

POLITECNICO DI TORINO

Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica



*Sviluppo e progettazione della meccanica di supporto
al servizio del nuovo tracker di particelle
dell'Esperimento CSES-LIMADOU-02*

Relatore:

Prof. Carlo Ferraresi

Correlatore:

Ing. Silvia Coli

Candidato:

Simone Garrafa Botta

Matr. S254228

Anno Accademico 2020-2021

Sommario

Estratto	VI
La missione spaziale CSES-LIMADOU-02 e la collaborazione	1
1.1 Esperimento LIMADOU e collaborazione	1
1.2 Satellite CSES-02 e relativa strumentazione.....	2
1.3 Rivelatore HEPD-02 ed elementi costituenti	3
1.4 Tracker	6
1.4.1 Chip ALPIDE.....	6
1.4.2 Flexible Printed Circuit (FPC)	7
1.4.3 Cold Plate (CP).....	9
1.4.4 Blocchetti terminali.....	11
1.4.5 Hibrid Integrated Circuit (HIC)	13
1.4.6 Stave meccanico	16
1.4.7 Stave.....	16
1.4.8 PCB-TSP	16
1.4.9 Torretta	17
1.4.10 Frame esterno.....	18
Tracker: procedura di assemblaggio e definizione delle specifiche	20
2.1 Procedura di assemblaggio	20
2.2 Definizione delle specifiche e dei requisiti richiesti.....	21
Progettazione della meccanica di supporto	25
3.1 Stato dell'arte: materiali utilizzati.....	25
3.2 Stato dell'arte: trattamenti utilizzati	29
3.3 Stato dell'arte: normativa di riferimento	31
3.4 Allineamento dei CHIP	32
3.5 Attrezzatura per il posizionamento della colla sull'FPC	34
3.6 Attrezzatura per l'assemblaggio dell'HIC.....	38
3.7 Box di trasporto/test dell'HIC	39
3.8 Attrezzatura per l'operazione di Wire Bonding.....	41
3.9 Attrezzatura per il taglio di alette/tab.....	42
3.10 Attrezzatura per l'assemblaggio dello STAVE MECCANICO.....	45

3.11	Attrezzatura per l'assemblaggio dello STAVE	49
3.12	Box per storage/testing dello STAVE	53
3.13	Attrezzatura per l'assemblaggio della TORRETTA	54
3.14	Progettazione TSP-box.....	57
3.15	Box di storage/trasporto della TORRETTA.....	60
Programmazione della Macchina di Misura a Coordinate		62
4.1	CMM Mitutoyo: caratteristiche	62
4.2	Programmazione della CMM: Software MCOSMOS.....	63
4.3	Utilizzo della CMM	63
4.4	Esempi di programmi stilati per l'allineamento dei chip.....	64
4.5	Altri programmi stilati.....	68
Costruzione dei prototipi		69
5.1	Controllo qualità e messa a punto dei tools per l'assembly.....	69
5.2	Controllo qualità degli elementi costituenti il TRACKER	70
5.3	Validazione dei prototipi: Sistema dei cursori sul frame.....	72
5.4	Validazione dei prototipi: Caratterizzazione della colla	74
5.5	Risultati ottenuti	77
Conclusione e sviluppi futuri.....		78
Bibliografia.....		79

Indice delle Figure

Figura 1. 1: Schematizzazione del Satellite CSES-02 [3].....	3
Figura 1. 2: Sistema di riferimento assoluto del satellite CSES-02	4
Figura 1. 3: Schema del rivelatore HEPD_02 (layer sensibili alla radiazione).....	5
Figura 1. 4: Schematizzazione del Tracker	6
Figura 1. 5: Chip ALPIDE, dello spessore di 50 µm, posizionati sotto la CMM	7
Figura 1. 6: Stratigrafia del flexible printed circuit (FPC).....	8
Figura 1. 7: Zoom sul centraggio dell'FPC (spina metallica – aletta forata)	8
Figura 1. 8: Layout del flexible printed circuit (FPC)	8
Figura 1. 9: Cold plate in fibra di carbonio, prodotto al CERN EP-DT	9
Figura 1. 10: Stratigrafia del cold plate in fibra di carbonio	9
Figura 1. 11: Diverse tipologie di blocchetti terminali (vista dall'alto).....	12
Figura 1. 12: Diverse tipologie di blocchetti terminali (vista dal basso).....	12
Figura 1. 13: Schematizzazione della struttura gerarchica del DD	13
Figura 1. 14: Nomenclatura dei 10 chip ALPIDE	13
Figura 1. 15: Ridondanza, 3 bond per ogni pad (zoom al microscopio ottico) ...	14
Figura 1. 16: Esempio di PAD DATI (sinistra) e PAD POWER/GND (destra).....	14
Figura 1. 17: Schematizzazione di wire bond per PAD DATI.....	15
Figura 1. 18: Schematizzazione di wire bond per PAD POWER/GND e BIAS.....	15
Figura 1. 19: Rendering della sezione di uno stave completo	16
Figura 1. 20: Stave completo, prodotto all'INFN di Torino	16
Figura 1. 21: Tripletta di stave prodotta presso il laboratorio INFN di Torino ...	17
Figura 1. 22: Rendering della torretta (completa di TSP-box).....	17
Figura 1. 23: Frame esterno con sistema a cursori.....	18
Figura 1. 24: Schematizzazione del sistema a cursori implementato sul frame.	19
Figura 2. 1: Schematizzazione della procedura di assembly del TRACKER	20
Figura 2. 2: Esempio di metrologia sul posizionamento dei chip (scostamenti delle coordinate X e Y dei marker rispetto alle posizioni nominali)	22
Figura 2. 3: Requisiti per lo spazio - Test vibrazionali.....	23
Figura 2. 4: Requisiti per lo spazio - Test termo-vuoto.....	23

Figura 3. 1: Caratteristiche della lega EN AW-6082 (da Catalogo METRA) [11]	.25
Figura 3. 2: Esempio di inserti in teflon (spatola e base di incollaggio)	.....27
Figura 3. 3: ARALDITE 2011 - pistola (sinistra) e miscelazione (destra)	.....27
Figura 3. 4: Focus sugli strati di ARALDITE tra CP-chip e chip-FPC	.....28
Tabella 1: Confronto delle caratteristiche dei tre tipi di anodizzazione	.....30
Figura 3. 5: elementi costituenti il Chip_Alignment_JIG	.....32
Figura 3. 6: Procedura di allineamento dei chip (sotto la CMM)	.....33
Figura 3. 7: Maschera per l'incollaggio dell'FPC sui chip	.....36
Figura 3. 8: Apposizione di colla sull'FPC tramite distributore a siringa	.....37
Figura 3. 9: Procedura di applicazione della colla sull'FPC	.....37
Figura 3. 10: Procedura di assemblaggio dell'HIC	.....38
Figura 3. 11: Box di trasporto/test dell'HIC	.....40
Figura 3. 12: Funzionamento del Box di trasporto/test dell'HIC	.....41
Figura 3. 13: Base per l'operazione di wire bonding	.....41
Figura 3. 14: Procedura di taglio di alette e tab	.....44
Figura 3. 15: Incollaggio delle spine in titanio nel blocchetto terminale	.....45
Figura 3. 16: Apporto dello strato di colla sul CP per l'isolamento elettrico	.....45
Figura 3. 17: Particolare sulle superfici del Gluing_Mold	.....47
Figura 3. 18: Messa a punto dello Stave_Mechanics_Assembly_JIG (inserimento di tape di kapton per assicurare il contatto)	.....47
Figura 3. 19: Procedura di assemblaggio dello stave meccanico	.....48
Figura 3. 20: Focus sullo strato di colla tra CP e blocchetto (sinistra) / Superfici interessate dall' incollaggio con il CP (destra)	.....48
Figura 3. 21: Maschera 1 per l'incollaggio dell'HIC sullo stave meccanico	.....50
Figura 3. 22: Maschera 1 per l'incollaggio dell'HIC sullo stave meccanico	.....51
Figura 3. 23: Posizionamento della colla sullo stave meccanico	.....51
Figura 3. 24: Procedura di assemblaggio dello stave	.....52
Figura 3. 25: Stave posizionato sulla base metallica del Box di storage	.....53
Figura 3. 26: Operazione di storage dello stave nell'apposito box	.....54
Figura 3. 27: Stave holder realizzato in officina	.....56
Figura 3. 28: Procedura di assemblaggio della torretta (senza TSP-box)	.....57
Figura 3. 29: Procedura di assemblaggio del TSP-box	.....59

Figura 3. 30: Schema di funzionamento del box di trasporto della torretta	61
Figura 4. 1: Mitutoyo CMM CRT AS 9206 (sinistra) e QVP (destra)	62
Figura 4. 2: Software "Offline MCOSMOS" (sinistra) e Joystick (destra)	63
Figura 4. 3: Fori A e B utilizzati per la realizzazione del sistema di riferimento .	64
Figura 4. 4: Chip allineati sotto CMM (immagine catturata tramite QVP)	65
Figura 4. 5: Banco di lavoro per l'operazione di allineamento dei chip	69
Figura 5. 1: Base che simula il sistema di cursori implementato sul frame.....	72
Figura 5. 2: Ciclo del test termico per la validazione del sistema a cursori.....	72
Figura 5. 3: Misurazioni dopo il ciclo termico (con e senza cursori).....	73
Figura 5. 4: Preparazione dei campioni per la caratterizzazione della colla.....	74
Figura 5. 5: Campione finale su cui effettuare la prova di strappo	75
Figura 5. 6: Camera climatica per cicli termici e setup per strappo striscia	75

Estratto

Il progetto CSES (*China Seismo-Electromagnetic Satellite*) è una missione spaziale volta allo studio delle possibili correlazioni, temporali e spaziali, tra le emissioni elettromagnetiche indotte dall'attività sismica e dalle eruzioni vulcaniche ed il verificarsi di perturbazioni nella ionosfera superiore e nei flussi di particelle intrappolate delle fasce di Van Allen. Le missioni CSES fanno parte di un programma di collaborazione tra la *China National Space Administration* (CNSA) e l'Agenzia Spaziale Italiana (ASI), sviluppato dalla *China Earthquake Administration* (CEA) e dall'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN), insieme a diverse università e istituti di ricerca cinesi e italiani. Due missioni, CSES-01, attualmente in orbita, e CSES-02, in fase di implementazione avanzata, costituiscono la prima fase del programma. Il satellite CSES-02 è dotato di dieci strumenti, tra i quali il rivelatore di particelle ad alta energia (HEPD) e il rivelatore di campo elettrico (EFD) che rappresentano il contributo italiano del progetto LIMADOU. Il lancio è previsto per il 2022 e la durata prevista è di sei anni.

All'interno di HEPD è collocato un rivelatore di direzione, denominato "*tracker*", composto da cinque moduli di tracciamento autonomi, chiamati "*torrette*", formati a loro volta da tre piani sensibili sovrapposti, gli "*stave*". Il funzionamento del *tracker*, progettato per misurare la direzione e l'energia dei flussi di elettroni e protoni intrappolati nella magnetosfera terrestre, si basa sull'utilizzo degli innovativi sensori a pixel monolitici ALPIDE. Il contributo dell'INFN di Torino consiste nella progettazione degli *stave* e nella costruzione delle relative torrette.

Il lavoro qui presentato, partendo dall'esigenza di adattare la tecnologia ALPIDE per l'utilizzo in ambito spaziale, comincia con la progettazione di una particolare struttura di supporto per i chip: trattasi di un *Cold Plate* in fibra di carbonio, ad alto modulo elastico ed elevata conducibilità termica, in grado di resistere a forti sollecitazioni vibrazionali e dissipare il calore generato dai chip. Segue la progettazione meccanica delle attrezzature utilizzate nelle fasi di assemblaggio del *tracker*, tenendo conto delle specifiche di progetto e dei requisiti molto stringenti (in termini di scelta dei materiali, elevate precisioni di posizionamento, alta resistenza alle vibrazioni e spazi limitati) che l'oggetto finale deve rispettare. Le attrezzature realizzate sono state messe a punto e controllate attraverso ispezioni ottiche e controllo qualità effettuati tramite CMM. Parallelamente a questo, tramite la programmazione della macchina di misura, sono stati stilati programmi atti a guidare l'operatore durante operazioni ad elevata precisione, effettuare controllo qualità e misurazioni per successive analisi dati.

La tesi si articola sostanzialmente in sei capitoli: i Capitoli 1 e 2, prettamente teorici, sono inerenti rispettivamente ad informazioni generali sulla missione spaziale e alla procedura di assemblaggio del *tracker*. I Capitoli 3, 4 e 5 si focalizzano sul lavoro svolto presso l'INFN di Torino e riguardano, in ordine, la progettazione del supporto meccanico e delle attrezzature per le fasi di assemblaggio, la programmazione della macchina di misura e la costruzione dei prototipi con relativo controllo qualità e validazione. Per concludere, il Capitolo 6 riassume i risultati conseguiti dall'attività descritta in questa tesi e presenta i possibili sviluppi futuri.

Capitolo 1

La missione spaziale CSES-LIMADOU-02 e la collaborazione

Introduzione

Questo primo capitolo tratta, in maniera riassuntiva, la missione cui questa tesi fa riferimento. Nella prima Sezione si pone l'attenzione sugli obiettivi della missione spaziale e sulla collaborazione italo-cinese responsabile del progetto. Seguirà una breve esposizione del satellite CSES-02 (*China Seismo-Electromagnetic Satellite*) che avrà il ruolo di ospitare tutta la strumentazione scientifica.

Successivamente, sarà trattato il rivelatore di particelle HEPD-02 (*High Energetic Particle Detector*), uno degli strumenti più importanti a bordo del satellite e l'unico di realizzazione esclusivamente italiana. A seguire, verrà descritto il *Direction Detector*, denominato Tracker, uno dei componenti del rivelatore HEPD-02 e vero protagonista di questa tesi, la cui realizzazione e validazione risultano essere il contributo e l'obiettivo ultimo dell'INFN di Torino. In particolare, saranno presentati ed approfonditi i vari componenti che compongono il Tracker.

1.1 Esperimento LIMADOU e collaborazione

Il progetto CSES-LIMADOU è una missione spaziale volta allo studio delle possibili correlazioni tra eventi sismici e perturbazioni delle fasce di Van Allen nella magnetosfera. Collocato sul satellite cinese CSES (*China Seismo-Electromagnetic Satellite*), l'esperimento compirà osservazioni e misure con l'obiettivo di studiare la variabilità dell'ambiente elettromagnetico attorno alla Terra (come i campi e le onde elettromagnetiche, le anomalie ionosferiche o la precipitazione di particelle energetiche dalle fasce di Van Allen) e sviluppare nuovi metodi per il monitoraggio di fenomeni geofisici su grande scala, come ad esempio i terremoti.

Più in generale, la missione indagherà sulla struttura e la dinamica della ionosfera, sui meccanismi di accoppiamento con gli strati inferiori e superiori di plasma e sulle variazioni temporali del campo geomagnetico terrestre in condizioni di quiete e disturbo. Inoltre, i dati raccolti dalla missione consentiranno di studiare le interazioni Terra-Sole ed i fenomeni solari, in particolare le *Coronal Mass Ejections* (CME), i brillamenti solari e la modulazione solare dei raggi cosmici.

La missione è frutto di un programma di cooperazione tra la *China National Space Administration* (CNSA) e l'Agenzia Spaziale Italiana (ASI), sviluppato dalla *China Earthquake Administration* (CEA) e dall'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN), insieme a diverse Università ed Istituti di ricerca cinesi e italiani [1] [2].

L'Italia partecipa alla missione CSES con il Progetto LIMADOU, finanziato da ASI e INFN, attraverso una collaborazione che comprende diverse divisioni INFN (Bologna, Napoli, Roma Tor Vergata, Torino), il Centro INFN TIFPA di Trento, i Laboratori INFN di Frascati, le Università di Bologna, Roma Tor Vergata, Torino, Trento, Uninettuno, INAF-IAPS (Istituto di Astrofisica Spaziale e Planetologia), INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia) e CNR-IFAC [2].

Il nome del progetto deriva dal nome cinese del gesuita ed esploratore Matteo Ricci che ha avuto grande importanza nella conoscenza della cultura occidentale nella Cina del XVI secolo (il suo nome in lingua mandarina era Lì Mǎdòu) [1].

Due missioni spaziali, CSES-01, attualmente in orbita, e CSES-02, in fase di implementazione avanzata, costituiscono la prima fase del programma.

La costruzione del satellite CSES-01, che include nove strumenti per la rilevazione nell'alta ionosfera di variazioni di campo elettrico, campo magnetico, parametri di plasma e di fluttuazioni del flusso di particelle delle fasce di Van Allen, si è conclusa nel 2017. Tra gli strumenti a bordo del satellite si trova l'*High Energy Particle Detector* italiano (HEPD-01). Il lancio è stato effettuato il 2 febbraio 2018 per una missione della durata prevista di 5 anni. È stata pianificata una nuova missione di un secondo satellite, CSES-02, gemello del primo che sarà messo nei prossimi anni sulla stessa orbita con una strumentazione sostanzialmente analoga: CSES-02 è in fase di implementazione avanzata e sarà dotato di dieci strumenti, tra i quali il rivelatore di particelle ad alta energia italiano (HEPD-02) e il rivelatore di campo elettrico (EFD), che rappresentano il contributo italiano di LIMADOU. Il lancio è previsto per marzo 2022 e la durata prevista è di 6 anni.

Lo scopo di questa seconda missione è quello di osservare con due satelliti, CSES-01 e CSES-02, che passano sulle medesime zone della Terra a distanza di pochi minuti l'uno dall'altro, l'evoluzione nel tempo di disturbi e processi legati all'attività sismica che possano essere identificati come precursori sismici.

1.2 Satellite CSES-02 e relativa strumentazione

Il satellite CSES-02 si basa sulla piattaforma cinese CAST2000, dotata di sistemi di stabilizzazione per tutti e tre gli assi. Ha una massa di circa 900 kg e un consumo di energia di picco pari a 900 W [2]. Il satellite verrà posizionato su un'orbita circolare di 98°, sincrona al sole (sorvolerà ogni punto sempre all'incirca alla stessa ora solare locale), ad un'altitudine di circa 500 km e con un periodo di circa 94 minuti, in modo tale che esegua poco più di 15 orbite al giorno. La stessa orbita si ripete ogni cinque giorni. CSES-02 si sposterà sullo stesso piano orbitale di CSES-01, con uno sfasamento di 180° rispetto al primo satellite, al fine di ottimizzare i tempi tra due passaggi sullo stesso sito e ridurre la risoluzione temporale. I dati saranno trasmessi in banda X a 120 Mbps.

Il carico utile a bordo, il *payload*, è costituito da una serie di strumenti scientifici quali: un rivelatore di particelle ad alta energia (HEPD-02) e uno spettrometro elettronico a bassa energia per misurare il flusso di particelle e lo spettro di energia, un magnetometro a bobina di ricerca (SCM) e un magnetometro ad alta

precisione (HPM) per misurare i componenti e l'intensità totale del campo magnetico, un rivelatore di campo elettrico (EFD) per misurare il campo elettrico, un analizzatore di plasma e una sonda di Langmuir per misurare il disturbo del plasma in ionosfera, un ricevitore di occultamento GNSS e un faro Tri-Band per misurare la densità degli elettroni ed infine un fotometro ionosferico [2]. Oltre a queste strumentazioni, il satellite è equipaggiato con una serie di unità di controllo termico e di pre-processamento di dati a bordo, oltre che di telemetria e di memoria dati (di circa 160 Gbit). Inoltre, è previsto un sistema di propulsione per il mantenimento dell'orbita, composto da quattro propulsori. Le unità di alimentazione presenti sono fornite da batterie a ioni di Litio e da pannelli solari fotovoltaici e devono erogare una potenza di circa 330 W per il funzionamento dell'intera piattaforma e del payload.

Tutti gli strumenti funzioneranno lungo l'intera orbita. Ogni payload raccoglierà i dati in due modalità operative: "*burst mode*" e "*survey mode*". La modalità *burst* viene attivata quando il satellite attraversa l'intero territorio cinese e le regioni con le attività sismiche più forti al mondo, mentre in tutte le altre aree verrà utilizzata la modalità di rilevamento *survey*.

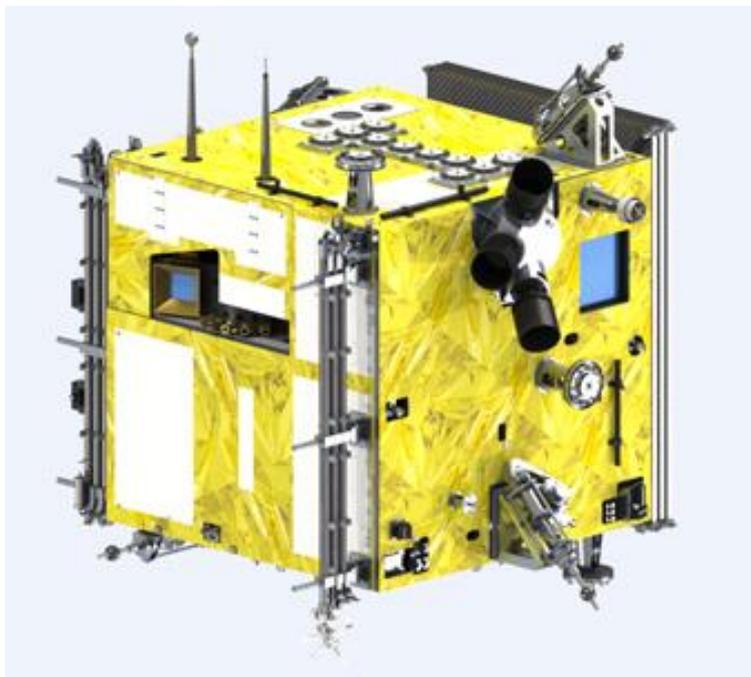


Figura 1. 1: Schematizzazione del Satellite CSES-02 [3]

1.3 Rivelatore HEPD-02 ed elementi costituenti

Uno degli strumenti di punta a bordo della missione satellitare CSES-02, è il rivelatore di particelle HEPD-02 (*High Energy Particle Detector*), realizzato dai ricercatori italiani della "Collaborazione LIMADOU".

Il rivelatore HEPD-02, attraverso osservazioni congiunte e coordinate con gli altri strumenti a bordo del satellite, consentirà di studiare i meccanismi che collegano i processi interni del nostro pianeta con la dinamica delle regioni di particelle

cariche (chiamate fasce di Van Allen) che circondano la Terra, con l'obiettivo di individuare e sviluppare nuove tecniche per il monitoraggio sismico dallo spazio.

Vi sono alcune deboli indicazioni che alcuni terremoti possano essere preceduti da perturbazioni nella ionosfera terrestre. Tali perturbazioni potrebbero, in linea di principio, essere osservate per mezzo di variazioni dei campi elettrici ionosferici oppure attraverso variazioni del flusso di particelle di alta energia.

Il rivelatore di particelle HEPD-02 ha lo scopo di identificare il tipo di particella incidente (protone o elettrone) e fornire una misura della direzione e del verso di provenienza, in modo da poter stabilire l'angolo tra la sua traiettoria ed il campo magnetico terrestre (il *pitch angle*) e di rivelarne l'energia.

L'obiettivo è quello di correlare le particelle misurate con quelle presenti nelle fasce di Van Allen e quindi di determinare con la massima accuratezza la regione magnetosferica di provenienza, ottenendo dunque lo spettro energetico e la composizione delle particelle delle fasce che precipitano improvvisamente nell'atmosfera (fenomeno denominato "*Particle burst*").

Il rivelatore di particelle utilizzato in questa missione spaziale è progettato per fornire una buona risoluzione di energia ed angolo di beccheggio per gli elettroni in un intervallo energetico compreso tra 3 MeV e 100 MeV e per i protoni tra 30 MeV e 200 MeV. Ha un peso di circa 38 kg (inclusa l'elettronica), necessita di una potenza di 45 W e garantisce la sua operatività tra -10°C e $+45^{\circ}\text{C}$. Nel corso della descrizione del rivelatore, verrà inteso come asse Z quello che durante la fase di funzionamento della missione punterà verso il centro della Terra e quindi parallelo alla linea di campo geomagnetico, come asse X quello che una volta in fase di volo sarà diretto come il vettore velocità del satellite, e come asse Y quello perpendicolare ad entrambi gli altri assi.

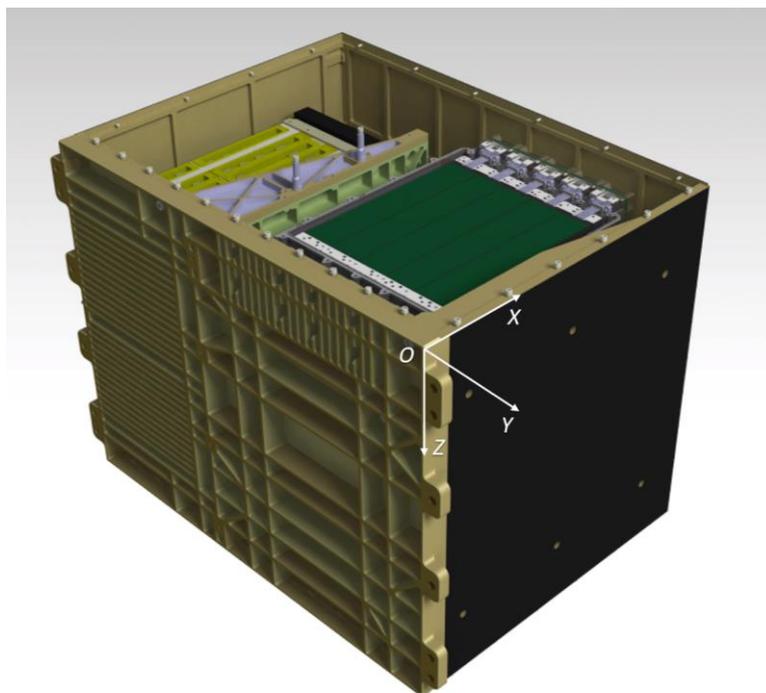


Figura 1. 2: Sistema di riferimento assoluto del satellite CSES-02

Il rivelatore HEPD-02 è organizzato in vari layer sensibili alla radiazione:

- Un primo piano di scintillatori TR1 (*First Trigger Plane*), di dimensioni complessive $200 \times 180 \times 2 \text{ mm}^3$ e composto da cinque barre;
- un rivelatore di direzione DD (*Direction Detector*), chiamato "Tracker" e basato su cinque moduli di tracciamento autonomi, denominate "torrette", ciascuna composta da tre piani sensibili, gli "stave";
- un secondo piano di scintillatori TR2 di dimensioni complessive pari a $150 \times 150 \times 8 \text{ mm}^3$ e composto da quattro barre;
- un calorimetro ED (*Energy Detector*) composto da:
 - 3 piani da 4 scintillatori in plastica ($150 \times 150 \times 12,7 \text{ mm}^3$)
 - 2 piani da 3 scintillatori inorganici LYSO ($150 \times 150 \times 50 \text{ mm}^3$)
- Un sistema di VETO: trattasi di uno scintillatore plastico che circonda il calorimetro, composto da cinque piani scintillatori da 8 mm di spessore (4 piani laterali, non visibili nella *Figura 1. 3*: Schema del rivelatore HEPD_02 (layer sensibili alla radiazione), ed un piano inferiore).

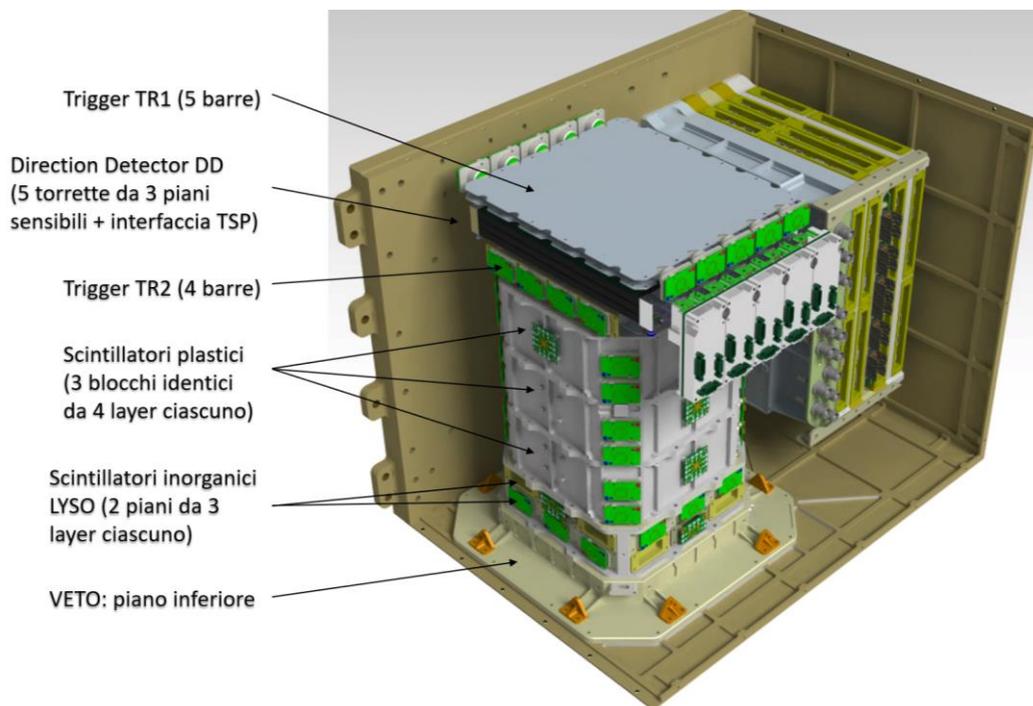


Figura 1. 3: Schema del rivelatore HEPD_02 (layer sensibili alla radiazione)

1.4 Tracker

Il tracker è costituito da cinque torrette, ciascuna composta da tre stave impilate ed una PCB-TSP di interfaccia con l'esterno. Ogni stave include un circuito integrato ibrido (HIC) incollato ad un cold plate (CP) in fibra di carbonio e due diversi blocchi terminali in alluminio, uno anteriore e l'altro posteriore. L'elemento costitutivo fondamentale del tracker, l'HIC, consiste in 10 chip ALPIDE di cinquanta micron di spessore, distribuiti in 2 file da 5 chip ciascuna e collegati ad un comune circuito stampato flessibile (FPC) tramite colla e fili di fissaggio.



Figura 1. 4: Schematizzazione del Tracker

1.4.1 Chip ALPIDE

Per la costruzione del nuovo tracker di particelle per l'esperimento LIMADOU sono stati proposti dei rivelatori a pixel monolitici, fabbricati con tecnologia CMOS, risultati estremamente interessanti come tracciatori di particelle in esperimenti a collider. Trattasi dei rivelatori ALPIDE (Alice Pixel DEtector), progettati al CERN per l'upgrade dell'*Inner Tracker System (ITS)* dell'esperimento ALICE.

I rivelatori di tipo MAPS (*Monolithic Active Pixel Sensors*) sono delle matrici di cristalli di silicio sulla cui superficie è integrato un circuito di *read out*. Questi cristalli sono chiamati pixel. Quando una particella carica attraversa un pixel, genera un segnale elettrico, il quale viene letto da un circuito di lettura, integrato sulla superficie del pixel stesso. Infatti, una caratteristica peculiare dei rivelatori MAPS sta nel fatto che la circuiteria di lettura è integrata sul rivelatore stesso (inclusa la soppressione dello zero), il che porta i vantaggi di aumentare la granularità ed evitare l'elettronica di lettura. La rivelazione avviene tramite raccolta di elettroni liberati dalla ionizzazione, in quanto una particella carica che attraversa il rivelatore perde energia per ionizzazione [4] [5].

I chip sono incaricati di fornire la direzione di provenienza e l'angolo di incidenza delle particelle rivelate ed inoltre, grazie al loro spessore particolarmente sottile, hanno un ruolo importante nella discriminazione del tipo di particella.

I chip in silicio hanno una dimensione pari a $15 \times 30 \text{ mm}$ ed uno spessore di 50 micron. Ogni chip contiene 1024×512 pixel quadrati di lato pari a $28 \mu\text{m}$.

Inoltre, i rivelatori sono dotati di *marker*: incisioni micrometriche a forma di croce posizionate in modo molto preciso nei quattro angoli del chip ed utilizzate come riferimenti durante le fasi di posizionamento eseguite sotto la CMM.

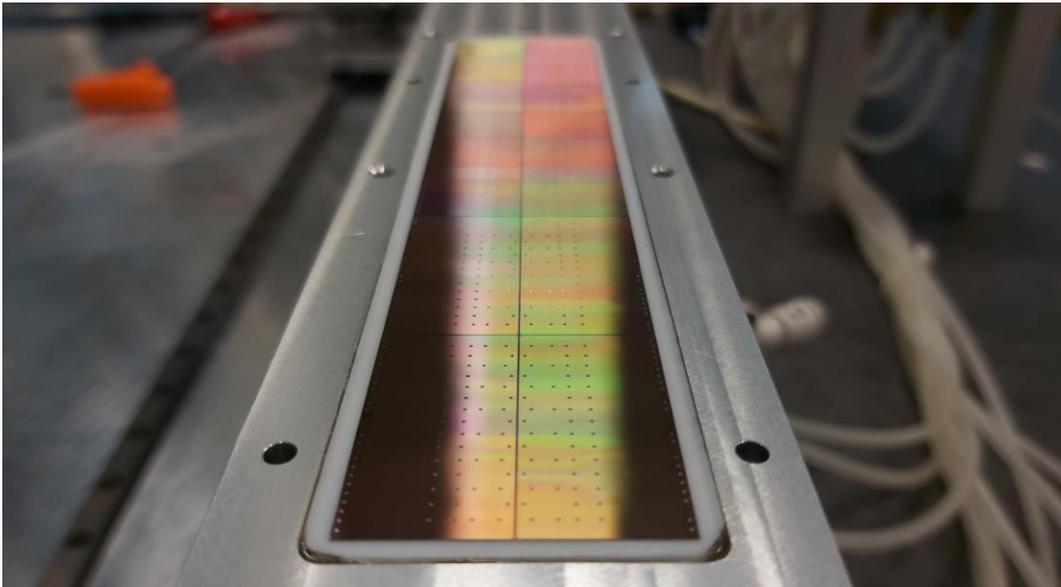


Figura 1. 5: Chip ALPIDE, dello spessore di $50 \mu\text{m}$, posizionati sotto la CMM

1.4.2 Flexible Printed Circuit (FPC)

I circuiti stampati flessibili, realizzati con tecnologia fotolitografica, permettono l'assemblaggio di circuiti elettronici mediante il montaggio di dispositivi elettronici su substrati di plastica flessibile come poliammide, PEEK o pellicola trasparente poliestere conduttiva. I circuiti flessibili sono spesso utilizzati come connettori in varie applicazioni in cui flessibilità, spessore della scheda, risparmio di spazio o vincoli di produzione limitano la manutenzione dei circuiti rigidi o del cablaggio manuale (vengono spesso utilizzati come collegamenti elettrici tra sottoinsiemi per sostituire cablaggi più pesanti ed ingombranti) [6].

Per quanto riguarda l'FPC utilizzato all'interno dell'esperimento LIMADOU, si tratta di un circuito stampato flessibile a doppia faccia, che ha la funzione di fornire ai chip in silicio l'alimentazione ed il collegamento alle linee dei dati. Il layout dell'FPC è stato progettato in modo tale da soddisfare le rigorose specifiche richieste dalle condizioni sperimentali. In particolare, la necessità di minimizzare il materiale, vincola fortemente lo spessore dei materiali da utilizzare per la realizzazione del circuito flessibile. La soluzione scelta prevede uno strato di poliammide, in particolare Pyralux Dupont, dello spessore di 75 micron, con dei circuiti integrati in fili di rame (2 layer dello spessore di 18 micron).

Il circuito è rivestito su entrambe le facce da un sottile strato di polimero simile a una lacca, denominato *solder mask*, che viene applicato alle lamine di rame per la protezione dall'ossidazione e per impedire la formazione di ponti di saldatura tra due pad di saldatura ravvicinati. Nel caso in questione, l'FPC è rivestito da due strati di *solder mask* dello spessore di 30 micron.

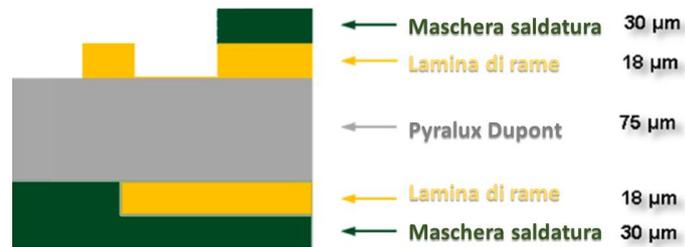


Figura 1. 6: Stratigrafia del flexible printed circuit (FPC)

Il circuito flessibile è provvisto di alette laterali forate, denominate *wings*, utilizzate nelle fasi iniziali della procedura di assemblaggio, per il corretto posizionamento e la movimentazione dell'FPC tramite apposito manipolatore.



Figura 1. 7: Zoom sul centraggio dell'FPC (spina metallica – aletta forata)

Presenta anche un *tab*, prolungamento del corpo centrale del circuito, provvisto di componente elettronica per l'accoppiamento con la strumentazione di testing (sono presenti 15 pad su cui saldare i 15 fili di connessione con l'esterno).

Inoltre, sulla parte superiore, il circuito stampato è equipaggiato di una serie di componenti a montaggio superficiale (condensatori, resistenze) e di 3 connettori.

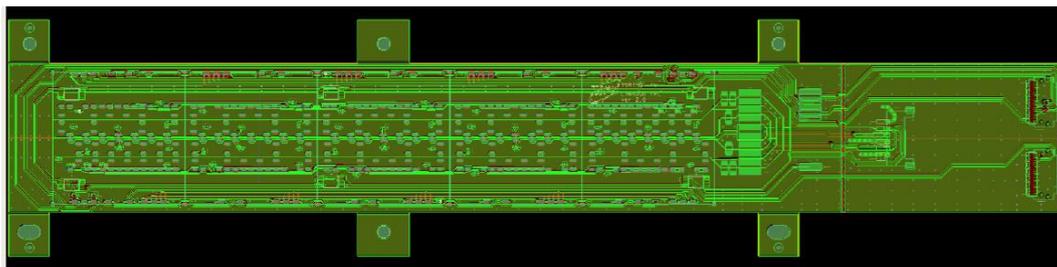


Figura 1. 8: Layout del flexible printed circuit (FPC)

1.4.3 Cold Plate (CP)

La fibra di carbonio è un materiale avente una struttura filiforme, molto sottile, realizzato in carbonio ed utilizzato in genere nella realizzazione di una grande varietà di "materiali compositi". Questi ultimi, sono così chiamati in quanto costituiti da due materiali, le fibre di carbonio e una cosiddetta matrice, in genere di resina (ma può essere in altro materiale plastico o in metallo), le cui funzioni sono quelle di tenere in posa le fibre resistenti affinché mantengano la corretta orientazione nell'assorbire gli sforzi, di proteggere le fibre ed infine quella di mantenere la forma del manufatto composito. Per la realizzazione di strutture in composito, le fibre di carbonio vengono dapprima intrecciate in veri e propri panni in tessuto di carbonio e, una volta messi in posa, vengono immersi nella matrice.

Tra le caratteristiche della fibra di carbonio spiccano l'elevata resistenza meccanica, la bassa densità, la capacità di isolamento termico, la resistenza alle variazioni di temperatura e all'effetto di agenti chimici, buone proprietà ignifughe. Di contro, il materiale risulta non omogeneo e presenta spesso una spiccata anisotropia (le caratteristiche meccaniche hanno una direzione privilegiata) [7].

Il *Cold Plate*, supporto meccanico in fibra di carbonio su cui viene incollato l'HIC, ha una forma a C, dimensioni pari a $34.6 \times 196 \times 7 \text{ mm}$ ed è costituito da:

- un corpo centrale, parte piatta dello spessore di $400 \mu\text{m}$ e formato da tre strati (*plies*) di fibra di carbonio, con orientamento $90^\circ - 0^\circ - 90^\circ$;
- due nervature laterali (denominate *ribs*) formate da 15 strati di fibra di carbonio (posti verticalmente e orientati a 0°) che aumentano la rigidità.

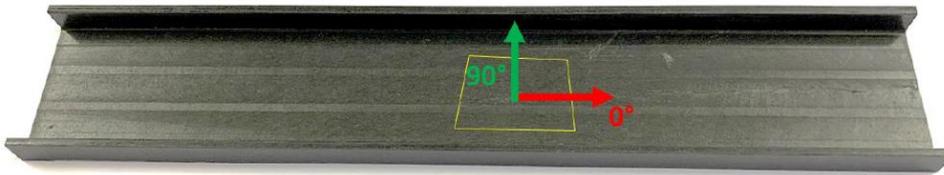


Figura 1. 9: Cold plate in fibra di carbonio, prodotto al CERN EP-DT

Sia il corpo centrale che le alette sono rivestiti da uno strato di *carbon fleece* spesso 20 micron, che funge da involucro e migliora le proprietà meccaniche.

ACTUAL STRATIGRAPHY FLAT PART			
Ply	Material/Sub-Laminate	Thickness (mm)	Orientation (Deg)
Fleece		0.02	
K13D2U_EX1515_67-...		0.120	90
K13D2U_EX1515_67-...		0.120	0
K13D2U_EX1515_67-...		0.120	90
Fleece		0.02	
TOTAL		0.4	

ACTUAL STRATIGRAPHY LATERAL RIB			
Ply	Material/Sub-Laminate	Thickness (mm)	Orientation (Deg)
Fleece		0.02	
K13D2U_EX1515_67-...		0.120	0
Fleece		0.02	
TOTAL		1.85	

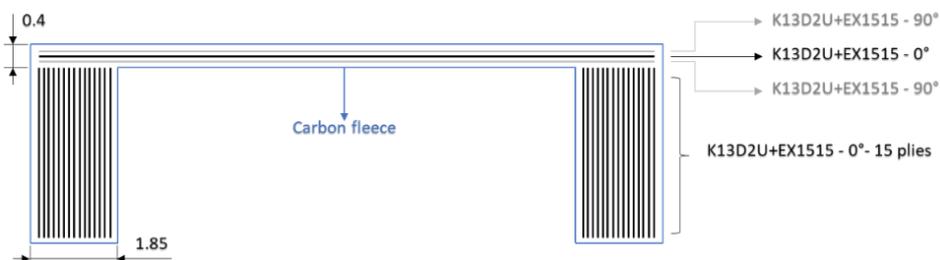


Figura 1. 10: Stratigrafia del cold plate in fibra di carbonio

La produzione del *cold plate* si basa su un uso non convenzionale di materiale di carbonio, progettato ad hoc per applicazioni su HEPD-02 in cui elevata conduttività termica, elevata rigidità e basso budget di materiale sono i requisiti che guidano il progetto. Per questo motivo, mentre il componente e lo stampo per produzione sono stati progettati presso l'INFN di Torino, le fasi di produzione e caratterizzazione dei CP sono state gestite dal gruppo CERN EP-DT, che vanta una lunga esperienza nella produzione in serie di strutture in fibra di carbonio, esperienza maturata nel corso di vari esperimenti nell'ambito della fisica nucleare.

Dopo le varie operazioni di riempimento, stampa, polimerizzazione in camera climatica, pulizia finale e taglio alle dimensioni nominali, vengono effettuati i test di *Quality Assurance (QA)*: ogni *cold plate* viene sistematicamente misurato.

In particolare, grazie all'utilizzo di una macchina di misura munita di sonda ottica, calibri e tavola di livellamento, viene verificata la planarità della zona piatta sulla quale verrà successivamente incollato l'HIC. Infatti, in fase di progettazione, è stato imposto sulla superficie piatta del CP un vincolo di planarità pari a 0.1 mm.

L'esigenza di rispettare tale tolleranza geometrica deriva soprattutto dalla fragilità dei rivelatori in silicio che, durante l'operazione di incollaggio sul CP, potrebbero flettersi e spezzarsi a causa della disuniformità della superficie sottostante. Inoltre, una non perfetta planarità della superficie sensibile potrebbe compromettere la fisica dell'esperimento, e dunque i dati acquisiti.

Per la realizzazione del *cold plate*, sono stati utilizzati i seguenti materiali:

- Prepreg unidirezionale al carbonio: R-EX₁₅₁₅/K₁₃D₂U₂K. Trattasi di fogli di preimpregnato in fibra di carbonio che contengono fibre tutte allineate in una direzione. Presenta le seguenti caratteristiche:
 - Diametro del filamento = 11 μm;
 - Numero di filamenti per filo di carbonio = 2000;
 - FAW (*Fiber Areal Weight*) pari a 120 g/m²;
 - Resina: estere cianato EX1515 (contenuto di resina pari al 33%).
- Carbon Fleece: foglio di fibre di carbonio a filo continuo, rifinito con un legante chimico per mantenere le fibre in posizione.
 - Diametro del filamento = 5 μm;
 - Spessore pari a 20 μm;
 - FAW = 8 g/m².

Il prepreg è un semilavorato che si ottiene facendo scorrere un nastro di carbonio (formato da fili di carbonio che vengono appiattiti e affiancati) in una macchina impregnatrice che fa penetrare la resina epossidica. L'utilizzo del prepreg unidirezionale consente di applicare le fibre in varie direzioni in modo da massimizzarne l'efficienza strutturale. Segue il processo di polimerizzazione, che incrementa ulteriormente la qualità e le caratteristiche meccaniche del manufatto in quanto compatta il materiale ed evita possibili zone di vuoto.

I *cold plate* prodotti vengono forniti con certificato di conformità, scheda dati di sicurezza, scheda tecnica e registro degli articoli a vita limitata.

1.4.4 Blocchetti terminali

I blocchetti terminali sono dei componenti in alluminio, incollati alle estremità del CP, che fungono da interfaccia tra lo stave e le attrezzature di supporto alle varie fasi di assemblaggio del tracker. Dotati di una geometria molto complessa, i blocchetti sono stati progettati rispettando il principio di minimizzazione del materiale (trattandosi di oggetti in alluminio, sono i componenti più pesanti che compongono lo stave) ed inoltre sono provvisti di diversi fori per il calettamento e l'avvitamento rispettivamente di spine e viti in titanio. Inoltre, durante la progettazione di tali componenti, la geometria è stata influenzata dal cablaggio tra FPC e TSP: nella superficie superiore del blocchetto anteriore è stata dimensionata un'apposita tasca per il passaggio e l'incollaggio dei fili saldati sui 15 pad dell'FPC. Le caratteristiche principali sono elencate di seguito:

- Materiale: Alluminio AW EN6082 T651 con anodizzazione a pori aperti, in conformità alla norma EN 9100 per la qualità nei settori spazio e difesa; la tipologia di anodizzazione adottata permette un incollaggio efficiente tra blocchetti e *cold plate* (avendo dei pori aperti sulla superficie utile di incollaggio del blocchetto, la colla aderisce meglio) ed inoltre elimina la conducibilità elettrica tra i due componenti.
- I blocchetti anteriori, gli "*endblocks front*", e quelli posteriori, i "*rear*", sono diversi. Inoltre, i blocchetti dello stave superiore, denominati "*top*", sono diversi dai blocchetti degli altri due sottostanti: dunque, all'interno di una singola torretta, ci sono quattro tipi diversi di blocchetti, come schematizzato nella figura successiva.
- Nei blocchetti dello stave superiore sono inseriti degli inserti Heli-coil M3x1.5d Tangless, in bronzo fosforoso e con funzione di antisvitamento, che garantiscono la longevità delle filettature. Da normativa, gli Heli-coil non possono essere utilizzati per più di tre volte, per non deteriorare la mollettina responsabile del lock. La torretta è provvista di 4 viti in titanio per l'accoppiamento dei tre stave, ed altre 4 viti per il fissaggio della torretta al frame esterno; tali collegamenti filettati risultano passanti attraverso i blocchetti dei due stave inferiori e avvitati a quello superiore.
- Altra differenza tra blocchetti *top* e gli altri, consiste nel fatto che questi ultimi dispongono di lamature in specifici fori, sia sulla parte superiore che inferiore: superiormente, le lamature fungono da tasche per l'inserimento di rondelle dentellate (DIN 6798 A) che migliorano il contatto elettrico e la relativa messa a terra dei blocchetti sovrapposti; inferiormente, le lamature sono state dimensionate per l'alloggiamento delle teste cilindriche delle 4 viti in titanio TCEI M3x20 per il fissaggio della tripletta.

Le lamature per l'allocazione delle rondelle dentellate in bronzo fosforoso, sono profonde 0.8 mm mentre le rondelle hanno uno spessore di 1.2 mm. Di conseguenza, una volta impilati i tre stave, interposte le rondelle ed accoppiato il tutto tramite collegamenti filettati, le rondelle dentellate penetrano di 0,2 mm per parte (superiormente ed inferiormente) nell'alluminio dei blocchetti impilati.

Questa procedura migliora la conducibilità elettrica tra blocchetti adiacenti. Per quanto riguarda la messa a terra della tripletta dei blocchetti anteriori, è necessario collegare uno dei tre terminali con il frame sottostante, per mezzo di un cavo elettrico allocato ed incollato all'interno di un apposito foro previsto in sede di progetto sui blocchetti (foro laterale visibile nelle figure sottostanti).

Invece, posteriormente, la messa a terra è garantita per mezzo di rondelle dentellate, interposte tra il blocchetto inferiore della torretta ed il frame e posizionate in apposite tasche previste sulla cornice metallica.

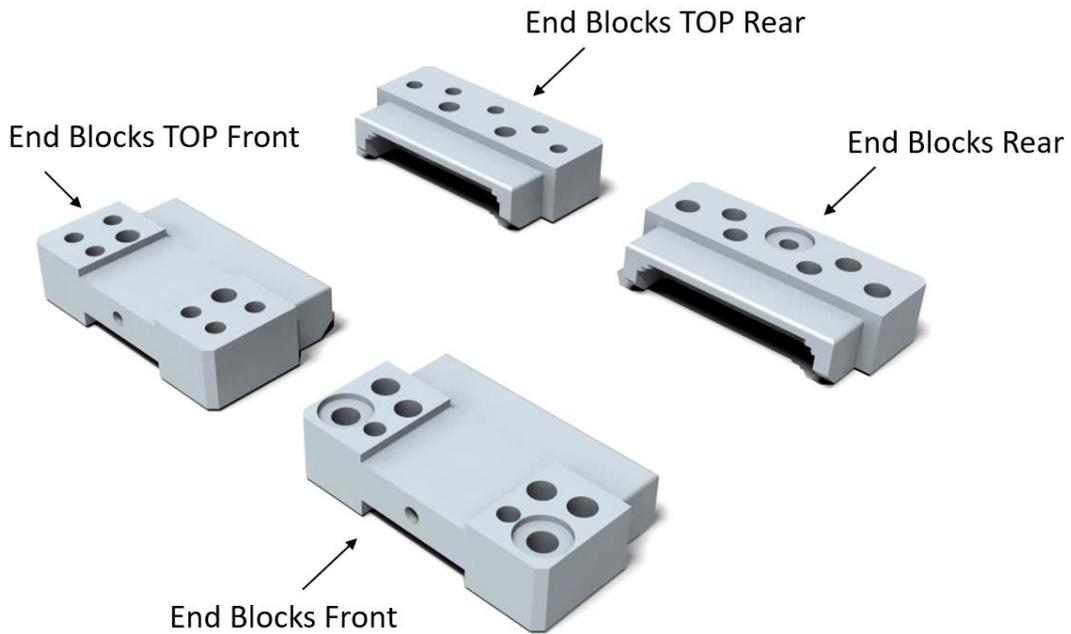


Figura 1. 11: Diverse tipologie di blocchetti terminali (vista dall'alto)

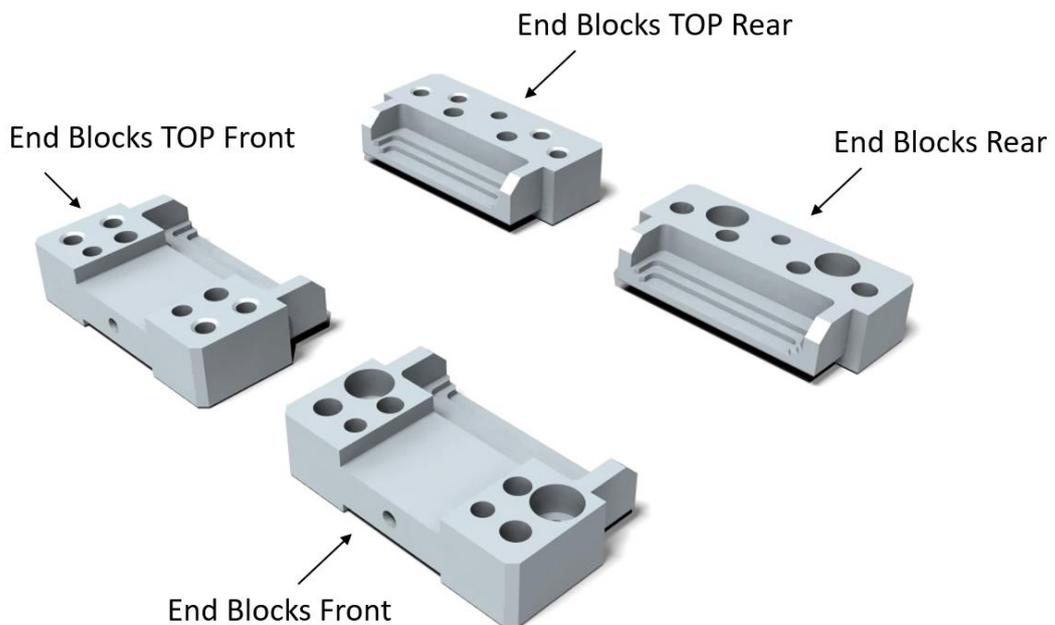


Figura 1. 12: Diverse tipologie di blocchetti terminali (vista dal basso)

1.4.5 Hibrid Integrated Circuit (HIC)

L'HIC, denominato anche "Modulo", è composto da 10 chip ALPIDE, di cinquanta micron di spessore, incollati sul lato inferiore di un comune circuito stampato flessibile tramite resina epossidica (Araldite2011). I chip vengono successivamente collegati alle linee di trasmissione e ai piani di alimentazione del circuito flessibile tramite microfilamenti di fissaggio in alluminio (bonding wires). L'HIC pesa circa 8 gr.

Il *Wire Bonding* è un approccio relativamente semplice e diffuso di integrazione tridimensionale. Lo svantaggio principale di questa tecnica è la fragilità di questi microfilamenti che, addizionata ai numerosi stress meccanici subiti dall'HIC durante le successive fasi di assemblaggio e/o manipolazione, rendono l'HIC estremamente delicato: è richiesta estrema cautela durante la manipolazione dell'HIC bondato.

Il circuito integrato è organizzato su due file, ciascuna composta da 5 chip di cui 1 *Master* e 4 *Slave*. I master sono i chip U0, in basso a sinistra, e U8, in alto a destra. La fila in basso è composta dal *Master* U0 + gli *Slave* U1-U2-U3-U4, mentre la fila in alto è composta dal *Master* U8 + gli *Slave* U9-U10-U11-U12 alla sua sinistra. Inoltre, i due Master sono gli unici chip collegati direttamente all'esterno.

Il tracker, composto da tre piani sensibili formati da cinque stave ciascuno, è segmentato in una struttura gerarchica per offrire modularità e ridondanza.

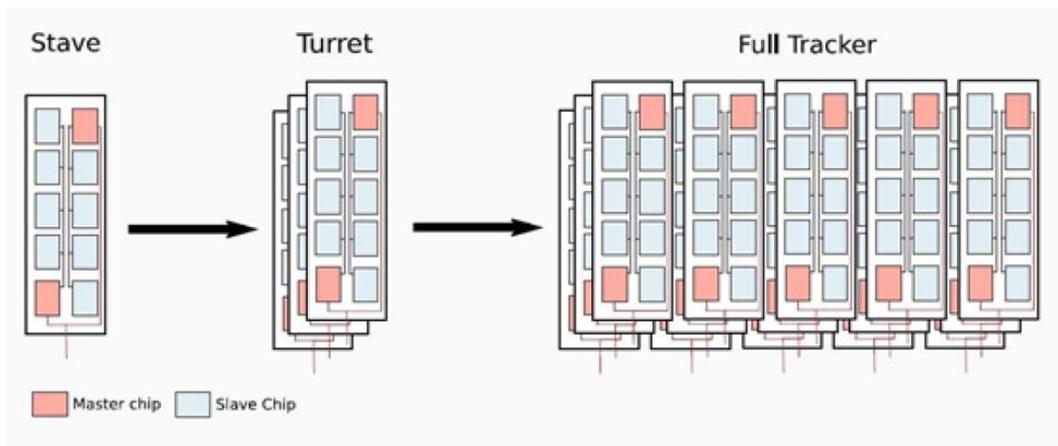


Figura 1. 13: Schematizzazione della struttura gerarchica del DD

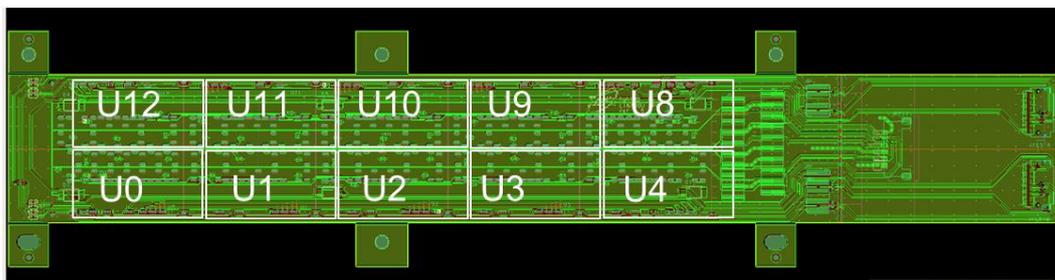


Figura 1. 14: Nomenclatura dei 10 chip ALPIDE

I chip, posizionati sotto l’FPC, sono provvisti di *bonding pads*, zone circolari poste sulla superficie superiore del chip, adibite alla saldatura dei *bonding wires*. In corrispondenza di ciascun *bonding pad* si trova un foro asolato sul corpo dell’FPC. I collegamenti tra chip ed FPC sono essenziali per il funzionamento del sistema. Infatti, la rottura dei bond comprometterebbe il funzionamento dell’HIC e dunque, per ridondanza, si è deciso di effettuare tre bond per ogni pad (figura sottostante).

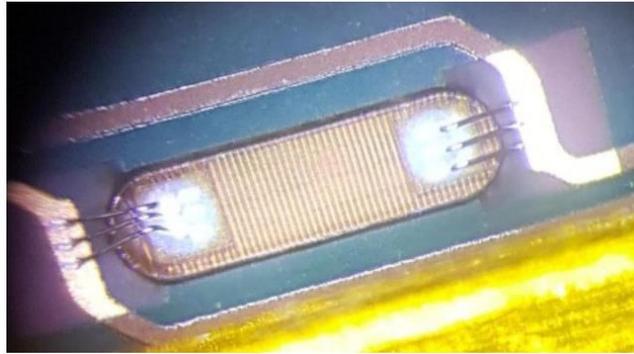


Figura 1. 15: Ridondanza, 3 bond per ogni pad (zoom al microscopio ottico)

Vi sono due diversi tipologie di connessioni elettriche tra chip ed FPC:

- 1) PAD DATI: sull’FPC, accanto al foro, ci sono 1-2 pad di forma rettangolare;
- 2) PAD POWER/GND e BIAS: il foro del circuito stampato è circondato da una corona metallizzata, la cui intera superficie è adatta al bond.

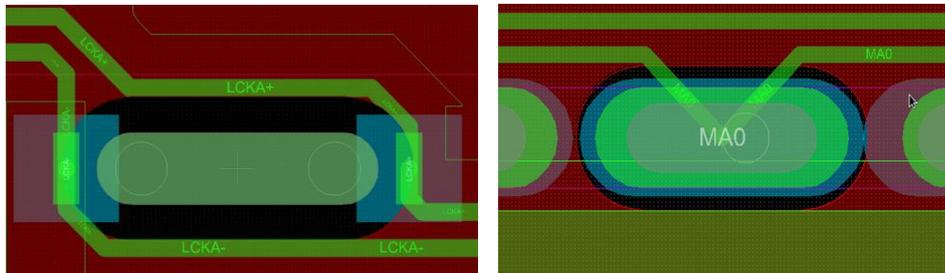


Figura 1. 16: Esempio di PAD DATI (sinistra) e PAD POWER/GND (destra)

- Ogni chip *Master* è dotato di 15 PAD DATI e 41 PAD POWER/GND, per un totale di 56 pad da collegare con ridondanza tripla (168 bond in totale).
- Ogni chip *Slave* è dotato di 9 PAD DATI e 34 PAD POWER/GND, per un totale di 43 pad da collegare con ridondanza tripla (129 bond in totale).
- Dunque, sull’intero HIC verranno effettuati in totale **1428 bond**.

Le figure successive mostrano, nel dettaglio, il collegamento effettuato tra i pad dei chip sottostanti e i pad/corone posti sulla superficie del circuito flessibile. Inoltre, è evidenziata la stratigrafia dell’FPC, di spessore pari a circa 175 micron.

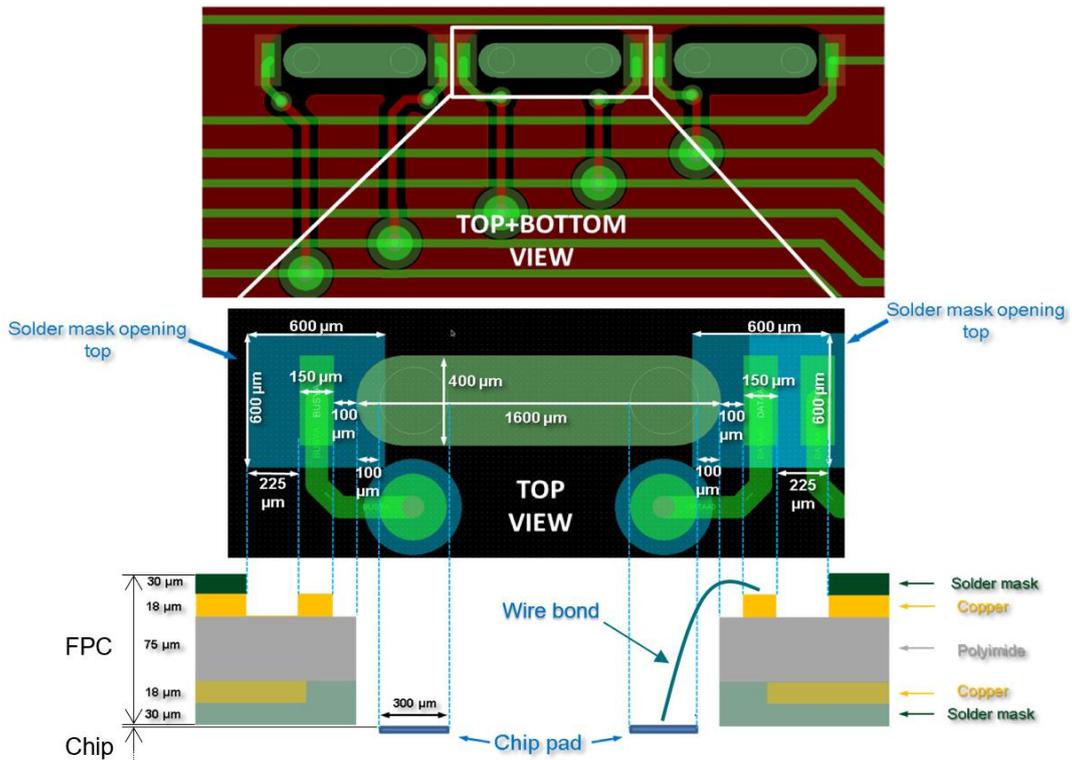


Figura 1. 17: Schematizzazione di wire bond per PAD DATI

È stato detto che, per ridondanza, sono stati effettuati tre bond per ogni pad. Nelle Figure 1.17 e 1.18 i tre bond sono indicati con un'unica linea blu.

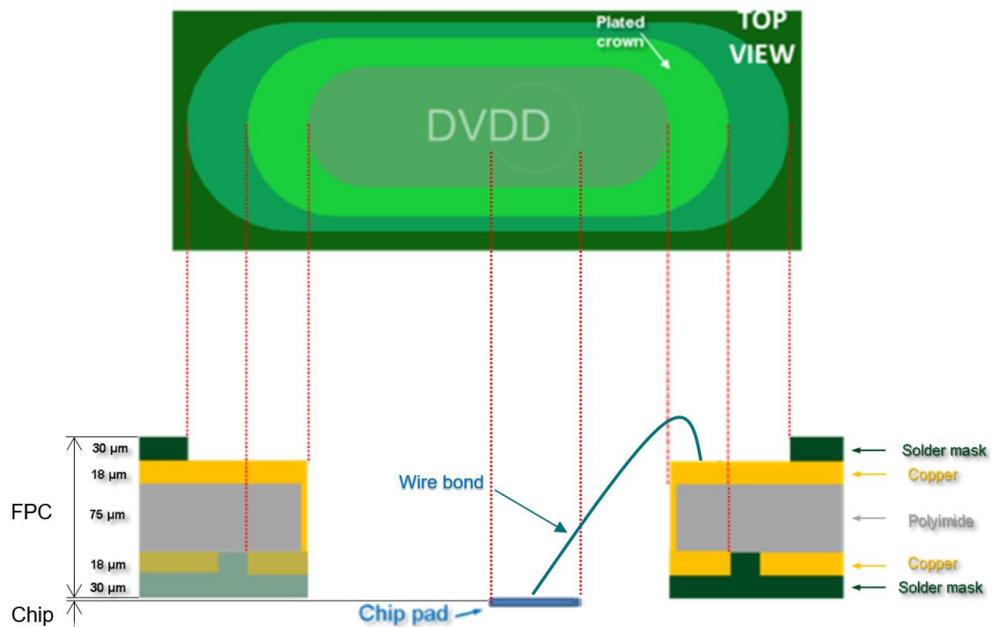


Figura 1. 18: Schematizzazione di wire bond per PAD POWER/GND e BIAS

1.4.6 Stave meccanico

Struttura meccanica su cui viene incollato l'HIC; è formato da un *cold plate* in fibra di carbonio e due blocchetti terminali in alluminio, uno anteriore e l'altro posteriore. Lo stave meccanico, oltre a dare solidità e robustezza allo stave durante le manovre di movimentazione, funge anche da ponte termico tra l'HIC e la cornice esterna in alluminio che contiene il tracker, denominata frame esterno.

Infatti, durante il funzionamento, i chip si surriscaldano e il calore generato deve essere allontanato per evitare di far lavorare i chip a temperature critiche e dunque compromettere il corretto funzionamento del rivelatore. Per tale motivo, il tracker è collegato ad una piastra termica dissipativa, mantenuta a circa 30°C.

1.4.7 Stave

Ognuno dei tre piani sensibili del DD, denominato *stave*, è formato da un HIC ed uno stave meccanico, incollati tramite colla epossidica (Masterbond EP37-3FLFAO). Lo stave ha un peso di circa 40 gr e dimensioni pari a 221,5 X 34,8 X 8,5 mm.

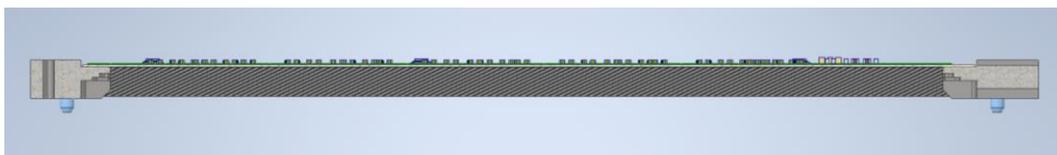


Figura 1. 19: Rendering della sezione di uno stave completo

Ai blocchetti terminali sono incollate quattro spine in titanio, due per ognuno, per il posizionamento dello stave sulle apposite attrezzature di assembly. Inoltre, nella Figura 1. 20: Stave completo, prodotto all'INFN di Torino, è possibile notare i 15 cavi elettrici di connessione tra HIC e TSP.

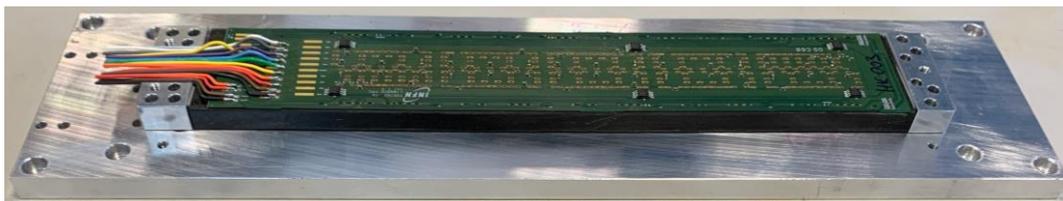


Figura 1. 20: Stave completo, prodotto all'INFN di Torino

1.4.8 PCB-TSP

Un circuito stampato (in inglese "*Printed Circuit Board*", in acronimo come *PCB*) è un supporto utilizzato per interconnettere tra di loro i vari componenti elettronici di un circuito tramite piste conduttive incise su un materiale non conduttivo. Di solito il materiale usato come supporto è la vetronite ramata, ovvero, una piastra di fibra di vetro ricoperta da un sottile strato metallico. Tale strato viene successivamente intagliato con la tecnica di fotoincisione (tramite l'azione di luce e acidi) o con quella di fresatura meccanica (tramite fresa CNC).

Nel caso in esame, è stata progettata una PCB-TSP di collegamento tra i fili elettrici provenienti dai tre stave (15 fili/stave) ed i connettori in uscita che andranno a dialogare con i due piani di trigger adiacenti al tracker, TR1 e TR2. Dunque, la scheda TSP funge da interfaccia elettrica della torretta con l'esterno.

Per lo scopo, è stata appositamente progettata una struttura in alluminio che contenga la TSP e i relativi connettori. Trattasi di un box metallico che, oltre a servire da struttura meccanica per l'allocazione dei vari componenti elettrici e relativi cablaggi, funge anche da schermo elettromagnetico e da protezione contro polveri e/o materiali indesiderati. La struttura è formata da tre componenti (pannello posteriore, pannello anteriore e cover) in alluminio AW EN 6082 T6 con trattamento Alodine 1200S, in conformità alla Norma EN 9100 [8], ed accoppiati tra loro tramite l'utilizzo di componenti filettati in titanio.

1.4.9 Torretta

La costruzione della torretta è l'obiettivo finale del gruppo INFN di Torino. È composta da tre stave, sovrapposti ed accoppiati tramite viti in titanio TCEI M3x20 inserite dal basso che, passanti sui blocchetti dei due stave inferiori, si avvitano sui blocchetti "top", ed un TSP-box per il collegamento elettrico con l'esterno.



Figura 1. 21: Tripletta di stave prodotta presso il laboratorio INFN di Torino

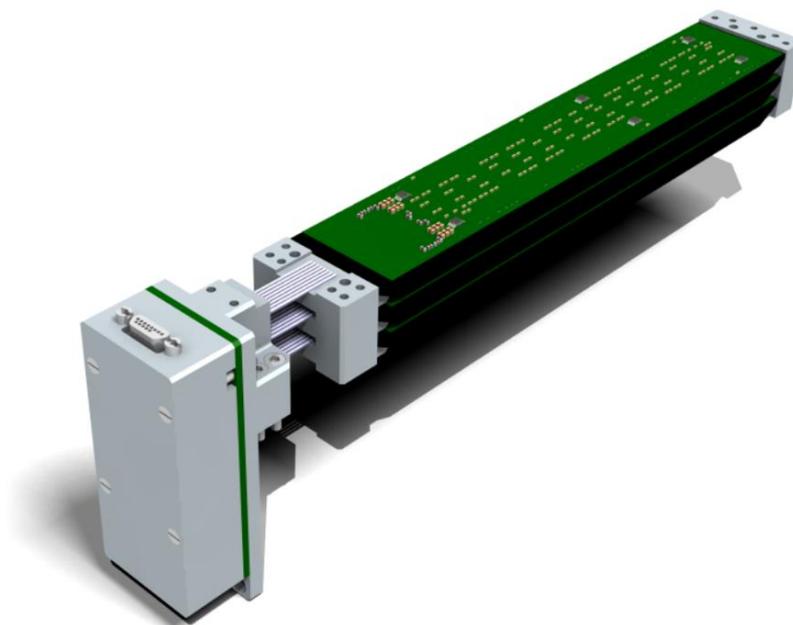


Figura 1. 22: Rendering della torretta (completa di TSP-box)

1.4.10 Frame esterno

Trattasi di una cornice esterna in Alluminio AW EN 6082 T6 con trattamento Alodine 1200S, di dimensioni massime pari a circa 246 x 294 x 31.5 mm.

Oltre a fungere da contenitore e protezione per le cinque torrette, la cornice è progettata in modo tale da limitare il budget di materiale, minimizzare l'impatto sulla stima della direzione delle particelle e collegare il tracker con il resto della strumentazione interna al rilevatore HEPD-02 (in particolare permette di accoppiare meccanicamente, tramite collegamenti filettati, il tracker con il TR1 soprastante e il TR2 sottostante). I fori della cornice sono equipaggiati con inserti Heli-coil in bronzo fosforoso, tangless, per garantire la longevità delle filettature. Per il fissaggio delle cinque torrette al telaio esterno, vengono utilizzate viti in titanio M3X30 VSEI (4 viti/torretta) più altre 4 viti per il fissaggio dei TSP-box.

Il frame è provvisto, superiormente ed inferiormente, di due coperture in Kapton fissate tramite l'utilizzo di resina epossidica, Araldite 2011. Inoltre, nelle porzioni di superficie di appoggio con i blocchetti metallici delle torrette, il componente è equipaggiato con inserti in PTFE per aumentare il contatto meccanico e dunque la conducibilità termica tra i due componenti, agevolando la dissipazione del calore.

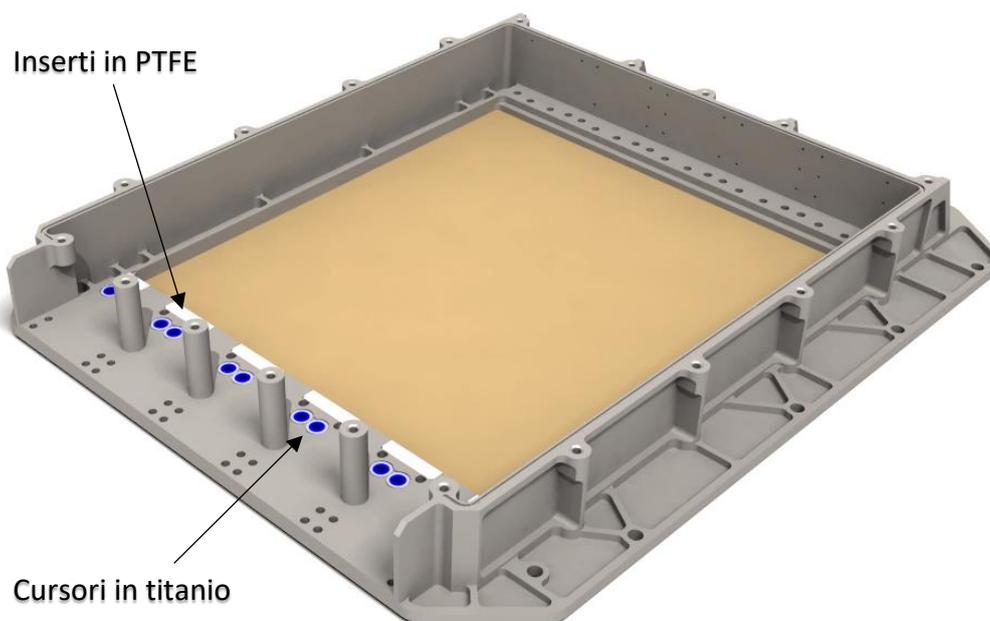


Figura 1. 23: Frame esterno con sistema a cursori

Durante la fase di progettazione, vista la lunghezza della cornice metallica di circa 294 mm, si è dovuto tenere conto di eventuali effetti di dilatazione termica. Il frame, accoppiato alle torrette tramite viti di fissaggio e spine di posizionamento, a causa del calore dissipato dall'elettronica in funzionamento, potrebbe essere soggetto a dilatazioni termiche non trascurabili. Quest'ultime porterebbero a degli stress meccanici sulle torrette, con conseguenti distacchi di colla o rotture interne, assolutamente da evitare. Per tale motivo, è stato deciso di utilizzare dei fori con spine per il centraggio dei blocchetti posteriori sul frame esterno, e dei fori asolati

nella parte anteriore, in modo da permettere il movimento relativo tra le due parti (frame e blocchetto anteriore) per compensare le dilatazioni termiche differenti.

Anteriormente, per quanto riguarda i fori delle spine di centraggio, sono delle semplici asole all'interno delle quali le spine possono scorrere liberamente. Nell'accoppiamento tramite collegamenti filettati, essendo questi sottoposti ad una coppia di serraggio pari a 1.1 Nm, è stato deciso di inserire dei cursori in titanio per tenere il blocchetto anteriore a contatto con il frame sottostante e, al tempo stesso, agevolare lo scorrimento relativo tra questi, dovuto ai diversi valori di CTE.

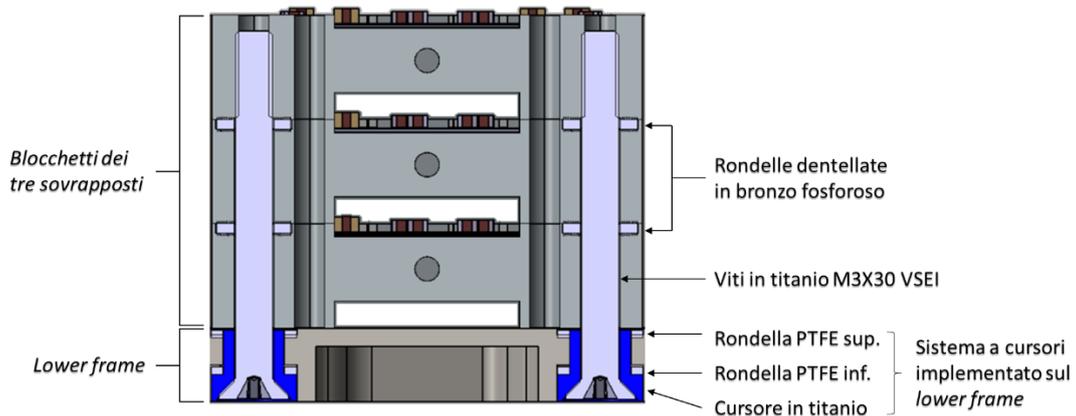


Figura 1. 24: Schematizzazione del sistema a cursori implementato sul frame

Il cursore, provvisto di due rondelle in teflon, entra inferiormente in apposite tasche del frame e va in battuta con la rondella inferiore. La seconda rondella è inserita tra il frame, con cui va in battuta, e la tripletta. Dunque, una volta inserita la vite, passante per il cursore e i blocchetti dei due stave sottostanti, e avvitata in appositi fori dello stave superiore della tripletta, si ha un cursore bloccato sia verso l'alto che verso il basso e che dunque tiene la torretta in posizione. Inoltre, le rondelle in teflon aiutano il movimento del cursore all'interno dell'asola.

Capitolo 2

Tracker: procedura di assemblaggio e definizione delle specifiche

Introduzione

Il seguente capitolo tratta la procedura di assemblaggio del Tracker, formato da cinque torrette, la cui realizzazione risulta essere l'obiettivo ultimo dell'INFN di Torino. Nella prima sezione si pone l'attenzione sulla procedura di assembly, suddivisa in step che riassumono le fasi di allineamento, incollaggio e montaggio delle varie sotto parti che andranno a costituire il Tracker.

Seguirà una seconda sezione riguardante la definizione delle specifiche che l'oggetto finale dovrà avere e di requisiti molto stringenti a cui si deve prestare attenzione durante tutta la fase di progettazione e assemblaggio.

2.1 Procedura di assemblaggio

La figura seguente riassume le varie fasi di assemblaggio che portano alla costruzione del tracker di particelle.

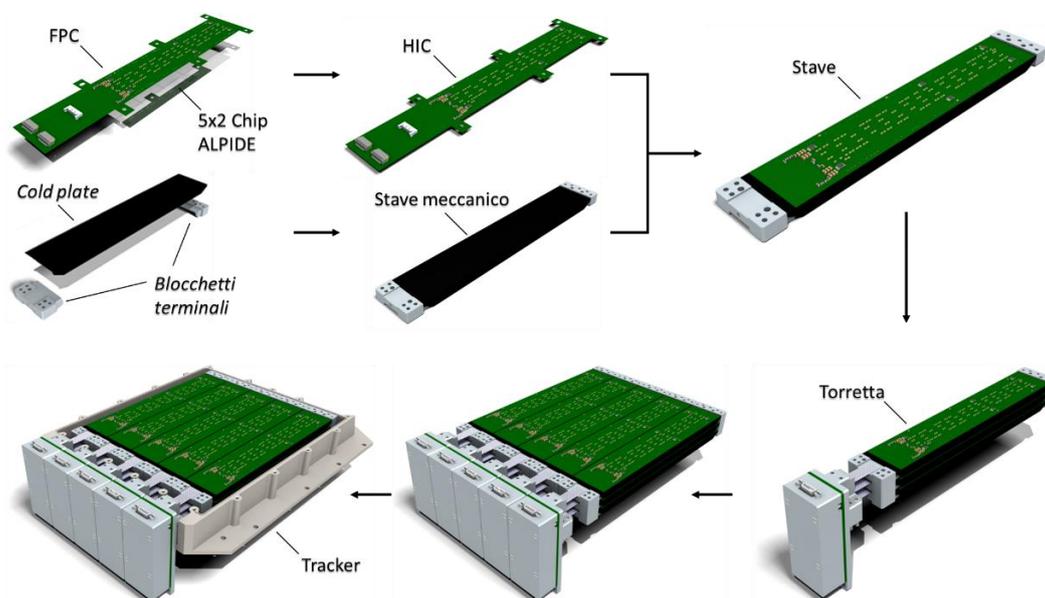


Figura 2. 1: Schematizzazione della procedura di assembly del TRACKER

La prima operazione è la fase di allineamento dei dieci chip ALPIDE sotto la macchina di misura. La CMM, oltre a guidare l'operatore durante la procedura di posizionamento dei chip (fase molto delicata e precisa), permette di eseguire check finali e/o misurazioni. Questa operazione avviene su un'apposita base in alluminio e teflon costruita in modo tale da avere dei fori che, tramite una

circuiteria di vuoto, permettono di tenere in posizione i chip. Tramite un'apposita postazione, sul lato inferiore dell'FPC vengono posizionati dei punti di colla (Araldite 2011) e seguirà la fase di assemblaggio dell'HIC che prevede l'incollaggio dell'FPC sui chip precedentemente allineati sotto la macchina di misura.

Parallelamente, segue la fase di assemblaggio dello stave meccanico, costituito dal *cold plate* in fibra di carbonio e i due blocchetti in alluminio. In un'apposita base avviene il posizionamento dei blocchetti tramite spine, l'applicazione di uno strato di 100 micron di colla (Masterbond EP37-3FLFAO) e dunque l'incollaggio del CP sui blocchetti. Passato il tempo di polimerizzazione della colla, lo stave meccanico è pronto per essere utilizzato nella fase successiva che prevede la costituzione dello stave. Si ha dunque l'apposizione di colla (Araldite 2011) sul CP dello stave meccanico e l'incollaggio dell'HIC su di esso, con l'ausilio della CMM.

A questo punto si procede con la costruzione della "torretta", formata da tre stave impilati e connessi al TSP-box precedentemente assemblato. Questa fase avviene su di un apposita postazione, costituita in modo tale da permettere un agevole montaggio tramite collegamenti filettati, inseriti dal basso. L'ultima fase per l'assemblaggio del tracker consiste nell'allineamento e fissaggio di cinque torrette all'interno di una cornice in alluminio che rende il tracker un oggetto unico, formato dunque da 15 stave non più separati. Il frame ha una duplice funzione, sia strutturale che protettiva. La progettazione e la produzione della cornice, così come l'assemblaggio del tracker, esulano dai compiti dell'INFN.

2.2 Definizione delle specifiche e dei requisiti richiesti

Nella costruzione del tracker di particelle per lo spazio è necessario considerare alcuni elementi critici: in primo luogo la potenza disponibile per il solo tracker, pari a 10 W (in questa configurazione ogni chip ALPIDE consuma circa 20 mW/cm^2), richiede un'ottimizzazione dei consumi dei rivelatori utilizzati; in secondo luogo la necessità di evitare che il sistema di rivelazione in funzione si surriscaldi, ha portato alla progettazione di un sistema di raffreddamento passivo (unico sistema di raffreddamento utilizzabile nello spazio), effettuato tramite il collegamento del rivelatore ad una piastra dissipativa tenuta ad una temperatura di circa 30°C . Il sistema deve essere costantemente raffreddato per permettere agli ALPIDE di lavorare in condizioni ottimali, ovvero ad una temperatura di 30°C . L'ultimo punto da considerare sono le condizioni critiche durante la fase di lancio e la permanenza nello spazio del rivelatore, verificate mediante test di termo-vuoto e vibrazionali, effettuati sul singolo stave, sulla singola torretta (EM) e sul tracker completo (QM).

Di seguito sono descritte le specifiche richieste ed i requisiti imposti in fase di progettazione ai principali componenti che costituiscono il tracker.

Flexible Printed Circuit

Il layout dell'FPC è stato progettato in modo da soddisfare le rigorose specifiche richieste dalle condizioni sperimentali. In particolare, la necessità di minimizzare lo strato di materiale che le particelle oggetto di studio devono attraversare prima

di colpire i pixel dei silici, vincola fortemente lo spessore dei materiali da utilizzare per la realizzazione del circuito flessibile. Inoltre, l’FPC prodotto viene sottoposto a diversi test elettrici: il primo test di continuità elettrica viene eseguito dal fornitore ed è previsto un secondo test di qualifica prima del montaggio sui chip.

Hibrid Integrated Circuit

Un altro requisito rilevante è la stretta tolleranza dimensionale, lungo Z, che l’HIC deve rispettare. Ciò viene fatto incollando l’FPC sui chip (precedentemente allineati) in una posizione definita da fori di allineamento e marker di riferimento. All’operazione di incollaggio tra FPC e chip, segue un’importante fase di rilievo metrologico: poiché la posizione dei pad sui chip e dei fori sull’FPC è fondamentale per la corretta esecuzione dell’operazione di wire bonding, verrà eseguita una scansione visiva dettagliata su ogni HIC, effettuata tramite la sonda della CMM.

Nella prima fase di validazione dell’EM è stato progettato il jig di assemblaggio dell’HIC, verificata la procedura di assembly e sono stati prodotti i primi prototipi.

La validazione della procedura di assemblaggio dell’HIC si è basata su rilievi metrologici. I valori di riferimento per gli spostamenti massimi dei chip sull’HIC sono inferiori a 20 μm (condizione di validazione soddisfatta in tutti i test eseguiti).

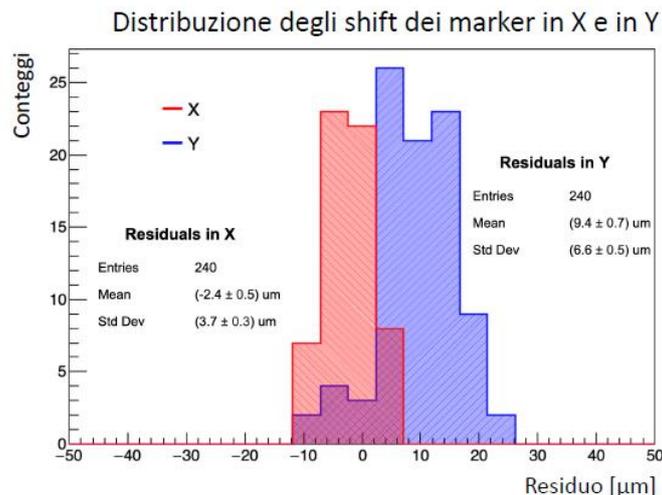


Figura 2. 2: Esempio di metrologia sul posizionamento dei chip (scostamenti delle coordinate X e Y dei marker rispetto alle posizioni nominali)

Struttura meccanica di supporto

Chip ALPIDE e circuiti stampati flessibili sono supportati meccanicamente da una struttura in fibra di carbonio, di forma a C e con la parte piana spessa 400 μm , da blocchetti terminali in alluminio e da un telaio esterno in alluminio, progettati per limitare l’utilizzo di materiale e minimizzare l’impatto sulla stima della direzione.

1. Cold plate

Il *cold plate* in fibra di carbonio, è stato progettato su misura per l’applicazione su HEPD-02 in cui elevata conduttività termica, l’alta rigidità e il basso budget di materiale sono i requisiti che guidano la progettazione e la scelta del materiale, della geometria e del processo di produzione. La progettazione, caratterizzazione e produzione dei CP è stata gestita in collaborazione con i gruppi CERN EP-DT.

2. Blocchetti terminali in alluminio

Questi componenti sono stati progettati tenendo in considerazione, oltre ai vari requisiti dimensionali e al compito che devono svolgere, la Norma EN 9100 [8] per quanto riguarda la scelta del materiale e dei trattamenti termici consentiti in ambito spaziale. I blocchetti devono avere come caratteristica fondamentale un'alta conducibilità termica, in modo tale da effettuare un "ponte termico" tra HIC e *frame* esterno, per la dissipazione del calore generato dai chip funzionanti.

Stave (metrologia)

Vengono eseguiti rilievi metrologici in diverse fasi dell'assemblaggio al fine di verificare la corretta posizione di chip, HIC e stave rispetto alle posizioni nominali. La validazione della procedura per l'assemblaggio dello stave si basa su rilievi metrologici e funzionali. I valori di riferimento per gli spostamenti massimi sono inferiori a 100 μm (condizione di validazione soddisfatta in tutti i test eseguiti).

Requisiti per lo spazio (+ test da effettuare su HIC, stave e torretta)

- Basso material budget (riduzioni di soglia di energia e diffusioni multiple).
- Dispersione termica nel vuoto: scelta della configurazione CP + doppia interfaccia termica e ΔT entro le specifiche ALPIDE ($\Delta T_{max} \ll 10^\circ\text{C}$).
- Test vibrazionali (vibrazioni con profilo sinusoidale e random) per la simulazione di carichi e vibrazioni fase di lancio e ricerca delle risonanze.

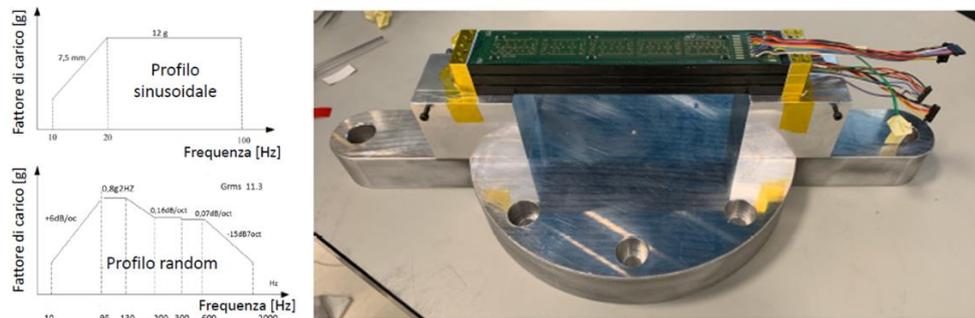


Figura 2. 3: Requisiti per lo spazio - Test vibrazionali

- Test termo-vuoto per simulare le condizioni termiche operative dopo il lancio. Il prototipo viene sottoposto a test funzionali durante i cicli termici

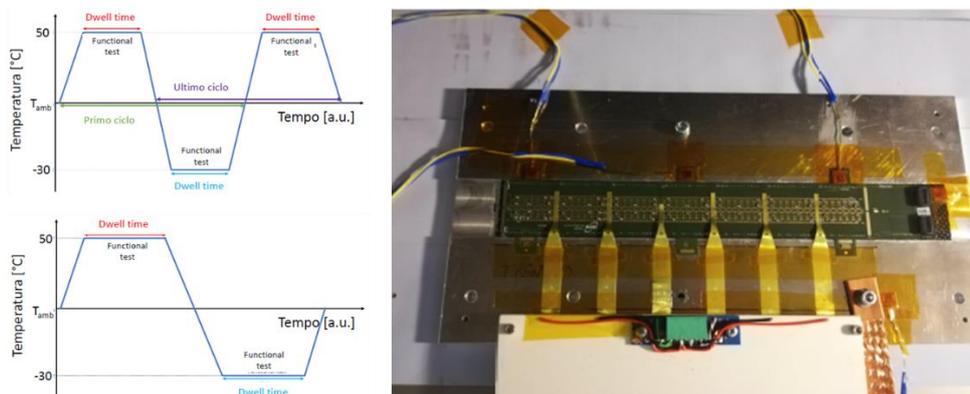


Figura 2. 4: Requisiti per lo spazio - Test termo-vuoto

Fasi di progettazione/validazione del tracker

La produzione del tracker di particelle, installato al bordo di HEPD-02, si basa su un lavoro di progettazione, caratterizzazione e validazione che si articola in tre fasi:

- **EM (Engineering Model)**
In questa prima fase viene sviluppato un EM per qualificare il design, la procedura di assemblaggio e le attrezzature di supporto del tracker. Quest'ultimo è composto da cinque parti identiche, le torrette, e dunque l'EM sarà costituito da una singola torretta. L'assemblaggio dell'EM è già stato effettuato mentre i test sono attualmente in corso. Vengono eseguite diverse prove di caratterizzazione per verificare la rispondenza ai requisiti: prove di flessione, torsione, vibrazionali, termiche e termoelastiche.
- **QM (Qualification Model)**
La validazione dell'EM, e di tutte le relative procedure di assemblaggio e collaudo, sarà il punto di partenza per la seconda fase di caratterizzazione. Saranno prodotte cinque torrette complete per assemblare un tracker QM, completo di torrette, frame esterno con relativi coperchi in kapton, superiore e inferiore. Il QM è sottoposto ai test di qualifica più stringenti, anche rispetto all'EM, difatti non verrà montato a bordo del satellite.
- **FM (Flight Model)**
Il *flight model*, composto da un tracker completo, dovendo essere montato a bordo del satellite dopo fase di testing, sarà sottoposto a test meno invasivi in modo da garantirne l'integrità ed il corretto funzionamento.

Capitolo 3

Progettazione della meccanica di supporto

3.1 Stato dell'arte: materiali utilizzati

ANTICORODAL

Trattasi di una serie di leghe dell'alluminio, denominata serie 6000, legate con magnesio (0.4-1.7%), manganese (0.5-1%) e silicio (1-5%). Presentano buona lavorabilità e saldabilità, sono caratterizzate da buone caratteristiche meccaniche e da un'ottima resistenza alla corrosione. Inoltre, sono adatte per l'anodizzazione.

L'indurimento è dovuto principalmente alla precipitazione di composti intermetallici del manganese ($MnAl_{12}$, $MnAl_6$) o del magnesio (Mg_2Si). Inoltre, il silicio, oltre ad aumentare la fluidità del fuso e ridurre il coefficiente di dilatazione, aumenta la resistenza alla corrosione intergranulare tipica di questa lega [9] [10].

L'Anticorodal è stato utilizzato per la costruzione della componentistica relativa alle attrezzature dedicate alle fasi di montaggio del tracker, ove non sono richiesti particolari requisiti di planarità e rugosità superficiale dell'oggetto da realizzare.

ANTICORODAL 100 (EN AW-6082 Estruso T651)

Lega della famiglia Al-Mg-Si-Mn di impiego generale, caratterizzata da buoni valori di resistenza, al vertice delle leghe 6000. È caratterizzata da buona resistenza alla corrosione, ottime saldabilità e lavorabilità alle macchine utensili. La dicitura T651 indica lo stato di prodotto trafilato ed estruso in piastre [11].

METRA		LEGA DI ALLUMINIO DA ESTRUSIONE Extrusion Aluminium Alloy							EN AW-6082				
Caratteristiche fisiche													
massa volumica :	2,71	g / cm ³		conduttività termica a 20°C		- nello stato O: 2,09		W / cm °K		- nello stato T6: 1,72		W / cm °K	
punto di fusione inferiore :	580	°C		coefficiente di dilatazione		-tra 20° e 100°C: 23,2 · 10 ⁻⁶		1 / °K		-tra 20° e 200°C: 24,1 · 10 ⁻⁶		1 / °K	
calore specifico tra 0° e 100°C:	897	J/Kg °K		termica lineare		-tra 20° e 300°C: 25,0 · 10 ⁻⁶		1 / °K					
modulo di elasticità lineare E:	69000	N / mm ²		resistività elettrica a 20°C		-nello stato O: 3,14		μΩ · cm		-nello stato T6: 3,85		μΩ · cm	
modulo elasticità tangenziale G:	26000	N / mm ²											
Composizione chimica secondo Norma Europea EN 573.3													
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Altri		Al		
									ciascuno	totale			
EN AW-6082	0,70 + 1,30	0,50 max	0,10 max	0,40 + 1,00	0,60 + 1,20	0,25 max	0,20 max	0,10 max	0,05 max	0,15 max	resto		
Proprietà meccaniche minime, secondo Norma Europea EN 755.2													
Tipi di profilo	(1) stato fisico di fornitura	diametro D [mm] per tondi, o spess. S [mm] per barre, o spess. di parete e per profili		Carico di rottura a trazione R _m [MPa]		Carico limite di elasticità R _{p0.2} [MPa]		Allungamento					
				min	max	min	max	A % min	A _{50mm} % min				
Tondi e barre piene	T6	D ≤ 20	S ≤ 20	295	-	250	-	8	6				
		20 < D ≤ 150	20 < S ≤ 150	310	-	260	-	8	-				
		150 < D ≤ 200	150 < S ≤ 200	280	-	240	-	6	-				
		200 < D ≤ 250	200 < S ≤ 250	270	-	200	-	6	-				

Figura 3. 1: Caratteristiche della lega EN AW-6082 (da Catalogo METRA) [11]

Per rispettare i requisiti specifici richiesti dalla norma UNI EN 9100, la lega in questione è stata utilizzata per la produzione dei componenti in alluminio che compongono il tracker, progettati per l'ambiente spazio:

- i blocchetti terminali, anteriore e posteriore;
- gli elementi costituenti il TSP-box (pannello posteriore, anteriore e cover).

ALCAPLUS (ALCOA-MIC6)

Il MIC6 è un prodotto realizzato dalla nota multinazionale statunitense ALCOA ed è destinato ad ogni ambito industriale o specialistico che abbia la necessità di utilizzare piastre di alluminio planari e stabili. Le piastre sono prodotte impiegando una lega di alluminio della serie 7000 (Al, Zn, Mg, Cu), ottenute con un processo di fusione in continuo su stampi posti orizzontalmente.

Il principale vantaggio delle piastre ALCOA-MIC6 è quello di avere un prodotto dimensionalmente stabile: la tecnica di produzione e il trattamento di distensione successivo consentono di effettuare lavorazioni senza che si verifichi l'insorgenza di alcuna tensione e dunque di avere una planarità invariata; inoltre è possibile scaldare ripetutamente la piastra fino a oltre 350°C ritornando a temperatura ambiente e conservare la dimensione originale senza subire alcuna deformazione.

La stabilizzazione in forno e la fresatura finale, contemporaneamente su entrambe le superfici, conferiscono alle piastre un'ottima planarità (0.13 mm di freccia max per spessori > 15.88 mm), una stretta tolleranza sullo spessore finale (± 0.13 mm) nonché una ridotta rugosità superficiale (< 0.64 micron) su entrambe le superfici. Tali caratteristiche unite all'eccellente lavorabilità, la leggerezza e il risparmio che si riscontra in fase di produzione, fanno dell'ALCOA-MIC6 un prodotto sempre più utilizzato in ogni campo dell'industria [12].

Inoltre, l'eccezionale stabilità permette di evitare successive operazioni di spianatura e rettifica che con altri materiali sono indispensabili per ottenere un prodotto perfettamente planare e di spessore preciso.

AISI-304 (noto in Italia come "X5CrNi18-10")

Trattasi di un acciaio inox austenitico amagnetico, composto da un tenore di cromo per il 18-20% e di nichel per l'8-11%. Ammette carbonio fino allo 0.08%.

Caratterizzato da buona lavorabilità e saldabilità, da un'ottima resistenza alla corrosione e da un alto coefficiente igienico, questo acciaio è maggiormente utilizzato per la produzione di pentole e servizi domestici.

TEFLON

Il politetrafluoroetilene (PTFE) è un polimero appartenente alla classe dei perfluorocarburi (PFC), derivante dall'omopolimerizzazione del tetrafluoroetilene.

È più conosciuto attraverso le sue denominazioni commerciali (quali Teflon, Fluon, Algoflon, Hostaflon, Inoflon e Guaflon), in cui al polimero vengono aggiunti altri componenti per migliorarne le possibilità applicative oppure incrementarne le prestazioni in ambito meccanico, pneumatico o chimico. Trattasi di una materia plastica, liscia al tatto e resistente a temperature fino a 260 °C [13].

Viene spesso utilizzata per ricoprire superfici sottoposte ad alte temperature alle quali si richiede buona inerzia chimica e antiaderenza. Infatti, il teflon è caratterizzato da completa inerzia chimica (non viene aggredito dalla quasi totalità degli agenti chimici) ed è antiaderente, ossia la superficie non è incollabile (ad oggi non è noto nessun adesivo in grado di incollare il PTFE). Inoltre, presenta ottime proprietà di scorrevolezza superficiale in quanto risulta essere il materiale con il coefficiente di attrito più basso conosciuto, con un attrito dinamico PTFE-Acciaio pari a 0.04 e attrito statico pari a circa 0.07-0.14.

Grazie alle caratteristiche sopra elencate, in sede di progetto delle attrezzature meccaniche, alcuni componenti sono stati equipaggiati con inserti in teflon per:

- agevolare lo scorrimento tra superfici sottoposte a strisciamenti ripetuti (per es. vedere il design della spatola presentata nel 3.5);
- evitare incollaggi indesiderati derivanti da sbavature di colla.

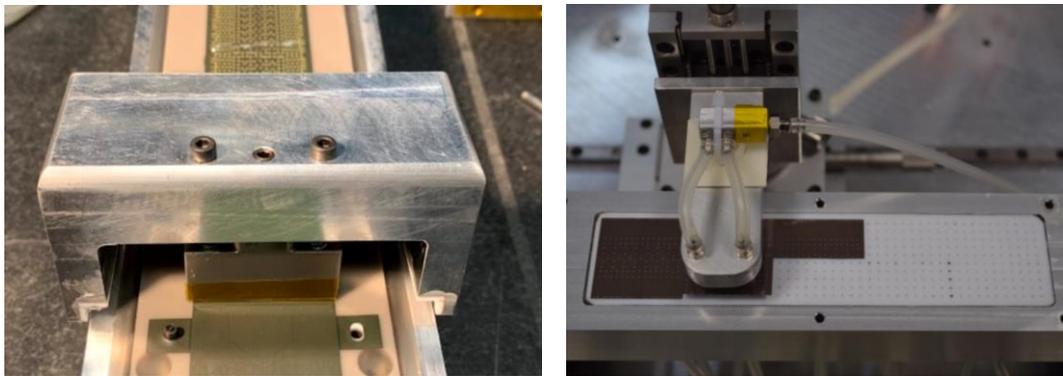


Figura 3. 2: Esempio di inserti in teflon (spatola e base di incollaggio)

ARALDITE 2011

Trattasi di un adesivo epossidico bicomponente che polimerizza a temperatura ambiente, caratterizzato da elevata resistenza e tenacità; ha un lungo tempo di vita, un basso ritiro e un'ottima resistenza al carico statico e dinamico. Inoltre, è adatto per l'incollaggio di un'ampia varietà di metalli, ceramiche, compositi, gomma, plastica rigida, vetro e molti altri materiali di uso comune.



Figura 3. 3: ARALDITE 2011 - pistola (sinistra) e miscelazione (destra)

La miscela resina-indurente può essere applicata manualmente o tramite macchina sulle superfici da unire, appositamente pretrattate ed asciutte. Lo spessore dello strato di adesivo compreso tra 0.05 e 0.10 mm, conferirà al giunto la più elevata resistenza al taglio per trazione (RTT) [14].

L'Araldite 2011 è stata utilizzata per gli incollaggi nella zona sensibile dell'esperimento, ovvero nella superficie dei rivelatori in silicio. Di conseguenza, è stato interposto un sottile strato di colla, di apposita geometria, tra:

- *cold plate* e chip, dello spessore di 50 μm (vedere 3.5);
- chip ed FPC, dello spessore di 100 μm (vedere 3.11).

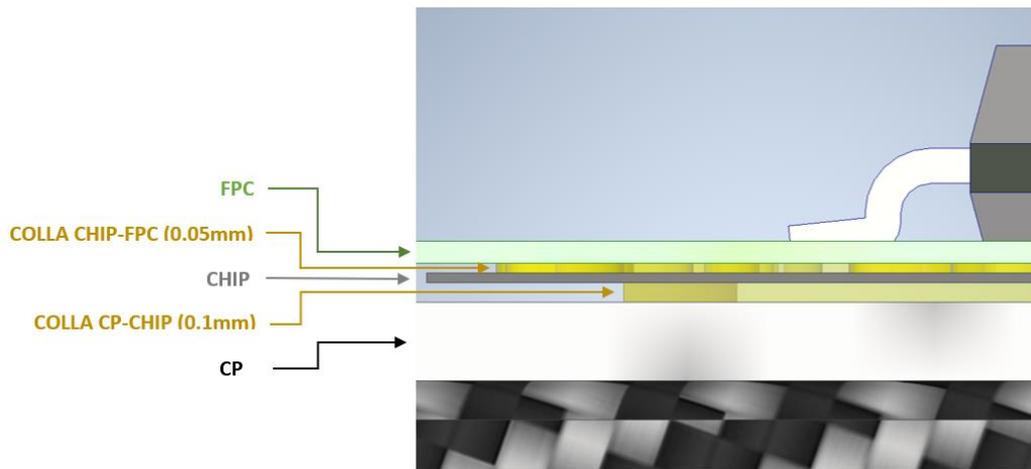


Figura 3. 4: Focus sugli strati di ARALDITE tra CP-chip e chip-FPC

MASTERBOND EP37-3FLFAO

Altro adesivo epossidico bicomponente utilizzato industrialmente per incollaggio ad alte prestazioni, che forma legami forti e flessibili su un'ampia varietà di substrati inclusi metalli, compositi, ceramiche, gomme e plastiche.

Tale resina epossidica, ideata per polimerizzare a temperatura ambiente (o più rapidamente a temperature elevate), presenta una straordinaria resistenza a urti, vibrazioni, impatti e cicli termici. Altri vantaggi di questo prodotto sono:

- comoda miscelazione, rapporto di uno a uno in peso o volume;
- elevata forza di adesione a un'ampia varietà di substrati;
- bassa viscosità con eccellenti caratteristiche di scorrimento, questo porta ad avere elevate conduttività termica ed isolamento elettrico;
- buona resistenza fisica e chimica ed alto grado di flessibilità;

L'adesivo EP37-3FLFAO è ampiamente utilizzato nei settori elettronico, elettrico, informatico, aerospaziale in cui sono richiesti isolamento elettrico e trasferimento di calore. Inoltre, il materiale in questione è stato certificato dalla NASA come resina epossidica a basso degassamento [15].

La Masterbond EP37-3FLFAO è stata utilizzata nella procedura di assemblaggio degli *stave* per l'incollaggio del *cold plate* sui blocchetti (vedere 3.10), in quanto è richiesto un incollaggio resistente ad urti e vibrazioni, con elevato isolamento elettrico ed alta conducibilità termica tra le due parti incollate.

3.2 Stato dell'arte: trattamenti utilizzati

ANODIZZAZIONE

L'anodizzazione (detta anche ossidazione anodica) è un processo elettrochimico non spontaneo grazie al quale, mediante la trasformazione superficiale dell'alluminio in ossido di alluminio (Al_2O_3), si ha la formazione di uno strato di ossido che protegge il metallo base dalla corrosione.

Il processo consiste nell'immersione dei componenti da trattare in una soluzione acida dove avviene il passaggio di corrente continua, fornita da un circuito elettrico esterno (il catodo), con gli oggetti che fungono da anodo (polo positivo): al passaggio della corrente si sviluppa dell'ossigeno atomico che, combinatosi con gli atomi di alluminio, forma un ossido caratterizzato da una crescita controllata, la quale porta ad un netto miglioramento delle proprietà fisico-meccaniche rispetto a quelle possedute dall'ossido formatosi naturalmente [16].

Alla fine di questo primo processo la struttura dell'ossido si presenta porosa; è dunque necessario sottoporre il componente ad un trattamento successivo, conosciuto come fissaggio (o sigillatura): trattasi di un passaggio in acqua deionizzata ad elevata temperatura, dove avviene un'idratazione dell'ossido con un conseguente aumento di volume che ne chiude le porosità, ottenendo dunque uno strato di ossido solidamente sigillato. Il fissaggio è fondamentale per ottenere un componente con un'elevata resistenza alla corrosione. Inoltre, nel caso di strati colorati, tramite la sigillatura viene notevolmente migliorata la tenuta del colore dall'esposizione alla luce solare. Per contro, si ha una riduzione della durezza superficiale e della resistenza all'usura/abrasione del componente trattato.

Lo strato di ossido che si viene a formare sulla superficie dell'alluminio ha in media uno spessore di circa 5-10 micron. L'ossidazione anodica conferisce al componente in alluminio un'alta resistenza alla corrosione, una buona conducibilità termica ed inoltre lo rende elettricamente non conduttivo.

Le leghe che si prestano meglio al trattamento di anodizzazione, specialmente per l'aspetto estetico finale, sono quelle della serie 6xxx (Anticorodal) e 5xxx (Peraluman). Invece, le leghe della serie 2xxx (Avional) e 7xxx (Ergal) sono trattate con idonei cicli di anodizzazione che ne privilegiano le caratteristiche tecniche funzionali, a scapito delle caratteristiche estetiche.

Per quanto riguarda la variazione dimensionale del componente, apportata dallo spessore dello strato di ossido formatosi a seguito del trattamento di anodizzazione, non è facilmente calcolabile e questo potrebbe portare a problemi nel caso di particolari con tolleranze ristrette. Infatti, l'ossido che si forma cresce in parte sopra al materiale base (alluminio) ed in parte penetra all'interno del componente. Ne deriva che la variazione dimensionale del pezzo anodizzato sarà dovuta solamente alla porzione di ossido "esterno" che, in base all'esperienza, rappresenta circa il 30-35% dello spessore totale di ossido creatosi.

Attualmente, sono disponibili tre tipologie di anodizzazione dell'alluminio, le cui caratteristiche principali vengono sintetizzate nella seguente tabella:

Caratteristiche	Ossidaz. cromica	Ossidaz. solforica	Ossidaz. Dura
Tipologia di bagno	Acido cromico	Acido solforico	Acido solforico, con particolari parametri di lavoro
Rif. Norma MIL-A-8625	Tipo I o IB	Tipo II	Tipo III
Spessore di ossido	2-8 μm	8-25 μm	20-80 μm
Incremento durezza superficiale	Minimo	Moderato	Elevato (+ 300%)
Resistenza ad usura	Scarsa	Discreta (circa tre volte quella di Al)	Elevata (circa 10 volte quella di Al)
Resistenza a corrosione	Buona	Buona	Buona
Colore ossido (senza colorazione aggiuntiva)	Da incolore a grigio-verdastro	Da incolore a grigio-giallastro	Da grigio chiaro a marrone-nero
Perdita di resistenza alla fatica	Minima	Media	Alta (30-60%)
Adattabilità a colorazione	Bassa (solo nero)	Alta	Bassa (solo nero)
Applicazione	Preferibile in caso di componenti con geometria complessa (es. sottosquadri e fori ciechi), per la bassa aggressività dell'elettrolita sull'alluminio.	Preferibile dove l'aspetto estetico è di primaria importanza, grazie alla sua elevata capacità di assorbire una vasta gamma di pigmenti colorati.	Indicata dove i requisiti principali sono la durezza superficiale e la resistenza ad usura/abrasione. (*)

Tabella 1: Confronto delle caratteristiche dei tre tipi di anodizzazione

* le prestazioni ottimali si ottengono effettuando un'anodizzazione senza fissaggio finale, con uno spessore non superiore ai 50-60 μm e con successiva asportazione meccanica di circa 20 μm (si scopre così lo strato più compatto e duro dell'ossido).

ANODIZZAZIONE A PORI APERTI

Processo superficiale che trasforma la superficie del particolare in alluminio in ossido d'alluminio, conferendogli una ottima resistenza alla corrosione ed isolamento elettrico. Inoltre, aumentando l'adesione di colle o vernici, conferisce al particolare finito maggiore resistenza agli agenti atmosferici. Il trattamento è conforme alle normative MIL-A8625.

ALODINE 1200S (cromatazione gialla)

Trattasi di una conversione cromica superficiale dell'alluminio che mantiene inalterate le proprietà elettriche del metallo base. Tramite l'utilizzo di un prodotto chimico in polvere, si ha la produzione di un rivestimento resistente alla corrosione su componenti, mediante lavorazione a spruzzo o per immersione (lo spessore del rivestimento è minimo, pari a circa 0,125 - 0,25 μm). Il bagno viene effettuato ad una temperatura di circa 24-30°C ed è costantemente controllato misurando il pH. La colorazione di questo rivestimento varia dal giallo al marrone, a seconda del tipo di lega o del grado di purezza del metallo [17].

Il processo di cromatazione gialla prevede la sequenza delle seguenti operazioni:

- prelavaggio con detergente *Ridoline*;
- risciacquo con acqua fredda (due risciacqui da 30 o 60 secondi);
- rivestimento con Alodine 1200S (immersione per circa 60-90 secondi);
- risciacquo con acqua fredda per un minimo di 30 secondi;
- passivazione con Deoxylyte41 (per una massima resistenza a corrosione);
- essiccazione in forno ed eventuale verniciatura.

I componenti trattati con Alodine 1200S risultano elettricamente conduttivi. Inoltre, il trattamento è certificato secondo lo standard MIL-DTL-5541-F [18].

3.3 Stato dell'arte: normativa di riferimento

UNI EN 9100 (per la Qualità nei Settori Aeronautica, Spazio e Difesa)

Il settore aerospaziale è caratterizzato da un'elevata specializzazione e i committenti richiedono che siano garantite misure di affidabilità e sicurezza certificate. Su queste basi sono stati definiti e concordati standard a livello internazionale: la serie di norme 9100, sviluppata *dall'International Aerospace Quality Group (IAQG)*, che esprime la necessità dell'Industria Aerospaziale di dotarsi di un sistema di gestione per la qualità che sia controllato direttamente dall'industria stessa, attraverso un meccanismo di sorveglianza sull'operato degli enti di accreditamento e degli enti di certificazione. La norma europea EN 9100 si basa sulla ISO 9001 - Sistemi di Gestione della Qualità - e aggiunge i requisiti specifici richiesti dalle autorità e dai costruttori del settore aerospaziale e della difesa. Particolare attenzione è dedicata alla gestione della configurazione e alle metodologie del settore e ad ulteriori requisiti specifici che riguardano la qualità, l'affidabilità e la sicurezza in volo [19].

I componenti costituenti il tracker (equipaggiato a bordo del satellite CSES-02) e discussi in questo lavoro di tesi, devono rispettare le suddette norme EN 9100 [8].

3.4 Allineamento dei CHIP

Progettazione meccanica

Durante la fase di allineamento dei chip, si lavora su un'apposita postazione, posta all'interno del volume di lavoro della macchina di misura, formata da:

Chip_Alignment_JIG: base di lavoro costituita da un corpo centrale in alluminio (1) provvista di una tasca lavorata in modo tale da avere dieci slot di vuoto, uno per ogni chip, indipendenti tra loro. All'interno della tasca è allocata una prima copertura forata in alluminio (2), per dare stabilità meccanica, e successivamente una seconda copertura forata in teflon (3). Tali coperture forate permettono di distribuire uniformemente il vuoto su tutta la superficie inferiore del chip, tramite appositi fori di diametro pari a 1mm, in modo tale da evitare non planarità dovute al basso spessore dei chip in questione (spessore del chip in silicio pari a 50 micron). Difatti, una non idonea distribuzione del vuoto potrebbe il chip ad inflettersi. Inoltre, è stata inserita la seconda copertura in teflon poiché in una fase successiva è previsto l'incollaggio dell'FPC sui chip nello stesso JIG. Quando si effettuano lavorazioni con le colle, è buona norma lavorare su superfici, quali il teflon, per evitare incollaggi dovuti ad un eventuale eccesso di colla che, sbordando fuori dalla superficie del chip incollati quest'ultimo alla base sottostante.

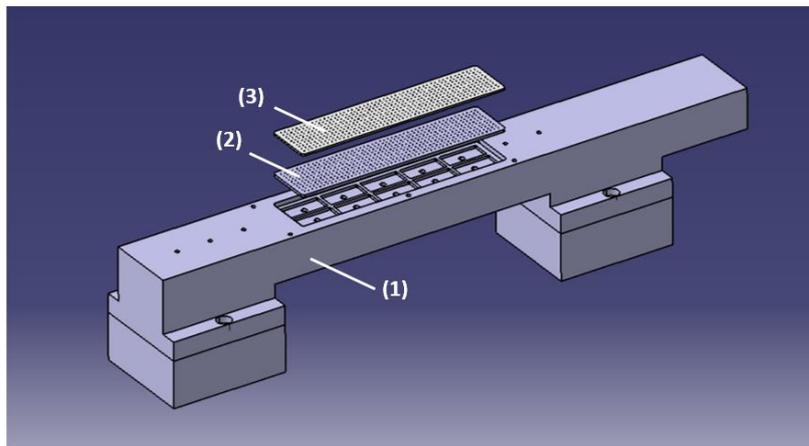


Figura 3. 5: elementi costituenti il Chip_Alignment_JIG

Circuito di vuoto: è stato dimensionato e messo a punto un circuito di vuoto utilizzando tubi di varie dimensioni, raccordi, adattatori e valvole 3/2 NC con Switch meccanico. In particolare, è stata ideata una "base di controllo del vuoto" che unisce, in un'unica postazione di controllo del vuoto, tutti gli switch necessari per questa prima fase di allineamento (dieci switch per i singoli chip + uno switch per la stazione di allineamento).

Stazione di allineamento: trattasi di una torretta con sistema di ventose/vuoto per la manipolazione dei chip. Agendo su 4 viti (testine micrometriche), è possibile gestire la movimentazione ed in particolare la traslazione lungo i 3 assi ortogonali X, Y, Z e la rotazione sul piano XY (4 gradi di libertà controllati).

Funzionamento JIG

Tramite l'utilizzo della torretta, azionando il vuoto delle ventose, si preleva il chip dall'apposita scatola di storage, dunque ci si sposta sulla zona di allineamento (copertura forata in teflon munita di vuoto), si posiziona il chip nella posizione corretta, si disattiva il vuoto della torretta e si attiva quello sul *Chip_Assembly_JIG* relativo al chip in questione. In tal modo si è posizionato il chip sul JIG, nella posizione corretta, ed è tenuto in posizione grazie al vuoto. Si può dunque procedere al posizionamento del chip successivo fino al completamento della fase.

Durante tutta la fase di allineamento del chip, l'operatore è assistito e guidato dalla macchina di misura che, grazie ad appositi programmi stilati dal sottoscritto, è in grado di: individuare le posizioni nominali dove andare a posizionare i marker del chip per un corretto allineamento, mostrare all'operatore la sequenza corretta delle operazioni da svolgere tramite l'esposizione di popup e warning, effettuare check di posizionamenti e/o misurazioni finali dell'allineamento.

L'operazione di allineamento dei chip è svolta manualmente dall'operatore, per mezzo della stazione di allineamento e con il supporto della macchina di misura a coordinate della Mitutoyo. Seguendo questo tipo di procedimento, si riesce ad ottenere un'accuratezza di posizionamento dei chip dell'ordine di 5÷10 micron.

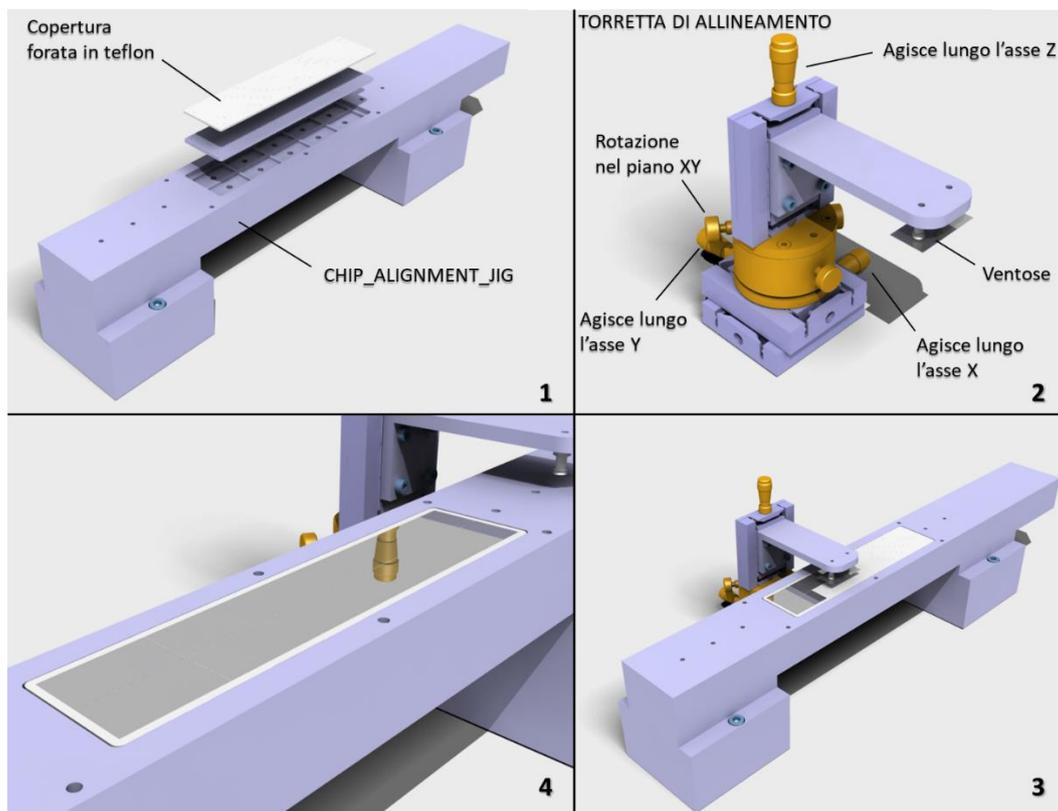


Figura 3. 6: Procedura di allineamento dei chip (sotto la CMM)

Una volta allineati tutti e dieci i chip, si prosegue con la fase successiva di assemblaggio dell'HIC, che consiste nell'incollaggio dell'FPC sui chip allineati.

3.5 Attrezzatura per il posizionamento della colla sull'FPC

Come descritto precedentemente, l'HIC è composto dall'FPC e dai dieci chip, incollati tramite Araldite 2011 (colla epossidica bicomponente). Dopo aver effettuato l'allineamento dei chip sotto la macchina di misura, l'FPC deve essere munita di punti di colla e posizionata sui rivelatori. Per quanto riguarda l'apporto di colla sulla superficie inferiore dell'FPC, bisogna rispettare i seguenti parametri:

- La colla deve essere posizionata con spessore costante lungo la superficie in modo tale da avere, dopo l'incollaggio, tutti i chip sullo stesso piano ed evitare stress causati da punti in cui si ha un maggiore spessore di colla;
- La colla deve essere allocata in posizioni precise in modo tale da garantire un incollaggio solido e, allo stesso tempo, non coprire i pad dei chip che necessitano di una superficie libera per l'operazione di wire bonding.
- L'FPC deve essere incollata in maniera precisa sui chip, per cui le fasi di centraggio e successivo incollaggio vengono effettuate sotto la CMM.

Progettazione meccanica

Per rispettare il primo requisito, è stata ideata una postazione, denominata **FPC_Gluing_Base**, che permette di tenere in posizione l'FPC capovolta, apporre la colla sulla superficie inferiore e spatolarla in modo da uniformare lo spessore. Tale postazione è composta da:

Base_FPC_Holder (DRAWING_1008_GB_1)

Trattasi di una base in ANTICORODAL anodizzata, provvista di uno scasso centrale e di fori filettati per il posizionamento e l'avvitamento dell'*FPC holder* il quale, tramite una circuiteria di vuoto integrata, è usato nelle operazioni di movimentazione/manipolazione dell'FPC. La parte superiore della base è stata ideata per fungere da binario per la spatola durante l'operazione di applicazione della colla. Inoltre, lateralmente, sono stati pensati dei fori per spine metalliche che fungono da finecorsa per la spatola. Infine, la lunghezza massima di questa postazione prevede un extracorsa che serve da appoggio per la spatola quando questa non viene utilizzata.

Mask_holder (DRAWING_1008_GB_2)

Supporto in ALCAPLUS anodizzato, di dimensioni pari a 205x60x10mm. Una serie di fori longitudinali Ø5 e fori Ø1, perpendicolari ai primi, formano i canali per l'inserimento di una circuiteria di vuoto. Difatti, i fori Ø5 sono filettati per i primi 5 mm per l'avvitamento dei bocchettoni adibiti all'inserimento dei tubicini di vuoto. Inoltre, il componente è provvisto di fori (filettati M4 per i primi 6mm e Ø3H7 per i restanti 4) per l'inserimento di pivot, che fungono sia da organi di presa per la manipolazione dell'*holder* che da spine di posizionamento per la maschera di colla. Il *mask holder* tiene in posizione la maschera attraverso il vuoto.

Spatola per colla, divisa in due parti:

- **Skate** (DRAWING_1008_GB_3)

Trattasi del pattino che scorre sulla *Base_FPC_Holder*. Al corpo centrale, in ANTICORODAL anodizzato, nella zona di scorrimento sono stati aggiunti strati di TEFLON_CERN_44.88.85.215.5 dello spessore di 1.5 mm (il teflon ha la funzione di ridurre gli attriti durante la corsa di livellamento della colla). Il componente in questione è provvisto di un'asola centrale che funge da binario per la spatola (quest'ultima può solo scorrere in alto o in basso), ed appositi fori per l'alloggiamento di viti e molle che daranno precarico alla spatola. Il precarico è fondamentale, in quanto garantisce sempre il contatto tra spatola e oggetto sul quale si vuole stendere la colla, anche a seguito di non planarità della superficie interessata.

- **Spatola** (DRAWING_1008_GB_4)

Componente in AISI 304 anodizzato che costituisce la "spatola" vera e propria. Essa è provvista di una zona a forma di asola, responsabile dell'accoppiamento prismatico con lo skate, e di 2 fori filettati M3 per l'avvitamento delle viti (e relative molle) responsabili del precarico. La parte centrale dell'oggetto, adibita all'operazione di livellamento della colla, deve essere quasi a spigolo vivo nella porzione terminale, ma deve avere un adeguato raggio di raccordo (nel caso in esame è stato previsto un raccordo di 5mm) in modo tale da ottenere dello spazio per la raccolta della colla in eccesso. Inoltre, è richiesta particolare attenzione circa la linearità dello spigolo vivo (nella messa in tavola è stata imposta una tolleranza geometrica di linearità pari a 0.02mm), in modo da garantire uno spessore di colla uniforme lungo tutta la superficie dell'FPC.

FPC_holder (DRAWING_1008_C10)

Supporto in ALCAPLUS + teflon utilizzato per la manipolazione dell'FPC attraverso il vuoto. Simile al *mask holder*, trattasi di una piastra forata, provvista di circuiteria di vuoto e pivot per la movimentazione. Alla base in ALCAPLUS è attaccato uno spessore in teflon, che funge da superficie di appoggio per l'FPC, per evitare che degli eccessi di colla vadano ad attaccarsi all'holder successivamente all'operazione di spatolamento della colla. Inoltre, la parte in teflon è stata fresata per ottenere degli scassi su cui andranno ad allocarsi i componenti elettrici saldati sull'FPC (la superficie superiore dell'FPC, che dovrà andare a battuta con l'holder, è provvista di condensatori e pad che sono dotati di un certo spessore e che dunque andrebbero in interferenza con la superficie in teflon). Se dovesse esserci anche solo una minima interferenza, la parte "piatta" del circuito stampato flessibile non risulterebbe a perfetto contatto con l'holder e questo comporterebbe un cattivo funzionamento del sistema di vuoto e di conseguenza una scarsa tenuta dell'oggetto da movimentare.

Maschera per incollaggio (*HIC_glue_mask*)

Foglio plastico, dello spessore di 50 μm , adesivo su una delle due facce e dotato di una particolare geometria ottenuta tramite l'utilizzo di un plotter da taglio.

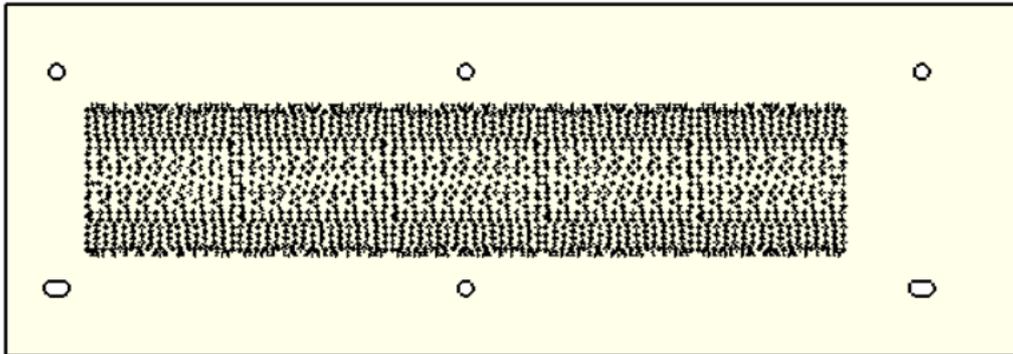


Figura 3. 7: Maschera per l'incollaggio dell'FPC sui chip

Dopo aver attaccato la maschera alla superficie dell'FPC ed aver steso la colla, la maschera viene staccata e sull'FPC rimarranno solamente i "punti di colla" dello spessore desiderato (50 micron) e nelle posizioni desiderate (sulla maschera sono stati realizzati piccoli fori che permettono di allocare i "punti di colla" nella posizione desiderata).

Funzionamento JIG

La fase in questione comincia con la presa dell'FPC tramite l'utilizzo dell'apposito holder, munito di sistema di vuoto, il posizionamento di quest'ultimo sulla *Base_FPC_Holder* e il fissaggio dell'holder alla base per mezzo di viti M4. Segue dunque una fase di preparazione della maschera: la rimozione della pellicola dalla maschera scoprendo la parte adesiva e il posizionamento della maschera sul *mask_holder* dalla parte non adesiva (il centraggio è garantito dall'accoppiamento tra i pivot previsti sull'holder ed appositi fori previsti sulla maschera). La maschera è tenuta in posizione grazie al circuito di vuoto integrato sull'holder.

Si applica, tramite movimentazione del *mask holder*, la maschera sull'FPC. La precisione dell'operazione è resa possibile grazie all'accoppiamento dei pivot del *mask holder* e dell'*FPC holder* in quanto entrambi sono dotati di appositi fori (sei in totale) che ne permettono il giusto posizionamento. Di norma si utilizzano due fori esterni-alterni per la manipolazione del *mask holder* e il corretto centraggio della maschera su di esso, gli altri due esterni-alterni per il posizionamento dell'FPC sull'apposito holder ed infine i due fori centrali vengono utilizzati per il posizionamento di spine metalliche che guidano l'operatore durante la fase di accoppiamento dei due holder. Appena i due holder vanno a contatto, si disattiva il vuoto del *mask holder* e, prima di rimuoverlo, si esercita una lieve pressione per essere sicuri che la maschera rimanga attaccata all'FPC. Tramite l'utilizzo di un tampone in cotone, si appiattisce per bene la maschera sull'FPC, in modo tale da evitare che si stacchi al passaggio della spatola e/o si depositi della colla in zone indesiderate. Con l'ausilio di un distributore a siringa (strumento costituito da una

centralina di controllo e temporizzazione digitale, raccordata ad una siringa), che permette di erogare con precisione ed affidabilità componenti fluidi, si stendono diverse strisce di colla perpendicolarmente alla direzione di lavoro della spatola.

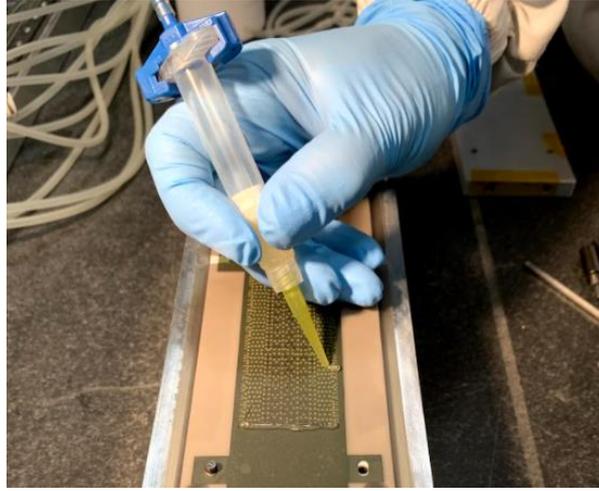


Figura 3. 8: Apposizione di colla sull'FPC tramite distributore a siringa

A questo punto, tramite l'utilizzo della spatola, si distribuisce uniformemente la colla. Segue un'attenta ispezione ottica per verificare che tutte le tasche della maschera siano state riempite con il giusto spessore di colla; in caso contrario bisogna apporre dell'altra colla e ripetere il processo. Infine, è possibile rimuovere la maschera. Si ottiene dunque l'FPC con dei "punti di colla", pronto per essere incollato sui chip precedentemente allineati sotto la CMM.

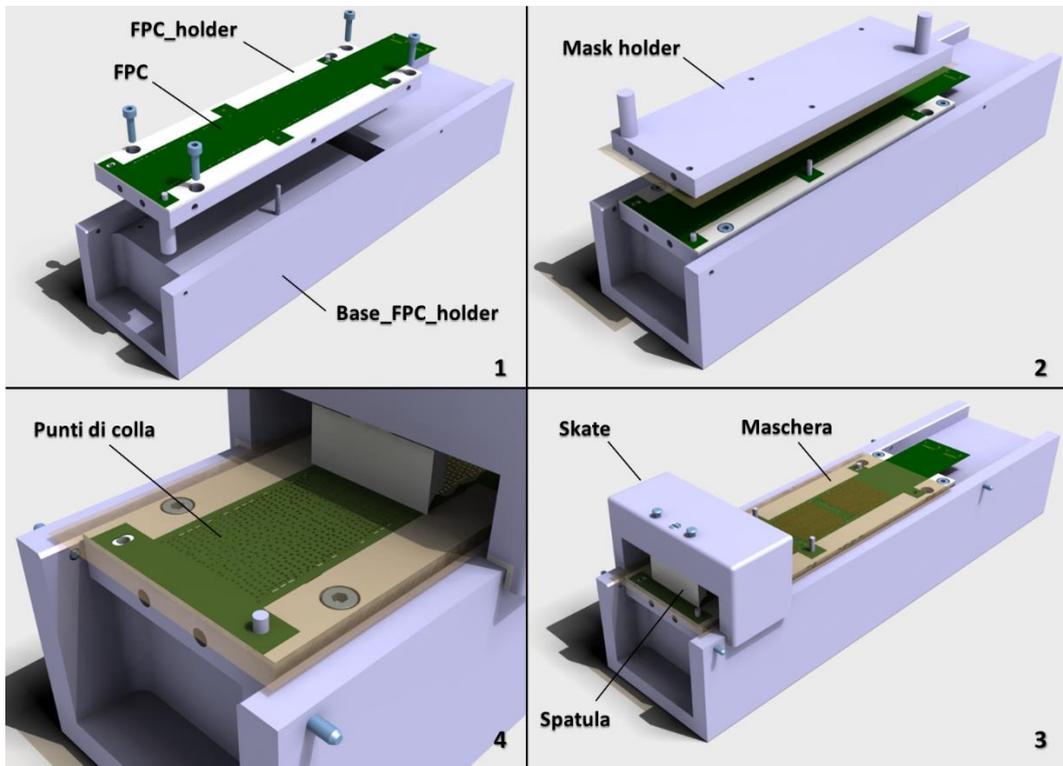


Figura 3. 9: Procedura di applicazione della colla sull'FPC

3.6 Attrezzatura per l'assemblaggio dell'HIC

L'operazione di assemblaggio dell'HIC viene effettuata sulla stessa postazione dove in precedenza erano stati allineati i chip (*Chip_Assembly_JIG*). I chip sono tenuti in posizione dal circuito di vuoto integrato nel jig; questo impedirà spostamenti non voluti dei rivelatori durante l'operazione di incollaggio dell'FPC.

Chip_Assembly_JIG e *FPC holder* hanno in comune i sei fori relativi alle alette dell'FPC; si utilizzano i due fori centrali per l'inserimento di spine metalliche che centrano l'accoppiamento e guidano l'operatore durante la fase di avvicinamento (discesa) dell'FPC sui chip. Dopodiché bisogna disattivare il vuoto dell'*FPC holder* ed effettuare una leggera pressione per essere sicuri che tutta la superficie utile del circuito flessibile sia in posizione. Durante tutta l'operazione, nonché durante il tempo di polimerizzazione della colla, pari a circa 12 h, bisogna tenere attivo il vuoto del jig sottostante per mantenere i chip nella posizione corretta.

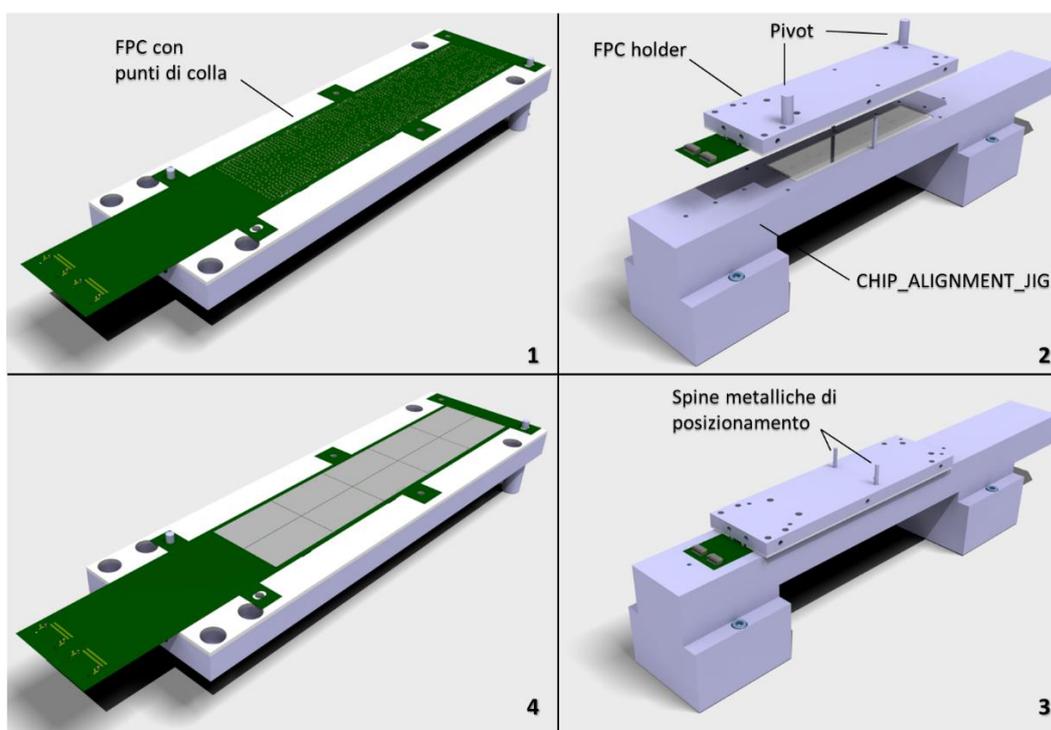


Figura 3. 10: Procedura di assemblaggio dell'HIC

Durante il tempo di polimerizzazione della colla, si è deciso di lasciare l'*FPC holder* sull'HIC e di apporre un peso aggiuntivo, di circa 200 g, per assicurare che l'holder rimanga effettivamente in posizione. Questo, oltre a comportarsi da peso statico utile per tenere l'FPC in posizione ed ottenere un migliore incollaggio, funge anche da protezione dell'HIC da eventuali accumuli di polvere e/o cadute accidentali di oggetti maneggiati nelle vicinanze della postazione.

Il tempo di polimerizzazione a temperatura ambiente, suggerito nelle schede tecniche dell'ARALDITE 2011, risulta essere pari a 10 ore. Durante la produzione, è stato deciso di tenere l'HIC a polimerizzare per un tempo pari a circa 12 ore.

Per valutare lo spostamento indesiderato dei chip dopo questa operazione, è stato implementato un apposito programma della CMM che, attraverso la misura delle coordinate dei marker esterni dei chip (unici marker visibili dopo l'incollaggio del circuito stampato sui silici), permette di osservare eventuali differenze di posizione dei chip prima e dopo l'incollaggio. Il corretto posizionamento tra FPC e chip risulta essenziale per la successiva operazione di bonding (il circuito stampato flessibile presenta dei fori che lo mettono in comunicazione con i chip sottostanti).

Infine, l'HIC viene sottoposto ad un'ispezione visiva sotto la macchina di misura per verificare che non ci sia della colla sui pad dei chip sottostanti; in caso contrario, non sarebbe possibile saldare i microfilari in rame ed effettuare il bonding.

3.7 Box di trasporto/test dell'HIC

Una volta assemblato, l'HIC deve essere riposto in appositi box di storage che, oltre a proteggere l'oggetto da cadute accidentali di attrezzature e/o depositi di polvere sull'FPC, vengono utilizzati durante le operazioni di trasporto e test. Infatti, gli HIC assemblati all'INFN di Torino verranno successivamente inviati a Bari e sottoposti alla delicata operazione di wire bonding. Inoltre, i box sono pensati in modo tale da essere utilizzati durante le fasi di test effettuate sugli HIC.

Progettazione meccanica

Durante la manipolazione ed il trasporto degli HIC, è di fondamentale importanza tenerli ben saldi in modo tale da evitare scollamenti dei chip dall'FPC. Per assolvere a questo scopo è stato pensato e progettato un apposito **Box di Trasporto per l'HIC**, composto dai seguenti componenti:

Base_box_Transporto (DRAWING_1008_BT_1).

Trattasi di una base rettangolare in ALCAPLUS anodizzato, di dimensioni pari a 260x70mm e dello spessore di 5mm. È provvista di diversi fori:

- 4 fori filettati M3 per le viti di chiusura del box;
- 6 fori filettati M3 per l'avvitamento di appositi inserti in PVC, discussi in seguito, che hanno il compito di tenere premuto l'HIC sulla base e dunque tenerlo in posizione durante le fasi di movimentazioni;
- 6 fori passanti Ø3 H7 per l'inserimento di spine di posizionamento relative ai fori delle alette dell'FPC (queste spine vengono utilizzate solamente nelle operazioni che precedono la fase di taglio delle alette);
- 10 fori passanti Ø3 H7 per l'inserimento di spine di posizionamento utilizzate nelle operazioni che seguono la fase di taglio delle alette (non essendoci più le alette forate nell'FPC, che garantivano un corretto posizionamento sulla base, si utilizzano queste spine che fungono da battuta per i quattro lati dell'FPC);
- 4 fori passanti Ø3.1 per l'inserimento di spine metalliche che permettono un corretto centraggio dell'HIC sulla base, movimentato per mezzo dell'apposito *HIC holder*.

Fermo posteriore/centrale/anteriore (DRAWING_1008_BT_2/3/4).

Trattasi di inserti in PVC, con apposita geometria e spessore pari a 4mm, provvisti di fori svasati $\varnothing 3.3$ per l'inserimento di viti che, permettendo l'accoppiamento dei fermi in questione sulla base, premono questi sulla superficie superiore dell'FPC.

Coperchio del box, formato a sua volta da una cover metallica ed appositi distanziali in plastica (fissati alla cover tramite viti):

- **Cover (DRAWING_1008_BT_7)**

Base rettangolare in ALCAPLUS anodizzato, di dimensioni pari a 260x70xmm, spessore di 4mm, provvista di dodici fori M3 per l'accoppiamento con i distanziali in plastica (esposti in seguito) e quattro fori $\varnothing 3.5$ per l'inserimento di viti di chiusura del box.

- **2x Distanziale lungo (DRAWING_1008_BT_6)**

Inserto in PVC di dimensioni pari a 253x6x4.5mm, provvisto di cinque fori svasati $\varnothing 3.2$ per l'inserimento delle viti di accoppiamento con la cover ed un foro passante $\varnothing 3.5$ per il passaggio della vite di chiusura del box.

- **Distanziale corto (DRAWING_1008_BT_5)**

Inserto in PVC di dimensioni pari a 70x7x4.5mm, provvisto di due fori svasati $\varnothing 3.2$ per l'inserimento delle viti di accoppiamento con la cover e due fori passanti $\varnothing 3.5$ per il passaggio delle viti di chiusura del box.

I tre distanziali ed il fermo posteriore formano una cornice plastica di chiusura tra la base e la cover del box di trasporto. Dunque, chiudendo il box tramite le apposite quattro viti, si ha una sorta di chiusura "ermetica" e l'HIC collocato all'interno della scatola è protetto da infiltrazioni indesiderate di polveri.

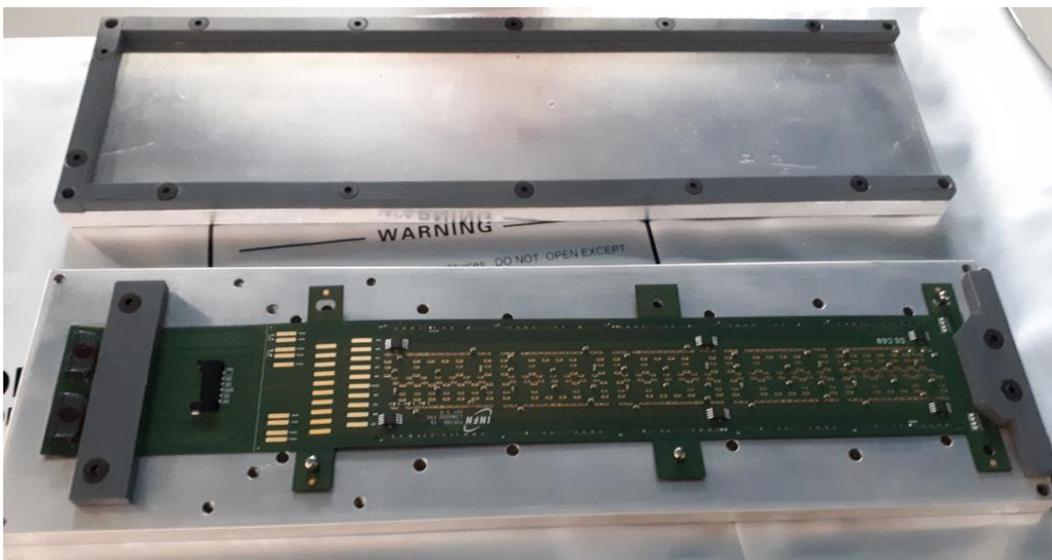


Figura 3. 11: Box di trasporto/test dell'HIC

Funzionamento del box

Finito il periodo di polimerizzazione della colla e successivamente alle operazioni di misurazione effettuate tramite CMM, che si ricorda essere l'ultimo step della fase di assemblaggio dell'HIC, tramite l'utilizzo dell'*holder* è possibile rimuovere l'HIC dal *Chip_Assembly_JIG* e posizionarlo sulla base del box. Una volta in posizione, si disattiva il vuoto dall'*holder* e quest'ultimo può essere allontanato. Segue il fissaggio delle alette dell'FPC tramite l'utilizzo di tape adesivo di kapton, per centrare correttamente l'HIC sulla base, ed è dunque possibile avvitare i tre fermi (anteriore, centrale e posteriore) alla base tramite apposite viti.

Infine, è possibile inserire ed avvitare il coperchio, precedentemente montato avvitando i distanziali plastici alla cover metallica, sulla base sottostante.

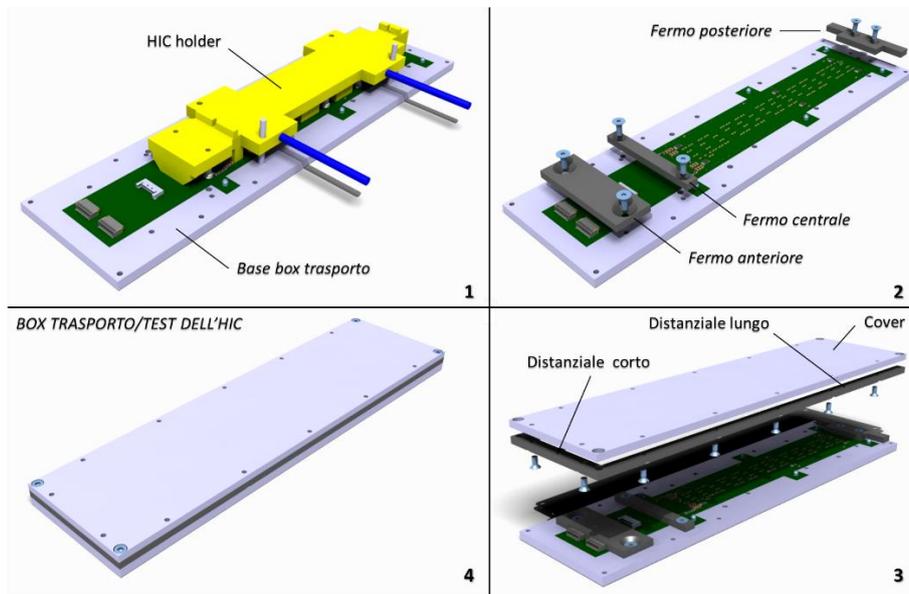


Figura 3. 12: Funzionamento del Box di trasporto/test dell'HIC

3.8 Attrezzatura per l'operazione di Wire Bonding

L'operazione di bonding consiste nella creazione di collegamenti elettrici tra FPC e chip, effettuati tramite microfilari in rame (per maggiori dettagli, 1.4.5).

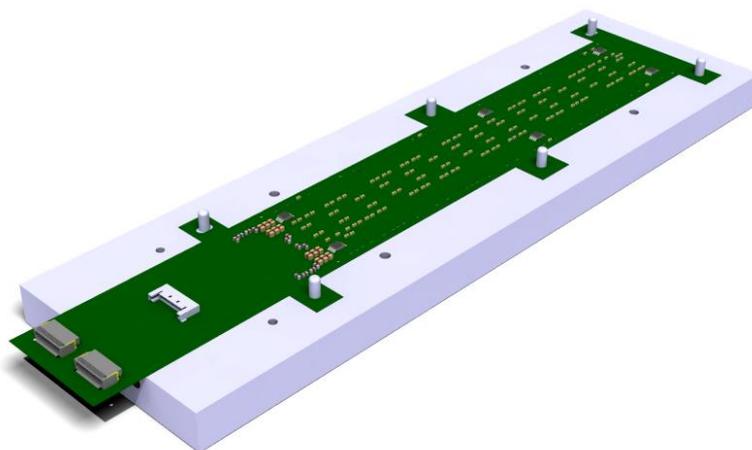


Figura 3. 13: Base per l'operazione di wire bonding

La saldatura viene effettuata su una postazione, la **Base_for_Wire_Bonding**, provvista di fori per l'inserimento di spine, responsabili del corretto posizionamento dell'HIC su di essa. Inoltre, sulla base è integrata una circuiteria di vuoto, per tenere l'HIC in posizione durante la delicata operazione di wire bonding.

3.9 Attrezzatura per il taglio di alette/tab

Come accennato nel 1.4.2, il circuito stampato flessibile è provvisto di sei alette forate che permettono il posizionamento dell'FPC, tramite l'utilizzo di spine metalliche, ed un *tab*, che contiene diversi componenti elettronici.

Dunque, una volta incollato l'FPC sui chip ed aver effettuato l'operazione di bonding, prima di procedere con l'incollaggio dell'HIC sullo stave meccanico, bisogna effettuare l'operazione di taglio di alette e tab dal circuito stampato.

Dopo l'assemblaggio dell'HIC e la procedura di *wire bonding*, tramite un'apposita strumentazione progettata ad hoc, si effettua il taglio di alette e tab. Tale strumentazione è necessaria per effettuare un taglio preciso e tenere l'HIC fermo per sottoporlo a minore stress possibile causato dalla procedura di taglio. Si ricorda che i chip il silicio da 50 micron incollati all'FPC sono molto fragili, per cui l'HIC è un oggetto estremamente delicato che deve essere maneggiato con molta cautela. Successivamente alla procedura di wire bonding, l'oggetto risulterà ancora più fragile poiché la rottura di un certo numero di *bond* comprometterebbe il corretto funzionamento dell'intero HIC.

Progettazione meccanica

Per guidare l'operatore durante la delicata fase di taglio, è stato pensato e progettato il **Tab/wings_Cut_JIG**, costituito dai seguenti componenti:

Base for chip side (DRAWING _1008_CJ_1).

Trattasi di una base rettangolare in ALCAPLUS anodizzato, di dimensioni pari a 220x70mm e dello spessore di 8mm. È provvista di diversi fori:

- fori Ø3 H7 per l'inserimento di spinette metalliche di centraggio, per il corretto posizionamento dell'HIC su questa base;
- fori Ø3 H7 per l'inserimento di spine metalliche, di lunghezza pari a 30mm, che fungono da guida per il posizionamento dell'HIC_holder sull'HIC;
- fori longitudinali Ø5 + fori Ø1, perpendicolari ai primi, che costituiscono parte del circuito di vuoto integrato sul componente.

Base for cutting (DRAWING _1008_CJ_2).

Trattasi di una base rettangolare in ALCAPLUS anodizzato, di dimensioni pari a 220x70mm e dello spessore di 8.5mm. È provvista di diversi fori:

- fori Ø3 H7 per l'inserimento di spinette di centraggio;
- fori filettati per l'accoppiamento con il *Knife insert* (descritto in seguito);
- fori longitudinali Ø5 + fori Ø1, perpendicolari ai primi, che costituiscono parte del circuito di vuoto integrato sul componente.

La superficie superiore di tale componente ha una geometria complessa, ottenuta tramite processo di fresatura, dovuta alla presenza dei componenti elettronici saldati sulla superficie superiore dell'FPC, superficie che andrà in battuta con la basetta in questione. Dunque, è stato indispensabile creare tasche apposite, della profondità di 2,5mm, per escludere eventuali problemi legati ad interferenze. La superficie non fresata è provvista dei fori per il circuito di vuoto.

Inoltre, in prossimità delle zone di taglio, sono stati previsti degli scassi molto sottili, dello spessore di 0,5 mm e profondi 2mm. In questo modo, nel momento in cui l'operatore effettua l'operazione di taglio di alette e tab per mezzo di un bisturi, la lama di quest'ultimo scorre all'interno delle asole sopra citate che fungono da guida per l'esecuzione di un taglio rettilineo e preciso.

Knife insert

Inserto in ANTICORODAL anodizzato che assolve alla duplice funzione di tenere in posizione, per schiacciamento, alette e tab durante la fase di taglio e guidare (assieme alle asole create sulla base) la corsa del bisturi durante il taglio.

L'inserto è costituito da tre parti differenti:

- ***Knife insert dx*** (DRAWING _1008_CJ_3)

Barra di dimensioni 220 x 9,5 mm e dello spessore di 5mm, provvista di fori passanti per il posizionamento e l'avvitamento della barra sulla base per il taglio ed altri fori, Ø3 H7 + foro filettato M3, rispettivamente per corretto posizionamento e accoppiamento del *knife insert dx* con il *knife insert tab*.

- ***Knife insert sx*** (DRAWING _1008_CJ_4)

Componente simile a quello descritto precedentemente.

- ***Knife insert tab*** (DRAWING _1008_CJ_5)

Componente in ANTICORODAL anodizzato che, accoppiato alle altre due parti dell'inserto tramite spine di posizionamento e viti M3, permette di ottenere il *knife insert* come componente unico.

La decisione di scindere l'inserto di taglio in tre particolari differenti, successivamente accoppiati tra di loro, deriva da una scelta di "buon senso" dal punto di vista della realizzazione del pezzo in officina meccanica.

Se l'inserto fosse stato realizzato come pezzo unico, si sarebbe dovuti partire da un grezzo rettangolare, scavato per quasi tutto il suo volume centrale: questa scelta avrebbe causato, oltre ad un inutile dispendio di materiale, la nascita di deformazioni residue dovute alle lavorazioni di asportazioni del materiale e causate dalla particolare geometria del componente in questione (spessori e larghezze ridotte, a fronte di una lunghezza considerevole).

Funzionamento JIG

La seguente figura schematizza la procedura di taglio delle alette e del tab eseguita sull'FPC, tramite l'utilizzo di bisturi e apposito jig.

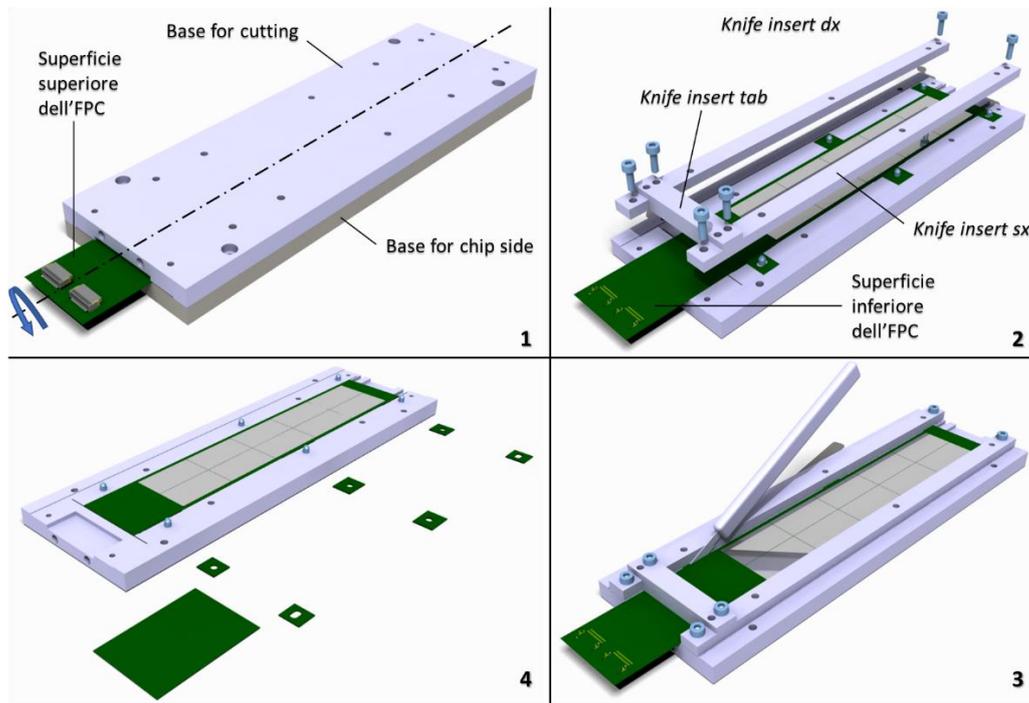


Figura 3. 14: Procedura di taglio di alette e tab

La procedura comincia con il posizionamento, tramite *HIC holder*, dell'HIC sulla *base for chip side* (il centraggio è garantito tramite l'utilizzo di spine metalliche). Una volta appoggiato l'HIC, si disattiva il vuoto dell'holder e si attiva quello della base, in modo tale da tenere l'HIC in posizione sulla base metallica. A questo punto è possibile rimuovere delicatamente sia l'holder che le spine. Dopo la chiusura del jig, tramite l'accoppiamento delle due basi metalliche, segue il capovolgimento, la disattivazione del circuito di vuoto integrato sulla *base for chip side*, l'attivazione del vuoto integrato sull'altra base e l'allontanamento della *base for chip side*.

Alla fine di questa procedura preliminare, si ottiene l'HIC capovolto, appoggiato dalla superficie superiore dell'FPC alla sottostante *base for cutting* e tenuto in posizione tramite il vuoto. La procedura di capovolgimento appena descritta è molto importante in quanto, in assenza di essa, il taglio dell'FPC sarebbe stato eseguito con l'HIC appoggiato alla base sottostante (*base for chip side*) tramite il contatto con i chip: il taglio avrebbe potuto instaurare delle forze di schiacciamento tali da portare alla rottura di uno o più rivelatori in silicio.

Seguono il montaggio del *knife insert* sulla base tramite collegamenti filettati (in tal modo si tengono schiacciate le parti che dovranno essere eliminate) e la fase di taglio vera e propria, di alette e tab, tramite lama di bisturi: la lama seguirà le asole lavorate sulla *base for cutting* e ciò comporterà un taglio preciso e sicuro. Una volta effettuato il taglio di tutte le parti, si prosegue con lo smontaggio degli inserti, il capovolgimento dell'HIC, la presa di questo tramite holder e lo stoccaggio in appositi box, in attesa della successiva fase di incollaggio sullo stave meccanico.

3.10 Attrezzatura per l'assemblaggio dello STAVE MECCANICO

Come descritto nel 1.4.6, lo stave meccanico è composto dai due blocchetti terminali ed il *cold plate* in fibra di carbonio, incollati tramite uno strato di Masterbond EP37-3FLFAO, dello spessore di 100 micron.

L'assemblaggio dello stave meccanico comincia con l'inserimento e l'incollaggio delle spine in titanio sui blocchetti. Queste hanno un'importanza fondamentale all'interno del progetto, essendo i riferimenti dei blocchetti per tutti i jig delle successive fasi di assemblaggio (stave meccanico, stave, torretta e tracker). L'inserimento delle spine, così come le successive manipolazioni dei blocchetti, vengono effettuate dall'operatore munito di guanti, per evitare di danneggiare l'anodizzazione a pori aperti applicata sui blocchetti terminali in alluminio.



Figura 3. 15: Incollaggio delle spine in titanio nel blocchetto terminale

Inoltre, il CP è sottoposto ad un'ulteriore lavorazione: per garantire l'isolamento elettrico tra CP e HIC soprastante, si applica uno strato di ARALDITE 2011 dello spessore di 100 μm sulla superficie superiore della parte piatta lasciando scoperti 5mm, sia anteriormente che posteriormente, per l'incollaggio dei fili di messa a terra dei *cold plate*. Infatti, i fili di messa a terra (2 fili/CP) collegano i CP al frame sottostante, dotato di un'inerzia maggiore rispetto ai componenti in fibra di carbonio. Inoltre, è stato deciso di lasciare indipendenti la messa a terra dei CP dalla messa a terra dei blocchetti terminali in alluminio.

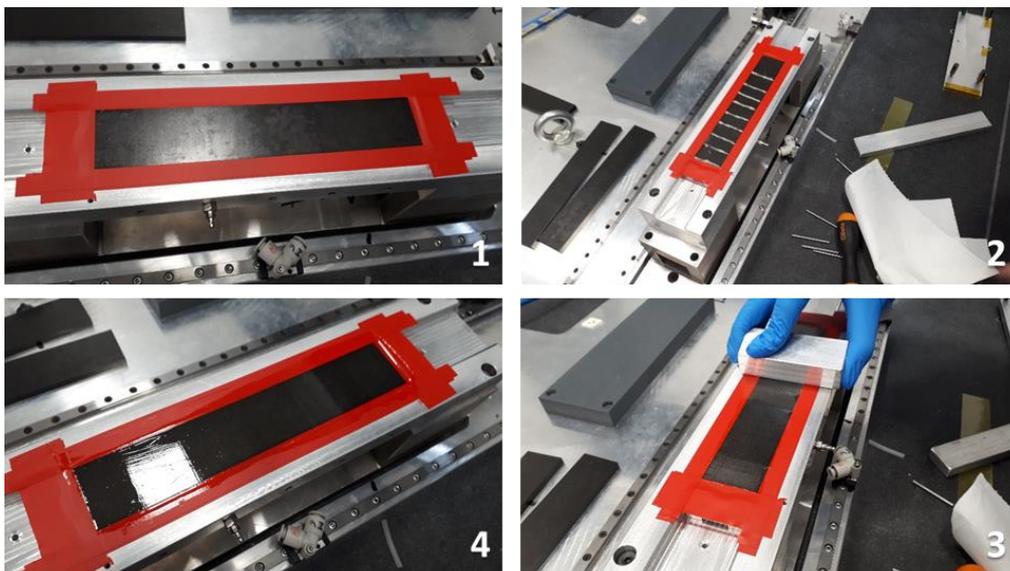


Figura 3. 16: Apporto dello strato di colla sul CP per l'isolamento elettrico

Questa operazione è eseguita sullo *Stave_Assembly_JIG*, discusso nel seguente 3.11, posizionando il CP su tale base per mezzo di due blocchetti terminali “dummy”, utilizzati per il corretto centraggio del CP. Due strati di tape di kapton, dello spessore di 50 micron ciascuno, sono posizionati ai quattro lati del CP per garantire uno strato di colla di 100 micron costante lungo tutta la superficie piatta. Una volta posizionate le linee di colla sul CP, utilizzando un blocco metallico si stende uniformemente la colla lungo tutto il CP. Una volta steso lo strato, i tape di kapton vengono rimossi e il CP viene stoccato per la completa polimerizzazione (3 giorni). Infine, tramite CMM, viene eseguita un’analisi metrologica in 13 punti del CP, per verificare l’uniformità dello spessore di colla apportato.

Successivamente, il *cold plate* dovrà essere incollato in maniera molto precisa sui blocchetti, rispettando stringenti criteri di:

- Posizionamento lungo l’asse Y, in quanto tra la superficie utile di incollaggio dei blocchetti e la distanza interna delle venature laterali del CP, vi è un gioco di circa 0,1 mm. Dunque, se l’incollaggio di uno degli stave della torretta non fosse centrato lungo Y, ci potrebbero essere fenomeni di interferenza tra CP di torrette adiacenti.
- Planarità sul piano XY, che risulta essere uno dei fattori determinante per la fisica dell’esperimento, in quanto permette una corretta acquisizione dei dati da parte di chip appartenenti allo stesso stave e dunque operanti sulla medesima coordinata Z (con un dato errore di tolleranza ammesso).

Progettazione meccanica

Per guidare al meglio l’operatore durante la procedura di assemblaggio dello stave meccanico, rispettando al contempo i requisiti di precisione sopra esposti, è stato progettato lo ***Stave_Mechanics_Assembly_JIG*** composto da:

Base for endblocks (DRAWING_1008_SM_1).

Trattasi di una base rettangolare in ALCAPLUS anodizzato, di dimensioni pari a 300x100 mm e dello spessore di 12mm, dotata di inserti in teflon allocati in apposite tasche. Il teflon è stato inserito in prossimità delle due zone di incollaggio tra *cold plate* e blocchetti, per evitare che eccessi di colla provochino sbavature e conseguentemente incollaggi indesiderati tra i blocchetti e la base in questione.

La base è provvista di quattro fori $\varnothing 3$ H7 e altrettanti fori filettati M2,5 rispettivamente per il centraggio (tramite spine metalliche) e l’avvitamento (tramite collegamenti filettati) dei blocchetti ad essa. Inoltre, il componente in questione presenta sei fori $\varnothing 3$ H7 per l’inserimento di spine metalliche che fungono da guida durante l’operazione di sovrapposizione del CP sui blocchetti. Tale accorgimento consente di rispettare il primo requisito di corretto posizionamento del *cold plate*, lungo l’asse Y. Infatti, in sede di progetto è stata imposta una tolleranza di 0.05mm sulla quota di interasse tra le due file di spine, il che limita l’errore di posizionamento derivante dal gioco discusso prima. Infine, la base è provvista di dieci fori M5 per l’avvitamento del *gluing mold* su di essa.

Gluing_Mold (DRAWING_1008_SM_2).

Componente in ALCAPLUS anodizzato, di dimensioni pari a 192x70 mm, dello spessore di 17.5 mm e provvisto di fori con lamatura per l'inserimento di viti M5. Il pezzo ha una forma a C ed è stato progettato in modo tale da funzionare per tenere premuto il CP sui blocchetti, durante il periodo di polimerizzazione della colla, e allo stesso tempo, garantire uno spessore di colla tra cold plate e blocchetti costante e pari a 0.1 mm. Quest'ultima richiesta è stata rispettata in fase di progettazione, scegliendo un'opportuna quota (e relativa tolleranza) circa il valore di profondità della tasca centrale. La scelta del materiale, ALCAPLUS, è dettata dall'esigenza di rispettare il secondo requisito di corretto posizionamento del *cold plate*, circa la planarità nel piano XY della superficie in fibra di carbonio; per questo motivo il componente dovrà rispettare determinati valori di planarità e rugosità delle superfici adibite al contatto con la base (A) e con il *cold plate* (B).

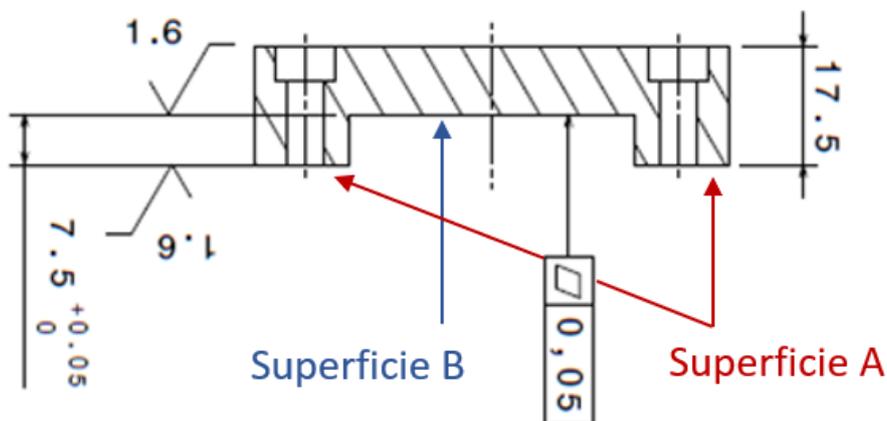


Figura 3. 17: Particolare sulle superfici del *Gluing_Mold*

Per quanto riguarda A, superficie esterna del grezzo di partenza in ALCAPLUS, non avrà bisogno di ulteriori lavorazioni di rettifica (vedi *Paragrafo_3.1*).

Invece, prendendo in considerazione la superficie B, successivamente alla lavorazione di fresatura per ottenere la tasca centrale, tale superficie dovrà essere sottoposta ad operazioni di finitura superficiale atti ad ottenere una planarità pari a 0.05 mm ed una rugosità di 1.6.

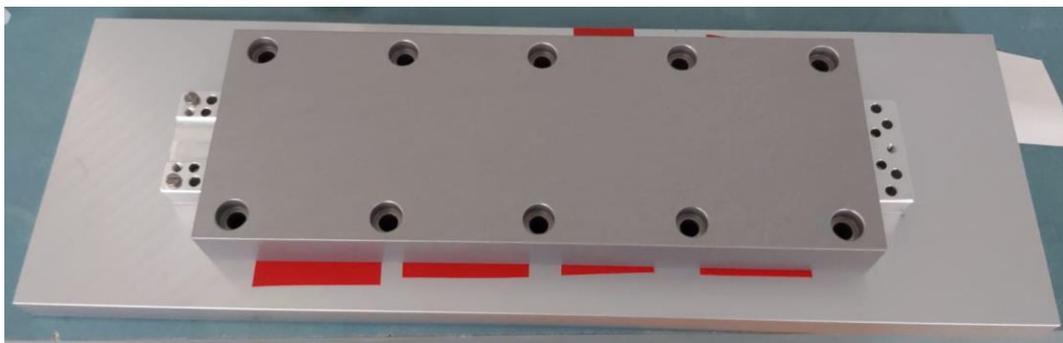


Figura 3. 18: Messa a punto dello *Stave_Mechanics_Assembly_JIG* (inserimento di tape di kapton per assicurare il contatto)

Funzionamento JIG

La procedura di assemblaggio dello stave meccanico comincia con il posizionamento, tramite apposite spine metalliche, dei due blocchetti terminali (anteriore e posteriore) sulla base del jig, il bloccaggio a questa tramite viti e l'inserimento delle spine metalliche che fungeranno da guida per il corretto posizionamento del CP sui terminali in alluminio.

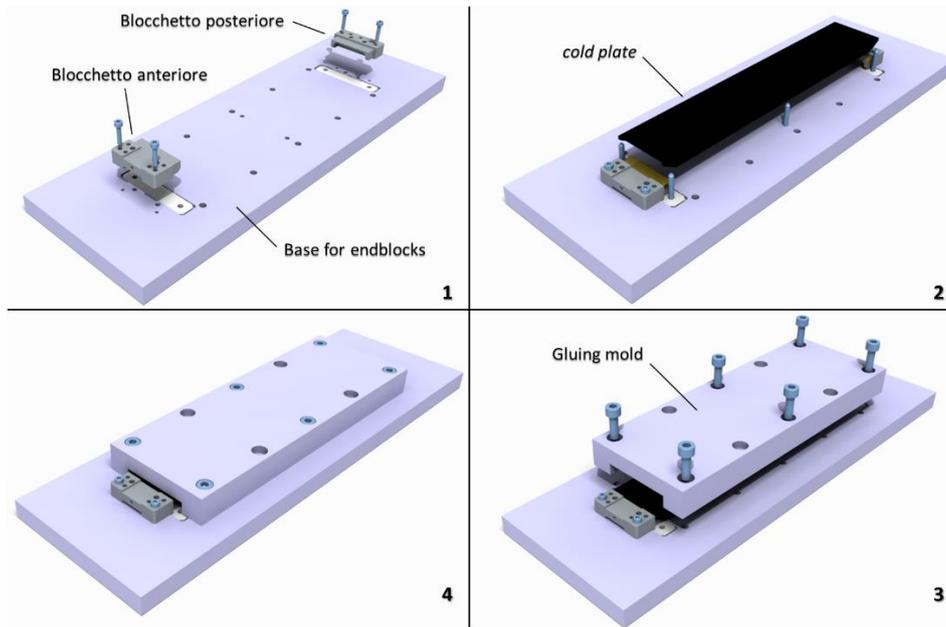


Figura 3. 19: Procedura di assemblaggio dello stave meccanico

Segue l'applicazione della resina Masterbond EP37-3FLFAO, precedentemente preparata, sulle tre facce interessate dei blocchetti (evidenziate in Figura 3. 20).

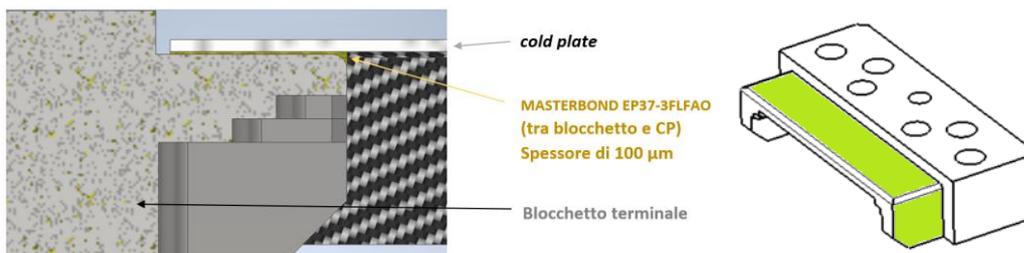


Figura 3. 20: Focus sullo strato di colla tra CP e blocchetto (sinistra) / Superfici interessate dall'incollaggio con il CP (destra)

La manipolazione manuale del *cold plate* è guidata dalle spine e, una volta posizionato sui blocchetti, bisogna effettuare una leggera pressione. Il passaggio successivo consiste nell'inserimento e nell'avvitamento del *Gluing Mold* alla base. Segue la fase di polimerizzazione della colla (si lascia riposare per circa 16 h). Passato il tempo di polimerizzazione, è possibile smontare e rimuovere il *mold*, svitare i blocchetti dalla base ed ottenere dunque lo stave meccanico finito.

Prima di effettuare lo storage dei componenti realizzati, in attesa della fase successiva, è buona norma verificare il pre-assemblaggio della torretta e dunque la corretta sovrapposizione degli stave meccanici.

3.11 Attrezzatura per l'assemblaggio dello STAVE

A questo punto della produzione si ha l'HIC bondato, sprovvisto di alette e tab, e dunque pronto per essere incollato sullo stave meccanico. La colla utilizzata per il fissaggio dell'HIC sullo stave meccanico è la stessa utilizzata per l'incollaggio dell'FPC sui chip; trattasi di colla epossidica bicomponente Araldite 2011.

Tale operazione è svolta all'interno del volume di lavoro della CMM in quanto sono richiesti il corretto posizionamento e relativo incollaggio dell'HIC sul CP, e un successivo rilievo metrologico per la misura finale delle posizioni nominali dei chip.

Progettazione meccanica

Per la corretta esecuzione di questa fase molto delicata, è stato progettato lo **Stave_Assembly_JIG**, costituito dai seguenti componenti:

Stave_Alignment_Base (DRAWING_1008_M9)

Trattasi di una postazione in ALCAPLUS anodizzato, provvista di quattro fori $\varnothing 6$ per l'inserimento di viti che bloccano tale base al piano di lavoro della CMM. Il componente è progettato in modo tale da permettere il posizionamento e la tenuta dello stave meccanico. Il contatto tra quest'ultimo e la base si trova unicamente nella faccia inferiore del *cold plate* (non vi è contatto con i blocchetti).

Sulla postazione è stato effettuato uno scasso in prossimità dei blocchetti e delle venature laterali del CP ed un'estrusione centrale che funge da superficie d'appoggio per la parte piatta del CP che, per tale motivo, deve rispettare stringenti valori di planarità, imposta in fase di disegno tramite tolleranze geometriche. Sono previsti appositi fori per l'integrazione di un circuito di vuoto che tiene in posizione lo stave meccanico durante l'operazione di incollaggio dell'HIC su di esso. Inoltre, vi sono quattro fori $\varnothing 3$ H7 per l'inserimento di spine metalliche che permettono il corretto posizionamento dei blocchetti e dunque dello stave meccanico sulla base, sei fori $\varnothing 3$ H7 per l'inserimento di spine di centraggio d3x6mm delle maschere per la colla, quattro fori $\varnothing 3$ H7 per l'inserimento di spine di posizionamento dell'*HIC holder* (tali spine, di lunghezza adeguata, fungono da guida durante l'operazione di avvicinamento dell'HIC al CP sottostante) e due fori $\varnothing 3$ H7 utilizzati dal *part program* stilato sulla CMM per la creazione del sistema di riferimento dello stave che ha lo scopo di assistere l'operatore durante lo svolgimento della fase in questione (vedi 4.5).

Infine, la base presenta quattro fori filettati M3 per l'avvitamento di due inserti, chiamati *Fine_Alignment_Tool*, discussi in seguito.

Fine Alignment Tool (DRAWING_1008_M5)

Inserti in ANTICORODAL anodizzato, di forma complessa, che si avvitano sulla *Stave_Alignment_Base* in prossimità delle due estremità dello stave meccanico.

Tali componenti, lungo le direzioni X e Y del sistema di riferimento dello stave, presentano dei fori filettati per l'inserimento di viti che, premendo contro l'*holder*, permettono di correggere il posizionamento relativo dell'HIC sul CP sottostante.

HIC_holder (DRAWING_1008_C13)

Apposito *holder* utilizzato per la movimentazione dell'HIC dopo il processo di *wire bonding*. Come discusso precedentemente, il problema principale dell'operazione di bonding risiede nell'estrema fragilità dei microfilamenti in rame che collegano FPC e chip sottostanti. Per questo motivo sono richieste attenzione e precisione durante le fasi di manipolazione dell'HIC. Nasce dunque la necessità di progettare un *holder* che, prendendo l'HIC dalla superficie superiore, non vada in interferenza con nessuno dei microfilamenti in rame: la superficie di presa dell'*holder* (che andrà in battuta con la superficie superiore dell'FPC) ha una forma complessa che gli permette di appoggiarsi unicamente nelle porzioni libere della superficie.

Inoltre, l'*holder* è provvisto di ventose che, integrate ad un opportuno sistema di vuoto, consentono la presa e la movimentazione dell'HIC. A differenza degli *holder* presentati precedentemente (*FPC_holder* e *mask_holder*), che si servivano di appositi fori per l'applicazione del vuoto sui componenti da movimentare, in questo caso si è deciso di utilizzare delle ventose per due motivi differenti:

- superficie di presa/appoggio limitata a causa della geometria dell'*holder*;
- peso dell'HIC non irrisorio, di circa 8 g.

Infine, lo strumento è provvisto di pivot laterali che fungono da maniglie di presa.

Maschere per incollaggio 1 (*stave_glue_mask_1*)

Maschera che permette l'applicazione della colla (ARALDITE 2011) in apposite zone definite "finestre di colla", una per ogni rivelatore in silicio + due finestre aggiuntive, A e B, per l'incollaggio delle porzioni anteriore e posteriore dell'FPC (che non hanno i chip sotto) al *cold plate*. I due slot aggiuntivi servono per aumentare l'adesione tra FPC e CP nelle zone terminali del circuito flessibile, in particolare la zona anteriore corrispondente al *tab*, adibite ad operazioni di saldatura per il fissaggio di cavi e altri componenti elettronici ed evitare la nascita di eventuali stress che potrebbero gravare sui rivelatori in silicio.

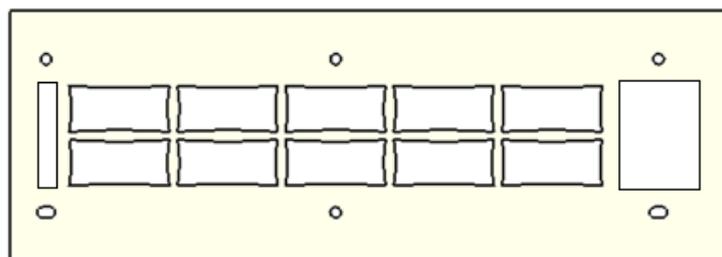


Figura 3. 21: Maschera 1 per l'incollaggio dell'HIC sullo stave meccanico

La colla, grazie allo spessore della maschera di 0,1 mm, una volta spatolata avrà uno spessore uniforme di 100 micron. Inoltre, le "finestre" della maschera sono state dimensionate in modo tale da evitare che la colla, una volta schiacciata dall'HIC soprastante, si allarghi e sbordi fuori dalla superficie del chip.

Nell'eventualità in cui la colla, uscendo fuori dalla superficie tra chip e *cold plate*, si infiltrasse tra due o più chip adiacenti, durante il periodo di polimerizzazione della colla potrebbero verificarsi delle tensioni (legate a trazioni e/o contrazioni) che genererebbero fratture indesiderate nei chip.

Maschere per incollaggio 2 (*stave_glue_mask_2*)

Maschera che permette l'applicazione della colla (ARALDITE 2011) nelle due finestre di colla, denominate A e B, per l'incollaggio delle porzioni anteriore e posteriore dell'FPC al *cold plate*. Questa maschera, dello spessore di 100 micron, viene sovrapposta alla prima in modo tale da ottenere due strati di colla in A e B dello spessore totale di 200 micron. Infatti, sotto queste due porzioni di FPC non si trovano i chip, dello spessore di 50 micron, e la colla di incollaggio chip-FPC, anch'essa dello spessore di 50 micron. Di conseguenza, in queste due zone, la distanza tra *cold plate* ed FPC soprastante risulta essere pari a 200 micron e dunque si necessita di uno strato di colla doppio rispetto a quello richiesto per l'incollaggio tra chip e *cold plate* sottostante.

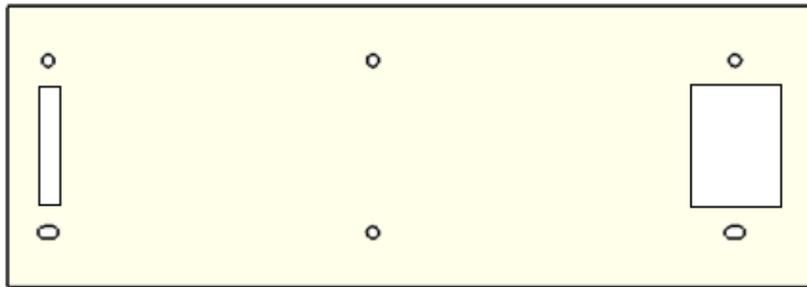


Figura 3. 22: Maschera 1 per l'incollaggio dell'HIC sullo stave meccanico

Funzionamento JIG

Il primo step della procedura in esame consiste nel posizionamento manuale dello stave meccanico sulla postazione, tramite l'utilizzo delle spine di centraggio (due per il blocchetto terminale anteriore e due per quello posteriore).

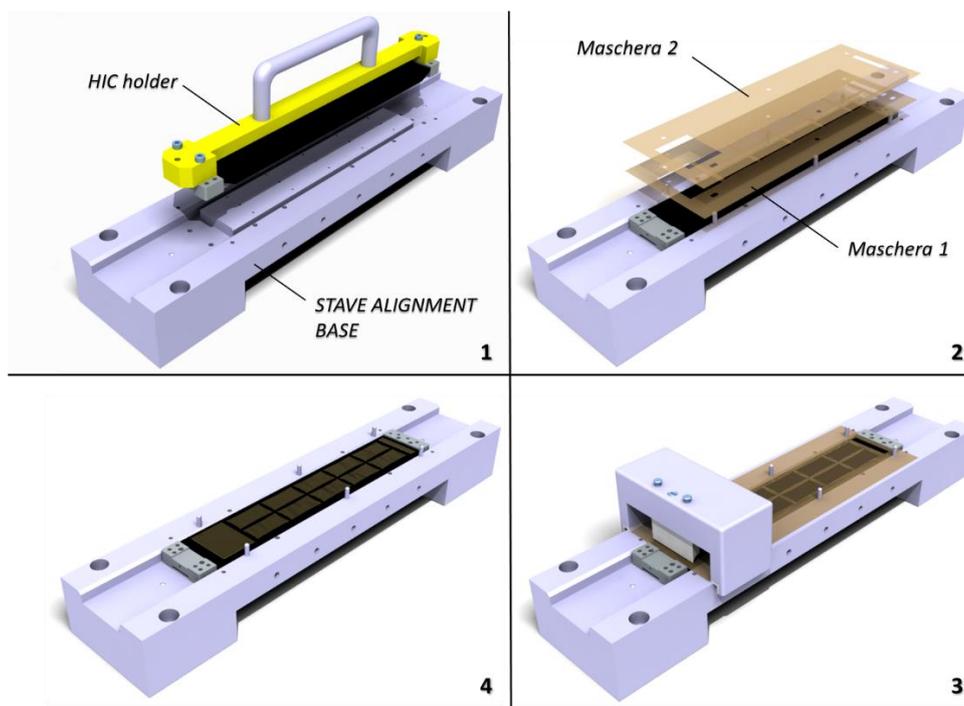


Figura 3. 23: Posizionamento della colla sullo stave meccanico

Segue il posizionamento manuale e il fissaggio delle maschere, tramite le spine metalliche di centraggio, sul *cold plate* (la maschera 1 in basso e la 2 sopra di essa). Così facendo si hanno due slot liberi, A e B, su cui posizionare e stendere in modo uniforme uno spessore di $100 + 100 = 200 \mu\text{m}$ di colla. A questo punto è possibile rimuovere la seconda maschera, stendere lo spessore di $100 \mu\text{m}$ di colla sulle dieci finestre relative ai dieci chip (facendo attenzione a non passare sugli slot di colla precedentemente stesi) e quindi rimuovere anche la prima maschera.

Prima di effettuare la rimozione delle maschere 1 e 2, si esegue un'attenta ispezione ottica per verificare che tutte le tasche della maschera siano state riempite con il giusto spessore di colla; in caso contrario bisogna stendere dell'altra colla e ripetere il processo. Si ottiene dunque il *cold plate* provvisto delle apposite finestre di colla e pronto per l'operazione di incollaggio vera e propria.

Il secondo step consiste nella fase di posizionamento e corretto centraggio dell'HIC (movimentato tramite apposito holder) sul CP dello stave meccanico sottostante. L'operazione consiste nel posizionare l'*HIC holder*, guidato da apposite spine fissate sulla base. Segue la rimozione delle spine per svincolare l'holder dalla base sottostante e l'operazione di correzione della posizione dell'HIC per mezzo dei due tool di allineamento, effettuata tramite la macchina di misura.

Durante lo svolgimento del secondo step, l'operatore è guidato da un apposito programma stilato sulla CMM (vedi 4.5) che permette di posizionare correttamente l'HIC (i marker visibili attraverso i fori dell'FPC devono trovarsi, a meno di piccoli errori di posizionamento, in determinate coordinate nominali).

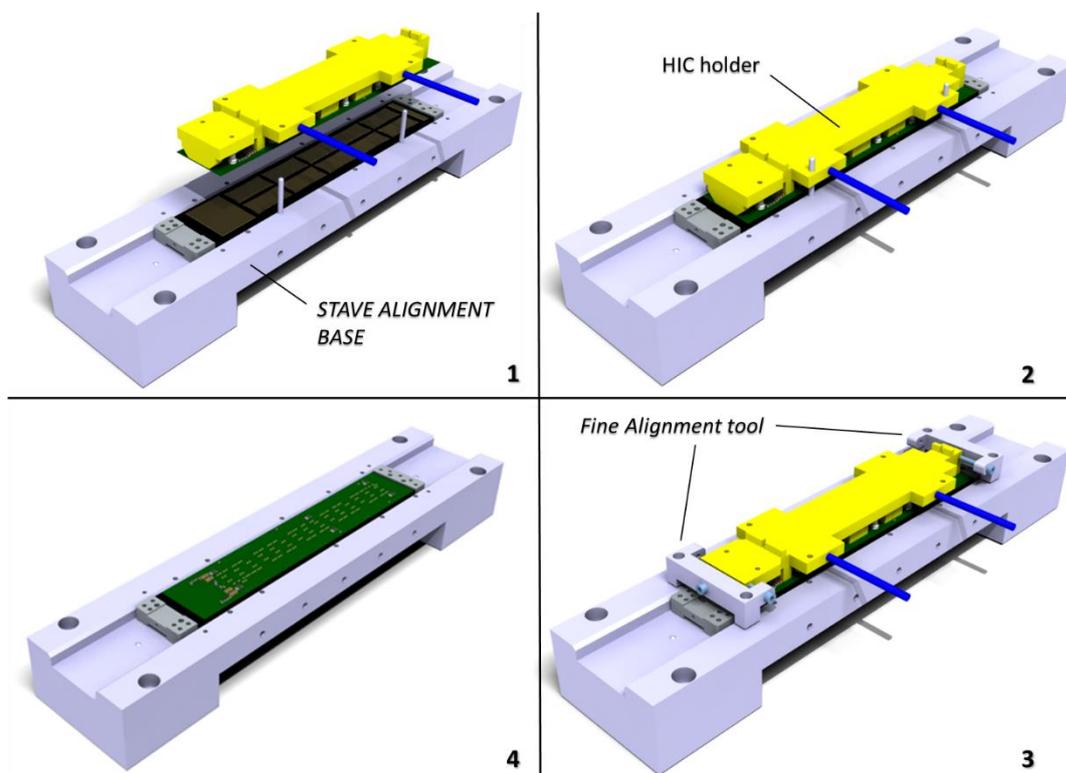


Figura 3. 24: Procedura di assemblaggio dello stave

Una volta soddisfatti del posizionamento, si lascia l'holder sull'HIC e si aggiunge un peso extra di circa 200 g. Dunque, si lascia polimerizzare la colla a temperatura ambiente per circa 18-24h. Trascorso il periodo di polimerizzazione, è possibile riporre lo stave, tramite holder dedicato, nell'apposito box di storage.

Successivamente, gli stave prodotti vengono sottoposti a test di qualifica, ed infine si effettua l'operazione di saldatura dei 15 fili di collegamento tra HIC e TSP.

Inoltre, nella parte anteriore del CP non coperta dallo strato aggiuntivo di Araldite2011 (utilizzato per l'isolamento elettrico), vengono incollati due fili per la messa a terra del CP con una colla conduttiva.

3.12 Box per storage/testing dello STAVE

Una volta prodotto, lo stave deve essere collocato all'interno di scatole adibite allo stoccaggio e all'interfaccia con attrezzature per l'esecuzione di test elettrici.



Figura 3. 25: Stave posizionato sulla base metallica del Box di storage

Progettazione meccanica

La scatola in questione è stata pensata per essere composta da due componenti, una base metallica ed una cover in plastica, di seguito analizzati nel dettaglio:

Base stave test/storage (DRAWING_1008_STS_01)

Basetta in Alcaplus anodizzato, di dimensioni 260x80 mm e spessore pari a 10 mm. È provvista di quattro fori $\varnothing 3.1$ per l'inserimento delle spine metalliche di centraggio, incollate sullo stave: il diametro del foro è stato dimensionato in modo tale da avere del gioco nell'accoppiamento foro-spina ed evitare eventuali impuntamenti che potrebbero portare, durante la fase di manipolazione dello stave, a sollecitazioni responsabili di scollamenti e/o rottura di chip e bond.

Inoltre, la base è provvista di quattro fori filettati M2.5 per l'avvitamento di viti di fissaggio dello stave alla base (sfruttando appositi fori passanti effettuati sui blocchetti terminali), quattro fori filettati M5 per l'inserimento di viti di chiusura del box (accoppiamento tra base e cover) ed infine altri due fori filettati M2.5 richiesti dalle attrezzature dedicate alle successive operazioni di test elettrici.

Cover stave test/storage (DRAWING_1008_STS_02)

Copertura in PVC di forma a C, con dimensioni massime pari a 260x80x20 mm e provvisto di una tasca centrale, passante per tutta la lunghezza dell'oggetto e profonda 13mm. Sul componente sono eseguiti quattro fori passanti $\varnothing 5.5$ + lamatura $\varnothing 10 \times 5$ mm per il passaggio delle viti adibite alla chiusura della scatola.

La tipica forma a C permette la chiusura della scatola solamente nei due lati più lunghi e dunque non si ha una protezione completa per lo stave. Questo non è un problema in quanto gli stave prodotti vengono stoccati all'interno della camera pulita e successivamente impilati per la costruzione della torretta: le scatole, non prevedendo il trasporto dello stave all'esterno del laboratorio, non necessitano di una chiusura totale ma solamente di una protezione dalla caduta accidentale di oggetti dall'alto. Inoltre, con la cover in questione, i box risultano impilabili.

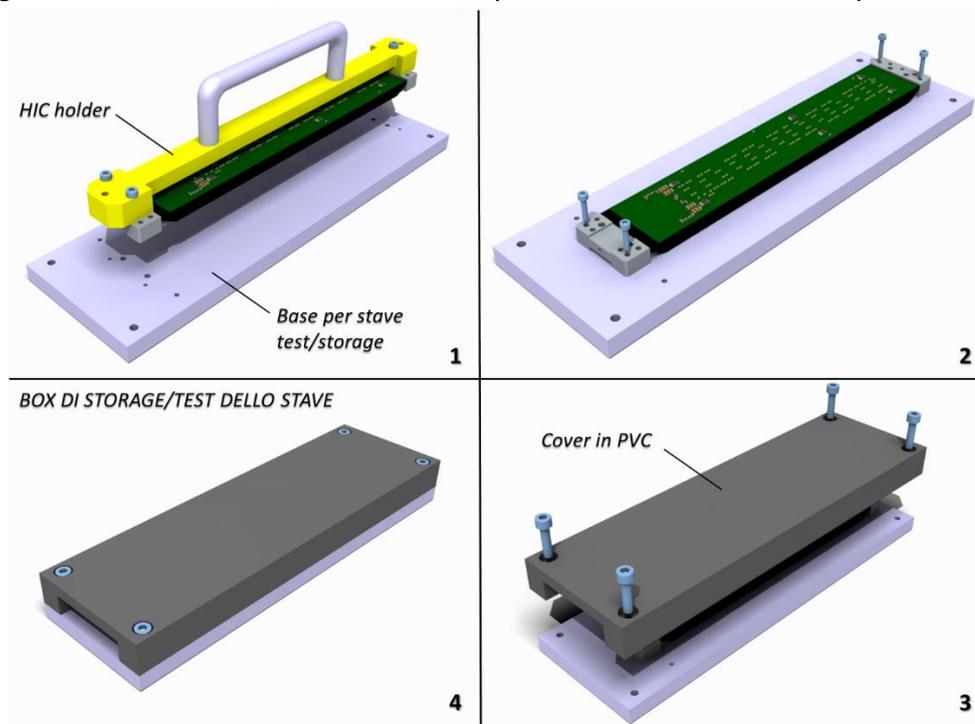


Figura 3. 26: Operazione di storage dello stave nell'apposito box

3.13 Attrezzatura per l'assemblaggio della TORRETTA

La torretta, discussa nel 1.4.9, è composta da tre stave impilati ed accoppiati tramite collegamenti filettati (trattasi di viti M3x20 in titanio), collegati ad una scheda PCB-TSP montata su un'apposita scatola, denominata TSP-box.

Progettazione meccanica

Durante la fase di assemblaggio della torretta, l'operatore deve innanzitutto sovrapporre i tre stave, prestando attenzione alla differenza tra i blocchetti terminali dello stave in alto rispetto a quelli dei due stave sottostanti.

Il corretto posizionamento tra i vari stave è garantito dall'accoppiamento tra le spine in titanio, incollate nella parte inferiore dei blocchetti, ed appositi fori di centraggio eseguiti sulla parte superiore dei blocchetti.

A questo punto nasce l'esigenza di tenere ben saldi i tre stave ed inserire dal basso le viti, passanti per i blocchetti dei due stave sottostanti, che andranno ad avvitarci sui fori filettati presenti sui blocchetti terminali dello stave "top". Per facilitare l'operazione, è stata progettata un'apposita postazione chiamata **Turret_Assembly_JIG**, costituita dai seguenti componenti:

Base (DRAWING_1008_TA_1).

Base rettangolare in ALCAPLUS anodizzato, delle dimensioni di 280x70x6mm.

È provvista di una tasca centrale che, oltre ad alleggerire la struttura, è stata pensata per adattare la base ai successivi test da effettuare sulla torretta (per la fisica del sistema, si ha la necessità di non avere materiale aggiuntivo al di sotto dei tre piani sensibili in silicio). Inoltre, la base metallica è provvista di diversi fori:

- 8 fori Ø3.3 (con lamatura Ø6x3mm) per l'inserimento di viti, per l'accoppiamento dei piedi alla base;
- 4 fori filettati M3, per l'inserimento delle quattro viti della TSP-box;
- 4 fori filettati M3, per l'avvitamento dei due C-Mold alla base;
- 4 fori ciechi Ø3 H7, profondi 3.5mm, per l'inserimento delle spine metalliche incollate sullo stave in basso della tripletta (quello che andrà a contatto con la base in questione) e dunque responsabili del corretto posizionamento della torretta rispetto al JIG;
- 2 fori ciechi Ø3 H7, profondi 3.5mm, per l'inserimento di spine metalliche che fungono da guida durante la fase di posizionamento degli stave, effettuata tramite l'utilizzo di uno *stave_holder*;
- 2 fori ciechi Ø3 H7, profondi 3.5mm, per l'inserimento di spine metalliche che vanno in battuta con la superficie anteriore del blocchetto anteriore;
- 4 fori passanti Ø6 per l'inserimento, dal basso, delle quattro viti in titanio, TCEI M3x20, responsabili dell'accoppiamento meccanico dei tre stave, e dunque della creazione della torretta come oggetto unico. Tali fori sono stati dimensionati in modo tale da permettere il passaggio della testa cilindrica cava esagonale, del diametro pari a 5.5mm.

2x C-Mold (DRAWING_1008_TA_2).

Trattasi di inserti in ANTICORODAL anodizzato, di dimensioni pari a 35x55x13.5mm e di forma a C. Sono provvisti di 2 fori passanti Ø3.3 + lamatura Ø6.5x15mm per l'inserimento di viti che accoppiano tali componenti alla base.

Inoltre, presentano tre fori Ø3.3 + lamatura Ø6.5x3mm per l'inserimento di viti che vanno ad avvitarci su appositi fori filettati presenti nei blocchetti terminali dello stave in alto. Queste viti permettono di tenere ulteriormente in posizione la torretta. Come descritto nel 1.4.4, i blocchetti posteriori ed anteriori presentano una geometria differente. In particolare, i blocchetti anteriori presentano due fori filettati M3 per l'inserimento delle viti sopra discusse, mentre i blocchetti posteriori ne presentano solo uno. I C-Mold sono stati progettati con tutti e tre i fori, per poter essere utilizzati indipendentemente dalla tipologia di blocchetto (anteriore o posteriore).

4x Leg for base (DRAWING_1008_TA_3).

Trattasi di piedi rettangolari per la base, in ANTICORODAL anodizzato, di altezza tale da permettere all'operatore di inserire ed avvitare la vite dal basso.

Sono provvisti di fori filettati M3, per l'inserimento delle viti di accoppiamento con la base. Sono stati progettati con quattro fori per "standardizzare" i piedi, indipendentemente dalla posizione in cui vengono montati rispetto alla base.

Stave holder (DRAWING_1008_H_1).

Apposito holder in ALCAPLUS anodizzato, progettato per la manipolazione dello stave. La presa avviene dall'alto, per mezzo di viti che vanno ad avvitarsi sui fori filettati presenti sulla superficie superiore dei blocchetti in alluminio. Per questo, la superficie inferiore, che andrà in battuta con i blocchetti, deve rispettare determinati parametri di planarità e rugosità superficiale. La parte centrale dell'holder è stata fresata in modo tale da evitare possibili interferenze con la componentistica elettronica saldata sui circuiti flessibili degli stave.

Come descritto precedentemente, i blocchetti anteriori presentano due fori, mentre quello posteriore solo uno. Dunque, l'holder è provvisto di tre fori passanti $\varnothing 3.3$ per l'inserimento di tali viti. Inoltre, è provvisto di altri due fori passanti $\varnothing 3.3$ che fungono da accoppiamento prismatico con delle spine metalliche che permettono il posizionamento e l'avvicinamento guidato dell'holder alla base.

Infine, il componente è provvisto di fori passanti $\varnothing 5.3$ + lamatura $\varnothing 9 \times 5.5$ mm per l'inserimento di una maniglia metallica di presa, montata tramite viti M5.

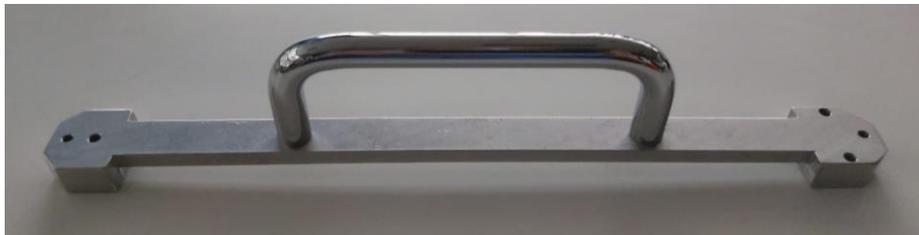


Figura 3. 27: Stave holder realizzato in officina

Funzionamento JIG

L'operazione comincia con la movimentazione e la sovrapposizione degli stave, tramite apposito holder. Bisogna prestare attenzione al giusto posizionamento dello stave "top" rispetto altri poiché, come spiegato precedentemente, vi è una differenza tra i blocchetti "top" e quelli sottostanti per quanto riguarda i fori sui cui andranno ad avvitarsi le viti responsabili dell'accoppiamento dei tre stave e dunque dell'assemblaggio della torretta come componente unico. Dunque, ogni torretta è composta da due stave "non top" e da uno stave "top" soprastante.

Inoltre, durante l'operazione di assemblaggio della torretta, devono essere posizionate, in apposite tasche dei blocchetti dei due stave "non top", le rondelle dentellate in bronzo fosforoso responsabili del collegamento elettrico tra le triplette di blocchetti impilati. In particolare, vengono posizionate due rondelle nei blocchetti anteriori ed una nei blocchetti posteriori.

Segue il montaggio dei due C-Mold alla base per tenere i tre stave ben saldi ed in posizione. Inoltre, i due fermi meccanici spingono le rondelle dentellate all'interno dei due blocchetti terminali (come descritto precedentemente, le rondelle entrano all'interno dell'alluminio per circa $0,2\text{ mm}$ in alto e in basso). A questo punto, si hanno i tre stave accoppiati e si procede con le successive fasi di assemblaggio del TSP-box, collegamento elettrico tramite saldatura dei fili provenienti dall'HIC, saldatura dei tre connettori di connessione con l'esterno e il fissaggio del TSP-box alla base del jig in questione. Infine, una volta eseguiti i test e la qualifica della TSP, è possibile eseguire i test della torretta. Gli stave componenti la tripletta non sono ancora fissati, ma gli arresti meccanici assicurano i movimenti della base per il trasporto e le movimentazioni.

Successivamente alla qualifica della torretta, gli stave devono essere fissati tramite viti in titanio (inseriti ed avvitati dal basso). Le viti devono essere serrate con un cacciavite dinamometrico e con una coppia di serraggio di $1,1\text{ Nm}$. Dopo questo passaggio gli stave vengono bloccati e la torretta è completa; con l'apposito holder può essere riposta nella scatola di trasporto della torretta.

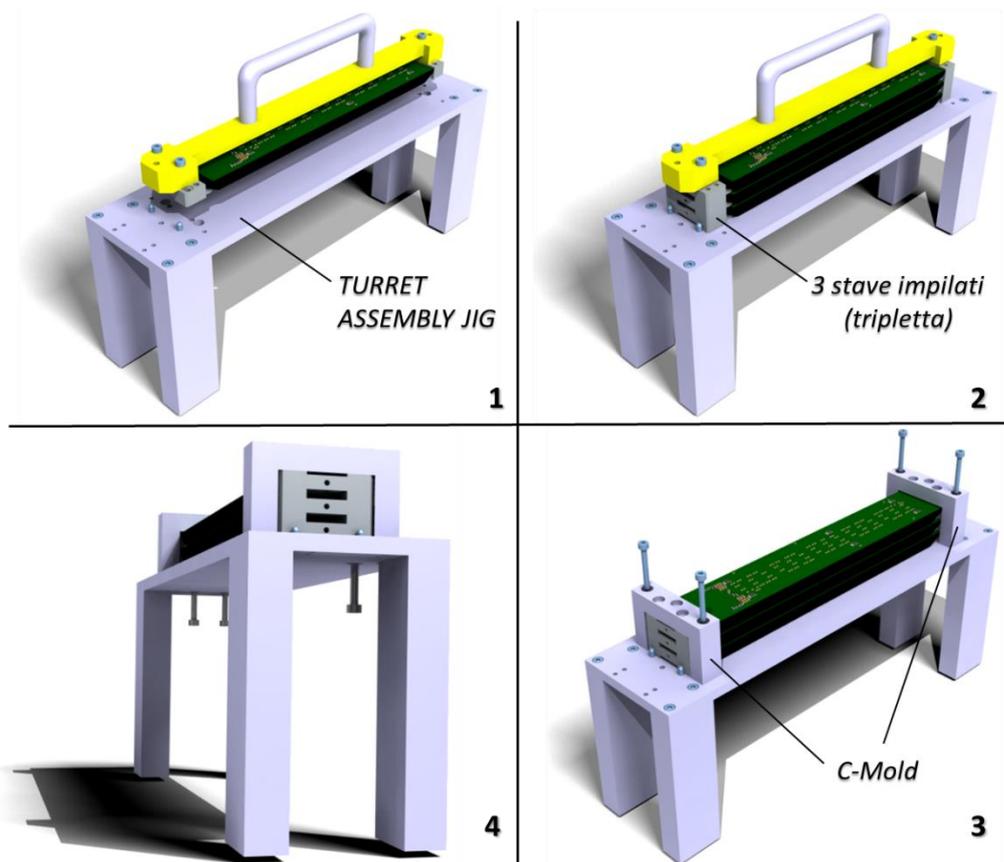


Figura 3. 28: Procedura di assemblaggio della torretta (senza TSP-box)

3.14 Progettazione TSP-box

Nel 1.4.8 è stato detto che la PCB-TSP è l'interfaccia elettrica della torretta. Per lo scopo, è stata appositamente progettata una struttura in alluminio che contenga la TSP e i relativi connettori di connessione con l'esterno.

Progettazione meccanica

Trattasi di un box metallico che, oltre a servire da struttura meccanica per l'allocazione della scheda e dei vari componenti elettrici (con relativi cablaggi), funge da schermo elettromagnetico e da protezione contro polveri e/o materiali indesiderati. La scatola è formata da tre componenti (pannello posteriore, pannello anteriore e cover) in alluminio AW EN 6082 T6 con trattamento Alodine 1200S, accoppiati tra loro tramite l'utilizzo di componenti filettati in titanio.

I pannelli sono stati progettati tenendo in considerazione diversi aspetti, quali:

- Il pannello posteriore, ossia quello più vicino agli stave, deve permettere il passaggio dei fili elettrici, provenienti dagli HIC, che andranno ad essere saldati sulla superficie posteriore della scheda TSP;
- I pannelli (posteriore ed anteriore) devono essere progettati con una geometria tale da garantire una tenuta salda del circuito stampato e allo stesso tempo minimizzare la superficie d'appoggio con la TSP, massimizzando in tal modo la superficie utile della scheda, sulla quale saranno saldati circuiti e componenti elettronici;
- Il pannello posteriore deve presentare una geometria tale da permettere il posizionamento e l'accoppiamento di tre connettori GLENAIR ad esso (devono essere dimensionate apposite tasche e scelta la minuteria);
- L'intero box deve rispettare il criterio di minimizzazione del materiale;
- Il box deve avere dimensioni ridotte, soprattutto lungo la direzione Y, in quanto le torrette verranno posizionate molto vicine le une alle altre.

Di seguito, vengono analizzati nel dettaglio i tre componenti formanti il box:

Back panel (DRAWING_L IM2-CI-1-DES-DD-00-0029)

Componente in alluminio, di dimensioni massime pari a 34.6 x 19 x 89.5 mm.

È stato ottenuto da un pezzo unico, appositamente fresato in modo tale da ottenere tre finestre adibite al passaggio dei fili elettrici provenienti dagli stave e contemporaneamente minimizzare il materiale e massimizzare la tasca centrale, sede dei relativi cablaggi. Il componente è provvisto dei seguenti fori:

- 4 fori filettati M2.5 per l'inserimento di viti di accoppiamento tra back panel e TSP ed altri 4 fori filettati M2.5 per l'avvitamento di viti di accoppiamento tra *back* e *front panel*;
- 2 fori filettati M2 per l'inserimento di apposite viti di supporto del connettore MR7590-21S-1BS (il connettore, pur essendo saldato direttamente sulla PCB-TSP, è tenuto in posizione da viti M2 in titanio);
- 2 fori filettati M3, effettuati sulla superficie superiore del pannello, per l'accoppiamento tra il TSP-box e il *turret holder*;
- 4 fori passanti $\varnothing 3.1$ + lamatura $\varnothing 6.5 \times 3 \text{mm}$ per il passaggio delle quattro viti responsabili del montaggio del TSP-box al *frame* esterno sottostante;
- 2 fori passanti $\varnothing 3.1$ con svasatura $\varnothing 6.5 \times 120^\circ$ per l'inserimento di viti a testa svasata, per l'accoppiamento del pannello posteriore del TSP-box ad una staffa esterna di supporto.

Per quanto riguarda questo ultimo punto, bisogna fare la seguente precisazione: le scatole della TSP, montate a sbalzo sul *lower frame*, hanno una lunghezza considerevole (di circa 90 mm) e dunque necessitano di una staffa esterna di fissaggio. In tal modo si riescono ad evitare eventuali vibrazioni indesiderate che potrebbero portare al distacco e relativa rottura della componentistica saldata sul circuito stampato. Dunque, è stato necessario allungare verso il basso il corpo del pannello posteriore, creando una sorta di appoggio per la staffa di supporto.

Front panel (DRAWING_L IM2-CI-1-DES-DD-00-0030)

Trattasi di una cornice in alluminio, di geometria complessa, appositamente munita di scassi e nervature forate per l'accoppiamento di tale pezzo con gli altri due componenti che compongono il box. Il componente è provvisto di:

- 4 fori passanti $\varnothing 2.7$ + lamatura $\varnothing 4.6$ per il passaggio delle viti di accoppiamento tra pannello posteriore ed anteriore;
- 4 fori filettati M2.5 per il fissaggio delle viti di montaggio della cover;
- Apposite tasche per l'alloggiamento ed il montaggio dei tre connettori di connessione con l'esterno (un connettore 15P sulla superficie superiore del pannello e due, 15S e 21S, sulla superficie inferiore).

Cover (DRAWING_L IM2-CI-1-DES-DD-00-0031)

Lamina rettangolare in alluminio, delle dimensioni pari a 34.6 x 80 mm e dello spessore di 2mm. È provvista di quattro fori svasati passanti, per il passaggio delle viti responsabili dell'accoppiamento meccanico tra la cover ed il pannello frontale.

Fasi di montaggio del TSP-box

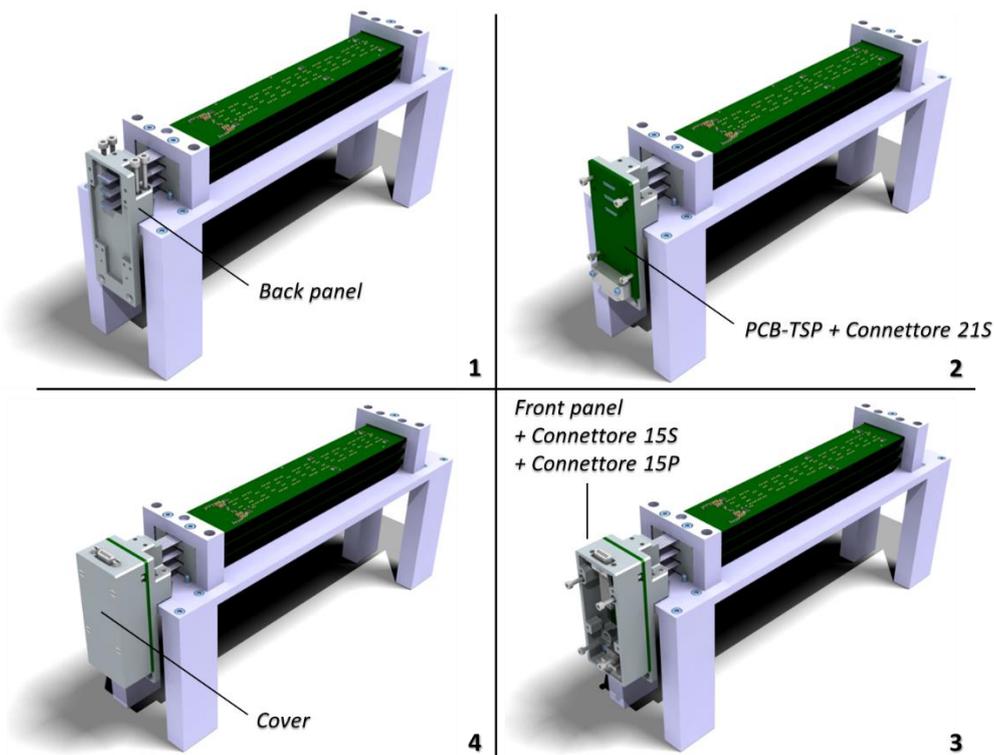


Figura 3. 29: Procedura di assemblaggio del TSP-box

3.15 Box di storage/trasporto della TORRETTA

Una volta prodotte, le torrette devono essere conservate in apposite scatole appositamente progettate per lo storage ed il trasporto in sicurezza delle torrette.

Progettazione meccanica

La scatola, denominata **Turret Storage Box**, è stata pensata come un involucro in plastica, costituito da due componenti (inferiore e superiore), con all'interno una struttura metallica su cui fissare la torretta. Quest'ultima è stata progettata tenendo in considerazione il suo utilizzo durante le successive operazioni di test. Nel seguito, si analizzano nel dettaglio i singoli componenti sopra menzionati:

Turret base (DRAWING_1008_TB_1)

Base metallica in ALCAPLUS anodizzato, di dimensioni pari a 255x70mm e spessore di 6mm. Presenta una tasca centrale che, oltre ad alleggerire la struttura, è stata pensata per adattare la base alle successive operazioni di testing della torretta (per la fisica dell'esperimento, si ha la necessità di non avere materiale aggiuntivo sotto i tre piani sensibili di silicio). È provvista di diversi fori:

- 6 fori passanti $\varnothing 4.3$ per l'allocazione di viti di accoppiamento della suddetta base con l'involucro inferiore in PVC;
- 4 fori ciechi $\varnothing 3.2 \times 4$ mm per il centraggio della torretta tramite le quattro spine metalliche equipaggiate sullo stave inferiore della tripletta (il diametro del foro è stato progettato in modo tale da avere un accoppiamento con gioco foro-spina, permettendo così un centraggio semplice della torretta ed evitando impuntamenti che potrebbero portare a sollecitazioni sui componenti più delicati della torretta, i chip);
- 4 fori filettati M3 per l'accoppiamento, tramite viti, dei C-Mold alla base;
- 4 fori filettati M3 per il montaggio, tramite viti, del TSP-box alla base.

Cover down (DRAWING_1008_TB_2)

Componente in PVC che funge da base per il posizionamento della *turret base*, di dimensioni pari a 320x90x70mm. È provvista di sei fori filettati M4 per l'accoppiamento, tramite viti, con la placca metallica e di altri quattro fori M4 per l'inserimento di viti di chiusura dell'involucro in plastica.

Inoltre, è previsto uno scasso lungo l'asse Z per l'alloggiamento del TSP-box ed uno scasso lungo l'asse Y per alleggerire la struttura. Lo scasso per la TSP-box è stato progettato tenendo in considerazione l'ingombro dato dai connettori installati sul box ed i relativi cablaggi, nonché dei raggi di curvatura dei fili elettrici.

Cover up (DRAWING_1008_TB_3)

Trattasi di un guscio in PVC, che funge da coperchio per la scatola della torretta. Il componente è provvisto di quattro fori passanti $\varnothing 4.3$ + lamatura $\varnothing 7.5 \times 28$ mm per il passaggio delle viti di accoppiamento con la *cover down*. L'altezza del coperchio tiene in considerazione l'altezza della torretta e dei C-Mold di tenuta.

Turret holder (DRAWING_1008_H_2).

Per la manipolazione della torretta è stato progettato un apposito holder che, tramite viti, consente la presa sia della tripletta di stave che del box della TSP.

Difatti, la TSP-box è connessa alla tripletta solamente tramite cavi elettrici (non vi è una connessione meccanica tra le due parti) e quindi bisogna prevedere un holder che effettui la presa su entrambi i componenti. L'oggetto in questione, in ALCAPLUS anodizzato, è provvisto di cinque fori passanti $\varnothing 3.3$ per il passaggio di viti che andranno ad avvitarsi sui due blocchetti terminali dello stave "top" e sul *back panel* del TSP-box. Inoltre, è provvisto di due fori passanti $\varnothing 5.3$ + lamatura $\varnothing 9 \times 5.5 \text{ mm}$ per l'inserimento di viti per il montaggio della maniglia di presa.

Funzionamento del box

Il primo passaggio del funzionamento del box comincia con il montaggio, tramite apposite viti, della base metallica alla *cover down*. A questo punto, tramite il *turret holder*, avviene la manipolazione della torretta precedentemente assemblata, il centraggio sulla *turret base* per mezzo di spine metalliche, il fissaggio della tripletta alla base tramite il montaggio dei due C-Mold ed infine l'avvitamento della TSP-box. Dunque, tripletta e TSP-box sono fissati alla base per una movimentazione in sicurezza della torretta. Infine, l'ultimo step consiste nella chiusura del box tramite l'accoppiamento della *cover up* sulla *cover down*, per mezzo di viti. Il box è dunque pronto per essere trasportato.

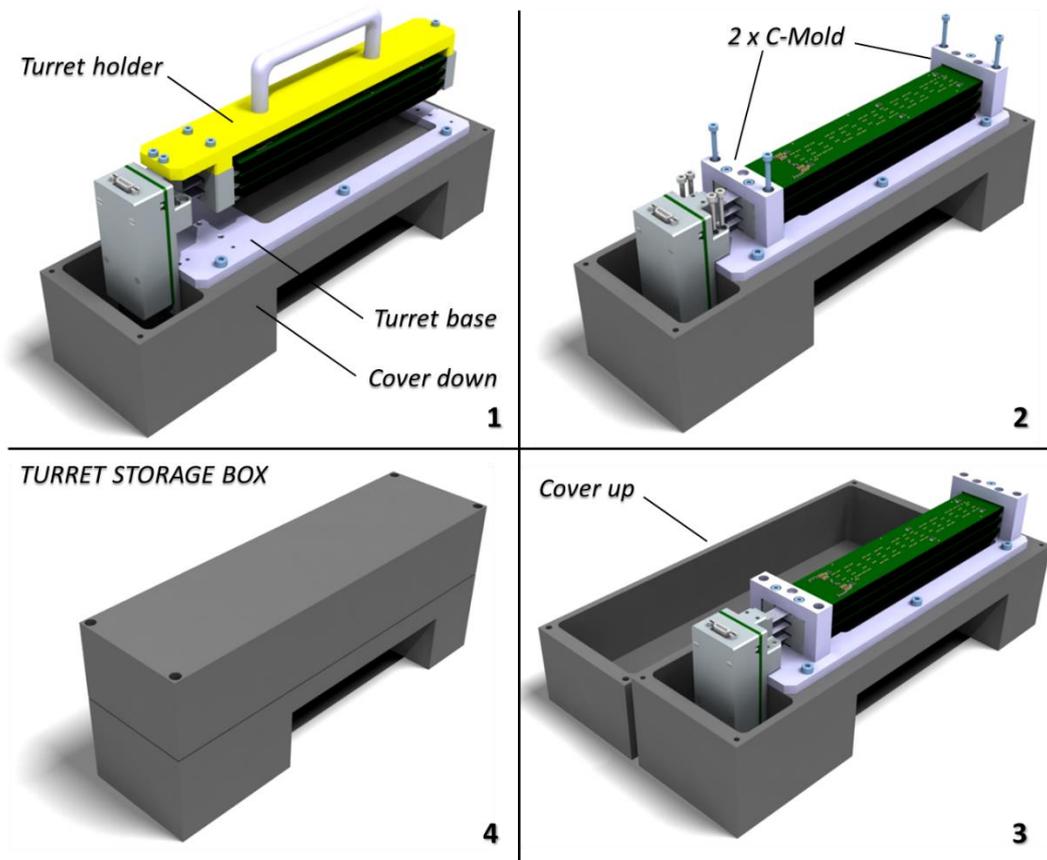


Figura 3. 30: Schema di funzionamento del box di trasporto della torretta

Capitolo 4

Programmazione della Macchina di Misura a Coordinate

4.1 CMM Mitutoyo: caratteristiche

Tutti i passaggi che richiedono precisioni nel posizionamento dei componenti sotto i 100 micron vengono eseguiti con l'utilizzo di una macchina di misura a coordinate (CMM) della Mitutoyo. Trattasi di una macchina di misura a portale, modello CRYSTA-APEX S 9206, con un'area di lavoro pari a 900 x 2000 x 600 mm.

Caratterizzata da materiali leggeri ed una struttura innovativa, la macchina garantisce elevata stabilità, rigidità ed accuratezza nei movimenti. Inoltre, la compensazione termica (in un range da 16°C a 26°C) permette di effettuare misurazioni accurate anche in ambienti di officina. Grazie alla tecnologia dei tastatori a scansione e laser, e alla possibilità di effettuare misure multi-sensor, la macchina è in grado di effettuare misurazione molto accurate ad alta velocità [20].

La CMM è equipaggiata di una sonda a visione rapida, la *Quick Vision Probe* (QVP), provvista di luce anulare e coassiale a led bianco e munita di una lente d'ingrandimento 10x.

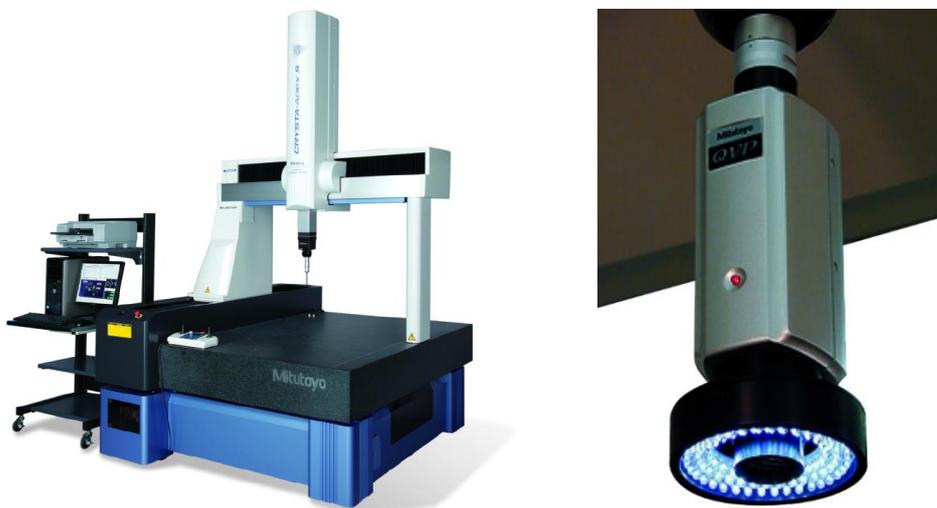


Figura 4. 1: Mitutoyo CMM CRT AS 9206 (sinistra) e QVP (destra)

Sul piano di lavoro della macchina di misura, in granito, è stata installata una struttura metallica in ALCAPLUS, equipaggiata con:

- guide metalliche per la movimentazione di torrette di posizionamento;
- placche metalliche progettate per il montaggio dei vari jig utilizzati durante le operazioni di assemblamento da effettuare sotto la CMM.

4.2 Programmazione della CMM: Software MCOSMOS

La macchina può essere manovrata in modalità manuale, tramite l'utilizzo di un joystick, oppure mediante la scrittura di codici che permettono di creare appositi programmi da far eseguire alla macchina.

Il software utilizzato per la programmazione offline è MCOSMOS e permette di stilare/gestire part program, creare finestre per dare comandi e suggerimenti all'operatore, archiviare i risultati di misura in vari formati (.PDF, .XLS, .TXT, .HTML) ed esportare gli elementi geometrici rilevati verso sistemi CAD [21].

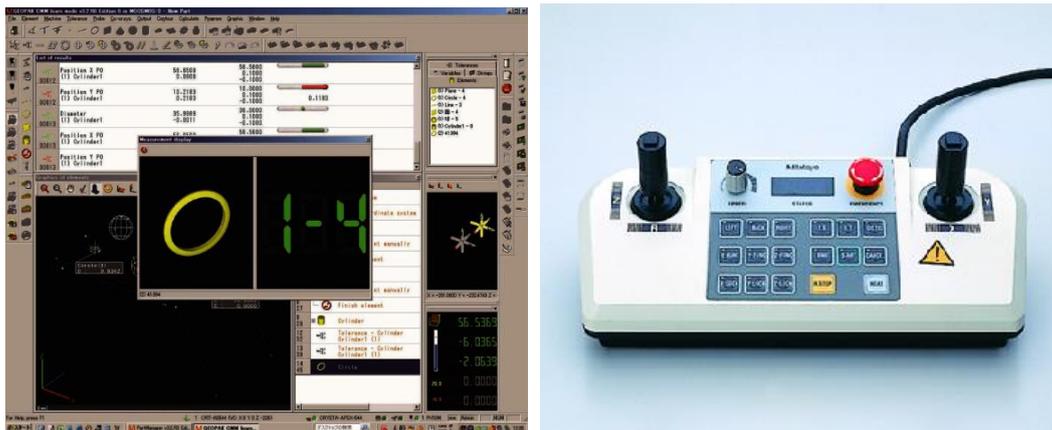


Figura 4. 2: Software "Offline MCOSMOS" (sinistra) e Joystick (destra)

4.3 Utilizzo della CMM

Per quanto riguarda il lavoro svolto dal gruppo dell'INFN di Torino, circa la progettazione del tracker di particelle della collaborazione LIMADOU, la CMM è stata utilizzata principalmente per tre applicazioni:

- supporto/assistenza per l'operatore durante le fasi di allineamento e montaggio che richiedono precisioni elevate, dell'ordine di qualche micron (es. fase di allineamento dei chip o operazioni di incollaggio);
- effettuare rilievi metrologici, eseguiti in diverse fasi dell'assemblaggio, al fine di controllare e verificare la corretta posizione del chip rispetto a quelle nominali (ed effettuare eventuali e successive analisi dati);
- ispezioni ottiche e controllo qualità dei componenti progettati.

Sono già stati sviluppati a Torino programmi CMM per guidare l'operatore durante le fasi di posizionamento dei chip, assemblaggio degli stave e per la raccolta di rilievi metrologici. Questi programmi vengono testati, convalidati e via via migliorati durante le diverse fasi dell'assemblaggio dei prototipi.

A titolo di esempio si riportano, nel paragrafo successivo, i programmi stilati per guidare l'operatore durante le operazioni di allineamento dei chip.

4.4 Esempi di programmi stilati per l'allineamento dei chip

4.4.1 LIMADOU_RS_Loc

Questo primo programma permette la creazione di un primo sistema di riferimento locale, utilizzato per calcolare un secondo sistema di riferimento, più preciso, che verrà poi richiamato ed utilizzato da tutti i part program successivi.

Il programma utilizza come base di visualizzazione la superficie superiore del jig di allineamento chip, il *Chip_Alignment_JIG*. In tale superficie sono stati effettuati dei fori, indicati nella Figura_ come A e B, che fungono da riferimenti per la CMM.

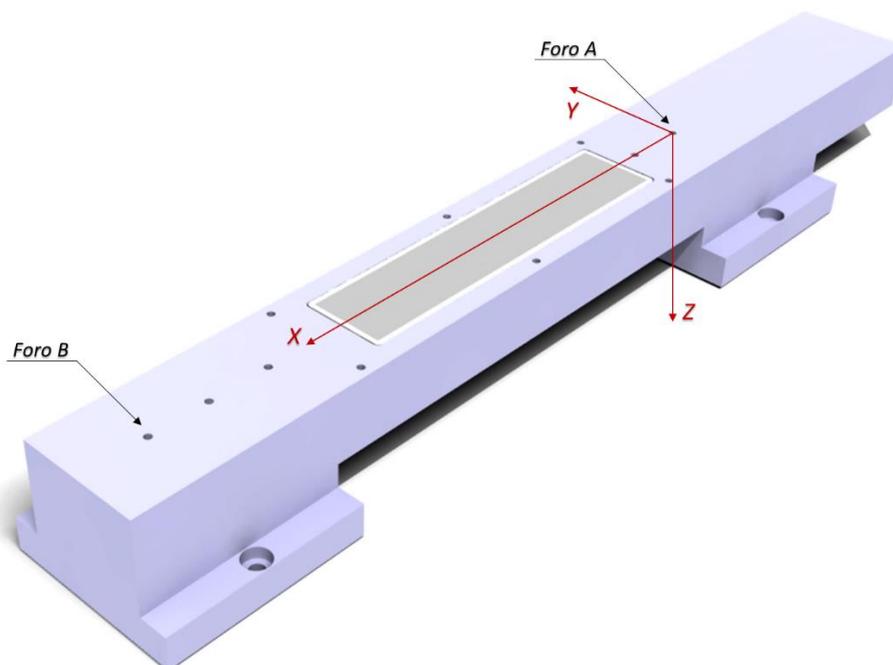


Figura 4. 3: Fori A e B utilizzati per la realizzazione del sistema di riferimento

In particolare, con tale part program, la CMM effettua i seguenti passaggi:

- Spostamento della sonda sopra il foro A, seguito da una fase automatica di messa a fuoco e riconoscimento del profilo del foro;
- calcolo del diametro del foro e delle coordinate del suo centro;
- segue la stessa procedura (questi primi due punti) per il foro B;
- creazione di un ente di connessione (retta) tra i due centri dei fori;
- allineamento dell'asse X parallelo alla retta creata;
- la terna de sistema di coordinate viene ruotata in modo tale da essere conforme al sistema di riferimento generale dell'esperienza LIMADOU;
- settaggio del centro del foro A come origine del nuovo sistema di riferimento e memorizzazione del sistema di coordinate ottenuto.

4.4.2 LIMADOU_RS_Chip

Tale programma utilizza, come base di partenza, il sistema di riferimento locale creato attraverso il programma precedente e ha lo scopo di verificare la planarità del *Chip_Alignment_JIG*, oltre a creare un nuovo sistema di riferimento.

In particolare, con tale part program, la CMM effettua i seguenti passaggi:

- Richiamo del primo sistema di riferimento creato da *LIMADOU_RS_Loc*;
- Misura delle coordinate di otto punti appartenenti alla superficie superiore metallica del jig di allineamento;
- Creazione di un ente di connessione (piano) passante per tali punti;
- Calcolo della tolleranza di planarità e visualizzazione del risultato ottenuto (con un messaggio di errore nel caso in cui la planarità ottenuta risulti maggiore rispetto ad un valore impostato, in sede di progetto, come limite massimo accettabile);
- Spostamento e posizionamento della sonda sopra il foro A, messa a fuoco automatica e riconoscimento del profilo del foro in questione;
- calcolo del diametro del foro e delle coordinate del suo centro;
- segue la stessa procedura (questi primi due punti) per il foro B;
- creazione di un ente di connessione (retta) tra i due centri dei fori;
- allineamento dell'asse X parallelo alla retta creata;
- la terna de sistema di coordinate viene ruotata in modo tale da essere conforme al sistema di riferimento generale dell'esperienza LIMADOU;
- settaggio del centro del foro A come origine del nuovo sistema di riferimento e memorizzazione del sistema di coordinate ottenuto;
- ricalcolo delle coordinate dei centri dei fori (A e B) e successiva verifica della tolleranza di posizionamento rispetto alle coordinate nominali.

4.4.3 LIMADOU_Chip_Align

Il seguente part program assiste l'operatore durante la fase di allineamento dei chip. Il programma guida l'operatore puntando il cursore (il centro della sonda QVP, raffigurato con una croce verde) nelle posizioni nominali dove dovranno essere posizionati i marker dei chip (si ricorda che i marker sono delle incisioni micrometriche effettuate nei quattro angoli del chip che permettono di posizionarlo in modo preciso), dando dei segnali di "warning" e ricordando all'operatore la sequenza corretta delle operazioni da svolgere.

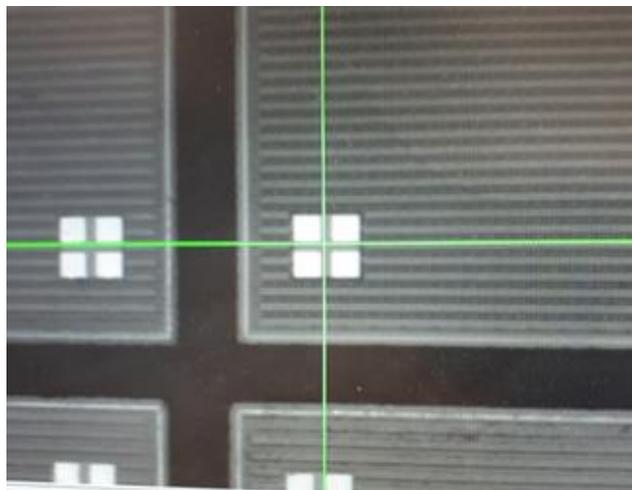


Figura 4. 4: Chip allineati sotto CMM (immagine catturata tramite QVP)

Il programma si compone delle seguenti fasi:

- Immissione, tramite finestre di dialogo, del numero dell'HIC, della tipologia dei chip utilizzati (spessore pari a 50 o 100 micron) e del numero del chip che si vuole allineare (la numerazione dei chip è stata decisa dalla collaborazione LIMADOU, vedere *Figura 1. 14: Nomenclatura dei 10 chip ALPIDE*);
- Finestra di dialogo che permette di richiamare e svolgere uno dei seguenti sottoprogrammi, indicati di seguito in ordine di esecuzione:

- **ROTAZIONE:** scelta del marker di partenza e movimentazione automatica della macchina in prossimità di questo, messa a fuoco automatica e calcolo del centro del marker. Segue il salvataggio di tali coordinate come XM1 e YM1, lo spostamento lungo X nel marker adiacente (A->B, B->A, C->D, D->C), il calcolo automatico del centro di questo secondo marker e il calcolo delle coordinate XM2 e YM2. A questo punto, il sottoprogramma effettua il calcolo di un certo valore di Y medio, definito come $YC = \frac{YM1+YM2}{2}$.

Il puntatore si sposta in posizione XM2 e YNEW=YC e chiede all'operatore di ruotare il chip (agendo sull'apposita vite della torretta di allineamento) fino a portare il centro del secondo marker in posizione YC. Dunque, il sottoprogramma suggerisce all'operatore di ruotare il chip della metà dell'angolo compreso tra i due marker adiacenti lungo X, in modo tale da correggerne il posizionamento parallelamente all'asse X.

In realtà, questa operazione di rotazione e relativa correzione dell'orientazione del chip non è così semplice: non si tratta di una rotazione semplice, bensì di una roto-traslazione nel piano XY.

Dopodiché si ha lo spostamento del puntatore nella zona del primo marker, puntando in posizione XM1 e YNEW, in modo tale da verificare la correttezza dell'allineamento dei due marker lungo X. Una finestra di dialogo chiede all'operatore se la fase di rotazione è avvenuta con successo, nel rispetto dei valori di tolleranza di posizionamento accettabili definiti in fase di progetto e, in caso di esito negativo, si procede con ulteriori iterazioni finché non si ottiene un allineamento considerato accettabile.

Dopo varie prove di allineamento è stato notato che, se l'operazione di presa del chip (svolta dall'operatore ad occhio nudo, per mezzo delle ventose di vuoto equipaggiate sulla torretta di allineamento) avviene in maniera relativamente precisa rispetto alla direzione X, basta effettuare una sola iterazione del sottoprogramma di rotazione per ottenere un allineamento preciso, dell'ordine del micron.

Al contrario, prendendo il chip ruotato di molto rispetto alla direzione di X, si ha la necessità di effettuare 2-3 iterazioni per ottenere un posizionamento considerato accettabile.

- TRASLAZIONE SUL PIANO XY: il sottoprogramma chiede all'operatore di posizionare correttamente, sul piano XY, uno dei quattro marker del chip (la scelta del marker è effettuata tramite finestra di dialogo) nella posizione nominale. Successivamente, si ha lo spostamento del puntatore sul marker adiacente, lungo la direzione X, per verificare che la fase precedente di rotazione sia stata eseguita correttamente. Infine, tramite finestra di dialogo, si chiede conferma all'operatore di procedere con la fase successiva (altrimenti, è possibile rieseguire una o entrambe le fasi di rotazione e traslazione del chip).
- CONTROLLO CHIP ADIACENTI: sottoprogramma che effettua lo spegnimento della CNC, dando all'operatore la possibilità di comandare la macchina in modalità manuale, ispezionando il bordo del chip movimentato e dunque verificare che nella successiva fase di posizionamento del chip sulla superficie del *Chip_Alignment_JIG*, non si vada a sovrapporlo ai chip adiacenti, precedentemente posizionati. Questo passaggio potrebbe essere evitato scegliendo correttamente il marker di partenza del sottoprogramma successivo poiché, prima di poggiare il chip in questione, si riesce a controllare che non ci sia interferenza tra questo ed i chip adiacenti.
- CHECK FINAL POSITION: partendo dal marker, accuratamente scelto, il sottoprogramma guida l'operatore durante la fase di abbassamento del chip fino al pelo della superficie d'appoggio del jig. Segue il controllo, in rotazione, delle posizioni di tutti e quattro i marker del chip per poi tornare sul primo. Durante questa fase di check, il programma calcola la distanza tra le posizioni reali e nominali dei marker e, di conseguenza, la relativa tolleranza di posizionamento. Successivamente, se l'operatore è soddisfatto del posizionamento complessivo del chip, si prosegue con lo spegnimento del vuoto della torretta e l'accensione del vuoto del jig: il chip viene appoggiato al jig e tenuto in posizione tramite il vuoto.
- Il programma, tramite finestra di dialogo, permette di scegliere il chip successivo da allineare. Ricomincia dunque il ciclo di allineamento appena descritto, fino al completo posizionamento di tutti e dieci i chip.

4.4.4 LIMADOU_Meas_Chip

Questo programma permette di calcolare, e salvare su fogli Excel, le coordinate relative alla posizione reale dei marker di tutti e dieci i chip precedentemente posizionati sul jig. Il puntatore si sposta da un marker all'altro, calcolando automaticamente le coordinate dei relativi centri. Allo stesso tempo effettua un calcolo della planarità collegata a tali punti, evidenziando eventuali irregolarità lungo l'asse Z (potrebbe esserci della sporcizia sotto uno o più chip).

Se il valore di planarità calcolata risultasse essere maggiore rispetto ad un valore limite accettabile, imposto in sede di progetto, si dovrebbero rimuovere e

riposizionare i chip relativi ai marker che presentano anomalie sulle coordinate Z (prima del riposizionamento, sarebbe necessario pulire, con un panno imbevuto d'alcool, sia la superficie inferiore del chip che la superficie di appoggio del jig).

Tale programma è utile per una successiva analisi dati svolta semplicemente tramite Excel oppure, tramite Python, per un'analisi più approfondita.

4.5 Altri programmi stilati

- Programma metrologico che permette di calcolare, e salvare su fogli Excel, le coordinate dei marker visibili successivamente all'incollaggio dell'FPC sui dieci chip. Infatti, dopo la creazione dell'HIC, solo le file di marker esterni (lungo Y) sono visibili dai fori asolati dell'FPC soprastante, mentre i marker interni sono coperti dal corpo del circuito flessibile. Il programma in questione, spostando la QVP da un marker all'altro, calcola automaticamente le coordinate dei relativi centri (effettua il calcolo di 20/40 dei marker totali incisi sui dieci chip). Confrontando le coordinate dei 20 marker esterni prima e dopo l'incollaggio dell'FPC sui chip, è possibile verificare che non ci siano stati movimenti indesiderati dei chip sottostanti (gli errori di posizione trovati, dell'ordine di qualche micron, sono stati ritenuti accettabili ai fini del progetto).
- Programma metrologico, simile al precedente, che permette il calcolo dei 20 marker esterni successivamente all'incollaggio dell'HIC sullo stave meccanico. In questo modo, per ogni stave prodotto, si ha un'analisi metrologica "finale" circa la posizione effettiva dei chip sul *cold plate* dello stave completo.
- Programmi di misura di *cold plate* e blocchetti terminali per la misura/verifica delle tolleranze ottenute dalla produzione (controllo qualità dei componenti).
- Programma di misura per la valutazione dello strato addizionale di colla, posto sulla parte piatta del *cold plate* per isolare elettricamente il CP dall'HIC.
- Programmi di misura dello stave meccanico per il calcolo degli ingombri lungo Y, con lo scopo di verificare che non ci siano interferenze tra torrette adiacenti.
- Programmi di misura dello stave meccanico per la valutazione della precisione, lungo Z, dell'incollaggio dei CP sui blocchetti (calcolo dello spessore di colla).
- Programma per la creazione del sistema di riferimento dello stave, utilizzato nello *Stave_Assembly_JIG* per il corretto posizionamento e relativo incollaggio dell'HIC sullo stave meccanico (ogni postazione di lavoro posizionata sotto CMM ha un proprio sistema di riferimento, determinato da appositi fori).

Capitolo 5

Costruzione dei prototipi

5.1 Controllo qualità e messa a punto dei tools per l'assembly

La maggior parte delle attrezzature di supporto alle fasi di assemblaggio del tracker, non dovendo rispettare i requisiti richiesti dalla Norma europea EN 9100 (trattasi di strumenti di supporto che, non essendo montati sul satellite, non dovranno rispettare i requisiti richiesti in ambiente spazio), sono state prodotte dall'officina interna all'INFN di Torino. La vicinanza tra progettisti e tecnici rende la comunicazione tra le due aree di progettazione e produzione molto veloce ed efficace. Infatti, progettato un componente e consegnata ai tecnici la relativa messa in tavola, è possibile osservare le varie fasi di produzione dei componenti e, se possibile, effettuare delle modifiche in corso d'opera.

Inoltre, una volta ottenuta l'attrezzatura ed aver effettuato la relativa messa a punto ed un'eventuale controllo qualità tramite CMM, per verificare il rispetto delle tolleranze dimensionali e geometriche imposte in fase di progetto, risulta molto semplice la richiesta di eventuali modifiche.

Per quanto riguarda la messa a punto della strumentazione realizzata, ogni postazione/attrezzatura è stata controllata, verificata e adattata alle diverse esigenze di progetto imposte dalle richieste derivanti dalla fisica dell'esperimento. Per esempio, per tutte quelle attrezzature (es. gli *holder* per la manipolazione) equipaggiate di circuiteria di vuoto, sono stati messi a punto banchi di lavoro dedicati utilizzando tubi, collettori, raccordi e valvole unidirezionali.

La figura sottostante mostra il banco di lavoro messo a punto per la fase di allineamento dei chip sotto la CMM, formato da *Chip_Alignment_JIG*, circuiteria di vuoto, postazione di comando del vuoto (equipaggiata con i relativi switch meccanici) ed ulteriori strumentazioni di supporto all'operatore.

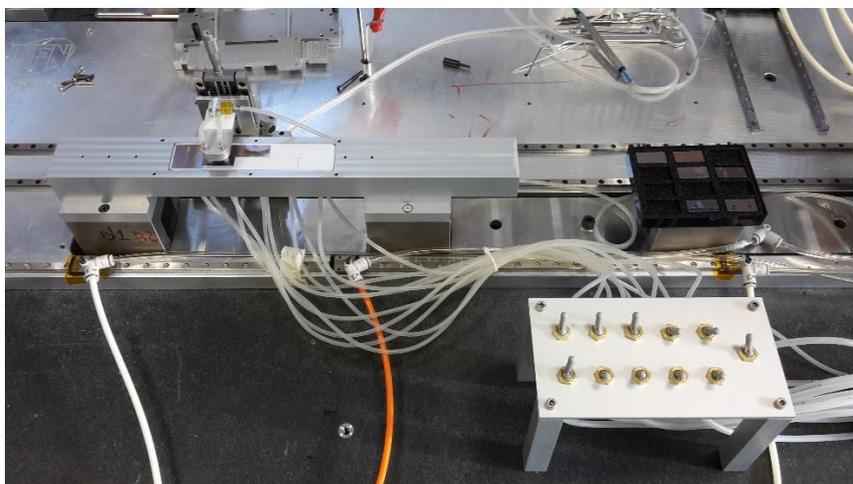


Figura 4. 5: Banco di lavoro per l'operazione di allineamento dei chip

5.2 Controllo qualità degli elementi costituenti il TRACKER

Gli elementi costituenti il tracker (chip ALPIDE, FPC, *cold plate*, blocchetti terminali e TSP-box) vengono prodotti da aziende specializzate nel settore e forniti assieme alla relativa documentazione contenente provenienza dei materiali, procedure impiegate nel processo di produzione, programma di consegna, certificato di conformità, scheda di sicurezza e scheda tecnica. Inoltre, alcuni di questi componenti necessitano di documentazione aggiuntiva e/o controlli qualità da effettuare prima di poterli utilizzare per il montaggio del tracker.

Blocchetti terminali

I blocchetti terminali, prodotti da una ditta esterna specializzata in produzione di componentistica per ambiente spazio, vengono forniti con certificazioni spazio; inoltre, prima di essere utilizzati per la costruzione degli stave, vengono sottoposti ad un controllo qualità per la verifica delle tolleranze ottenute dalla produzione.

Cold Plate

Per quanto riguarda i *cold plate*, la cui produzione e caratterizzazione sono state gestite dal CERN, saranno forniti con una documentazione aggiuntiva riguardante:

- Report di misurazione (ispezione ottica, valutazione peso, misurazione 3D) contenente, in particolare, la verifica della tolleranza di planarità pari a 0.1 mm imposta sulla superficie superiore della parte piatta dei CP ed effettuata tramite CMM con sonda ottica, calibri e tavola di livellamento.
- Report di caratterizzazione, riguardanti i test effettuati sui *cold plate*:
 - Prove di flessione su 3 punti (testato fino a 200 gf, 4 step da 50 gf) eseguito sui CP, con lo scopo di valutarne le proprietà elastiche. È stato calcolato un modulo di elasticità a flessione, con comportamento lineare, pari a $9,37 \times 10^6 Nmm^2$.
 - Prove di flessione eseguite sui CP, testati gradualmente fino a 780 gf con peso distribuito sulla superficie, per lo studio del comportamento plastico. Dopo un'attenta ispezione al microscopio, sul provino non sono stati rilevati danni visibili o deformazioni plastiche.
 - Prove di flessione prima e dopo un ciclo termico: partendo dalla temperatura di 25°C, il *cold plate* viene riscaldato di 5°C/min fino alla temperatura di 65°C, esposto a 65°C per 10 min e raffreddato rapidamente fino a 25°C. Non sono stati osservati danni visibili, deformazioni plastiche o differenze nelle proprietà meccaniche.
 - Prove di torsione, effettuate sul CP, con l'obiettivo di determinare la rigidità torsionale. La procedura di prova prevede il cold plate fissato su un lato ed una coppia agente sul lato opposto.
 - Test di misurazione del CTE (set-up 1), con l'obiettivo di valutare il CTE (*Coefficient of Thermal Expansion*) dei CP nelle direzioni X e Y. Il test è stato eseguito in un forno da laboratorio (con velocità di riscaldamento pari a 0,5°C/min), utilizzando 3 sensori di temperatura attaccati alla

superficie posteriore del CP ed un sistema di correlazione di immagini digitali per osservare la deformazione. Sono stati valutati valori di CTE pari a circa $0,9 \text{ ppm} \cdot \text{C}^{-1}$ lungo la direzione X e $0,55$ lungo Y. In generale, si ottiene un $CTE < 1 \text{ ppm} \cdot \text{C}^{-1}$.

- Test di misurazione del CTE (set-up 2): campioni di nervature laterali e della parte piatta del CP misurati nel dilatometro, sottoposti ad una rampa di $0.5^\circ\text{C}/\text{min}$ fino a 70°C . Sono stati ottenuti i seguenti valori:
 - $CTE_{\text{nervatura_longitudinale}} < 3 \text{ ppm} \cdot \text{C}^{-1}$
 - $CTE_{\text{piatto_longitudinale}} < 4 \text{ ppm} \cdot \text{C}^{-1}$
 - $CTE_{\text{piatto_trasversale}} < 2 \text{ ppm} \cdot \text{C}^{-1}$
- Test termico, effettuato sul provino composto da CP + blocchetto, incollati con Araldite 2011, con l'obiettivo di valutare la resistenza ai cicli di carico termico. Il provino è sottoposto a 3 cicli termici ($80, 100, 120^\circ\text{C}$) con rampa di $5^\circ\text{C}/\text{min}$. Dopo un'ispezione al microscopio, non sono stati rilevati danni o deformazioni nella zona di incollaggio.
- Test vibrazionali (analisi modale), effettuati inizialmente solo sul CP e successivamente sul CP + Blocchetto. L'obiettivo è quello di valutare le frequenze naturali dell'oggetto in prova, sottoponendo il provino a diversi livelli di vibrazioni date da due differenti sorgente di eccitazione: altoparlante o agitatore.
- Test termoelastico, eseguito su un provino formato da CP + blocchetto, con l'obiettivo di determinare le deformazioni termiche indotte sulla superficie del *cold plate* e dovute agli stress causati dalla differenza di espansione termica dei due materiali. La procedura di prova prevede di sottoporre il provino, totalmente libero, ad un riscaldamento con rampa $0,5^\circ\text{C}/\text{min}$ fino a 60°C , utilizzando un solo sensore di temperatura fissato con tape di kapton alla faccia posteriore del blocchetto in alluminio. Utilizzando colla Masterbond EP37-3FLFAO per l'incollaggio tra CP-blocchetto, è stata calcolata una deformazione a 65°C pari a circa $1000 \text{ micron}/\text{m}$.

Per quanto riguarda l'ultimo test esposto nell'elenco soprastante, la lunghezza dell'incollaggio Blocchetto - CP lungo X è pari a circa 5mm ; di conseguenza, si avrà una deformazione di $5 \mu\text{m}$. La colla ha un modulo di resistenza al taglio da sovrapposizione pari a 200 Mpa (misura la capacità di un materiale di resistere a sollecitazioni poste su un piano, dove la forza di taglio esercitata sposta i due substrati in direzioni opposte) e dunque, applicando la legge di Hooke, si ottiene un valore di sforzo di taglio (a cui è sottoposta la colla) di circa $\sigma = E \cdot \varepsilon = 200 \cdot 5/1000 = 1 \text{ MPa}$, nettamente inferiore al valore massimo sopportato dalla colla, pari a 5 Mpa . Di conseguenza, se lo stave meccanico fosse libero di muoversi, l'incollaggio utilizzato tra blocchetti e *cold plate* con colla Masterbond EP37-3FLFAO reggerebbe gli allungamenti, dell'ordine dei micron, derivanti da differenti valori di CTE di alluminio e fibra di carbonio.

5.3 Validazione dei prototipi: Sistema dei cursori sul frame

Sono stati effettuati dei test termici con uno stave collegato prima ad una base in alluminio che simula il frame esterno mediante sistema a cursori e poi senza.

Come discusso nel 1.4.10, il sistema a cursori è composto da due cursori metallici, con rondelle in teflon, collegati ai blocchetti “front” dello stave attraverso il frame e da due viti per il collegamento tra blocchetto “rear” e frame. Sul frame sono previste anteriormente delle asole per i cursori e posteriormente dei fori per le viti; i cursori possono spostarsi lungo l'asola, consentendo lo spostamento relativo del frame esterno rispetto agli stave. Questo sistema è stato implementato per compensare le diverse dilatazioni delle parti, dovute ai diversi CTE (alluminio del *frame* e fibra di carbonio del CP) per i gradienti termici. Invece, per quanto riguarda la base che simula il frame esterno senza cursori, sia la parte anteriore che posteriore sono provviste di due fori per le viti di fissaggio.



Figura 5. 1: Base che simula il sistema di cursori implementato sul frame

I test termici sono stati effettuati per mezzo di una camera climatica, presso il laboratorio dell'INFN di Torino. Il ciclo termico è riportato nella figura seguente:

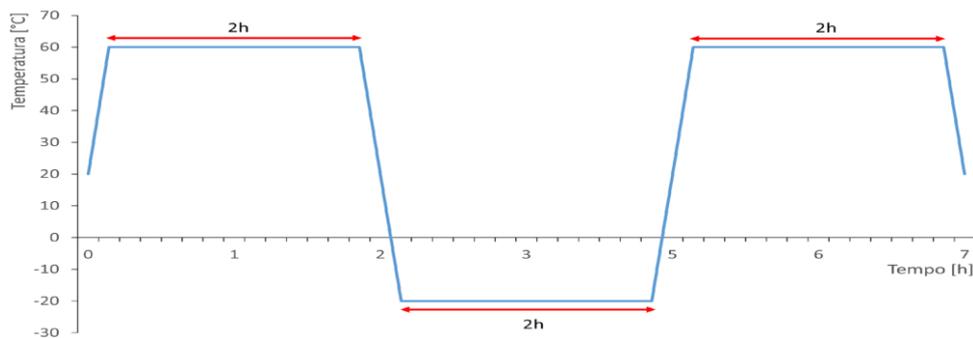


Figura 5. 2: Ciclo del test termico per la validazione del sistema a cursori

- T_{amb} - $T_{20^{\circ}C}$ con una rampa di $4^{\circ}C/min$
- $T_{20^{\circ}C}$ - $T_{60^{\circ}C}$ con una rampa di $4^{\circ}C/min$
- $T_{60^{\circ}C}$ per 2h
- $T_{60^{\circ}C}$ - $T_{-20^{\circ}C}$ con una rampa di $4^{\circ}C/min$
- $T_{-20^{\circ}C}$ per 2h
- $T_{-20^{\circ}C}$ - $T_{60^{\circ}C}$ con una rampa di $4^{\circ}C/min$
- $T_{60^{\circ}C}$ per 2h
- $T_{60^{\circ}C}$ - $T_{20^{\circ}C}$ con una rampa di $4^{\circ}C/min$

Il provino è stato sottoposto a diversi cicli termici e, dopo ogni ciclo, sono stati misurati dei punti sotto la macchina di misura, alla temperatura di laboratorio di 20°C, e calcolate le distanze tra *cold plate* e blocchetti nei quattro spigoli del CP.

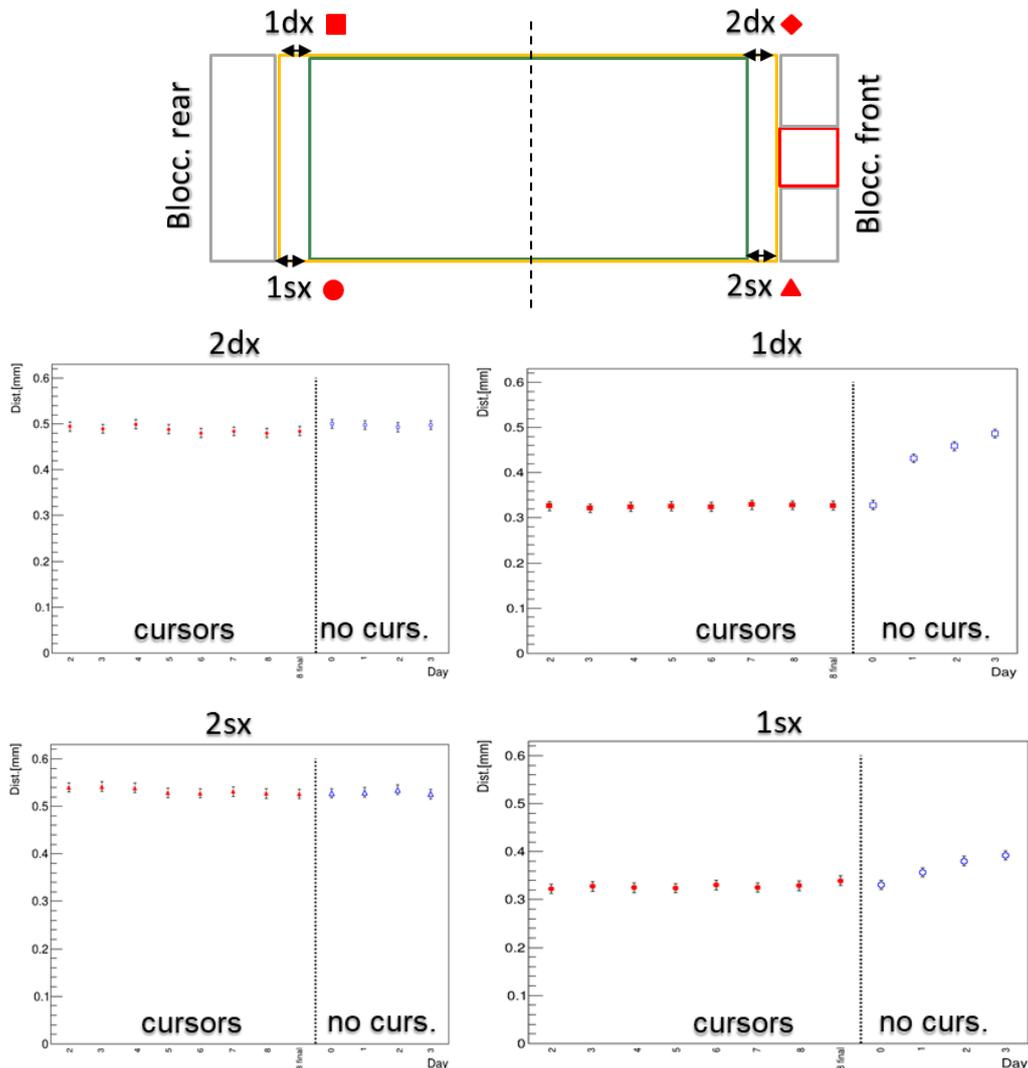


Figura 5.3: Misurazioni dopo il ciclo termico (con e senza cursori)

- Cursors: cicli termici con stave collegata alla base in alluminio mediante viti di fissaggio sul lato rear e con sistema a cursori sul lato front;
- No curs: cicli termici con stave collegata alla base in alluminio tramite viti di fissaggio su entrambi i lati.

Risultati

Dopo 8 cicli termici eseguiti con sistema a cursore, le distanze tra CP e blocchetti terminali sono sempre stabili entro 20 µm. Questo vuol dire che, utilizzando i cursori, il sistema torna sempre nella sua posizione e di conseguenza l'incollaggio CP-blocchetto non risente dello sforzo dovuto alla differenza di CTE.

Invece, dopo 1 o 2 cicli termici senza sistema a cursore, le differenze tra le misurazioni crescono fino a 150 µm sull'incollaggio nel lato rear (1dx). Il sistema, non avendo la possibilità di compensare la differenza di CTE, provoca uno sforzo di trazione, con conseguente scorrimento relativo tra CP e blocchetto nel lato rear (dove la superficie di incollaggio risulta minore rispetto a quella del lato front).

5.4 Validazione dei prototipi: Caratterizzazione della colla

L'obiettivo della caratterizzazione dell'Araldite 2011 è quello di osservare la reazione della colla epossidica bicomponente all'aumento della temperatura.

A causa della mancanza di prototipi realistici, la caratterizzazione della colla è stata effettuata utilizzando due strisce di vetronite, da sovrapporre ed incollare tramite la colla oggetto di test, che simulano la parte piatta del cold plate in fibra di carbonio e la sequenza di chip ALPIDE. Trattasi di una simulazione di incollaggio dell'HIC alla meccanica di supporto in fibra di carbonio.

La fase di preparazione dei provini prevede i seguenti passaggi:

- Posizionamento della striscia inferiore su di una base in alluminio e teflon, munita di circuiteria di vuoto per tenere la striscia in posizione.
- Preparazione della maschera di colla, dello spessore di $100\ \mu\text{m}$, che permette di stendere sulla striscia dieci "finestre di colla" di forma rettangolare e di spessore uniforme. La manipolazione della maschera avviene tramite l'utilizzo di un apposito *mask holder*.
- Applicazione della maschera sulla striscia appoggiata alla base; il corretto posizionamento tra maschera e striscia in vetronite è garantito dall'accoppiamento tra pivot/spine metalliche, *mask holder* e base. Una volta a contatto, spegnere il vuoto dell'holder, svitare i pivot, effettuare una leggera pressione e quindi rimuovere l'holder.
- Preparazione della colla bicomponente, mescolata lentamente con movimenti circolari per 5min , facendo attenzione a non incorporare aria.
- Distribuzione della colla sulla maschera e livellamento con spatola.
- Rimozione della maschera.
- Manipolazione della seconda striscia in vetronite tramite apposito holder con relativo posizionamento sulla striscia inferiore, provvista di colla.
- Allontanamento dell'holder e aggiunta di un peso extra di circa $200\ \text{g}$ da tenere sul provino (coppia di strisce incollate) per tutto il tempo di polimerizzazione della colla, pari a circa 24 ore.

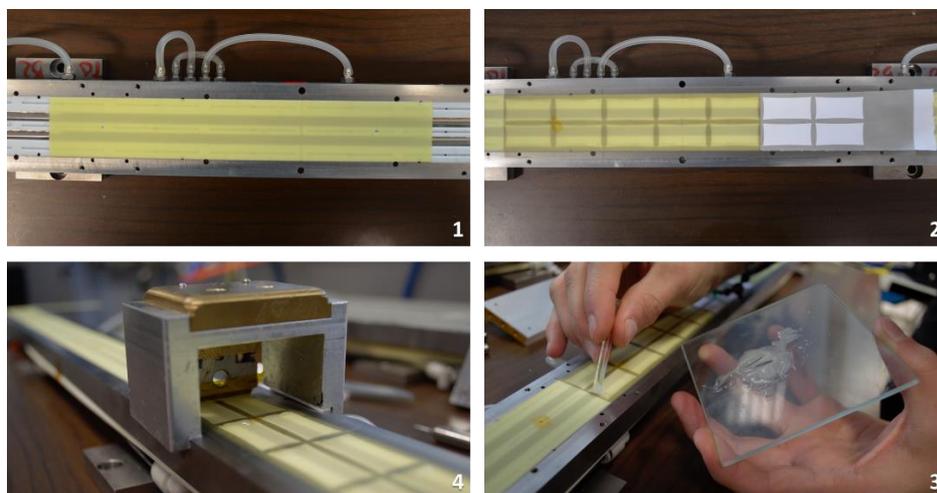


Figura 5. 4: Preparazione dei campioni per la caratterizzazione della colla

Passato il tempo di polimerizzazione, i provini sono stati muniti di un apposito gancio per la successiva fase di strappo delle strisce incollate. Prima di procedere con l'operazione di strappo vera e propria, i provini sono stati sottoposti a diversi cicli termici, tramite l'utilizzo e la programmazione di una camera climatica: alcuni provini sono stati lasciati a temperatura ambiente, mentre gli altri sono stati sottoposti ad un ciclo termico partendo da $T = 20^{\circ}\text{C}$, riscaldamento con rampa di $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$, mantenimento alla $T = 70^{\circ}\text{C}$ (temperatura leggermente superiore a quella dei test effettivi, pari a 60°C) per tempi diversi (pari a 3.5, 7, 14, 21 h) e poi raffreddamento veloce fino alla temperatura ambiente. Alla fine della fase di polimerizzazione, e dopo aver sottoposto il provino al ciclo termico, le strisce sono state tagliate a metà in modo da effettuare i test su strisce dotate di una sola fila di cinque slot di colla (ogni slot simula l'incollaggio tra singolo chip e il *cold plate*).



Figura 5. 5: Campione finale su cui effettuare la prova di strappo

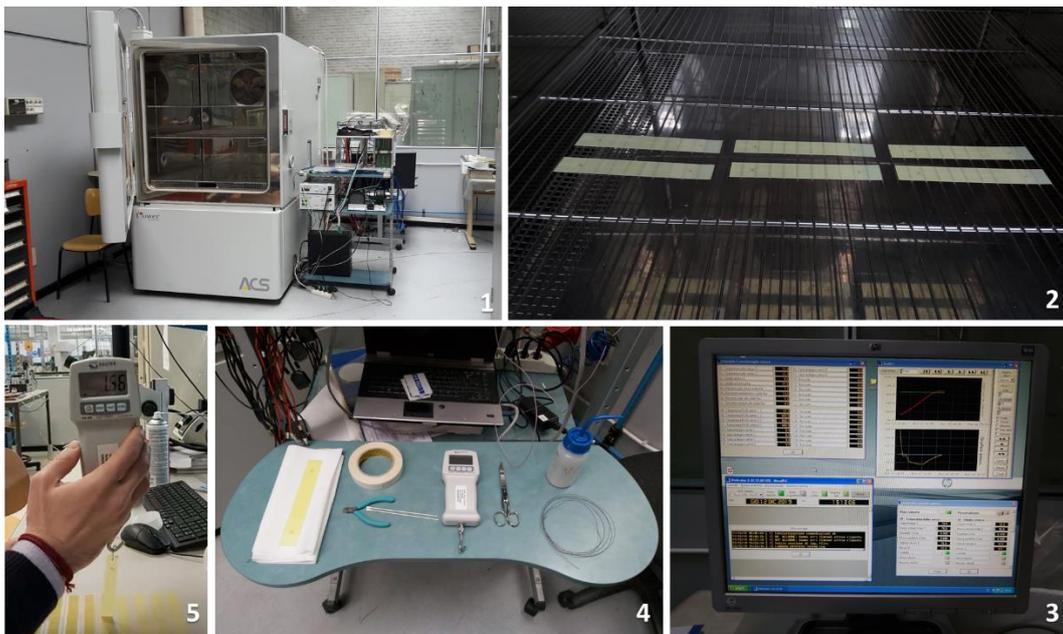


Figura 5. 6: Camera climatica per cicli termici e setup per strappo striscia

Raccolta dati

La raccolta dati consiste nel misurare la forza di adesione tra le due strisce, tramite l'utilizzo di un dinamometro (con sensibilità pari a 0.01N) opportunamente agganciato alla striscia superiore, mentre la striscia inferiore viene incollata al tavolo di lavoro per mezzo di nastro biadesivo; i diversi valori di forza di distacco vengono registrati durante lo strappo mediante acquisizione video. Dall'analisi dei valori registrati si osserva un andamento della forza di strappo non costante su ciascuna finestra di colla (andamento crescente-decrescente con un massimo) ed una fluttuazione tra finestre adiacenti, appartenenti allo stesso campione. I valori

di forza più bassi sono quelli misurati dal dinamometro nell'intramezzo, tra finestre adiacenti, dove non si trova la colla. Inoltre, i valori della forza registrata dal dinamometro, nello strappo di campioni lasciati a polimerizzare a temperatura ambiente, oscillano in un range più ristretto rispetto alle diverse polimerizzazioni effettuate a 70°C. Dopo aver individuato l'andamento delle forze di strappo per ogni finestra, è stata fatta la media delle forze che lo costituivano, ottenendo così una forza media per ogni finestra. Le forze medie associate a tutte le finestre delle strisce lasciate polimerizzare per lo stesso tempo, sono state a loro volta mediate.

Risultati

Il valore ricavato da campioni caratterizzati da polimerizzazione a temperatura ambiente, pari a circa 3 *N*, risulta minore degli altri e con un errore ragionevole.

Al contrario, gli errori associati alle polimerizzazioni a 70°C, che hanno un valore di forza pari a circa 6 *N*, rendono questi valori poco affidabili. Ci sono dunque effetti non riconducibili alle casistiche analizzate e non si è in grado di distinguere correttamente gli effetti dovuti alle condizioni di polimerizzazione da quelli risultanti dalla preparazione del campione o dal metodo di raccolta dati.

I risultati ottenuti, pur se non conclusivi, mostrano un cambiamento della tenuta della colla per temperature di polimerizzazione maggiori di quella ambiente e confermano che il riscaldamento del campione non produce un peggioramento nella tenuta della colla. Dunque, lo stress termico cui è sottoposto l'HIC non riduce la resistenza della colla, l'Araldite 2011, utilizzata per l'incollaggio dell'HIC sul CP.

5.5 Risultati ottenuti

La prima fase di produzione e caratterizzazione dell'*Engineering Model* è stata conclusa. Sono state progettate, prodotte e messe a punto tutte le attrezzature di supporto alle fasi di assemblaggio del tracker, messe a punto le relative postazioni di lavoro ed integrate con la relativa circuiteria di vuoto. Successivamente, è stata validata l'intera procedura di assemblaggio e tutti i programmi stilati per offrire supporto all'operatore durante le operazioni ad elevata precisione, eseguito il controllo qualità dei componenti assemblati (tramite l'utilizzo di programmi di misura effettuati dalla CMM) ed effettuate delle rilevazioni metrologiche per quantificare la precisione dei posizionamenti relativi tra i vari componenti che costituiscono i singoli stave. Sono stati ottenuti valori di tolleranze dimensionali e di posizionamento, che rispettano i requisiti stringenti richiesti in fase di progetto.

Infine, sono stati validati sia il sistema di cursori, implementato sul frame per compensare le dilatazioni termiche, sia la colla utilizzata nell'incollaggio CP-HIC.

Per la caratterizzazione della torretta, sottoposta alle diverse fasi di validazione dell'EM, sono stati prodotti tre stave di cui due con chip ed FPC completamente funzionanti ed uno stave, denominato "meccanico", con HIC non funzionante.

La torretta, sottoposta a diverse prove di caratterizzazione per verificare la rispondenza ai requisiti, ha passato l'intera procedura di validazione dell'EM.

Sono stati effettuati innanzitutto dei Test elettrici sui due HIC funzionanti, successivamente alle varie fasi di assemblaggio dello stave, per verificare che dopo l'esecuzione dell'intera procedura di assembly i componenti elettronici risultino perfettamente funzionanti.

A seguire, sono stati effettuati dei Test vibrazionali, per il calcolo delle frequenze naturali, sia sul singolo stave che sulla torretta, prima e dopo aver sottoposto il prototipo al carico vibrazionale (secondo disposizioni ASI). In entrambi i casi sono state trovate le stesse frequenze naturali prima e dopo l'applicazione del carico e dunque, dal punto di vista meccanico, non ci sono state ripercussioni derivanti dal carico applicato. Stave e torretta hanno superato i test vibrazionali della fase EM. Inoltre, gli esiti di ulteriori test elettrici effettuati sui prototipi prima e dopo i cicli vibrazionali, mostrano che l'HIC continua a funzionare correttamente anche successivamente all'applicazione del carico.

Infine, è previsto un Test di termo-vuoto, per la simulazione delle condizioni operative dopo il lancio, superato per l'HIC e pianificato per stave e torretta.

In definitiva, la torretta ha superato sia la prova di funzionalità dell'HIC sia quella meccanica, sottoponendola al carico richiesto per la caratterizzazione dell'EM.

La seconda fase, ossia la produzione e la caratterizzazione del *Qualification Model*, è attualmente in corso. Sono state prodotte due delle cinque torrette costituenti il tracker e il frame esterno è in fase di progettazione avanzata. Una volta assemblato, il tracker verrà sottoposto ai test di qualifica, più stringenti rispetto all'EM, per la caratterizzazione e la validazione del prototipo.

Infine, seguirà la produzione e relativa caratterizzazione del *Flight Model* che, una volta superata la fase di testing, verrà montato a bordo del satellite CSES-02.

Conclusione e sviluppi futuri

Il presente lavoro di tesi ha trattato in maniera dettagliata lo sviluppo e la progettazione della meccanica di supporto al servizio del nuovo tracciatore di particelle dell'Esperimento spaziale CSES-LIMADOU-02.

In particolare, ho contribuito personalmente alla programmazione della macchina di misura a coordinate della Mitutoyo, installata nel Laboratorio Tecnologico dell'INFN di Torino. Una volta appreso il software dedicato MCOSMOS, ho stilato appositi programmi di misura di supporto all'operatore durante l'esecuzione di operazioni ad alta precisione. L'obiettivo è stato quello di automatizzare il più possibile il procedimento, in modo tale da far compiere alla CMM il maggior numero possibile di operazioni.

Inoltre, affiancando un esperto tecnologo, mi sono occupato della definizione e della successiva validazione della procedura di assemblaggio del tracker, nonché della progettazione meccanica dei tool di assembly e della meccanica di supporto del tracker di particelle, effettuata tramite Software Cad 3D (CATIA e INVENTOR). Una volta prodotti i disegni esecutivi, e consegnati ad apposite ditte per la produzione dei componenti progettati, abbiamo effettuato la messa a punto ed il controllo qualità delle attrezzature realizzate.

Le attività di assemblaggio della torretta per la caratterizzazione dell'*Engineering Model*, in cui sono stato personalmente coinvolto, si sono concluse con successo. La torretta prodotta ha superato i vari test elettrici e vibrazionali a cui è stata sottoposta, la procedura di assemblaggio e i jig di supporto progettati sono stati validati, sono state ottenute delle precisioni di assemblaggio dell'ordine dei micron, sono state effettuate le prime acquisizioni dati ed i primi test di qualifica spaziale hanno dato esiti positivi. Inoltre, è stata effettuata una caratterizzazione preliminare della resistenza ad alte temperature della colla epossidica bicomponente, l'Araldite 2011, utilizzata per le operazioni di incollaggio tra i chip ALPIDE e il circuito stampato flessibile (FPC) e tra l'HIC e il *cold plate*.

La successiva fase produzione e validazione del *Qualification Model* è attualmente in corso. Infine, seguirà la produzione del *Flight Model* che, una volta testato, verrà montato a bordo del satellite CSES-02 (il lancio è previsto nel 2022).

Per quanto riguarda gli sviluppi futuri, un primo punto di partenza potrebbe essere quello di effettuare ulteriori caratterizzazioni delle colle epossidiche bicomponenti, utilizzando per esempio prototipi di stave "meccanici" sottoposti a cicli di termo-vuoto. Inoltre, si potrebbero stilare nuovi programmi della CMM, di supporto all'operatore per quelle operazioni che vengono svolte manualmente. Oppure, al posto della *Quick Vision Probe*, la Macchina di Misura potrebbe essere equipaggiata di un tastatore per effettuare un controllo qualità più accurato sui *cold plate* in fibra di carbonio prodotti al CERN.

Bibliografia

- [1] Uninettunouniversity, «CSES - China Seismo-Electromagnetic Satellite - LIMADOU Collaboration», sito web, url: https://www.uninettunouniversity.net/it/p1_cses-limadou.aspx. [Consultato il giorno 21 11 2020].
- [2] «CSES Roma2», sito web, url: <http://ces.roma2.infn.it/node/126>. [Consultato il giorno 13 01 2021].
- [3] ASI, «The HEPD particle detector of the CSES satellite mission for investigating seismo-associated perturbations of the Van Allen belts» sito web, url: <https://www.asi.it/scienze-della-terra/missione-cses-contributo-italianolimadou/>. [Consultato il giorno 12 01 2021].
- [4] Ricci E. , «“The passage from microstrip to pixel silicon detectors for tracking particles in space”» Tesi di Dottorato, Dipartimento di Fisica, Università di Trento.
- [5] D. C. L., «Characterization of Monolithic Pixel Detectors for the ALICE Inner Tracking System» Tesi di Laurea Magistrale, Università degli Studi di Trento, Dipartimento di Fisica, 2019.
- [6] Proto-Electronics, «PCB Flex: Vantaggi ed Inconvenienti» , sito web, url: <https://www.proto-electronics.com/it/blog/pcb-flex-vantaggi-inconvenienti>. [Consultato il giorno 24 01 2021].
- [7] «La fibra di Carbonio: cos'è? A cosa serve?» 19 11 2019. , sito web, url: <https://reglass.it/2019/11/la-fibra-di-carbonio-cose-a-cosa-serve/>. [Consultato il giorno 02 02 2021].
- [8] *Norma UNI EN 9100, "Sistemi di gestione per la qualità - Requisiti per le organizzazioni dell'aeronautica, dello spazio e della difesa"*, 2018.
- [9] «CO.ME.FI. - Metalli», sito web, url: <https://www.comefimetalli.it/lega6082>. [Consultato il giorno 07 02 2021].
- [10] «Metra Industry "Leghe dell'alluminio"» , sito web, url: <https://www.metraindustry.com/leghe-di-alluminio/>.
- [11] «Metra Industry - Catalogo EN AW-6082» , sito web, url: <http://www.metra.it/aluminium/tabellaLeghe/tabellaCatalogo6082.pdf>.
- [12] «Alluminio di Qualità - Catalogo ALCOA-MIC6» , sito web, url: https://www.alluminiodiquality.it/wp-content/uploads/2014/12/catalogo_iii_cast_plate.pdf.
- [13] «Mediatec - Caratteristiche del politetrafluoroetilene (PTFE)» , sito web, url: <https://www.mediatecsrl.it/prodotti/ptfe-vergine/>.
- [14] «Sargom - Scheda Tecnica Araldite 2011» , sito web, url: <http://www.sargom.it/catalogo/doc/2011.pdf>.

- [15] «Masterbond - Colla EP37-3FLFAO» , sito web, url:
<https://www.masterbond.com/tds/ep37-3flfao>.
- [16] «Galvanica Paciotti Oreste - Ossidazione anodica dell'alluminio» , sito web, url: <https://galvanicapaciotti.it/index.php/it/ossidazione-anodica>.
- [17] «Cromatura Moderna - Conversione Cromica dell'alluminio (ALODINE 1200S)» , sito web, url: <http://www.cromaturamoderna.it/catalogo-prodotti-categoria-scheda.php>. [Consultato il giorno 18 02 2021].
- [18] «Technical Bulletin - Scheda Tecnica ALODINE 1200S» , sito web, url: https://www.telfordindustries.com.au/new/wp-content/uploads/pdf/Alodine_1200S_TDS.pdf.
- [19] «ISO Certificazioni - UNI EN 9100» , sito web, url: <https://isocertificazioni.it/app/consulenza-certificazione-ENI-EN-9100-qualita-aerospaziale-brescia-milano-bergamo-cremona-lodi-verona-torino.aspx>.
- [20] «Mitutoyo - Catalogo CMM CRYSTA-APEX S 9206» , sito web, url: [https://shop.mitutoyo.eu/web/mitutoyo/en/mitutoyo/CRYSTA-APEX%20S900%20Series/CRYSTA-Apex%20V9206%20CNC%20CMM/\\$catalogue/mitutoyoData/PR/191-579/index.xhtml](https://shop.mitutoyo.eu/web/mitutoyo/en/mitutoyo/CRYSTA-APEX%20S900%20Series/CRYSTA-Apex%20V9206%20CNC%20CMM/$catalogue/mitutoyoData/PR/191-579/index.xhtml).
- [21] «Mitutoyo - Software MCOSMOS» Mitutoyo, sito web, url: [https://shop.mitutoyo.eu/web/mitutoyo/en/all/all/MCOSMOS%20-%20The%20Modular%20Software%20for%20all%20Kinds%20of%20Measurement/\\$catalogue/mitutoyoData/PG/SOFT%20MCOSMOS/index.xhtml?result=1617472469435](https://shop.mitutoyo.eu/web/mitutoyo/en/all/all/MCOSMOS%20-%20The%20Modular%20Software%20for%20all%20Kinds%20of%20Measurement/$catalogue/mitutoyoData/PG/SOFT%20MCOSMOS/index.xhtml?result=1617472469435). [Consultato il giorno 05 03 2021].
- [22] U. T. I. Uninettuno, «uninettunouniversity» , sito web, url: https://www.uninettunouniversity.net/it/p1_cses-limadou.aspx.