UNIVERSITA' TELEMATICA "e-Campus"

Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea in Ingegneria Industriale

Caratterizzazione meccanica di fili ultra sottili e gestione dei processi di filatura per la realizzazione del tracciatore dell'esperimento MEG al Paul Scherrer Institut (PSI) di Zurigo

Relatore:

Chiar.ma Prof.ssa Michela Simoncini

Correlatori:

Chiar.mo Dott. Fabio Bossi

Chiar.mo Dott. Francesco Grancagnolo

Chiar.mo Prof.re Marco Panareo

Tesi di Laurea di:

Alessandro Miccoli

Matricola n.1024589

Anno Accademico 2017/2018

AUTORIZZAZIONE ALLA CONSULTAZIONE DELLA TESI DI LAUREA

Il sottoscritto Alessandro Miccoli n° di matricola 1024589, nato ad Arnesano (Lecce) il 09.11.1972 autore della tesi dal titolo: Caratterizzazione meccanica di fili ultra sottili e gestione dei processi di filatura per la realizzazione del tracciatore dell'esperimento MEG al Paul Scherrer Institut (PSI) di Zurigo

AUTORIZZA

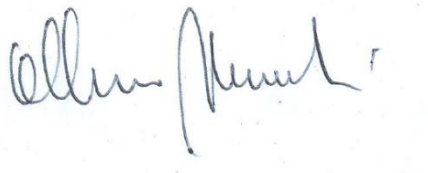
la consultazione della tesi stessa, fatto divieto di produrre, parzialmente o integralmente, il contenuto.

Dichiara inoltre di:

AUTORIZZARE

per quanto necessita l'università telematica e-Campus, ai sensi della legge n. 196/2003, al trattamento, comunicazione, diffusione e pubblicazione in Italia e all'estero dei propri dati personali per le finalità ed entro i limiti illustrati dalla legge.

Lecce, 09.11.2017 Firma



Considerate la vostra semenza: fatti non foste a viver come bruti, ma per seguir virtute e canoscenza.

(Dante Alighieri, Inferno XXVI)

Indice

Introduzione

Capitolo 1. Rivelatori

1.1 Rivelatori di Particelle;

1.2 Rivelatori di Tracce:

- 1.2.1 Camere Proporzionali;
- 1.2.2 Camere a Drift;
- 1.2.3 Problematiche di una camera a fili;

1.3 Esperimento MEG:

- 1.3.1 Evoluzione delle camere a deriva ultra-leggere;
- 1.3.2 Geometria della cella elementare, numero di fili, sense wires e filed wires, layers e sublayers;
- 1.3.3 Struttura meccanica del rivelatore;
- 1.3.4 Analisi strutturale della camera a deriva soggetta al carico dei fili;
- 1.3.5 Definizioni e caratteristiche tecniche dei tessuti in fibra di carbonio;
- 1.3.6 Cilindro esterno della camera a drift;
- 1.3.7 Problematiche del rivelatore: effetto delle imperfezioni geometriche sul carico critico;

Capitolo 2. Fili Ultra sottili

2.1 Tipologie di fili sottili:

- 2.1.1 Rivestimento superficiale dei fili;

2.2 Caratterizzazione Meccanica;

2.3 Caratterizzazione elettrica;

2.4 Analisi Morfologica SEM e Microanalisi EDX;

Capitolo 3. Gestione dell'esperimento MEG

3.1 Un istituto di ricerca: l'INFN:

3.1.1 La struttura e l'organizzazione;

3.1.2 Modalità di finanziamento ordinario dell'INFN per gli esperimenti;

3.2 Gestione dei progetti di ricerca:

3.2.1 Gestione dei progetti Europei;

3.2.2 Acquisti;

3.2.3 Personale: dipendenti INFN e personale Universitario

3.3 MEG:

3.3.1 Il prototipo di MEG;

3.3.2 Il robot di filatura;

3.3.3 Fase operativa;

3.3.4 Controllo di qualità;

3.3.5 Assemblaggio presso la sezione INFN di Pisa;

Capitolo 4. Sigillatura del tracciatore e spedizione al Paul Scherrer Institut (PSI) di Zurigo

4.1 Chiusura e sigillatura della camera a drift;

4.2 Trasporto: normativa e documentazione doganale;

Conclusioni

Bibliografia

Ringraziamenti

Introduzione

Il lavoro di tesi in questione nasce dalla mia esperienza lavorativa maturata in oltre vent'anni di impiego professionale presso la sezione di Lecce dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN).
L'INFN si è posto l'obiettivo di valutare la possibilità di impiegare materiali innovativi nella progettazione e realizzazione di rivelatori traccianti ad alta trasparenza. Tale obiettivo progettuale è legato alla necessità di ottenere una migliore prestazione del rivelatore in termini di precisione spaziale, leggerezza, stabilità, proprietà di barriera ai gas e schermatura elettromagnetica alle radiofrequenze, rispetto a quella ottenuta con i materiali precedentemente impiegati (metalli e/o compositi). La sezione INFN di Lecce, insieme ad altri gruppi di ricerca Italiani ed Esteri ha avuto, nello specifico, il ruolo principale di sviluppare progettualmente e successivamente realizzare un tracciatore di particelle altamente performante con precisioni di posizionamento spaziale dei fili dell'ordine di 10 μm. Il rivelatore di particelle in questione si basa sul principio secondo il quale una particella carica che attraversa un gas lo ionizza producendo una coppia elettrone-ione positivo. Gli elettroni vengono raccolti, per attrazione elettrostatica, da un elettrodo carico positivamente (anodo) mentre gli ioni positivi sono attratti da un elettrodo con potenziale negativo (catodo). Osservando su quale elettrodo è stato generato un impulso di tensione e, contemporaneamente, misurando il tempo che l'elettrone impiega a raggiungere l'anodo (tempo di deriva) partendo dall'istante in cui è avvenuta la collisione, si può ricostruire, con un buon grado di accuratezza, la traiettoria della particella.
La prima parte della tesi è improntata sulla caratterizzazione dei fili ultra sottili utilizzati come elettrodi del tracciatore dell'esperimento MEG e nello sviluppo di una "macchina di filatura" (wiring machine) necessaria sia per la costruzione di un prototipo in scala, sia per la costruzione del tracciatore vero e proprio.
La seconda parte della tesi è incentrata sulla gestione dell'esperimento da un punto di vista ingegneristico, cioè valutando le specifiche tecniche ed i tempi dettati dal comitato scientifico internazionale. La gestione organizzativa delle risorse umane, dei ruoli professionali e finanziarie, in uno spazio temporale prefissato, ha innescato una dinamica lavorativa di tipo industriale. Si è passati, cioè, dal realizzare un prototipo in scala in laboratorio ad una collaborazione capillare con numerosi gruppi di ricerca. Questo ha permesso uno scambio continuo di opinioni e soluzioni tecniche completamente libere da qualsiasi vincolo sociale.
In ultimo si è proceduto al test del rivelatore nel sito di assemblaggio, ovvero la sezione INFN di Pisa, al suo impacchettamento e spedizione secondo valori prefissati di umidità e temperatura presso il sito di integrazione che è il Paul Scherrer Institut di Zurigo.

Capitolo 1

1.1 Rivelatori di particelle

Un rivelatore di particelle è, in generale, uno strumento in grado di evidenziare il passaggio di una radiazione. Quando una particella (carica o neutra) attraversa la materia, interagendo con essa in modo elettromagnetico o nucleare, cede al mezzo tutta o parte della sua energia, determinando un eccitazione degli atomi (o molecole) con conseguente emissione di fotoni, o una ionizzazione: i fotoni e gli elettroni così prodotti possono essere rivelati, consentendo di riconoscere il passaggio della particella primaria. Per una vasta categoria di rivelatori, possiamo affermare che il risultato finale dell'interazione è la presenza nel mezzo di un certo numero di cariche elettriche. In realtà esistono parecchi tipi di rivelatori, che, oltre a segnalare il passaggio della particella, sono in grado di fornire ulteriori informazioni su:

- Energia della/e particella/e che ha/hanno attraversato il rivelatore;
- Posizione;
- Numero di particelle;
- Quantità di moto;
- Istante di attraversamento;
- Identificazione del tipo di particella;

Nessun rivelatore sarà sensibile a tutti i tipi di radiazione e a tutte le energie. In realtà ogni rivelatore è progettato per essere sensibile ad un certo tipo di radiazione in un determinato intervallo di energie; al di fuori di tale regione, si ottiene generalmente un segnale inutilizzabile o una forte diminuzione dell'efficienza di rivelazione. Tale caratteristica dipende da diversi fattori:

1. la probabilità con cui avvengono le interazioni tra la particella primaria ed il materiale di cui è composto il rivelatore;
2. la massa del rivelatore;
3. il rumore intrinseco del rivelatore, ovvero la caratteristica di produrre segnali imprevisti ed indesiderati che si sovrappongono al segnale utile;
4. il materiale di protezione che circonda il volume sensibile del rivelatore (a causa dell'assorbimento del mezzo di protezione, infatti, solo una radiazione con energia sufficiente per attraversare tale spessore di materiale può essere rivelata);

La particella incidente può rilasciare tutta o parte della sua energia nel rivelatore oppure attraversarlo senza subire interazioni, con probabilità che variano a seconda del tipo di radiazione, della sua energia e delle dimensioni del rivelatore. La probabilità che una

particella che incide sul rivelatore venga effettivamente rivelata è parametrizzata come: $P(x) = 1 - e^{-\mu x}$, dove μ è il coefficiente di attenuazione lineare della radiazione nel mezzo di cui è composto il rivelatore e dove x è il cammino percorso all'interno del rivelatore.
Storicamente sono stati sviluppati diversi tipi rivelatori come ad esempio:

- Rivelatori a scintillazione;
- Camera a nebbia;
- Camera a bolle;
- Camera a scintilla;
- Camera a effetto Cerenkov;
- Rivelatori a ionizzazione gassosi (Geiger-camere proporzionali, camere a ionizzazione, camere a drift, contatori a piatti resistivi);

Di seguito daremo una breve descrizione di questi ultimi tipi di rivelatori ed in particolare delle camere proporzionali e delle camere a drift che sono di maggiore rilevanza per questa tesi.

1.2 Rivelatori di tracce

1.2.1 Camere proporzionali

Le camere multifili (MWPC, Multi Wire Proportional Chamber) sono costituite da due o più piani di sottilissimi fili paralleli tra loro (r ~ 10 μm), tutti alimentati e letti da circuiti elettronici indipendenti. Questi fili sono mantenuti ad un potenziale positivo (alcuni kVolt) e ad una distanza tipica di 2 mm l'uno dall'altro. Quando un particella ionizza il gas di riempimento, solo i fili più vicini raccolgono il segnale elettrico: in questo modo il filo che produce il segnale elettrico identifica una coordinata della particella. Il campo elettrico attorno ai fili è molto elevato e questo fa sì che gli elettroni primari siano fortemente accelerati e che raggiungano energie cinetiche così elevate da poter essi stessi cominciare a ionizzare il gas. Si produce allora una "valanga" di carica che viene raccolta sui fili e convertita in un segnale elettrico. Il tempo di arrivo e l'ampiezza dell'impulso vengono registrati elettronicamente. La conoscenza della posizione dei fili permette di determinare dove la particella è passata. Se i fili di due piani indipendenti sono perpendicolari tra di loro si riescono a misurare le coordinate X e Y della posizione della particella e se esistono parecchi piani di fili si ottiene il cosiddetto "tracking" ossia il tracciamento della traiettoria della particella. Si possono ricostruire i vertici delle interazioni, e se le MWPC sono immerse in un campo magnetico si può misurare il raggio di curvatura delle traiettorie e quindi la quantità di moto della particella.

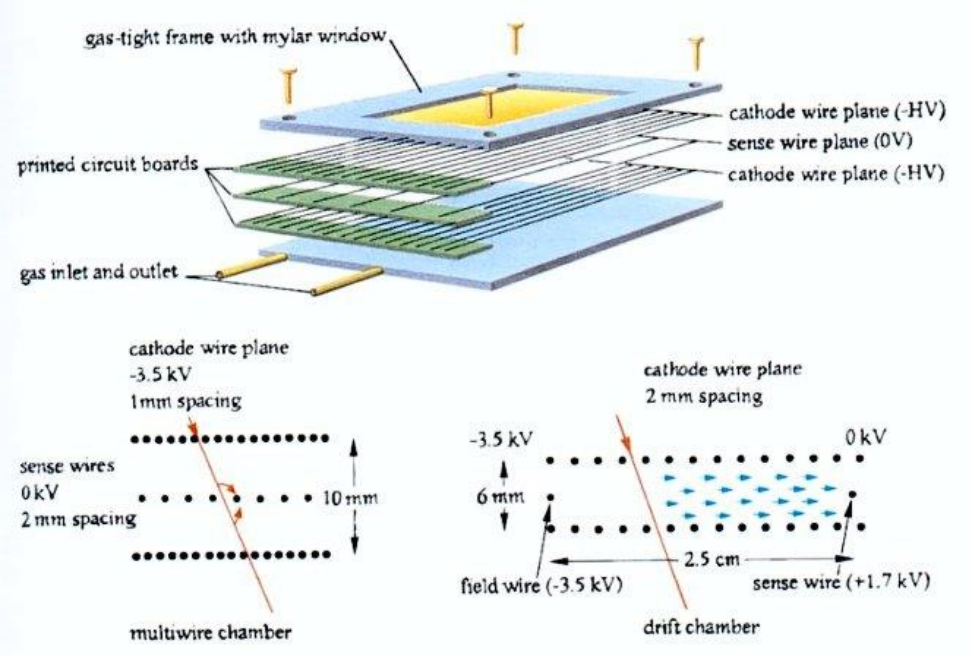


Figura1 Camera proporzionale multifili (MWPC)

1.2.2 Camere a Drift

Una camera a fili in cui si misura il tempo di deriva degli elettroni di ionizzazione rispetto ad un riferimento temporale esterno si chiama Camera a Deriva o Camera a Drift.
Il segnale di riferimento temporale può essere fornito da un altro rivelatore (ad esempio scintillatori) o, in esperimenti presso acceleratori, da un segnale sincronizzato con il passaggio del fascio. In questo rivelatore la distanza tra il catodo e i fili anodici può essere grande: fino a circa 10 cm. La posizione della particella è misurata dal tempo di deriva se si conoscono la velocità di deriva degli elettroni di ionizzazione. La risoluzione spaziale è definita dagli effetti di diffusione degli elettroni durante la migrazione verso l'anodo e dalla precisione con cui è nota la velocità di deriva ed è tipicamente 100-200 μm. Le prestazioni di un rivelatore a gas di questo tipo migliorano con la pressione, poiché aumenta la ionizzazione specifica e diminuisce la diffusione degli elettroni nel gas. La purezza del gas è un parametro di funzionamento molto importante perché in presenza di contaminazioni da elementi elettronegativi, gli elettroni possono essere catturati nel loro moto di deriva verso l'anodo. I limiti permessi per queste impurità, dipendono dalla lunghezza del cammino di deriva: più questo è lungo, più alto deve essere il livello di purezza.
Le camere a drift planari (vedi Fig.2) misurano solamente la distanza tra la traccia e il piano dei fili, per cui occorrono più piani per determinare una traiettoria. Solitamente i

piani di fili hanno diverse angolazioni, in modo da ottenere la misura di proiezioni diverse, offrendo la possibilità di ricostruire la traccia nello spazio. Spesso le camere a drift si utilizzano su collisionatori centrali e, per simmetria, assumono forma cilindrica con asse coincidente con la direzione del fascio. Per poter lavorare con velocita di deriva costanti e dunque con campi elettrici il più possibile uniformi lungo l'intero volume della camera, si alternano fili anodici (sense wires) e fili catodici (field wires).

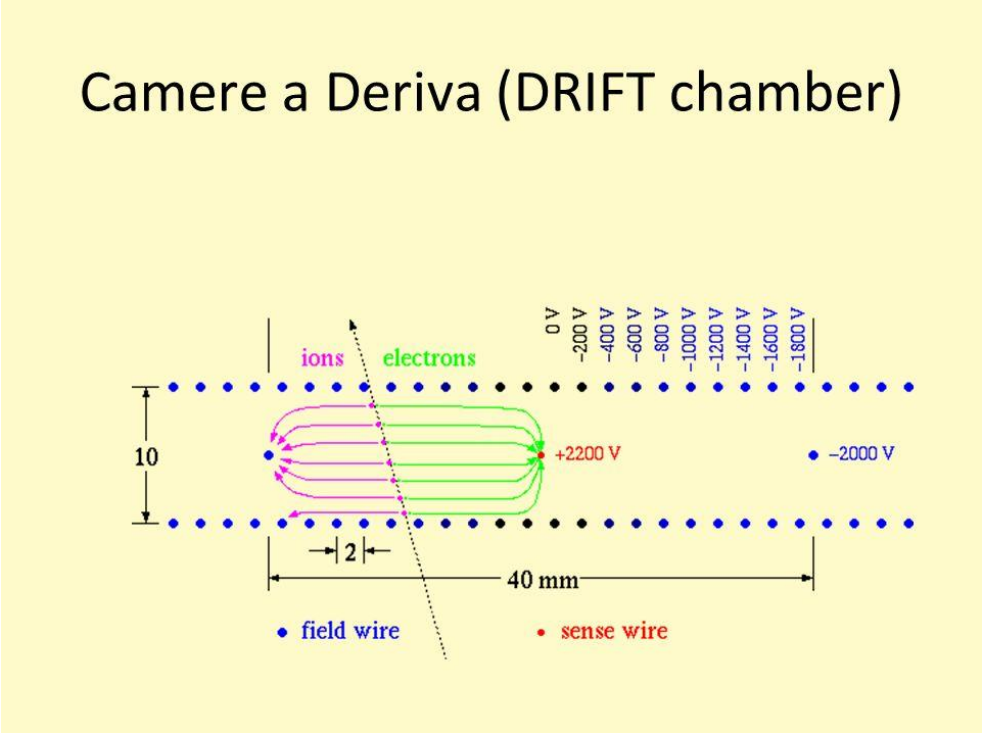


Figura 2 Struttura e principio di funzionamento di una Camera a Drift di tipo planare

Generalmente, i fili sono disposti su strati concentrici con strati di fili di campo alternati a strati di fili di sense intervallati da fili di campo (Fig.3). Questo tipo di configurazione e denominata a Cella di Deriva. In Fig.4 si riporta un esempio di cella di deriva e l'andamento delle linee di forza del campo elettrico creato.

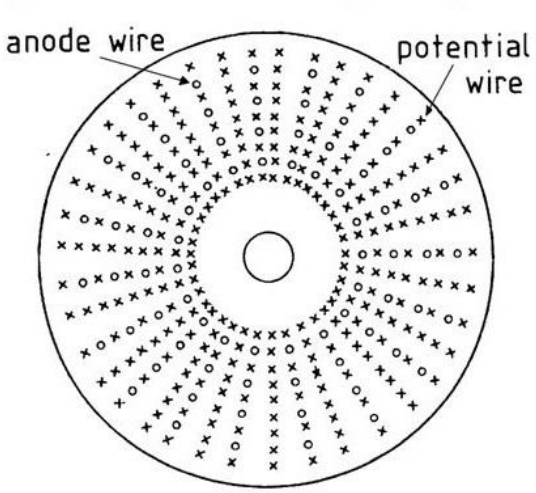


Figura 3 Struttura di una camera a drift di tipo cilindrico

L'identificazione del sense wire dove si sono depositati gli elettroni ed il calcolo della distanza della particella dall'anodo fornisce due coordinate spaziali; per avere una completa ricostruzione della traiettoria, è necessaria la coordinata relativa alla posizione della particella lungo l'asse del cilindro. Per ottenerla, i fili vengono posizionati con un piccolo angolo stereo rispetto all'asse cilindrico e con segni alternati in funzione del raggio del layer, in modo da avere sempre due viste indipendenti tra loro per la ricostruzione della traiettoria nello spazio (Fig.5).

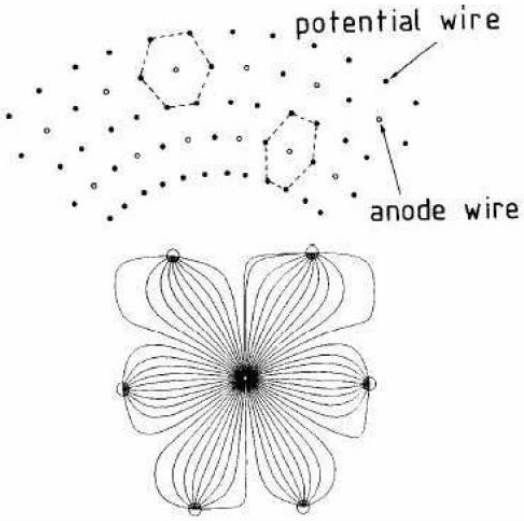


Figura 4 Disposizione geometrica longitudinale dei fili in una Camera a Deriva cilindrica con celle esagonali e andamento delle linee di forza del campo elettrico

Immergendo una camera a deriva in un campo magnetico di intensità nota si induce una curvatura proporzionale alla quantità di moto della particella il cui verso dipende dal segno della carica della stessa (Legge di Lorenz).

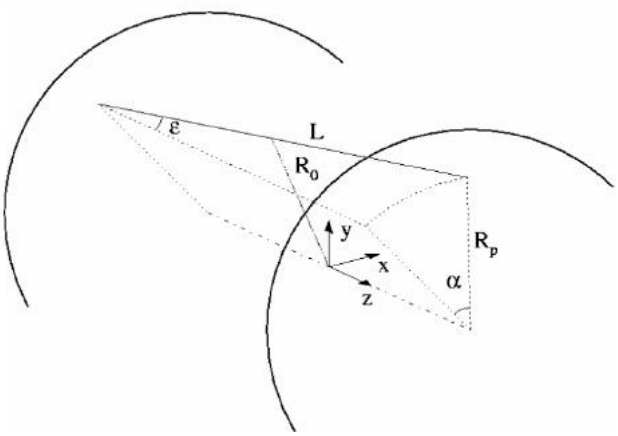


Figura 5 Rappresentazione geometrica dell'angolo stereo in una camera a deriva

1.2.3 Problematiche di una camera a fili

Nella realizzazione delle camere a deriva devono essere affrontate una serie di problematiche costruttive. Tra esse, le più rilevanti sono connesse a:

1. Dimensioni della cella;
2. Scelta dei materiali costituenti il rivelatore;

Nel dimensionare la cella bisogna trovare il giusto compromesso tra l'esigenza di massimizzare la risoluzione spaziale, che richiederebbe grandi dimensioni della cella stessa, rispetto al minimizzare la possibilità di cattura delle impurità presenti nel gas. Poiché la scelta della miscela di gas, così come delle tensioni di operazione della camera, dipende dalle caratteristiche della radiazione che si intende rivelare, il dimensionamento della cella varia a seconda di queste.
La scelta dei materiali di costruzione utilizzati per la realizzazione del rivelatore è cruciale in quanto questi devono avere la minima interazione con le particelle da rilevare. Quindi occorre ricorrere a materiali leggeri per densità, basso numero atomico e peso atomico. Inoltre, i fili, sia di sense che di field, dovrebbero mantenere una direzione rettilinea e ciò richiede materiali in grado di compensare le curvature dei fili indotte dal peso proprio e l'attrazione elettrostatica tra i fili stessi. Per queste ragioni spesso la scelta ricade su materiali compositi fibrorinforzati con fibre di carbonio (carbon fiber reinforced polymers, CFRP), con spessori il più possibile contenuti.

1.3 Esperimento MEG

1.3.1 Evoluzione delle camere a deriva ultra-leggere: camera di MEG

L'esperimento MEG, presso il PSI di Zurigo, ricerca il decadimento del muone in un elettrone e un fotone gamma, $\mu^+ \rightarrow e^+ + \gamma$, proibito nell'ambito del modello standard (SM) delle particelle elementari in quanto il decadimento classico del muone è: $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_\mu + \nu_e$. Negli anni quaranta un brillante fisico italiano, Bruno Pontecorvo, cercava questo decadimento nei raggi cosmici pensando che il muone fosse un elettrone più massivo e quindi soggetto a tale decadimento. È interessante notare che l'assenza di questo decadimento a quel livello è stato un argomento usato, all'epoca, in favore dell'esistenza di due diversi tipi di neutrino. Nell'ambito dello Standard Model, la probabilità di osservare il decadimento $\mu^+ \rightarrow e^+ + \gamma$ è di circa 10^{-54}, cioè praticamente inaccessibile sperimentalmente. Nell'esperimento MEG, i muoni (particelle positive) del fascio con un'energia di 4.5MeV e una intensità di 3×10^7s-1vengono arrestati da un sottile bersaglio di polietilene in modo che possano decadere a riposo. Il fotone viene rivelato nel calorimetro a Xenon (Xe) liquido (LXe) che permette di misurare l'energia e l'istante di incidenza del fotone. Ottocento litri di materiale scintillante sono mantenuti a una temperatura di 16K (-257,5 °C) in una struttura di acciaio e alluminio (criostato) a forma di semitoroide trapezoidale (una C, per intenderci) che copre il 10% dell'angolo solido attorno alla direzione di volo del muone. La traiettoria del positrone da 52.8 MeV/c, emesso in direzione opposta rispetto al fotone, viene curvata dal campo di un magnete superconduttore a gradiente di campo (COBRA) ed il suo percorso viene identificato attraverso la camera a drift (DC). Infine il positrone va a incidere su un insieme di barre di scintillatore plastico, ciascuna letta alle due estremità da fotomoltiplicatori (Timing Counter), dove viene registrato con grande precisione il suo tempo di arrivo (Fig.6).

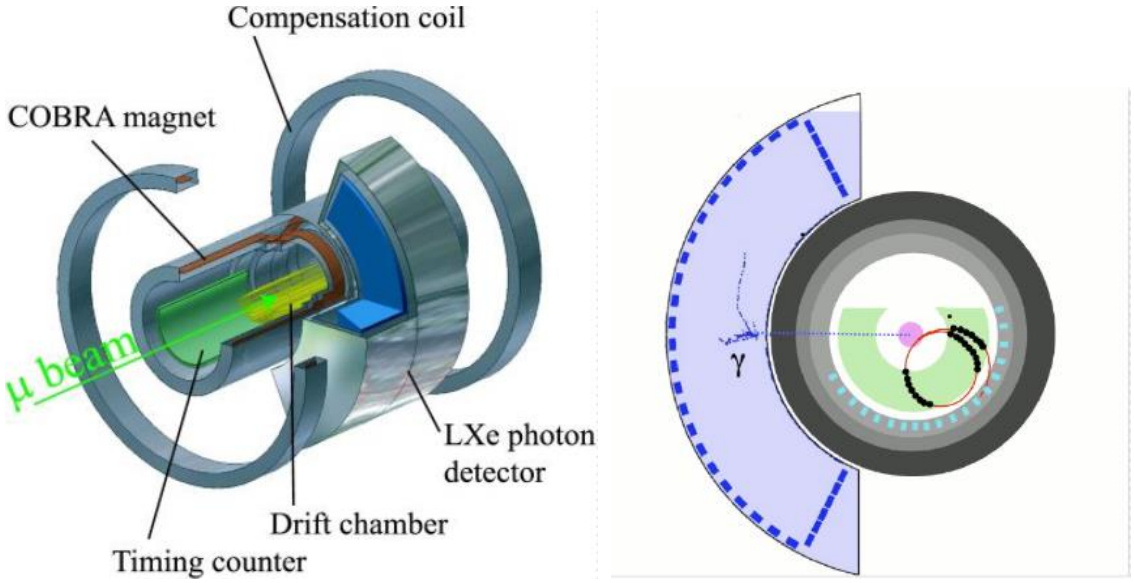


Figura 6 Vista 3D e frontale dell'esperimento MEG

Nel corso degli anni, lo sviluppo di nuovi materiali e l'introduzione di nuovi sistemi di progettazione e simulazione computerizzata, ha permesso lo sviluppo di rivelatori sempre più performanti in materia di trasparenza alle radiazioni ed altamente affidabili e precisi nell'acquisizione dei segnali. Nel caso specifico della camera a deriva di MEG il punto di focalizzazione è stato il posizionamento spaziale dei fili. Nei precedenti tracciatori i fili venivano tensionati singolarmente tra i due endplates ed il loro ancoraggio consisteva in una "crimpatura" meccanica del filo attraverso dei passanti metallici chiamati "feed-trought ". Tecnicamente, quindi, si inserivano dei fili in Alluminio da 80μm di diametro in dei feed-trought da 120μm di diametro, nel caso specifico dei fili catodici. Nel caso, invece, dei fili anodici, il filo utilizzato era in Tungsteno da 100μm di diametro inserito sempre nello stesso feed-trought da 120um. Si può quindi immaginare l'incertezza di posizionamento dei fili nello spazio. Inoltre, tutto questo era amplificato dalle deformazioni indotte sugli endplates dal carico totale in gioco scaturito dalla trazione di fili di grosso diametro. In MEG si è passati dunque a considerare la possibilità di utilizzo di fili ultra-sottili, a limite delle prestazioni meccaniche, nonché all'eliminazione totale della crimpatura meccanica introducendo una nuova filosofia di ancoraggio dei fili stessi. Utilizzando, appunto, sistemi complessi di filatura , non più incentrati sul filo singolo, bensì su un numero adeguato di fili tali da parametrizzare le richieste di progetto ed introducendo la saldatura laser come sistema innovativo di ancoraggio, abbiamo ridotto l'incertezza del posizionamento dei fili di un fattore quattro rispetto ai metodi tradizionali. Inoltre, un fattore di non trascurabilità innovativa è stato anche il ridurre quasi a zero le operazioni manuali. Da un punto di vista elettronico, inoltre, l'acquisizione di segnali "puliti" ha richiesto l'utilizzo di schede multi-layers e multi-canali, in digitale, molto veloci e complesse.

1.3.2 Geometria della cella elementare, numero di fili, sense wires e field Wires, layers e sublayers

La struttura portante della camera è geometricamente costituita da due cilindri, uno portante esterno ed uno di chiusura ed a tenuta di gas interno. Nella zona delimitata dai due cilindri vengono disposti i fili ancorati su due endplates laterali, fissati a loro volta sul cilindro esterno (Fig.7).

Figura 7 Modello 3D della camera a deriva di MEG

I fili sono disposti su cerchi concentrici chiamati “anelli”. Ciascun anello si riferisce ad un “sublayer”, tre anelli consecutivi fatto un “layer”. Un sublayer può essere composto da soli field wires o da field wires alternati a sense wires. Seguendo la simmetria cilindrica della camera, le celle elementari aumentano le loro dimensioni aumentando il raggio dell’anello. La cella elementare ha la forma di un quadrato quasi regolare al centro del quale troviamo il sense wire e sui vertici i field wires (Fig.8).

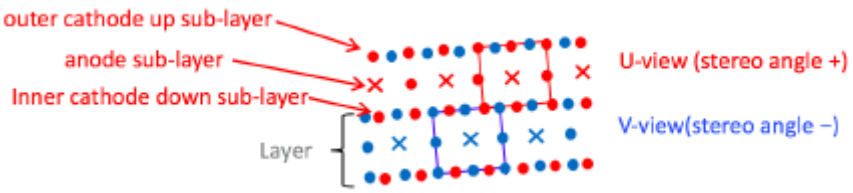


Figura 8 Disposizione spaziale dei fili di sense e dei fili di field

La dimensione della cella varia linearmente da 6,7 sul raggio interno fino a 8,7 mm sul raggio esterno e di conseguenza l'angolo stereo varia da 5,8° a 8,5° (Fig.9). I fili relativi all'anodo hanno un diametro di 20 µm e sono in Tungsteno rivestiti in oro, i fili relativi al catodo sono in Alluminio da 40µm rivestiti in Argento. Inoltre, sulla parte inferiore, cioè a raggio minore e sulla parte superiore, cioè a raggio maggiore, vi sono due layers di fili di guardia da 50 µm in Alluminio rivestiti in argento.

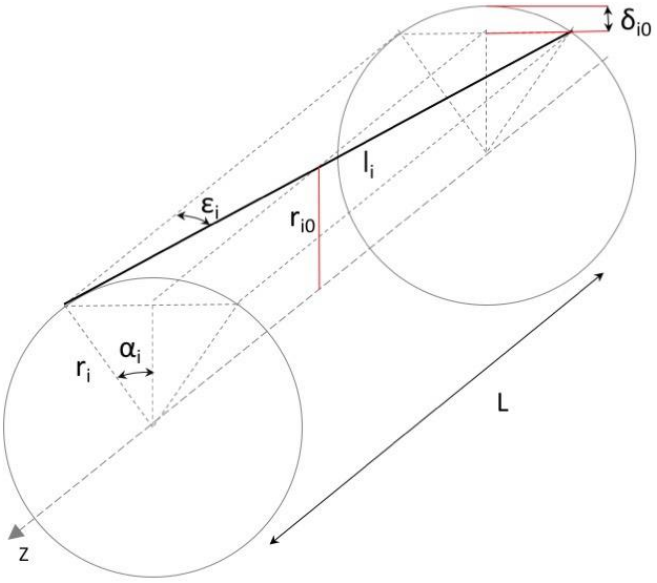


Figura 9 Angoli caratteristici in una camera a fili ad angolo stereo

Per realizzare la camera a drift di MEG si è scelto di mantenere costante la proiezione dell'angolo $\alpha_i = \alpha = 30°$, quindi la lunghezza del filo sarà: $l_i = L/\cos(\varepsilon_i)$ dove L è la lunghezza della camera e ε_i è l'angolo stereo. Poiché r_i è la posizione radiale del filo sull'endplate, al centro della camera, dove teoricamente la forma quadrata della cella è regolare, si avrà: $r_{i0} = r_i \cos(\alpha_i/2)$, dove L=1940 mm. L'angolo stereo è determinato dalla funzione del raggio r_i tramite la formula:

$$\varepsilon_i = \arctan\left(\frac{2r_i}{L}\sin\alpha\right)$$

In funzione di ciò, la camera prende la forma di un iperboloide dove le facce sono in realtà lo sviluppo dei piani dei fili. La posizione radiale del filo i-esimo lungo l'asse Z è:

$$r_i(\mathrm{z}) = r_i\cos\alpha\sqrt{1+\tan^2\alpha\frac{4z^2}{L^2}}.$$

L'angolo stereo si ottiene fissando le PCBs nell'i-esimo settore dell'endplate US e nell' (i+2)-esimo settore dell'endplate DS (Fig.10).

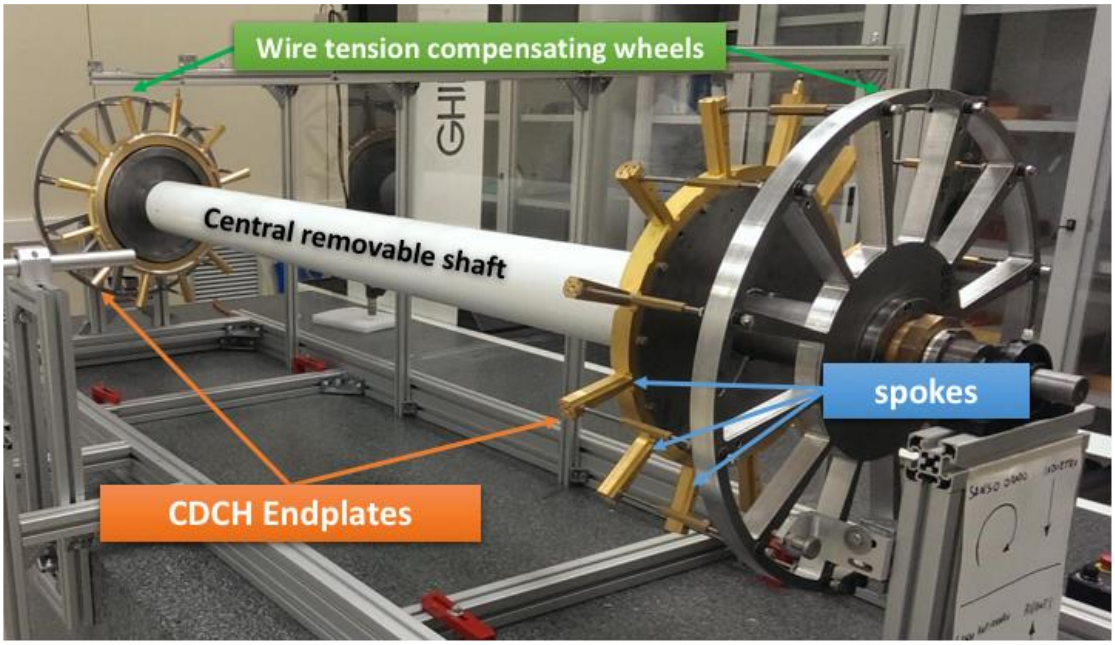


Figura 10 Disposizione geometrica degli endplates

I primi due layers sono dei fili di guardia da 192 filed wires, successivamente il primo layer "attivo" è formato da 384 field wires . Il secondo layer "attivo" avrà invece 192 field wires e 192 sense wires ed il terzo layer nuovamente 384 field wires.

Così facendo si è formata la prima cella completa come mostrato in Fig.5. I fili candidati a diventare sense wires devono possedere le seguenti caratteristiche:

1. dimensioni molto contenute, per ottenere campi elettrici locali molto intensi. Il diametro nominale tipico è di 20 μm;
2. buona resistenza a trazione. Sotto l'azione del peso proprio e delle interazioni elettrostatiche con gli altri fili, l'asse devia dalla configurazione rettilinea, e ciò influisce negativamente sulla rilevazione della traccia;
3. peso specifico basso; minore è il peso specifico, minore risulta la "sagitta" tra il filo e la configurazione rettilinea, a parità di tensione meccanica;
4. buona conducibilità elettrica;

La resistività del filo è inversamente proporzionale alla sezione del filo. Fili di piccolo diametro comportano inevitabilmente una bassa conducibilità elettrica. Alcuni fisici ritengono che la resistenza elettrica dei sense wires sia un parametro chiave per le prestazioni della camera, e suggeriscono che proprio essa sia la fonte dominante dei disturbi che vengono introdotti nel la amplificazione dei segnali. La buona conducibilità elettrica non si accompagna generalmente però ad una buona resistenza a trazione del filo; si adottano perciò fili ad alta resistenza meccanica, rivestiti di metallo di ottima conducibilità. La scelta cade su fili in lega di tungsteno (ad es. 3% di renio) rivestiti di oro. Valori tipici della resistenza elettrica sono di 120 Ω/m.
Non sono invece richieste particolari qualità ai fili che devono costituire i field-wires; tipicamente hanno maggior diametro (40÷50 μm), per limitare il campo elettrico sulla loro superficie ed evitare, così, di amplificare il segnale dovuto alla raccolta degli ioni positivi. Per motivi di bassa densità e alta conduttività sono in alluminio ricoperto di argento.

Complessivamente, la camera di MEG consta di 19690 field wires e 1900 sense wires distribuiti nella seguente modalità:

						full coverage (360°)													
			alpha	0,523599		Sense Wires	1920			epsi positive									
						Field Wires	9216			epsi negative									
						Total Wires	11136												
subL	# of Lay	wires	sign(stereo)	height at z=0	width at z=0	R wires at z=0	pitch at z=0	endplate distance	2*α	epsi degrees	epsi radiants	R wires endpl	drop	Wire length	pitch on PCB	width endpl	height endpl		
0	0		inner cyl out			157,000	0,000	1912,000	0,000	0,000	0,000000	157,000	0,000						
1	3	192	guard layer			189,792	6,211	1912,000	60,000	5,8674	0,102406	196,487	6,695	1922,069	6,430				
2	3	192	guard layer			189,792	6,211	1912,000	60,000	-5,8674	0,102406	196,487	6,695	1922,069	6,430				
3	10	384	inner field up-			194,621	3,184	1912,000	60,000	-6,0156	0,104993	201,487	6,866	1922,587	3,297				
4	10	384	inner field dw+			194,621	3,184	1912,000	60,000	6,0156	0,104993	201,487	6,866	1922,587	3,297				
5	9	192	sense/field +	**6,703**	**6,475**	197,858	6,475	1912,000	60,000	6,1149	0,106726	204,838	6,980	1922,941	6,703	**6,703**	**6,703**		
6	9	384	outer field up+			201,096	3,290	1912,000	60,000	6,2142	0,108459	208,190	7,094	1923,301	3,407				
7	9	384	inner field dw-			201,096	3,290	1912,000	60,000	-6,2142	0,108459	208,190	7,094	1923,301	3,407				
8	8	192	sense/field -	**6,926**	**6,690**	204,441	6,690	1912,000	60,000	-6,3168	0,110248	211,653	7,212	1923,679	6,926	**6,926**	**6,926**		
9	8	384	outer field up-			207,786	3,400	1912,000	60,000	-6,4193	0,112037	215,116	7,330	1924,063	3,520				
10	8	384	inner field dw+			207,786	3,400	1912,000	60,000	6,4193	0,112037	215,116	7,330	1924,063	3,520				
11	7	192	sense/field +	**7,157**	**6,913**	211,243	6,913	1912,000	60,000	6,5251	0,113885	218,695	7,452	1924,467	7,157	**7,157**	**7,157**		
12	7	384	outer field up+			214,699	3,513	1912,000	60,000	6,6310	0,115732	222,273	7,574	1924,876	3,637				
13	7	384	inner field dw-			214,699	3,513	1912,000	60,000	-6,6310	0,115732	222,273	7,574	1924,876	3,637				
14	6	192	sense/field -	**7,395**	**7,143**	218,270	7,143	1912,000	60,000	-6,7402	0,117639	225,970	7,700	1925,307	7,395	**7,395**	**7,395**		
15	6	384	outer field up-			221,842	3,630	1912,000	60,000	-6,8495	0,119546	229,668	7,826	1925,744	3,758				
16	6	384	inner field dw+			221,842	3,630	1912,000	60,000	6,8495	0,119546	229,668	7,826	1925,744	3,758				
17	5	192	sense/field +	**7,641**	**7,381**	225,532	7,381	1912,000	60,000	6,9623	0,121516	233,488	7,956	1926,204	7,641	**7,641**	**7,641**		
18	5	384	outer field up+			229,223	3,751	1912,000	60,000	7,0751	0,123484	237,309	8,086	1926,671	3,883				
19	5	384	inner field dw-			229,223	3,751	1912,000	60,000	-7,0751	0,123484	237,309	8,086	1926,671	3,883				
20	4	192	sense/field -	**7,895**	**7,626**	233,035	7,626	1912,000	60,000	-7,1916	0,125517	241,256	8,221	1927,161	7,895	**7,895**	**7,895**		
21	4	384	outer field up-			236,849	3,875	1912,000	60,000	-7,3080	0,127549	245,204	8,355	1927,659	4,012				
22	4	384	inner field dw+			236,849	3,875	1912,000	60,000	7,3080	0,127549	245,204	8,355	1927,659	4,012				
23	3	192	sense/field +	**8,158**	**7,880**	240,789	7,880	1912,000	60,000	7,4282	0,129647	249,283	8,494	1928,182	8,158	**8,158**	**8,158**		
24	3	384	outer field up+			244,729	4,004	1912,000	60,000	7,5484	0,131744	253,362	8,633	1928,714	4,146				
25	3	384	inner field dw-			244,729	4,004	1912,000	60,000	-7,5484	0,131744	253,362	8,633	1928,714	4,146				
26	2	192	sense/field -	**8,429**	**8,142**	248,799	8,142	1912,000	60,000	-7,6724	0,133909	257,576	8,777	1929,272	8,429	**8,429**	**8,429**		
27	2	384	outer field up-			252,871	4,138	1912,000	60,000	-7,7965	0,136074	261,791	8,920	1929,839	4,284				
28	2	384	inner field dw+			252,871	4,138	1912,000	60,000	7,7965	0,136074	261,791	8,920	1929,839	4,284				
29	1	192	sense/field +	**8,710**	**8,413**	257,077	8,413	1912,000	60,000	7,9245	0,138309	266,146	9,069	1930,435	8,710	**8,710**	**8,709**		
30	1	384	outer field up+			261,283	4,275	1912,000	60,000	8,0525	0,140542	270,500	9,217	1931,040	4,426				
31	1	384	inner field dw-			261,283	4,275	1912,000	60,000	-8,0525	0,140542	270,500	9,217	1931,040	4,426				
32	0	192	sense/field -	**8,999**	**8,693**	265,630	8,693	1912,000	60,000	-8,1846	0,142849	275,000	9,370	1931,675	8,999	**8,999**	**9,000**		
33	0	384	outer field up-			269,976	4,417	1912,000	60,000	-8,3167	0,145154	279,500	9,524	1932,321	4,573				
34	0	384	outer field dw+			269,976	4,417	1912,000	60,000	8,3167	0,145154	279,500	9,524	1932,321	4,573				
35	0	192	guard layer			274,322	8,977	1912,000	60,000	8,4487	0,147457	283,999	9,677	1932,977	9,294				
36	0	192	guard layer			274,322	8,977	1912,000	60,000	-8,4487	0,147457	283,999	9,677	1932,977	9,294				
0	0	0	outer cyl in			294,000	0,000	1912,000	0,000	0,000	0,000000	294,000	0,000						

I fili sono saldati sulle PCBs (Fig.11) utilizzando un sistema di saldatura selettiva laser il quale ci permette di uniformare gli standard di qualità ed affidabiltà. Con la saldatura laser si utilizza un filo da 1mm di diametro in lega SnPb con percentuali 63/37 lead-free ed a bassa temperatura di fusione, normalmente 285°C.

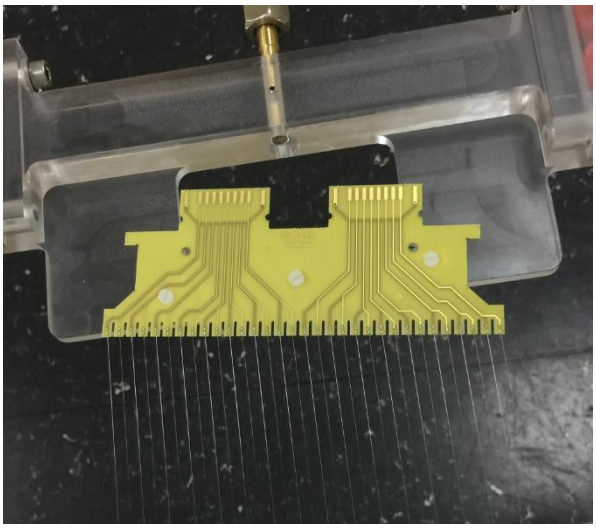


Figura 11 PCB con fili di sense e field

1.3.3 Struttura meccanica del rivelatore

La camera a deriva di MEG ha una lunghezza totale di 2720mm ed un diametro esterno di 588mm. La massa totale, senza fili, è di 150 Kg ed è costituita essenzialmente da due endplates (Fig.12) posti a distanza nominale di 1940 mm e sostenuti esternamente da un cilindro in fibra di carbonio di 3 mm di spessore.

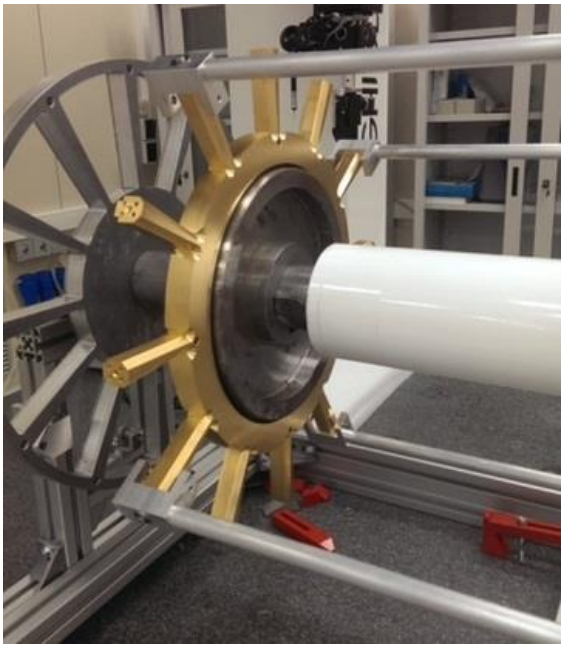


Figura 12 Endplate

Il cilindro esterno è realizzato in due gusci simmetrici, connessi tra loro in mezzeria tramite due bacchette in carbonio. Il fissaggio degli endplates è assicurato grazie a 4 viti posizionate sulla testa di 12 colonne (spokes) di ogni endplates (Fig.13).

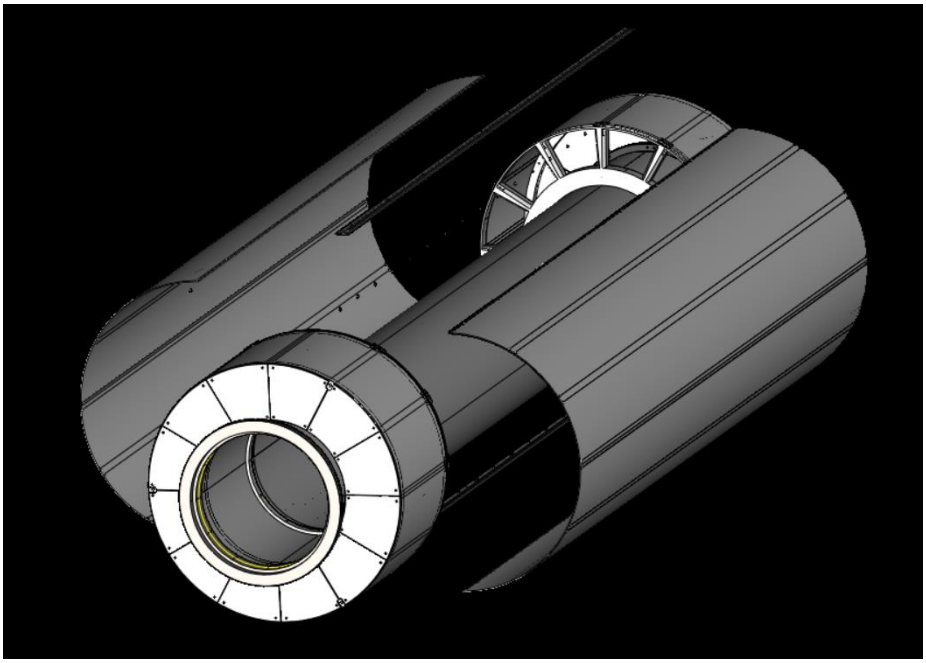
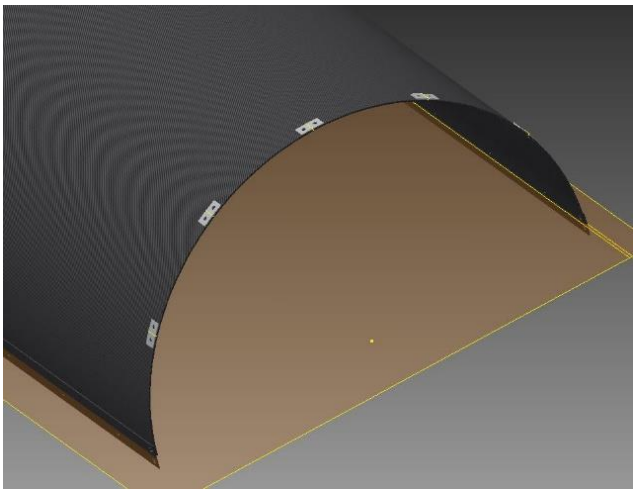


Figura 13 Vista esplosa della camera a drift di MEG

Sui due gusci esterni in fibra di carbonio, gli endplates hanno libertà di movimento lungo l'asse del cilindro +/- 5mm, ciò permette il tensionamento finale della camera a filatura ultimata (Fig.14).



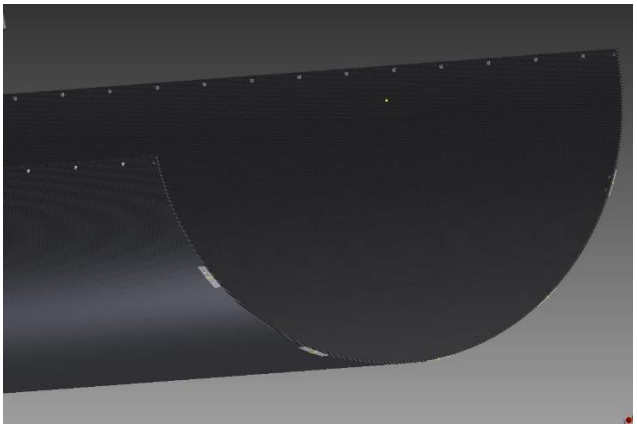


Figura 14 Semigusci in fibra di carbonio costituenti il cilindro esterno della camera

1.3.4 Analisi strutturale della camera a deriva soggetta al carico dei fili

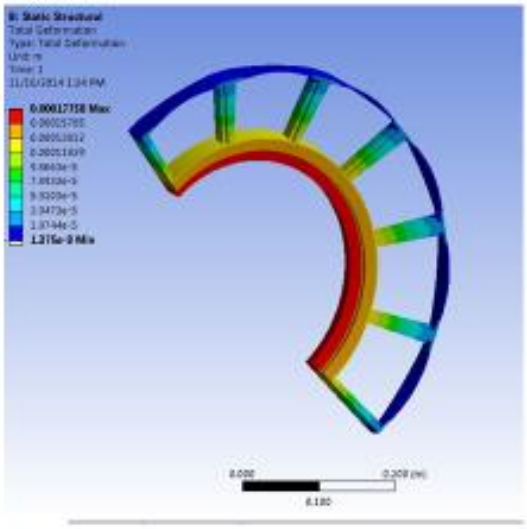
Completata la filatura, il carico complessivo su ciascun endplate è di 2500N così ripartiti:

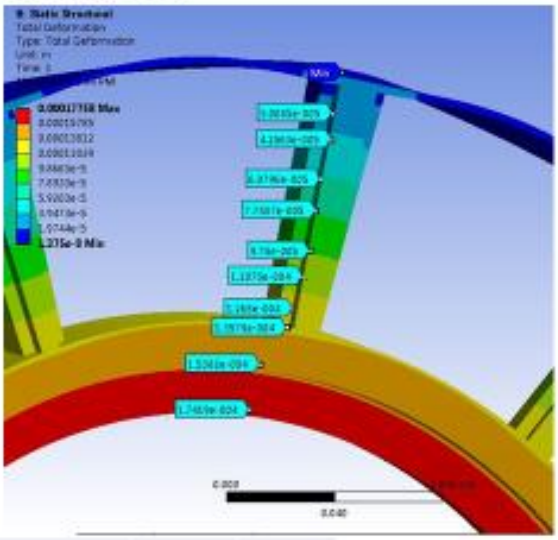
	Sense wires 20μm	Field wires 40μm	Guard wires 50μm
numero fili	1920	9600	2640
tensione applicata (N)	0,243	0,189	0,288
carico (N)	466,20	1812,90	761,40

Assumendo tale valore di carico nominale, cioè 2500N, si procede all'analisi FEM degli endplates ripartendo in tre fasi lo studio delle deformazioni:

1. Central Test Load;
2. Test model with wires;
3. Test model with axial load and inner screen.

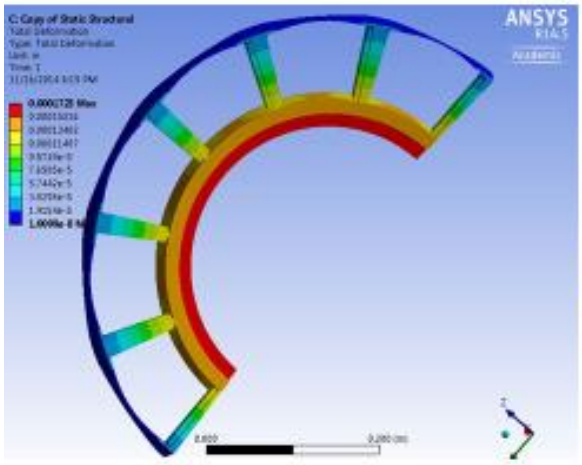
Central test load

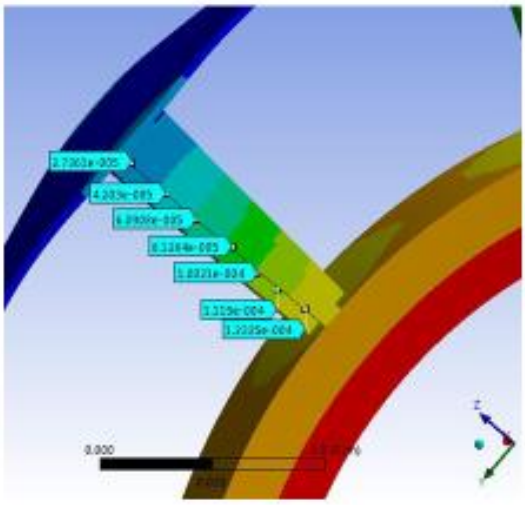




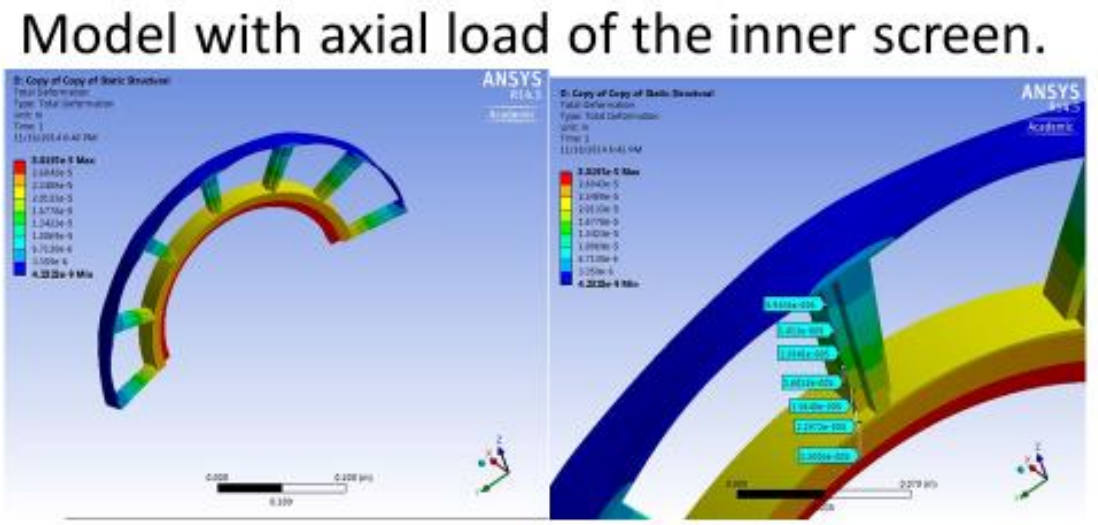
spoke1 disp (mm)	spoke2 disp (mm)	spoke3 disp (mm)	spoke4 disp (mm)	Spokes avg disp (mm)	Model (mm)	Diff. %
0.134	0.146	0.132	0.139	0.13775	0.1357	0.205
0.076	0.089	0.077	0.076	0.0795	0.0743	0.52
0.007	0.027	0.006	0.008	0.012	0.003	0.9

Model with wires





Total wire load 3500N Max displacement 0.1723mm of the end plates.
Max expected load 2500 N max displacement 0.123 mm
Max wire displacements 0.092 mm. Pressure applied on the contact regions



Total wire load 248 Newton Max displacement 30 micron.

Il cilindro interno non è strutturale ed è realizzato sagomando e tensionando opportunamente un foglio in mylar da 100µm di spessore. La tenuta del gas è assicurata grazia ad una metallizzazione in oro della superficie interna. Il cilindro esterno è realizzato con la tecnica della Resin Infusion (Controlled Vacuum Infusion - CVI) processo ad infusione sotto vuoto, nel quale il tessuto di rinforzo viene racchiuso tra lo stampo ed una membrana di plastica a tenuta ermetica in cui viene ottenuto il vuoto pneumatico, inducendo l'ingresso della resina e l'impregnazione del tessuto. Si tratta sostanzialmente di uno stampo aperto, con costi di circa la metà rispetto alla tecnica RTM. Tale tecnica risulta conveniente nella realizzazione di parti di grandi dimensioni. Il tradizionale manufatto in materiale composito è realizzato nella forma del laminato, avente lamine sovrapposte e legate tra loro. Tali lamine possono differenziarsi in base a vari fattori, il principale dei quali nella quasi totalità dei casi industriali di interesse è l'orientazione delle fibre nel piano delle singole lamine.

1.3.5 Definizioni e caratteristiche tecniche dei tessuti in fibra di carbonio

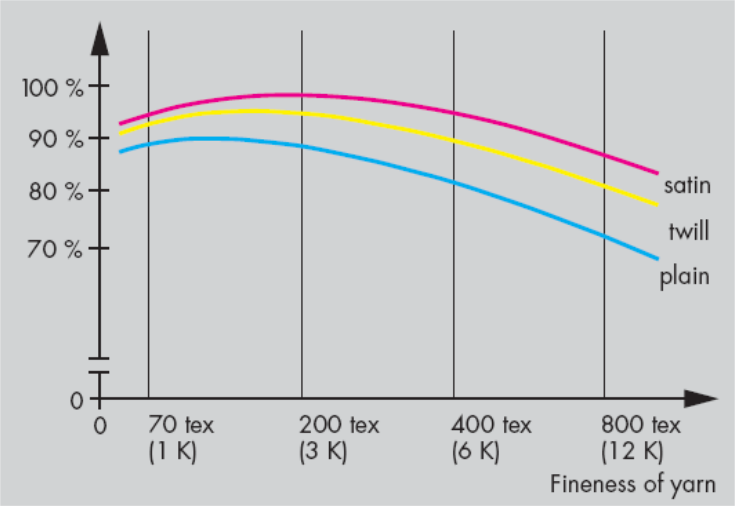
Per titolo di un filato si intende il peso per unità di lunghezza:

• TEX = massa in grammi di 1000 m di filato;
• DEN (denaro) = massa in grammi di 9000 m di filato (1 TEX = 0,111 DEN), (1 den = 1.111 $\times 10^{-7}$ kg/m);
• Carbonio: titolo in migliaia di microbave K=1000 bave (12K = 800 tex per filati HS);

Per sizing si intende l'appretto applicato alla superficie del filo che ne migliora la conservazione e lavorabilità, migliorando nel contempo le caratteristiche meccaniche favorendo l'interfaccia resina-filato.
Per riduzione si intende il numero di fili al cm in trama ed ordito.
Per ratio si intende:

• nei tessuti sbilanciati (UD) il rapporto tra i pesi di trama e ordito;
• nei tessuti ibridi il rapporto tra i pesi dei filati componenti;

La classificazione commerciale dei rinforzi a base di fibra si basa sulla indicazione della grammatura dei tessuti. Per grammatura si intende il peso specifico di superficie, indicato in g/m2 ("cc"), di un 25 tessuto. Un rinforzo in fibra di carbonio di grammatura 200 cc avrà un contenuto in fibra minore di uno con grammatura 400 cc. Esiste una stretta correlazione tra spessore del tessuto e grammatura, vale generalmente la relazione: S = grammatura/1000 [mm]. Generalmente vengono utilizzati tessuti con grammatura maggiore per componenti strutturali non in vista e con grammatura inferiore per parti di elevata importanza estetica. Questo perché un tessuto con grammatura ad esempio 200 cc presenta una tessitura più fine e piana rispetto ad una grammatura 400 cc. Di rilievo è anche la classificazione per numero di fibre che costituiscono i singoli yarn. Un tessuto 12 K presenta yarn formati da 12000 filamenti. La Fig.15 mostra la qualità del trasferimento delle proprietà da fibra a tessuto per i diversi tipi di armatura e titoli di fibra.



The strength of CFRP composites is governed by the yarn fineness and type of weave

Figura 15 Qualità fibra-tessuto

Si nota come l'armatura satin garantisce prestazioni superiori rispetto a twill e plain a causa del minor grado di curvatura delle fibre, e come tendenzialmente le proprietà meccaniche calino all'aumentare del titolo della fibra (effetto dimensionale). Titoli minori di 3K non sono generalmente commercializzati.
Ogni diverso tipo di ordine di laminazione rende uniche le proprietà e le caratteristiche di un laminato che di conseguenza deve essere identificato univocamente. Una chiara identificazione è data dallo Standard Laminate Code, il quale specifica nel modo più conciso possibile:

1. l'orientazione di ogni lamina rispetto ad un asse di riferimento del laminato finale (asse x);
2. il numero di lamine ad ogni orientazione;
3. la esatta sequenza geometrica delle lamine;

Lo Standard Laminate Code assume che ogni lamina sia identica in spessore e proprietà. Per l'identificazione di laminati ibridi sono utilizzate notazioni specifiche:

1. Ogni lamina è denotata da un numero che rappresenta l'angolo in gradi tra la direzione longitudinale della lamina stessa (direzione delle fibre per unidirezionali, direzione longitudinale della lamina per wave) e l'asse x del laminato;
2. Singole lamine adiacenti sono separate da una barra slash se sono angolate differentemente;
3. Le lamine sono elencate in sequenza secondo il loro ordine da una faccia del laminato all'altra, partendo dalla prima lamina del lay-up, con parentesi quadre indicanti l'inizio e la fine del codice;
4. Lamine adiacenti aventi la stessa orientazione sono denotate da un pedice numerico;

La Figura 16 evidenzia la Convenzione dei segni per il Standard Laminate Code.

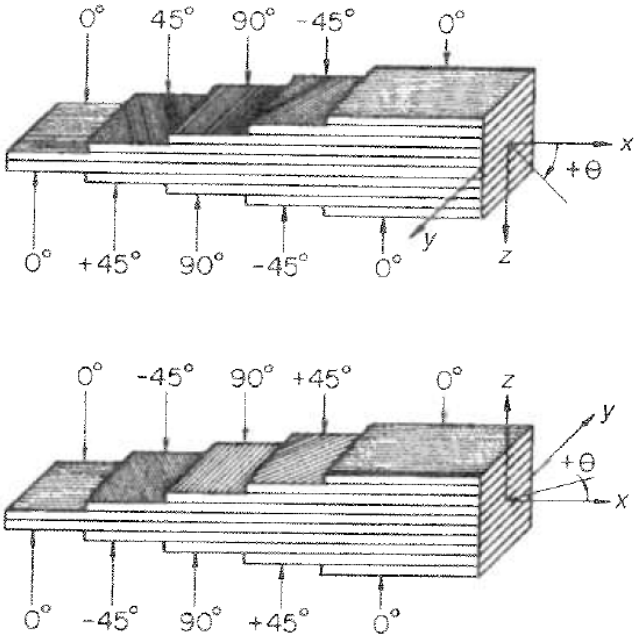


Figura16 Convenzione distribuzione laminati

Possiamo distinguere 3 differenti tipi di laminati:

1. Laminati simmetrici;
2. Laminati ibridi;
3. Laminati 3D;

1. Laminati Simmetrici

I laminati che posseggono simmetria nell'orientazione delle lamine nei confronti del piano medio geometrico richiedono la specifica di solo metà della sequenza di laminazione. Infatti si elencano le lamine in sequenza con un numero pari di lamine, partendo da una faccia e fermandosi al piano medio. Il pedice S alle parentesi indica che solamente metà del laminato è descritto, con l'altra metà simmetrica rispetto al piano medio.

$$[90=0_2=45]_s$$

Laminati simmetrici con un numero di lamine dispari sono codificati allo stesso modo dei laminati simmetrici pari, ad eccezione della lamina centrale, elencata per ultima e marcata da una linea superiore.

$$[0=45=90]_s$$

Ripetizioni della sequenza del laminato sono chiamate sets e sono racchiuse in parentesi. Ogni set è codificato in accordanza delle stesse regole che vengono applicate alla singola lamina.

$$[(45=0=90)_2]_s \text{ oppure } [45=0=90]_{2s}$$
$$[(45=0=90)_4] \text{ oppure } [45=0=90]_4$$

2. Laminati ibridi

Quando ci si riferisce a laminati ibridi, il codice standard è parzialmente modificato. Le modifiche generalmente consistono nell'aggiunta di una serie di pedici alle indicazioni delle angolazioni che vanno a designare non solo l'angolazione, ma anche il materiale costituente di ogni lamina. Da annotare è però che non è compito dello Standard Laminate Code definire lo specifico sistema di materiale, per i laminati sia ibridi sia non ibridi. Il codice per laminati ibridi è illustrato nella figura seguente:

$$[0_B=_45_{Gr}=90_{Gr}]_s$$

Le fibre utilizzate sono caratterizzate da elevata resistenza (σ_r= 2100 - 2500 MPa), solo di poco più bassa delle fibre di vetro, ma più elevata rigidezza (E = 240.000 - 390.000 MPa, circa-cinque volte quello delle fibre di vetro) unita ad una elevata conducibilità

elettrica e termica ed una elevatissima resistenza alla corrosione. Quest'ultima proprietà fa si che compositi con fibre di carbonio oltre che in applicazioni strutturali siano anche usati per sostituire elementi metallici in applicazioni caratterizzate da elevata corrosione. Inoltre, il coefficiente di espansione termico negativo permette di ottenere materiali compositi con coefficiente di dilatazione praticamente nullo. Il legame ad alta resistenza tra gli atomi di carbonio nella direzione dello strato comporta il modulo elastico estremamente alto, considerato che i deboli legami del tipo di Van der Walls tra strati vicini determinano un modulo elastico più basso in quella direzione. Una struttura cristallina di questo tipo è quindi in grado di resistere bene a sollecitazioni esterne giacenti su piani paralleli e/o coincidenti con l'andamento del piano atomico basale, mentre è molto meno resistente rispetto a sollecitazioni ortogonali a questo. In conseguenza di questo fatto le fibre vanno orientate opportunamente nella direzione di massima sollecitazione per utilizzarne al meglio le caratteristiche di resistenza meccanica, anche se questo non é sempre pienamente ottenibile. Le fibre di carbonio si possono classificare in base alla rigidezza e si distinguono in 5 categorie:

1. LM (low modulus), utilizzato per aumentare la tenacità della matrice;
2. SM (standard modulus);
3. HT high tenacity-high strength or (IM) intermediate modulus;
4. HM (high modulus);
5. UHM (ultra high modulus) di uso selettivo nell'industria aeronautica e aerospaziale.

A partire dal PAN si possono in pratica ottenere fibre la cui combinazione resistenza-rigidezza può essere variata con continuità entro un ampio range. Tra queste molto utilizzate sono le fibre HM per la possibilità offerta di costruire compositi con rigidezza confrontabile con quella dell'acciaio, che consente di sostituire facilmente elementi strutturali prima realizzati in acciaio con elementi in composito significativamente più leggeri (peso circa ¼). Nella seguente tabella sono riportate le caratteristiche tipiche di fibre di carbonio di largo uso:

Fabbricante	Nome commerciale	Precursore	Resistenza a trazione (MPa)	Modulo elastico (MPa)	Densità (g/cm^3)
Carborundum	Celion GY70	PAN	2070	607 000	1,96
	3000	PAN	2860	235 000	1,75
	6000	PAN	2920	228 000	1,75
Great lakes co.	Fortafi 3 T	PAN	1380	138 000	1,70
	4 T	PAN	2410	255 000	1,70
	5 T	PAN	2760	331 000	1,80
	6 T	PAN	2900	407 000	1,90
Hercules	Magnamite AS	PAN	2760	221 000	
	HMS	PAN	3100	345 000	
	KCF100(carb.)	PITCH	1104	45 000	1,61
	KCF200(graf.)	PITCH	1104	47 000	1,62
Morgan Ltd	Modmor 1	PAN (TOW)	2415	386 000	1,99
	Modmor 2	PAN (TOW)	2485	276 000	2,74
	Modmor 3	PAN (TOW)	2415	221 000	
Stakepole	30/A TOW	PAN	2760	221 000	1,74
	1/4 CF 30	PAN	2243	207 000	1,73
	30 R Roving	PAN	1553	262 000	1,75
	30 Y/800 D	PAN	1553	262 000	2,75
	30 Y/300 D	PAN	1553	262 000	1,75
Toray	Torayka T300	PAN	3000	250 000	1,8
	Torayka T800	PAN	5000	250 000	
	Torayka M40	PAN	2400-3000	400 000	
Toho	Besfight ST1	PAN	3600	240 000	
	Besfight ST2	PAN	4080	240 000	
	Besfight ST3	PAN	4320	240 000	
Union Carbide	Thormel 25	RAYON	1242	186 000	1.42
	Thormel 40	RAYON	1725	276 000	1.56
	Thormel 50	RAYON	2175	393 000	1,67
	Thormel 75	RAYON	2662	545 000	1.82
	Thormel 300	PAN	2484	221 000	1,76
	Thormel 400	PAN	2760	235 000	1,76
	PAN 50	PAN	2139	393 000	

In pratica la T300 (molto usata), la AS2 e la AS4D sono di tipo HS, la IM6 è di tipo IM, la HMS4 è di tipo HM, la UHM e la M50 sono di tipo UHM.
Il diametro caratteristico delle fibre varia da 7 a 10 μm, con valore medio ricorrente di 8 μm. Le fibre in carbonio prodotte da ogni precursore hanno diversi vantaggi ed inconvenienti in termini sia di costi che di proprietà. Le fibre in carbonio derivate dal PAN hanno costi più bassi e hanno buone proprietà. Esse costituiscono la classe predominante di fibre strutturali di carbonio e sono usate ampiamente nei velivoli militari, nei missili, nei veicoli spaziali. Le fibre in carbonio derivate dal pitch generalmente hanno più alta rigidità e conduttività elettrica, il che le rende utilizzabili nelle strutture di satelliti e in applicazioni di gestione termica, come radiatori e chiusure elettroniche. Le fibre in carbonio derivate dal rayon non sono usate per applicazioni strutturali, ma la loro bassa conduttività termica le rende utili in applicazioni di isolamento e ablative come ad esempio le teste dei missili, le sezioni coniche anteriori dei veicoli di rientro dallo spazio e gli scudi termici. Nella tabella seguente riportiamo alcune proprietà di fibre di carbonio da precursore PAN:

Property	Commercial, standard modulus	Aerospace		
		Standard modulus	Intermediate modulus	High modulus
Tensile modulus, GPa (10^6 psi)	228 (33)	220–241 (32–35)	290–297 (42–43)	345–448 (50–65)
Tensile strength, MPa (ksi)	380 (550)	3450–4830 (500–700)	3450–6200 (600–900)	3450–5520 (600–800)
Elongation at break, %	1.6	1.5–2.2	1.3–2.0	0.7–1.0
Electrical resistivity, μΩ· cm	1650	1650	1450	900
Thermal conductivity, W/m · K (Btu/ft · h ·°F)	20 (11.6)	20 (11.6)	20 (11.6)	50–80 (29–46)
Coefficient of thermal expansion, axial direction, 10^{-6} K	–0.4	–0.4	–0.55	–0.75
Density, g/cm^3 (lb/in.^{3})	1.8 (0.065)	1.8 (0.065)	1.8 (0.065)	1.9 (0.069)
Carbon content, %	95	95	95	+99
Filament diameter, μm	6–8	6–8	5–6	5–8
Manufacturers	Zoltek, Fortafil, SGL	BPAmoco, Hexcel, Mitsubishi Rayon, Toho, Toray, Tenax, Soficar, Formosa		

Con le fibre di carbonio ottenute da PAN, la resistenza aumenta fino ad un massimo di 1300°Cper poi diminuire gradualmente, mentre il modulo aumenta proporzionalmente all'aumentare della temperatura (Fig.17).

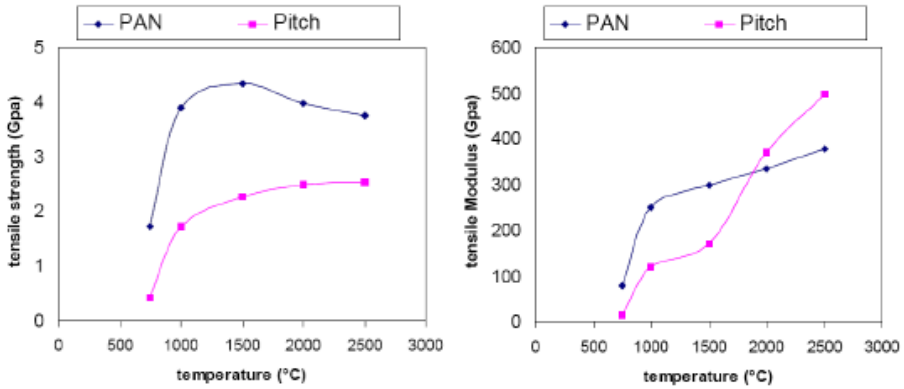


Figura 17 Resistenza (temperatura) per fibre di carbonio

Le fibre di carbonio sono disponibili in una grande varietà di combinazioni di proprietà poiché esse possono essere facilmente modificate controllando la loro struttura durante il processo di costruzione (ad es. la temperatura del trattamento termico). Le proprietà delle fibre cambiano da gruppo a gruppo e anche man mano che i costruttori migliorano la tecnologia delle fibre. Gli ultimi dati forniti dal costruttore dovrebbero essere consultati per specifiche fibre e per conoscere le loro attuali proprietà.
Questo materiale viene fornito all'utilizzatore conformemente a norme specifiche: DIN 65184 e DIN 29965, ed è oggi sempre più utilizzato nei campi aeronautico e meccanico perché caratterizzato da alta resistenza meccanica, elevato modulo elastico, bassa densità, bassa sensibilità alle cricche, eccellente capacità di smorzamento delle vibrazioni, bassa sensibilità al fenomeno della fatica presente nell'impiego delle strutture aeronautiche. Ne è inoltre iniziato un uso che va sempre più estendendosi nel

campo motoristico e dell'automazione, dove viene adoperato per fabbricare parti o organi meccanici molto sollecitati, come alberi di trasmissione, bielle, telai, ecc..
Ha una alta inerzia chimica ed una elevata resistenza agli attacchi corrosivi sia acidi che alcalini, ed ai solventi organici. Possiede basso coefficiente di espansione termica e bassa conduttività termica. In campo elettrico e magnetico ha una buona conducibilità elettrica, non è magnetico e possiede un basso coefficiente di assorbimento dei raggi X ed è quindi facilmente verificabile tramite il controllo non distruttivo radiografico. Le temperature in cui è possibile un utilizzo delle fibre di carbonio in ambienti ossidanti è di circa 500°C. Le fibre di carbonio consentono quindi la realizzazione di elementi strutturali che presentano un'elevata stabilità dimensionale anche in presenza di grandi sollecitazioni dovute a variazioni periodiche di temperatura.
La matrice utilizzata è di tipo epossidico ed attualmente viene prodotta in diverse formulazioni e tipi (liquida, semisolida, ecc) e presenta in genere buona resistenza meccanica, buona compatibilità con metalli ed altri materiali di interesse ingegneristico, basso ritiro, ottimo isolamento elettrico e bassa tossicità. Il fenomeno di solidificazione di queste resine è di una certa complessità. Da un punto di vista chimico, l'indurimento può avvenire anche a freddo con tempi lunghi. Esso porta alla eliminazione di acqua formata da ossidrili liberi, con la formazione di legami trasversali tra le singole molecole, secondo una reazione chimica detta di reticolazione. Industrialmente il processo di indurimento viene condotto a temperatura sufficientemente elevata mediante un riscaldamento detto curing. I parametri fondamentali che hanno influenza sull'andamento dei fenomeni sono la temperatura di trattamento ed il tempo della sua durata. Per rappresentare quanto avviene si ricorre al diagramma T.T.T., ottenuto mediante trasformazioni-tempo-temperatura (Fig.18).

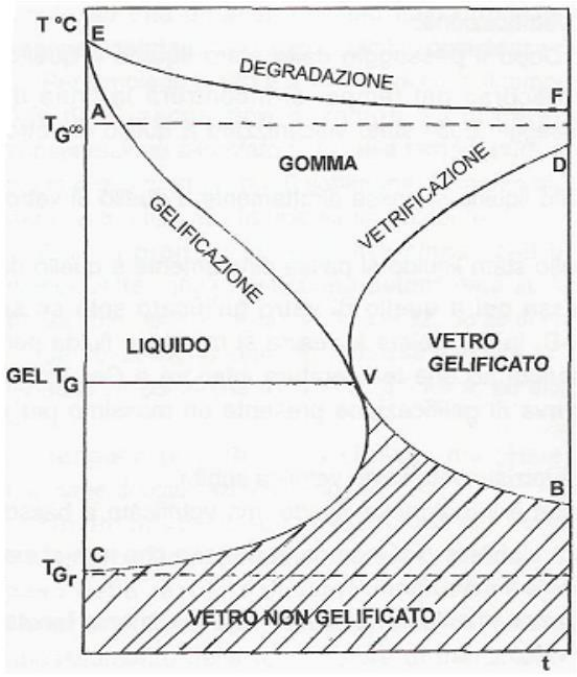


Figura 18 Diagramma trasformazioni-tempo-temperatura (T.T.T.)

Il diagramma rappresenta i cambiamenti di stato che avvengono nel polimero a temperatura di curing costante. Esso è diviso quindi in tante zone, ciascuna delle quali rappresenta lo stato fisico chimico nel quale il sistema materiale polimerico si trova alla temperatura di trasformazione individuata in ordinate e dopo che sia trascorso il tempo individuato in ascisse. Ciascuna zona è delimitata da linee di confine che sono il luogo dei punti rappresentativi del passaggio del materiale da uno stato ad un altro. Per analizzare in dettaglio la successione dei fenomeni che si verificano nel sistema, si traccia una retta orizzontale intersecante l'asse delle ordinate in corrispondenza della temperatura di curing considerata. La successione dei fenomeni descritti dal diagramma lungo tale retta è quella che avviene a temperatura costante con una trasformazione id tipo isotermico. Esistono nel diagramma 3 temperature fondamentali influenzanti il processo. In ordine di grandezza crescente sono:

- T g_r: Temperatura di transizione vetrosa dallo stato fluido a quello di solido molecolare non cristallino dei reagenti, per sistemi che non attraversano lo stato gommoso;
- Gel Tg: temperatura di transizione diretta dallo stato liquido allo stato di vetro gelificato, senza passaggi intermedi allo stato gommoso;
- T g_∞: temperatura massima di transizione vetrosa per sistemi che subiscono l'intero passaggio allo stato vetroso solo dopo aver subito quello allo stato gommoso;

Per comprendere la successione dei fenomeni, tracciamo delle rette orizzontali in ciascuno dei campi di temperatura in cui le ordinate sono suddivise dalle tre temperature caratteristiche sopra considerate.
Per $T>T\,g_\infty$: La retta orizzontale che rappresenta la trasformazione isotermica parte al tempo t = 0, con il sistema interamente allo stato liquido. Con il passare del tempo si incontra la linea di gelificazione A-V, che rappresenta il passaggio dallo stato liquido del polimero a quello di elastomero gommoso. Si entra quindi nel campo di stabilità della gomma. Seguitando a trascorrere il tempo, sempre a temperatura costante, si incontra la linea E-F che segna l'inizio della degradazione del polimero gommoso.
Per $T=T\,g_\infty$ si ha la trasformazione stabile di un liquido in un elastomero gommoso ed elastico senza vetrificazione.
Per $T\,g_\infty>T>T\,g_r$: Dallo stato liquido si passa direttamente a quello di vetro non gelificato. Si passa poi a quello di vetro gelificato solo se si attraversa il tratto di linea V-B. In particolare la resina si mantiene fluida per tempi prolungati se è mantenuta ad una temperatura inferiore a Gel Tg, e superiore a T g_r, dove la curva di gelificazione presenta un massimo per i tempi. Per $T=T\,g_r$: se il sistema è inizialmente fluido vetrifica subito. Per $T<T\,g_r$: il sistema non è inizialmente liquido ma vetrificato a basso peso molecolare. Tale stato è stabile e cioè non muta, a meno che non ci sia riscaldamento, con conseguente liquefazione.
La temperatura di immagazzinamento del polimero è mantenuta generalmente intorno a questi ultimi bassi valori. L'immagazzinamento può avvenire anche per temperature di poco superiori a Gel Tg ma per tempi massimi limitati. Per una operazione di curing efficace occorre operare ad una temperatura maggiore di T g_∞: si ottengono in questo modo le proprietà ottimali della matrice. Se però la T g_∞ supera i limiti di stabilità termica della resina, non sarà possibile operarne una conversione chimica completa. Nel caso delle resine epossidiche che stiamo considerando, il prodotto finale che si ottiene al termine della polimerizzazione ha buone caratteristiche meccaniche, ottima capacità di adesione alle fibre del composito, resistenza agli agenti chimici, basso ritiro nel

passaggio di stato liquido-solido, e quindi bassa tendenza alla formazione di tensioni interne residue. Le resine in commercio differiscono tra loro essenzialmente per la temperatura di curing che viene prevista in generale su tre diversi valori: 60°C, 121°C, 177 °C. Per l'impiego a 60 °C viene garantito un tempo di gelificazione di circa 4 ore, cioè di transizione dallo stato totalmente fluido a quello di gel simile ad una gelatina non più fluida ma non completamente solida pur essendo dotata di un apprezzabile consistenza di forma. Per l'impiego a 120°C e 177 °C il tempo di gelificazione va da 2 a 20 minuti. Ciascun tipo di resina è poi caratterizzato da un tempo di conservazione allo stato fluido alla temperatura di 25 °C, che va da un minimo di 3 giorni fino a 6 settimane. E' inoltre stabilito il tempo di gelificazione per ciascun tipo alla temperatura ambiente. Questi prodotti sono inoltre classificati in base alle caratteristiche meccaniche finali post-curing determinate su lamine preformate di 4 per 6 pollici quasi isotrope, con 32, 36 fili di rinforzo. Se ne distinguono 3 tipi: a bassa tenacità se inferiore a 193 MPa, a media tenacità se compresa tra 193 e 225 MPa, ed alta tenacità se superiore a 255 MPa. Vengono poi forniti per ciascun materiale i valori delle temperature massime di utilizzazione in opera.
Un inconveniente serio di queste resine è dato dal fenomeno dell'assorbimento, da parte di esse, di piccole quantità di acqua in relazione al peso della resina considerata. Questo fenomeno comporta una forte variazione dimensionale della matrice, una sua plasticizzazione, ed un abbassamento della temperatura di transizione vetrosa, con degrado delle caratteristiche meccaniche come la resistenza alla compressione e al taglio. Questi inconvenienti sono superabili mediante rivestimenti impermeabilizzanti.
Infine nella formazione di PMCs le resine epossidiche presentano i seguenti vantaggi:

1. ottimo legame fibra-matrice, quindi elevata resistenza al debonding ed alla delaminazione;
2. elevata resistenza meccanica ed alla frattura;
3. buona resistenza agli agenti ambientali e corrosivi;
4. basso ritiro post cura, quindi basse tensioni residue e/o distorsioni dei manufatti;

Gli svantaggi principali delle comuni resine epossidiche risiedono invece in quanto segue:

1. viscosità relativamente elevata, che rende non facile l'annegamento delle fibre nella matrice;
2. costo relativamente elevato;
3. bassa temperatura critica, variabile da una formulazione all'altra ma comunque in genere sempre inferiore a 180°-200° C circa.

Fissati i parametri di lavoro e determinati i materiali costituenti il cilindro strutturale esterno, si è passati all'anali FEM dello stesso per determinare eventuali punti critici alla stabilità. Usando la comune pratica ingegneristica, le strutture tubolari in parete sottile sono ampiamente utilizzate in quanto forniscono un elevato rapporto tra rigidezza e peso. Esse hanno però l'intrinseca debolezza dell'essere particolarmente soggetti a problematiche di instabilità dell'equilibrio, sfociando in fenomeni di buckling catastrofici per la funzionalità della struttura. Sono stati perciò effettuati un gran numero di studi, sia analitici che sperimentali, volti al ricavare delle espressioni facili da utilizzare per effettuare una stima del carico critico di strutture tubolari al variare delle

loro caratteristiche geometriche. Uno degli approcci ancora oggi più utilizzato è quello sviluppato dalla NASA nel documento SP-8007 risalente al 1968[4], dove sono con tenute tutte le linee guida per una progettazione in sicurezza di componenti tubolari. Si consideri quindi un tubo cilindrico di altezza l, raggio r e spessore della parete t il quale se deformato assume una configurazione caratterizzata da un certo numero di semionde nella direzione assiale m ed un certo numero di semionde nella direzione circonferenziale n. Sia inoltre tale cilindro caratterizzato da un materiale isotropo dotato di modulo elastico E ed un coefficiente di Poisson ν. Una prima equazione che vuole fornire il carico critico di una struttura cilindrica in parete sottile è presentata nella forma seguente:

$$N_x = k_x \frac{\pi^2 D}{l^2}$$

Dove kx è detto "buckle factor" ed è pari a:

$$k_x = m^2(1+\beta^2)^2 + \frac{12}{\pi^4}\frac{\gamma^2 Z^2}{m^2(1+\beta^2)^2}$$

Il termine *Z* è detto parametro di curvatura, esso dipende, tra le altre cose, anche dallo spessore della parete e dal coefficiente di Poisson del materiale secondo la relazione:

$$Z = \frac{l^2}{rt}\sqrt{1-\nu^2}$$

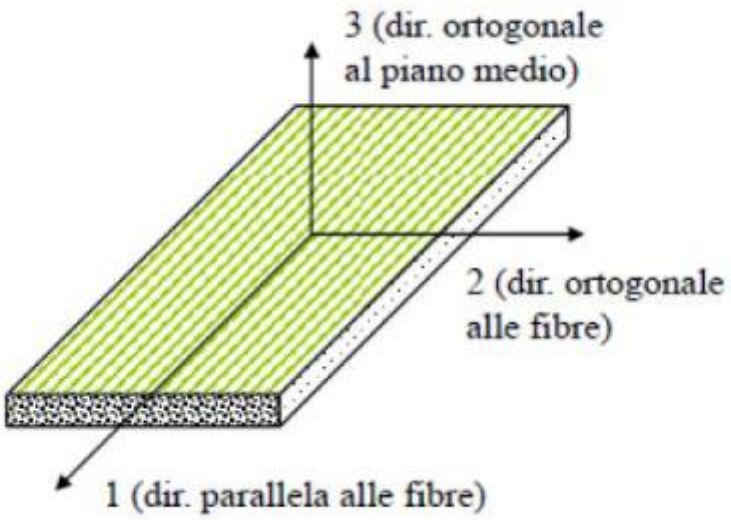
Il parametro β è invece detto "buckle aspect ratio" ed è un parametro che mette in relazione parametri dimensionali come lunghezza e raggio del cilindro al numero di semionde in direzione assiale e circonferenziale secondo l'espressione:

$$\beta = \frac{nl}{\pi rm}$$

Infine, D è la rigidezza flessionale della struttura ed è pari a:

$$D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)}$$

Nel caso in cui il materiale costituente non è più isotropo bensì ortotropo, si parlerà di proprietà elastiche secondo tre diversi piani ortogonali tra loro:



Come già suggerito dal nome, i materiali compositi sono formati da due diversi elementi, una matrice con lo scopo di tenere unito il materiale ed un rinforzo con lo scopo di fornire elevate prestazioni meccaniche. La bontà di un materiale composito dipenderà dal rapporto in volume di rinforzo rispetto alla matrice. Si definisce perciò la frazione di volume di fibra V_f pari a:

$$V_f = \frac{Volume\ fibre}{Volume\ totale}$$

Considerando una lamina unidirezionale, ovvero nella quale le fibre sono tutte orientate secondo una direzione comune, se si conoscono le costanti elastiche che caratterizzano le fibre e la matrice si possono calcolare i parametri elastici della lamina stessa:

1. Modulo elastico nella direzione della Fibra;
2. Modulo elastico nella direzione ortogonale a quello della fibra;
3. Modulo di taglio;
4. Coefficienti di Poisson.

1.3.6 Cilindro esterno della camera a drift

Come già ampiamente discusso, il cilindro esterno della camera a deriva di MEG è strutturale nel sistema endplate-cilindro ed è quindi la struttura sulla quale è stata riservata maggiore attenzione da un punto di vista del calcolo agli elementi finiti (FEM).

Nella realizzazione del composito in carbonio relativo alla realizzazione dei due gusci del cilindro esterno è stata adottata la seguente schedula costruttiva:

Ply : **T300;Epoxy;F-.220/193/50**

Keywords : Fiber;Carbon;Toray;Matrix;Epoxy;
Modified : Fri Jan 08 11:12:07 2010

Physical nature : **reinf.ply** Mech. behavior : **orthotropic**
Form of reinf. : weave, plain

t = 0.22 mm	m_A = 325.6 g/m²	V_f = 50%
	rho = 1480 kg/m³	f_1/2 = 50/50%

Engineering constants (orthotropic)

E_1 = 55 GPa	G_12 = 4 GPa	nu_12 = 0.04
E_2 = 55 GPa	G_31 = 3 GPa	nu_13 = 0.3
E_3 = 7.5 GPa	G_23 = 3 GPa	nu_23 = 0.3

Thermal and moisture expansion coeff. (orthotropic)

alpha_1 = 2.2 e-6/°C	beta_1 = 0 e-2/w%
alpha_2 = 2.2 e-6/°C	beta_2 = 0 e-2/w%
alpha_3 = - e-6/°C	beta_3 = 0 e-2/w%

First failure stresses and strains - Nominal (orthotropic)

X_t / X_eps,t = 275 MPa / 0.5 %	X_c / X_eps,c = 385 MPa / 0.7 %
Y_t / Y_eps,t = 275 MPa / 0.5 %	Y_c / Y_eps,c = 385 MPa / 0.7 %
Z_t / Z_eps,t = 75 MPa / 1 %	Z_c / Z_eps,c = 75 MPa / 1 %
S / S_eps = 65 MPa / 1.625 %	(12)
R / R_eps = 45 MPa / 1.5 %	(31)
Q / Q_eps = 45 MPa / 1.5 %	(23)

Ultimate stresses and strains - Nominal (orthotropic)

X_t / X_eps,t = 550 MPa / - %	X_c / X_eps,c = 550 MPa / - %
Y_t / Y_eps,t = 550 MPa / - %	Y_c / Y_eps,c = 550 MPa / - %
Z_t / Z_eps,t = - MPa / - %	Z_c / Z_eps,c = - MPa / - %
S / S_eps = 65 MPa / 2 %	(12)
R / R_eps = - MPa / - %	(31)
Q / Q_eps = - MPa / - %	(23)

Insufficient stress/strain data for DLF analyses!

Processing data

Applicability : wet lay-up;prepreg lay-up

Comment

GENERAL COMMENTS
Typical data at room temperature (25°C) with moisture weight content 0.5% and void volume content less than 3.0%.

MECHANICAL DATA
* Certain (X_c, Y_c, S) first failure and ultimate stresses are considered to be identical.

Ultimate tensile strength
X_t,U 550 MPa
Y_t,U 550 MPa

Nel nostro caso, abbiamo simulato il cilindro utilizzando un il pacchetto specifico di Ansys dedicato ai compositi: Esacomp 4.5.2. I valori di riferimento considerati sono:

Beam buckling and FPF

Beam cross section : **circular**
Modified : Sun Nov 16 21:06:00 2014
Type : Circular

a_o = (579.52 mm)
a_i = 576 mm

Laminate : cylinder (h = 1.76 mm)

Lay-up : (90a/0a/0a/90a)2

Ply	t	E_1	E_2	G_12	nu_12
	mm	GPa	GPa	GPa	
a T300;Epoxy;F-.220/193/50	0.22	55	55	4	0.04

Beam load : **axial_load**
Modified : Sun Nov 16 21:28:10 2014
Beam length : L = 1961.00 mm
End supports : S-S

P_x = 2.5 kN

Shear deformation : included

Factor of safety : FoS^v = 1
Stability factors : SF_g = 1, SF_l = 1
Failure criterion : Puck 2D; Tsai-Hill; Von Mises; None; None; None
(UD; non-UD; homogeneous; honeyc. core; foam/other core; adhesive)
Failure crit. param. : p_Tll+/Tll-/TT-/s/M(carbon)=0.35/0.3/0.275/0.5/0.5;(other)=0.3/0.25/0.225/0.5/0.5
Stress/strain recovery : layer top/bottom

Beam buckling loads

P_x,crit = -5864.16 kN P_x,y = -5864.16 kN
P_x,z = -5864.16 kN

Applied load

P_x = 2.50 kN
eps_x = 0.0014 %
delta_x = 0.0279 mm

Margin to failure

MoS_buckling = INF (tensile load)

MoS_FPF = 35040 % Mode: 2t Crit. layers: All

Laminate stiffness and compliance matrices

Laminate : **cylinder**
Modified : Sun Nov 16 20:43:47 2014

Lay-up : (90a/0a/0a/90a)2 h = 1.76 mm

	Ply
a	T300;Epoxy;F-.220/193/50

Stiffness matrices

[A]	9.69551e+007	3.87821e+006	0
(N/m)	3.87821e+006	9.69551e+007	0
	0	0	7.04e+006
[B]	0	0	0
(N)	0	0	0
	0	0	0
[D]	25.0274	1.00109	0
(Nm)	1.00109	25.0274	0
	0	0	1.81726

Compliance matrices

[a]	1.03306e-008	-4.13223e-010	0
(m/N)	-4.13223e-010	1.03306e-008	-0
	0	-0	1.42045e-007
[b]	0	0	0
(1/N)	-0	-0	-0
	0	0	0
[d]	0.0400203	-0.00160081	0
(1/(Nm))	-0.00160081	0.0400203	-0
	0	-0	0.550279

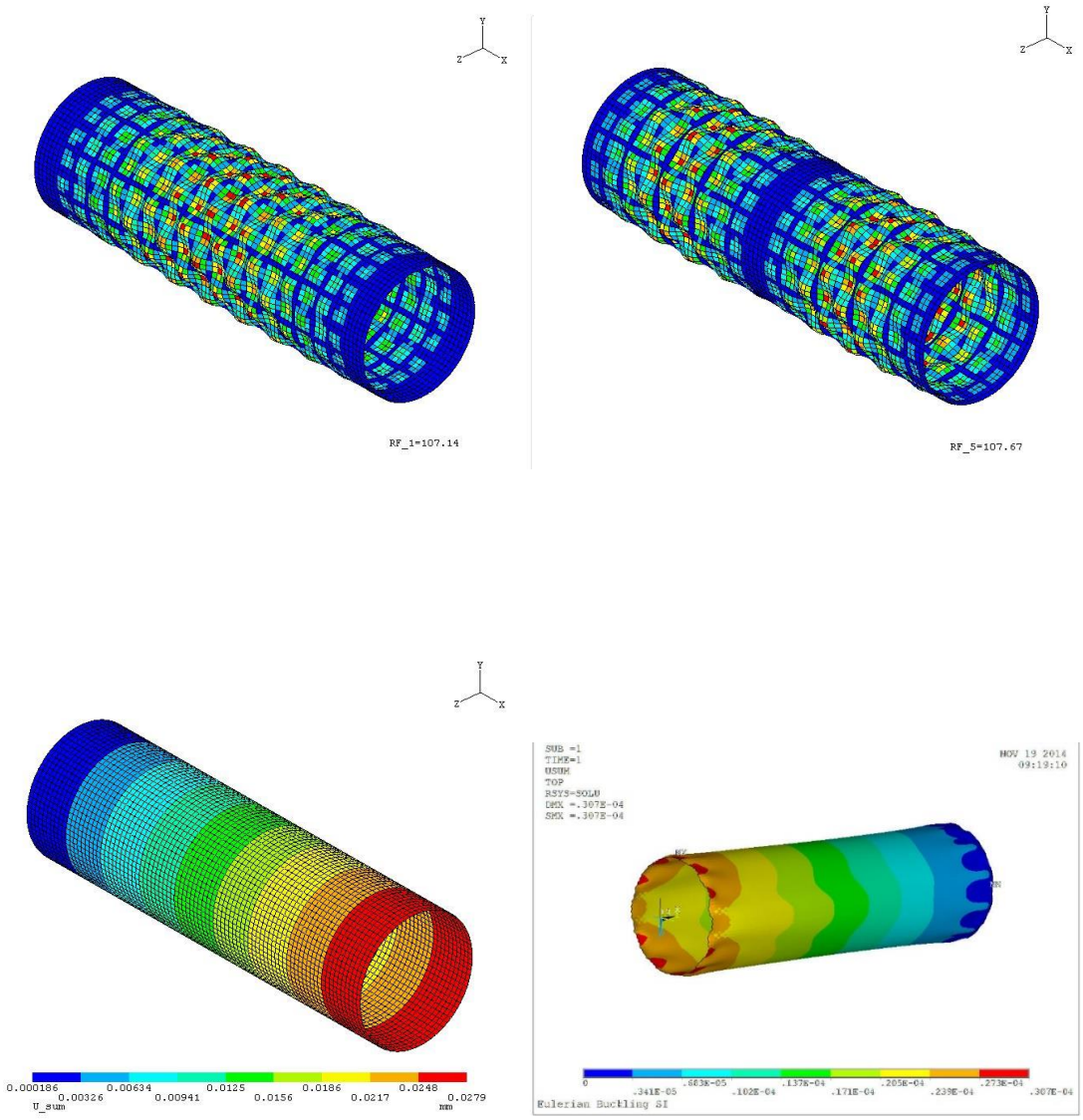


Figura 19 Valutazione numerica dei risultati

I risultati mostrati in Fig.19 riassumono complessivamente tutte le prove di simulazione sostenute e sinteticamente possiamo dire che carico assiale di 2,5 KN si ha uno spostamento massimo di 30 µm confermando una "non snellezza" del cilindro per i nostri scopi. L'analisi strutturale ha confermato, altresì, una sollecitazione di stress, nelle direzione delle fibre, della parte inferiore del cilindro di 1.7MPa ed una tensione di stress ortogonale alle fibre di -1 MPa (Fig.20). Possiamo quindi concludere che le aspettative strutturali programmate sono state ampiamente soddisfatte e rispettate.

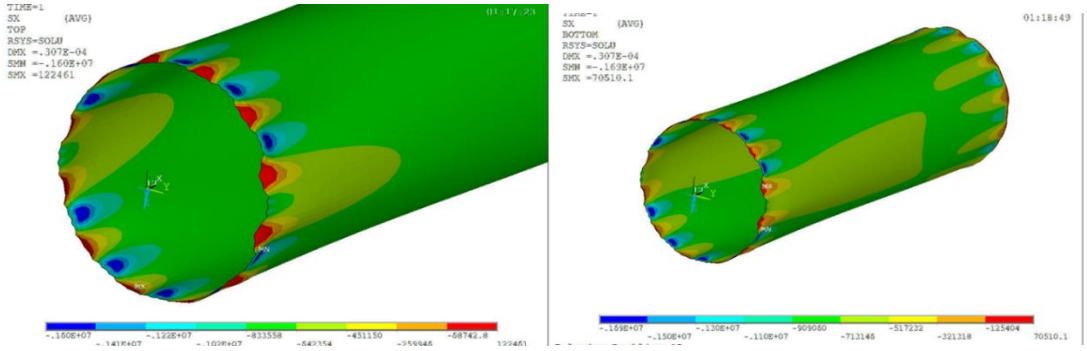


Figura 20 Zone interessate dal vincolo sollecitate nella direzione delle fibre

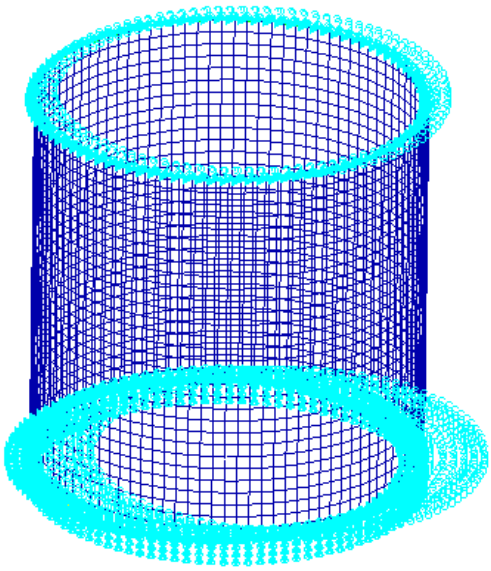
1.3.7 Problematiche del rivelatore: Effetto delle imperfezioni geometriche sul carico critico

L'obiettivo di questo capitolo è studiare l'effetto sul carico critico di varie tipologie di imperfezioni geometriche della struttura cilindrica in esame, correlando il tipo e l'entità dell'imperfezione alla perdita di resistenza al buckling corrispondente. Nel caso di cilindri in materiale composito non è facile parlare di difetti geometrici, la forma che il materiale assume dipende unicamente dal processo di fabbricazione, in quanto il materiale una volta prodotto il componente ha un comportamento fragile a rottura e non prevede deformazione plastica che ne possa alterare la forma. Tuttavia la tecnica più comune per produrre cilindri di grandi dimensioni in parete sottile è quella dello stampo aperto che prevede la deposizione degli strati di fibre pre-impregnate su uno stampo semicilindrico. È dunque evidente che il prodotto risultante ricalchi la forma dello stampo usato come base, e, se esso presenta delle imperfezioni geometriche, queste saranno trasmesse anche al cilindro che è stato realizzato. Per questo motivo ha senso valutare una serie di tipologie di imperfezioni che vengono descritte in questo capitolo del presente elaborato. Nel nostro caso abbiamo classificato le seguenti problematiche da studiare:

1. Asse del cilindro non ortogonale alla base;
2. Difetti di non circolarità del cilindro;
3. Difetti di rettilineità: sezione di area non costante;
4. Difetti dovuti all'indentazione dello stampo;
5. Influenza dei difetti del materiale sul carico critico;

1. Asse del cilindro non ortogonale alla base

Un cilindro nel quale i centri delle sezioni di base e di estremità non siano allineati secondo una direzione ortogonale ad una delle due sezioni fa sì che l'asse tra i centri delle suddette sezioni non sia perfettamente assiale, ma abbia anche una componente parallela al piano della sezione di estremità.



Nel caso specifico della camera di MEG, un eventuale errore avrebbe comportato un'amplificazione reale del rischio buckling della struttura. Il certosino controllo reale del cilindro, utilizzando una macchina di controllo tridimensionale (DEA), ha permesso il contenimento di tale errore entro un range di +/-15µm.

2. Difetti di non circolarità del cilindro

E' il classico caso in cui in cui la struttura cilindrica in esame presenti dei difetti di circolarità, ovvero non tutte le sue sezioni costituiscono dei cerchi geometricamente perfetti. Anche in questo caso, la presenza di tali imperfezioni comporterebbe, oltre al problema di addensamento non simmetrico dei carichi unitari, problemi di instabilità strutturale e rischi concreti di non tenuta di gas. Il controllo dimensionale, come nel caso precedente, è stato effettuato grazie all'utilizzo di una macchina di controllo tridimensionale (DEA) realizzando un errore di circolarità contenuto nei valori di +/-15µm.

3. Difetti di rettilineità: sezione di area non costante

In questo caso abbiamo studiato l'influenza di una nuova tipologia di imperfezione. Si ipotizza che il valore del raggio del cilindro, che nel caso ideale dovrebbe essere costante al variare della posizione sia in direzione assiale che circonferenziale, assuma valori realistici contenuti entro un limite di tolleranza. Nel caso reale del cilindro esterno della camera a drift di MEG abbiamo ritenuto come tolleranza di rettilineità +/- 20μm. Assunto tale valore abbiamo effettuato il controllo dimensionale utilizzando una macchina di controllo dimensionale 3D (DEA) e rapportando i valori reali con quelli attesi abbiamo certificato la struttura valutando scostamenti massimi di +/-14μm e quindi entro i valori prefissati di progetto (Fig.21).

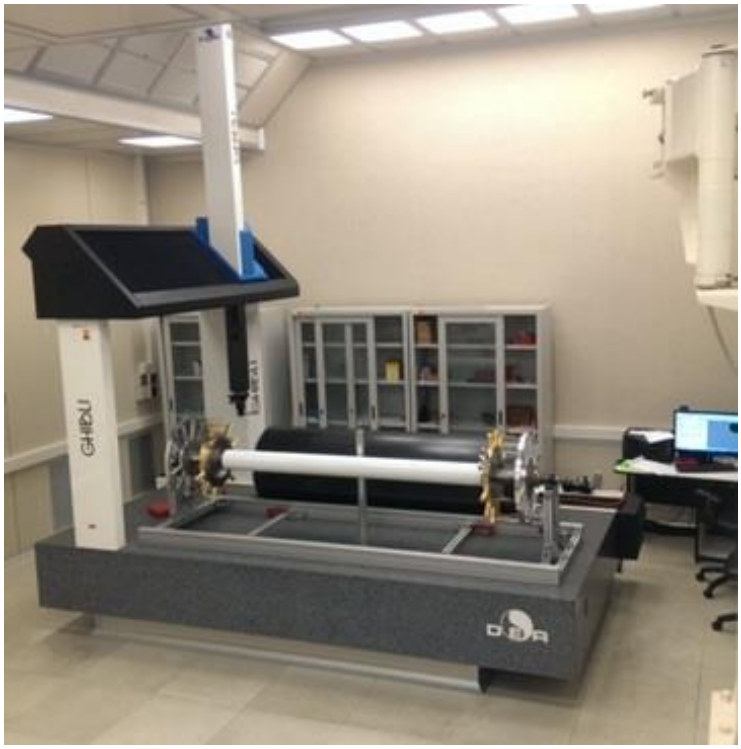


Figura 21 Controllo dimensionale con macchina 3D

4. Difetti dovuti all'indentazione dello stampo

Generalmente i materiali compositi hanno comportamento elastico fragile, e quindi non sono soggetti a deformazioni plastiche. Utilizzando stampi in materiale metallico, può succedere, nella normale pratica industriale, che questi subiscano degli urti in seguito a cadute o vengano accidentalmente colpiti e a causa di questi eventi si innesca una sequenza di effetti a valanga trasmessi successivamente al prodotto finale sotto la

classica forma di indentazione. Trasmettendo il difetto dallo stampo al pezzo che si va a realizzare si rende logica l'analisi di imperfezioni appena descritta. Una rappresentazione del risultato di un probabile problema di indentazione appena descritto è osservabile in figura seguente (Fig.22).

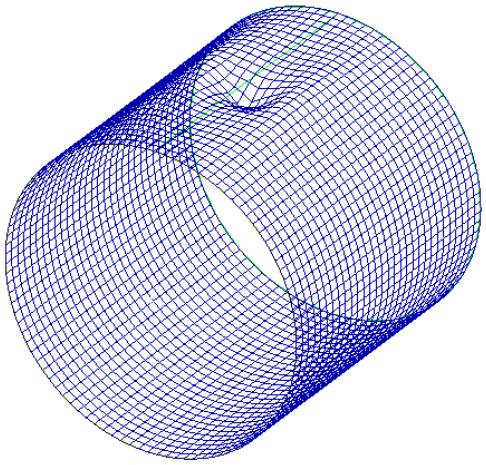


Figura 22 Punto caratteristico di indentazione

5. Influenza dei difetti del materiale sul carico critico

Ultima analisi da effettuare è l'influenza di eventuali imperfezioni presenti all'interno del materiale utilizzato per la realizzazione dei componenti strutturali in esame. I Difetti dovuti alla non uniformità delle proprietà del materiale convogliano inverosimilmente in un pensiero in cui si dà per assodato che le sue proprietà meccaniche siano uniformi all'interno della totalità del materiale stesso. Considerando ad esempio un materiale isotropo, il valore del suo modulo elastico *E* dovrebbe essere costante in qualsiasi punto del materiale stesso. Questo in realtà non accade, vi sono infatti dei difetti nella microstruttura cristallina che, localizzati in delle specifiche zone, portano ad una diminuzione delle proprietà locali. Un ragionamento di questo tipo può essere generalizzato anche ai materiali compositi, dove si presuppone che all'interno della fibra vi siano delle zone in cui la sua microstruttura presenta dei difetti. Si avrà dunque che in queste piccole zone localizzate i valori dei parametri elastici di interesse utilizzati per le simulazioni bidimensionali E1, E2, e G12 che si discostano da quelli nominali. Tale discostamento implica una riduzione delle proprietà meccaniche del materiale stesso. I materiali utilizzati sono gli stessi adoperati per le simulazioni FEM e con la stessa stacking sequence. Le proprietà vengono qui riprese per comodità di consultazione:

Pre preg in fibra di carbonio	
E_1 [Pa]	2.897E11
E_2 [Pa]	6.207E9
G_{12} [Pa]	4.828E9
ν_{12}	0.25
t [mm]	0.25

Per determinare l'entità della diminuzione delle proprietà elastiche da introdurre nel materiale è stato ripreso un studio effettuato da Richard Degenhardt, Alexander Kling, Arne Bethge, Jana Orf, Luise Kärger, Rolf Zimmermann, Klaus Rohwer e Adriano Calvi dal titolo: "Investigations on imperfection sensitivity and deduction of improved knock-down factors for unstiffened CFRP cylindrical shells". In tale pubblicazione viene effettuato uno studio su diverse tipologie di materiali in fibra di carbonio, per ognuno di essi vengono effettuate dei test a trazione e compressione volti a determinare i valori dei parametri elastici, in modo da calcolarne la differenza in termini percentuali rispetto ai valori nominali.
Definite le entità dei difetti in termini di proprietà elastiche dei materiali considerati resta da definire come queste vengano modellate all'interno delle ricostruzioni agli elementi finiti. Utilizzando lo stesso modello per l'analisi FEM si determinano le deformazioni ed i punti critici considerando le stesse condizioni di carico, vincoli e densità di mesh.

Capitolo 2

2.1 Tipologie di fili sottili

I fili considerati nello studio e sviluppo del tracciatore dell'esperimento MEG sono di quattro tipologie:

1. Alluminio 40µm;
2. Alluminio 50µm;
3. Tungsteno 20µm;
4. Carbonio 33,5µm;

I fili anodici sono caratterizzati da dimensioni contenute al fine di ottenere un campo elettrico di elevata intensità. Sono meccanicamente soggetti all'azione del peso proprio e di forze dovute alle interazioni elettrostatiche con gli altri fili. Il peso proprio, in particolare, porterà il filo ad un abbassamento nel centro (sagitta), il cui scostamento è inversamente proporzionale allo sforzo di trazione che tende il filo e direttamente proporzionale alla densità lineare dello stesso. Per tali motivi è necessario adottare fili con buona resistenza alla trazione, bassa densità ed elevata conducibilità elettrica. Un'altra caratteristica di fondamentale importanza è la rigidezza, che però è in contrasto con la necessità di avere diametri molto piccoli; si tende quindi a cercare una soluzione di compromesso tra queste due condizioni. I fili catodici hanno un diametro maggiore di quelli anodici per limitare la concentrazione del campo elettrico sulla superficie ed evitare di amplificare il segnale dovuto alla raccolta di ioni positivi. Ad essi è richiesta bassa densità ed elevata conducibilità elettrica. Sono stati quindi caratterizzati, come fili catodici, quelli in Alluminio da 40µm e 50µm :

Produttore: California Fine Wire
Tipo: Aluminum 5056 AG PLTD 3-5%
Diametro: 40µm

Produttore: California Fine Wire
Tipo: Aluminum 5056 AG PLTD 3-5%
Diametro: 50µm

Per quanto riguarda i fili anodici abbiamo caratterizzato i fili in Tungsteno, Tungsteno/Rh (3%) ed i fili in Carbonio:

Produttore: California Fine Wire
Tipo: Tungsten Gold PLTD 3-5%
Diametro: 20 μm

Produttore: California Fine Wire
Tipo: Tungsten/Rodio (Rh 3%) Gold PLTD 3-5%
Diametro: 20 μ m

Produttore: Specialty Materials
Tipo: Carbonio
Diametro: 33,5μm

2.1.1 Rivestimento superficiale dei fili

Per le nostre applicazioni, esclusivamente per i fili metallici, abbiamo richiesto la fornitura degli stessi con rivestimento superficiale in oro nel caso dei fili in tungsteno ed in argento per quelli in alluminio. Tale rivestimento è necessario per:

- Evitare perturbazioni del campo elettrico dovute alla presenza di difetti superficiali
- Migliorare la conducibilità elettrica e saldabilità

Infatti, l'utilizzo di un filo in alluminio puro sarebbe realisticamente improponibile poiché si avrebbe la formazione superficiale dell'ossido di alluminio o allumina (Al_2O_3) rendendolo immediatamente non conduttivo ed impedendone l'eventuale saldatura. La tecnica di rivestimento del filo è basata sul processo elettrochimico mediante una cella elettrolitica. Nel caso specifico del filo in alluminio, l'anodo della cella è un elettrodo metallico in argento mentre il catodo è il filo da ricoprire. Il bagno elettrolitico invece è una soluzione contenente disciolti sali complessi di argento (cianuri e iposolfiti alcalini oppure nitrato di argento). In questo modo l'argento dell'anodo passa in soluzione come ione Ag^+ mentre al catodo si deposita come argento metallico. Lo spessore di deposito è direttamente proporzionale al tempo di immersione del filo nel bagno elettrolitico per cui gestendo automaticamente tale processo si distribuisce uniformemente lo spessore desiderato (Fig.22).

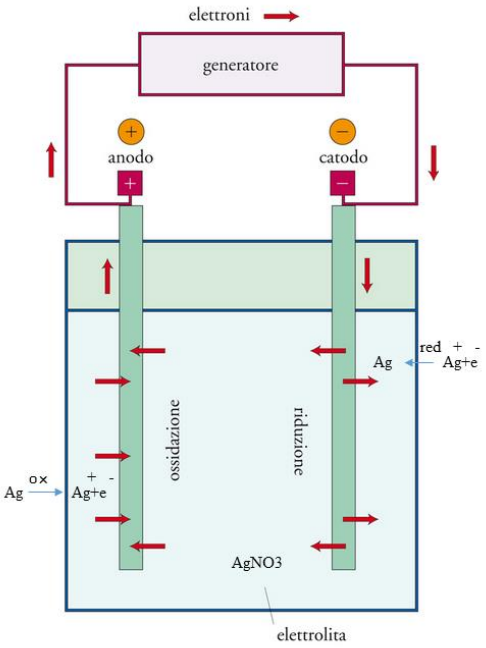


Figura 22 Schema di deposizione Galvanica dello strato di Argento sul filo in Alluminio

Analogamente a quanto descritto sopra, il rivestimento dei fili in tungsteno con oro richiede l'utilizzo di elettroliti in funzione dell'utilizzo dell'oggetto da rivestire. Di particolare interesse è la deposizione di rodio su oro per migliorare la resistenza di quest'ultimo alla corrosione e all'usura conferendogli una resistenza meccanica migliore.
L'oro, essendo un metallo estremamente tenero e duttile nonché molto resistente alla corrosione, può venire depositato in un numero considerevole di soluzioni presentando di conseguenza proprietà molto differenti. Sulla base di queste proprietà, i bagni di doratura si possono cosi raggruppare:

- Bagni al cianuro, che danno luogo a depositi di oro puro, molto teneri (40 VPH), per lo più usati a fini decorativi.
- Bagni usualmente al cianuro, da cui l'oro viene depositato come lega (soprattutto Au/Cu, Au/Ni, Au/Ag), in tinte dal bianco al rosso, con durezze fino a 250 VPH e con eccellente resistenza all'usura, specie se contiene Sn o Sb.
- Bagni acidi (pH 4-5,5) che forniscono depositi virtualmente puri (Co in tracce), lucidi, con durezze 110-115 VPH. Questi bagni presentano basso rendimento catodico e danno spesso luogo a depositi tensionati.
- Bagni noti come «Neutral or acid fine gold processes», a base di citrati, fosfati, citrati fosfati (pH 6,2-6,8), che danno luogo a depositi per lo più non porosi, con durezze 100 110 VPH.
- Bagni di recente messa a punto di tipo acido, che danno a freddo depositi di particolare struttura (durezza 180 VPH), e di tipo alcalino senza cianuro, che realizzano depositi lucidi, duttili con durezze di 100-250 Vickers.

I depositi molto duri (450 VHN) sono per lo più fragili e stressati, criccano facilmente, presentano diminuita resistenza alla trazione ed inoltre si saldano male.
I depositi ottenuti da bagni convenzionali sono, ovviamente, più duri dell'oro ricotto (durezza ≥ 28 kg/mm²) e nel nostro caso specifico poiché è richiesta una buona resistenza alla trazione senza che sia la minima cricca dello strato superficiale, il bagno utilizzato per il rivestimento dei fili in tungsteno è quello con elettroliti convenzionali alcalini a base di cianuro.

2.2 Caratterizzazione Meccanica

Data la criticità dovuta agli sforzi a cui sono soggetti i fili, è stato necessario caratterizzarli per definire il carico di transizione elasto-plastico. I fili soggetti alla forza di Coulomb durante il funzionamento della camera devono rimanere in campo elastico al fine di evitare che deformazioni permanenti ne possano aumentare irreversibilmente il valore della sagitta, con il rischio di scarica tra fili di potenziale diverso.
La normative ASTM D 3379-75 (1989) "Standard Test Method for Tensile Strenght and Young's Modulus for High-Modulus Single-Filament Materials" fornisce le linee guida per realizzare la caratterizzazione dei fili ultra sottili. In particolare, essa prevede l'utilizzo di supporti piatti per l'ancoraggio dei fili in oggetto. Nel nostro caso abbiamo utilizzato dei fogli di PET ramato (polietilene tereftalato) da 190µm di spessore aventi forma rettangolare da 60x20 mm con al centro un'asola lunga 30mm (Fig.23).

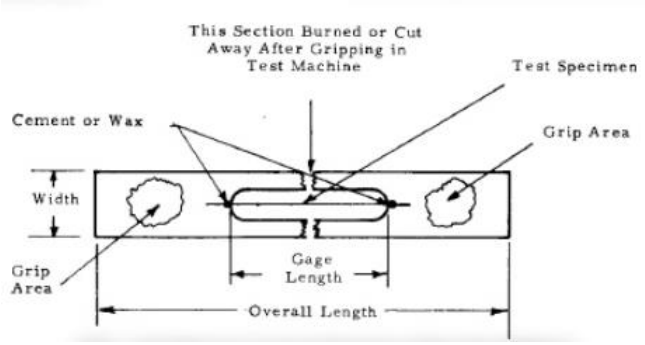


Figura 23 Supporto per caratterizzazione filamenti sottili

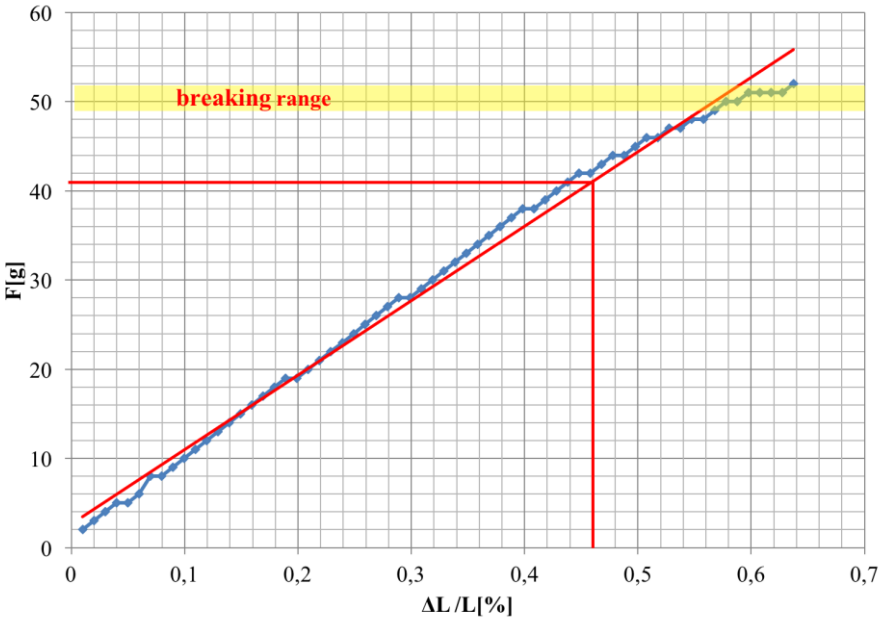
Lo strumento utilizzato per la valutazione dell'elongazione del filo in funzione del carico è il reometro ARES (Advanced Rheometric Expansion System) della Rheometric Scientific con l'ausilio del software di acquisizione dati RSI Orchestrator presente nel Laboratorio di Materiali Ceramici presso il Dipartimento di Ingegneria dell'Innovazione dell'Università del Salento.

Il filo metallico viene saldato sul provino, come mostrato in figura 23, senza apporre alcuna trazione a quest'ultimo. Dopo aver montato il tutto su un reometro, limitando ovviamente la zona di afferraggio nella parte terminale del supporto in PET, si procede alla tranciatura di quest'ultimo in due metà in modo tale da assicurare esclusivamente lo sforzo di trazione al filo. Il campione siffatto è pronto per la prova di trazione. L'analisi secondo normativa ASTM presenta dei tempi di esecuzione relativamente lunghi a causa della preparazione dell'elevato numero di provini, oggetto di test, necessari ad ottenere un'adeguata statistica. Per tale motivo, in modo preliminare, con lo scopo di avere un'idea del comportamento dei fili soggetti a trazione, abbiamo effettuato un test qualitativo sui fili a disposizione utilizzando un'attrezzatura semplice costituita da un profilato in alluminio sulla cui estremità è fissata una slitta micrometrica solidale ad un dinamometro digitale. Sull'altra estremità abbiamo posizionato un supporto fisso ad una distanza di 500,00 ± 0,05 mm (Fig.24).

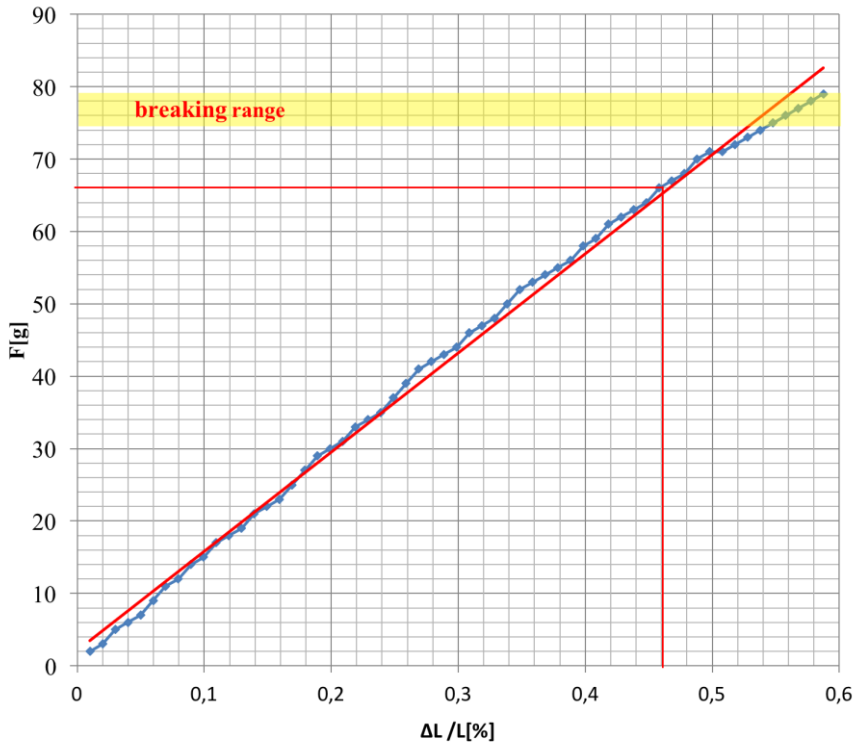
Il dinamometro utilizzato ha le seguenti caratteristiche:

Dinamometro con cella di carico interna: mod. PCE-FB5
Range di misura/Risoluzione : 5 N (0,5 kg) / 0,001 N (0,1 g)
Precisione : ±0,1 % del range di misura
Frequenza di campionamento : 10 valori / sec. o 40 valori / sec.

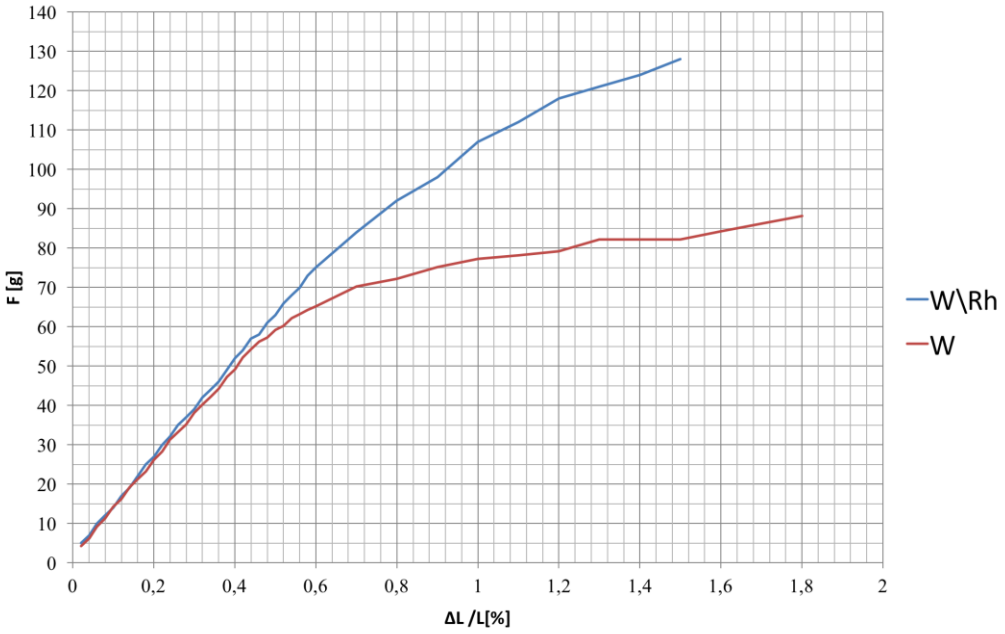
La slitta micrometrica ha invece una sensibilità di ±0,01 mm. Il filo oggetto di studio viene saldato tra le due estremità nel caso di fili metallici oppure incollato nel caso del filo di carbonio. Una volta fissato il filo si agisce sulla slitta micrometrica a spostamenti di 10 μm fino a quando non si registra un aumento della tensione di circa 2 g. Alla distanza iniziale di 500 mm bisogna quindi sommare il valore di spostamento della slitta per il quale il filo inizia ad essere caricato: tale somma rappresenta il valore di L0. Si procede all'elongazione del campione registrando per ogni step il relativo valore del carico misurato dal dinamometro. Si può quindi tracciare un grafico del carico in grammi in funzione dell'allungamento percentuale (L-L0)/L0.
Nei grafici seguenti faremo una comparazione qualitativa del comportamento dei fili in oggetto studiando i vari diagrammi sforzo-elongazione.



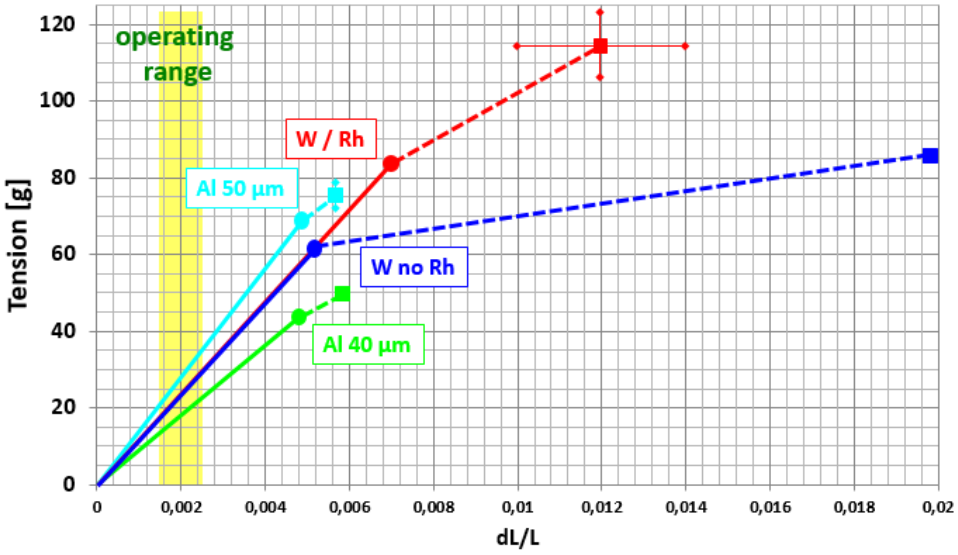
Analisi qualitativa del comportamento del filo Al 5056 Ag PLDT 40µm



Analisi qualitativa del comportamento del filo Al 5056 Ag PLDT 50µm



Analisi qualitativa del comportamento del filo Tungsten Gold PLTD 20µm e del filo Tungsten Gold PLTD/Rh 20µm con percentuale di rodio pari al 3%



Comparazione qualitativa tra le diverse tipologie di fili

Dopo aver valutato qualitativamente i fili sopracitati, abbiamo notato che il filo W/ Rh ha un limite elastico maggiore di 7 mm/m a 85g rispetto al filo in W (5,2 mm/m a 62 g).

Ciò sembrerebbe, a prima vista, un vantaggio ma successivamente e dopo un'attenta analisi si nota che tale vantaggio non può essere sfruttato poiché si trova ben al di fuori dell'intervallo elastico dei fili di campo in Al. Inoltre, il filo W/Rh è meno uniforme e mostra una maggiore resistività (293 Ω/m vs 175 Ω/ m del filo in W), il che comporta un'elettronica di lettura con meno larghezza di banda e guadagno e, quindi, maggiore rumore. Queste funzionalità sono parametri limitativi fondamentali per avere un'ottima performance del rivelatore. Quindi, in base a queste considerazioni abbiamo escluso definitivamente l'utilizzo del filo in tungsteno con l'apporto di Rodio.

Esclusivamente a titolo di studio per i futuri tracciatori abbiamo testato il filo in carbonio da 33,5µm. Tale filo è prodotto esclusivamente da un'azienda statunitense: Specialty materials Inc. . Le applicazioni commerciali del filo sono come microelettrodi per l'analisi elettrochimica. I microelettrodi in monofilamento di carbonio possono essere rivestiti con polimeri ionici per applicazioni in varie tecniche di misurazione come la voltametria, la cronoamperometria ad alta velocità e la cronopotenziometria. Inoltre, la SMI ha sviluppato il suo monofilamento di carbonio come substrato per le sue fibre di carburo di silicio SCS per applicazioni in elettrochimica. Nel grafico in Figura 24 sono riportate due misure selezionate su un totale di dieci prove effettuate.

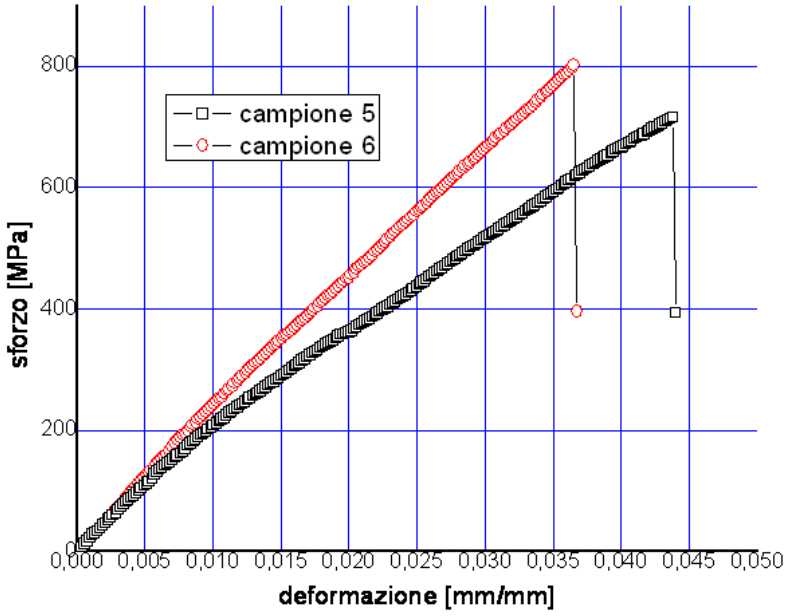


Figura 24 - Prova di trazione su filo di carbonio da 33,5 micron, eseguita alla velocità di 2 micron/s

I valori del modulo di elasticità e della tensione ultima, $\sigma_{rottura}$, relativi a questa prova, con relativa media e deviazione standard sono:

	Campione 5	Campione 6	media	dev. st.
E [GPa]	21.05	24.66	22.855	2.55
$\sigma_{rottura}$ [MPa]	716	802	759	60.81

La fase successiva alla valutazione qualitativa è stata quella di determinare in modo normativo la valutazione dei fili in oggetto. Abbiamo, quindi, provveduto a preparare i campioni di filo con relativo supporto secondo la normativa ASTM 3379-75. Il posizionamento del filo sul supporto in PET (Fig.25) è stato effettuato su base piana per facilitare il posizionamento dei fili e per agevolare la saldatura del filo nella zona all'estremità della "Gage Length" (avente una lunghezza pari a 30mm) mediante stagno basso fondente STANNOL HF32 Sn 62%,Pb 36%, Ag 2% avente spessore 0.5mm.

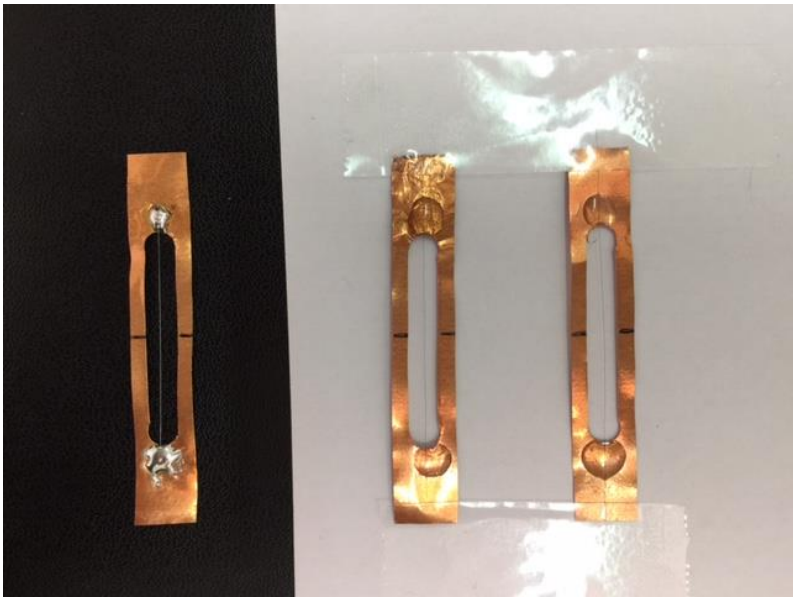


Figura 25 Supporti in PET ramato - Normativa ASTM D 3379-75

Una volta saldati i fili sui supporti, questi vengono fissati sui tools di afferraggio del reometro (Fig.26) e si effettua il taglio dei due lembi del supporto in corrispondenza della metà della "Gage Length" come possiamo notare nella figura successiva. In questo modo viene registrata solo la forza del filo.

Figura 26 Reometro Ares

Le prove relative a ciascuna tipologia di campione sono state condotte con una velocità costante pari a 0.002 mm/s.
In figura 27 e 28 viene riportato il diagrammo sforzo-deformazione relativo alle prove condotte sui campioni in Alluminio da 40μm e da 50μm:

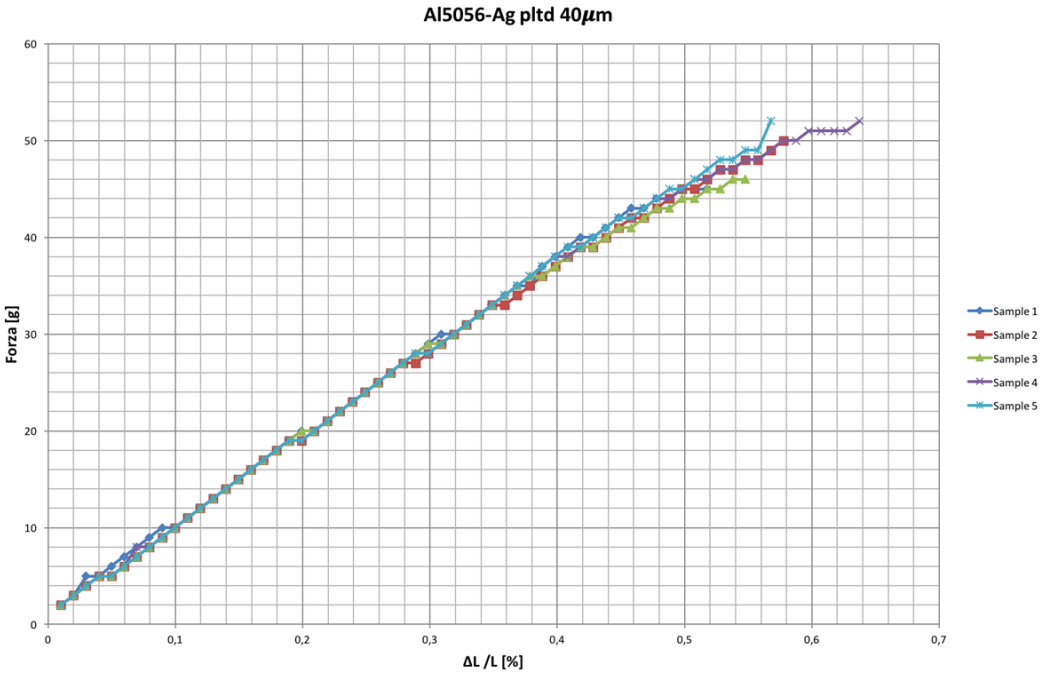


Figura 27 Grafico Carico/Elongazione fili in Alluminio da 40µm

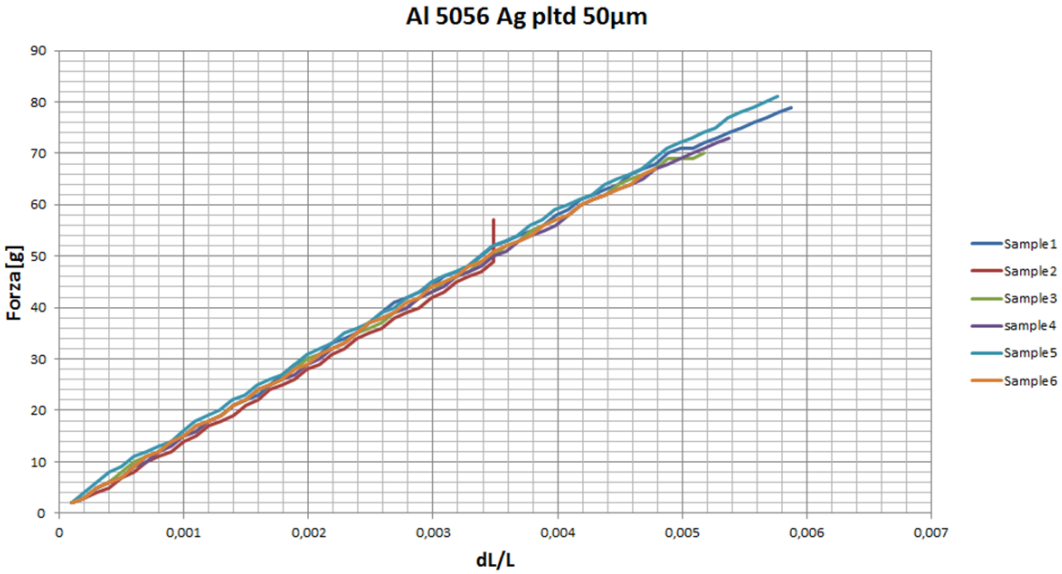


Figura 28 Grafico Carico/Elongazione fili in Alluminio da 50µm

Analogamente a quanto fatto per i fili di alluminio, si procede nella preparazione dei supporti di PET con i fili in Tungsteno (Fig.29) e con i fili in Carbonio (Fig.30).

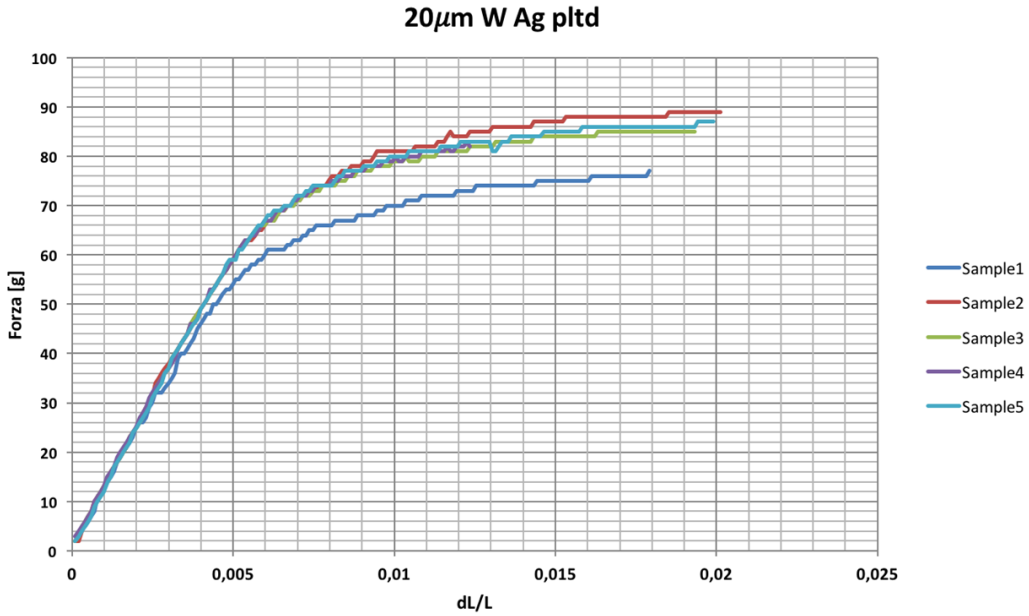


Figura 28 Grafico Carico/Elongazione fili in Alluminio da 50µm

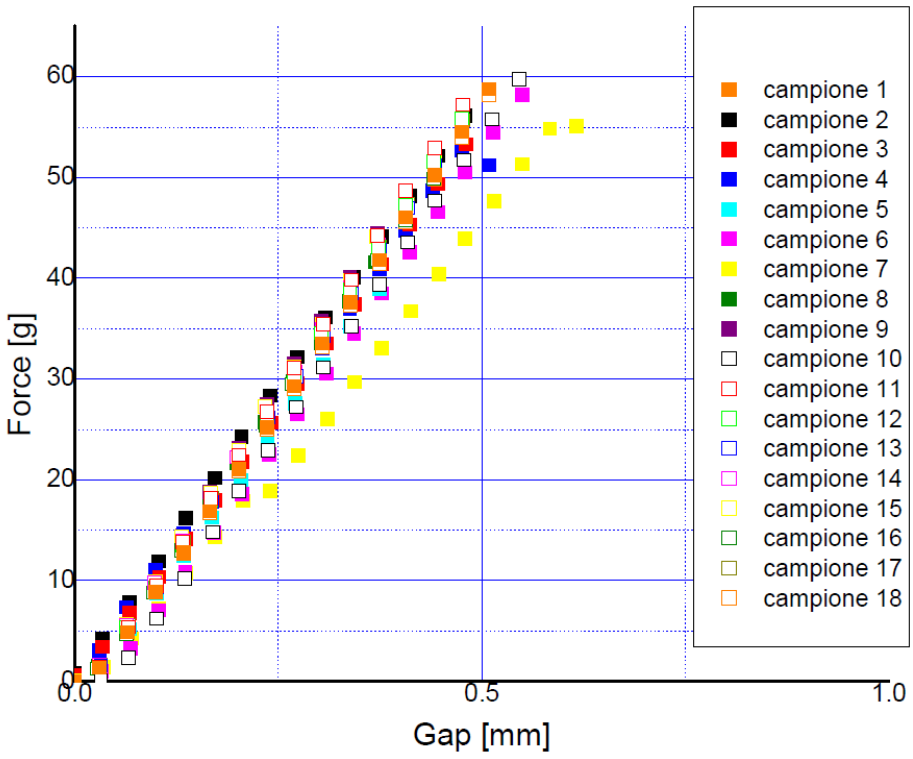


Figura 30 Grafico Carico/Elongazione fili in Carbonio da 33,5µm

In conclusione, abbiamo testato quattro tipologie di filo e nella tabella sottostante riportiamo i valori del modulo elastico medio, della resistenza a trazione ed il valore in percentuale dell'elongazione media dei fili studiati:

	Diametro (mm)	Resistenza (R) [Ω]	Resistività (ρ) [Ωm]
Alluminio 40µm	0,04	37,5	$4,7*10^{-8}$
Alluminio 50µm	0,05	24	$4,7*10^{-8}$
Tungsteno 20µm	0,02	175	$5,5*10^{-8}$
Tungsteno/Rh 20µm	0,02	293	$9,2*10^{-8}$
Carbonio 33,5 µm	0,0335	$37*10^{3}$	$3,3*10^{-5}$

2.3 Caratterizzazione elettrica: Resistenza e Resistività

Il parametro che caratterizza un materiale nei confronti dei fenomeni di trasporto della corrente elettrica è la conducibilità elettrica σ [S/m] o il suo inverso ρ=1/ σ [Ω m]. Sperimentalmente, il comportamento dei solidi da un punto di vista del trasporto della corrente elettrica si può caratterizzare disponendo di un campione lungo e stretto, di geometria nota e sezione costante, misurandone la resistenza elettrica R =V/I (legge di Ohm). Da tale misura si può ricavare la resistività ρ definita macroscopicamente per un conduttore omogeneo di lunghezza L e sezione S:

$$R = \rho L/S, \text{ o la conducibilità } \sigma = 1/\rho \qquad [1]$$

La conducibilità e la resistività elettrica presentano un range di valori molto ampio nei materiali: 24 ordini di grandezza passando dagli isolanti ai buoni conduttori (Fig. 31). Tecnicamente si potrebbe dire che i materiali, da un punto di vista elettrico, si ripartiscono in quattro grandi gruppi:

- Buoni conduttori;
- Conduttori;
- Semiconduttori;
- Isolanti;

Il primo gruppo di materiali è costituito da quelli che possiedono una resistività di valore molto basso, nell'ordine dei 10^{-8} Ωm e nella pratica ingegneristica sono i materiali con cui si realizzano i conduttori. Il secondo gruppo presenta valori di resistività un po' più elevati: con questi materiali si costruiscono i resistori, ossia quei componenti circuitali che realizzano volutamente resistenze di valore stabilito. I

materiali del terzo gruppo hanno un valore intermedio tra quello dei conduttori e degli isolanti, e per tale motivo sono denominati semiconduttori. I materiali del quarto gruppo presentano una resistività elevatissima, non comparabile a quella dei primi due gruppi: sono questi i materiali isolanti, che, anche se sottoposti a differenze di potenziale (tensioni) notevoli, non sono praticamente attraversati da corrente. Con tali materiali si costruiscono gli isolatori, che servono a separare elettricamente tra loro i conduttori.

	Materiale	Resistività a 0°C		Coefficiente α_0 $\times 10^{-3}$ [°C^{-1}]
		Ω·m	Ω·mm²/m	
Buoni conduttori	Argento	$1{,}5 \cdot 10^{-8}$	0,015	4,0
	Rame	$1{,}6 \cdot 10^{-8}$	0,016	4,2
	Oro	$2{,}1 \cdot 10^{-8}$	0,021	3,9
	Alluminio	$2{,}6 \cdot 10^{-8}$	0,026	4,3
Conduttori	Tungsteno	$5 \cdot 10^{-8}$	0,05	4,5
	Ferro puro	$10 \cdot 10^{-8}$	0,10	6,0
	Ferro dolce	$13 \cdot 10^{-8}$	0,13	4,8
	Piombo	$20 \cdot 10^{-8}$	0,20	4,2
	Manganina	$40 \cdot 10^{-8}$	0,40	0,01
	Ferro-silicio (3% Si)	$50 \cdot 10^{-8}$	0,50	1,0
	Ferro-nichel (25% Ni)	$85 \cdot 10^{-8}$	0,85	0,6
	Nichel-cromo (20% Cr)	$105 \cdot 10^{-8}$	1,05	0,1
Semiconduttori	Carbone	$3000 \cdot 10^{-8}$	30	−0,4
	Germanio purissimo	0,5		negativo
	Solfuro di piombo	10		negativo
	Silicio purissimo	$2{,}5 \cdot 10^{3}$		negativo
Isolanti	Ardesia	10^{6}		
	Bachelite	10^{9}		
	Olio minerale	10^{11}		
	Porcellana	10^{12}		
	Resine epossidiche	10^{13}		
	Mica	10^{14}		
	Polistirolo	10^{16}		

Figura 31 Range di resistività nei materiali

Da un punto di vista fisico, è importante osservare che la resistività aumenta rapidamente con il contenuto di impurezza del materiale e, in un materiale conduttore, aumenta l'aumentare della temperatura. Indicando con ρ la resistività di un materiale conduttore alla temperatura θ e con ρ_0 la sua resistività a 0°C, vale la seguente relazione:

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha_0 \theta)$$

Dove α_0 rappresenta il coefficiente di temperatura della resistività riferito a 0°C.
Al contrario, la resistività di altri materiali, come ad es. i semiconduttori, diminuisce all'aumentare della temperatura. I materiali detti superconduttori, quando vengono portati al di sotto della loro temperatura critica, assumono un resistività praticamente nulla. In figura 32 si può rappresentare graficamente quanto detto:

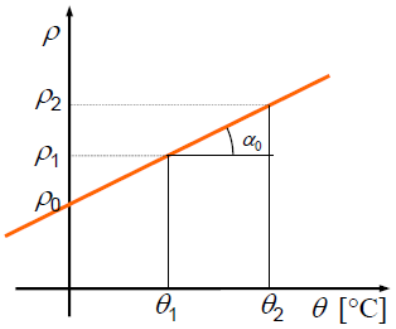


Figura 32 Andamento della Resistività in funzione della Temperatura

Sperimentalmente il metodo più immediato per misurare una resistenza è quello Amperometrico. Esso ci permette di utilizzare la legge di Ohm misurando la tensione ai capi del resistore, la corrente che lo attraversa e valutandone il rapporto. Il metodo di misura descritto, considerando tensione e corrente continue, può essere rappresentato schematicamente in Figura 33.

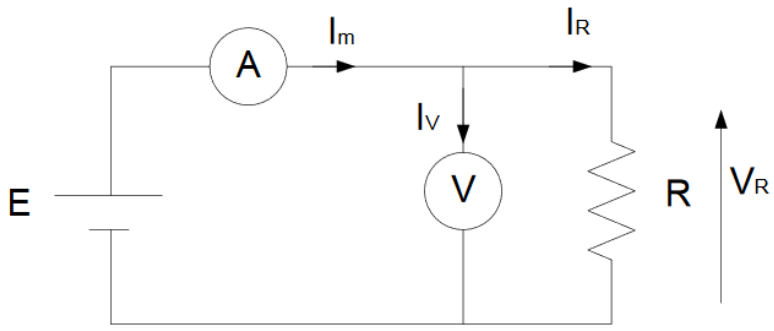


Figura 33 Circuito Amperometrico per la misura della Resistenza Elettrica

Quindi la resistenza misurata è:

$$R_m = \frac{V_m}{I_m} = \frac{V_R}{I_R + I_V}$$

Per le misure di resistività sui fili in questione abbiamo utilizzato un multimetro digitale della serie Fluke 45 con risoluzione di $0.001\Omega^{-1}$mΩ ed un supporto in nylon necessario all'ancoraggio dei fili. Sostanzialmente abbiamo posizionato due morsetti

fissi ad un metro di distanza tra loro e sistematicamente abbiamo misurato il valore della resistenza del filo. Applicando la formula inversa della [1] si ottiene il valore della resistività per metro di lunghezza:

	Diametro (mm)	Resistenza (R) [Ω]	Resistività (ρ) [Ωm]
Alluminio 40µm	0,04	37,5	4,7*10-8
Alluminio 50µm	0,05	24	4,7*10-8
Tungsteno 20µm	0,02	175	5,5*10-8
Tungsteno/Rh 20µm	0,02	293	9,2*10-8
Carbonio 33,5 µm	0,0335	37*10^3	3,3*10-5

2.4 Analisi Morfologica SEM e Microanalisi EDX

Abbiamo effettuato, presso il Laboratorio di Microscopia a Scansione Elettronica del Dipartimento di Fisica dell'Università del Salento, delle analisi SEM (Electron Scanning Microscope) su alcuni campioni di filo preparati allo scopo di analizzarne meglio la microstruttura superficiale a diversi ingrandimenti.
Dalla figura 34 si evidenzia una perfetta superficie del filo ed è possibile notare l'effettivo valore del diametro di 40 µm.

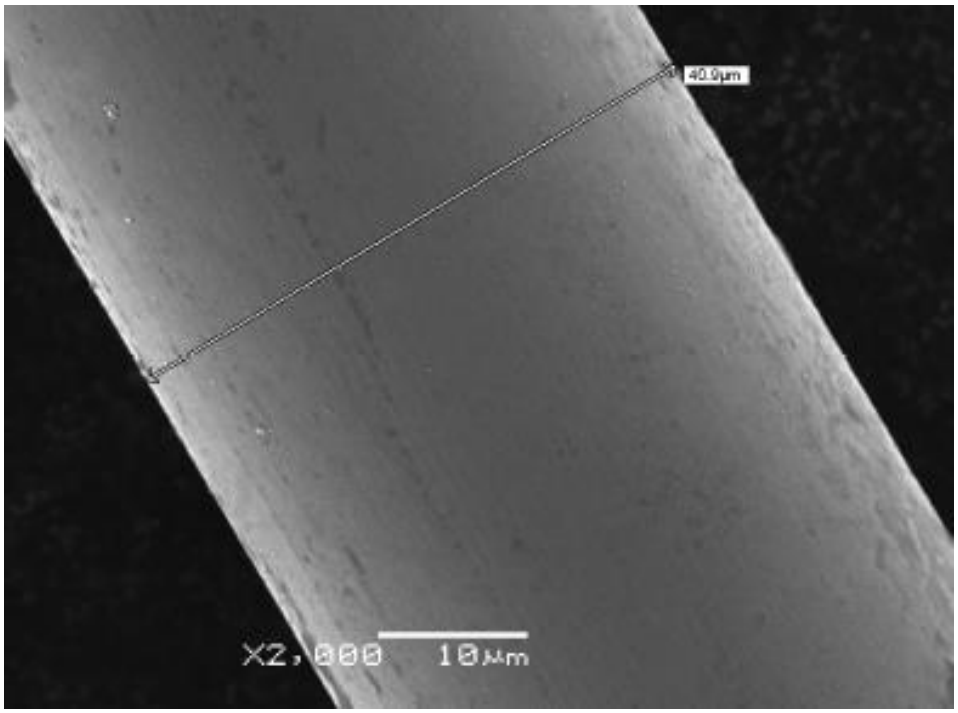


Figura 34 SEM 2000X - Al 40µm

Nella figura 35 è ben visibile la zona di frattura del filo ad una trazione di 61g:

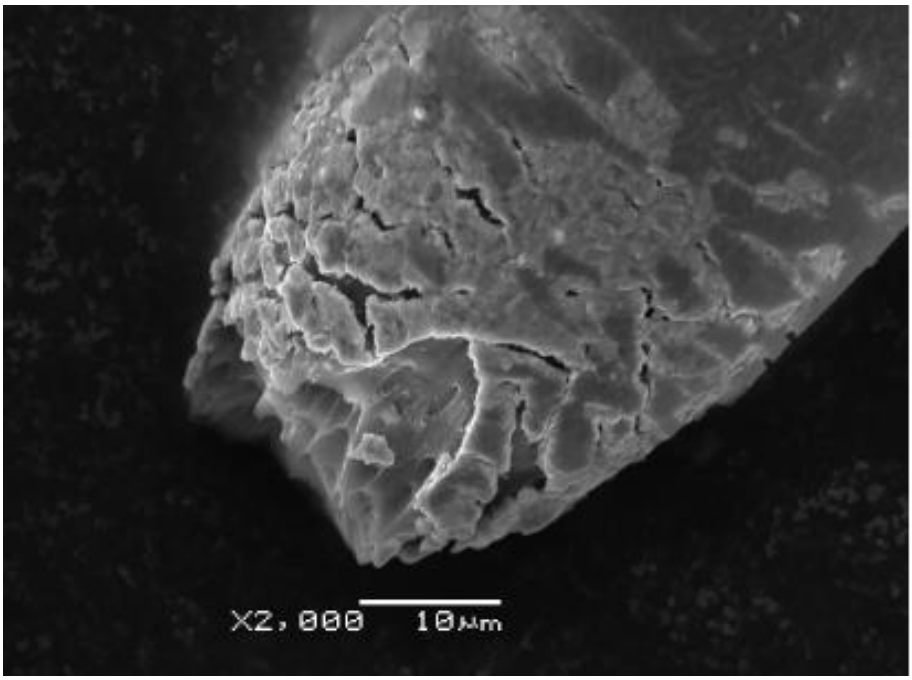


Figura 35 SEM 2000X – Al 40µm

Nella figura 36 è possibile osservare la superficie del filo in Tungsteno da 20µm:

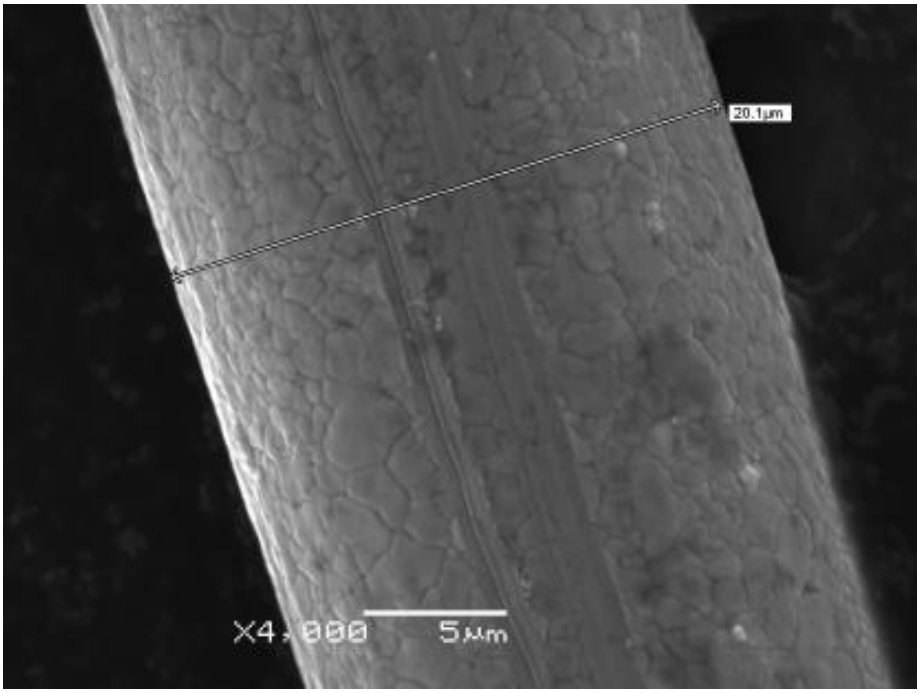


Figura 36 SEM 3000X – W 20 µm

Analogamente a quanto fatto per i fili in alluminio, nella figura 37 è possibile osservare la zona di frattura del filo in tungsteno sotto trazione a 47g:

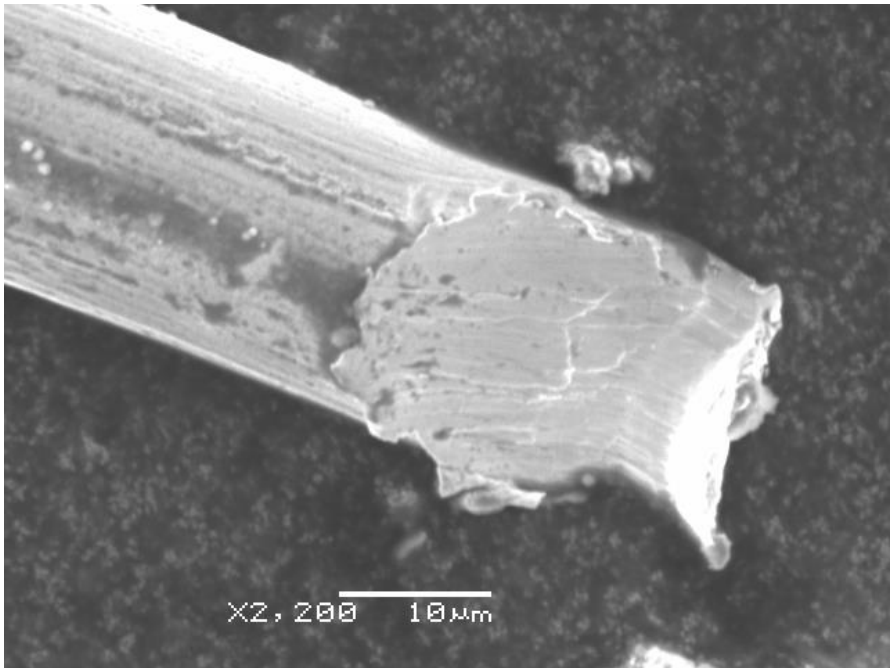


Figura 37 SEM 3000X (top) e SEM 2200X (bottom)– W 20 µm

Parallelamente all'analisi SEM abbiamo effettuato sui fili una ulteriore analisi da un punto di vista chimico analizzandone gli elementi costituenti con le relative percentuali mediante Sistema EDX per la Microanalisi. In figura 38 è mostrato il risultato ottenuto per la superficie interna del filo in alluminio con le percentuali degli elementi effettivamente presenti. Come si può notare, la purezza del materiale è più che soddisfacente.

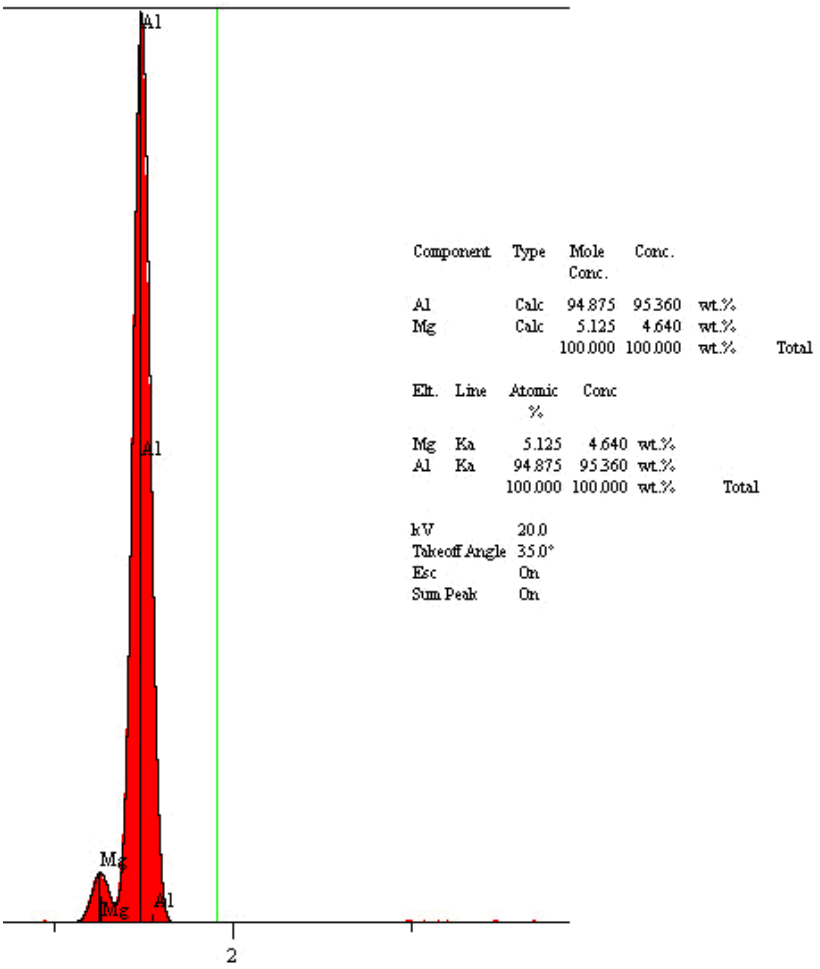


Figura 38 Composizione chimica della superficie interna del filo in alluminio

Di contro, la figura 39 evidenzia come la composizione chimica della superficie esterna del filo in alluminio sia molto più contaminata.

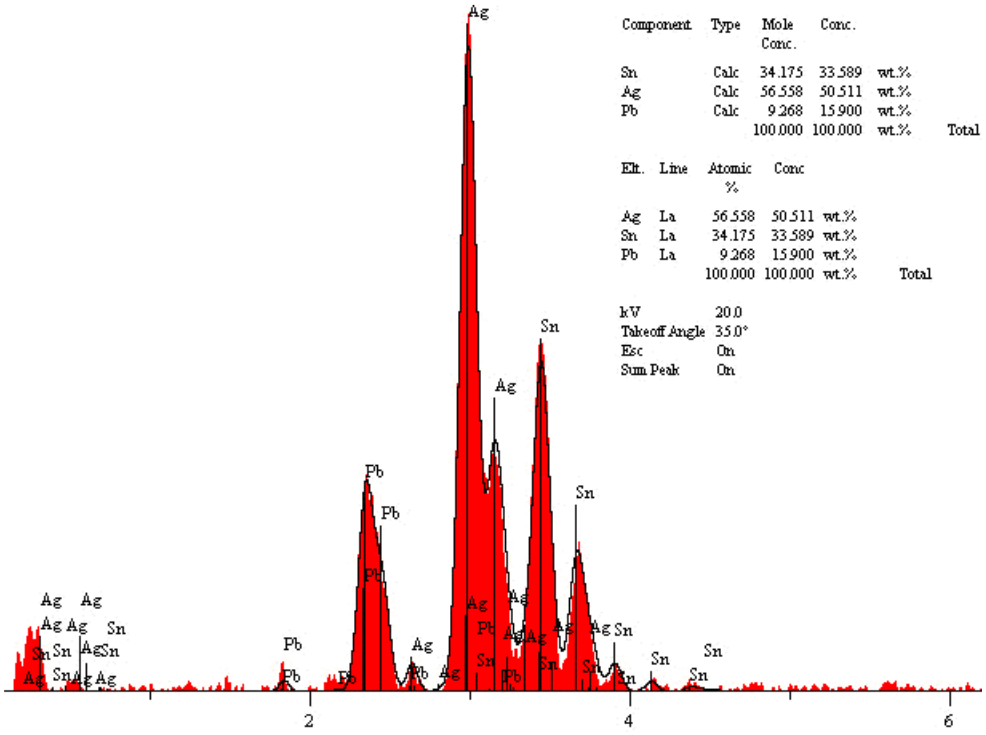
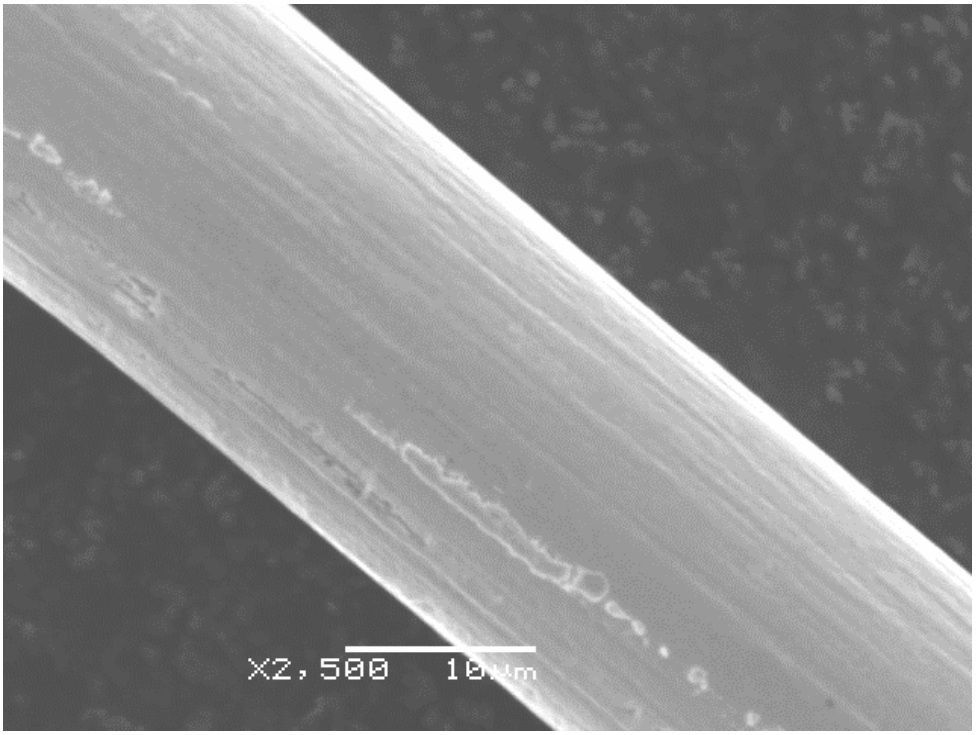


Figura 39 Composizione chimica della superficie esterna del filo in alluminio

Le figure seguenti, 40 e 41, mettono in evidenza la composizione chimica del filo in tungsteno relativamente a due punti differenti della superficie esterna.



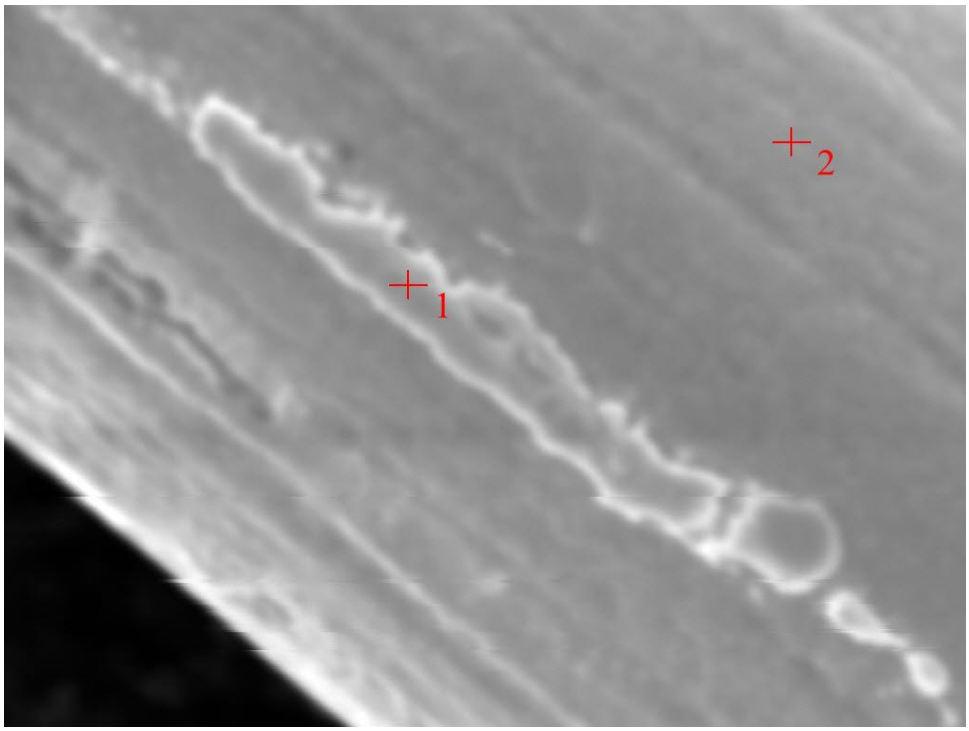
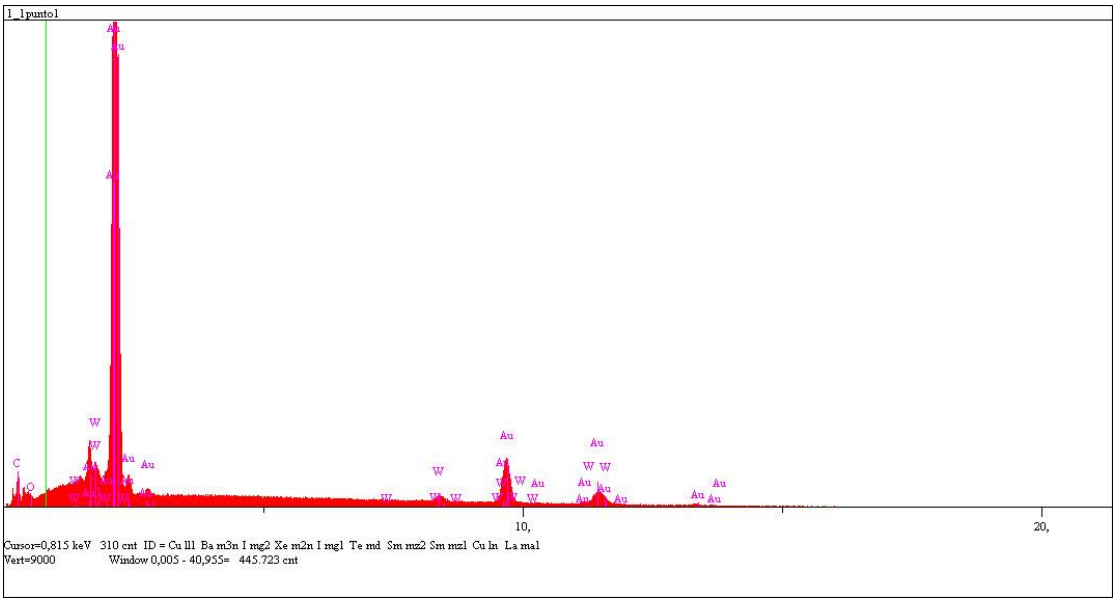


Figura 40 Superficie esterna del filo in Tungsteno da 20µm



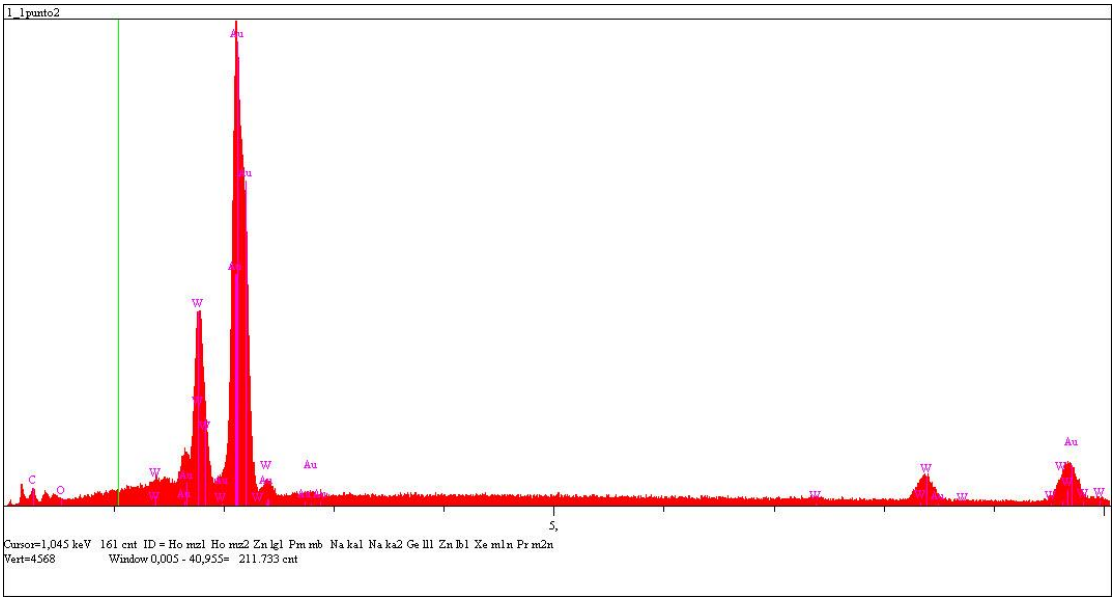


Figura 41 Composizione chimica della superficie esterna del filo in tungsteno nei punti 1 e 2 evidenziati in figura 40

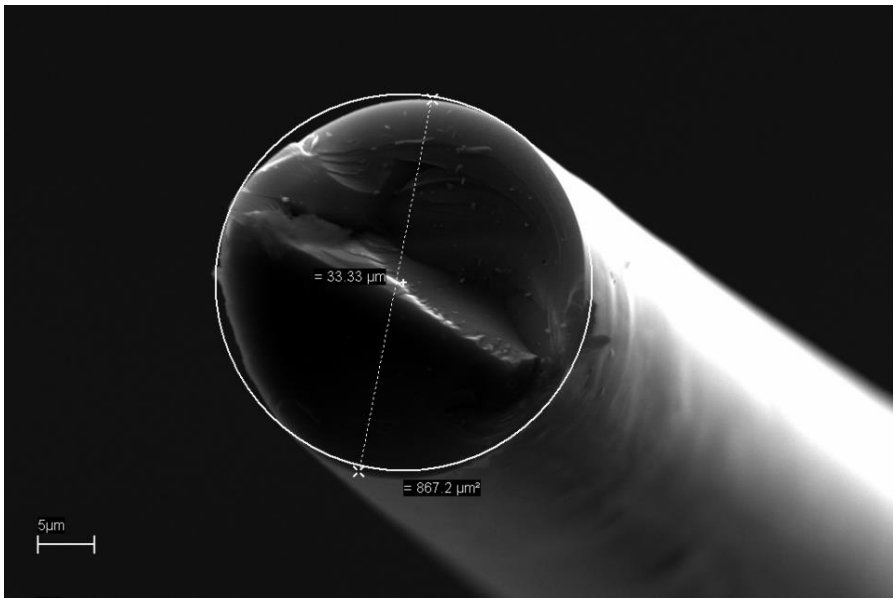
Elt.	Line	Atomic %	Conc	Units	
C	Ka	23,472	1,985	wt.%	
O	Ka	4,025	0,453	wt.%	
W	La	32,288	41,792	wt.%	
Au	La	40,214	55,769	wt.%	
		100,000	100,000	wt.%	Total

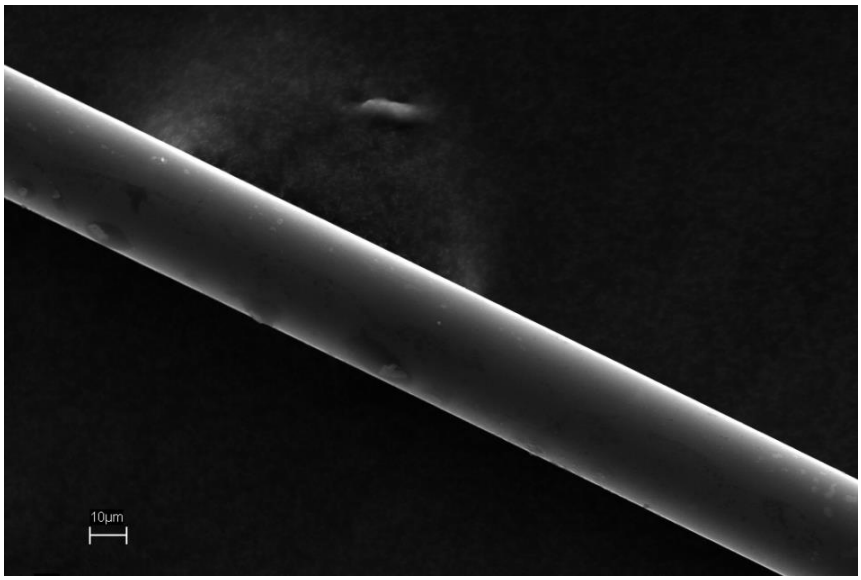
kV	20,0
Takeoff Angle	35,0°

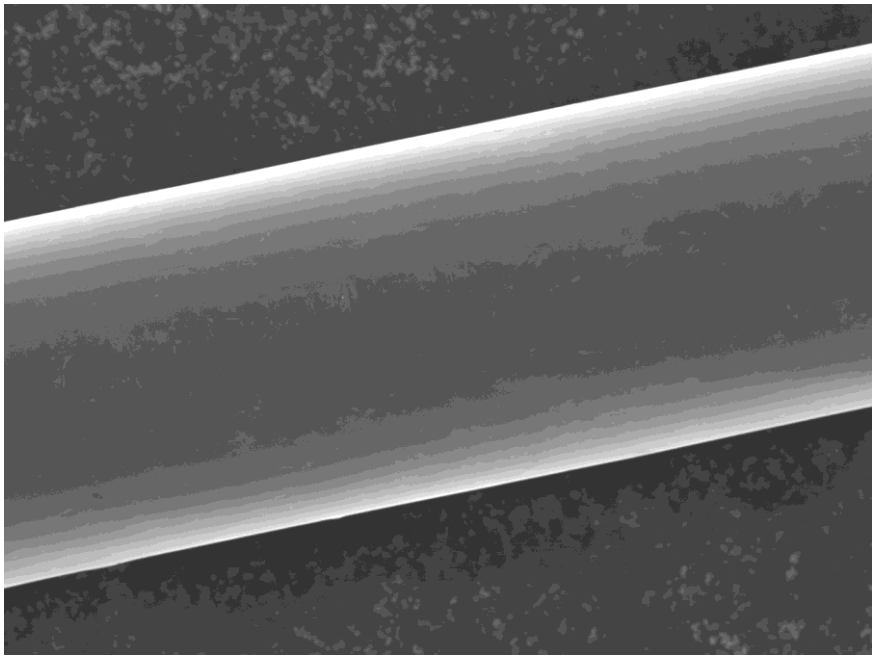
Elt.	Line	Atomic %	Conc	Units	
C	Ka	46,649	5,688	wt.%	
O	Ka	6,423	1,043	wt.%	
W	La	4,307	8,038	wt.%	
Au	La	42,622	85,230	wt.%	
		100,000	100,000	wt.%	Total

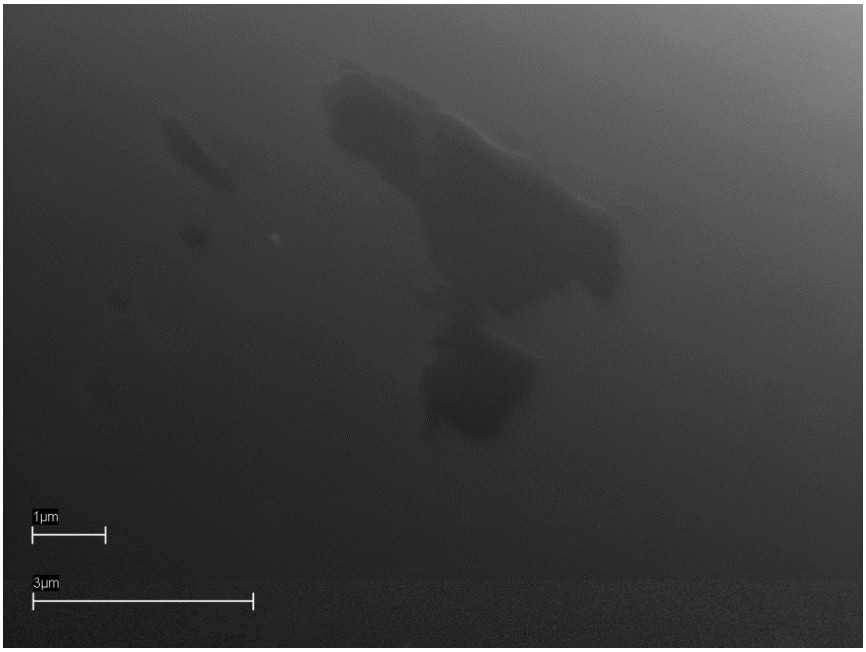
kV	20,0
Takeoff Angle	35,0°

Analogamente a quanto fatto per i fili in alluminio e tungsteno è possibile studiare morfologicamente il filo in Carbonio da 33,5µm.



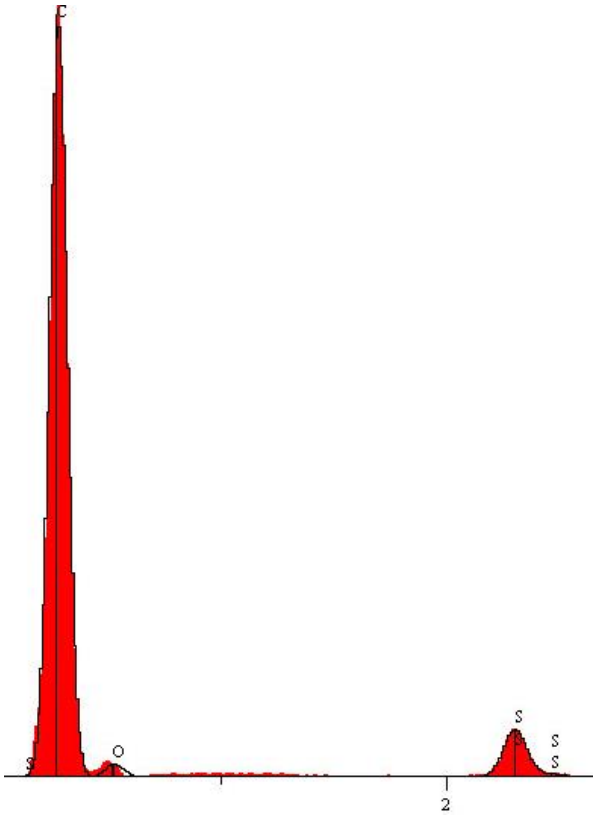






Immagini SEM del filo di carbonio con diametro pari a 33,5µm

È stato possibile effettuare un'analisi degli elementi che costituiscono il filo in Carbonio. Nella seguente figura sono riportati lo spettro e le percentuali in questione.



Component	Type	Mole Conc.	Conc.		
O	Calc	5.592	7.248	wt.%	
C	Calc	93.865	91.340	wt.%	
S	Calc	0.543	1.412	wt.%	
		100.000	100.000	wt.%	Total

Elt.	Line	Atomic %	Conc		
C	Ka	93.865	91.340	wt.%	
O	Ka	5.592	7.248	wt.%	
S	Ka	0.543	1.412	wt.%	
		100.000	100.000	wt.%	Total

kV	20.0
Takeoff Angle	35.0°
Esc	On
Sum Peak	On

Capitolo 3

3.1 Un istituto di ricerca: l'INFN

L'INFN è un ente pubblico nazionale di ricerca, vigilato dal Ministero dell'Istruzione, dedicato allo studio dei costituenti fondamentali della materia e delle leggi che li governano. Esso svolge attività di ricerca, teorica e sperimentale, nei campi della fisica subnucleare, nucleare e astro-particellare. Le attività di ricerca dell'INFN si svolgono tutte in un ambito di competizione internazionale e in stretta collaborazione con il mondo universitario italiano, sulla base di rapporti pluridecennali consolidati. La ricerca fondamentale in questi settori richiede l'uso di tecnologie e strumenti di ricerca d'avanguardia che l'INFN sviluppa sia nei propri laboratori sia in collaborazione con il mondo dell'industria. Istituito nel 1951 da gruppi delle Università di Roma, Padova, Torino e Milano al fine di proseguire e sviluppare la tradizione scientifica iniziata negli anni '30 con le ricerche teoriche e sperimentali di fisica nucleare di Enrico Fermi e della sua scuola, negli anni '50, l'INFN progettò e costruì il primo acceleratore italiano, l'elettrosincrotrone realizzato a Frascati dove nacque il primo Laboratorio Nazionale dell'Istituto (LNF). Nello stesso periodo iniziò la partecipazione dell'INFN alle attività di ricerca del CERN, il Centro europeo di ricerche nucleari di Ginevra, per la costruzione e l'utilizzo di macchine acceleratrici sempre più potenti. Oggi il contributo dei ricercatori dell'INFN è riconosciuto internazionalmente non solo nei vari laboratori europei, ma in numerosi centri di ricerca mondiali.

3.1.1 La struttura e l'organizzazione

L'attività dell'INFN si basa su due tipi di strutture di ricerca complementari: le Sezioni e i Laboratori Nazionali (Fig.44)

Figura 44 Disposizione geografica delle sezioni e dei laboratori nazionali dell'INFN

I Laboratori nazionali, con sede a Catania, Frascati, Legnaro e Gran Sasso, ospitano grandi apparecchiature e infrastrutture messe a disposizione della comunità scientifica nazionale e internazionale. Le 20 Sezioni e gli 11 Gruppi collegati alle Sezioni o Laboratori hanno sede in altrettanti dipartimenti di Fisica Universitari e realizzano la stretta connessione tra l'Istituto e le Università.
Della struttura complessiva attuale fanno anche parte:

- Il consorzio EGO, European Gravitational Observatory, a Cascina (Pisa);
- Il CNAF, Centro Nazionale per la Ricerca e Sviluppo nelle Tecnologie Informatiche e Telematiche, a Bologna;
- L'Amministrazione centrale, a Frascati.
- La Presidenza, a Roma.

Nel 2009, con l'approvazione da parte del Ministro dell'Istruzione del nuovo statuto riguardante il riordino degli EPR, è stato elaborato un nuovo modello di organizzazione manageriale e scientifica, figura 45, per lo svolgimento dell'attività scientifica.

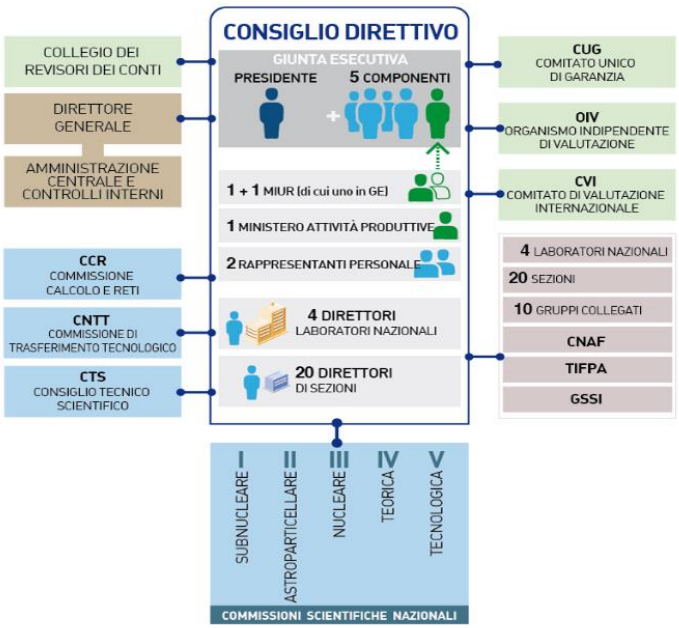


Figura 45 Organizzazione manageriale e scientifica dell'INFN

L'INFN si avvale di cinque Commissioni Scientifiche Nazionali (CSN), consultive del Consiglio direttivo che ricoprono rispettivamente le seguenti linee scientifiche: fisica subnucleare (CSN1), fisica astro particellare (CSN2), fisica nucleare (CSN3), fisica teorica (CSN4), ricerche tecnologiche e interdisciplinari (CSN5). L'organizzazione manageriale e scientifica si è gradualmente affinata. La sua funzionalità è frutto anche di buone esperienze consolidate nel tempo, che ne hanno fissato dettagli operativi essenziali. Essa rappresenta un efficace equilibrio tra organizzazione centralizzata e decentrata, tra vertice e base, frutto dell'esperienza. Di particolare rilevo è l'entrata in esercizio, nel 2009, del nuovo Sistema Informativo che costituisce uno strumento essenziale che consentirà sempre di più una gestione integrata, efficiente, trasparente e ottimizzata dei processi amministrativi dell'Istituto.

Per definire l'assetto organizzativo e realizzare quanto stabilito nella nuova "vision" l'Istituto ha operato nel periodo di riferimento un "cambio di paradigma", fondato sull'azione delle competenze interne. Questa nuova logica di funzionamento, ha privilegiato l'idea del lavoro in team multidisciplinare basato sull'orientamento alle attività per progetto. Il cambio di paradigma interseca fondamentalmente tre dimensioni:

- il modo di leggere ed interpretare il sistema: il modo stesso di "guardare" il sistema, la prospettiva stessa con la quale si analizza la realtà;
- il sistema delle decisioni: i luoghi, i modi, gli snodi;
- il sistema delle azioni: ricerca di sinergie e generazione di valore per il sistema nel suo complesso e non per singole parti;

La riorganizzazione globale dell'Istituto è stata guidata dai "pilastri" o valori chiave che formano ed orientano gli scopi, le intenzioni e le azioni di tutte le persone che lavorano all'interno dell'INFN e che sono stati identificati in:

- Unicità dell'Istituto;
- Centralità della vocazione scientifica e tecnologica;
- Contestualizzazione della ricerca nella prospettiva della fisica nucleare;
- Centralità della Persona;
- Sviluppo della ricerca e dell'innovazione tecnologica;
- Innovazione gestionale e relazionale;
- Affermazione del ruolo sia a livello nazionale che internazionale;
- Razionalizzazione delle risorse e contenimento dei costi gestionali;

Il disegno di "riordino" dell'Istituto si è focalizzato quindi ad assicurare una visione unitaria, ad avere obiettivi comuni ed a permettere un costante interscambio tra le diverse funzioni, facendo convergere con pari dignità la ricerca scientifica con l'attività di laboratorio. Un altro aspetto di fondamentale importanza è la gestione economica dell'Istituto. Analizzando attentamente il grafico di figura 46 si evince che dal 2011 le entrate senza vincolo di destinazione, dopo un periodo continuo di contrazione, sono tornate al livello dell'anno 1985.

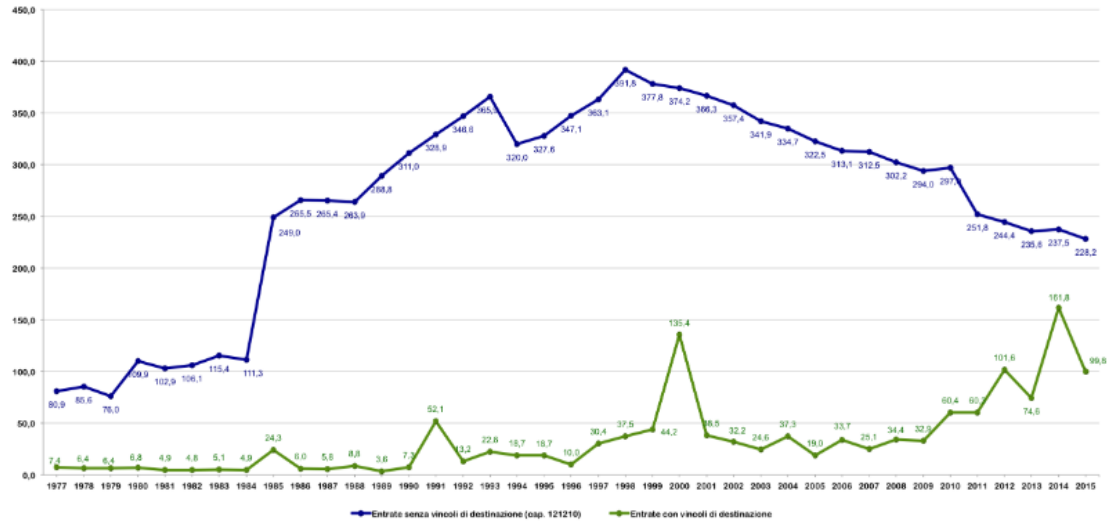


Figura 46 Valori di bilancio dell'INFN (1977-2015)

Si è quindi posta la necessità di contrarre progressivamente le spese in modo tale da rientrare entro i nuovi limiti posti dalle Entrate, e allo stesso tempo di trovare nuove

sorgenti di finanziamento. A questo proposito va sottolineata la crescita, verificatasi negli ultimi anni, dei finanziamenti con vincoli di destinazione. Si tratta principalmente di fondi destinati a progetti di ricerca o tecnologici specifici di durata pluriennale provenienti da diverse fonti quali ad esempio: i fondi dei programmi europei, i fondi regionali (PON e POR), i fondi MIUR: Premiali e per progetti a valenza internazionale. L'aumento dei fondi su progetti specifici risolve solo parzialmente il problema del finanziamento delle ricerche istituzionali dell'INFN, basate sulle entrate senza vincoli di destinazione. Il livello globale di spesa corrente dell'INFN negli ultimi anni è attestato intorno a 300 ML € e questo numero riflette le esigenze finanziarie legate alla ordinaria amministrazione dell'Ente.

3.1.2 Modalità di Finanziamento ordinario dell'INFN per gli esperimenti

Le modalità di finanziamento ordinario per gli esperimenti dell'INFN si possono definire nei punti di seguito:

1. Le attivita' sperimentali vengono inizialmente proposte a livello progettuale da collaborazioni di fisici provenienti da molte istituzioni diverse generalmente su scala internazionale. Una volta convintisi scientificamente della validità della proposta si formalizzano gli accordi di collaborazione tramite opportuni documenti ufficiali (Memorandum of Understanding, MoU) in cui vengono esplicitamente stabiliti diritti e doveri delle varie istituzioni che partecipano all'impresa. Questi MoU per l'INFN vengono generalmente redatti e studiati dall' Ufficio Affari Internazionali e in ultimo firmati dal Presidente dell'ente;
2. Nell' INFN l'opportunità di partecipare alla impresa in oggetto e l'eventuale impegno da formalizzare nei MoU, viene scrutinato dalla commissione nazionale di riferimento (nel caso di MEG, la CSN1) che ha il compito di fornire un parere dettagliato sulla stessa alla Giunta Esecutiva, che è l'organo di governo preposto ad autorizzare tecnicamente tutti i flussi di pagamento;
3. In commissione altresì si individua il Responsabile Nazionale del progetto (generalmente democraticamente proposto dai partecipanti INFN all'esperimento) e si determinano anche le assegnazioni finanziarie per le singole sotto unità di progetto afferenti alle varie sezioni INFN. Ogni singola sezione individua quindi anche un responsabile locale, che gestisce il budget locale sotto la supervisione del Direttore di Sezione;
4. In altri paesi e per altre agenzie finaziatrici la struttura gestionale può essere leggermente differente, ma per grandi linee il modello INFN è abbastanza diffuso.
5. Parallelamente, a livello di Collaborazione vengono individuate una serie di figure dirigenziali quali lo Spokesperson, portavoce scientifico/politico della collaborazione, il Technical Manager, responsabile tecnico della stessa e generalmente una serie di responsabili di sotto progetti il cui numero è determinato in prima istanza dalla complessità dell'esperimento stesso. Di norma, queste figure vengono ricambiate per statuto dopo un certo numero di anni, che varia a seconda della collaborazione.

6. E' tramite la cooperazione tra le figure rappresentanti gli enti finanziatori (i rappresentanti Nazionali e/o locali) e quelle proprie della Collaborazione (cioè lo Spokesperson e il Technical Manager) che si procede con il progresso dell'impresa, in tutte le sue fasi, da quella costruttiva, a quella di presa dati, di analisi degli stessi eccetera...

3.2 Gestione dei Progetti di ricerca

I progetti di ricerca dell'INFN si caratterizzano per una durata pluriennale che può facilmente raggiungere il decennio, e in alcuni casi superarlo. In questo periodo, il profilo del progetto ed il tipo di spesa variano considerevolmente (progettazione, ingegnerizzazione, costruzione, messa in opera e funzionamento). Sarebbe dunque indispensabile poter contare su un flusso ragionevolmente costante di risorse, o almeno su una programmazione pluriennale di finanziamento che permetta di ottimizzare l'uso delle risorse e la programmazione scientifica. L'ultima legge di stabilità ha dato un segnale che interrompe l'erosione dei finanziamenti, prevedendo per INFN un finanziamento aggiuntivo di 45 ML su 3 anni, ma per rendere auto-sostenibile sul lungo termine il bilancio INFN, occorre che questa inversione di tendenza si stabilizzi e continui nel tempo.

Con la delibera del Consiglio Direttivo n.13430/14, tutti i Direttori delle Strutture INFN sono stati nominati Legal Signatories (LSIGN) e sono di conseguenza autorizzati a sottoscrivere, per conto dell'Istituto il Grant Agreement (GA), il Consortium Agreement (CA). I documenti inerenti il GA, sia in forma cartacea che elettronica, una volta ricevuto l'invito della Commissione alla preparazione del GA relativo al Progetto, assegnano tramite Delibera del Consiglio Direttivo, un Project Legal Signatory (PLSIGN). Il Direttore della Struttura cui afferisce il proponente, in questa fase definita come "time to grant", inserisce tramite il proprio coordinatore nel Participant Portal i dati necessari alla preparazione del GA e degli allegati e ciascun partner sottoscrive elettronicamente la "Declaration of Honour".

Successivamente la Commissione fornisce il suo riscontro, chiedendo eventuali modifiche e la negoziazione si conclude con la sottoscrizione del Grant Agreement. Nel contempo le parti sottoscrivono, quando richiesto o comunque opportuno, anche il Consortium Agreement, un accordo che regola i rapporti fra le parti ed affronta questioni di interesse del consorzio. La Commissione non viene coinvolta in questo accordo; tuttavia il suo contenuto deve comunque rispettare il Grant Agreement ed in generale la normativa Ue.

Una volta sottoscritto il contratto, i Responsabili nazionali del Progetto possono richiedere l'assegnazione in Bilancio dell'importo corrispondente al contributo europeo previsto, a copertura delle spese necessarie al Progetto. In base alle tipologie di spesa da sostenere le risorse vengono assegnate nei corrispondenti capitoli di Bilancio. In particolare, l'INFN mette a disposizione l'importo totale relativo ai costi diretti:

- per le trasferte;
- per l'acquisto di materiale di consumo;
- per l'acquisto di beni durevoli definito come materiale inventariabile;
- per la stipula di nuovi contratti di lavoro o d'opera, a tempo determinato, dedicati al Progetto.

Si ricorda inoltre che, di norma, l'Amministrazione Centrale dell'Ente trattiene parzialmente una quota del contributo, detta overhead, a copertura degli oneri di carattere generale. La richiesta di assegnazione/anticipazione del contributo in Bilancio deve essere trasmessa tramite il Servizio Amministrazione della Sezione.

3.2.1 Gestione dei progetti Europei

La prima fase nella gestione dei progetti Europei è il reclutamento di nuovo personale da impiegare sul progetto/i. Una volta ricevuta l'assegnazione in Bilancio del contributo Ue è possibile richiedere l'attivazione delle procedure per l'assegnazione di eventuali contratti di lavoro a tempo determinato sui fondi del Progetto. La richiesta deve essere presentata dal Responsabile scientifico e da quello amministrativo e trasmessa all'Amministrazione Centrale tramite la Direzione. È importante che le richieste siano state verificate per gli aspetti economici con il Servizio Amministrazione prima della trasmissione. Il personale assunto con contratto a tempo determinato sui fondi del Progetto deve essere dedicato esclusivamente alle attività del Progetto stesso. All'avvio del Progetto viene definito l'elenco del personale "staff", con le relative percentuali di coinvolgimento. Tali percentuali devono essere dichiarate nei Preventivi di spesa annuali INFN. L'eventuale partecipazione di personale afferente ai Servizi di Progettazione Meccanica od Elettronica va preventivamente concordata con il Direttore ed i rispettivi Responsabili. Tutto il personale del quale si espongano i costi per il tempo dedicato al Progetto o con partecipazioni rilevanti alle attività di ricerca è tenuto a dichiarare il proprio coinvolgimento al progetto stesso e le eventuali percentuali di coinvolgimento in altri progetti coo-finanziati e già operativi.
Il personale dedicato al Progetto, per disposizione del Presidente, deve compilare il proprio timesheet relativo al tempo produttivo tramite il database INFN.
Il personale che lavora esclusivamente al Progetto presenta invece per ciascun periodo di rendicontazione un'apposita dichiarazione, detta "Declaration on exclusive work the action". L'INFN ha fissato il tempo produttivo medio, utilizzato per il calcolo del costo orario del personale INFN, in mesi/uomo.

3.2.2 Acquisti

Una sezione di particolare interesse ed importanza nella gestione di un progetto scientifico è il settore riguardante gli acquisti. Un buon progetto prevede sicuramente una buona valutazione dell'ordine di grandezza da attribuire, in termini puramente monetari, alla voce acquisti. Commettere errori di valutazione, soprattutto nella fase

iniziale, implicherebbe indubbiamente un'esposizione a rischi di fattibilità e durata del progetto stesso. I costi del Progetto relativi all'acquisto di materiale di consumo e servizi necessari per l'esecuzione delle attività vengono caricati sotto la voce "Budget" del progetto indicando il periodo temporale di avvio. L'acquisto di beni e servizi la normativa europea richiede, diversamente dalla normativa nazionale, una procedura comparativa per acquisti di qualsiasi importo. Per questo motivo è necessario usufruire per tutti gli acquisti della RDO presente sul MEPA e, qualora il metaprodotto non fosse disponibile ottenere almeno tre differenti offerte comparative. Eventuali subcontratti sui fondi del Progetto devono essere richiesti già in fase di negoziazione ed essere quindi inseriti nel DoA. Tali costi non danno origine ad alcun overhead. Come per l'acquisto di materiali e servizi sono necessarie la procedura comparativa e la relazione del Responsabile Scientifico coadiuvata da apposita commissione nominata da Direttore. L'acquisto di attrezzature e beni durevoli sui fondi del Progetto viene fortemente sconsigliato, in quanto vengono rimborsate dalla Commissione solo le quote di ammortamento relative al periodo di effettivo utilizzo del bene per il Progetto, nell'arco della durata dello stesso. Un capitolo molto importante che interessa l'area degli acuisti è il capitolo delle missioni del personale. La Commissione prevede il rimborso delle spese di viaggio e soggiorno del personale facente parte dello staff del Progetto inviato in missione per lo svolgimento delle attività previste. I viaggi, per i quali si applica l'usuale normativa INFN per le trasferte, devono essere motivati come essenziali per le attività del Progetto. Le spese di missione devono essere pertanto adeguatamente giustificate in connessione alle specifiche attività previste nell'Annex 1 e/o nel CA. Particolare attenzione dev'essere rivolta alla pertinenza delle spese sostenute con le date dei meeting, la causale di missione indicata nell'autorizzazione dovrà essere il più dettagliata possibile e tutta la documentazione disponibile a dimostrazione dell'inerenza del costo alle attività del Progetto (inviti a partecipare alle riunioni, agende, minute, locandine di workshop o conferenze, etc), dovrà essere trasmessa all'Amministrazione non appena disponibile. Tale documentazione sarà infatti presa in esame dal revisore per il rilascio della certificazione audit.

3.2.3 Personale: dipendenti INFN e personale Universitario

Il personale dipendente INFN si suddivide in due categorie: personale dipendente a tempo indeterminato (Staff) e personale dipendente a tempo determinato con incarico esplicito su progetto. Il personale dipendente a T.I., su invito del Direttore della struttura, può collaborare ad uno o più progetti contemporaneamente subordinando il suo impegno in percentuali di impiego. Il personale Universitario, dopo aver sottoscritto l'incarico di associazione all'INFN, può partecipare alle attività del Progetto. L'elenco dei nominativi, sia nel caso di personale INFN che Universitario, deve essere riportato nell'allegato tecnico Annex 1 e sarà poi possibile caricare sul Progetto il costo delle missioni, per lo svolgimento delle attività relative al GA, di detto personale. Non è possibile, a differenza del personale INFN, rendicontare il costo del personale associato per le ore di lavoro dedicate al Progetto. Ciononostante, in caso di partecipazioni rilevanti alle attività di ricerca, si procede alla compilazione del timesheet anche per il personale associato.

3.3 MEG: il gruppo di lavoro

Prima di definire in modo univoco il gruppo di lavoro che è stato impegnato nel progetto relativo all'esperimento MEG è di fondamentale importanza chiarire alcuni punti riguardanti gli aspetti organizzativi. Nel caso specifico di MEG abbiamo seguito una logica puramente aziendale rapportando il successo del progetto alla valutazione delle componenti necessarie a tale successo. I punti cardine sono stati così classificati:

1. Selezione del team necessario al progetto;
2. Pianificazione delle risorse umane;
3. Ruoli e responsabilità;
4. Valutazione delle differenze culturali;
5. Team virtuali e gruppi distribuiti;
6. Gestione dei conflitti;
7. Project Manager;
8. Riunioni con scadenza temporale;

Il successo di un gruppo di lavoro dipende sempre in maggior misura dall'organizzazione delle risorse umane e dalle strategie collegate per generare nel personale attivo un forte senso di stabilità. L'organizzazione costruisce il suo successo e grazie alla collaborazione diretta delle persone, ovvero quelle risorse interne ed esterne, si ha la possibilità di perseguire gli obiettivi, portando avanti l'idea principale del progetto. Una non adeguata Organizzazione delle Risorse Umane potrebbe quindi rallentare o limitare il successo e lo sviluppo dell'impresa.

Inoltre**,** la scelta del personale è tanto importante quanto l'Organizzazione del Personale: saper cercare, reclutare, motivare, coinvolgere e valorizzare il personale in forza diventa un elemento di differenziazione rispetto alla "concorrenza" e può determinare la riuscita o meno del progetto scientifico.

Altresì importante è chiarire ruoli e responsabilità per lo svolgimento del progetto. Nella fase della pianificazione è di fondamentale coinvolgere le persone interessate in modo da ottenerne il massimo impegno nel fare quanto concordato.

La gestione delle risorse umane di progetto presenta particolari criticità nel caso si operi su progetti globali cui partecipano persone provenienti da contesti culturali diversi. Spesso i progetti internazionali vedono la partecipazione di team virtuali che interagiscono occasionalmente utilizzando infrastrutture di rete per lo scambio di informazioni e videoconferenze o webinar per condividere idee ed impegni concreti nel progetto.

In un progetto scientifico altamente ambizioso come nel caso specifico di MEG, sono necessarie risorse umane di elevata qualità professionale, metodologie e processi di lavoro strutturati nonché strumenti evoluti in grado rispettare i "constrain"imposti dalla

comunità scientifica. Indubbiamente le persone sono la componente più importante perché possono potenziare metodi e strumenti ma, in egual misura, una non mirata investitura su persone esperte e con un bagaglio professionale adeguato possono arrecare ritardi non valutati o addirittura vanificarne l'esito finale.

I team virtuali ed i gruppi di progetto distribuiti su aree geografiche diverse sono ormai una realtà nel mondo del lavoro e nel caso di strutture accademiche è di usuale gestione. Tuttavia queste prassi costituiscono una modalità operativa di non semplice gestione per via delle problematiche organizzative e culturali. Il mondo della ricerca scientifica ha piazzato le basi su una politica di completa integrazione delle culture senza nessun vincolo economico, politico e religioso. Su questo punto infatti è di fondamentale importanza ricordare la prospettiva di Bourdieu circa l'integrazione sociale all'interno di strutture di altissima rilevanza. Bourdieu concepisce le relazioni sociali come una sorta di capitale che rappresenta una risorsa, in parte intenzionalmente accumulata ed in parte derivata dall'Habitus, riconvertibile al pari di altre in diverse forme di capitale. Esso consiste quindi nella somma di risorse, attuali e virtuali, che fanno capo ad un individuo o ad un gruppo che possiede una rete durevole di conoscenze istituzionalizzate.

La leadership di un project manager è senza alcun dubbio l'anima del progetto stesso. Essa deve essere un punto di riferimento autorevole nel raggiungere gli obiettivi prefissati. Una leadership forte assicura indubbiamente una riconoscenza a livello internazionale nonchè una stabilità al gruppo di lavoro in qualsiasi momento.

La presenza di conflitti durante lo sviluppo di un progetto è inevitabile e fisiologica. In particolare possono crearsi situazioni di conflitto dipendenti da:

- incomprensioni e fraintendimenti;
- disaccordi sul giusto modo di affrontare un problema;
- differenze di obiettivi personali o di reparto;
- personalismi eccessivi;

La gestione dei conflitti in un progetto è quindi un compito importante e riguarda soprattutto gli aspetti organizzativi iniziali del progetto.

Le riunioni di progetto costituiscono momenti di incontro importanti in cui sviluppare il lavoro concordato e valutare le performance del progetto. Durante lo svolgimento di un progetto numerose sono le occasioni di incontro tra i componenti del team di progetto. Riunioni per la valutazione dello stato di avanzamento dei lavori, riunioni operative, riunioni periodiche per discutere e risolvere eventuali incomprensioni fisiologiche del progetto stesso.

Nello sviluppo di MEG si è scelto di gestire la pianificazione del progetto con il modello RAM (Responsibility Assignment Matrix), integrando tutte le informazioni in un preciso organigramma del progetto. In questo modo è stato definito sostanzialmente il "chi fa che cosa" ma soprattutto evidenzia in modo immediato cosa deve essere fatto e da chi. Quindi in questo senso contribuisce a:

- evidenziare in modo immediato cosa deve essere fatto, chi lo deve fare e con quale ruolo organizzativo;
- formalizzare il ruolo non solo di coloro che dovranno effettivamente svolgere il lavoro ma anche di coloro che li dovranno supportare;
- favorire una migliore valorizzazione dei costi di ciascuna attività inglobando non solo quelli operativi/esecutivi ma anche quelli di supporto;
- creare consapevolezza dell'impatto del lavoro di ciascuno sul lavoro degli altri componenti del team;
- creare responsabilizzazione tra i componenti del team di progetto;
- favorire il commitment anche da parte dei responsabili delle risorse coinvolte.

A tal fine, abbiamo dato una particolare definizione dei diversi ruoli per ciascuna attività utilizzando la codifica RACI-VS che costituisce un acronimo dei 6 possibili ruoli associabili ad un'attività:

Responsible: è il ruolo di colui che è chiamato ad eseguire operativamente il task (per ogni task è possibile avere più Responsibili);

Accountable: è solitamente il ruolo a cui riporta il/i Responsible nell'organigramma di progetto o che comunque dovrà svolgere un ruolo di supervisione del lavoro del/dei Responsibile/i (deve essere univocamente individuato e dovrà rendere conto del lavoro delle risorse da lui coordinate nello svolgimento dell'attività);

Consult: è il ruolo di chi dovrà supportare il/i Responsible nello svolgimento del task fornendogli informazioni utili al completamento del lavoro o a migliorare la qualità del lavoro stesso;

Inform: è il ruolo di chi dovrà essere informato in merito al lavoro del/dei Responsible e che dovrà prendere decisioni sulla base delle informazioni avute;

Verifier: è colui che verifica che il deliverable rispetti i criteri di accettazione;

Signatory: è colui che approva la decisione del Verifier;

La RAM si costruisce, pertanto, associando a ciascuna attività relativa al progetto le persone o i ruoli organizzativi che vi parteciperanno indicando il ruolo specifico per ciascuna attività. E' quindi possibile che una stessa persona abbia un ruolo su un'attività ed un ruolo diverso su un'altra attività. Nella figura sottostante (Fig.47) è riportato un esempio di RAM riferita per semplicità ad alcune macro-attività riguardanti il progetto.

Grafico RACI-VS	Personale					
Attività	X1	X2	X3	X4	X5	X6
Fase Progettuale	A	R	I	V	I	S
Cap.Economico	V	A	R	I	S	C
Ordini/Acquisti	A	I	R	V	C	S
Sviluppo	A	S	I	R	V	C
Trasporti	I	R	A	S	C	V
Missioni ITA	A	C	V	I	R	S
Missioni Estere	R	I	A	V	I	S
Assegni di Ricerca	A	R	V	C	S	I

Figura 47 Esempio Struttura di tipo RAM (R=Responsible, A=Accountable, I=Inform,C=Consult, S=Signatory, V=Verifier)

Nella figura seguente invece, Fig.48, è riportato un esempio di struttura RAM con l'integrazione di due macro aree relative al progetto: WBS e OBS. La Work Breakdown Structure (WBS) è l'espressione utilizzata per definire la struttura organizzativa di progetto. Questo documento formalizza ed ufficializza le linee di riporto tra i componenti del project team ed ha validità ai soli fini dell'operatività del progetto stesso cioè non necessariamente è un riflesso dell'organigramma aziendale. La Organization Breakdown Structure (OBS) è invece uno strumento utile per precisare il processo decisionale e le modalità con cui esso dovrà svolgersi all'interno del progetto indicando appunto come i vari ruoli dovranno integrarsi tra loro e quali sono i livelli di escalation a fronte di scelte e problemi operativi. E' importante osservare che la OBS è particolarmente utile all'interno di progetti complessi in quanto chiarisce i livelli di coordinamento, i punti di controllo organizzativi e l'ambito di autonomia dei ruoli coinvolti. Questo schema non precisa le responsabilità e i compiti dei componenti del team che invece sono definiti nella RAM di progetto.

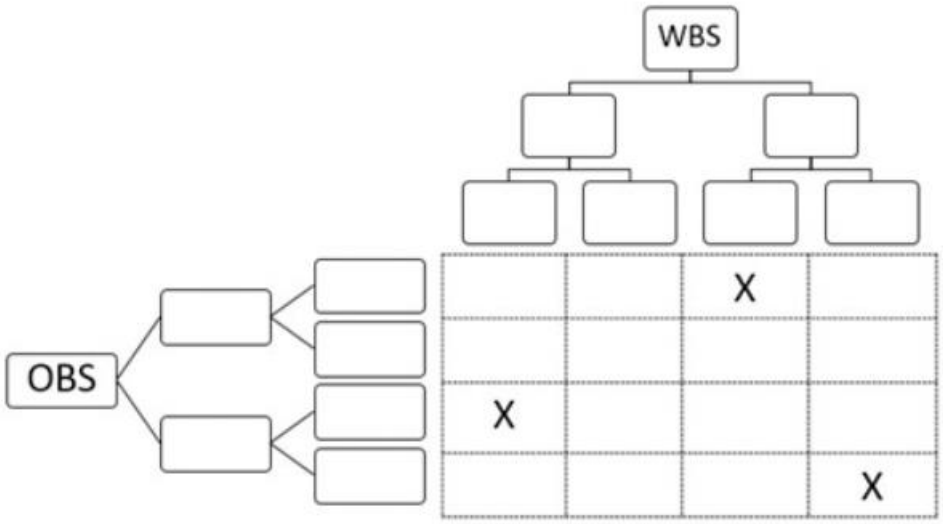


Figura 48 Esempio di struttura RAM con l'integrazione del controllo WBS e OBS (WBS= Work Breakdown Structure; OBS=Organization Breakdown Structure)

3.3.1 Il prototipo di MEG

Seguendo questa filosofia abbiamo suddiviso inizialmente il progetto del prototipo da valutare e testare in tre macro aree:

- Progettazione e sviluppo prototipo (Lecce-Pisa);
- Progettazione e sviluppo schede di acquisizione (Lecce-Roma1);
- Progettazione e sviluppo sistema gas (Roma1-Pisa);

Come già descritto nei capitoli precedenti, la fase progettuale ha dapprima investito lo studio di un prototipo in scala dell'esperimento vero e proprio. Tale studio è stato effettuato con la visione, nel breve periodo, di una riparametrizzazione del prototipo su larga scala, cioè la progettazione della camera finale. La realizzazione di una camera a drift di dimensioni ridotte, 1190 fili, (Fig.49 e Fig.50) è stata di fondamentale importanza per valutare e gestire, sia da un punto economico ma anche da un punto di vista puramente realistico, la fattibilità del progetto reale. Progettare e realizzare un prototipo implica una valutazione iniziale dei costi, una programmazione precisa dei compiti ed una gestione efficiente del personale. La fase di progettazione del prototipo ha coinvolto la sezione INFN di Lecce e quella di Pisa, integrando tra esse una collaborazione capillare di informazioni e simulazioni di efficienza, con metodo statistico "Montecarlo" del tracciatore. Per realizzare sia il prototipo ma successivamente la camera a drift è stato necessario progettare dapprima ed immediatamente dopo, con una tempistica molto ristretta (~6 mesi), una macchina capace di posizionare i fili secondo le caratteristiche richieste dal progetto.

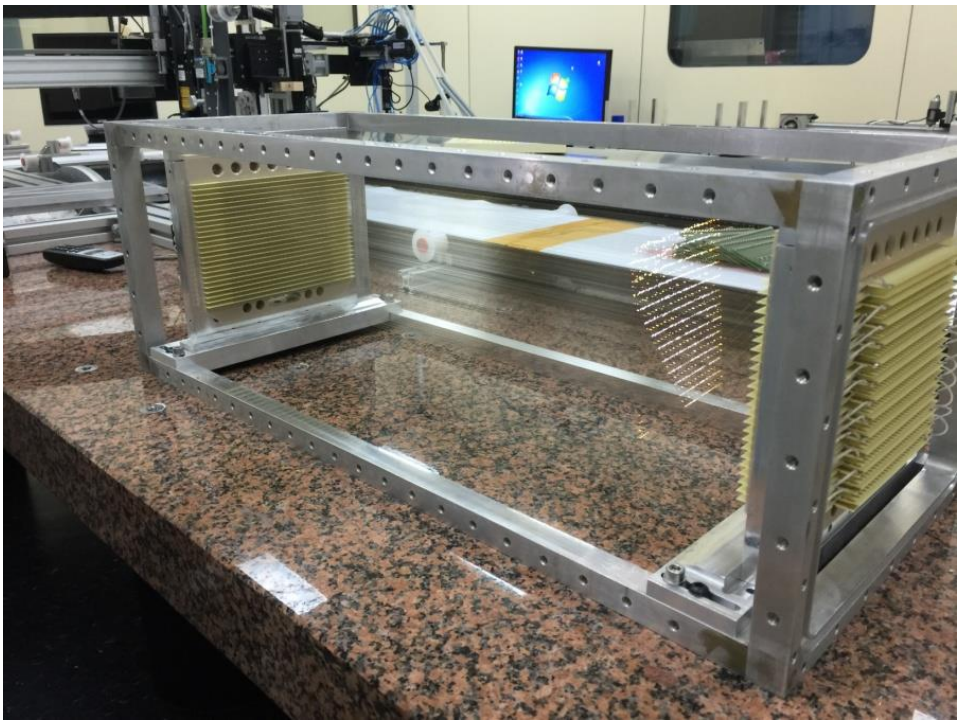


Figura 49 Prototipo in scala della camera a drift di MEG (parte relativa ai fili)

Figura 50 Prototipo completo in scala della camera a drift di MEG

3.3.2 Il robot di Filatura

Completato il lavoro di progettazione è stata realizzata la macchina capace di gestire i parametri di progetto richiesti: il robot di filatura (Fig.51). La macchina per la filatura è un robot semiautomatico progettato esclusivamente dalla sezione INFN di Lecce, capace di gestire un numero elevato di fili posizionandoli ad altissima precisione sulle wires PCBs e gestendo in modo certosino la tensione di questi ultimi.

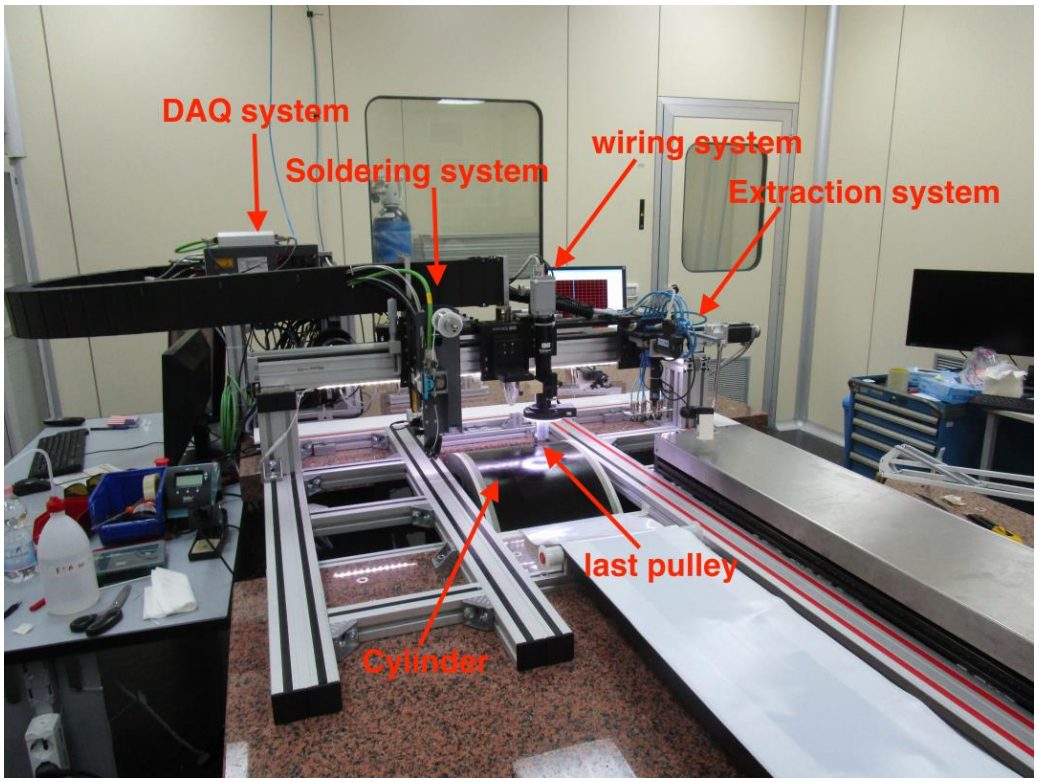


Figura 51 Robot di filatura all'interno della Clean Room, Laboratorio Alte Energie (Lecce)

Le wires PBCs sono realizzate in FR4 (Vetronite) da 400 μm di spessore e le piste in rame sono rivestite con 35μm di oro per evitare possibili ossidazioni. Sono complessivamente di tre tipologie: anodo, catodo e guardia. Sulla parte superiore sono realizzati tre "marker" (puntatori) necessari, inizialmente, per il controllo esatto della posizione delle PCBs sul cilindro di filatura, successivamente sui rispettivi end-plates. Molto importante sono le scritte realizzate sempre sulla parte superiore delle PCbs con la tecnica della fotoincisione, grazie ad esse è possibile identificare le informazioni relative al sublayer: layer number, PCB type, stereo angle. Inoltre cinque fori completano il quadro delle PCBs. Due di essi sono fissi per tutte le tipologie di PCB

mentre gli altri tre cambiano in funzione del layer di assemblaggio. La loro utilità è importante sia in fase di estrazione dal robot di filatura che durante il montaggio in camera (Fig.52).

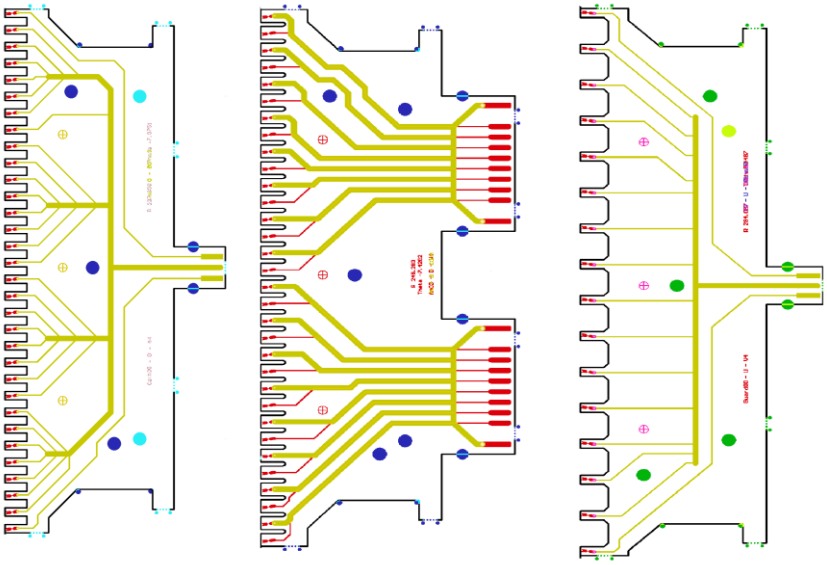


Figura 52 Tipologie di wires PCBs

Una volta posizionate le PCBs sul cilindro del robot di filatura si procede alla filatura di queste ultime utilizzando il sistema di filatura. Il sistema di filatura è composto da tre sottosistemi ben definiti:

1. il sistema di cablaggio;
2. il sistema di saldatura;
3. il sistema di estrazione;

Le PCBs vengono posizionate sul cilindro centrale sul quale vi è una maschera in alluminio realizzata con fresatrice CNC capace di alloggiare perfettamente le PCB (Fig.53). La posizione delle PCBs è assicurata considerando come superfici di riferimento delle schede il lato sinistro ed il lato superiore. In questo modo è possibile ridurre entro 20μm l'errore iniziale di posizionamento.

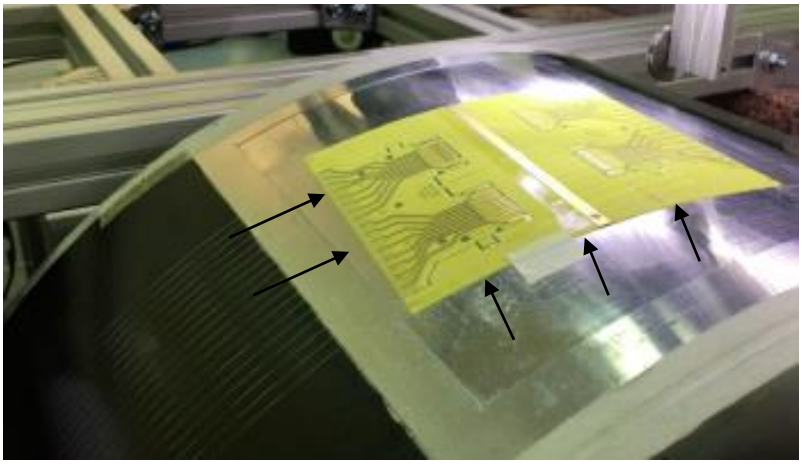


Figura 53 Posizionamento delle PCB sul cilindro

Una fotocamera digitale posizionata sul nasello di uscita del filo controlla il corretto posizionamento delle PCBs sul cilindro riducendo ulteriormente di un fattore due l'errore iniziale (~10μm).
Il sistema di filatura ha il compito di distribuire il filo lungo una traiettoria elicoidale ad altissima precisione (~8μm) e con una tensione meccanica costante durante tutta la fase di filatura. La tecnica consiste nel far ruotare un cilindro del diametro prefissato sincronizzato con un'asse trasversale sul quale è posizionato il sistema di distribuzione del filo. Il sistema di distribuzione del filo consta di un porta bobina-filo, coassiale con un torsiometro ed un freno elettromagnetico (Fig.54).

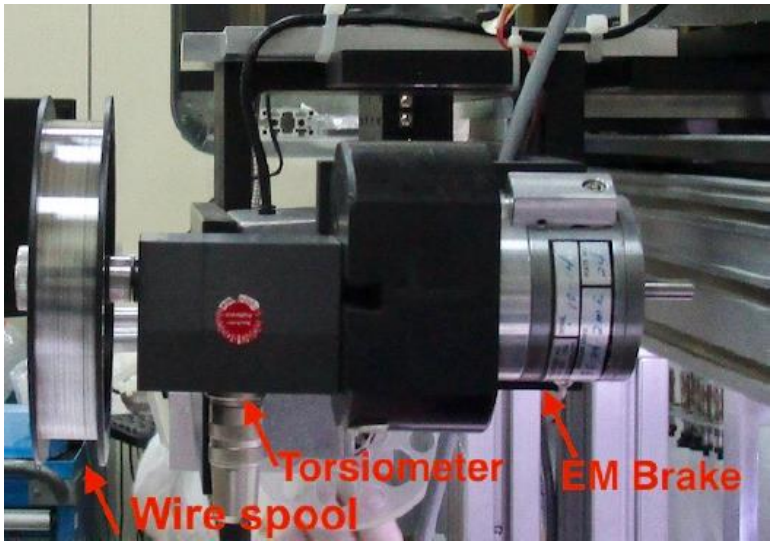


Figura 54 Sistema distribuzione filo

Il torsiometro (ETH messtechnik DRFL) è necessario per ottenere un ulteriore controllo della tensione meccanica applicata al filo, mentre la frizione elettromagnetica (Magtrol HCF-8M) coassiale alla spola di filo-torsiometro viene utilizzata per impostare la

tensione meccanica al filo attraverso un sistema di feedback con il torsiometro collegato al cilindro.
Il Torsiometro DRFL fornisce una tensione come segnale di uscita compreso tra 0 V e 10 V proporzionali alla coppia nell'intervallo 0-0,5 Nm. L'uscita del torsiometro è collegata sistema DAQ che verrà descritto in seguito.
La frizione HCF-8M è controllata in corrente grazie ad un sistema di alimentazione Magtrol 5210 ed è collegata e controllata direttamente dal sistema DAQ con un segnale di tensione. La Figura 55 mostra la curva di calibrazione per il freno elettromagnetico, evidenziando la presenza di isteresi durante la fase di attivazione, rilascio e riattivazione.

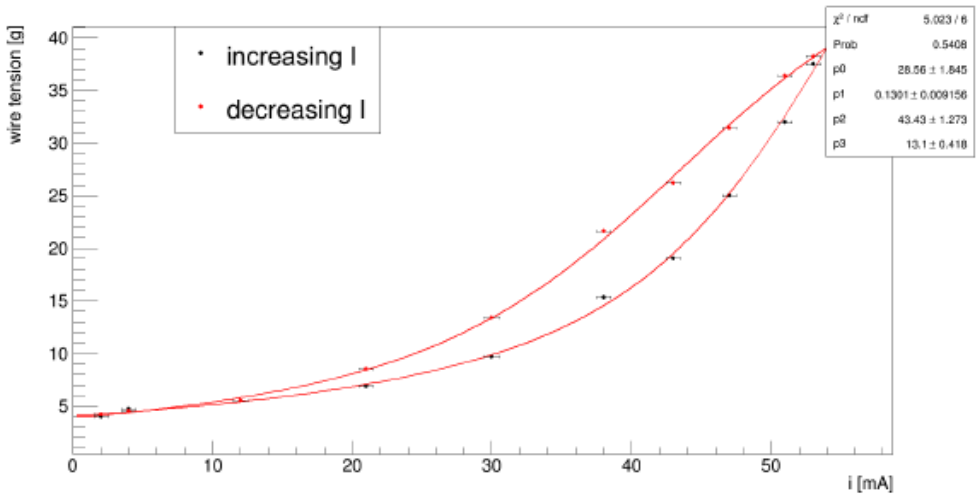


Figura 55 Curva di calibrazione freno elettromagnetico

Il filo della bobina passa attraverso un sistema di pulegge connesse ad una cella di carico. Tale sistema è necessario per misurare la tensione del filo durante la fase di filatura. Uno dei grossi problemi che ha investito, nella fase di realizzazione del robot, il team di ingegneri è quello della non uniformità di tensione del filo dovuta alla rotazione sbilanciata del cilindro. Infatti facendo ruotare un cilindro di 660mm di diametro e 300mm di lunghezza sul quale è stata ricavata una sede per alloggiare la maschera di posizionamento delle PCBs genera uno sbilanciamento dello stesso durante un'evoluzione completa e di conseguenza una distribuzione di tensione non uniforme del filo.
Per compensare l'effetto di tale sbilanciamento sono stati aggiunti alcuni pesi all'interno della due raggiere del cilindro valutando opportunamente le oscillazioni con un torsiometro (MAGTROL TM300) montato sull'asse del cilindro. La Figura 56 mostra la curva di calibrazione del torsiometro e la Figura 57 rappresenta la coppia rispetto alla fase di rotazione del cilindro, rilevando uno squilibrio di circa ± 90 g con un offset di 30g. Nella figura 58 si nota l'equilibriatura fatta al cilindro grazie all'apporto dei pesi calibrati nei punti indicati dal torsiometro.

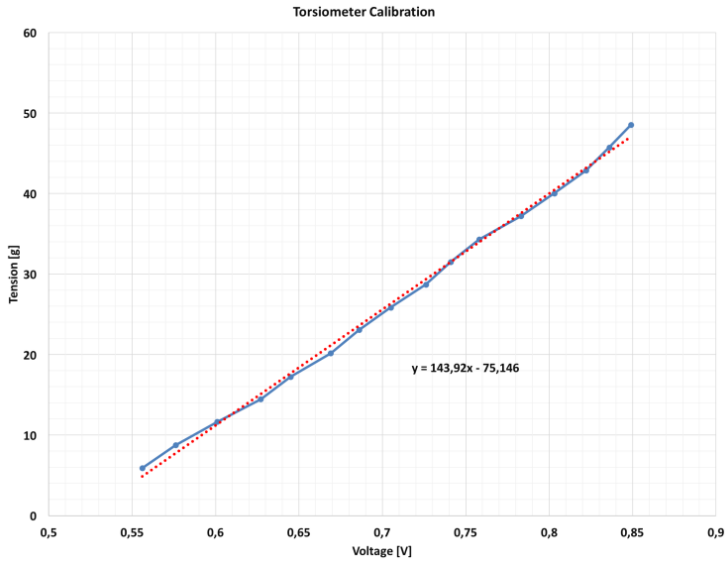


Figura 56 Curva di Calibrazione del Torsiometro

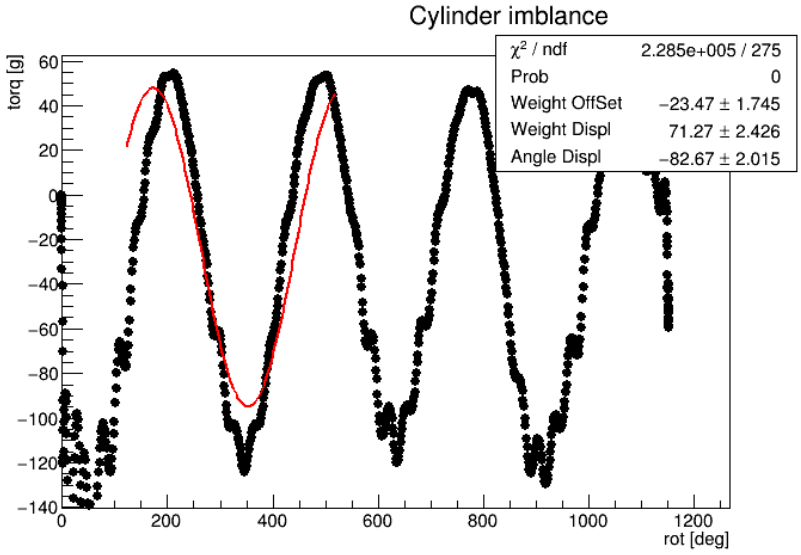
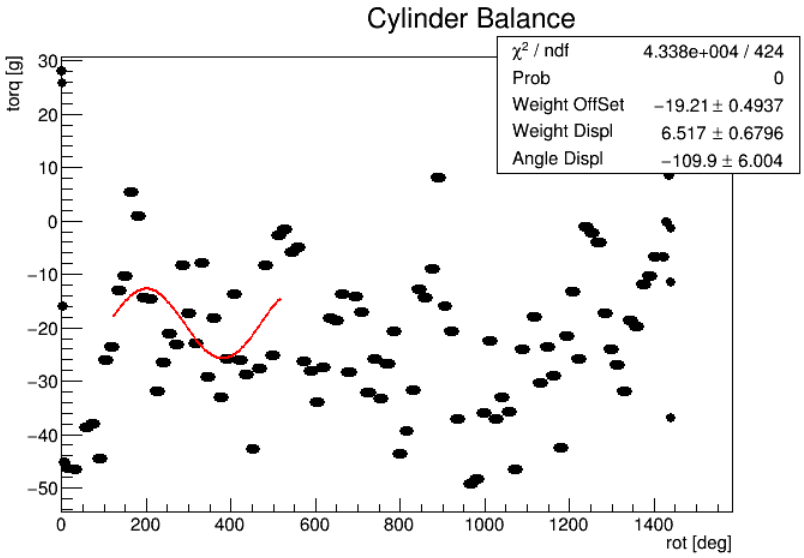


Figura 57 Risposta Torsiometro-Posizione angolare del cilindro senza bilanciamento



Risposta 58 Torsiometro-Posizione angolare del cilindro con bilanciamento

Il sistema di pulegge guida il filo dalla bobina del filo al cilindro rotante, ed è progettato in modo da indirizzare il filo con la massima cura ed attenzione evitando piegature brusche che potrebbero danneggiare il filo stesso. Consiste di 6 pulegge realizzate in policarbonato e montate su cuscinetti a sfera (Fig.59). Tre di queste, con diametro da 100 mm, sono utilizzate per il Robot di filatura e servono esclusivamente come guida per il filo, le altre tre sono invece utilizzate per misurare la tensione meccanica del filo durante la filatura.

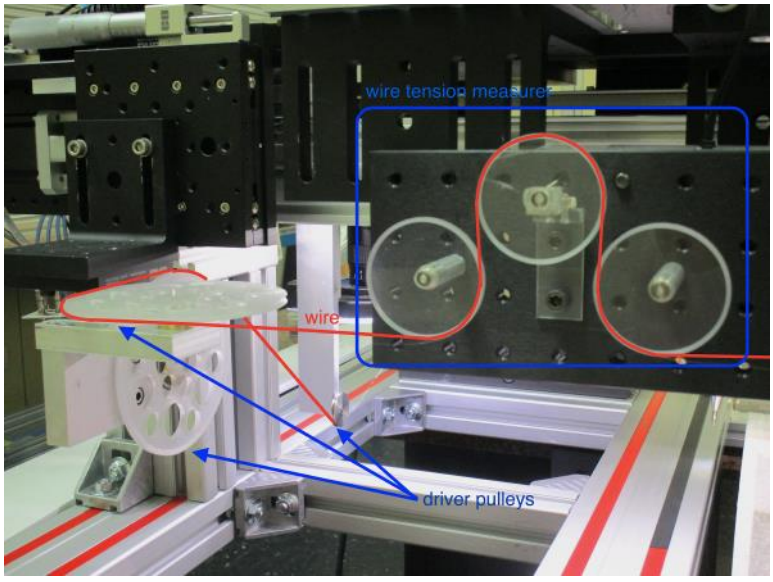


Figura 59 Sistema controllo tensione e guida filo

La misura della tensione si effettua leggendo la puleggia centrale che è calettata su una cella di carico (Micro Load Cell) con range da 0 g a 100 g e sensibilità di 50 mg. Il segnale di uscita è collegato grazie ad un circuito con ponte di Wheatstone ed amplificatore (Phidgets 1046) al sistema DAQ. La fotocamera digitale PIXELINK PL-B776 controlla l'allineamento del filo durante tutta la fase di filatura (Fig.60).

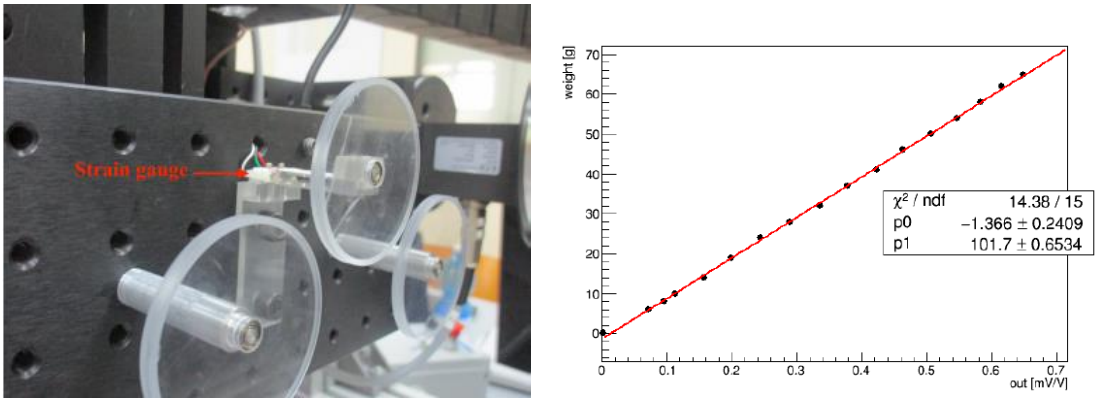


Figura 60 Sistema pulegge per controllo tensione filo e relativa curva di calibrazione

La tensione del filo è controllata da un sistema di feedback implementato nel sistema DAQ, utilizzando il freno elettromagnetico e la cella di carico.
Come si può vedere in Figura 60, la puleggia centrale e collegata alla cella di carico ed è allineata con le altre due pulegge quindi, così facendo si misura il doppio del valore della tensione del filo. Durante la fase di filatura, il sistema DAQ acquisisce, ad una velocità di 24 misure / ms, la misura della tensione meccanica del filo ed esegue un livellamento utilizzando una media mobile del filtro ogni 100 campioni, corrispondenti a 0,5 mm di filo svolto alla velocità di filatura di 12,5 cm/s. Per garantire una tensione del filo costante su un piano di filatura da 16 o 32 fili, viene aggiunto un ulteriore filo necessario a compensare la fase di accelerazione del cilindro rotante prima di raggiungere un valore stabile di tensione ed uno durante la decelerazione al completamento della fase di filatura.
Il sistema DAQ imposta inizialmente la tensione sul freno elettromagnetico con un'interpolazione “spline” della curva crescente mostrata in Figura 61.

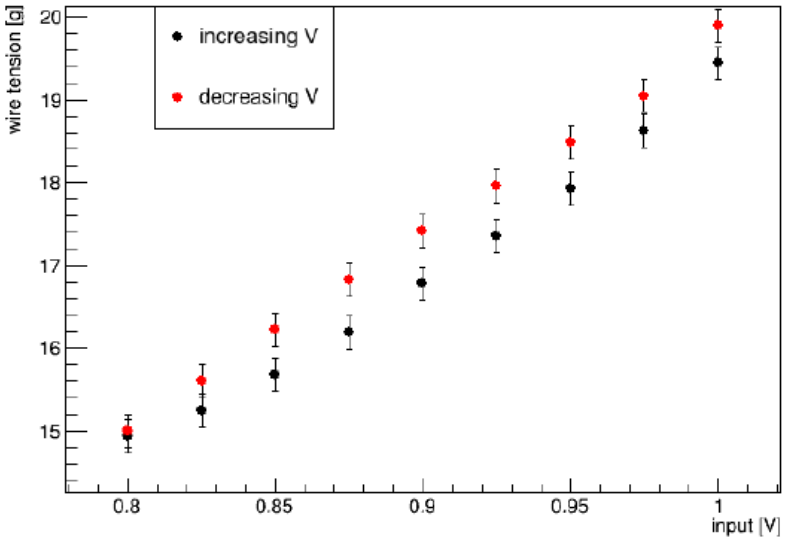
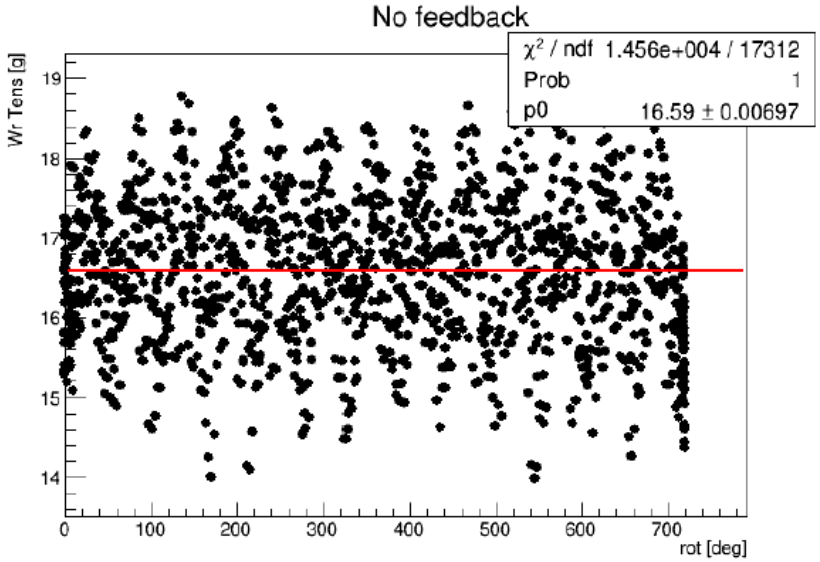


Figura 61 Curva usata per il feedback tra freno e cella di carico

Nel momento in cui il cilindro raggiunge la velocità costante e la tensione meccanica del filo è al valore impostato, il sistema di retroazione legge la tensione del filo attraverso l'estensimetro e confronta tale valore con quello della tensione di set-point. La correzione del feedback viene applicata interpolando i set di record di dati mostrati in figura 61 dove i punti rossi implicano una diminuzione della tensione del filo ed i punti neri implicano un aumento.
Nella figure successive (Fig.62) è riportata la tensione meccanica del filo senza correzione del feedback (prima figura), con una tensione di frenatura fissa (centrale) e con la retroazione attivata (ultima immagine in basso).



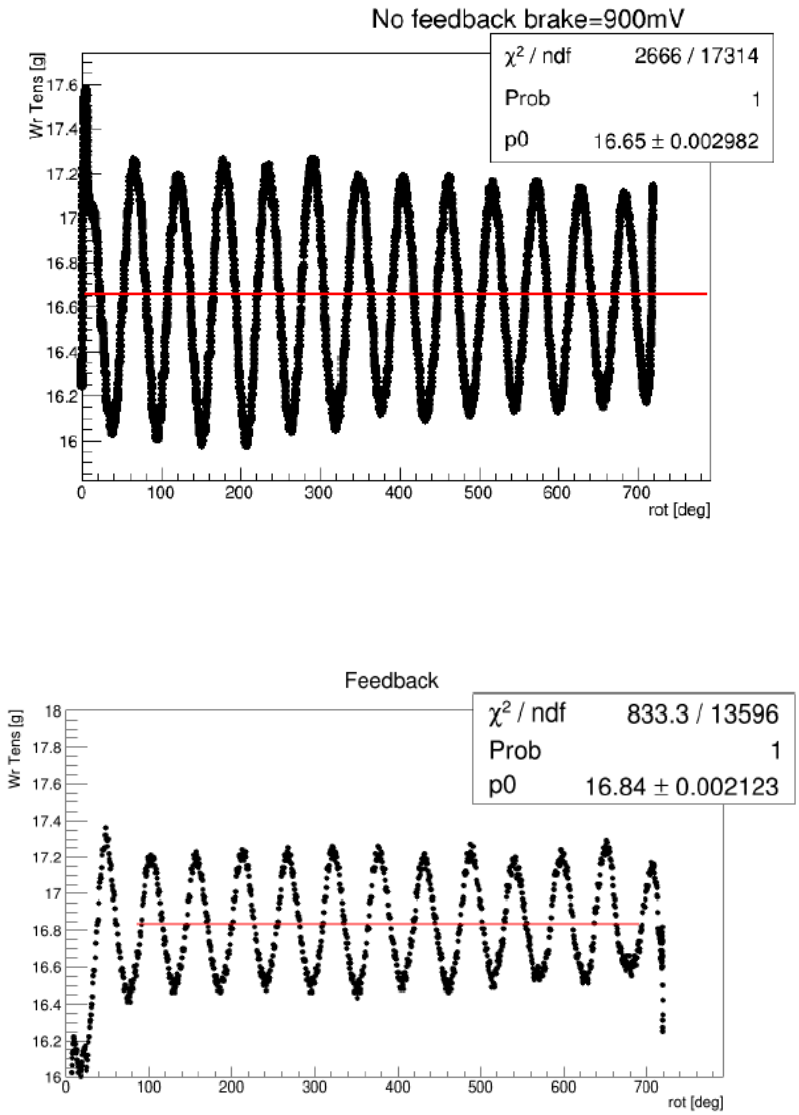


Figura 62 Tensione meccanica del filo senza feedback (foto in alto), con freno e tensione fissa (foto al centro) e con feedback attivo (foto in basso)

Dalla figura 62 è evidente che risulta da correggere un'oscillazione residua di ± 0,35 g rispetto ad un valore fisso di 16,8 g. Il numero di oscillazioni in un giro completo del cilindro indica un periodo di circa 30 cm sul filo, suggerendo che queste ultime possono essere dovute a causa di un fuori centro della bobina di filo, il cui diametro è di circa 10 cm. Tuttavia, la differenza sistematica nella tensione tra due fili adiacenti può essere al massimo una oscillazione su 7, quindi: 0,35 g / 7 = 0,005 g.

Completata la filatura delle PCB si procede nel vincolare in modo permanente e sicuro il filo saldandolo rispettivamente su entrambe le pad. La saldatura avviene quando il filo è ancora sotto tensione meccanica ed è ben vincolato attorno al cilindro, ed è realizzata utilizzando un sistema di saldatura laser IR (LASCON Hybrid with a solder wire feeder) costituito da un sistema automatico di alimentazione del filo di stagno necessario per la saldatura, un laser a infrarossi con potenza pari a 68 W, un pirometro per la misura della temperatura relativa ed una fotocamera digitale, come mostrato in Figura 63.

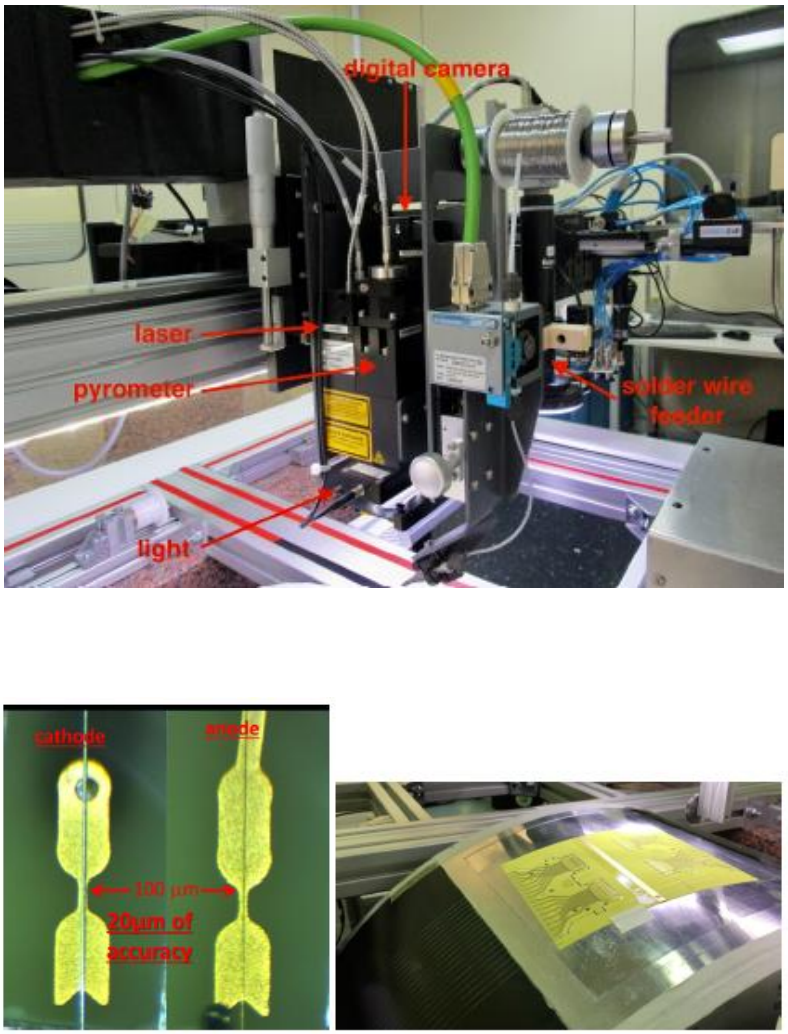


Figura 63 Sistema saldatura Laser

Le funzioni della fotocamera digitale (Fig.64) e del pirometro sono rispettivamente di monitorare in tempo reale le operazioni relative alla saldatura (posizionamento corretto sulla pad, distanza dalla PCB, menisco della saldatura, inclusione corretta del filo, ecc) mentre quella del pirometro è di controllare perfettamente la temperatura di saldatura onde evitare saldature "fredde".

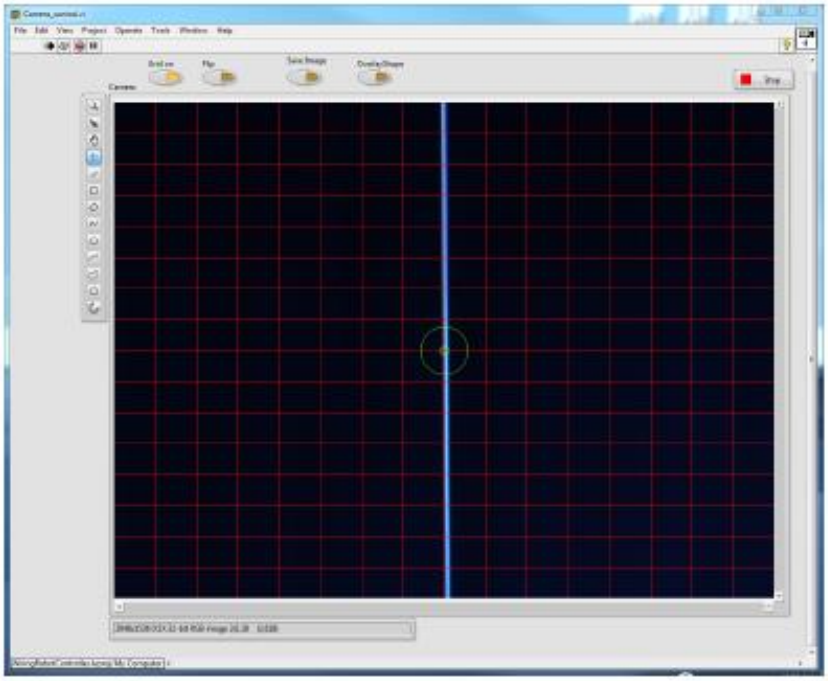


Figura 64 Posizione del filo rilevato dalla fotocamera digitale

La movimentazione e tutte le operazioni riguardanti il sistema di saldatura sono gestite e controllate dal DAQ ed in particolar modo è opportuno osservare che sistema laser e sistema di posizionamento cilindro-asse principale sono in perfetto sincronismo grazie ad un programma sviluppato in LABVIEW (fig.65).

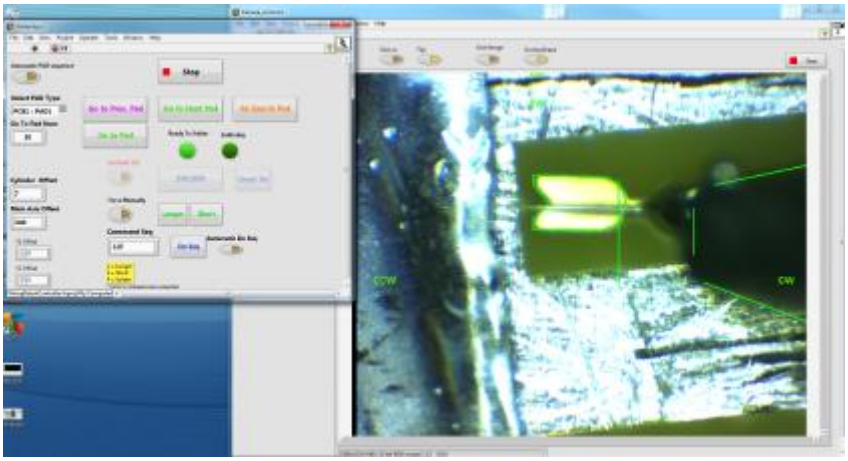


Figura 65 Settaggio dei parametri di saldatura

I parametri di saldatura (temperatura, tempo di saldatura, lunghezza del filo di saldatura e velocità di alimentazione) sono definiti in modo preciso nell'ottica di preservare accuratamente l'integrità del filo. In particolar modo, come già opportunamente descritto nel capitolo precedente, la temperatura di saldatura riveste un ruolo di fondamentale importanza. Il filo di stagno utilizzato è a basso punto di fusione (160°C) in modo da evitare sia l'evaporazione dello strato Ag/Au ma anche per ridurre "l'outgassing" che sarebbe altresì dannoso alla camera durante la presa dati. Tale script è rigorosamente inserito in Labview come mostrato in figura 66.

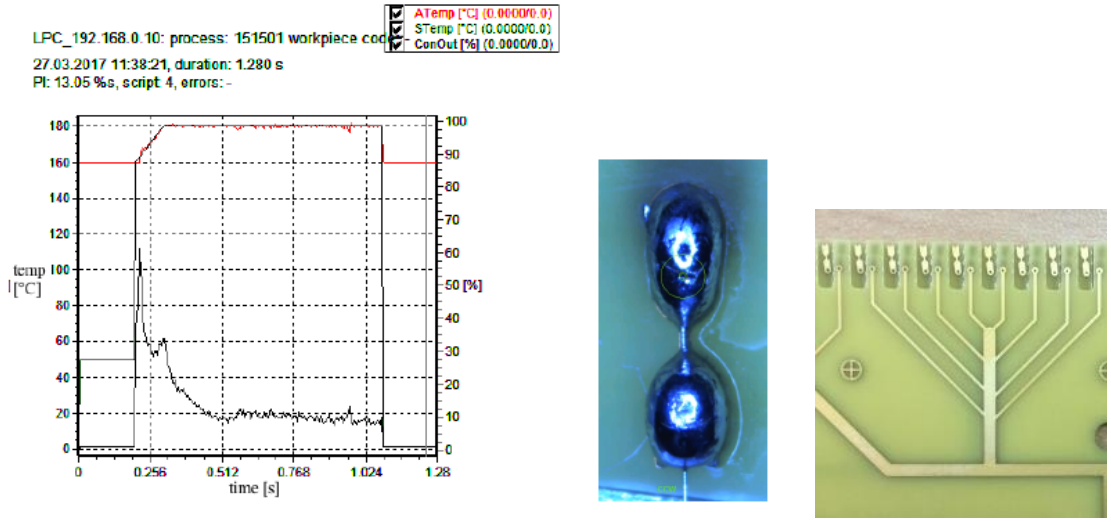


Figura 66 Temperatura dello spot di saldatuta (linea rossa), valore in temperature del pirometro (linea verde) e menisco della saldatura relativo alla pad del PCB

Completata la fase di saldatura e rimozione del filo "madre", si procede ad estrarre le PCB complete di filo dal cilindro tramite il sistema di estrazione (Fig.67).

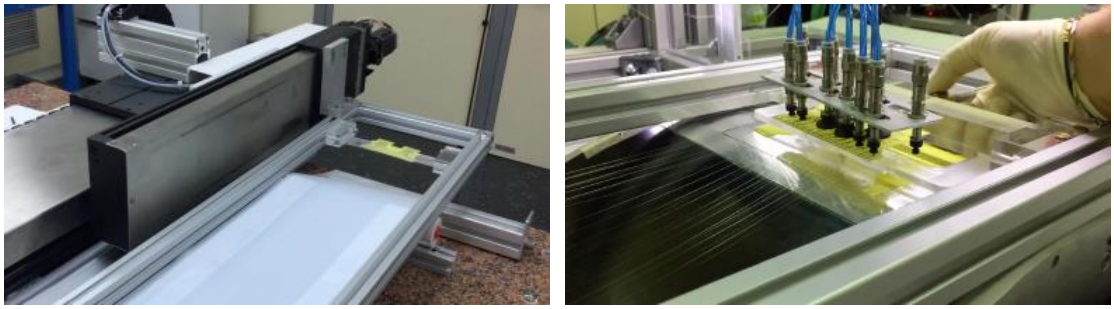


Figura 67 Fase di estrazione del vassoio fili

Il sistema di estrazione consente di aprire le PCB complete di tutti i fili, detensionando questi ultimi i quali sono disposti attorno al cilindro. Il sistema di estrazione, Figura 68 è costituito da:

• un attuatore lineare (Zaber T-LA60);
• un sistema di rotazione piastra ventose (PI C-663);
• una piastra con ventose;
• un sistema per vuoto (SMC ZK2);
• un asse lineare;

L'attuatore lineare ed il sistema di rotazione della piastra contenente tutte le ventose servono per posizionare perfettamente il modulo delle ventose sul PCB. Un sistema da vuoto assicura la presa ed il rilascio della PCB durante lo spostamento dal cilindro al frame di trasporto. Tutta l'operazione è perfettamente sincronizzata al fine di evitare possibili collisioni ma soprattutto sempre in funzione di preservare al massimo l'integrità del vassoio appena filato. La procedura consiste quindi nel sollevare e posizionare sul frame di trasporto la prima PCB, sincronizzare il cilindro di filatura con la movimentazione della struttura di trasporto contenente quindi la PCB al fine di srotolare completamente i fili e posizionare la seconda PCB sul frame. Un sistema meccanico permette successivamente di tensionare a valori nominali i fili prima della sigillatura del frame.

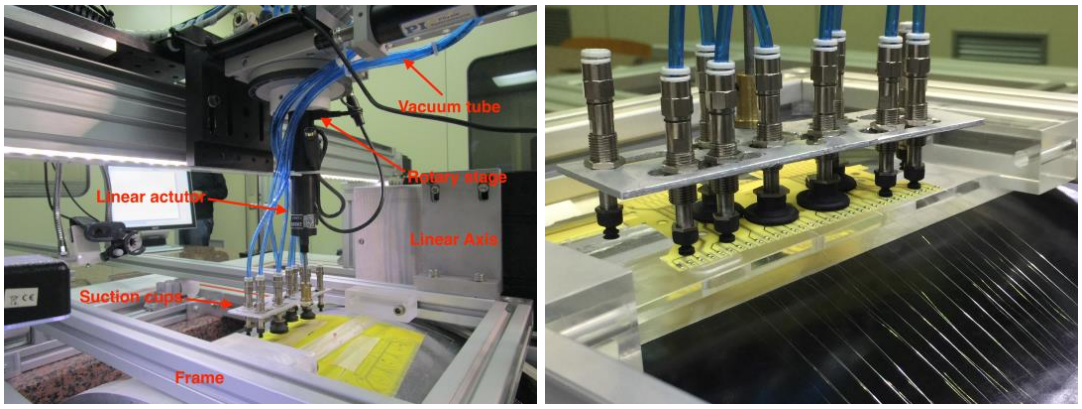


Figura 68 Sistema di estrazione – Robot di filatura

Il sistema DAQ permette di sincronizzare accuratamente tutti i sistemi descritti appena descritti. E' composto da un controller della National Instrument che, in tempo reale, grazie diversi moduli aggiuntivi e contestualmente con apporto di LabVIEW eseguono questo compito. I sistema si può sostanzialmente suddividere in due sottosistemi correlati tra loro: DAQ Hardware e DAQ Software.
L'hardware del sistema DAQ, Figura 69, è il PowerPC in Real Time Controller NI cRIO-9024® e la struttura di supporto NI cRIO-9112® che fisicamente e grazie a delle

porte parallele permette la comunicazione tra i moduli aggiuntivi. I moduli aggiuntivi sono:

• 4 interfaccia NI 9512® Axis Stepper Drive;
• 1 ingresso analogico di tensione / corrente NI 9207® con risoluzione a 24 bit;
• 1 NI 9264® Tensione di uscita analogica 1 NI 9381® Modulo I / O multifunzione;

Questi moduli sono utilizzati per collegare i diversi elementi che costituiscono la fase della filatura, inoltre i moduli NI 9512® sono utilizzati per controllare i vari assi (asse principale e asse di estrazione) e cilindro rotante. I moduli I / O sono usati per inviare comandi al sistema di saldatura, per leggere il torsiometro, per impostare la tensione al freno elettromagnetico, per attivare le ventose a vuoto.

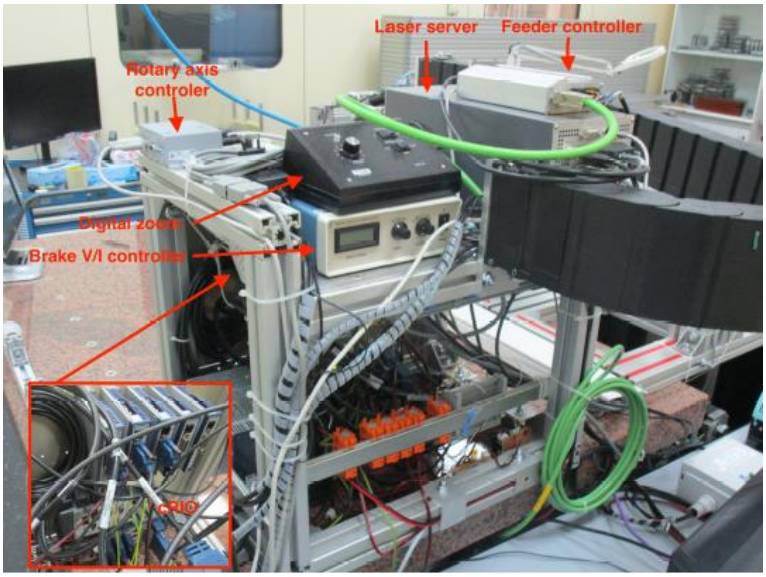


Figura 69 DAQ (Data Acquisition)

Il sistema di saldatura ha un proprio server di gestione, a cui il cRIO e il PC sono collegati, rispettivamente, con moduli aggiuntivi e cavo ethernet (Fig.70). Appena si avvia il sistema, il server laser esegue la calibrazione e comunica con il controller in modo da impostare i parametri. Tutti gli altri elementi (attuatore lineare, piastra rotante delle ventose, attuatore lineare e fotocamere digitali) sono direttamente collegati al PC di controllo ed il tutto è sincronizzato grazie a LabVIEW.

Figura 70 cRIO controller completo di moduli

La parte del software del DAQ è sviluppato interamente in LabVIEW®. Per eseguire la corretta sincronizzazione dei vari elementi abbiamo utilizzato dei moduli specifici sviluppati dalla National Instrument come NI SoftMotion® per la gestione dei movimenti o NI Vision® per la gestione delle due fotocamere digitali.
La Figura 71 mostra la schermata principale del software per la gestione dei movimenti determinati dall'operatore e le diverse fasi per avvolgere una coppia di PCB.

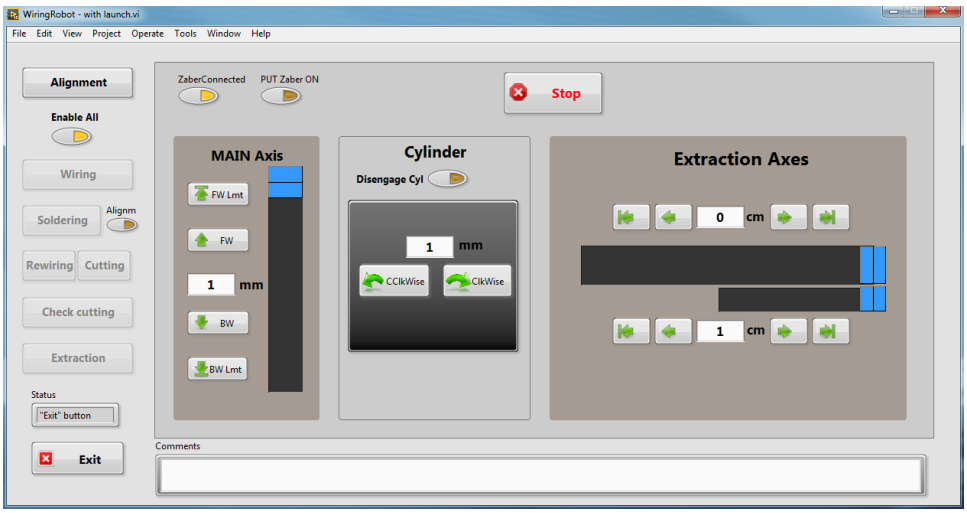


Figura 71 Pannello principale

All'avvio del software, è richiesto l'input, per quanto riguarda il tipo di layer ed altre informazioni, come mostrato nella Figura 72. Il software esegue alcuni SQL necessaria ad eseguire una query sul database di filatura in modo da ottenere tutti i parametri relativi a: layers, informazioni sugli operatori, tipologia del filo e pitch da eseguire.

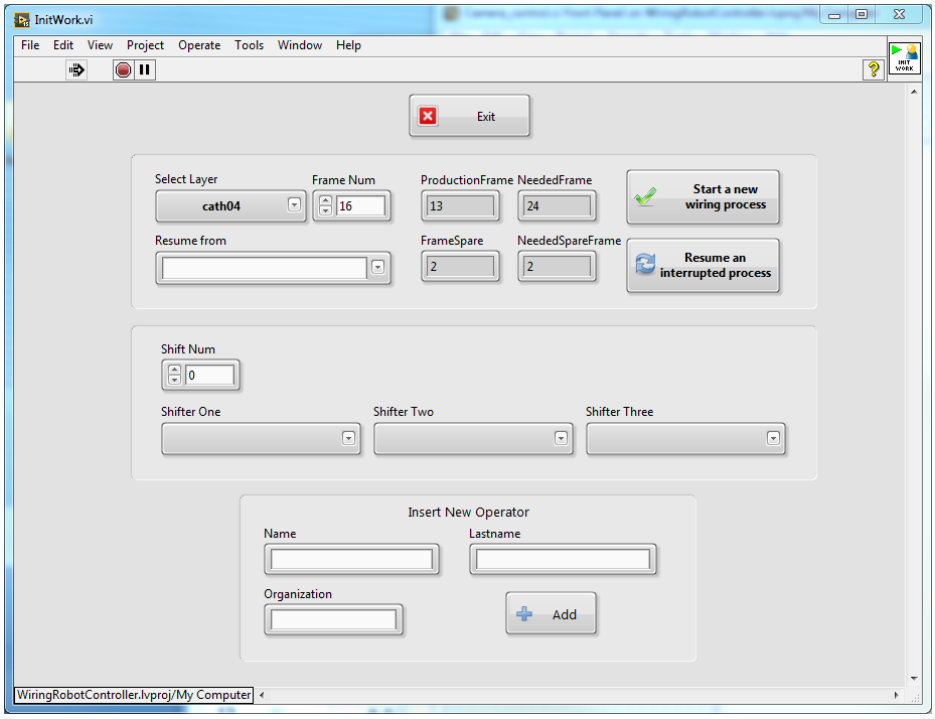


Figura 72 DAQ software

Gli operatori spostano il sistema di filatura in posizione di avvio in modo che il software possa calcolare le posizioni di tutti le pad relative alla PCB. Nella Figura 73 e Figura 74 vi sono le interfacce grafiche per la gestione della saldatura e per il sistema di estrazione del vassoio filato.

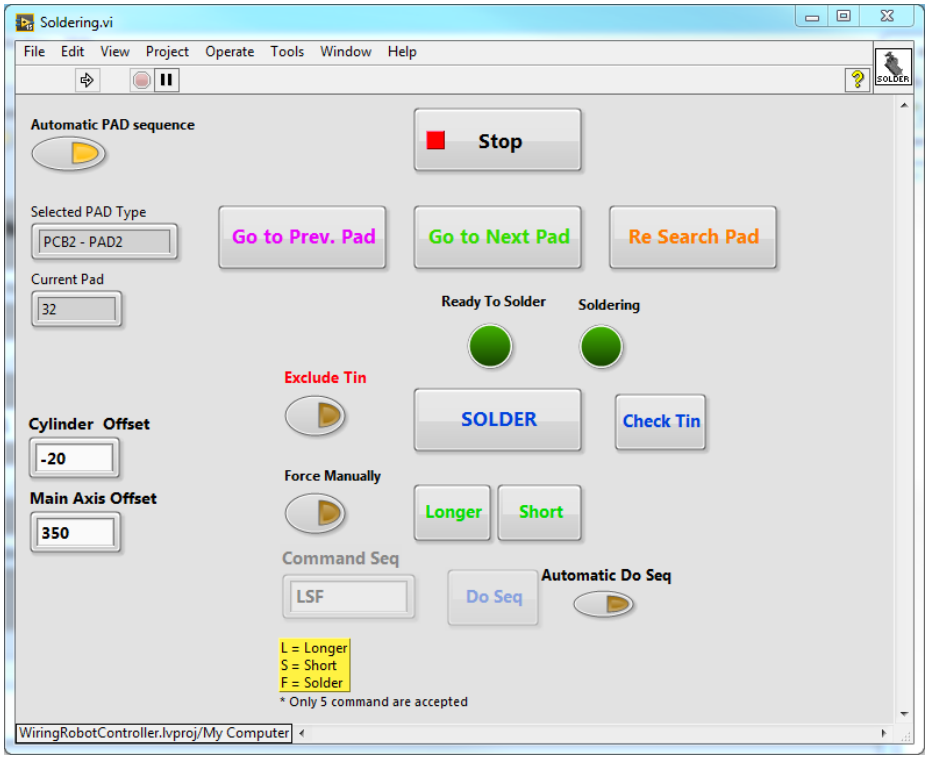


Figura 73 pannello relativo alla fase di saldatura

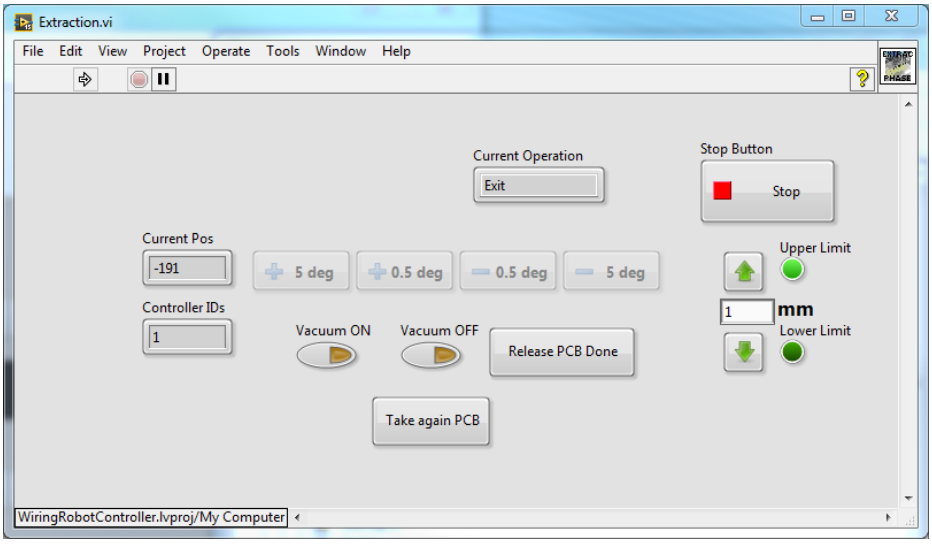


Figura 74 Pannello relativo alla fase di estrazione del vassoio filato

Dopo aver eseguito l'estrazione estrazione e dopo aver ricevuto la conferma da parte dell'operatore che il piano multi-wire è accettato, il software aggiorna i dati nel Database (DB) con tutte le informazioni sul vassoio prodotto includendo opportunamente i grafici della tensione meccanica della filettatura. In figura 75 si può osservare il diagramma Entità /Relazione (E / R) del DB con le varie finestre.

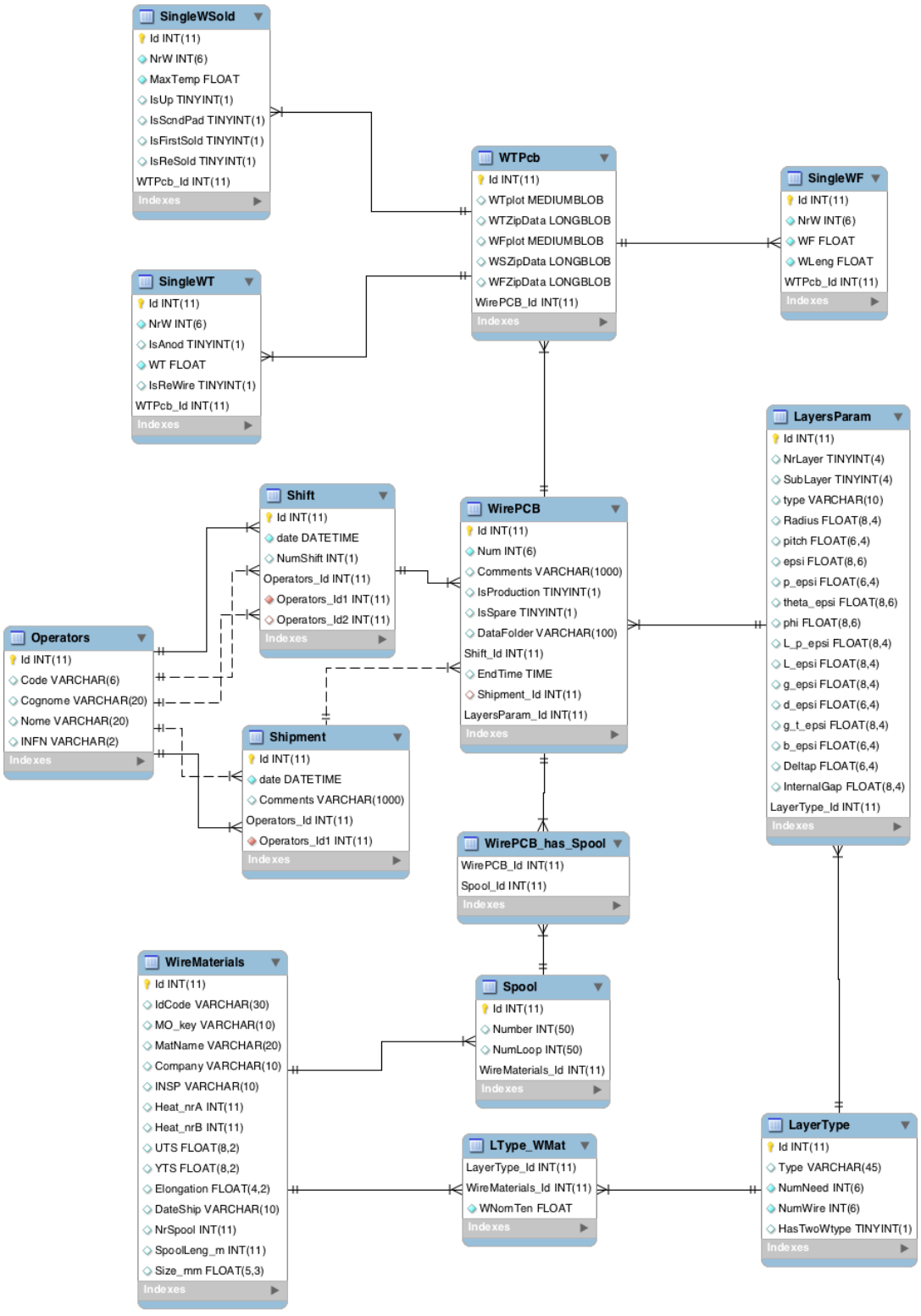


Figura 75 Diagramma E/R del Database

3.3.3 Fase Operativa

Operativamente, le fasi appena descritte vengono classificate in:

1. Fase della saldatura;
2. Fase della taglio del filo;
3. Fase dell'estrazione del vassoi completo;

Durante la fase della saldatura si posiziona una striscia di mylar nella zona adiacente le pad per proteggere i fili da possibili spruzzi di flussante o microsfere di stagno, come mostrato in Figura 76.

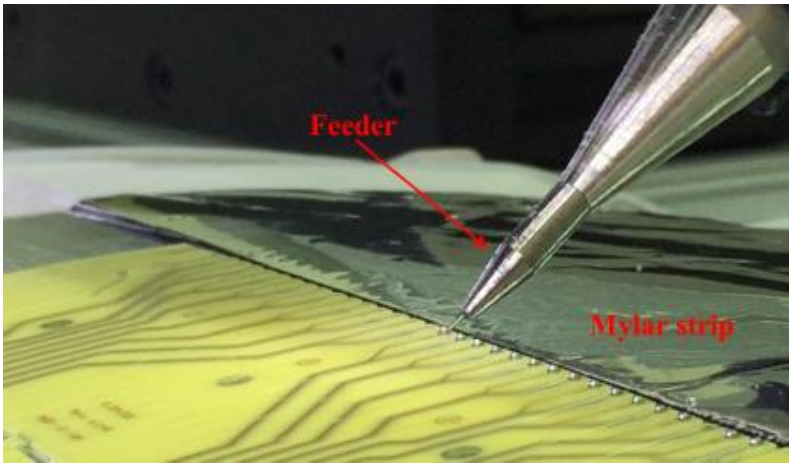


Figura 76 Posizionamento del foglio di mylar prima della saldatura

Completata la saldatura dei fili sulle PCB si passa al taglio dei fili disposti su ciascuna pad. Il filo viene tagliato sul bordo delle piazzole di saldatura e gli operatori controllano, grazie alla fotocamera digitale che nessuna parte del filo sporga dalla pad. La fase di taglio è l'unica operazione completamente manuale eseguita durante il processo di filatura. Completato il taglio dei fili si procede ad aprire il vassoio multifilo dal cilindro rotante con un'operazione manuale di distacco delle PCB dal frame di posizionamento. (Figura 77).

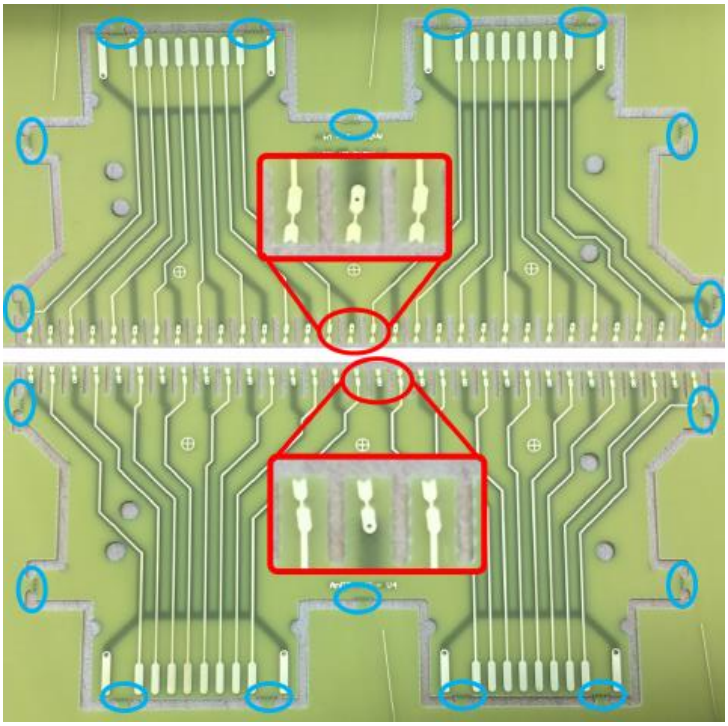
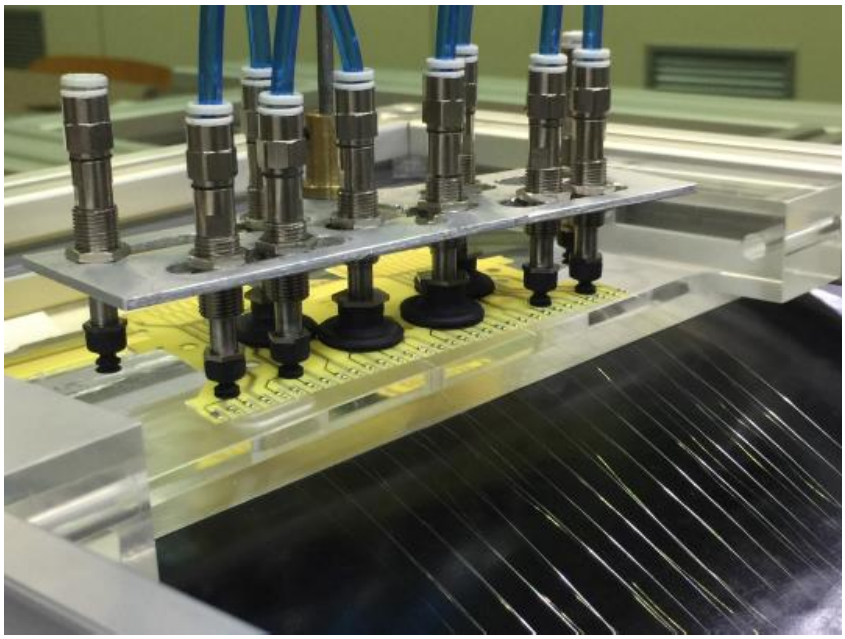


Figura 77 Zone di distacco delle PCB dal frame di posizionamento iniziale

La PCB del filo UP viene quindi sollevata dal cilindro rotante con l'attuatore lineare collegato al set di ventose aspiranti (Figura 78-Top) e posizionato sul supporto fisso del telaio di trasporto (Figura 78-Bottom).



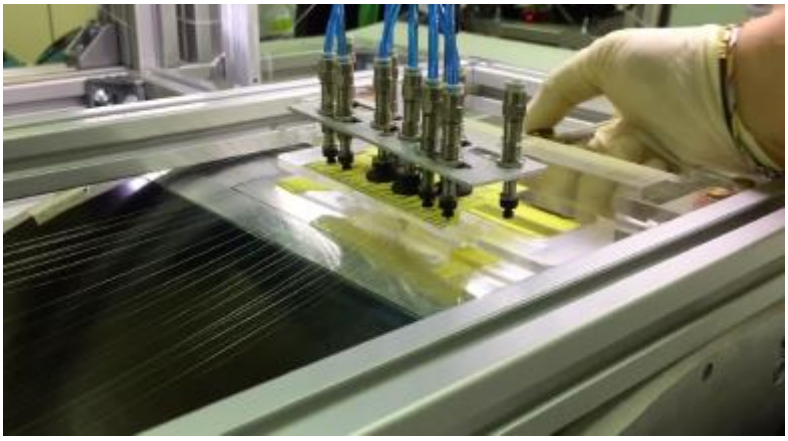


Figura 78 Fase di sollevamento della prima PCB (Top), fase di sollevamento e posizionamento sul frame di trasporto della seconda PCB (Bottom).

L'apertura del vassoio di fili è assicurata sincronizzando la rotazione del cilindro con lo spostamento lineare del telaio. Una volta che il piano multifilo è completamente aperto si procede a sollevare il primo PCB dal cilindro, posizionandolo sul frame in alluminio di trasporto. Utilizzando esattamente la stessa procedura si assicura, sempre sul telaio di trasporto, anche il secondo PCB. Il telaio viene quindi rimosso dal sistema di estrazione ed il piano multifilo viene sottoposto alla fase di ispezione e certificazione. Completata la certificazione di 39 vassoi di fili si procede al trasporto presso la sezione INFN di Pisa. Il trasporto di 39 vassoi, cioè tre blocchi da 13, avviene grazie ad un sistema di movimentazione ed impacchettamento realizzato prima della movimentazione effettiva dalla Clean Room. Le tre torri di vassoi sono avvolte in una busta saldata ermeticamente e gonfiata con elio a 0,3 bar per evitare possibili contaminazioni con l'ambiente esterno. All'interno di ogni blocco di fili sono inseriti dei sensori di umidità e temperatura collegati in wireless ad un sistema centrale che ne monitora continuamente i valori di umidità relativa e temperatura durante il trasporto e lo stoccaggio in laboratorio a Pisa (Fig.79).

Figura 79 Impacchettamento e trasporto

3.3.4 Controllo di qualità

La sezione di particolare importanza nella fase subito dopo la produzione è la sezione relativa alla certificazione dei piani multifilo appena prodotti. Il controllo sulla qualità viene eseguito in base ai seguenti passaggi:

- Ispezione visiva per rimuovere eventuale presenza di microparticelle attratte elettrostaticamente dai fili;
- Test di stress eseguito con 10 cicli di allungamento fino a 1 mm sopra il valore nominale della lunghezza del filo teso. Il test è eseguito con un encoder lineare ottico ed induce la rottura di possibili fili danneggiati all'intero piano multifilo;
- Misurare la tensione meccanica del filo con il metodo che descriveremo di seguito;

Il primo step di fondamentale importanza nella classificazione di un vassoio di fili è la misura della tensione meccanica in funzione della lunghezza nominale del singolo filo. Tale misura viene eseguita con il metodo dell'oscillazione di risonanza indotta sui fili al passaggio di un impulso elettrico con frequenza nota. Analiticamente la frequenza di risonanza nominale di un filo è dato da:

$$f = \frac{1}{2L}\sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

$$\mu = \pi r^2 \rho$$

dove L è la lunghezza, T è la tensione, μ è la densità lineare, ρ è la densità del volume ed r è il raggio del filo.
Il sistema da noi sviluppato, Figura 80, permette di misurare la variazione della capacità Cww tra due fili adiacenti:

$$C_{ww} = \frac{2\pi\varepsilon}{\ln\left(\frac{4H}{d}\right)}$$

$$|\delta f| \approx \frac{C_{ww}}{4\pi C\sqrt{LC}} \frac{\frac{2}{3}}{\ln\left(\frac{2H}{d}\right)} \frac{dH}{H}$$

dove ε è costante dielettrica, H è la distanza tra i fili, d è il diametro del filo, L e C sono l'induttanza e la capacità del circuito risonante LC ed f è la variazione di frequenza.

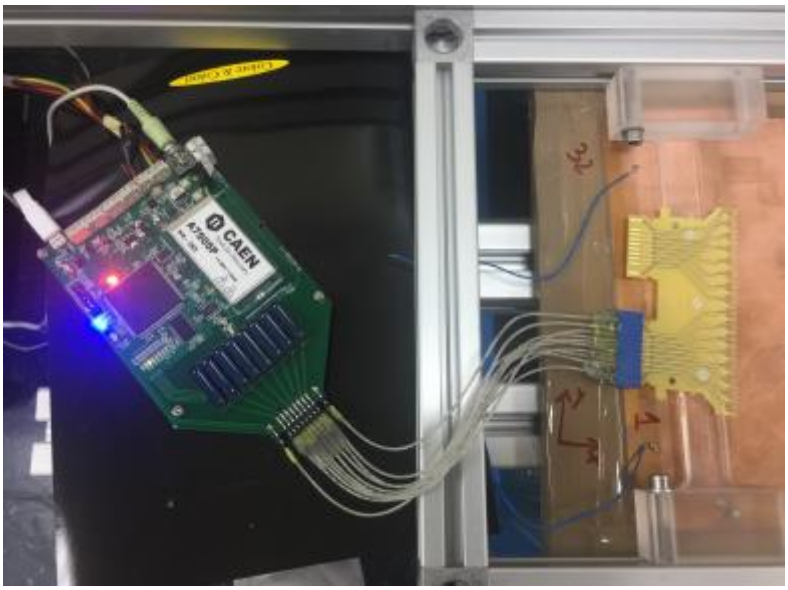


Figura 80 Sistema di misura della tensione dei fili

Un segnale HV sinusoidale applicato tra i due fili induce oscillazioni che causano una variazione della capacità reciproca, la cui misura, in funzione della frequenza del segnale HV indotto, mostra la caratteristica forma di risonanza.
In Figura 82 è evidenziata la frequenza di oscillazione di risonanza per una lunghezza fissa del piano multifilo (figura in alto) e le curve misurate tra due fili esterni, lunghezza del filo vs (f [Hz])^2, di un PCB multifilo: tipologia catodo (figura in basso). Le due curve non si sovrappongono a causa di un piccolo angolo tra i due fili del PCB posti sul telaio di trasporto. In particolar modo, in Figura 83, si evidenziano le curve con la lunghezza del filo in funzione della tensione meccanica del filo stesso. La linea in rosso tratteggiato indica il punto di funzionamento dei fili di campo : Al 40 µm , L = 1925.774, tensione T = 19,2 g. Nella tabella di figura 81 sono riportati i valori della frequenza di risonanza in funzione della diversa tipologia di fili analizzati:

Wire	μ (10^{-6}g/m)	T (g)	f (Hz)
50 μm Al (Ag)	6.53	29.64	54.74
40 μm Al (Ag)	4.38	19.25	53.83
20 μm W (Au)	6.04	24.51	51.74

Figura 81 Classificazione delle diverse tipologie di filo in funzione della frequenza di risonanza

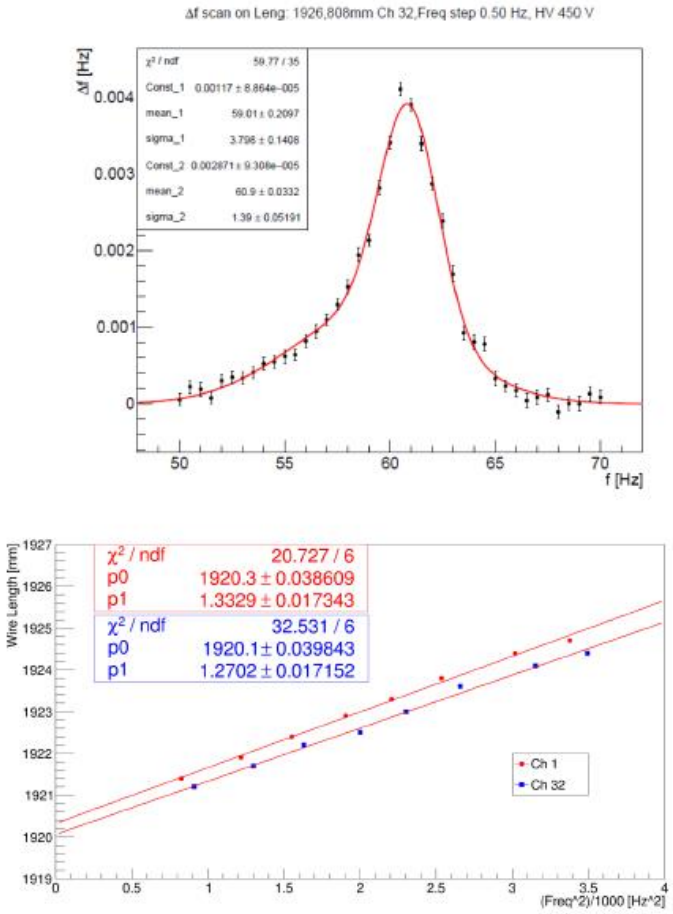


Figura 82 Scan della frequenza in funzione della lunghezza del filo (figura in alto). Lunghezza del filo in funzione di (*f*[*Hz*])^2 tipologia : cathode multi-wire plane.

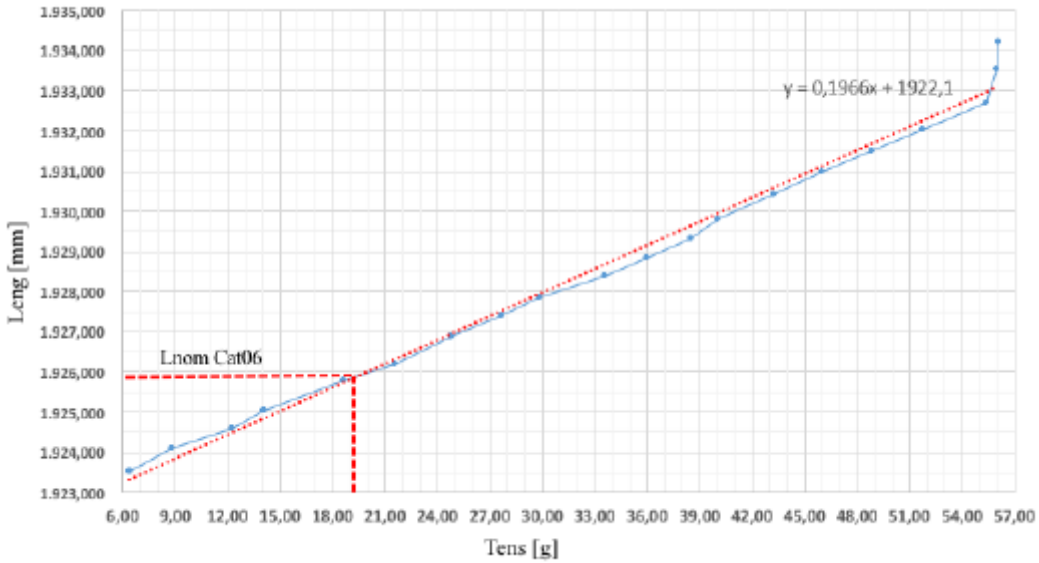


Figura 83 Lunghezza del filo in funzione della tensione meccanica

3.3.5 Assemblaggio presso la sezione INFN di Pisa

L’assemblaggio della camera a fili avviene operativamente presso la sezione INFN di Pisa. I vassoi di PCB multi-filo vengono estratti dalla struttura di trasporto (Fig.84) seguendo una procedura ben collaudata in modo da evitare possibili tensioni nelle zone prossime alla saldatura dei fili. Tutto l’iter di posizionamento sugli endplates è costantemente monitorato e valutato dimensionalmente con una macchiana di misura 3D (DEA) in Clean Room.

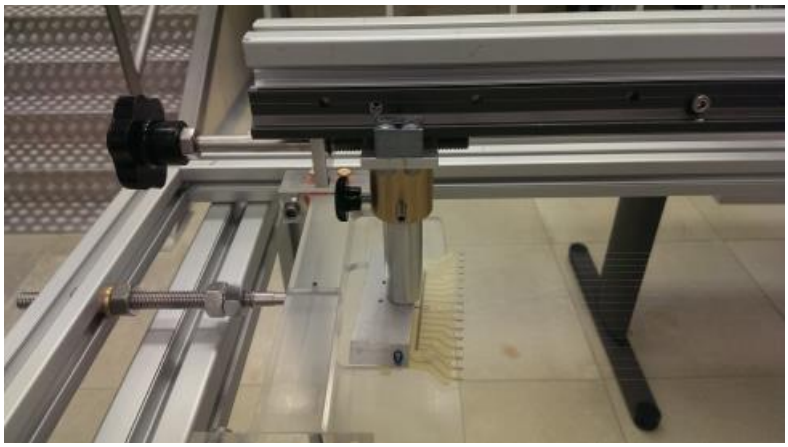


Figura 84 Sistema di estrazione e movimentazione di un PCB multifilo

Il tastatore di tale macchina consente di valutare una precisione di posizionamento di 20 μm nel piano orizzontale e 40 μm sull'asse verticale rilevato attraverso il fiduciale presente sui PCB multifilo.
Un ultimo collaudo dei PCB multifilo è previsto nella fase immediatamente prima dell’inserimento sugli endplates. Consiste sostanzialmente in un ciclo ripetuto di allungamento del 25% della tensione nominale dei fili con un controllo della tensione dei fili in cui le oscillazioni di ogni singolo filo sono indotte da un bombardamento di onde acustiche, effettuate con degli altoparlanti, direttamente sui fili sotto tensione elettrica.
Superato quest’ultimo test si procede all’inserimento del piano PCB multifilo sugli endplates della camera come mostrato in Figura 85.

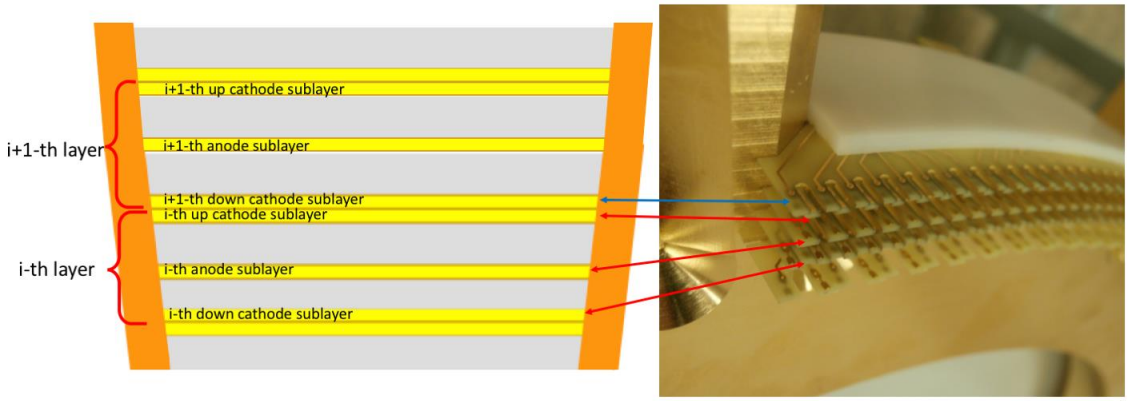


Figura 85 Posizionamento del PCB multifilo su endplate

Durante la fase inserimento del PCB multifilo, i due endplates vengono spostati in avanti riducendo la loro distanza nominale. Tale prassi è utile per agevolare la corretta posizione dei PCB e per evitare possibili sovratensioni ai fili.
Il posizionamento finale è guidato a mano ed i PCB di multifilo vengono incollati su degli appositi distanziali in PEEK realizzati con fresatrice CNC ed aventi il perfetto raggio di adeguamento (Fig.86)

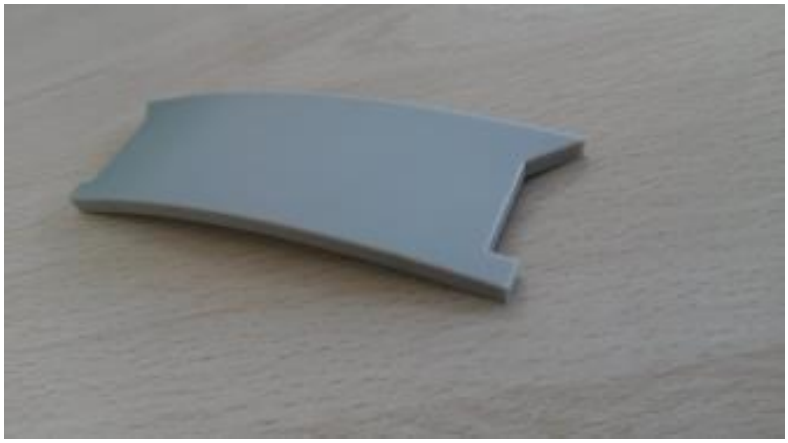
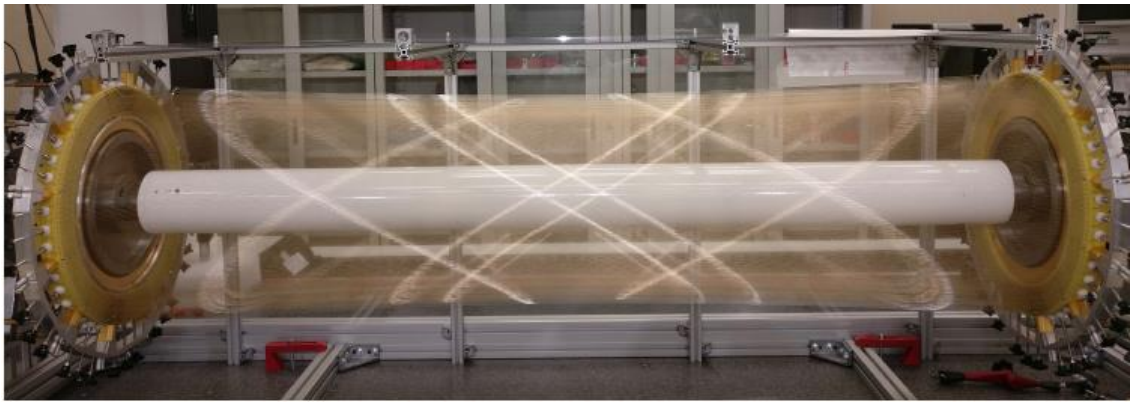
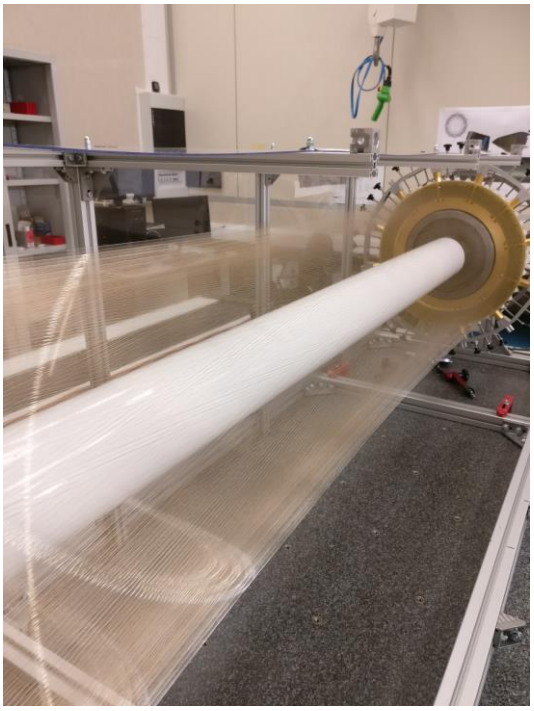


Figura 86 Distanziale in PEEK (Spacer)

La loro funzione è quella di separare i layer di filo assicurandone la perfetta distanza tra loro. L'operazione appena descritta è ripetuta per ciascuno dei 12 settori della camera e per ciascuno dei 10 strati della camera a drift (Fig.87).





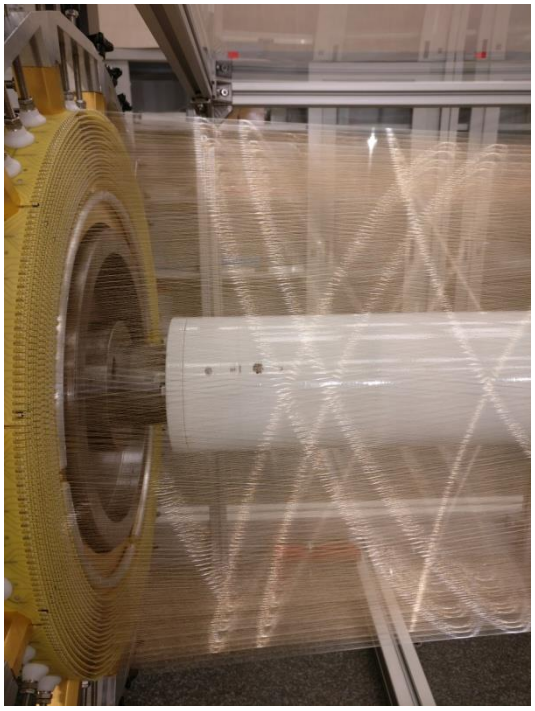


Figura87 Camera a drift di MEG

Capitolo 4

4.1 Chiusura e Sigillatura della camera a drift

Completato il montaggio di tutti i piani multifilo e controllata minuziosamente la posizione geometrica del layers si procede con la chiusura esterna della camera. I pannelli di chiusura esterna, come già detto nel capitolo 1, sono strutturali e quindi sono i diretti interessati al carico dovuto al tensionamento dei fili. La fase di chiusura è suddivisa nelle seguenti operazioni:

- Precarico dei fili e controllo diretto della posizione di ogni singolo raggio degli endplates con macchina 3D;
- Installazione dell'anello esterno su ogni singolo endplate;
- Montaggio dei due semicilindri che compongono il cilindro esterno,
- Installazione delle sfere di controllo dimensionale;
- Posizionamento del sistema di estrazione dell'albero centrale;
- Tensionamento tramite i sistemi "turnbuckles";
- Montaggio dei due semigusci in fibra di carbonio costituenti il cilindro esterno;
- Sigillatura del cilindro esterno;
- Installazione della lamina in mylar interna;
- Sigillatura degli endplates;
- Test di tenuta della camera;
- Installazione dei supporti terminali per le schede di elettronica;
- Installazione dei cilindri di chiusura aree terminali;
- Montaggio dei supporti terminali per alloggiare le schede di elettronica;
- Montaggio del sistema di distribuzione del gas;
- Installazione delle flange terminali;
- Controllo dei fili;
- Controllo finale della posizione dimensionale delle sfere di sicurezza;
- Impacchettamento e predisposizione per il trasporto;

Il precarico dei fili è necessario per il posizionamento corretto dei due endplates contenenti i piani multifilo (Fig.88). Nella fase di chiusura si procederà quindi a fissare definitivamente la posizione spaziale di quest'ultimi poiché verranno successivamente,

per problemi legati alla tenuta del gas, vincolati meccanicamente e sigillati al cilindro esterno.

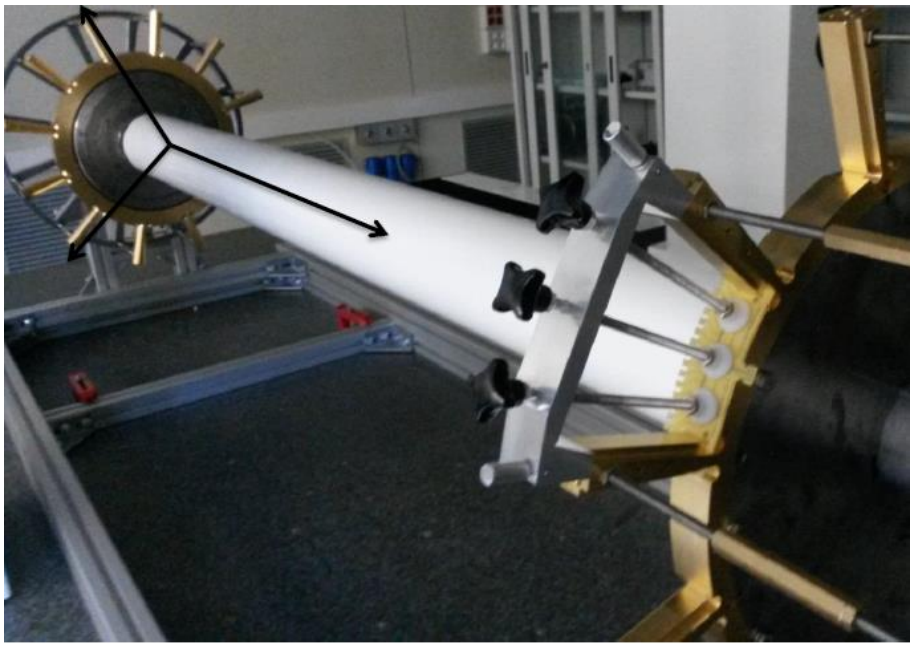


Figura 88 Sistema di movimentazione degli endplates

Operativamente, il precarico dei fili consiste nel distanziare meccanicamente i due endplates grazie ad un sistema di tensionamento con delle barre filettate avvitate direttamente su ogni raggio degli endplates. Il passo delle viti è di un millimetro, con tolleranza di fine accoppiamento Vite-Madrevite h5/H6 (Designazione UNI 4534), in modo da realizzare spostamenti precisi. Inoltre, il precarico stabilito verrà raggiunto in tre steps frazionati ogni due ore in modo da controllare perfettamente la trazione dei fili eliminando possibili assestamenti sui singoli layers.

La fase successiva è il montaggio degli anelli di chiusura sulla parte superiore degli endplate (Fig.89). Tale struttura ha lo scopo di uniformare la zona di giunzione endplate-cilindro aumentando, altresì, la zona di incollaggio tra gli endplates ed il cilindro in fibra di carbonio.

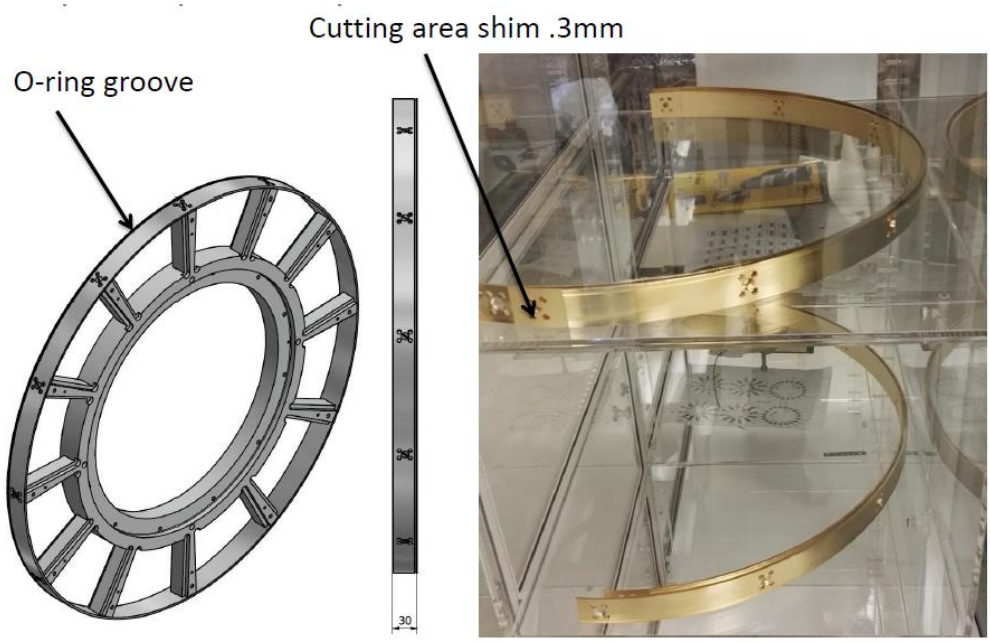


Figura 89 Anelli di chiusura degli endplates

Completata la fase di precarico degli endplates, utilizzando una chiave dinamometrica, si procede nel montaggio del primo semiguscio esterno in fibra di carbonio (Fig.90).

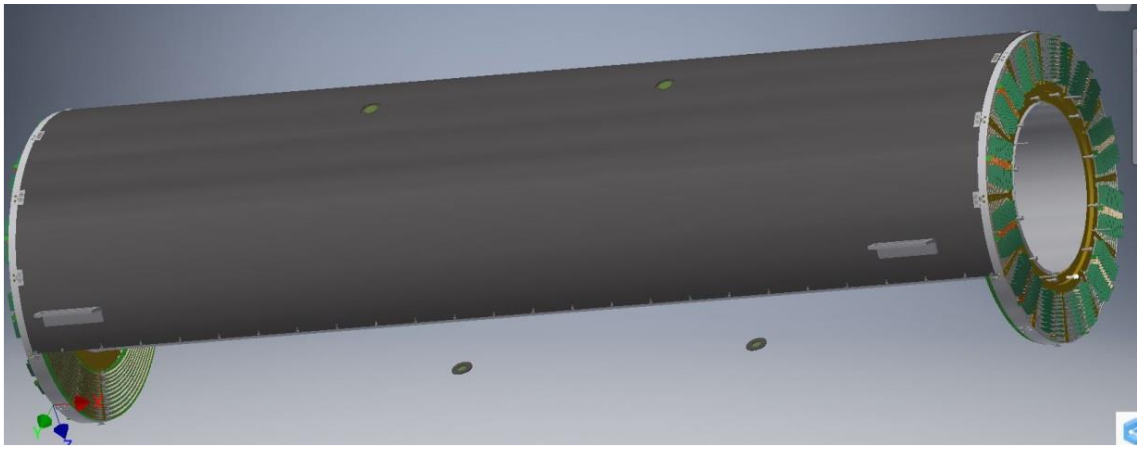


Figura 90 Posizionamento del primo semiguscio in fibra di carbonio

La fase di avvitaura e serraggio dei due semigusci (Fig 91) sui rispettivi endplates rispetta le comuni pratiche aeronautiche nel preservare i componenti in fibra di carbonio. Tali pratiche consistono nell'incollaggio, laddove vi è una giunzione fibra-

metallo, di una piastrina in alluminio sul pannello di carbonio in modo che la pressione di serraggio esercitata dalla vite non danneggi la fibra.

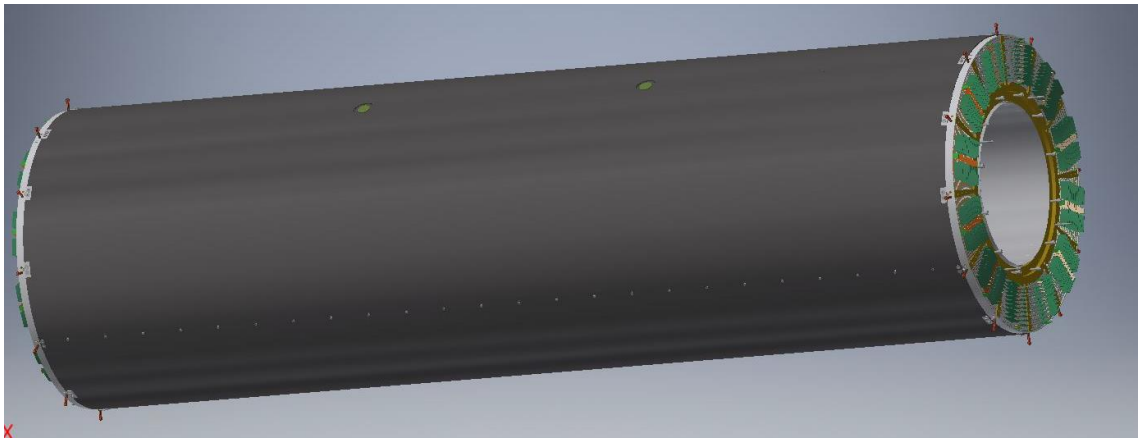


Figura 91 Chiusura del cilindro esterno in fibra di carbonio

In figura 92 si può vedere il posizionamento delle sfere di controllo dimensionale della camera.

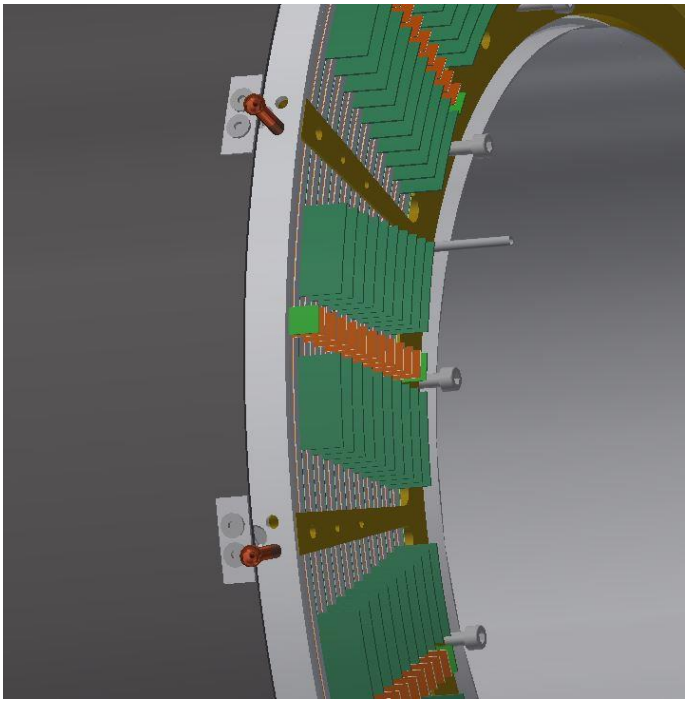


Figura 92 Posizionamento dei riferimenti di controllo dimensionale

Completato il montaggio dei semigusci costituenti il cilindro esterno si procede al montaggio di una culla di supporto della camera e successivamente all'estrazione

dell’albero centrale di supporto. La tecnica di estrazione si basa sull’uso di un braccio telescopico di estrazione come mostrato in figura 93.

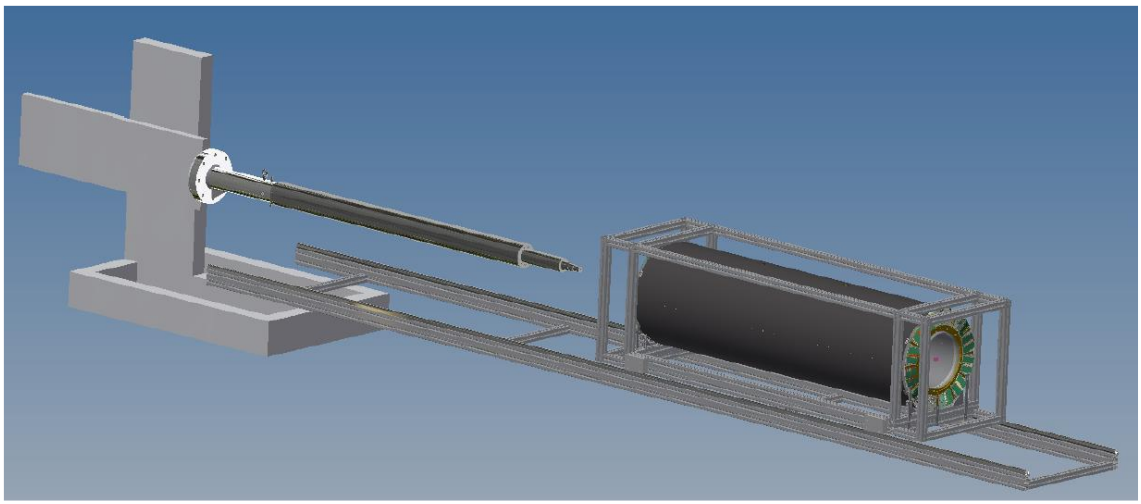


Figura 93 Disegno concettuale del sistema di estrazione dell’albero centrale

Il frame di supporto della camera permette la perfetta custodia nonché la possibilità di rotazione in posizione verticale del tracciatore. La rotazione infatti è di fondamentale importanza per la fase di sigillatura con STYCAST 2850FT degli endplate. Il sigillante STYCAST 2850 FT è una colla di tipo epossidico a due componenti con un basso coefficiente di espansione termica ed eccellenti proprietà di isolante elettrico. Inoltre, è progettato per l'incapsulamento di componenti che necessitano la dissipazione del calore e shock termico ed è fortemente raccomandato per l'uso in alta tensione (Fig.94).

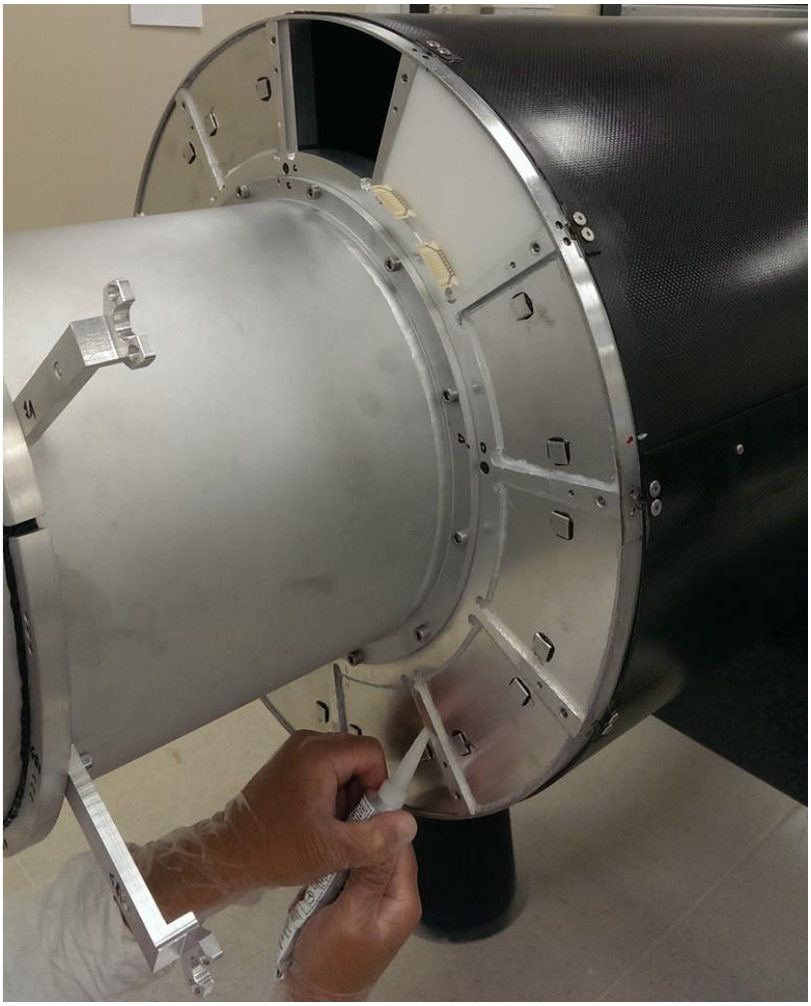


Figura 94 Sigillatura degli endplates con Stycast

Successivamente alla rimozione dell'albero centrale si procede nell'inserimento del foglio di mylar costituente il cilindro interno (Fig.95). Sostanzialmente la tecnica è quella di sagomare il foglio di mylar opportunamente incollato su due anelli aventi il diametro del cilindro interno della camera. Il cilindro in mylar si ottiene, quindi, tensionando i due anelli opportunamente calettati sull'albero di rotazione del tracciatore.

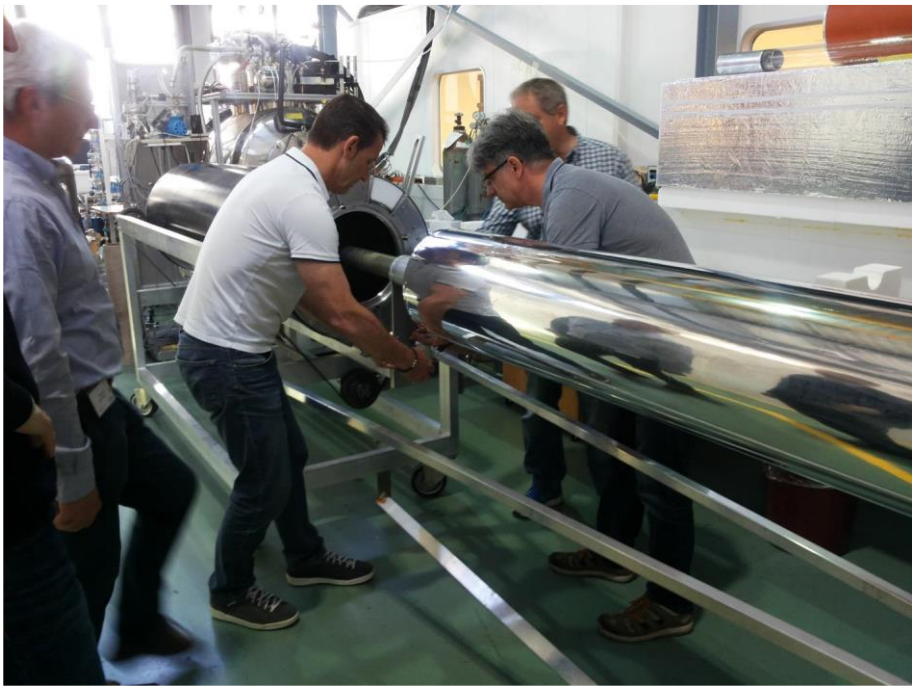


Figura 95 Fase di inserimento del foglio di mylar costituente il cilindro centrale

Completato il montaggio del cilindro centrale si procede a sigillare la camera con colla epossidica conduttiva in modo da assicurare una uniformità di massa su tutto il rivelatore. Il controllo successivo è quello della tenuta al gas ed avviene grazie all'introduzione di elio dalle flange frontali di connessione (Fig.96).

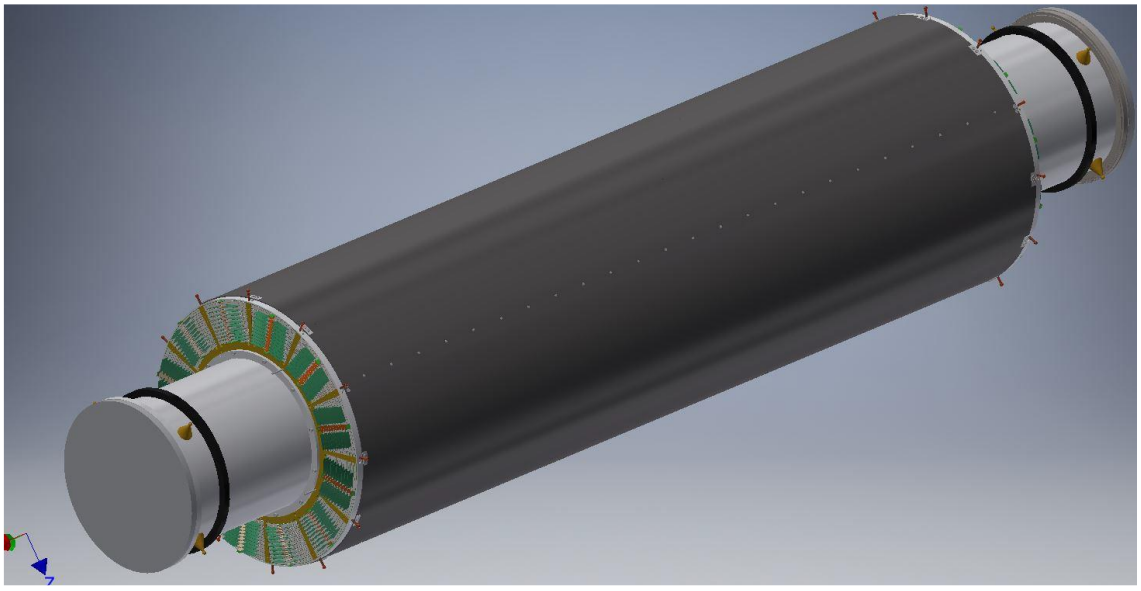


Figura 96 Fase di chiusura temporanea del cilindro centrale per il test di tenuta ad elio

Il montaggio dei cilindri terminali riproduce esattamente la stessa tecnica utilizzata per il cilindro centrale e la stessa procedura di sigillatura (Fig.97)

Figura 97 Chiusura delle parti terminali della camera

Completato il montaggio dei due cilindri terminali si inseriscono le sfere di controllo dimensionale sulla parti frontali del rivelatore (Fig.99). La "gabbia" di trasporto verrà sigillata ermeticamente con un foglio di PROPAMETIC 701. Il Propametic è un film multistrato ottenuto per accoppiamento di 4 materiali tecnici i quali conferiscono un'altissima barriera al vapore acqueo e all'umidità. Inoltre, sono facilmente saldabili assicurando una perfetta tenuta a prova d'aria (Fig. 98).

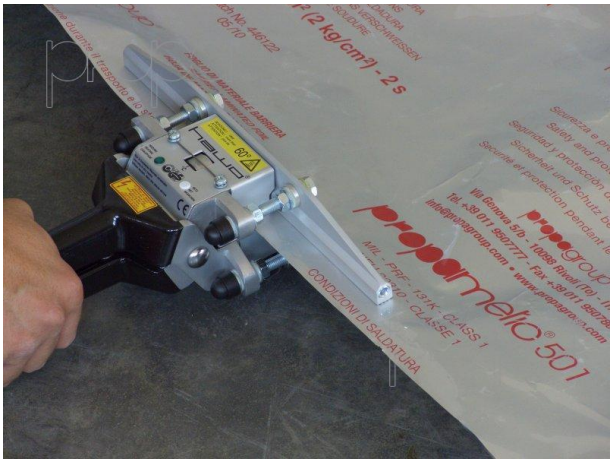


Figura 98 Saldatrice a barra calda per saldatura materiali barriera

All’interno della gabbia verrà applicato un igrometro TFA KlimaLogg Pro ed un sensore di temperatura TFA con connessione wifi per il monitoraggio durante tutta la fase di trasporto. Un sistema con accelerometro ne monitorerà infine le eventuali vibrazioni indotte sia dal trasporto che dalla fase di carico-scarico.

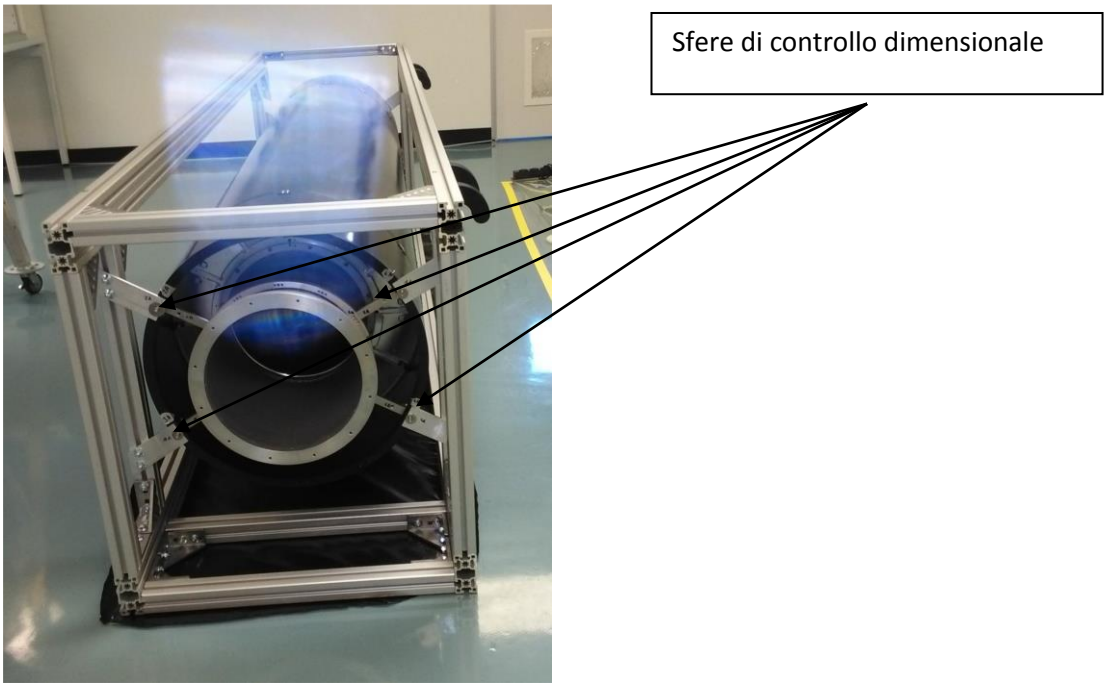


Figura 99 Posizionamento pre-trasporto

4.2 Trasporto: normativa e documentazione doganale

Il trasporto internazionale è regolato da norme di diritto civile e commerciale, di diritto assicurativo, di diritto amministrativo, di diritto doganale, di diritto comunitario e di diritto internazionale, oltre che dalla normativa interna e internazionale sulla fiscalità diretta (IVA). I punti salienti sono:

1. Regimi doganali;
2. Responsabili dell’operazione di esportazione;
3. Documentazione doganale:
    3.1 dichiarazione di esportazione;
    3.2 documento amministrativo unico DAU;
    3.3 documento di accompagnamento all’export DAE;
4. Procedura telematica di sdoganamento;
5. Controlli;
6. Imballaggi;

7. Passaporto;
8. Documentazione pre-trasporto;

1. Regimi doganali

Chiunque decida di partire sia per un itinerario turistico, chi per un viaggio di lavoro o per affrontare trasporti internazionali, dovrà aver a che fare con la dogana: un organismo pubblico che si occupa del controllo delle merci in entrata o in uscita da un territorio nazionale.

L'esportazione è una tipologia di regime, una procedura incentivata dai diversi governi per favorire il commercio. Questa operazione è vincolata da leggi fiscali e doganali che devono essere rispettate minuziosamente. In pratica, l'esportazione è una cessione fuori dall' UE in cui i beni commerciali vengono mandati all'estero.

La merce, che entrata in dogana, è sottoposta a severi controlli e se non risulta idonea viene sequestrata dalle autorità dogana. Per ovviare a questo problema si richiede appunto: l'avvio del processo di sdoganamento. Esso consiste nel pagamento dei dazi doganali, svincolando così le merci e permettendone l'esportazione. Il proprietario della merce o un suo rappresentante, muniti di dichiarazione doganale di esportazione, è la persona fisica che può richiedere lo sdoganamento. Tutta la documentazione viene trasmessa, in formato elettronico, ai diversi apparati doganali dove la merce importata dovrebbe arrivare. Proprio in quegli uffici avviene l'analisi dei rischi fiscali e di sicurezza generale che potrebbero subentrare. Dopo aver effettuato i dovuti controlli, la merce è pronta ad essere esportata. È importante osservare che:

Le merci devono essere munite di apposita dichiarazione di esportazione e l'ufficio doganale è il responsabile dell'intera procedura.

Le merci **se** non ritenute idonee all'esportazione sono sottoposte al deposito doganale**.** Il deposito doganale è il luogo dove i beni vengono momentaneamente depositati e immagazzinati. Tale operazione non richiede il pagamento di dazi di importazione poiché si avvia una procedura di momentanea sospensione. L'apparato doganale ha il diritto si sequestrare le merci bloccando l'esportazione.

L'esportatore di beni commerciali**,** inoltre, deve dare a questi ultimi una destinazione doganale: se non c'è possibilità di sdoganare la merce o rimandarla al mittente si può optare per un esportazione sotto il controllo della dogana e quest'ultima può espropriare la merce del suo valore eliminando gli oneri doganali previsti a seguito del controllo della merce.

Il lavoro dell'apparato doganale è complesso e pericoloso; esso mette al primo posto la sicurezza al fine di garantire l'ordine pubblico all'interno della comunità nazionale. A seconda del tipo di operazioni da effettuare e del tipo di merce che viene scambiata, esistono diversi regimi doganali.

Il regime di importazione definitiva consiste nel pagamento dei diritti doganali e svincolando così la merce, che proviene da paesi extracomunitari, da qualsiasi ostacolo di natura doganale o fiscale.

Il regime di transito è il regime in cui lo spedizioniere si impegna a ripresentare la stessa merce, controllata alla dogana di partenza, all'ufficio doganale di arrivo, nell'arco di un tempo prestabilito. Questo regime viene applicato alle merci che, spostandosi da un posto all'altro, sono soggette a formalità doganali.

Il regime del deposito doganale consente l'immagazzinamento di merci che non appartengono al territorio comunitario affinchè esse non vengono assoggettate ai dazi doganali di importazione. Il regime di perfezionamento passivo, invece, sostiene la competitività delle imprese appartenenti alla comunità. È possibile esportare i beni commerciali temporaneamente sottoponendoli a operazioni di modifica e perfezionamento. Allo stesso tempo il regime di perfezionamento attivo permette di esportare le merci e riesportarle, in seguito, come prodotti finiti. Tutto questo senza incorrere ai diritti doganali.

Il regime di trasformazione sotto controllo doganale permette di modificare le merci non comunitarie in territorio europeo senza incorrere nelle spese doganali.

Il regime di ammissione temporanea permette di introdurre nella comunità merci estere in occasione di fiere o altri eventi occasionali, per poi esportarle nuovamente.

2. Responsabili dell’operazione di esportazione

Per procedura di esportazione si intende comunemente l'insieme di pratiche che permette il trasporto delle merci prodotte all'interno dell'Unione Europea al di fuori del suo territorio doganale.

Un esportatore che opera all'interno dell'UE, per instaurare scambi commerciali con clienti che risiedono in Paesi esterni all'Unione, oltre che degli aspetti logistici e contrattuali della vendita deve necessariamente essere a conoscenza delle pratiche doganali che regolamentano l'esportazione delle merci.

Poiché è comunque diretta responsabilità dell'esportatore il saper fornire la documentazione completa e tutte le informazioni da esibire al momento dell'esportazione, è interesse del soggetto esportatore che le merci viaggino con tutta la documentazione necessaria, compresi i certificati di origine, le autorizzazioni e le licenze. Una ulteriore informazione importante è essere a conoscenza dei rapporti di politica commerciale con lo Stato destinatario, per potersi avvalere di riduzioni o esenzioni dal pagamento dei dazi previsti dal diritto commerciale internazionale.

Due sono gli aspetti fondamentali del processo di esportazione: quello doganale e quello fiscale.

Per quanto riguarda il primo aspetto, i riferimenti normativi sono l'articolo 16 del Codice Doganale Comunitario (regolamento Cee 2913/1992), che definisce l'esportazione, e gli articoli 161 e 162 del suddetto codice, che la disciplinano. Le disposizioni attuative del regime di esportazione sono invece illustrate dagli articoli 788 e seguenti del regolamento Cee 2454/1993.

Per quanto riguarda l'aspetto fiscale, l'esportazione è regolamentata dal Decreto Iva D.P.R. 633/72 (articolo 8). Tra le varie norme, il decreto dispone che l'esportazione debba risultare da un documento doganale. Oggi, il documento è sostituito da un messaggio elettronico contenente un codice alfanumerico univoco, detto Movement Reference Number (MRN).

Il responsabile principale della procedura di esportazione è l'esportatore stesso, definito dall'art. 788 delle disposizioni attuative del già citato regolamento Cee 2954/1993 come "la persona per conto della quale viene presentata la dichiarazione di esportazione". Il responsabile deve necessariamente coincidere con il proprietario della merce esportata e la merce può essere presentata in dogana anche da un rappresentante incaricato dall'esportatore, in questo caso si tratta si tratta di un "doganalista" abilitato a "rappresentare i terzi nei confronti della dogana".

Inoltre, ci sono due tipi di rappresentanza doganale previsti dal codice: la più diffusa è la rappresentanza diretta, riservata ai doganalisti abilitati (ovvero agli spedizionieri doganali) che operano all'interno di un Centro di Assistenza Doganale (CAD) ed oltre ad essere iscritti all'albo degli spedizionieri doganali, posseggono l'apposita patente rilasciata dall'Agenzia delle Dogane.

Per il proprietario/esportatore, questa è la soluzione più semplice. Infatti è il doganalista a incaricarsi della compilazione delle dichiarazioni doganali, sempre naturalmente in nome e per conto del proprietario, che rimane l'unico titolare dell'operazione doganale, con tutti i diritti e i doveri del caso.

La seconda tipologia di rappresentanza doganale è quella indiretta, nella quale il rappresentante agisce sempre per conto dell'esportatore, ma in nome proprio. In questo caso per il rappresentante non c'è alcun obbligo di abilitazione o iscrizione all'albo professionale. In questo caso egli risponde personalmente delle dichiarazioni doganali effettuate, insieme naturalmente al mandante.

Il regolamento Ce 450/2008 modifica comunque sensibilmente queste impostazioni di rappresentanza, in quanto ammette per la prima volta la possibilità di liberalizzare i servizi doganali (articolo 106).

Tuttavia, grazie all'attuazione del regolamento Ce 312/2009**,** a partire dal 1º luglio 2010, per effettuare operazioni doganali si deve necessariamente essere in possesso del codice alfanumerico di massimo 15 caratteri denominato EORI (Economic Operator Registration and Identification). Il suo scopo è identificare a livello comunitario chi effettua operazioni doganali. In Italia questo codice è composto dal numero della partita IVA o del codice fiscale dell'esportatore/dichiarante, preceduto dal codice ISO alfa 2 "IT".

L'assegnazione di questo codice si ottiene con la prima operazione doganale effettuata, ma può anche essere richiesta preventivamente; esso dovrà comparire nella casella con la dicitura "speditore/esportatore" della dichiarazione doganale o del Documento Amministrativo Unico (DAU).

3. Documentazione doganale

La legislazione dei trasporti internazionali è un problema complesso poiché oltre ad essere multi-formale è soprattutto soggetto a rapide trasformazioni.
Uno dei primi aspetti da tenere in considerazione è quello dei documenti da presentare in dogana cioè i documenti doganali**.** Oggigiorno, il processo di informatizzazione delle procedure amministrative ha introdotto una certa semplificazione della preparazione dei documenti doganali, il sistema AEO, che raccoglie gli Operatori Economici Autorizzati nel territorio dell'Unione Europea**.**

Gli operatori, cioè i produttori, gli esportatori, i vettori, i depositari e gli agenti doganali richiedono il sistema AEO, dal primo gennaio 2007, hanno una garanzia nella semplificazione delle pratiche doganali, con il vantaggio di una maggiore velocità nel disbrigo delle pratiche, di facilitazioni nel settore della sicurezza e di un migliore rapporto con le autorità riducendo gli accertamenti doganali.

Quando ci si riferisce ai documenti doganali, il più importante è ovviamente la fattura, o comunque un documento commerciale che ad essa sia equivalente. In questo caso, l'esportatore deve essere in possesso di un documento bancario che attesti l'avvenuto pagamento della vendita all'estero. Nel caso di cessioni a titolo gratuito si utilizzerà la cosiddetta "fattura proforma", cioè una fattura priva dell'importo della vendita. È importante osservare che queste attestazioni sono fondamentali perché permettono di tracciare con sicurezza il valore delle merci importate nonostante la fattura è redatta dal fornitore secondo le leggi del suo Paese.

Dati altrettanto importanti sono le condizioni per la resa, il peso lordo e netto della merce. Fondamentale è anche la packing list, in caso di spedizioni che comprendano più colli.

Il documento di trasporto **o** bolla di accompagnamento, obbligatorio sia in Italia che a livello internazionale, serve per accompagnare la merce nel suo tragitto. Esso deve essere accompagnato dalla lettera di vettura internazionale (CMR, Convention des Marchandises par Route) per i trasporti su strada.

Un ultimo documento doganale è il documento di origine, ossia il documento di certificazione che una merce è completamente prodotta nel Paese di origine, senza che modifiche o alterazioni intervengano tra il Paese di partenza e quello di arrivo.

Queste tre tipologie di documenti (fatture, documenti di trasporto e di origine) sono le più importanti. Tra i numerosi altri in cui ci possiamo imbattere quando ci si occupi di trasporto merci internazionale, ci sono i certificati sanitari, veterinari o fitosanitari,

documenti specifici prodotti per garantire che alcune tipologie di merci spedite (in particolare, naturalmente, i prodotti agricoli, quelli di origine animale e quelli alimentari in generale) rispettano le norme igienico-sanitarie del Paese di origine e di quello di destinazione. Si tratta di documenti ugualmente importanti, perché in mancanza di essi la dogana non permetterà l'ingresso della merce.

3.1 Dichiarazione di esportazione

La dichiarazione doganale di esportazione è un documento che deve venire prodotto ogni volta che si effettua l'esportazione di merci al di fuori del territorio della comunità europea. Questo tipo di comunicazione deve venire effettuata prima del transito delle merci dalla dogana nazionale ed è possibile inviare tale dichiarazione in modo telematico, direttamente dall'azienda che deve esportare i beni.

I documenti doganali devono essere presentati dal proprietario della merce da esportare, o da un suo rappresentante, all'ufficio doganale competente per la zona in cui la merce è imballata o caricata sui mezzi di trasporto, o anche nella zona in cui risiede l'esportatore.

Dopo aver effettuato tale dichiarazione in modo telematico, utilizzando gli appositi strumenti del sistema informatico dell'Agenzia AIDA, l'ufficio di esportazione effettua dei controlli, per verificare che la merce depositata corrisponde a quella dichiarata. In alcuni casi è necessario presentare anche particolari certificati di esportazione, per poter trasferire merci definite pericolose.

3.2 Il Documento Amministrativo Unico DAU

Il Documento Amministrativo Unico è un formulario cartaceo che costituisce la dichiarazione doganale. Tecnicamente è il modulo che viene compilato online dall'esportatore e successivamente stampato negli uffici doganali al momento in cui si prepara una dichiarazione doganale di esportazione. È un documento molto semplice da compilare poiché riporta le caratteristiche salienti della merce in transito e compilarlo correttamente permette alla dogana di effettuare le operazioni di sdoganamento in tempi molto più rapidi. Esso consta di otto pagine, ognuna delle quali viene inviata agli organi competenti. La copia numero 3 è quella che viene restituita all'esportatore. Se le merci da spedire hanno diritto ad una quota di restituzione, è necessario ricevere la copia 3A e senza la quale l'esportatore non potrà ricevere alcuna percentuale di restituzione.

3.3 Documento di Accompagnamento all'Export DAE

Dopo aver controllato le merci e aver verificato il DAU, la dogana produce il documento di accompagnamento all'export, DAE, che viene compilato e consegnato all'esportatore o ad un suo rappresentante. Tale documento viene poi consegnato, assieme alla merce, all'effettivo ufficio di uscita dal territorio comunitario.

Tecnicamente la Dogana verifica tutta la dichiarazione doganale di esportazione e controlla che la merce corrisponda a quella descritta nel DAE. A questo punto il sistema informatico rimanda all'esportatore la dicitura: "uscita conclusa", che dà la certezza dell'avvenuto passaggio corretto in dogana.

4. Procedura telematica di sdoganamento

Il processo di progressiva internazionalizzazione delle imprese ha comportato una sempre più massiccia esigenza di razionalizzare il trasporto delle merci a livello internazionale dal punto di vista delle pratiche doganali. Il fatto che le merci possano circolare liberamente tra la maggior parte dei Paesi a un livello ormai mondiale non toglie infatti che siano necessarie procedure ben definite per sovrintendere a questa libertà di circolazione.

Grazie ai processi di informatizzazione a livello europeo delle pratiche doganali, sono state negli ultimi anni introdotte diverse novità nella legislazione in materia di trasporto merci internazionale.

In particolare, a seguito della caduta delle barriere doganali tra i Paesi membri dell'Unione Europea nel 1993 con l'introduzione della tariffa doganale unitaria, l'Unione ha cercato di dotarsi di strumenti sempre più efficaci per regolamentare il trasporto merci velocizzando le procedure doganali ricorrendo all'innovazione tecnologica

Il progetto più noto dell'UE per informatizzare le procedure doganali riducendo i costi e ottimizzando i controlli è denominato E-Customs. Si tratta in sostanza di un accordo che vincola la Commissione Europea e le autorità doganali dei Paesi membri alla progressiva costituzione di una cosiddetta "dogana elettronica paneuropea". Il cambiamento fondamentale rispetto al passato è la necessità di aggiornare l'apparato legislativo in modo che i documenti elettronici abbiano lo stesso valore di quelli cartacei. Per far questo è naturalmente necessaria una innovazione anche tecnica in materia di autenticazione dei documenti digitali. In Italia questo accordo europeo trova la sua applicazione nel sistema AIDA.

Il sistema AIDA, cioè l'avvio delle procedure di sdoganamento telematico, è un sistema complesso di integrazione tra il sistema doganale e quello fiscale. Questo sistema gestisce ormai oltre dieci milioni di pratiche doganali annue. Il sistema è in grado di acquisire dati come il valore della merce, la qualità, la quantità, gli Stati di origine, le

destinazioni ed inviare ad istituti di ricerca come l'Istituto Nazionale di Statistica o la Ragioneria Generale dello Stato tali indici in modo da monitorare annualmente i valori.

Gli operatori che optano per lo sdoganamento telematico utilizzano la firma digitale invece dei classici documenti cartacei e possono usufruire di un fascicolo elettronico che conserva i documenti presentati all'atto della dichiarazione doganale.

E' da notare che questa procedura di domiciliazione, che permette di effettuare operazioni doganali direttamente dalla sede dell'azienda, quindi abbattendo l'obbligo di presentare le merci alla dogana, può essere richiesto da imprese commerciali, agricole, industriali e da quelle che si occupano di intermediazione nel commercio internazionale. I vantaggi di tale procedura sono l'assenza di accertamenti doganali ispezioni preventive e a campione, con una notevole riduzione della tempistica burocratica nonché una notevole riduzione dei costi di gestione e adeguamento alle procedure doganali.

5. Controlli

Il sistema del controllo doganale durante le operazioni di sdoganamento è abbastanza complesso e mira all'ottemperanza di tutte quelle pratiche doganali previste dalla vigente legislazione italiana. Il legislatore ha messo a punto, infatti, molteplici fasi di controllo del trasporto merci, sia presso la dogana di ingresso (o di uscita), che in remoto tramite l'accertamento delle operazioni effettuate.

I controlli durante le pratiche doganali, negli ultimi anni hanno visto, inoltre, un processo d'integrazione con le norme comunitarie, norme che al giorno d'oggi permettono di avere un sistema di traffico merci soprattutto in ambito UE, abbastanza standardizzato. Il sistema dei controlli doganali in Italia, punta su tre pilastri fondamentali:

1. Controlli fisici;
2. Controlli di conformità;
3. Controlli in remoto;

Ognuno di questi punti di controllo contribuisce a garantire un certo livello di sicurezza e di avere un'analisi dei rischi abbastanza veritiera rispetto alle operazioni scorrette messe in atto. L'integrazione di tutte le tipologie di controlli tra di essi, innalza il sistema di riscontro generalizzato e permette di avere un esame dell'accertamento di quanto dovuto, in maniera completa, permettendo un introito per le casse dello stato che viene quantificato nell'ordine di miliardi di euro.

Nel caso di esportazione merci, gli uffici doganali controllano innanzitutto che la merce "in uscita" non sia sottoposta a vincoli specifici. Per questo motivo, nella maggior parte dei casi, il controllo è sia fisico che di conformità. Il superamento quindi di tale controllo determina il rilascio della prescritta autorizzazione, che è conosciuta con il nome di "bolla o bolletta doganale".

In caso, invece, d'importazione, gli uffici doganali devono agire per permettere l'incasso degli oneri doganali. È questa, forse, la fase più difficile dell'intero procedimento dei controlli, il funzionario doganale deve innanzitutto riuscire a catalogare la merce e accertarne la provenienza del paese d'origine. Una volta saputi questi che sono i dati basilari, con un mero calcolo matematico (che contempla anche il valore statistico della merce in entrata) si quantifica il dazio doganale e da questo deriva successivamente il calcolo dell'Imposta sul valore aggiunta (IVA) da incassare. Di solito tutti i calcoli trovano come punto di partenza la dichiarazione presentata dallo spedizioniere e in possesso dell'autotrasportatore.

È importante osservare che il controllo merci in dogana negli ultimi anni è stato condizionato, soprattutto in virtù dell'Unione Europea che permette il libero transito delle merci all'interno dei suoi confini. Sono molti, infatti, i prodotti che entrano all'interno dei confini UE attraverso i paesi che non hanno un sistema di controlli efficaci, e si muovono solo in seguito all'interno dei confini dei singoli stati nazionali, usufruendo in tal caso della sola assistenza doganale. In tale caso lo sdoganamento UE effettuato in altri paesi, non inficia la valenza di quello che è un controllo fondamentale e che riguarda tutte le merci che si muovono all'interno del nostro paese

6. Imballaggio

La Svizzera non richiede l'obbligo di imballaggi a Marchio IPPC/FAO se provenienti dall'UE.
La Svizzera come l'UE richiede imballaggi a Marchio IPPC/FAO in ingresso esclusivamente se provenienti dal Portogallo o da Paesi Terzi.
Dal 1 marzo 2006 gli imballaggi in legno destinati alla Svizzera devo essere trattati, fumigati e marchiati secondo la normativa NIMP numero 15. Gli imballaggi fabbricati nell`UE non hanno bisogno di rispondere a questi requisiti

7. Passaporto

La svizzera aderisce all'accordo di Schengen. E' necessario viaggiare con uno dei due documenti in corso di validità, da poter esibire in caso di richiesta da parte delle Autorità locali.
La Svizzera concede l'ingresso ai titolari di una carta di identità italiana in forma cartacea in corso di validità e rinnovata con timbro apposto sul documento stesso. Invece non è accettata la carta di identità elettronica, formato carta di credito, che indichi una data scaduta, se la proroga della stessa figura su un modulo cartaceo separato.

8. Documentazione pre-trasporto

La fase successiva al completamento delle operazioni inerenti la sigillatura e relativi test preliminari dell'apparato è la preparazione di tutta la documentazione per l'esportazione del rivelatore presso il Paul Scherrer Institut (PSI) di Zurigo.

Il primo documento da redigere è la compilazione del DAU, necessario affinchè l'autorità doganale rilasci il DAE. Un fac-simile di tale documento è mostrato in figura 100.

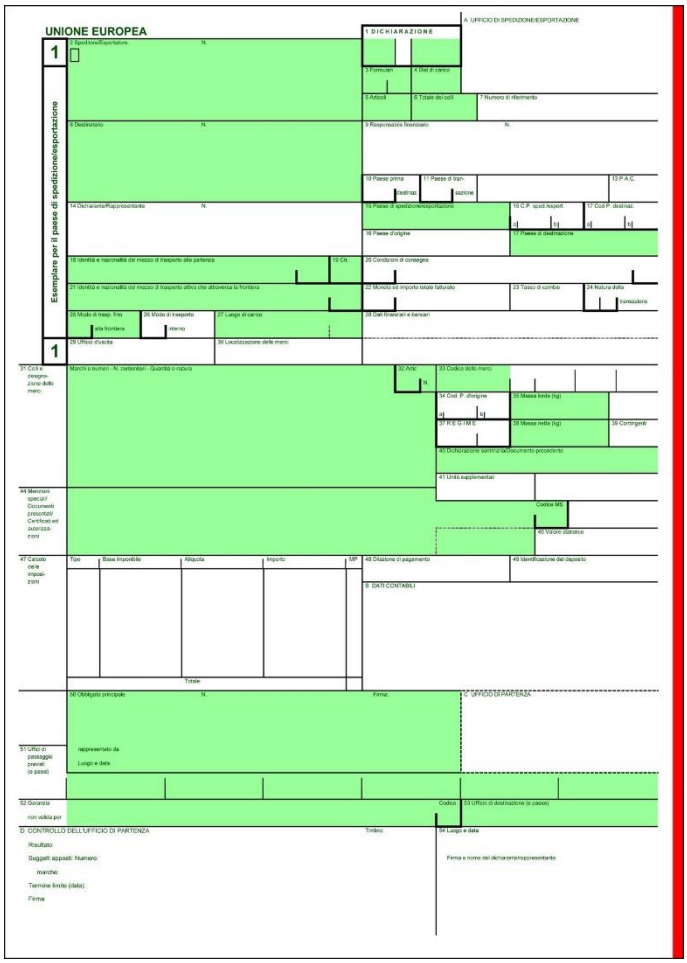


Figura 100 Fac-simile del Documento Amministrativo Unico (DAU)

Relativamente all'invio di tale documento presso l'autorità doganale di competenza, nel caso specifico della camera di MEG è Pisa, si riceverà il Documento di accompagnamento all'export (DAE). Tale documento è effettivamente il documento da presentare in dogana al momento dell'attraversamento della frontiera, cioè all'uscita dal paese comunitario (Fig.101).

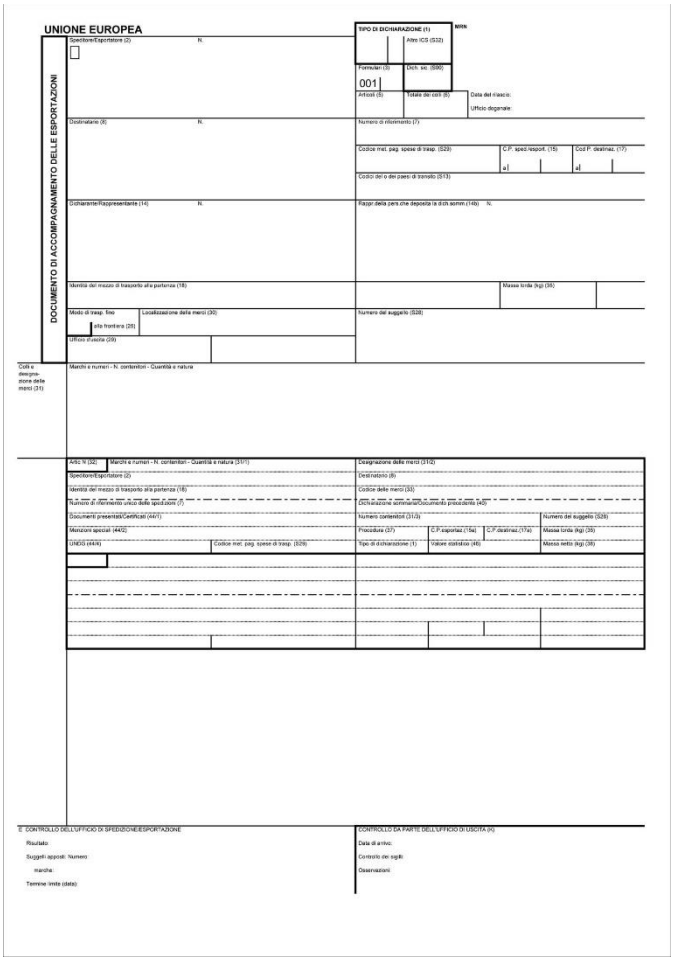
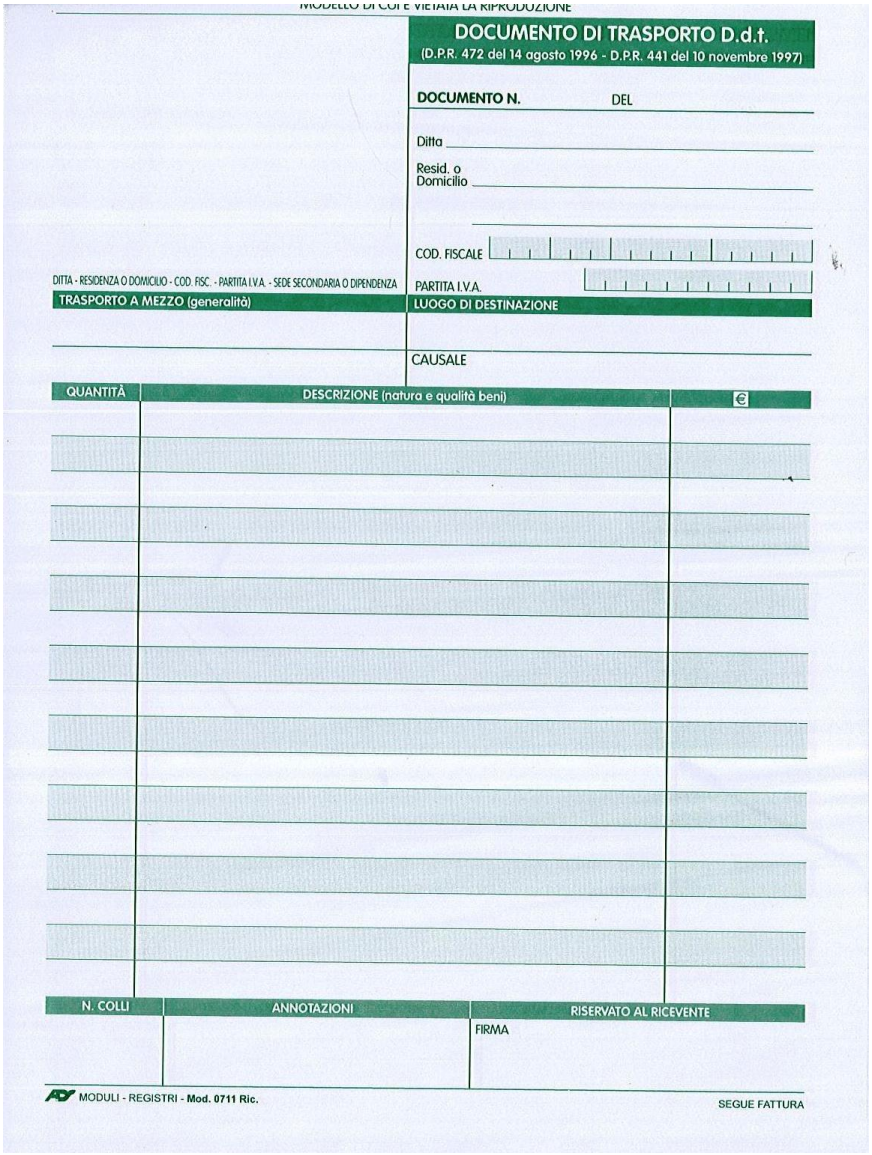


Figura 101 Fac-simile del Documento di accompagnamento all'export (DAE)

Insieme al DAE, il vettore dovrà avere, al proprio seguito, il Documento di Trasporto (DDT), figura 102, ed una fattura pro-forma



MODELLO DI COPIA VIETATA LA RIPRODUZIONE

DOCUMENTO DI TRASPORTO D.d.t.
(D.P.R. 472 del 14 agosto 1996 - D.P.R. 441 del 10 novembre 1997)

DOCUMENTO N. DEL

Ditta

Resid. o Domicilio

COD. FISCALE

DITTA - RESIDENZA O DOMICILIO - COD. FISC. - PARTITA I.V.A. - SEDE SECONDARIA O DIPENDENZA

PARTITA I.V.A.

TRASPORTO A MEZZO (generalità)

LUOGO DI DESTINAZIONE

CAUSALE

QUANTITÀ	DESCRIZIONE (natura e qualità beni)	€

N. COLLI	ANNOTAZIONI	RISERVATO AL RICEVENTE
		FIRMA

MODULI - REGISTRI - Mod. 0711 Ric.

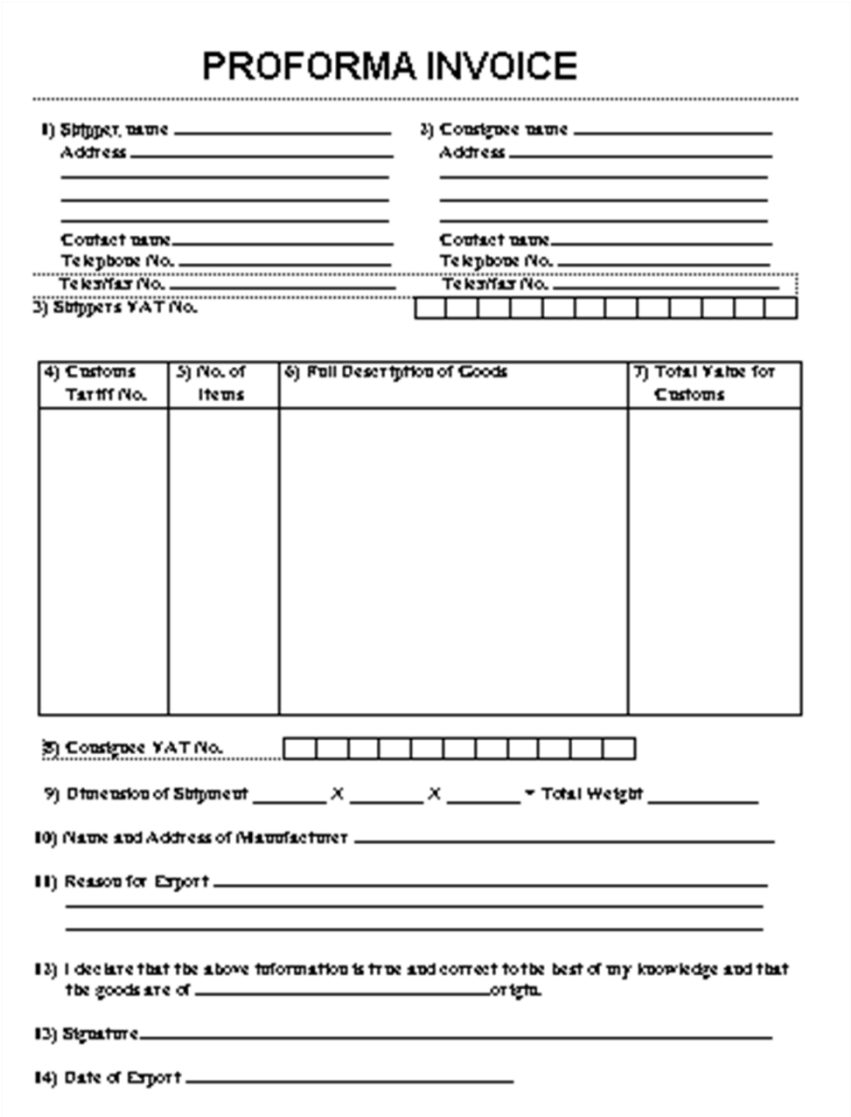
SEGUE FATTURA

Figura 102 Fac-simile Documento di Trasporto (DDT)

La fattura pro-forma (Fig.103) è un documento senza alcuna valenza fiscale quindi non genera obblighi ai fini di eventuali spese doganali di esportazione. Si tratta di un documento in carta semplice che 'assomiglia' ad una fattura ma riporta in evidenza la dicitura 'Pro-forma'. Inoltre, il documento deve riportare, normalmente a piè di pagina, la seguente dicitura: "Il presente documento non costituisce fattura valida ai fini del DPR 633 del 26/10/1972 e successive modifiche. Da un punto di vista doganale essa può essere utilizzata come una dichiarazione di esportazione definitiva, indicando il codice documento nella casella n.44 del DAU poiché rientra nei soli casi in cui non viene emessa alcuna fattura commerciale ai fini dell'IVA.

Nel caso specifico della camera di MEG, per poter esportare il rivelatore dall'Italia verso la Svizzera, è sempre obbligatorio indicare in fattura i seguenti dati:

1. indirizzo completo di mittente e destinatario;
2. numero colli;
3. peso lordo e netto dei colli;
4. descrizione dettagliata della merce;
5. codice doganale;
6. nazione di produzione della merce o dichiarazione d'origine preferenziale della merce debitamente firmata;
7. valore della merce;
8. il motivo dell'esportazione;
9. citare il corretto articolo di legge per l'esenzione IVA;
10. eventuale resa della merce.



PROFORMA INVOICE

1) Shipper, name _____ 2) Consignee name _____
Address _____ Address _____
_____ _____
_____ _____
_____ _____
Contact name _____ Contact name _____
Telephone No. _____ Telephone No. _____
Telefax No. _____ Telefax No. _____
3) Shippers VAT No.

4) Customs Tariff No.	5) No. of Items	6) Full Description of Goods	7) Total Value for Customs

8) Consignee VAT No.

9) Dimension of Shipment _____ X _____ X _____ = Total Weight _____

10) Name and Address of Manufacturer _____

11) Reason for Export _____
_____
_____

12) I declare that the above information is true and correct to the best of my knowledge and that the goods are of _____ origin.

13) Signature _____

14) Date of Export _____

Figura 103 Fac-simile di fattura pro-forma

Conclusioni

L'obiettivo del presente lavoro di tesi è stato lo studio di soluzioni e materiali innovativi per la realizzazione di un tracciatore di particelle, ossia della Camera a Deriva presente nell'esperimento MEG, situato presso il Paul Scherrer Institut (PSI) di Zurigo.
Nello specifico, la tesi ha documentato tutte le fasi inerenti la progettazione in primis e la realizzazione sia di un prototipo in scala, che la camera a drift finale. Con la realizzazione della camera di MEG è stato modificato il concetto di realizzazione classica dei tracciatori di particelle. Nel passato, il concetto classico di tali rivelatori, era quello di due piatti circolari (endplates) posizionati a distanza nota, sui quali venivano realizzati i fori per l'alloggiamento dei passanti per i fili (feedtrougth) necessari alla "crimpatura" dei fili stessi. Tutto questo prevedeva l'utilizzo di fili di grosso diametro e di feedtrougth capaci di alloggiare tali fili. Giusto per avere un'idea, si tendeva ad utilizzare feedtrougth con fori da 120μm nei quali venivano bloccati dei fili da 100μm. La valutazione della precisione del rivelatore dipendeva, ovviamente, da dati statistici riguardanti il posizionamento spaziale dei fili poiché, il tutto implicava un errore di posizionamento iniziale nonché un errore dovuto alle tolleranze nelle lavorazioni meccaniche degli endplates. Inoltre, l'utilizzo di fili di grosso diametro prevedeva la necessità di tensioni di trazione elevate e quindi carichi importanti sugli endplates.
La camera a drift di MEG ha rivoluzionato completamente il concetto di posizionamento spaziale dei fili riducendo tale errore a valori di qualche micron, grazie alla realizzazione di un robot di filatura. Con l'utilizzo di fili ultra sottili è stato ridotto drasticamente il carico sugli endplates e di conseguenza lo spessore del cilindro esterno. Quest'ultimo, in particolar modo, ha richiesto un impegno totale da parte di tutti i gruppi coinvolti per soddisfare i vincoli imposti dal progetto iniziale: leggerezza, stabilità, proprietà di barriera ai gas, schermatura elettromagnetica alle radiofrequenze, precisione spaziale dei fili.
L'esperimento MEG, inoltre, ha permesso il coinvolgimento di gruppi sia italiani che esteri, implementando il concetto di lavoro di squadra in uno scenario sociale differente. Lo scambio repentino di opinioni e di soluzioni ha senz'altro aiutato a perseguire i traguardi prefissati.
La realizzazione finale del rivelatore in una sezione italiana e successivamente la spedizione di quest'ultimo presso il PSI di Zurigo, ha permesso altresì il coinvolgimento non solo della comunità scientifica ma anche dei servizi amministrativi INFN, necessari per il disbrigo delle pratiche doganali.
Il progetto della camera a drift di MEG ha quindi coinvolto in modo esaustivo un gruppo di ricercatori, ingegneri, tecnici ed amministrativi con l'ottica del raggiungimento dello scopo prefissato.

Bibliografia

[1] G. Akovali - Handbook of Composite Fabrication - Pubblicato da Rapra Technology Ltd, 2001

[2] R.Assiro, M.Cascella, F.Grancagnolo, A.L'Erario, A.Miccoli, S.Rella, M.Spedicato, G.Tassielli - Assembly techniques for Ultra-Low mass Drift Chambers - 1st Conference on Charged Lepton Flavor Violation, 6÷8 May 2013, Lecce, Italy

[3] R.Assiro, L.Cappelli, M.Cascella, L.De Lorenzis, F.Grancagnolo, F.Ignatov, A.L'Erario, A.Maffezzoli, A.Miccoli, G.Onorato, M.Perillo, G.Piacentino, S.Rella, F.Rossetti, M.Spedicato, G.Tassielli, G.Zavarise - Ultra-low mass Drift Chambers -Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A(2012)

[4] A.M.Baldini, E.Baracchini, L.Berretta, S.Bianucci, G.Cavoto, G.Chiarello, C.Chiri, F.Cei, A.Corvaglia, S.Dussoni, D.Fahrni, L.Galli, F.Grancagnolo, M.Grassi, A.Hofer, M.Hildebrandt, F.Ignatov, A.Miccoli, D.Nicolò, A.Orsini, M.Panareo, A.Pepino, C.Pinto, G.Piredda, G.Signorelli, F.Raffaelli, L.Recchia, F.Renga, E.Ripiccini, G.Tassielli, A.Tazzioli, F.Tenchini, M.Venturini, C.Voena, A.Zullo - A new cylindrical drift chamber for the MEG II experiment -Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A824 (2016)

[5] J. Barbero - Introduction to composite materials design, New York, Milton Park, Taylor and Francis, c1999.-XVII

[6] D. Brunnschweiler - The Structure and Tensile Properties of Braids- J. Textile Ind., Vol 45, T55-87, 1954

[7] G.Chiarello, C.Chiri, A.Corvaglia, F.Grancagnolo, A.Miccoli, M.Panareo, A.Pepino, C.Pinto, P.Primiceri, M.Spedicato, G.F.Tassielli -A new assembly technique of full stereo Drift Chamber for high energy physics Experiments - Advances in Sensors and Interfaces (IWASI), 2015

[8] G.Chiarello, C.Chiri, A.Corvaglia, F.Grancagnolo, A.Miccoli, M.Panareo, A.Pepino, C.Pinto, P.Primiceri, M.Spedicato, G.F.Tassielli - A new construction technique of high granularity and high transparency Drift Chambers for modern High Energy Physics experiments -Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A824 (2016)

[9] G. Chiarello - The full stereo drift chamber for the MEG II experiment Journal of Instrumentation Vol.12 (JINST 12) C03062, 2017

[10] L.De Lorenzis, F.Grancagnolo, A.L'Erario, A.Maffezzoli, A.Miccoli, S.Rella, F.Rossetti, A.Maffezzoli, G.Zavarise - Preliminary design and optimization of a component of a Drift Chamber for Mu2e Experiment - *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research* A816 (2015)

[11] F.Grancagnolo, A.L'Erario, A.Maffezzoli, A.Miccoli, M.Perillo, S.Rella, F.Rossetti, M.Spedicato, G.Tassielli, G.Zavarise - Mechanical Structure for an Ultra-light high energy physics particle Detector- International CAE Conference, Pacengo – Lazise, Verona, Italy, 2016

[12] **N.** J. Hoff**,** L.W.Rehfield - Buckling of Axially Compressed Circular Cylindrical Shells at Stresses Smaller Than the Classical Critical Value - *J. Appl. Mech* 32(3), 542-546 (Sep 01, 1965)

[13] L.R. Sanders, Braiding - A Mechanical Means of Composite Fabrication, SAMPE Q., 1977, p38–44

[14] Handbook for Composite Materials (MIL-HDBK-17)

[15] Standard Test Method for Tensile Strength and Young's Modulus for High-Modulus Single-Filament Materials. ASTM D 3379-75 (1989)

Ringraziamenti

A conclusione di questo lavoro di tesi, desidero ringraziare tutte le persone che ho avuto modo di conoscere in questo importante periodo della mia vita e che mi hanno aiutato a crescere sia dal punto di vista professionale che umano.
Un ringraziamento sentito va alla Prof.ssa Michela Simoncini, relatore di questa tesi, per la grande disponibilità e cortesia dimostratomi, e per tutto l'aiuto fornito durante la sua stesura. Ringrazio con vivo entusiasmo il mio tutor, Ing. Lucia Gentile, per il supporto incondizionato fornitomi in questi anni di studio.
Un ringraziamento di cuore va ai miei correlatori, dott. Fabio Bossi, Direttore della sezione dell'INFN di Lecce, al dott. Francesco Grancagnolo, Dirigente di ricerca dell'INFN di Lecce ed al prof. Marco Panareo, Professore di Fisica dell'Università del Salento e responsabile locale dell'esperimento MEG, che con pazienza e spirito critico mi hanno insegnato, sostenuto, consigliato ed aiutato durante tutto lo svolgimento della tesi. Gli sono grato per la stima e l'amicizia che mi hanno dimostrato e l'entusiasmo che mi hanno trasmesso per la ricerca.
Ringrazio il collega Gianluigi Chiarello, per la disponibilità ed il tempo che mi ha dedicato durante questi intensi anni di studio e durante la stesura della tesi.
Un grazie particolare va alla mia amica e collega Paola Mazzotta. Grazie Paola per la tua infinita pazienza, per avermi aiutato, sostenuto nei momenti peggiori e soprattutto per aver creduto sempre nelle mie capacità.
Non possono mancare da questo elenco di ringraziamenti tutte quelle persone con le quali ho iniziato e trascorso i miei studi, condividendo momenti indimenticabili, instaurando una sincera amicizia ed una profonda collaborazione. Sappiate che se ho raggiunto questo traguardo lo devo anche alla vostra continua presenza, per avermi fatto capire che potevo farcela, incoraggiandomi a "non mollare mai".
Non so se trovo le parole giuste per ringraziare i miei genitori e mia sorella, però vorrei che questo mio traguardo, per quanto possibile, fosse un premio anche per loro e per tutti i sacrifici che hanno fatto nel formare la persona che sono.
Infine, ma non in ordine di importanza, un pensiero è rivolto alla mia bellissima moglie Alessandra, compagna di questa straordinaria avventura che è la vita: grazie per esserci sempre, nei momenti belli ma soprattutto in quelli meno belli. Grazie per la tua infinita pazienza, per aver creduto sempre in me, trasmettendomi giornalmente il tuo amore. Un grazie particolarissimo va alle mie splendide ragazze: Chiara e Beatrice. Ragazze sono orgoglioso di voi e vi assicuro che una fetta importante di questo traguardo è stato possibile grazie anche a voi.