rotazione angolare di 70° .

Il fascio di ioni ad elevata intensità che non interagisce con il target verrà indirizzato verso il “beam dump”, cioè il luogo nel quale il fascio verrà arrestato in modo sicuro. È necessario ingrandire la sala sperimentale sul lato ovest per ospitare il beam dump e, poiché l’interazione tra fascio e target produce numerose radiazioni neutroniche e gamma, è necessaria una schermatura del dump che verrà realizzata tramite blocchi di cemento con bario. Poiché lo spettrometro può assumere due diverse configurazioni, sono state progettate due linee di trasporto (dedicate ai fasci ^{18}O e ^{20}Ne): una linea a destra del FPD per rilevare i prodotti di reazione con rigidità magnetica superiore a quella del fascio incidente (MAGNEX ruotato di -3°); un’altra linea a sinistra del FPD per rilevare i prodotti di reazione con rigidità magnetica inferiore a quella del fascio incidente (MAGNEX è ruotato di $+3^\circ$). Al fine di minimizzare i costi la prima parte delle due linee è costituita dagli stessi elementi magnetici, cioè due magneti steerer e due quadrupoli; poi ciascuna linea presenta il proprio magnete di curvatura. La prima parte delle linee (magneti steerer e quadrupoli) è posizionata su un adeguato carrello che ne permette la traslazione per accettare in ingresso uno dei due fasci in uso (^{18}O o ^{20}Ne).

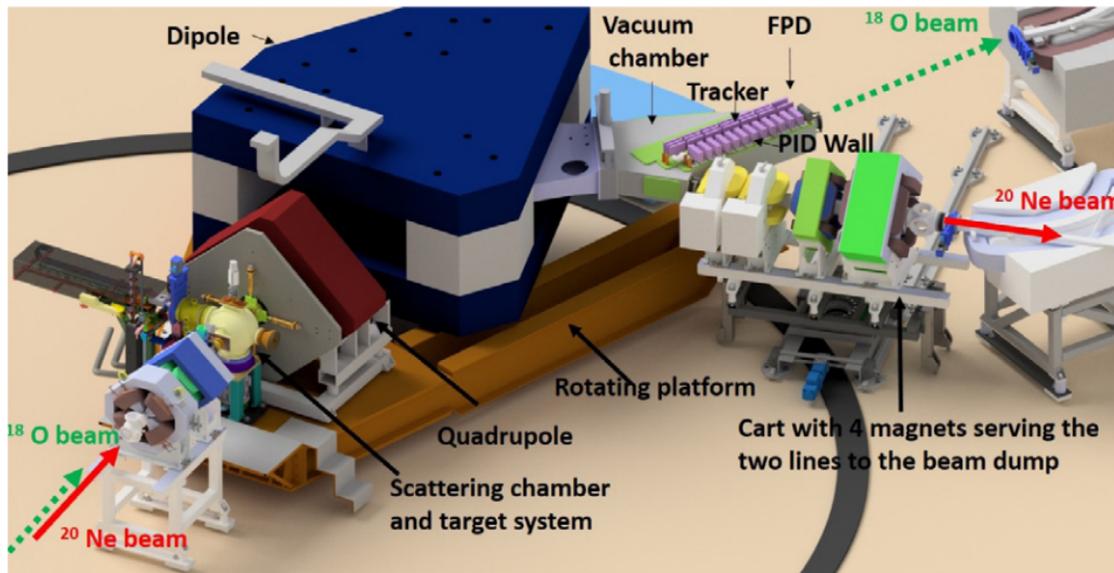
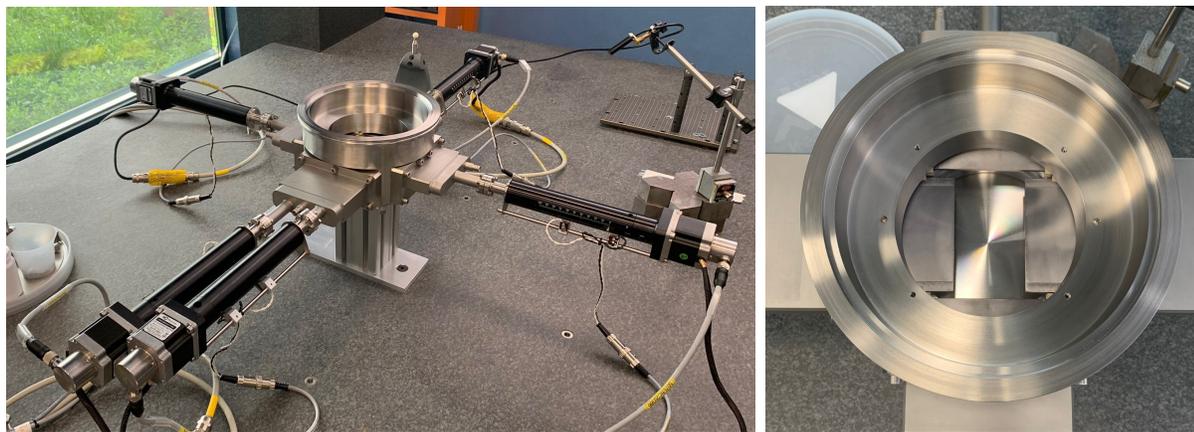


Figura 1.12: Il nuovo layout dell’area sperimentale dopo l’aggiornamento [1].

Capitolo 2

Studio del sistema camera slitte

Il sistema analizzato durante l'attività di tesi è la camera slitte che opera sull'accettazione dello spettrometro MAGNEX. Il nuovo sistema di slitte (vedi Fig. 2.1) è collocato in un'apposita camera che sarà disposta tra la camera di scattering e il quadrupolo di MAGNEX. La sua funzione consiste nel rimodellare la finestra di accettazione dei prodotti di reazione generati dall'interazione tra il bersaglio e il fascio di ioni incidente ed emessi verso lo spettrometro.



(a) La nuova camera slitte.

(b) Vista downstream delle slitte nella nuova camera.

Figura 2.1: Il nuovo sistema.

Come già anticipato, un sistema simile e con la medesima funzione era già presente nello spettrometro MAGNEX ed era posto all'interno della preesistente camera di scattering a valle del bersaglio, prima della flangia di uscita della beam line (vedi Fig. 2.2).

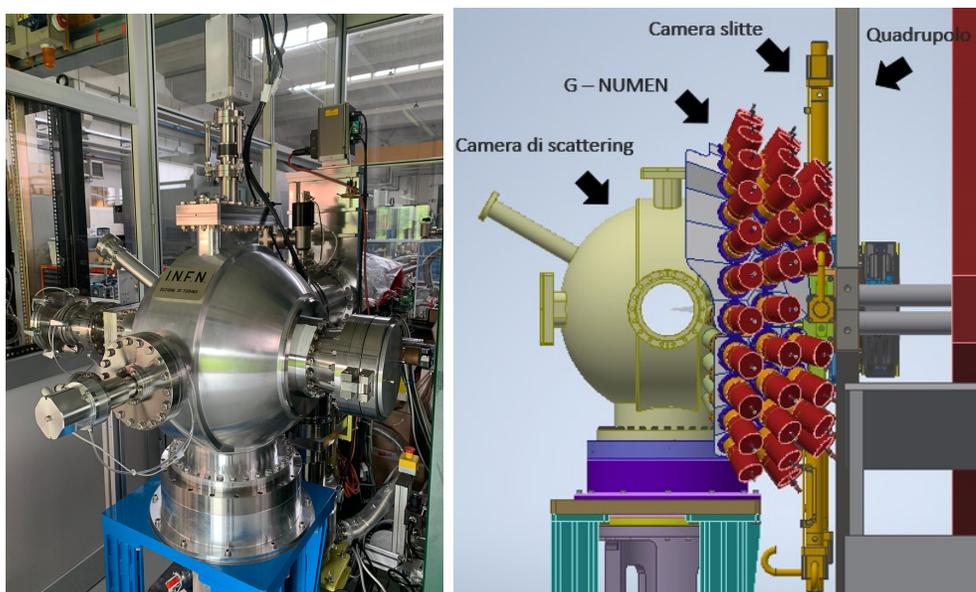


(a) Camera di scattering pre-esistente [15]. (b) Interno della vecchia camera di scattering [15].

Figura 2.2: Il vecchio sistema.

2.1 Caratteristiche del nuovo sistema

Il nuovo sistema di slitte è stato progettato per essere posto al di fuori della nuova camera di scattering (vedi Fig. 2.3), la quale è più piccola della preesistente e ha una geometria sferica per permettere l'installazione di G – NUMEN intorno alla stessa.



(a) Esterno della nuova camera di scattering.

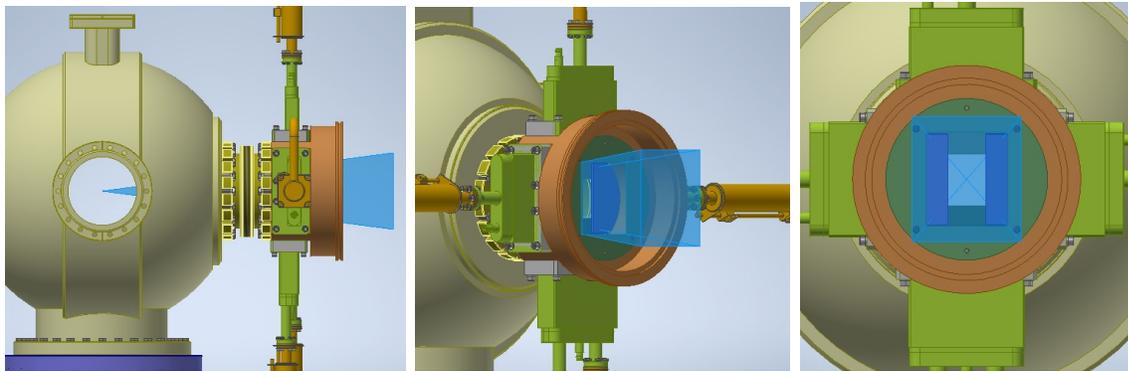
(b) Assieme completo.

Figura 2.3: La nuova camera di scattering e l'assieme completo. È possibile notare il poco spazio disponibile per l'integrazione del nuovo sistema di slitte.

Per questo motivo il sistema di slitte non può più essere contenuto all'interno della camera di scattering. Quindi, risulta necessaria un'apposita camera dedicata alle slitte da posizionare immediatamente dopo la camera di scattering e prima del quadrupolo. Il limitato spazio a disposizione ha richiesto uno studio specifico ed un'ottimizzazione dell'integrazione di tutti gli elementi che costituiscono la nuova camera. Un'altra importante richiesta è la precisione sulla posizione delle slitte per garantire il corretto funzionamento del sistema. In particolare, le slitte devono presentare errori di orientamento minori di 0.10 mm, in modo tale da ottenere un taglio preciso dei prodotti d'interazione con l'obiettivo di bloccare ciò che introduce sporcizia nel rivelatore o che non si vuole misurare. Rispettando tale specifica viene rimodellata una finestra di accettazione, con angoli ben definiti, che consente allo spettrometro MAGNEX di lavorare correttamente. Quindi, al fine di ottimizzare al meglio il sistema di movimentazione delle slitte e ottenere la precisione di posizionamento richiesta viene utilizzato un sistema di controllo in anello chiuso basato su encoder assoluti multigiro.

2.1.1 La regolazione dell'accettanza

L'accettanza dello spettrometro MAGNEX è una finestra rettangolare definita dagli angoli $\pm 7.5^\circ$ [4] in direzione verticale e $\pm 6.5^\circ$ [4] in direzione orizzontale. Gli angoli sono misurati dal centro del bersaglio. Infatti, si può anche parlare di piramide di accettanza, come illustrato in Fig. 2.4.

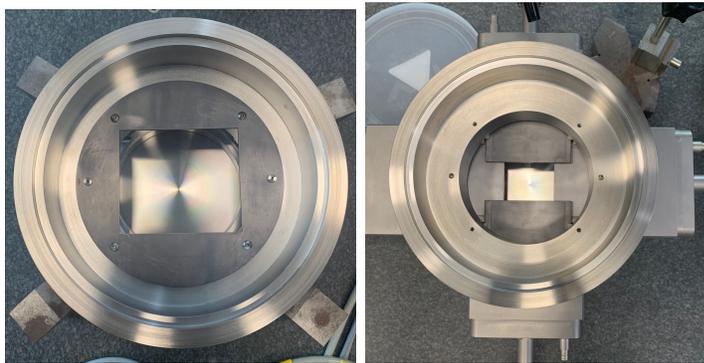


(a) Vista laterale dell'accettanza. (b) Piramide di accettanza. (c) Vista downstream dell'accettanza.

Figura 2.4: La regolazione dell'accettanza.

Lo schermo fisso in tantalio limita il passaggio degli ioni prodotti dalle interazioni all'accettanza sopra definita (Fig. 2.5 (a)). Poi un'ulteriore regolazione può essere eseguita tramite

quattro slitte mobili (Fig. 2.5 (b)), due che si muovono in direzione verticale e altre due in direzione orizzontale, ognuna delle quali è movimentata indipendentemente dalle altre da un attuatore lineare dedicato. Ciascun attuatore permette di controllare la posizione rispetto all'asse del fascio di ciascuna slitta senza interferire con il funzionamento delle altre. Le slitte ridefiniscono l'accettanza fornendo la selezione di specifici canali di fisica da studiare. In pratica, le slitte limitano l'accettanza ai soli prodotti di reazione che si vogliono analizzare, eliminando quelli che non si vogliono identificare nel rivelatore di piano focale (alcune volte per il rate troppo elevato).



(a) Schermo fisso posiziona- (b) Slitte mobili posizionate
to nella camera. nella camera.

Figura 2.5: Lo schermo fisso e le slitte mobili posizionati nella camera.

2.1.2 Le slitte mobili

Un'importante modifica riguarda le slitte mobili (Fig. 2.6), le quali in precedenza erano più sottili (spessore pari a 1 mm) ed erano realizzate in rame. Le nuove slitte sono in tantalio e sono più spesse. Si è optato per questa scelta a seguito di numerose simulazioni con le quali è stato valutato che lo spessore doveva essere almeno pari 2.8 mm [4].

Le due slitte verticali, denominate UP (U) e DOWN (D), sono movimentate dai due attuatori posizionati rispettivamente nella parte superiore e inferiore del sistema. Le dimensioni di queste slitte sono: larghezza 92 mm, altezza 72 mm e spessore 3 mm. Le due slitte orizzontali, denominate RIGHT (R) e LEFT (L), sono movimentate dai due attuatori posizionati rispettivamente nella parte destra e sinistra del sistema. Le dimensioni di queste slitte sono: larghezza 96 mm, altezza 66 mm e spessore 3 mm.

Nella parte inferiore del sistema è presente una seconda slitta chiamata pepperpot, azionata anch'essa da un apposito attuatore lineare. La pepperpot, dotata di numerosi fori (in totale 65 fori), viene movimentata in modo tale da intercettare gli ioni prodotti nelle interazioni e selezionare piccoli gruppi specifici di tracce a valle del bersaglio, corrispondenti ad ogni foro. L'obiettivo è quello di eseguire una calibrazione del tracker del piano focale dello spettrometro utilizzando le mappe di fori della pepperpot. Ciascun foro ha un diametro pari a 1.5 mm e le dimensioni della slitta sono: larghezza 92 mm, altezza 110 mm e spessore 3 mm.

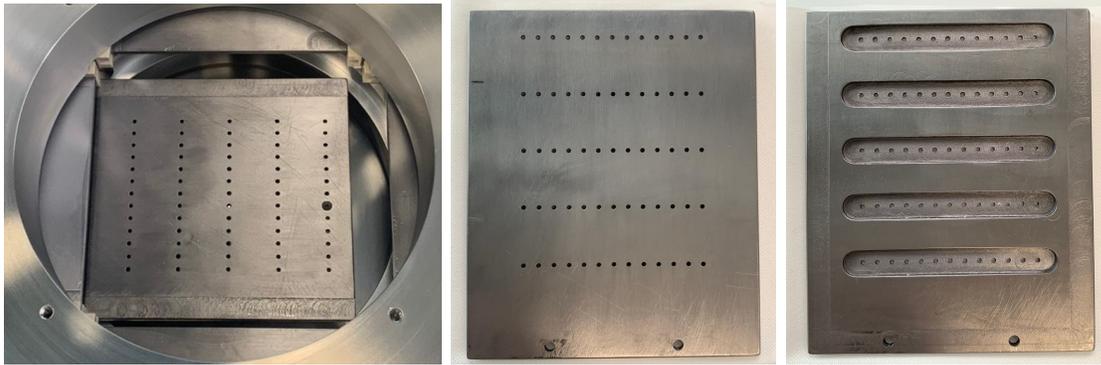


(a) Slitta mobile verticale UP. (b) Slitta mobile orizzontale RIGHT.

Figura 2.6: Le slitte mobili.

In realtà, sono state realizzate due pepperpot (Fig. 2.7); una ha lo spessore costante pari a 3 mm mentre l'altra, denominata pepper -pot alleggerita, è caratterizzata da una diminuzione dello spessore intorno ai fori. In particolare, in questo secondo caso lo spessore è pari ad 1 mm intorno ai fori e pari a 3 mm lontano da essi. L'uso della lamina alleggerita favorisce la selezione di traiettorie di ioni evitando il fenomeno di scattering all'interno del foro.

Tutte le slitte e lo schermo fisso sono stati prodotti a partire da un foglio laminato di dimensioni 30 cm x 30 cm x 0.3 cm con una tolleranza nominale sullo spessore del $\pm 10\%$. Questo foglio è stato lavorato e tagliato in macchina per elettroerosione per ricavare le singole slitte e lo schermo fisso. I componenti così ottenuti presentano spigoli netti e superfici con una buona qualità della finitura superficiale. Anche tutti i fori sulla pepperpot sono stati lavorati per elettroerosione.



(a) La pepperpot all'interno della camera. (b) Vista upstream della pepperpot alleggerita. (c) Vista downstream della pepperpot alleggerita.

Figura 2.7: La pepperpot e la pepperpot alleggerita.

2.1.3 La scelta dei materiali

Il tantalio

Il materiale impiegato per la realizzazione delle slitte e dello schermo fisso è tantalio al 99.99%. Si tratta di un metallo pesante caratterizzato da legami interatomici estremamente forti in grado di garantire un'eccellente stabilità dimensionale e ottime tolleranze anche ad alte temperature (si poteva utilizzare il molibdeno in alternativa).

È stato scelto il tantalio perché riesce ad assorbire gli ioni e limitare l'emissione di neutroni. Il tantalio ha la proprietà di essere immune agli attacchi chimici in qualsiasi ambiente a temperature inferiori ai 150°C [5][16] e conferisce alle slitte un'elevata resistenza alla corrosione. Questo avviene per effetto della passivazione, cioè sulla superficie si forma un sottile strato di ossido di tantalio che protegge il metallo. I forti legami interatomici conferiscono al tantalio una temperatura di fusione molto alta, nello specifico il tantalio puro fonde a 3290 K [16]. Oltre ad essere un metallo refrattario, questo materiale è anche un ottimo conduttore di calore ed elettricità.

La struttura cristallina del tantalio cubica a corpo centrato conferisce duttilità al metallo. In generale, per quanto riguarda le proprietà meccaniche, il tantalio è caratterizzato da: buona duttilità, elevato modulo elastico, alta resistenza meccanica e grande durezza, sia a temperatura ambiente che elevata.

II PEEK

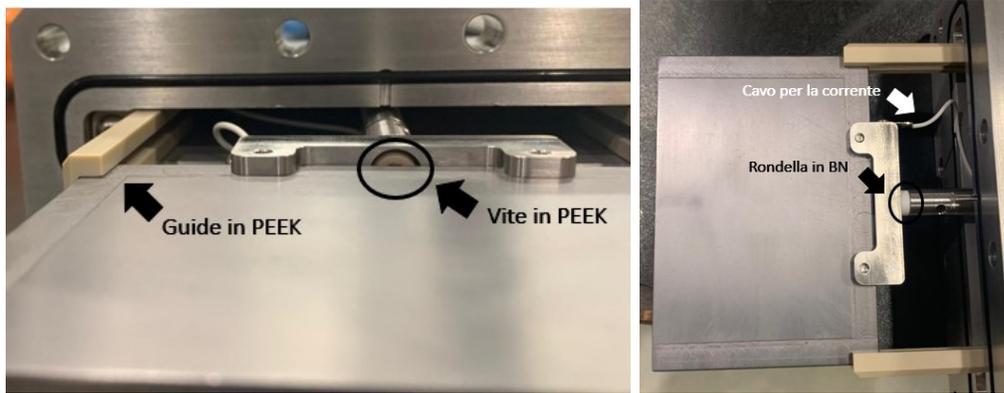
Le slitte con i loro supporti sono isolate elettricamente dagli attuatori tramite un collegamento con vite in PEEK (polietere etere chetone) e rondella in nitruro di boro (BN). Il PEEK è un polimero termoplastico organico semicristallino caratterizzato da un'elevata robustezza e da un'ottima resistenza al calore, alla degradazione termica e agli attacchi chimici. È stato scelto il PEEK per questa applicazione per la sua compatibilità con il funzionamento in vuoto e per l'eccellente resistenza alle radiazioni. Infatti, grazie alla stabilità chimica della sua struttura molecolare, il polietere etere chetone può essere esposto ad elevate dosi di raggi gamma senza subire infragilimento. Questo polimero mantiene le sue proprietà per lunghi periodi di tempo, anche a temperature più alte, ed è dotato di un'ottima stabilità dimensionale. Per quanto riguarda le proprietà meccaniche, il PEEK presenta un'elevata resistenza meccanica a trazione e a scorrimento, grande durezza, alto modulo elastico e notevole duttilità. Grazie alla bassa conducibilità termica e alle sue proprietà dielettriche è anche un ottimo isolante (termico ed elettrico). In sintesi, le viti in PEEK sono leggere, resistenti, meccanicamente stabili e idonee alle applicazioni in ambienti di lavoro difficili come quello del sistema in esame (alto vuoto, radiazioni).

Anche le guide sono state realizzate in PEEK che, grazie al basso coefficiente di attrito, garantisce uno scorrimento non lubrificato tra slitte e guide. Infatti, non è ammesso l'utilizzo di lubrificanti, i quali genererebbero contaminazioni e impurità nella camera slitte, compromettendo il corretto funzionamento del sistema. Infine, essendo un materiale caratterizzato da elevata purezza, non c'è il rischio di rilasciare sostanze nell'ambiente della camera.

Il nitruro di boro

Il nitruro di boro (BN) utilizzato per le rondelle presenta un reticolo cristallino a strati, sovrapposti e paralleli tra loro, in cui gli atomi si dispongono a formare degli esagoni. La polarità dei legami che si instaurano tra il boro e l'azoto ostacola il movimento degli elettroni, rendendo il nitruro di boro un ottimo isolante elettrico. Allo stesso tempo, questo materiale è un'eccellente conduttore termico (paragonabile ai metalli). Infatti, il motivo principale per cui è stato scelto il nitruro di boro deriva dall'esigenza di garantire l'isolamento elettrico tra le slitte e gli attuatori pur consentendo la conduzione termica. Uno svantaggio è rappresentato dalla durezza meccanica molto bassa.

Il disaccoppiamento elettrico è necessario per avere una misura della corrente presente su ogni slitta causata dall'impatto degli ioni, senza che vi sia una dispersione verso gli attuatori.



(a) Le guide e la vite in PEEK.

(b) La rondella in nitruro di boro e il cavo per la misura della corrente.

Figura 2.8: Le rondelle in nitruro di boro, le guide e le viti in PEEK.

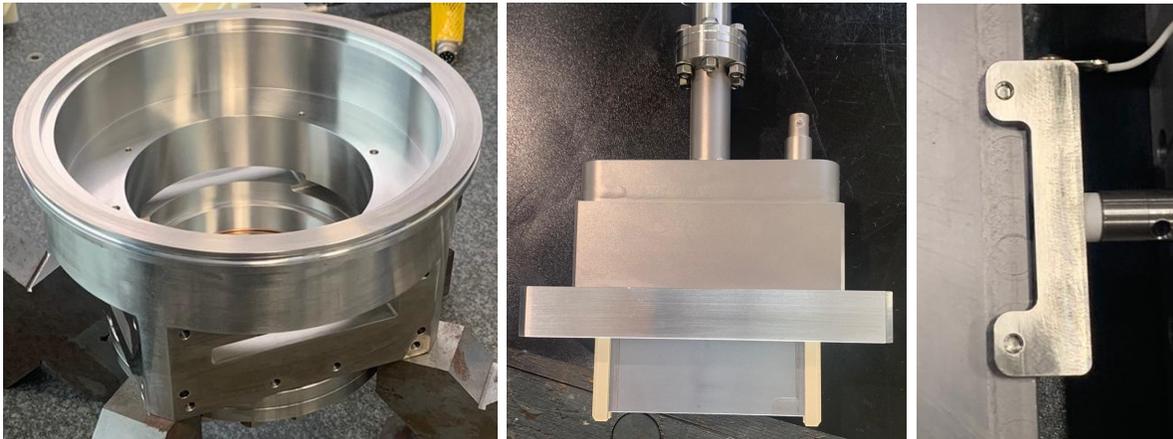
Infatti, a valle del bersaglio i prodotti di reazione sono emessi in un cono che interessa anche le slitte nel momento in cui sono parzialmente inserite. È stato valutato che gli ioni da interazione, e in particolare da scattering elastico, impattando sulle slitte produrranno circa 1 W [4].

La dissipazione di calore attraverso le slitte non è rilevante e, essendo il tantalio un buon conduttore termico, è possibile realizzare il raffreddamento mediante un semplice contatto metallico, senza la necessità di predisporre un circuito di raffreddamento dedicato.

L'acciaio AISI 316 LN

La camera, le tasche in cui sono alloggiati le slitte e i supporti per il collegamento tra slitte e attuatori sono stati realizzati tutti in acciaio AISI 316 LN (Low Carbon Nitrogen) (Fig. 2.9). Si tratta di una lega in acciaio inossidabile contenente un basso tenore di carbonio, una sufficiente percentuale di cromo, nichel, molibdeno e azoto disciolto nel reticolo cristallino. La presenza degli elementi appena citati conferisce all'acciaio in questione un'elevatissima resistenza alla corrosione, anche in ambienti molto difficili e aggressivi.

È una lega appartenente alla classe degli acciai austenitici, i quali presentano una struttura cristallina cubica a facce centrate stabile anche a temperatura ambiente. L'austenite ha la caratteristica di essere diamagnetica, ossia è soggetta ad una magnetizzazione molto debole, opposta in verso e direzione, rispetto al campo magnetico esterno. La diamagnetività dell'austenite fa sì che l'acciaio sia maggiormente inerte alle interazioni magnetiche deboli con



(a) Il corpo della camera.

(b) Una delle tasche contenenti le slitte.

(c) Il supporto per le slitte.

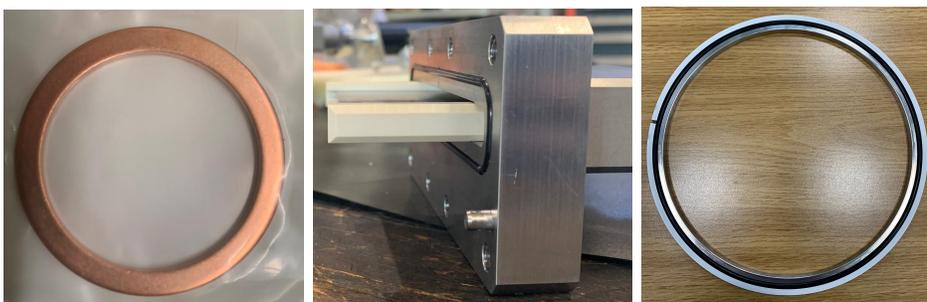
Figura 2.9: I componenti realizzati in acciaio AISI 316 LN.

l'esterno. L'acciaio, grazie alla struttura austenitica molto compatta, risulta anche meno attaccabile chimicamente, il che è ideale per l'utilizzo in un ambiente di alto vuoto. Inoltre, l'aggiunta di un gas inerte come l'azoto protegge l'acciaio da eventuali contaminazioni esterne. In sintesi, il basso contenuto di carbonio e la presenza di azoto stabilizzano la microstruttura austenitica, la quale riduce la permeabilità magnetica dell'acciaio AISI 316LN rendendolo idoneo per l'applicazione in esame.

Il rame oxygen - free e l'EPDM

Nel sistema sono presenti guarnizioni (Fig. 2.10) per assicurare la tenuta ed impedire il passaggio di molecole di gas. Tra le flange delle tasche contenenti le slitte e le flange degli attuatori vengono inserite delle guarnizioni in rame oxygen - free. L'accoppiamento tra le flange schiaccia la guarnizione metallica, la quale subisce una deformazione plastica permanente che è responsabile della tenuta. Il rame oxygen free è ideale per le applicazioni in alto vuoto perché non rilascia ossigeno, il quale potrebbe causare reazioni chimiche indesiderate.

L'o - ring da inserire tra la camera e la gate - valve è realizzato in EPDM (Ethylene-Propylene Diene Monomer), così come le guarnizioni di tenuta tra le flange delle tasche e la camera slitte. La scelta di utilizzare una gomma sintetica è giustificata dalla geometria di questi elementi; sarebbe stato molto più complicato e costoso realizzare queste guarnizioni in rame. La soluzione in EPDM ha un costo notevolmente più basso, riuscendo comunque a svolgere la propria funzione con una buona resistenza all'elevato livello di radiazioni.



(a) Le guarnizioni in rame oxygen - free. (b) Le guarnizioni in EPDM. (c) L'o-ring in EPDM.

Figura 2.10: Le guarnizioni in rame e in EPDM.

2.1.4 Il nuovo sistema di movimentazione

Per la movimentazione delle slitte vengono utilizzati cinque attuatori lineari motorizzati tramite motori passo – passo (Fig. 2.11). L’azionamento dei motori è effettuato con delle unità di controllo a distanza, ideali per il sistema in esame che si troverà in un ambiente pericoloso a causa dell’elevato livello di radiazioni. Il feedback di posizione è fornito da encoder magnetici che consentono di eseguire un controllo in anello chiuso. Inoltre, gli attuatori sono equipaggiati con interruttori di finecorsa che permettono di lavorare in sicurezza, evitando di raggiungere posizioni estreme indesiderate. Il sistema di movimentazione così costituito fornisce un mezzo accurato e preciso per ottenere un movimento lineare automatizzato.

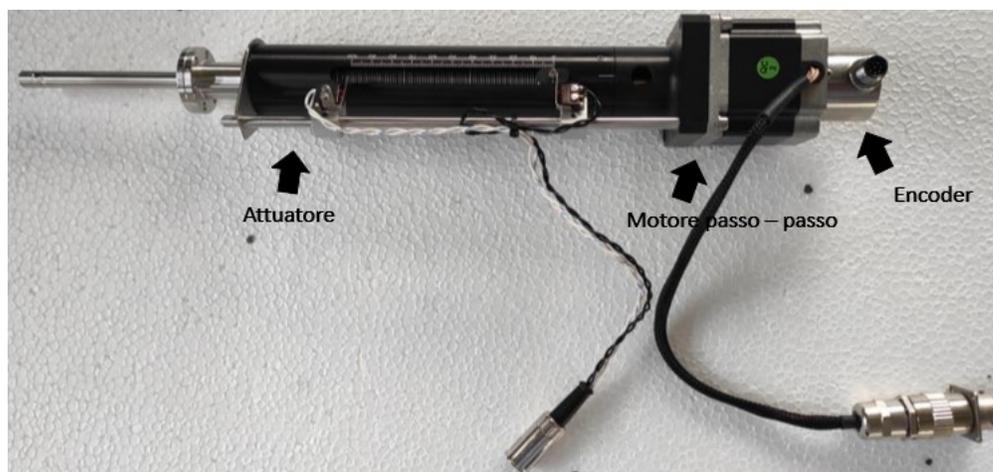


Figura 2.11: Il sistema di movimentazione delle slitte costituito dall’attuatore, il motore e l’encoder.

Gli attuatori lineari

Gli attuatori della ditta VACGEN appartengono alla serie LDS (Linear Screw Drives) e sono dispositivi push/pull adatti all'utilizzo in ambiente con alto grado di vuoto. L'attuatore converte il movimento rotatorio del motore passo – passo in un movimento lineare e fluido. La conversione del moto avviene mediante l'utilizzo di una vite che movimentata una chiocciola lungo la direzione assiale. Internamente è presente un sistema di supporto con cuscinetti lineari per guidare il movimento lineare e limitare l'oscillazione dello stelo al quale viene collegata la slitta. Questi attuatori lineari sono realizzati in acciaio inox e alluminio e sono stati testati per garantire molti cicli di funzionamento. Le caratteristiche degli attuatori sono riportate in Tabella 2.1.

Diametro albero	9 mm
Corsa massima	100 mm
Diametro flangia	34 mm
Risoluzione	0.02 mm
Carico assiale max	220 N
Pressione min	10^{-11} mbar

Tabella 2.1: Caratteristiche degli attuatori lineari VACGEN.

I motori passo – passo

I motori passo – passo utilizzati appartengono alla serie 23HSX206W della ditta Mclennan. Si tratta di motori elettrici in corrente continua senza spazzole (brushless) la cui rotazione può essere suddivisa in un gran numero di passi (step). Eccitando opportunamente con un impulso elettrico le bobine installate nello statore si genera un campo elettromagnetico rotante attorno al rotore. La rotazione di questo campo provoca la rotazione del rotore sul quale è montato un magnete al neodimio che funge da fonte magnetica permanente ad alta intensità. Grazie all'azionamento bipolare la corrente elettrica può fluire in entrambe le direzioni attraverso i singoli avvolgimenti. In questo modo è possibile arrestare istantaneamente l'albero e invertirne il verso di rotazione. Inoltre, grazie all'assenza di spazzole, il motore è caratterizzato da una lunga vita meccanica e ottima affidabilità.

L'albero non ruota in modo continuo ma in modo discreto, cioè effettua un certo numero di passi. Tale gamma di motori fornisce una risoluzione di 400 passi in una rotazione completa dell'albero (360°) lavorando in modalità di azionamento half step. In questa modalità è

prevista l'alimentazione di due bobine (due fasi) disposte le une di fronte alle altre nello statore; in questo modo il rotore ruota della metà dell'angolo nominale per eseguire un singolo passo. Ciò si traduce in un miglioramento sia della precisione che della fluidità di funzionamento del motore. Inoltre, si ottiene un raddoppiamento della risoluzione angolare rispetto alla modalità full step.

È stata scelta questa tipologia di motori proprio perché è in grado di garantire una buona risoluzione. Infatti, i motori passo – passo sono ideali per le applicazioni che richiedono una buona fluidità del movimento ed un'elevata precisione nel posizionamento. Inoltre, la struttura compatta e robusta è perfetta per l'installazione in uno spazio ridotto come quello in cui deve essere inserito il sistema.

I motori passo – passo sono molto utili per movimentare le slitte ma, nella loro forma di base, operano in modalità di controllo in anello aperto. In pratica, il motore risponde alle istruzioni del controllore e si muove di un certo numero di passi ma non fornisce alcun feedback sulla posizione raggiunta al termine del movimento. A tal proposito il motore della serie HSX ha un doppio albero per consentire il collegamento di un encoder, il quale trasforma la posizione angolare dell'albero motore in un segnale di retroazione, che viene poi elaborato dall'unità di controllo. I motori passo – passo integrati con gli encoder costituiscono, insieme alle unità di controllo, dei sistemi completi per eseguire un controllo di posizione in anello chiuso, preciso e affidabile. Questo sistema di controllo “move and verify” è particolarmente vantaggioso perché permette di verificare istantaneamente se il motore si è spostato del numero di passi impostato. La comunicazione digitale tra controllore, encoder e motore avviene tramite l'interfaccia BiSS C (bidirezionale, seriale, sincrona). Si tratta di un'interfaccia che opera in tempo reale, consentendo la trasmissione continua dei dati tra i diversi dispositivi con un'alta velocità di trasmissione.

Angolo/step	0.9°
Movimento/giro	1 mm
Movimento/step	0.0025 mm
Risoluzione	400 steps/giro
Pressione min	10^{-11} mbar

Tabella 2.2: Caratteristiche dei motori passo - passo.

Le unità di controllo

Il funzionamento di ciascun motore passo – passo è gestito da una unità di controllo dedicata (controller stepper), cioè un dispositivo che alimenta il motore eccitando o diseccitando gli avvolgimenti dello statore tramite un'erogazione controllata di energia elettrica. In pratica, ogni segnale di feedback proveniente dall'encoder viene interpretato dall'unità intelligente, la quale immediatamente inoltra una serie di impulsi di tensione al motore. Gli impulsi elettrici determinano così una sequenza di passi che corrisponde ad una specifica rotazione dell'albero meccanico. L'utilizzo di controllori integrati per pilotare i motori passo – passo permette di eseguire un controllo molto preciso del movimento e dello spostamento. Ciò rende questo sistema particolarmente adatto per l'applicazione in esame, la quale richiede una manipolazione accurata delle slitte.

Il controllore integrato Sim – Step della ditta Mclellan è un sistema la cui installazione è notevolmente facilitata e velocizzata grazie alla ridotta complessità di cablaggio. Infatti, affinché il sistema sia operativo è sufficiente eseguire il collegamento diretto tra l'unità intelligente e l'alimentazione in corrente alternata, il motore, l'encoder, i limiti di finecorsa e il PC. Il sistema è fornito di un gruppo completo di cavi, ciascuno dei quali viene utilizzato per realizzare una specifica connessione. Le unità di controllo, caratterizzate da una struttura compatta e modulare, sono state installate tramite guide opportune su un unico telaio. In questo modo è più facile la sostituzione delle singole unità di controllo in presenza di guasti e si semplifica l'integrazione di unità aggiuntive nel caso sia richiesto.

Ciascuna unità può essere programmata grazie alla memoria interna che permette di memorizzare le sequenze di istruzioni e i comandi necessari per controllare in modo preciso i parametri che caratterizzano il movimento dell'albero motore. I parametri di controllo del movimento programmabili sono la velocità, l'accelerazione, la decelerazione, la direzione di rotazione e la posizione dell'albero (in termini di spostamento assoluto o relativo). Inoltre, è possibile impostare facilmente i finecorsa software (opzionali) per limitare il movimento delle slitte entro dei limiti prefissati. In questo modo si ha la sicurezza di lavorare all'interno della corsa voluta, evitando danni generati da eventuali collisioni. Il sistema di controllo garantisce anche un'ulteriore protezione grazie al collegamento con i limiti di finecorsa hardware installati sull'attuatore lineare. Su ogni attuatore sono montati due microinterruttori meccanici, i quali sono sensibili alla direzione e hanno contatti normalmente chiusi. L'attuatore raggiunge il finecorsa, colpisce la leva e il sistema di controllo ferma immediatamente il motore. Così si evitano movimenti pericolosi al di fuori dei limiti causati da possibili errori di comando.

La comunicazione e lo scambio di dati tra i controllori Sim – Step e il PC avvengono tra-

mite un'interfaccia seriale RS232. L'operatore può effettuare la programmazione dell'unità intelligente in maniera efficiente tramite il software emulatore di terminale "McTerminal" installato sul computer. Sul terminale si inserisce il comando di input (numero di step e direzione di movimento) che viene ricevuto dal controllore, il quale fornisce in tempo reale i movimenti per regolare la direzione e la distanza esatta da raggiungere.



(a) Le unità di controllo.

(b) Il retro delle unità di controllo.

Figura 2.12: Il sistema di controllo Sim - Step.



Figura 2.13: I finecorsa installati sull'attuatore.

Gli encoder rotativi

Gli encoder rotativi integrati nei motori sono prodotti dall'azienda POSITAL e sono dispositivi magnetici la cui tecnologia di rilevazione dei segnali è basata sulla variazione del campo magnetico generato da un magnete permanente rotante fissato direttamente all'albero del motore. All'interno dell'encoder i componenti elettronici sono racchiusi in un pacchetto compatto, montato su un unico circuito stampato, privo di parti in movimento. Una custodia

resistente in acciaio inossidabile protegge tutte le parti del sistema. L'assenza di contatto tra il magnete rotante e i componenti statici è un fattore che elimina l'usura meccanica del dispositivo, il quale ha una vita potenzialmente infinita. Questo è uno dei principali vantaggi del sistema magnetico che, non richiedendo interventi di manutenzione, risulta conveniente anche da un punto di vista economico. Un'altra caratteristica è rappresentata dalla semplicità meccanica (assenza di ingranaggi, cuscinetti), grazie alla quale gli encoder magnetici sono resistenti ad alti livelli di vibrazioni e urti. Inoltre, la tecnologia magnetica è ottima per lavorare in ambienti gravosi poiché è robusta ed è piuttosto insensibile all'umidità, alla polvere e altri agenti contaminanti. Infine, il design compatto di questi encoder è ideale per l'integrazione nel sistema in esame in quanto facilita l'installazione in spazi ridotti.

La variazione del flusso magnetico viene rilevata, campionata e trasformata in un impulso elettrico da un sensore Wiegand. Il principio di funzionamento di questi sensori è basato sull'effetto Wiegand, un fenomeno fisico che si verifica avvolgendo una bobina di rame attorno al filo di Wiegand, cioè un nucleo realizzato con un filo di Vicalloy (lega ferromagnetica di cobalto, ferro e vanadio), e sottoponendo il sistema ad un campo magnetico esterno. Ogni volta che la polarità del campo magnetico si inverte si verifica un'improvvisa inversione della polarità magnetica del filo di Wiegand che, a sua volta, induce un impulso di corrente nella bobina avvolta sul nucleo. Negli encoder rotativi gli impulsi sono generati dalla rotazione del magnete permanente collegato sul secondo albero del motore. Grazie alle caratteristiche uniche del filo di Wiegand, gli impulsi generati da ogni rotazione dell'albero sono uniformi in intensità e durata, cioè sono indipendenti dalla velocità di rotazione e dalla frequenza con cui varia il campo magnetico esterno. Quindi, ad ogni inversione di polarità magnetica anche la quantità di energia elettrica prodotta è costante.

L'impiego dei sensori Wiegand è molto efficace in quanto gli impulsi generati vengono sfruttati sia come segnali di output sia per recuperare energia. In pratica, l'energia recuperata da ogni singolo impulso è sufficiente per alimentare l'elettronica del contatore, eliminando la necessità di un'alimentazione esterna o batterie. In questo modo è possibile registrare ogni giro meccanico dell'albero in maniera affidabile, qualunque sia la condizione operativa. Così si garantisce che il conteggio del numero di giri, il quale viene memorizzato in un chip di memoria non volatile, sia accurato e preciso. Di conseguenza, il sistema di controllo, anche a seguito di un riavvio o un'interruzione di alimentazione, ha informazioni complete e precise sulla posizione assoluta.

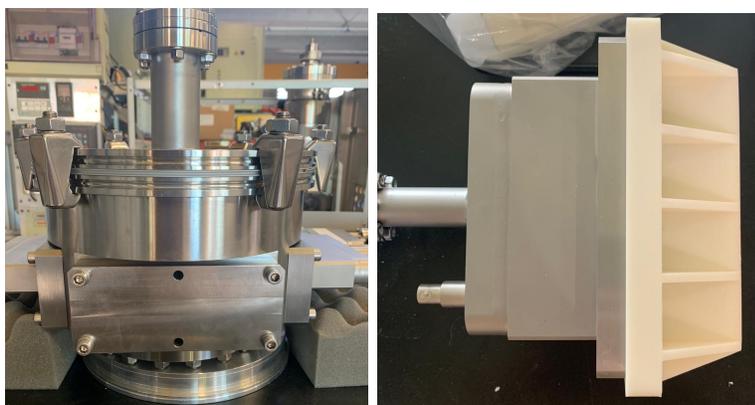
Gli encoder rotativi impiegati sono assoluti, cioè forniscono un feedback di posizione assoluto. In pratica, ad ogni posizione fisica dell'albero è associato un valore numerico univocamente

codificato. La tecnologia di misurazione assoluta garantisce una risoluzione elettrica di 16 bit, con la possibilità di effettuare misure multigiro in un campo che arriva fino a 65536 giri. Il segnale di uscita tiene conto sia dell'angolo di rotazione effettuato dall'albero all'interno di un singolo giro sia del numero di giri completati. Tra le altre caratteristiche, questi encoder offrono un'ottima precisione, la quale è garantita all'interno di un intervallo di $\pm 0.3^\circ$.

2.2 Procedura di montaggio

Per facilitare il lavoro di coloro che si occuperanno dell'installazione del sistema slitte presso i laboratori di Catania è stata stilata una procedura di montaggio dettagliata, la quale spiega passaggio per passaggio tutte le fasi da eseguire e l'ordine con cui vanno collegati tutti i componenti. Queste istruzioni saranno utili nel fornire le indicazioni necessarie per il montaggio di tutti gli elementi che costituiscono il sistema al fine di effettuare una corretta installazione. In questo modo gli operatori potranno operare in autonomia e in totale sicurezza.

Dalla sezione di Torino non verrà spedito l'intero sistema completamente assemblato. In particolare, saranno spediti il corpo della camera, chiusa con al suo interno lo schermo fisso, e separatamente le tasche contenenti le slitte collegate ai sistemi di movimentazione, anch'esse chiuse. La chiusura della camera e delle tasche mediante opportuni tappi (Fig. 2.14) è indispensabile per evitare l'accumulo di sporcizia e impurità al loro interno con conseguente contaminazione dei componenti che lavoreranno in condizioni di alto vuoto quando saranno messi in opera. Infatti, prima del montaggio tutti i componenti sono stati attentamente lavati, puliti e maneggiati con i guanti.



(a) I tappi per la chiusura della camera. (b) I tappi per la chiusura delle tasche.

Figura 2.14: I tappi per la chiusura del sistema.

Le fasi e le operazioni da svolgere per l'installazione completa dell'intero sistema sono le seguenti:

1. Per prima cosa si esegue il centraggio dello schermo fisso all'interno della camera slitte mediante due spine, che garantiscono un posizionamento molto preciso, e successivamente si effettua il fissaggio tra i due corpi tramite le viti ISO 7380-1 M4 x 12 (Fig. 2.15).

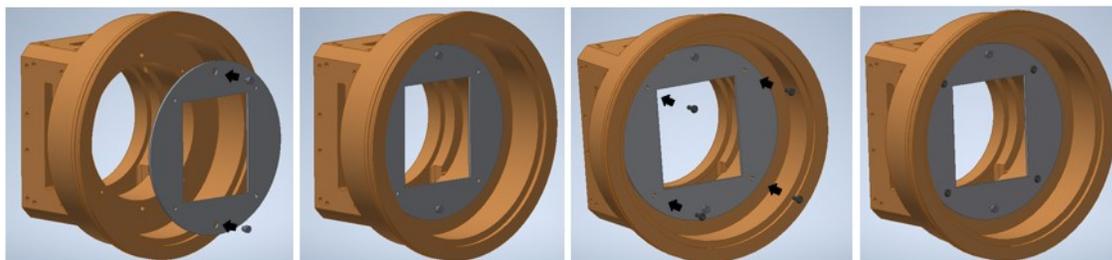
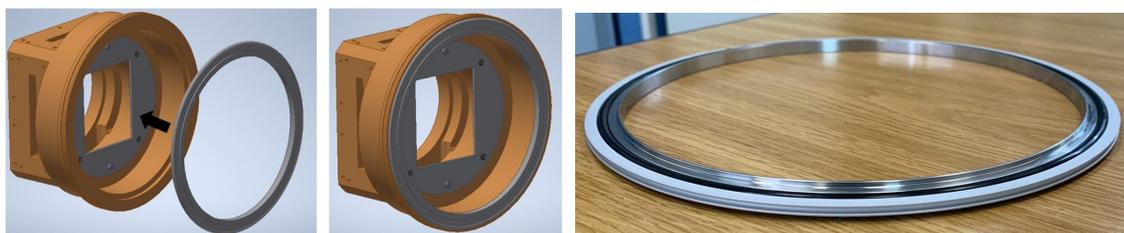


Figura 2.15: Fase 1 - Installazione dello schermo nel corpo della camera slitte.

2. Si procede con il montaggio dell'o-ring in EPDM sull'anello di centraggio e l'inserimento dei due nella camera slitte (Fig. 2.16). L'anello di centraggio è un anello in metallo che ha la funzione di mantenere la tenuta nella giusta posizione durante il montaggio, cioè mentre viene schiacciata tra la flangia della camera e quella della gate – valve. Inoltre, l'anello ha anche il compito di replicare la posizione relativa tra le due flange.



(a) Fase 2.

(b) L'anello di centraggio con l'o-ring.

Figura 2.16: Fase 2 - Inserimento dell'anello di centraggio.

3. In seguito, può avvenire il collegamento tra la camera slitte e la gate – valve con griffe e viti (DIN EN ISO 4762 M8 x 35) che assicurano un fissaggio stabile (Fig. 2.17). Questo tipo di chiusura con griffe permette la rotazione del corpo della camera slitte finché non si è raggiunta la posizione voluta tramite rilevamento con un sistema di misura esterno, garantendo la verticalità del sistema rispetto le superfici di montaggio delle tasche LEFT e RIGHT (non ancora installate).

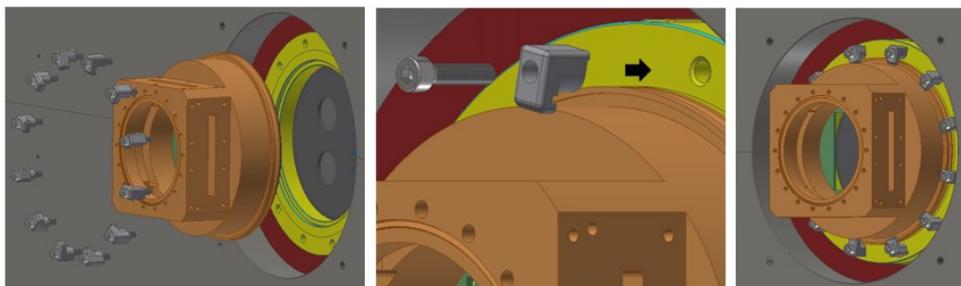


Figura 2.17: Fase 3 - Montaggio del corpo della camera.

4. Successivamente si posiziona opportunamente il collare intorno alla camera (Fig. 2.18). Tale collare va inserito già con le viti radiali (M12 x 27) completamente avvitate perché l'apertura sullo schermo del quadrupolo non permette di avvitarle radialmente. Si effettua quindi la chiusura del collare intorno al corpo della camera, in basso e in alto, utilizzando viti (DIN EN 24017 M8 x 45), rondelle (DIN 125-1 A A 8,4) e dadi (DIN EN ISO 4032 M8). In questa fase si consiglia di non stringere completamente le due parti del collare in maniera tale che quest'ultimo possa ruotare ancora attorno al corpo della camera. Se il collare venisse stretto totalmente ci sarebbe il rischio di generare sforzi nelle fasi successive.

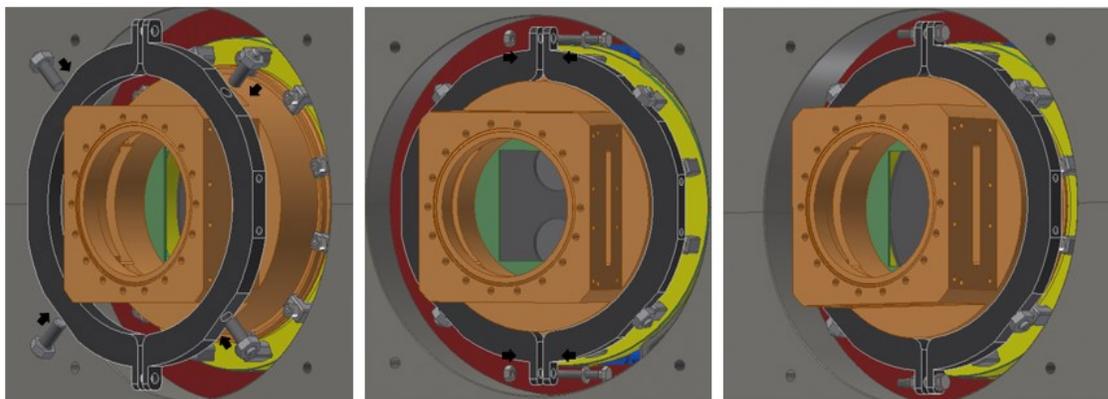


Figura 2.18: Fase 4 - Inserimento e posizionamento del collare.

5. A questo punto è possibile svitare gradualmente le viti (M12 x 27) in modo tale che si inseriscano nei fori dei blocchetti di posizionamento (componenti viola) del collare (Fig. 2.19). In questo modo i blocchetti vengono premuti contro la superficie interna del foro centrale dello schermo del quadrupolo. In pratica, i blocchetti di posizionamento hanno la funzione di regolare il centraggio del corpo della camera (regolazione della posizione verticale e orizzontale).

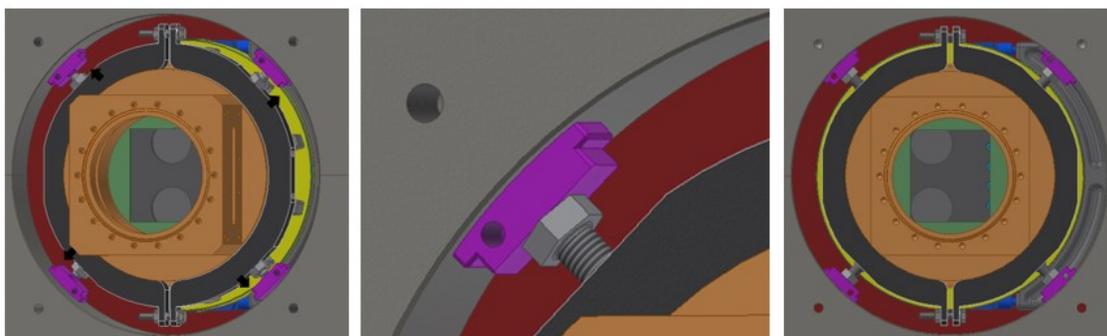


Figura 2.19: Fase 5 - Installazione dei blocchetti di posizionamento del collare.

6. È possibile procedere con il collegamento tra le guide (componenti blu) e i blocchetti di posizionamento tramite viti DIN EN 24017 M8 x 25 (Fig. 2.20). Le guide hanno la funzione di regolare la posizione della camera in profondità, cioè lungo la linea del fascio. Quindi si effettua il fissaggio delle guide allo schermo del quadrupolo utilizzando viti (DIN EN 24017 M12 x 25) e si effettua la regolazione. In questo modo le guide fissano definitivamente la posizione dei blocchetti di posizionamento. È possibile ora stringere viti e dadi per bloccare il collare sulla camera, sicuri di non indurre tensioni indesiderate.

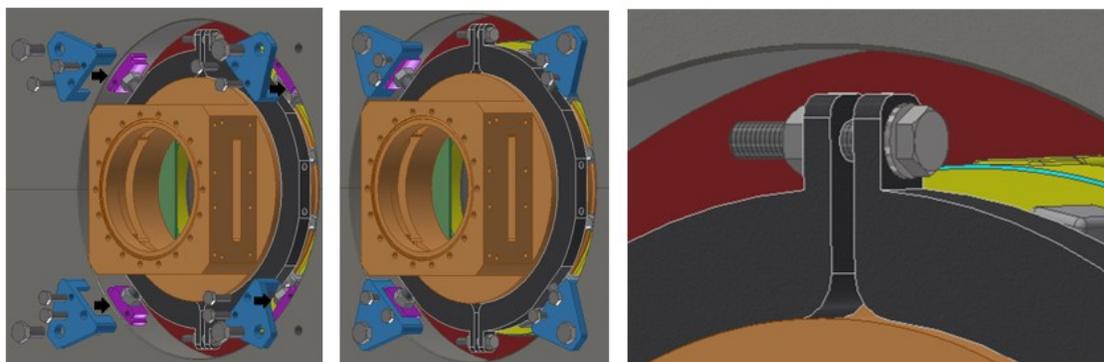


Figura 2.20: Fase 6 - Inserimento e collegamento delle guide del collare.

7. Successivamente si esegue il collegamento tra gli attuatori lineari e le tasche utilizzando viti (DIN EN ISO 4762 M4 x 20), rondelle (DIN 125-1 A A 4,3) e dadi (DIN EN ISO 4032 M4), inserendo le necessarie guarnizioni in rame tra le flange CF 16 (Fig. 2.21). Il collegamento tra la vite e il dado esercita una forza di serraggio che schiaccia e deforma plasticamente la guarnizione in modo tale da garantire la tenuta statica. Bisogna fare attenzione quando il collegamento tra le due flange viene allentato perché, una volta deformata, la guarnizione non può essere riutilizzata e deve essere necessariamente sostituita.

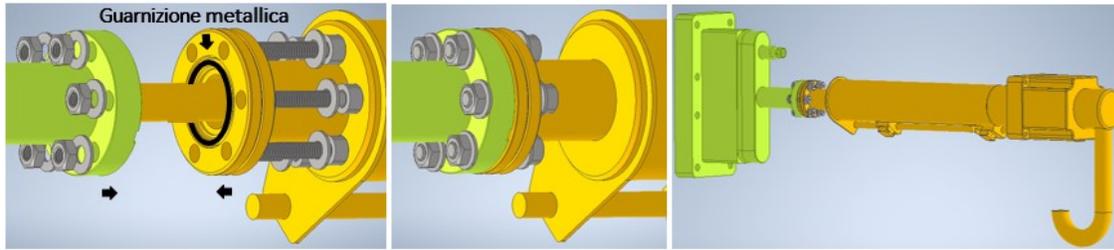
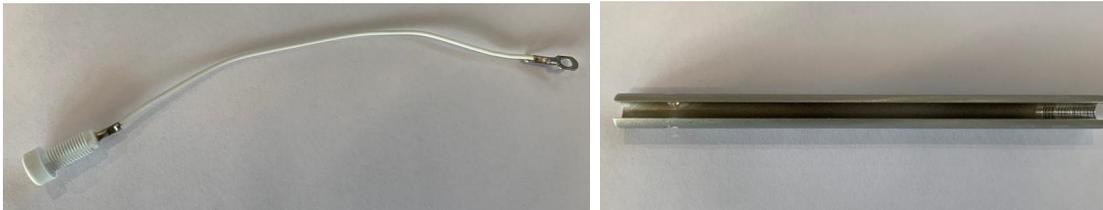


Figura 2.21: Fase 7 - Collegamento tra attuatori e tasche.

8. Si procede con l'inserimento dei cavi per la misurazione della corrente elettrica all'interno delle tasche (Fig. 2.22); ciascuna delle tasche ha un connettore, il cui pin si inserisce nel connettore femmina del cavo corrispondente consentendo così il collegamento elettrico. Risulta piuttosto difficile l'inserimento di questi cavi nelle tasche a causa del ridotto spazio a disposizione. Per tale motivo è stato realizzato uno strumento ad hoc sufficientemente lungo per facilitare questa operazione. Basterà inserire il connettore del cavo all'interno di questo strumento, farlo entrare nella tasca ed eseguire il collegamento.



(a)

(b)

Figura 2.22: Nella figura (a) è mostrato il cavo per la misurazione della corrente e nella figura (b) lo strumento per inserire il cavo nella tasca.

9. A questo punto si esegue il collegamento tra il sostegno delle slitte UP (U), RIGHT (R) e LEFT (L) al rispettivo attuatore tramite una vite in PEEK (M4 x 12) e interponendo una rondella in nitruro di boro (Fig. 2.23). Bisogna far avanzare l'attuatore fino ad ottenere la fuoriuscita dello stelo dalla tasca. Questa fase è fondamentale al fine di garantire il disaccoppiamento elettrico tra le slitte e gli attuatori. Come già detto, le correnti indotte dagli ioni che colpiscono le slitte non si devono propagare verso gli attuatori in modo tale da poter misurare il loro valore effettivo tramite il cavo collegato al sostegno della slitta. La discontinuità elettrica è stata verificata mediante l'utilizzo di un multimetro.

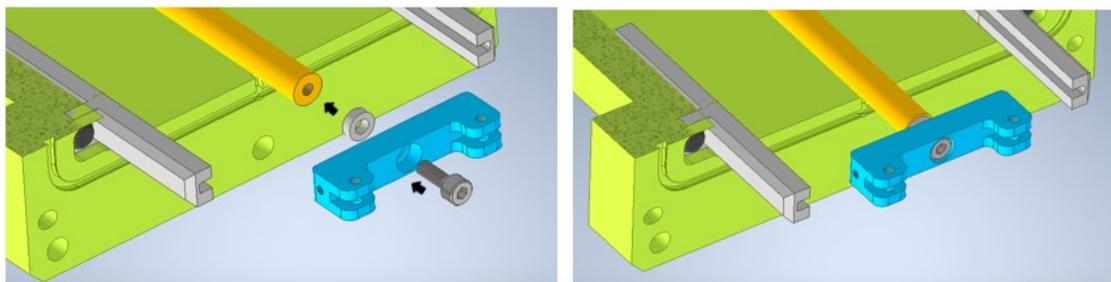


Figura 2.23: Fase 9 - Collegamento del sostegno della slitta UP all'attuatore; similmente per le slitte LEFT e RIGHT.

10. Viene poi eseguito il collegamento tra il cavo per la misurazione delle correnti e il sostegno delle slitte UP (U), RIGHT (R) e LEFT (L) mediante una vite (ISO 7380-1 M3 x 6) (Fig. 2.24). In questa fase occorre prestare molta attenzione e disporre il cavo correttamente in modo tale che non rimanga incastrato tra la guida e la slitta. Se ciò accadesse si verificherebbe la rottura del cavo e non sarebbe possibile misurare le correnti correttamente.

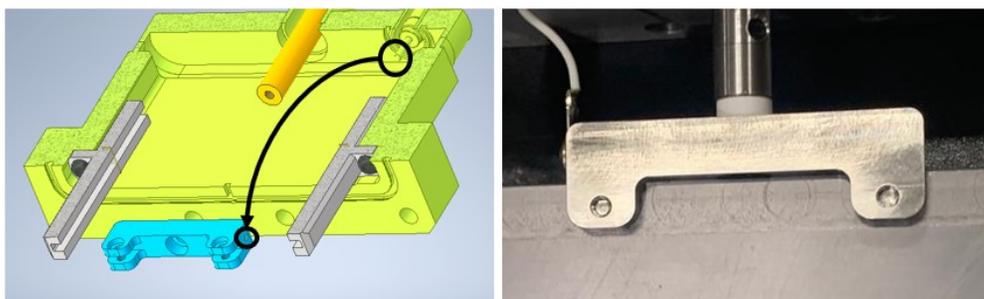


Figura 2.24: Fase 10 - Collegamento dei cavi ai rispettivi sostegni delle slitte U, L, R, D.

11. Successivamente vengono effettuati i collegamenti tra le slitte UP (U), RIGHT (R) e LEFT (L) e i relativi sostegni utilizzando viti (ISO 7380-1 M3 x 6) (Fig. 2.25). Questo collegamento è quello che permette di trasferire il moto dall'attuatore alla slitta e per tale motivo è importante controllare che il serraggio delle viti sia stato eseguito correttamente. Per effettuare una verifica bisogna far muovere ripetutamente l'attuatore avanti e indietro, controllando che il movimento delle slitte risulti fluido e continuo.
12. Per quanto riguarda la slitta DOWN (D), viene dapprima eseguito il collegamento tra l'adattatore intermedio e il corrispondente attuatore tramite una vite (ISO 7380-1 M4 x 10) (Fig. 2.26). L'adattatore intermedio inizialmente non era presente; la ragione per cui è stato introdotto è spiegata nel paragrafo 3.5. L'attuatore in questione è quello

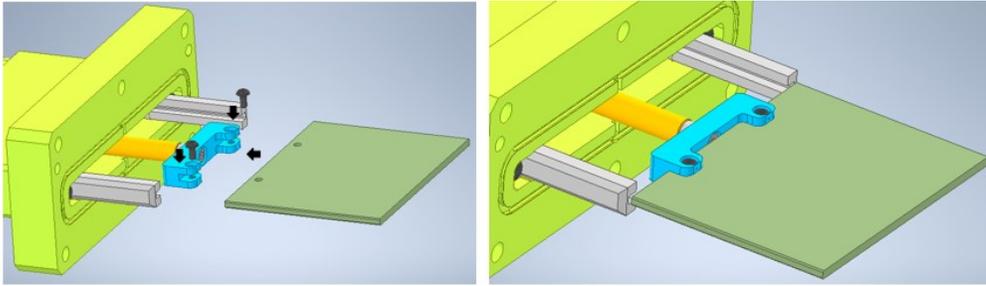


Figura 2.25: Fase 11 - Collegamento tra la slitta UP e il relativo sostegno; similmente per le slitte LEFT e RIGHT.

il cui stelo passa attraverso il cilindro con lunghezza minore. Anche in questo caso bisogna far avanzare l'attuatore fino ad ottenere la fuoriuscita dello stelo dalla tasca.

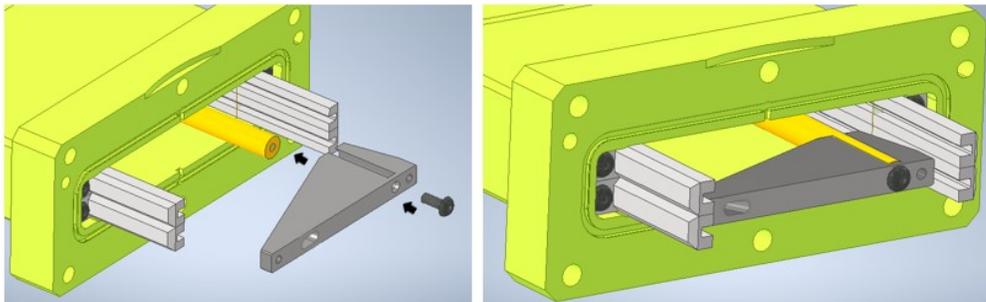


Figura 2.26: Fase 12 - Collegamento tra l'adattatore intermedio e lo stelo dell'attuatore.

13. A questo punto bisogna far passare il cavo per la misurazione della corrente attraverso l'asola passante ricavata nell'adattatore intermedio e in seguito si effettua il collegamento tra il cavo e il sostegno della slitta DOWN mediante una vite (ISO 7380-1 M3 x 6) (Fig. 2.27). È importante che il cavo passi attraverso l'asola dell'adattatore perché altrimenti c'è il rischio che il filo rimanga bloccato tra la guida e la slitta DOWN o la pepperpot. Inoltre, durante il suo movimento, la pepperpot potrebbe trasportare con sé il filo e scollegarlo dal connettore. Quindi, bisogna evitare queste situazioni che porterebbero problemi nella lettura della corrente sulla slitta DOWN.
14. Si procede con il collegamento tra il sostegno della slitta DOWN (D) e l'adattatore intermedio utilizzando le viti in PEEK (M4 x 12) e interponendo le rondelle in nitruro di boro (Fig. 2.28). Il collegamento avviene in due punti, a destra e sinistra, garantendo l'isolamento elettrico tra la slitta e l'attuatore.
15. Viene poi effettuato il collegamento tra la slitta DOWN (D) e il relativo sostegno mediante viti (ISO 7380-1 M3 x 6) (Fig. 2.29). Anche per questa slitta è importan-

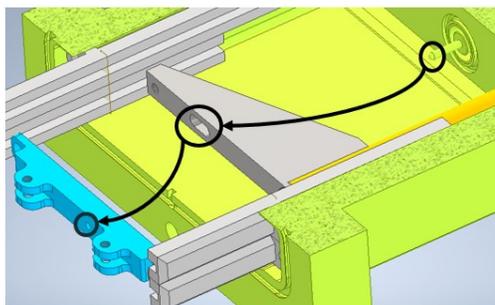


Figura 2.27: Fase 13 - Collegamento del cavo per misurare la corrente al sostegno della slitta DOWN.

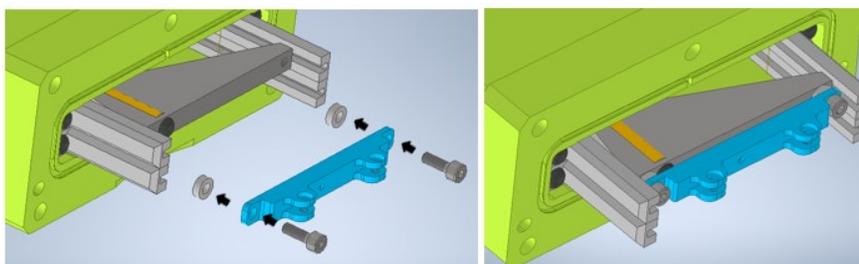


Figura 2.28: Fase 14 - Collegamento tra il sostegno della slitta DOWN e l'adattatore intermedio.

te controllare che il serraggio delle viti sia stato eseguito correttamente. Inoltre, è assolutamente necessario far muovere ripetutamente l'attuatore avanti e indietro, controllando in primo luogo che il movimento della slitta avvenga senza impuntamenti, e in secondo luogo che risulti fluido e continuo. Infatti, la slitta DOWN (D) è movimentata da un attuatore decentrato rispetto al centro della slitta, con conseguente aumento del rischio che si manifesti l'impuntamento della stessa. L'adattatore intermedio inserito nella Fase 12 serve proprio per mitigare questo problema. La slitta è stata testata in laboratorio e l'impuntamento non si verifica.

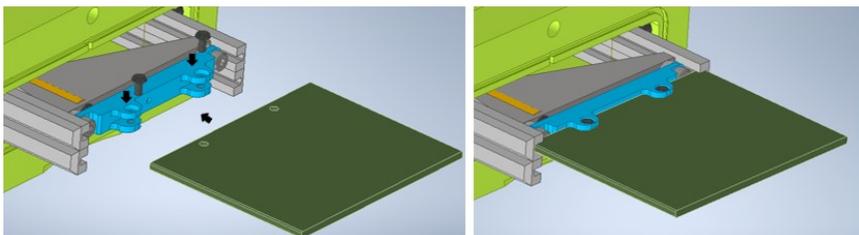


Figura 2.29: Fase 15 - Collegamento tra la slitta DOWN e il relativo sostegno.

16. Successivamente viene eseguito il collegamento tra il sostegno della pepperpot e il relativo attuatore utilizzando una vite in acciaio inox (ISO 7380-1 M4 x 10) (Fig. 2.30).

Anche in questo caso bisogna far avanzare l'attuatore fino ad ottenere la fuoriuscita dello stelo dalla tasca. L'attuatore in questione è quello il cui stelo passa attraverso il cilindro con lunghezza maggiore. Non vengono utilizzate la vite in PEEK e la rondella in BN perché non è richiesta alcuna lettura della corrente elettrica sulla pepperpot, la quale ha la funzione di selezionare particolari traiettorie di ioni emessi nelle interazioni.

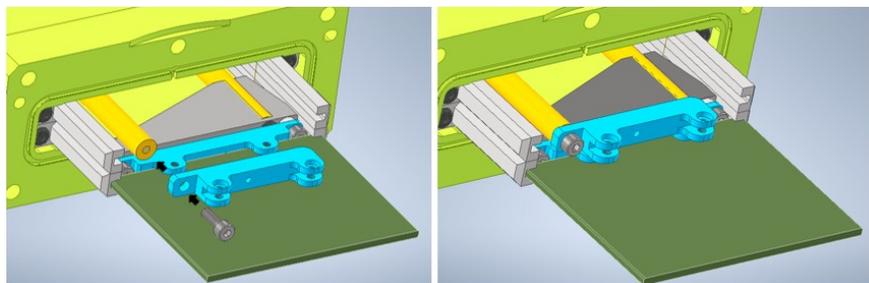


Figura 2.30: Fase 16 - Collegamento tra il sostegno della pepperpot e il relativo attuatore.

17. A questo punto si effettua il collegamento tra la pepperpot e il relativo sostegno tramite le viti (ISO 7380-1 M3 x 6) (Fig. 2.31), verificando che il serraggio delle viti sia stato eseguito correttamente. Poiché anche la pepperpot è movimentata da un attuatore decentrato rispetto ad essa, è maggiore il rischio che si manifesti il suo impuntamento. Quindi, è assolutamente necessario far muovere ripetutamente l'attuatore avanti e indietro, controllando in primo luogo che il movimento della pepperpot avvenga senza impuntamenti, e in secondo luogo che risulti fluido e continuo. Anche la pepperpot è stata testata in laboratorio e l'impuntamento non si verifica. Gli operatori dovranno comunque movimentare la slitta ripetutamente prima della messa in opera del sistema.

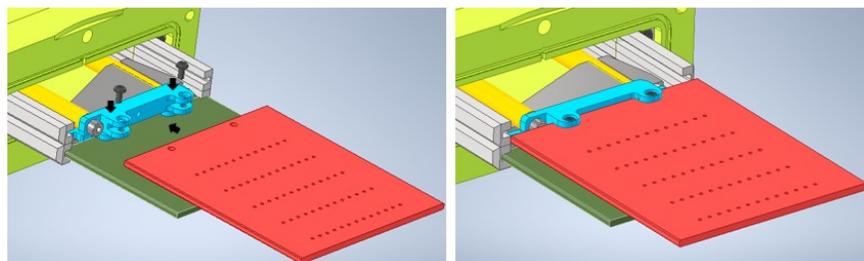


Figura 2.31: Fase 17 - Collegamento tra la pepperpot e il relativo sostegno.

18. Si procede con l'avvitamento finale delle guide all'interno delle tasche agendo sulle viti (ISO 7380-1 M4 x 12) precedentemente inserite (Fig. 2.32). Questa operazione è

particolarmente importante al fine di eliminare il gioco tra le guide e le slitte. In questo modo viene garantita la linearità del movimento delle singole slitte e viene ridotto il rischio che le stesse si impuntino, ottenendo anche una maggiore precisione nel controllo del movimento.

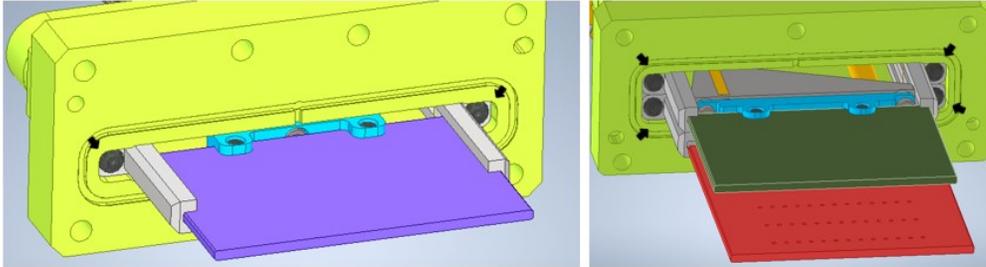


Figura 2.32: Fase 18 - Avvitamento finale delle guide.

19. Una volta terminato il montaggio delle slitte all'interno delle tasche si esegue il collegamento di queste ultime al corpo della camera tramite viti (UNI 5931 M6 x 30) e rondelle (UNI 6592 6,4 x 11), ricordando di inserire le guarnizioni in EPDM che assicurano la tenuta per il vuoto (Fig. 2.33). L'allineamento di ciascuna tasca sulla camera è garantito da due spine caratterizzate da un accoppiamento molto preciso. Il fissaggio mediante il serraggio delle viti va eseguito utilizzando una chiave dinamometrica per applicare una coppia pari a 7 Nm che garantisce il corretto posizionamento delle tasche e la corretta deformazione dell'o-ring sull'intero perimetro.

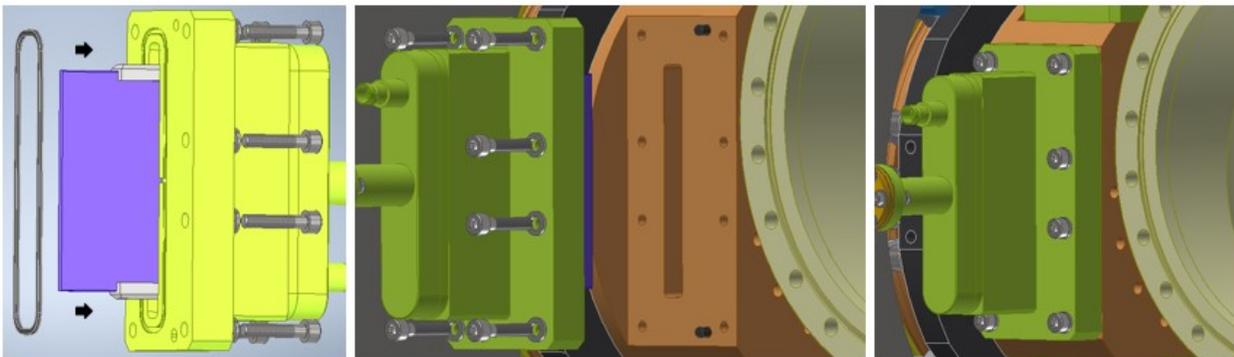


Figura 2.33: Fase 19 - Montaggio delle tasche al corpo della camera.

20. Infine, si effettua il posizionamento del soffietto tra la camera slitte e la camera di scattering per mettere i due ambienti in comunicazione (Fig. 2.34). Si tratta della beam pipe attraverso la quale passa sia il fascio di ioni che non ha interagito col bersaglio, sia i prodotti (ioni) delle interazioni. Il collegamento tra il soffietto e le due camere avviene mediante viti (DIN EN 24017 M8 x 25).

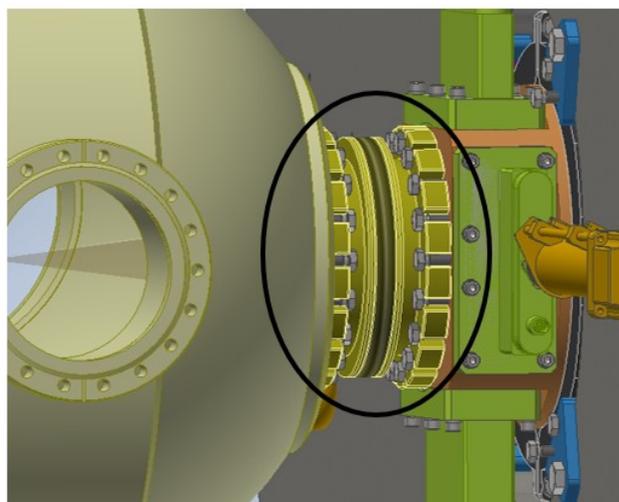


Figura 2.34: Fase 20 - Disegno esplicativo della fase 20.

Una peculiarità molto importante è che il sistema di slitte può essere montato in posizione sia se la camera di scattering è presente, sia se è assente. Rimuovendo le tasche con le slitte e scollegando il manicotto è possibile sfilare via la camera slitte, facendola scorrere nello spazio tra la camera di scattering e lo schermo del quadrupolo. Nella Fig. 2.35 viene mostrato il risultato finale al termine della procedura di montaggio.

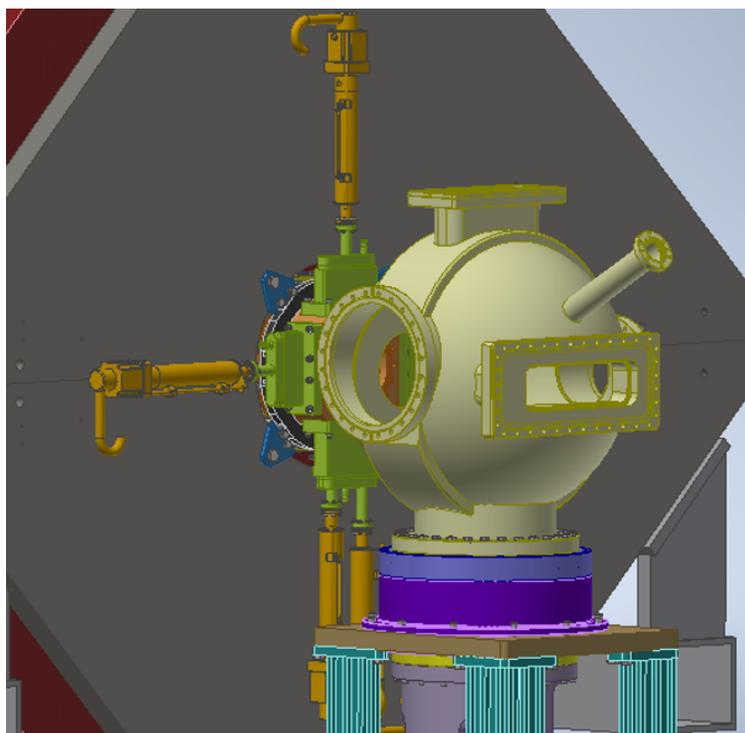


Figura 2.35: Vista della camera slitte in posizione.

Capitolo 3

Test preliminari e ottimizzazione del sistema

3.1 Circuito di controllo del sistema di movimentazione

Una delle prime attività svolte è stata la realizzazione del circuito elettrico di controllo per la movimentazione dei motori e, di conseguenza, delle slitte. Come spiegato nel Capitolo 2, il funzionamento di ciascun motore passo – passo è gestito tramite un controllore dedicato Sim-Step che esercita un controllo in anello chiuso (closed loop) sul sistema. Ogni comando introdotto da un operatore che effettua la programmazione da computer viene ricevuto dall'unità intelligente. Il segnale in ingresso, corrispondente ad un certo numero di steps, viene elaborato e trasformato in una serie di impulsi, i quali vengono inviati al motore determinando il suo movimento. La rotazione effettiva dell'albero viene misurata dall'encoder magnetico e convertita in un segnale elettrico di retroazione che viene poi inviato all'unità intelligente per chiudere l'anello di controllo. Infatti, sulla base del segnale di feedback ricevuto, il controllore agisce eccitando o diseccitando gli avvolgimenti del motore al fine di far ruotare l'albero del numero di passi impostato.

In totale bisogna controllare il movimento di cinque motori diversi per cui il sistema è costituito da cinque unità di controllo, a ciascuna delle quali è associato un indirizzo diverso (vedi Fig. 3.1). Gli indirizzi sono stati associati alle slitte nel seguente modo:

- ADDRESS 01: motore che aziona la slitta UP.
- ADDRESS 02: motore che aziona la slitta DOWN.

- ADDRESS 03: motore che aziona la slitta LEFT.
- ADDRESS 04: motore che aziona la slitta RIGHT.
- ADDRESS 05: motore che aziona la PEPPERPOT.



Figura 3.1: Le cinque unità di controllo che permettono la movimentazione dei motori del sistema.

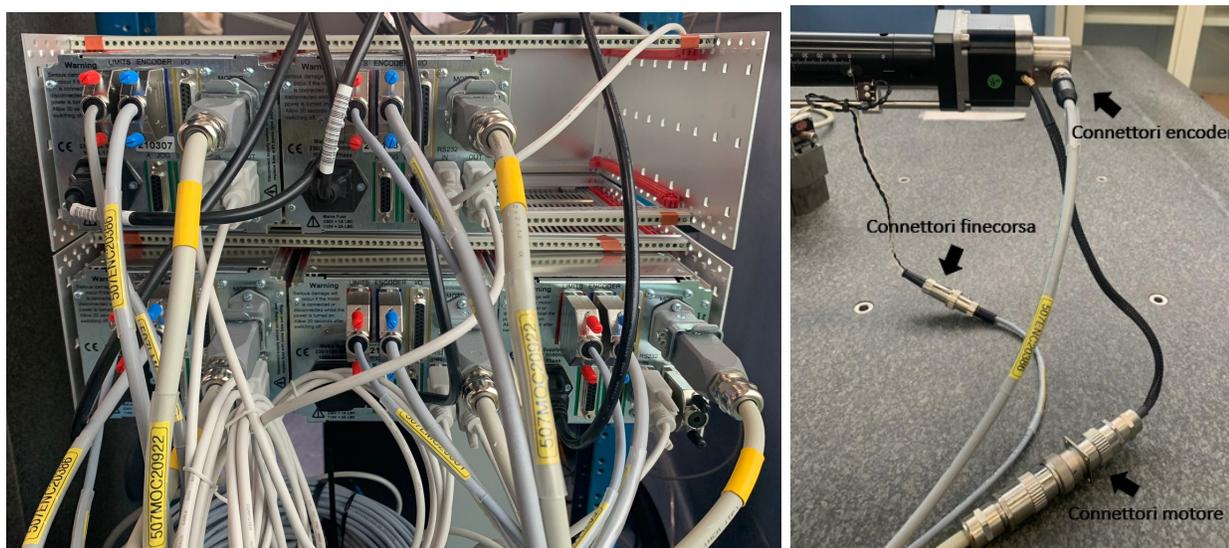
Per consentire la trasmissione dei dati e lo scambio di informazioni tra i diversi dispositivi sono stati utilizzati degli specifici cavi dotati di connettori da inserire nel lato posteriore del pannello del controllore (vedi Fig. 3.2). Per prima cosa è stato eseguito il collegamento di ciascuna unità di controllo all'alimentazione (cavi neri). Poi si è proceduto con il collegamento in serie tra i singoli controllori mediante cavi seriali RS232 come indicato:

1. ADDRESS 01 connesso al computer in ingresso e all'ADDRESS 02 in uscita.
2. ADDRESS 02 connesso all'ADDRESS 01 in ingresso e all'ADDRESS 03 in uscita.
3. ADDRESS 03 connesso all'ADDRESS 02 in ingresso e all'ADDRESS 04 in uscita.
4. ADDRESS 04 connesso all'ADDRESS 03 in ingresso e all'ADDRESS 05 in uscita.
5. ADDRESS 05 connesso all'ADDRESS 04 in ingresso e al connettore di loop – back terminator in uscita.

Successivamente è stato effettuato il collegamento diretto tra ogni unità di controllo Sim - Step e gli altri componenti, semplificato grazie all'utilizzo di cavi codificati. Ogni cavo è

dotato su ciascuna estremità di un connettore: uno è stato inserito nell'unità di controllo e l'altro nel corrispondente connettore del dispositivo da collegare (motore, encoder, finecorsa) (vedi Fig. 3.2). Il circuito elettrico completo è riportato in Appendice A. Inoltre, su tutte le unità di controllo, in corrispondenza dei diversi attacchi sono indicati i nomi dei dispositivi da collegare e ad alcuni connettori è associato un colore. In particolare, sono stati impiegati:

- un cavo della serie 507MOC per la connessione tra il motore passo-passo e il controllore;
- un cavo della serie 507ENC per la connessione tra l'encoder e il controllore (colore blu);
- un cavo della serie 507LMC per la connessione tra i finecorsa e il controllore (colore rosso).



(a) Tutti i cavi inseriti nel retro delle unità di controllo. (b) I connettori che consentono il collegamento tra l'unità di controllo e il motore, l'encoder e i finecorsa.

Figura 3.2: I cavi e i connettori utilizzati nel sistema di controllo.

Terminati tutti i collegamenti, è necessario che tutte le unità siano attive e interconnesse tra loro per rendere il sistema operativo, altrimenti comparirà un segnale di errore nel terminale di programmazione McTerminal e non sarà possibile inviare alcun comando. Invece, nel caso in cui una o più connessioni con motore/encoder/finecorsa non siano state eseguite correttamente, sul display del pannello frontale apparirà lo stato "E" per segnalare la presenza di un errore. In caso contrario, sul display verrà visualizzato il segnale "-" ad indicare che l'unità di controllo è attiva e predisposta per il funzionamento senza alcun rilevamento di

guasti. Invece, durante l'esecuzione di un comando compare il segnale "o" per segnalare che la movimentazione del motore è in corso. La comparsa di questi segnali di stato è visibile in Fig. 3.3.



(a) Segnale di errore. (b) Segnale di assenza guasti. (c) Segnale di movimentazione in corso del motore.

Figura 3.3: I segnali di stato del sistema.

Altri segnali che possono essere visualizzati tramite il display di stato sono (vedi Fig. 3.4):

- “u” per indicare il raggiungimento del limite software superiore (upper soft limit);
- “l” per indicare il raggiungimento del limite software inferiore (lower soft limit);
- “U” per indicare il raggiungimento del limite hardware superiore (upper hard limit);
- “L” per indicare il raggiungimento del limite hardware inferiore (lower hard limit).



Figura 3.4: I segnali di raggiungimento del finecorsa.

Come è stato già anticipato, la programmazione delle unità di controllo avviene tramite un computer sul quale è stato installato il software McTerminal. Attraverso il terminale sono state fornite le istruzioni per effettuare la movimentazione dei motori e l'impostazione dei limiti software (soft limits). Si riportano di seguito i comandi utilizzati per lo svolgimento delle operazioni appena citate.

- Il comando “ $\langle indirizzo \rangle MA \langle posizione \rangle$ ” per far sì che il motore associato a tale indirizzo raggiunga la posizione assoluta indicata (in termini di steps); viene così eseguito un movimento assoluto rispetto allo zero dell’encoder.
- Il comando “ $\langle indirizzo \rangle MR \langle posizione \rangle$ ” per far sì che il motore associato a tale indirizzo subisca uno spostamento pari alla distanza indicata (in termini di steps); viene così eseguito un movimento relativo rispetto all’ultima posizione.
- Il comando “ $\langle indirizzo \rangle UL \langle posizione \rangle$ ” per impostare il limite software superiore pari alla posizione indicata.
- Il comando “ $\langle indirizzo \rangle LL \langle posizione \rangle$ ” per impostare il limite software inferiore pari alla posizione indicata.



(a) Comando che impone uno spostamento di 20000 steps al motore associato all’indirizzo 03 (slitta LEFT). (b) Comando che impone uno spostamento di 0 steps al motore associato all’indirizzo 03 (slitta LEFT).

Figura 3.5: Interfaccia grafica del terminale McTerminal.

3.2 Valutazione degli ingombri effettivi

Dopo aver completato tutti i collegamenti è stato osservato che l’insieme dei cavi impiegati per l’interconnessione tra i diversi dispositivi potrebbe rappresentare un problema per i sistemi adiacenti. I cavi sono numerosi e risultano piuttosto ingombranti a causa della loro lunghezza e del loro spessore (vedi Fig. 3.6 (a)). È fondamentale considerare tale ingombro perché

rappresenta un vincolo importante nella progettazione dei dispositivi semiautomatici che effettuano la movimentazione dei supporti dei rivelatori gamma. In generale il sistema di slitte impone numerosi vincoli e limitazioni per questi dispositivi che hanno a disposizione uno spazio di lavoro molto ridotto per svolgere la loro funzione. Per tale motivo è stata valutato il massimo ingombro generato dai cavi. In particolare, il cavo che occupa lo spazio maggiore è quello che collega il motore passo – passo all’unità di controllo. Mediante un calibro è stata misurata la distanza tra il motore e l’estremo più lontano del cavo in questione; l’ingombro massimo è risultato pari a 140 mm (vedi Fig. 3.6 (b)).

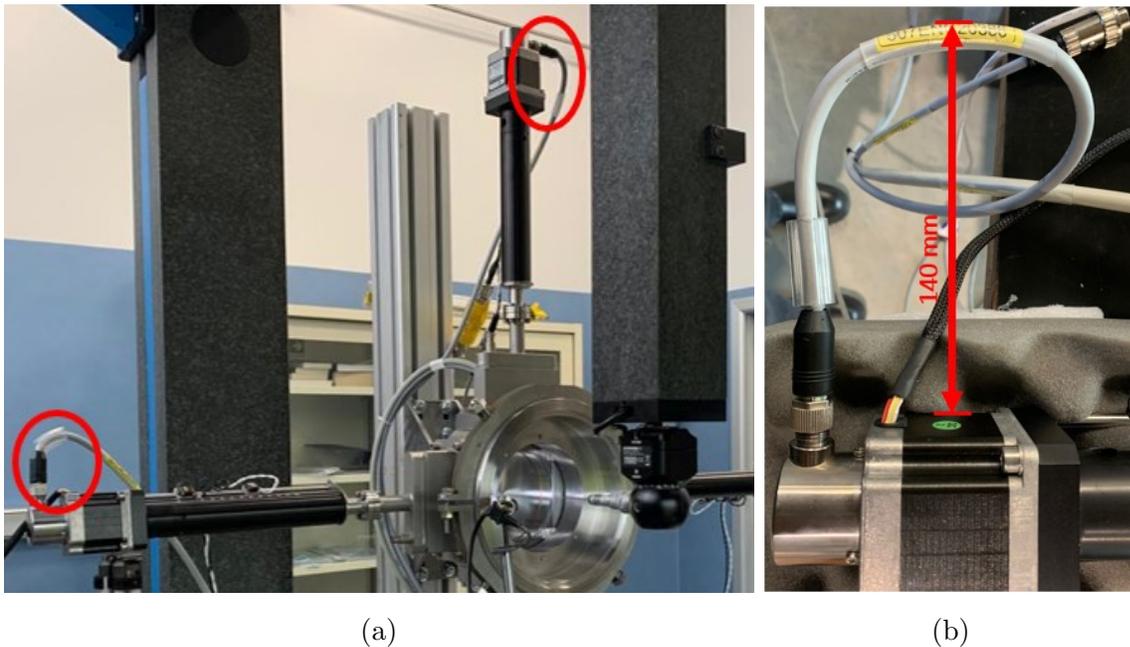


Figura 3.6: Nella figura (a) sono visibili gli ingombri occupati dai cavi nel sistema. Nella figura (b) è visibile l’ingombro massimo del cavo del motore misurato tra l’estremo più lontano del cavo e il motore stesso.

Un’altra osservazione è nata al termine del montaggio dei motori passo – passo. Il corpo del motore rimane ruotato a causa del collegamento del sistema al tubo della tasca, all’interno del quale scorre lo stelo. Questo deriva dal numero finito di viti che sono necessarie al collegamento e dalla mancata corrispondenza tra le parti (vedi Fig. 3.7). Questa inclinazione non può essere eliminata perché il sistema (attuatore, motore ed encoder) è stato spedito dall’azienda produttrice già assemblato. Sarebbe stato complicato scollegare e ricollegare il motore al fine di correggere l’errore di rotazione perché in questo modo sarebbe andata persa la precisione di misurazione dell’encoder garantita dalla calibrazione effettuata dalla ditta. Quindi, anche in questo caso è stato necessario calcolare l’ingombro effettivo di ciascun motore. Utilizzando un truschino analogico è stata misurata la distanza reale tra il punto

più estremo di ciascun motore, rispetto l'asse del sistema, e la superficie della tasca contenente la relativa slitta (vedi Fig. 3.8).

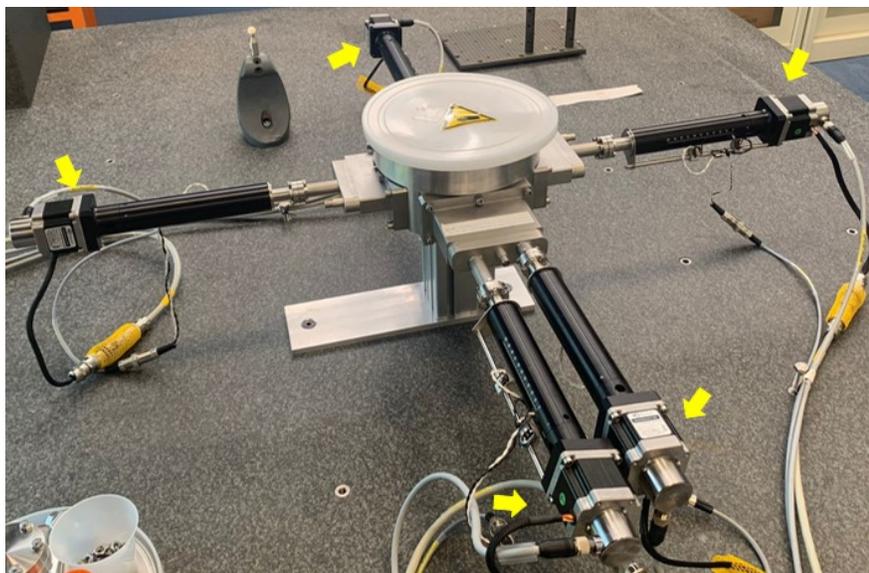


Figura 3.7: Nella figura è visibile la rotazione dei motori a seguito del montaggio.

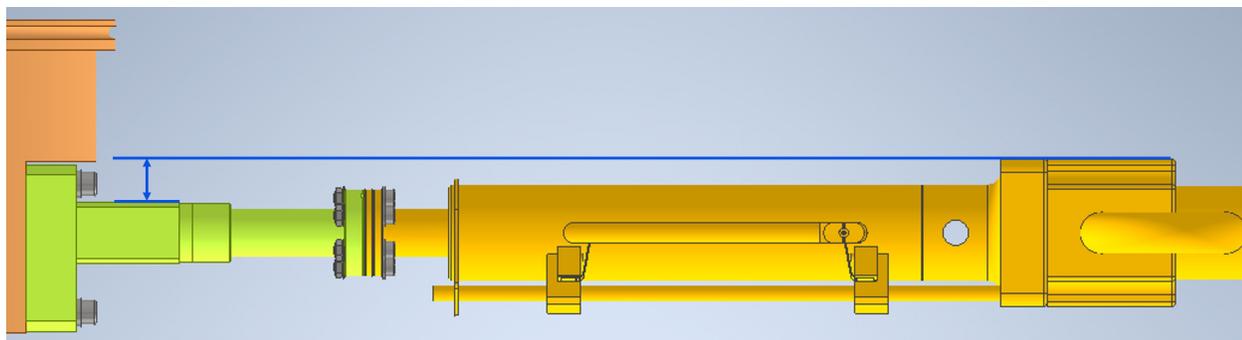


Figura 3.8: La figura mostra la distanza misurata tra la tasca e il punto più estremo, rispetto l'asse del sistema, del motore per la valutazione degli ingombri.

Dal confronto tra la distanza misurata e quella nominale, presa da CAD, è stato valutato lo scostamento reale. Il calcolo è stato effettuato per tutti i motori ed è stato preso in considerazione lo scostamento massimo per valutare l'ingombro effettivo. Anche questa informazione è importante per coloro che eseguono la progettazione dei sistemi che operano nelle immediate vicinanze della camera slitte. Dai risultati ottenuti emerge che l'ingombro massimo è dato dal motore che movimentata la slitta RIGHT (vedi Tabella 3.1). Lo scostamento massimo è pari a 5.76 mm che, sommato alla dimensione del motore, fornisce un ingombro massimo di 69 mm. I nuovi ingombri sono rappresentati in Fig. 3.9.

Motore	UP	LEFT	RIGHT	DOWN	PEPPERPOT
Distanza nominale [mm]	16.6	16.6	16.6	16.7	6.6
Distanza reale [mm]	18.3	18.84	22.36	14.64	8.64
Scostamento [mm]	1.7	2.24	5.76	2.06	2.04

Tabella 3.1: Calcolo degli ingombri dei motori.

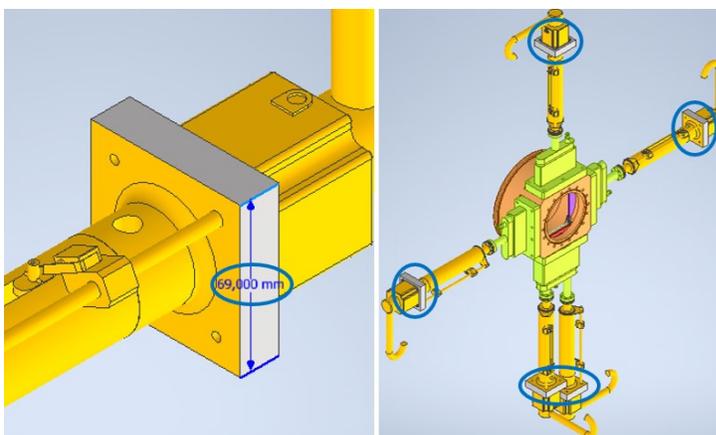
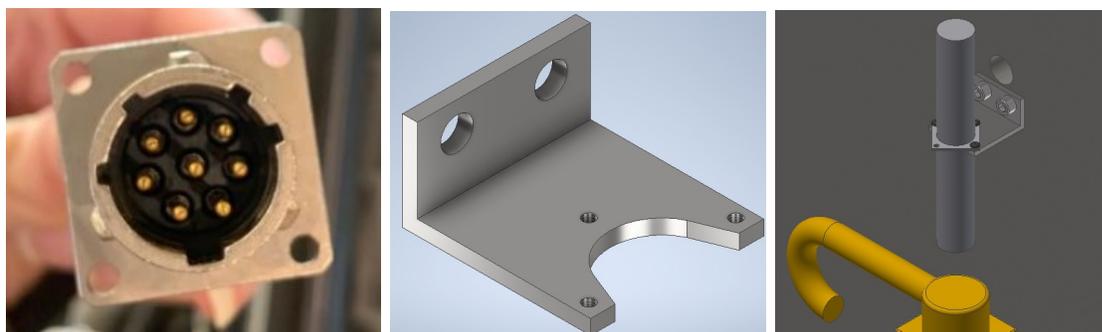


Figura 3.9: Modifica degli ingombri effettivi dei motori.

I cavi, oltre ad essere un ingombro, rappresentano anche un pericolo durante lo spostamento dei sostegni dei gamma detectors perché potrebbero incastrarsi ed essere trasportati anch'essi dai sistemi di movimentazione. Per questo motivo è stata prevista una soluzione per fissare i cavi allo schermo del quadrupolo tramite dei supporti ad hoc. Il connettore del motore, che è dotato di una piccola piastra con quattro fori, viene collegato al supporto fissato al quadrupolo (vedi Fig. 3.10).

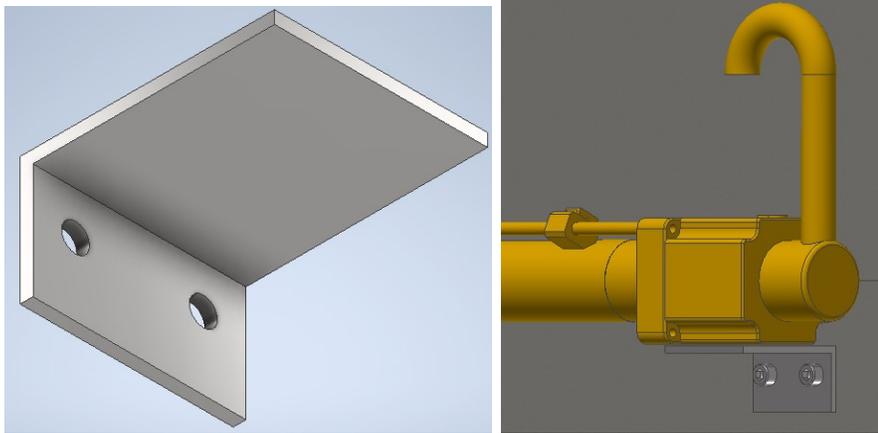


(a) La piastra del connettore del motore. (b) Il supporto progettato. (c) Collegamento finale del connettore al quadrupolo.

Figura 3.10: Soluzione per il fissaggio dei cavi.

Inoltre, gli attuatori e i motori che movimentano le slitte LEFT (L) e RIGHT (R) in direzione

orizzontale saranno sospesi in aria. Quindi, si è pensato di fissare due mensole allo schermo del quadrupolo, al di sotto dei motori a sbalzo (vedi Fig. 3.11). Ciascuna mensola ha la funzione di sostegno in modo tale da contrastare l'azione generata dal peso proprio del sistema di movimentazione. In caso contrario tale azione andrebbe a gravare sul collegamento tra la flangia dell'attuatore e quella della tasca.



(a) La mensola progettata per sostenere il motore. (b) Collegamento finale della mensola al quadrupolo.

Figura 3.11: Soluzione per il sostegno dei motori a sbalzo. La mensola viene posizionata sotto i motori LEFT e RIGHT ed è collegata allo schermo del quadrupolo.

3.3 Simulazione del funzionamento in alto vuoto

Come è stato già anticipato, durante l'esperimento NUMEN il sistema di slitte lavorerà in condizioni di alto vuoto per evitare l'interferenza tra il fascio di ioni e le molecole di aria presenti nella camera. Per tale motivo è stato condotto un test in vuoto al fine di valutare la bontà delle tenute e del montaggio eseguito. Quindi, la camera slitte è stata chiusa mediante flange cieche ed è stata collegata alla pompa turbomolecolare VARIAN Mini-TASK AG81 (vedi Fig. 3.12) per la realizzazione dell'alto vuoto.

Questo sistema comprende una pompa turbomolecolare in serie con una pompa primaria. La turbomolecolare effettua il pompaggio aumentando progressivamente la velocità di rotazione del rotore (81000 rpm max) in base alla pressione residua all'interno della camera. Durante l'esecuzione della prova sono stati acquisiti i dati di pressione e velocità di rotazione collegando la pompa al computer. Dopo circa 22 ore è stata raggiunta una pressione limite di $5.6 \cdot 10^{-6}$ mbar che è un valore accettabile per il sistema in esame, tenendo conto che la pompa ha

una capacità di pompaggio non alta e che all'interno della camera ci sono materiali, come le slitte, che necessitano di degasare a lungo. La pressione è stata misurata dal trasduttore posizionato nel tubo di collegamento tra la camera e la turbomolecolare. Il livello di vuoto ottenuto conferma che il sistema è ben isolato e quindi che le tenute svolgono correttamente la loro funzione con un'ottima resistenza alla bassa pressione. I risultati confermano anche la correttezza della procedura di montaggio, escludendo la presenza di eventuali perdite o fughe di aria. I dati di pressione e velocità di rotazione sono visibili nei grafici in Fig. 3.13 e 3.14.



Figura 3.12: La pompa turbomolecolare per la realizzazione dell'alto vuoto.

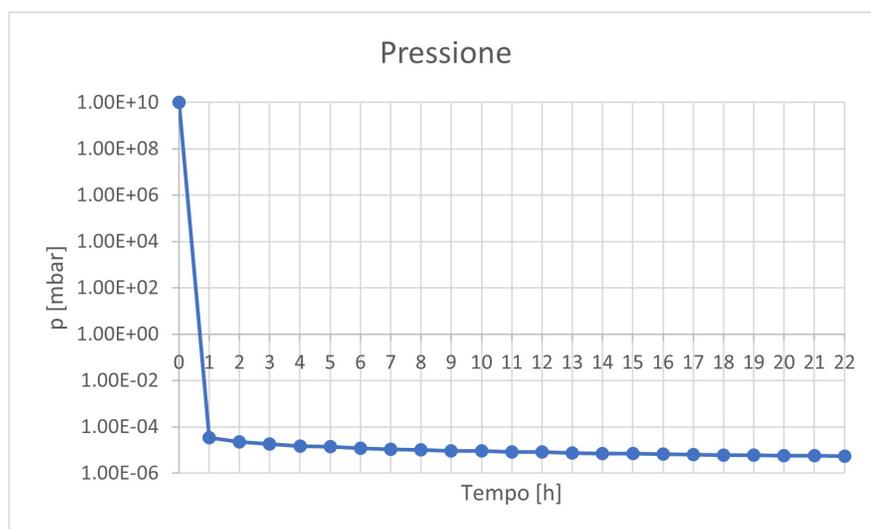


Figura 3.13: Il grafico mostra l'andamento della pressione misurata dal trasduttore della turbomolecolare.

La curva relativa alla pressione presenta un ginocchio: partendo dal valore di pressione atmosferica, c'è un primo tratto decrescente che rappresenta la fase di svuotamento della camera; in questa fase iniziale la pressione diminuisce velocemente perché il sistema si trova nello stato di flusso viscoso, cioè una condizione in cui la distanza tra le molecole è piccola e queste interagiscono le une con le altre. Arrivati al ginocchio si raggiunge lo stato di flusso molecolare, una condizione nella quale la distanza tra le molecole aumenta a tal punto che queste interagiscono maggiormente con le pareti della camera piuttosto che tra di loro; in questa fase avviene il degasaggio delle pareti con conseguente rimozione delle molecole di aria residue. Quindi, dopo il ginocchio la curva diventa asintotica rispetto al valore di pressione finale, che rappresenta il limite della pompa. Per quanto riguarda la velocità di rotazione (Fig. 3.14), essa aumenta in funzione della pressione residua fino al valore massimo di 81000 rpm.

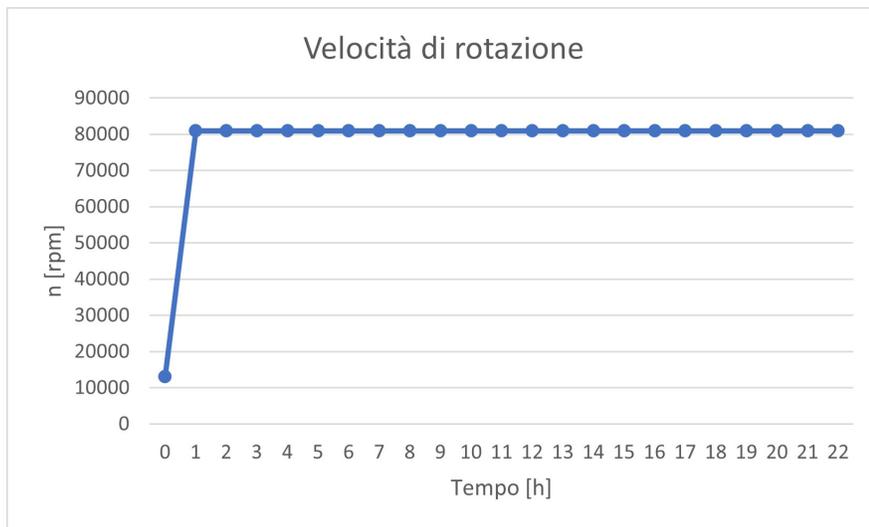
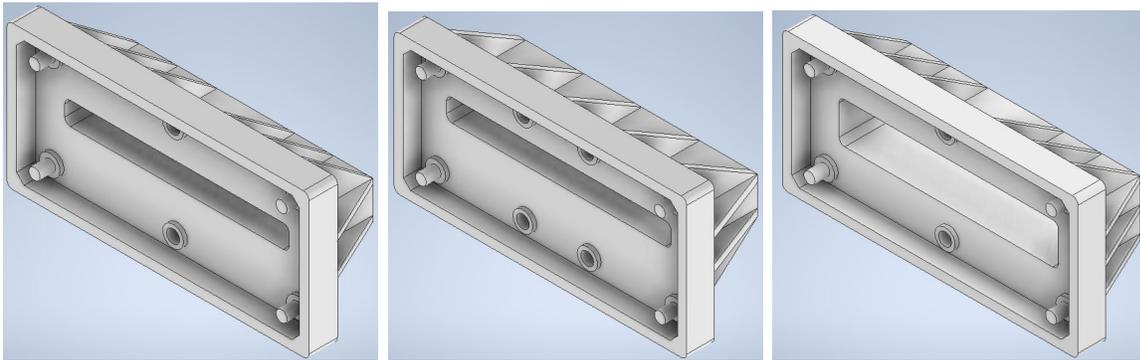


Figura 3.14: Il grafico mostra l'andamento della velocità di rotazione della pompa turbomolecolare.

Infine, è stato possibile eseguire anche un test di movimentazione delle slitte in vuoto. Il movimento delle slitte non era visibile perché la realizzazione del vuoto richiedeva che il sistema fosse totalmente isolato però, grazie agli encoder magnetici, è stato possibile leggere il feedback di posizione. Tramite il sistema di controllo è stato inviato un comando di spostamento al motore ed è stato verificato che la posizione effettivamente raggiunta, cioè il segnale fornito dall'encoder, coincidesse con il valore impostato. Durante le prove sono stati ottenuti risultati positivi per tutte le slitte dal momento in cui non sono stati rilevati problemi nella loro movimentazione ed è stata verificata la coincidenza tra la posizione effettiva raggiunta e quella voluta ed inserita nell'interfaccia utente dell'unità di controllo.

3.4 Realizzazione dei tappi per il trasporto delle slitte

Un'altra attività svolta riguarda la realizzazione dei tappi per la chiusura delle tasche contenenti le slitte durante la spedizione. Infatti, il sistema dovrà essere spedito dalla Sezione di Torino ai Laboratori Nazionali del Sud di Catania e bisogna assolutamente evitare che, durante il trasporto, i componenti presenti all'interno delle tasche vengano danneggiati. La funzione principale dei tappi consiste nella protezione delle slitte e delle guide; in secondo luogo, i tappi isolano l'interno delle tasche dall'ambiente esterno, evitando la contaminazione del sistema causata dall'accumulo di sporcizia, polvere e impurità. Infine, i tappi proteggono la superficie della tasca che va a contatto con l'o-ring e la superficie esterna della camera. Questa superficie di accoppiamento deve essere mantenuta pulita e non deve graffiarsi/danneggiarsi. La modellazione dei tappi è stata svolta facendo riferimento alla forma e alle dimensioni delle singole tasche, le quali non sono tutte uguali tra loro. Infatti, sono stati disegnati tre tappi differenti (vedi Fig. 3.15): uno per la tasca UP, un altro per la tasca DOWN e un ultimo per le tasche LEFT e RIGHT.



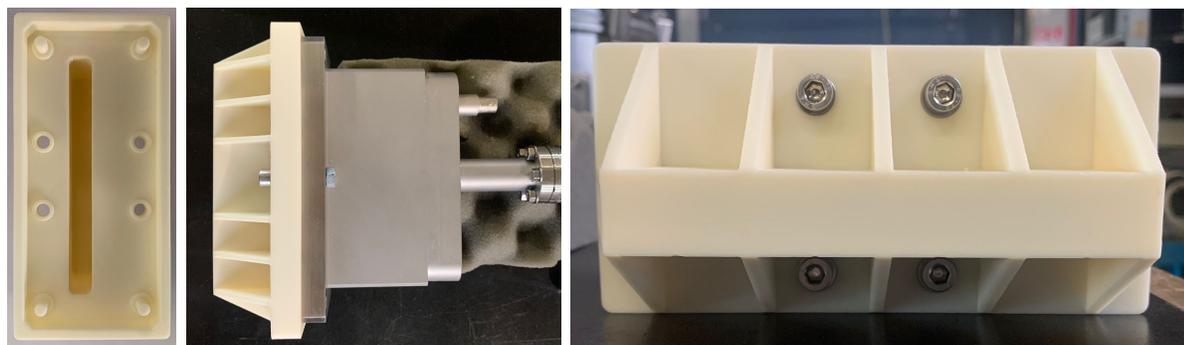
(a) Tappo per la slitta UP. (b) Tappo per le slitte LEFT e RIGHT. (c) Tappo per la slitta DOWN e la pepperpot.

Figura 3.15: I tre tappi disegnati per la chiusura delle tasche contenenti le slitte.

Il tappo avvolge la superficie esterna della flangia e l'accoppiamento tra i due componenti avviene nel seguente modo: i pin realizzati sul tappo si inseriscono nei fori delle flange, garantendo il corretto posizionamento relativo, mentre il fissaggio è eseguito mediante dadi e viti passanti attraverso i fori centrali. L'alloggiamento per il contenimento e la protezione delle slitte è circondato da numerose nervature che aumentano la resistenza del componente e favoriscono la stabilità meccanica. Il risultato finale è mostrato in Fig. 3.16.

I tappi sono stati realizzati tramite stampante 3D per modellazione a deposizione fusa (FDM). Il modello della stampante è il A4_v4 della 3ntr. È stato considerato anche questo fattore

durante la progettazione introducendo smussi e inviti nei sottosquadri per facilitare l'operazione di rimozione del supporto, il quale viene depositato per facilitare la realizzazione del pezzo.



(a) L'interno del tappo. (b) Vista dall'alto. (c) Vista frontale.

Figura 3.16: Le figure mostrano il risultato finale della chiusura delle tasche tramite i tappi.

Una foto scattata durante la stampa del tappo per la slitta UP è riportata in Fig. 3.17. Il materiale impiegato è ABS (acrilonitrile butadiene stirene), una plastica leggera, rigida e con buone proprietà meccaniche di resistenza. Le proprietà dell'ABS sono riportate in Tabella 3.2.

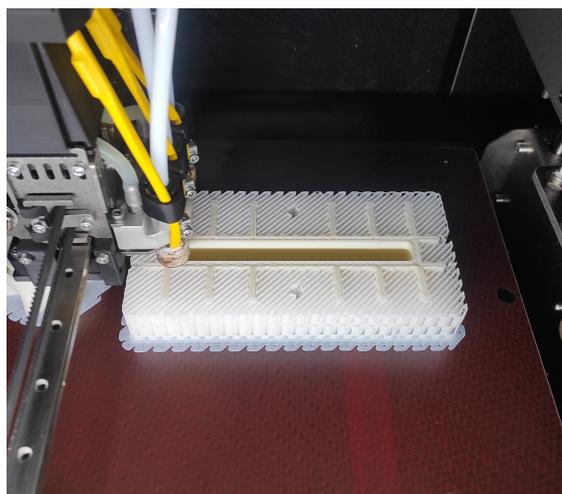


Figura 3.17: Foto acquisita durante la stampa del tappo per la slitta UP.

La creazione dei tappi è avvenuta per deposizione del polimero fuso, strato dopo strato, impostando i seguenti parametri:

- spessore dello strato (layer): 0.1 mm;

- riempimento (infill): 25% che fornisce un buon rapporto tra robustezza e risparmio (in termini di materiale e tempo);
- stile riempimento: dritto, cioè un reticolo a forma di griglia con linee perpendicolari nelle due direzioni.

Densità	1.03 g/cm^3
Tensione di snervamento	26.1 MPa
Modulo di Young	1900 MPa

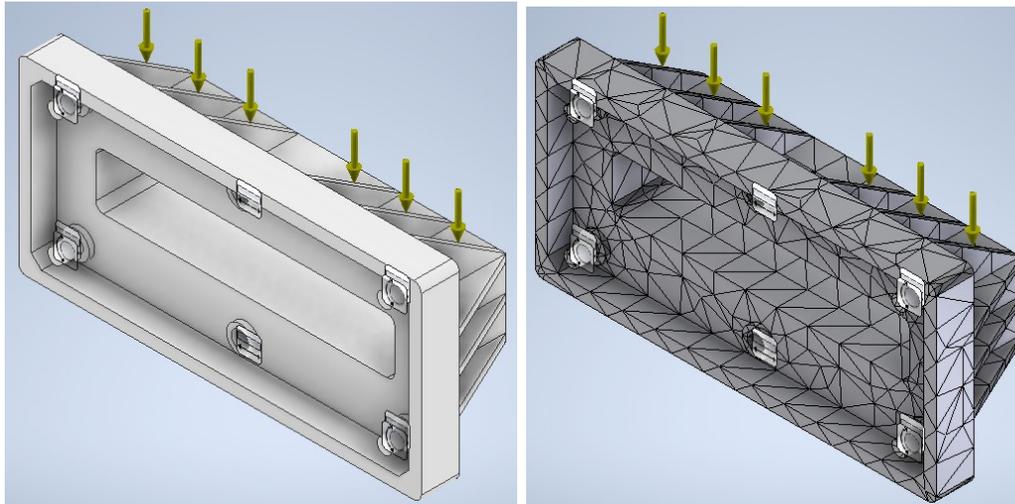
Tabella 3.2: Proprietà ABS.

Come è stato già spiegato, i tappi hanno il semplice compito di proteggere le slitte e quindi non sono sottoposti ad azioni esterne rilevanti. Sicuramente il sistema non sarà soggetto a sollecitazioni dinamiche o periodiche e, per tale motivo, non è stata eseguita alcuna analisi FEM a riguardo. Potrebbe invece accadere che le tasche chiuse con i tappi, durante la spedizione, siano disposte in un pacco le une sulle altre. In questo caso i tappi sarebbero soggetti alle sollecitazioni statiche generate dalla forza peso dei sistemi soprastanti. Quindi, è stata condotta un'analisi FEM per analizzare il comportamento dei tappi e valutare se una situazione simile possa provocarne la rottura.

Per l'esecuzione dell'analisi di sollecitazione sono stati applicati i vincoli che limitano il movimento e i carichi che agiscono sul tappo (vedi Fig. 3.18 (a)). Sulle superfici cilindriche dei pin è stato applicato un vincolo che impedisce il loro spostamento in direzione assiale, radiale e tangenziale, poiché questi saranno inseriti nei fori della relativa tasca. Sulle superfici piane che saranno in contatto con la tasca è stato applicato un vincolo che impedisce lo spostamento in direzione perpendicolare alla stessa. In questo modo vengono vincolati tutti i gradi di libertà dell'oggetto. Per quanto riguarda i carichi strutturali, è stato applicato un carico distribuito, normale ed entrante, sulle nervature del tappo per simulare la forza peso di un ipotetico oggetto/sistema soprastante. Il modulo della forza è stato impostato pari ad un valore di 100 N al fine di effettuare un'analisi conservativa. Infatti, la condizione effettiva di esercizio prevede che il tappo sia sottoposto, nel peggiore dei casi, all'azione di una massa sicuramente inferiore ai 10 kg. Per la mesh (vedi Fig. 3.18 (b)) sono state selezionate le seguenti impostazioni:

- dimensione media elemento: 0.1;
- dimensione minima elemento: 0.2;

- fattore di gradazione: 1.5;
- angolo di rotazione massimo: 60°.



(a) Vincoli e carichi strutturali.

(b) La mesh.

Figura 3.18: Le figure mostrano i vincoli, i carichi e la mesh utilizzati nell'analisi FEM.

Terminata l'impostazione di vincoli, carichi e mesh è stata eseguita la simulazione. Occorre però fare una precisazione: c'è una discrepanza tra il solido simulato, che è pieno, e il componente realizzato, che ha una densità al 25%; di conseguenza, i risultati non possono essere ritenuti affidabili e non vengono riportati. I tappi non hanno una funzione strutturale e non devono sopportare particolari sforzi. Per tale motivo non era richiesta un'analisi FEM, la quale è stata eseguita (prima della stampa) e viene riportata con il solo obiettivo di osservare gli andamenti di sollecitazione e spostamento.

Come dimostrano i risultati ottenuti dalla simulazione sui componenti pieni, pur applicando un carico superiore rispetto a quello che agirà effettivamente nella realtà, le sollecitazioni non sono tali da provocare la rottura. La presenza di numerose nervature intorno all'alloggiamento per le slitte conferisce rigidità e resistenza all'intera struttura. I punti maggiormente sollecitati si trovano immediatamente sotto i pin superiori (Fig. 3.19), cioè quelli in corrispondenza del carico applicato. Lo spostamento massimo (Fig. 3.20) si verifica nella zona centrale dell'alloggiamento per le slitte, cioè nel punto più lontano dai vincoli, ma la sua entità non è tale da provocare un contatto con le slitte. In conclusione, l'analisi dimostra che il tappo è in grado di svolgere la propria funzione, e cioè garantisce la protezione delle slitte, evitando il danneggiamento di queste ultime. Il montaggio/smontaggio dei tappi, più l'eventuale usura dovuta al trasporto e al contatto con gli altri pezzi non crea problemi di

rilascio di materiale sulle slitte. Infatti, l'eventuale usura esterna non può perforare il tappo, il quale è spesso 5 mm. Inoltre, prima della messa in opera del sistema, verrà effettuata una pulizia completa dello stesso in modo tale da rimuovere eventuale sporcizia accumulata durante il trasporto.

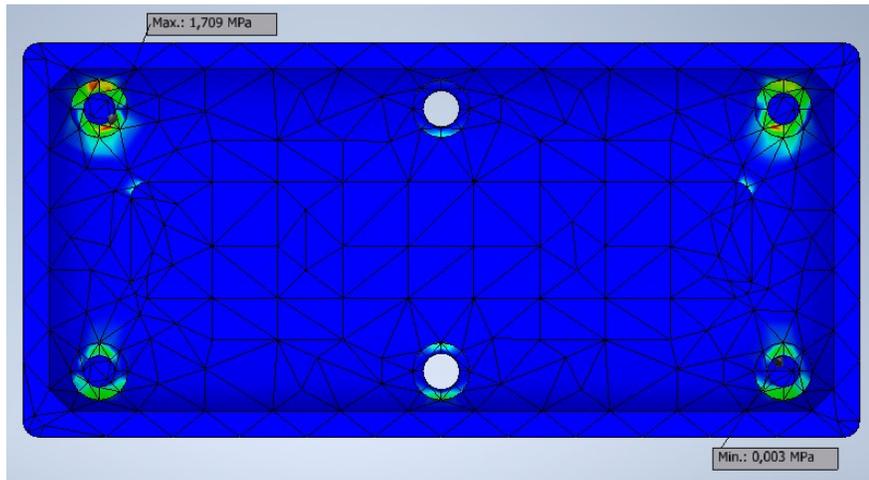


Figura 3.19: Andamento della sollecitazione di Von Mises per il tappo DOWN. Gli andamenti relativi agli altri tappi sono simili.

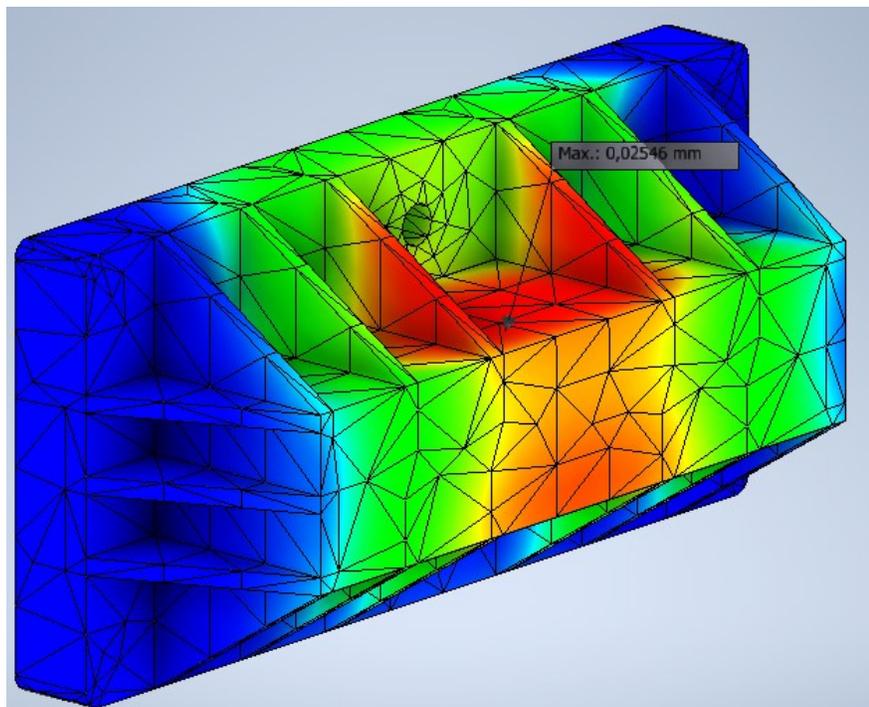


Figura 3.20: Andamento dello spostamento per il tappo DOWN. Gli andamenti relativi agli altri tappi sono simili.

3.5 Test di movimentazione delle slitte

Completato il montaggio del sistema è iniziata l'attività di movimentazione delle slitte tramite le unità di controllo Sim – Step. L'obiettivo di queste prove era verificare l'affidabilità dei collegamenti che consentono la trasmissione del moto tra gli attuatori e le relative slitte.

Eseguendo i test di movimentazione delle slitte UP, LEFT e RIGHT non è sorto alcun problema; la trasmissione garantisce un movimento lineare, fluido e continuo. In particolare, il supporto di queste slitte viene spinto/tirato dal rispettivo attuatore mediante un collegamento centrato (Fig. 3.21). In altre parole, l'asse dell'albero coincide con il centro della slitta; in questa condizione non si genera alcun momento e il collegamento con la vite in PEEK e la rondella in nitruro di boro è sufficiente per assicurare un corretto movimento delle slitte.

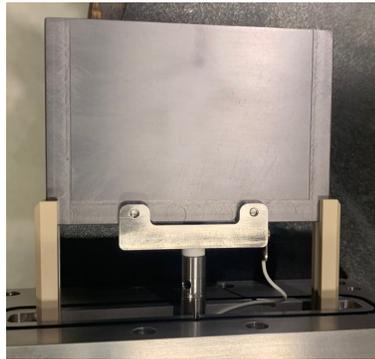


Figura 3.21: Collegamento centrato tra la slitta UP/LEFT/RIGHT e il relativo attuatore.

Invece, nelle prove condotte sulla slitta DOWN e la pepperpot si è verificato un evidente problema di impuntamento durante la movimentazione delle stesse. I principali motivi per cui si manifesta il fenomeno di impuntamento sono due. In primo luogo, la slitta DOWN e la pepperpot sono collocate nella tasca inferiore e, a causa del limitato spazio a disposizione, devono essere necessariamente azionate da due attuatori decentrati rispetto ad esse (vedi Fig. 3.22). Tra l'asse di ciascun albero e il centro dell'elemento da movimentare c'è una certa distanza. Quindi, la forza di spinta esercitata è caratterizzata da un braccio che genera un momento, il quale tende ad imprimere una rotazione sulla slitta. Il momento generato aumenta man mano che incrementa la forza di spinta, provocando l'impuntamento. In secondo luogo, bisogna considerare gli elementi utilizzati per il collegamento: la vite in PEEK, a causa del momento generato dalla spinta decentrata, subisce un'inflessione che potrebbe provocare il cedimento della stessa; in aggiunta, la rondella in nitruro di boro, essendo caratterizzata da una bassa durezza meccanica, può risultare cedevole con tendenza a sfaldarsi. In laboratorio, a seguito dell'impuntamento, si è verificata la rottura sia della vite che della rondella.

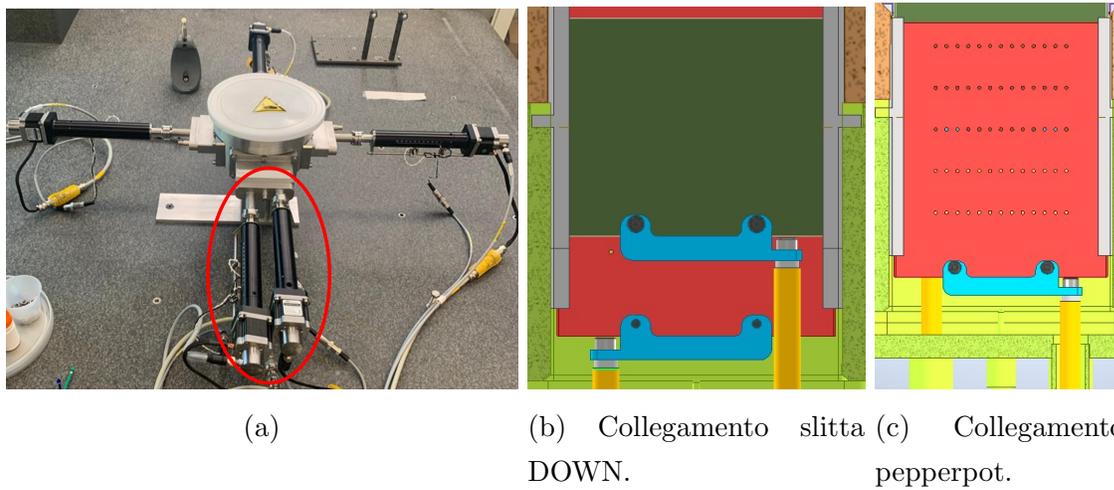


Figura 3.22: La figura (a) mostra i due attuatori posti nella parte inferiore del sistema. Le figure (b) e (c) mostrano i collegamenti decentrati per la slitta DOWN e la pepperpot.

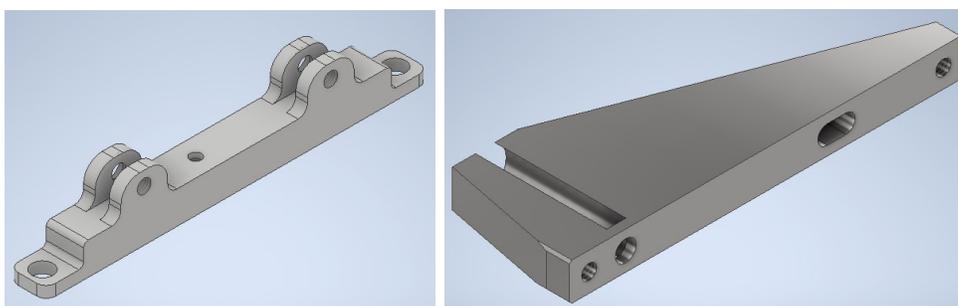
Per risolvere il problema ed eliminare l'impuntamento, con conseguente interruzione del movimento, è stata adottata la soluzione descritta di seguito. Per quanto riguarda la pepperpot si è deciso semplicemente di eliminare la rondella in BN e di sostituire la vite in PEEK con una in acciaio inox. Questa modifica è accettabile: non è necessario garantire l'isolamento elettrico della pepperpot perché non è richiesta alcuna lettura della corrente indotta sulla stessa. La vite in acciaio inox, la quale è caratterizzata da rigidità e resistenza maggiori rispetto alla vite in PEEK, non si danneggia sotto l'azione del momento generato dalla spinta decentrata, conferendo una migliore stabilità meccanica al collegamento tra l'attuatore e il supporto della pepperpot. L'impuntamento della pepperpot è stato così eliminato senza dover modificare il supporto (vedi Fig. 3.23).



Figura 3.23: Supporto per il collegamento tra la pepperpot e il relativo attuatore.

Per quanto riguarda la slitta DOWN, invece, si deve assolutamente impedire la conduzione di corrente verso l'attuatore ma garantire la dissipazione termica. È fondamentale rispettare questo requisito al fine di ottenere una corretta lettura della corrente originata dagli ioni sulla

slitta. Si è pensato di risolvere il problema modificando il supporto della slitta e introducendo un elemento di congiunzione tra il supporto e l'attuatore (vedi Fig. 3.24). Questo secondo elemento, denominato adattatore intermedio, ha la funzione di ridistribuire la forza di spinta esercitata sul supporto della slitta. Lo stelo dell'attuatore è inserito nel foro dell'adattatore, il quale lo circonda per una certa lunghezza con l'obiettivo di limitare la rotazione generata dal momento. Inoltre, l'adattatore viene collegato all'attuatore tramite una vite in acciaio inox, la quale irrigidisce e stabilizza tale collegamento. Il supporto è stato allargato e su di esso sono stati realizzati due fori equidistanti dal centro della slitta. In questo modo può essere effettuato il collegamento tra l'adattatore intermedio e il supporto della slitta mediante due viti in PEEK e due rondelle in BN (vedi Fig. 3.25). Così vengono garantiti il disaccoppiamento elettrico e la redistribuzione della spinta, la quale viene trasmessa su due punti simmetrici rispetto al centro della slitta.



(a) Il nuovo supporto.

(b) L'adattatore intermedio.

Figura 3.24: I nuovi elementi progettati per collegare la slitta DOWN all'attuatore utilizzato per la movimentazione.

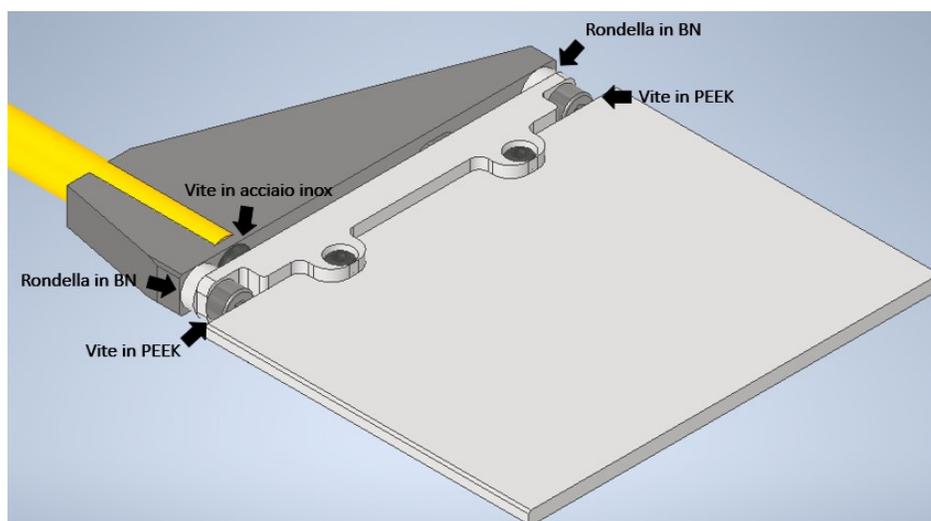


Figura 3.25: Soluzione per eliminare l'impuntamento della slitta DOWN.

I nuovi componenti sono stati realizzati, montati e testati in laboratorio. Con questa soluzione è stato raggiunto l'obiettivo e cioè è stato eliminato il fenomeno d'impuntamento anche per la slitta DOWN (vedi Fig. 3.26). La risoluzione del problema d'impuntamento è stata fondamentale per ottenere una corretta movimentazione della slitta e della pepperpot.

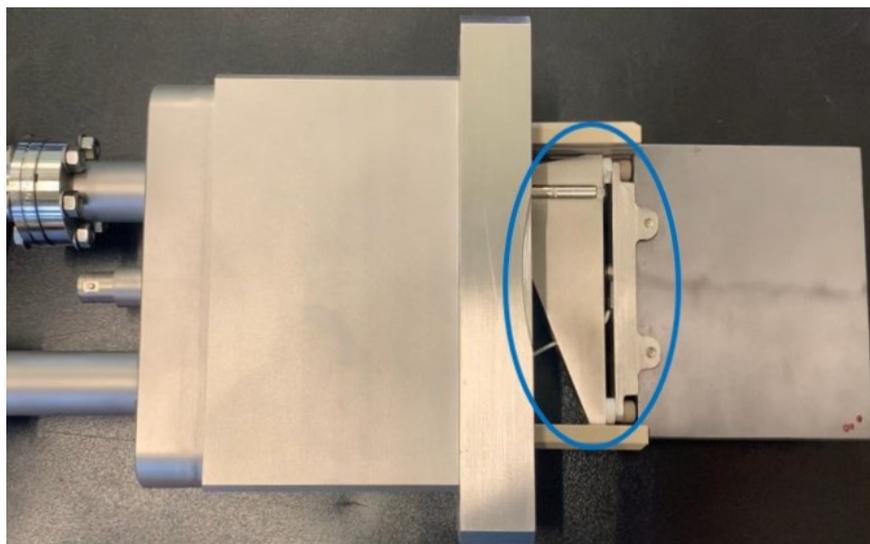


Figura 3.26: Messa in opera della soluzione studiata per eliminare l'impuntamento della slitta DOWN.

Per il nuovo supporto e l'adattatore intermedio non sono state eseguite analisi agli elementi finiti poiché i carichi in gioco sono bassi. La messa in tavola del nuovo supporto e dell'adattatore intermedio è riportata in Appendice B. Di seguito è riportato un diagramma di corpo libero (vedi Fig. 3.27 e Fig. 3.28) per mostrare come avviene la redistribuzione del carico mediante il nuovo sistema. Il diagramma di corpo libero si riferisce ad una condizione di equilibrio statico visto che il movimento avviene a velocità costante e bassa.

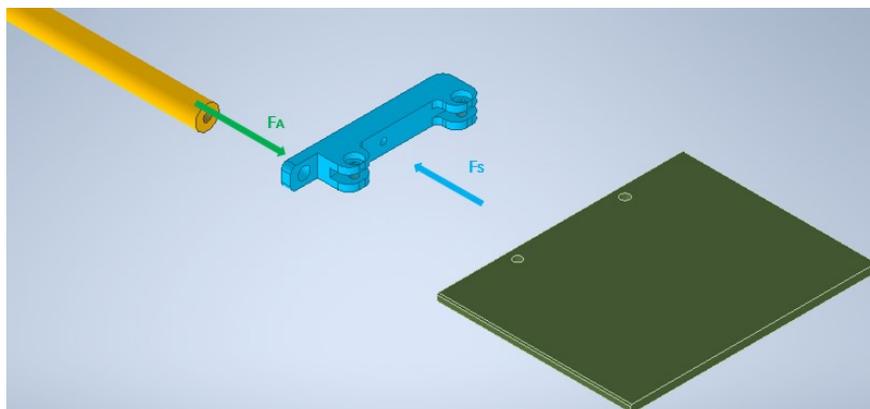


Figura 3.27: Il diagramma di corpo libero con le forze agenti sul supporto della slitta DOWN prima della modifica. La forza F_A è la forza di spinta dell'attuatore, la forza F_S è la forza scambiata con la slitta.

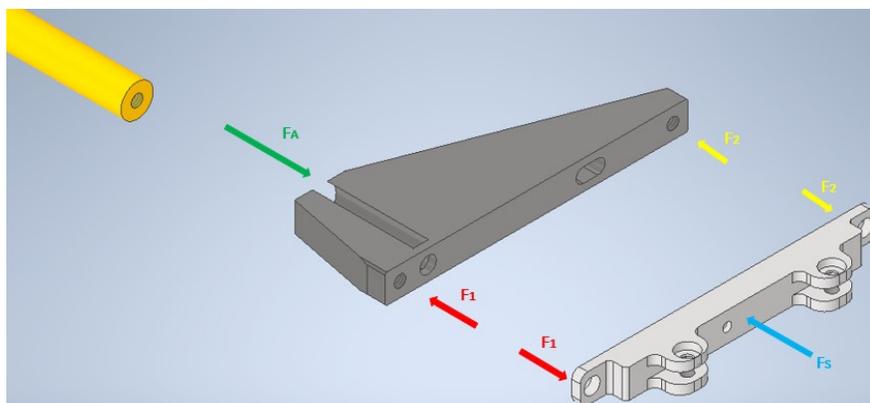


Figura 3.28: Il diagramma di corpo libero con le forze agenti sul supporto della slitta DOWN dopo la modifica. La forza F_A è la forza di spinta dell'attuatore, le forze F_1 e F_2 sono le forze scambiate tra l'adattatore e il supporto, la forza F_S è la forza scambiata con la slitta.

Capitolo 4

Funzionalità ed ottimizzazione del sistema

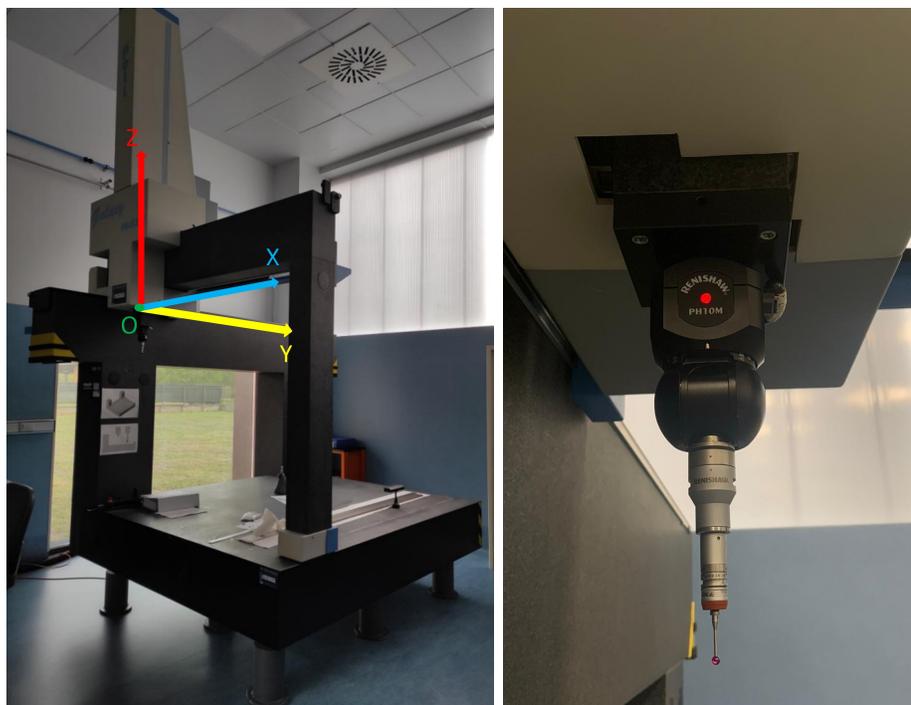
Un'importante attività di controllo è stata svolta per verificare la precisione con cui sono stati realizzati i componenti principali del sistema in esame. L'ispezione dimensionale e geometrica è stata eseguita mediante la macchina di misura a coordinate (CMM) installata presso il laboratorio della sezione di Torino dell'INFN. L'analisi dei risultati ha permesso sia di accertare il rispetto delle tolleranze definite in fase di progetto, sia di risolvere i problemi legati ai difetti rilevati e che avrebbero compromesso il corretto funzionamento del sistema durante l'esperimento. Infine, sono state eseguite delle prove per valutare l'effettivo posizionamento delle slitte nella camera e, di conseguenza, effettuare la calibrazione dei sistemi di attuazione.

4.1 La macchina di misura a coordinate

La CMM impiegata per il controllo dei componenti è una macchina di misura a portale della marca POLI, modello GALAXY MAXY (Fig. 4.1 (a)). La macchina movimentata una sonda (Fig. 4.1 (b)), cioè un sistema di tastatura che, entrando in contatto con la superficie da esaminare, rileva dei punti discreti. Il movimento della sonda avviene in uno spazio tridimensionale lungo tre assi ortogonali tra loro (X, Y, Z). Il campo di misura della CMM è $1200 \times 2000 \times 1160 \text{ mm}^3$.

La struttura a portale presenta una gamba che si muove sul piano di lavoro, definendo il movimento lungo la direzione Y. Il basamento è realizzato in granito, il quale gli conferisce alta precisione e stabilità dimensionale, e presenta inserti filettati per consentire il bloccaggio

dei pezzi. Lo scorrimento avviene su pattini ad aria per assicurare una corsa quasi priva di attrito. Sul ponte del portale è installato un carrello che scorre su apposite guide, fornendo il movimento lungo l'altro asse orizzontale, cioè in direzione X. Il movimento lungo l'asse Z avviene tramite un canotto, il quale trasla verticalmente rispetto al centro del carrello. Infine, all'estremità del canotto è fissato il tastatore che esegue il rilevamento dei punti di misura.



(a) La CMM POLI GALAXY MAXY. (b) Il sistema di tastatura della macchina.

Figura 4.1: La macchina di misura a coordinate e il suo sistema di tastatura.

La posizione del tastatore può essere controllata in due modi: manualmente tramite un joystick (Fig. 4.2 (a)) oppure automaticamente da computer. In questa seconda modalità, denominata DCC (Direct Computer Control), i movimenti programmati da listato sono controllati totalmente da PC. La raccolta e l'elaborazione dei dati sono state eseguite tramite l'unità di controllo della macchina e il software applicativo PC-DMIS della Hexagon (Fig. 4.2 (b)). Tramite il software è stata effettuata la programmazione delle procedure di misura, la cui implementazione ha permesso di ispezionare i componenti.

Il sistema di tastatura è costituito da due elementi: la testa e la sonda. La testa motorizzata Renishaw della serie PH10M può ruotare per definire l'orientamento della sonda. Da programma è possibile impostare il movimento angolare della testa intorno a due assi (A e B)

in modo tale da raggiungere la posizione richiesta dalla specifica ispezione (caratteristiche in Tabella 4.1). L'asse B coincide con l'asse dello stelo e l'asse A giace nel piano perpendicolare all'asse B lungo l'asse Y del sistema cartesiano della macchina.



(a) Il joystick. (b) L'interfaccia di programmazione.

Figura 4.2: Il joystick per controllare manualmente il sistema di tastatura e l'interfaccia del software di programmazione PC-DMIS.

Rotazione A	da 0° a 105° con incrementi di 7.5°
Rotazione B	da 0° a 180° con incrementi di 7.5°
Numero totale posizioni	720

Tabella 4.1: Caratteristiche della testa Renishaw PH10M.

Durante l'attività di controllo la punta è stata calibrata in diverse configurazioni testa/sonda per poter accedere facilmente a tutti gli elementi dei componenti in esame (4.3). Ad esempio, la denominazione A0B0 significa che la testa è stata ruotata di un angolo pari a 0° intorno all'asse A e di 0° intorno all'asse B.



(a) A90B0. (b) A0B0. (c) A90B180.

Figura 4.3: Alcune configurazioni della testa motorizzata.

La sonda touch – trigger TP20 è una sonda elettronica a contatto composta da due parti: il corpo sonda e il modulo stilo (rimovibile e intercambiabile), collegati tra loro mediante un accoppiamento cinematico magnetico. Il modulo stilo è caratterizzato da uno stelo in acciaio inossidabile e una sfera di rubino sintetico. La deflessione dello stelo a seguito di un contatto fisico con la superficie del componente genera un segnale elettrico, il quale viene inviato al computer fornendogli le informazioni sulle coordinate (X, Y, Z) del punto acquisito. Le prove sono state eseguite con un modulo stilo a forza standard, caratterizzate da un cappuccio nero (vedi Fig. 4.4). Le forze di deflessione che permettono l’attivazione del segnale sono:

- 0.08 N in direzione orizzontale (X o Y);
- 0.75 N in direzione verticale (Z).



(a) Sonda 1x10 con estensione di 10 mm. (b) Sonda 1x20.

Figura 4.4: Due esempi di punte utilizzate nei test. Ad esempio, la denominazione 1x10 significa diametro della sfera 1 mm e lunghezza dello stelo 10 mm.

La precisione della CMM è garantita nell’intervallo $\pm(5.00 + 4.00 \cdot L/1000) \mu m$, dove L è lunghezza misurata. La ripetibilità delle misure è contenuta in questo intervallo (ripetibilità < precisione). La precisione e la ripetibilità sono state certificate dalla Hexagon e sono state fornite tramite un certificato di calibrazione.

4.2 Descrizione delle procedure di misura

Prima di iniziare le misure, tutti i componenti sono stati attentamente puliti per evitare che polvere o eventuale sporcizia potessero influenzare negativamente l'accuratezza delle misurazioni, con conseguente alterazione dei risultati. Da notare che la macchina di misura POLI si trova in un ambiente pulito con circuito di filtraggio aria ed è mantenuta a temperatura e umidità controllata. Successivamente sono stati utilizzati dei fissaggi modulari per sollevare e bloccare i pezzi su una piastra levigata, la quale, a sua volta, è stata fissata sul piano della CMM (vedi Fig. 4.5 (a)). Il bloccaggio è stato eseguito a mano, applicando forze di serraggio che impedissero il movimento dei pezzi ma senza generare tensioni con conseguente deformazione degli stessi. Inoltre, anche la camera è stata sollevata tramite un apposito supporto (Fig. 4.5 (b)) in modo tale da essere totalmente accessibile, in qualsiasi punto, alla sonda.



(a) I fissaggi modulari. (b) Il supporto utilizzato per sollevare e (c) La sfera per la
bloccare la camera. qualifica.

Figura 4.5: Nelle figure (a) e (b) due esempi di come sono stati fissati e sollevati i componenti durante i test di controllo. Nella figura (c) la sfera di qualifica usata per la calibrazione delle punte.

La prima fase eseguita consiste nella calibrazione delle punte, operazione con la quale vengono determinate le dimensioni esatte della sfera della sonda. È indispensabile conoscere con precisione il diametro e il centro della sfera perché il contatto avviene tra la sua superficie e il pezzo. Le dimensioni della sfera e le coordinate del suo centro vengono calcolate misurando una sfera molto precisa (Fig. 4.5 (c)), denominata sfera di qualifica, il cui diametro è noto ed è immesso nel software. Quindi, la punta viene calibrata toccando 8 punti di riferimento posti nella parte superiore della sfera di qualifica. Noti il centro e il diametro della sfera,

il software può operare una compensazione che permette di ottenere le coordinate effettive dei punti di contatto acquisiti durante le misure. La calibrazione è stata eseguita per tutte le punte utilizzate e per ciascun orientamento della testa. La qualifica del tastatore è stata eseguita ogni giorno, prima di avviare le routine di misurazione, perché solo in questo modo si ha la certezza di ottenere risultati accurati e affidabili.

In secondo luogo, è stata eseguita la fase di allineamento, la quale definisce la posizione e l'orientamento del pezzo nello spazio (3D) di misura. La CMM ha un suo sistema di coordinate (Fig. 4.6 (a)), definito dagli assi (X, Y, Z) lungo i quali avvengono i movimenti del tastatore. L'allineamento consiste nel mettere in relazione il sistema di coordinate della macchina con il sistema di coordinate del pezzo (Fig. 4.6 (b)) in modo tale che la macchina possa individuare la posizione del pezzo. L'operazione di allineamento è stata svolta nel seguente modo: dopo aver importato il modello CAD nel programma, sono stati selezionati gli elementi di riferimento che definiscono i tre assi del sistema di coordinate del pezzo; quindi, per vincolare tutti i GDL del pezzo (6 nello spazio), sono stati misurati tre elementi di riferimento (primario, secondario, terziario). L'elemento primario definisce l'orientamento del pezzo, il secondario la localizzazione e il terziario lo blocca. Per ogni routine di misurazione, l'allineamento è stato eseguito due volte: prima in modalità manuale (acquisizione dei punti tramite joystick) per localizzare il pezzo, poi in modalità automatica (DCC) per rifinire il posizionamento in modo preciso grazie all'acquisizione di un maggior numero di punti; in DCC la velocità è la medesima per tutti i punti in modo tale da uniformare la misura.



(a) Il sistema di riferimento della macchina.

(b) Il sistema di riferimento del pezzo.

Figura 4.6: I due sistemi di riferimento che vengono messi in relazione durante l'allineamento.

Terminato l'allineamento, sono state implementate le routine di misurazione che hanno permesso di analizzare i componenti. È opportuno sottolineare che la procedura di acquisizione è avvenuta totalmente in modalità DCC, con il tastatore alla massima velocità di avvicinamento disponibile (2 mm/s). La massima velocità serve perché i punti di misura rilevati vengono registrati correttamente solo se lo stelo viene deflesso con una forza sufficiente ad aprire meccanicamente i contatti elettrici, con conseguente invio del segnale al controllore della macchina. In quest'ultima fase sono stati forniti in input gli elementi da analizzare sul pezzo (punti, linee, piani, cilindri, ecc...), i quali sono stati misurati in base all'ordine specificato con la programmazione. Gli elementi misurati sono stati poi elaborati dal software per la valutazione delle dimensioni e delle tolleranze geometriche effettive.

4.2.1 Procedura di misura per le slitte e le pepperpot

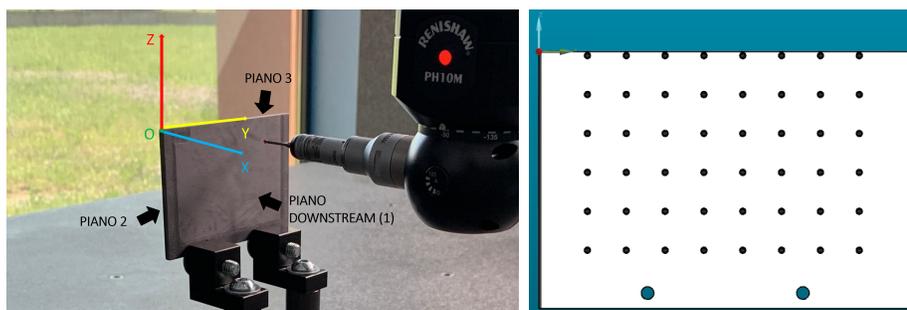
I primi componenti analizzati con la CMM sono le slitte mobili e le pepperpot. La procedura di misura implementata per la loro ispezione è la medesima e verrà descritta di seguito. Per condurre queste prove è stata utilizzata una punta 2x20, e cioè caratterizzata da lunghezza dello stelo pari a 20 mm e diametro della sfera pari a 2 mm. Per definire il sistema di coordinate del pezzo (Fig. 4.7 (a)), e cioè vincolare tutti i suoi gradi di libertà, è stato eseguito il seguente allineamento manuale:

1. L'elemento di riferimento primario è il PIANO DOWNSTREAM. Così sono definiti l'asse X, normale ed uscente dal piano, e la sua origine, vincolando due GDL di rotazione e uno di traslazione.
2. L'elemento di riferimento secondario è una linea misurata sulla superficie sinistra della slitta/pepperpot. Così sono definiti l'asse Z, parallelo alla linea di riferimento, e l'origine dell'asse Y, vincolando un GDL di rotazione e uno di traslazione.
3. L'elemento di riferimento terziario è un punto misurato sulla superficie superiore della slitta/pepperpot. Così viene definita l'origine dell'asse Z, vincolando l'ultimo GDL di traslazione.

Successivamente, per rifinire il posizionamento del componente rispetto al sistema di riferimento della macchina, è stato eseguito il seguente allineamento automatico:

1. L'elemento di riferimento primario è il piano DOWNSTREAM. Così sono definiti l'asse X, normale ed uscente dal piano, e la sua origine, vincolando due GDL di rotazione e uno di traslazione.
2. L'elemento di riferimento secondario è il piano misurato sulla superficie sinistra della slitta/pepperpot. Così sono definiti l'asse Y, normale ed entrante nel piano, e la sua origine, vincolando un GDL di rotazione e uno di traslazione.
3. L'elemento di riferimento terziario è un piano misurato sulla superficie superiore della slitta/pepperpot. Così viene definita l'origine dell'asse Z, vincolando l'ultimo GDL di traslazione.

A seguito dell'allineamento, è stata avviata la routine di misurazione per acquisire gli elementi del componente e valutare la loro precisione di realizzazione. In particolare, per le slitte mobili e le pepperpot, sono stati misurati i piani sulle superfici superiore, sinistra, destra e inferiore al fine di verificare se le dimensioni e le tolleranze geometriche (planarità, perpendicolarità e parallelismo) definite in fase di progettazione sono state rispettate. In secondo luogo, sono state create e misurate delle mappe di punti (Fig. 4.7 (b)) sulle superfici DOWNSTREAM e UPSTREAM con l'obiettivo di valutare se lo spessore è costante sull'intero componente.



(a) Il risultato dell'allineamento.

(b) Mappa di punti.

Figura 4.7: Nella figura (a) viene mostrato il risultato finale dell'allineamento con il sistema di riferimento del pezzo e gli elementi che lo definiscono. Nella figura (b) viene mostrato un esempio di mappa di punti acquisita sulla slitta RIGHT.

4.2.2 Procedura di misura per lo schermo fisso

L'attività di controllo si è poi focalizzata sull'analisi dello schermo fisso, il quale limita il passaggio degli ioni prodotti dalle interazioni all'accettanza dello spettrometro MAGNEX.

Quindi, è fondamentale che le caratteristiche dimensionali e geometriche della finestra rettangolare realizzata sullo schermo rispettino le specifiche di progetto. Per condurre queste prove è stata utilizzata una punta 1x20, e cioè caratterizzata da diametro della sfera pari a 1 mm e lunghezza dello stelo pari a 20 mm. Per definire il sistema di coordinate dello schermo fisso (Fig. 4.8 (a)), e cioè vincolare tutti i suoi gradi di libertà, è stato eseguito il seguente allineamento manuale:

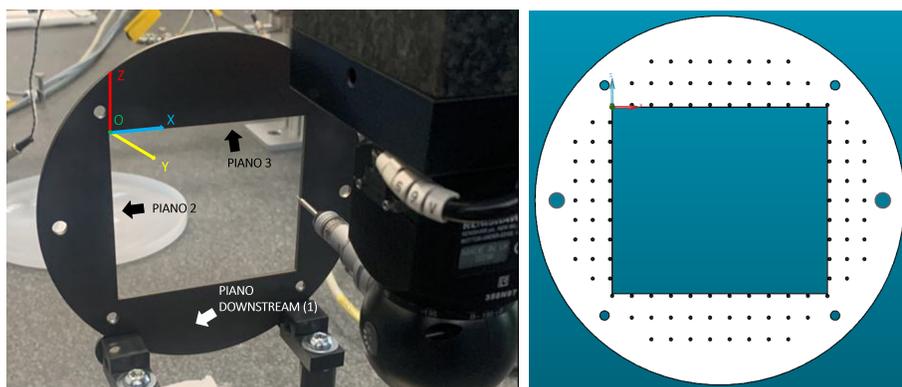
1. L'elemento di riferimento primario è il piano DOWNSTREAM. Così sono definiti l'asse Y, normale ed uscente dal piano, e la sua origine, vincolando due GDL di rotazione e uno di traslazione.
2. L'elemento di riferimento secondario è una linea misurata sulla superficie sinistra della finestra rettangolare. Così sono definiti l'asse Z, parallelo alla linea di riferimento, e l'origine dell'asse X, vincolando un GDL di rotazione e uno di traslazione.
3. L'elemento di riferimento terziario è un punto misurato sulla superficie superiore della finestra rettangolare. Così viene definita l'origine dell'asse Z, vincolando l'ultimo GDL di traslazione.

Successivamente, per rifinire il posizionamento dello schermo fisso rispetto al sistema di riferimento della macchina, è stato eseguito il seguente allineamento automatico:

1. L'elemento di riferimento primario è il piano DOWNSTREAM. Così sono definiti l'asse Y, normale ed uscente dal piano, e la sua origine, vincolando due GDL di rotazione e uno di traslazione.
2. L'elemento di riferimento secondario è il piano misurato sulla superficie sinistra della finestra rettangolare. Così sono definiti l'asse X, normale ed uscente dal piano, e la sua origine, vincolando un GDL di rotazione e uno di traslazione.
3. L'elemento di riferimento terziario è un piano misurato sulla superficie superiore della finestra rettangolare. Così viene definita l'origine dell'asse Z, vincolando l'ultimo GDL di traslazione.

Con la routine di misurazione sono stati misurati i piani sulle superfici superiore, sinistra, destra e inferiore della finestra rettangolare al fine di verificare se le dimensioni e le tolleranze geometriche (planarità, perpendicolarità e parallelismo) definite in fase di progetto sono state

rispettate. Un'altra analisi molto importante è stata eseguita sui fori realizzati sullo schermo fisso. Questi due fori definiscono il centraggio dello schermo all'interno della camera. È quindi indispensabile garantire un accoppiamento molto preciso tra i due elementi affinché la finestra di accettazione sia posizionata correttamente rispetto al corpo della camera. Per questo motivo sono stati acquisiti i fori di centraggio ed è stata valutata la loro posizione reale. Infine, sono state create e misurate delle mappe di punti sulle superfici DOWNSTREAM e UPSTREAM (Fig. 4.8 (b)) con l'obiettivo di valutare se lo spessore è costante sull'intero schermo.



(a) Il risultato dell'allineamento. (b) Mappa di punti sullo schermo fisso.

Figura 4.8: Nella figura (a) viene mostrato il risultato finale dell'allineamento con il sistema di riferimento dello schermo fisso e gli elementi che lo definiscono. Nella figura (b) viene mostrata la mappa di punti acquisita sul piano UPSTREAM dello schermo.

4.2.3 Procedura di misura per la camera

L'ultima procedura di misura è stata implementata sia per effettuare il controllo dimensionale e geometrico della camera, sia per valutare il posizionamento dello schermo fisso e delle slitte all'interno della stessa. Anche per questi test è stata utilizzata una punta 1x10 EXTEND20. Per definire il sistema di coordinate della camera, e cioè vincolare tutti i suoi gradi di libertà, è stato eseguito il seguente allineamento manuale:

1. L'elemento di riferimento primario è il cilindro misurato sulla superficie interna della camera. Così sono definiti l'asse Z, coincidente con l'asse del cilindro, e l'origine degli assi X e Y, vincolando due GDL di rotazione e due di traslazione.

2. L'elemento di riferimento secondario è un piano misurato sulla superficie esterna della camera in corrispondenza della quale viene montata la tasca LEFT. Così è definito l'asse X, normale ed uscente dal piano, vincolando un GDL di rotazione.
3. L'elemento di riferimento terziario è un punto misurato sulla superficie dove viene montato lo schermo fisso. Così viene definita l'origine dell'asse Z, vincolando l'ultimo GDL di traslazione.

Successivamente, per rifinire il posizionamento della camera rispetto al sistema di riferimento della macchina, è stato eseguito il seguente allineamento automatico:

1. L'elemento di riferimento primario è l'interasse costruito tra i centri dei due fori nei quali vengono alloggiare le spine per il centraggio dello schermo. Così viene definito l'asse Y, coincidente con l'interasse, e l'origine degli assi X e Y, coincidenti con il punto medio dell'interasse, vincolando un GDL di rotazione e due di traslazione.
2. L'elemento di riferimento secondario è il piano misurato sulla superficie dove viene montato lo schermo fisso. Così viene definito l'asse Z, normale ed uscente dal piano, e la sua origine, vincolando un GDL di rotazione e uno di traslazione.
3. L'elemento di riferimento terziario è un piano misurato sulla superficie esterna della camera in corrispondenza della quale viene montata la tasca LEFT. Così è definito l'asse X, normale ed uscente dal piano, vincolando l'ultimo GDL di rotazione.

Questa procedura è stata poi modificata durante la calibrazione dei motori di attuazione perché, a seguito del montaggio delle tasche con le slitte, non era possibile acquisire il piano della camera in corrispondenza della quale è montata la tasca LEFT. Quindi, le operazioni di allineamento (2) manuale e (3) automatica sono state svolte misurando il piano sulla superficie esterna e laterale della tasca UP. Per semplicità, poiché l'allineamento manuale e quello automatico sono diversi per le differenti prove con la camera, di seguito viene riportato solo il risultato finale, cioè come è stato definito il sistema di riferimento del sistema (Fig. 4.9). Si ricorda che l'allineamento automatico viene eseguito per far sì che la sonda tasti i punti con la stessa forza e quindi garantendo una migliore precisione e uniformità di risposta.

Con la routine di misurazione sono stati misurati i piani sulle superfici esterne della camera al fine di verificare se le tolleranze geometriche (planarità, perpendicolarità e parallelismo) definite in fase di progetto sono state rispettate. Successivamente, sono state montate le slitte nella camera ed è stato controllato il loro posizionamento reale rispetto alla linea del

fascio. Grazie a quest'ultima attività è stato possibile definire le curve di calibrazione dei sistemi di movimentazione.

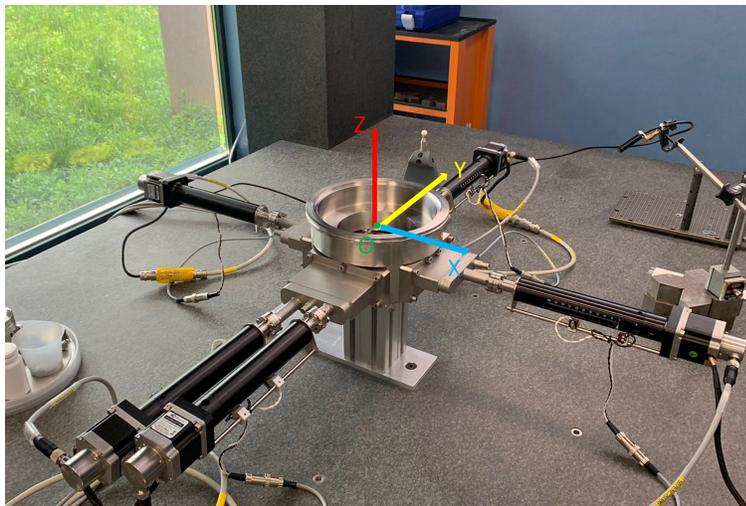


Figura 4.9: Il sistema di riferimento della camera slitte al termine dell'allineamento.

4.3 Analisi dei risultati

4.3.1 Test su slitte mobili e pepperpot

Il primo test eseguito aveva l'obiettivo di verificare la ripetibilità delle misure effettuate. A tale scopo, la grandezza misurata è lo spessore della slitta RIGHT. Quindi, sono state condotte 20 prove consecutive nell'arco di due giorni nelle stesse condizioni di misura e ambientali, cioè utilizzando sempre la medesima procedura di testing in un ambiente a temperatura e umidità stabile durante tutta la durata del test. Ogni prova si è basata sull'acquisizione di 48 punti, secondo una certa griglia, su entrambe le superfici della slitta. I punti misurati hanno poi permesso di definire i piani UPSTREAM e DOWNSTREAM. Lo spessore è stato valutato come la distanza media tra i due piani generati dai due set di misura. I risultati delle 20 prove sono riportati nel grafico in Fig.4.10. Nella stessa figura è riportata, in arancione, la media degli spessori.

Dai risultati ottenuti la ripetibilità risulta in un intervallo di $\pm 3 \mu m$ rispetto la media. Volendo valutare quantitativamente l'errore di ripetibilità, definito come lo scostamento massimo rilevato nella serie di misure, esso risulta pari a $6 \mu m$. Occorre fare una precisazione: l'incertezza di misura, ossia l'intervallo dentro il quale si trova il valore reale della misura, non coincide con l'intervallo di ripetibilità. Infatti, lo spessore della slitta RIGHT è stato calcola-

to come distanza media tra due piani che non sono perfettamente paralleli tra loro. Quindi, l'errore di misurazione deve tener conto sia dell'errore di parallelismo tra i due piani, sia dell'errore nel calcolo della distanza. In altre parole c'è un effetto di propagazione degli errori dovuto alle limitazioni nelle misure. In pratica, l'errore ottenuto è stato calcolato come la radice quadrata della somma dei quadrati degli errori sopra citati. Quindi, lo spessore della slitta RIGHT risulta essere $3.034 \pm 0.05 \text{ mm}$.

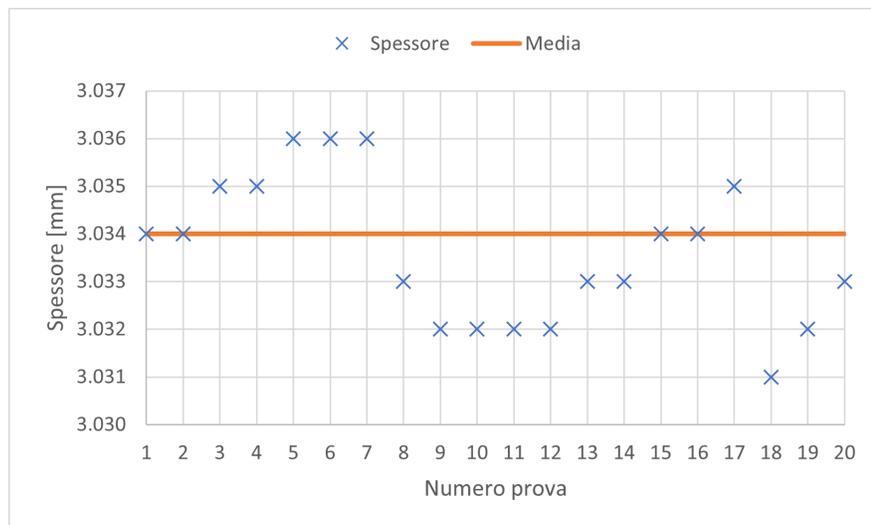


Figura 4.10: I risultati di spessore medio ottenuti dalle prove di ripetibilità eseguite sulla slitta RIGHT.

Successivamente sono stati eseguiti i test di controllo su tutte le slitte e le pepperpot. Su ciascun componente sono state condotte due prove basate sulla medesima procedura di testing ma effettuate a distanza di una settimana. I risultati che saranno mostrati di seguito sono relativi alla prima misura. La seconda prova è stata ripetuta al fine di validare i risultati ottenuti con la prima. Effettivamente sono stati trovati dei valori coerenti, tutti compresi nell'intervallo di precisione della CMM.

Per valutare la precisione di realizzazione dei componenti in esame sono state verificate dapprima tutte le tolleranze di planarità imposte sulle loro superfici in fase di progettazione. Dopo aver acquisito più punti su ciascuna superficie, tramite software è stato costruito il piano che meglio interpola i punti ed è stato calcolato l'errore di planarità impostando una zona di tolleranza formata da due piani paralleli e distanti 0.010 mm. In particolare, uno dei due piani è definito dai punti più estremi della superficie, il secondo è parallelo al primo e distante della tolleranza specificata. I risultati ottenuti sono positivi perché in tutti i casi le misure hanno restituito degli errori di planarità inferiori alla tolleranza richiesta. Dunque, si può considerare rispettato il requisito di planarità, e quindi di uniformità, di tutte le

superfici analizzate. In secondo luogo, sono state determinate le tolleranze sull'orientamento degli stessi piani. È stato adottato come datum feature A il piano misurato sulla superficie laterale della slitta/pepperpot. Tale elemento, denominato PIANO 2, rappresenta l'elemento di riferimento per tutti gli altri piani per la valutazione di parallelismi e perpendicolarità. L'errore di parallelismo è stato calcolato impostando una zona di tolleranza formata da due piani paralleli alla superficie di riferimento e distanti del valore specificato in fase di progetto. In particolare, la superficie che definisce il PIANO 4 deve essere compresa tra due piani distanti tra loro 0.030 mm e paralleli al PIANO 2. Anche per quanto riguarda i risultati ottenuti da queste misure si può considerare rispettato il requisito di parallelismo. Poi è stato calcolato l'errore di perpendicolarità impostando una zona di tolleranza formata da due piani paralleli tra loro, entrambi perpendicolari alla superficie di riferimento. La tolleranza è stata valutata per le superfici che definiscono il PIANO 3 e il PIANO 5, ciascuno dei quali deve trovarsi all'interno di due piani perpendicolari al PIANO 2 e distanti 0.030 mm l'un dall'altro. Dalle misure si può affermare che anche il requisito di perpendicolarità è stato ampiamente rispettato. Tutti i risultati sono mostrati di seguito (Fig. 4.11-4.16).

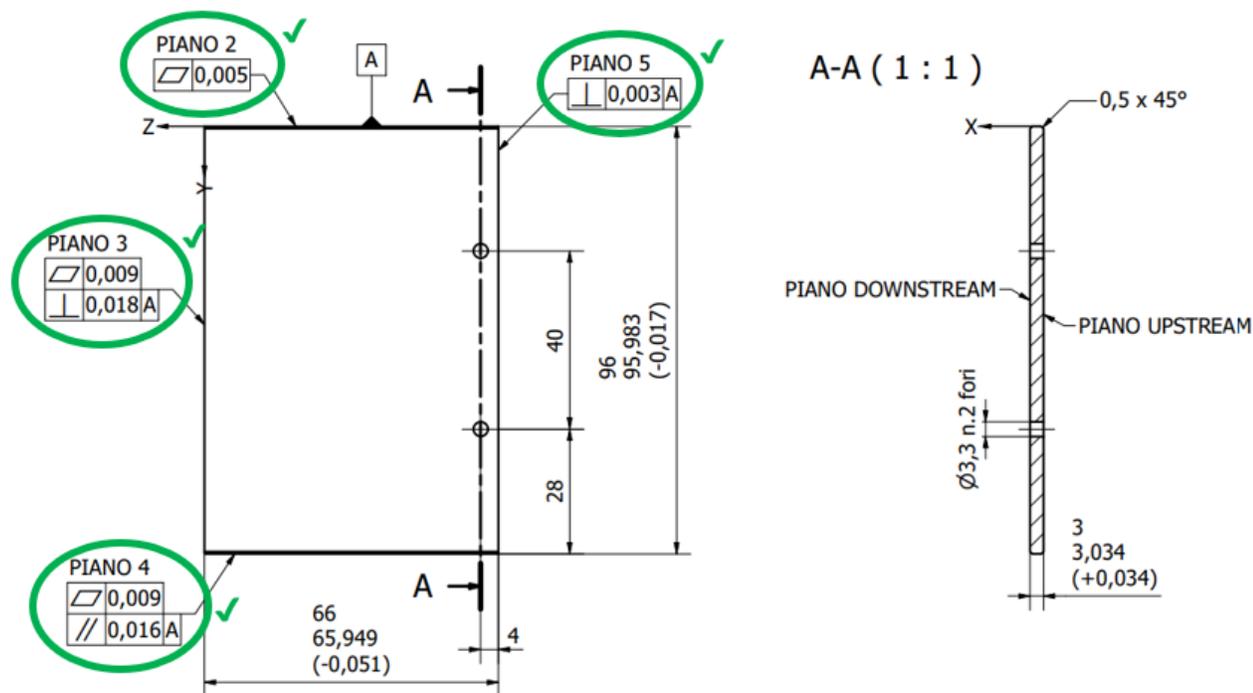


Figura 4.11: I risultati ottenuti per la slitta RIGHT.

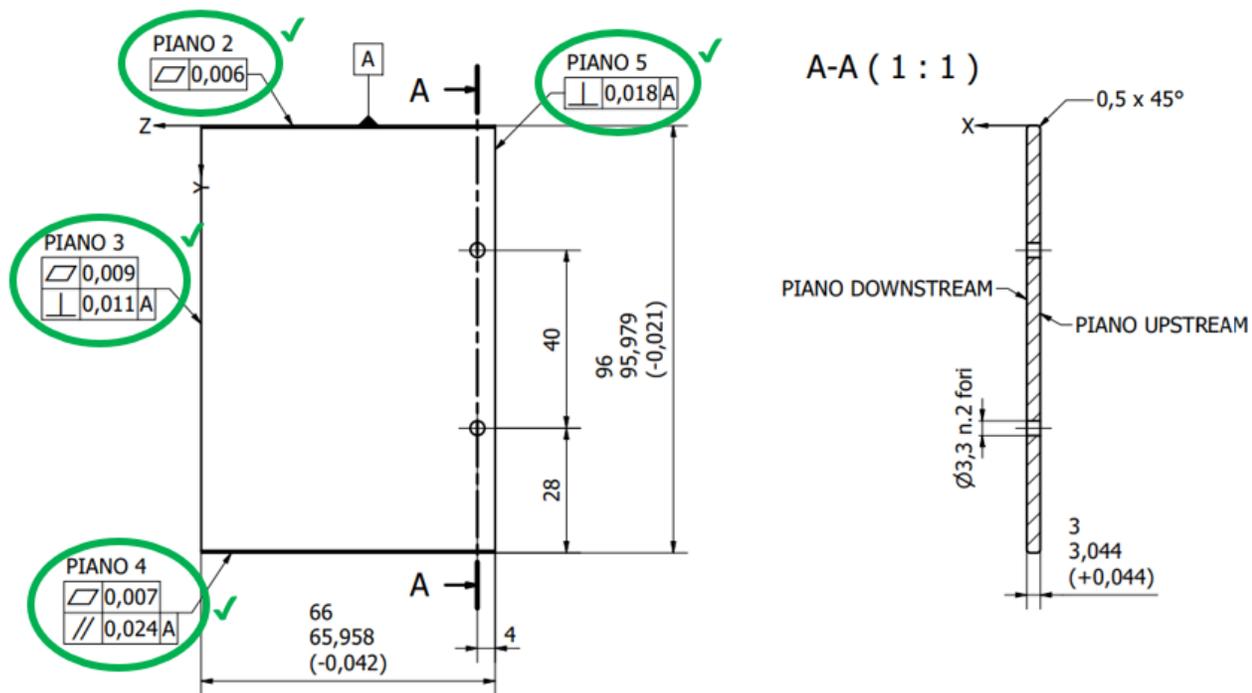


Figura 4.12: I risultati ottenuti per la slitta LEFT.

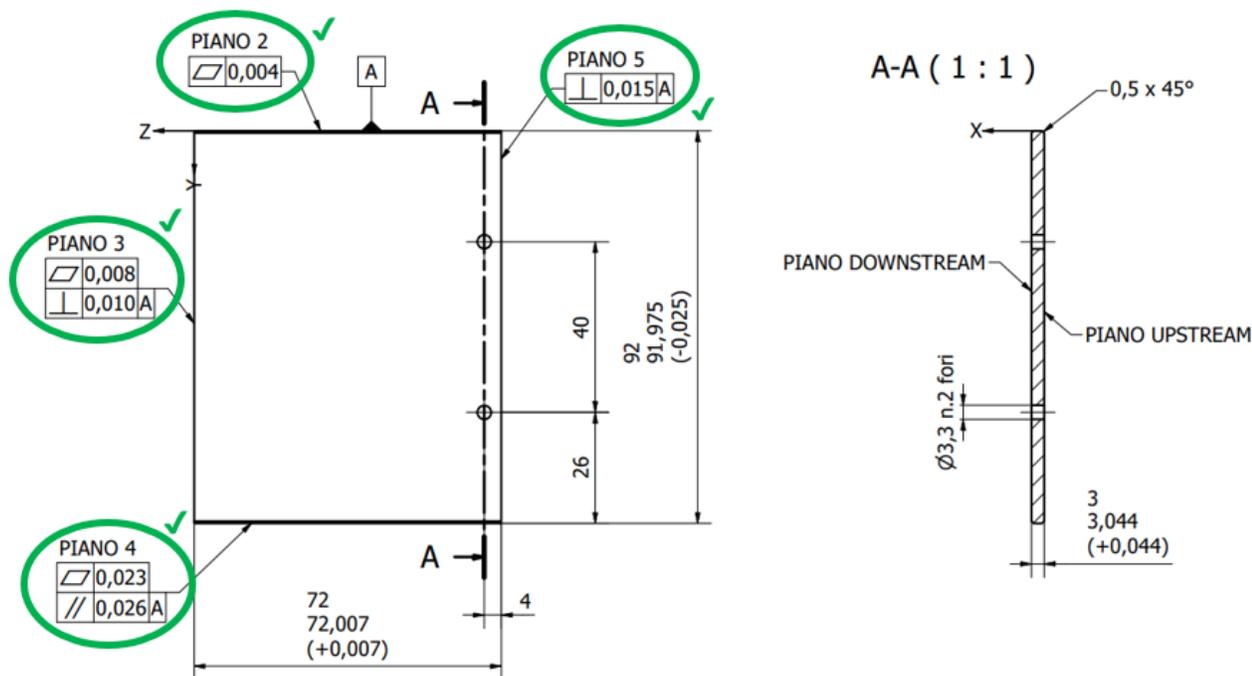


Figura 4.13: I risultati ottenuti per la slitta UP.

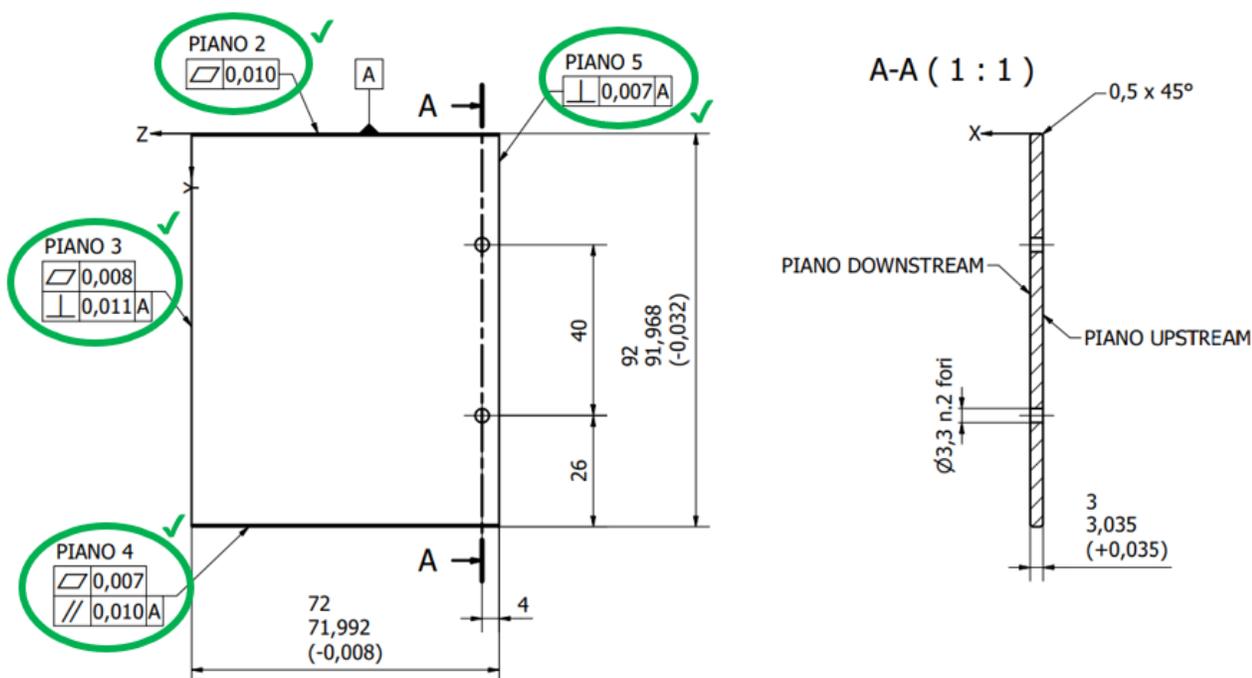


Figura 4.14: I risultati ottenuti per la slitta DOWN.

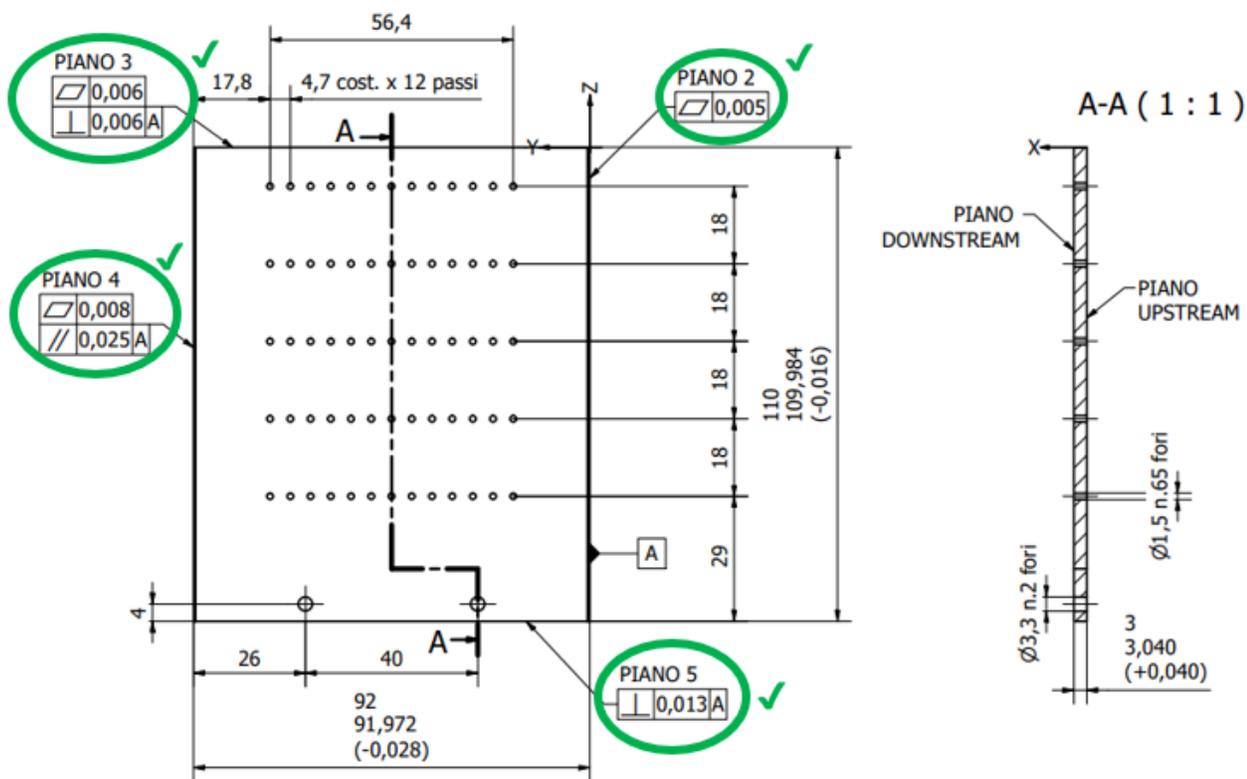


Figura 4.15: I risultati ottenuti per la pepperpot.

Spessore	UP	LEFT	RIGHT	DOWN	PEPPERPOT
Medio [mm]	3.044	3.044	3.034	3.035	3.040
Massimo [mm]	3.057	3.053	3.051	3.047	3.059
Minimo [mm]	3.023	3.032	3.002	3.017	3.017

Tabella 4.2: Valori medi, massimi e minimi degli spessori.

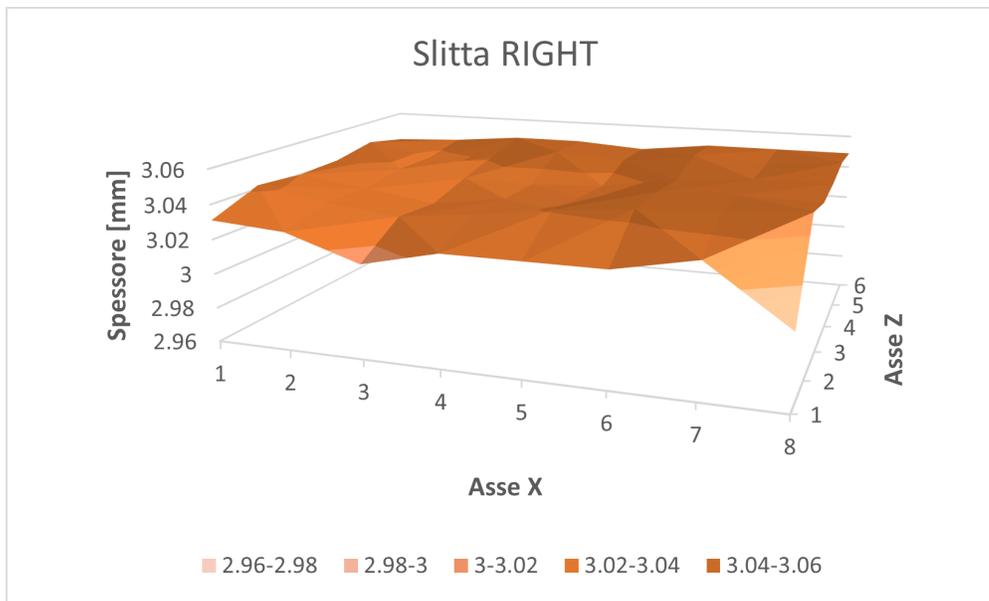


Figura 4.17: Andamento dello spessore sulla slitta RIGHT.

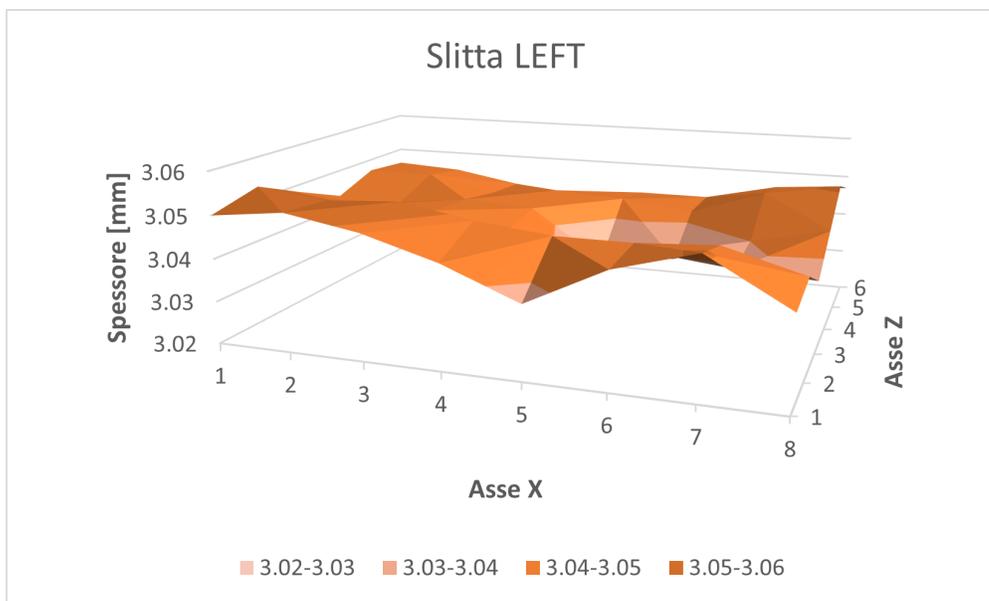


Figura 4.18: Andamento dello spessore sulla slitta LEFT.

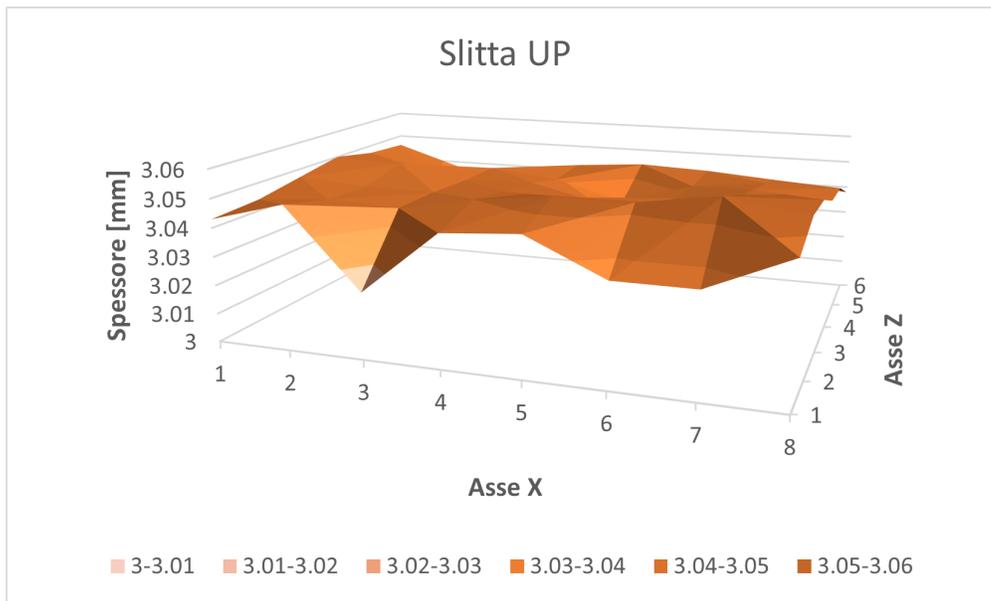


Figura 4.19: Andamento dello spessore sulla slitta UP.

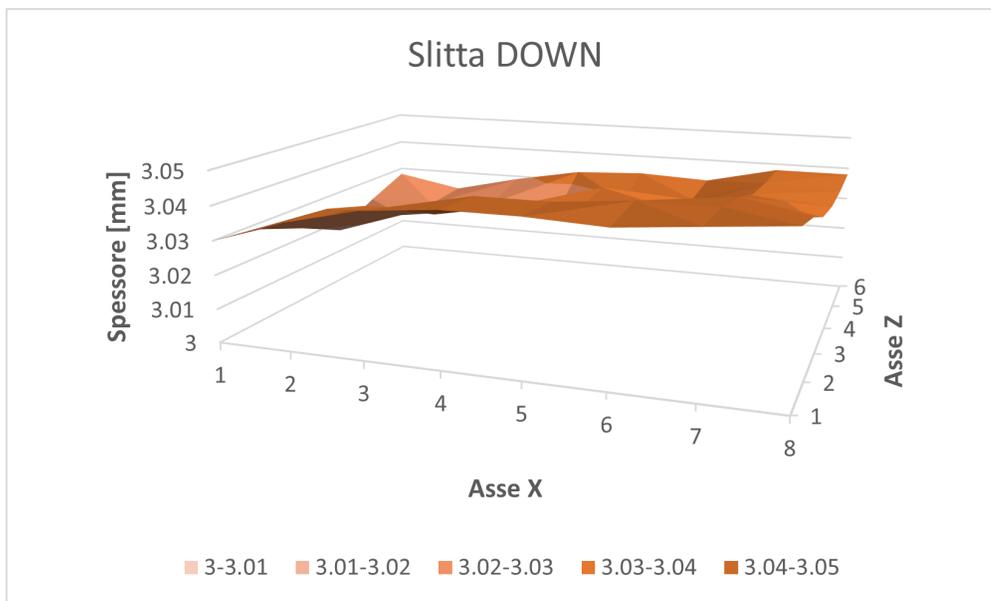


Figura 4.20: Andamento dello spessore sulla slitta DOWN.

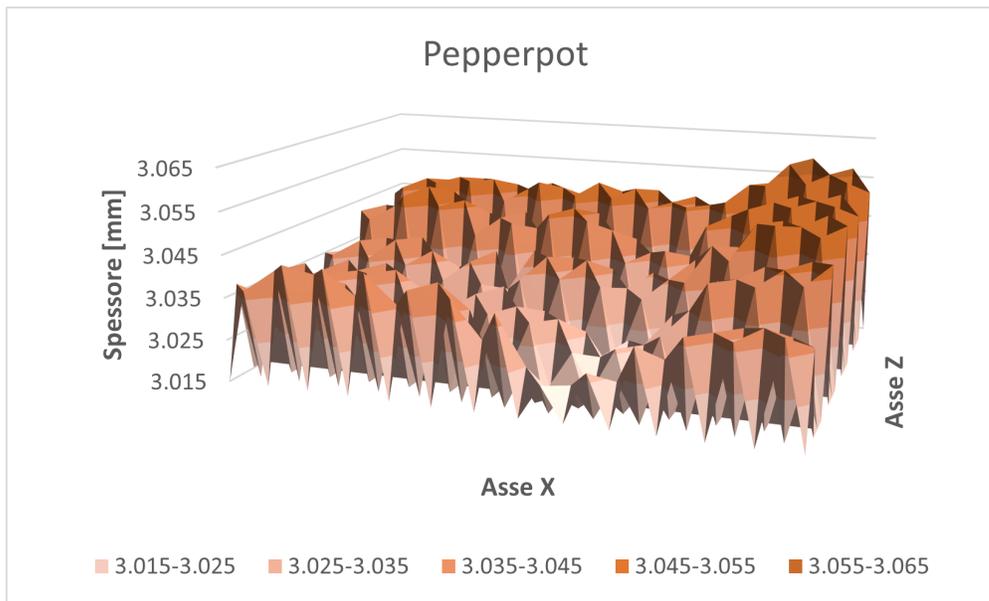


Figura 4.21: Andamento dello spessore sulla pepperpot.

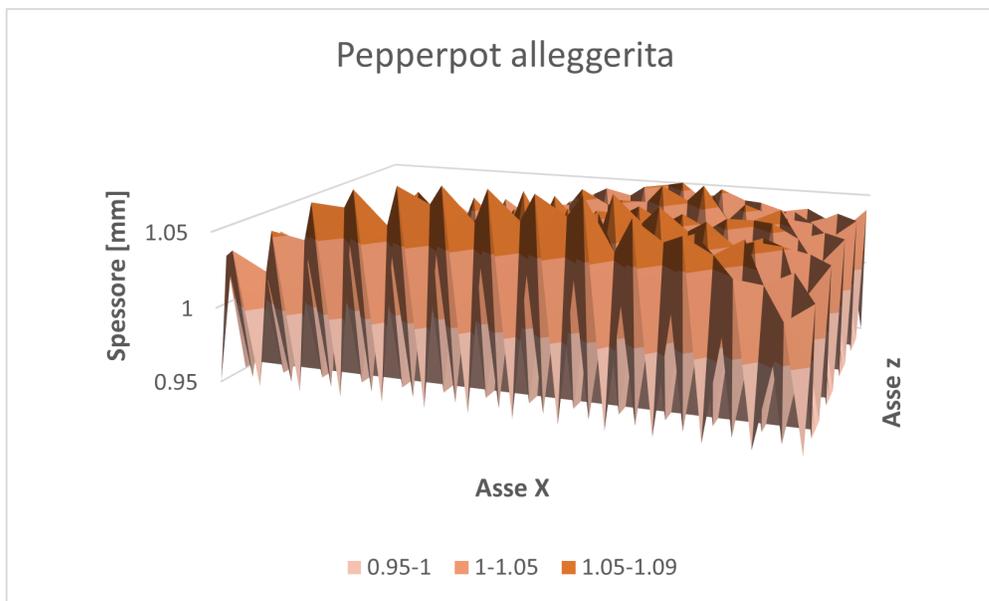


Figura 4.22: Andamento dello spessore sulla pepperpot alleggerita.

Per la pepperpot alleggerita la specifica di progetto richiedeva uno spessore intorno ai fori di (1.0 ± 0.1) mm.

4.3.2 Test sullo schermo fisso

Sullo schermo fisso è stato eseguito dapprima un controllo dimensionale per verificare la precisione di realizzazione della finestra di accettazione. Sono stati misurati i piani sulle superfici interne che definiscono la finestra rettangolare e sono state valutate le distanze tra PIANO 2 e PIANO 4 e tra PIANO 3 e PIANO 5. I risultati ottenuti mostrano delle deviazioni delle dimensioni reali da quelle nominali piuttosto piccole. In particolare, l'apertura presenta un errore rispetto al nominale di 0.021 mm in direzione verticale e di soli 0.002 mm in direzione orizzontale. Le specifiche di progetto da parte della fisica da studiare richiedevano una tolleranza dimensionale di ± 0.050 mm su ogni lato della finestra di accettazione dello schermo. Gli scostamenti calcolati con le misure sono accettabili e dimostrano l'alta precisione ottenuta nella lavorazione del componente.

Invece, le misure che non hanno prodotto dei risultati positivi sono quelle relative al controllo dei due fori di centraggio, i quali sono stati acquisiti come i cilindri CIL 1 e CIL 2. Nel disegno era stata specificata una tolleranza dimensionale sull'interasse di ± 0.010 mm al fine di assicurare un posizionamento reciproco molto preciso tra schermo e camera. L'errore reale, misurato sulla distanza tra i centri dei due fori, è risultato ampiamente al di fuori dell'intervallo accettabile e, in particolare, pari a 0.606 mm. Per comprendere quale dei due fori fosse il peggiore dal punto di vista del posizionamento sono state valutate anche le distanze tra i centri e i piani della finestra rettangolare. Queste misure hanno dimostrato che il foro caratterizzato dal posizionamento peggiore è il CIL 2, la cui distanza rispetto al PIANO 4 (datum B) presenta uno scostamento di ben 0.521 mm dal nominale. Gli errori misurati su entrambi i fori sono rilevanti e non permetteranno mai un corretto posizionamento dello schermo nella camera. Per risolvere il problema è stata eseguita una lavorazione supplementare sul componente (come riportato nel paragrafo successivo), il quale ha un costo piuttosto elevato e non poteva essere semplicemente scartato.

Si è proceduto poi al controllo delle tolleranze geometriche con l'obiettivo di valutare gli errori di forma e di orientamento dei piani acquisiti in precedenza. Su ciascuna superficie della finestra era stata applicata una tolleranza di planarità di 0.010 mm; dalle misure emerge che questo requisito è stato rispettato per tutti i piani in quanto l'errore di planarità è sempre risultato inferiore al valore specificato. Sono stati poi definiti i datum A e B, correlati rispettivamente al PIANO 5 e al PIANO 4. Questi due elementi sono stati utilizzati come riferimenti per determinare l'orientamento delle superfici della finestra. Gli errori di perpendicolarità e parallelismo risultano inferiori al valore di tolleranza specificato (0.030 mm) e quindi anche i requisiti relativi l'orientamento della finestra rettangolare sono stati

rispettati. Tutti i risultati ottenuti dal controllo dimensionale e geometrico dello schermo fisso sono riportati in Fig. 4.23.

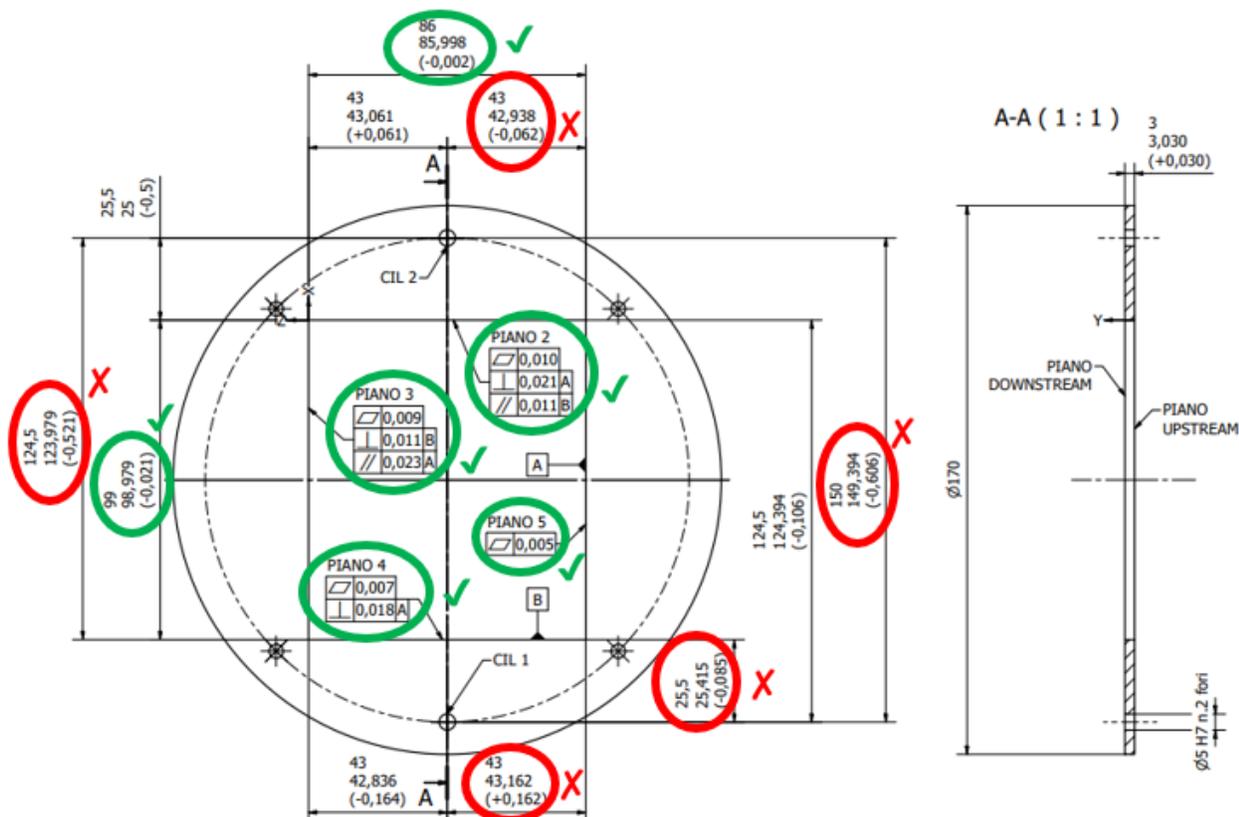


Figura 4.23: I risultati ottenuti per lo schermo fisso. Le quote cerchiato in verde rispettano i requisiti di progetto, quelle in rosso no.

Infine, sono state create le mappe di punti sulle superfici dello schermo per la valutazione dello spessore in tutti i punti dove è prevista un'interazione con gli ioni che si vuole fermare e non propagare nello spettrometro. Sono stati acquisiti 110 punti per ogni piano e, valutando la distanza tra i due piani generati, sempre denominati UPSTREAM e DOWNSTREAM, è stato calcolato lo spessore medio. Come già è stato detto, con le mappe è stato possibile analizzare anche l'andamento dello spessore sull'intero componente, misurando localmente la distanza per ogni coppia di punti (Fig. 4.24). I risultati ottenuti sono buoni in quanto il massimo scostamento calcolato è inferiore al decimo di mm (massimo spessore pari a 3.046 mm). Quindi, il requisito sullo spessore è stato verificato.

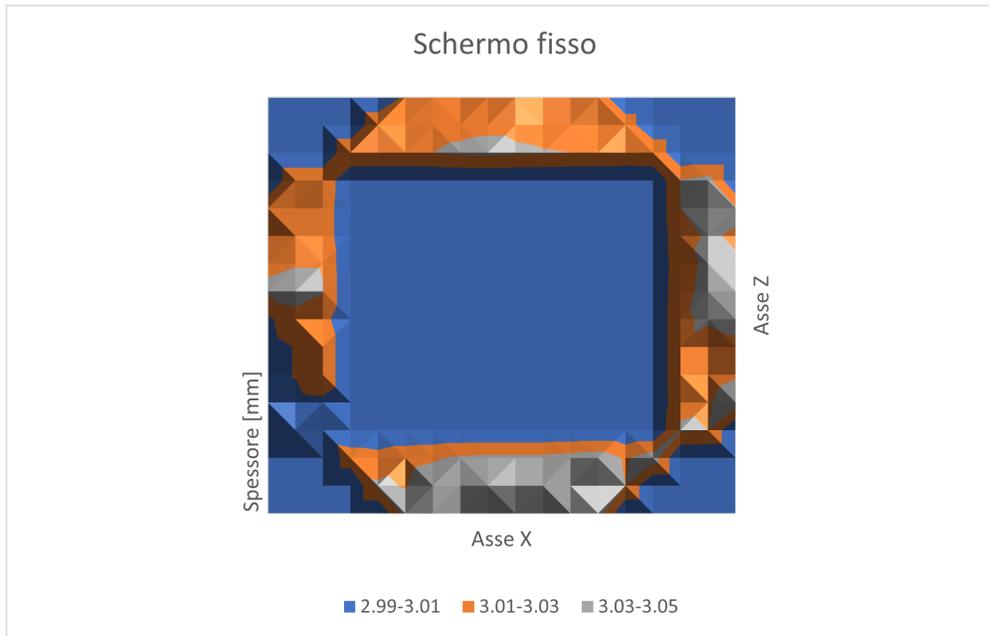


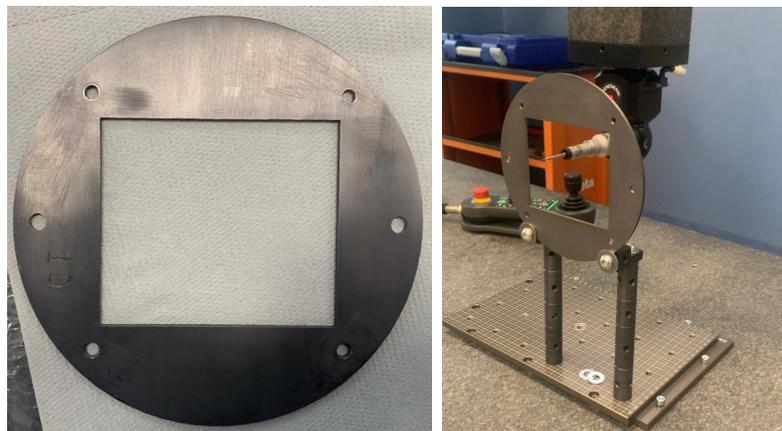
Figura 4.24: Andamento dello spessore sullo schermo fisso.

4.3.3 La modifica dello schermo fisso

Per risolvere i problemi legati all'errato posizionamento dei fori di centraggio realizzati sullo schermo fisso è stata adottata la soluzione illustrata di seguito. I fori sono stati modificati e, in particolare, si è deciso di aumentare il loro diametro fino ad un valore di 7 mm. La messa in tavola dello schermo fisso modificato è riportata in Appendice B.3. Inizialmente il raggio dei fori era pari a 2.5 mm e l'errore misurato sull'interasse risultava 0.606 mm. Questo errore viene corretto realizzando due nuovi fori con raggio pari alla somma tra il raggio iniziale e l'errore misurato; approssimando per eccesso tale valore è stato trovato un raggio finale di 3.5 mm. Quindi, il pezzo è stato rimesso in macchina per elettroerosione e sono stati realizzati i due nuovi fori di centraggio (Fig. 4.25 (a)). Successivamente, è stato effettuato il solito controllo dimensionale tramite CMM per verificare la posizione dei fori e l'interasse tra i due (Fig. 4.25 (b)). I risultati ottenuti confermano un ottimo posizionamento dei nuovi fori, con un errore misurato sull'interasse di entità inferiore al centesimo di mm (Fig. 4.27). In questo modo è stato garantito un centraggio molto preciso dello schermo fisso all'interno della camera.

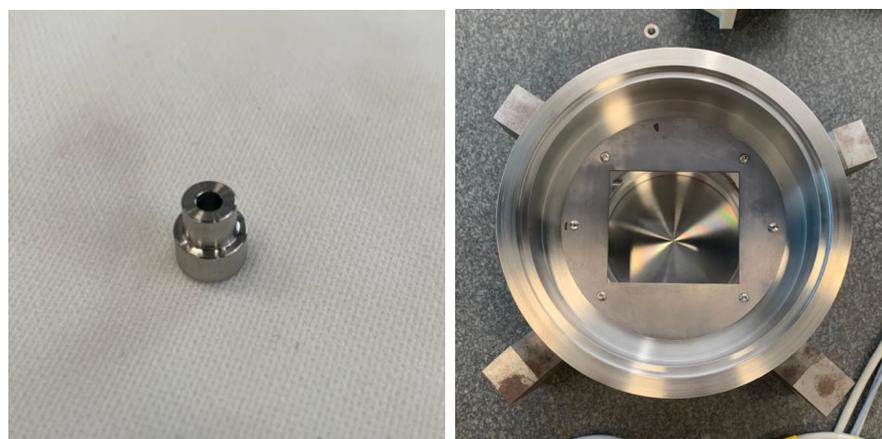
A causa di questa modifica non è possibile utilizzare le spine di riferimento con il diametro previsto in precedenza. Quindi, sono state realizzate delle nuove spine ad hoc (Fig. 4.26 (a)) caratterizzate da due diametri differenti in modo tale da poter essere inserite nei rispettivi fori dei due componenti da collegare. La porzione di spina con diametro pari a 5 mm viene

inserita nel foro della camera mentre la porzione con diametro pari a 7 mm nello schermo fisso. Inoltre, è presente un piccolo forellino al centro della spina che funge da via di fuga per l'aria. Infatti, l'inserimento della spina nel foro cieco della camera intrappola gas a pressione ambiente alla base della spina stessa, generando delle perdite virtuali. Tramite il forellino l'aria non viene intrappolata e fuoriesce facilmente, eliminando il problema durante il funzionamento in alto vuoto. Il risultato finale è visibile in Fig. 4.26 (b).



(a) Lo schermo fisso modificato. (b) Messa in macchina dello schermo modificato.

Figura 4.25: Nella figura (a) viene mostrato lo schermo fisso a seguito della modifica dei fori. Nella figura (b) viene mostrato lo schermo mentre viene testato con la CMM.



(a) La nuova spina. (b) Posizionamento dello schermo fisso nella camera tramite le nuove spine.

Figura 4.26: Nella figura (a) è mostrata la nuova spina realizzata per collegare lo schermo fisso e il corpo della camera. Nella figura (b) viene mostrato il montaggio finale.

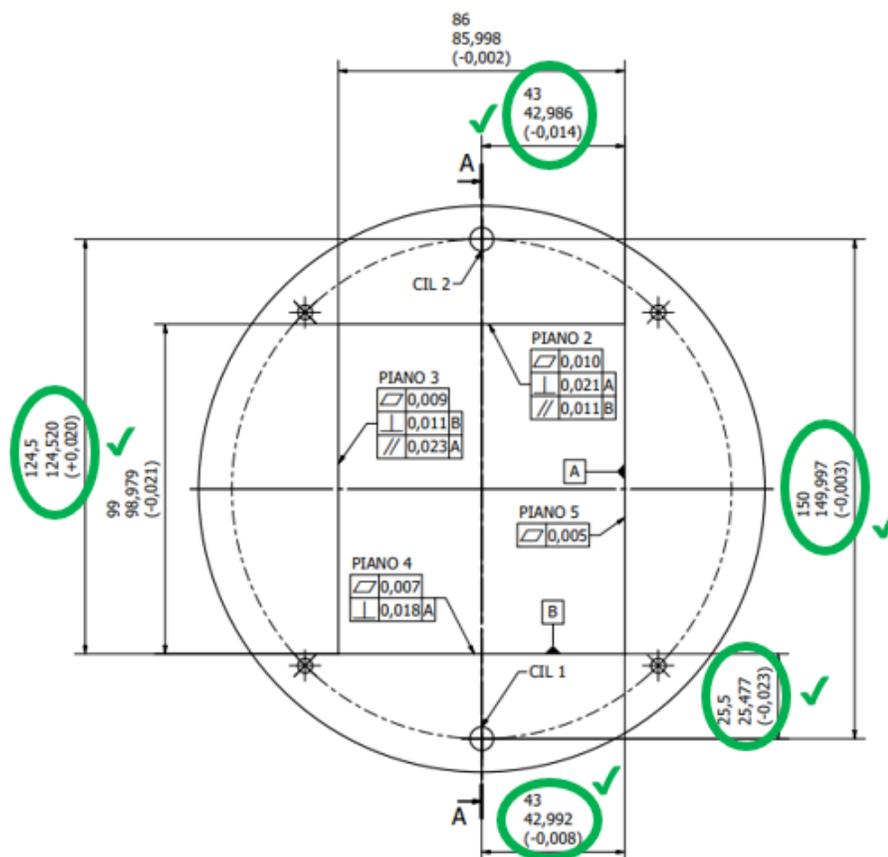


Figura 4.27: I risultati ottenuti per lo schermo fisso dopo la modifica.

4.3.4 Test sulla camera

Il primo controllo è stato eseguito sulle superfici esterne della camera in corrispondenza delle quali vengono montate le tasche contenenti le slitte (Fig. 4.28 (a)). Queste facce devono essere piane, uniformi e orientate adeguatamente nello spazio poiché attraverso esse avviene il collegamento con le flange delle tasche. Di conseguenza, eventuali errori di forma e di orientamento influiscono anche sul posizionamento delle slitte a seguito del montaggio. Inoltre, entrando in contatto con la guarnizione in EPDM, la corretta realizzazione di queste superfici è necessaria al fine di garantire la tenuta durante il funzionamento in alto vuoto. Per il controllo sono stati acquisiti i piani UP, DOWN, LEFT e RIGHT e sono stati misurati i relativi errori di planarità, i quali sono tutti inferiori al valore di tolleranza specificato nel disegno (0.010 mm). Poi è stato definito il datum D, corrispondente al PIANO RIGHT, assunto come elemento di riferimento per la valutazione delle tolleranze di orientamento degli altri piani. L'errore di parallelismo del PIANO LEFT e gli errori di perpendicolarità dei piani UP e DOWN rientrano tutti nei limiti di variabilità prestabiliti (0.030 mm). I requisiti di forma e orientamento relativi le superfici esterne della camera sono stati rispettati (Fig. 4.30).



(a) Test di controllo sulla camera. (b) Test di controllo sullo schermo.

Figura 4.28: Nella figura (a) è mostrata la camera mentre viene testata con la CMM. Nella figura (b) viene mostrato lo schermo che viene testato a seguito del montaggio nella camera.

Successivamente lo schermo fisso è stato montato all'interno della camera in quattro posizioni diverse al fine di valutare la configurazione che assicura il miglior orientamento della finestra di accettazione tenendo conto che lo schermo è simmetrico nelle due direzioni UP/DOWN e LEFT/RIGHT. L'obiettivo è quello di ridurre al minimo i disallineamenti che si generano a seguito del montaggio, guadagnando una maggiore precisione nel posizionamento dell'apertura nel sistema. Il test è stato eseguito nelle seguenti posizioni:

1. foro CIL 1 dal lato del PIANO UP e PIANO DOWNSTREAM dello schermo a contatto con la camera;
2. foro CIL 1 dal lato del PIANO DOWN e PIANO DOWNSTREAM dello schermo a contatto con la camera;
3. foro CIL 1 dal lato del PIANO UP e PIANO UPSTREAM dello schermo a contatto con la camera;
4. foro CIL 1 dal lato del PIANO DOWN e PIANO UPSTREAM dello schermo a contatto con la camera.

Per ciascuna prova sono stati acquisiti i piani sulle superfici interne della finestra rettangolare (4.28 (b)) e sono stati misurati i relativi errori di parallelismo e perpendicolarità rispetto al

PIANO RIGHT (datum D). Dai risultati ottenuti è emerso che il miglior orientamento della finestra è garantito dal posizionamento 4 (vedi Fig. 4.29). I valori ricavati dalle misure con lo schermo in questa posizione sono visibili in Fig. 4.30.

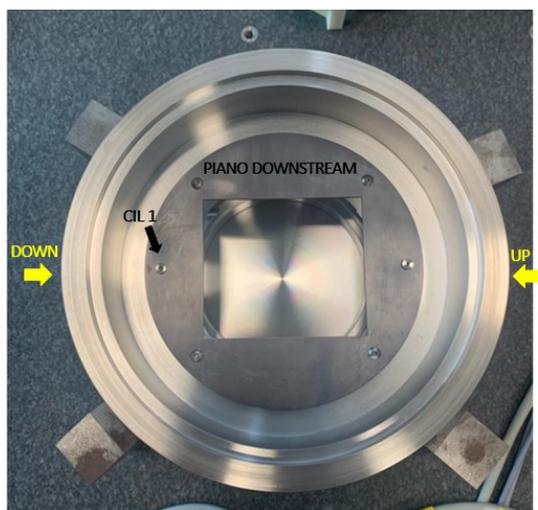


Figura 4.29: Il posizionamento con cui si ha il miglior orientamento della finestra rettangolare.

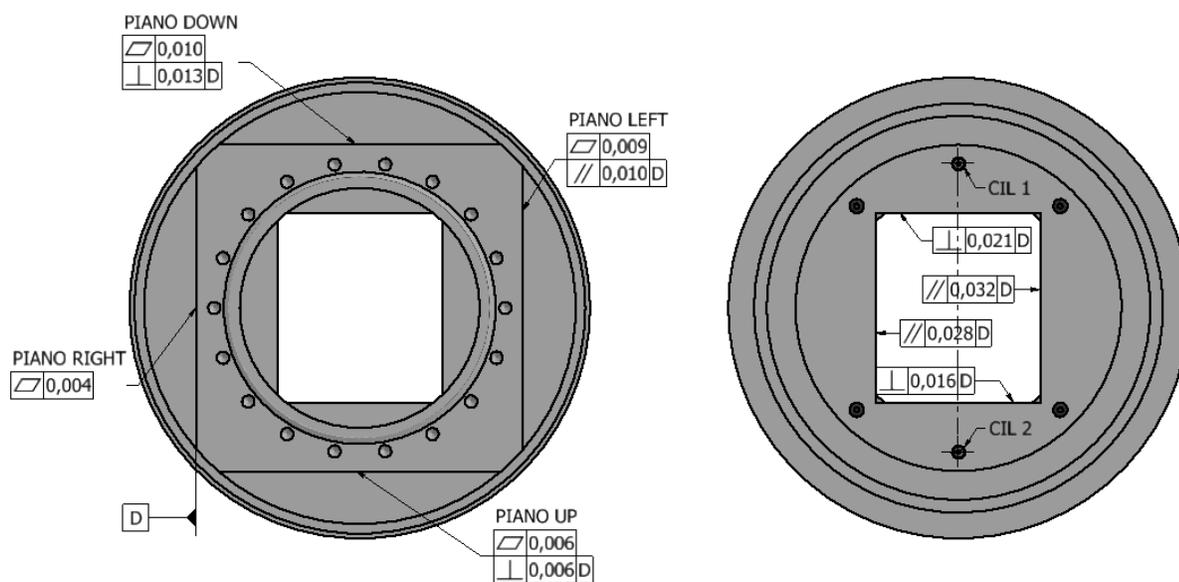


Figura 4.30: I risultati ottenuti per la camera e lo schermo fisso dopo il montaggio.

4.3.5 Calibrazione preliminare del sistema

L'ultima attività di controllo è stata eseguita con le slitte montate all'interno della camera con lo scopo di osservare il loro effettivo posizionamento e, di conseguenza, definire le curve

di calibrazione per i sistemi di movimentazione. La prima operazione svolta consiste nell'azzeramento delle slitte mobili e cioè nel definire la posizione in cui la superficie superiore di ciascuna slitta coincide con la linea del fascio (Fig. 4.31 (a)). Invece, nel caso della pepperpot l'azzeramento definisce la posizione in cui si verifica la coincidenza tra il centro del suo piccolo foro centrale e la linea del fascio (Fig. 4.31 (b)). La linea del fascio, cioè l'elemento di riferimento, è il punto medio che giace sull'interasse misurato tra i due fori di centraggio dello schermo fisso e rappresenta l'origine del sistema. L'origine del sistema è stata poi messa in relazione con ciascun piano misurato sulla superficie superiore delle slitta/pepperpot in esame. L'azzeramento è stato effettuato iterativamente nel seguente modo:

1. invio del comando con la posizione di riferimento; tale comando, in termini di step, rappresenta la posizione teorica che permetterebbe di ottenere una distanza pari a zero tra l'origine del sistema e la superficie superiore della slitta/pepperpot;
2. lettura della distanza effettivamente misurata e calcolo dell'errore di posizionamento;
3. regolazione del numero di step in modo tale da ridurre l'errore sulla distanza entro 0.005 mm;
4. verifica della correzione.

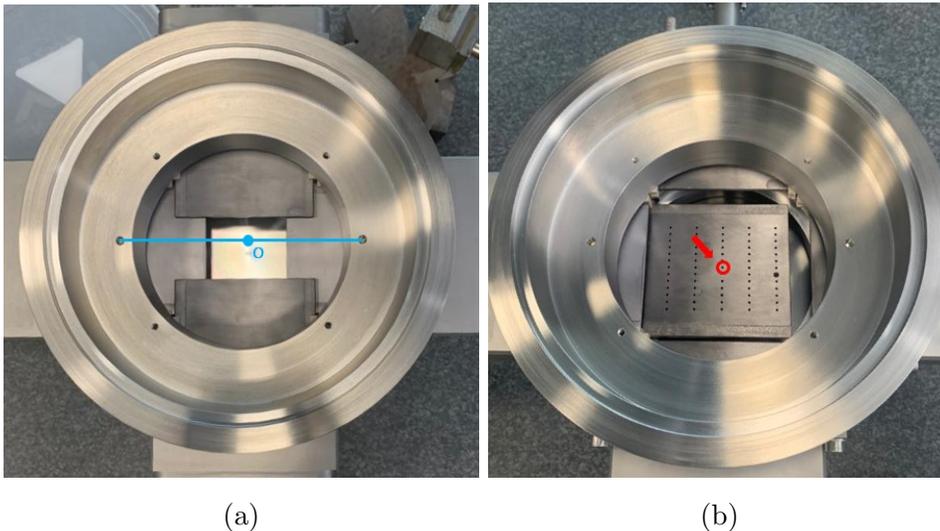


Figura 4.31: Nella figura (a) è visibile l'origine del sistema che rappresenta il punto di riferimento per l'azzeramento delle slitte e della pepperpot. Nella figura (b) viene mostrato il punto centrale della pepperpot che deve coincidere con l'origine del sistema nell'azzeramento.

Il calcolo dell'esatto numero di step che garantisce l'azzeramento permette anche di impostare i limiti software di finecorsa per ciascun motore (Fig. 4.32). Infatti, l'origine del sistema

rappresenta il limite superiore da non superare mai durante la movimentazione delle slitte al fine di evitare collisioni indesiderate. Si notano degli offset nell'azzeramento, cioè delle differenze di step quando le slitte sono posizionate sullo zero del sistema. In primis le slitte UP/DOWN e LEFT/RIGHT devono effettuare corse differenti per raggiungere lo zero proprio per come è stato realizzato il sistema; infatti, le tasche UP/DOWN sono più profonde di quelle LEFT/RIGHT. In secondo luogo, altre differenze intercorrono perché la tasca in cui sono inserite la slitta DOWN e la pepperpot è più profonda di quella che contiene la UP. Infine, bisogna tener conto delle differenze che si generano a seguito del montaggio. I limiti inferiori sono stati impostati pari allo zero dell'encoder, cioè con le slitte in posizione completamente rientrata (stelo dell'attuatore retracts). I limiti hardware definiti sugli attuatori lineari sono uguali a quelli software. Occorre fare una precisazione: l'azzeramento fatto in calibrazione si mantiene costante indipendentemente dalle condizioni dell'esperimento ma solo a patto di non eseguire lo smontaggio e il rimontaggio delle slitte. Se sarà effettuato lo smontaggio delle slitte, o la sostituzione di altri componenti (viti in PEEK, rondelle in BN), sarà necessario ricalibrare il sistema mediante un laser tracker che viene inviato lungo la linea del fascio.

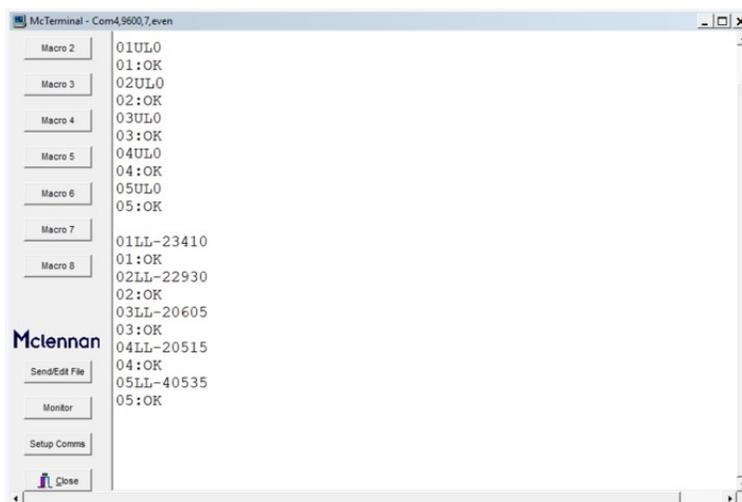


Figura 4.32: I limiti software, espressi in numero di step, impostati a seguito dell'azzeramento.

Successivamente sono stati effettuati i test di movimentazione delle slitte e della pepperpot al fine di valutare la loro precisione di posizionamento. Sono state ripetute 4 prove consecutive per ciascun test, il quale è stato condotto nel seguente modo:

1. posizionamento iniziale in corrispondenza dell'origine del sistema;
2. rientro completo della slitta/pepperpot fino al raggiungimento dello zero dell'encoder; il rientro della slitta allo zero dell'encoder deve essere ripetuto prima di posizionare la

slitta ad un nuovo valore poiché muovendola da una posizione all'altra si accumulano degli errori non trascurabili.

3. fuoriuscita della slitta/pepperpot con posizionamento ad una distanza di 2000 step dall'ultima posizione analizzata;
4. acquisizione del piano;
5. esecuzione delle fasi (2), (3) e (4) fino al raggiungimento della posizione che delimita la finestra rettangolare dello schermo fisso.

Per ciascuna posizione è stata misurata la distanza effettiva tra il piano acquisito e l'origine del sistema. Poi questa distanza è stata diagrammata in funzione del numero di step che hanno generato il posizionamento. La distanza 0 mm indica che la slitta è completamente inserita mentre la distanza 45/50 mm indica che è estratta. Inoltre, è stato analizzato l'orientamento delle slitte e della pepperpot in relazione all'interasse tra i due fori di riferimento, valutando in ogni posizione gli errori di parallelismo e perpendicolarità. Le rette di calibrazione riportate di seguito sono state calcolate mediando le misure relative alle 4 prove eseguite per ciascun componente.

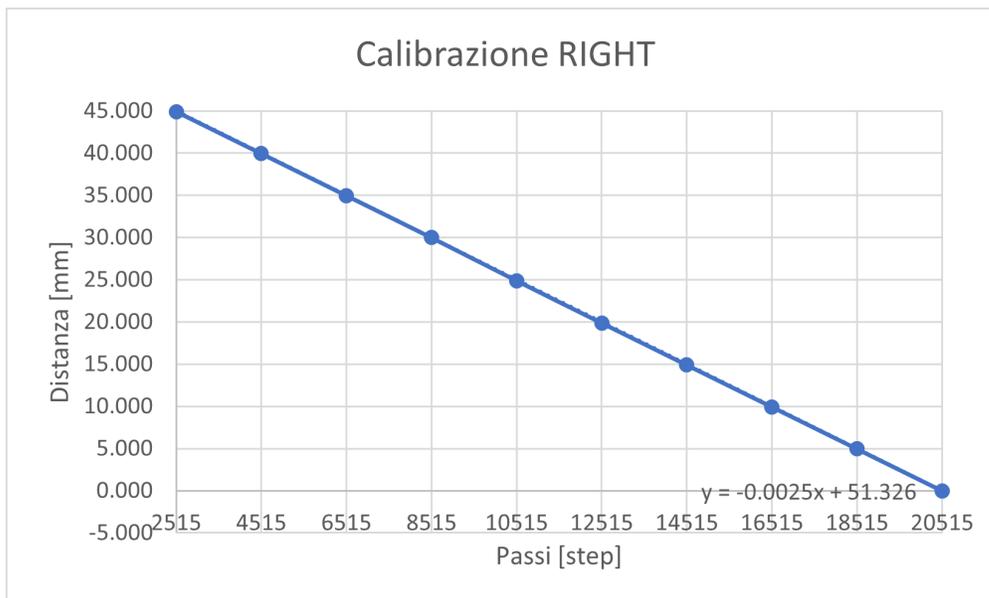


Figura 4.33: Retta di calibrazione per la slitta RIGHT.

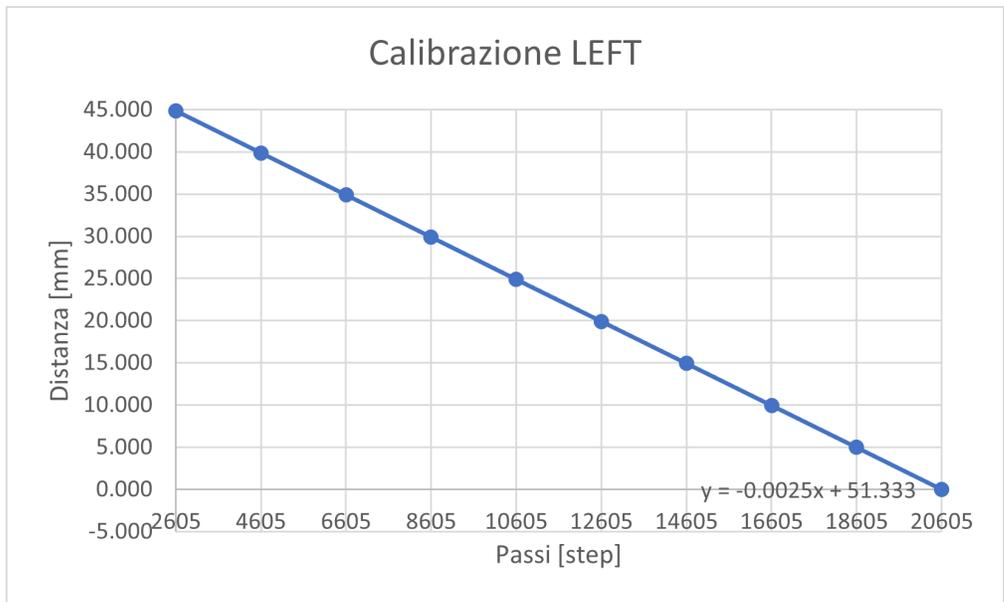


Figura 4.34: Retta di calibrazione per la slitta LEFT.

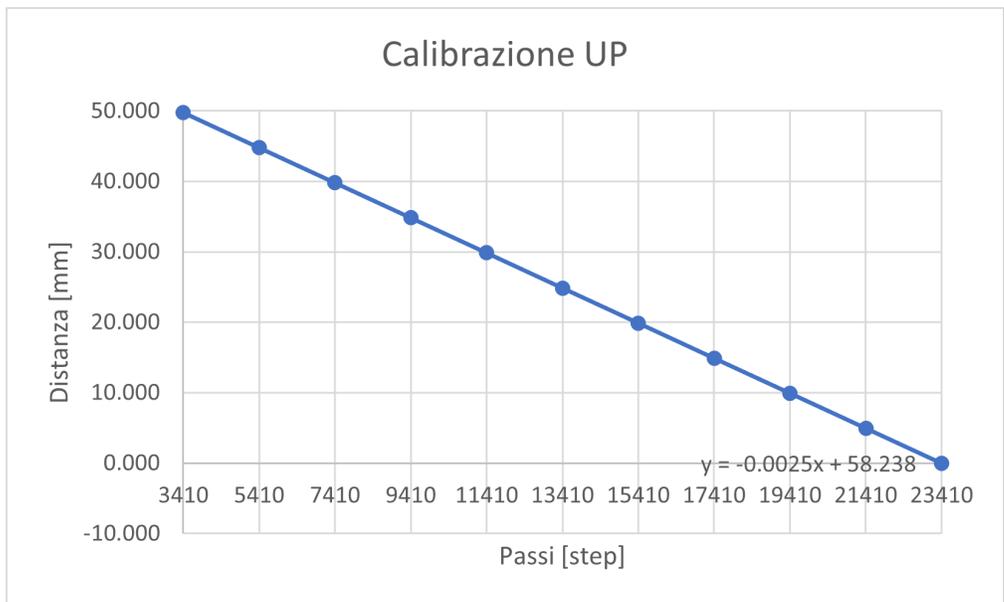


Figura 4.35: Retta di calibrazione per la slitta UP.

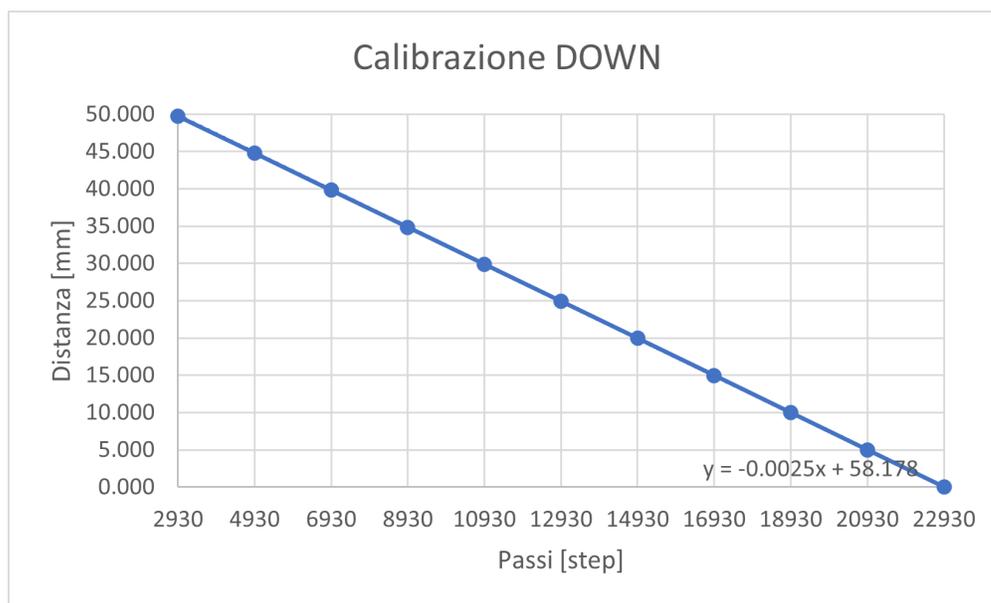


Figura 4.36: Retta di calibrazione per la slitta DOWN.

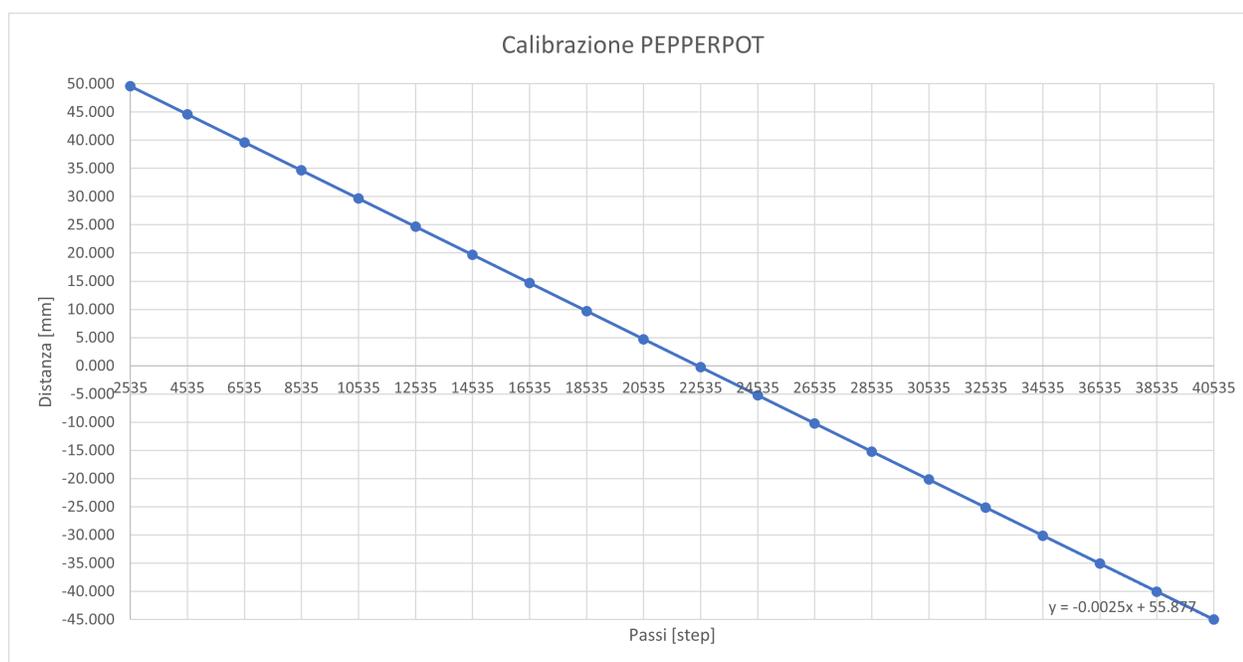


Figura 4.37: Retta di calibrazione per la pepperpot.

L'andamento delle curve di calibrazione, ricavate sperimentalmente, conferma il comportamento quasi perfettamente lineare del sistema di movimentazione e cioè l'esistenza di una relazione lineare tra la posizione misurata e il comando fornito al motore in termini di step. Infatti, ad ogni variazione del segnale in ingresso di 2000 step corrisponde una variazione nel posizionamento del componente di circa 5 mm. Teoricamente 400 step del motore equivalgo-

no ad uno spostamento dell'attuatore lineare di 1 mm; quindi, il coefficiente angolare teorico è pari a -0.0025 mm/step. Calcolando il coefficiente angolare da ciascuna curva sperimentale si ottengono degli ottimi risultati (vedi Tabella 4.3).

	UP	LEFT	RIGHT	DOWN	PEPPERPOT
Coefficiente angolare [mm/step]	-0.00249	-0.00249	-0.00250	-0.00249	-0.00249

Tabella 4.3: Calcolo del coefficiente angolare delle rette di calibrazione.

Invece, per quanto riguarda gli errori di parallelismo e perpendicolarità misurati rispetto l'interasse di riferimento è emerso che tutte le slitte sono soggette ad un fenomeno di impuntamento. Questo fenomeno è giustificato dall'errato posizionamento degli attuatori. Infatti, gli steli sono soggetti a delle oscillazioni, le quali non permettono di spingere linearmente le slitte. Le guide in PEEK hanno proprio la funzione di correggere le leggere oscillazioni dell'attuatore. Nel tratto in cui le guide sono rigide, cioè sono avvolte dalla tasca, permettono alla slitta di posizionarsi correttamente; invece, se sono libere, cedono sotto la spinta, si deformano e la slitta si impunta. Questo fenomeno è meno marcato nella movimentazione delle slitte LEFT e UP ed è più accentuato per le slitte RIGHT e DOWN (vedi Tabella 4.4).

Distanza [mm]	UP [mm]	LEFT [mm]	RIGHT [mm]	DOWN [mm]
0	0.160	0.076	0.311	0.332
5	0.128	0.069	0.323	0.323
10	0.091	0.056	0.332	0.339
15	0.062	0.049	0.343	0.355
20	0.038	0.044	0.347	0.367
25	0.023	0.034	0.342	0.356
30	0.021	0.056	0.357	0.339
35	0.021	0.071	0.298	0.327
40	0.028	0.075	0.223	0.317
45	0.038	0.089	0.188	0.302
50	0.034	-	-	0.269

Tabella 4.4: Gli errori di orientamento delle slitte rispetto all'interasse di riferimento. Sulla prima colonna è indicata la distanza dall'origine del sistema.

In particolare, i risultati peggiori sono quelli relativi al posizionamento della slitta DOWN con un errore di perpendicolarità massimo di 0.367 mm (valutato rispetto all'interasse di

riferimento). In pratica, i valori ottenuti non sono accettabili perché questi errori di orientamento dovrebbero essere minori di almeno 0.10 mm. Quindi, per risolvere questo problema sono stati eseguiti altri test, i quali verranno descritti nel prossimo paragrafo.

4.3.6 Calibrazione finale del sistema

Le prove sono state rieseguite prima disponendo il sistema in verticale (Fig. 4.38), cioè nella posizione in cui opererà durante gli esperimenti, e poi apportando anche una modifica sulle guide. I test effettuati prima di intervenire sulle guide hanno mostrato gli stessi errori ottenuti con il sistema in orizzontale.



Figura 4.38: Il sistema disposto in verticale per la calibrazione finale.

Come già detto nel paragrafo precedente, l'impuntamento, responsabile degli errori misurati sull'orientamento di slitte e pepperpot, è giustificato dalla bassa rigidità delle guide in PEEK, le quali garantiscono un buon scorrimento ma tendono a flettersi verso l'esterno, non riuscendo a guidare il movimento in maniera perfettamente lineare quando la slitta viene estratta verso il centro del sistema. In secondo luogo, l'errore è amplificato dalla dinamica trasferita dagli attuatori. Infatti, gli steli sono pieni solo in punta mentre per il resto della lunghezza sono cavi. Questa caratteristica li rende più leggeri e meno robusti, per cui durante la movimentazione gli steli tendono a subire una flessione, con conseguente deformazione che tende ad amplificare l'impuntamento della slitta/pepperpot. Quindi, per risolvere il problema è stata adottata la seguente soluzione: sono stati inseriti degli spessori in PEEK, posizionati lateralmente sulle guide (Fig. 4.39), in modo tale da eliminare lo spazio vuoto tra le stesse e il corpo della camera. Così le guide vengono irrigidite grazie allo spessore in contatto con le superfici interne della camera e riescono a guidare meglio il movimento lineare delle slitte.

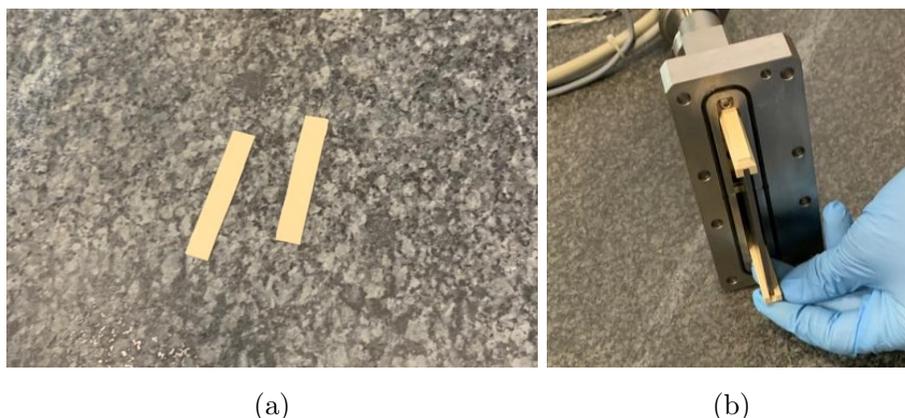


Figura 4.39: La figura (a) mostra gli spessori in PEEK utilizzati per irrigidire le guide. Nella figura (b) viene mostrato come sono stati posizionati gli spessori a fianco delle guide.

I test di posizionamento sono stati rieseguiti in queste condizioni e la modifica si è dimostrata efficace nell’aumentare la precisione di posizionamento (vedi Tabella 4.5). In particolare, per le slitte LEFT e UP gli errori di orientamento sono tutti inferiori al decimo di mm (0.10 mm); per le slitte RIGHT e DOWN gli errori sono stati notevolmente ridotti rispetto a prima e sono nell’ordine del decimo di mm (quasi tutti minori di 0.10 mm con qualche valore leggermente al di sopra ma accettabile). In conclusione, il sistema è stato ottimizzato, ritestato e ricalibrato ed è stato verificato che sia in grado di garantire le precisioni richieste dall’esperimento. Le rette ottenute con la calibrazione finale sono riportate in Fig. 4.40-4.43.

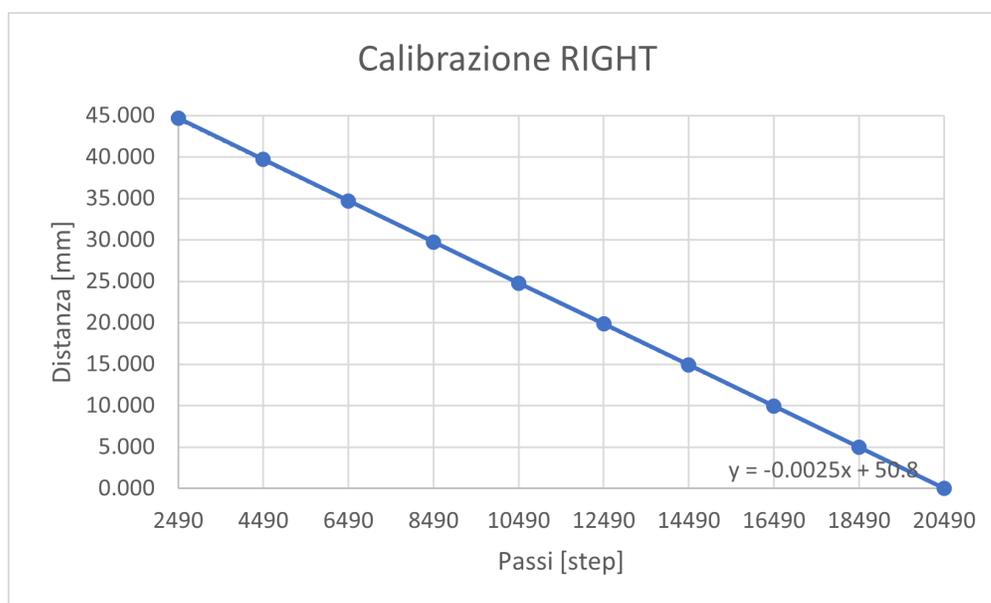


Figura 4.40: Retta di calibrazione finale per la slitta RIGHT.

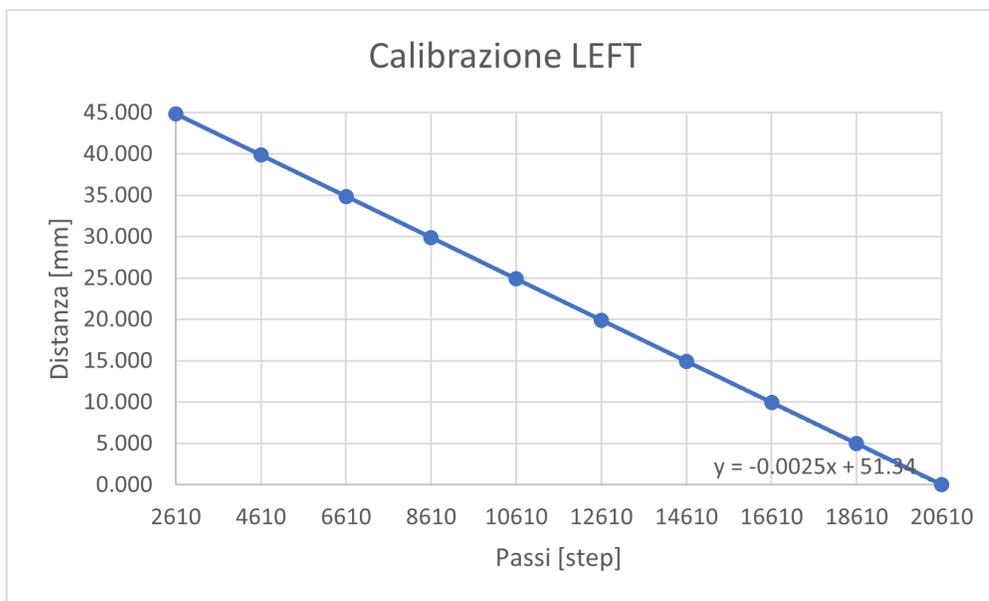


Figura 4.41: Retta di calibrazione finale per la slitta LEFT.

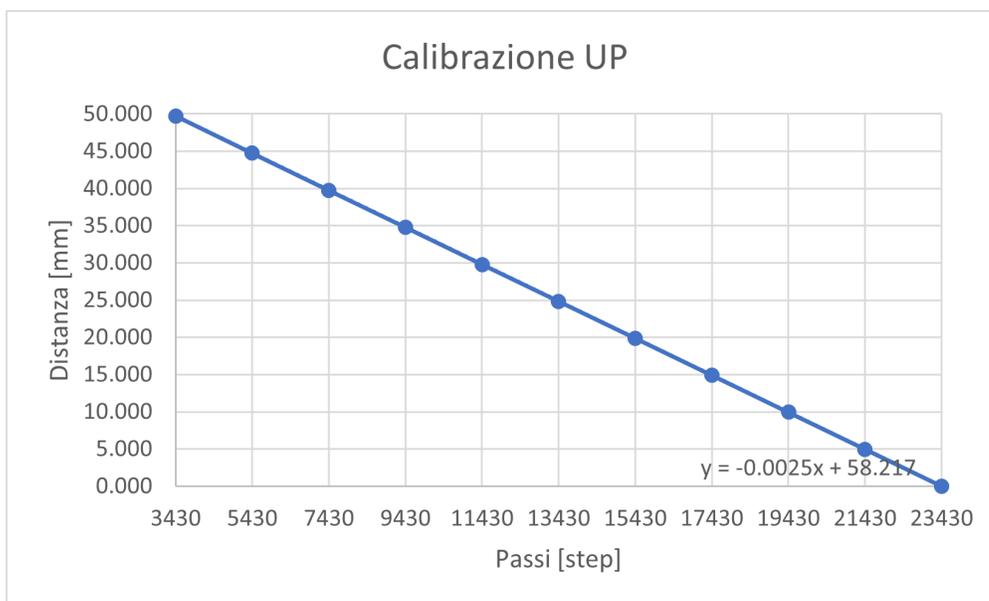


Figura 4.42: Retta di calibrazione finale per la slitta UP.

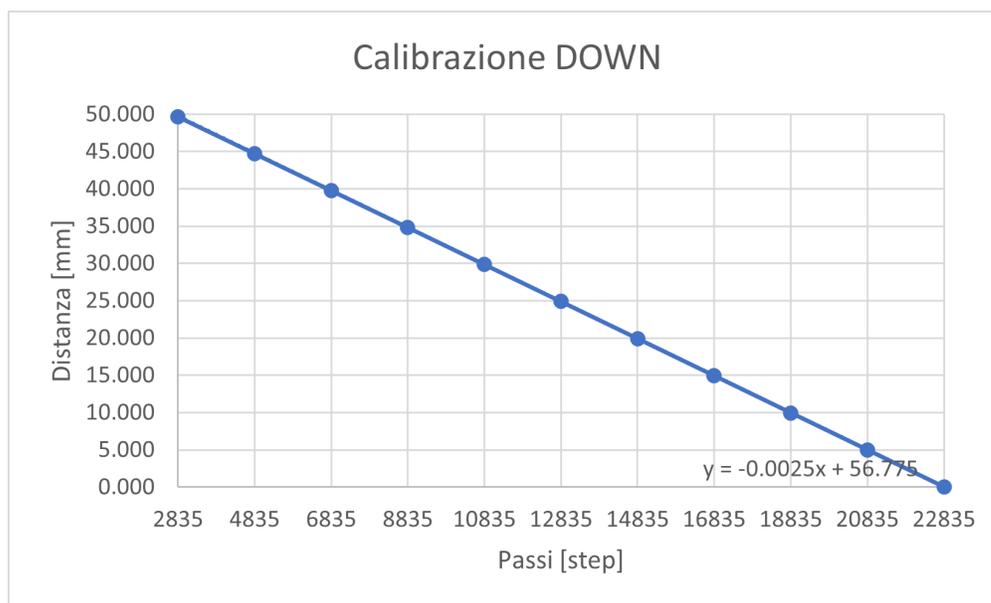


Figura 4.43: Retta di calibrazione finale per la slitta DOWN.

Distanza [mm]	UP [mm]	LEFT [mm]	RIGHT [mm]	DOWN [mm]
0	0.032	0.007	0.036	0.129
5	0.018	0.007	0.049	0.103
10	0.011	0.006	0.059	0.089
15	0.013	0.006	0.070	0.071
20	0.019	0.007	0.079	0.049
25	0.006	0.007	0.087	0.033
30	0.009	0.014	0.098	0.021
35	0.006	0.011	0.106	0.014
40	0.017	0.010	0.112	0.012
45	0.030	0.014	0.110	0.012
50	0.024	-	-	0.029

Tabella 4.5: Gli errori di orientamento delle slitte rispetto all'interasse di riferimento ottenuti con la calibrazione finale. Sulla prima colonna è indicata la distanza dall'origine del sistema.

Per quanto riguarda la pepperpot non è stata eseguita la calibrazione finale poiché l'unica posizione di interesse è quella di azzeramento. L'azzeramento finale della pepperpot si ottiene con 39255 step e l'errore di perpendicolarità rispetto l'interasse di riferimento è pari a 0.106 mm.

Conclusion

Lo studio condotto tramite questo lavoro di tesi ha permesso di testare, ottimizzare e calibrare il sistema della camera slitte in accordo con le precisioni richieste dall'esperimento NUMEN. Con un'attività preliminare di movimentazione è stata verificata l'affidabilità dei collegamenti che consentono la trasmissione del moto tra gli attuatori e le relative slitte. Per alcune slitte non è sorto alcun problema, il loro movimento è risultato lineare, fluido e continuo. Laddove invece si è presentato un'evidente fenomeno di impuntamento, con conseguente interruzione del moto, è stata elaborata una soluzione che ha permesso di raggiungere l'obiettivo, e cioè di ottenere una corretta movimentazione dei componenti. In secondo luogo, è stato condotto un test per la simulazione del funzionamento in alto vuoto al fine di valutare la bontà delle tenute ed escludere la presenza di eventuali perdite o fughe di aria. Il livello di vuoto ottenuto ha confermato un buon isolamento del sistema e quindi le tenute svolgono correttamente la loro funzione con un'ottima resistenza alla bassa pressione. Successivamente, l'ispezione dimensionale e geometrica eseguita tramite una macchina di misura a coordinate ha permesso di verificare la precisione di realizzazione dei componenti principali del sistema. I risultati ottenuti confermano il rispetto delle tolleranze dimensionali e geometriche imposte in fase di progetto su quasi tutti i componenti. Nel caso in cui sono stati rilevati difetti rilevanti, i quali comprometterebbero il corretto funzionamento del sistema, sono state effettuate delle modifiche che hanno permesso di eliminare il problema. Infine, con le prove eseguite per valutare l'effettivo posizionamento delle slitte, sono state ricavate delle curve di calibrazione che confermano il comportamento lineare del sistema di movimentazione, in accordo con le aspettative. Invece, per quanto riguarda la precisione di posizionamento delle slitte, con una prima calibrazione sono stati ottenuti degli errori inaccettabili. Anche in questo caso, è stato rilevato il problema e sono state apportate delle modifiche al sistema. Successivamente, il sistema è stato ritestato e ricalibrato ed è stato accertato che sia in grado di garantire le precisioni richieste dall'esperimento. Il sistema così ottimizzato e modificato sarà spedito nelle prossime settimane presso i Laboratori Nazionali del Sud a Catania e lì sarà installato nell'apparato MAGNEX per l'esperimento NUMEN.

Riferimenti bibliografici

Bibliografia

- [1] Daniela Calvo et al. “Present Outcome from the NUMEN R&D Phase”. In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 1041 (11 ott. 2022), p. 167336. ISSN: 0168-9002. DOI: 10.1016/j.nima.2022.167336. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900222006519> (visitato il 26/04/2023).
- [2] Daniela Calvo et al. “Towards the Integration of the NUMEN Experiment”. In: *Journal of Physics: Conference Series* 2374.1 (nov. 2022), p. 012029. DOI: 10.1088/1742-6596/2374/1/012029. URL: <https://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/2374/1/012029>.
- [3] Francesco Cappuzzello et al. “The NUMEN Project: Nuclear Matrix Elements for Neutrinoless Double Beta Decay”. In: *The European Physical Journal A* 54.5 (8 mag. 2018), p. 72. ISSN: 1434-601X. DOI: 10.1140/epja/i2018-12509-3. URL: <https://doi.org/10.1140/epja/i2018-12509-3> (visitato il 26/04/2023).
- [4] Francesco Cappuzzello et al. “The NUMEN Technical Design Report”. In: *International Journal of Modern Physics A* 36.30 (30 ott. 2021), p. 2130018. ISSN: 0217-751X. DOI: 10.1142/S0217751X21300180. URL: <https://www.worldscientific.com/doi/abs/10.1142/S0217751X21300180> (visitato il 26/04/2023).
- [5] William D. Callister David G. Rethwisch. *Scienza e Ingegneria dei Materiali*. Edises, 2012.
- [15] Diego Sartirana. “Sistemi Automatici per La Movimentazione Di Bersagli per Esperimenti Di Fisica Nucleare”. Tesi di laurea magistrale. Politecnico di Torino, 2019.

Sitografia

- [6] *Kit encoders*. URL: <https://www.posital.com/it/prodotti/kit-encoders/KitEncoder.php>.

- [8] *Nitruro di boro*. URL: https://it.wikipedia.org/wiki/Nitruro_di_boro.
- [9] *PEEK - Polietereeterchetone*. URL: <https://www.ensingerplastics.com/it-it/semilavorati/materiali-ad-alte-prestazioni/peek#>.
- [10] *Polietere etere chetone*. URL: https://it.wikipedia.org/wiki/Polietere_etere_chetone.
- [14] *Prezzo, occorrenza, estrazione e utilizzo del tantalio*. URL: <https://it.institut-seltene-erden.de/seltene-erden-und-metalle/strategische-metalle-2/tantal/>.
- [16] *Tantalum*. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Tantalum>.
- [18] *Wiegand sensors*. URL: <https://www.posital.com/it/prodotti/wiegand-sensors/wiegand-integrated-Sensing-Harvesting.php>.

Cataloghi

- [7] Mclennan, cur. *Packaged Stepper Motor System*. www.mclennan.co.uk.
- [11] POSITAL, cur. *Kit Encoder WHITEPAPER*. www.posital.com.
- [12] POSITAL, cur. *POSITAL DATASHEET KCD-BC03B-XX17-XXXX-XXX*. www.posital.com.
- [13] POSITAL, cur. *Stepper Motor WHITEPAPER*. www.posital.com.
- [17] VACGEN, cur. *LDS Screw Drives*. www.vacgen.com.

Appendice A

Circuito elettrico

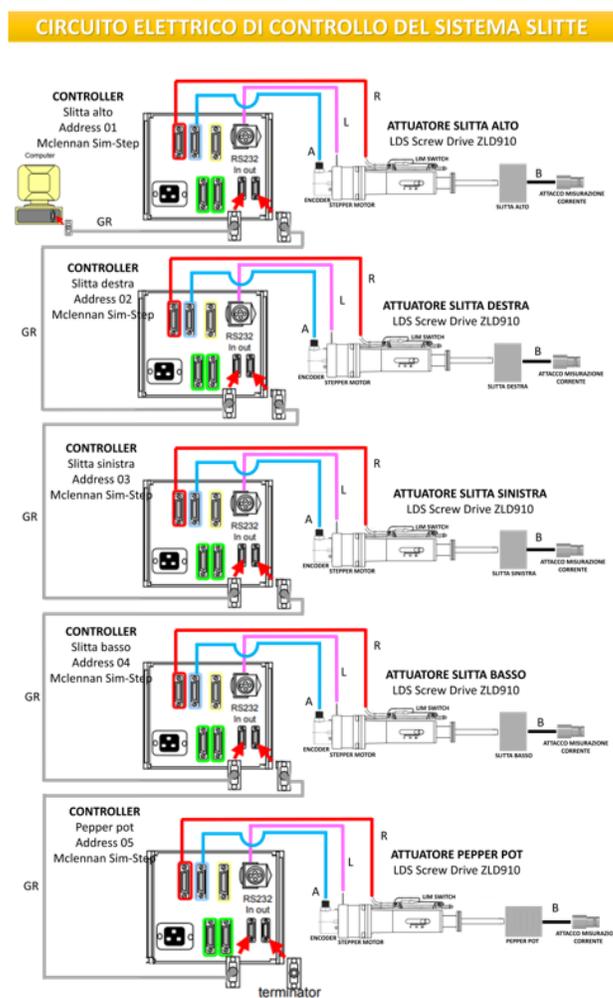


Figura A.1: Il circuito elettrico di controllo del sistema di movimentazione.

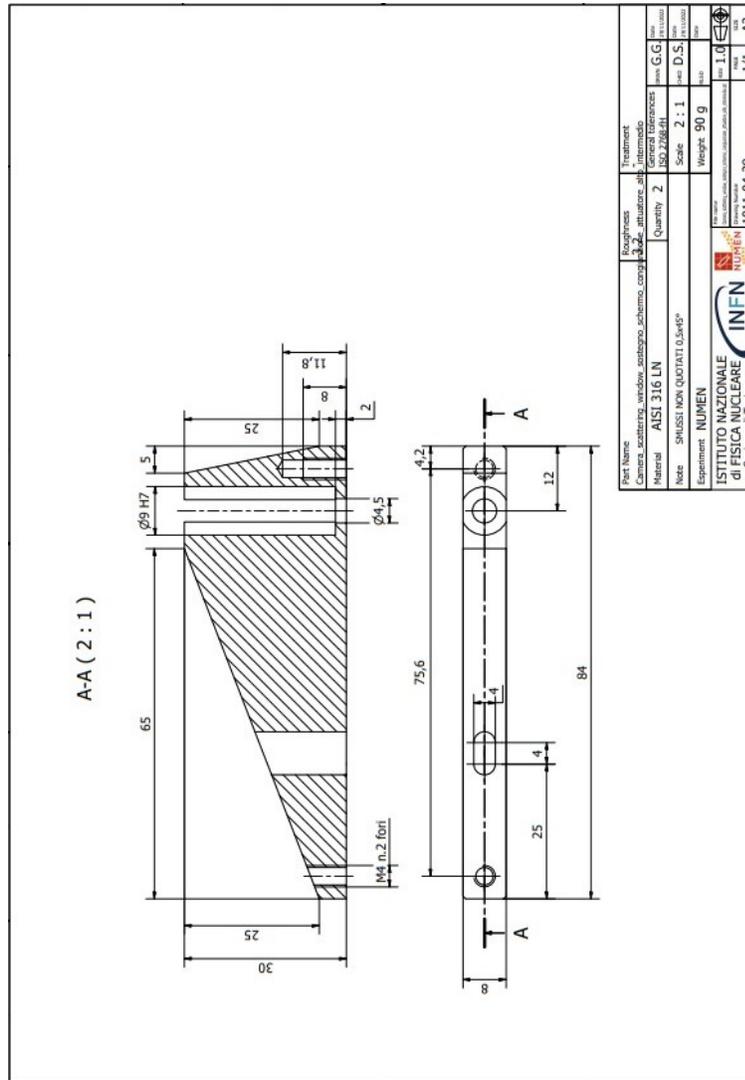


Figura B.2: La messa in tavola dell'adattatore intermedio per la slitta DOWN.

