UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI ROMA

"LA SAPIENZA"

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Tesi di laurea di I livello in

INGEGNERIA AEROSPAZIALE

ANALISI STRUTTURALE DEL SUPPORTO MICROSTRIPS/STRAW-TUBES PER L'ESPERIMENTO DI FISICA DELLE PARTICELLE BTeV

Relatore:
Prof.
Paolo Gasbarri

Laureando:
Cristiano Pucci
Matricola 09106058

Correlatore:
Prof.
Antonio Paolozzi

Relatore esterno
Prof.
Franco Luigi Fabbri

Stage presso

INFN-LNF

(Istituto Nazionale di Fisica Nucleare-Laboratori Nazionali di Frascati)

Anno Accademico 2003/2004

INDICE

RINGRAZIAMENTI **4**

INTRODUZIONE **5**

CAP 1 IL MODELLO STANDARD E LA STRUTTURA DELLA MATERIA **8**

1.1 INTRODUZIONE 9
1.2 LA STRUTTURA DELLA MATERIA E LA SCOPERTA DELL'ANTIMATERIA 9
1.3 IL MODELLO STANDARD 11
1.4 LA VIOLAZIONE DELLA SIMMETRIA CP 17

CAP 2 IL PROGETTO BTEV **20**

2.1 IL PROGETTO BTEV 21
2.2CENNI STORICI 23

CAP 3 IL DETECTOR DI BTEV **25**

3.1 COMPONENTI DEL DETECTOR BTEV 26
3.1. 1 Beam Pipe *26*
3.1. 2 Pixel Detector *28*
3.1. 3 Ring Imaging Cerenkov Counter (RICH) *31*
3.1. 4 Calorimetro elettromagnetico *33*
3.1. 5 Sistema Muonico *36*
3.1. 6 Rielaborazione dei dati raccolti *41*
3.1. 7 Il Sistema Trigger di BTeV *42*

CAP 4 IL FORWARD TRACKING SYSTEM, MICROSTRIPS E STRAW-TUBES **47**

4.1 L' FTS 48
4.2 RIVELATORI STRIP IN SILICIO (MICROSTRIP) 49
4.2 .1 Microstrip in BTeV *50*
4.3 STRAW-TUBES 55
4.3. 1 Descrizione delle parti costituenti gli straws *57*
4.3. 2 End-plate *58*
4.3. 3 End-plugs *60*
4.3. 4 Terminali per i filamenti di tungsteno *62*
4.3. 5 Twisters *63*

CAP 5 MODULO 0 IN VISTA X: IL MOX **65**

5.1 MODULO 0 IN VISTA X: IL MOX. DESCRIZIONE 66
5.2 DUE POSSIBILI ALTERNATIVE 67
5.3 MODELLO 1 68
5.4 MODELLO 1 70

CAP 6 MODELLIZZAZIONE F.E.M. DEL MODULO MOX **71**

6.1 MESH 72
6.2 CORRETTEZZA DEL MODELLO F.E.M. 77
6.2. 1 Modello 1: prova di trazione *78*
6.2. 2 Modello 1: prova di flessione *80*
6.2. 3 Modello 1: prova di torsione *82*
6.2. 4 Validazione del modello 2 ..... *84*
6.3 CONFRONTO TRA LE RIGIDEZZE DEI DUE MODELLI 86
6.3. 1 Analisi comparata: Rigidezza assiale *88*
6.3. 2 Analisi comparata: Rigidezza flessionale *91*
6.3. 3 Analisi comparata: Rigidezza torsionale *93*
6.4 MODELLIZZAZIONE F.E.M. DEI CARICHI DOVUTI AGLI STRAW-TUBES 96
6.5 MODELLIZZAZIONE DEI CARICHI DOVUTI ALLE MICROSTRIPS 100
6.5. 1 ANALISI COMPARATA 101

CAP 7 LAVORAZIONE DEL COMPOSITO E ASSEMBLAGGIO DEL MODULO 107

7.1 LAVORAZIONE DEL COMPOSITO 108
7.2 PREPARAZIONE DEL ROHACELL® E INCOLLAGGIO DEGLI STRAW-TUBES 110
7.3 ASSEMBLAGGIO FINALE 117
7.4 CONSIDERAZIONI FINALI 120

CAP 8 CARATTERISTICHE DEI MATERIALI IMPIEGATI.....122

8.1 INTRODUZIONE.....123
8.2 I MATERIALI COMPOSITI 123
8.3 CARATTERISTICHE DEI MATERIALI COMPOSITI USATI.....125
8.4 ROHACELL® 127

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA 131

Ringraziamenti

La presente opera non avrebbe visto la luce senza l'importante contributo di tutte le persone che mi hanno assistito e fornito aiuto durante la sua stesura.

Un grazie particolare ai miei genitori, senza il cui sostegno morale, e non solo, non avrei potuto raggiungere tale importante obiettivo che ripaga me e loro anche di quegli inevitabili momenti di tensione che si sono presentati.

Grazie ad Emanuele, o meglio all'ing. Basile, per l'effettiva disponibilità dimostratami nei brevi mesi in cui abbiamo condiviso questa esperienza all' INFN.

Un ringraziamento anche al Prof. Franco Luigi Fabbri, mio relatore esterno, a Stefano Bianco e a Bruno Ortenzi per i disegni ed i render forniti.

E per finire grazie di cuore al Prof. Carlo Pelli, mio professore di Fisica e Matematica, per avermi fatto sì tanto appassionare alla matematica e alla scienza.

Volevo ricordare in questa sede anche tutti coloro che seppur non in maniera attiva e diretta, mi hanno comunque supportato e mi sono stati vicini in questo importante periodo. Tra tali persone sono i miei compagni ed ex compagni di corso Marco, Alessandro P., Federico, Emanuela, Sara e l'ing. Evandro Liani ed i miei amici Marco Z, Davide, Alessandro, Silvia, , Alessandro L., Gianmario .

Grazie anche a tutti gli amici del Primo Plotone Artiglieria del 185° corso A.U.C.

Non posso tralasciare di ringraziare tutta la mia famiglia e in particolar modo Gianni e tutti coloro (i nonni, zia Elvira e zia Carla) che non ci sono più ma che dall' alto si sono fatti pur sempre sentire.

Per concludere volevo ringraziare la persona che mi è stata vicina in tutti questi anni, Simona, per i bei momenti passati insieme come per quelli brutti e di sconforto quando le cose e soprattutto lo studio sembravano interporre ostacoli insormontabili.

INTRODUZIONE

Il presente lavoro è la sintesi di quanto svolto nell' ambito di un tirocinio formativo della durata di tre mesi presso i Laboratori di Frascati dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare.

In esso si espone l'analisi strutturale effettuata su di un supporto per rivelatori da utilizzare per l'esperimento di fisica delle alte energie BTeV.

Lo studio effettuato ha riguardato due differenti geometrie per il supporto ed è stato finalizzato a stabilire quale fosse la soluzione migliore in funzione delle caratteristiche strutturali richieste, di quelle realizzative in termini di fattibilità e di costi, nonché di quelle prettamente legate alla corretta esecuzione dell'esperimento che si riassumono nella necessità di avere della componentistica di basso peso specifico nella zona d'interazione delle particelle e quindi una ridotta massa attraversata con conseguente alta trasparenza alle radiazioni.

I requisiti strutturali, in particolare, richiedono una buona rigidezza della struttura poiché destinata a supportare rivelatori di tracking di particelle ad alta precisione da tenere in posizione fissa onde evitare di limitare la loro sensibilità con l'introduzione di indeterminazioni sulla loro collocazione.

Una buona rigidezza è comunque caratteristica di strutture massive e con bassa trasparenza alle radiazioni. L'inconciliabilità dei due aspetti è risolta quindi solo raggiungendo una soluzione di compromesso; a tale finalità viene incontro anche lo sviluppo dei materiali compositi, nati in ambito aerospaziale per soddisfare le richieste di strutture con elevate proprietà meccaniche e di rigidezza a fianco di un basso peso specifico, ed oramai utilizzati in molti altri campi tra cui anche quello della fisica.

Tali materiali soddisfano inoltre anche la richiesta di realizzare una struttura amagnetica, aspetto non meno importante della rigidezza e della buona trasparenza alle radiazioni. Questa caratteristica permette di soddisfare l'esigenza di non perturbabilità e scarsa interazione con le particelle dell'esperimento.

Per questo motivo si è pensato di realizzare una struttura composita costituita da un sandwich scatolato con pelli in pre-preg unidirezionale realizzato in epossidico con rinforzo in fibra lunga di carbonio e core in rohacell.

A complemento di quella che è la finalità principale del presente lavoro e cioè l'analisi F.E.M. del supporto in esame si riportano anche delle parti analitiche relative agli aspetti della fisica alla base dell' esperimento, ai concetti che hanno portato al suo sviluppo, all' assemblaggio finale del supporto e alle proprietà meccaniche dei materiali utilizzati.

“Esercitare liberamente il proprio ingegno, ecco la vera felicità”

Aristotele (III sec. a.C.)

Capitolo 1

Il Modello Standard e la struttura della materia

1.1 Introduzione

La ricerca sui costituenti fondamentali della materia e sulle forze che agiscono tra loro ha condotto, nel corso del '900, a risultati considerevoli, fino all'elaborazione di una teoria che descrive con buona precisione il mondo delle particelle elementari. Dalla metà degli anni 60, per i fisici è stato chiaro che la teoria tradizionale, secondo cui tutta la materia è composta da protoni, neutroni ed elettroni fondamentali, non era sufficiente a spiegare la miriade di nuove particelle osservate. Risolse il problema la teoria dei quark di Gell-Mann e Zweig. Negli ultimi trent'anni, la teoria si è arricchita e ha guadagnato crescente favore con nuove prove sperimentali ai moderni acceleratori di particelle. Oggi è nota col nome di Modello Standard delle particelle e interazioni fondamentali.

La teoria divide le particelle elementari in due classi: i leptoni, soggetti solo alle interazioni elettromagnetiche, deboli e gravitazionali, e i quarks che sono sensibili anche alle interazioni forti. Le forze tra le varie particelle sono rappresentate come scambi di quanti di energia: il fotone per le forze elettromagnetiche, i bosoni Z e W per le interazioni deboli, i gluoni per le interazioni forti, infine i gravitoni, non ancora osservati, per le forze gravitazionali.

In questo capitolo si propone una panoramica generale sulla teoria del Modello Standard e sugli interrogativi che esso ancora pone; inoltre si introducono i motivi che hanno portato alla nascita del progetto BTeV.

1.2 La struttura della materia e la scoperta dell'antimateria

È possibile suddividere tutte le particelle elementari che costituiscono la materia in due grosse categorie: i *quark* e i *leptoni*. Un quark è una particella avente carica frazionaria.

Se ne conoscono 6 tipi (o "sapori"), denominati *up* (u), *charm* (c) e *top* (t) di carica pari a 2/3, *down* (d), *strange* (s) e *bottom* (b) di carica pari a –1/3. I componenti della famiglia leptonica sono: *fotone*

(γ), *neutrino elettronico* (ν_e), *elettrone* (e^-), *neutrino muonico* (ν_μ), *muone* (μ^-), *neutrino del tau* (ν_τ), particella *tau* (τ^-).

Nel 1928 Paul Dirac, alla ricerca di una teoria che conciliasse i principi della meccanica quantistica con quelli della relatività ristretta di Albert Einstein, arrivò alla formulazione della meccanica quantistica relativistica ed ipotizzò l'esistenza dell'antimateria. Tale teoria prevede per ogni particella dotata di carica, l'esistenza di un'altra particella dotata di massa identica e carica opposta: quella che oggi viene chiamata antiparticella.

Nel 1932 Carl Anderson provò l'esistenza dell'antimateria nel corso di un esperimento volto a studiare la natura dei Raggi Cosmici.[*] Da allora le evidenze sperimentali dell'esistenza dell'antimateria si sono succedute a ritmo crescente ed attualmente la creazione di antiparticelle è un fenomeno di routine in numerosi laboratori di alte energie di tutto il mondo. Nel linguaggio usuale il simbolo dell'antiparticella è quello della particella con una barra sopra, come mostrato nello schema di figura 1.1. Quando materia e antimateria si incontrano, si verifica un completo mutamento della massa in energia; questo processo prende il nome di *annichilazione*. Secondo la teoria quantistica relativistica (QFT), la materia è costituita da particelle di materia a spin semintero dette *fermioni*, che interagiscono per mezzo di quattro forze fondamentali (forza gravitazionale, forza elettromagnetica, forza debole e forza forte), mediante lo scambio di altri tipi di particelle di campo a spin intero dette *bosoni*.

[*] In particolare, l'esperimento analizzava le tracce lasciate dalle particelle nell'attraversamento di una *camera a nebbia* (un apparato costituito sostanzialmente da una camera piena di vapore, in cui il passaggio di una particella carica viene visualizzato dall'apparire di una scia di bollicine). Fra tante tracce ordinarie, Anderson ne identificò una particolare, che corrispondeva al passaggio di una particella con massa uguale all'elettrone ma carica elettrica opposta, cioè positiva: era il primo segno tangibile dell'esistenza dell'antielettrone, che oggi chiamiamo positrone..

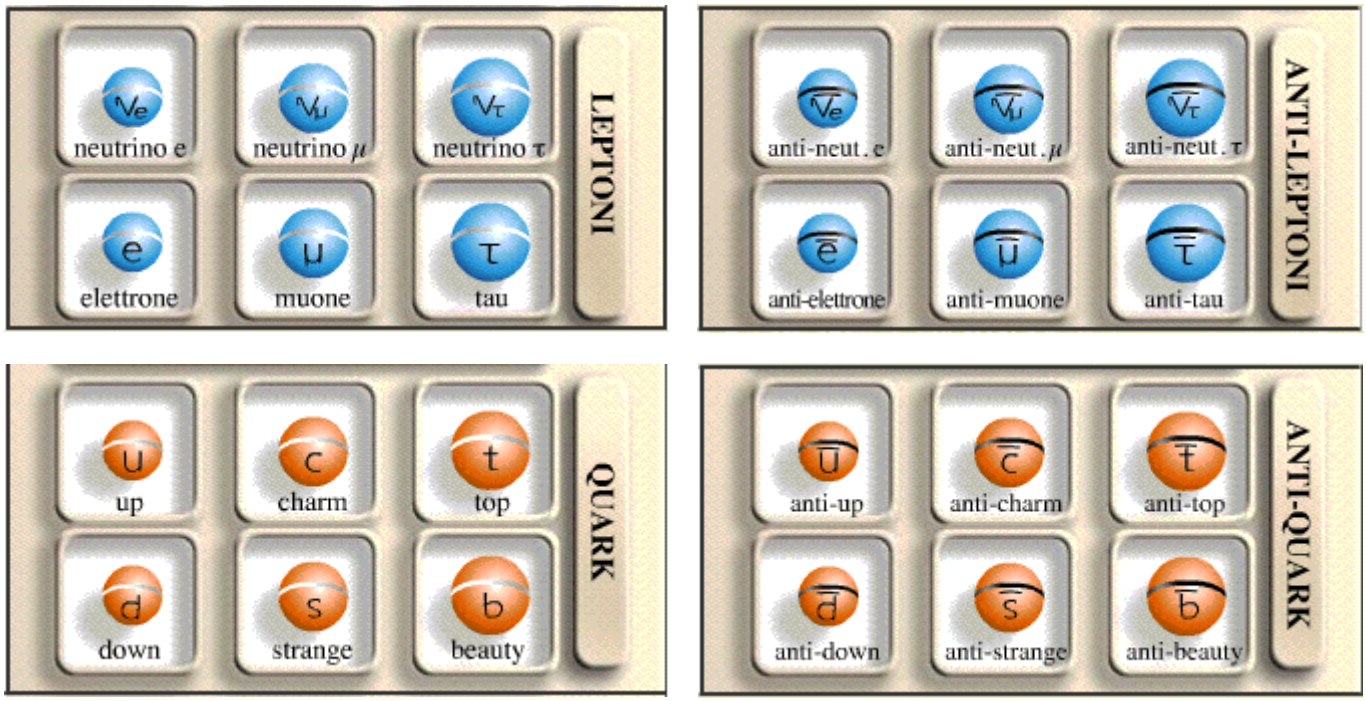

Figura 1.1: Schema riassuntivo delle particelle e delle rispettive antiparticelle

1.3 Il Modello Standard

Il Modello standard è una teoria fisica che riassume tutte le attuali conoscenze nel campo delle particelle elementari e delle forze che ne regolano le interazioni fondamentali.

La forza di tale teoria è nella capacità di descrivere tutta la materia sulla base di poche particelle ed interazioni fondamentali.

Poiché la materia è composta dalle stesse particelle, la base dello studio delle interazioni consiste nell'analisi delle leggi che regolano l'azione mutua tra tali entità; tale esame si semplifica considerando che tutte le forze conosciute si possono ridurre a quattro tipi fondamentali (interazione elettromagnetica, forza nucleare forte e debole e interazione gravitazionale).

Sino al sec. XIX si conoscevano solo due di queste interazioni, a quel tempo era già nota la forza gravitazionale. Storicamente il secondo tipo di interazione studiata fu l'interazione elettromagnetica. Il nome di quest'ultima deriva dal fatto che elettricità e magnetismo sono due diversi aspetti dello

stesso fenomeno, peraltro più complesso della gravitazione, non solo per l'esistenza di due tipi di cariche elettriche, ma anche per la dipendenza di queste interazioni dalla velocità delle particelle cariche che ne sono responsabili.

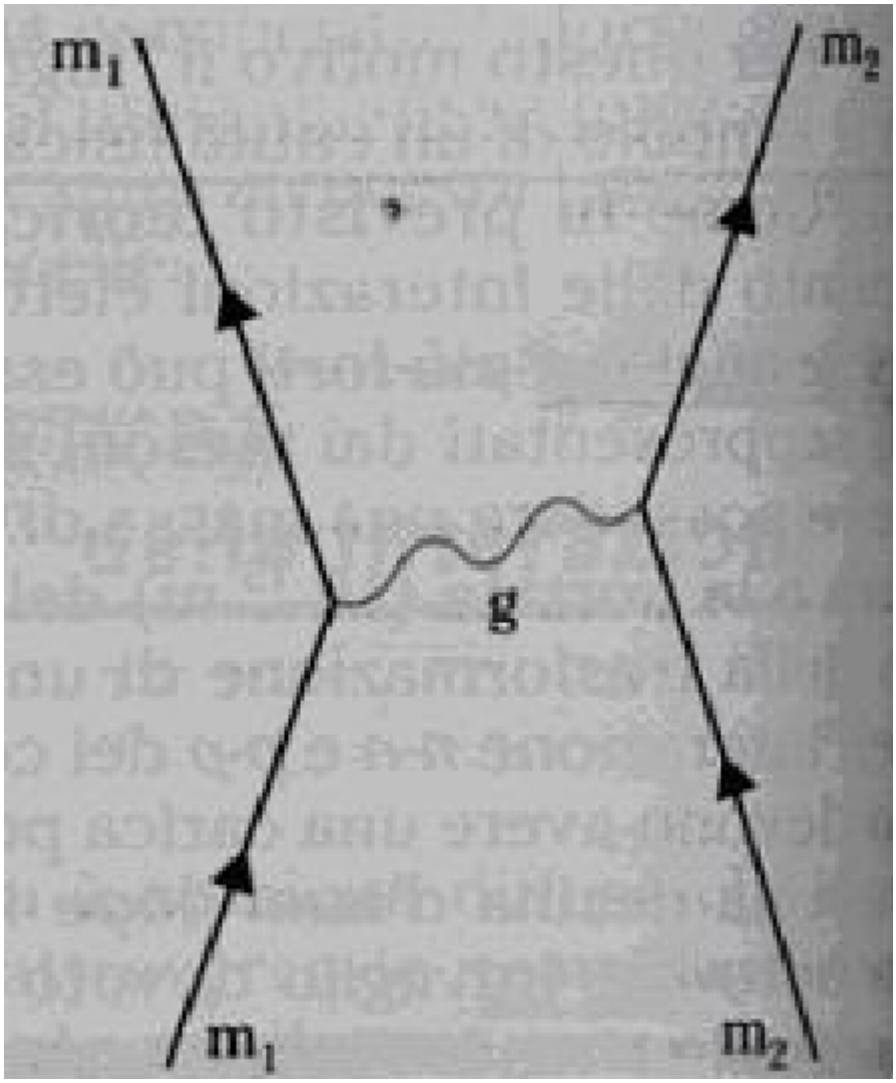

Figura 1.2 Interazione gravitazionale

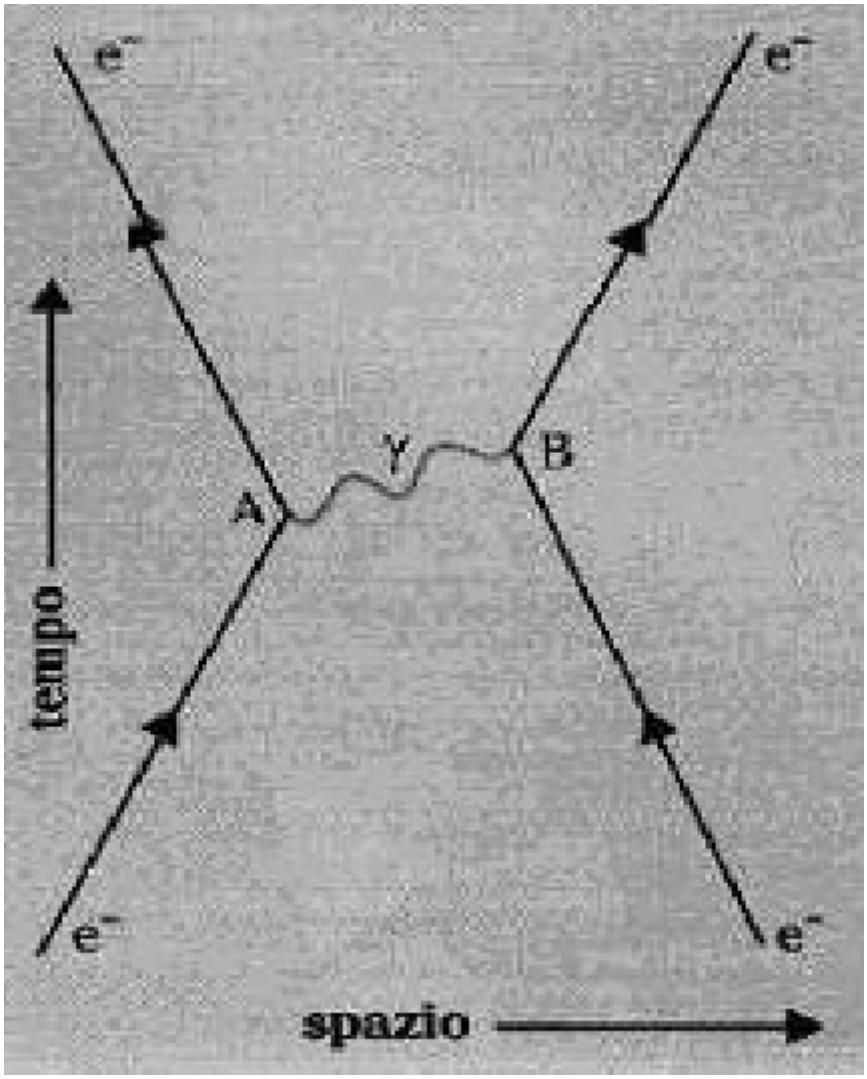

Figura 1.3 Interazione elettromagnetica

Successivamente la scoperta del neutrone implicò la considerazione delle interazioni forti; l'interazione elettromagnetica è responsabile della coesione tra gli elettroni e il nucleo negli atomi. Quando si scende alla scala del nucleo atomico, i protoni e i neutroni sono tenuti insieme da un'altra forza, l'interazione forte che impedisce al nucleo di disintegrarsi in conseguenza della repulsione coulombiana tra i protoni del nucleo. L'interazione forte non è però connessa direttamente a neutroni e protoni , bensì a uno strato di struttura più profondo al loro interno, al livello dei quark[*].

[*] L'evidenza sperimentale dell'esistenza dei quark proviene da una serie di esperimenti eseguiti alla fine degli anni Sessanta e negli anni Settanta, iniziati dai ricercatori della Stanford University in California. Questi esperimenti utilizzavano fasci di elettroni di elevata energia che venivano sparati contro i nuclei atomici. Lo studio della diffusione degli elettroni dopo l'urto con i nuclei mise in evidenza la struttura interna dei protoni e dei neutroni.

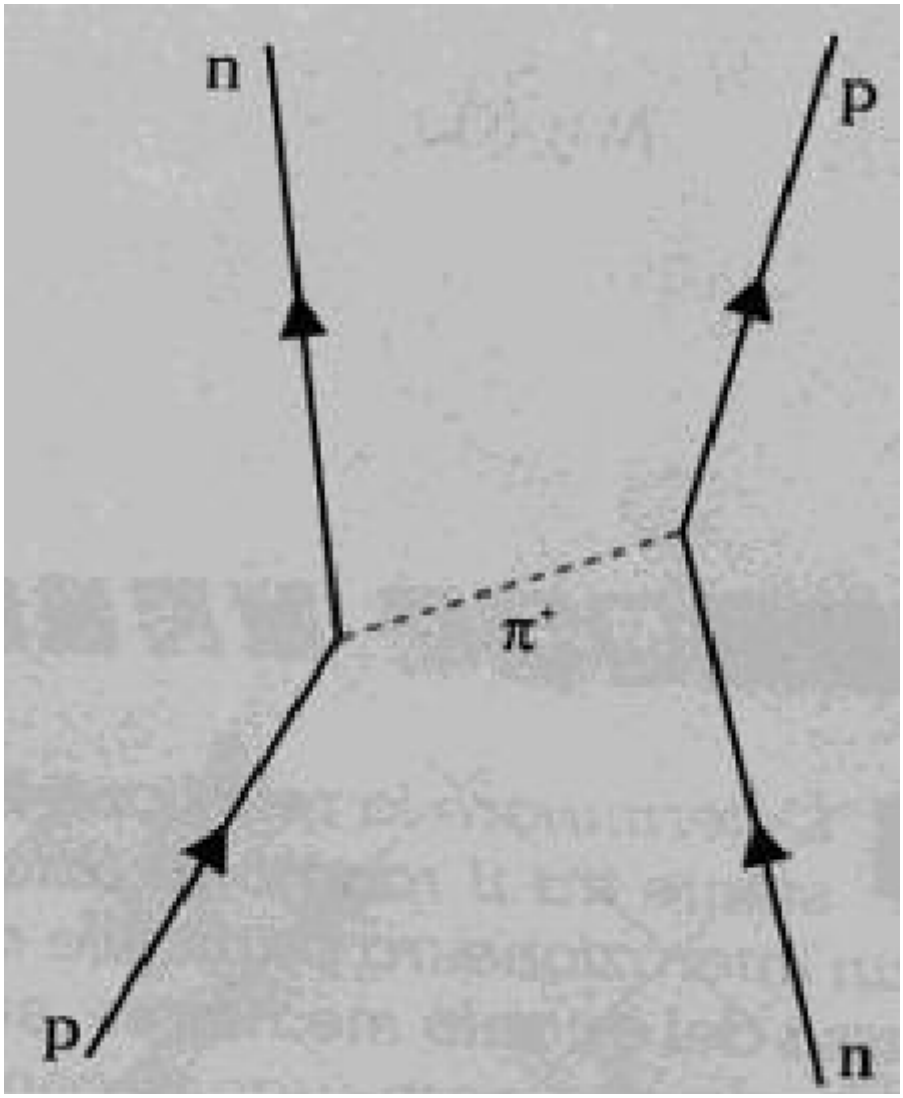

Figura 1.4 Interazione forte

Il decadimento del neutrone e l'ipotesi del neutrino indussero, infine, Fermi ad introdurre un quarto tipo di interazione: le interazioni deboli*, di intensità inferiore a quelle forti, ma sensibilmente superiore a quella delle interazioni gravitazionali ed elettromagnetiche. Tali interazioni governano il decadimento di molte particelle che interagiscono fortemente e sono responsabili del regresso di certi nuclei radioattivi. L'agente responsabile delle interazioni deboli è rimasto sconosciuto fino agli inizi degli anni Ottanta; fino a che nel 1983 il fisico italiano C. Rubbia con un gruppo di ricercatori del CERN di Ginevra scoprì le particelle attraverso le quali interagiscono le interazioni deboli,

* Una particolare manifestazione dell' interazione debole è il decadimento β. In tale processo si ha la trasformazione di un neutrone in un protone più un elettrone e un antineutrino elettrone ($n \rightarrow p + e + \overline{\nu}_e$)

individuandole nei bosoni W e Z_o Il raggio d'azione della forza debole è estremamente piccolo, al limite possiamo dire che è puntiforme, cosicché è improbabile che due particelle si trovino abbastanza vicine da sentire l'una la forza dell'altra. Il raggio d'azione della forza è così piccolo perché i bosoni W e Z_o che la mediano sono molto pesanti (il bosone W è 85 volte la massa del protone, mentre il bosone Z_o è 97 volte la massa del protone), così pesanti che è difficile per due particelle scambiarseli! Ne segue che anche l'intensità relativa delle interazioni deboli è estremamente piccola, tanto piccola che i processi di decadimento sono in generale eventi molto rari.

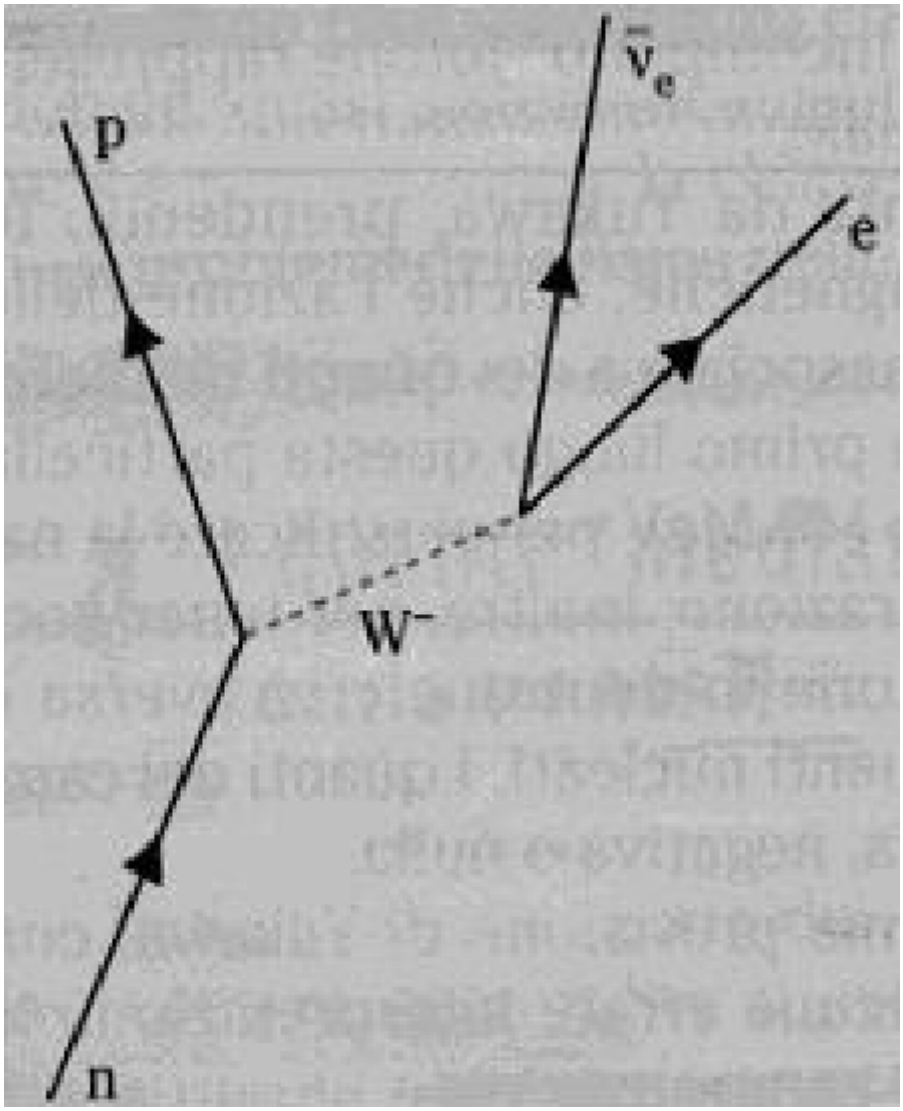

Figura 1.5 Interazione debole

E’ cercando di mettere in ordine le nuove scoperte, che i fisici nucleari iniziarono a costruire il Modello Standard, con l’intento di riuscire a spiegare tutte le interazioni con un'unica teoria. Sotto questo profilo però questo modello presenta dei limiti che ostacolano il raggiungimento dello scopo ultimo della fisica moderna. In primo luogo, pur avendo riunificato la forza elettromagnetica e quella nucleare debole, ci sono alcuni punti deboli nella teoria. I principali sono:

- non include la forza di gravità, che è l’interazione di più debole intensità
- non spiega lo spettro delle masse delle particelle
- in esso compaiono diversi parametri arbitrari
- non riunisce in un'unica teoria l'interazione nucleare forte e la forza elettrodebole, che la teoria della grande unificazione spiega con l’ipotesi che queste due forze a temperature elevate si equivalgono
- per costruire il modello è necessario introdurre i bosoni di Higgs che gli odierni acceleratori di particelle non sono ancora in grado di produrre.

Dalla scoperta dell’elettrone e delle altre particelle quantistiche, soprattutto negli ultimi cinquanta anni, c’è stato un grandissimo numero di esperimenti e analisi teoriche per rispondere a quesiti circa la determinazione dell’ultimo costituente della materia, il modo di classificare tali entità e il determinare le possibili interazioni tra loro esistenti.

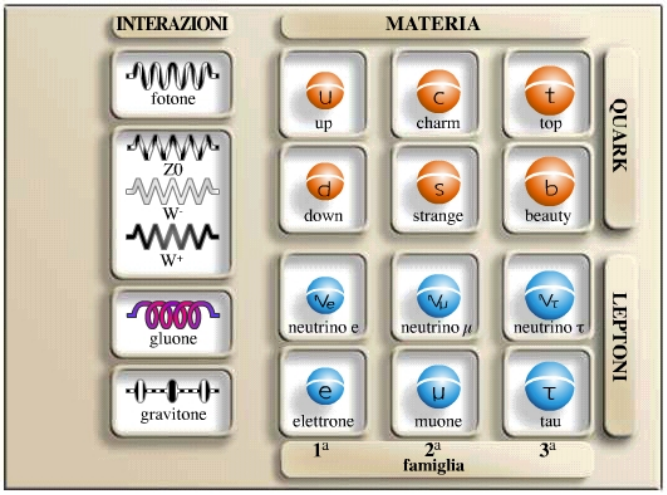

Figura 1.6 Il gravitone (interazione gravitazionale) agisce su tutte le particelle. Il gluone (interazione forte) agisce su i tutti i quark, il fotone (interazione elettromagnetica) agisce su tutte le particelle dotate di carica elettrica, quindi su tutti i quark e su *elettrone*, *muone* e *tau*. I bosoni intermedi Z^0, W^+ e W^- (interazione debole), agiscono su tutte le particelle.

1.4 La violazione della simmetria CP

Come già precedentemente detto, la differenza tra la materia ordinaria e l'antimateria risiede nella diversa carica e spin (momento angolare intrinseco) delle particelle che le compongono.

In realtà per "carica" si intende tanto la carica elettrica, che determina il comportamento di due particelle che si attraggono o respingono per effetto dell'interazione elettromagnetica, quanto caratteristiche analoghe, come la carica di colore* che determina il comportamento delle particelle nelle interazioni nucleari forti. Dunque particelle e antiparticelle, avendo massa uguale, si comportano in modo identico sotto l'effetto della forza di gravità ma si comportano in modo opposto per quanto riguarda tutte le altre forze fondamentali.

Quando particelle ed antiparticelle si scontrano tendono ad annichilirsi e a trasformarsi in radiazione elettromagnetica. Questo mette in evidenza che la materia, in accordo con quanto affermato da A. Einstein, altro non è se non una particolare forma di energia.

* La carica associata alla interazione forte, esiste in tre stati. I quark ed i gluoni sono soggetti alla una interazione forte. Leptoni, fotoni, W+- e bosone intermedio Z non hanno forza di colore e quindi non partecipano alle interazioni forti. La denominazione colore viene da una sottostante analogia la composizione dei colori in ottica.

A parità di massa libera, tale processo di annichilazione produce 1500 volte più energia della fissione nucleare e 250 volte più energia della fusione nucleare.

La meccanica quantistica relativistica, la teoria che prevede l'esistenza delle antiparticelle, richiede che se si volesse trasformare una particella nella sua antiparticella bisognerebbe cambiare oltre alla carica anche lo spin; dal punto di vista dell'orientamento spaziale, un'antiparticella si comporta come una particella vista attraverso uno specchio. Dunque la trasformazione che collega materia e antimateria è l'azione combinata dell'inversione di carica (indicata con C che sta appunto carica) e della riflessione spaziale (indicata con P che sta invece per parità), denominata nel suo insieme trasformazione di CP. Se potessimo costruire in un specchio in grado di invertire la carica, oltre alle coordinate spaziali, avremmo costruito un vero e proprio specchio materia-antimateria che mostrerebbe la *simmetria CP*. La possibilità che la simmetria CP sia rispettata da tutti i fenomeni naturali che coinvolgono materia e antimateria farebbe pensare che la natura non distingua fra le due; da ciò nasce uno dei più grandi interrogativi della fisica moderna: quale criterio ha portato alla creazione della materia e alla sua dominanza sull'antimateria?

Nel 1964, J.H. Christenson, J.W. Cronin, V.L. Fitch e R. Turlay, in un altro storico esperimento presso il laboratorio di Brookhaven, USA, che fruttò il premio Nobel nel 1980, scoprirono un particolare effetto: il decadimento del mesone K (detto anche Kaone) neutro a vita lunga in due pioni[*] (anch'esso dovuto alle interazioni deboli) viola la simmetria CP; quando altri esperimenti confermarono la violazione, si ammise che la natura, in effetti, distingue tra particelle ed antiparticelle, che non sono quindi concetti puramente convenzionali, ma assoluti. Il fisico Andre Sakharov dimostrò nel 1967 che una delle condizioni necessarie per creare l'asimmetria fra materia e antimateria che oggi osseviamo nel Cosmo è che i processi di decadimento (o più in generale le interazioni) di particelle ed antiparticelle non siano perfettamente *speculari*. Questo fenomeno è noto in gergo tecnico come *violazione della simmetria CP*, ovvero la violazione della simmetria che lega materia e antimateria.

[*] Un mesone è composto da un quark e da un antiquark, legati da gluoni; il pione è il tipo meno massivo di mesone. I pioni possono avere cariche elettriche +1, -1, o 0.

Si potrebbe affermare che la scelta per un universo fatto di materia è stata decisa negli istanti immediatamente successivi al Big Bang e la prova sarebbe proprio nella violazione della simmetria CP. Una delle spiegazioni più accreditate è che materia ed antimateria fossero presenti in origine in quantità uguali. L'eccesso della prima si sarebbe creato proprio perché le due forme di materia hanno comportamenti leggermente diversi, tali da rompere l'originaria simmetria del sistema. Per creare l'universo che vediamo oggi deve esserci stata una prevalenza della materia sull'antimateria anche solo per una frazione di secondo dopo l'esplosione iniziale; al contrario, se il comportamento fosse state esattamente il medesimo, materia e antimateria si sarebbero annientate a vicenda, sarebbero cioè annichilite scomparendo e lasciandosi dietro una scia di energia. Invece, secondo quanto ricavato da esperimenti sviluppati presso il Cern di Ginevra, Svizzera, è bastato un minimo squilibrio, una piccolissima quantità di materia sopravvissuta su tutta quella creata, per osservare oggi un universo materiale. Fra gli aspetti particolarmente affascinanti del problema vi è anche il fatto che l'asimmetria fra materia e antimateria prevista dal Modello Standard non sembra esser sufficiente per ottenere l'eccesso di materia che attualmente osserviamo nell'Universo.

Per questo motivo molti fisici ritengono che lo studio sperimentale dell'asimmetria fra materia e antimateria potrebbe aprire una finestra su interazioni completamente nuove, non previste dalle teorie attuali. Alla luce di queste nuove scoperte, la domanda sull'origine del mondo diventa ancora più incalzante e BTeV potrebbe essere la risposta.

Capitolo 2

Il progetto BTeV

2.1 Il Progetto BTeV

BTeV è un progetto il cui scopo a lungo termine è quello di realizzare studi precisi sulla violazione CP nel collider protone-antiprotone Tevatron del Fermilab di Chicago, USA; queste ricerche hanno il fine di sondare in modo accurato alcuni aspetti del Modello Standard, calcolare alcuni dei suoi parametri con estrema precisione e, in particolare, verificare la spiegazione data da tale teoria sulla violazione della simmetria CP; tutto allo scopo di fare luce sulla dominanza della materia sull'antimateria nell'origine dell'universo.

Per questo, un gruppo di ricercatori (fisici, informatici ed ingegneri) di USA, Italia, Russia e Cina ha iniziato, da alcuni anni, la costruzione del detector per un nuovo esperimento di fisica delle alte energie. Tale dispositivo, che rappresenta il primo esempio di acceleratore in linea, non solo deve essere in grado di analizzare i fenomeni di interesse, ma deve essere anche insolitamente affidabile e facile da rimodernare e mettere a punto.

La stazione di rilevazione in fase di realizzazione è un esperimento che è disegnato per sondare in modo accurato taluni aspetti del Modello Standard, calcolare alcuni dei suoi parametri con estrema precisione e, in particolare, verificare la spiegazione data da tale teoria sulla violazione della simmetria del CP. Ci si aspetta che le misurazioni effettuate rivelino le eventuali debolezze di tale modello in merito a quest'ultimo aspetto, in modo da fornire lo spunto per una teoria più generale di quella attualmente presente. I risultati serviranno a far luce sui fenomeni associati all'origine dell'universo, in altre parole come e perché il tutto sia fatto di materia e non di antimateria.

Il rivelatore BTeV è composto di:

- Un pixel detector di vertice che, oltre ad offrire informazioni offline di qualità molto alta, è usato dal trigger di Livello 1 (vedi par.3.1.7) per selezionare gli eventi di interesse. Associato al sistema di acquisizione dati permette l'accumulazione di un campione imparziale in quanto molto ricco di eventi.

- Un sistema di identificazione e per particelle che permetterà l'identificazione di mesoni K, protoni e pioni.
- Un calorimetro elettromagnetico a cristalli ad alta risoluzione che consente lo studio di precisione di eventi che contengono fotoni, pioni neutri, ed altre particelle neutre.
- Un tracciatore di eventi con microstrip di Silicio e straw tubes, il Forward Tracking System (FTS).

In BTeV avvengono 15 milioni di collisioni tra particelle ad alta energia per secondo, ognuna di queste interazioni tipicamente crea tra 10 a 100 particelle subatomiche che viaggiano attraverso il detector.

L'esperimento è progettato per esplorare le interazioni tra protone ed antiprotone nei punti posti alla luminosità di 2 x 10^{32} $cm^{-2}s^{-1}$.La sua portata di fisica, in conformità a quanto detto sinora, supera quella degli altri esperimenti in alcune di queste importanti misurazioni.

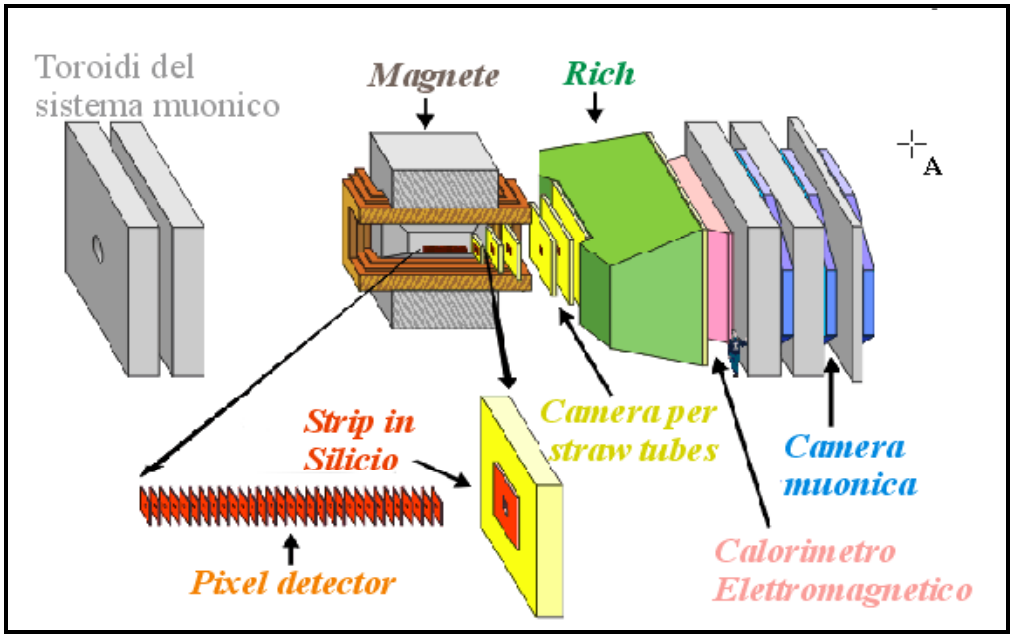

Figura 2.1 parti costituenti l'esperimento BTeV a Fermilab, secondo l'attuale progetto sta cercando di realizzare solo uno dei due bracci inizialmente previsti, la lunghezza di tale parte è di 12 metri.

2.2Cenni Storici

Dalla sua concezione nel Maggio del 1997 è subito risultato che l'esperimento BTeV fosse di elevatissimo interesse fisico. Il progetto viene quindi immediatamente sottoposto all'attenzione della direzione del Fermilab che nel Dicembre dello stesso anno lo dichiara progetto prioritario.

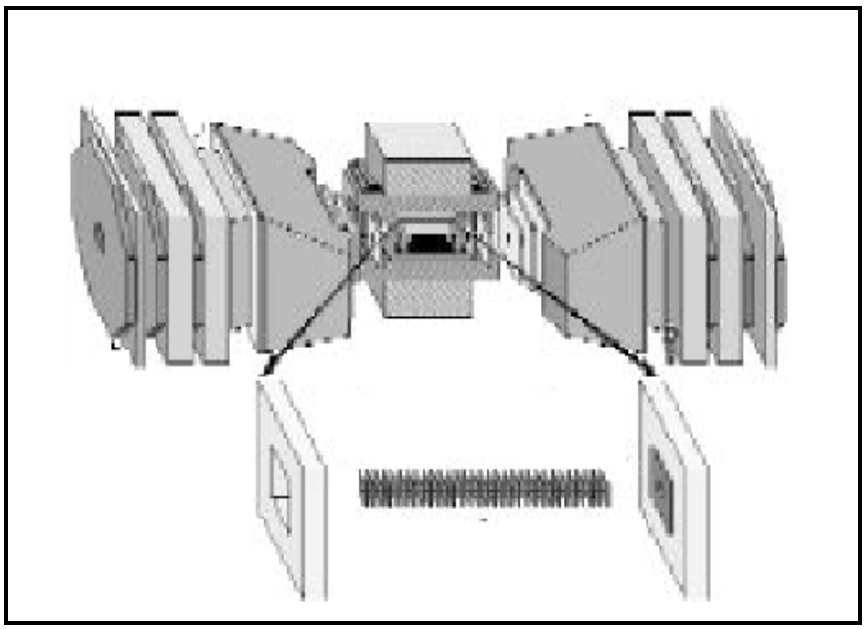

Figura 2.2 Progetto BTeV secondo la preliminare proposta del 1999, secondo tale schema sono previsti due bracci e non uno come l'attuale piano.

A Maggio del 1999 BTeV si sottopone ad un preliminare progetto con rapporto tecnico, questo rappresenta il primo documento che descrive in toto le funzioni e le parti della stazione di rilevazione a due bracci. Nel Maggio 2000 si presenta una proposta a Fermilab, l'Assemblea Consultiva dei fisici dell'istituto di ricerca, riunitasi in Aspen (Colorado) il 17 giugno 2001, ha deliberato di stanziare i fondi per realizzare tale idea, in tale occasione è stato descritto come un esperimento ambizioso con "un detector elegante e difficile", che potrebbe "essere l'esperimento definitivo che chiarifica finalmente la questione della violazione del CP". Il mese successivo, per la

sua realizzazione, sono stanziati $130.000.000, più $50.000.000 per i costi della regione di interazione e di beam-line (magneti e apparecchiature di altro genere).

In seguito ai catastrofici eventi dell'autunno 2001 l'approvazione del progetto è stata arrestata, tuttavia, a Marzo 2002 è stato presentato un aggiornamento di proposta che descrive uno spettrometro a singolo braccio. Il costo della realizzazione è ridotto a $100.000.000 e si decide di ridurre parti di beam-line spostando la loro rivelazione ad altre regioni di interazione, riducendo altresì le spese supplementari.

L'Assemblea Consultiva dei fisici del Fermilab nel Maggio 2002 riapprova all'unanimità il piano di realizzazione.

Settembre/Ottobre, 2002: Fermilab conduce un esame di costo di BTeV.

La Collaborazione BTeV è un gruppo di circa 150 fisici ed ingegneri appartenenti trentacinque università ed istituti di ricerca in Bielorussia, Canada, Cina, Italia, Russia e Stati Uniti. Quest'equipe di scienziati ha fatto un eccellente lavoro nello sviluppo delle tecnologie avanzate, necessarie a rendere l'esperimento possibile, e nella realizzazione di apparecchiature per l'analisi e la rilevazione degli eventi.

L'esperimento utilizzerà il collider di protone-antiprotone di Tevatron al FermiLab, ad ovest di Chicago, Illinois (USA), la sua costruzione dovrebbe cominciare nel 2004 e dovrebbe essere completa in tempo per prendere dati nel 2008.

Capitolo 3

Il Detector di BTeV

3.1 Componenti del Detector BTeV

Il detector BTeV, come già accennato nel capitolo precedente, si andrà a collocare all'interno di un acceleratore di dimensioni maggiori: il TEVATRON.
Le sue parti costituenti principali, mostrate nella figura sotto, sono:

- La Beam Pipe
- Il Pixel Detector
- Il Forward Tracking System (FTS)
- Il Ring Imaging Cherenkov Counter (RICH)
- Il Calorimetro elettromagnetico
- Il sistema muonico
- Il Trigger

3.1. 1 Beam Pipe

La Beam Pipe è un tubo in cui è praticato il vuoto e al cui interno viaggiano i protoni e gli antiprotoni accelerati dal Tevatron e destinati ad impattare. I materiali impiegati per la sua realizzazione devono essere tali da minimizzare le collisioni secondarie tra le particelle. A tal fine ben si prestano l'alluminio, il berillio e i materiali compositi.
La sua struttura è caratterizzata da un sandwich costituito da due pelli di alluminio di spessore 0,05 mm) con interposizione di un core in materiale espanso a base di carbonio. Tale soluzione è stata preferita ad un' altra che prevedeva un core in rohacell e due pelli in composito a matrice epossidica e rinforzo in carbonio.
Di seguito sono riportati i dati relativi alle due soluzioni

	Sandwich in composito con core in rohacell®	Sandwich in alluminio con core in rohacell®
Massa totale delle Pelli in alluminio (g/cm^2)	6,84	4,58
Massa del core (g/cm^2)	10,77	4,58
TOTALE (g/cm^2)	17,61	9,16

Tabella 3.1 Tabella riassuntiva delle masse totali per le due soluzioni costruttive della beam-pipe.

La prima soluzione prevede l'introduzione di minor massa nella realizzazione del componente. Questa sua caratteristica ne fa la più idonea ai fini dell' esperimento in termini di massa attraversata dalle particelle.

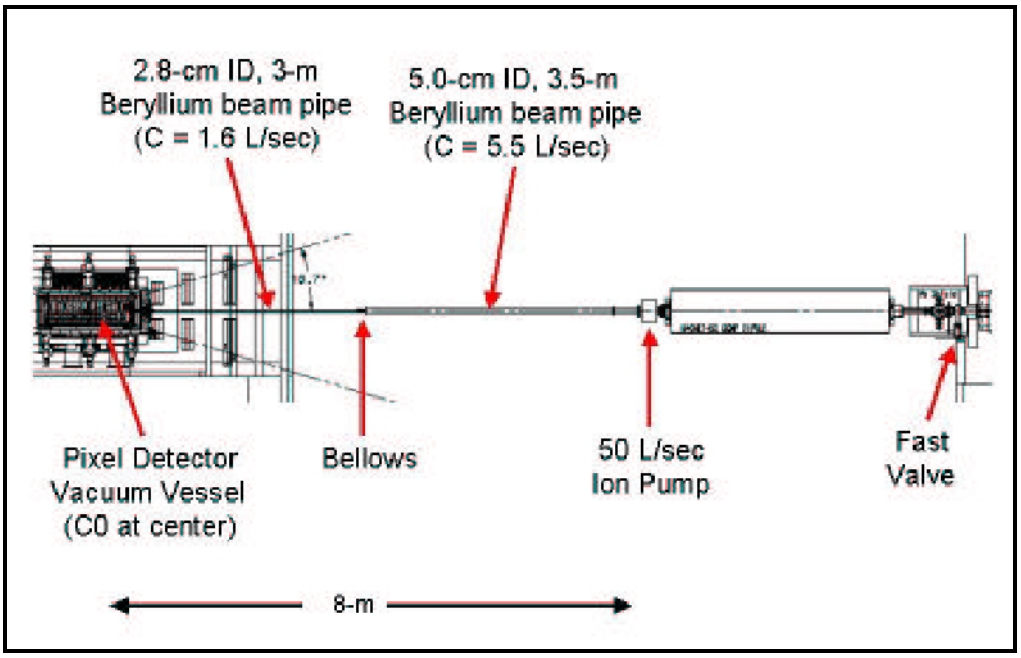

Figura 3.1 Schema della Beam Pipe

3.1. 2 Pixel Detector

Il pixel detector è collocato all'interno di un dipolo che genera un campo elettromagnetico di 1,6 T e che circonda la zona di interazione. I dati raccolti dal pixel detector verranno utilizzati per individuare le traiettorie delle particelle e ricavare i punti in cui avviene la separazione*, nel luogo preciso in cui avviene il decadimento con formazione di B_s con un'incertezza calcolata di 138 μm.

Al massimo della luminosità a cui si prevede di operare ($2 \cdot 10^{32}\,\mathrm{cm}^{-2}\mathrm{s}^{-1}$) il pixel più interno, e quindi quello più vicino alla zona di interazione sarà sottoposto ad un flusso di $10^{14}/\mathrm{cm}^2$ particelle per anno di funzionamento. Questo produrrà danni da radiazioni ad entrambe le superfici e al bulk dei pixel detectors. Per ridurre tali danni è usato del silicio a bassa resistenza con drogaggio n\p**.

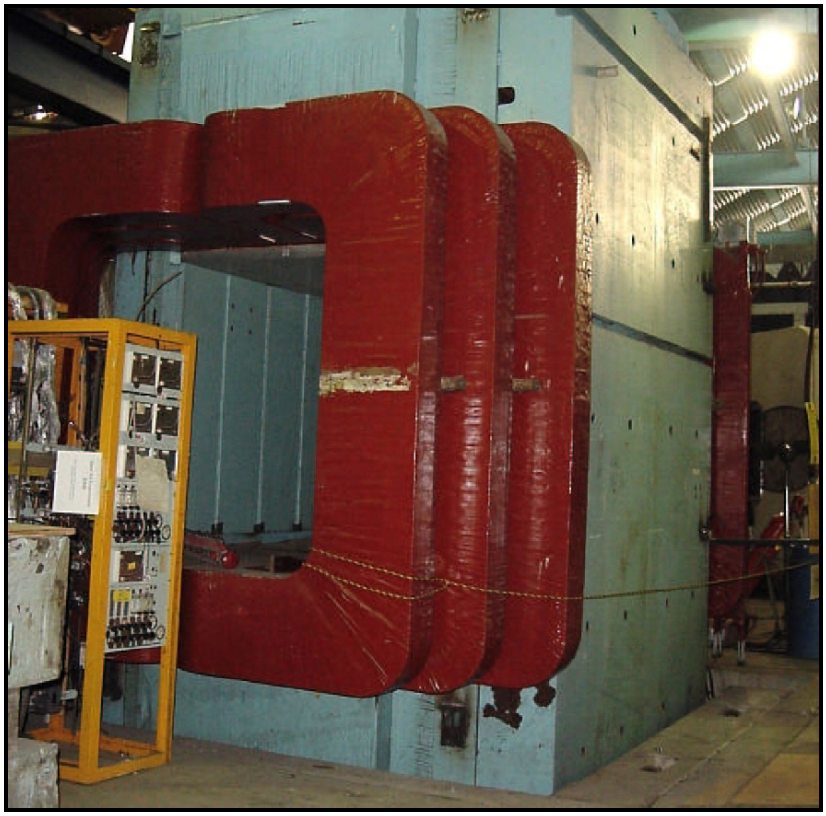

Figura 3.2 Immagine del dipolo da 1,6 T in cui verrà inserito il Pixel Detector

* detti anche punto di vertice. Il pixel detector viene indicato anche con il nome di vertex detector

** Il drogaggio consiste nell'aggiunta di impurezze a un semiconduttore con il fine di aumentarne la conducibilità. Esso può essere di tipo p (positivo) se l'impurezza ha un numero di elettroni di conduzione inferiore a quelli del semiconduttore, oppure di tipo n (negativo) se tale numero è superiore. In entrambi i casi, il movimento di cariche dovuto alla presenza di elettroni o lacune libere di muoversi determina le caratteristiche semiconduttive del cristallo.

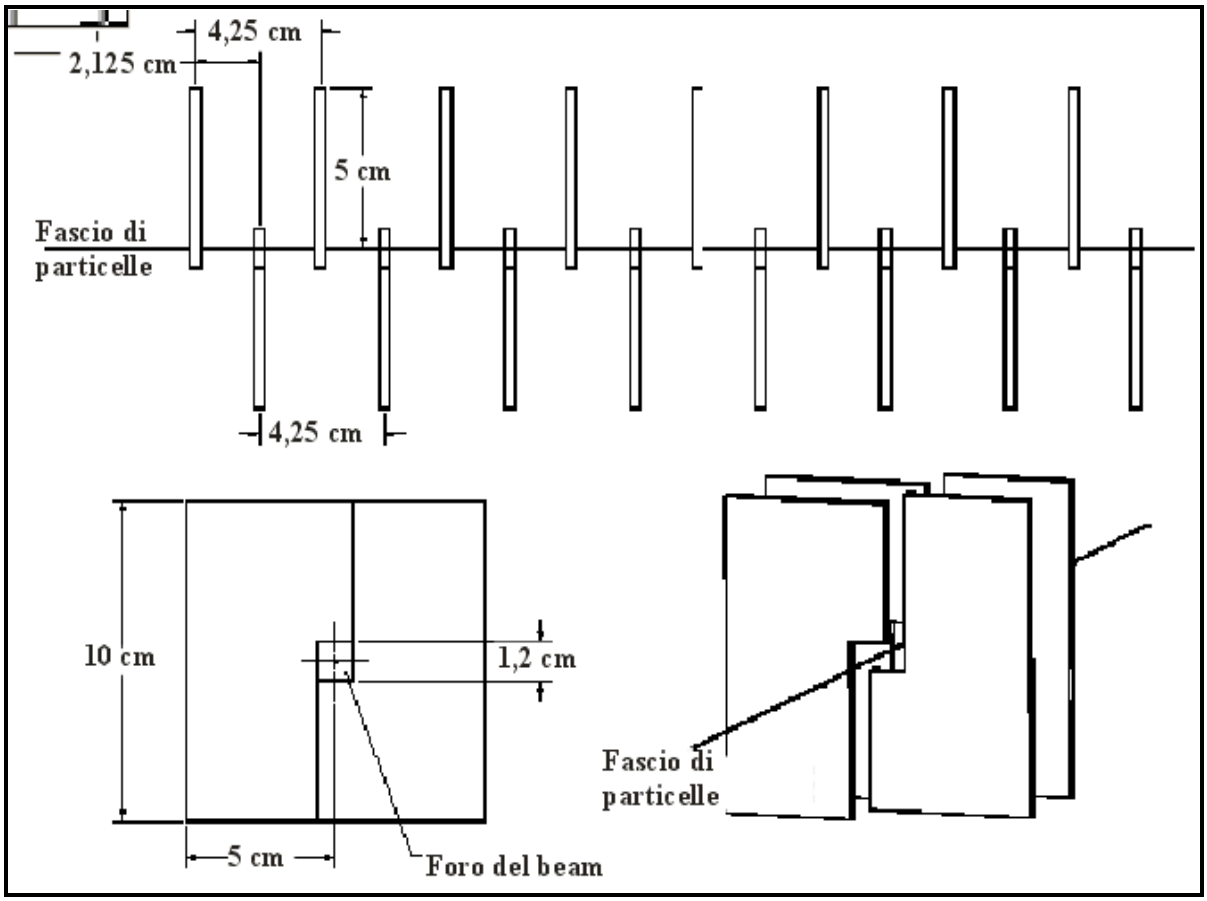

Figura 3.3 Schema del pixel detector

Il rivelatore è costituito da una serie di semipiani a forma di "L" accoppiati come in figura 2 in modo tale da lasciare al centro un foro a sezione quadrata attraverso il quale passa la beam pipe.

Ogni semipiano dista dalla beam 6mm e ricopre un'area di 0,5 m^2. In totale il rivelatore è composto da 23 milioni di pixel.

Per minimizzare il materiale tra il fascio e gli elementi attivi del pixel, il rivelatore è tenuto sotto vuoto con un sottile strato di protezione tra tali elementi e la radiazione. Anche i rivelatori sono sottili in modo da ridurre il materiale attraversato dalle particelle nello spazio che precede la prima interazione.

Il detector è provvisto di dieci anelli di guardia per permettere l'applicazione di 600 V, tensione questa necessaria per permettere una buona rivelazione di cariche anche dopo una decina di anni di continuato funzionamento. Il sistema opera a –5°C per minimizzare fenomeni di trasformazione strutturale innescati dall'energia fornita dalle cariche.

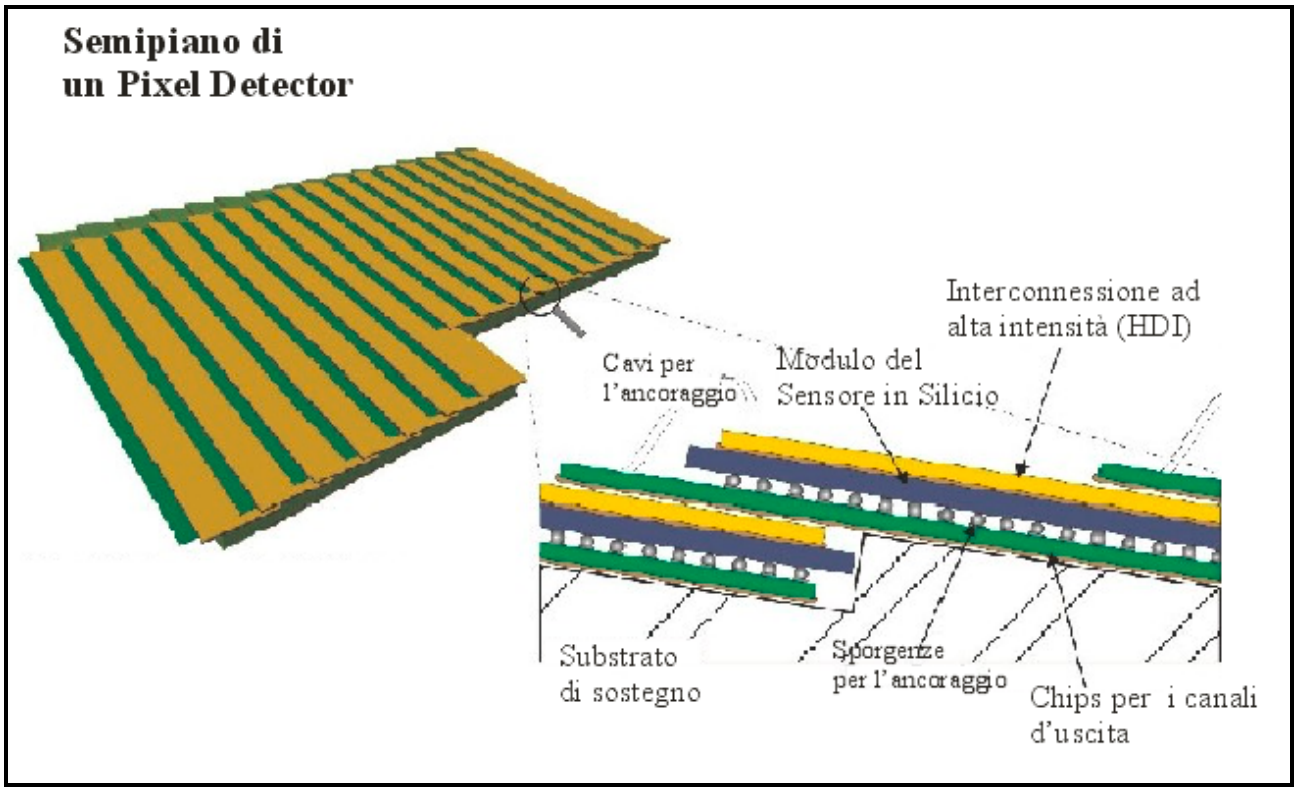

Figura 3.4 dettaglio del semipiano del pixel detector

Per realizzare tale condizione operativa è previsto un sistema di raffreddamento realizzato in materiale a base di carbonio.

Il pixel detector è impiegato per identificare gli eventi nei quali è possibile che, in seguito al decadimento delle particelle coinvolte, si sviluppino quarks di interesse per l'esperimento. La scelta delle interazioni interessanti, e la conseguente eliminazione di quelle non in grado di dare le particelle cercate, è eseguita da un algoritmo matematico di selezione basato sulla misurazione del corto tempo di vita dei quarks generatisi e dalla misurazione dei parametri di urto, essendo questi ultimi maggiori rispetto a quelli delle altre collisioni. Il modello di accettazione dati è arricchito tenendo presente che ci sono due tipi di decadimento di interesse, entrambi in grado di dare un allargamento dei segnali rilevati.

Il sistema trigger è in grado di determinare il punto di interazione tra protone ed antiprotone per ogni singolo evento che avviene nella zona di interazione in una regione di circa 30 cm^2. Grazie ai particolari algoritmi di analisi messi a punto appositamente per BTeV è possibile avere

un'eliminazione del 99% degli eventi non desiderati ed un'efficienza di rilevazione superiore al 50% per quei decadimenti che generano B_s.

3.1. 3 Ring Imaging Cerenkov Counter (RICH)

Si tratta di un contatore anulare basato sull' effetto Cerenkov* ed è utilizzato per distinguere le trasformazioni delle quantità di materia. Dall' angolo di apertura del cono di radiazione si misura la velocità con cui la particella lo attraversa e determinando in modo indipendente la sua quantità di moto (p=mv) è possibile determinarne la massa.

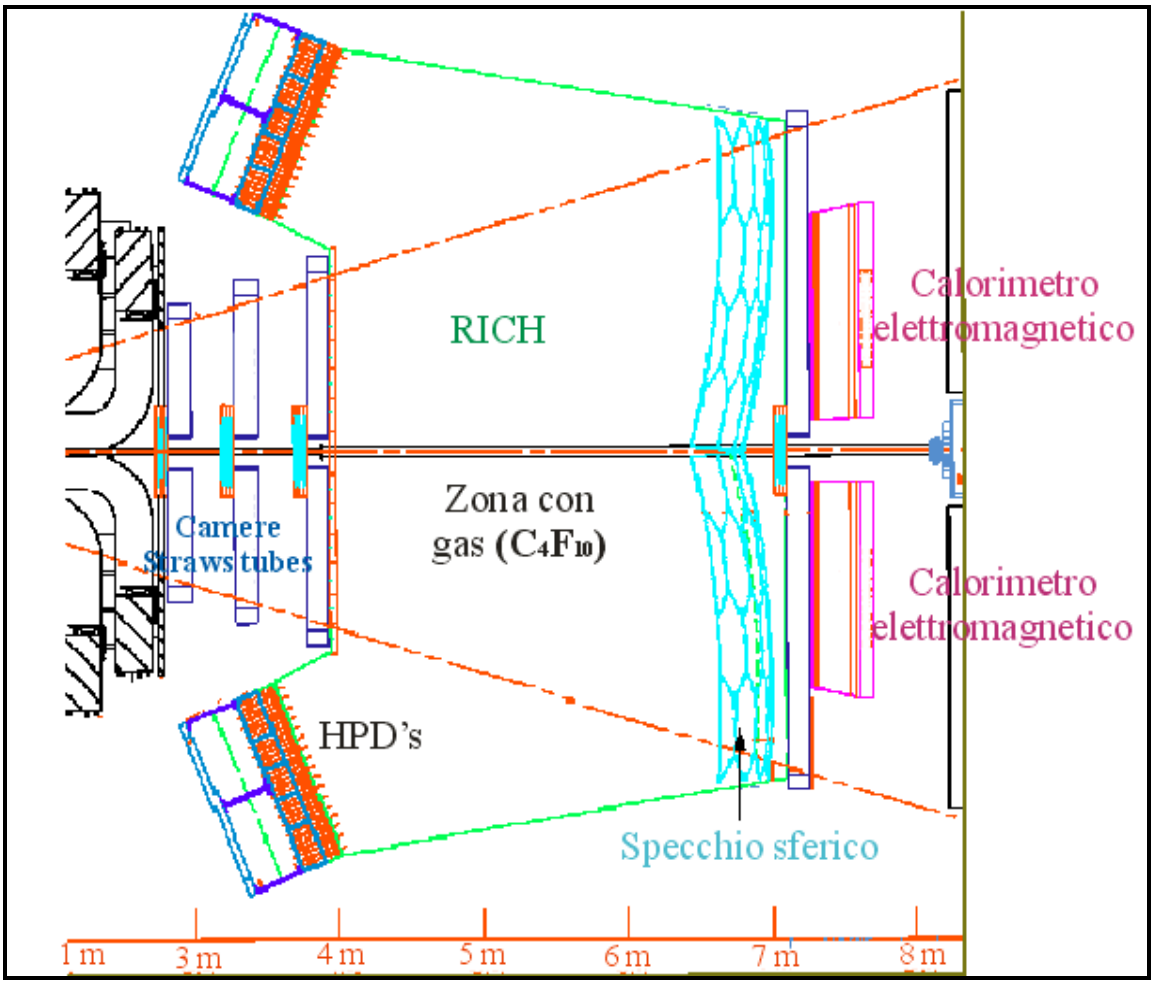

Figura 3.5 Pianta del RICH

*Cerenkov scoprì l'emissione luminosa dovuta a una particella che attraversa un mezzo a velocità superiore a quella della luce.

Il RICH è collocato a valle del dipolo elettromagnetico che racchiude il pixel detector e provvede all' identificazione di adroni* e leptoni fino alla totale apertura del detector che è di 300 mrad; ciò è fondamentale dal momento che il sistema muonico e il calorimetro elettromagnetico non coprono l'intero angolo solido.

E' costituito da due sistemi indipendenti; il sistema principale è composto da una camera riempita con gas C_4F_8O. Nel gas, utilizzato quale mezzo di trasmissione, le particelle producono luce, riflessa da uno specchio sferico su di una griglia di fotorivelatori sensibili a lunghezze d' onda nell' intervallo 280-600 nm. Tali fotorivelatori possono essere costituiti o da tubi fotomoltiplicatori multianodo (MAPMT, multi-anode photomultiplier tubes) o da un apparato di diodi fotografici ibridi (Hybrid Photo Diodes o HPDs). L'MAPMT ha forma quadrangolare con lati di lunghezza 1" (2,54 cm) e dispone di 16 canali mentre l'HPD ha sezione circolare con un diametro di circa 6,8" (17,27 cm). Entrambe i sistemi rivelano lo stesso numero di fotoni Cerenkov, ma attualmente il MAPMT è meno costoso e di più facile utilizzo. Inoltre quest'ultimo è stato recentemente sottoposto ad un programma di upgrade.

Il secondo sistema, posto dinanzi alla camera contenente il gas C_4F_8O ed utilizzato principalmente per distinguere kaoni e protoni al di sotto di 10 GeV/c, utilizza come mezzo di tramissione C_5F_{12} liquido.

I fonorivelatori utilizzati per questo secondo sistema sono tubi fotomoltiplicatori monoanodici (PMT single-anode).

La temperatura operativa del RICH deve essere tenuta al di sotto dei 28°C, altrimenti il liquido entra in transizione gassosa. La temperatura non deve essere necessariamente uniforme in tutto il RICH tuttavia le variazioni della stessa devono essere tenute entro i ±2°.

* Gli adroni sono una famiglia di particelle interessate dall'interazione forte. Sono suddivise in adroni bosonici (mesoni) e adroni barionici (fermioni)

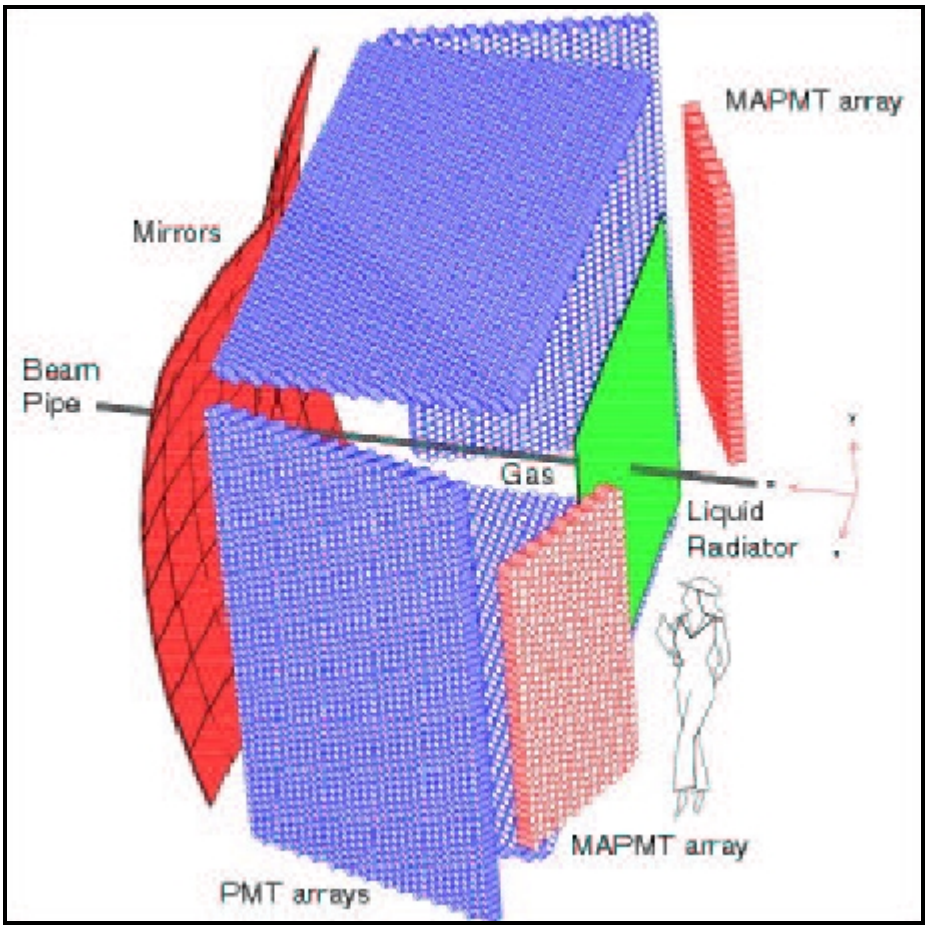

Figura 3.6 Vista dei componenti principali del RICH

3.1. 4 Calorimetro elettromagnetico

Il calorimetro elettromagnetico è costituito essenzialmente di cristalli scintillanti di tungstato di piombo. Tali cristalli hanno l'importante proprietà di rivelare l'energia incidente con un rendimento ben superiore a quello di qualsiasi altro materiale. A questo si accompagna inoltre un' ottima risoluzione spaziale. Essi possiedono inoltre una bassa densità, caratteristica che li rende particolarmente idonei,in termini di massa introdotta, all' impiego. A differenza di esperimenti affini, che adoperano gli stessi rilevatori, il Tevatron non è posto in un campo magnetico molto intenso, è quindi possibile accoppiare questa sensoristica con un sistema di trasmissione operante con dei tubi fotomoltiplicatori a finestre di quarzo piuttosto che con fotodiodi o fototriodi a cascata

o sotto vuoto[*]. Questa scelta dovrebbe portare ad avere una riduzione del rumore di fondo ed un miglioramento del potere risolutivo dello strumento apprezzabile soprattutto alle basse energie. Entrambe le considerazioni trovano riscontro empirico nei test Monte Carlo praticati in fase di messa a punto di tali apparecchiature.

I cristalli di $PbWO_4$ sono attualmente prodotti in Russia presso Bogoroditsk al centro BTCP[**] ed in Cina, all'SIC[***] di Shanghai, analoghi sensori sono usati nell'acceleratore russo U70 di Protvino costruito nel 2001. Secondo misurazioni sulla sensibilità eseguite su tale componente si ha produzione di 5000 fotoelettroni ogni GeV di radiazione incidente per cristallo, costituito da 1000 unità di $PbWO_4$. Quando un elettrone, avente un'energia variabile entro l'intervallo 1÷45 GeV, impatta contro una superficie di 4x4 mm^2 di cristallo si riesce ad avere un rendimento di rilevazione massima del 76%. Tale valore è tuttavia minore se aumenta l'angolo di incidenza tra la normale alla superficie e la direzione di incidenza del fascio.

Le dimensioni e dei sensori usati per il Calorimetro Elettromagnetico sono:

- Spessore 27,2x27,2 mm^2 nella parte anteriore, 28x28 mm^2 nella parte posteriore;
- Lunghezza 22 cm (25% della lunghezza di radiazione X_0).

Il campo di radiazione prodotto dal $PbWO_4$ è fortemente influenzato dalla temperatura, per evitare oscillazioni di segnale dovute a questo effetto, i cristalli sono posti in un box trasparente alle radiazioni ed isolato termicamente. All'interno di questa camera stagna è fatta circolare una miscela al 70% di Argon e 30% di Isobutano. Il controllo della temperatura è eseguito grazie all'ausilio di un criotermostato con una tolleranza di errore dei ±0.1°C. Per effettuare un controllo sulla

[*] L'impiego di diodi o triodi, ottenuti dall'accoppiamento di, rispettivamente, due e tre semiconduttori drogati opportunamente, è l'unica soluzione, almeno per l'attuale stato dell'arte, da usarsi alla presenza di campo magnetico molto intenso. La creazione di un gap di portatori di carica nella zona posta a ridosso della superficie di contatto tra le superfici, risulta essere abbastanza stabile e non risente della presenza di eventuali campi magnetici esterni. Non si può dire lo stesso per il fotomoltiplicatore.

[**] Bogorodits technochemical plant.

[***] Shanghai Institute of Ceramics.

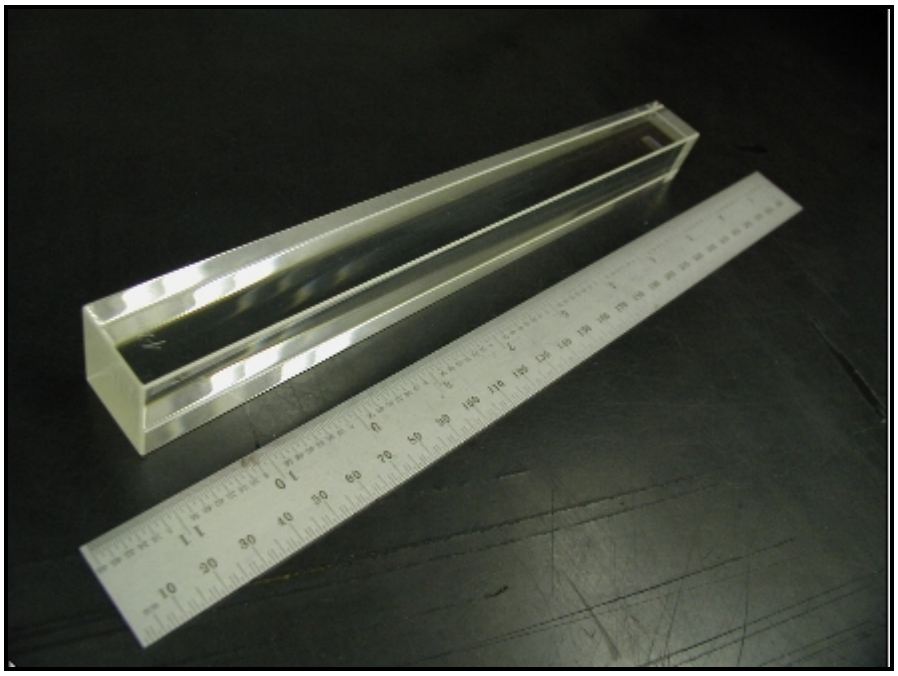

Figura 3.7 Cristallo di $PbWO_4$ costituente il calorimetro elettromagnetico, la lunghezza è di 22 cm.

stabilità termica si adoperano 24 distinti sensori di temperatura posti sia nella parte anteriore sia posteriore dei vari cristalli.

Il sistema di acquisizione dati, la cosiddetta elettronica, è costituito, come detto, da dei fototubi, accoppiati otticamente con i cristalli e gestiti da transistori ad alto voltaggio. Il segnale rilevato, con tempo di risposta di 150 ns, è inviato ad un pannello posto nella stanza di controllo per l'amplificazione e una prima discriminazione. Per evitare la creazione di non graditi effetti loops con il box della camera criotemostatata, bisogna evitare che ci siano contatti tra queste parti.

Il sistema di acquisizione dati è controllato da PC, la cui struttura prevede:

- Un dispositivo per la lettura dei cristalli*;
- Dei moduli per la misurazione delle regolazioni dei segnali nelle camere da vuoto**;
- Trigger logici per il controllo e la gestione della raccolta dati.

* Questo dispositivo è denotato CAMAC.
** La loro dizione corretta è moduli TDC.

	Valori
Densità (ton/m^3)	8,28
Massa attraversata (cm)	22,4
Indice di rifrazione	2,30
Coefficiente di Dilatazione termica (%/°C)	-2

Tabella 3.2 Caratteristiche del PbWO4, valori di letteratura.

Tale sistema usa una piattaforma Linux, il software, chiamato HISTOSCOPE, è usato sia come supporto per il controllo dell'analisi, sia per uno studio on-line dei dati. Per avere degli esami più dettagliati e per la realizzazione di un archivio si adoperano dei processori di appoggio esterni alla linea di controllo.

La revisione dei dati include: check-up termico, esame del voltaggio e monitoraggio dell'elettronica di alimentazione del calorimetro, verifica del corretto posizionamento della struttura, controllo dei fototubi per la rilevazione del segnale.

Il prototipo di questo calorimetro è stato sviluppato a Bogoroditsk, in Russia, ed a Shanghai, in Cina; le misure sono prese facendo riferimento al campione posto nell'acceleratore di Protvino, in Russia, in grado di generare un fascio energetico di intensità oscillante tra 1 e 45 GeV.

3.1. 5 Sistema Muonico

Il sistema muonico ha un ruolo importante negli obiettivi del progetto BTeV, le sue funzioni sono principalmente due: la prima è l'individuazione, come fa anche il trigger di vertice, di quegli eventi contenenti leptoni μ*.

* La loro dizione corretta è moduli TDC.

Caratteristiche del sistema muonico sono:

- Robustezza, realizzazione di una struttura molto rigida per avere un corretto posizionamento dei suoi costituenti;
- Grande quantitativo di carica accumulabile, la capacità deve essere dell'ordine di alcuni kHz/cm^2 per avere una buona analisi dei dati;
- Creazione di un campo magnetico mediante la presenza di due campi toroidali di intensità di 1,5 T aventi uno spessore di 1 m;
- Basso tempo morto: tempo di ricostruzione di un evento 50÷60 ns;
- Alta risoluzione spaziale, generalmente 2, 3 mm di errore nella ricostruzione del tracking delle particelle;
- Ridotto ingombro longitudinale, necessità dettata da limiti costruttivi dell'intero acceleratore;
- Bassa suscettibilità ai neutroni;
- Uniformità dello spazio occupato e riduzione della massa introdotta specie se concentrata.

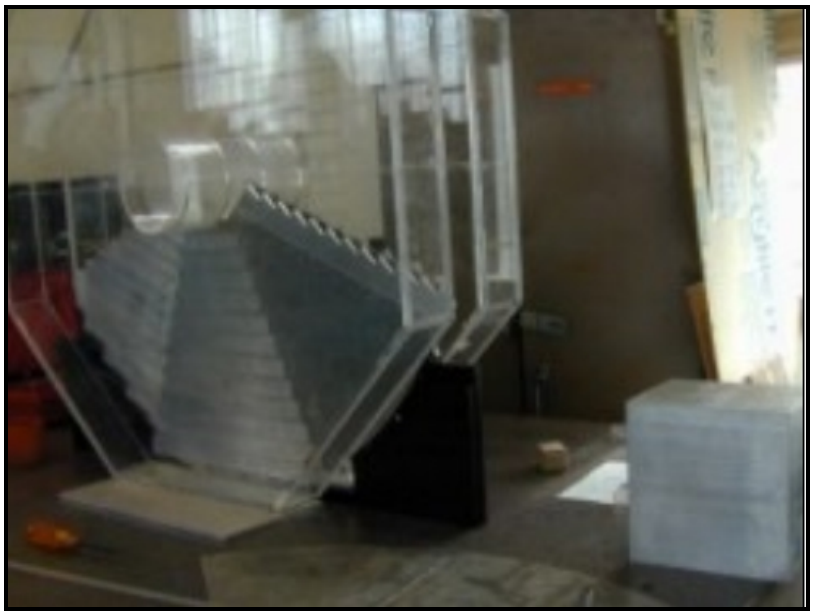

Figura 3.8 Prototipo di una stazione del sistema muonico parzialmente montato, si notino in basso i tre ottanti con le diverse orientazioni dei tre assi a 0°; 22,5° e –22,5° rispetto all'orizzontale.

Il corpo base del complesso del detector è un piano costituito da 32 tubi proporzionali in acciaio inossidabile con diametro di 9,52 mm disposti in un doppio strato con uno sfasamento di mezzo tubo tra loro e tenuti assieme in due o tre punti da dei nastri di alluminio. Questa struttura realizza un blocco con un'alta rigidità in grado di autosostenersi. I tubi proporzionali , di spessore 0,25 mm, sono adoperati nel corpo del detector perché robusti ed aventi la necessaria capacità di accumulare carica, oltre ad un basso grado di danneggiamento con esposizione continuata alle radiazioni ed ad un bassa probabilità di errore.

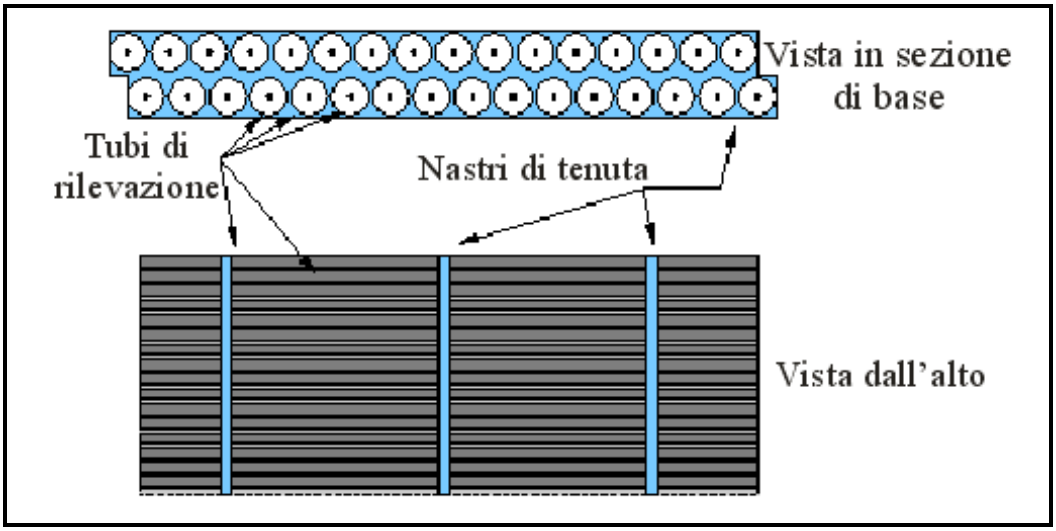

Figura 3.9 Pacchetto tubi del sistema muonico, sezione di base e prospettiva dall'alto.

Questi tubi sono riempiti da un miscela di gas (88% Argon, 1% CF_4 e 2% di CO_2), caratterizzato da un bassa viscosità, e la velocità di flusso è di 9 cm/μs, in questo modo il tempo massimo di rilevazione del segnale si è stimato essere dell'ordine di 60 ns.

Per minimizzare lo spazio occupato, ogni stazione è costituita da otto strati sovrapposti e forma un ottagono, ogni ottante* è un'unità singola ed è sospesa al supporto esterno. Ognuno di questi settori ha tre ordini di tubi disposti secondo tre diverse orientazioni, tra un ordine ed un altro è

* E' definito ottante una sezione avente la forma di un triangolo isoscele con vertice nel centro dell'ottagono e per base un suo lato. Ogni stazione ha otto ottanti.

posto un sottile foglio di alluminio in modo da riuscire parzialmente a filtrare le radiazioni. I tre assi di cui si faceva cenno in precedenza sono disposti a 0°, 22,5°, -22,5° rispetto al piano orizzontale, il terzo asse da ridondanza nella rilevazione della posizione, in studi particolari questa coordinata aggiuntiva è in grado di dare migliori risultati. La scelta dell'angolo di orientazione degli assi a ±22,5° è stata fatta sulla base di tests effettuati su prototipi condotti soprattutto con il metodo Monte Carlo. L'avere una forma ottagonale permette al rivelatore di rimanere molto vicino alla beam-pipe ed avere una distribuzione di massa uniforme all'interno dell'acceleratore.

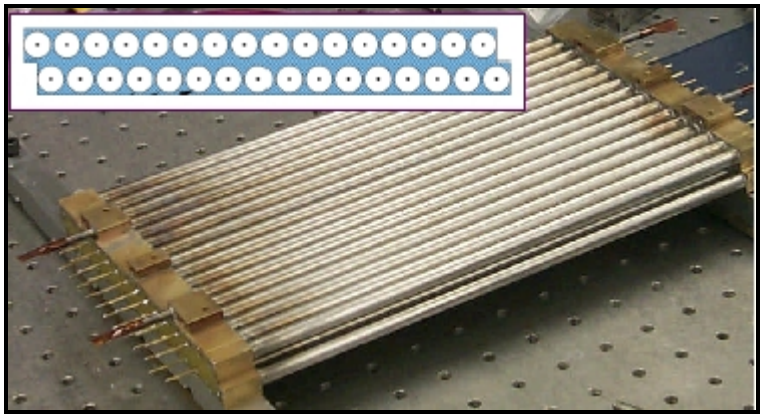

Figura 3.10 Tubi proporzionali pronti per il montaggio nel sistema muonico, in alto la loro disposizione su un piano trasversale alle basi.

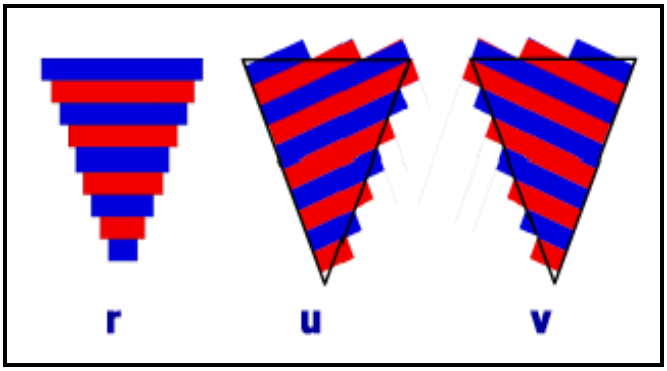

Figura 3.11 Disposizione dei piani di tubi in ogni ottante, gli angoli sono di ±22,5° rispetto all'orizzontale.

Ogni settore ha 15 piani per vista, 32 canali per piano, 1440 per ogni ottante (15x32x3), in ogni stazione di rilevazione ha 11520 piani e in ogni braccio ci sono 34560 piani. Ogni stazione ha un peso tra le 1,5 e le 2 tonnellate. Il tubo più lungo ha una lunghezza di 19,68 metri con un diametro di 20÷50 μm. Verifiche effettuate hanno dimostrato che non sono necessari supporti meccanici per tenerlo in posizione all'interno dell'ottante.

Spessore tot. per singola stazione	Numero tot. di canali per braccio	Numero di ottanti Per stazione	Numero di canali Per singolo ottante (da 3 piani)	Risoluzione spaziale
200 mm	35000	8	1440	1,5 mm
Distanza tra i tubi	Diametro dei tubi per La rivelazione	Dimensione dei Singoli piani	Apertura angolare Per singolo ottante	Intensità del campo Magnetico toroidale
5 mm	10 mm	20 m^2	0,2 rad	1,5 T

Tabella 3.3 Tabella riassuntiva caratteristiche sistema muonico.

Mediante le analisi Monte Carlo si è anche cercato di valutare il margine di errore accettabile dal trigger. Per ottenere una qualità accettabile si deve avere una percentuale di errore non superiore al 10%.

Il segnale raccolto è elaborato ed amplificato da un apposito sistema ed inoltre è convertito in digitale per una successiva analisi o un suo immagazzinamento in apposite banche dati di cui si fa cenno in seguito.

3.1. 6 Rielaborazione dei dati raccolti

Per questa stazione di rilevazione sono state proposte delle metodologie e delle apparecchiature costituite principalmente da sistemi di computers in grado di fornire in tempo reale le seguenti performances:

- Raggiungere prestazioni di calcolo molto alte attraverso l'uso di architetture hardware impiegate in parallelo;
- Raggiungere e mantenere l'integrità dei dati attraverso l'esame gerarchico ed il loro controllo;
- Facilità di messa a punto;
- Possibilità di essere migliorabile e riconfigurabile dinamicamente.

Per ricostruire 15 milioni di interazioni di particelle al secondo e decidere quali eventi sono da trattenere per l'ulteriore analisi, è richiesto il parallelo di un massiccio, quanto eterogeneo, quantitativo di risorse di calcolo. Il software, da impiegare per questo tipo di sistema incorporato operante in tempo reale, ha creato problemi nel campo dell'informatica e della pianificazione dei dispositivi la cui soluzione può avere applicazione anche in altri settori. Le caratteristiche di tali calcolatori sono di far lavorare l'hardware di più computers in contemporaneo e di avere un'elevata velocità nell'elaborazione dei dati, tal esigenza nasce perché BTeV produce un numero molto grande di dati tra loro interconessi da elaborare in tempi brevi.

L'architettura del sistema è composta di migliaia di microprocessori come il DSPs[*] o l'FPGAs[**] connessi da reti ad alta velocità.

[*] Digital Signal Processors, sono dei Microprocessori a Segnali Digitali.
[**] Field Programmable Gate Arrays, è un Campo Programmabile per l'accumulo dei dati.

Altri aspetti importanti sono la possibilità di raccogliere ed immagazzinare dati per lunghi periodi e rendere tali informazioni estremamente disponibili ed accessibili, anche a distanza, questo perché eventi, se pur rari, possono essere di notevole interesse.

La realizzazione di una struttura di tale entità richiede lo sviluppo di un apparato di acquisizione dati con sistemi incorporati, si è sviluppato circa il 5% di tale complesso nel 2002, si conta di portarlo a termine tra il 2005 ed il 2006, tuttavia saranno possibili ulteriori ottimizzazioni quando BTeV sarà operativo.

Per la realizzazione di tali apparati, è necessaria la collaborazione interdisciplinare tra sperimentatori ed esperti di computers venuti da università ed istituti di ricerca facenti parte della collaborazione BTeV.

Molte domande di sistemi incorporati operanti in tempo reale richiedono prestazioni computazionali e disponibilità alte. La fisica delle alte energie è solamente una delle tante discipline che devono raccogliere e analizzare quantitativi enormi di dati in tempo breve e continuare ad operare anche se si verificano condizioni anomale o errori. Dal momento che si prevedono margini di sviluppo notevole nei prossimi anni nel campo dei sistemi integrati, la ricerca svolta deve essere estremamente disponibile, facilmente aggiornabile e correggibile per tutta la durata dell'esperimento in modo da potersi avvalere degli ultimi ritrovati nel campo dell'informatica.

3.1. 7 Il Sistema Trigger di BTeV

BTeV genererà un ammontare enorme di eventi, approssimativamente 1500 Mbytes/s di dati; i fattori, che contribuiscono a generare questa percentuale di dati insolitamente grande, sono l'alto numero di interazioni (15 milioni di collisioni/s), il grande quantitativo di particelle prodotte ed i

tanti sensori elettronici impiegati (30 milioni di canali nel corrente progetto) nel detector.

La luminosità del BTeV è, come detto in precedenza, di $2x10^{32}$ $cm^{-2}s^{-1}$ mentre il quantitativo di eventi che generano particelle B_s è di $4x10^{11}$ per anno, solo 1/500 del numero totale. Il trigger di livello 1 opera con una massima velocità di attraversamento di fascio di 7,6 MHz ed è posto nella parte della stazione di rilevazione più interessata dal sistema di rivelazione. In queste condizioni il dispositivo di vertice deve far fronte ad un tempo medio intercorrente tra due interazioni successive di 132 ns.

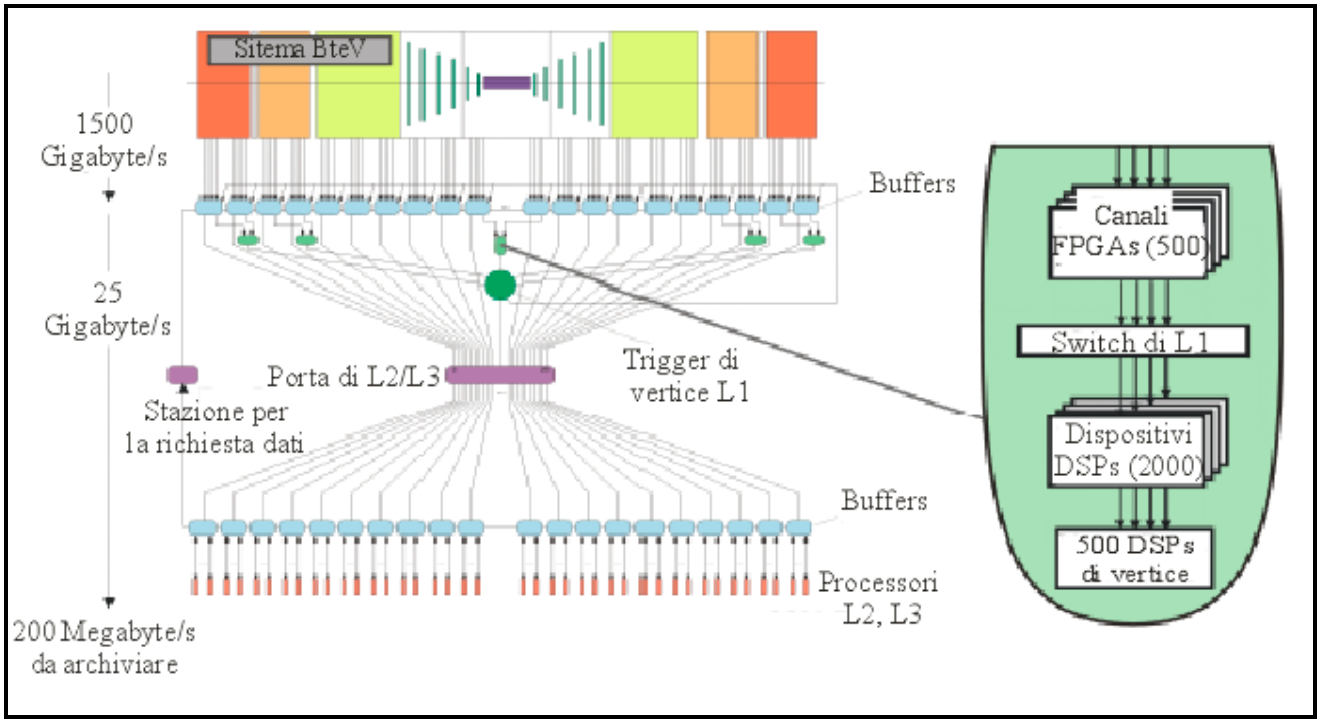

Figura 3.12 Schema riassuntivo del sistema completo di acquisizione dati, a sinistra nel dettaglio la struttura del trigger di vertice L1.

Il sistema di trigger ha tre livelli distinti, Livello 1 (L1), Livello 2 (L2), e Livello 3 (L3) usati in parallelo per rendere contemporanee le procedure di calcolo su ogni livello.

Il livello L1 raccoglie i dati dei trigger di vertice, esso funge da interruttore in grado di selezionare le informazioni da analizzare in L2 e successivamente in L3, in questo modo sono selezionati gli eventi di interesse da archiviare. I dati scelti, disponibili per una successiva analisi, occupano circa

200 Mbytes/s contro i 1500 Mbytes/s prodotti. Il trigger di vertice L1 adopera un algoritmo di riconoscimento che usa approssimativamente 500 Campi Programmabili, per ricercare le particelle che si sono generate nell'interazione, è necessario prevedere lo stoccaggio di tali informazioni per il tempo occorrente a L1 per eliminare quelli non interessanti. L'obiettivo del primo livello è scartare il 99% delle interazioni che avvengono nel detector; gli eventi utili saranno inviati al trigger di L2 che compie un'analisi dei dati con un criterio di selezione più severo, L3 la migliora ulteriormente completando lo studio particolareggiato.

La sfida di BTeV è di selezionare solo le interazioni di interesse, ovvero quelle che coinvolgono le B_s, per scriverle in un deposito permanente per l'analisi offline seguente. Sino ad ora la maggior parte degli esperimenti realizzati classifica gli eventi sulla base di sole considerazioni energetiche, in questo modo si corre il rischio di scartare dati potenzialmente interessanti. Nel caso di BTeV la funzione del rivelatore è di individuare il vertice associato ad ogni interazione, deve selezionare quegli eventi aventi un gran parametro di urto, tipico delle particelle B_s, ed individuare il punto nel quale si ha il loro decadimento posto a distanza di alcune centinaia di microns dalla zona di collisione. Per un'analisi di questo genere è richiesto un complesso algoritmo di riconoscimento, che consenta di individuare ogni singola interazione nel detector.

Il livello 1 di trigger riceve i dati dal pixel detector in Silicio, queste informazioni sono date sotto forma di gruppi di picchi messi insieme prima di essere inviati al dispositivo di rilevazione. Ogni pacchetto trasmesso rappresenta una misura di posizione avente una risoluzione spaziale di 10 μm.

Le operazioni eseguite dal trigger con questi dati includono: la classificazione del gruppo di eventi provenienti dal pixel, rilevazione di segmenti di cammino delle particelle ed estrapolazione della zona di fascio interessata, ricostruzione vertice e calcolo dei parametri di impatto, selezione degli eventi sulla base del loro parametro di urto.

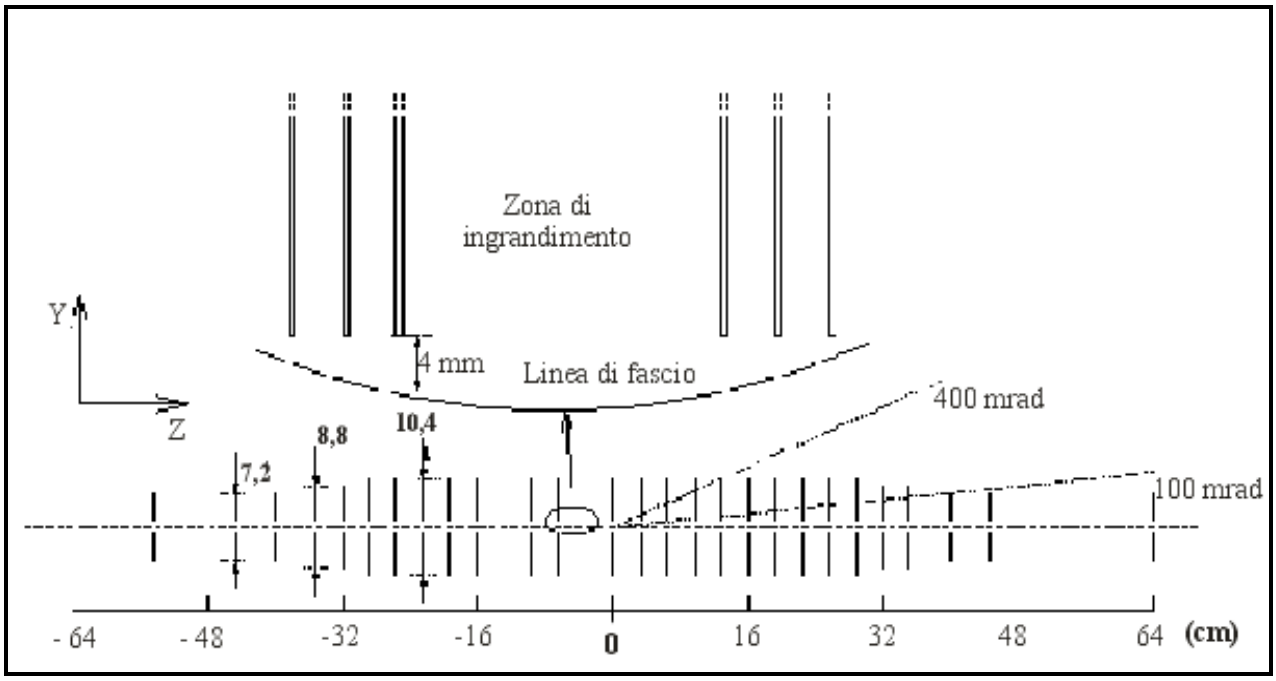

Figura 3.13 Progetto preliminare del pixel detector, ogni stazione consiste di tre piani di pixels.

Le prestazioni del trigger possono essere divise in due gruppi:

- Smistamento dei gruppi di dati e loro riconoscimento e classificazione secondo il tipo. Tale performance è un aspetto nuovo dell'esperimento BTeV; questa funzione coinvolge un piccolo numero di calcoli matematici e una grande quantità di gruppi di pixel e loro combinazioni, necessarie per ricostruire il cammino. Quest'operazione è svolta da circa 500 matrici con campi programmabili, gli FPGAs, in grado di compiere analisi dei dati in parallelo.
- Operazioni di appoggio alla funzione prima esposta. In questa parte di implementazione del sistema sono impiegate molte risorse di calcolo ed un numero ridotto di campi programmabili. In media sono impiegati 2500 processori a segnale digitale, i DSPs, divisi in due gruppi: il primo usato per la ricostruzione della linea di spostamento delle particelle, il secondo per altre rilevazioni.

La ricostruzione del tracking usa gruppi di segnali a 3 dimensioni provenienti dai pixel detector, questi usano la curvatura del cammino delle particelle dovuta alla presenza di un campo magnetico

nella ragione del fascio per calcolare i parametri della direzione di moto. In questo modo è possibile valutare la presenza di un punto di vertice in una zona precisa del beam. Secondo il progetto preliminare, ogni stazione di tracking consta di tre piani, l'attuale tendenza è, tuttavia, quella di eliminarne uno, in questo modo si ridurrebbe notevolmente il quantitativo di materiale nel detector.

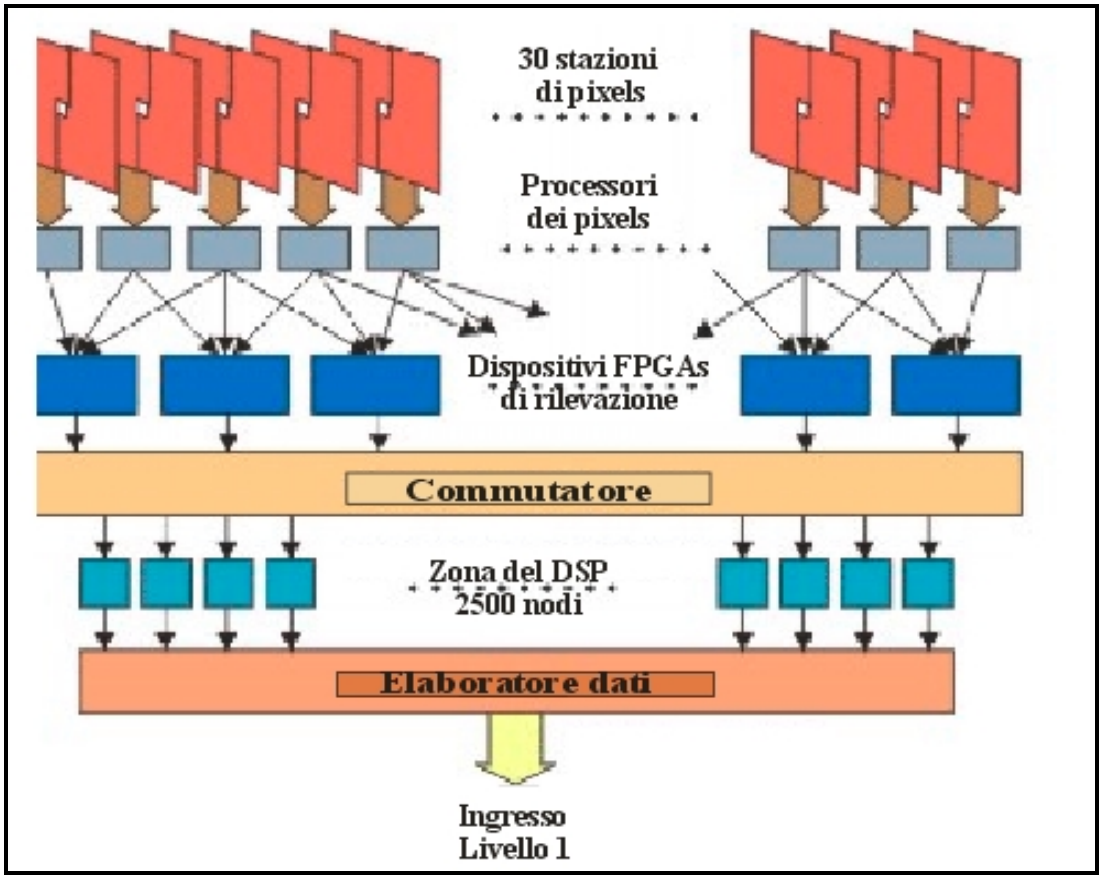

Figura 3.14 Schema della struttura di trasferimento dati dai sensori in Silicio al trigger di livello 1.

La struttura di calcolo sopra descritta deve essere realizzata in modo da essere molto versatile, devono essere possibili variazioni nelle impostazioni del software, inoltre, qualora ci fosse disponibilità di nuovi e diversi tipi di hardware, essere consentite eliminazioni di parti superflue, eventuale sostituzioni di strutture obsolete e modifiche degli algoritmi usati.

Capitolo 4

Il Forward Tracking System Microstrips e Straw-tubes

4.1 L' FTS

Il Forward Tracking System consiste in 7 stazioni, poste trasversalmente alla beam a varie distanze dal punto di interazione.

Tre stazioni sono poste nel dipolo magnetico, tre nella regione a monte del RICH e una nella regione a valle dello stesso.

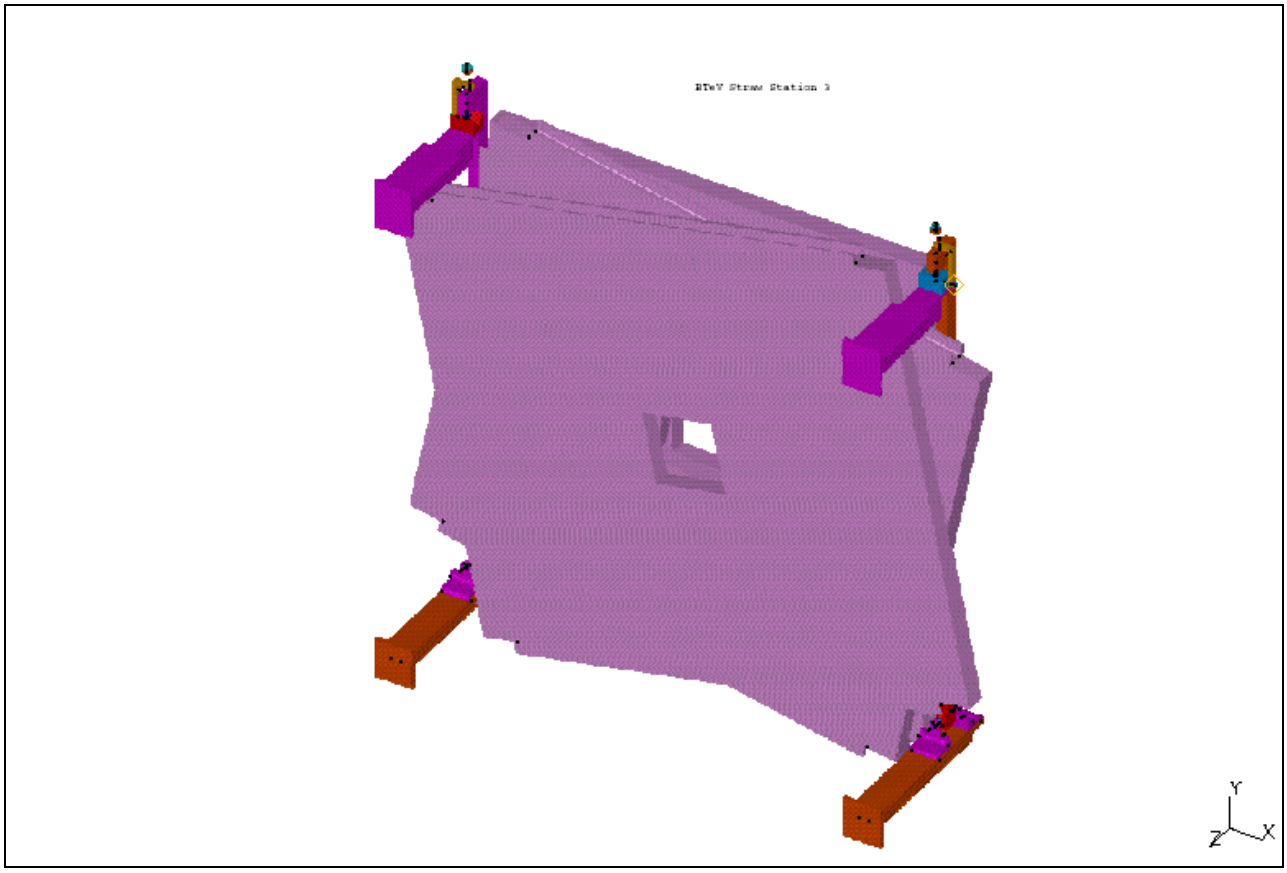

Figura 4.1 Immagine del supporto della stazione 3 dell' FTS

L'intero sistema si estende per una distanza di oltre 7 m e fornisce una copertura angolare da ~ ±10 mrad fino a 300 mrad.

Il disegno dell' FTS è stato guidato dall' elevata densità delle tracce prodotte nella direzione della beam-pipe.

La maggior parte dell'angolo solido è coperta da straw tubes. Gli Straw sono stati scelti soprattutto perché possono circondare la beam pipe senza richiedere una intelaiatura di sostegno pesante intorno alla stessa. La densità di traccia particolarmente elevata intorno alla beam richiede rivelatori

a più elevata risoluzione, per questo otivo la parte centrale di ogni stazione è stata provvista di rivelatori al silicio (MICROSTRIPS).

4.2 Rivelatori strip in silicio (microstrip)

Il primo dispositivo operazionale di questo tipo, è stato costruito dalla CERN-Munich group per uno studio sperimentale sull'interazione adronica di particelle a breve periodo di estinzione in alta energia. La fig. 1 mostra la struttura di questo sensore, esso è fatto di un wafer di silicio cristallino n-drogato, con una resistività di 2 kΩxcm, un diametro di 50 mm e uno spessore di 280 μm. Un lato del cristallo è alluminizzato, dalla parte opposta un'area sensibile di 24x26 mm è ricoperta con un nastro fissato con Boro di materiale p drogato.

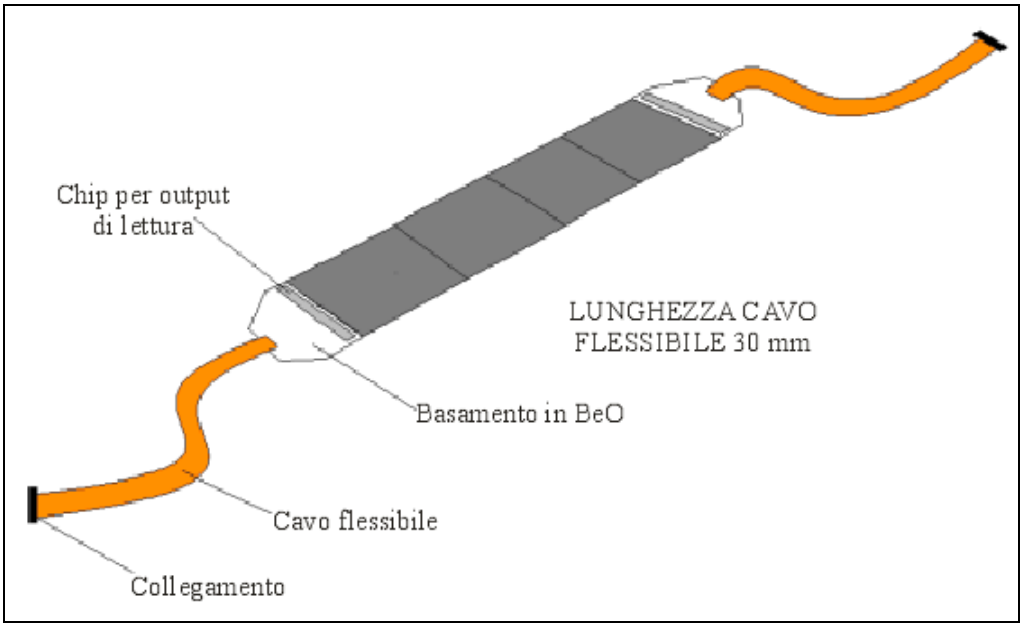

Figura 4.2 Configurazione del sensore della microstrip in Silicio con denominazione componenti e dimensioni del cavo flessibile.

Una particella relativistica carica e produce 25000 coppie di buchi elettronici quando attraversa i 280 μm di silicio. Il segnale registrato dallo strip, collegato agli elettrodi ogni 10 ns, misura la

posizione delle particelle che attraversano. Per questi rivelatori ci sono 1200 strips di 12000x36 mm impiantati con un'inclinazione di 20 μm. Per ridurre il numero delle letture di output, solo ogni 3 strips (intervallate da 60 μm) c'è un canale di uscita (spaziate di 120 μm). La carica prodotta dalle particelle è divisa tra le confinanti strips tramite accoppiamento capacitivo. La posizione delle particelle è ottenuta calcolando il centro di gravità delle cariche collegata a più strips con canali di uscita, la risoluzione spaziale ottenuta dai detectors è stata di 4.5 μm per canali di uscita posti ogni 60 μm.

Se un campo magnetico di 1.68 Tesla è applicato parallelamente allo strip con canale di uscita, la forza di Lorenz fa spostare i portatori di carica in modo che la coordinata misurata è spostata in media di 10 μm. La risoluzione spaziale, ottenuta se ogni strip ha un canale di uscita, è di 2.8 μm. Questa risoluzione può essere ottenuta se l'elettronica associata con ogni strip può essere impiantata mediante la tecnica VLSI sullo stesso wafer che forma il detector. Una recente innovazione prevede l'integrazione di 60 canali di preamplificazione, Integrandoli su un chip collegato e fissato al detector si ha una dimensione dei sensori limitata a 70x70 mm.

4.2 .1 Microstrip in BTeV

Il pixel detector in silicio di BTeV contiene 30 stazioni poste sotto vuoto attorno alla beam-pipe del Tevatron, il rivelatore risiede all'interno del magnete di analisi e la sua posizione impone rigide costrizioni ai vincoli meccanici del supporto, agli impianti di raffreddamento, agli schermi RF, all'alimentazione, ed al sistema di vuoto.

Il detector in silicio contiene 1600 cavi elettrici che portano segnali dal\al rivelatore, il carico di calore da ogni frammento di lettura è 0.5 W/cm per un totale di 2.5 KW, un sistema di raffreddamento mantiene la temperatura di esercizio tra -5° C e -10° C con un'oscillazione di ±2° C.

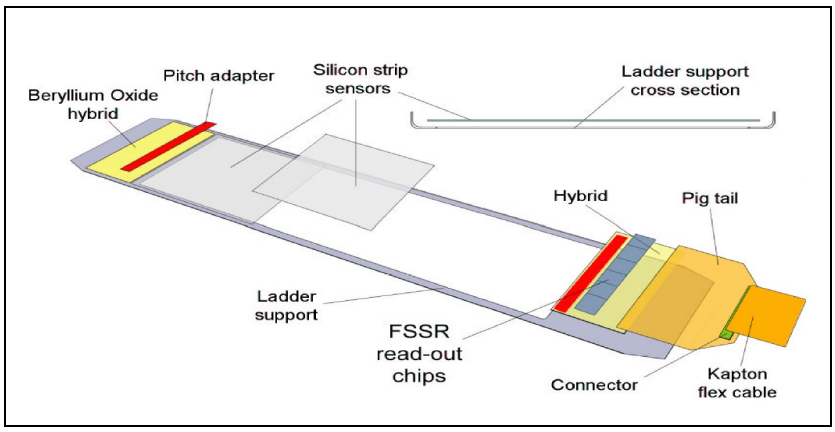

Figura 4.3 Immagine di una microstrip di BTeV.

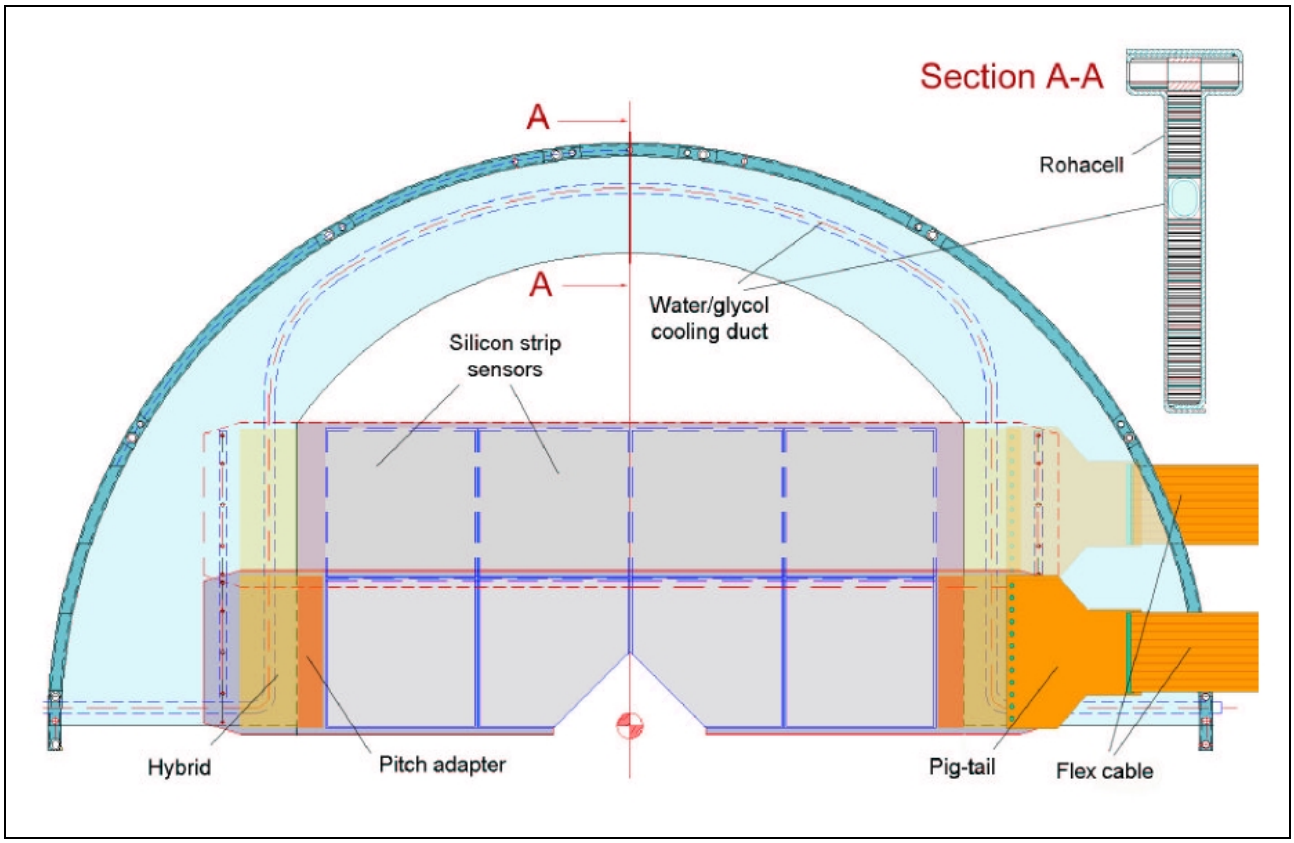

Figura 4.4: Microstrip BTeV pianta. Il supporto meccanico delle microstrips consiste in una struttura a sandwichrelizzata con due sottili strati di materiale composito in fibra di carbonio con interposizione di rohacell. Attraverso la struttura corre un condotto di raffreddamento che raggiunge le zone dove sono collocati i circuiti (Hybrid) e quindi le zone dove si ha la massima trasmissione di calore.

I sensori devono essere messi all'interno del magnete con un campo magnetico di 1.6 Tesla, sono, inoltre, posti in una camera da vuoto con una pressione di 10^{-7} torr. I vantaggi di questa disposizione sono di eliminare le relazioni tra acqua e vuoto, e di ridurre la possibilità che la miscela si disperda nel substrato di carbonio. In fase operativa, essi devono essere tenuti a 6 mm di distanza dalla beam-line, mentre, durante la fase di iniezione, sono allontanati dal dispositivo di azionamento di 20 mm.

Ogni pixel richiede tipicamente un giorno per essere correttamente posizionato, la tolleranza di errore massima consentita e di 50 μm, mentre la dilatazione per effetto termico dovuto all'esercizio deve essere limitata a 2 μm. In ultimo è richiesto uno scudo RF tra il pixel detector ed il liquido refrigerante circolante per avere una protezione adeguata elettromagnetica.

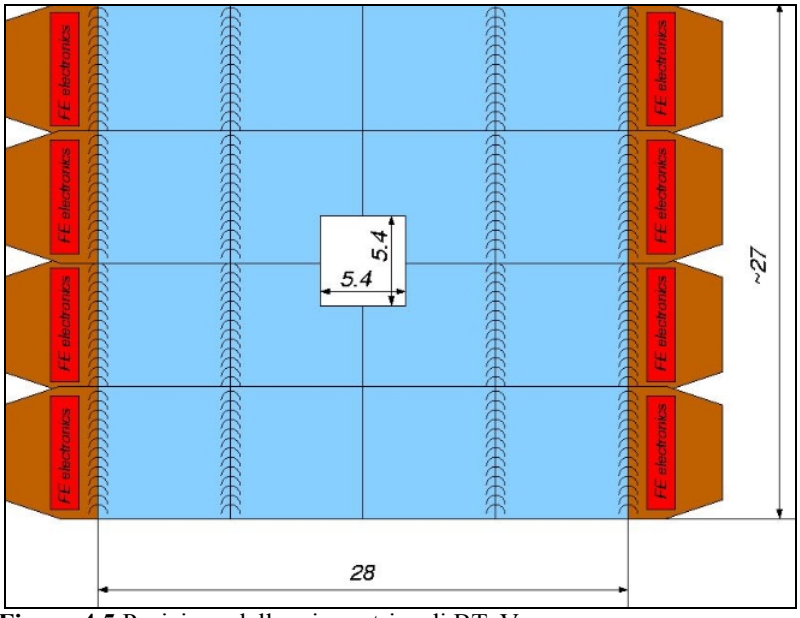

Figura 4.5 Posizione delle micro-strips di BTeV.

Lo spettrometro ha un angolo di ricezione di 300x300 $mrad^{-2}$. Ogni materiale posto all'interno di quest'angolo, deve essere di dimensioni piccole il più possibile per ridurre interazioni di tipo

primarie, la quantità di materiale posto all'interno dell'angolo di accettazione è circa 1,25% di una lunghezza di radiazione per ogni singolo piano di silicio.

I pixels di silicio sono posti su substrati, come mostrato in Figura 20, ce ne sono due per stazione per un totale di 30 nel rivelatore. Durante la fase di rivelazione del segnale, i rivelatori sono posizionati in modo che le radiazioni viaggino attraverso un buco, di dimensioni 12x12 mm, praticato all'interno dei substrati stessi; mentre durante la fase di iniezione, sono allontanati dalla linea su cui si muovono le particelle.

Il substrato è realizzato in grafite prodotta dall'ESLI[*], allineato secondo la direzione di sollecitazione del rivelatore. La lunghezza di radiazione di tale materiale, supposta pari a 440 cm, è solo di 0.02% per una spessore di 0.88 mm. E' importante sottolineare che il carbonio ha un coefficiente di espansione termica simile a quello del silicio, questo elimina problemi di distacco tra le superfici di appoggio ed i rivelatori. Schiuma di carbone o grafite pirolitica sono possibili alternative a tale materiale.

Per tenere il pixels in silicio alla temperatura di corretto funzionamento è adoperato un sistema di raffreddamento alimentato con glicol al 40% in volume ed acqua, 1 L/min attraverso ogni substrato. I tubi di raffreddamento sono realizzati in carbone, prodotto anch'esso dall'ESLI. I substrati sono tenuti in posizione da fibre di carbonio aventi la forma di mezzo cilindro, sempre dello stesso materiale, sono i supporti posti alle estremità del substrati per posizionarli ed incollarli all'interno del semicilindro, la forma delle fibre è realizzata al fine da aumentare la rigidezza nella direzione di sollecitazione, da calcoli fatti si hanno abbassamenti di 0.05 mm dovuti alla forza peso.

[*] Energy Science Labroatories, Incorporated (ESLI), San Diego.

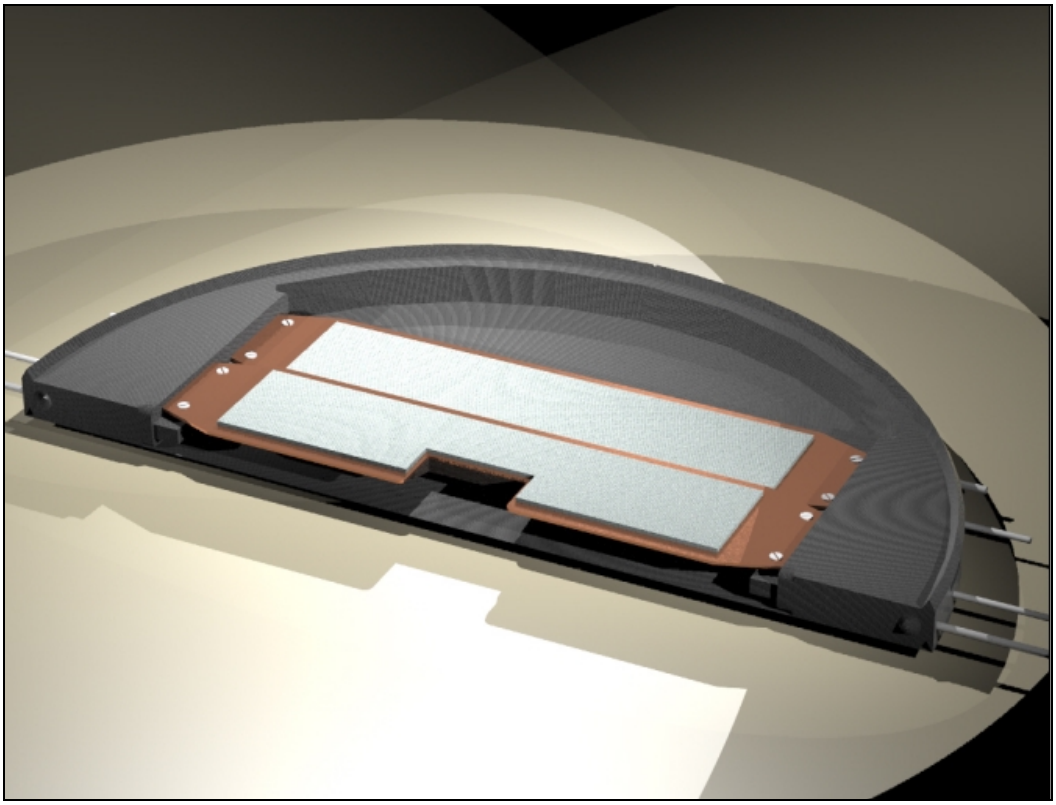

Figura 4.6 Disposizione delle due microstrips all'interno della mezzaluna in composito.

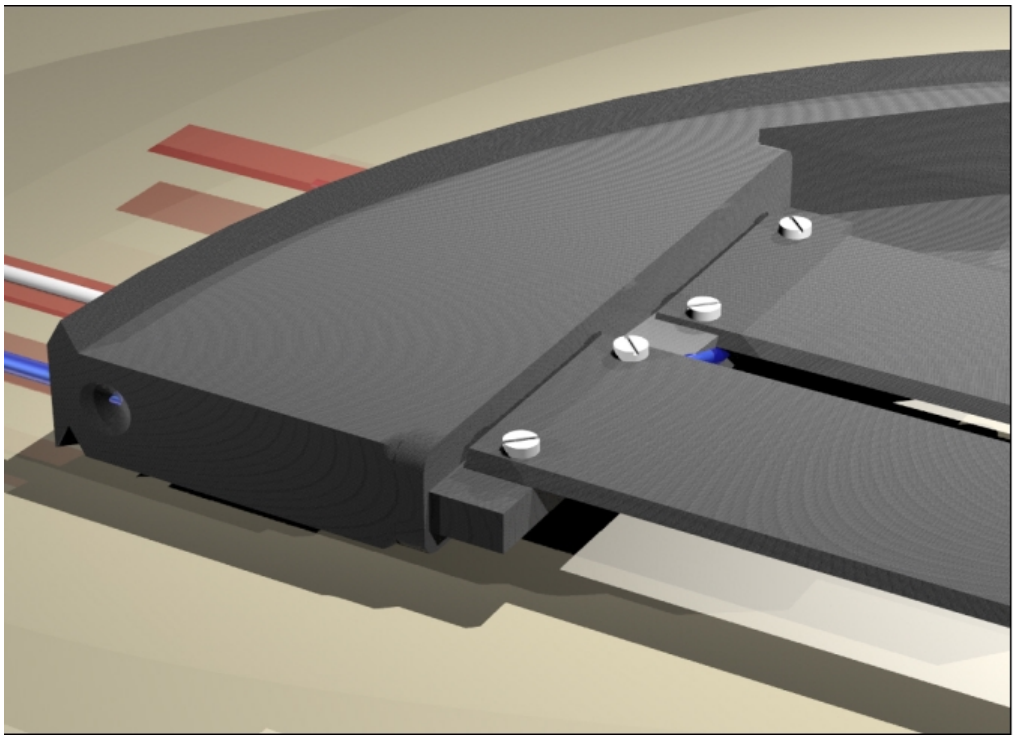

Figura 4.7 Parte di collegamento tra le microstrips e il supporto, in azzurro è rappresentato l'impianto di raffreddamento per l'elettronica, realizzata di colore rosso.

4.3 Straw-tubes

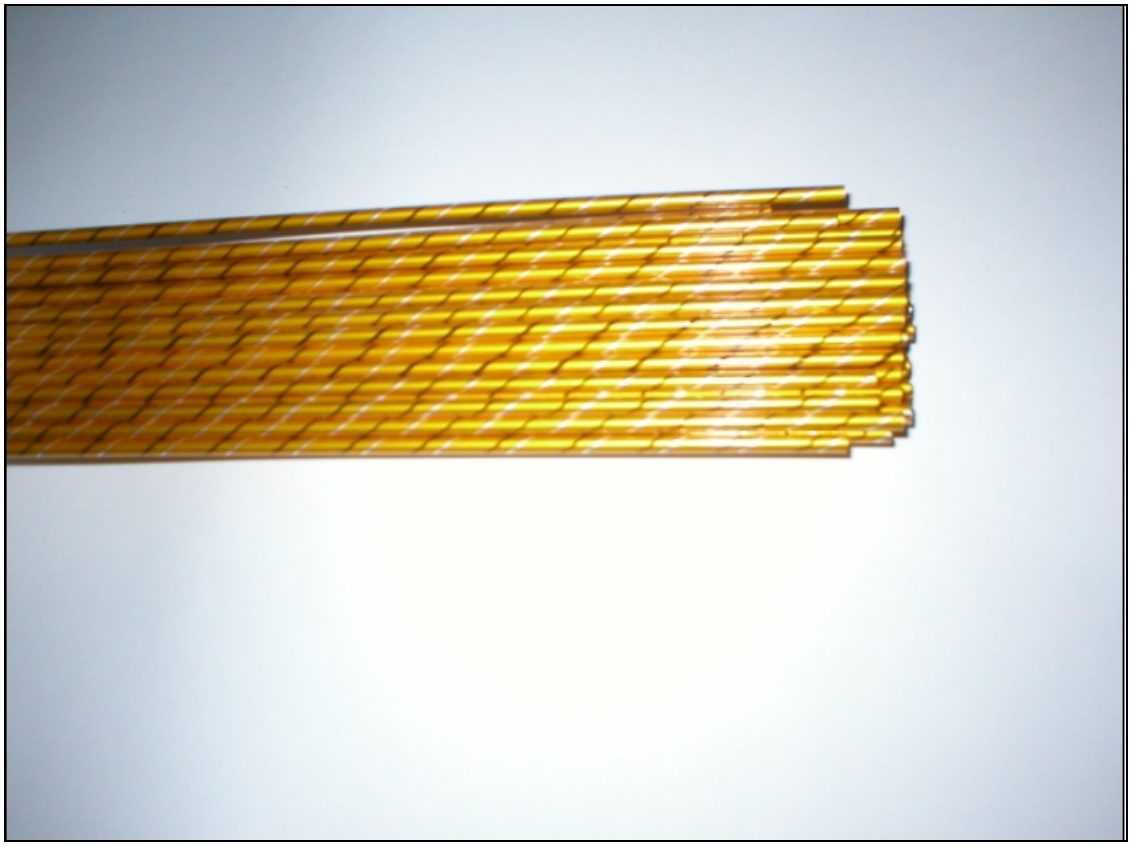

Figura 4.8 Straw tubes di BTeV.

Gli straws prodotti sono costituiti da un rivestimento a spirale dello spessore di 0.012 mm costituito da kapton alluminato, lo spessore dell'alluminio è di 0.1 μm. Un rivestimento di kapton è applicato sul nastro ricoperto ed un secondo nastro sempre di kapton, spessore 0.012 mm, è posto sopra quest'ultimo. Lo spessore complessivo dello straw è di 0.03±0.01 mm che rappresenta circa $1*10^{-4}$ della lunghezza della radiazione. Può essere raggiunta una risoluzione inferiore ai 40 μm.

Dei filamenti di tungsteno placcati d'oro con un diametro di 0.03 mm sono usati come anodo, la resistenza elettrica è stimata essere di 85 Ω/m mentre il massimo carico sopportabile è di 1.8 N. Il filamento che funge da anodo è fissato in una capsula di rame placcata d'oro, questa ha un foro interno di 0.01 mm o 0.02 mm con una zona di serraggio di 6 mm dal diametro esterno di 0.07±0.01

mm. La sezione della capsula è conica ed ha un'altezza di 10 mm, rivestita da una resina acetale, conferisce una rigidezza meccanica e lo posiziona al centro dello straw.

In sezione lo straw appare come un cilindro in alluminio con un diametro esterno di 4.00±0.01 mm. La zona esterna della capsula permette alla filamento di muoversi lungo l'asse del foro posto nella parte terminale mentre tirando lo straw gli si conferisce la tensione richiesta. Lo straw contiene un foro in cui sono ospitate le capsule dei filamenti, i cosiddetto twisters, e fornisce l'ingresso e la fuoriuscita dei gas dagli straws.

L'incollaggio avviene a temperatura ambiente per un tempo di 16 ore sotto l'azione di uno sforzo tensile di 126 kg\cm^2. Quando la colla ha fatto presa le sezioni sono inserite e gli straws sono tensionati a 25 N. Dopo il bloccaggi delle parti terminali il filamento è inserito in una capsula da un'estremità dello straw, tensionato a 1 N e fissato all'estremità opposta.

Impedenza di ingresso	300 Ω
Impedenza d'uscita	50 Ω
Guadagno	1-3 V\mA
Charge guadagno	20-60
Range dinamico	2 V
Tempo di settaggio output	2 ns
Potenza fornita	±6 V
Consumo di potenza	50 mV

Tabella 4.1 Caratteristiche del pre-amplificatore.

I preamplificatori sono montati su circuiti stampati , l'impedenza in ingresso è di 300 Ω, il circuito opera con ±6 V dissipando 50 mV per canale. Il massimo valore di output prima della saturazione è impostato ai 2 V. Il gas impiegato per il prototipo è dimetile con purezza del 99.8% con una sovrappressione di circa 20 mbar. Il guadagno del gas è misurato usando gli impulsi originati da un singolo elettrone prodotti dalla fotoemissione dalla superficie del catodo.

La dipendenza della risoluzione spaziale sulla distanza di drift si trova essere in accordo con un semplice modello che considera il contributo dovuto alla ionizzazione statistica ed all'agitazione nel tempo di misura. Il contributo dovuto alla diffusione degli elettroni è di circa 7 μm per ogni mm di distanza dal drift. A distanze più brevi di 2÷3 mm, il contributo dovuto all'agitazione durante la misura predomina su quello di risoluzione spaziale.

La lunghezza degli straws è un parametro importante per determinare l'eccentricità e di conseguenza gli errori sistematici e la risoluzione spaziale. L'eccentricità degli straws può essere misurata dalle distribuzioni dei tempi di drift e gli errori sistematici possono essere corretti. Con questa metodologia di correzione è stata ottenuta una risoluzione spaziale migliore di 40 μm con straws di 2 m di lunghezza.

4.3. 1 Descrizione delle parti costituenti gli straws

In questa sezione sono descritte le varie componentistiche, con le loro dimensioni e materiali che verranno assemblate.

La componentistica trattata è:

- End-plate;
- End-plug;
- Terminali per i filamenti di tungsteno;
- Twisters;

4.3. 2 End-plate

Per evitare che ci siano interferenze tra questo componente e il fascio di particelle esso è realizzato in lega di alluminio 6061, conosciuta con il nome commerciale di Anticorodal, il reticolo cubico facce centrate di questo materiale assicura infatti un comportamento amagnetico. Gli end-plates sono posati come terminazioni dell'interfaccia ed in essi si vanno ad inserire gli straws, la loro sezione prevede quindi la presenza di fori disposti su righe e sfasate di un distanza pari a quella del raggio dello straws.

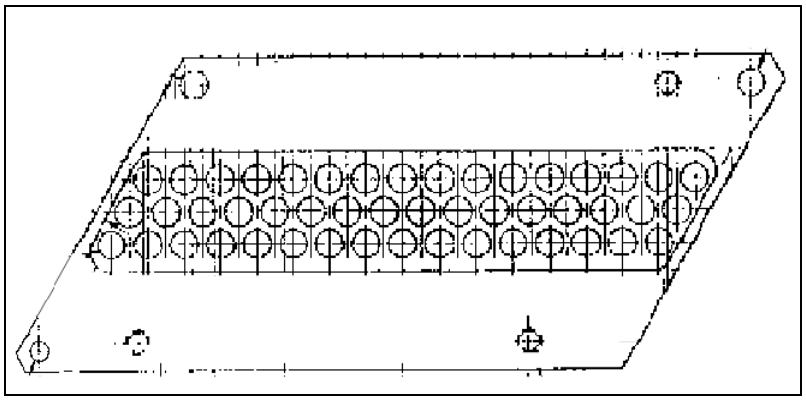

Figura 4.9 Pianta dell'end-plate presa dai disegni di progetto originali. La dimensione orizzontale massima è di 90.195 mm**.**

Per quanto riguarda la sua funzione, c'è da sottolineare come non è richiesta una rigidezza molto elevata dal momento che gli straw tubes sono incollati all'interno dell'interfaccia l'end-plate ha come uniche funzioni quelle di evitare eventuali disallineamenti delle terminazioni dei sensori e di tenere in posizione assiale il filamento di tungsteno. In quest'ultima funzione sono coadiuvati anche dai terminali in rame di cui si fa cenno in seguito.

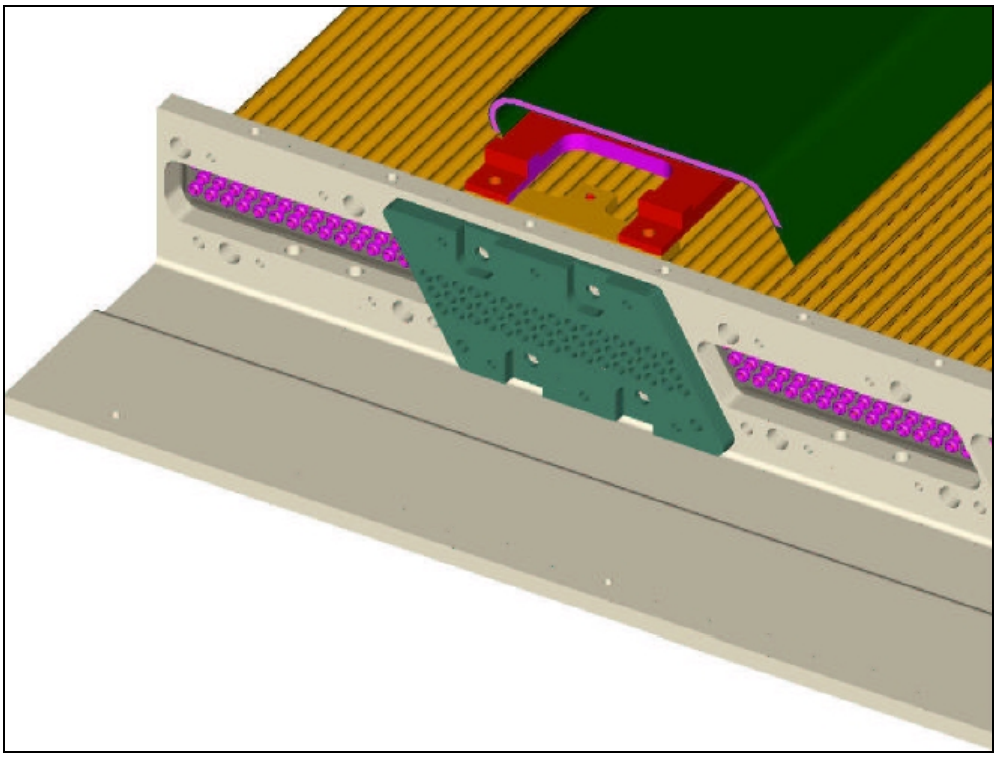

Figura 4.10 Collegamento dell'end plate al telaio

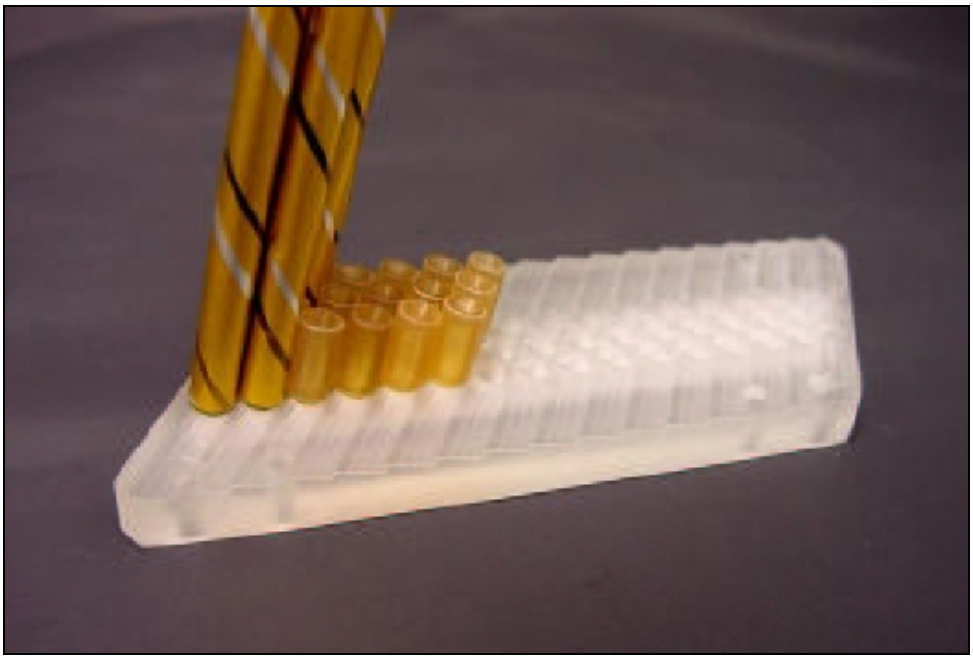

Figura 4.11 Connessione degli straws all' end plate

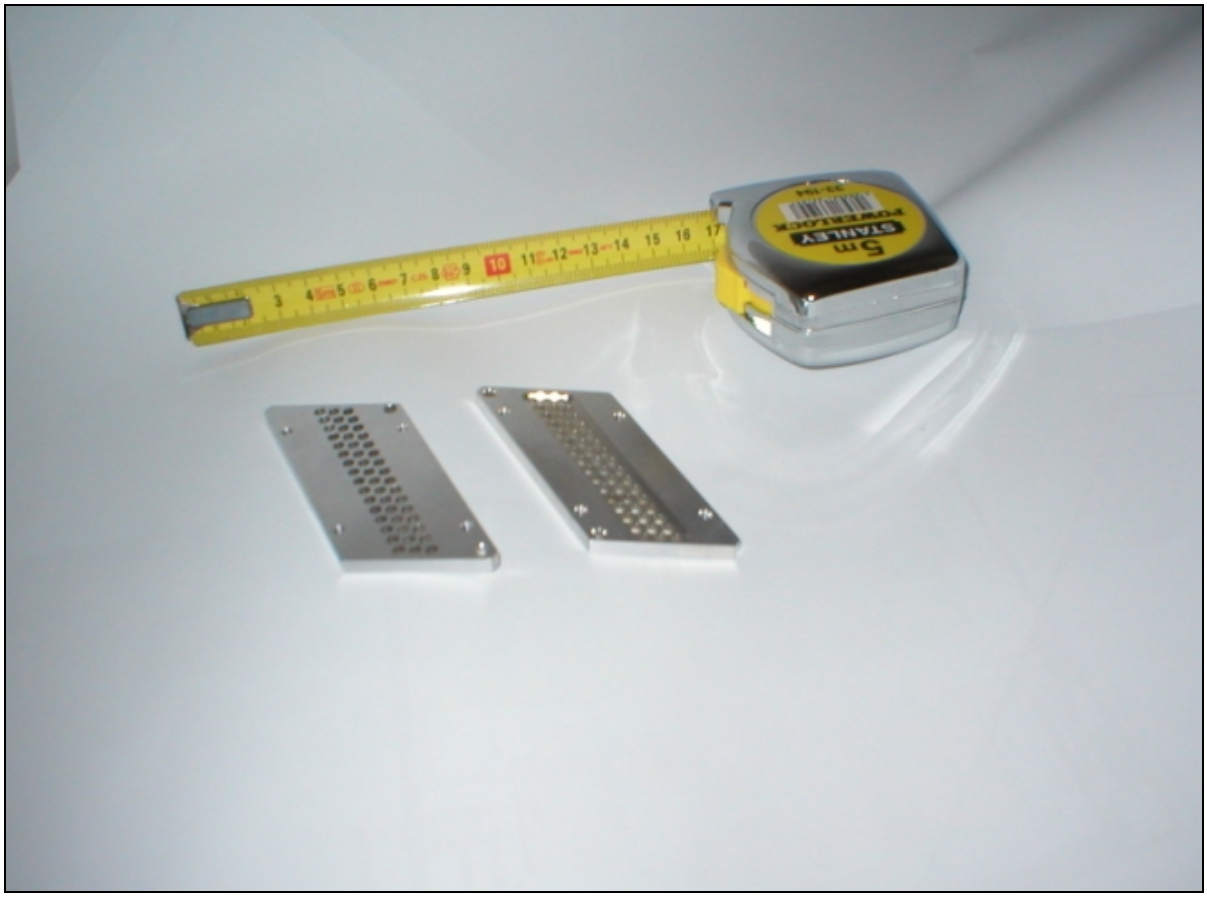

Figura 4.12 Foto di due end-plate.

4.3. 3 End-plugs

Questi componenti sono posti al termine di ogni singolo straws, sono realizzati in vetroresina ed hanno una funzione isolante, servono per evitare cadute di potenziale prima del trasferimento del segnale prodotto dagli straws all'elettronica. Vengono incollati con della colla conduttiva agli straws sull'end-plate, di seguito si riportano i disegni originali ed alcuni campioni fotografati.

Figura 4.13 Foto di due end-plugs di BTeV in vetroresina.

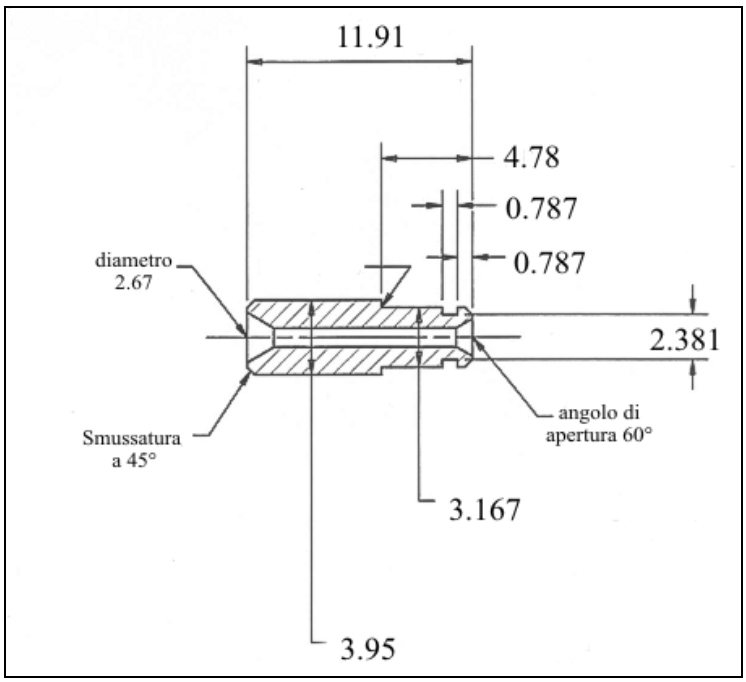

Figura 4.14 Progetto originale con quote in mm dell'end-plug di BTeV.

4.3. 4 Terminali per i filamenti di tungsteno

Sono realizzati in rame o ottone, sono incastrati intorno al filamento di tungsteno ed hanno la funzione di tenerlo tensionato ed allineato con l'asse dello straw, in figura 31 alcuni campioni di questi componenti. La loro dimensione è tale da permettere di essere inseriti all'interno degli end-plugs. Sono vincolati ad essi mediante una colla di tipo conduttivo*.

Figura 4.15: End-plugs, terminalini e twisters.

* Della colla di cui si parla non sono pervenute le specifiche, è di tipo bicomponente e realizza una sospensione di Argento per avere trasferimento di carica. L'impiego di tale adesivo è importante per il corretto funzionamento dell'elettronica dello straw.

4.3. 5 Twisters

Sono realizzati in vetroresina, hanno un diametro di 4 mm e la forma a spirale. Hanno la funzione di evitare delle variazioni nell'eccentricità dello straw in cui si vanno ad inserire. Il processo di montaggio prevede di impregnarli in colla termofusibile, aspettare una parziale essiccazione dell'adesivo quindi inserire i twisters all'interno degli straws a distanza di 70, 80 cm l'uno dall'altro. Per il posizionamento si ricorre a barre rettificate con diametro pari a 4 mm. Eseguito il montaggio all'interno del rivelatore si esegue un riscaldamento con una spiralina con resistenza elettrica o con insufflaggio di aria calda, questo porta la colla a rifondere ed a far presa con il rivestimento interno dello straw tube.

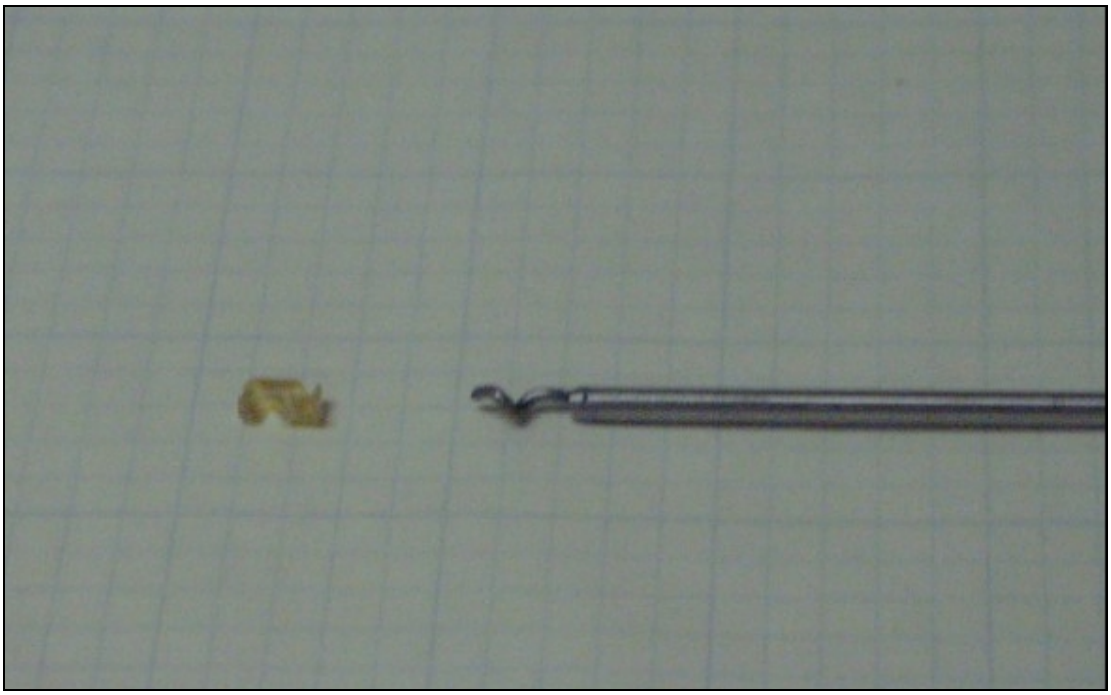

Figura 4.16 Twister con spiralina a resistenza per il riscaldamento del twister all'interno dello straw.

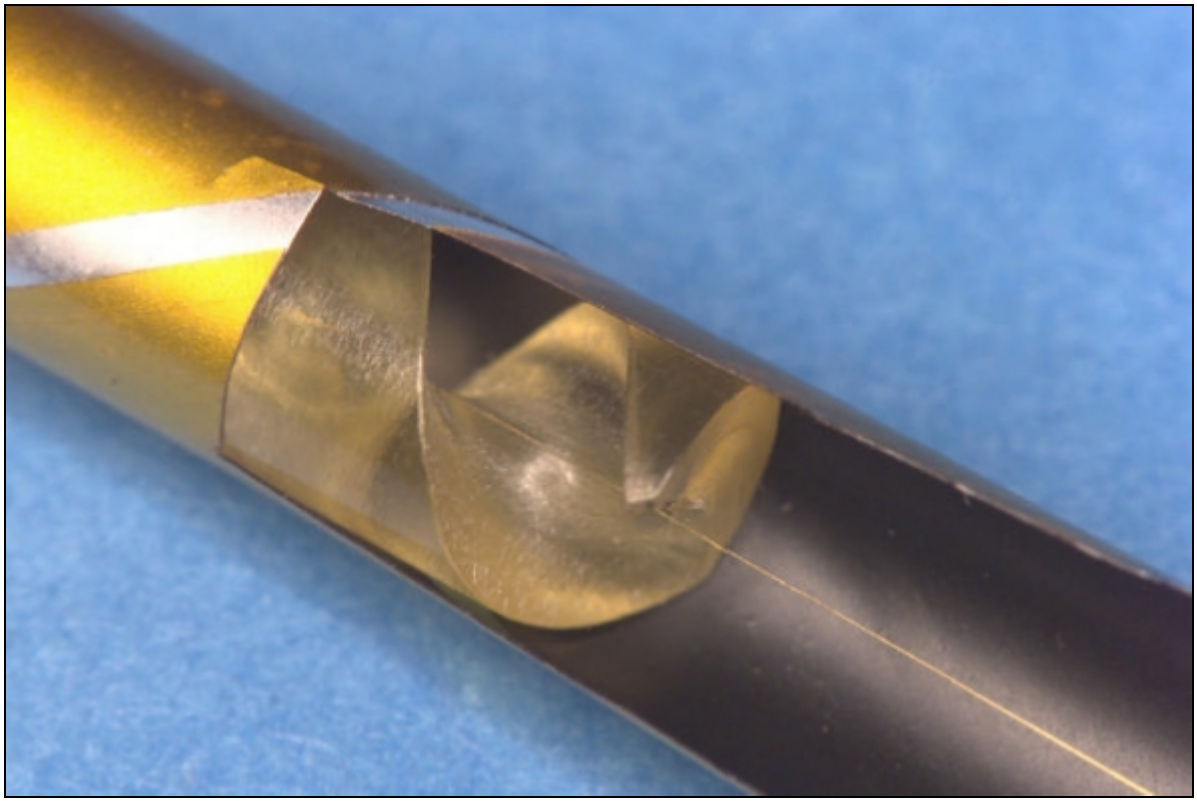

Figura 4.17 Spaccato di uno straw, sono evidenti il twister e il cavo anodico

Capitolo 5

Modulo 0 in vista X
IL MOX

5.1 Modulo 0 in vista X: il MOX. Descrizione

Presso i Laboratori Nazionali di Frascati dell'INFN è stato disegnato un particolare modulo di supporto per microstrips e straw-tubes, il MOX, che va ad innestarsi nella zona di attraversamento della beam pipe. Il modulo è collocato su ciascuna delle sette stazioni ed ha una lunghezza variabile tra i 54 cm di quello della prima stazione e i 2,31m di quello della 6. La settima stazione ha una geometria del tutto diversa e non verrà presa in considerazione. Gli straws contenuti in questo modulo sono incassati nel rohacell in tal modo essi sono mantenuti dritti senza il bisogno di pretensionamento. Il pacchetto di straws e rohacell é racchiuso da un sandwich in fibra di carbonio. Fissato sul modulo c'è il disco di supporto in fibra di carbonio per le microstrips.

Gli straw-tubes sono incollati agli end plate allo stesso modo degli altri moduli. Dal momento che gli straws del MOX non sono pretensionati gli end plates possono essere costruiti con materiali molto leggeri tipo poliammidi, ecc...

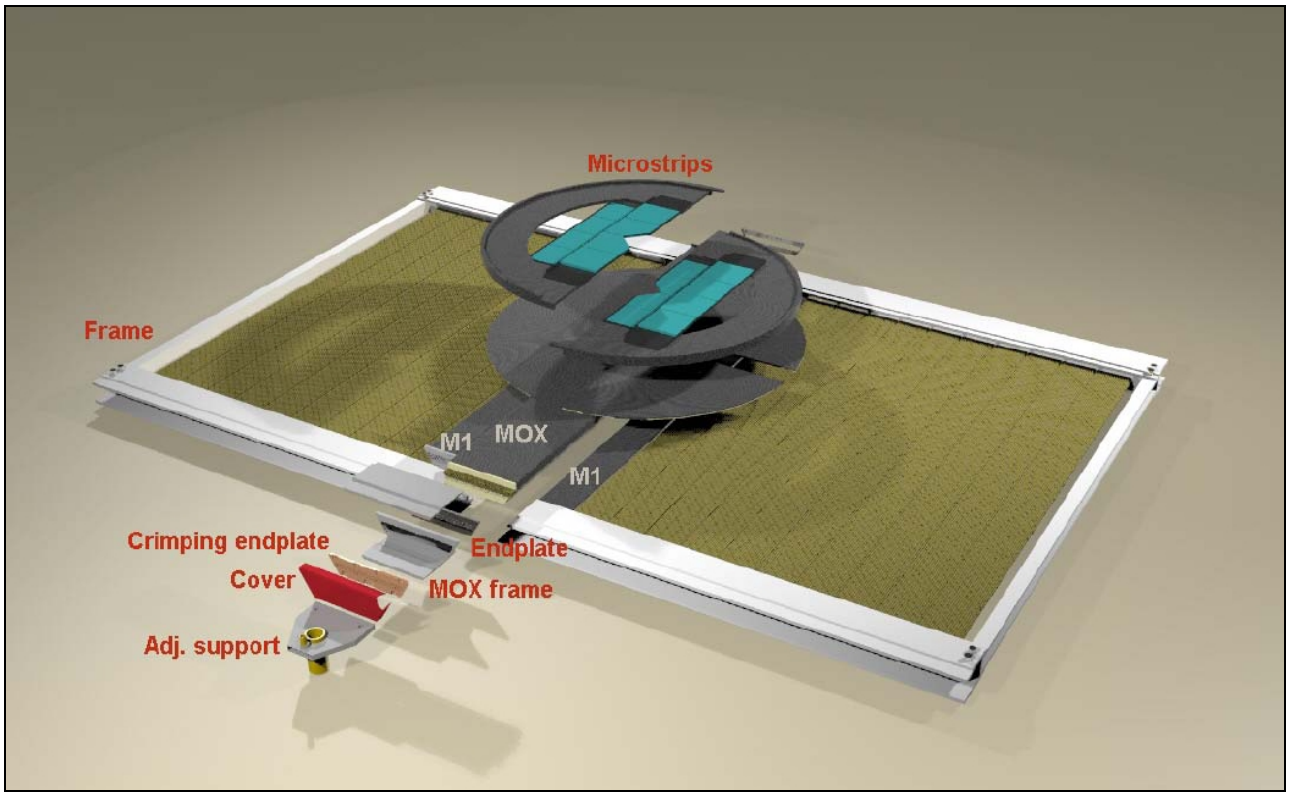

Figura 5.1 Vista d'assieme del MOX e della stazione.

Gli end plate di questo modulo sono progettati per resistere ad una tensione di 50g per ognuno dei 98 straws.

Le deformazioni del modulo saranno monitorate in tempo reale con l'uso di sensori FBG (Fiber Bragg Grating). Tali sensori saranno inseriti all'interno della struttura in fibra di carbonio è serviranno anche per un accurato monitoraggio della struttura di supporto del Pixel Detector. Si avrà così un preciso controllo di tutta la geometria del Forward Tracking Detector.

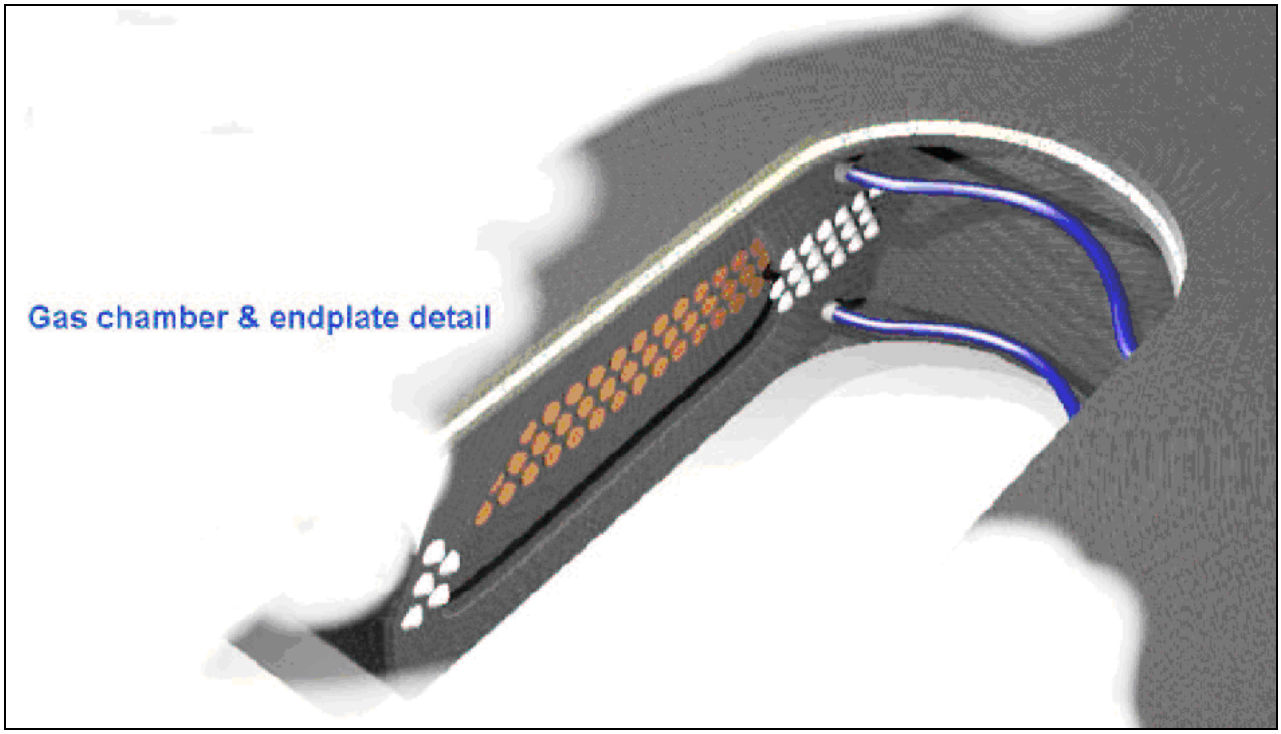

Figura 5.2 In questa immagine si può notare l'interruzione di parte dei 98 straws del MOX in corrispondenza del passaggio della beam pipe.

5.2 Due possibili alternative

Nei tre mesi antecedenti la redazione del presente lavoro sono state valutate diverse possibili alternative geometriche per il modulo MOX. Si è dovuto infatti venire incontro a quelle che erano le esigenze più prettamente connesse all'esperimento e presentate dello staff di fisici dei LNF e quelle

tecnologico-strutturali esposte dagli strutturisti e dall' azienda incaricata della lavorazione dei materiali compositi e della realizzazione finale del supporto*.

Tra tutte, due in particolare sono state fatte oggetto di un più marcato interesse ed è stata effettuata una analisi comparata del loro comportamento strutturale.

Indicando con Z l'asse di sviluppo longitudinale del modulo MOX, le due soluzioni differiscono sostanzialmente per la diversa sezione trasversale XY e per il diverso ingombro in direzione Y. La prima, che d'ora in avanti chiameremo soluzione o modello 1 presenta una sezione XY di forma ottagonale e una dimensione in direzione Y di 5 cm. La seconda, invece, indicata come soluzione o modello 2, è caratterizzata da una sezione trasversale di forma trapezoidale e un ingombro in direzione Y di 3,3 cm. La dimensione X di entrambe i modelli è la stessa in virtù del fatto che si ha la necessità di posizionare il MOX tra i due moduli M1 (vedi fig 1). Le analisi strutturali che verranno effettuate riguarderanno il modulo della sesta stazione in quanto è quello di lunghezza maggiore e che prevedibilmente subirà gli spostamenti maggiori.

5.3 Modello 1

Come già detto, il disegno del modulo MOX scaturisce dal giusto compromesso di esigenze di natura diversa per venire incontro sia alle finalità fisiche dell'esperimento, sia a quelle progettuali della sua realizzazione pratica. Proprio per rispondere a quest'ultima esigenza si è pensato di proporre una sezione simmetrica; dovendo realizzare lo strut in due parti, per motivi legati all'assemblaggio finale del componente (cfr. cap 7), una tale forma per la sezione permette la realizzazione di due semigusci uguali. Ciò presuppone la realizzazione di due stampi identici con conseguenti vantaggi sia costruttivi che economici.

Questo implica tuttavia anche un maggiore ingombro nella direzione Y (5 cm) e quindi l'inserimento di una quantità maggiore di rohacell, in definitiva più massa attraversata dalle

* L'azienda citata è la Plyform S.r.l. di Milano

particelle. La modellizzazione geometrica tramite pre-processore della soluzione 1 è risultata abbastanza agevole, si è potuto infatti far ampio ricorso alla generazione di elementi geometrici speculari.

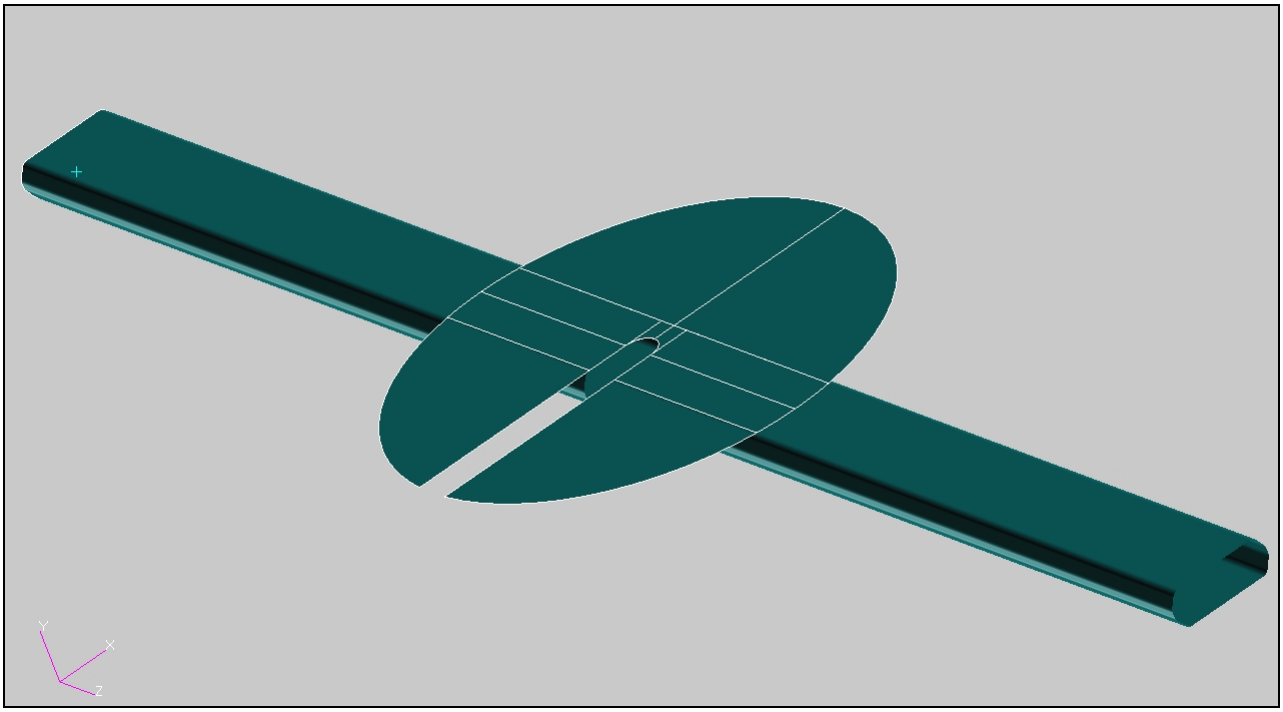

Figura 5.3 Modello geometrico della soluzione 1 costruito con il pre-processore MSC Patran

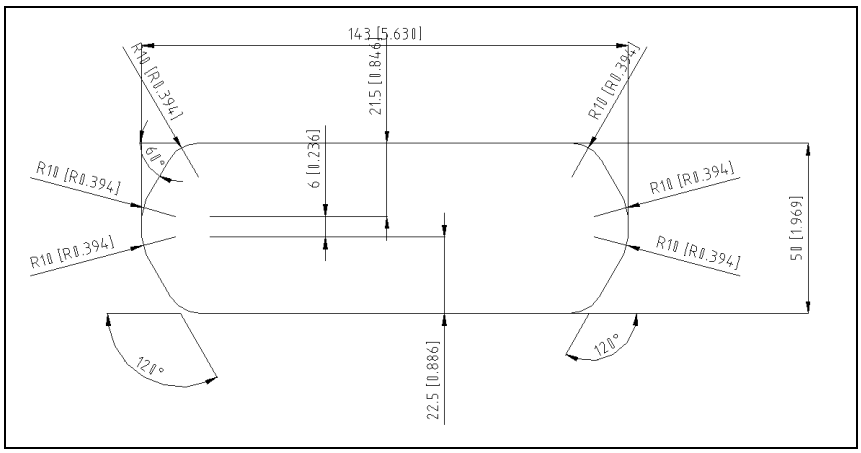

Figura 5.4 Dettaglio della sezione ottagonale con le relative quote

5.4 Modello 2

L'altra soluzione considerata prevede una sezione di forma trapezoidale. Una tal sezione implica la necessità di due stampi di forma diversa per le due parti dello strut. D'altra parte si ha però la possibilità di contenere l'ingombro in direzione Y che per questa seconda soluzione è di 3,3 cm.

Per il resto le dimensioni nelle altre direzioni sono le stesse. La modellizzazzione è risultata un po' più laboriosa rispetto al primo modello.

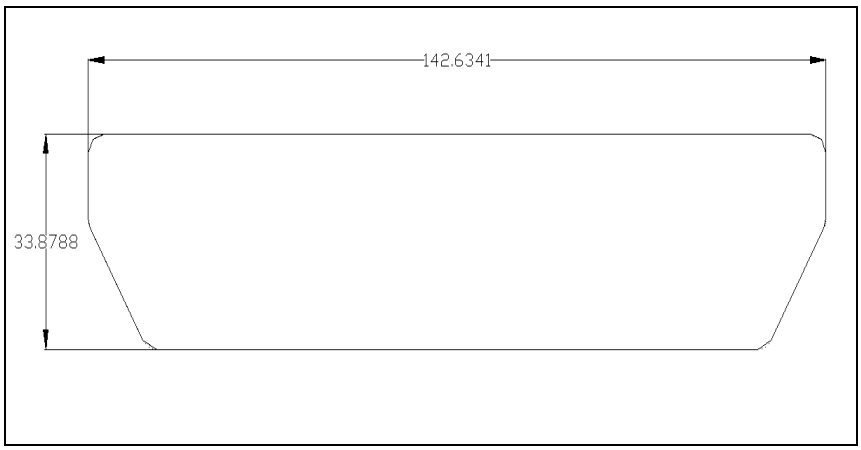

Figura 5.5 Dettaglio della sezione trapezoidale della soluzione 2 con le relative quote

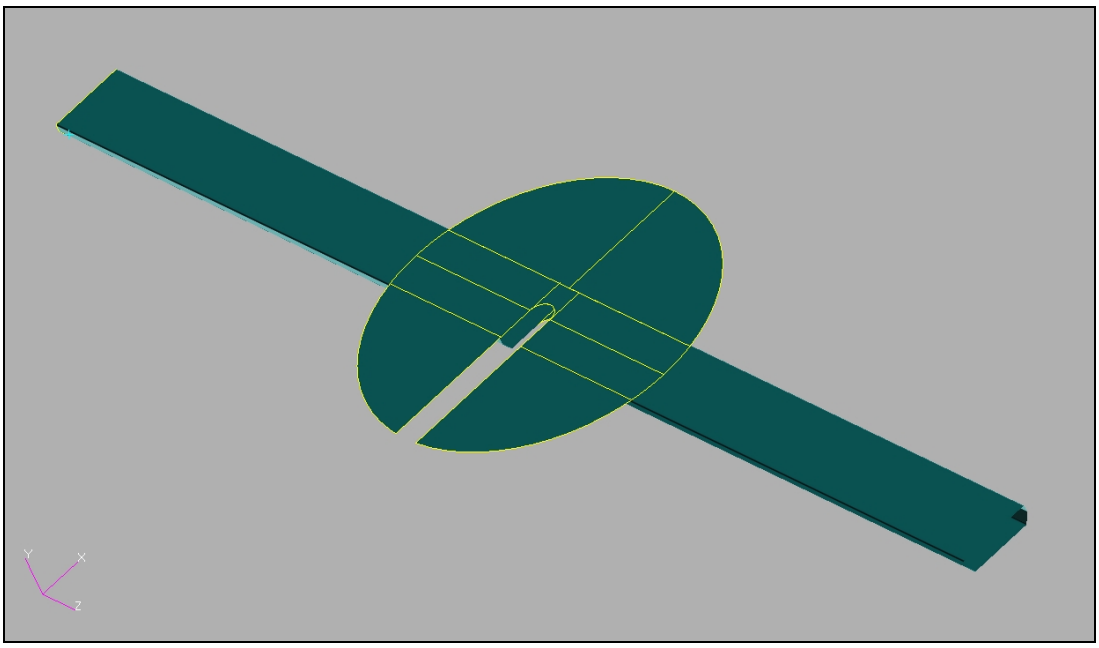

Figura 5.6 Modello geometrico della soluzione 1 costruito con il pre-processore MSC Patran

Capitolo 6

Modellizzazione F.E.M. del modulo MOX

6.1 Mesh

Il grado di infittimento della mesh del modello influisce direttamente sulla sua "pesantezza" e quindi sul costo di calcolo della soluzione numerica. L'errore di discretizzazione è intrinseco al metodo F.E.M.. Tale metodo infatti fornisce una soluzione approssimata ed è quindi lecito aspettarsi che tanto meno grossolana sarà la discretizzazione (o equivalentemente tanto più fitta sarà la mesh) tanto più accurati saranno i risultati prodotti.

Nel caso del componente strutturale in esame, prima di procedere alle necessarie prove di validazione, si è proceduto ad una attento controllo del grado di infittimento della mesh più idoneo per il tipo di analisi che si andranno ad effettuare.

Il modello sul quale sono state effettuate le prove seguenti è quello relativo alla soluzione 1. Per motivi pratici di ottimizzazione dei tempi di lavoro, i risultati da esso ricavati saranno applicati anche al modello della soluzione 2.

Data la geometria e il tipo di vincoli, si è notato che il modello ben si presta ad una "meshatura" il più regolare possibile. Per quanto riguarda invece il collegamento disco-MOX si sono riscontrati problemi maggiori. Per motivi che si vedranno in seguito è stato ritenuto opportuno realizzare un merge dei nodi per realizzare l'accoppiamento perfetto tra il MOX e il disco. Tale procedimento ha richiesto notevole tempo poiché in larga parte è stato effettuato manualmente[*].

E' stato applicato un carico flessionale generico identico per tutte le analisi, l'unico parametro variato di volta in volta è stata la dimensione massima degli elementi della mesh. Il modello è stato vincolato ad un estremo mentre l'altro è stato lasciato libero di muoversi. Il materiale impiegato è un materiale isotropo con modulo elastico E=70 GPa (verosimilmente un' alluminio). La mesh è stata realizzata con elementi bidimensionali CQUAD4 cui sono stati associati, nell'ambito delle diverse prove effettuate, i relativi spessori.

[*] In PATRAN è presente il comando "Equivalence"; esso permette di identificare in un unico nodo i nodi di elementi vicini con distanze relative inferiori ad un certo valore inserito dall'operatore. Tale valore presenta però un limite massimo dato dalle dimensioni minime degli elementi della mesh. Se così non fosse si avrebbe il collasso di quegli elementi le cui dimensioni risultano inferiori alla tolleranza impostata.

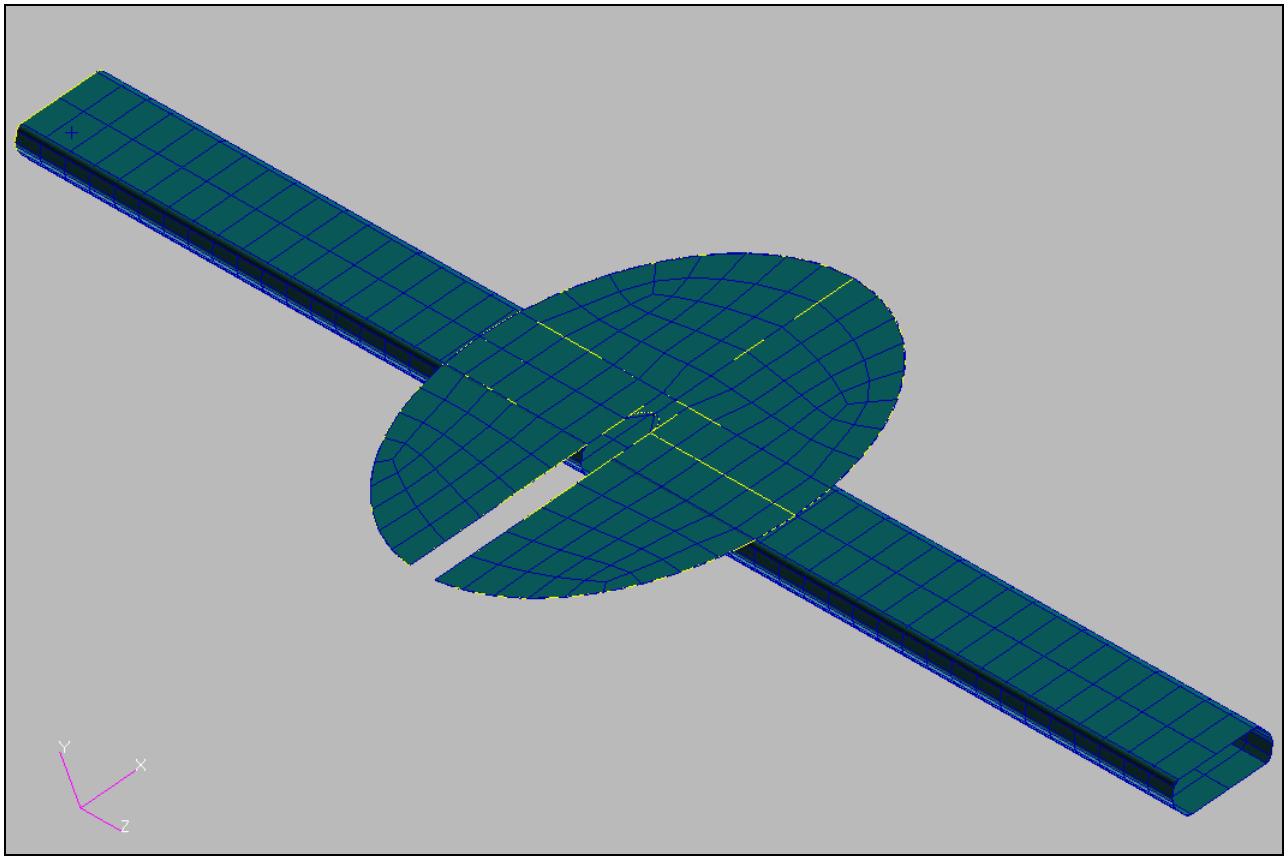

Figura 6.1 Mesh 1: dimensione massima degli elementi pari a 50 mm

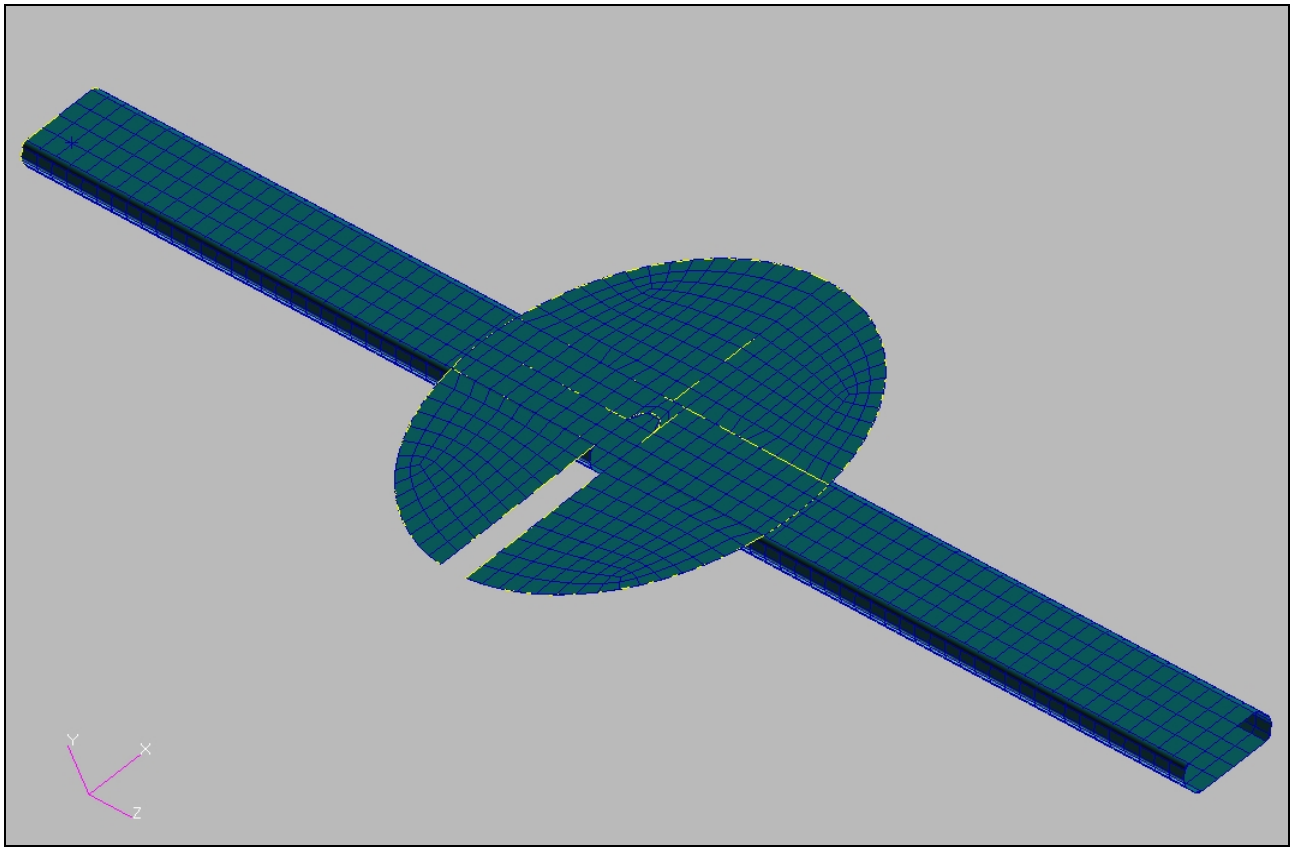

Figura 6.2 Mesh 2: dimensione massima degli elementi pari a 30 mm.

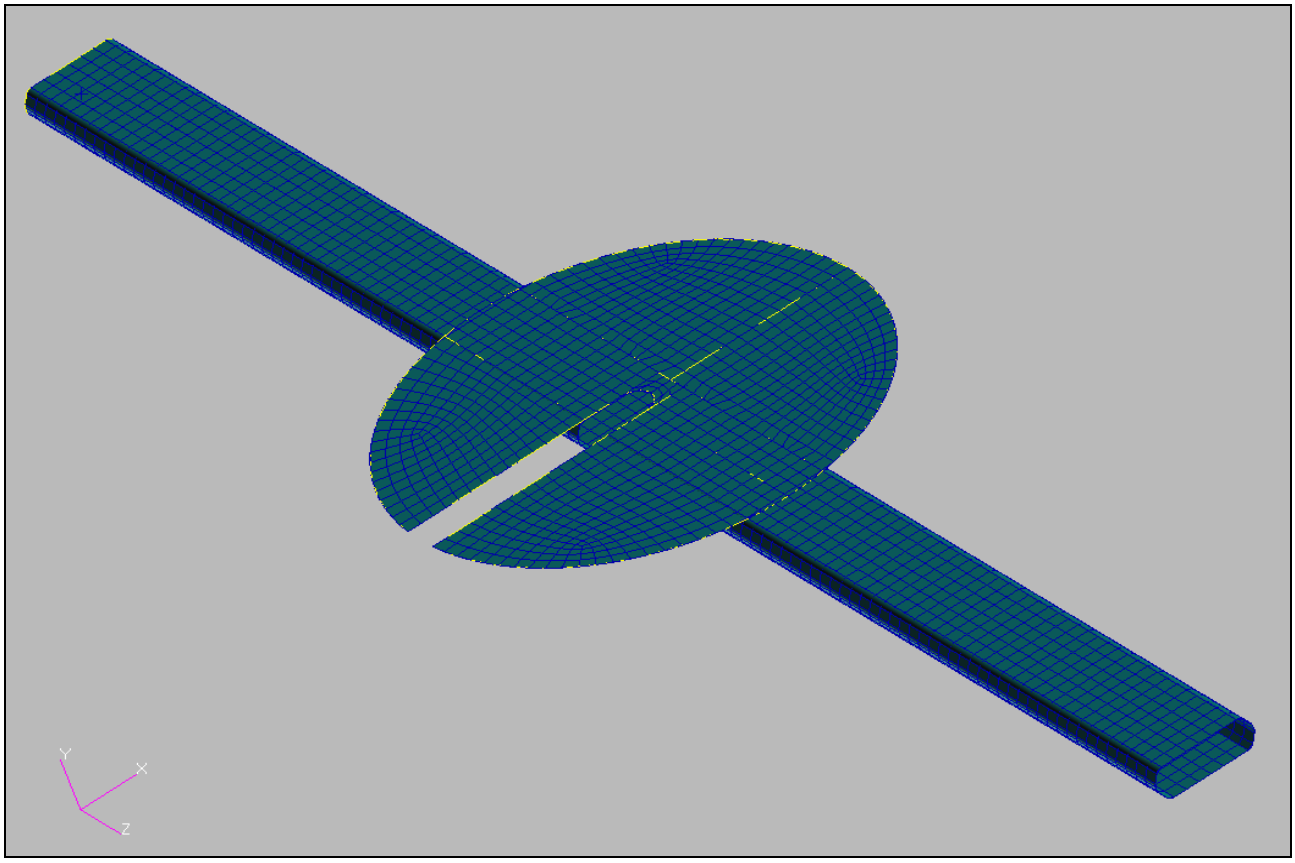

Figura 6.3 Mesh 3: dimensione massima pari a 20 mm.

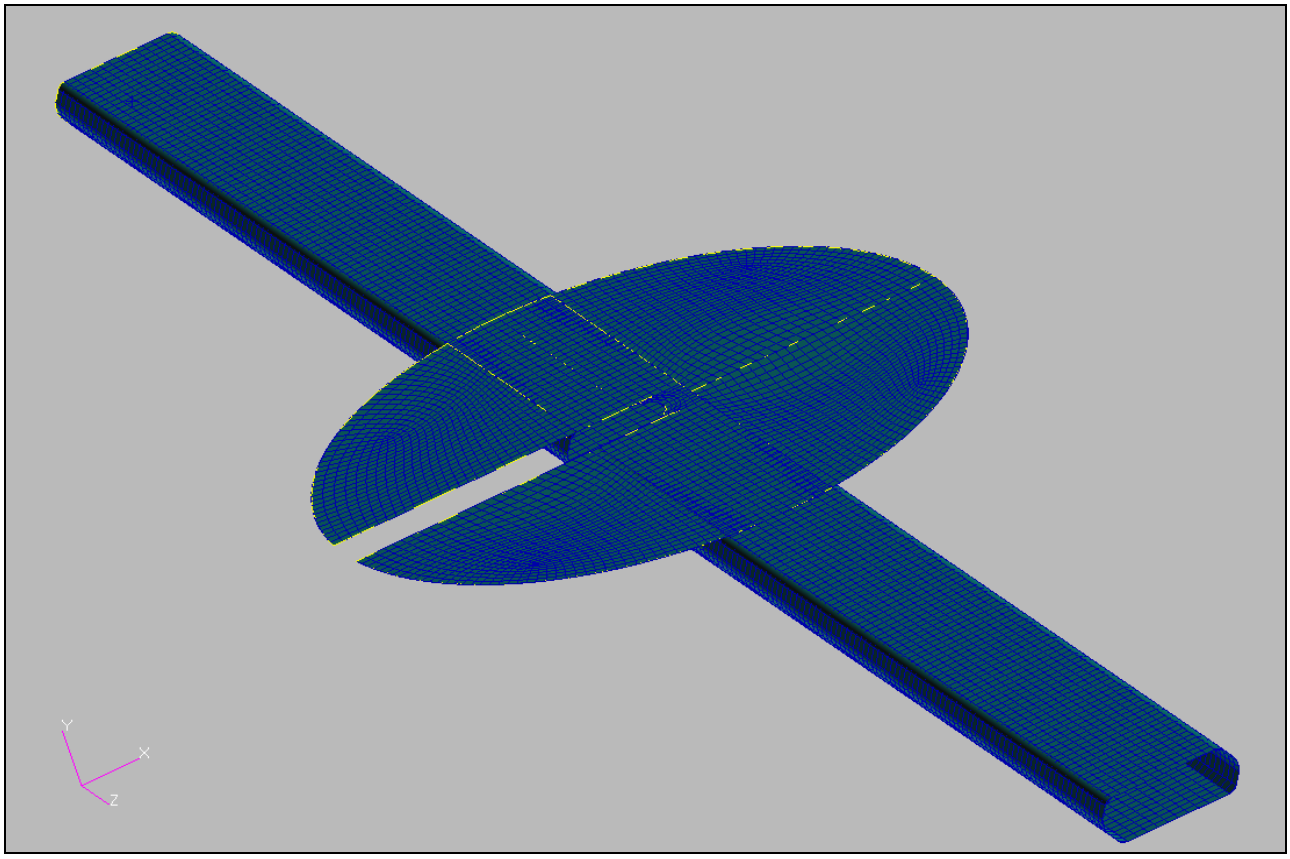

Figura 6.4 Mesh 4: dimensione massima pari a 15 mm.

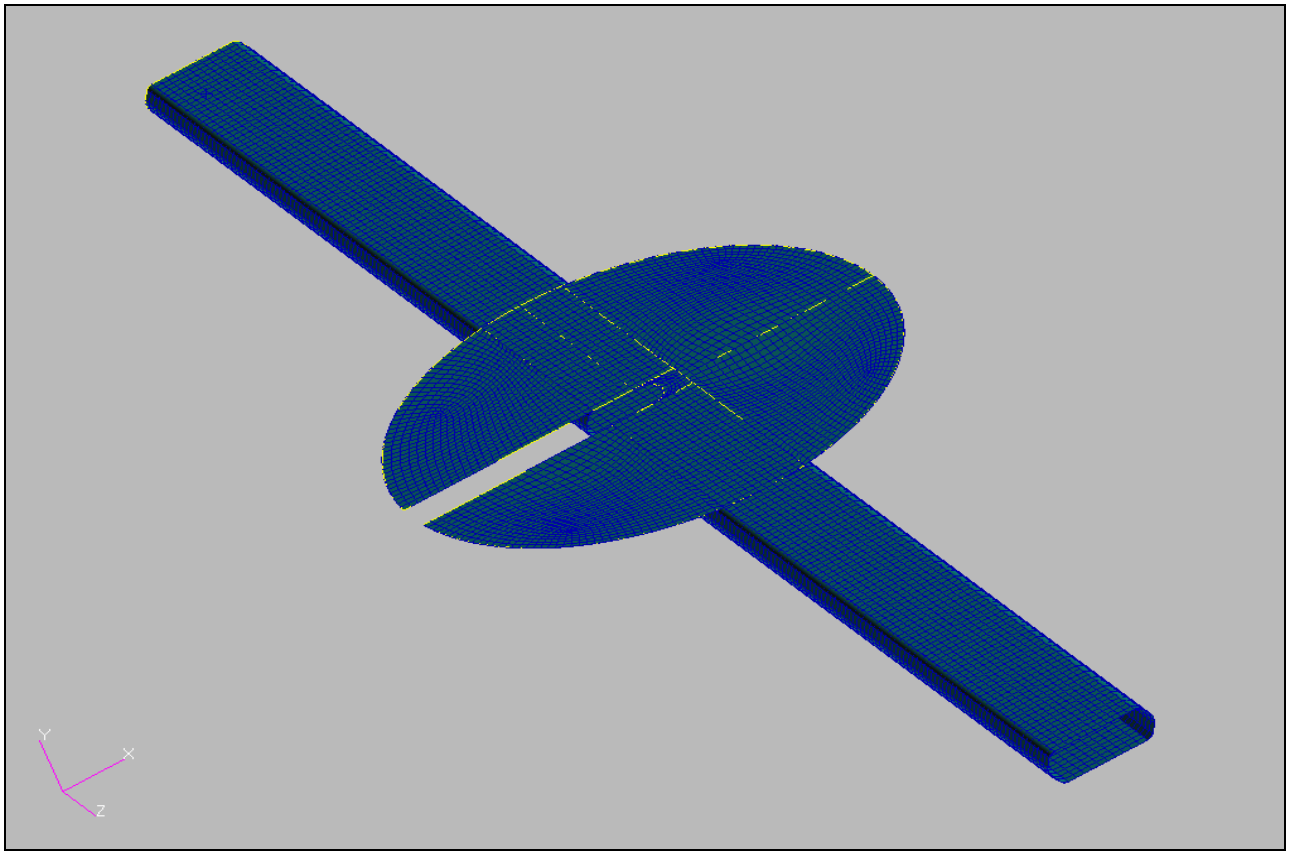

Figura 6.5 Mesh 5: dimensione massima pari a 10 mm.

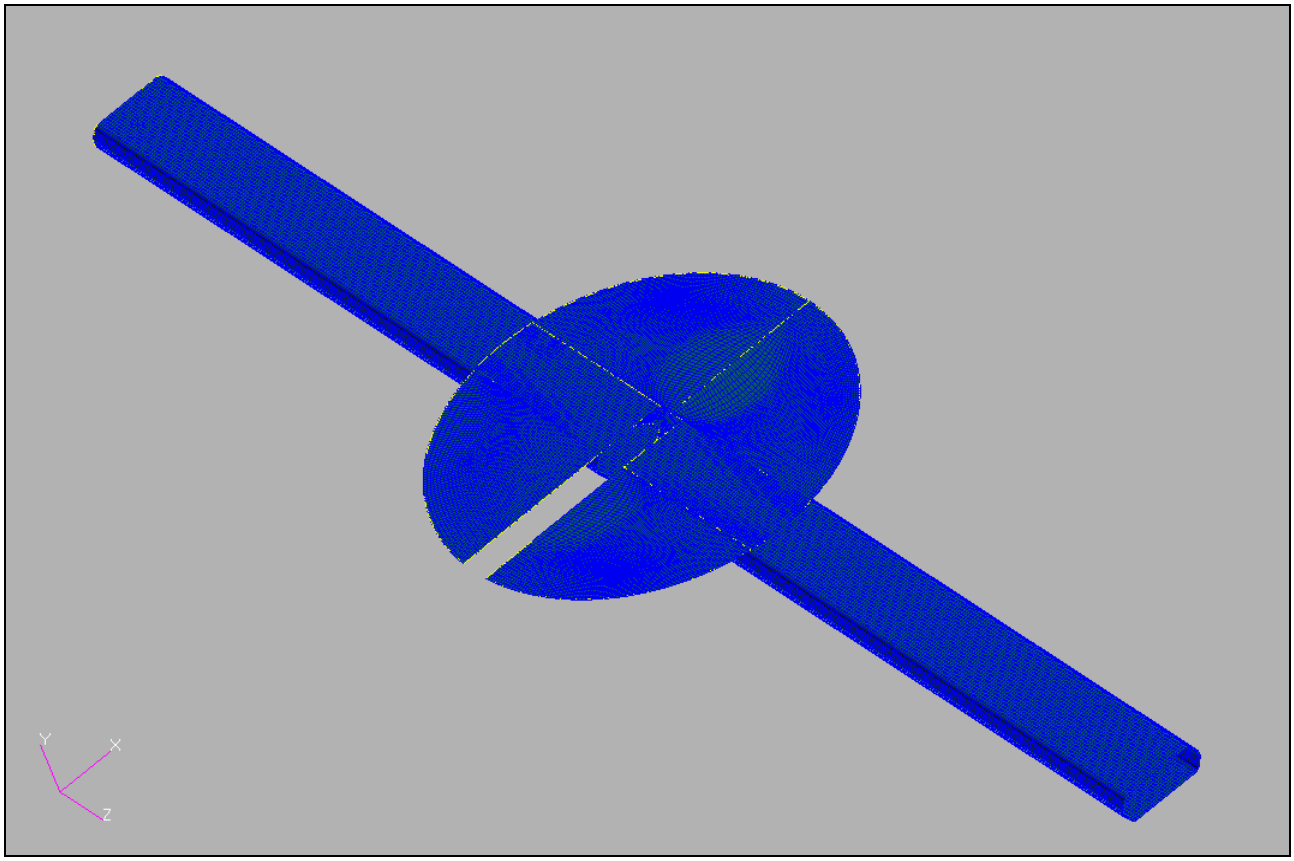

Figura 6.6 Mesh 6: dimensione massima pari a 5 mm.

	dimensione max elementi (mm)	spostamento max (mm)
Mesh n°1	50	8,056
Mesh n°2	30	8,065
Mesh n°3	20	8,069
Mesh n°4	15	8,071
Mesh n°5	10	8,073
Mesh n°6	5	8,073

Tabella 6.1 Nella presente tabella sono riportati i valori degli spostamenti massimi nei vari casi analizzati.

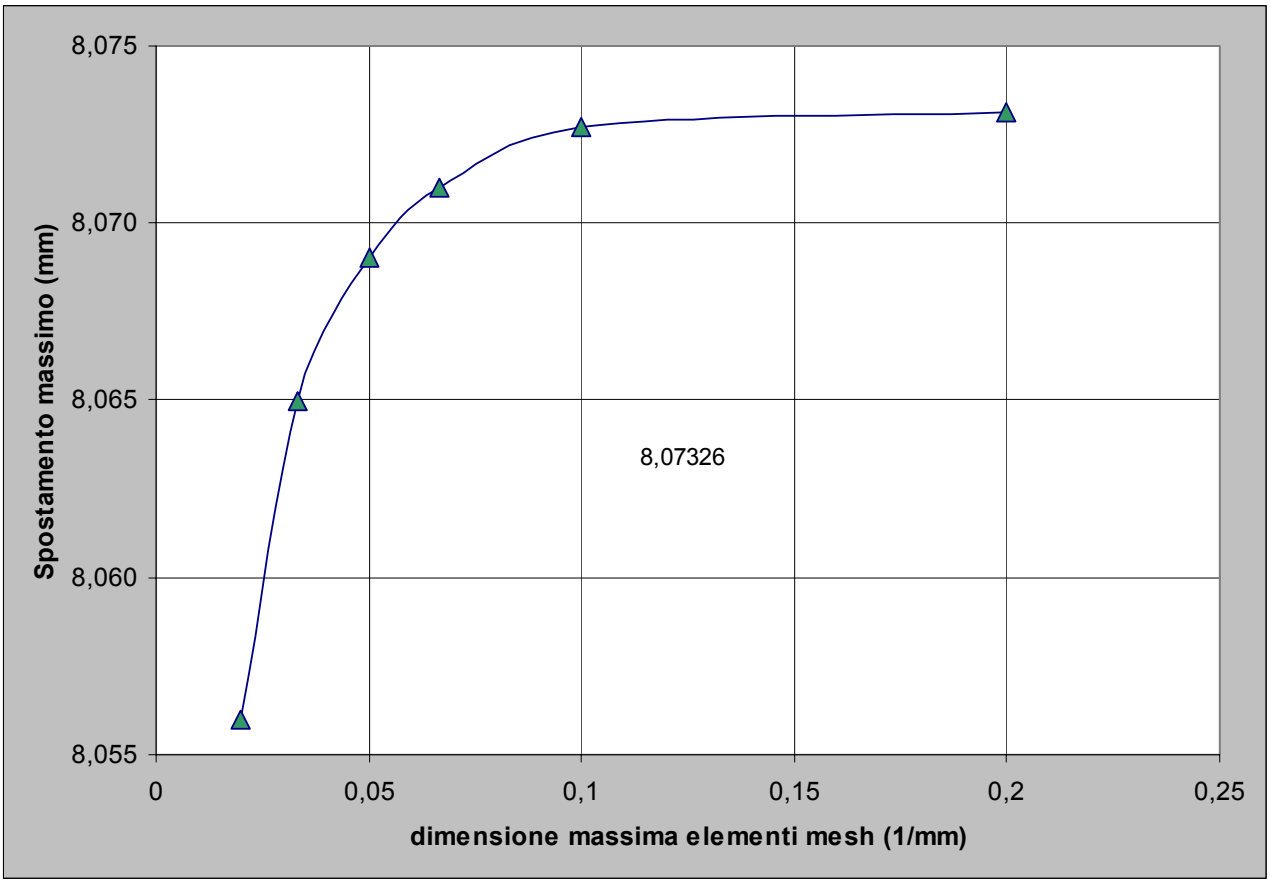

Figura 6.7 Nel presente grafico è evidente l'andamento asintotico dei valori dello spostamento all'aumentare della densità del mesh.

Dalle analisi effettuate è emerso che il valore dello spostamento tende asintoticamente a 8,0732 mm. Si ha quindi la convergenza della soluzione. Risulta opportuno allora utilizzare la mesh numero 5 che prevede una dimensione massima per gli elementi di 10 mm. Passando dalla mesh numero 5 alla numero 6 si ha un miglioramento della soluzione pari a circa lo 0,05%. Seppur più

idonea ad approssimare il valore limite, in fase di analisi la mesh numero 6 ha evidenziato un tempo di processazione del modello molto elevato e pari circa 2 minuti* in confronto a quello del modello con la mesh numero 5 che è stato pari a 17 sec. Rispetto alle mesh numero 3 e 4 il miglioramento ottenuto con la mesh 5 è di circa lo 0,4% e 0,2% con un tempo di soluzione pressoché identico. Più marcata è la differenza con le soluzioni 1 e 2; tali soluzioni hanno richiesto un tempo di soluzione molto minore (circa 1 sec) ma rispetto ad esse la mesh numero 5 ha comportato miglioramenti dell'ordine dell'1% La mesh numero 5 risulta quindi, per il tipo di analisi che si dovranno effettuare, il giusto compromesso tra semplicità del modello e accuratezza dei risultati. Inoltre una tale densità di mesh permette, almeno in prima battuta, una analisi più dettagliata delle deformazioni nelle zone critiche, prime fra tutte quella a ridosso delle Beam-Pipe, e il disco, sul quale verranno montate le microstrips.

Stabilito ora il grado di infittimento più opportuno si procederà, nei paragrafi successivi, ad una serie di controlli sui modelli, al fine di valutarne la corretta formulazione matematica.

6.2 Correttezza del modello F.E.M.

Al fine di valutare la correttezza della rappresentazione matematica del modello agli elementi finiti, sono state effettuate delle prove di trazione, flessione e torsione del modello stesso. I valori forniti dal solutore sono stati poi confrontati con quelli ricavati analiticamente risolvendo le note equazioni fornite dalla Scienza delle Costruzioni per una trave di sezione e lunghezza identiche.

Data la simmetria del MOX rispetto all'asse della Beam-Pipe le prove sono state effettuate solo su metà modello, ciò ha permesso di ridurre notevolmente la pesantezza del modello FEM e quindi il costo computazionale dell'analisi.

Tali prove sono state effettuate su entrambe i modelli e sono riportate nel seguito.

* I tempi di soluzione sono stati letti sul file F06 di Nastran. Essi sono realitvi alle risorse di calcolo utilizzate. Nell'ambito del presente lavoro si è utilizzato un Pentium 4 con processore a 2,8 GHz con 512 Mb di RAM.

6.2. 1 Modello 1: prova di trazione

Per effettuare la prova è stato imposto un vincolo di incastro ad una estremità del modello mentre all'altra è stato applicato un carico di trazione di 200N distribuito su quattro nodi. Ponendoci nell'ipotesi di Saint Venant abbiamo considerato, ai fini della valutazione, lo spostamento di un punto del modello posto a 35 cm dal vincolo. Nel modello FEM tale punto corrisponde al nodo 1584.

Allora la relazione da utilizzare è la seguente:

$$N = EA \cdot \varepsilon$$

In cui:

- N è la forza assiale applicata [N];
- E è il modulo elastico longitudinale [Pa];
- A è l'area della sezione di base [m^2];
- ε è l'allungamento relativo in funzione della lunghezza iniziale, esprimibile anche come $\Delta l / l_0$, con Δl pari al valore dell'allungamento assoluto ed l_0 pari alla lunghezza iniziale.

La precedente relazione può essere riscritta nella forma:

$$\Delta l = \frac{N l_0}{EA}$$

Il Modulo di Young ipotizzato è di 210 GPa mentre l'area della sezione del MOX è pari a 86.6 mm^2.

Si ottiene allora una valore dello spostamento:

$$\Delta l = 0.00377 \text{ mm}$$

Dall' analisi FEM si ottiene il seguente valore per lo spostamento del nodo 1584 da noi considerato:

$$\Delta l = 0.00376 \text{ mm}$$

Si ha quindi una differenza percentuale del 0,3%

I moderni programmi di pre-processing, come MSC PATRAN utilizzato per il presente lavoro di tesi, hanno anche capacità di post-processing; sono cioè in grado di leggere i file di uscita del solutore e di fornire una comoda ed utile rappresentazione grafica del risultato. Con tali capacità si possono identificare immediatamente spostamenti, distribuzioni di sforzi e tensioni ecc…

Di seguito è riportata una immagine in cui è possibile notare lo stato di deformazione del modello a seguito del carico applicato.

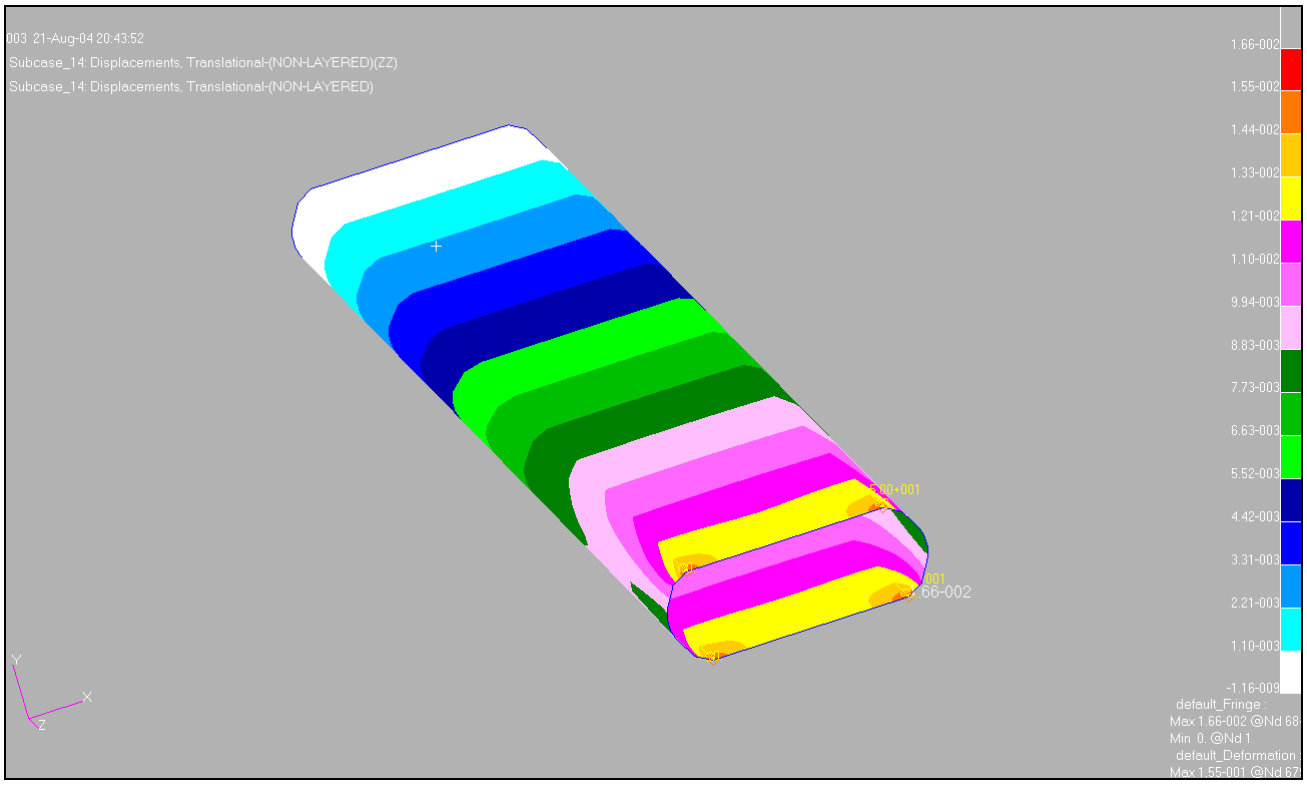

Figura 6.8 Immagine ottenuta nella fase di post-processing dell'analisi effettuata. Il nodo 1584 si trova nella zona di colore blu cui corrisponde, come si può notare dalla legenda a lato, uno spostamento di circa 3 µm.

6.2. 2 Modello 1: prova di flessione

Per effettuare la prova di flessione è stato applicato un carico verticale di 200N* sulla sezione di estremità del modello. La struttura è ancora vincolata ad una estremità con un incastro.

Per il confronto con la soluzione analitica è stata considerata una trave a sbalzo di sezione identica a quella del MOX. Per essa possiamo scrivere:

$$EI\frac{d^3w}{dx^3} = -T$$

In cui:

- T è la forza di taglio applicata all'estremo libero [N];
- E è il modulo elastico [Pa];
- I è il momento di inerzia della sezione rispetto all' asse X [m^4];
- Dalla precedente relazione si ricava per integrazioni successive:

$$w''' = -\frac{TL^3}{EI}$$

$$w'' = -\frac{TL^3}{EI}\xi + c_1$$

$$w' = -\frac{TL^3}{EI}\xi^2 + c_1\xi + c_2$$

$$w = -\frac{TL^3}{EI}\xi^3 + c_1\xi^2 + c_2\xi + c_3$$

* Il caso qui considerato è quello di flessione dovuta a taglio

Le varie costanti vengono determinate una volta imposte le condizioni al contorno che sono:

$$w(0) = 0 \Rightarrow c_3 = 0$$
$$w'(0) = 0 \Rightarrow c_2 = 0$$
$$w''(1) = 0 \Rightarrow c_1 = \frac{TL^3}{EI}$$

Si ha allora per lo spostamento:

$$w(\xi) = \frac{TL^3}{6EI}(3\xi^2 - \xi^3)$$

In particolare per quello dell'estremo libero $(\xi = L)$:

$$w(L) = \frac{TL^3}{6EI}(3L^2 - L^3)$$

Considerando la stessa sezione già vista per la prova di trazione si ottiene:

$$w = 1{,}270\,\text{mm}$$

Lo spostamento fornito invece da codice di calcolo per il nodo 1584 è pari a:

$$w = 1{,}276\text{mm}$$

La differenza percentuale tra i risultati i n questo caso è dell'0,5%

Analogamente a prima riportiamo una immagine dello stato di deformazione

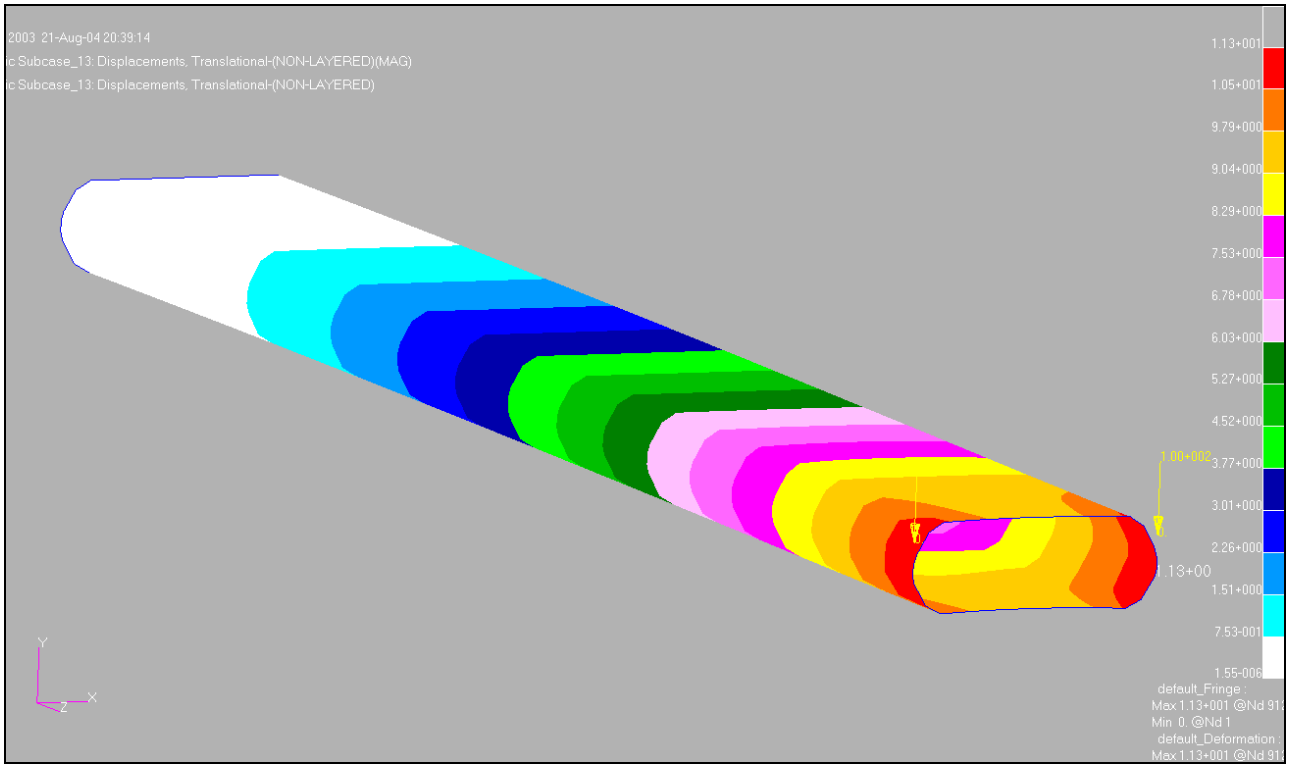

Figura 6.9 Immagine ottenuta nella fase di post-processing dell'analisi effettuata. Il nodo 1584 si trova ora nella zona di colore bianco cui corrisponde, come si può notare dalla legenda a lato, uno spostamento di circa 1 mm.

6.2. 3 Modello 1: prova di torsione

All'analisi flessionale è seguito lo studio della struttura per un carico di tipo torsionale ed intensità unitaria.

In questo caso la relazione da utilizzare e la seguente:

$$\frac{GJ}{L} = \frac{M}{\varphi}$$

In cui si è usata la seguente simbologia:

- G, modulo di taglio [Pa];
- J, momento d'inerzia polare o torsionale;
- L, lunghezza del componente [m];

- M, momento torcente [Nm];
- φ, derivata dell'angolo di rotazione rispetto all'asse attorno al quale avviene la torsione [rad].

Il confronto ci porta in questo caso:

Soluzione analitica	**Soluzione numerica**
$2{,}32 \cdot 10^{-4}$ rad	$2{,}21 \cdot 10^{-4}$ rad

Nel caso della torsione la differenza percentuale è per il primo modello del 4,7%. Si tenga comunque presente che per la soluzione analitica è stata assunta l'ipotesi di indeformabilità della sezione, cosa che in realtà, come è evidente dalla figura, non è corrispondente al vero.

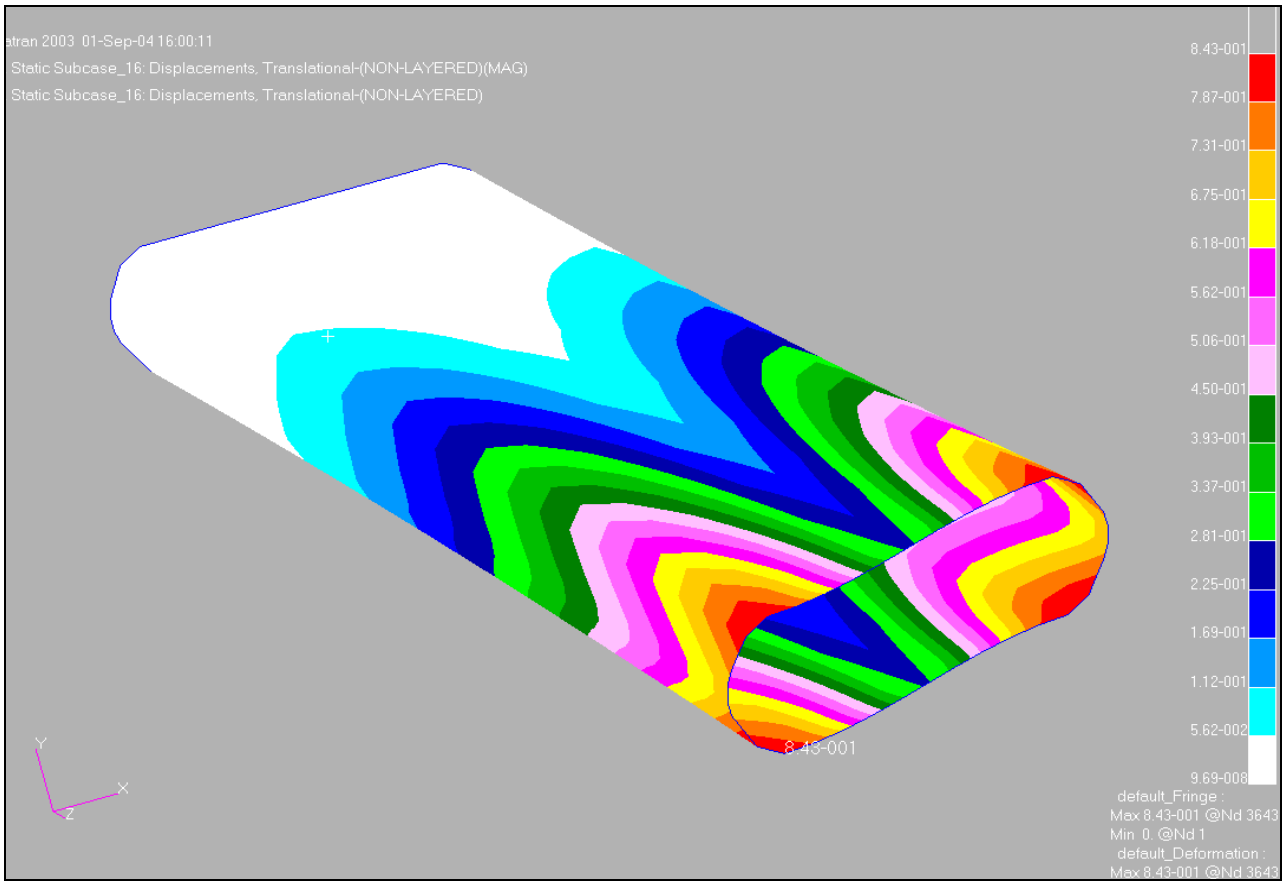

Figura 6.10 Post-processing della analisi torsionale

6.2. 4 Validazione del modello 2

Le condizioni di vincolo e carico utilizzate per validare il modello 2 sono le stesse utilizzate per il modello 1. In tal modo risulta possibile anche un primo immediato confronto tra le proprietà meccaniche delle due configurazioni.

Per tale modello valgono le stesse considerazioni del precedente, si riportano quindi solamente i risultati ottenuti con l'analisi F.E.M. e con la risoluzione delle equazioni già presentate sopra.

Seguono poi le immagini relative alle tre analisi effettuate.

Da questa prima analisi,che conferma la validità di entrambe i modelli, possiamo notare un miglior comportamento di quello a sezione esagonale.

	Soluzione analitica	**Soluzione numerica**	**Differenza %**
Trazione	0,00378 mm	0,00379 mm	0,5%
Flessione	3,027 mm	3,045 mm	0,6%
Torsione	2,23*10^-3 rad	2,12*10^-3 rad	4,9%

Tabella 6.2 Schema riassuntivo delle prove effettuate sul secondo modello. Si noti come i valori delle differenze percentuali siano pressoché identici a quelli del primo modello, per contro, volendo effettuare un primo confronto tra le due soluzioni costruttive, essi risultano maggiori.

Per quanto riguarda la trazione i risultati sono pressoché equivalenti in virtù del fatto che le aree delle sezioni dei due modelli sono quasi identiche. Per quanto riguarda la flessione il secondo modello tende a deformarsi di meno in conseguenza del maggiore momento d'inerzia della sezione stessa rispetto al piano neutro. Per la torsione vale un discorso analogo; il valore più basso della rotazione intorno all'asse di torsione è dovuto all'aumento dell'area della sezione racchiusa dalla struttura in parete sottile del modulo.

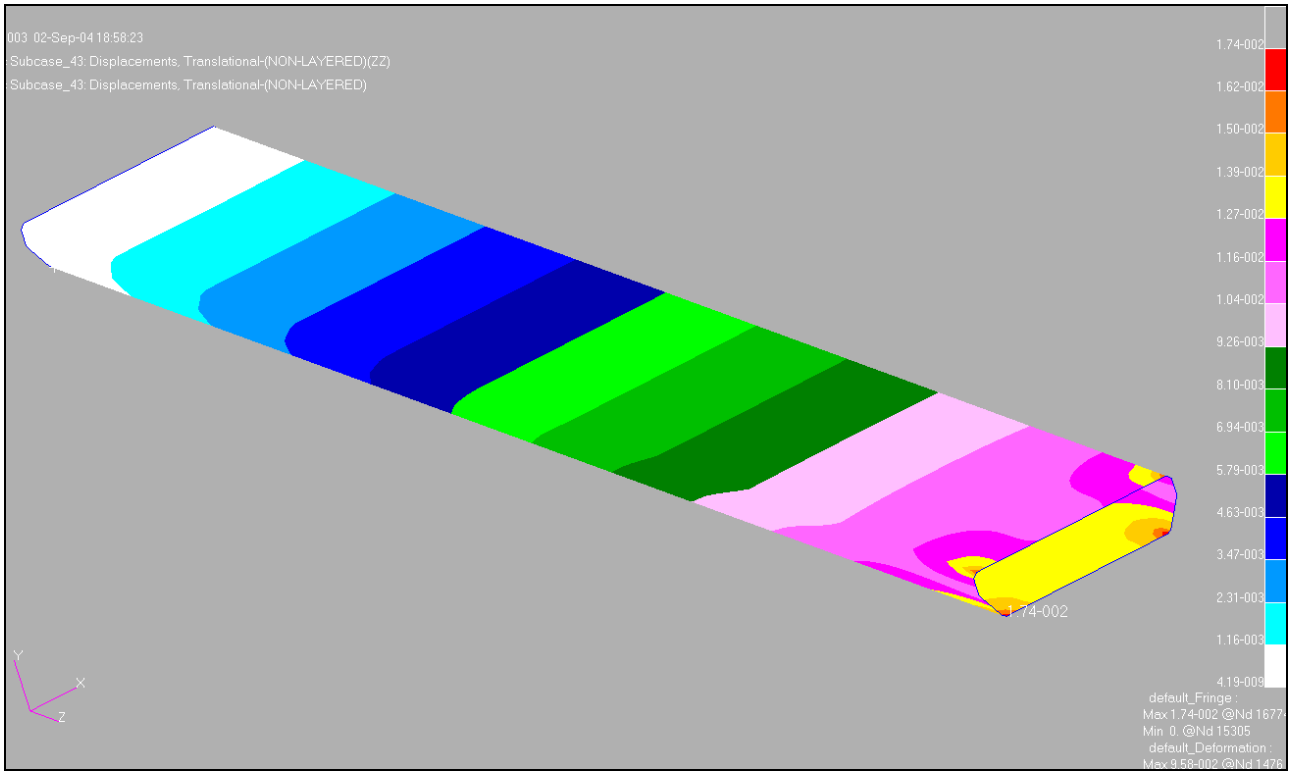

Figura 6.11 Post-processing della prova di trazione

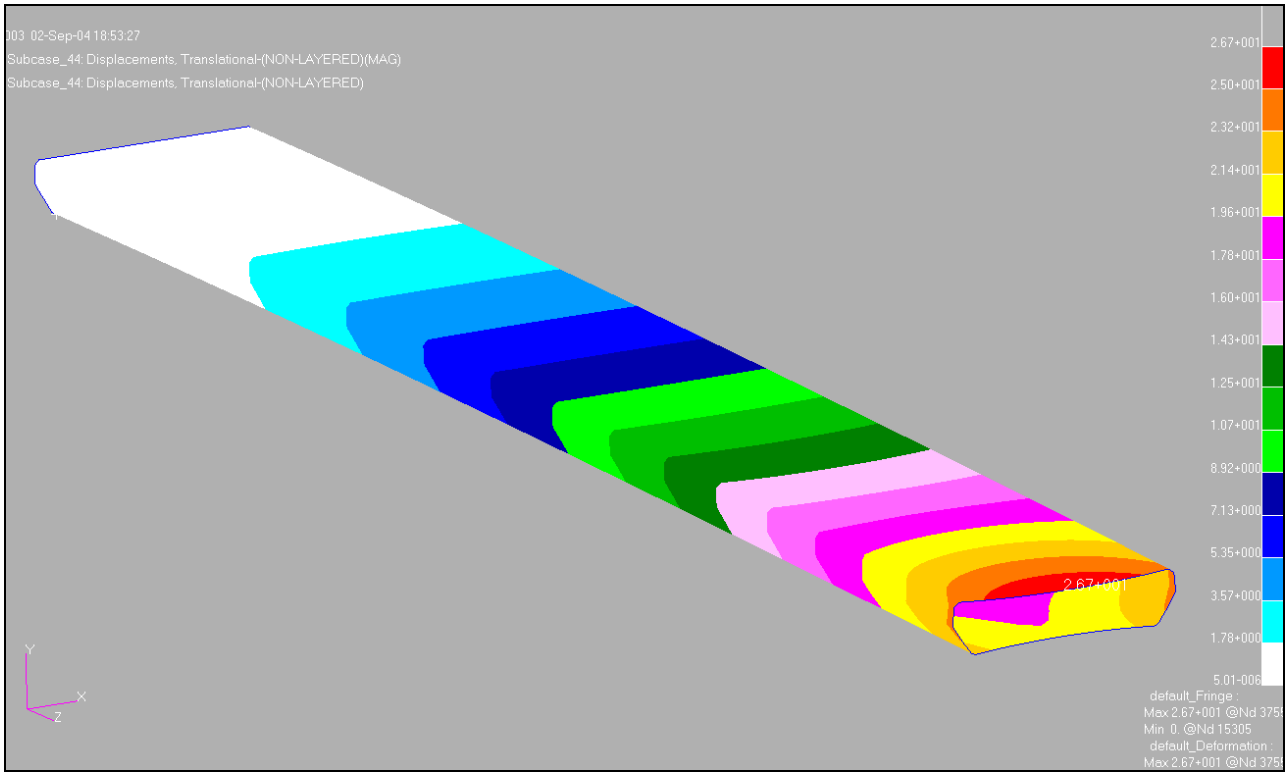

Figura 6.12 Post-processing della prova di flessione

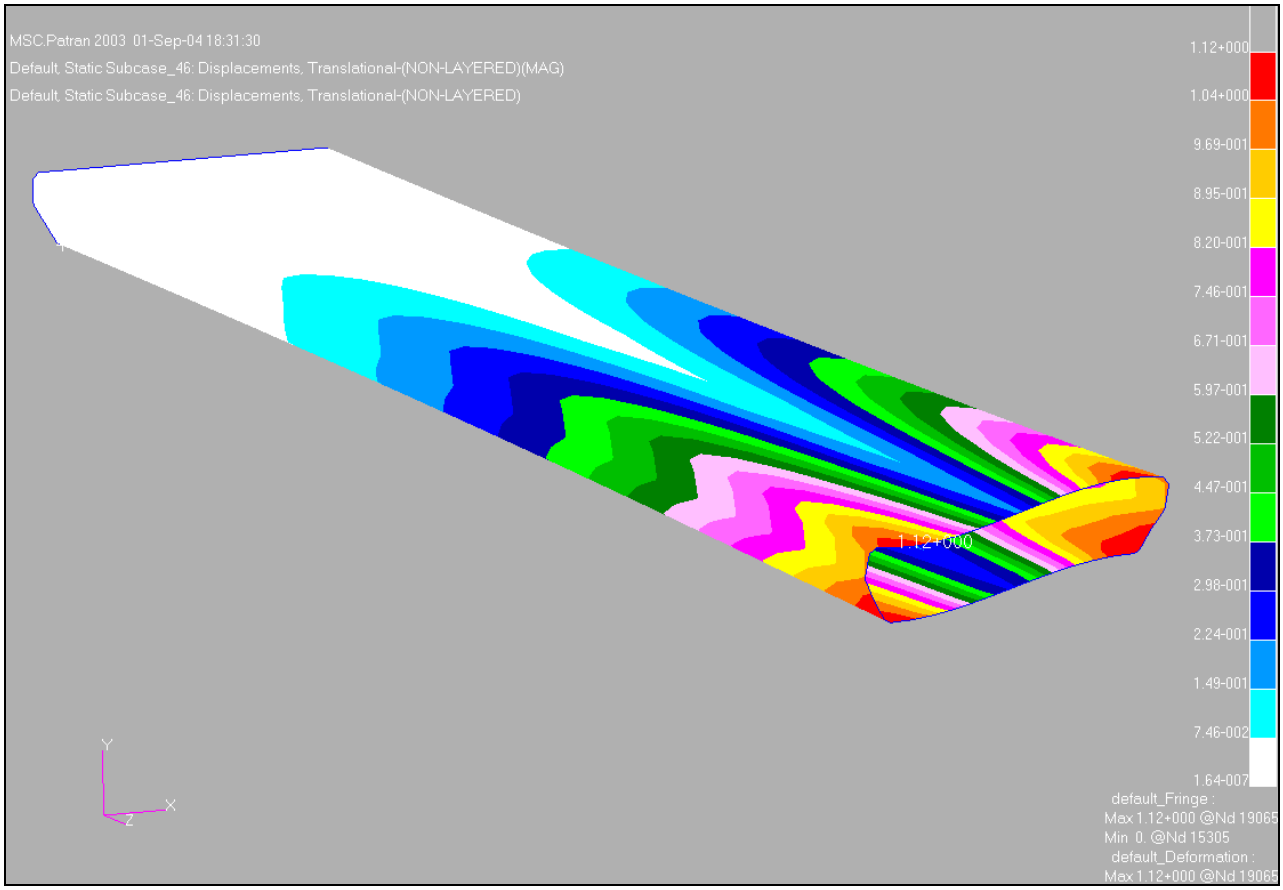

Figura 6.13 Post-processing della prova di torsione

6.3 Confronto tra le rigidezze dei due modelli

Si procede ora ad una analisi comparata delle rigidezze assiali, flessionali e torsionali dei due modelli.

Il confronto è stato fatto, analogamente alle prove di validazione, con l'applicazione di carichi e vincoli identici nonché con l'utilizzo dello stesso materiale per entrambe i modelli.

Le prove sono state effettuate sempre sui semimodelli privo di disco; si sono potute così calcolare le rigidezze inserendo i dati letti dai file di output nelle equazioni relative al caso semplice di trave con sezione e lunghezza identica a quella del semimodello e soggetta alle stesse sollecitazione e tipo di vincoli. Il materiale impiegato è il composito che verrà utilizzato per la realizzazione finale del modulo MOX (vedi cap 8). Nella parti del modulo, corrispondenti alla basi maggiore e minore della

sezione trapezoidale e a quelle superiore e inferiore di quella ottagonale si ha un sandwich costituito da 6 pelli di pre-preg separate in due gruppi da tre dall'interposizione di 2 mm di rohacell.

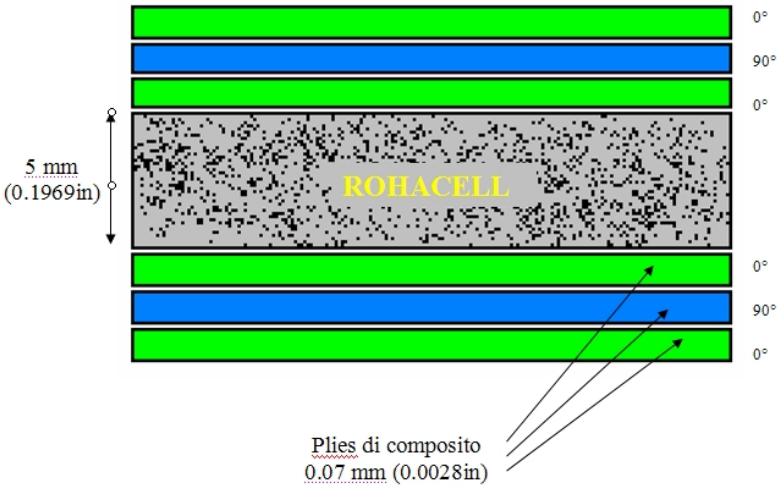

Figura 6.14 Schematizzazione del sandwich in composito

Le condizioni di vincolo e carico prevedono di avere una struttura incastrata ad un'estremità e caricata dalla parte opposta, le sollecitazioni impresse alla struttura sono state:

- Carico assiale di 200 N
- Momento flettente 2 N/m
- Momento torcente 1 N*m

Nelle analisi numeriche si è preso a riferimento un nodo posto a distanza 50 cm dal vincolo di incastro.

Lo studio effettuato è stato rivolto a valutare, nelle sopraccitate condizioni di carico, l'entità degli spostamenti in funzione dell'orientazione delle fibre del composito. Si è partiti da una condizione di orientazione 0°/0°/0° facendo variare man mano quella della pelle centrale fino ad essere ortogonale a quella delle altre due. Tale studio ha di conseguenza riguardato anche quello delle varie rigidezze.

Si prende come angolo zero di orientazione delle fibre quello lungo la direzione del carico di trazione.

6.3. 1 Analisi comparata: Rigidezza assiale

Considerata la relazione:

$$N = EA \cdot \varepsilon$$

essa può essere riscritta, esplicitando lo spostamento percentuale, nella forma:

$$\frac{N}{\Delta l} = \frac{EA}{l_0}$$

che esprime la rigidezza assiale divisa per la lunghezza iniziale l_0.

Tale rigidezza può essere immediatamente calcolata inserendo nell'espressione sopra il valore dello spostamento del nodo di riferimento ricavato dall'analisi e quello noto del carico agente.

I grafici che seguono, relativi alle due soluzioni, evidenziano, come è logico aspettarsi, una significativa riduzione dello spostamento del nodo di riferimento e un aumento della rigidezza assiale man mano che la fibre della pelle centrale tendono ad orientarsi nella direzione della sollecitazione.

Si riportano inoltre in due tabelle i valori degli spostamenti e delle rigidezze calcolate per le due soluzioni e plottati nei grafici.

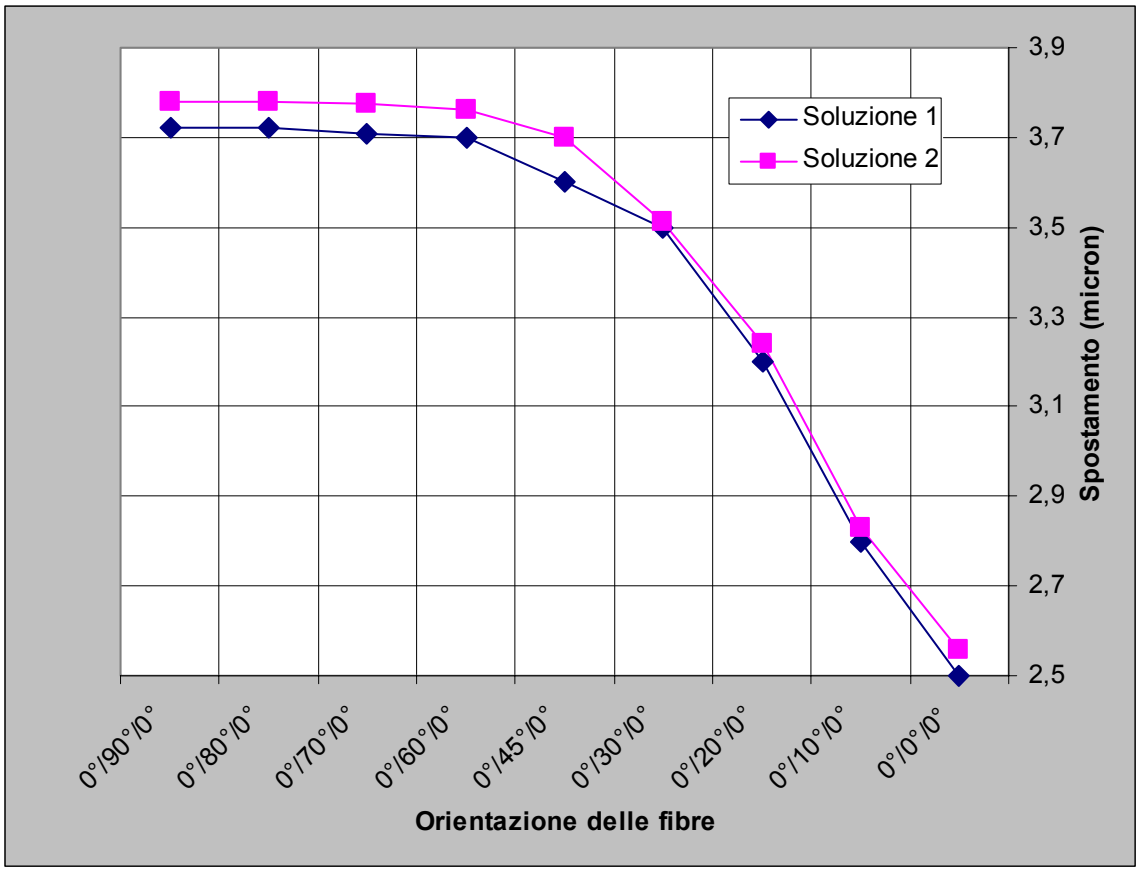

Figura 3.15 I valori degli spostamenti delle due soluzioni differiscono poco per ogni orientazione delle fibre. Esso risulta minimo per l'orientazione 0°/0°/0°.

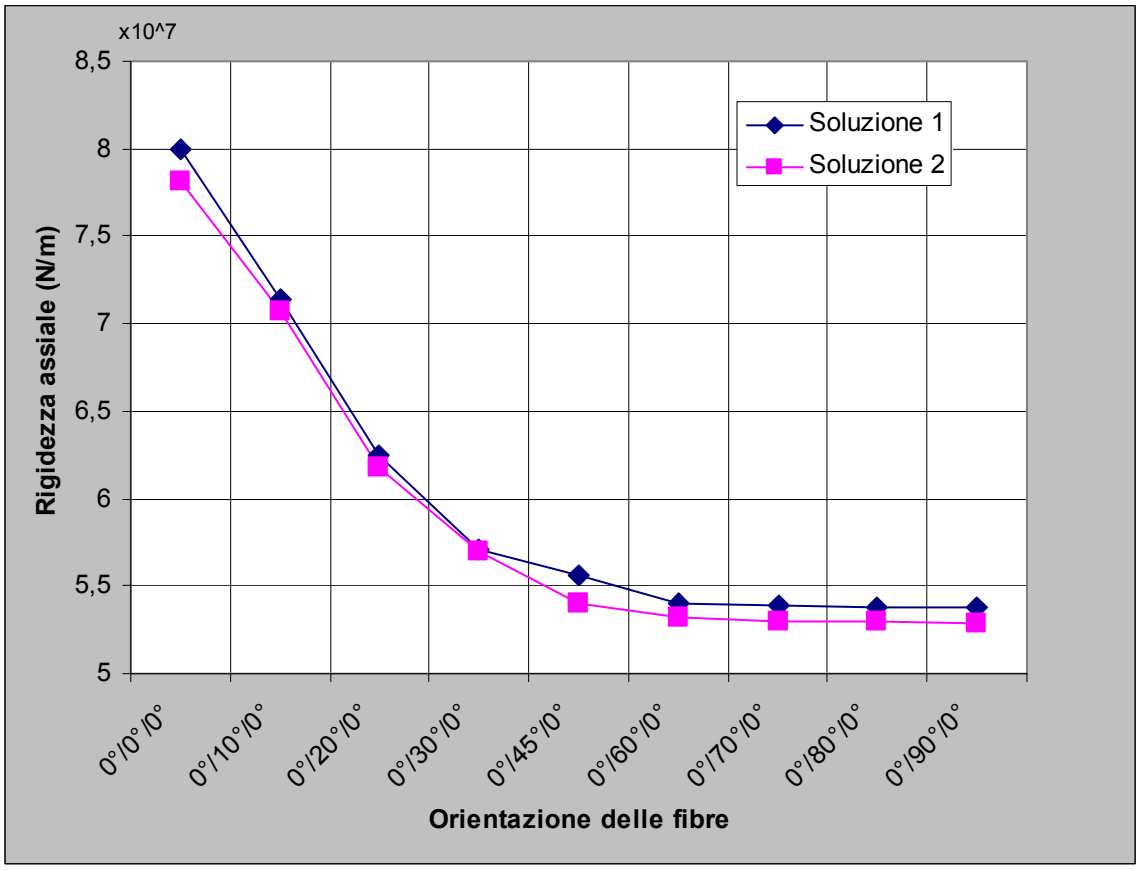

Figura 6.16 Andamento delle rigidezze dei due modelli.

Orientazione delle fibre	Spostamento max (micron)	Rigidezza assiale calcolata (N/m) x10^7
0°/0°/0°	2,50	8,00
0°/10°/0°	2,80	7,14
0°/20°/0°	3,20	6,25
0°/30°/0°	3,50	5,71
0°/45°/0°	3,60	5,56
0°/60°/0°	3,70	5,41
0°/70°/0°	3,71	5,39
0°/80°/0°	3,72	5,38
0°/90°/0°	3,72	5,38

Tabella 6.3 Spostamenti e rigidezze relativi alla soluzione 1 per le varie orientazioni delle pelli

Orientazione delle fibre	Spostamento max (micron)	Rigidezza assiale calcolata (N/m) x10^7
0°/0°/0°	2,56	7,81
0°/10°/0°	2,83	7,07
0°/20°/0°	3,24	6,17
0°/30°/0°	3,51	5,70
0°/45°/0°	3,70	5,41
0°/60°/0°	3,76	5,32
0°/70°/0°	3,78	5,30
0°/80°/0°	3,78	5,29
0°/90°/0°	3,78	5,29

Tabella 6.4 Spostamenti e rigidezze relativi alla soluzione 2 per le varie orientazioni delle pelli

L'entità degli spostamenti e della rigidezza calcolata sono molto simili per le due soluzioni. Questo perché l'area delle due sezioni è pressoché identica. L'area della sezione del modello 1 e tuttavia leggermente maggiore e questo spiega il miglior comportamento della soluzione 1.

6.3. 2 Analisi comparata: Rigidezza flessionale

In modo analogo a quanto fatto per lo sforzo assiale si sono ripetute le analisi al FEM per la sollecitazione flessionale. Si sono calcolati i vari angoli di rotazione per effetto della flessione e si sono determinate le corrispondenti rigidezze in funzione della diversa orientazione delle fibre del composito. Per il calcolo della corrispondente rigidezza rapportata alla lunghezza iniziale si è fatto uso della relazione*:

$$\frac{EJ}{l} = \frac{M}{\varphi}$$

In tale espressione J è il momento di inerzia flessionale (Kg*m^2) e φ è l'angolo di rotazione intorno all'asse di flessione. Si ricorda che il momento flettente applicato alla sezione di estremità e di 2 N*m.

Si riportano analogamente a prima i valori tabellati e graficati della rotazione attorno all'asse di flessione e della rigidezza flessionale di entrambe i modelli.

Orientazione delle fibre	Rotazione attorno all'asse di flessione (rad) x10^-8	Rigidezza flessionale calcolata (Nm/rad) x 10^7
0°/90°/0°	3,90	2,56
0°/80°/0°	3,89	2,57
0°/70°/0°	3,89	2,57
0°/60°/0°	3,88	2,58
0°/45°/0°	3,82	2,62
0°/30°/0°	3,61	2,77
0°/20°/0°	3,32	3,01
0°/10°/0°	2,90	3,45
0°/0°/0°	2,62	3,82

Tabella 6.5 Rotazioni e rigidezze relative alla soluzione 1 per varie orientazioni delle pelli di pre-preg

Orientazione delle fibre	Rotazione attorno all'asse di flessione (rad) x10^-8	Rigidezza flessionale calcolata (Nm/rad) x 10^7
0°/90°/0°	8,14	1,23
0°/80°/0°	8,13	1,23
0°/70°/0°	8,12	1,23
0°/60°/0°	8,11	1,23
0°/45°/0°	7,92	1,26
0°/30°/0°	7,38	1,36
0°/20°/0°	6,69	1,49
0°/10°/0°	5,71	1,75
0°/0°/0°	5,08	1,97

Tabella 6.6 Rotazioni e rigidezze relative alla soluzione 2 per varie orientazioni delle pelli di pre-preg

* Nella presente analisi consideriamo il caso di flessione pura

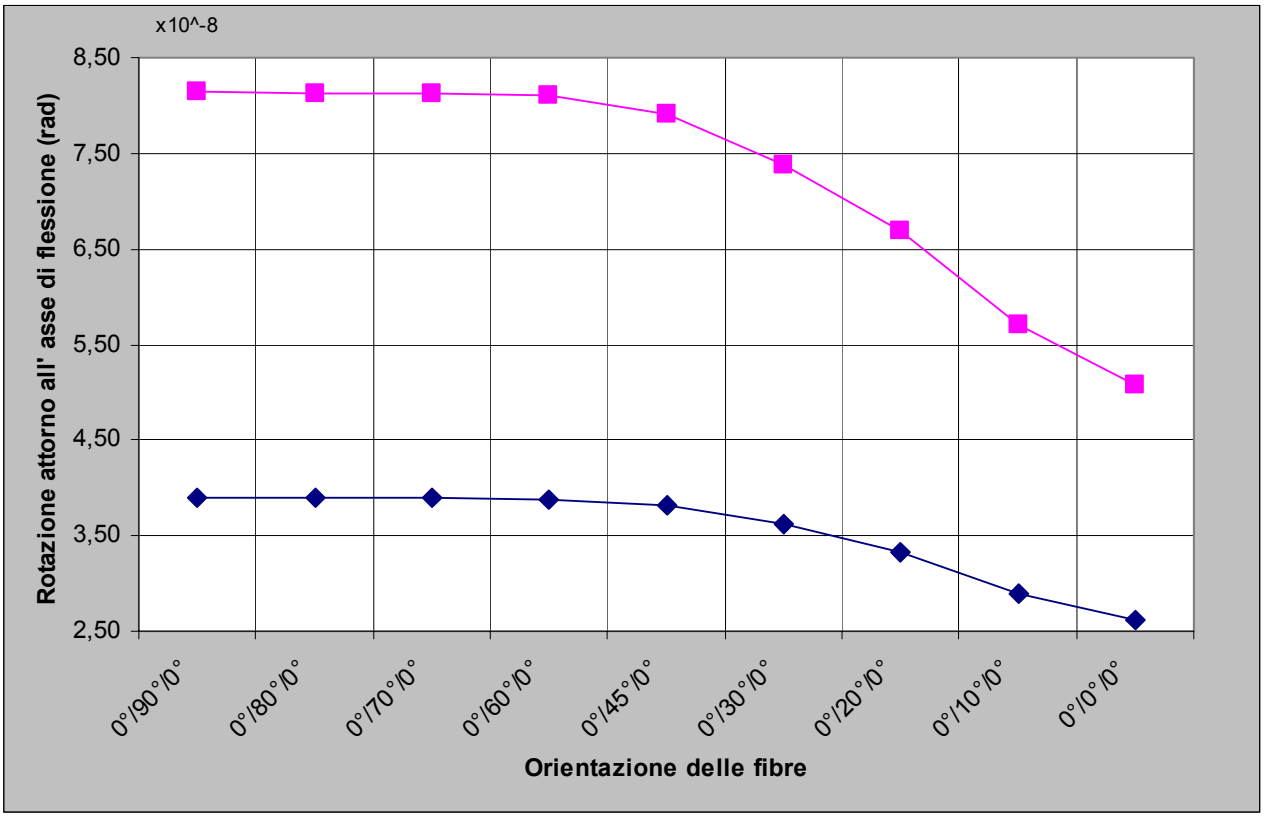

Figura 6.17 Rotazioni intorno all' asse di flessione per le due soluzioni. La soluzione 1, in virtù della maggiore inerzia della sua sezione presenta rotazioni minori per tutte le orientazioni del pre-preg.

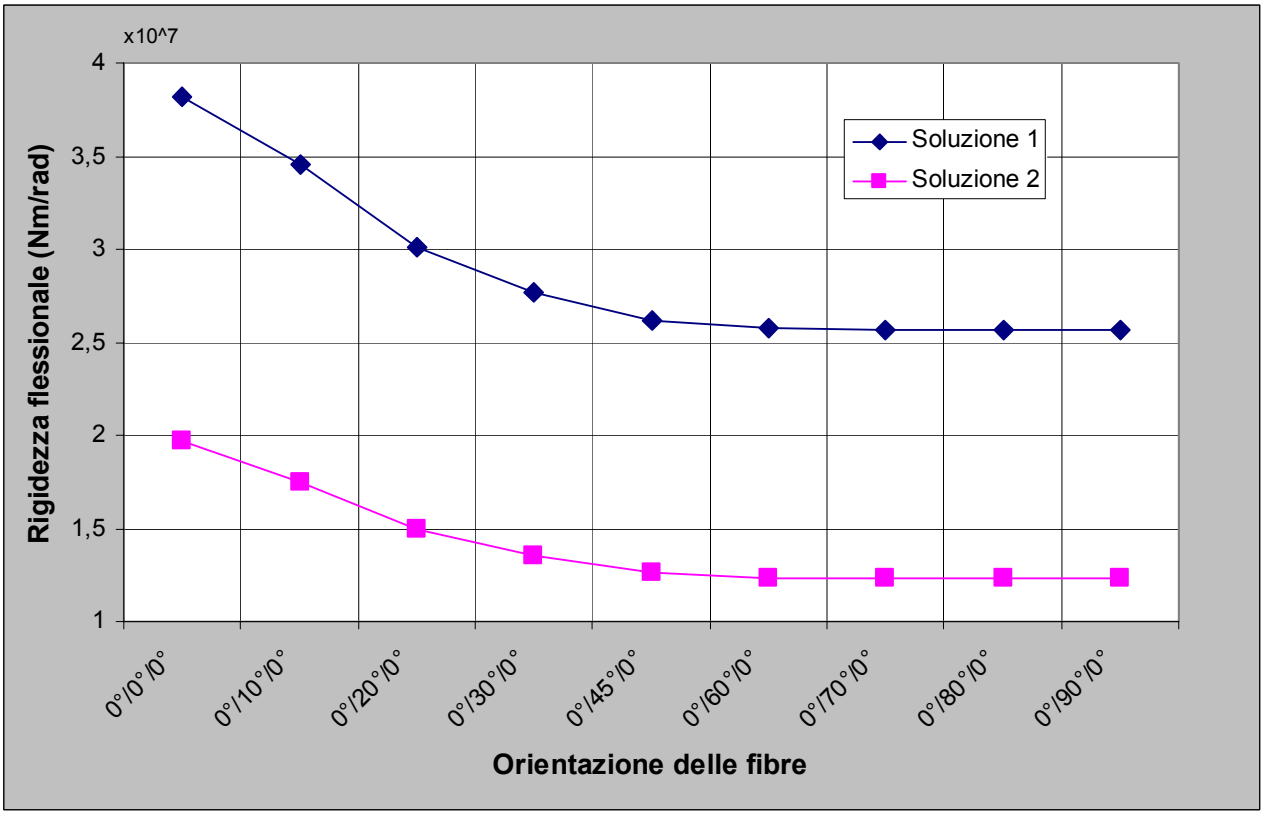

Figura 6.18 Andamento della rigidezza flessionale delle due soluzioni in funzione dell'orientamento delle fibre del composito

Per quanto riguarda la rigidezza flessionale dai grafici sopra riportati è evidente il miglior comportamento della soluzione 1. Tale soluzione, come già esposto precedentemente, presenta un ingombro in direzione Y di 5 cm. Il suo momento d'inerzia rispetto all'asse X risulta quindi maggiore di quello della sezione trapezoidale della soluzione 2. In conseguenza di ciò si nota anche una minor rotazione della sezione di riferimento, che ricordiamo è posta a 50 cm dal vincolo di incastro per la soluzione 1. Dalle analisi svolte si evince una differenza percentuale tra le due soluzioni, in termini di rigidezza flessionale, di circa il 50%.

6.3. 3 Analisi comparata: Rigidezza torsionale

All'analisi flessionale è seguito lo studio della struttura per un carico di tipo torsionale ed intensità unitaria, si sono quindi calcolate le corrispondenti rigidezze torsionali, la relazione di riferimento in questo caso è la seguente:

$$\frac{GJ}{l} = \frac{M}{\varphi}$$

In tale relazione, che esprime la rigidezza torsionale diviso la lunghezza, G è il modulo di taglio (Pa), M il momento torcente applicato (in questa prova è pari a 1 N*m) e φ è la derivata dell'angolo di rotazione rispetto all'asse di torsione, calcolata come differenza tra la rotazione della sezione di riferimento e quella in cui è applicato il carico diviso la loro distanza.

Anche per questa ultima analisi si riportano i relativi grafici e tabelle. Anche per quanto riguarda la rigidezza torsionale il modello 1 mostra un comportamento migliore.

Ciò è dovuto al fatto che l'area della sezione racchiusa dalla struttura in parete sottile del modulo a sezione ottagonale è maggiore di quella del modulo a sezione trapezoidale.

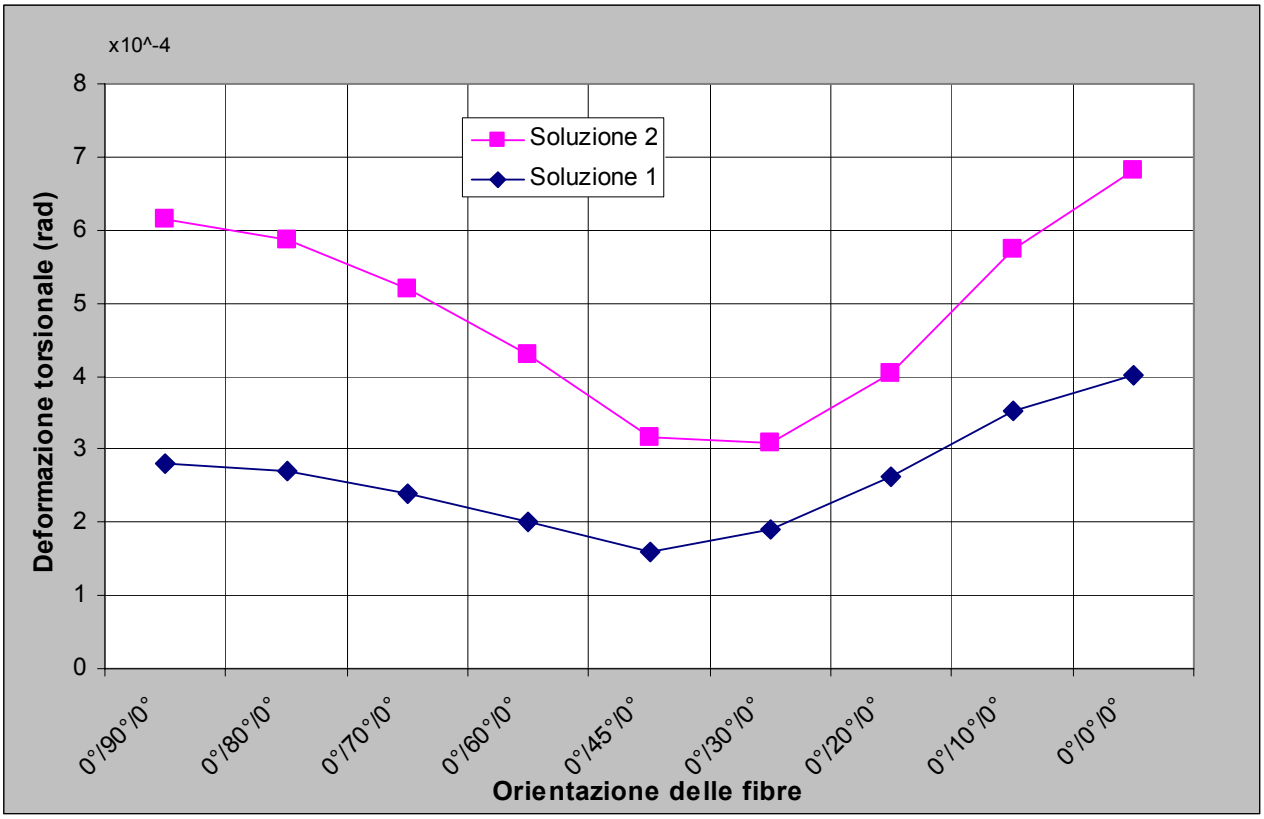

Figura 6.19 Rotazione delle sezioni intorno all'asse di torsione in funzione dell'orientazione delle fibre delle pelli di composito.

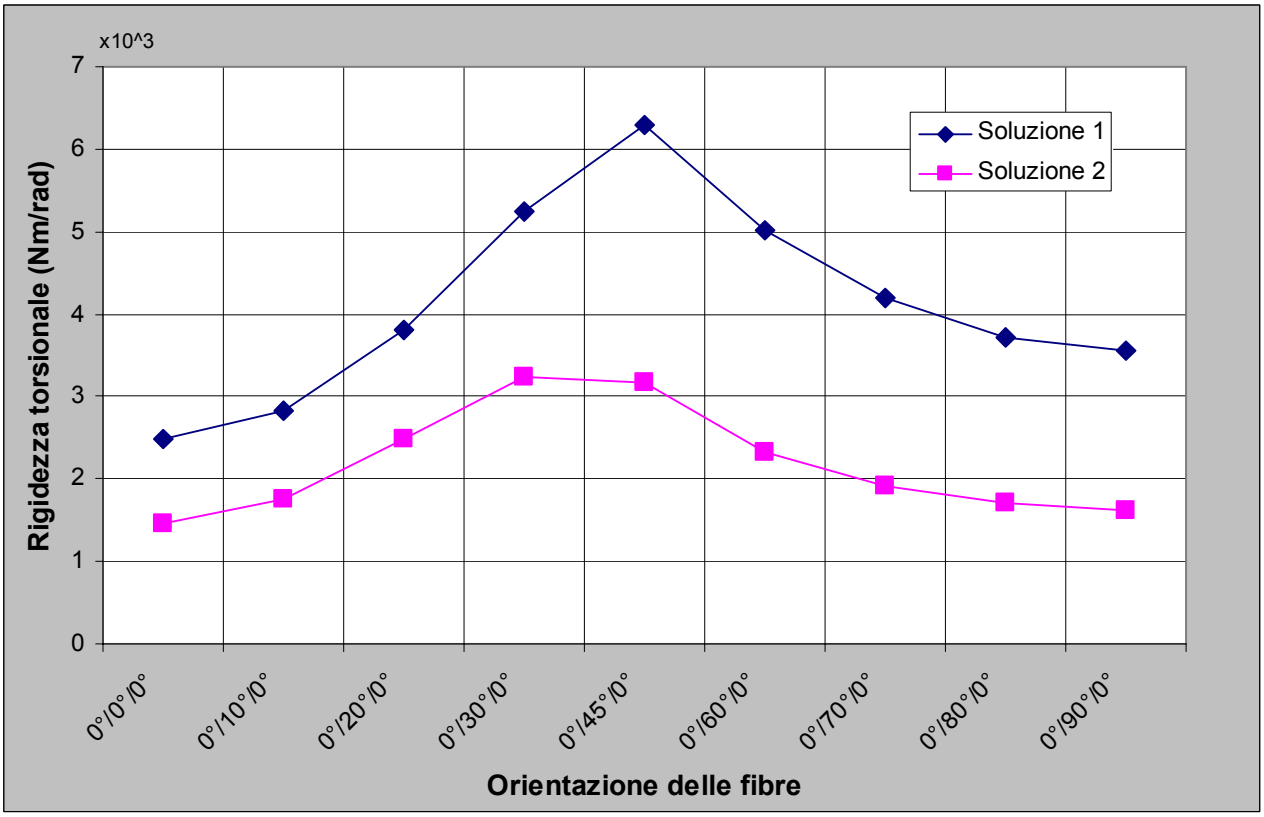

Figura 6.20 Andamento della rigidezza torsionale delle due soluzioni in funzione dell'orientamento delle fibre del composito

Orientazione delle fibre	Rotazione attorno all'asse di flessione (rad) x10^-8	Rigidezza torsionale calcolata (Nm/rad) x10^7
0°/90°/0°	6,14	1,63
0°/80°/0°	5,88	1,70
0°/70°/0°	5,19	1,93
0°/60°/0°	4,31	2,32
0°/45°/0°	3,16	3,16
0°/30°/0°	3,09	3,24
0°/20°/0°	4,03	2,48
0°/10°/0°	5,73	1,75
0°/0°/0°	6,83	1,46

Tabella 6.7 Spostamenti e rigidezze relativi alla soluzione 2 per le varie orientazioni delle pelli

Orientazione delle fibre	Rotazione attorno all'asse di torsione (rad) x10^-4	Rigidezza torsionale calcolata (Nm/rad) x 10^3
0°/90°/0°	2,81	3,56
0°/80°/0°	2,69	3,71
0°/70°/0°	2,39	4,19
0°/60°/0°	2,00	5,01
0°/45°/0°	1,59	6,30
0°/30°/0°	1,90	5,25
0°/20°/0°	2,62	3,81
0°/10°/0°	3,53	2,83
0°/0°/0°	4,02	2,49

Tabella 6.8 Spostamenti e rigidezze relativi alla soluzione 2 per le varie orientazioni delle pelli

In questo caso la differenza percentuale in termini di rigidezza torsionale tra i due modelli è di circa il 40%. Il minimo per lo spostamento che si rileva in entrambe le soluzioni per l'orientazione 0°/45°/0° è dovuto al fatto che, in analogia al caso della torsione di un cilindro circolare per il quale la sollecitazione è di puro sforzo normale su elementi orientati a 45°,l'aggiunta di un ply con orientamento 45° contrasta il fenomeno della lesione longitudinale delle fibre disposte lungo l'asse.

6.4 Modellizzazione F.E.M. dei carichi dovuti agli straw-tubes

Il pacchetto di straws racchiusi all'interno del MOX è composto da 98 elementi. Ogni straw esercita sul modulo un carico di compressione pari a 50g su agente su ciascuna sua estremità. Si ha quindi un carico totale pari a 48.069 N applicato alle due estremità del modulo.

Per schematizzare questo tipo di sollecitazione il carico è stato ripartito su quattro nodi come in figura 1 e figura 2

Su ciascun nodo avremo quindi un forza di modulo 12.01725 N.

Per l'analisi numerica è stato considerato un materiale omogeneo isotropo di modulo elastico E=70GPa e coefficiente di Poisson pari 0.3.

Data la presenza dei vincoli di incastro i carichi sono stati applicati sui nodi immediatamente successivi. In caso contrario altrimenti l'analisi non ci avrebbe dato alcuno spostamento della struttura.

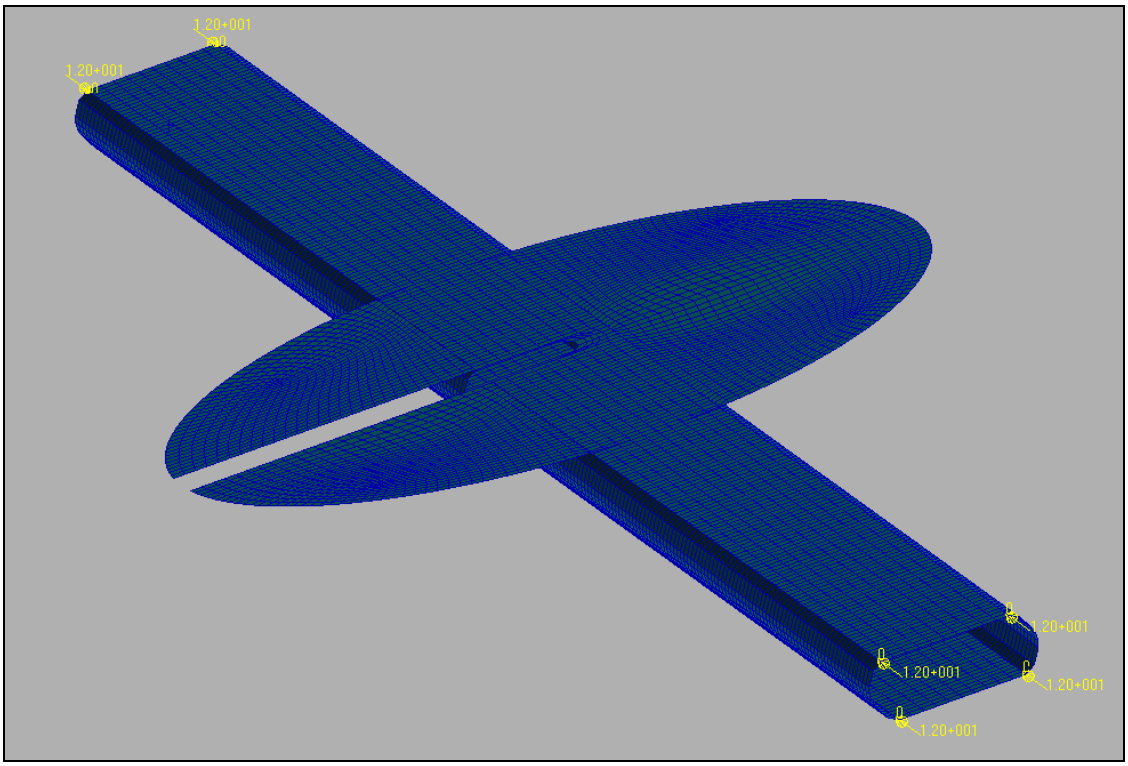

Figura 6.21 Il carico di compressione è applicato su quattro nodi per ciascuna delle due estremità del modulo. L'immagine qui presentata si riferisce alla soluzione 1.

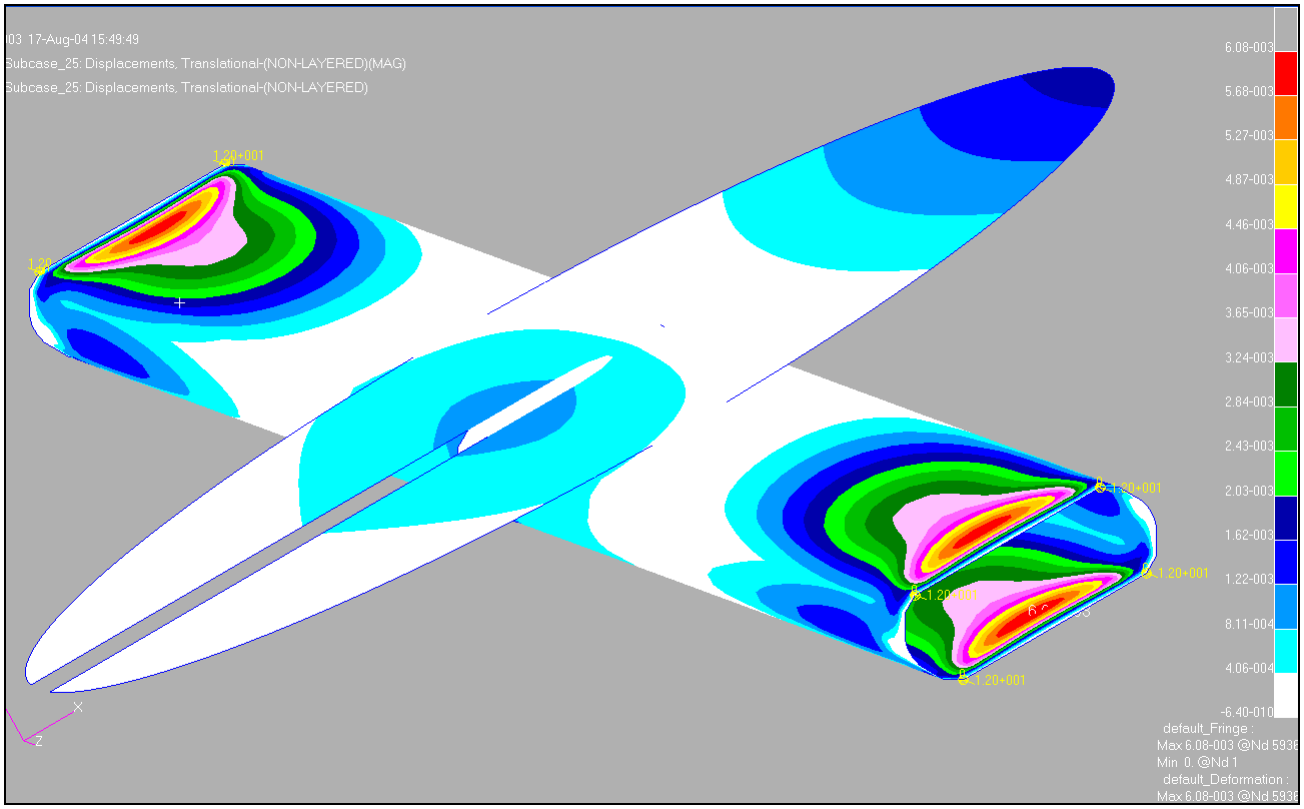

Figura 6.22 Rappresentazione grafica con i valori in modulo dello spostamento per il modello 1

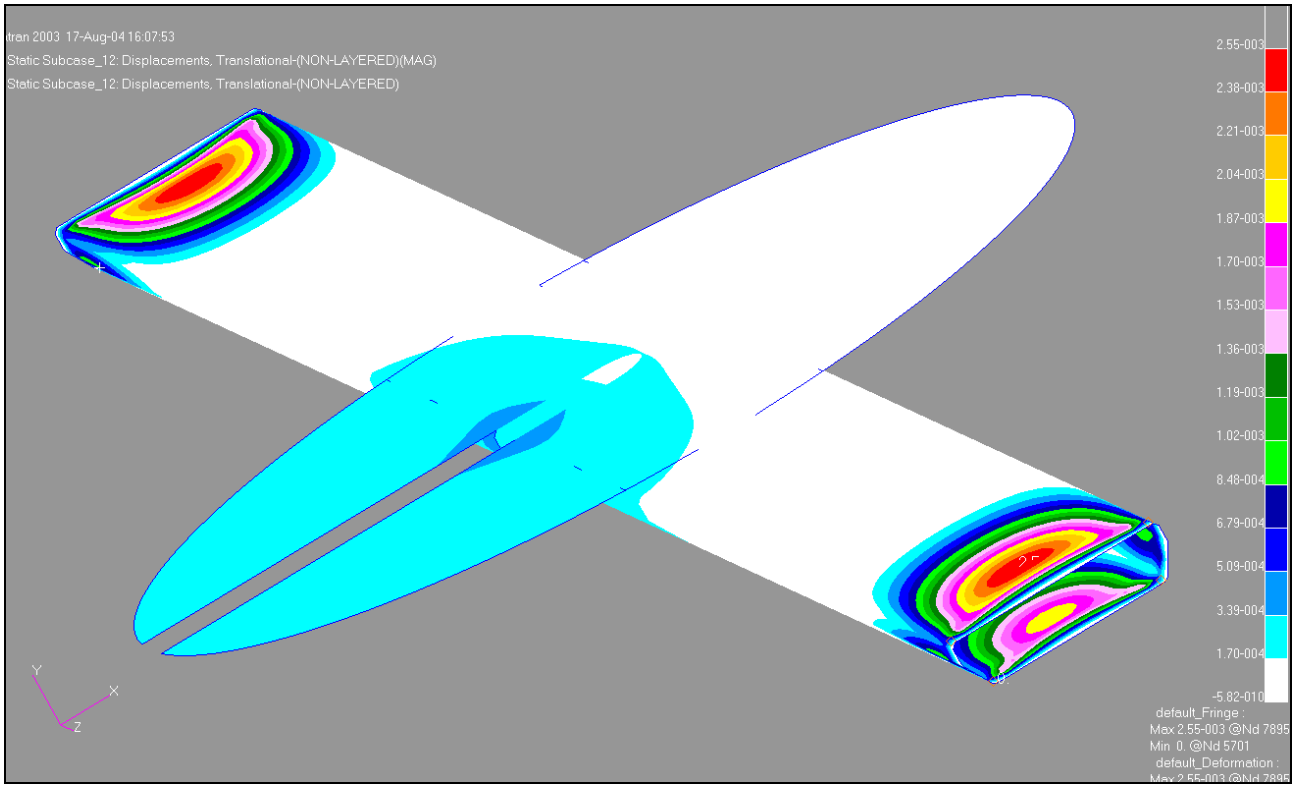

Figura 6.23 Rappresentazione grafica con i valori in modulo dello spostamento per il modello 2

Lo spostamento nella zona intorno alla Beam-Pipe raggiunge un valore massimo di circa 0.8 μm per entrambe i modelli. Nel primo modello tuttavia si ha anche uno spostamento più marcato dell'estremità opposta a quella dell'intaglio e pari a circa 1.62 μm, situazione che nel secondo non si verifica.

Aumentando la rigidezza del materiale si ha una diminuzione dello spostamento; considerando ad esempio un materiale con modulo elastico pari a 200 GPa (ad esempio un acciaio) si rileva uno spostamento massimo in prossimità della Beam-Pipe dell'ordine del decimo di micron. In tale situazione, presentatasi in entrambe le soluzioni costruttive, la deformazione dovuta al carico di compressione degli straws risulta del tutto trascurabile. Dovendo inoltre realizzare la struttura in materiale composito risulta lecito aspettarsi deformazioni dovute a tali carichi, ancora minori.

E' stata successivamente analizzata un'altra possibile schematizzazione dei carichi applicati ripartendo il carico di compressione su un numero maggiore di nodi.

L'analisi effettuata ha evidenziato un comportamento qualitativo della struttura non dissimile dal caso precedente; tuttavia gli spostamenti calcolati, seppur dello stesso ordine di grandezza risultano essere più piccoli.

Il valore degli spostamenti è pressoché lo stesso su buona parte del modello mentre per il primo modello risulta notevolmente ridotto (circa 2 μm) quello dell'estremità del disco opposta all'intaglio.

Ciò vuol dire che la schematizzazione precedente ci poneva in ipotesi conservative.

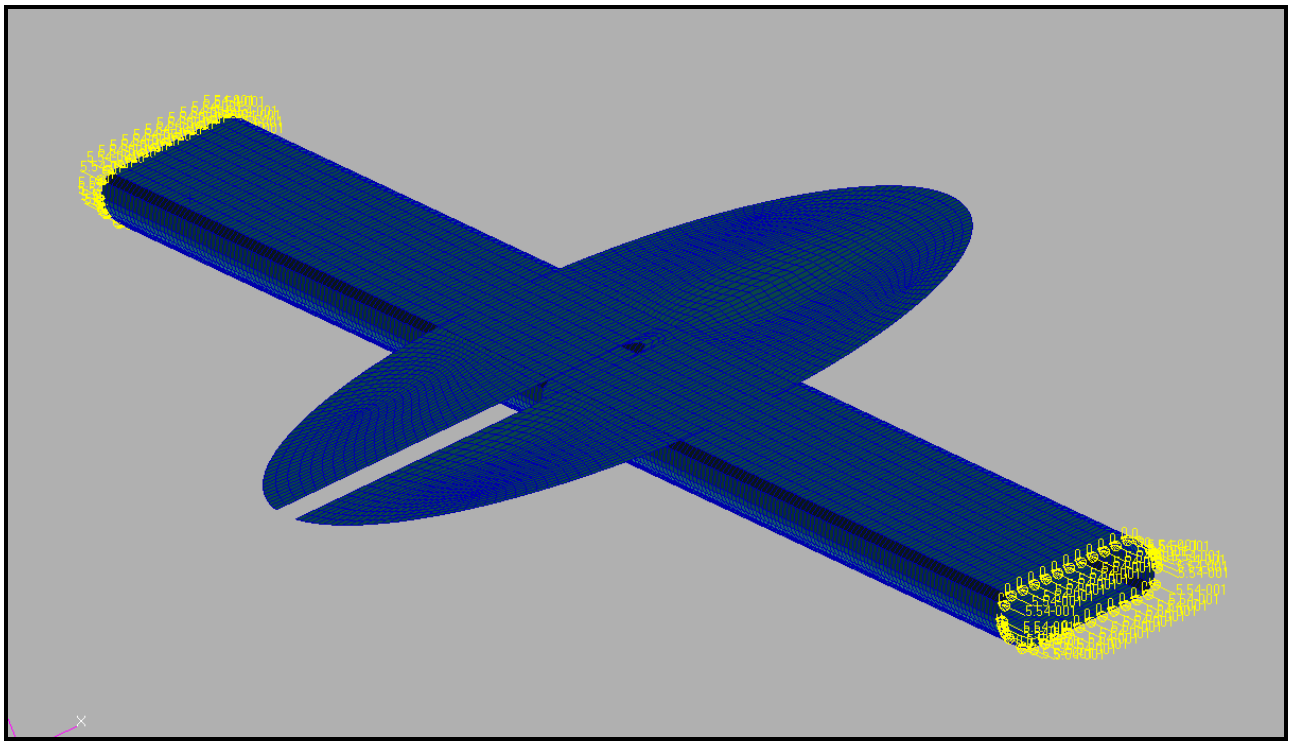

Figura 6.24 Ripartizione dei carichi di compressione su di u numero maggiore di nodi

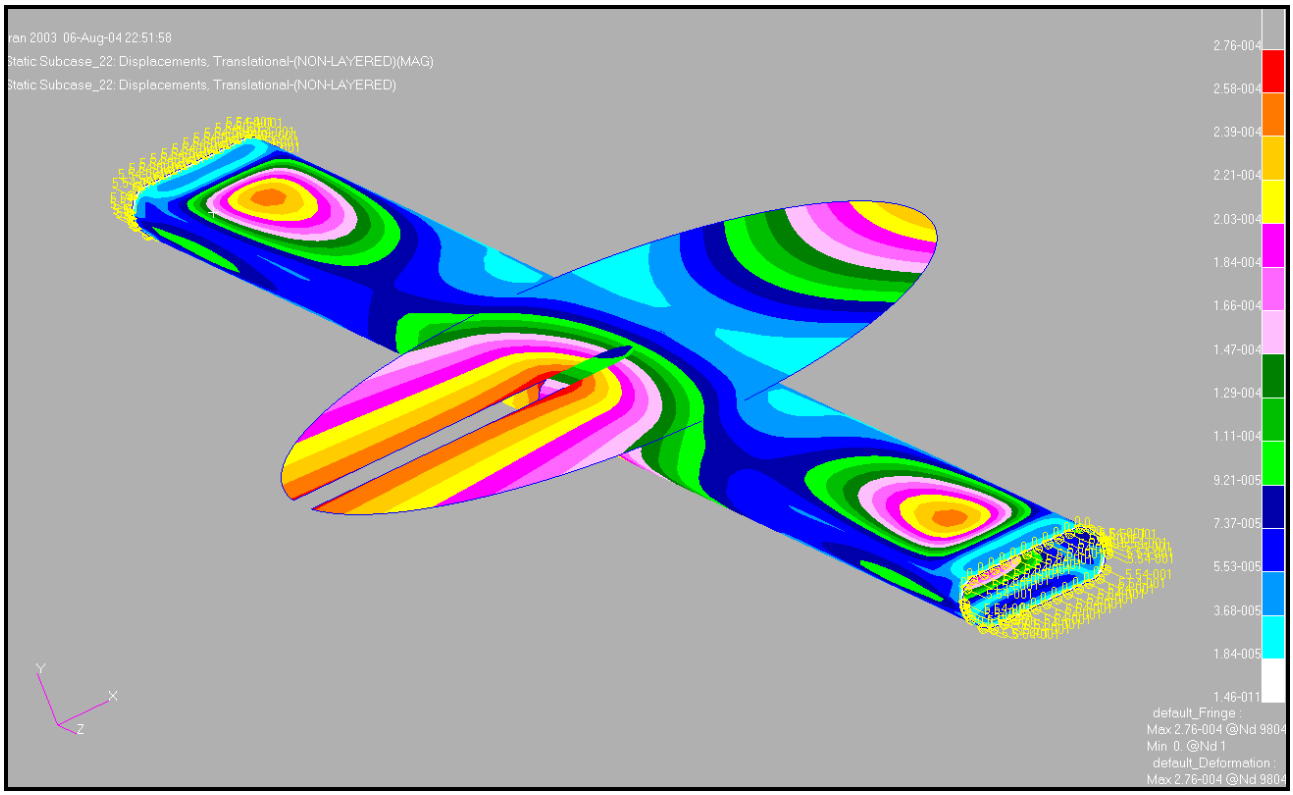

Figura 6.25 Confrontando i valori della legenda a sinistra si può nodare come la situazione nella zona "calda" a ridosso della Beam-Pipe non sia variata di molto rispetto alla schematizzazione precedente.

6.5 Modellizzazione dei carichi dovuti alle microstrips

Nelle analisi definitive, quelle cioè in cui verranno applicati i reali carichi e vincoli alla struttura, possiamo, per quanto visto precedentemente, non considerare più il carico dovuto agli straws dato il suo scarso contributo alla deformazione. La sollecitazione indotta invece dal peso proprio delle microstrips ha evidenziato una influenza ben più rilevante. E' chiaro quindi come una non corretta rappresentazione dei carichi determinati da tali componenti possa indurre errori anche non trascurabili.

Le microstrips, che ricordiamo verranno incollate sull' apposito disco, nel loro complesso graveranno sulla struttura con un peso di 5 Kg.

Il loro baricentro si trova a circa 4 cm di distanza dal piano del disco. Se si ipotizza la rigidezza di tali componenti sufficientemente elevata il taglio generato dalla forza peso si trasmette senza variazioni fino al punto di contatto delle microstrips con il disco.

In definitiva tale sollecitazione può essere schematizzata applicando al nodo che risulta essere la proiezione del baricentro delle microstrips sul disco un taglio di intensità pari alla forza peso e un momento dato dalla moltiplicazione di tale forza per la distanza del baricentro dal piano del disco.

Date le dimensioni delle microstrips tale sollecitazione è stata ripartita su 4 nodi. Questo poiché, cadendo la proiezione del baricentro proprio in prossimità del foro di passaggio della beam pipe. applicare tutta la sollecitazione in quel punto avrebbe indotto a deformazioni locali sovrastimate e per di più in una delle zone più delicate.

Il limite massimo ammesso per le deformazioni è di 20 μm, valore che corrisponde all'indeterminazione data dalle microstrips nella localizzazione della posizione della traccia.

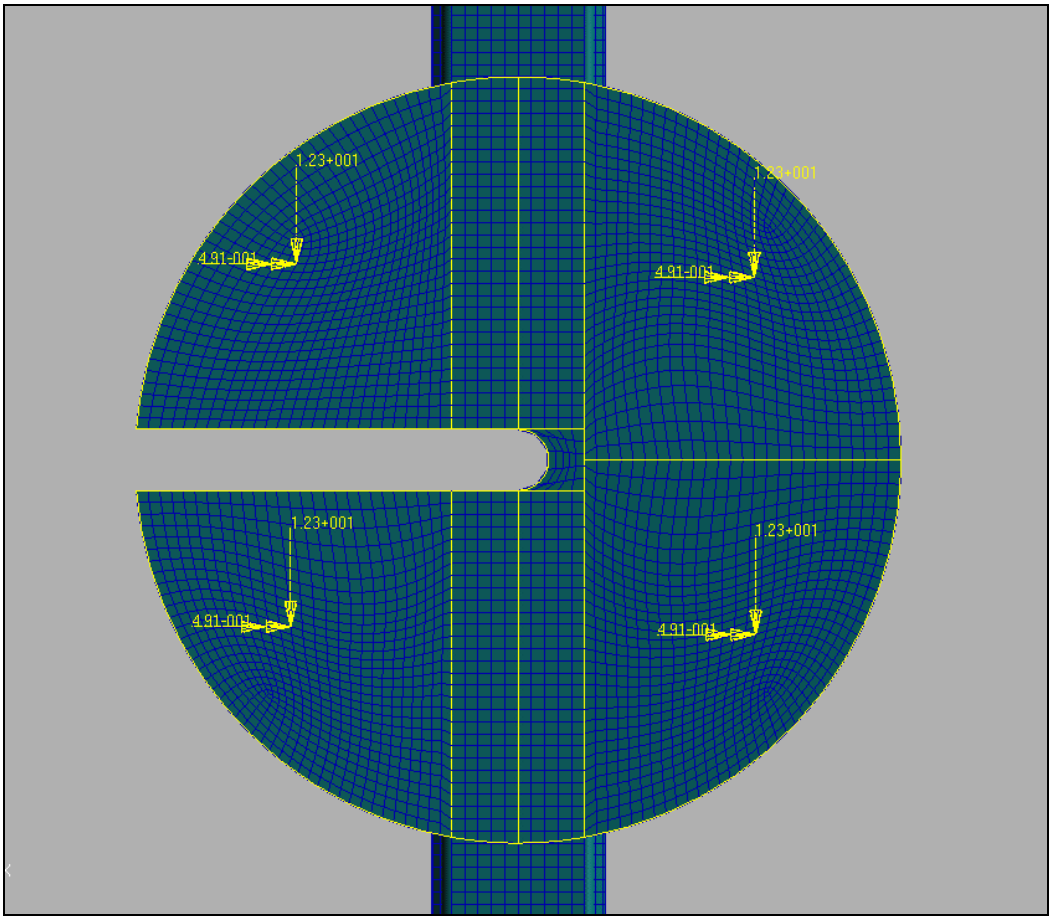

Figura 6.26 Distribuzione dei carichi delle microstrips sul disco (modello 1)

6.5. 1 Analisi comparata

Analogamente a quanto fatto per lo studio delle rigidezze, è stata una analisi comparata dei due modelli, questa volta completi e soggetti alle reali condizioni di vincolo e carico, volta a determinare l'orientazione più efficiente delle fibre del composito per l'ottenimento dei valori minimi dello spostamento.

I carichi applicati, per quanto visto nei capitoli precedenti, sono esclusivamente quelli dovuti alle microstrips. Nella parti del modulo corrispondenti alla basi maggiore e minore della sezione trapezoidale e a quelle superiore e inferiore di quella ottagonale si ha un sandwich costituito da 6

pelli di pre-preg separate in due gruppi da tre dall'interposizione di 2 mm di rohacell. Sul disco si ha una struttura simile con l'unica differenza che lo spessore del rohacell è in questo caso di 5 mm.

I compositi utilizzati per il modulo e per il disco sono commercializzati rispettivamente con i nomi M46J e K13D2U e le loro caratteristiche sono riportate nel capitolo 8.

Da una prima analisi effettuata sul modello 1 con orientazione delle pelli 0°/90°/0° si è riscontrato uno spostamento massimo il cui valore in modulo è di circa 15 µm e quindi al di sotto della tolleranza accettata.

Nelle immagini seguenti possono essere visualizzati le componenti dello spostamento e il loro valore in modulo.

Le tabelle e i grafici mostrano invece il confronto tra i valori degli spostamenti in funzione dell'orientazione delle pelli del pre-preg e la localizzazione del loro valore massimo sui due modelli

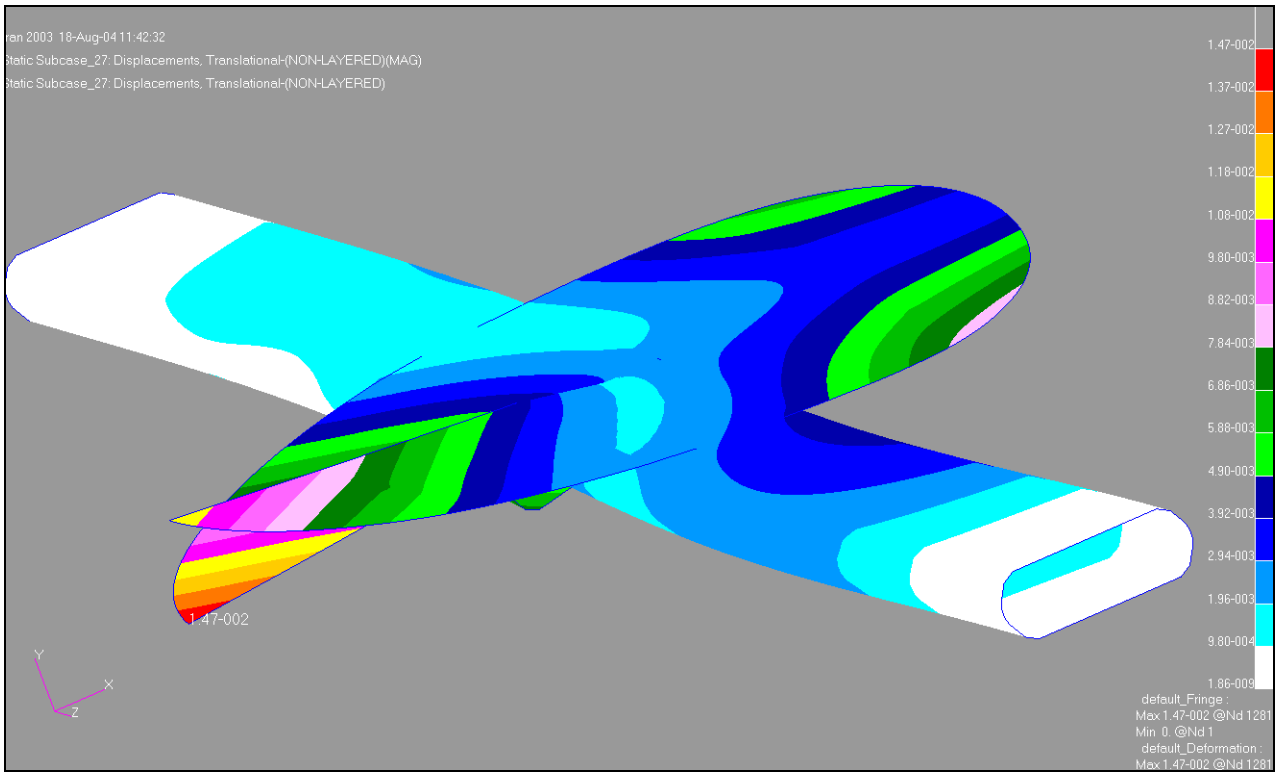

Figura 6.27 Visualizzazione grafica della deformata nel caso di carichi e vincoli reali. I valori dello spostamento nella legenda sono in modulo.

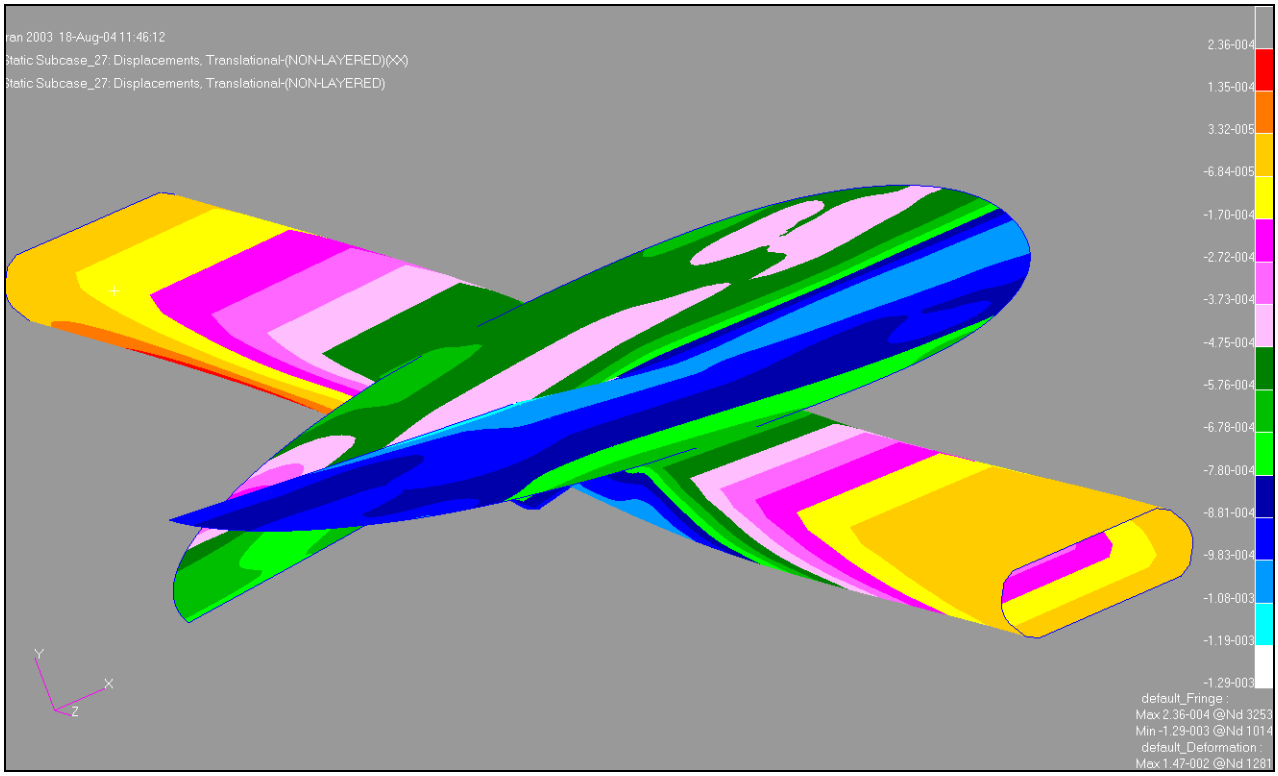

Figura 6.28 Visualizzazione grafica dell'entità degli spostamenti in direzione x per la soluzione 1

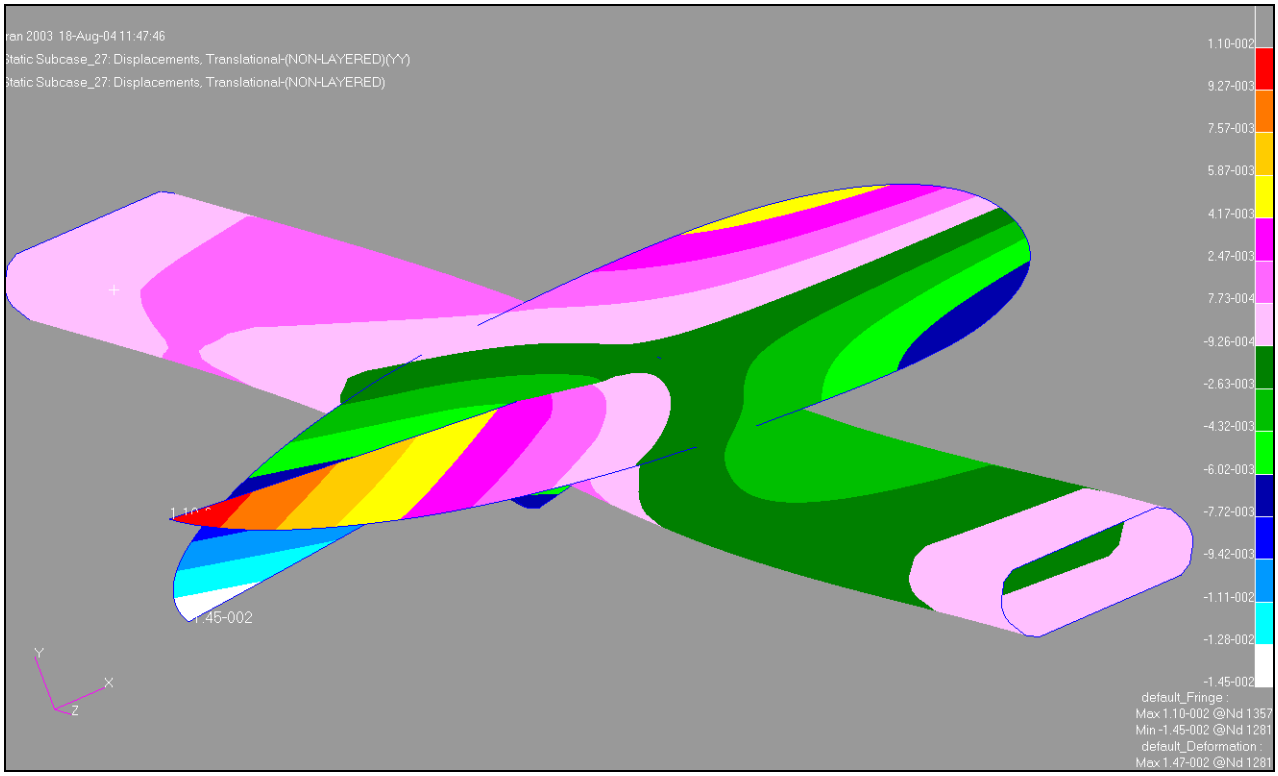

Figura 6.29 Visualizzazione grafica dell'entità degli spostamenti in direzione y per la soluzione 1

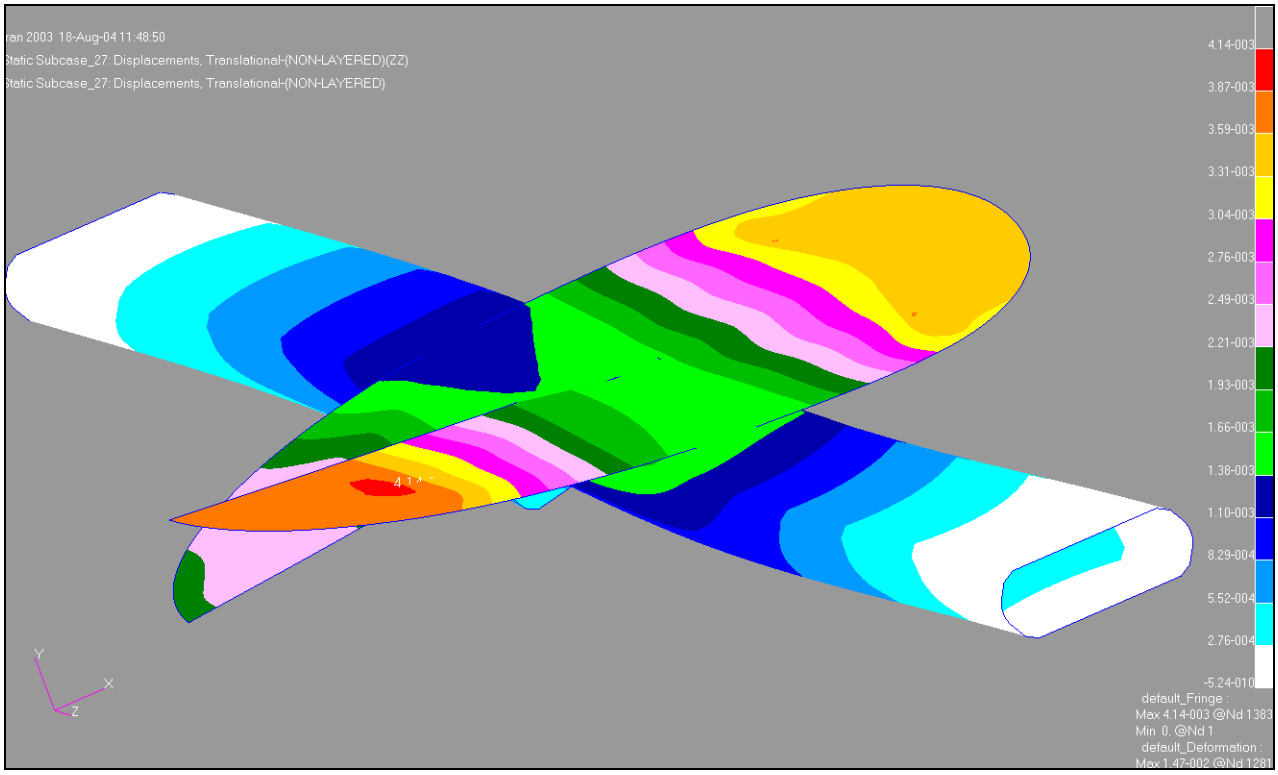

Figura 6.30 Visualizzazione grafica dell'entità degli spostamenti in direzione z per la soluzione 1

Orientazione delle fibre	Spostamento massimo	Localizzazione
0°/0°/0°	28,4	sull' aletta del disco
0°/10°/0°	30,1	sul disco e parte del MOX
0°/20°/0°	29,9	sul disco e parte del MOX
0°/30°/0°	30,1	sull'aletta e parte del MOX
0°45°/0°	33,4	sull'aletta e parte del MOX
0°/60°/0°	29,8	sull'aletta
0°/70°/0°	21,9	sull'aletta
0°/80°/0°	17,8	sull'aletta
0°/90°/0°	14,7	sull'aletta

Tabella 6.9 Entità degli spostamenti (in modulo) e loro localizzazione, nel caso di carichi e vincoli reali, per la soluzione 1

Orientazione delle fibre	Spostamento massimo	Localizzazione
0°/0°/0°	18	sulle alette
0°/10°/0°	8,6	sull'aletta
0°/20°/0°	4,5	sull'aletta e sull'estremità opposta del disco
0°/30°/0°	4,45	sull'estremità opposta del disco
0°45°/0°	7,5	sull'aletta
0°/60°/0°	9,6	sulle alette
0°/70°/0°	11,7	sull'aletta
0°/80°/0°	13,6	sull'aletta
0°/90°/0°	13,2	sull'aletta

Tabella 6.10 Entità degli spostamenti (in modulo) e loro localizzazione, nel caso di carichi e vincoli reali, per la soluzione 1

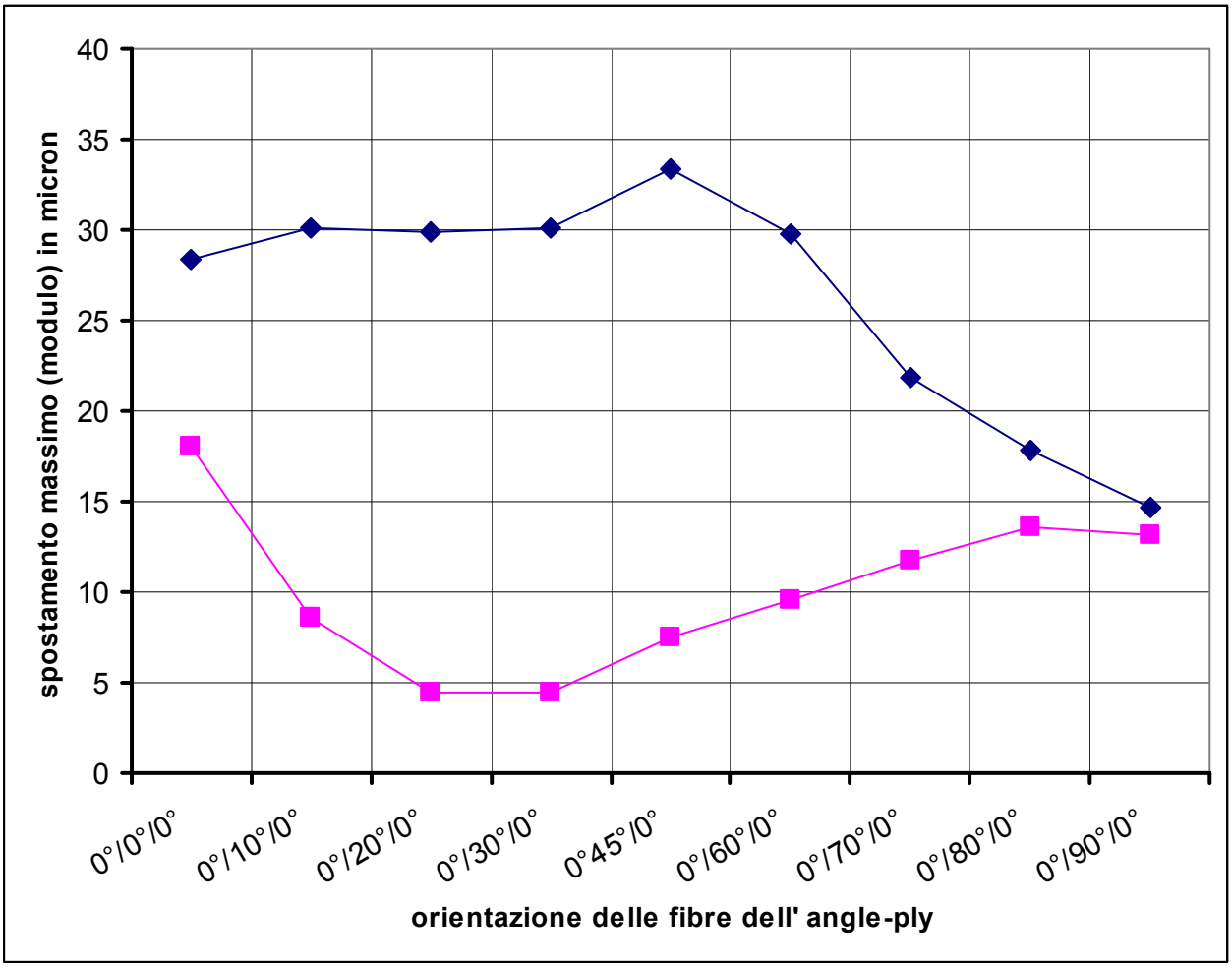

Figura 6.32 andamento dello spostamento massimo (in modulo) in funzione dell' orientazione delle pelli del composito

Il modello 2 presenta una deformabilità minore per qualsiasi orientamento delle fibre del composito. Tuttavia per ragioni costruttive che verranno chiarite nel seguito, si ha la necessità di effettuare una laminazione con orientamento 0°/90°/0°.

Dal grafico precedente si nota come per tale configurazione le due soluzioni differiscano di poco nei valori massimi delle deformazioni.

Dal momento che studi condotti sulla perdita di energia delle particelle nell'attraversamento del materiale hanno ritenuto idonei entrambe le soluzioni si può concludere che la scelta debba ricadere sulla soluzione, costruttivamente parlando, di più facile realizzazione.

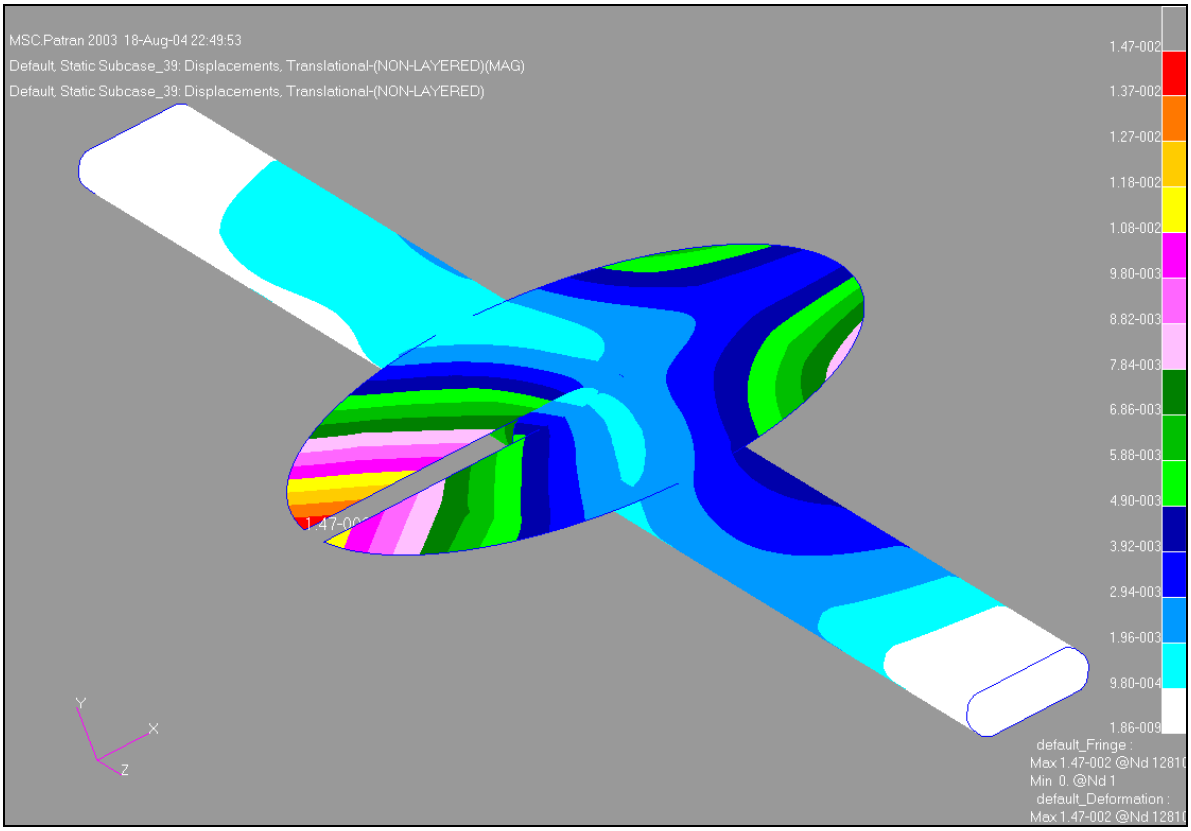

Figura 6.33 Visualizzazione della deformata della soluzione 1 per orientazione 0°/90°/0° delle pelli del composito

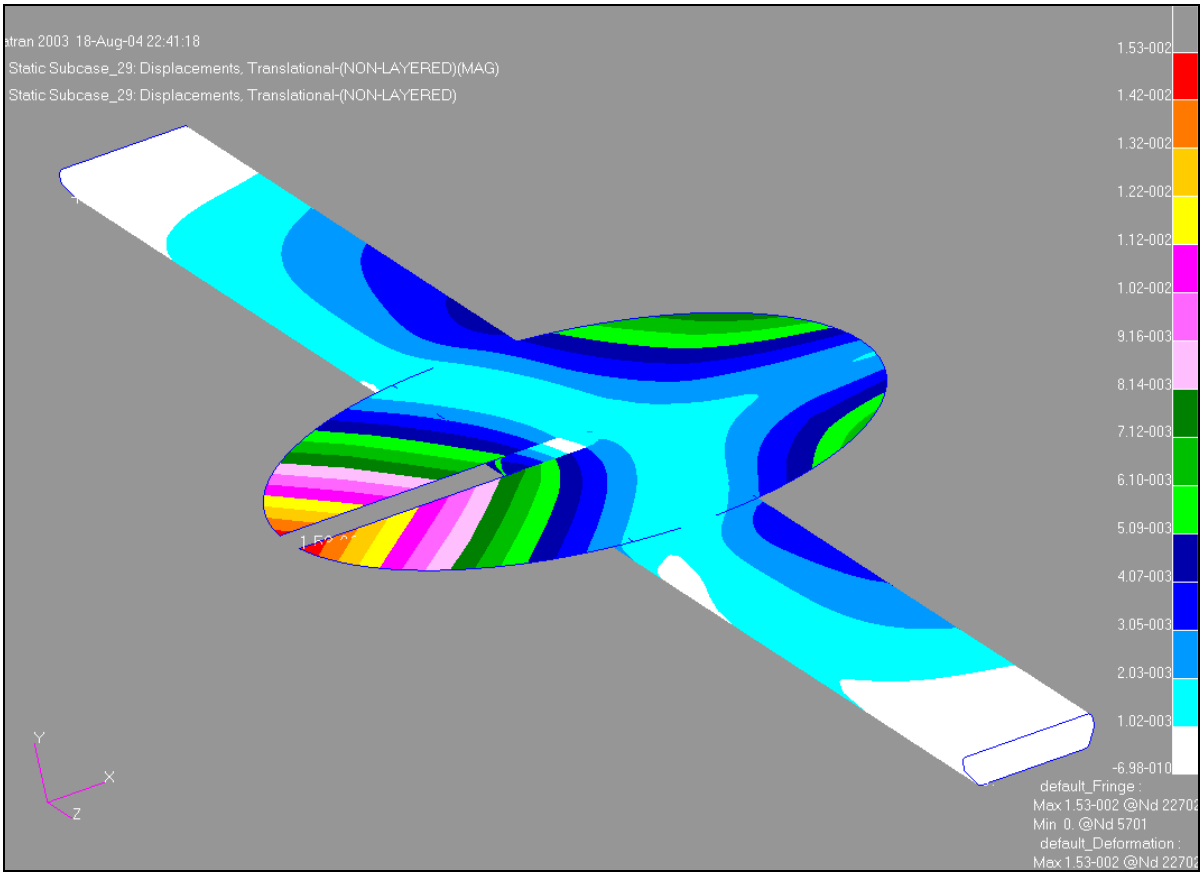

Figura 6.34 Visualizzazione della deformata della soluzione 2 per orientazione 0°/90°/0° delle pelli del composito

Capitolo 7

Lavorazione del composito e assemblaggio del modulo

7.1 Lavorazione del composito

Una volta decisa la geometria del modulo si passa alla realizzazione dello stampo in anticorodal. In realtà gli stampi sono due e da ciascuno di essi si ricava una metà dello strut.

Prima di passare alla disposizione delle pelli di pre-preg* all'interno dello stampo vengono passate tre mani a pennello di distaccante per facilitare poi, a lavorazione terminata, l'estrazione del modulo.

Vengono poi inserite, come mostrato in figura, due flange che serviranno per il successivo posizionamento degli end-plates. Tali flange presentano quattro fori, due lisci per il loro calettamento sullo lo stampo, e due filettati per permettere il fissaggio di supporti che serviranno per il mantenimento degli straws nella giusta posizione una volta incollati sul rohacell ed inseriti nello strut.

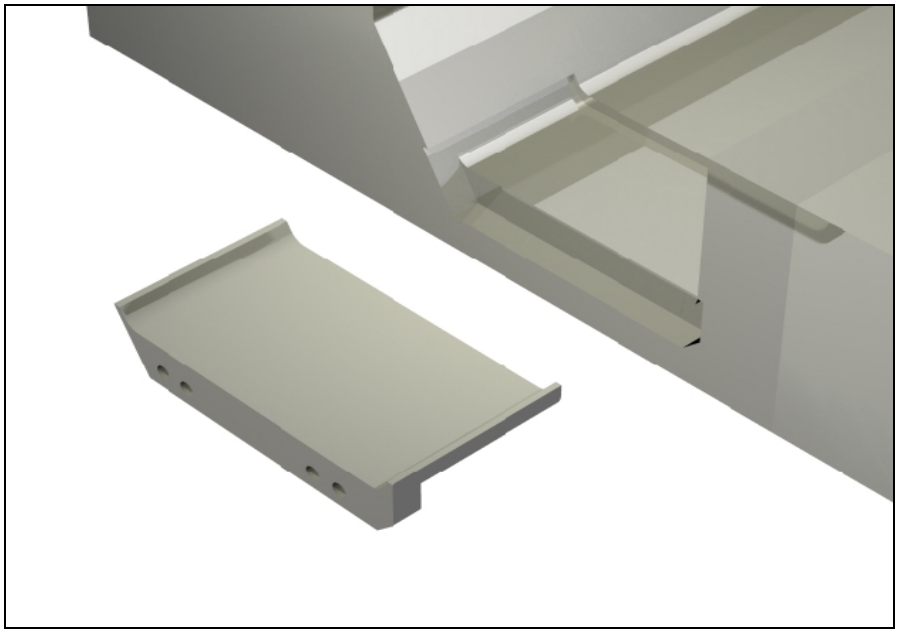

Figura 7.1 Flangia per il montaggio finale degli end-plates.

* Il composito è realizzato con fibre lunghe unidirezionali in carbonio e matrice epossidica

Si procede quindi alla disposizione delle pelli di pre-preg, dello spessore di 0,07 mm ciascuna, secondo le orientazioni scelte in sede di progetto (0°/90°/0°), a quella del pane di rohacell da 2 mm e delle ulteriori tre pelli di composito la cui area deve essere sufficiente a ricoprire il rohacell ed a permetterne l'incollaggio alle tre pelli sottostanti. Infine si dispone sul tutto uno strato preformato in gomma. Lo scopo dello strato di gomma è quello di garantire una aderenza migliore tra le pelli nella successiva fase di aspirazione del sacco e quindi una più efficiente eliminazione di residue bolle d'aria. Per finire viene posto un foglio di materiale drenante per l'eliminazione di residui d'incollaggio. Il tutto viene poi avvolto da un sacco da vuoto, costituito da un telo di kevlar.

Una volta terminata l'apirazione del sacco, il tutto viene messo in autoclave per 4-5 ore ad una temperatura di 120°C. Durante tale fase il componente sottoposto a trattamento è controllato da sensori di temperatura. Tramite lampade all'infrarosso vengono di conseguenza effettuati interventi localizzati per ristabilire la giusta temperatura ove risultasse necessario. A trattamento ultimato, lo stampo viene tirato fuori dall'autoclave e il sacco rimosso. Successivamente vengono rimossi il tessuto drenante e lo strato in gomma. Lo strut è ora pronto ma viene lasciato nello stampo per terminare l'assemblaggio del modulo con l'inserimento del rohacell contenete gli straws e il finale incollaggio con l'altra metà del componente lavorata nell' altro stampo.

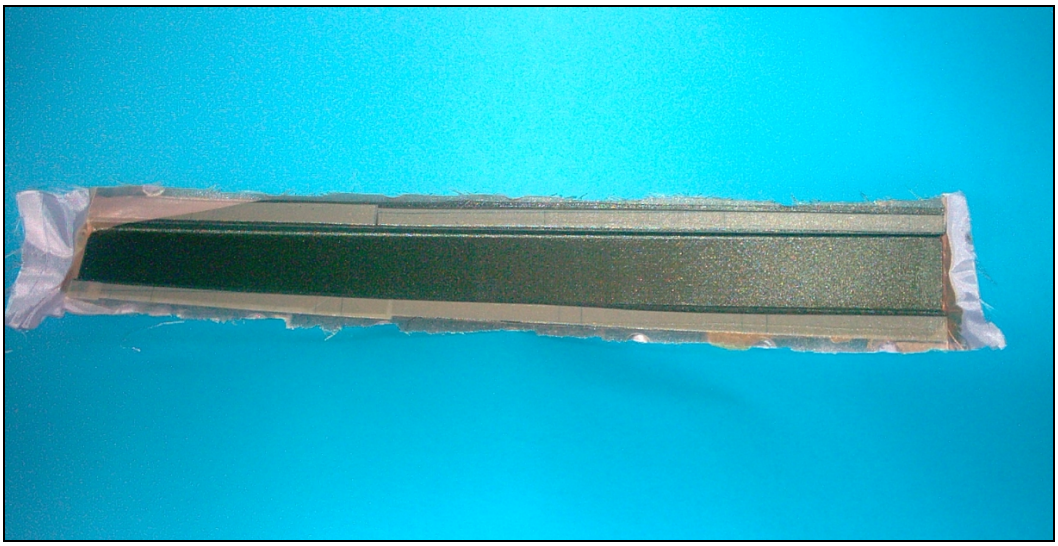

Figura 7.2 Ecco come appare a termine del trattamento in autoclave il composito. Lo strato in gomma preformato è stato rimosso mentre è ancora visibile il tessuto drenante. Il modello rappresentato non costituisce parte del modulo MOX ma è soltanto il risultato di una prova di lavorazione.

Vengono a questo punto fissati i supporti per gli straws. Anch'essi come le flange sono caratterizzati da quattro fori, due lisci per il calettamento sullo stampo e due filettati per il fissaggio alle flange stesse.

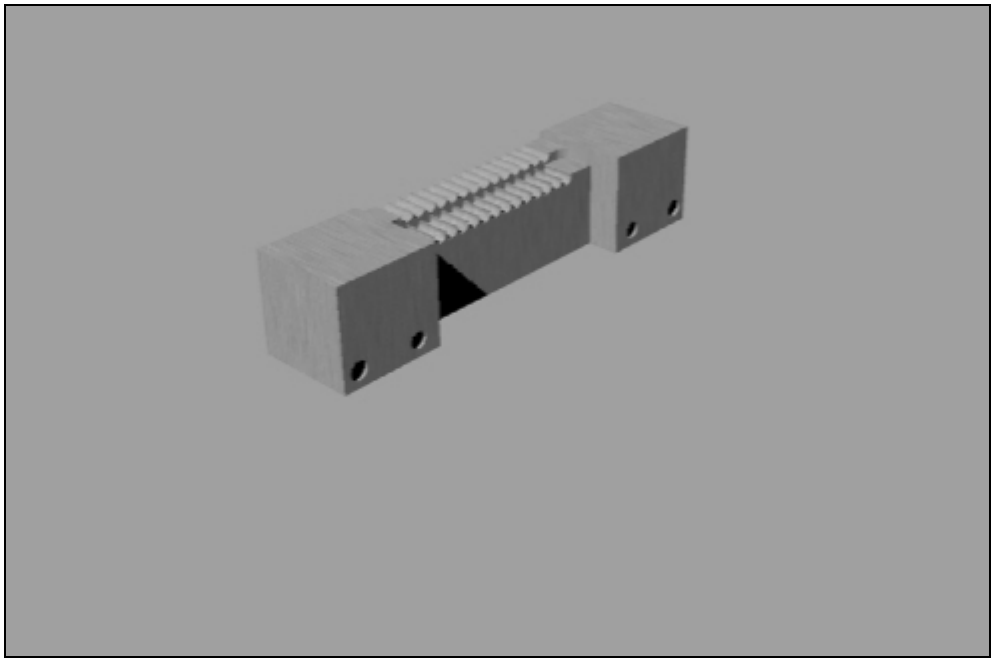

Figura 7.3 Supporto per il mantenimento in posizione degli straws. Sono visibili i quattro fori per permettere il fissaggio dello stesso allo stampo e aglle flangette.

7.2 Preparazione del Rohacell® e incollaggio degli straw-tubes

A fianco della lavorazione dello strut si procede con la preparazione del rohacell per effettuare il successivo posizionamento ed incollaggio degli straws.

A tal fine al rohacell viene prima conferita una forma tale da adattarsi all'inserimento nello strut. Successivamente sulla superficie cui andranno ad alloggiare gli straws vengono praticati dei solchi semicircolari per permetterne l'inserimento.

La realizzazione di tali solchi può avvenire o tramite pressore oppure lavorando il pezzo per fresatura. Nel primo caso tuttavia prove effettuate hanno evidenziato che, a lavorazione terminata,

per ritorno elastico del materiale i solchi tendevano a perdere la forma conferitagli. Si è così optato per il secondo metodo di lavorazione. Bisogna tenere in conto che tale sistema non è privo di inconvenienti, primi fra tutti la tendenza dell'espanso a sfaldarsi durante la lavorazione e l'elevata produzione di polveri. Un' eccessiva velocità di rotazione e avanzamento inoltre, porta anche alla bruciatura del rohacell.

Verifiche fatte per mezzo di proiettore di profili hanno tuttavia evidenziato che i solchi ottenuti con velocità di rotazione della fresa di 5000 giri/min e avanzamento di 1 m/min presentano una buona sezione semicircolare per tutta la lunghezza.

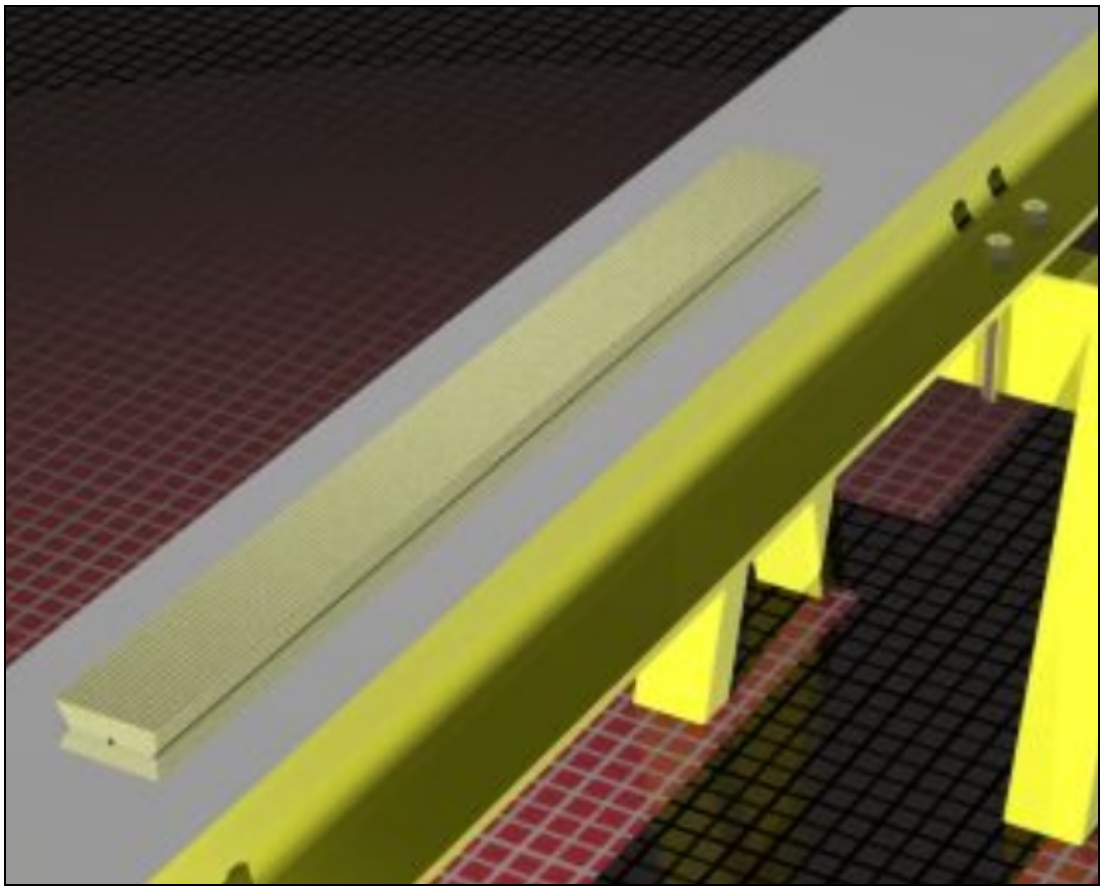

Figura 7.4 Rohacell lavoratoe adagiato sul banco di lavoro. Si può ora procedere alla successiva fase di incollaggio degli straws

Prima di posizionare gli straws è necessario provvedere l'incollaggio del pane di rohacell all'interno dello strut. Per l'incollaggio viene utilizzato colla poliuretanica monocomponente. L'adesivo viene

cosparso direttamente sul composito e per far si che lo strato di colla sia il più uniforme possibile si può prevedere di ricorrere ad una spruzzatura tramite aerografo. Per ridurre inoltre la massa introdotta, oltre a prevedere uno spessore per il collante non superiore ai 30 μm, si può inserire una maschera in anticorodal in modo tale da coprire le parti che non interessa siano ricoperte e realizzare così solo strisce di adesivo.

Si posiziona ora il rohacell nello strut e si inizia con la disposizione e l'incollaggio degli straw-tubes. Data la delicatezza dei rivelatori per non correre il rischio di deformarli nell'effettuare il montaggio si provvede all'inserimento al loro interno di tondini di acciaio nichelato di 4 mm di diametro. Il processo di nichelatura dell' acciaio serve a ridurre l'attrito tra le parti al momento dell'inserimento del tondino nello straw.

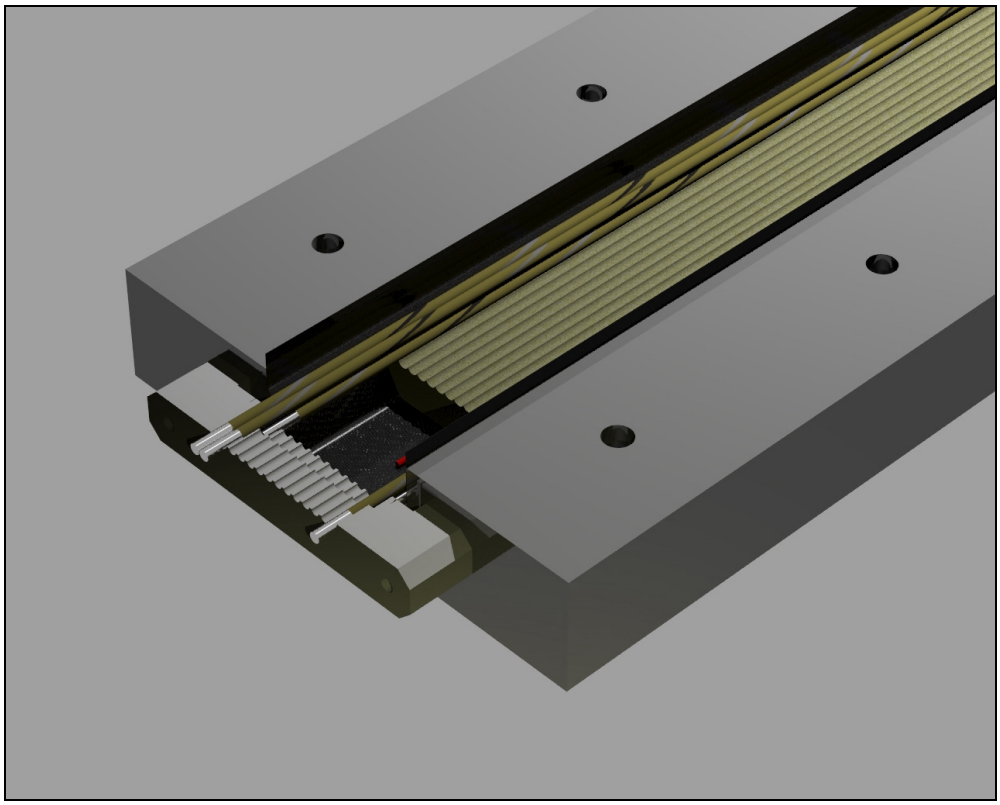

Figura 7.5 Posizionamento degli straw

Per incollare gli straw viene utilizzata la stessa colla utilizzata per lo strut. L'incollaggio di tali componenti risulta ancor più delicato, si richiede quindi anche in questo caso la realizzazione di un

mascheramento delle zone che non devono essere interessate con delle strisce in anticorodal. La colla deve avere uno spessore di 30 μm deve essere cosparsa sul fondo dei solchi semicircolari precedentemente praticati nel rohacell, come mostrato in figura.

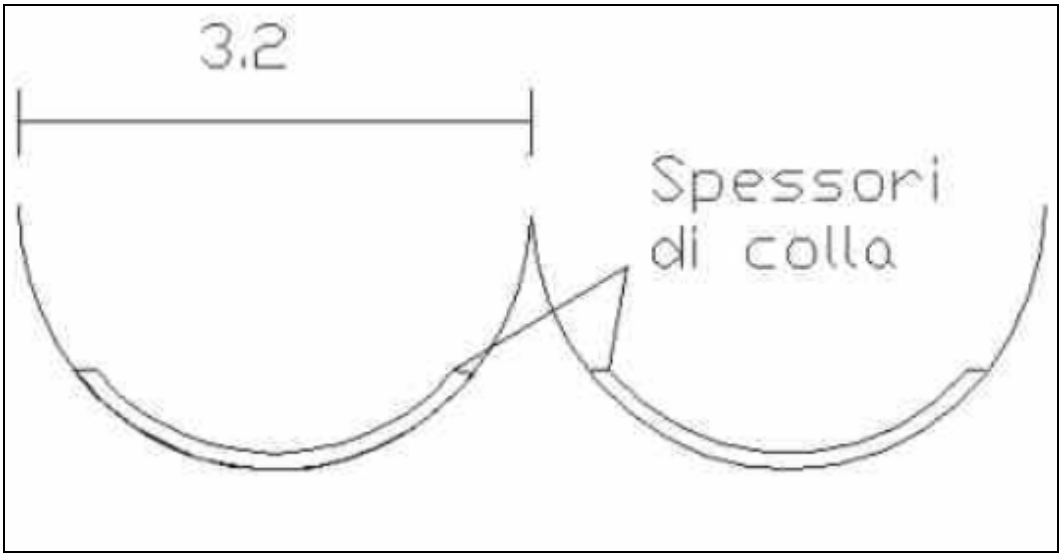

Figura 7.6 Dimensione dei solchi e rappresentazione dello strato di colla con il relativo spessori. Si noti come per evitare fuoriuscite dell'adesivo si è pensato di porlo solo nella parte centrale e non vicino al bordo esterno. Per l'incollaggio degli straws viene utilizzata la stessa colla impiegata nello strut, lo spessore è sempre di 30 μm, e le modalità di applicazione prevedono anche in questo caso l'uso di aerografo per spruzzatura di precisione e di maschere in anticorodal per la ricopertura di parti su cui non si vuole avvenga l'incollaggio.

La spruzzatura dell'adesivo con l'aerografo può comportare l'otturazione dell'ugello dello strumento e conseguentemente lunghi tempi per la sua pulizia, tempi che tra l'altro potrebbero risultare incompatibili con quelli di essiccazione della colla. A tal proposito è stata ipotizzata, come soluzione alternativa, la realizzazione di un pettine raschiatore; ad un blocco di alluminio in grado di scorrere su una vite senza fine è incernierata una serie di pennini (il pettine) che vengono posizionati sui solchi. La colla, passata a punti per mezzo di una maschera forata in alluminio, viene in tal modo distribuita in maniera uniforme.

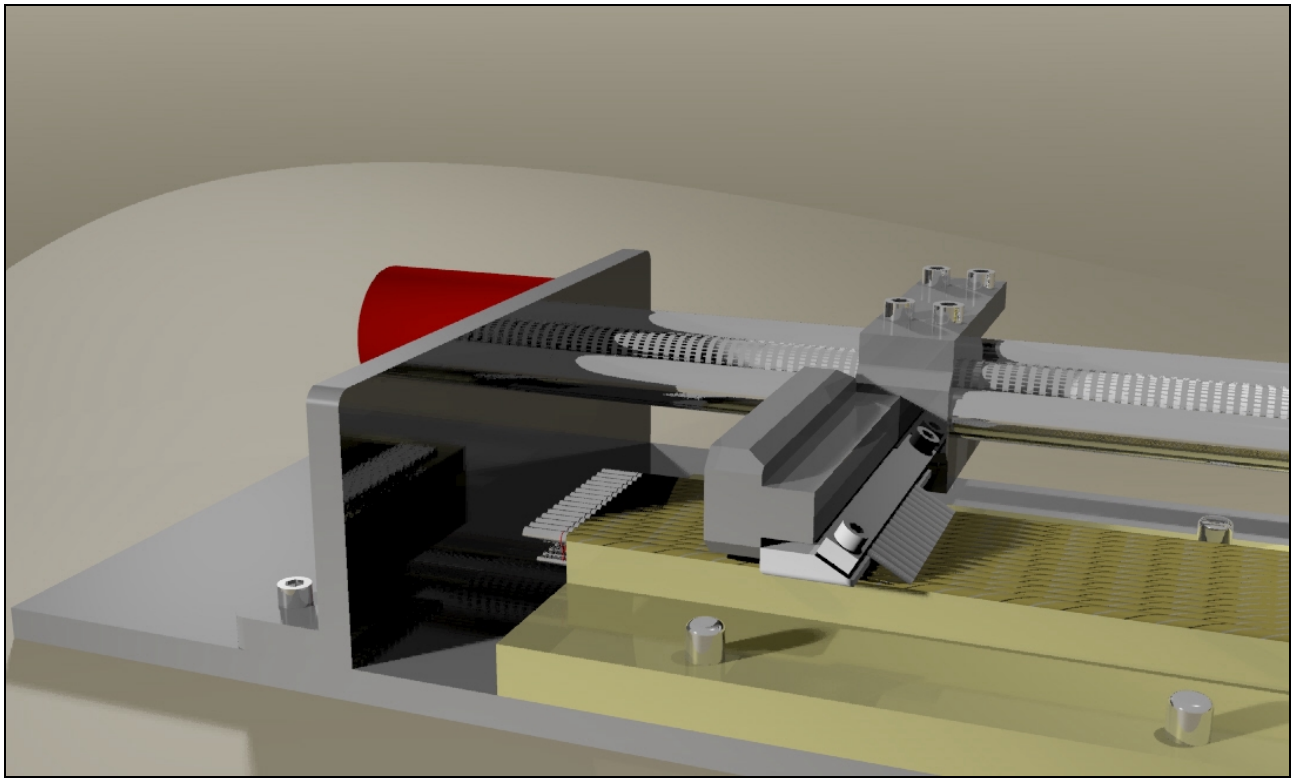

Figura 7.7 Ricostruzione grafica del raschiatore. Sono visibili in figura i pennini del pettine.

Il pettine è in grado di adattarsi alla superficie su cui si muove. Nella cerniera è prevista una molla torsionale per mezzo della quale può essere regolata la pressione esercitata dai pennini.

Inoltre, per evitare spessori troppo elevati, la rotazione del pettine intorno all'asse di cerniera e quindi il sollevamento dei pennini, viene controllato per mezzo di un dente di bloccaggio.

Per realizzare la pressione necessaria all' adesione viene utilizzato un blocco di alluminio provvisto nella parte inferiore di scanalature che si adagiano superiormente agli straws.

Tale pressore è calettato con il banco di lavoro per mezzo di viti che permettono di applicare una pressione regolabile attraverso il loro serraggio e con l'aggiunta di spessori pelabili per regolazioni centesimali.

La pressione esercitata permette alla colla di riempire eventuali irregolarità createsi deurante la fresatura sulla superficie del rohacell. Inoltre aver cosparso la colla solo sul fondo dei solchi previene la fuoriuscita accidentale di adesivo in fase di incollaggio.

L'adesivo ha un tempo di presa di 15 minuti ed entro tale tempo l'incollaggio e l'assemblaggio dei componenti deve essere terminato.

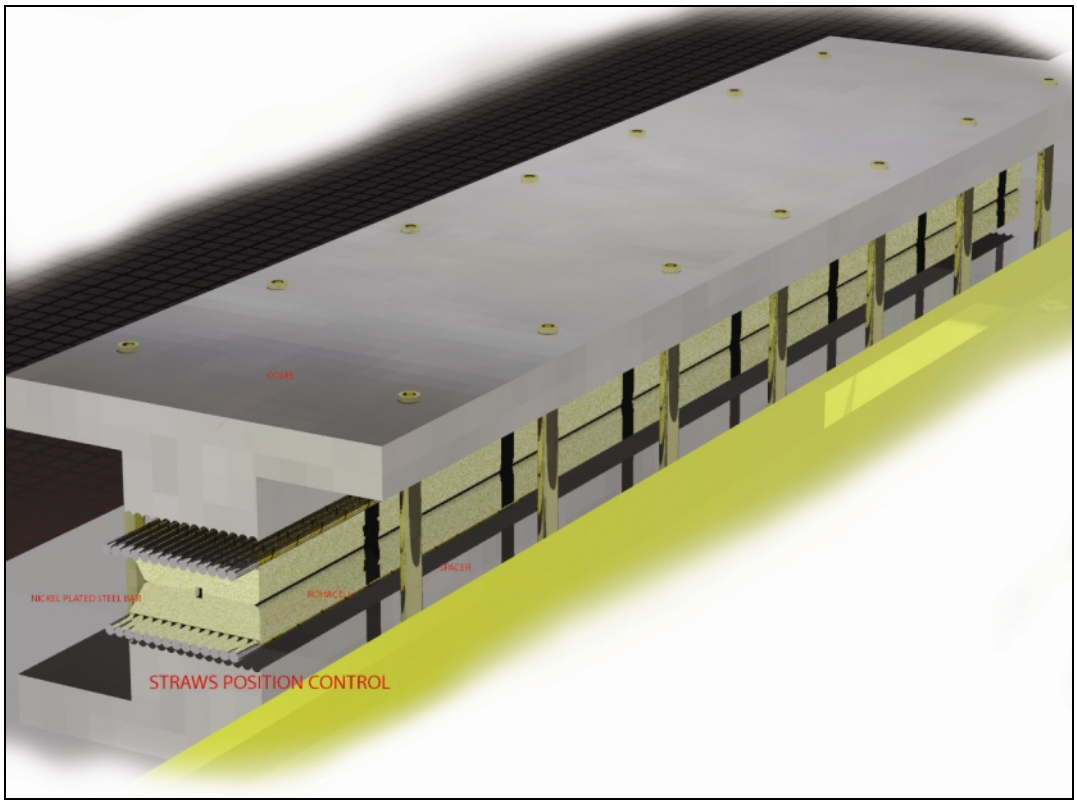

Figura 7.8 Pressore per la prima fila di straws

La seconda fila di straws viene adagiata su un particolare supporto (vedi fig 7.9). Tale supporto presenta alle due estremità dei tondini ai quali, per mezzo di legature ad otto, vengono fissati uno ad uno gli straws. Capovolgendo il supporto per continuare l'incollaggio, gli straws, bloccati solo alle estremità dalle legature, si inflettono per effetto del loro peso e di quello dei tondini. La freccia massima si ha al centro.

Il supporto viene calettato allo stampo per mezzo di viti. Man mano che esso viene abbassato, le due file vengono a contatto a partire dal centro. In tal maniera l'aria viene progressivamente spinta verso le estremità, realizzando un incollaggio più efficiente.

Tra le file di straws deve inoltre esserci una distanza pari a 25μm; tale distanza viene mantenuta regolando opportunamente il serraggio delle viti.

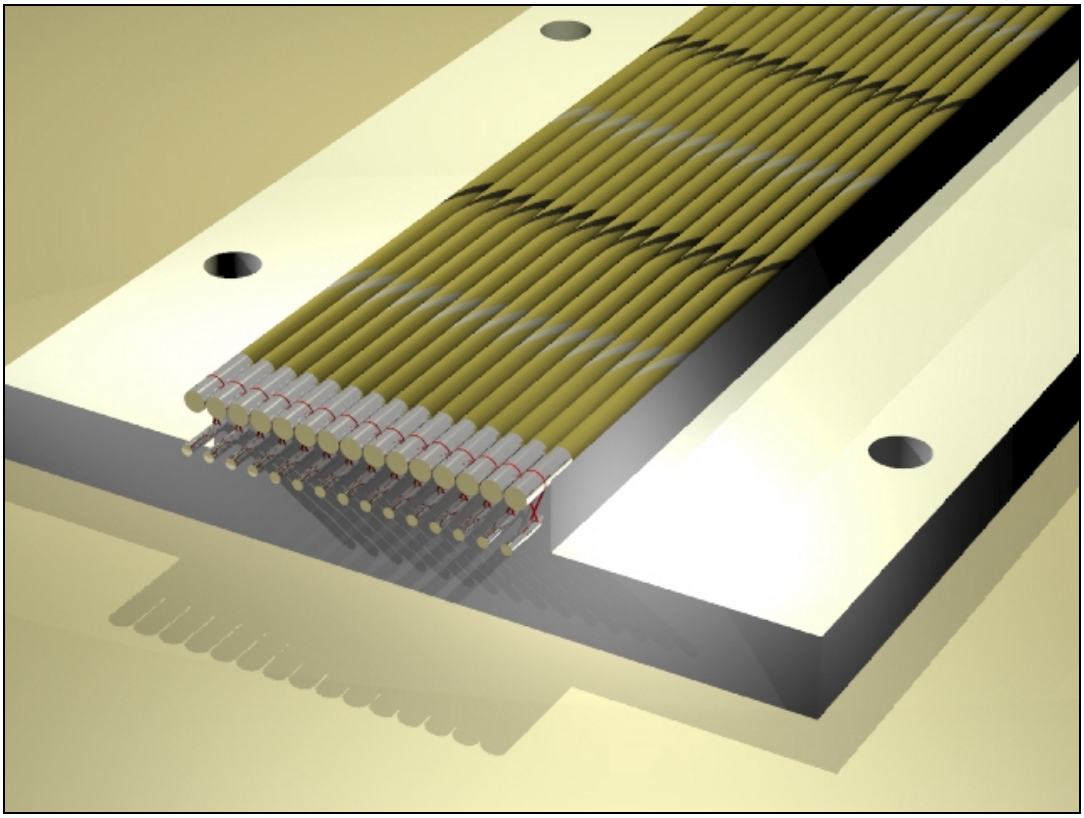

Figura 7.9 Supporto per la seconda fila di straws. Nell'immagine sono visibili le legature ad otto che legano i tondini inseriti negli straws al supporto

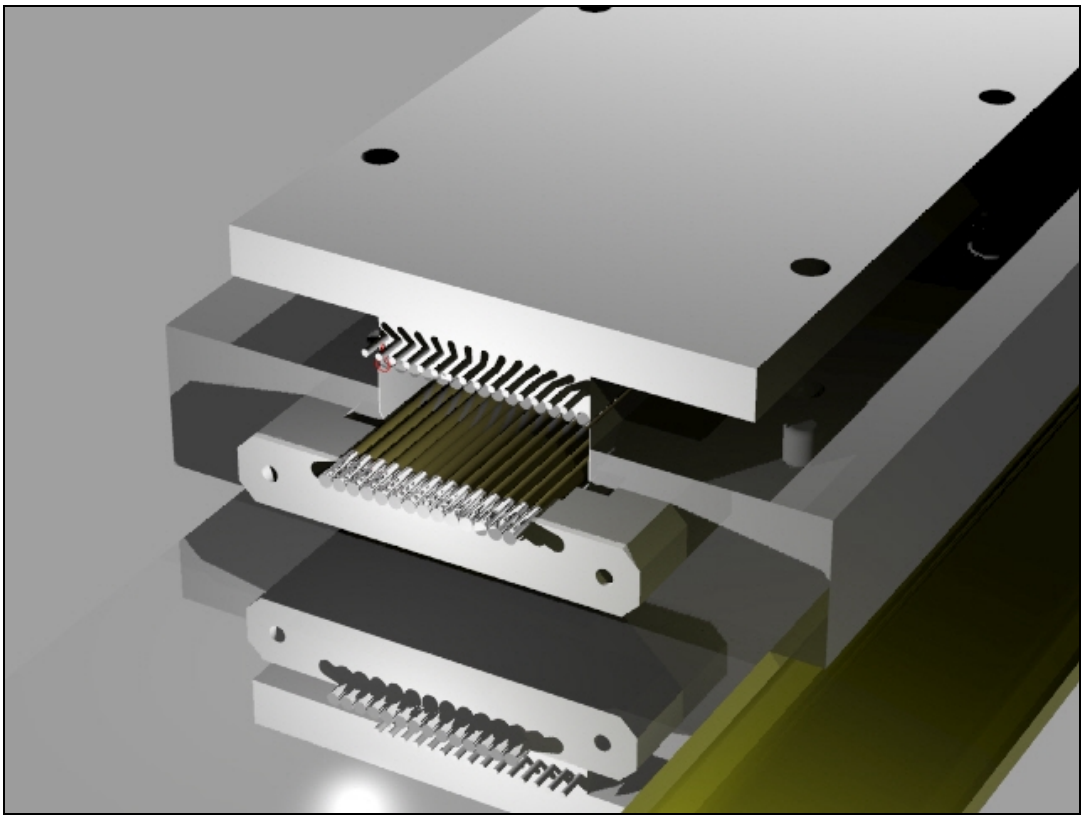

Figura 7.10 Posizionamento del supporto sullo stampo per l'incollaggio della seconda fila di straws.

7.3 Assemblaggio finale

L'assemblaggio del modulo termina con l'incollagio delle due metà dello strut e successivamente del disco.

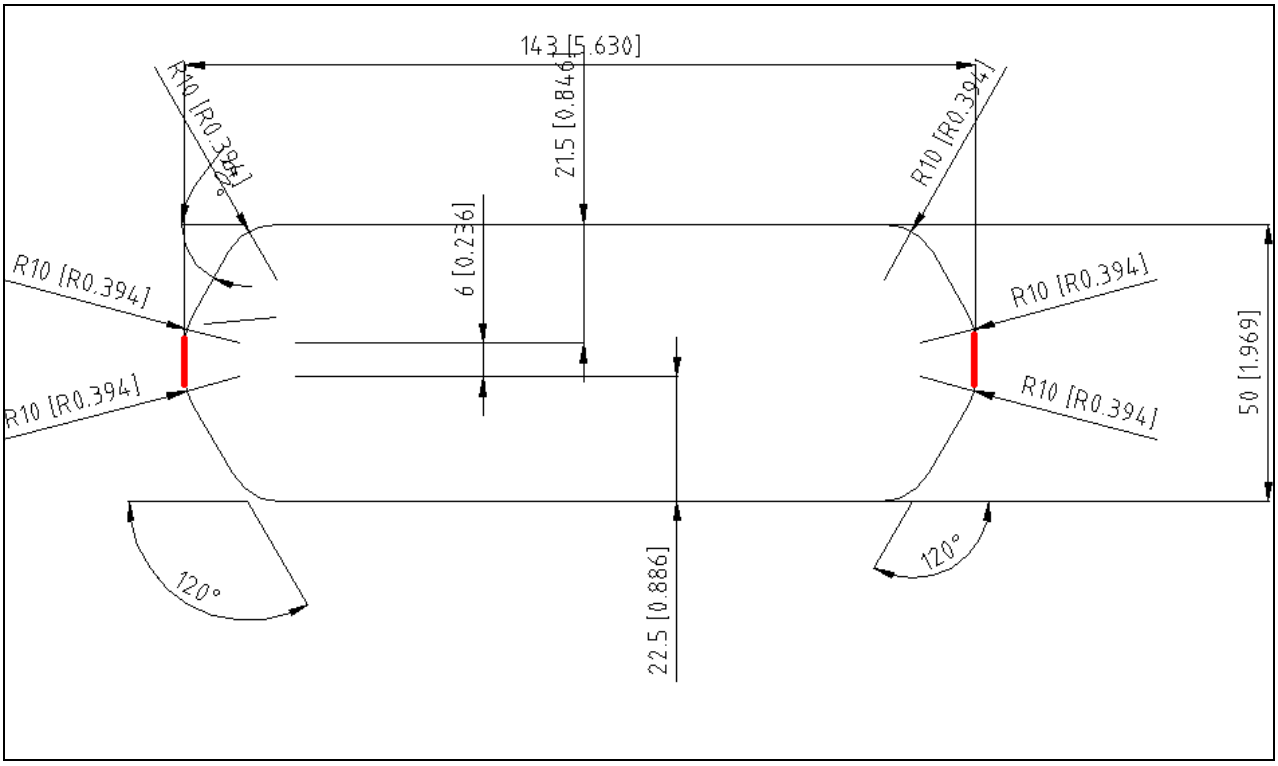

Figura 7.11 Visualizzazione delle zone di incollaggio dei due semigusci dello strut

Nella figura sopra sono evidenziate in rosso le zone di incollaggio. Poiché ognuna delle due parti è stata laminata con tre ply, per evitare che in tale zona si abbia la sovrapposizione di sei pelli di composito e quindi uno spessore doppio, si è pensato di far partecipare all'incollaggio due ply della metà superiore e un ply della metà inferiore dello strut. Si utilizza in questo caso un collante epossidico bicomponente e si effettua un incollaggio a freddo delle due parti. L'adesione delle parti viene garantita con l'utilizzo di due placche in anticorodal disposte esternamente alle zone di incollaggio e premute contro di esse. In alternativa all'incollaggio a freddo si può procedre ad un

incollaggio a caldo con biadesivo termosensibile sostituendo alle placche in anticorodal sopraccitate due piastre con resistenza per la polimerizzazione dello stesso. Optando per questa soluzione il modulo viene tenuto sotto pressore per circa 10 ore e le resistenze scaldano la colla fino a temperatura di 60 °C in modo da far avvenire la presa.

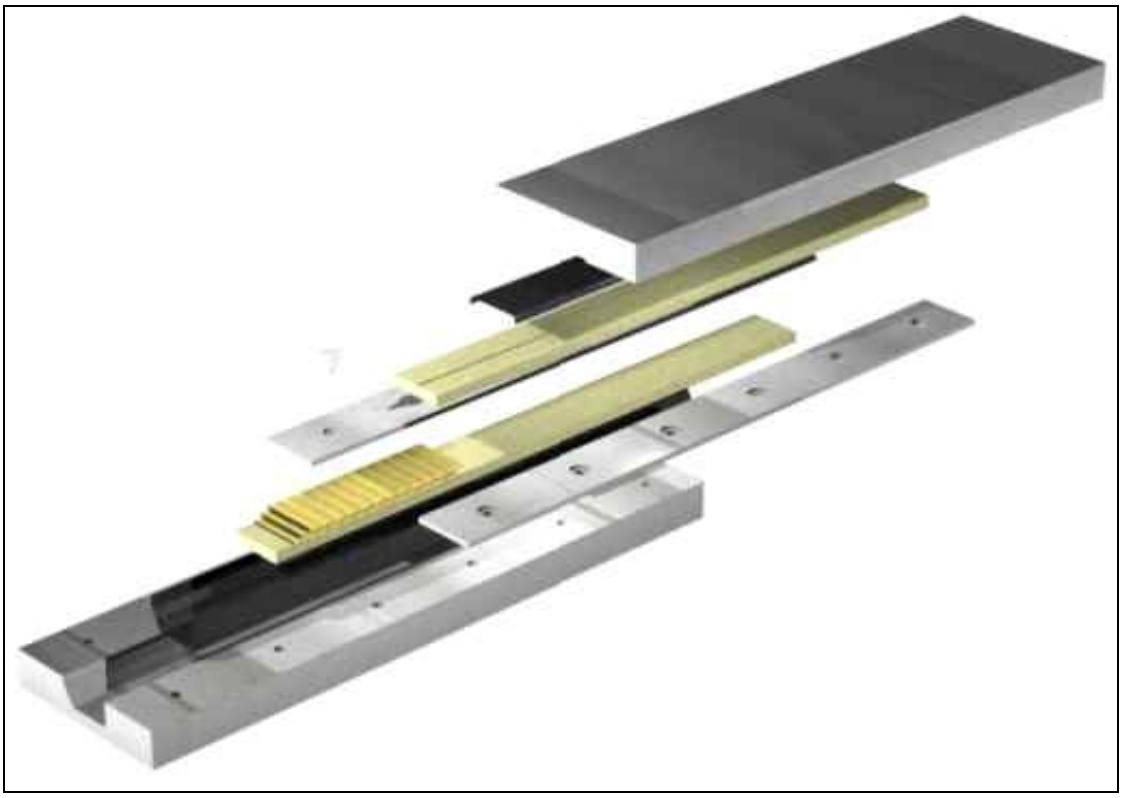

Figura 7.12 Esploso dello stampo. Si notino le barre laterali per l'incollaggio delle due parti dello strut

Ad incollaggio terminato si rimuovono i supporti e le anime in acciaio nichelato precedentemente inserite negli straws. Successivamente si inseriscono a pressione gli end-plugs sugli end-plates e si fanno passare attraverso gli straws i twisters per sostenere i filamenti di tungsteno del rivelatore. Si innestano poi gli end-plugs agli straws assicurando il contatto di massa con adesivo conduttivo e si avviatano gli end-plates alle flange precedentemente inserite nello stampo. A questo punto lo strut è pronto per essere avvitato sul supporto regolabile all'esterno del quale vengono fissati i terminali dei filamenti per mezzo di un successivo end-plate in Noryl® isolante. Su tali terminali viene infine connessa l'elettronica protetta da un coperchio isolante (in rosso in fig. 7.14).

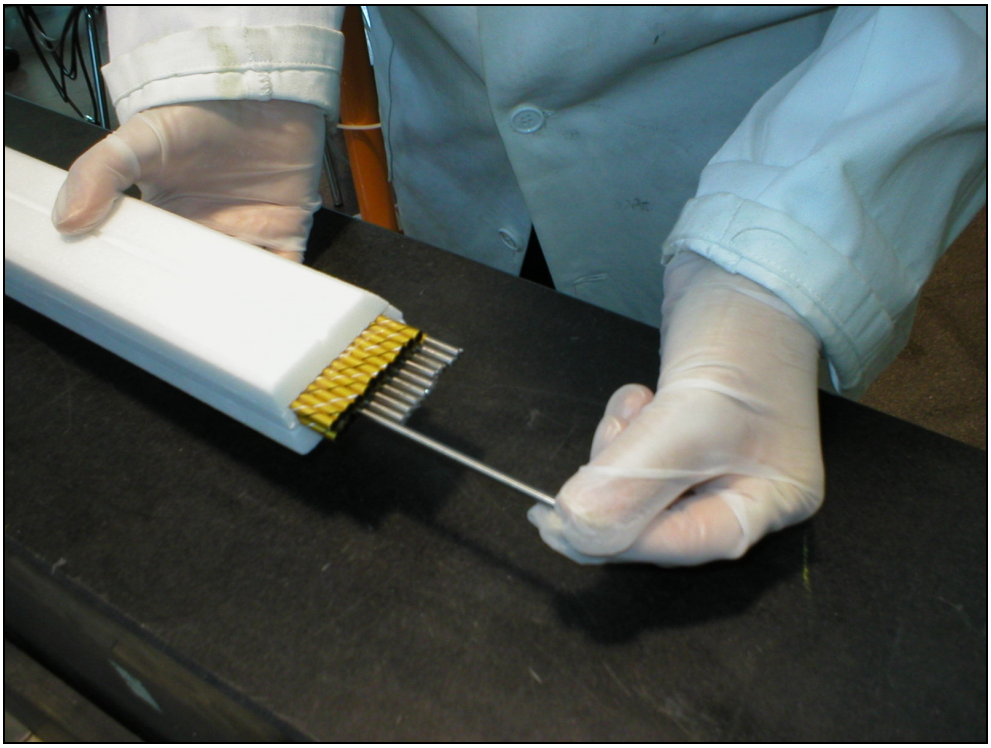

Figura 7.13 Estrazione dei tondini dagli straws

.

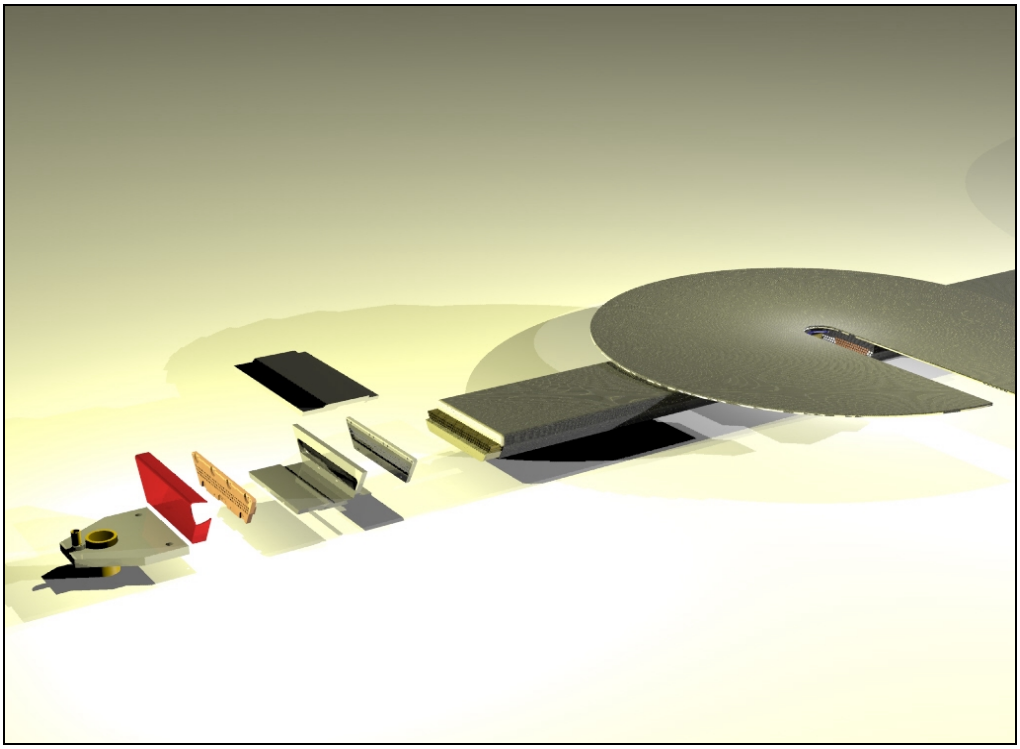

Figura 7.14 Esploso di montaggio

Fissati gli end-plates si ripassa ulteriormente la parte esterna di colla strutturale epossidica, cospargendola con una siringa. Le operazioni di montaggio terminano con l'incollaggio del disco e con le rifiniture in cui si eliminano bave di adesivi in eccesso.

7.4 Considerazioni finali

Durante l'intero periodo di stage si sono avuti continui colloqui con l'azienda incaricata della realizzazione dello modulo e da essi, a seguito di prove sperimentali, è emerso il problema della lavorazione del pre-preg nello stampo a causa dei bassissimi raggi di curvatura che caratterizzano gli angoli del modulo.

Tale problema ha portato in un primo tempo alla diversa realizzazione dei due sandwich per modulo e disco utilizzando due pre-preg con diversa fibra unidirezionale. Per garantire la planarità del MOX infatti è stato proposto l'utilizzo di una fibra unidirezionale ad alto modulo elastico (vedi Cap. 8). E' stato notato tuttavia che in corrispondenza degli angoli il pre-preg tende comunque a lacerarsi nella direzione parallela alla fibra, per questa ragione il suo utilizzo è stato proposto solamente per il disco. Per non utilizzare tuttavia un composito alternativo con modulo elastico nella direzione delle fibre troppo basso è stato posto il vincolo, sopramenzionato, dell'orientazione 0°/90°/0° per le pelli che permette di ottenere una maggior resistenza dello stesso nella direzione perpendicolare a quella dello sviluppo longitudianale del modulo e quindi una miglior tenuta delle fibre nella fase di posa del pre-preg nello stampo. A tale caratteristica si aggiunge quella di una lavorazione più rapida e più semplice.

Tutte queste considerazioni hanno portato a scartare preventivamente, tranne nell'ipotesi in cui le analisi svolte in questa sede avessero mostrato un suo migliore ed evidente comportamento meccanico rispetto alla soluzione 1, la soluzione 2. Essa tra l'altro presenta altri due inconvenienti; il primo è la necessità di realizzare due stampi differenti per le due metà del modulo, il secondo è

legato invece alla difficoltosa estrazione dallo stampo della metà superiore del modulo (poiché presenta angoli di 90°).

Se a tutto ciò si aggiunge l' avallo dato dall'equipe di fisici ad entrambi i modelli in quanto conformi in termini di massa introdotta è evidente il fatto che la scelta finale sia da far ricadere sulla soluzione 1.

Allo stato attuale i Laboratori sono in attesa dell'arrivo di un primo prototipo del modulo da sottoporre presumibilmente già nei primi mesi del 2005 a prove sperimentali

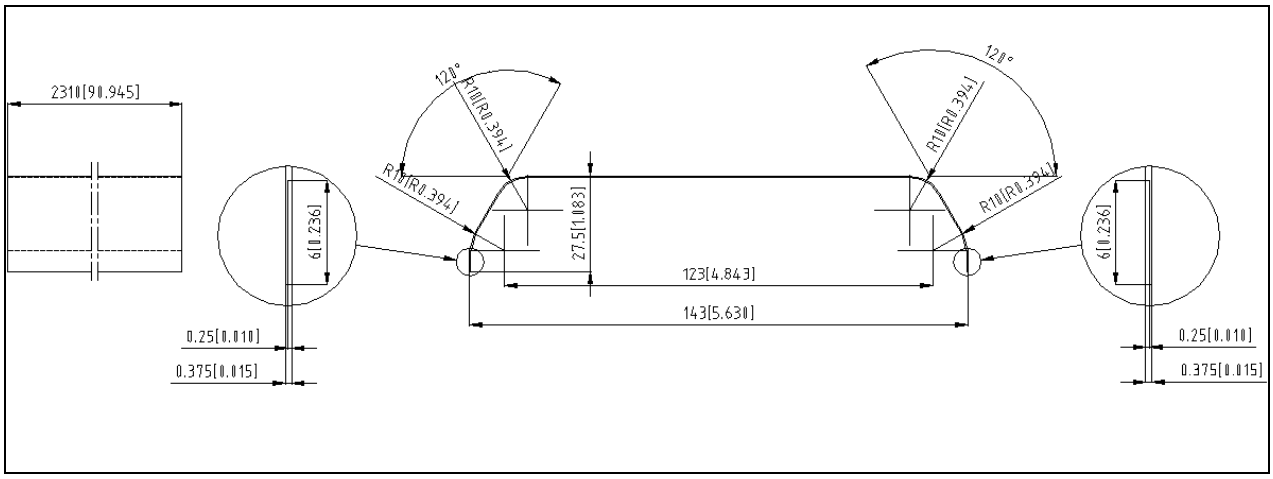

Figura 7.15 Dimensioni dello stampo per la soluzione esagonale. La metà inferiore dello strut verrà preparata in uno stampo identico.

Capitolo 8

Caratteristiche dei materiali impiegati

8.1 Introduzione

L'utilizzo dei compositi fibrorinforzati sin dalla loro introduzione è cresciuto significativamente negli ultimi anni. I compositi hanno ampiamente dimostrato la loro funzionalità in campi sempre più diversificati. I motivi della loro espansione sono da attribuire alle eccellenti proprietà meccaniche rapportate al loro peso specifico, alla durabilità ed alla versatilità. L'uso dei compositi avanzati è stato a lungo limitato alle applicazioni ad elevato valore aggiunto, dal costo delle materie prime, quali fibre di carbonio e Kevlar®, e dal costo della tecnologia di produzione. Il recente lo sviluppo e la messa a punto di nuove tecnologie hanno permesso ai compositi di competere con i metalli in applicazioni a più basso valore aggiunto.

8.2 I materiali compositi

Tra i materiali strutturali, i compositi fibro-rinforzati risalgono ad appena quattro decenni. Tuttavia, in questo breve lasso di tempo, questa nuova classe di materiali ha avuto un enorme sviluppo scientifico e tecnologico. La bassa densità, l'alta resistenza, l'elevata rigidezza rispetto al peso, l'eccellente durabilità e la versatilità nell' assumere le forme più svariate sono le ragioni principali del loro successo come componenti strutturali negli aerei, nelle automobili, nei moduli spaziali, nelle imbarcazioni ed in molti altri campi.

Un composito fibro-rinforzato si ottiene dalla combinazione di due o più componenti: fibra e matrice, nella maggior parte dei casi un polimero. Le fibre occupano la frazione in volume maggiore in un laminato composito, esse forniscono rigidezza e resistenza al composito stesso. E' molto importante una selezione accurata del tipo, della quantità e dell'orientamento delle fibre in quanto tutto ciò influenza le seguenti caratteristiche di un laminato composito:

- Densità relativa.
- Resistenza meccanica e modulo elastico.
- Meccanismi di resistenza e rottura a fatica.
- Conduttività termica ed elettrica.
- Costo.

Il ruolo della matrice in un composito fibro–rinforzato è quello di:

- trasferire le tensioni tra le fibre;
- proteggere le fibre dall'azione corrosiva ambientale;
- proteggere la superficie delle fibre da abrasioni meccaniche;
- trasmettere gli sforzi di taglio interlaminari (carichi flessionali) e nel piano (carichi torsionali).

La processabilità e i difetti di un materiale composito, inoltre, dipendono fortemente dalle caratteristiche fisiche e termiche della matrice come la viscosità, il punto di fusione e la temperatura alla quale vengono formati. La diffusione relativamente povera delle competenze progettuali nel calcolo strutturale, insieme ai costi di produzione elevati è sicuramente uno dei fattori limitanti per un più esteso impiego dei materiali compositi come diretti sostituti di quelli tradizionali come l'acciaio o le leghe leggere. Ciononostante questi materiali sono sempre di più utilizzati per le caratteristiche sopraelencate in un'ampia gamma di settori: aeronautico, aerospaziale, automobilistico, navale-marino, chimico, edile, elettrico, agricolo e sportivo.

Il processo più diffuso e quello della laminazione in autoclave con sacco a vuoto (*bag molding*) in cui si impiegano preimpregnati di fibra di carbonio in resina epossidica curati in autoclave (vengono anche utilizzati rinforzi in fibra di vetro o kevlar). Dopo aver sovrapposto manualmente i preimpregnati secondo una precisa sequenza di laminazione, legata alle caratteristiche di progetto

del pezzo finito, si sottopone il manufatto, tenuto sotto vuoto in un sacco, ad un particolare ciclo di pressione e temperatura in autoclave. I bassi volumi di produzione e le elevate prestazioni richieste giustificano l'utilizzo di tecniche di produzione manuali e di materiali pregiati.

I compositi sono particolarmente adatti per applicazioni in cui la sollecitazione principale è una pressione interna. In questi casi la tecnica di fabbricazione adottata è la formatura per avvolgimento di fibre (filament winding) particolarmente adatta per riprodurre forme assialsimmetriche come serbatoi per carburante, involucri esterni e coni motori a combustibile solido per razzi (Arianne 6) e missili, tubi di lancio e persino l'intera fusoliera di un aereo (*Beech Starship*).

8.3 Caratteristiche dei materiali compositi usati

E' stata precedentemente evidenziata la difficoltà riscontrata nella posa del pe-preg nello stampo e la relativa facilità con cui le fibre tendevano a scollarsi in prossimità delle curvature dello stampo. Si è così pensato di utilizzare per il modulo un composito con caratteristiche di rigidità minori rispetto a quello ustato per il disco. Le sue caratteristiche sono riportate nella tabella sottostante.

Proprietà della fibra

Nome commerciale	**M46J**
Diametro della fibra	5 µm
Densità	1,84 g/cm^3
Tenacità a trazione	4210 Mpa
Modulo elastico	436 Gpa
Elongazione	1%
Calore specifico	0,17 Cal/g*°C
Conduttività termica	0,202 Cal/cm*s*°C
Resistività elettrica	0,9x10^{-3}Ω*cm
Composizione chimica	Carbonio (>99%) Na+K

Proprietà del composito

Exx	265 Gpa
Eyy	10 Gpa
Gxy	7,2 GPa
Percentuale di fibra	60%
Coeff. Poisson	0,3

Per garantirne il più elevato grado di planarià possibile, il composito utilizzato per il disco è costituito da fibre ad alto modulo unidirezionale curato con resina epossidica. Le caratteristiche della fibra e del composito sono riportante nelle seguenti tabelle.

Proprietà della fibra

Nome commerciale	**K13D2U**
Diametro della fibra	6 µm
Densità	2,2 g/cm^3
Tenacità a trazione	3700 Mpa
Modulo elastico	935 Gpa
Elongazione	0,4%
Conduttività termica	800 W/m*K
Composizione chimica	Carbonio (>99%) Na+K

Proprietà del composito

Exx	560 Gpa
Eyy	5,1 Gpa
Gxy	7,2 GPa
Percentuale di fibra	60%
Coeff. Poisson	0,3

8.4 Rohacell®

Uno degli aspetti notevoli di questo espanso è la sua resistenza a solventi organici (come benzene, xilene, monostirene, etc.), a solventi per vernici ed adesivi generalmente a base di combustibili usati per solubilizzare la maggior parte delle specie polimeriche, ha tuttavia una media resistenza all'attacco di specie alcaline. Grazie a queste sue caratteristiche attualmente trova largo uso in campo aeronautico ed aerospaziale oltre che come isolante e riempitivo in applicazioni mediche e paramediche data la sua non tossicità e la bassa reattività. Un aspetto interessante da sottolineare è la resistenza meccanica di tale materiale è che, anche se usato come espanso, non ha solo una comportamento parastrutturale, tipico delle altre schiume, ma può sostenere carichi applicati in modo persistente.

Il Rohacell è lavorabile con utensili ad alta velocità disegnati per legno o plastica, senza l'uso di lubrificanti, deve tuttavia essere previsto un impianto per la cattura accurata della polvere. Questo aspetto è di particolare utilità per la realizzazione del supporto, data la necessità di dover praticare dei canali longitudinali con stretta tolleranza lungo tutta la sua lunghezza per poter alloggiare gli straw tubes. Si è infatti pensato di realizzare tali scanalature tramite fresatura, si ha un leggero riscaldamento (50÷70°C) dovuto alla velocità di rotazione dell'utensile. Un altro aspetto di rilievo è la buona affinità con gli adesivi del tipo di quelli comunemente usati per l'incollaggio di parti in legno o polimeriche.

Importante per la stazione di rilevazione BTeV è la resistenza del Rohacell alle radiazioni, tale proprietà è stata verificata in alcuni rivelatori di particelle, tra cui il detector di vertice di Phoenix dei Laboratori Nazionali di Brookhaven, nell'esperimento in esame si adopera del Rohacell 71 come supporto di detectors in Silicio.

Questa proprietà è stata verificata con l'esame di campioni di dimensione 100x10x10 mm^3 e densità variabili tra 31 e 71 kg\cm^3, irradiati da una dose di 0.15 Mrad e successivamente da una di 10 Mrad generati da una sorgente di cobalto 60.

Il test di banco eseguito ha dimostrato che non c'è stato un calo significativo nelle proprietà esaminate in seguito all'esposizione dei campioni alla sorgente di 0.15 Mrad. Si ha invece un crollo delle prestazioni meccaniche in seguito all'esposizione alla sorgente di 10 Mrad specie in quei campioni di densità più bassa, si è provato infatti che il Rohacell 31 irradiato non è in grado di sostiene alcuno peso, la verifica è stata fatta sottoponendo i campioni ad un carico di 400 g. I dati del tests, raggruppati in tabella servono ad avere idea di quello che è il comportamento meccanico del core dell'interfaccia in seguito all'esposizione prolungata al fascio di particelle.

Condizioni Di Irradiazione	Resistenza a Compressione N/mm^2	Resistenza a Flessione N/mm^2	Deformazione a Frattura mm
Non irradiato	1,5	1,8	6,0
0.15 Mrad	1,5	2,3	5,8
10 Mrad	1,3	1,8	2,5

Tabella 8.1: Variazione delle proprietà meccaniche in seguito all'esposizione di un campione di Rohacell 71 a radiazioni emesse da una sorgente costituita da cobalto 60, i dati sono utili per valutare quello che dovrebbe essere il comportamento del core in seguito all'esposizione prolungata a radiazioni provenienti dalle particelle.

Una buona formabilità e lavorabilità a caldo sono caratteristiche comuni del rohacell nelle varie tipologie di seguito presentate. I diversi tipi sono riportati nelle pagine seguenti con le caratteristiche, proprietà meccaniche e campi di impiego:

- Tipo A è utilizzato nel campo dell'aviazione e per antenne, è fatto curare in autoclave con una pressione di 0,35 MPa, presenta una buona plasmabilità e formabilità a caldo.
- Tipo EC, con una densità di 75 Mg/m^3 presenta una resistenza a compressione di $2,83*10^{-2}$ Pa, inferiore a quella di altri tipi di rohacell. Questo aspetto in genere costituisce un problema per il suo utilizzo in strutture meccaniche, è tuttavia impiegato in schermature EMI ed in altri campi dell'elettronica per le sue buone caratteristiche elettriche.

- Tipo FX, impiegato per la costruzione di parti di pale per mulini di vento e strutture impiegate in campo aeronautico. Può essere fatto curare in autoclave con pressione di 0.2 MPa.
- I settori di impiego del Rohacell HF sono parti di antenne e componentistica per sale mediche in zone esposte ai raggi X, per la reticolazione si applica una pressione di 0.35 MPa, la tabella 9 riporta caratteristiche e proprietà meccaniche del tipo HF, questa variante di rohacell è caratterizzata da una cella reticolare di dimensione più piccola delle altre tipologie.
- Il Rohacell LS[1] è largamente impiegato per la produzione di diaframmi di altoparlanti, è tipicamente lavorato con stampaggio ed infusione di resina. A differenza degli altri tipi l'LS ha una temperatura di distorsione di 175°C.
- Il Rohacell IG è impiegato per la realizzazione di prototipi, componentistica meccanica, specie aeronautica e navale, produzione di articoli sportivi unità esposte a RX per uso biomedico. Aspetto importante che lo caratterizza è una stabilità alle radiazioni migliore degli altri tipi.
- Rohacell P ha proprietà di anisotropia, è indicato per la realizzazione di sci di alta qualità, é comunemente impiegato con densità superiori a quelle degli altri tipi.
- Il tipo S trova impiego nella costruzione di veicoli ed aerei, rispetto agli altri presenta una migliore formabilità ed è inoltre autoestinguente.
- Il Rohacell XT serve per la realizzazione del core di strutture sandwiches ed in generale come espanso il strutture composite, comunemente usato in campo aeronautico ed aereo spaziale.

Per le caratteristiche sopra viste si è ritenuto opportuno impiegare il Rohacell IG, data la necessità di avere un componente all'interno di un rivelatore di particelle, è molto apprezzata la buona stabilità dimensionale di questa tipologia di espanso. In tabella 8 si sono riassunte le principali proprietà meccaniche per tale tipo di Rohacell, la tipologia utilizzata per la realizzazione del supporto per straws è quella contrassegnata dal nome commerciale IG 31.

[1] LS sta per Loudspeakers, cioè altoparlanti.

	Unità di Misura	Rohacell 31 IG	Rohacell 51 IG	Rohacell 71 IG
Resistenza a Compressione	MPa	0.4	0.9	1,5
Resistenza al Taglio	MPa	1.0	1.9	1,6
Resistenza al Taglio	MPa	0.8	1.6	0,8
Modulo Elastico long.	MPa	0.4	0.8	19
Modulo elastico trasv.	MPa	13	19	4,0
Allungamento a Rottura	%	3.5	4,0	4,5

Tabella 8.2: Tabella riassuntiva proprietà del rohacell IG utilizzato, tali valori sono stati riportati per diverse tipi di densità.

Bibliografia e sitografia utilizzata

1 R. Barboni,“Dispense di Costruzioni Aerospaziali”

2 K.K. Chawla, “Composite materials” Springer-Verlag

3 E. Basile, “Scelta dei materiali ed analisi strutturale per supporti di rivelatori di particelle dell’esperimento BTeV a Fermilab (U.S.A.), tesi di laurea in Ingegneria dei Materiali, 2003

4 F. Di Falco,“Realizzazione di un prototipo di rivelatore di particelle a straw tube per l’esperimento BTeV del Fermilab (USA) e relativi test di caratterizzazione meccanica e funzionale sui materiali utilizzati”, tesi di laurea in Ingegneria dei Materiali, 2004

5 W. F.Smith, “Structure and properties of eingeering alloys”, McGraw-Hill.

6 L. R. Falce and G. S. Breeze, "CPD Cathodes for High-Resolution CRTs," SID 91 Digest.

7 M. Dinardo: *Report on Microstrip Silicon Detector*. Documento interno BTeV numero 1879, 2003.

8 L.Moroni: *Forward Silicon Tracker Project*. Documento interno BTeV numero 619, 2001.

9 D.M.Kaplan et al. (Collaborazione BTeV): *The BTeV Trigger System*. Pres. 6th International Conference on B-Physics at Hadron Machines (BEAUTY 99), Bled, Slovenia, 1999. Pubbl. Nucl.Instrum.Meth.A446:282-288,2000.

10 C.R.Newsom et al. (Collaborazione BTeV): *Overview of the BTeV Pixel Detector*. Pres. International Workshop on Seminconductor Pixel Detectors for Particles and XRays (PIXEL 2000), Genova, Italia, 2000. Pubbl. Nucl.Instrum.Meth.A465:34-39,2000.

11 J.Wang: *Description of the BTeV Detector*. Pres. DPF 2000: The Meeting of the Division of Particles and Fields of the American Physical Society, Columbus, Ohio, 2000. Pubbl. in Int.J.Mod.Phys.A16S1C:1062-1064,2001.

12 S.D.Rindani: *CP Symmetry and its Violation in Fundamental Interactions*. Pubbl. Pramana 49:81-92,1997.

13 Degussa Rohm Performance Plastics, *Rohacell® Datasheet*.

14 www-btev.fnal.gov/public_documents

15 www.infn.it

16 www.scienzapertutti.lnf.infn.it