

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI NAPOLI
"FEDERICO II"



FACOLTA' DI INGEGNERIA

**DOTTORATO DI RICERCA IN INGEGNERIA CHIMICA,
DEI MATERIALI E DELLA PRODUZIONE**

indirizzo in

Tecnologie e Sistemi Intelligenti per l'Automazione della Produzione

XIX ciclo

TESI DI DOTTORATO

**PROGETTAZIONE E REALIZZAZIONE DI UN PANTOGRAFO IN
MATERIALE COMPOSITO PER TRENI AD ALTA VELOCITÀ.**

Tutor

Ch.mo Prof. Ing. I. Crivelli Visconti

Coordinatore

Ch.mo Prof. Ing. Nino Grizzuti

Dottorando

Ing. Marco de la Feld

ANNO ACCADEMICO 2005-2006

Indice

Capitolo 1.....	4
Caratteristiche dei materiali compositi	4
1.1 Definizioni e generalità.....	4
1.2 Matrici.....	11
1.3 Fibre	14
1.3.1 Fibre di vetro.....	17
1.3.2 Fibre di carbonio	22
1.3.3 Fibre di boro.....	26
1.4 Tecnologie di fabbricazione.....	26
1.5 Processi produttivi materiali compositi.....	29
1.5.1 Deposizione manuale senza applicazione di pressione o vuoto.....	30
1.5.2 Formatura per iniezione di resina (RTM resin transfer molding).....	31
1.5.3 Filament winding	34
1.5.4 Formatura in continuo.....	35
1.5.5 Vacuum infusion	36
1.5.6 Bulk Casting.....	37
1.5.7 Centrifugal casting	37
1.5.8 Continuous molding.....	38
1.5.9 Continuous profile.....	38
1.6 La tecnologia Wrapping.....	38
1.6.1 Formatura con stampo e controstampo	40
1.6.2 Tecnologia del sacco in pressione.....	40
1.6.3 Deposizione per taglio e spruzzo	42
1.6.4 Formatura in autoclave.....	42
1.6.5 Cenni sulla teoria dei sandwich	44
Capitolo 2.....	47
Resin Infusion Under Flexible Tooling (RIFT)	47
2.1 Introduzione	47
2.2 Fasi produttive del RIFT	49
2.3 Attrezzature utilizzate per il RIFT	51
2.4 Stampi per il RIFT	53
2.5 Materiali per il sacco.....	54
2.6 Rinforzo e miscela di impregnazione.....	55
2.7 Proveni per l'utilizzo della teoria del Rift.....	56
2.8 Descrizione delle fasi del processo di sperimentazione.....	59
2.9 Descrizione del meccanismo di impregnazione.....	65
Capitolo 3.....	69
Il Pantografo.....	69
3.1 Introduzione	69
3.2 Traiettoria del punto di contatto.....	73
3.3 Forze agenti sul pantografo.....	76
3.4 Cause del distacco pantografo - catenaria.....	84
3.5 Analisi dei materiali e dei componenti costituenti il pantografo originale.....	89
3.6 Realizzazione del pantografo in composito:	94
Determinazione del nuovo design.....	94
3.7 Prove sperimentali realizzate	99
Capitolo 4.....	101
Il Metodo degli Elementi Finiti: approccio agli spostamenti.....	101
4.1 Introduzione	101

4.2 Le successive fasi dell'approccio agli spostamenti.....	102
4.3 Forze nodali.....	104
4.4 Assemblaggio degli elementi	107
4.5 Analisi elastica	109
4.6 Assemblaggio e soluzione.....	111
4.7 Analisi agli elementi finiti dell'archetto realizzato.....	112
Capitolo 5.....	116
Evoluzione del nuovo Archetto: studio dell'impacchettamento.....	116
5.1 Introduzione	116
5.2 Impacchettamento	119
5.3 Realizzazione del nuovo prototipo in vetroresina.....	123
Capitolo 6.....	134
Prove sperimentali.....	134
6.1 Introduzione alle prove	134
6.2 Prove in bibliografia.....	137
6.3 Strumentazione di prova	147
6.4 Parametri della prova	151
6.5 Prove di fatica e risultati	154
Capitolo 7.....	157
Effetti termici sul pantografo	157
7.1 Introduzione	157
7.2 Dati in bibliografia.....	159
7.3 Degrado termico dei compositi	166
Capitolo 8.....	169
Prove termiche	169
8.1 Introduzione	169
8.2 Realizzazione della struttura di isolamento e sostegno striscianti	169
8.3 Strumentazione di prova	175
8.4 Prove preliminari.....	176
8.5 Prove sull'archetto	179
8.6 risultati delle prove.....	181
Capitolo 9.....	185
Prova sul treno	185
9.1 Introduzione	185
9.2 Montaggio dell'archetto sul pantografo.....	191
9.3 Approfondimento delle semplificazioni manutentive	195
Conclusioni	198
Bibliografia	201

Capitolo 1

Caratteristiche dei materiali compositi

1.1 Definizioni e generalità

I materiali compositi hanno avuto, negli ultimi anni, impiego crescente in molteplici settori, per la realizzazione di elementi strutturali.

Una definizione di materiali compositi può essere la seguente: si tratta di materiali di solito non presenti in natura che sono il risultato di una combinazione tridimensionale di almeno due materiali tra loro chimicamente differenti con un'interfaccia di separazione. Ciascun costituente mantiene la propria identità nel composto finale senza dissolversi o fondersi completamente nell'altro. La combinazione così ottenuta vanta proprietà chimico-fisiche non riscontrabili nei singoli materiali che la compongono. Vari MC sono usati in strutture quali ad esempio quelle impiegate sul Boeing 777 a motivo della loro resistenza e leggerezza, nonché della resistenza alla fatica, alla corrosione e agli impatti. Il favorevole rapporto tra prestazioni meccaniche e peso motiva il sempre più ampio uso di questi materiali nelle applicazioni del settore trasporti, per realizzare aerei, imbarcazioni ed autoveicoli meno pesanti, e pertanto con minor consumo e maggiore autonomia. Molteplicità di processi di fabbricazione, rapidità di produzione, adattabilità a forme e requisiti complessi, possibilità di ottenere manufatti con proprietà meccaniche progettate in funzione dei requisiti richiesti, costituiscono indubbi vantaggi sia per la produzione che per la realizzazione stessa di un aereo, auto o imbarcazione o di loro

componenti. La possibilità di sfruttare convenientemente le caratteristiche di anisotropia e di disporre fibre o tessuti di rinforzo nella matrice polimerica in direzioni volute, oltre a cellule di rinforzo quali schiume dure e strutture a nido d'ape (honeycomb), privilegiando rigidità e resistenze in tali direzioni, costituisce un'opportunità unica di progettazione e realizzazione contemporanee di una struttura, assente per gli altri tipi di materiali tradizionali, che possono considerarsi microscopicamente isotropi. E così se per irrigidire a flessione una trave di acciaio bisogna aumentare l'altezza della trave adottando forme e dimensioni opportune, l'irrigidimento a flessione di una trave in composito può essere ottenuto disponendo le fibre prescelte, in quantità e direzioni opportune, nel pezzo senza che sia per questo necessario variarne forma o dimensioni. In generale, i criteri di progettazione attualmente utilizzati per i materiali compositi sono molto simili a quelli che tradizionalmente vengono considerati per le strutture metalliche. Per esempio, un componente strutturale in un aeroplano sia esso realizzato in alluminio o in materiale composito viene dimensionato sulla base dei seguenti criteri:

1. deve essere in grado di sopportare i carichi massimi ammissibili in condizioni statiche;
2. il limite di fatica deve essere uguale o superiore al tempo di vita previsto per il veicolo;
3. le deformazioni conseguenti all'applicazione dei carichi ripetuti e dei carichi massimi ammissibili non devono interferire con la manovrabilità

aerodinamica dell'aereo o indurre danni che implicino sostituzione o riparazione di parti.

I carichi massimi ammissibili vengono solitamente stimati considerando un fattore di sicurezza moltiplicativo rispetto ai carichi di progetto. Per componenti metallici il fattore di sicurezza solitamente utilizzato è 1.5, mentre per strutture in materiale composito si utilizza un fattore più elevato, 2 o più, principalmente a causa della mancanza di esperienza progettuale e di dati relativi al comportamento a lungo termine. La relativamente scarsa diffusione delle competenze progettuali nel calcolo strutturale è sicuramente uno dei fattori limitanti per un più esteso impiego dei materiali compositi in sostituzione diretta di materiali tradizionali come l'acciaio o anche le leghe leggere.

Tabella I : alcune applicazioni dei materiali compositi a matrice polimerica.

SETTORE INDUSTRIALE	ESEMPI
AERONAUTICO- AEROSPAZIALE	Parti di ali e code, fusoliere, antenne, pale di elicottero, carrelli di atterraggio, sedili, pavimenti, pannelli interni, serbatoi, involucri esterni e coni terminali di razzi e missili, tubi di lancio

AUTOMOBILISTICO	Parti di carrozzeria, cabine per camion, spoilers, quadri comandi, pannelli porta-strumenti, alloggiamenti per luci, paraurti, molle per sospensioni, organi di trasmissione, ingranaggi, cuscinetti
NAVALE – MARINO	Scafi, ponti, alberi, vele e relative stecche, profili strutturali, sagole di salvataggio, boe d'ancora, protezioni per motori, pannelli interni
CHIMICO	Tubazioni, serbatoi, recipienti in pressione, tramogge, valvole, pompe, ventole e giranti, grate per pavimenti
EDILE	Passerelle e ponti per traffico leggero, condotte sotterranee, recinzioni, profilati strutturali, zoccolini corrimano, ringhiere, grondaie, profili per finestre, elementi di rinforzo per il recupero edilizio
ELETTRICO	Basette per circuiti stampati, pannelli, alloggiamenti, interruttori, isolatori, connettori, condotte porta cavi, scale isolate, corde, tralicci, componenti per motori e trasformatori, utensili isolati

<p style="text-align: center;">AGRICOLO</p>	<p style="text-align: center;">strutture per silos e serre, palificazioni per piantagioni, recinzioni, archetti per tunnels, scale, botti per alimenti</p>
<p style="text-align: center;">SPORT E TEMPO LIBERO</p>	<p style="text-align: center;">mazze da golf, racchette da tennis, elmetti protettivi, sci, tavole da surf e snow-board, archi e frecce, biciclette, canne da pesca, canoe, piscine, componenti per caravans e roulotte</p>

La diffusione delle conoscenze relative alle tecniche progettuali con i materiali compositi dovrà però essere accompagnata da un parallelo sviluppo delle relative tecnologie di fabbricazione e lavorazione che consentano di raggiungere i volumi produttivi richiesti dai vari settori industriali. Le tecniche manuali, benché ancora ampiamente utilizzate, non consentono infatti il raggiungimento di elevati livelli di produttività. Esistono poi delle tecnologie, parte già industrializzate e parte tuttora oggetto di studio ed affinamento, che si basano su processi automatici o semi-automatici. Le principali tecnologie comprese in questa categoria sono: avvolgimento elicoidale, formatura per stampaggio ad iniezione con resina in pressione, stampaggio di lastre preimpregnate (SMC), stampaggio di paste preimpregnate (BMC). La tecnologia dei materiali compositi è in continua evoluzione. Lo sviluppo di nuovi processi di fabbricazione, e la messa a punto di nuove matrici polimeriche, facilmente processabili e riciclabili, potranno ancor più ampliare i settori di utilizzazione di

questi materiali. Lo svantaggio maggiore è invece legato ai maggiori costi. I MC ibridi sono tipicamente ottenuti aggiungendo fiberglass o kevlar alla matrice di base fibra-epoxy. Le aggiunte sono fatte per ottenere specifiche caratteristiche quali la resistenza alla rottura o agli impatti. L'aggiunta di carbonio-epoxy alle strutture in fiberglass, ad esempio, incrementa la rigidità dell'insieme. Strutture di grafite-epoxy permettono un risparmio di peso del 20% rispetto all'alluminio. La scelta dei tipi di resine impiegate permette di variare le caratteristiche relative alle temperature d'esercizio, alla resistenza agli agenti chimici e all'aggressione degli agenti atmosferici, alle proprietà di conducibilità elettrica e alla resistenza al fuoco. Pressoché ogni oggetto prodotto con materiali tradizionali può essere prodotto anche usando materiali compositi. Mentre l'uso dei compositi è quasi una scelta obbligata per certi tipi di applicazioni, la selezione del materiale da impiegare è in genere funzione della durata utile richiesta al prodotto finito, del numero totale dei pezzi da produrre, della complessità della forma, del risparmio nei costi di assemblaggio, e, infine, dell'esperienza nell'uso dei compositi. In molti casi i risultati migliori si ottengono dall'uso combinato di materiali compositi e di materiali tradizionali.

Caratteristiche materiali compositi: principali

- Alta resistenza e basso peso;
- Resistenza alla corrosione;
- Durata.

I materiali compositi vantano un miglior rapporto peso-resistenza rispetto ad alluminio ed acciaio e possono essere ingegnerizzati per fornire un'ampia gamma di caratteristiche relativamente a resistenza all'impatto, tensione e flessione. La maggior leggerezza rispetto ai materiali tradizionali si traduce invece in un risparmio sui costi di stoccaggio, movimentazione, trasporto e installazione.

Caratteristiche materiali compositi: opzionali

- Ignifughi;
- Antistatici o ad alta conducibilità elettrica;
- Pigmentati o traslucidi;
- Resistenza all'abrasione.

La composizione di base di un materiale composito può essere modificata per esaltare performance e apparenza attraverso la combinazione di una o più delle caratteristiche di cui sopra.

Forma e disegno

- Flessibilità nel disegno;
- Stabilità dimensionale;
- Alta capacità di adattamento ad altri materiali.

Usando i compositi si possono creare un numero pressoché infinito di prodotti di ogni forma e dimensione usando un numero minore di parti da assemblare, tutto ciò genera risparmi nei processi di produzione.

1.2 Matrici

Come abbiamo già detto i materiali compositi sono costituiti da due parti: matrici e fibre. Analizziamo brevemente entrambe le parti.

Nonostante l' alto valore della resistenza e del modulo elastico, le fibre non avrebbero importanza pratica se non fosse possibile dare al pezzo da progettare una forma stabile. A questa funzione provvede la matrice che inglobando le fibre, assume nello stesso tempo il compito di dare forma al pezzo e proteggere le fibre stesse dall' ambiente esterno.

La matrice può essere di natura: plastica, metallica, o ceramica da cui il nome composti plastici, metallici o ceramici.

I primi sono i più diffusi nelle applicazioni pratiche. La matrice dei composti plastici può essere costituita da una resina termoindurente o termoplastica. Le resine termoindurenti presentano una struttura tale che innalzando la temperatura oltre un certo limite si degradano in maniera irreversibile; quelle termoplastiche invece all'aumentare della temperatura diventano più fluide, ma una volta raffreddate riacquistano tutte le proprietà e quindi possono essere rimodellate anche dopo il processo di polimerizzazione. Il compito della matrice è quello di trasferire alle fibre i carichi applicati: ciò viene fatto grazie alla deformazione a taglio della matrice attorno alle fibre. Le matrici sono reticolate tramite il processo di polimerizzazione mediante il quale la resina allo stadio fluido subisce una serie di trasformazioni passando per uno stato gelificato e gommoso sino a raggiungere lo stato vetroso.

Le matrici termoindurenti usate nel campo dei compositi si presentano, prima della messa in opera, sotto forma di liquido più o meno viscoso. In tali condizioni esse non hanno ancora subito reticolazione. Perché la reticolazione abbia inizio, si aggiungono al polimero degli opportuni agenti, che sono detti catalizzatori nel caso delle matrici poliestere, indurenti negli altri casi.

Il tempo per la reticolazione può essere opportunamente regolato mediante l'aggiunta di acceleranti o di inibitori, e tale tempo è fortemente influenzato dalla temperatura, diminuendo al crescere di essa. Fra le matrici di tipo termoindurente quelle più importanti nel campo dei compositi sono le poliestere, le epossidiche, le fenoliche e le siliconiche e in tabella II, sono riportate le diverse caratteristiche:

<i>Tipo di Matrice</i>	<i>Modulo di Young</i>	<i>Resistenza a trazione</i>	<i>Resistenza a compressione</i>	<i>Allungamento a rottura</i>	<i>Massa volumica</i>	<i>Coeff. di Dilatazione termica</i>
	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(N/mm ²)	%	(Kg/m ³)	(10 ⁻⁶ /°C)
<i>Poliestere</i>	3.800	70	150	1,8	1.220	60
<i>Epossidica</i>	4.900	70	200	2,9	1.200	70
<i>Fenolica</i>	7.500	45	200	0,6	1.390	
<i>Siliconica</i>	5.000	25	105	0,5	1.900	

Tab.II Proprietà tipiche delle matrici.

Esistono in commercio una gamma vastissima di resine epossidiche, le cui proprietà chimico-fisiche e meccaniche sono migliori di quelle delle matrici poliestere. In particolare, queste resine presentano un buon allungamento a rottura, fattore questo importantissimo per le proprietà meccaniche dei compositi.

Questo tipo di matrice, però, ha un costo superiore a quello delle resine poliestere, e anche la sua messa in opera è più laboriosa.

Per questo motivo le resine epossidiche si sono affermate soprattutto nei campi più avanzati come quelli aeronautico, aerospaziale e sportivo. Le resine fenoliche, invece, si sono affermate per la loro buona capacità di resistenza a temperature elevate (fino a 250°C).

Per questa loro caratteristica vengono usate nell'industria aerospaziale, in quella elettronica e in quella automobilistica.

Infine i polimeri siliconici, che danno vita a resine di questo tipo, sono simili a quelli a base di carbonio, ma in essi il silicio prende il posto del carbonio. Quelli siliconici sono dunque dei polimeri inorganici.

Questa differenza di struttura si risolve dal punto di vista meccanico in una notevole resistenza in campi di temperatura impensabili per i polimeri organici, sebbene questi ultimi mostrino a temperature ambiente delle proprietà più elevate.

Le resine siliconiche hanno reso possibile l'uso strutturale dei compositi per temperature fino a 450-500°C.

Si definiscono termoplastiche le resine a struttura molecolare lineare che durante lo stampaggio a caldo non subiscono modificazioni chimiche. Il calore

provoca la fusione e la solidificazione avviene durante il raffreddamento. E' possibile il ciclo per un numero limitato di volte poiché troppi riscaldamenti possono degradare le resine.

Di questo tipo di resine si è già detto che l'impiego in campo strutturale è molto limitato. Infine le matrici ceramiche sono caratterizzate da ottime proprietà meccaniche ad alte temperature, ma attualmente sono poco impiegate a causa della loro porosità e fragilità.

1.3 Fibre

Alle fibre viene affidato il compito di sostenere il carico ma non possono essere utilizzate direttamente a causa delle ridotte dimensioni trasversali, e pertanto vengono inglobate in una matrice dando così origine ad un composito fibroso.

Come accennato, grazie alle loro dimensioni limitate, le fibre presentano una perfezione strutturale fuori del comune; questa caratteristica, unita alle proprietà intrinseche dei materiali costitutivi, assicura ad esse:

1. resistenza meccanica elevata;
2. modulo elastico molto alto;
3. peso specifico molto basso;
4. comportamento elastico lineare fino alla rottura.

Le fibre più importanti per uso in compositi possono essere di vetro, carbonio, organiche e minerali. Esse si trovano nei compositi o sotto forma di fibre continue

disposte parallelamente in un piano, o sotto forma di fibre tagliate e disposte in un piano con orientazione casuale (MAT) o, infine, possono essere tessute secondo una configurazione trama-ordito e disposte in un piano. Le fibre di vetro rappresentano il tipo più comune di rinforzo per i compositi a matrice polimerica grazie al loro basso costo, alle elevate resistenze alla trazione, all' impatto ed all' attacco chimico. Esse presentano però alcuni svantaggi quali: ridotti valori di modulo elastico, bassa resistenza a fatica e una scarsa adesione alle matrici polimeriche; per arginare tale svantaggio è necessario l' impiego di "appretti" applicati sulla superficie delle fibre che però potrebbero favorire l' insorgere di tensioni indesiderate per l' assorbimento di umidità. Negli ultimi tempi si tende a sostituire il vetro con materiali dotati di maggiore rigidità quali il carbonio. Limitandoci al caso dei materiali compositi di maggiore uso per applicazioni strutturali, e pertanto ai materiali compositi a matrice polimerica rinforzati da fibre, è interessante comparare le proprietà meccaniche di alcune fibre (Tabella III).

	Densità (g/cm ³)	Modulo elastico (GPa)	Resistenza a trazione (Mpa)	Deformazione a rottura (%)	Coeff. espansione termica (10 ⁻⁶ /°C)
FIBRE					
Vetro tipo E	2.54	72.4	3450	4.80	5
carbonio Amoco T-300	1.76	231	3650	1.60	longitudinale - 0.6 radiale 7-12
carbonio Hercules AS- 4	1.80	248	4070	1.65	-
Carbonio Amoco P-100	2.15	758	2410	0.32	longitudinale - 1.45
aramidiche Kevlar 49	1.45	131	3620	2.8	longitudinale - 2 radiale 59
polietilene Spectra-1000	0.97	172	3000	2.7	-

Boro	2.7	393	3100	0.79	5
Allumina Fiber FP	3.95	379	1900	0.4	8.3

Tabella ///: proprietà di alcune fibre e matrici polimeriche e comunemente utilizzate nella realizzazione di materiali compositi

1.3.1 Fibre di vetro

Le fibre di vetro (figura 1.3.1) sono prodotte nella forma standard come vetro E, noto essenzialmente per applicazioni elettriche.

Una fibra più resistente è il vetro S: la sua resistenza a trazione è, infatti, circa il 33% più grande del vetro E.

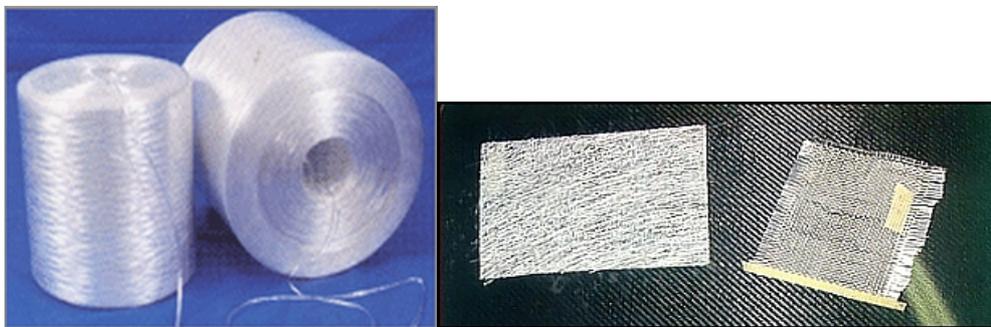


Fig. 1.3.1 Fibre di vetro

Questo tipo di vetro è largamente utilizzato per applicazioni aerospaziali, dove sono richiesti alti rapporti resistenza su peso e buone caratteristiche a temperature elevate, insieme con un alto limite di fatica: qualità, tutte presenti nel vetro di tipo S.

Un altro tipo di fibra di vetro è ottenuto con vetro ad alto contenuto di alcali: essa ha una buona resistenza chimica ma presenta proprietà elettriche modeste, vetro C.

Altri tipi di vetro sono il vetro D, con ottime caratteristiche elettriche, e quello L, che per il suo contenuto in piombo, realizza una buona protezione alle radiazioni e può essere usato come traccia per il controllo ai raggi x dell'allineamento delle fibre.

In Tabella IV è riportato, a seconda dell'impiego, il tipo di vetro più idoneo.

<i>Impiego</i>	<i>Tipo di vetro</i>
<i>Fibre multiscopo</i>	<i>E</i>
<i>Fibre resistenti agli acidi</i>	<i>A, C, CR</i>
<i>Fibre resistenti agli alcali</i>	<i>R, S</i>
<i>Fibre alta resistenza meccanica</i>	<i>R, S</i>
<i>Fibre alte caratteristiche dielettriche</i>	<i>D</i>

Tab. IV Tipo di vetro usato a seconda dello scopo.

Tutti i vetri hanno un rapporto resistenza su peso molto alto, sebbene le fibre di vetro siano fra le fibre inorganiche sintetiche a densità più alta. Il vetro mantiene le sue proprietà meccaniche, fino al 50% delle sue capacità di resistenza , ad una temperatura di 375°C, e fino al 25% a 538°C.

Sono riportati qui di seguito i vantaggi delle fibre di vetro, in particolare della fibra “E” rispetto ad altri materiali.

Essi sono:

- Rapporto tra alta resistenza alla trazione ed alta resistenza al peso: a parità di peso, la fibra di vetro è due volte più resistente di un filo d'acciaio.
- Stabilità dimensionale: il vetro non si accorcerà o non si allungherà in relazione alle variazioni atmosferiche. Le fibre di vetro mostrano un allungamento massimo del 3% a rottura.
- Alta resistenza al calore: le fibre di vetro si comportano bene in applicazioni dove devono essere tollerate alte temperature. Esse hanno ancora il 50% della resistenza a trazione, alla temperatura di 340°C.
- Basso assorbimento di umidità: il vetro è un materiale acellulare per cui l'umidità non può penetrare nella superficie dei filamenti.
- Notevoli proprietà elettriche: il vetro possiede una bassa costante dielettrica e delle buone capacità isolanti.
- Alta resistenza alla fiamma: il vetro non brucia oppure brucia senza dar luogo a fiamma.

Risultato di quanto sopra esposto, è un prodotto in cui sono combinate diverse proprietà fisiche, che non possono essere ottenute con fibre organiche. La resistenza delle fibre di vetro dipende dalle condizioni di formazione, come pure dal sistema di rivestimento impiegato per trattare la superficie della fibra di vetro.

La fase di copertura ha un significativo effetto sulla resistenza delle fibre di vetro e sulle loro proprietà di superficie.

L'effetto del trattamento chimico di superficie ha dimostrato di migliorare la resistenza delle fibre di vetro fino al 20%.

Il sistema di copertura (trattamento chimico) consiste in un rivestimento organico che viene applicato alle fibre di vetro immediatamente sotto al rivestimento isolante e prima che i filamenti siano tirati insieme a formare un unico capo. I rivestimenti, sono applicati allo scopo di proteggere le fibre di vetro durante il successivo processo di lavorazione e per ottenere un optimum di compatibilità con le resine da rinforzare. Gli ingredienti impiegati nella copertura delle fibre dipendono dalle specifiche applicazioni : essi sono brevettati e classificati in una o più categorie.

Gli agenti accoppianti, come il loro nome suggerisce, hanno la funzione principale di accoppiare le fibre di vetro alla matrice oppure ad altri ingredienti di copertura, i quali a loro volta interagiscono con la matrice. Quando tra le fibre di vetro e la matrice si è formato un legame chimico , i compositi in vetro rinforzati divengono un materiale molto resistente impiegabile in campo ingegneristico, come conseguenza di un efficiente trasferimento di sollecitazioni da una matrice relativamente debole a fibre di vetro molto resistenti.

Per facilitare il processo di lavorazione e di composizione sono necessari i lubrificanti: le fibre di vetro essendo materiale fragile sono facilmente abrase quando vengono a contatto con altri materiali, compreso lo stesso vetro. Durante il processo di lavorazione si determina una rottura dei filamenti, che dà luogo a lanugine di vetro

che si disperde nell'aria. Un'adeguata selezione dei lubrificanti può ridurre tale fenomeno.

Il processo di fabbricazione delle fibre di vetro ha inizio con il pesare con cura i componenti del vetro per poi miscelarli in una massa omogenea di composizione predefinita.

Il tutto viene posto in un forno ed esposto a temperatura sufficiente (1400°C circa) a convertire i carbonati e la sabbia in ossidi liquidi, i quali devono possedere una sufficiente viscosità e flusso per produrre un'adeguata omogeneità. Il vetro fuso viene poi raffreddato a temperature più basse (1100°C) in modo da renderlo idoneo alle successive fasi lavorative: per produrre vetri con minimi difetti e di alta qualità, sono indispensabili condizioni operative ottimali e forni correttamente progettati. La massa fusa di vetro d'alta qualità è poi tirata attraverso dei fori praticati in una piastra di platino, e ridotta a fibre di diametro voluto. La piastra riscaldata elettricamente, è dotata d'ugelli che variano in genere da 200 a 4000. Immediatamente al di sotto della piastra viene applicato ai filamenti una copertura o rivestimento organico. I filamenti possono essere raccolti in vario numero in fasci mediante un pettine o un ceppo di raccolta. Ad esempio quando viene impiegata una piastra con 400 ugelli ed un ceppo di raccolta con fessure a due vie si produrranno due fasci di 200 filamenti ciascuna, che verranno poi avvolti su un pettine.

Il risultato finale sarà la formazione di una matassa.

Per evitare che i fasci non giacciono paralleli gli uni agli altri e possano essere dipanati senza difficoltà, viene utilizzata una linea trasversale o spirale onde imprime

un movimento a zig zag dei capi appena essi si avvicinano alla superficie dell'argano. I pacchi che vengono realizzati sono posti nel forno per rimuovere l'acqua e assicurare la copertura della superficie del vetro.

Successivamente essi vengono messi in una rastrelliera e riuniti in fasci a formare gomitoli.

1.3.2 Fibre di carbonio

Per lungo tempo le fibre più usate in applicazioni di compositi strutturali sono state quelle di vetro. Sebbene abbiano buone caratteristiche di resistenza e bassa densità, presentano un modulo di elasticità relativamente basso. Per questo motivo, circa 25 anni fa, si iniziò a sperimentare e convertire compositi organici in fibre e tessuti di carbonio e grafite.

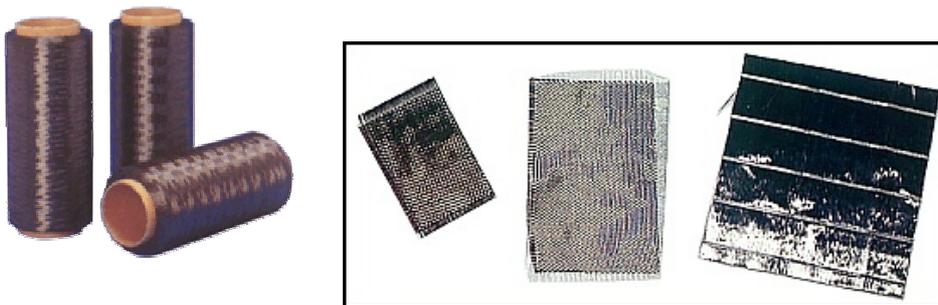


fig. 1.3.2 Fibre di carbonio

Le elevate proprietà meccaniche delle fibre di carbonio derivano dalla particolare struttura cristallina della grafite. Quanto più la struttura cristallina è elevata, tanto più il materiale possiede caratteristiche notevoli. Un cristallo di grafite ha una struttura composta da strati sovrapposti di piani costituiti da atomi di carbonio.

I legami fra gli stessi atomi dello stesso piano sono forti (legami covalenti) mentre quelli fra atomi di piani differenti sono relativamente deboli (legami Van der Waals): è evidente come i cristalli siano strutture fortemente anisotrope e sarà compito del processo di fabbricazione disporre la struttura cristallina nella direzione voluta. Naturalmente ciò non è facile: praticamente non si riesce mai ad ottenere cristalli perfetti e precisione nell'orientamento, per cui le caratteristiche meccaniche risultanti saranno più basse di quelle teoriche. Le fibre di carbonio sono ottenute grafitizzando in atmosfera inerte, a oltre 2000°C, delle fibre organiche tessili di rayon o poliacrilonitrile (PAN). Le fibre di partenza prendono il nome di precursori. Durante il processo di grafitizzazione le fibre sono sottoposte a trazione, quanto maggiore è lo sforzo di trazione esercitato, tanto più alto risulta il modulo di Young del prodotto.

D'altra parte l'aumento del modulo viene bilanciato da una diminuzione di resistenza.

Esistono così in commercio sia fibre di carbonio ad alto modulo, penalizzate nella resistenza, sia a basso modulo e alta resistenza.

I due tipi sono detti rispettivamente C1 e C3 o , con terminologia anglosassone, HM («High Modulus», cioè alto modulo) e HS («High strength», cioè alta resistenza a trazione).

Rispetto alle fibre di vetro, quelle di carbonio presentano tre vantaggi sostanziali:

1. un modulo elastico molto alto;

2. una massa volumica bassa;
3. un coefficiente di dilatazione termica molto basso.

Esse perciò stanno soppiantando le fibre di vetro in tutti quei campi in cui sono richieste, oltre a un basso peso, un'alta rigidità (strutture aeronautiche, attrezzi sportivi ecc.) o una notevole stabilità dimensionale al variare della temperatura (dispositivi ottici, radar ecc.). L'ostacolo alla diffusione generalizzata delle fibre di carbonio è costituito però dal loro costo, ancora relativamente elevato. Il loro colore, nero brillante, le rende inconfondibili.

La capacità produttiva delle fibre di carbonio è stimabile in circa 12.000 tonnellate annue. Nonostante ci siano stati momenti di crisi, l'andamento dei consumi è decisamente positivo, ciò si può vedere anche dall'andamento del diagramma riportato in Figura 1.3.3

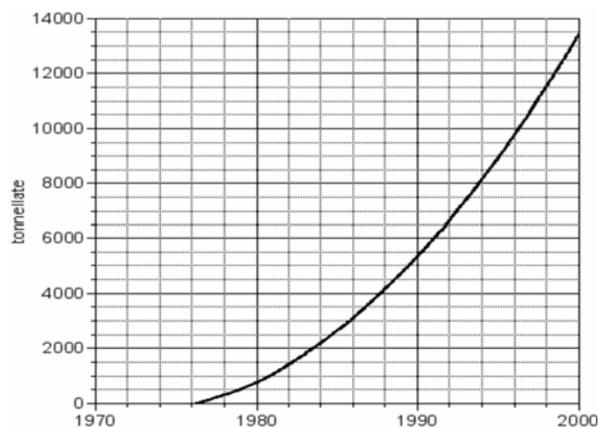


fig. 1.3.3 produzione di fibre di carbonio nel tempo

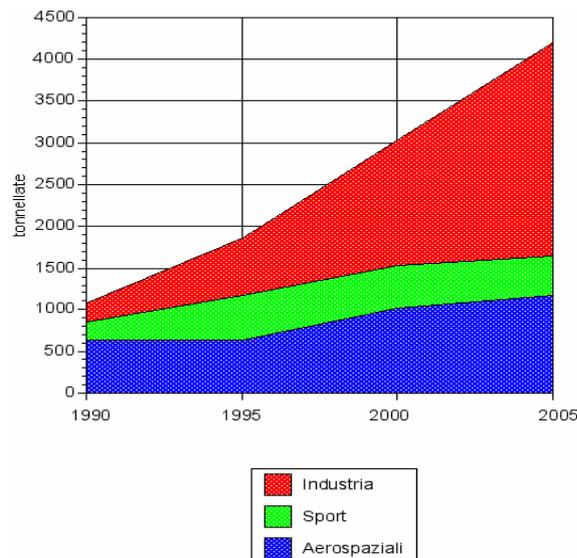


fig. 1.3.4 Suddivisione dei consumi di fibre di carbonio tra i settori: industria, sport ed aeronautica.

Fibre di carbonio, aramidiche (tra le quali il Kevlar) o vetro possiedono modulo elastico (rigidità) o resistenza molto più elevati di quello delle matrici polimeriche che andranno a rinforzare.

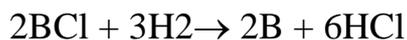
L'aggiunta del 50% in volume di fibre continue di carbonio in una matrice di resina epossidica produrrà una struttura che, sollecitata a trazione nella direzione secondo la quale sono disposte le fibre, presenta una rigidità anche di 2 volte superiore a quella di una struttura in acciaio delle stesse dimensioni (il modulo elastico del composito può raggiungere i 400 GPa, il doppio di quello dell'acciaio che è uguale a 200 GPa), con una resistenza a rottura 4-5 volte più alta. Inoltre, la struttura realizzata con il composito di fibre di carbonio e resina epossidica peserà circa 4 volte di meno, con chiari vantaggi per tutte quelle applicazioni nelle quali il comportamento, l'economicità, o la possibilità stessa di realizzazione di un manufatto dipendono dal suo peso (si pensi ai diversi veicoli del settore trasporti).

1.3.3 Fibre di boro

Nella fabbricazione delle fibre di boro un filamento di tungsteno, del diametro di circa 0,01mm, viene riscaldato alla temperatura di 1100°C.

In queste condizioni, esso è introdotto in un ambiente in cui è contenuta una miscela di tricloruro di boro (BCl₃) e idrogeno.

A contatto con la superficie calda del filamento, la miscela dà luogo alla reazione:



e il boro così formato si deposita sul filamento.

La fibra di boro ottenuta contiene quindi in realtà anche il filamento di tungsteno. Le fibre di boro presentano modulo e resistenza assolutamente eccezionali, di gran lunga superiori a quelle dell'acciaio e delle altre fibre normalmente usate.

Purtroppo il metodo di fabbricazione pone dei problemi di costo, per cui questo tipo di fibra presenta anche un costo elevatissimo.

Inoltre il diametro di queste fibre è circa 10 volte superiore a quello delle altre, e impedisce che esse assumano dei valori di curvatura elevati senza rompersi.

1.4 Tecnologie di fabbricazione

Le tecnologie di fabbricazione di elementi in composito con matrice plastica variano secondo la forma, dimensione e proprietà richieste al pezzo finito. La

fabbricazione di elementi in composito viene sempre effettuata per deposizione, essendo le lavorazioni per asportazione di materiale impiegate solo per operazioni successive.

Le operazioni fondamentali comuni a tutte le tecnologie sono:

- a) realizzazione dello stampo;
- b) applicazione di un distaccante;
- c) impregnazione del rinforzo;
- d) deposizione della resina;
- e) stampaggio;
- f) estrazione.

Le operazioni elencate possono essere effettuate in diversi modi, secondo le diverse tecniche e con l'impiego di diversi materiali e macchinari.

Le tecnologie possono essere distinte in tecnologie in cui si impiegano stampi chiusi o stampi aperti; ancora, le tecnologie possono essere distinte in continue o discontinue e manuali e automatizzate.

Con il termine stampo aperto si indica uno stampo che consente l'ottenimento di una sola superficie a finitura controllata dei particolari. I processi a stampo aperto si prestano comunemente alla fabbricazione di parti molto voluminose: in questi casi sarebbe praticamente impossibile disporre di stampi chiusi per la loro difficile movimentazione legata al peso eccessivo. Nella gran parte delle applicazioni invece di utilizzare, come materiale di partenza, resine e fibre separatamente, si preferisce lavorare con i preimpregnati (prepregs). Usando delle fibre secche, l'impregnazione

viene eseguita tramite un pennello, al momento dell'esecuzione del particolare, contemporaneamente all'adattamento degli strati alla superficie dello stampo. Le inevitabili bolle d'aria tra gli strati vengono eliminate eseguendo una rullatura ed eventualmente, qualora siano richiesti migliori risultati, ricorrendo ad un sacco a vuoto.

Questa serie di operazioni presenta però degli inconvenienti: in primo luogo, impregnando le fibre a mano si utilizza un quantitativo di resina superiore a quello strettamente necessario, ed è assai difficoltoso, anche ricorrendo alla formatura sottovuoto, eliminare la parte superflua, per cui il composito sarà di qualità più scadente perché strati di fibra molto mobili accrescono le difficoltà di esecuzione di un buon sacco a vuoto.

Questi problemi vengono risolti ricorrendo proprio alle fibre preimpregnate. Queste, infatti, grazie alla calibratura e alla parziale essiccazione, presentano un rapporto fibra-resina ottimale (normalmente 60-65 % fibra e 35-40 % resina) ed una compattezza tale da facilitare molto l'esecuzione del sacco a vuoto, che qui risulta indispensabile per garantire una buona coesione tra i vari strati.

I distaccanti sono dei materiali che vengono impiegati per consentire l'estrazione dei particolari dagli stampi.

Essi possono essere di vario tipo:

- a) cere;
- b) resine;
- c) fogli di materiale plastico;

d) PTFE (teflon).

Le cere vengono impiegate nei processi durante i quali le temperature raggiunte non superano i 50-60 °C: esse vengono normalmente deposte sullo stampo con metodi manuali e vanno deposte nuovamente ad ogni stampata. Il vantaggio principale di questo tipo di distaccanti è che consentono, se correttamente applicati, un numero molto elevato di stampate per cui vengono anche classificati come distaccanti permanenti o semi-permanenti.

Quando la geometria dei particolari da realizzare lo consente è possibile impiegare come distaccanti fogli di materiale plastico che vengono poi strappati dalla superficie dei particolari.

I distaccanti in fogli hanno il vantaggio di poter essere facilmente deposti e di non alterare gli strati più esterni della resina dei particolari realizzati. Il PTFE è un ottimo agente distaccante adatto anche per alte temperature (anche oltre 200 °C) e può essere deposto sia a spruzzo che in fogli.

1.5 Processi produttivi materiali compositi

I processi produttivi dei materiali compositi sono svariati. I più diffusi sono nove:

1. stesura manuale;
2. resin transfer molding (RTM);
3. filament winding;

4. pultrusione;
5. vacuum infusion;
6. bulk casting;
7. centrifugal casting;
8. continuous molding;
9. continuous profile.

1.5.1 Deposizione manuale senza applicazione di pressione o vuoto

E' un processo tuttora largamente diffuso per lavori su superfici ampie quali piscine e scafi di imbarcazioni per i quali la produzione si svolge tipicamente per piccoli lotti. Dopo aver applicato il distaccante, generalmente una cera, viene applicato il "gel-coat" che consiste in una miscela di resina e altri componenti destinata a dare la colorazione voluta e la finitura al manufatto. Rinforzi in forma di mat, tessuto o stuoia, in percentuale come da progetto sono stesi all'interno dello stampo , successivamente le fibre vengono imbevute di resina catalizzata e poi consolidate manualmente usando rulli di metallo o di plastica allo scopo di eliminare la resina in eccesso. La polimerizzazione avviene generalmente a temperatura ambiente. L'estrazione dallo stampo può essere manuale, con l'impiego d'aria compressa oppure d'attrezzature di sollevamento adatte alle specifiche esigenze del particolare realizzato. In Figura 1.5.1 viene riportato uno schema di deposizione manuale. Gli stampi vengono realizzati tipicamente in vetro-resina.

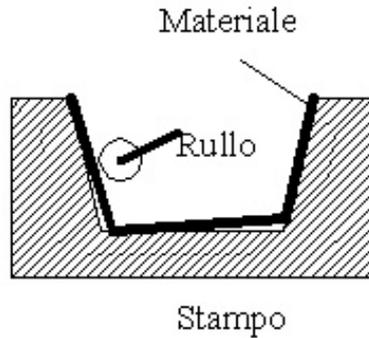


Fig. 1.5.1 Deposizione manuale

I valori tipici di V_f ottenibili con tale tecnologia sono 25-30%.

In alcuni casi per migliorare la qualità del laminato stampato l'impregnazione dei tessuti viene effettuata fuori dallo stampo in modo da utilizzare la corretta quantità di resina per ogni lamina.

In questo caso è possibile raggiungere valori di V_f anche di 35-38%.

1.5.2 Formatura per iniezione di resina (RTM resin transfer molding)

In questi anni, tra le diverse tecnologie per la produzione di elementi in composito che hanno riscosso maggiore interesse, vi è il Resin Transfer Molding (RTM), tale tecnologia viene adottata, tutt'oggi, per elementi di largo utilizzo quali ad esempio i prodotti per l'industria automobilistica (paraurti, pianali, ecc.), poiché consente di realizzare laminati con elevate percentuali volumetriche di fibre ed ottima finitura superficiale.

Con il termine RTM "resin transfer moulding" si intende una tecnologia mediante la quale si fabbricano compositi a matrice polimerica, iniettando la resina

catalizzata in una cavità avente la forma del pezzo da realizzare ed in cui è stato preliminarmente collocato il rinforzo asciutto. La cavità è ottenuta chiudendo stampo e controstampo, l'uno contro l'altro. Questi possono essere di vario tipo; più comunemente si usano stampi in vetroresina o stampi in metallo.

Le fasi di fabbricazione RTM si possono riassumere come segue:

- pulitura dello stampo;
- applicazione del distaccante;
- applicazione del gel-coat;
- posizionamento del rinforzo;
- chiusura e bloccaggio dello stampo;
- iniezione e polimerizzazione della resina;
- apertura dello stampo ed estrazione del pezzo;
- operazioni di rifinitura.

Le prime due fasi sono relative a tutti i tipi di tecnologie e quindi è superfluo discorrerne.

Per ciò che riguarda le altre fasi accenniamo brevemente in cosa consistono: deposto il rinforzo secondo le direzioni e la sequenza desiderata le parti dello stampo e del controstampo vengono accostate e bloccate fra loro: viene poi iniettata la resina.

Tale operazione viene normalmente eseguita a freddo, ma è possibile riscaldare lo stampo per accelerare il processo.

La pressione, essendo esercitata mediante la resina ancora liquida, si distribuisce uniformemente su tutto il laminato in fabbricazione consentendo così

spessori uniformi e ottima qualità del manufatto. In genere le pressioni usate per l'iniezione variano tra 0,5 e 4 bar ed i tempi di iniezione tra i 20 secondi e i 2 minuti.

La tecnologia di formatura per iniezione di resina è molto interessante per la possibilità di automazione che offre e quindi per la produzione di componenti anche in grande serie. Inoltre è possibile stampare elementi anche di notevoli dimensioni.

Il prodotto ottenuto è rifinito e per tanto mostrerà buone caratteristiche geometriche.

Il resin transfer molding è un processo produttivo adatto a lotti medi che produce articoli finali con superfici finite su entrambi i lati.

Tutti i suddetti fattori decretano una evoluzione delle tecnologie di tipo transfer ed infusion per il raggiungimento di un elevato rapporto qualità/costo dei manufatti in composito. Stampi più duraturi e tecniche di iniezione della resina controllate da software specializzati hanno ampliato il campo di applicazione tipici dei processi produttivi del tipo RTM.

Le resine

Resine Veloci Termoindurenti (82°C) con tempi ridotti di catalisi, Poliesteri modificate o in base acetilica (MODAR). Le resine in versione Low Profile contengono nella miscela una percentuale significativa di termoplastico, che emergendo in superficie garantisce la finitura di Classe A senza dover utilizzare Gel-coat.

La Qualità

Un controllo qualità in tutte le fasi del processo è assicurato anche da un

sistema di monitoraggio con allarmi e bloccaggi automatici, che assicura costante produzione e alti livelli di qualità.

1.5.3 Filament winding

Il filament winding è la tecnica produttiva preferita per la produzione di articoli di forma cilindrica come tubature, canaline e serbatoi.

La tecnica del filament winding, illustrata schematicamente in figura 1.5.2, consente la realizzazione di manufatti attraverso l'avvolgimento in continuo di filamenti impregnati di resina catalizzata, intorno ad un mandrino rotante secondo uno schema deciso in ragione delle caratteristiche desiderate nel prodotto finale, in una singola operazione.

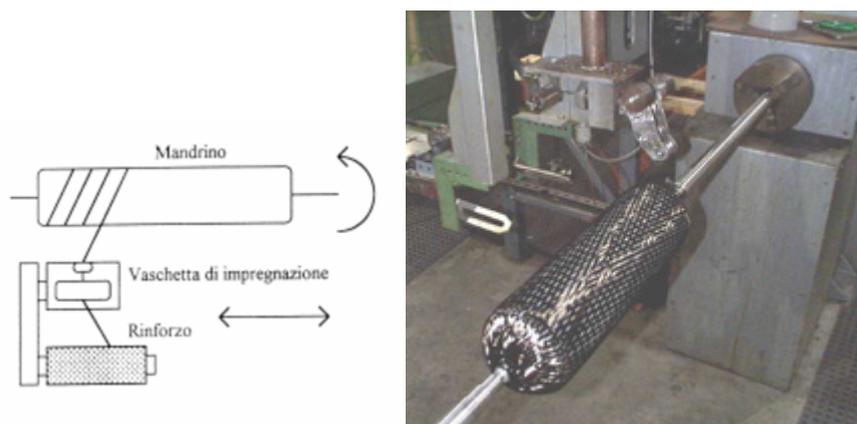


Fig. 1.5.2 Avvolgimento di fili

Si tratta dunque di prodotti aventi superficie laterale assimilabile ad una superficie di rivoluzione come elementi cilindrici.

A seconda delle modalità di avvolgimento, è possibile distinguere :
avvolgimento circonferenziale e quello elicoidale.

Le diverse orientazioni delle fibre si ottengono variando il rapporto tra la velocità di avanzamento del dispositivo che guida i fili al mandrino e la velocità di rotazione di quest'ultimo. In generale, quando si impregna il solo avvolgimento elicoidale , il roving può essere avvolto con angolazioni comprese tra i 25° e gli 85° rispetto all'asse di rotazione.

La possibilità di realizzare angoli così piccoli fa sì che tale tecnologia sia adatta anche alla realizzazione di recipienti con fondo e di serbatoi in pressione.

1.5.4 Formatura in continuo

La formatura in continuo di manufatti in composito è la più altamente automatizzata e viene impiegata per la produzione di lastre e profilati dalle geometrie più varie.

Il processo, detto di pultrusione, è schematizzato in figura 1.5.3:

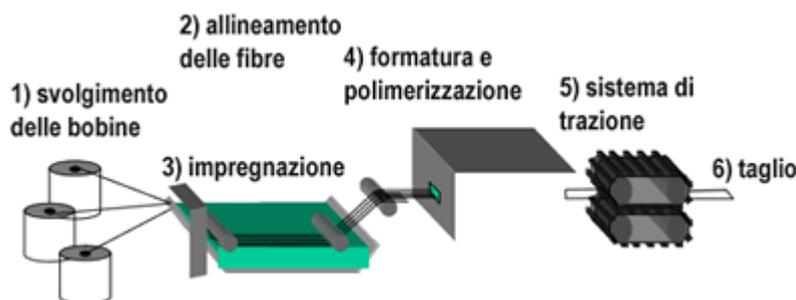


fig. 1.5.3 Formatura in continuo

La pultrusione dei materiali compositi è il processo produttivo normalmente impiegato nella produzione di canne, di articoli a sezione cava e di profilati vari.

Le bobine di roving, nastri o tessuti, vengono impregnati in una vaschetta dove

appositi cilindri assicurano la massima uniformità possibile nella distribuzione della resina sul rinforzo.

Il sistema rinforzo più resina viene costretto, mediante trazione a passare in uno stampo dove assume la sua forma finale.

La polimerizzazione può avvenire in forno, quindi a stampo riscaldato, oppure mediante energia apportata in radiofrequenza. Quest'ultimo sistema permette di ottenere una polimerizzazione della matrice molto uniforme e quindi elevata costanza delle caratteristiche del prodotto finale.

I vantaggi di questo tipo di tecnologie sono: produzione in continuo, elevato grado di flessibilità sia nella marcia della macchina che nella scelta dei profili, possibilità di ottenere in una direzione preferenziale, elevata resistenza, possibilità di adottare il processo anche a sezioni trasversali piccole sia piene che cave.

Le limitazioni si riferiscono essenzialmente all'impossibilità di ottenere forme che non abbiano sezioni trasversali a profilo estrudibile.

1.5.5 Vacuum infusion

La vacuum infusion dei materiali compositi è un processo produttivo sempre più usato per ridurre le emissioni di vapori di stirene, per migliorare le qualità del prodotto e per ridurre i costi di manodopera. Nel processo ad infusione sotto vuoto, il rinforzo viene racchiuso in un contenitore di plastica a tenuta ermetica in cui viene poi ottenuto il vuoto pneumatico, il quale, a sua volta, provoca l'ingresso della resina catalizzata che si va a depositare sul rinforzo. Le tecnologie più avanzate applicate a

questo processo produttivo consistono in tecniche di canalizzazione della resina più sofisticate e nell'impiego di resine gelatinose ad indurimento ritardato. Il risultato finale è la possibilità di poter creare anche prodotti finiti dalla forma complessa e/o di grosse dimensioni.

1.5.6 Bulk Casting

Il bulk casting dei materiali compositi è un processo adoperato soprattutto per la produzione di articoli decorativi dall'aspetto gradevole e di qualità, come pianali per cucine, piani d'appoggio per tavoli, mensole, box doccia, etc. Additivi minerali vengono miscelati con resina liquida catalizzata fino a formare una mistura densa che viene poi introdotta nello stampo. Si ottengono così prodotti finiti che simulano molto realisticamente materiali quali marmo, granito, onice e altre pietre da costruzione.

1.5.7 Centrifugal casting

Il centrifugal casting nei materiali compositi è un Processo adatto alla produzione di alti volumi di tubature e condutture cilindriche. Una miscela di resina e di rinforzo viene progressivamente introdotta in uno stampo cilindrico che viene poi fatto ruotare ad alta velocità forzando così la miscela contro le pareti dello stampo. Il risultato è un prodotto finito cavo le cui pareti presentano caratteristiche di alta resistenza e densità. Durante l'operazione di centrifuga la miscela viene riscaldata per velocizzare l'indurimento, e, in generale, per migliorare la resa del processo.

1.5.8 Continuous molding

Il continuous molding dei materiali compositi è un processo produttivo tipico dell'industria automobilistica e si svolge usando stampi riscaldati in acciaio. Di conseguenza si tratta di una tecnica produttiva costosa e riservata a cicli con lotti di produzione ad alto volume.

1.5.9 Continuous profile

Il continuous profile nei materiali compositi è un processo produttivo tipicamente impiegato nella produzione di prodotti finiti in fogli quali quelli adoperati nell'edilizia. Un foglio di fibra di vetro inserito "a sandwich" tra due pellicole di rilascio ed appoggiato su un nastro trasportatore, viene impregnato di resina catalizzata. Il tutto è poi fatto passare in un forno di curvatura assieme ai profilati necessari per ottenere il prodotto finito. Una volta uscito dal forno il foglio indurito così ottenuto viene tagliato a misura.

1.6 La tecnologia Wrapping

Consente la realizzazione di elementi tubolari cilindrici e conici a sezione circolare ellittica attraverso l'avvolgimento, su di un mandrino metallico, di tessuti di fibra in carbonio, vetro o ibridi, con direzioni delle fibre pre-determinate. La compattazione mediante un film termoretraibile e la polimerizzazione in autoclave permettono l'eliminazione dei vuoti e consentono di ottimizzare le performances del

composito stesso.

Campi applicativi

- Sport e tempo libero;
- Automazione;
- Robotica;
- Meccano-tessile.

Caratteristiche dimensionali

Diametro max 350mm – min 14mm

Lunghezza max 3500mm

Spessore min 0.5mm

Tolleranze dimensionali

Diametro esterno (da stampo): +/- 0.25mm

Diametro esterno (rettificato): +/- 0.02 mm per $D < 100\text{mm}$, +/- 0.1 mm per $D > 100\text{mm}$

Concentricità: +/- 0.2mm

Vantaggi dei tubi o cilindri in composito

- Bassissima inerzia meccanica;
- Elevata rigidità;
- Grande resistenza;
- Facilità di assemblaggio e movimentazione;
- Riduzione della potenza applicata per il loro utilizzo.

1.6.1 Formatura con stampo e controstampo

Questo metodo di fabbricazione, come tutti quelli in stampo chiuso, permette di ottenere manufatti con entrambe le superfici a finitura controllata. Il rinforzo viene depositato insieme con la resina catalizzata sullo stampo: l'accostamento ed il serraggio dello stampo e del contro-stampo fa sì che si esercitino pressioni anche molto elevate come mostrato in figura 1.5.4. Per contro la distribuzione delle pressioni non è uniforme su tutto il laminato perché le componenti della forza di chiusura su direzioni diverse sono per forza di cose diverse e non è possibile stampare forme complesse.

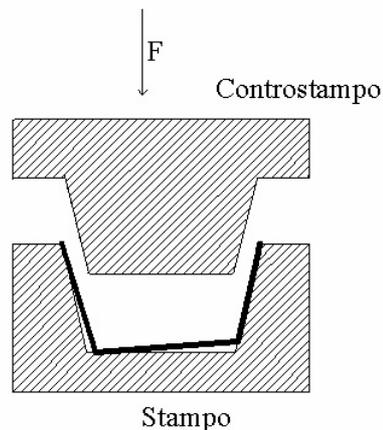


Fig.1.5.4 Formatura con stampo e controstampo

1.6.2 Tecnologia del sacco in pressione

Negli ultimi anni, grazie allo sviluppo di moderne tecniche di progettazione ed ai recenti progressi nel campo dei materiali di partenza, la tecnologia del sacco in pressione o con dizione anglosassone del "pressure bag" sta acquisendo sempre

maggior diffusione, da un lato rimpiazzando altre tecnologie, dall'altro introducendo nuove possibilità di impiego dei compositi nelle industrie automobilistica, aerospaziale, navale e sportiva.

Questa tecnica, per il semplice caso di un cilindro, prevede un solo stampo negativo: sul mandrino viene montato un sacco estensibile e quindi gli strati di rinforzo.

Le dimensioni del mandrino sono tali da consentire l'inserimento del tutto nello stampo. In figura 1.5.5 è riportato lo schema di tale tecnologia:

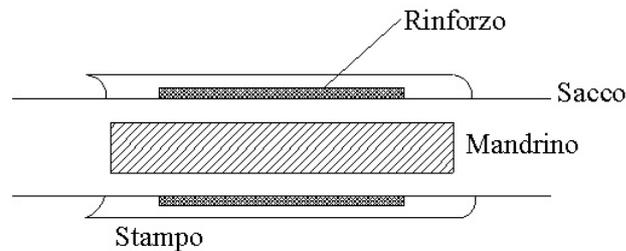


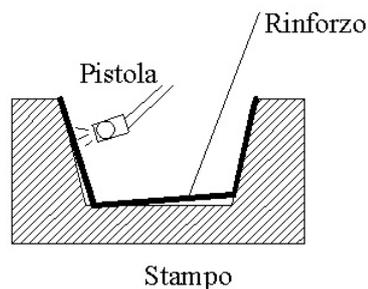
fig. 1.5.5 Formatura con sacco in pressione

Per ottenere la compattazione del laminato viene data pressione tramite il sacco che, espandendosi, costringe il rinforzo a prendere la forma dello stampo.

La tecnologia del sacco in pressione, adatta per piccole e medie serie, è molto interessante perché consente di ottenere laminati di buona qualità con costi di impianto limitatissimi: inoltre è possibile assicurare una uniforme distribuzione della pressione su tutto il manufatto in realizzazione, cosa che non è possibile ottenere quando si stampano forme cave non semplici con la tecnologia dello stampo e controstampo.

1.6.3 Deposizione per taglio e spruzzo

In questo caso il rinforzo viene deposto in forma di fibre corte mediante un sistema a lama rotante, detto pistola, che taglia le fibre provenienti dalle bobine e le proietta verso lo stampo insieme con una certa quantità di resina catalizzata come indicato in figura 1.5.6: Fig.



1.5.6 Deposizione per taglio e spruzzo

L'operazione di spruzzo è seguita da una rullatura manuale dello strato ottenuto. Tale tecnologia presenta il vantaggio di essere facilmente automatizzabile e quindi di contenere i costi, d'altra parte però, non è possibile realizzare laminati con il rinforzo orientato per cui la sua applicazione è limitata alla realizzazione di laminati isotropi.

1.6.4 Formatura in autoclave

La tecnologia del sacco a vuoto in autoclave, figura 1.5.7, è sostanzialmente un'evoluzione della semplice formatura con sacco a vuoto essendo nata dalla necessità di ottenere laminati con caratteristiche meccaniche migliori.

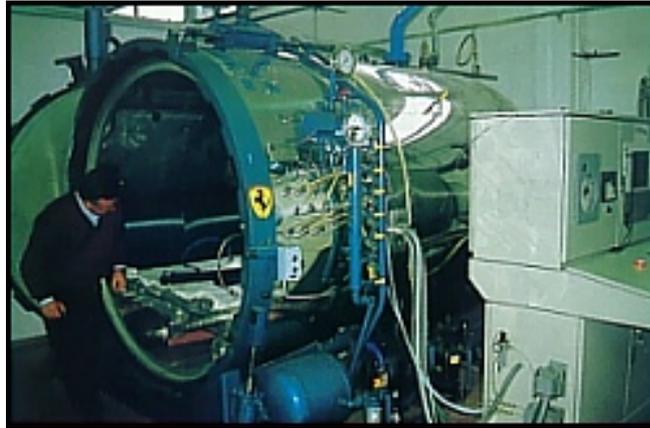


Fig.1.5.7 Macchina per autoclave

Con l'impiego dell'autoclave è possibile intensificare l'azione di compattazione aumentando la pressione durante il ciclo di cura fino a circa 7-10 atm. e la temperatura fino a 2000 °C.

Le autoclavi più recenti offrono inoltre la possibilità di variare la pressione e la temperatura durante il ciclo di polimerizzazione secondo le leggi più opportune per il particolare tipo di resina impiegato. Una pressione maggiore garantisce l'assenza di vuoti tra gli strati ed una percentuale che può raggiungere il 65% che è il limite superiore nella fabbricazione di compositi. Questo tipo di fabbricazione viene adottato quando si devono realizzare particolari dalle caratteristiche meccaniche molto spinte come richiesto ad esempio per impiego aeronautico, spaziale e medicale.

Il processo in autoclave rappresenta, dunque, una delle tecnologie più avanzate nella produzione di componenti in composito.

1.6.5 Cenni sulla teoria dei sandwich

L'utilizzo dei materiali compositi è molto spesso accompagnato dall'utilizzo di una struttura sandwich.

Tra le piastre realizzate in fibra di vetro o carbonio, è possibile interporre diversi tipi di materiale caratterizzati da una buona resistenza a taglio ed un basso peso specifico.

In questa maniera si ottiene un miglioramento delle caratteristiche mantenendo allo stesso tempo un peso contenuto.

I materiali utilizzati possono essere di diverso tipo come un pvc espanso o strutture di tipo esagonale formate in alluminio.

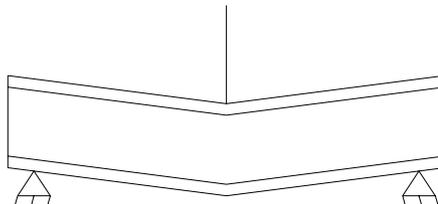


Fig. 1.5.8 Deflessione di un sandwich

Quando un sandwich è sottoposto ad un sistema di carichi la componente della freccia dovuta al momento flettente dipende, attraverso la rigidità flessionale, dai seguenti parametri propri del sandwich:

- Modulo elastico delle facce;
- Spessore delle facce;
- Spessore dell'anima;

Volendo limitare tale componente è possibile:

- Adottare un materiale ad alto modulo elastico per le facce;
- Adattare facce di spessore elevato;
- Adottare un'anima di spessore elevato.

Quando un sandwich è assoggettato a un momento flettente M questo provoca una sollecitazione di trazione praticamente uniforme, in una faccia del sandwich ed una compressione nella faccia opposta.

Se le sollecitazioni superano le corrispondenti resistenze a rottura dei materiali costituenti le facce, queste ultime cedono bruscamente.

Nei calcoli di progetto, la verifica di resistenza delle facce si esegue confrontando le sollecitazioni dovute ai carichi esterni con quelle ammissibili per il materiali costituenti le facce.

La sollecitazione ammissibile si ricava dividendo la resistenza per un opportuno coefficiente di sicurezza, che tenga conto della variabilità delle proprietà dei materiali, delle approssimazioni adottate nella schematizzazione della struttura, dei carichi accidentali, di fenomeni di fatica, ecc..

Quando le sollecitazioni calcolate superano quelle ammissibili, occorre modificare il dimensionamento del sandwich.

In tal caso si può:

- Prevedere per le facce un materiale che presenti sollecitazioni ammissibili più elevate;
- Aumentare lo spessore delle facce, riducendo di conseguenza le sollecitazioni applicate;
- Aumentare lo spessore dell'anima, anche questo metodo provoca una riduzione delle sollecitazioni nelle facce.

L'incremento dello spessore dell'anima è spesso il modo più conveniente per risolvere il problema.

La scelta di un anima di densità più elevata non comporta invece nessuna conseguenza sulle sollecitazioni nelle facce.

Capitolo 2

Resin Infusion Under Flexible Tooling (RIFT)

2.1 Introduzione

I limiti legislativi sull'emissione di stirene causato dall'utilizzo della resina poliestere, nelle lavorazioni per la tutela della salute degli operai, hanno indotto lo sviluppo di nuove tecnologie di fabbricazione di compositi plastici rinforzati.

La tecnologia RTM ha consentito lavorazioni anche con elevata frazione volumetrica di fibre realizzando compositi nel rispetto delle tolleranze dimensionali del laminato.

Per strutture di ampie dimensioni i costi di lavorazione con tale tecnologia diventano molto elevati dovendo utilizzare stampi rigidi rinforzati per resistere alla pressione di iniezione della resina.

La lavorazione RIFT (Resin Infusion Under Flexible Tooling), variante del RTM, utilizzando il sacco polimerico flessibile al posto di una delle facce dello stampo rigido, è più economica e operando il vuoto all'interno, la resina viene spinta all'interno del rinforzo asciutto così da ridurre il contatto dell'operatore con la resina allo stato liquido e con tutti i suoi componenti volatili emessi durante la messa in opera.

Per bassi volumi di produzione si ricorre a resine alternative, epossidica o poliestere con basso contenuto di stirene. A breve termine questa può rappresentare una soluzione effettiva, ma nel lungo periodo il processo deve essere ridisegnato per

acquisire i vantaggi dei sistemi economicamente più convenienti e per ridurre i rischi di incolumità.

I criteri utilizzati nella scelta di una tecnologia produttiva sono vincolate da costi, qualità, sicurezza degli operatori, esigenze progettuali. Il RIFT, come già detto, è sostanzialmente differente dalla tecnologia RTM per l'utilizzo di un film polimerico flessibile, invece di uno stampo rigido e per la presenza del distributore.

Sia per l'RTM che per il RIFT, un parametro fondamentale è rappresentato dalla permeabilità del rinforzo e cioè dalla capacità delle fibre di lasciarsi impregnare dalla resina. Per accelerare tale processo, si utilizzano vari sistemi di distribuzione per il RIFT e ad oggi è ancora molto fervente l'attività di ricerca al riguardo; lo dimostra il fatto che, negli ultimi anni, sono stati registrati numerosi brevetti proprio per i distributori stessi. L'aumento del valore della permeabilità ha, come diretta conseguenza, una migliore e più facile impregnazione delle fibre, per cui ne consegue una migliore qualità del prodotto intesa come assenza di difetti, una riduzione dei tempi di impregnazione e, quindi, una maggiore produttività o una diminuzione delle pressioni di iniezione rispetto al processo RTM; si traggono, dunque, vantaggi anche per quel che riguarda i costi d'impianto.

Da appositi punti di sfogo viene creato il vuoto che compatta il rinforzo, mentre da altri punti viene fatta entrare la resina, che sotto l'azione della pressione atmosferica esterna, viene convogliata attraverso dei distributori sul rinforzo. Il flusso potrà impregnare in due diversi modi a seconda del tipo di distributore utilizzato e dal tipo di letto fibroso: un primo modo prevede una direzione del flusso normale al

piano di giacitura del rinforzo, un secondo modo prevede un'impregnazione mista con due flussi uno normale ed uno parallelo al piano di giacitura del tutto simile a quello che caratterizza l'RTM .

2.2 Fasi produttive del RIFT

Le attrezzature utilizzate per il RIFT sono simili a quelle utilizzate in un ciclo RTM, così come il ciclo produttivo. In esso distinguiamo le seguenti fasi:

- pulitura dello stampo;
- applicazione del distaccante;
- applicazione del gel-coat;
- posizionamento del rinforzo;
- posizionamento del peel-ply e del distributore;
- applicazione del sigillante;
- chiusura con il sacco e sigillatura dei canali per il vuoto e l'iniezione;
- iniezione e cura della resina ;
- eliminazione del sacco, del peel-ply e del distributore ed estrazione del pezzo;
- operazioni di rifinitura;

Le prime quattro fasi si ripetono in modo identico al processo RTM, successivamente si pone tra il rinforzo ed il distributore il peel-ply che è permeabile

al flusso di resina, anche se la permeabilità trasversale è bassa, inoltre si distacca in modo semplice dal laminato, facilita l'apertura del sacco e consente di avere una superficie rugosa pronta per eventuali incollaggi. Il rinforzo è costituito dalla sovrapposizione di strati (mat o tessuti) in fibra di vetro, di carbonio, aramidica. Per facilitare il corretto posizionamento, il rinforzo viene preassemblato mediante operazioni di stampaggio secondo una opportuna geometria, prossima a quella del prodotto finito. Il risultato di tale operazione è la cosiddetta "preforma" che si circonda di sigillante e si fa aderire, mediante il sacco, allo stampo, rendendo ermetica la tenuta.

Dopo aver chiuso lo stampo si procede a creare il vuoto nella cavità per mezzo di una pompa e di una valvola di controllo associata ad un manometro per regolare le condizioni di vuoto; infatti non solo non deve entrare aria nelle cavità ma bisogna evitare di raggiungere percentuali di vuoto troppo spinte che potrebbero far passare sostanze da stato liquido a vapore. La pressione atmosferica agirà sul sacco che comprimerà il rinforzo. Successivamente si introdurrà la resina che sotto la spinta della pressione atmosferica impregnerà il rinforzo.

La resina deve essere introdotta senza ulteriore pressione, altrimenti si eliminerebbero gli effetti della compressione e compattazione delle fibre prodotti dal vuoto.

Impregnato il rinforzo, si chiude la valvola di mandata della resina; raggiunto il gel-time, necessario per la gelificazione della resina, si spegne la pompa. Dopo la

polimerizzazione seguiranno le fasi di eliminazione del peel-ply e del distributore e quindi si giunge alla fase di estrazione e di rifinitura del pezzo.

2.3 Attrezzature utilizzate per il RIFT

Le attrezzature usate dal RIFT sono:

- semistampo rigido;
- pompa per il vuoto;
- sacco;
- sistema di distribuzione della resina.

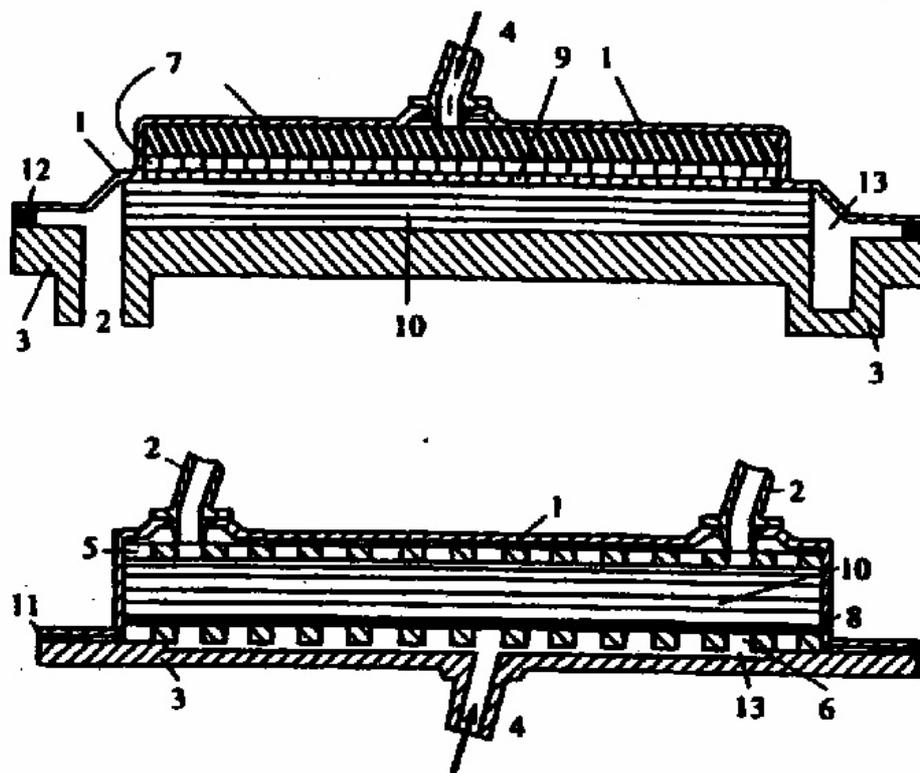
Gli stampi per le tecnologie di tipo infusion pur essendo uguali a quelli utilizzati per l'RTM non necessitano di nervature o di altri elementi per essere rinforzati perché le pressioni di iniezione sono comunque basse.

E' importante, infine, ricordare che tra lo stampo e la pompa per il vuoto andrà installato un serbatoio di raccolta della resina in eccesso proveniente dallo stampo per evitare che questa possa disturbare il funzionamento della pompa. I sacchi utilizzati nel RIFT sono essenzialmente di quattro tipi: in nylon, in polypropilene, in gomma siliconica ed in polyetilene a bassa densità. Le proprietà in base alle quali si giudicano i vari tipi sono la rigidità, la resistenza ai solventi e la resistenza ai picchi esotermici delle resine.

Il distributore necessita di manutenzione dopo ogni ciclo di polimerizzazione della resina dovendo essere ripulito per riutilizzarlo e

quindi di relativi costi aggiuntivi.

In figura 2.1 è mostrato uno schema dell'attrezzatura utilizzata per la tecnologia RIFT:



- | | | | |
|-------|--------------------------|-------|-----------------|
| 1 | Vacuum bag | 8,9 | Porous peel ply |
| 2 | Vacuum connection | 10 | Fabric |
| 3 | Rigid tool | 11,12 | Tape |
| 4 | Resin inlet | 13 | Mould space |
| 5,6,7 | Resin distribution media | 14 | Helical spring |

Fig

ura 2.1 Schema dell'attrezzatura utilizzata per il RIFT

2.4 Stampi per il RIFT

Gli stampi per processi RIFT possono essere fatti di diverso materiale e possono essere costruiti dallo stesso utente o da costruttori specializzati. La scelta del materiale per lo stampo è dettata da criteri economici, quali il costo e la vita utile dello stampo e da valutazioni tecniche quali la correttezza geometrica, la finitura superficiale, la temperatura sopportabile.

A seconda del materiale di cui è costituita la superficie della cavità si possono distinguere i seguenti gruppi di stampi:

Stampi in materiale composito: sono realizzati con resina termoindurente (poliestere o epossidica) rinforzata con fibra di vetro. Il loro basso costo e la modesta vita utile li rende adatti a produzione di piccola serie.

Stampi elettroformati: sono rivestiti di una pellicola di nichel o cromo ottenuta per deposizione elettrolitica su di un modello e che costituirà la superficie di lavorazione dello stampo.

Stampi in metallo: i risultati dei prodotti realizzati evidenziano le ottime proprietà in termini di precisione geometrica e di finitura superficiale, sono adatti però per le produzioni a grandi serie poiché il loro costo è elevato.

2.5 Materiali per il sacco

La scelta del materiale del sacco è un parametro di processo chiave per tutti i metodi di produzione sottovuoto, incluso il RIFT, la sua integrità deve essere garantita. Alla DSM Brittles hanno ideato un sacco estremamente flessibile, esso risulta essere impermeabile allo stirene una resina di bassa viscosità.

La DSM ha inoltre introdotto un metodo che utilizza un doppio sacco per il vuoto. Attualmente i tipi di sacchi utilizzati per stampaggio sotto vuoto sono: nylon, gomma di silicone, polypropylene e polyethylene.

Nylon e gomma di silicone hanno un più basso modulo di Young e quindi un alto allungamento per lo stampaggio sottovuoto. Le proprietà del film di nylon variano sensibilmente con l'umidità, mentre la gomma siliconica ha poca resistenza ai solventi e ha un alto costo. Gli altri materiali hanno un modulo di Young maggiore e sono più indicate per forme di compositi irregolari ed hanno una resistenza termica notevole.

2.6 Rinforzo e miscela di impregnazione

Le considerazioni fatte a riguardo del rinforzo e della miscela di impregnazione per l'RTM continuano a valere per il RIFT.

Vengono usate fibre di vetro, di carbonio o aramidiche sotto forma di fogli o nastri prefabbricati nella forma di mat o di tessuti.

I mat utilizzati sono quelli unifilo (continuous-strand mat) i quali sono caratterizzati da una buona formabilità.

I tessuti più usati sono quelli a fibre orientate, dei tipi woven oppure non crimped(fibre intrecciate o non intrecciate).

Le resine utilizzate sono termoindurenti costituite da gruppi non saturi disciolti in un monomero diluente che serve a ridurre la viscosità; somministrando calore e miscelando con un agente catalizzatore i gruppi non saturi reagiscono fra di loro saturandosi e dando origine a legami spaziali incrociati. La resina una volta catalizzata deve rimanere allo stato liquido per un periodo sufficiente affinché il fronte di flusso riesca ad impregnare tutto il rinforzo prima di cominciare a gelificare.

Le resine più utilizzate sono le poliestere che hanno un basso costo.

Per ottenere prestazioni superiori si ricorre alle vinilesteri e alle epossidiche.

2.7 Provini per l'utilizzo della teoria del Rift

Per la realizzazione dell'archetto come visto, è stata fatta la scelta dell'utilizzo della teoria del rift, in modo da ridurre il contatto dell'operatore con la resina allo stato liquido, per il basso contenuto di soffiature e notevoli proprietà meccaniche del laminato, per il costo inferiore di quello dell'RTM, perché si possono realizzare lavorazioni con elevata frazione volumetrica di fibre e per una migliore e più facile impregnazione delle stesse. Per verificare l'adeguatezza di questa teoria al nostro caso, si è passati alla realizzazione dei laminati di varie dimensioni, in modo da poter stabilire il materiale da impiegare, al fine di verificare la possibilità di ottenere migliori caratteristiche strutturali, migliore finitura, e una rapidità di lavorazione a costi ridotti.

L'apparecchiatura utilizzata per tali prove è la seguente:

- a) stampo piano in plexiglas;
- b) sistema di iniezione costituito da un serbatoio munito di scala graduata in cui è contenuta, a pressione atmosferica, la resina preventivamente mescolata all'indurente e un condotto con una valvola che collega il serbatoio allo stampo;
- c) sistema per creare il vuoto nello stampo costituito da una pompa che presenta i seguenti dati di targa: $P=1,1$ KW, $\cos\varphi=0,94$, $f=50$ Hz, $V=230$ v, $A=7$, giri/1'=2830 ed un condotto con una valvola di sicurezza che impedisce alla resina in eccesso di arrivare alla pompa;

- d) sacco che funge da controstampo;
- e) distributore a rete in materiale plastico;
- f) sigillante da applicare ai bordi dello stampo che serve a fissare il sacco e i condotti che vanno al serbatoio della resina e alla pompa;
- g) un distributore a spirale posto subito dopo il punto di iniezione per consentire l'avanzamento del fronte di flusso piatto;
- h) peel-ply, per consentire il distacco del distributore dalla piastra a polimerizzazione avvenuta;
- i) cronometro digitale, necessario insieme al serbatoio graduato per il calcolo della variazione della portata di resina durante l'iniezione;
- j) agente distaccante per permettere il distacco del pezzo a polimerizzazione avvenuta;

I rinforzi utilizzati in queste prove sono 8 strati di fibre di vetro di tipo unidirezionale da 600 g/m². Core in poliuretano dello spessore di 1 cm.

Il distributore a rete è in materiale plastico rigido con maglia quadrata di circa 6,25mm² con una struttura asimmetrica che da un lato crea una sezione di passaggio di $\cong 6\text{mm}^2$ per cm di larghezza e dall'altro lato una sezione di $\cong 3\text{mm}^2$ per cm di larghezza, per cui si deve fare attenzione a porre dal lato del rinforzo la parte con sezione di passaggio maggiore. La miscela di impregnazione comprende la resina e l'indurente. La resina utilizzata è una resina epossidica di tipo I-SX10 della MATES, a bassa viscosità e bassa tossicità, con indurente SX10 medio(M).

Resina ed indurente vanno miscelate nella proporzione 100 parti in peso di resina e 26 parti in peso di indurente, alla temperatura $T = 25^{\circ}\text{C}$ pari a $\mu = 550\text{-}800$ MPas, un tempo di lavorabilità di 20 minuti e un pot-life di 45 minuti.

Nella figura 2.2 è riportato l'esploso assometrico dello stampo utilizzato.

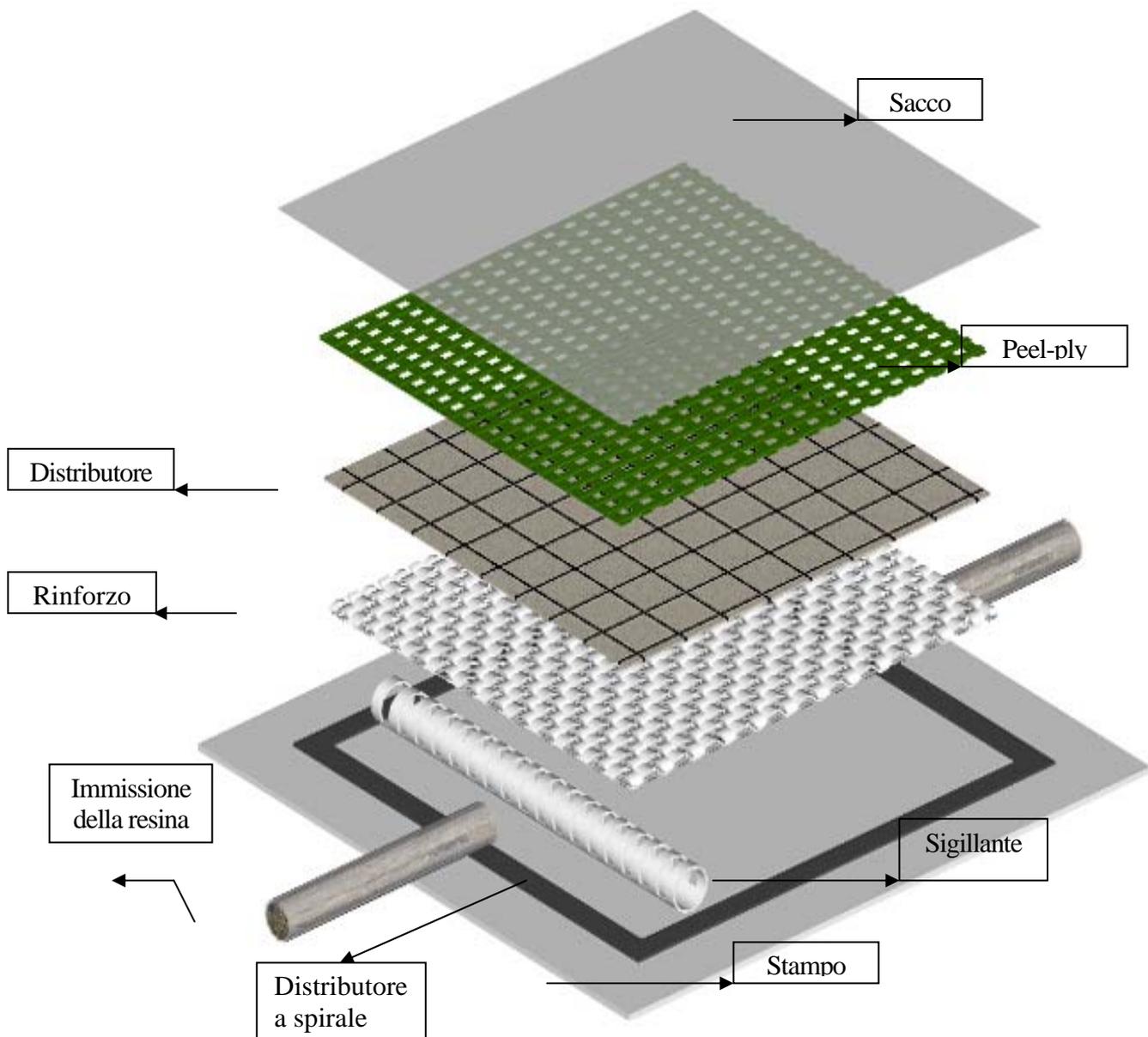


Figura 2.2- Esploso assometrico di uno stampo usato per il RIFT.

2.8 Descrizione delle fasi del processo di sperimentazione

Di seguito si descrivono le fasi eseguite per realizzare un laminato con tecnologia RIFT:

- a) Pulitura dello stampo con opportuno solvente;
- b) Applicazione della cera sullo stampo in plexiglas per facilitare il successivo distacco del pezzo;
- c) Taglio del rinforzo nelle dimensioni progettuali e suo posizionamento sullo stampo in modo corretto. Sono state tagliate le fibre di vetro delle dimensioni di $20*20*0,15\text{cm}^3$, facendo attenzione a non sfibrarle e successivamente posizionate a 0^0 e a 90^0 in modo alternato in due strati. Interposto tra i due strati è stato disposto il core in poliuretano, precedentemente scanalato nelle direzioni longitudinali e trasversali (per migliorare il flusso di resina), con l'utilizzo di una fresa.
- d) Una volta stabilito quale sia il fronte di flusso, con l'utilizzo di una mola il core è stato leggermente smussato nella direzione del tubo di iniezione, in modo che il sacco potesse aderire meglio sullo stampo.
 - e) Si deve fare in modo che il tessuto non finisca sul sigillante creando delle microcavità che impedirebbero il raggiungimento di un vuoto spinto;
 - f) Taglio e disposizione del peel-ply sul rinforzo; si ricorda che il peel-ply, oltre a garantire una buona finitura superficiale, consente il successivo distacco della rete distributore e l'eliminazione della resina in eccesso;

- g) Taglio e posizionamento del distributore sopra il peel-ply, facendo attenzione, per il distributore tipo rete, a disporre i canali dello stesso lungo la direzione del flusso delle resina;
- h) E' stata disposta una comune spirale per rilegature, che funge da distributore, nel lato di iniezione della resina ;
- i) Materiale assorbente disposto sullo stampo dalla parte della pompa che svolge la funzione di assorbire la resina in eccesso una volta che la valvola al serbatoio è stata chiuso;
- j) Posizionamento del sigillante sullo stampo. Il sigillante deve essere posto o adiacente al rinforzo o tanto lontano da permettere al sacco di aderire sullo stampo durante il vuoto. Si deve garantire infatti che tra il rinforzo e il sigillante non si formino dei canali preferenziali in cui potrebbe scorrere la resina che, incontrando meno perdite di carico rispetto al rinforzo stesso, raggiungerebbe il condotto di aspirazione tanto rapidamente da costringere a chiudere la valvola della pompa prima che la resina abbia impregnato tutto il rinforzo;
- k) Inserimento sul sigillante dei condotti per l'iniezione della resina e per il collegamento alla pompa;
- l) Si è notato che i punti critici sono quelli in corrispondenza del tubo di aspirazione e mandata con il sacco, e gli spigoli della spirale.
- m) Posizionamento dell'assorbente;

n) Disposizione del sacco sopra al sistema in modo da sigillare tutto perfettamente.

Prima dell'iniezione della resina vanno eseguite ancora due azioni: la prima è quello di azionare la pompa per verificare la presenza di eventuali perdite nel sacco o nel sigillante; la seconda è la preparazione della miscela, operazione da fare sempre alla fine per utilizzare tutto il tempo della fase di gelificazione durante il processo. La miscela una volta preparata viene versata nel serbatoio da dove viene prelevata a causa della differenza di pressione che si instaura dopo l'azionamento della pompa tra il serbatoio e lo stampo.

Azionata la pompa, si procede ad una rilevazione dei tempi.

Abbiamo cronometrato l'inizio e la fine dell'impregnazione e si è osservato che:

Lungo il perimetro del laminato l'impregnazione è avvenuta in un tempo brevissimo (circa due minuti) come può vedersi dalla figura 2.3:

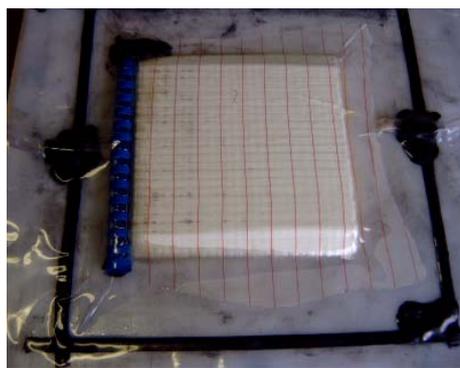


Fig.2.3 Impregnazione laterale

Ad un esame tattile, a valle della spirale, si è osservato un notevole accumulo di resina, e per tale motivo si è avuto un rallentamento della prova perché la pompa ha dovuto lavorare per un tempo maggiore al fine di poter aspirare la resina in eccesso.

Infine un accidentale foratura del sacco in prossimità degli spigoli della spirale ha causato il formarsi di bolle d'aria che si sono propagate lungo il laminato. A poco è servito sigillare subito il foro. Il tutto si osserva nella seguente figura 2.4:

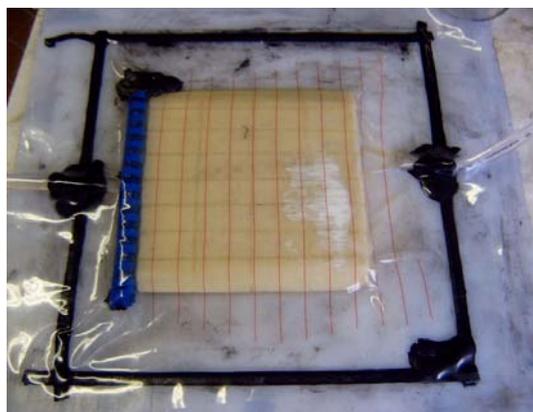


fig. 2.4 Formazione di aria

Ciò che risulta evidente dallo studio del primo laminato è che bisogna cercare il modo di eliminare il formarsi di canali lungo il perimetro e di cercare di ridurre i tempi di impregnazione.

Uno dei primi cambiamenti apportati è stato semplicemente quello di smussare i due lati del poliuretano in modo da formare un angolo a 45° al fine di evitare il formarsi di una sorta di gradino con le fibre dello strato sottostante come si osserva nell'immagine seguente della figura 2.5.



Figura 2.5: Materiale dell'anima.

Ripetendo la prova con questo accorgimento l'impregnazione è proceduta più velocemente ed il tempo cronometrato tra l'inizio e la fine dell'impregnazione è stato di 13 minuti.

Dalla sequenza di foto 2.6, però, si è osservato comunque il formarsi dei canali ai bordi del provino e qui riportiamo una delle foto in esame che evidenzia quanto detto:

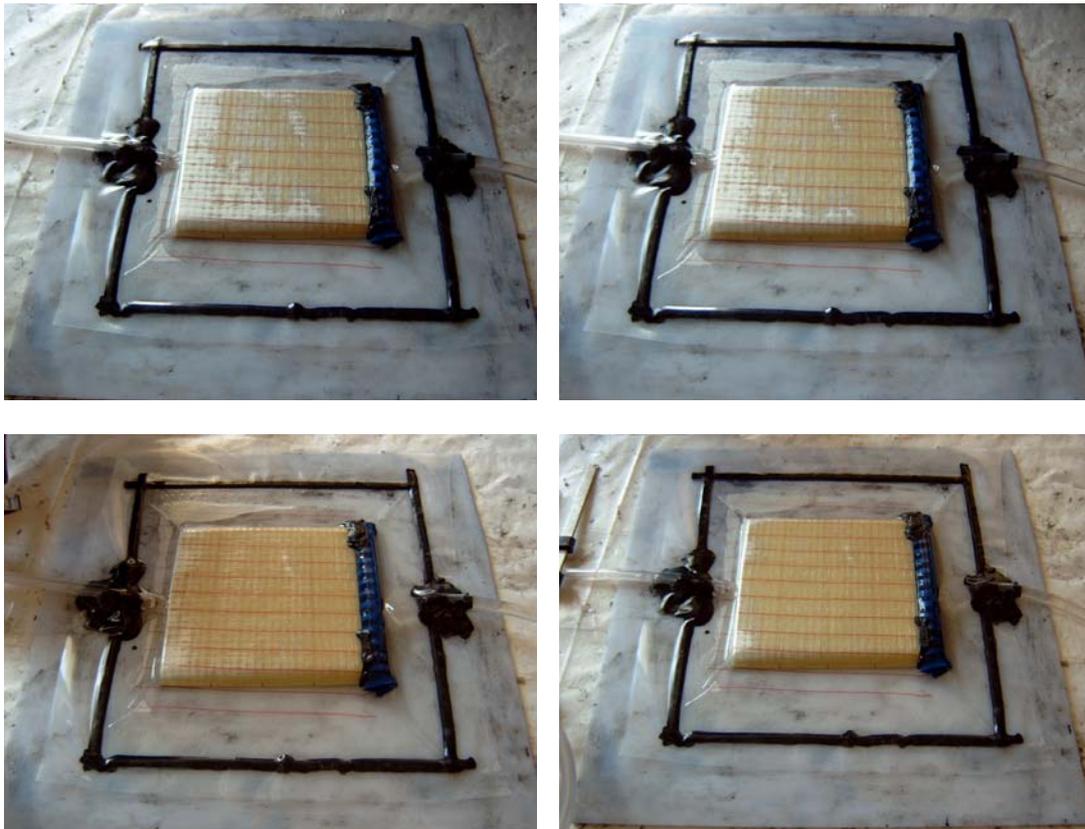


Fig.2.6 Processo di impregnazione

L'esperienza successiva è leggermente differente, infatti per vedere se l'impregnazione fosse più veloce e per evitare che la spirale forasse il sacco, si è pensato di cucire un pezzo di una rete che funge ancora come distributore, attorno alla spirale stessa come si osserva dalla foto 5.16:

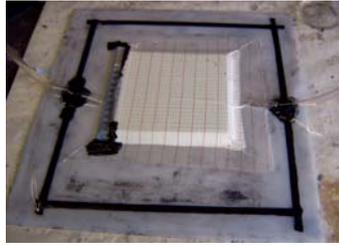


Fig.2.7 Rete intorno alla spirale

I tempi di impregnazione anche in questo caso sono risultati ancora troppo elevati, cioè di circa 15 minuti.

2.9 Descrizione del meccanismo di impregnazione

In una prova di tipo standard, comprendente, quindi, sia il rinforzo sia il distributore, bisogna comprendere che nella fase di esercizio saranno presenti due portate longitudinali di resina distinte, una che attraversa il rinforzo, l'altra che attraversa il distributore.

E' stata posta alla base del modello l'ipotesi che:

L'impregnazione di un volume di rinforzo fibroso avviene grazie al contributo di due portate, una diretta trasversalmente al rinforzo, proveniente dalla portata longitudinale del distributore, l'altra diretta longitudinalmente ad esso.

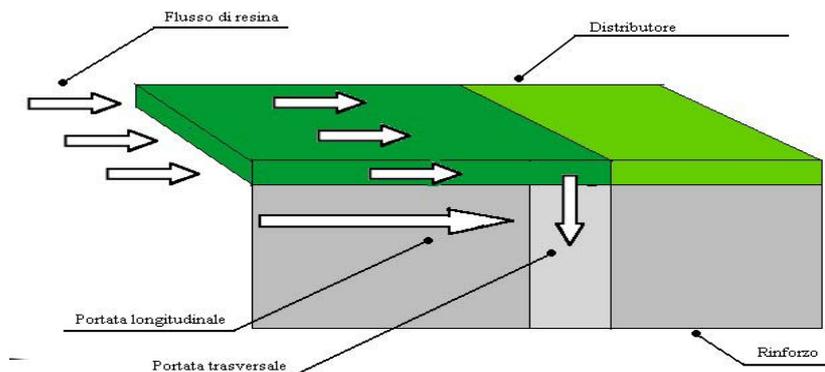


Fig.2.8(a)

La portata diretta trasversalmente arriva ad impregnare le fibre molto prima di quella diretta longitudinalmente al rinforzo, questo è dovuto proprio al fatto che la portata longitudinale del distributore è più elevata di quella del rinforzo avendo una permeabilità maggiore di quella di un qualsiasi tessuto.

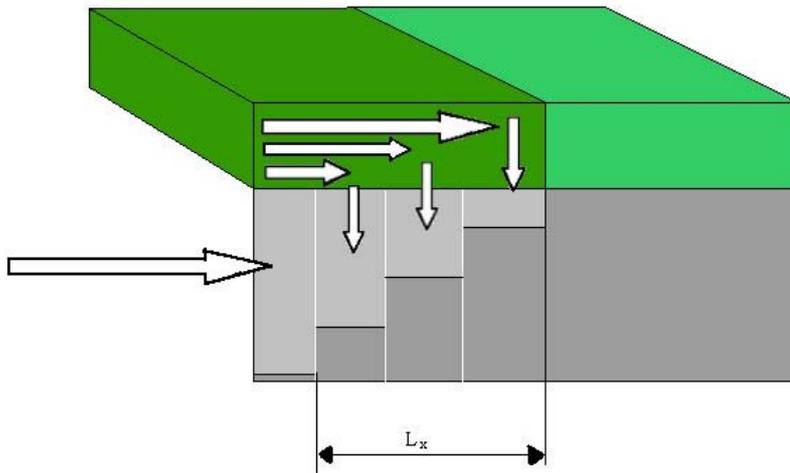


Fig.2.8(b)

Dunque, risulta evidente, che durante l'impregnazione vi saranno delle fibre (quelle disposte superiormente) che si impregnano prima delle altre (quelle disposte inferiormente). Risulta ovvio che questo fenomeno è tanto più evidente allorché la preforma da impregnare presenta uno spessore elevato. La distanza orizzontale tra l'ultimo punto impregnato delle fibre superiori e l'ultimo punto toccato dalla resina delle fibre inferiori è indicata nella figura 2.8(b) con L_x .

Il valore di L_x risulta di fondamentale importanza, in quanto esso rappresenta uno stato critico del processo, infatti, raggiunto il valore massimo di tale distanza, il flusso di resina non avanzerà più tutto longitudinalmente nel distributore fin quando non si sarà impregnato altro rinforzo.

In altri termini, la resina giunge all' inizio della preforma ed il flusso in questo istante risulta essere piatto grazie all' utilizzo del diffusore longitudinale (spiralina). La differenza di permeabilità tra distributore e rinforzo fa sì che la resina proceda più velocemente nel distributore e per tale motivo le fibre più a stretto contatto con il distributore si impregneranno immediatamente. Le fibre disposte più in basso e quindi a contatto con lo stampo in plexiglass verranno attraversate dalla resina solo successivamente, anche grazie al flusso verticale, proveniente dal distributore stesso, nel rinforzo.

Si verrà, dunque, a creare una distanza misurata in senso orizzontale tra le prime fibre che si sono impregnate (quelle a stretto contatto con il distributore) e le ultime bagnate dalla resina (quelle a stretto contatto con lo stampo). Tale distanza verrà convenzionalmente chiamata L_x .

All' altezza di L_x si può affermare che la portata del distributore sarà dimezzata in senso longitudinale e la restante metà scende trasversalmente ad impregnare il rinforzo sottostante.

Tale L_x si riduce man mano che la portata longitudinale, sempre presente, del rinforzo stesso non va ad impregnare altro rinforzo.

Una volta ridottosi L_x , la resina che giunge al distributore può tornare a muoversi solo in direzione orizzontale bagnando così altro distributore e dando vita nuovamente al fenomeno sopra descritto aumentando, quindi, L_x fino al raggiungimento di una nuova condizione di uguaglianza di portate (longitudinale nel distributore trasversale nel rinforzo).

Tale processo andrà avanti fin quando non sarà stato impregnato tutto il laminato.

Il valore che assume la suddetta distanza orizzontale è, quindi, molto importante poiché influenza tutto il processo di impregnazione, una sua valutazione (anche approssimata) è dunque necessaria, anche se, purtroppo, molto complicata dato che L_x non è costante, ma varia con l'istante in cui si effettua la misurazione, quindi in linea generale ci si dovrà riferire ad un valore di tale distanza medio e calcolato negli istanti finali del processo.

Capitolo 3

Il Pantografo

3.1 Introduzione

Il *pantografo* è la presa di corrente utilizzata per la captazione della corrente dalla linea ad alta tensione di contatto degli impianti ferroviari ed è la più adatta ai mezzi di trazione per le potenze e le velocità elevate che si richiedono.

Esso è costituito da un sistema articolato (*quadro*), montato a mezzo di isolatori sul tetto del rotabile, e da un *archetto* munito di *striscianti* che sono a diretto contatto con il filo o i fili della linea elettrica di contatto.

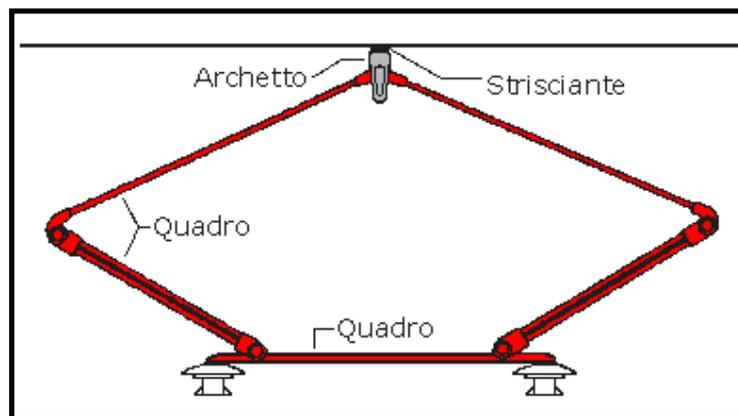


Figura 1-3 Disegno semplificato di un pantografo.

Il sistema articolato consente all'archetto di spostarsi liberamente nel piano verticale senza perdere il contatto con la linea aerea.

Gli *striscianti* sono costituiti da barre di materiale conduttore di facile sostituzione (rame, acciaio, alluminio, carbone) e sono la vera e propria presa di corrente in quanto a diretto contatto con i fili della linea. Il pantografo, la cui altezza di lavoro può raggiungere gli 1 - 1.5 metri di altezza, è alzato con dispositivi ad aria compressa e tenuto alla pressione stabilita, contro il filo della linea aerea, a mezzo di molle opportunamente tarate oppure, come in dispositivi più moderni a *spinta impressa*, da un azionamento pneumatico che adegua il valore della spinta in funzione della velocità di marcia a tutto vantaggio della bontà di captazione. A causa di variazioni della quota della catenaria non sempre si riesce a mantenere il contatto continuo e costante.

Si sottolinea, infine, che le buone caratteristiche della presa di corrente, unitamente a quelle della linea di contatto, concorrono a determinare una soddisfacente captazione di corrente riducendo al minimo i possibili distacchi dell'archetto e garantendo una buona conservazione sia del filo che degli stessi striscianti.

A basse e medie velocità, approssimativamente inferiori a circa 200Km/h, la maggior parte dei pantografi fornisce buone prestazioni anche su linee per le quali siano previste velocità inferiori.

All'aumentare della velocità cominciano invece a sorgere problemi per quanto riguarda la corretta captazione della corrente, nel senso che risulta più difficile assicurare il contatto continuo dello strisciante con la catenaria, con conseguente

formazione di archi elettrici che possono causare gravi danni all'intera struttura, ma in particolare alle apparecchiature elettriche del convoglio, spesso computerizzate.

I problemi che ostacolano una corretta captazione si possono far risalire essenzialmente ai seguenti motivi:

- Il profilo del filo di contatto non è perfettamente parallelo al tetto del locomotore ma presenta delle irregolarità dovuto al fatto che lo stesso filo è sospeso ad una catenaria di alimentazione tramite pendini in rame distanziati di circa 8, 10 metri tra di loro, mentre la catenaria è fissata agli estremi in corrispondenza dei pali di sostegno, intervallati di circa 60, 65 metri. Ragion per cui oltre certe velocità (200Km/h) lo strisciante del pantografo, lungo il percorso della linea, vede un profilo del conduttore di alimentazione in cui sono presenti delle armoniche di frequenza fondamentale legata alla distanza tra i pendini e che potremmo stimare attorno ai 4 , 20 Hz a seconda della velocità.
- Deformazioni del filo di contatto per la spinta statica e dinamica data dal pantografo stesso sulla catenaria che avranno una frequenza fondamentale legata alla lunghezza della campata e variabile tra 0.5 e 2.5 Hz.
- Interazione tra più pantografi in presa.
- Punti singolari della linea (scambi, gallerie, portali presenti nelle stazioni).
- spinte di natura aerodinamica.

Le masse delle parti mobili del pantografo nei movimenti verticali dello stesso, derivanti dalla necessità di seguire con la testa del pantografo il profilo della linea, danno luogo a forze di inerzia verticali che possono in relazione al loro verso ed alla loro identità, provocare o una spinta, e quindi una deformazione eccessiva della linea di contatto, oppure un distacco del pantografo dalla linea con conseguente formazione di archi elettrici .

Il motivo fondamentale del distacco è individuabile nella forza di inerzia a cui è sottoposto l'archetto porta striscianti; infatti mentre le altre due forze interessate: quella statica e quella aerodinamica, la prima generata meccanicamente, la seconda dovuta alla portanza del vento, spingono l'archetto verso l'alto, quella d'inerzia tende a farlo allontanare dalla catenaria.

Per risolvere questo problema è possibile intraprendere due strade: la prima è quella di aumentare il valore delle forze che agevolano il contatto (statica ed aerodinamica), la seconda è quella di diminuire la massa dell'archetto, riducendo di conseguenza la forza d'inerzia.

Nel primo caso però si aumenterebbe contemporaneamente il fenomeno di usura sia degli striscianti che della catenaria a causa del forte attrito che si genererebbe e per tale motivo si vuol cercare di ridurre la massa del pantografo.

Lo studio della struttura di questo elemento evidenzia la circostanza che la parte di tale organo maggiormente soggetta alle forze d'inerzia è quella compresa nella zona tra i bracci superiori del pantografo e l'archetto.

In particolare l'archetto porta striscianti posto nel punto più in alto del pantografo è il componente la cui riduzione di massa comporta i maggiori benefici in termini di riduzione delle forze d'inerzia.

3.2 Traiettoria del punto di contatto

Una volta introdotto brevemente lo schema teorico del pantografo vogliamo passare ad un'analisi descrittiva dei fenomeni meccanici che intervengono.

La catenaria è un sistema dotato di elasticità variabile da punto a punto, con un massimo a centro campata ed un minimo in corrispondenza delle sospensioni. Poiché risulta impossibile controllare le catenarie di tutti i tragitti ferroviari abbiamo preso in esame il pantografo.

Il pantografo durante la marcia premendo il filo con una forza costante lo solleverà di più al centro e di meno sotto le sospensioni: la traiettoria descritta nel punto di contatto tra striscianti e filo nel piano verticale non potrà mai essere rettilinea ma assomiglierà ad una sinusoidale.

In realtà però la variazione di elasticità, in corrispondenza delle sospensioni, è molto più brusca di quanto non competa alla legge sinusoidale.

Ciò si traduce in una maggiore facilità di distacchi proprio in corrispondenza delle sospensioni.

Per calcolare l'elasticità massima a centro campata ed in corrispondenza delle sospensioni si utilizzano le formule:

$$e_{\max} = \frac{l}{4(T_0 + T_f)} \quad ; \quad e_{\min} = \frac{l_p}{4} \cdot \left(\frac{1}{T_0} + \frac{1}{2 \cdot T_f} \right)$$

$$e_{\text{media}} = \frac{(e_{\max} + e_{\min})}{2}$$

con l = lunghezza della campata

T_0 = tiro della fune portante

T_f = tiro complessivo dei fili di contatto

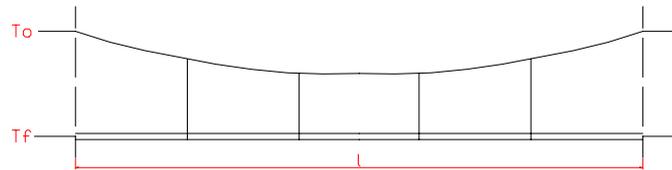
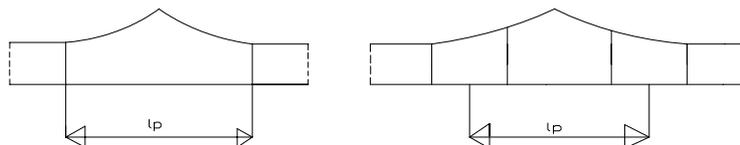


Fig 3.1 Schematizzazione della catenaria

l_p rappresenta invece la distanza tra i pendini a cavallo della sospensione

nel caso di linea aerea con un solo filo di contatto (fig.3.1-a); se i fili di

contatto sono due, l_p rappresenta invece la distanza di cui alla (fig.3.1-b).



a) fig. 2-3 (b)

Per una catenaria FS per alte velocità si possono assumere i seguenti valori di riferimento :

$$l = 60 \text{ m}$$

$$T_f = 2 \times 1000 \text{ kg}$$

$$T_0 = 1500 \text{ kg}$$

$$l_p = 8 \text{ m}$$

Che sostituiti nelle formule dell'elasticità forniscono un $e_{max} = 4.3 \text{ mm/kg}$ ed un $e_{min} = 1.8 \text{ mm/kg}$ attraverso i quali è possibile ricavare i sollevamenti della catenaria a centro campata ed in corrispondenza delle sospensioni. L'equazioni precedenti ci indicano i parametri sui quali si può intervenire almeno teoricamente, per migliorare una catenaria e cioè se diminuisce l'ampiezza diminuisce la F_i e quindi la possibilità di distacchi.

Nota il carico agente non resta che moltiplicare il valore prima trovato per quello della forza. Quindi il pantografo si alza e si abbassa restando soggetto ad accelerazioni e a forze di inerzia.

Approssimando il moto del pantografo con uno sinusoidale ed integrando la legge del moto si ricava che le accelerazioni saranno del tipo:

$$a = -\omega^2 c \text{sen}(\omega \cdot t) \quad (3.1)$$

con $\omega =$ pulsazione.

Anche se si tratta di dati approssimati.

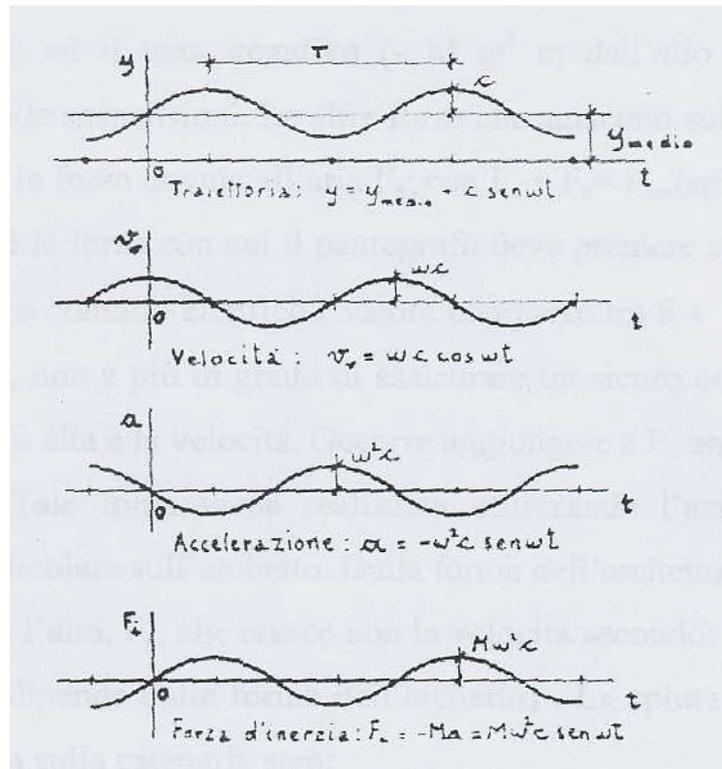


Fig. 3.2 Andamento del contatto pantografo catenaria

3.3 Forze agenti sul pantografo

Passiamo ora alla descrizione dettagliata delle forze che agiscono sul pantografo.

La forza di gran lunga più dannosa agente è sicuramente la forza d'inerzia.

Tale forza d'inerzia altro non è che il prodotto della massa per l'accelerazione del pantografo.

$$F_i = -M \cdot a = M \cdot \omega^2 \cdot c \cdot \text{sen}(\omega \cdot t) \quad (3.2)$$

Tale forza raggiunge il suo massimo positivo (dal basso verso l'alto) a centro campata ed il suo massimo negativo (dall'alto verso il basso) in corrispondenza delle sospensioni.

Le altre forze che agiscono sul pantografo sono lo sforzo statico F_s e la forza dovuta alla resistenza dell'aria F_a .

Sarà indicato con F_{aer} la somma di queste due forze.

Lo sforzo statico è la forza con cui il pantografo deve premere sul filo della locomotiva anche se ferma, per un sicuro contatto elettrico.

Durante la marcia però la F_s non è più in grado di assicurare un sicuro contatto e ciò è tanto più vero quanto più è alta la velocità.

Occorre aggiungere ad F_s una forza che aumenti con la velocità.

Tale sollecitazione viene prodotta utilizzando l'azione del vento sul pantografo in particolare sull'archetto.

Dalla forma dell'archetto si può ottenere una forza rivolta verso l'alto che cresce secondo la velocità con un'espressione del tipo:

$$F_a = Kv^2 \quad (3.3)$$

con K costante che dipende dal profilo dell'archetto.

La spinta complessiva che il pantografo esercita sulla catenaria sarà, pari a:

$$F_{tot} = F_s + F_a + F_i = F_{aer} + F_i \quad (3.4)$$

Al centro campata la forza d'inerzia si aggiungerà alle altre due mentre sotto le sospensioni questa aliquota verrà sottratta.

È proprio in questo punto che la spinta del pantografo diminuendo può addirittura annullarsi.

Quando ciò avviene si ha il distacco degli striscianti dalla linea aerea.

Si passa adesso ad una valutazione numerica delle sollecitazioni in gioco.

L'analisi riguarderà il pantografo FS 52/92, sicuramente uno dei più affidabili della serie FS 52, il cui peso dell'archetto (al netto degli striscianti) è pari a 9.5 kg, i cui dati sono riportati in TABELLA 1.

M_{stat}	29 kg
M_{stat}/M_{din}	1,2
F_s	8 kgf
M	9,5 kg
$F_{aer}(200km/h)$	24 kgf
F_{aer}/m	2,53
F	1,6 mm/kg
v_{max}	200-230km/h
PANTOGRAFO FS52	

TABELLA 1

Lo sforzo statico F_s è di semplice rivelazione essendo un termine costante stabilito dal progettista: si tratta infatti di un carico costantemente applicato all'archetto per facilitare il suo accoppiamento con la catenaria ed agente su di esso anche quando il treno è fermo.

Questo valore nel caso in esame può oscillare da un minimo di 8 *kgf* ad un massimo di 10 *kgf*.

Ponendosi nelle condizioni più gravose verrà considerato il secondo valore.

La forza dovuta alla resistenza dell'aria F_a viene solitamente chiamata portanza.

Si tratta di una forza variabile in funzione della velocità del treno : quanto maggiore sarà la resistenza dell'aria tanto più elevato sarà il valore di questa sollecitazione.

Per ricavare l'andamento del fenomeno descritto ci si avvale di un diagramma sperimentale , come indicato dal documento della DIVISIONE MATERIALE ROTABILE delle FERROVIE DELLO STATO , utilizzato in fase di progettazione e controllo che riporta in ascisse la velocità ed in ordinate le portanze.

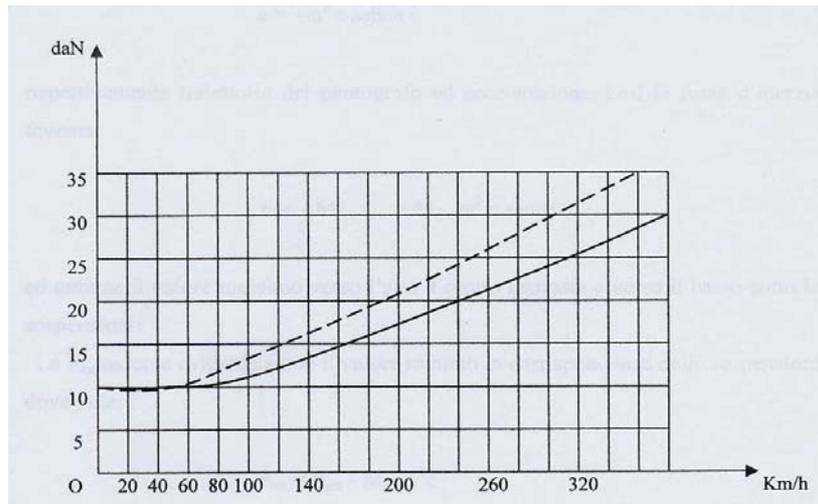
Si faccia attenzione al fatto che i valori di portanza sono differenti a seconda che riferiti ad un pantografo montato ad inizio o fine treno.

Le perturbazioni a cui un pantografo è soggetto, a causa dell'aria, sono, a parità di velocità, maggiori se il pantografo è montato nella parte anteriore del treno.

Nel diagramma viene studiata tale condizione attraverso la presenza di due curve associate, per l'appunto, alle due posizioni di montaggio dello stesso pantografo(vedi fig.3.3). La linea tratteggiata si riferisce al caso in cui l'archetto si trovi nella parte anteriore quella continua nella parte posteriore

essendo i valori ricavati leggermente diversi.

Fig. 3.3 Andamento della portanza



La F_a è valutata in corrispondenza della velocità di 200 km/h, dove assume il valore di 19.18 daN (vedi linea continua sul diagramma).

Non rimane che definire la componente della forza d'inerzia.

Questa sollecitazione , come visto in precedenza , ha una formula del tipo :

$$F_i = -M_{din} \cdot a_{per} \quad (3.5)$$

dove a_{per} è una qualsiasi accelerazione perturbatrice.

Il primo passo è quello di calcolare la a_{per} .

Per fare ciò bisogna uguagliare le forze che spingono l'intero pantografo verso l'alto (forze aerodinamiche) con quelle che invece tendono a farlo staccare (forza d'inerzia) che sono funzioni della massa dinamica dell'intera struttura.

In questo modo si assicura il continuo contatto tra il pantografo e la catenaria.

$$-M_{din} \cdot a_{per} = M_{dim} \cdot \omega^2 c = F_s + F_a = F_{aer} \quad (3.6)$$

E' anche importante che la F_{aer} sia la più regolare possibile, nel senso che ad una certa velocità il suo valore non deve oscillare rispetto al valore medio. A titolo di

esempio nella fig. 3.4 è mostrato l'andamento della Faer a 200 Km/h per il pantografo FS 52 montato su un'elettromotrice Ale 601. Si può notare la sua regolarità con minime variazioni rispetto al valor medio.

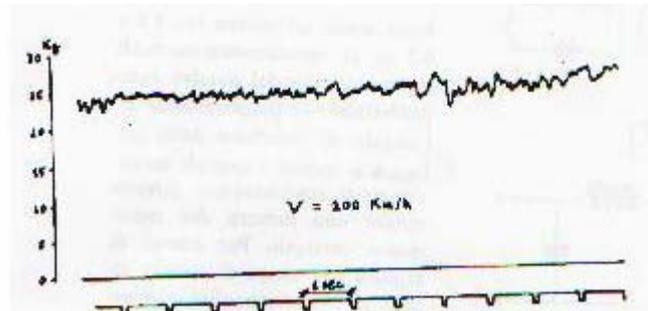


Fig.3.4 Faer a 200 Km/h per il pantografo FS 52

L'esperienza mostra che il rapporto tra $M_{stat.}$ e $M_{din.}$ qualunque sia il tipo di pantografo è pari ad 1.2.

Per misurare quella statica è stato utilizzato un dinamometro, mentre per il calcolo della dinamica di una molla di flessibilità nota ed attraverso la formula $M_{din} = T^2 / 4\pi^2$. Dalle condizioni di progetto lo sforzo di sollevamento misurato attraverso un dinamometro, per un pantografo FS 52/92, è circa 40.8 daN, per cui la M_{sta} altro non è che $400/9.8 = 40.81$ kg.

Noto questo valore è possibile ricavare quello della massa dinamica che sarà pari a :

$$M_{din} = M_{stat}/1.2 = 40.81/1.2 = 34.01 \text{ kg.} \quad (3.7)$$

Non resta che eguagliare le due forze in maniera tale da consentire sempre il contatto tra il pantografo e la catenaria.

Risolvendo l'equazione si otterrà la a_{per} che risulterà pari a 8.52 m/s^2 o anche 0.87 g .

Tale accelerazione rappresenta quella che la spinta aerodinamica è in grado di imprimere al pantografo ma rappresenta anche l'accelerazione perturbatrice massima che il pantografo riesce a controllare, evitando il distacco dalla catenaria, senza la necessità del sistema archetto-sospensione. D'altra parte noi siamo interessati a porci nelle condizioni più gravose relativamente alla forza che agisce sul generico braccio superiore del pantografo, in questo senso l'accelerazione massima sostenibile dal quadro di base è proprio $0,87\text{g}$ valore per il quale, grazie alla spinta aerodinamica, è possibile evitare il distacco dal filo di contatto.

Valori maggiori dell'accelerazione perturbatrice sono senz'altro possibili (caso delle perturbazioni ad onda corta) ma in questo caso il continuo contatto con la catenaria è assicurato dal solo archetto spinto com'è oltre che dalla forza aerodinamica anche dalla sospensione che lo lega al quadro di base . L'accelerazione del quadro di base viene, in questo caso, attenuata dalla sospensione raggiungendo il valore massimo teorico, appunto $0,87\text{g}$, quando il quadro di base si muove nuovamente a formare un tutt'uno con l'archetto.

La forza d'inerzia massima sarà:

$$F_i = M_{din} \cdot a_{per} = 34.01 \cdot 8.52 = 289.77 \text{ N}$$

La forza totale invece, avendo ricavato le componenti che la compongono sarà:

$$F_{tot} = F_s + F_a + F_i = 98 + 191.8 + 289.77 = 579.57 \text{ N} = 57.96 \text{ daN}$$

con:

$$F_s = 10 \text{ kgf} = 10 \cdot 9,8 = 98 \text{ N} = 9,8 \text{ daN}$$

$$F_a = 19,18 \text{ daN}$$

Tale forza rappresenta la reazione massima prodotta dalla catenaria sul pantografo nelle condizioni più gravose in cui ci siamo posti. I valori effettivi durante il normale e reale funzionamento sono, naturalmente, sensibilmente più bassi.

Per calcolare, invece, la massa M_{din} del solo archetto è necessario sempre considerare il rapporto tra la M_{sta} e la M_{din} pari ad 1.2.

La massa statica del pezzo è pari a 10 *daN* e di conseguenza:

$$M_{din} = \frac{M_{sta}}{1.2} = \frac{10}{1.2} = 8.3 \text{ kg}$$

A questo punto non rimane che moltiplicare i due valori ottenuti per ottenere il valore della forza d'inerzia agente sull'archetto.

Sostituendo i valori si otterrà una sollecitazione pari a 70.72 *N*.

Dunque in prossimità del centro campata, dove le sollecitazioni si sommano, la forza totale agente sull'archetto sarà pari a :

$$F_{tot} = F_a + F_{sta} + F_i = 191.8 + 98 + 70.72 = 360.5 \text{ N} = 36.05 \text{ daN}$$

Mentre sotto le sospensioni questa forza sarà approssimativamente nulla creandosi problemi di contatto.

Per questi valori delle masse e delle forze in gioco nel momento in cui si verifica un aumento dell'accelerazione perturbatrice necessariamente avviene il distacco tra gli striscianti e la catenaria.

Ridurre le masse in gioco permetterà all'archetto di poter seguire il movimento della catenaria anche per valori di accelerazioni maggiori.

Come si vede dalla figura 4.5 per una massa qualsiasi ubicata nella posizione indicata in ascissa , dà in ordinata la parte di essa che concorre alla determinazione della massa fittizia.

Per esempio , una massa di 1 kg sita nella posizione 5 equivale a 0,5 kg (50%) di massa fittizia.

In questo modo viene messo in evidenza che alleggerendo il pantografo, cioè riducendo la massa fittizia, che per definizione è intesa come la massa ideale che concentrata nel punto di contatto tra gli striscianti e il filo, equivale alla massa totale di tutto il pantografo, si migliora la qualità di captazione, e per tale motivo risulta fondamentale alleggerire l'archetto.

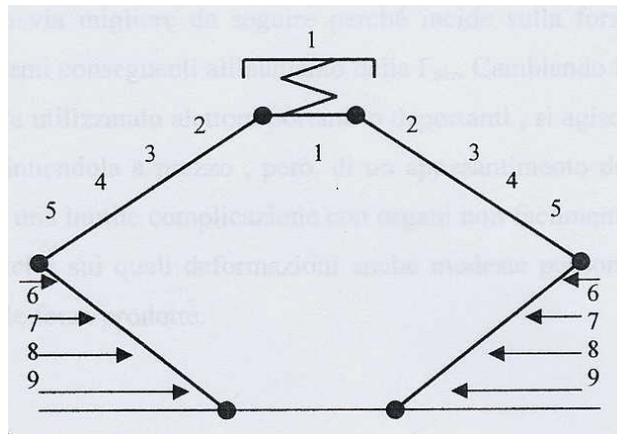


Fig 3.5 Influenza delle masse

3.4 Cause del distacco pantografo - catenaria

Come accennato nel paragrafo precedente diminuire le masse in gioco significa ridurre la probabilità di causare distacchi tra il pantografo e la catenaria, in particolare se si agisce sulla massa del pantografo.

Tali distacchi avvengono sempre in corrispondenza delle sospensioni: in questi punti il valore della forza d'inerzia è negativo, ovvero con verso opposto alle altre forze che sono: la forza statica e la portanza che lo spingono verso l'alto.

La forza d'inerzia, ha un'espressione del tipo riportata nella (3.5)

Avverrà il distacco nel momento in cui il valore della forza d'inerzia supera quello dell'aerodinamica e cioè quando:

$$M_{din} \cdot a_{per} > F_s + F_a = F_{aer} \quad (3.8)$$

$$a_{per} > \frac{F_{aer}}{M_{din}}$$

$$\omega = 2\pi v/l \quad (3.9)$$

dove $F_{aer}/M_{din} = 24 \cdot 9.8/24 = 9.8 \text{ m/s}^2 = 1g$, considerando inoltre la (4.9), a 200 Km/h con $l=60m$ e assumendo $c=10cm$ si ha anche:
 $\omega^2 \cdot c = (2\pi \cdot 200/3.6 \cdot 60)^2 \cdot 0.1 = 3.38 \text{ m/s}^2 = 0.35g$

Le accelerazioni dovute a perturbazioni impresse dalla deformazioni sinusoidali del filo hanno un valore pari a 0.35 g che confrontato con il precedente valore di 0.87 g vengono largamente supportate.

Per questo tipo di variazioni non vi sono problemi di distacco.

Quelle che invece possono creare problemi sono le perturbazioni così dette ad onda lunga ed onda corta.

La perturbazione sinusoidale nell'ambito della campata è del tipo che si definisce ad onda lunga, intendendo con questa espressione delle perturbazioni la cui

lunghezza d'onda è relativamente lunga, cioè in altre parole il cui periodo è relativamente grande. Le perturbazioni ad onda lunga in genere non sono molto pericolose per la qualità della captazione perché, il pantografo è in grado di compensarle abbastanza agevolmente.

L'accoppiamento pantografo-catenaria è anche afflitto da perturbazioni ad onda corta(cioè di periodo molto più piccolo): esempi sono le deformazioni locali del filo di contatto tra pendini, quelle dovute al passaggio del pantografo sotto punti singolari della catenaria, quelle dovute in genere allo stato di agitazione, di vibrazione della linea aerea e dei suoi supporti, che diventa sempre più violento al crescere della velocità. Tali perturbazioni, dell'ordine di qualche millimetro, sono in realtà quelle più difficili da controllare.

L'altezza della linea aerea è intorno ai 5 m ma può variare in corrispondenza delle stazioni, passaggi a livello, ponti, e galleria.

Le zone ad altezza diversa vengono raccordate con rampe che hanno pendenza che varia dal 1% al 3% a seconda dei casi, come in figura 3.6.

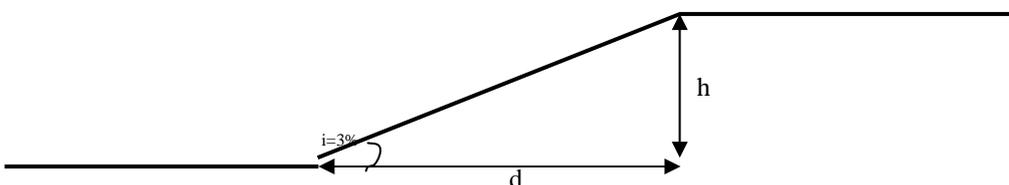


Fig3.6 Rampa di raccordo tra zone di catenaria ad altezza diversa

Si supponga allora una variazione della linea da 4,5 m a 5 m .

Come si vede in figura la lunghezza della rampa di raccordo sarà :

$$d = \frac{h}{l} = \frac{0.5}{0.003} = 170m \quad (3.10)$$

Il tempo impiegato a percorrerla è pari a:

$$t = \frac{d}{v} = \frac{170 \cdot 3.6}{200} = 3\text{sec} \quad (3.11)$$

con $v = 200 \text{ km/h}$

Dunque, l'accelerazione necessaria a superare il dislivello h , nell' ipotesi che si tratti di moto uniformemente accelerato , sarà pari a:

$$a_{per} = \frac{2 \cdot h}{t^2} = \frac{2 \cdot 0.5}{3^2} = 0.11 \frac{m}{s^2} = 0.01g \quad (3.12)$$

Anche in questo caso la condizione di contatto (4.8) non è soddisfatta.

Una diminuzione della M_{din} , quindi della massa dell'archetto, determinerebbe valori più soddisfacenti, potendo per esempio diminuire la spinta aerodinamica a tutto beneficio della catenaria.

Bisogna verificare però che il contatto sia ottenuto per perturbazioni anche più corte.

Si supponga, per fare un esempio, di avere a che fare con una perturbazione che sollevi la linea di contatto di 4 mm in un tempo corrispondente allo spazio di circa 1 m .

Sempre considerando una velocità media di 200 km/h si avrà :

$$t = \frac{d}{v} = \frac{1 \cdot 3.6}{200} = 0.02\text{sec} \quad (3.13)$$

L'accelerazione perturbatrice sarà di conseguenza :

$$a_{per} = \frac{2 \cdot 4 \cdot 10^{-3}}{0.02^2} = 2g \quad (3.14)$$

Poiché l'accelerazione che la spinta aerodinamica è in grado di imprimere al pantografo è come abbiamo già calcolato di 1g e ne risulta che la condizione (3.8) è soddisfatta.

L'archetto non riesce a seguire il filo di contatto che si solleva più rapidamente di quanto sia nelle sue possibilità e si ha evidentemente il distacco.

Tali perturbazioni sono piuttosto normali e frequenti : è evidente che bisogna intervenire in maniera opportuna.

Una riduzione del peso dell'archetto consentirà di fargli seguire la catenaria anche nelle condizioni in cui ora non è possibile.

Inoltre occorre dotare l'archetto di un'adeguata sospensione.

Di seguito è riportato un grafico qualitativo che mostra la variazione della accelerazione perturbatrice in funzione della massa statica dell'archetto.

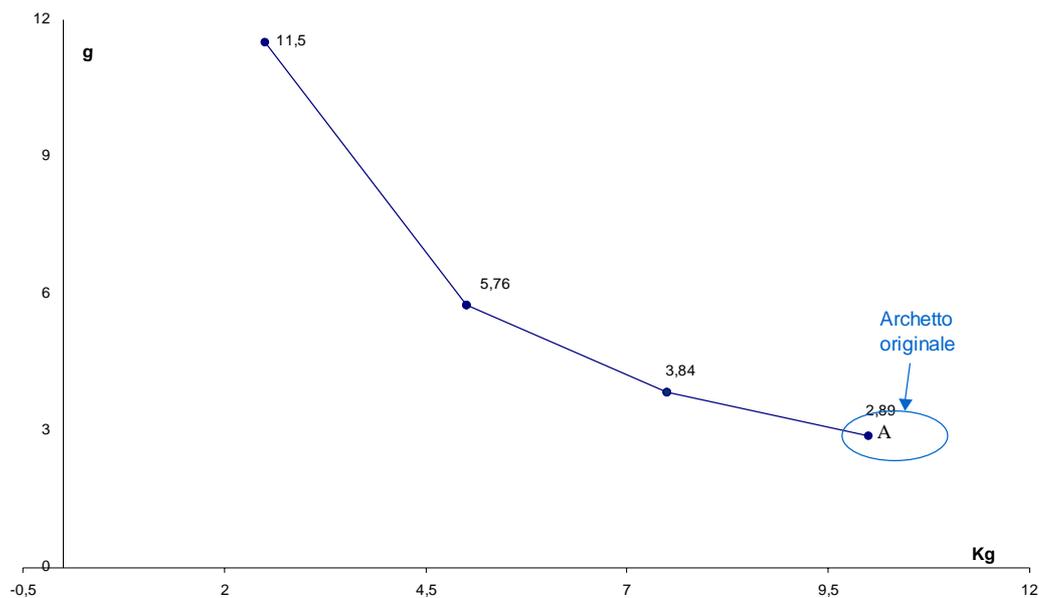


Fig. 3.7 Variazioni delle accelerazioni in funzione della massa

Il nostro obiettivo è quello di spostare il punto A quanto più a sinistra possibile sul grafico.

3.5 Analisi dei materiali e dei componenti costituenti il pantografo originale

Il pantografo sul quale concentreremo la nostra attenzione è il modello FS 52/92 attualmente in uso sugli ETR delle Ferrovie dello Stato e che in futuro verrà utilizzato anche sulle linee ad alta velocità (TAV).

Le caratteristiche tecniche di quest'ultimo sono:

Velocità d'impiego $v = (0 \div 250 \text{ Km/h})$;

Forza di contatto $F_c = F_p = 9 \text{ daN}$ per $0 \leq v \leq 100 \text{ Km/h}$;

Forza di contatto $F_c = F_p + F_a = 22 \text{ daN}$ per $100 \leq v \leq 200 \text{ Km/h}$;

Forza di contatto $F_c = F_p + F_a = 29 \text{ daN}$ per $200 \leq v \leq 250 \text{ Km/h}$;

Sollevamento max s della catenaria sotto sospensione:

$s < 9$ cm per $0 \leq v \leq 200$ Km/h e $s < 12$ cm per $200 \leq v \leq 250$ Km/h.

Il portastriscianti(o archetto), è orientabile sia in senso trasversale che longitudinale,ottenendo così una sistematica eliminazione del grave difetto del cabraggio,che produce un consumo anomalo dello strisciante anteriore senso marcia. Gli striscianti sono di solo rame sinterizzato,o di rame e di carbone.

Come abbiamo già accennato la funzione del pantografo è quella di assicurare il passaggio di corrente dalla linea elettrica alla locomotiva del treno e affinché svolga correttamente il suo compito, è importante che non subisca danni al telaio, causa la frequente interruzione della marcia.



Fig.3.8 Pantografo montato su di un treno

Il pantografo è caratterizzato da un quadro di base che viene sollevato tramite una robusta molla messa in tensione da un cilindro pneumatico. Sulla sommità del

quadro di base è montato l'archetto porta striscianti con la sua sospensione. Sull'archetto sono applicati gli striscianti.

Proprio a causa delle forze di interazione tra pantografo e catenaria, come precedentemente visto, la nostra attenzione si soffermerà sull'archetto la cui diminuzione di massa comporta un'elevata riduzione delle forze agenti sull'intero organo senza però voler rinunciare ad un'elevata rigidità tale da permettere il corretto funzionamento.

L'archetto originale, realizzato dall'azienda "Production S.p.a.", è caratterizzato da tre parti fondamentali:

1)CORPO CENTRALE

2)APPENDICI LATERALI

3)CORNI PROTETTIVI

Il corpo centrale è la zona in cui avviene per maggior tempo il contatto tra l'archetto e la catenaria. In tale zona vengono montati gli striscianti, che coprono quasi l'intera superficie, insieme a delle particolari strisce metalliche che hanno il compito di attutire l'urto con la catenaria successivamente ad un distacco della linea elettrica.

Si cerca in questo modo di preservare gli striscianti da qualsiasi fenomeno accidentale che ne potrebbe aumentare l'usura in maniera non controllata.

Il collegamento tra striscianti ed archetto è assicurato da viti di bronzo per ogni lato mentre per fissare le bacchette metalliche vengono utilizzate altre viti. La sezione è di tipo scatolare ed è realizzata in acciaio.

Le appendici laterali sono invece il collegamento tra la parte centrale e i corni protettivi.

La caratteristica fondamentale che devono possedere sono le giuste dimensioni per poter ospitare le sospensioni che congiungono il telaio con il resto del pantografo. Infatti l'archetto non è fissato direttamente ai bracci che lo sostengono, ma risulta connesso a questi tramite delle viti che hanno anche il compito di assorbire meglio gli urti accidentali tra l'archetto e la catenaria.

Nel momento in cui per una qualsiasi perturbazione della linea elettrica questo pezzo subisce una forte sollecitazione può accadere che il punto più alto della sospensione superi in altezza l'appendice laterale: proprio grazie agli spazi creati si evita il contatto tra i due pezzi preservando l'integrità della struttura.



Fig. 3.9 Particolare dell' appendice laterale

Le appendici laterali hanno una sezione rettangolare con uno spessore variabile tra quello della parte centrale a quello del corno laterale. Sono realizzate in acciaio e sono presenti dei fori per permettere il collegamento con la parte centrale. Sull'altra

estremità invece è ricavato l'alloggio per i corni laterali che vengono fissati con dei bulloni di ottone.

L'ultima parte dell'archetto da caratterizzare è rappresentata dai corni laterali che hanno il compito di proteggere il pantografo in prossimità degli scambi, in cui si ha uno sdoppiamento sia dei binari che della catenaria.



Fig 3.10 Particolare del corno protettivo

Si rischia così, che l'archetto urti, con velocità pari a quella del treno, contro la parte ferma della linea elettrica. L'assenza di queste protezioni potrebbe causare l'inserimento del cavo al di sotto dell'archetto causando lo strappo di quest'ultimo dal resto del pantografo provocando danni irreparabili all'intero apparato di trasmissione elettrica.

Il corno laterale è realizzato in alluminio, a sezione rettangolare piena, ed è semplicemente separabile dall'archetto essendo disposto sulle due parti terminali di detto archetto.

Il corno è progettato con un certo margine di sicurezza : il contatto con la catenaria non avverrà mai nell'estremo dell'archetto, e quindi non in prossimità del corno, ma sempre approssimativamente in una parte centrale. Un parametro da tenere presente in futuro è la temperatura di esercizio raggiunta dall'archetto : visto il continuo contatto con la catenaria è notevole la quantità di calore generata per attrito.

Da passati studi ed anche tramite prove sperimentali , però è stato verificato che la massima temperatura raggiunta dagli striscianti (e non dall'archetto) è massimo di 200°.

Tenendo conto del calore che si dissipa lungo tutto lo spessore del rame si è sicuri di lavorare con temperature tali che non deteriorano un eventuale pezzo in composito , che resiste senza grossi problemi a circa 150°.

3.6 Realizzazione del pantografo in composito:

Determinazione del nuovo design

Questo lavoro di tesi si inserisce nell'ambito di una ricerca finanziata dal M.U.R.S.T. (Ministero dell'Università della Ricerca Scientifica e Tecnologica) e facente parte del progetto 2 del cluster 26 "Progettazione e prototipizzazione di un pantografo in materiale composito per treni ad alta velocità".

Il progetto di ricerca parte dallo studio dell' accoppiamento pantografo-catenaria e si basa sulla realizzazione di un sistema capace di captare, con continuità, corrente ad alta velocità.

Le interruzioni nel contatto pantografo-catenaria, quelle che normalmente si chiamano distacchi, sono decisive per giudicare il comportamento di un pantografo.

Come già detto, la forza di inerzia assume il suo valore massimo verso l'alto a centro campata e verso il basso sotto le sospensioni. Affinché non si abbia un distacco tra pantografo e catenaria è necessario che la forza o spinta residua del pantografo non sia nulla, ma maggiore di zero, ovvero che sia rispettata la seguente disequazione:

$$F_{aer} > F_i$$

Dal altro canto si è osservato che l'usura della linea aerea, dipendendo dall'attrito con gli striscianti, aumenterà al crescere della forza di chiusura.

La forza di inerzia non è l'unica forza che sollecita il pantografo ma ve ne sono altre due: lo sforzo statico F_s e la forza dovuta all'aria F_a . La spinta complessiva che il pantografo esercita sulla catenaria è:

$$F_{tot} = F_s + F_a + F_i = F_{aer} + F_i$$

Obiettivo della ricerca è quello di realizzare un sistema pantografo tale da minimizzare l'usura della linea aerea, garantendo allo stesso tempo, un contatto continuo tra gli striscianti e catenaria.

Abbiamo per tanto focalizzato l'attenzione sulla riduzione della forza di inerzia in modo da poter ridurre, conseguentemente, la forza di chiusura e preservare così la linea aerea.

La riduzione della forza di inerzia comporta necessariamente la riduzione della massa del pantografo.

Il progetto di ricerca finora ha consentito di individuare quali sono le componenti della struttura che è maggiormente conveniente alleggerire.

Lo studio delle masse ha evidenziato che le parti più alte del pantografo incidono maggiormente sulla determinazione della massa fittizia. Da quanto detto consegue che la parte su cui è più conveniente lavorare è quella compresa nell'intorno dell'archetto.

Per alleggerire il pantografo si è ricorso all'uso dei materiali compositi per sfruttarne la caratteristica intrinseca di anisotropia e la possibilità di inserire il rinforzo là dove è necessario. L'uso dei materiali compositi però necessita di uno studio sulle temperature nella zona dei componenti da realizzare, stante la bassa resistenza di tali materiali alle alte temperature. L'iniziale studio della struttura dell'archetto in metallo ne ha permesso la caratterizzazione. Successivamente è stata realizzata un'analisi FEM per analizzare il comportamento al variare dei carichi e dei materiali impiegati. Sono quindi stati realizzati dei prototipi in materiale composito che ricalcano perfettamente la geometria dell'archetto originale.

Nel presente lavoro volendo ridurre ulteriormente la massa della struttura, si è ricercato un nuovo design del pantografo per individuare le possibili modifiche della parte da realizzare in composito.

Delle diverse soluzioni esaminate quella che consente di avere migliori risultati è relativa alla modifica dell'attacco delle sospensioni. Come si vede in figura 5.8, la sospensione è collegata all'archetto mediante dei bracci ad L, che nella

configurazione originale consentono l'escursione della sospensione stessa al di sopra del livello dell'archetto in caso di abbassamenti repentini del pantografo.

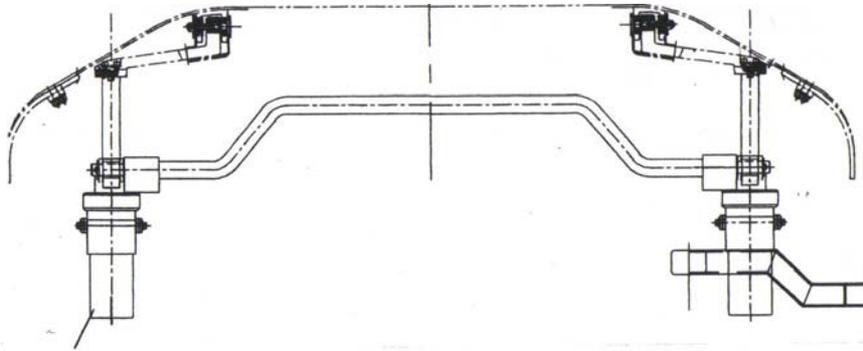


Fig 3.11: Particolare del braccio ad "L"

Tali componenti hanno un peso non trascurabile ed è quindi stata verificata la possibilità di spostare l'attacco delle sospensioni. Conseguentemente, è stato modificato tutto il design dell'archetto. Tale modifica ha comportato un abbassamento dello stesso, ricavando un potenziale aumento in altezza per le carrozze ferroviarie, che potranno essere più grandi.

L'uso del composito ha inoltre permesso la costruzione di un pezzo unico.

Per tale motivo il nuovo design conterrà i corni laterali che finora erano bullonati alla parte centrale dell'archetto. In questo modo otteniamo una semplificazione costruttiva ed il prototipo non sarà più diviso in tre parti. E' stata inoltre introdotta una barra centrale per dare alla struttura la medesima rigidità dell'archetto originale.

Definito il nuovo design si è passati allo studio di uno stampo che ricalcasse perfettamente le nuove caratteristiche geometriche.

Per fare ciò è stato inizialmente realizzato un disegno al calcolatore con il programma Pro E (fig.3.12), successivamente si è andati presso l'azienda "Production Spa", in modo che con la loro collaborazione fosse più semplice passare attraverso un sistema CAM alla realizzazione dello stampo.

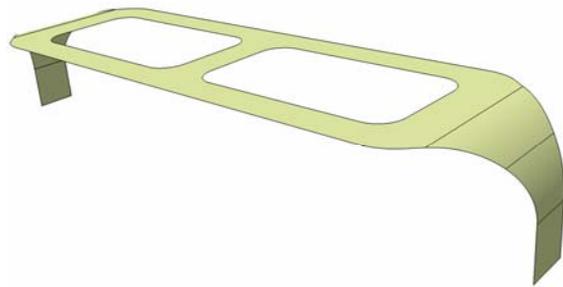
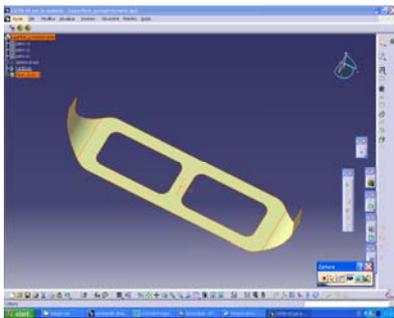


Fig.3.12 Disegno al cad

Lo stampo è stato realizzato in MDF. Particolare attenzione è stata posta al dimensionamento degli angoli di sformo che sono del 3%. Nella figura 3.13 è possibile apprezzare quanto finora detto relativamente alla realizzazione dello stampo.



Fig 3.13 Stampo realizzato in MDF

3.7 Prove sperimentali realizzate

In questo lavoro di tesi, come si vedrà nei successivi capitoli, è stato realizzato un archetto in vetroresina che verrà in seguito sottoposto a prove meccaniche e termiche.

Per la realizzazione di tale pezzo, si è partiti dagli studi e dalle prove sperimentali che sono stati oggetto di precedenti lavori di tesi e che ci hanno consentito di evitare numerosi errori che si sono presentati e che andiamo ora ad evidenziare.

Gli archetti precedentemente realizzati avevano come nel nostro caso una struttura sandwich ma le differenze sostanziali sono: la mancanza di rinforzo sui bordi e il differente orientamento e il numero di strati di rinforzo che erano in quel caso 0/90/0/90/core/90/0/90/0.



Dalla realizzazione di tali prove uno dei principali problemi che è venuto fuori è quello relativo alla mancata impregnazione di alcune aree in particolar modo nella

zona centrale del corno, problema che, come si vedrà in seguito, è stato risolto utilizzando diversi strati di distributore.

Per quanto riguarda la presenza di rinforzo nei bordi del pezzo si è dovuto procedere allo studio di un nuovo impacchettamento che consentisse il completo avvolgimento dello stesso, realizzando quindi, come vedremo, delle dime di carta che sono servite come guida al taglio delle varie forme di fibra di vetro.

Capitolo 4

Il Metodo degli Elementi Finiti: approccio agli spostamenti

4.1 Introduzione

I recenti sviluppi delle tecnologie strutturali in questi ultimi decenni hanno determinato un continuo sviluppo dei procedimenti di calcolo delle strutture. In particolare nel campo delle applicazioni aerospaziali, l'impiego di strumenti di calcolo sofisticati e potenti, si è rivelato determinante non solo al fine di ridurre i pesi ma anche per la necessità di valutare le interazioni fra le forze elastiche, dinamiche, aerodinamiche e termiche.

L'algebra matriciale ha trovato largo sviluppo per la sua particolare adattabilità al calcolatore elettronico rendendo così possibile lo studio di grandi sistemi strutturali ovvero di sistemi complessi.

L'uso del calcolatore non è tuttavia limitato alla soluzione di sistemi di equazioni di ordine elevato bensì, consente di conoscere in dettaglio lo stato tensionale e deformativo delle strutture più complesse partendo da una descrizione dettagliata del modello di calcolo.

Il metodo degli elementi finiti recepisce il carattere astratto del modello di spostamento, riconducendolo ad una formulazione di estrema versatilità, applicabile in un contesto generale.

Si suddivide la struttura in un numero finito di elementi e si stabilisce per ognuno di essi il modello di spostamento. Su questa base viene definito il

comportamento di ogni singolo elemento e quello dell'intera struttura viene poi ricostruito assemblando gli elementi di cui è composta, immaginandoli connessi tra loro e con il supporto esterno solo in determinati punti, detti nodi. E' quindi sufficiente determinare le proprietà di alcuni elementi fondamentali per "ricostruire" strutture diverse per forma e condizione di vincolo e di carico. Il calcolo delle proprietà degli elementi e il loro assemblaggio richiedono operazioni di natura ripetitiva, affidabili quasi per intero a programmi di calcolo.

Il metodo degli elementi finiti più che su di un rinnovamento dei fondamenti meccanici del problema strutturale, si basa su di una loro riorganizzazione che li adatta alle esigenze dell'automatizzazione del processo risolutivo. Ne è risultato un procedimento estremamente versatile, che in linea di principio, consente la soluzione di qualunque problema, non solo strutturale.

4.2 Le successive fasi dell'approccio agli spostamenti

Il procedimento di calcolo, in un contesto generale, si articola nella seguente successione di operazioni:

Definizione dello schema discreto. Una struttura non si presenta come assemblaggio di costituenti elementari. E' richiesta, quindi, una suddivisione del dominio strutturale in sottodomini di dimensione finita, denominati per questo elementi finiti e successivamente connessi tra loro in alcuni punti detti nodi.

Questo sistema discretizzato costituisce il modello di calcolo e ad esso è associata la definizione di un modello di spostamento per ogni elemento mediante combinazioni lineari di funzioni assegnate, di regola polinomi, definite sul singolo elemento finito, chiamate funzioni di forma.

Una volta discretizzata la struttura e stabilito il modello di spostamento, sono determinate le caratteristiche di comportamento dello schema discreto con cui si approssima la struttura originaria. Le fasi successive riguardano essenzialmente la costruzione delle equazioni a partire dall'equazione variazionale dei lavori virtuali come condizione necessaria di equilibrio e la tecnica risolutiva che poco pesano sulla qualità della soluzione.

Il modello strutturale viene espresso in funzione degli spostamenti dei nodi dai quali dipende, tramite le funzioni di forma, la matrice di rigidezza ed il vettore delle forze nodali della struttura. Tali grandezze sono costruite tramite un assemblaggio delle grandezze omonime del singolo elemento finito.

Definizione delle proprietà dell'elemento Il comportamento dell'elemento isolato, si esprime attraverso una relazione del tipo:

$$\mathbf{p} = \mathbf{k} \mathbf{u} \quad (4.2.1)$$

in cui \mathbf{k} rappresenta la matrice delle rigidezze e da cui può differire soltanto per la presenza di un termine noto rappresentativo di carichi eventualmente agenti sull'elemento.

Le proprietà dell'elemento vengono poi trasferite nel riferimento globale con delle opportune leggi di trasformazione.

Assemblaggio. L'operazione ricostituisce la continuità della struttura imponendo la congruenza degli spostamenti in corrispondenza dei nodi degli elementi. In questa fase tali spostamenti sono riferiti tutti allo stesso riferimento risultando sovrapponibili e l'assemblaggio, viene realizzato con una procedura di identificazione effettuata automaticamente che provvede anche all'eliminazione degli spostamenti impediti dai vincoli esterni (o all'imposizione di cedimenti vincolari, se diversi da zero).

Calcolo della soluzione. Ad assemblaggio effettuato, le equazioni risolventi si presentano, nel caso lineare, nella forma:

$$\mathbf{P} = \mathbf{K} \mathbf{U} \quad (4.2.2)$$

nella quale la matrice delle rigidezze \mathbf{K} si presenta simmetrica e definita positiva. Noti gli spostamenti nodali \mathbf{U} della struttura è possibile calcolare le deformazioni e quindi, tramite il legame costitutivo del materiale, gli sforzi locali.

In fine è da tenere presente che gli sforzi sono proporzionali alle derivate degli spostamenti e quindi la loro precisione è ridotta dall'operazione di derivazione.

4.3 Forze nodali

Si consideri un continuo discretizzato , come quello rappresentato in fig. 3.3:

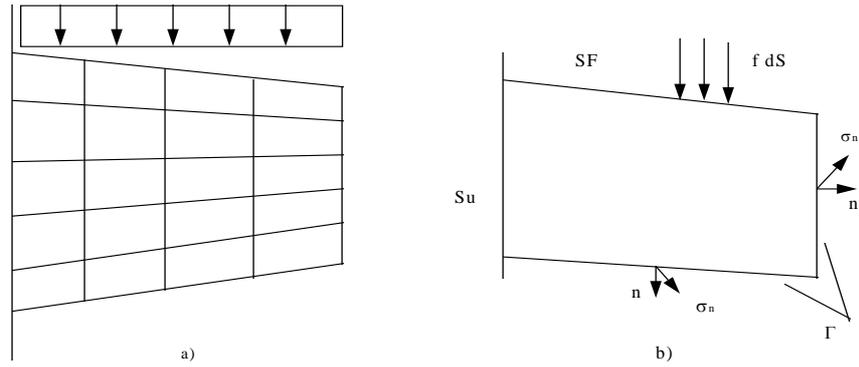


Figura 4.3 Continuo discretizzato

Nel caso più generale, il suo contorno si presenta suddiviso in una prima parte S_u , appartenente alla superficie vincolata della struttura di cui si conoscono gli spostamenti; la seconda S_f che appartiene al contorno caricato soggetta a tensioni superficiali \mathbf{f} note; infine una terza, che chiamiamo S_c , che costituisce l'interfaccia con gli elementi adiacenti. Su quest'ultima sono incogniti sia gli spostamenti che le tensioni costituite dalle componenti vettoriali $\boldsymbol{\sigma}_n$ di sforzo sulla giacitura identificata dalla normale uscente da S_c . E' chiaro che per un elemento interno, completamente circondato da altri, il contorno è esclusivamente di questo tipo.

Attribuiamo all'elemento una variazione virtuale di spostamento $\delta \mathbf{s}$ che generi $\delta \boldsymbol{\varepsilon}$.

Indicando con \mathbf{F} le forze di volume e ricordando che è $\delta \mathbf{s} = 0$ su S_u , i lavori virtuali interno ed esterno si scrivono:

$$\mathbf{L}_e = \int_V \mathbf{F}^t \cdot \delta \mathbf{s} dV + \int_{S_f} \mathbf{f}^t \cdot \delta \mathbf{s} dS + \int_{S_c} \boldsymbol{\sigma}_n^t \cdot \delta \mathbf{s} dS_c \quad (4.3.1a)$$

$$\mathbf{L}_i = \int_V \boldsymbol{\sigma}_n^t \cdot \delta \boldsymbol{\varepsilon} dV \quad (4.3.1b)$$

La condizione di equilibrio per l'elemento si ottiene imponendo l'uguaglianza tra le (4.3.1) limitatamente alle variazioni virtuali compatibili con il modello di spostamento. Quindi per ogni $\delta \mathbf{u}$ valgono le relazioni:

$$\delta \mathbf{s} = \mathbf{N} \delta \mathbf{u} \quad \delta \boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{B} \delta \mathbf{u} \quad (4.3.2a, b)$$

Sostituendo queste nelle (4.3.1) otteniamo:

$$L_e = \left\{ \int_V \mathbf{N}^t \cdot \mathbf{F} dV + \int_{S_F} \mathbf{N}^t \cdot \mathbf{f} dS + \int_{S_c} \mathbf{N}^t \cdot \boldsymbol{\sigma}_n dS \right\}^t \delta \mathbf{u} = (p_0 + p)^t \delta \mathbf{u} \quad (4.3.3a)$$

$$\mathbf{L}_i = \left\{ \int_V \mathbf{B}^t \cdot \boldsymbol{\sigma} dV \right\}^t \delta \mathbf{u} \quad (4.3.3b)$$

avendo posto:

$$\mathbf{p} = \int_{S_c} \mathbf{N}^t \cdot \boldsymbol{\sigma}_n dS \quad \mathbf{p}_0 = \int_V \mathbf{N}^t \cdot \mathbf{F} dV + \int_{S_F} \mathbf{N}^t \cdot \mathbf{f} dS \quad (4.3.4a, b)$$

La condizione di equilibrio pertanto si esprime come:

$$\left\{ \mathbf{p}_0 + \mathbf{p} - \int_V \mathbf{B}^t \cdot \boldsymbol{\sigma} dV \right\}^t \delta \mathbf{u} = 0 \quad \forall \delta \mathbf{u} \quad (4.3.5)$$

e richiede quindi che sia:

$$\mathbf{p} = \int_V \mathbf{B}^t \cdot \boldsymbol{\sigma} dV - \mathbf{p}_0 \quad (4.3.6)$$

I vettori definiti dalle (4.3.4) sono noti come *forze nodali* e le loro componenti sono le quantità statiche associate agli spostamenti nodali per mezzo del modello cinematico. In particolare, \mathbf{p}_0 è il vettore noto delle forze nodali equivalenti ai carichi esterni applicati sull'elemento, mentre \mathbf{p} rappresenta il contributo delle tensioni all'interfaccia con gli elementi adiacenti. Tali forze sono *equivalenti* alle azioni

effettivamente presenti, cioè è possibile esprimere in termini di esse il lavoro virtuale esterno sull'elemento per ogni variazione di spostamento concessa dal modello.

4.4 Assemblaggio degli elementi

In questa fase si ricostruisce la continuità della struttura imponendo quella degli spostamenti nodali. Si consideri un possibile schema costituito da N elementi finiti e diciamo R il numero di nodi una volta che sono stati interconnessi.

La configurazione che questo schema può assumere è governata dagli spostamenti \mathbf{U} di tali nodi, riferiti al sistema di assi della struttura (\mathbf{U} è un vettore che contiene tanti elementi quanti sono gli spostamenti del singolo nodo moltiplicato per il numero di nodi totale, considerando anche quelli vincolati). Il generico elemento e , considerato isolatamente, ha m componenti di spostamento nodale, che sono elementi del vettore \mathbf{u}_e e comunque definite nel riferimento globale una volta effettuata la trasformazione precedentemente descritta.

Il processo continua con l'identificazione delle componenti di spostamento dei singoli elementi con le corrispondenti nella struttura assemblata. In generale si può scrivere

$$\mathbf{U} = \{U_1^t \quad \dots \quad U_J^t \quad \dots \quad U_R^t\} \quad \mathbf{u}_e = \{u_{e1}^t \quad \dots \quad u_{ej}^t \quad \dots \quad u_{er}^t\} \quad (4.4.1)$$

in cui il vettore \mathbf{U} ha per elementi i trasposti dei vettori che contengono le componenti di spostamento del generico nodo della struttura (lo stesso dicasi per il singolo elemento). Quindi con tali posizioni posso scrivere

$$\mathbf{u}_e = \mathbf{L}_e \mathbf{U} \quad (e = 1, \dots, N) \quad (4.4.2)$$

o meglio esplicitando:

$$\left\{ \begin{array}{c} \mathbf{u}_1 \\ \mathbf{u}_2 \\ \dots \\ \mathbf{u}_r \\ \dots \\ \mathbf{u}_e \end{array} \right\} = \left[\begin{array}{cccccc} \cdot & \cdot & \mathbf{I} & \cdot & \cdot & \\ \cdot & \mathbf{I} & \cdot & \cdot & \mathbf{I} & \\ \cdot & \mathbf{I} & \cdot & \cdot & \cdot & \\ \cdot & \cdot & \cdot & \mathbf{I} & \cdot & \\ \cdot & \mathbf{I} & \cdot & \cdot & \cdot & \end{array} \right] \left\{ \begin{array}{c} \mathbf{U}_1 \\ \mathbf{U}_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \mathbf{U}_R \end{array} \right\} \quad (4.4.3)$$

dove \mathbf{u}_r è il vettore degli spostamenti del nodo r dell'elemento e ; la corrispondenza con il vettore \mathbf{U}_R avviene tramite matrici identità \mathbf{I} che hanno tante righe e tante colonne quante sono le componenti di spostamento del generico nodo. Le matrici complessive \mathbf{L}_e sono note come *matrici di connettività*.

Introducendo le (4.4.2) nelle (4.4.3), le espressioni per spostamenti e deformazioni locali divengono:

$$\mathbf{s}_e(\mathbf{x}) = \mathbf{N}(\mathbf{x}) \mathbf{L}_e \mathbf{U} \quad \boldsymbol{\varepsilon}_e(\mathbf{x}) = \mathbf{B}(\mathbf{x}) \mathbf{L}_e \mathbf{U} \quad (e = 1, \dots, N) \quad (4.4.4a, b)$$

Dobbiamo ricordarci che tali spostamenti nodali non tengono conto della presenza dei vincoli. E' possibile eliminare da \mathbf{U} le componenti di spostamento relative ai vincoli fissi, a patto di non considerare le colonne corrispondenti ai gradi di libertà vincolati nelle matrici di connettività \mathbf{L}_e . Dopo tale operazione le (4.4.2) esprimeranno gli spostamenti e le deformazioni locali delle sole componenti libere. La presenza di cedimenti vincolari si tradurrà in spostamenti noti per i nodi vincolati.

Il principio dei lavori virtuali richiede che:

$$\sum_{e=1}^N \mathbf{p}_e^t \cdot \delta \mathbf{U}_e = 0 \quad \forall \delta \mathbf{U}, \delta \mathbf{u}_e = \mathbf{L}_e \delta \mathbf{U} \quad (4.4.5)$$

dove le \mathbf{p}_e sono le forze nodali. Nella relazione espressa, al primo membro c'è il contributo dei singoli elementi, espresso in termini di variabili nodali e sommato su tutti gli elementi. Dalla (4.4.5) consegue che:

$$\sum_{e=1}^N \mathbf{L}_e^t \mathbf{p}_e = 0 \quad (4.4.6)$$

Definiamo il vettore delle *forze nodali equivalenti* ai carichi come:

$$\mathbf{P}_0 = \sum_{e=1}^N \mathbf{L}_e^t \mathbf{p}_{0e} \quad (4.4.7)$$

Sostituendo nella (4.4.6) l'espressione delle \mathbf{p}_e si ottiene l'equazione di equilibrio per lo schema discreto che è:

$$\mathbf{P}_0 = \sum_{e=1}^n \mathbf{L}_e^t \int_{V_e} \mathbf{B}^t(\mathbf{x}) \cdot \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{x}) dV \quad (4.4.8)$$

che ci dà le cosiddette *equazioni di equilibrio nodale*.

Le possibili forze concentrate verranno sommate alle corrispondenti componenti nella (4.4.7) e saranno ovviamente dei termini noti.

4.5 Analisi elastica

Introduciamo ora le relazioni costitutive, considerando il legame elastico lineare, che nella sua forma più generale si esprime come:

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{D}(\boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\varepsilon}_0) + \boldsymbol{\sigma}_0 \quad (4.5.1)$$

dove la \mathbf{D} è la matrice (simmetrica, definita positiva) delle costanti elastiche e $\boldsymbol{\varepsilon}_0$ è il vettore delle deformazioni anelastiche o iniziali eventualmente presenti. Il vettore $\boldsymbol{\sigma}_0$ è noto come *sforzo iniziale*. Sia $\boldsymbol{\varepsilon}_0$ che $\boldsymbol{\sigma}_0$ sono considerati noti.

La (4.5.1) si traduce facilmente in una relazione relativa al comportamento del singolo elemento finito in termini nodali. Ricordando l'espressione $\boldsymbol{\varepsilon}$ è e tenendo conto della formula per \mathbf{p} si scriverà:

$$\mathbf{p} = \left[\int_V \mathbf{B}^t \cdot \mathbf{D} \cdot \mathbf{B} \, dV \right] \mathbf{u} - \left[\int_V \mathbf{B}^t (\mathbf{D}\boldsymbol{\varepsilon}_0 - \boldsymbol{\sigma}_0) \, dV \right] - \mathbf{p}_0 \quad (4.5.2)$$

La matrice simmetrica:

$$\mathbf{k} = \left[\int_V \mathbf{B}^t \cdot \mathbf{D} \cdot \mathbf{B} \, dV \right] \quad (4.5.3)$$

è nota come *rigidezza elastica* dell'elemento finito. Il vettore:

$$\mathbf{p}_{\varepsilon_0} = \left[\int_V \mathbf{B}^t (\mathbf{D}\boldsymbol{\varepsilon}_0 - \boldsymbol{\sigma}_0) \, dV \right] \quad (4.5.4)$$

definisce invece le forze nodali equivalenti a deformazioni e sforzi iniziali. In definitiva si può scrivere la (4.5.2) come:

$$\mathbf{p} = \mathbf{k}\mathbf{u} - (\mathbf{p}_0 + \mathbf{p}_{\varepsilon_0}) \quad (4.5.5)$$

in tale espressione compare un termine noto, costituito dalle forze nodali equivalenti, dove per introdurre la problematica si omettevano i carichi applicati e gli effetti anelastici iniziali.

4.6 Assemblaggio e soluzione

Introdotta la relazione di connettività nella (4.5.5) si ottiene per ogni elemento l'espressione:

$$\mathbf{p}_e = \mathbf{k}_e \mathbf{L}_e \mathbf{U} - (\mathbf{p}_{0e} + \mathbf{p}_{\varepsilon_0 e}) \quad e = 1, \dots, N \quad (4.6.1)$$

L'equazione di equilibrio nodale fornisce la relazione:

$$\sum_{e=1}^N \mathbf{L}_e^t \mathbf{k}_e \mathbf{L}_e \cdot \mathbf{U} - \sum_{e=1}^N \mathbf{L}_e^t (\mathbf{p}_{0e} + \mathbf{p}_{\varepsilon_0 e}) = 0 \quad (4.6.2)$$

Ponendo

$$\mathbf{K} = \sum_{e=1}^N \mathbf{L}_e^t \mathbf{k}_e \mathbf{L}_e \quad \mathbf{P} = \sum_{e=1}^N \mathbf{L}_e^t (\mathbf{p}_{0e} + \mathbf{p}_{\varepsilon_0 e}) \quad (4.6.3a, b)$$

e si scrive:

$$\mathbf{K} \mathbf{U} = \mathbf{P} \quad (4.6.4)$$

Le (4.6.3) definiscono, rispettivamente, la matrice di rigidità elastica della struttura e il vettore delle forze nodali equivalente ai carichi e alle deformazioni (e/o sforzi) iniziali. In assenza di queste ultime, \mathbf{P} coincide con l'espressione (4.5.7) di \mathbf{P}_0 .

La matrice \mathbf{K} è simmetrica come lo sono le \mathbf{k}_e di ogni elemento.

L'assemblaggio elimina la possibilità di spostamenti rigidi relativi tra gli elementi; le singularità ad essi associati sono rimosse e possono esserci solo quelle dovute a cinematici dello schema discreto nel suo complesso.

La modellazione introdotta ha condotto alla fine ad un sistema algebrico lineare che nei casi realistici è di dimensioni notevoli. Quindi l'efficienza del metodo a elementi finiti è legata certamente agli algoritmi necessari a risolvere tali sistemi,

inoltre, l'onere computazionale è percentualmente significativo rispetto a quello richiesto dalla soluzione globale del problema elastico. Tale peso cresce notevolmente in presenza di non linearità di qualunque tipo. In ogni caso è possibile risolvere problemi di ogni tipo che altrimenti non potremmo affrontare con approcci tradizionali.

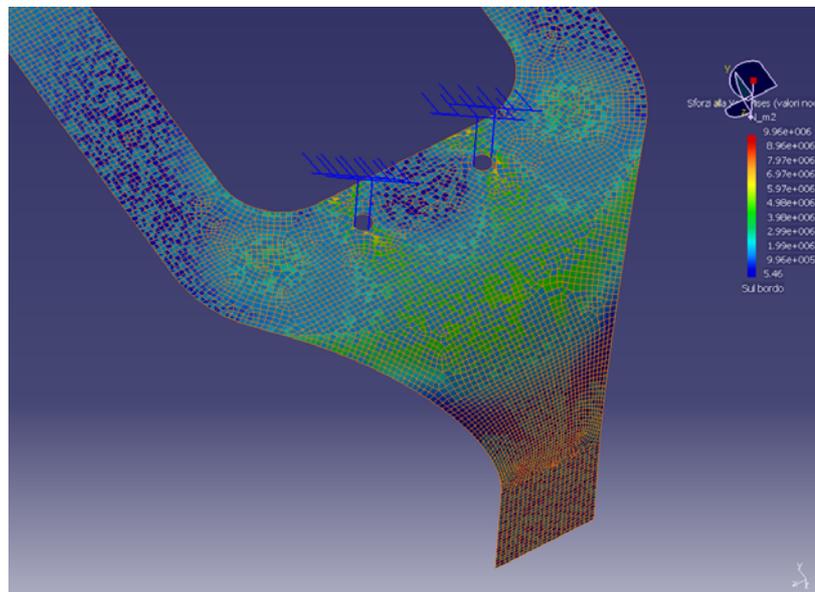
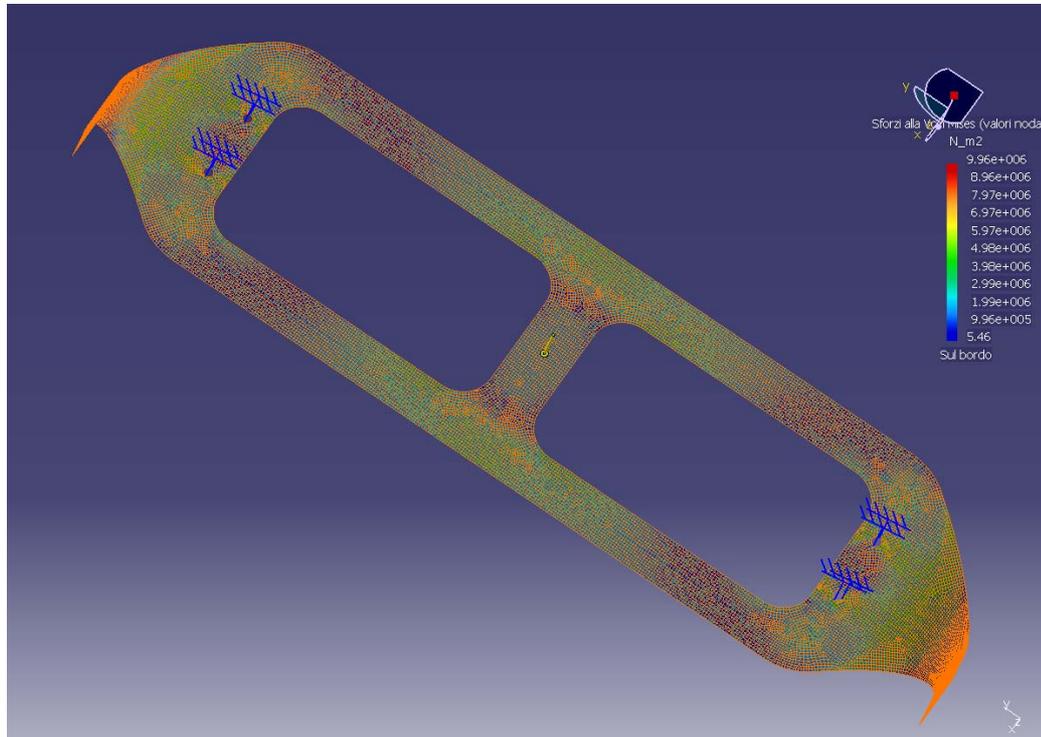
La conoscenza dei valori nodali U è sufficiente a determinare il campo puntuale degli spostamenti e delle deformazioni. La ricostruzione dello stato tensionale presenta bassi livelli di precisione, legati al modello cinematico adottato che rende la rappresentazione dello stato di sforzo attendibile solamente in media. Ciò conduce a valori locali poco accurati.

4.7 Analisi agli elementi finiti dell'archetto realizzato

Al fine di valutare in maniera preliminare la risposta dell'archetto progettato alle sollecitazioni di esercizio si è ritenuto opportuno effettuare un'analisi agli elementi finiti che ci consentisse di analizzare il comportamento teorico del pezzo e di determinare la freccia determinata dall'applicazione del carico di esercizio

Per effettuare la prova agli elementi finiti è stato prima realizzato un modello 3D dell'archetto utilizzando il software "*Catia R14*", l'analisi agli elementi finiti è stata quindi effettuata con il software "*SimDesigner for CATIA V5 2005 R14*".

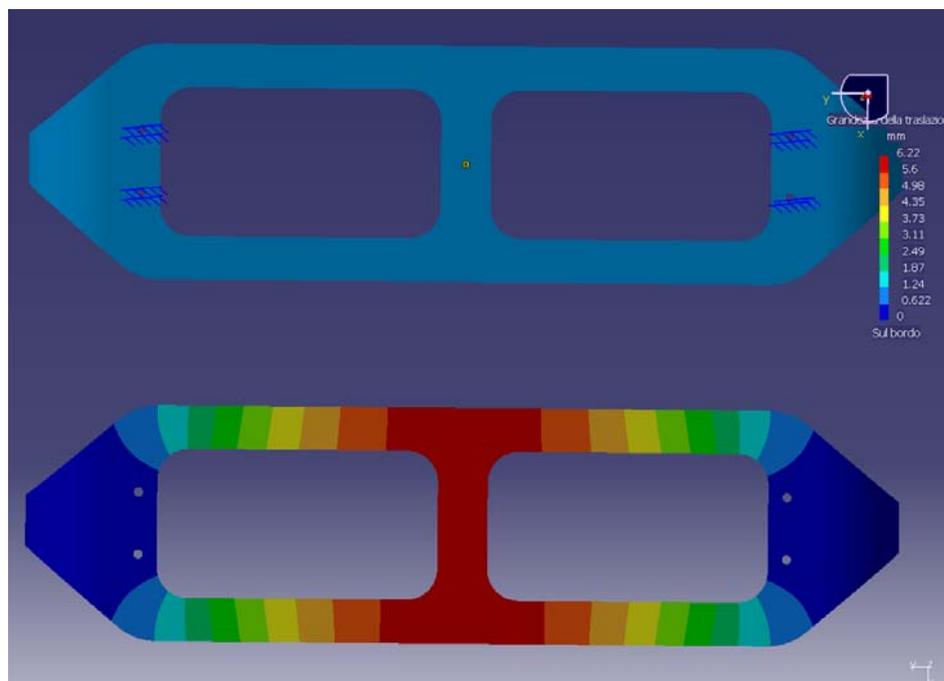
La meshatura del modello è stata realizzata con 19948 elementi di cui 19942 elementi quadrati e 6 elementi triangolari di dimensione compresa tra un massimo di 4.016mm e un minimo di 0.641mm.



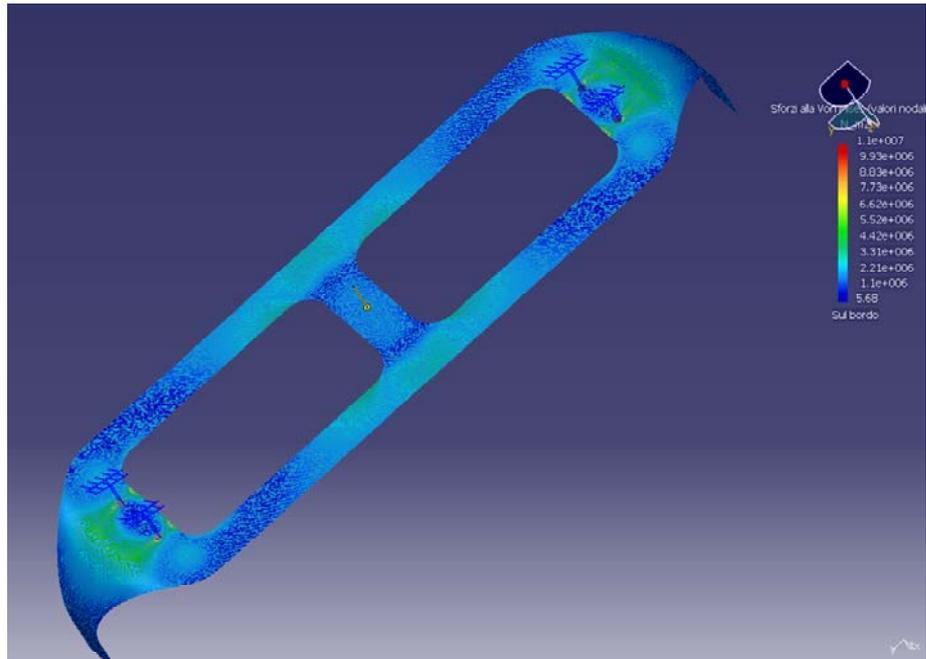
Il pezzo, come si vede dalle immagini, è incastrato nei quattro punti corrispondenti ai fori dove vengono inserite le viti di collegamento con le tasche inferiori che corrispondono quindi con le sospensioni.

Gli incastri utilizzati sono stati considerati privi di cedevolezza, mentre, in realtà il pezzo è collegato ad un sistema di sospensioni che riducono il carico a cui è sottoposto il pezzo, ciò sempre al fine di valutare le condizioni peggiori di esercizio.

Al pezzo è stato applicato quindi un carico distribuito di 360N che, come abbiamo visto in bibliografia risulta il carico di esercizio, e tale carico ha causato una deformazione massima del pezzo nella parte centrale di 6 mm.



Come si può vedere dalle immagini le tensioni presenti in seguito alla prova effettuata non sono superiori ai 10 MPa e non sono quindi tali da inficiare le proprietà meccaniche del pezzo.



In seguito al buon esito di tale prova, si è passati alla fase di realizzazione del pezzo.

Capitolo 5

Evoluzione del nuovo Archetto: studio dell'impacchettamento

5.1 Introduzione

Siamo ora giunti, sulla base delle esperienze precedenti, alla realizzazione dell'archetto in materiale composito attraverso la tecnologia RIFT, che sia quanto più vicino possibile al modello teorico visto con l'analisi FEM, in modo da poter fare, successivamente, un confronto tra i dati teorici, ricavati da quest'ultimo, e quelli sperimentali. A differenza del prototipo realizzato in precedenza, questo nuovo prototipo ha come caratteristica principale la continuità tra gli strati inferiori al core e quelli superiori, e cioè gli strati di fibre partono da sotto (a contatto con lo stampo) e avvolgono il core (in poliuretano). Si vuole realizzare una struttura simmetrica con due pelli esterne, ognuna costituita da 8 strati di materiale orientati a $0^\circ/90^\circ/\pm 45^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ/0^\circ$ con uno spessore singolo di 0,313mm per un totale di 2,5mm per lamina e con un **CORE** di spessore pari a 15mm.

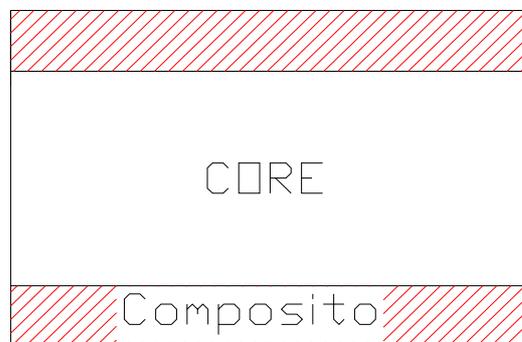


Figura 1-5 Struttura Sandwich

Una volta definito il numero e la sequenza dei vari strati di fibre

(0,90,+45,-45,-45,+45,90,0) il primo problema da risolvere è stato quello di stabilire la disposizione delle fibre nella preforma. Vista la particolare geometria dello stampo è risultato impossibile realizzare ogni strato con un unico pezzo di fibre, capace di avvolgere completamente il core.

Inoltre, dalla necessità di evitare che si creassero zone in cui ci sia mancanza di fibre (che determina una scarsa resistenza del prototipo), sovrapposizioni di più pezzi nello stesso punto (che danno luogo alla presenza di ingrossamento), pezzi piccoli (per evitare che si spostassero durante la stratificazione), è nata l'esigenza di sezionare l'area dello stampo in più parti e quindi di conseguenza ogni strato è formato da più pezzi. Ciascun lembo del pezzo di fibre deve congiungersi con quello adiacente senza sovrapporsi. Risulta chiaro da questa prima analisi, come le difficoltà presentatosi sono state molteplici. Inizialmente è stato utile schematizzare il tutto con dei disegni realizzati al CAD per un primo approccio teorico.

Delle diverse soluzioni quella che consente di avere migliori risultati è schematizzata in fig. 2-5

Legenda

LAYER:

NERO = CORE

ROSSO = FIBRE A 0°

VERDE = “ A 90°

BLE = “ A $+45^\circ$

VIOLA = “ A -45°

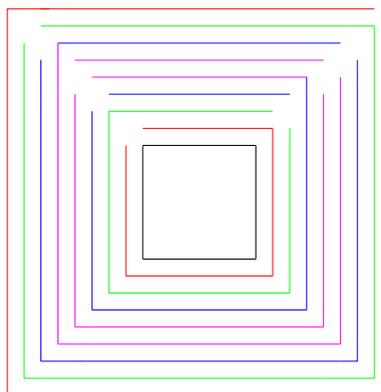


Figura 2-5 Avvolgimento

In questa figura si vede che le fibre terminano sul core, alternativamente, prima da un lato e poi dall'altro dello stampo, questo vale per gli strati a 0° e 90° e non sempre per $\pm 45^\circ$. L'obiettivo principale è quello di evitare la presenza di discontinuità nello stesso piano della sezione ortogonale alla base dello stampo. Mentre per lo strato a 0° e 90° è possibile realizzare pezzi di fibre che avvolgono completamente il CORE, come si vede anche nella fig. 2-5, il problema è nato quando si copriva il poliuretano con le fibre a $\pm 45^\circ$, e cioè mentre la parte inferiore e laterale era ricoperto con fibre aventi direzione $+45^\circ$, la parte superiore, appartenente sempre allo stesso pezzo di fibre, diventava -45° (come si vede dalla fig. 2-4). Lo stesso vale per le fibre a -45° , che diventano $+45^\circ$ quando ricoprono la parte superiore del poliuretano. Allora, per lo strato a $+45^\circ$ si è fatto in modo che quando il pezzo di fibra diventa -45° , viene utilizzato per lo strato successivo e sopra il core vengono inseriti pezzi di fibre a $+45^\circ$. Lo stesso discorso vale per lo strato a -45° . Essendo vincolati alla necessità di realizzare tanti pezzi di fibre, con diverse e in alcuni casi particolari geometrie (pezzi con piccole alette e con grandi curvature), si è

scelto un particolare tessuto bi-direzionale, bilanciato a $0/90^\circ$ con grammatura di 290 g/m^2 tipo web, termoincollato con un sottile film di colla, avente $h=50\text{cm}$, armatura tela in roving di vetro E-CR Owens Corning T 30 Advantex TM 111 A, prodotto dalla “Dalla Betta”, che si presta molto bene al taglio, lungo ogni direzione in quanto le fibre sono incollate tra loro: si eviteranno in questo modo problemi di deterioramento lungo i bordi e vista la buona consistenza non si avranno problemi nelle sezioni più deboli che potrebbero danneggiarsi durante le fasi di lavorazione.

5.2 Impacchettamento

Prima di passare al taglio delle fibre si è ritenuto opportuno realizzare delle “dime” di cartone colorate, necessarie per gli n strati: basterà così distenderle sul materiale per poter tracciare il profilo che interessa, e verificare se tale impacchettamento secondo la sequenza desiderata risulta praticamente realizzabile. Tale operazione è possibile vederla nelle successive foto(simulazione della stratificazione):



strato a $0^\circ (=90^\circ)$

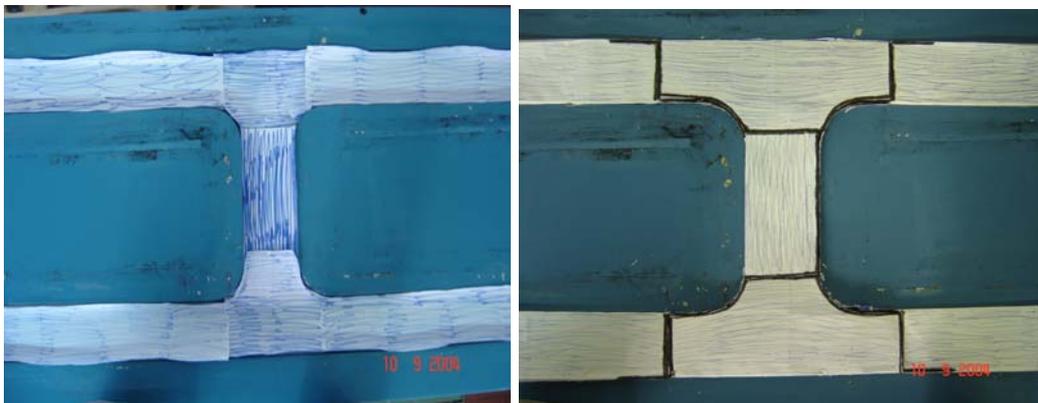
strato a -45°



strato a $0^\circ (=90^\circ)$

strato- $45^\circ (= +45^\circ)$ inf.

strato- $45^\circ (= +45^\circ)$ sup.



strato inferiore a $+45^\circ$

strato superiore a $+45^\circ$

successivo a -45°

è il -45° che diventa $+45^\circ$

Nelle foto precedenti il colore nero sulle dime indica dove chiude quest' ultima e dove si congiungono, in modo tale che nel successivo strato la chiusura avverrà dall'altro lato dello stampo(per alcuni pezzi) e il congiungersi delle fibre sarà spostato di qualche cm rispetto allo strato precedente. Nella foto dello strato a -45° si vede che sono stati inseriti pezzi di fibre sul core, mentre gli altri a lato(appartenenti sempre allo stesso strato)serviranno per lo strato successivo(strato superiore a $+45^\circ$).

In effetti, il numero totale di pezzi è 98. Sotto riportiamo in modo dettagliato la quantità di pezzi in corrispondenza di ogni strato.

n° di strati inferiori e sup. al core	Disposizione	n° di pezzi
1	0°	11
2	90°	11
3	$+45^\circ$	16
4	-45°	11
5	-45°	16
6	$+45^\circ$	11
7	90°	11
8	0°	11

Poiché è impensabile avere 98 dime di riferimento, si è preferito determinare un numero minimo di esse rappresentate nelle foto successive(dime base), dove le uniche modifiche da apportare durante il taglio delle fibre, sono la variazione delle dimensioni e cioè aggiungendo e

togliendo diversi cm all'intera dima (escluse le alette), a secondo dello strato(al primo strato aggiungiamo 4 cm ad alcune dime e a quello successivo li togliamo), in

modo che il congiungersi dei vari pezzi non avviene sempre nella stessa sezione, al fine di evitare un indebolimento del prototipo.

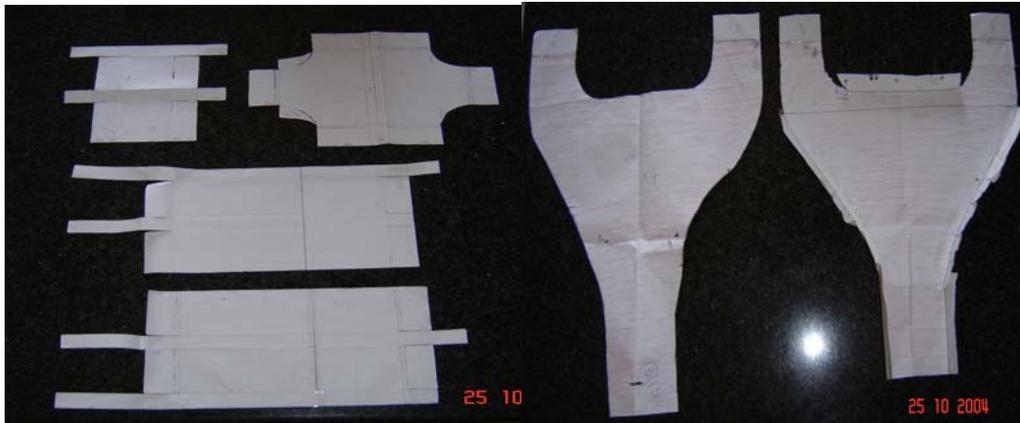
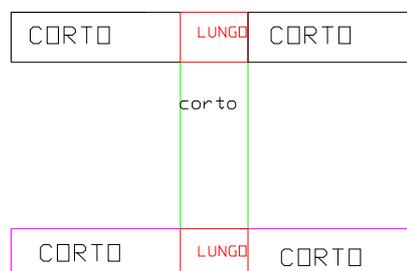


Figura 3-5 Dime Base

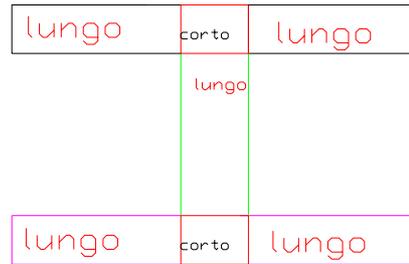
Parte centrale dell'archetto.

Schema delle fibre per lo strato a 0° : la parola corto, significa che dobbiamo tagliare quella dima (rappresentata dal rettangolo nero, viola e verde) considerandola di 4 cm più corta rispetto a quella base .

Mentre la parola lungo significa che le dime rappresentate dal quadrato di colore rosso devono essere più lunghe di 4 cm rispetto alla dima base.



Per lo strato a 90°:



la parola lungo significa che quelle dime devono essere più lunghe di quelle base di 4 cm, viceversa per la parola corto. Analogamente per gli strati successivi.

5.3 Realizzazione del nuovo prototipo in vetroresina

Una volta risolte le problematiche relative alla corretta disposizione delle fibre nello stampo, alla realizzazione delle dime di cartone e infine alla verifica dell'impacchettamento del nuovo prototipo, possiamo passare alla descrizione della preparazione dei materiali, per la realizzazione dell'archetto in materiale composito sempre attraverso la stessa tecnologia. La stessa dima utilizzata per i precedenti archetti è stata impiegata per tagliare il core in poliuretano di spessore 15mm e il distributore inferiore, essendo quello superiore più grande a causa degli angoli di sformo. Una volta ottenuta la forma desiderata del core, con l'aiuto di una fresa, sono state ricavate le scanalature in direzione sia longitudinale che trasversale, per lo stesso motivo detto in precedenza (fig. 4-5). Inoltre quest'ultimo è stato forato in diversi punti per favorire l'impregnazione della parte inferiore del poliuretano. Per

consentire che il core in esame, essendo rigido, potesse assumere la forma curva dello stampo, si è adoperata la stessa tecnica descritta in passato (fig. 5-5).

Sono state poi tagliate le fibre di vetro E bi-direzionale le cui caratteristiche sono già note, prestando attenzione al fatto che man mano che si inseriscono nello stampo, al crescere del numero degli strati, le fibre (nella parte centrale dell'archetto) più vicine al core devono essere sempre più corte rispetto alla dima di partenza per raggiungere l'altezza utile del poliuretano.

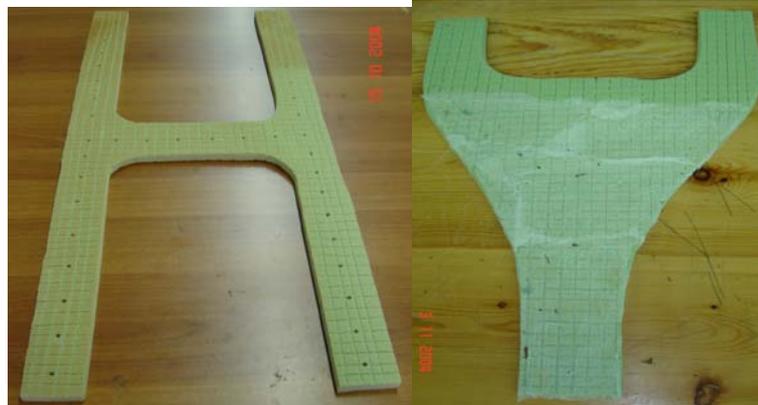


Figura 4-5

Figura 5-5

Mentre per i corni è al contrario e cioè devono essere più lunghe e più larghe della dima di partenza essendo la curvatura degli strati più vicini al core minore. Gli strati dell'archetto considerato sono 16: 8 al di sopra e 8 al di sotto del core, tagliati come da progetto.

La reale distribuzione sarà data dalle fibre disposte nel seguente modo:
0/90/±45/±45/90/0/core/0/90/±45/±45/90/0.

Una volta preparato il materiale è stato possibile cominciare la prova di infusione. E' stato prima di tutto pulito e cerato lo stampo, successivamente sono stati

disposti tre distributori per ogni lato curvo(il primo occupa l'intero corno esclusa la parte centrale dell'archetto, il secondo è una striscia stretta che occupa solo parte dei corni e infine il terzo occupa tutta la sagoma dello stampo), sia al di sotto delle fibre che al di sopra. Quanto detto è possibile vederlo nella fig. 6-5.



fig. 6-5 (1distr.)

2 distributore

3 distributore

Inoltre è stato disposto il peel play e quindi la prima pelle del prototipo costituita da otto strati di fibre, con le modalità descritte precedentemente, come si osserva in fig. 7-4. Per consentire una buona compattazione del prototipo si è incollato ciascun strato con della colla spray, già utilizzata nelle prove precedenti.

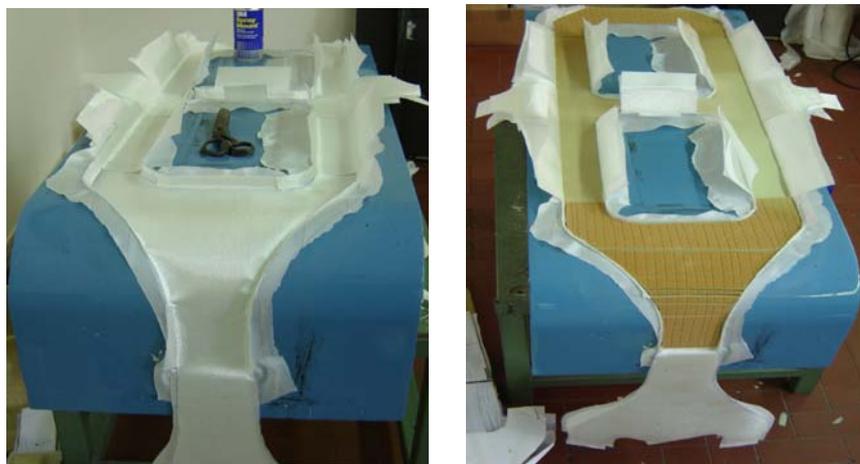


fig. 7-5 Prima pelle di fibre asciutte

A questo punto, è stato disposto il core ed infine la seconda pelle, con il secondo strato di peel play e di distributore.

Effettuata la fase relativa alla disposizione del sacco polimerico, si è fatto il pre-vuoto. Solo dopo aver verificato che la tenuta del sacco risultasse buona si è potuto partire con la vera prova d'impregnazione.

Il processo d'impregnazione delle fibre è proceduto piuttosto velocemente (circa 28 minuti), nelle seguenti fig. 8-5 è possibile vedere l'avanzamento, mentre nella tab.1 sono riportati i tempi d'impregnazione.

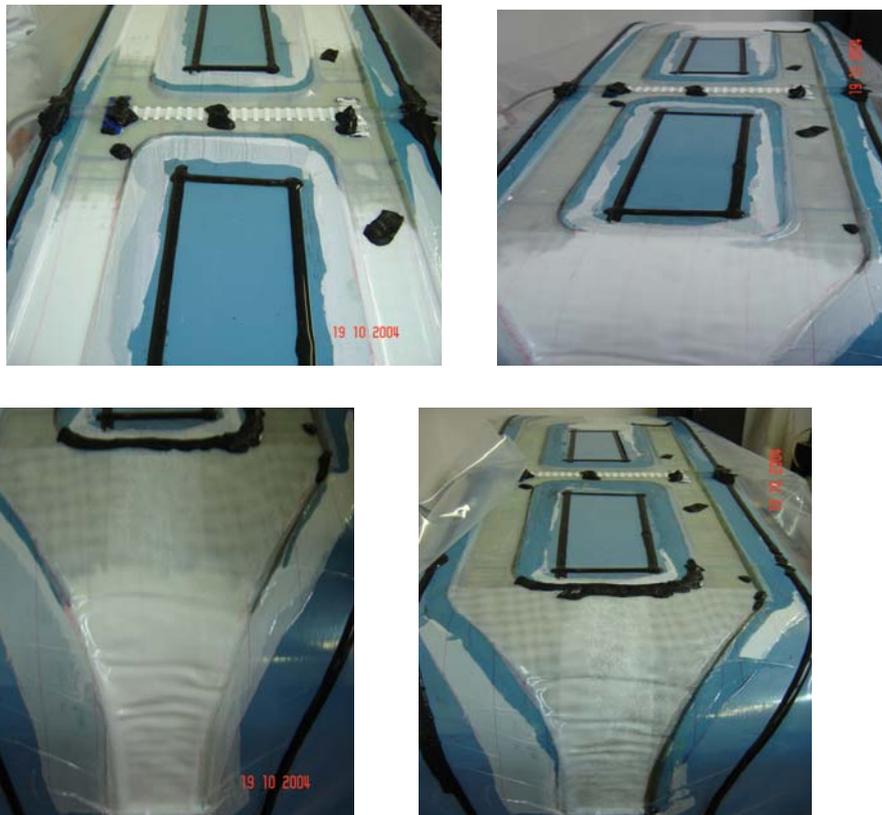


fig. 8-5 Fasi di impregnazione

Spazio percorso (per la parte centrale) in cm	Tempo impiegato (in sec.)	Spazio percorso (per il corno) in cm	Tempo impiegato (in sec.)
5	28"	5	Non uniforme
10	52"	10	"
15	1'70"	15	"
20	2'37"	20	"
25	3'	25	"
30	3'23"	30	11'50"
35	3'54"	35	13'38"
48	6'52"	48	21'

Tab. 1

Una volta sformato il pezzo è stato possibile analizzare l'esito del processo d'impregnazione (fig. 9-5)

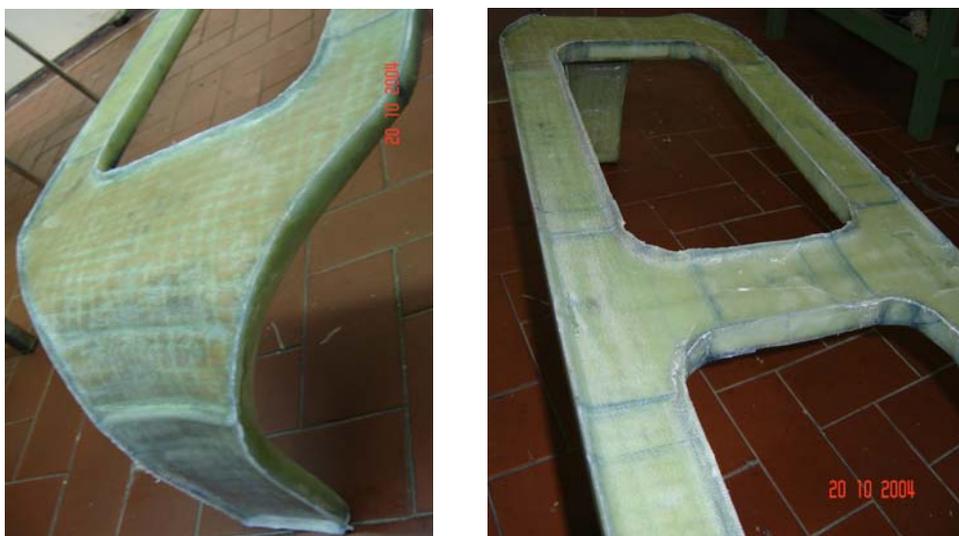


fig. 9-5 Difetti del prototipo

Sono stati individuati i punti critici con lo scopo di determinare le azioni correttive da mettere in pratica nel prosieguo del lavoro di tesi.

I rigonfiamenti riscontrati in corrispondenza dei corni laterali (fig. 9-4) sono probabilmente dovuti ad un' imprecisa modalità del taglio delle fibre e del poliuretano.

Lungo tutto l'archetto si è formato un "dente" fatto di resina e fibre, il che denota un taglio troppo lungo delle fibre. Accanto a questi riscontri negativi c'è da dire che l'archetto è risultato completamente impregnato anche in corrispondenza delle zone più critiche ed ha mostrato una discreta finitura laterale.

Il lavoro di tesi è quindi proseguito con l'apporto di cambiamenti indotti dalla precedente esperienza e descritti qui di seguito.

E' stato effettuato un diverso taglio degli strati delle fibre e del poliuretano, e cioè leggermente più corti rispetto ai precedenti.

Mentre per il poliuretano sono state praticate delle incisioni parallele più fitte. Per quanto riguarda il corno laterale, la dima per lo strato 0° e 90° è stata modificata e resa identica a quella utilizzata per lo strato a $\pm 45^\circ$ in modo da ridurre lo sfrido (vista la particolare geometria) ed eliminare i rigonfiamenti riscontrati sui corni laterali (anche sulla base), quanto detto è visibile nelle fig. 10-4. Come nelle prove precedenti il sistema d'iniezione è costituito da due serbatoi in cui è contenuta, a pressione atmosferica, la resina preventivamente mescolata con l'indurente e due condotti che collegano i serbatoi allo stampo. Inoltre ci sono due aspirazioni, ciascuna a lato di ogni corno dell'archetto e due valvole di sicurezza che impediscono alla resina in eccesso di arrivare alla pompa.



fig. 10-5 Modifica della dima

Una volta disposto tutto l'occorrente è cominciata la prova e il processo d'impregnazione è visibile nelle fig. 11-5.



fig. 11-5 Fasi di impregnazione

Dall'analisi del prototipo è risultato che nel complesso si sono risolti molti problemi (fig. 12-5).

Infatti: le fibre ed il poliuretano sono sicuramente stati tagliati meglio in quanto non si è verificata la formazione di nessun rigonfiamento.

La differenza di taglio risulta evidente anche confrontando le fig. 10-4 con le fig. 7-5. La presenza del “dente” sulla superficie del pantografo è notevolmente diminuita. Non sono state riscontrate zone non impregnate e si è avuta una migliore finitura laterale proprio per l'accorgimento praticato, e cioè di inserire la preforma nello stampo senza alcun eccesso di rinforzo. Infine si è avuto lo schiacciamento dei tubi di aspirazione (fig. 13-5).



fig. 12-5 Risultati dell'impregnazione

Il tempo d'impregnazione è risultato leggermente più basso e cioè pari a 26 minuti.



fig. 13-5 Tubo di aspirazione

Le azioni correttive da mettere in pratica nel prosieguo del lavoro di tesi sono:

- 1) Perfezionare l'inserimento della preforma nello stampo al fine di ottenere una migliore finitura superficiale ed eliminazione totale del dente di rinforzo;
- 2) Modifica del sistema di aspirazione, che prevede un tubo di $Di=8\text{mm}$ di gomma, con un tubo più rigido dello stesso diametro, che eviti lo schiacciamento durante tutto il tempo della prova, onde evitare rallentamenti del processo di impregnazione.
- 3) Migliorare il taglio del corno in poliuretano (mediante l'inserimento di piccoli pezzi dello stesso materiale nelle scanalature, che si formano quando esso si adatta alla curvatura dello stampo, provocate da incisioni parallele.

La disposizione delle fibre, dei distributori, per quest' ultima prova, è stata uguale alle precedenti (fig. 14-5).



fig. 14-5 Seconda pelle di fibre asciutte

Il processo d'impregnazione è risultato veloce e uniforme, infatti, ha impiegato circa 26 minuti, nelle fig. 15-5 sono riportate le fasi salienti.



fig. 15-5 Fasi di impregnazione

Dall'analisi del prototipo è emerso che l'archetto è risultato completamente impregnato ed ha mostrato una finitura laterale superiore a quella vista nei precedenti pezzi.

Infatti, come si può vedere dalle fig. 16-5 è del tutto scomparsa la presenza del dente lungo tutto il prototipo. Anche il corno non presenta alcun difetto, anzi, grazie alla modifica apportata è presente una curvatura uniforme, dalle successive figure si vede la differenza tra quest'ultimo pezzo e quello precedente. Il nuovo tubo non ha subito nessun schiacciamento durante tutta la prova.

Il vuoto del sacco è risultato essere ottimo anche dopo aver aspettato circa 24 ore, per avere una completa polimerizzazione e questo ha garantito l'assenza di difetti.



fig. 16-5 Archetto Finale

In definitiva è risultato che il peso effettivo del nuovo prototipo è di 3.6 Kg(<4 Kg del precedente) e quindi confrontato con il peso dei 9,5 Kg dell'archetto originale, si ha una riduzione di peso del 62%.

Capitolo 6

Prove sperimentali

6.1 Introduzione alle prove

Dal punto di vista della captazione di corrente, le ferrovie italiane hanno problemi maggiori rispetto alla situazione di numerosi paesi europei. Infatti, la quasi totalità della rete è a 3KV CC, mentre in molti paesi Europei usano lo standard 25KV AC. Il pantografo deve quindi prendere dalla rete correnti di valore molto elevato che raggiungono il valore di 2500A, questo richiede che una maggiore forza di contatto tra pantografo e linea sia mantenuta sulla linea configurata a 3 KV CC, con la conseguenza che il valore ottimo è nell'intervallo 180N-200N (rispetto ai circa 100N richiesti nella linea configurata a 25 KV CA). Inoltre, sulla rete italiana esiste una minore qualità della posa della linea e sono stati documentati casi di differenze fino a 0,5 m di quota della linea tra un palo ed il successivo (su tratti dove transitano treni ad alta velocità). E' evidente dunque l'importanza del problema per il sistema ferroviario italiano.

Nell'interazione pantografo-catenaria a velocità superiori a 200 km/h nascono delle oscillazioni che mettono in pericolo la persistenza del contatto. Gli eventuali distacchi generano una serie di problemi già citati e vanno quindi evitati per quanto possibile.

Il moto del treno induce dei disturbi nell'interazione pantografo-catenaria che sono particolarmente evidenti a velocità superiori a 200 km/h:

- Disturbi di campata, con frequenza verticale di 1–2Hz;
- Disturbi dovuti alla pendinatura, con frequenza verticale 10–20Hz;
- Disturbi dovuti all'oscillazione della linea superiore, con frequenza orizzontale di circa 1Hz (paragonabile alla frequenza di campata ad una velocità di avanzamento di circa 216 km/h;
 - Punti singolari della linea (scambi, gallerie, portali presenti nelle stazioni);
 - Spinte aerodinamiche.

In maniera particolare il moto oscillatorio del filo in direzione orizzontale comporta fenomeni di usura concentrata che possiamo vedere in *fig. 1-5*, tale fenomeno può portare in taluni casi alla completa usura dello strisciante nella zona centrale, comportando così un'usura dell'archetto.

Tale fenomeno è da evitare perché la sostituzione dell'archetto comporterebbe una spesa nettamente superiore a quella 4-3 concernente la sostituzione degli striscianti.

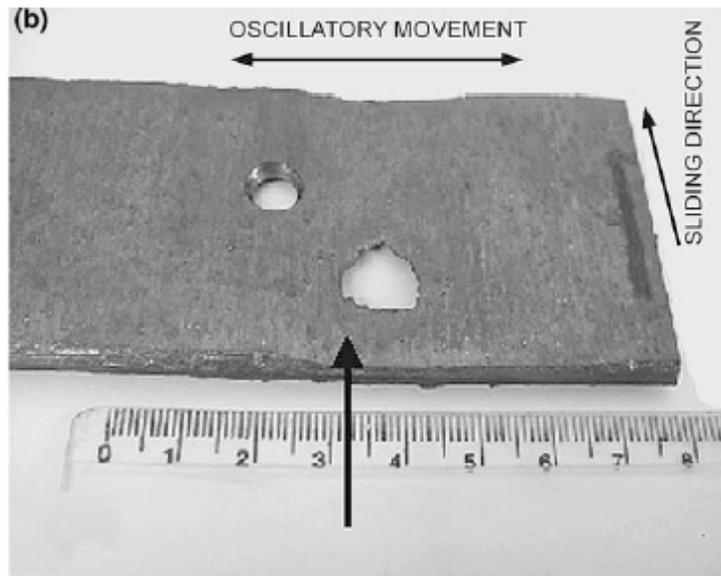


Figura 6-6 Usura dello strisciante

Nell'analisi della bontà di accoppiamento pantografo-catenaria è possibile definire degli indici con cui verificare dei risultati ottenuti in linea.

Per quanto riguarda il fenomeno del distacco, sulla base dell'esperienza maturata si considerano distacchi inferiori a 5 ms poco significativi. Pertanto il sistema di controllo dovrà riuscire ad apprezzare distacchi di durata maggiore. Viene così definito un indice come il rapporto fra la somma dei tempi di distacco ed il periodo totale di osservazione:

$$\text{Distacchi in \%} = \frac{\sum \text{tempideidistacchi}}{\text{Tempodiosservazione}} \times 100$$

Il valore massimo di tale indice generalmente accettato è 0.2 | 0.3 %.

Successivamente, mediante analisi statistica, vengono classificati i distacchi in base alla loro durata.

Per le misure delle forze di contatto, viene definito un indice con la formula $F_m \pm 3\sigma$, dove F_m rappresenta la forza media e σ la sua deviazione standard. Per valori

positivi si ottiene una buona captazione, mentre quelli negativi rappresentano i distacchi.

In realtà apprezzare una buona qualità di accoppiamento pantografo-catenaria vuol dire osservare più parametri contemporaneamente; nello specifico la captazione può considerarsi soddisfacente quando:

- si ottiene la massima corrente con la minima spinta sul filo di contatto;
- si minimizzano i rischi di impatto pantografo-catenaria dovuta al sollevamento del filo di contatto;
- si minimizzano le percentuali dei distacchi;
- si minimizza la temperatura degli striscianti in condizioni operative;
- si contiene l'usura strisciante-filo dovuta agli attriti.

Da tutto ciò si intuisce l'esigenza di una analisi a più parametri, altrimenti si corre il rischio ad esempio di focalizzare l'attenzione sui distacchi trascurando la dinamica delle forze scambiate, sottovalutando così le problematiche legate all'usura degli striscianti e alla sua temperatura di esercizio.

6.2 Prove in bibliografia

Nella ricerca effettuata, per valutare lo stato dell'arte dei numerosi gruppi di ricerca che si occupano dell'interazione pantografo catenaria, si sono prospettate diverse ipotesi, alcune delle quali meritano una breve analisi.

Una prova di notevole interesse è quella effettuata dal politecnico di Milano, in questo caso la strumentazione di prova è costituita da un sistema ruotante che è messo in contatto con l'archetto del pantografo, imponendo allo stesso tutte le diverse sollecitazioni cui è soggetto durante una generica tratta.

La storia di carico, necessaria alla realizzazione della prova, è ottenuta utilizzando dei sensori collocati sopra un treno, che nel percorrere una data tratta è soggetto a determinate sollecitazioni che, registrate dai sensori, serviranno a ricostruire la storia di carico utilizzata in laboratorio per valutare la reazione del pantografo.



Figura 7-6 Banco di prova Politecnico di Milano

Un'altra interessante prova è stata realizzata dal Deutch Bahn AG. Research and Technology Centre (FTZ), Munich, dove per simulare l'interazione tra la linea di contatto e il pantografo si è utilizzato un banco di prova a tre assi separati, costituito da un portale che si può muovere in direzione verticale con un range di un metro e mezzo che simula i lenti cambiamenti del contatto. Una slitta, montata sul portale, si

muove in direzione orizzontale e simula le oscillazioni in tale direzione. Un attuatore dinamico con un range di lavoro dinamico in direzione verticale molto alto è montato sulla slitta orizzontale e un sistema di sospensioni è montato sotto l'attuatore. Questo sistema modella l'interazione pantografo catenaria in modo molto completo.



Figura 8-6 Banco di prova

Di non minore interesse sono le prove realizzate dalla Mer-Mec che, utilizza un sistema di misura dell'interazione del pantografo che può essere installato su qualsiasi veicolo ferroviario. Il sistema acquisisce, in qualsiasi condizione ambientale, vari parametri che possono essere elaborati a bordo ed in-office, allo scopo di rivelare le condizioni del pantografo e della linea di contatto. Il sistema di misura è provvisto di software destinato all'elaborazione in tempo reale dei segnali dei sensori acquisiti.

In ultimo si ritiene importante citare lo studio che stanno portando avanti diversi gruppi di ricerca tra i quali quello dell' università di Pisa e dell' università di

Firenze, che stanno studiando la realizzazione di un pantografo servoasservito. Questo pantografo è fornito di diversi sensori di posizione e temperatura che forniscono dei dati direttamente ad un computer che si trova a bordo della locomotiva e che in funzione di questi parametri regola istantaneamente la forza di contatto, impressa sul pantografo, per mantenerla sempre costante.

La ricerca bibliografica ha anche evidenziato che per il momento nessun gruppo di ricerca sta tentando di risolvere il problema del distacco del pantografo dalla linea realizzando, come nel nostro caso, l'archetto in materiale composito, riducendone in questo modo il peso e quindi la forza d'inerzia.

Mer-Mec

Di notevole supporto nella ricerca bibliografica è stato il materiale fornito dalla mer-mec, di cui andiamo ad analizzare la parte 3 concernente l'analisi delle forze di contatto e alle relative prove effettuate.

Analisi delle forze scambiate pantografo-filo di contatto.

I parametri fondamentali relativi all'analisi delle forze scambiate tra pantografo e filo di contatto sono:

- entità delle forze scambiate
- distribuzione delle forze tra archetto anteriore e posteriore
- fenomeno dei distacchi e quindi degli archi elettrici

- misura del sollevamento dinamico del filo di contatto rispetto alla sua posizione di riposo
- analisi dell'indice della qualità di captazione
- velocità del veicolo.

A tal fine è necessario strumentare il pantografo con delle celle di carico (ponti estensimetrici full bridge) in grado di misurare le forze scambiate, una dinamo tachimetrica per il calcolo dell'altezza del filo di contatto e un sistema di telemetria per la ricezione dei segnali.

In fase di inizio acquisizione, il sistema pneumatico del pantografo verrà impostato per imprimere una forza statica sul filo di contatto di circa 55 N; dopo tale operazione, il veicolo potrà partire e si procederà con l'acquisizione vera e propria. Il valore letto delle forze sarà il contributo della forza statica più quella derivante dalla portanza aerodinamica del pantografo.

La distribuzione delle forze sugli archetti sarà simmetrica in condizioni di altezza del filo costante, mentre quando questo varia si noterà un carico maggiore su un archetto rispetto all'altro.

Il fenomeno del distacco con conseguente arco voltaico potrà essere identificato dalla sommatoria delle forze (su tutte e quattro le celle di carico) che in questo caso sarà prossima allo zero; dal software di analisi è possibile impostare una soglia sotto la quale viene rilevato un distacco.

Per quanto riguarda il sollevamento del filo dovuto al passaggio del pantografo, il test viene effettuato confrontando i dati teorici di altezza della catenaria e quelli

rilevati dal veicolo di misura; eventuali differenze sono da computare al sollevamento del filo dovuto alla forza impressa dal pantografo, verificata soprattutto al centro delle campate dove la tensione del filo è più bassa.

Per l'analisi dell'indice di qualità di captazione, si rimanda al capitolo 1 dove l'argomento è stato trattato in maniera esaustiva.

La velocità del veicolo è un parametro da considerare in ogni analisi perché determina, ad esempio, il contributo aerodinamico nella forza impressa dal pantografo come dal seguente grafico, dove F_s rappresenta la forza statica e F_d quella dinamica.

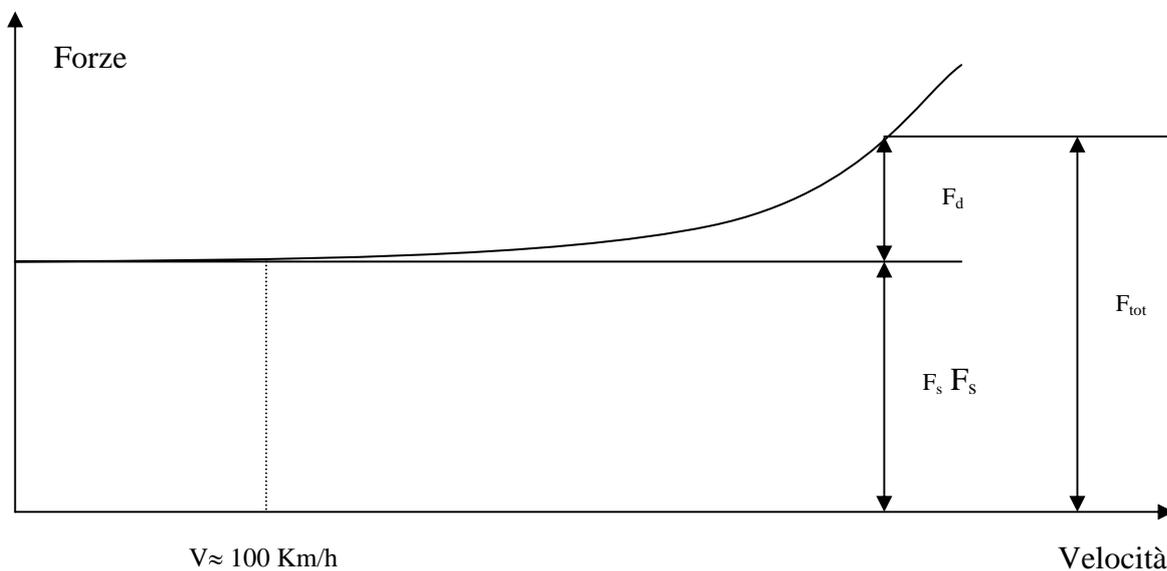


Figura 4-6 Apporto dinamico sulle forze scambiate

Prove effettuate

Una campagna di prove è stata effettuata dove si è analizzato il comportamento del pantografo e quindi dello strisciante in diverse condizioni. Per le analisi dei

parametri acquisiti e le seguenti elaborazioni statiche si è utilizzato il modulo di analisi EVAL 1000.

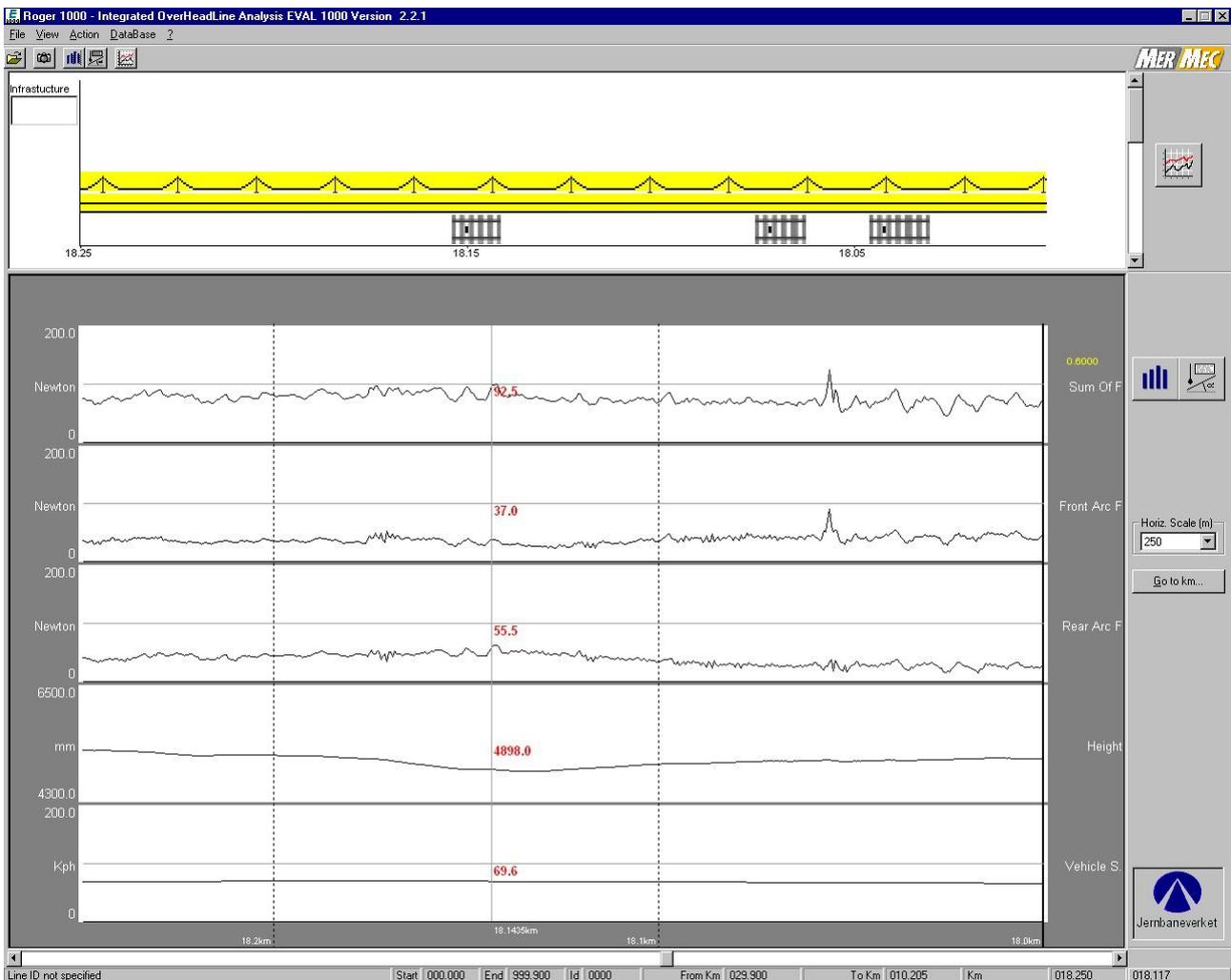


Figura 5-6 Screenshot applicativo EVAL per analisi forze

Come si vede da questo grafico, una diminuzione di altezza del filo di contatto introduce un duplice fenomeno:

- Sull'archetto posteriore viene rilevato un aumento di pressione;
- Sull'archetto anteriore viene rilevato una diminuzione di pressione.

Questo effetto è dovuto alle accelerazioni a cui il pantografo è soggetto.

Discorso analogo può essere riscontrato, quando si ha un aumento di altezza del filo di contatto, come si evince dal seguente grafico:

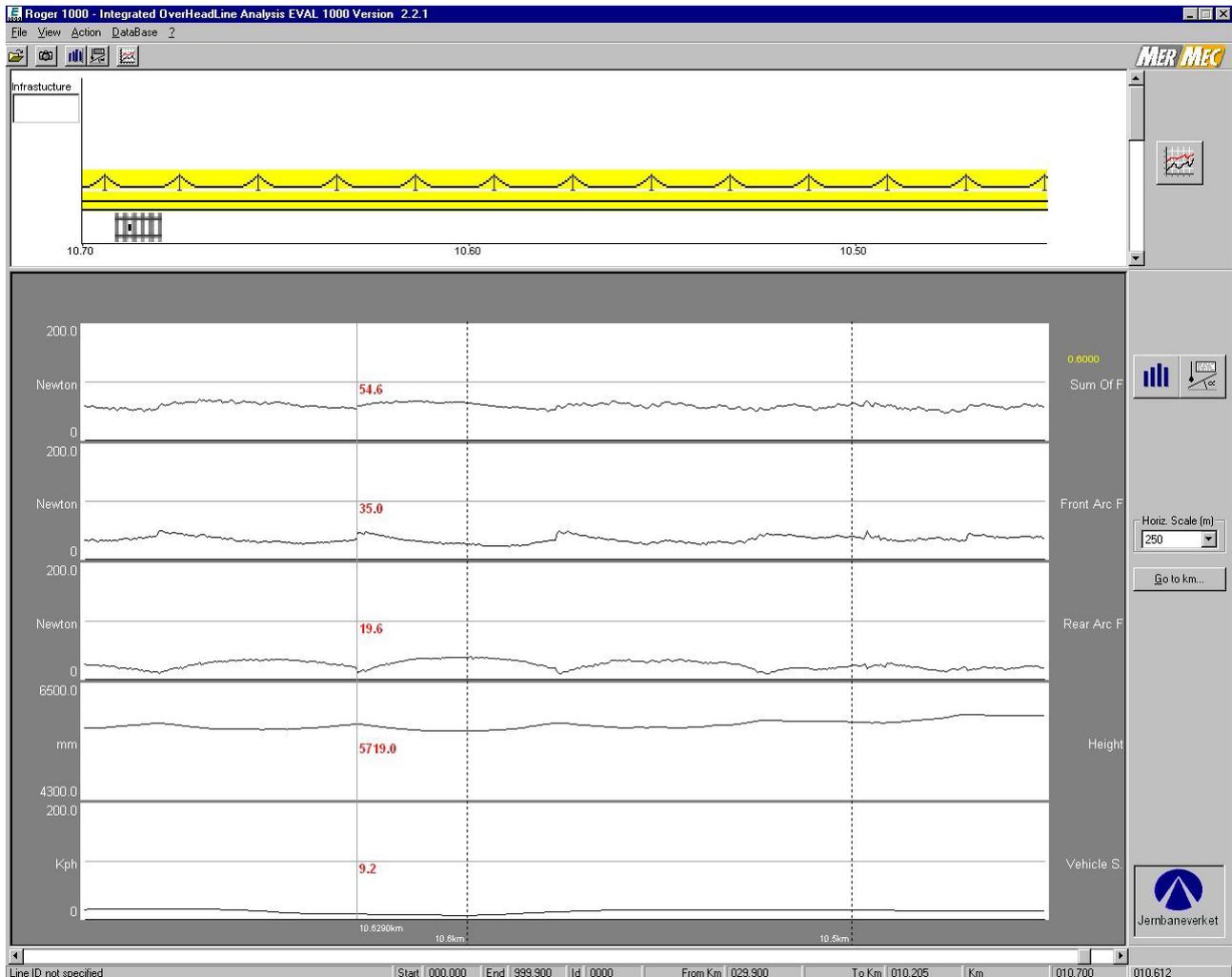


Figura 6-6 Screenshot EVAL per analisi forze

Una funzionalità prevista dal software consiste nell'analisi statistica del tratto acquisito o di una parte di esso.

In pratica:

- vengono prese in esame la somma delle forze scambiate;
- viene calcolato il loro valor medio e deviazione standard (σ);
- viene creato un istogramma raffigurante la distribuzione delle forze;

- vengono calcolate degli indici di qualità di captazione.

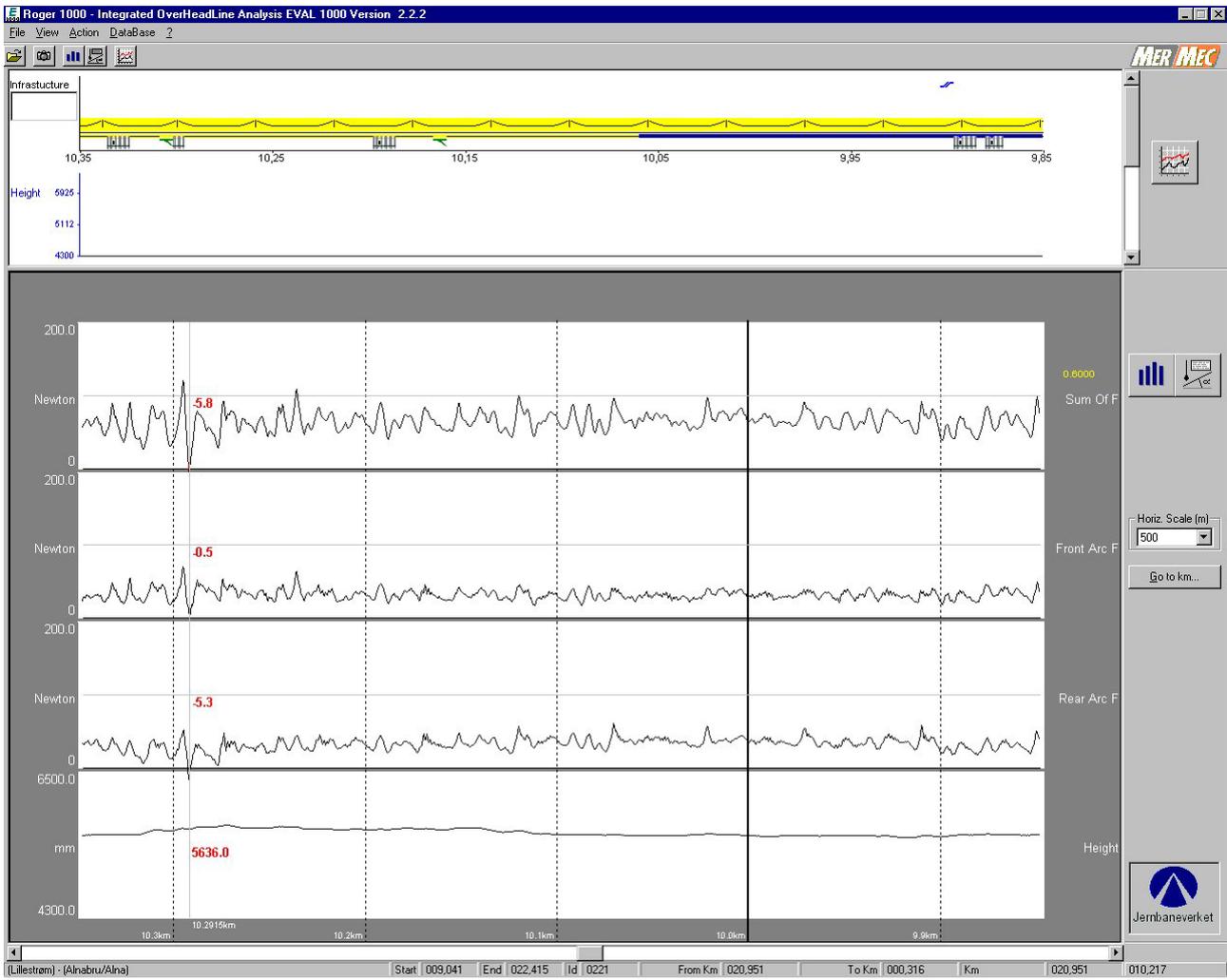


Figura 7-6 Esempio di distacco pantografo

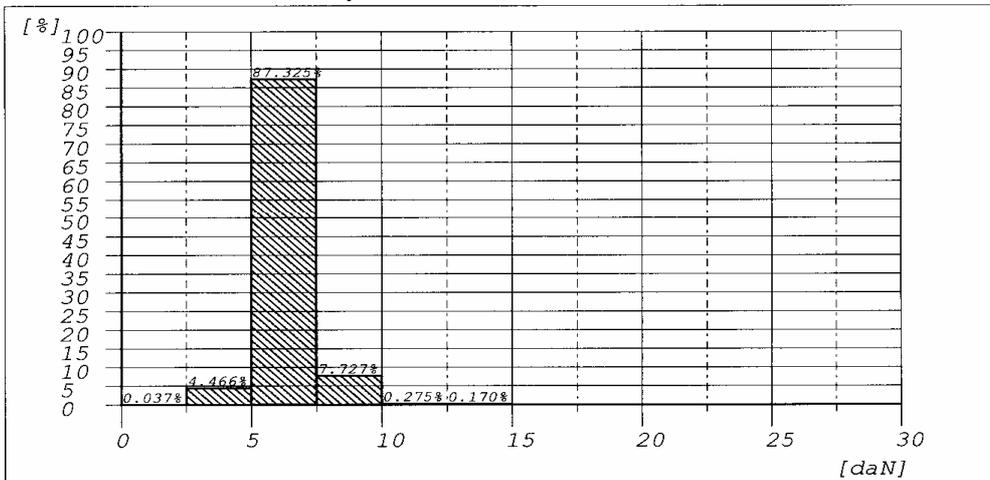
Line Information

Line ID : 0221 Survey Description :Lillestrom-Oslo
 Selected Section From Km : 20.926 To Km : 0.316

Contact Forces Quality Index

Max Value :145.290 N
 Min Value :-5.790 N
 Mean Value (Fm) :63.569 N
 Standard Deviation (Sigma) :9.370 N
 Fm - (3 x Sigma) :35.460 N
 Fm + (3 x Sigma) :91.678 N

Forces Sum Distribution Graph



De-Wiring Quality Index

De-Wiring Total Time :00:00:00.043 [hh:mm:ss:ms]
 Selected Time :00:35:38.461 [hh:mm:ss:ms]
 Quality Index :99.998 %



MER MEC S.p.A. 70043 MONOPOLI (BARI - ITALY) - VIA OBERDAN 70
 TEL. +39 080 8876570 - FAX +39 080 8874028

Figura 5-6 Report sugli indici di qualità delle forze scambiate

Da questo diagramma si evince che il massimo valore della forza di contatto è di 145.290 N, valore che prenderemo a riferimento nella definizione dei parametri di prova.

6.3 Strumentazione di prova

Tutti gli articoli e le pubblicazioni trovati in bibliografia, seppure numerosi, sono relativi nella maggior parte dei casi a prove effettuate sull'intero pantografo. Nel nostro caso, sono state eseguite delle prove di fatica, con una macchina di prova MTS 810(Material Test System), avente una cella di carico di 500KN, al fine di analizzare l'archetto da noi realizzato, che ci consentano di ottenere dei parametri relativi alle caratteristiche meccaniche dello stesso prima e dopo la prova, e di verificare la resistenza strutturale del sistema di collegamento da noi progettato e realizzato.

Prima di parlare dei parametri relativi alle prove che sono state effettuate, è importante descrivere un aspetto non secondario che riguarda la realizzazione di un'apposita strumentazione che ci ha consentito di alloggiare gli archetti, precedentemente realizzati, sulla macchina di prova a fatica presente presso il dipartimento.

Dato che il nostro obiettivo è quello di valutare le caratteristiche dell'archetto, si è ritenuto opportuno realizzare la strumentazione di ancoraggio del pezzo alla macchina completamente rigida, senza la presenza di sospensioni che, pur presenti nella struttura originale, non sono di alcun interesse nella nostra prova, in quanto la valutazione delle proprietà dell'archetto realizzato fornisce risultati più oggettivi senza tenere in considerazione tutte le altre forze relative al sistema di sollevamento originale presente sui pantografi fino ad ora utilizzati.

Prendendo spunto dai progetti del pantografo FS 52-92, abbiamo realizzato due tasche in alluminio alle quali, in condizioni di esercizio, vengono montate le sospensioni, mentre nel nostro caso saranno utilizzate per effettuare il collegamento con la strumentazione di prova. Queste tasche devono quindi essere collegate rigidamente all'archetto e per realizzare questo collegamento si è scelto tra due ipotesi.

Si sarebbe potuto inserire in fase di realizzazione del pezzo una lastra di metallo all'interno dello stesso, alla quale si sarebbero collegate le tasche, ma quest'operazione avrebbe reso ancora più difficile la fase di realizzazione del pezzo che come si è già visto ha presentato notevoli difficoltà anche senza quest'ulteriore complicazione.

Il bloccaggio delle tasche è stato invece ottenuto tramite collegamento bullonato, per realizzare il quale sono state appositamente progettate e realizzate otto boccole, inserite in altrettanti fori effettuati sull'archetto, nelle quali sono stati inseriti i bulloni.

Analizziamo ora punto per punto i diversi elementi costituenti la strumentazione di prova:

- All'archetto sono collegate due tasche in alluminio del peso di 502,6g ciascuna, collocate simmetricamente sull'archetto ad una distanza di 1090mm;

- Le tasche sono bloccate sull'archetto mediante otto viti (quattro per ogni tasca), che sono inserite all'interno d'altrettante boccole anch'esse realizzate in alluminio, ciascuna del peso di 20,1 g, che sono a loro volta inserite ed incollate all'interno di fori realizzati sull'archetto;

Nella *fig. 8-6* è riportato il disegno della tasca, mentre nella *fig. 9-6* è riportata la boccola (realizzata con il tornio parallelo).

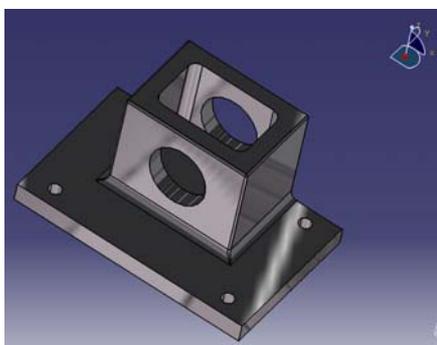


Figura 8-6 Disegno 3D della tasca



Figura 9-6 Boccola in alluminio

Le boccole come si può vedere dalla fotografia hanno la parte superiore di diametro maggiore, in modo da distribuire il carico su una superficie più grande, evitando sollecitazioni concentrate.

Per quanto riguarda invece l'altezza della parte delle boccole a diametro minore, coincide perfettamente con lo spessore dell'archetto, per fare sì che siano le boccole ad essere sollecitate a compressione durante la prova e non l'archetto, la cui resistenza a compressione in tale direzione è nettamente inferiore a quella delle boccole, pertanto se la sollecitazione di compressione non fosse sostenuta dalle

boccole si potrebbe avere danneggiamento dell'archetto che con il passare del tempo potrebbe portare alla rottura dello stesso.

Nella *fig. 10-6* è riportato il collegamento boccole-archetto (vista dall'alto).



Figura 10-6 Collegamento archetto-boccole

- Le tasche a loro volta sono state collegate, mediante uno spinotto inserito in due boccole, con due barre di alluminio di 300mm di altezza ad una trave ad H di 1200mm sulla quale sono stati realizzati due supporti mobili per consentire leggere variazioni di interasse ove fosse necessario;



Figura 11-6 Strumentazione di prova



Figura 12-6 Tubo per simulazione catenaria

- Il filo di contatto è schematizzato mediante un tubo di $D_i=4,3\text{cm}$, al centro del quale è stato saldato un elemento rettangolare in acciaio per consentirne l'afferraggio nel mandrino superiore della macchina.

In *fig. 12-6* è riportato il tubo che è messo in contatto con l'archetto simulando l'interazione pantografo-catenaria.



Figura 13-6 Particolare della prova

6.4 Parametri della prova

La ricerca bibliografica ha fornito i parametri, necessari all'esecuzione della prova, che andiamo di seguito ad esaminare.

Ciò che noi abbiamo voluto evidenziare nelle prove, è l'effetto sull'archetto dei disturbi di campata dovuti al fatto che, come già visto prima, il filo si dispone tra due tralicci secondo una linea curva detta catenaria, il che comporta una notevole variazione della forza di contatto.

La catenaria è un sistema dotato di elasticità variabile da punto a punto, con un massimo a centro campata ed un minimo in corrispondenza delle sospensioni.

Pertanto il pantografo durante la marcia, premendo il filo con una forza costante, lo solleverà di più al centro e di meno sotto le sospensioni: la traiettoria descritta nel punto di contatto tra striscianti e filo nel piano verticale non potrà mai essere rettilinea, ma assomiglierà nella migliore delle ipotesi ad una senoide.

In realtà, però, la variazione di elasticità in corrispondenza delle sospensioni è molto più brusca di quanto non competa alla legge sinusoidale.

Ciò si traduce in una maggiore facilità di distacchi proprio in corrispondenza delle sospensioni.

Prima di fare una descrizione dei parametri utilizzati per la prova, dobbiamo analizzare alcuni elementi che hanno influenzato la scelta di tali parametri.

I valori della frequenza dei disturbi di campata si possono ottenere semplicemente mediante l'equazione: $f=v/l$

Dove con "l" è indicata la distanza tra due tralicci e con "v" la velocità del treno.

Per quanto riguarda la distanza di due tralicci, si è considerato il valore di 60 m (valore medio), che comunque è spesso variabile da tratta a tratta.

Per quanto riguarda la velocità invece, si è considerata la velocità massima raggiungibile dai treni ad alta velocità, vale a dire 300km/h.

Sostituendo questi valori all'interno della precedente equazione si ottiene il valore della frequenza dei disturbi di campata.

Con $v=200\text{km/h}=200 \cdot 1000/3600\text{m/s}$; $f=200 \cdot 1000/ (3600 \cdot 60) =0.926\text{Hz}$

$v=250\text{km/h}=250 \cdot 1000/3600\text{m/s}$; $f=250 \cdot 1000/ (3600 \cdot 60) =1.157\text{Hz}$

$v=300\text{km/h}=300 \cdot 1000/3600\text{m/s}$; $f=300 \cdot 1000/ (3600 \cdot 60) =\mathbf{1.389\text{Hz}}$

Nello svolgimento della prova si è scelto quindi di considerare il valore più gravoso di frequenza, vale a dire **$f=1.389\text{Hz}$** .

La prova è stata eseguita in controllo di deformazione, imponendo una freccia di 4 mm, con la frequenza in precedenza calcolata.

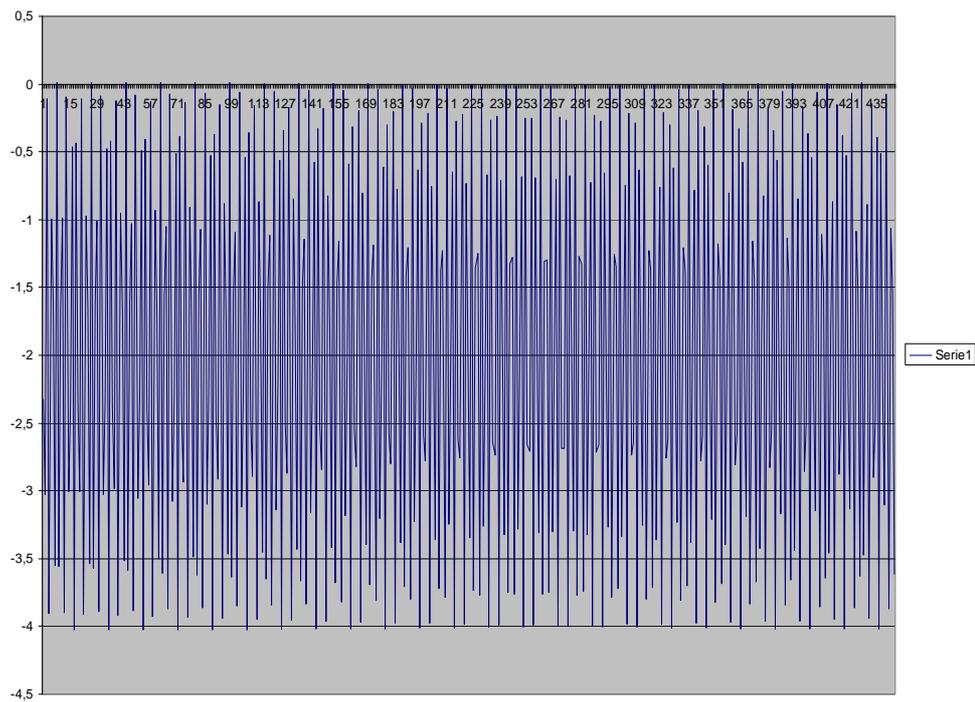


Figura 14-6 Deformazione imposta nel tempo

6.5 Prove di fatica e risultati

Le prove sono state svolte sui pantografi realizzati, ciascuna della durata di sei ore, ottenendo così 30000 cicli per ogni pezzo testato.

Prima e dopo l'esecuzione di ogni singola prova è stata effettuata una prova a ciclo unico, imponendo in entrambi i casi una freccia di 4mm, al fine di ricavare il carico necessario ad imporre la stessa deformazione, in modo da determinare il decadimento delle proprietà meccaniche dell'archetto.

Dalla prova iniziale a ciclo unico, eseguita sui pantografi, si è ottenuto in tutti e tre i casi, un valore del carico di circa 800 N. Tale carico si è mantenuto costante fino alla fine delle prove e risulta avere un coefficiente di sicurezza uguale a 2.22 rispetto al carico totale agente sull'archetto che si ricorda essere 360.5N.

Inoltre se consideriamo che in queste prove non sono stati presi in considerazione né il sistema di sospensioni né la presenza dello strisciante, si può ritenere tale coefficiente ancora più alto.

Il grafico in *fig. 15-6* è relativo alla prima prova effettuata si è ritenuto superfluo riportare quelli relativi alle altre prove in quanto non sarebbe apprezzabile la differenza tra gli stessi.

Come si vede la linea che rappresenta il valore target è quasi orizzontale con un coefficiente angolare $m=0,00334$ da ciò si evince che il carico necessario a deformare il pezzo di 4mm è risultato quasi costante per tutta la durata della prova.

Nelle altre due prove effettuate tale valore del coefficiente angolare è rimasto quasi del tutto inalterato essendo nella seconda prova $m=0,00344$ e nella terza $m=0,00337$, da ciò la scelta di riportare unicamente il grafico relativo alla prima prova.

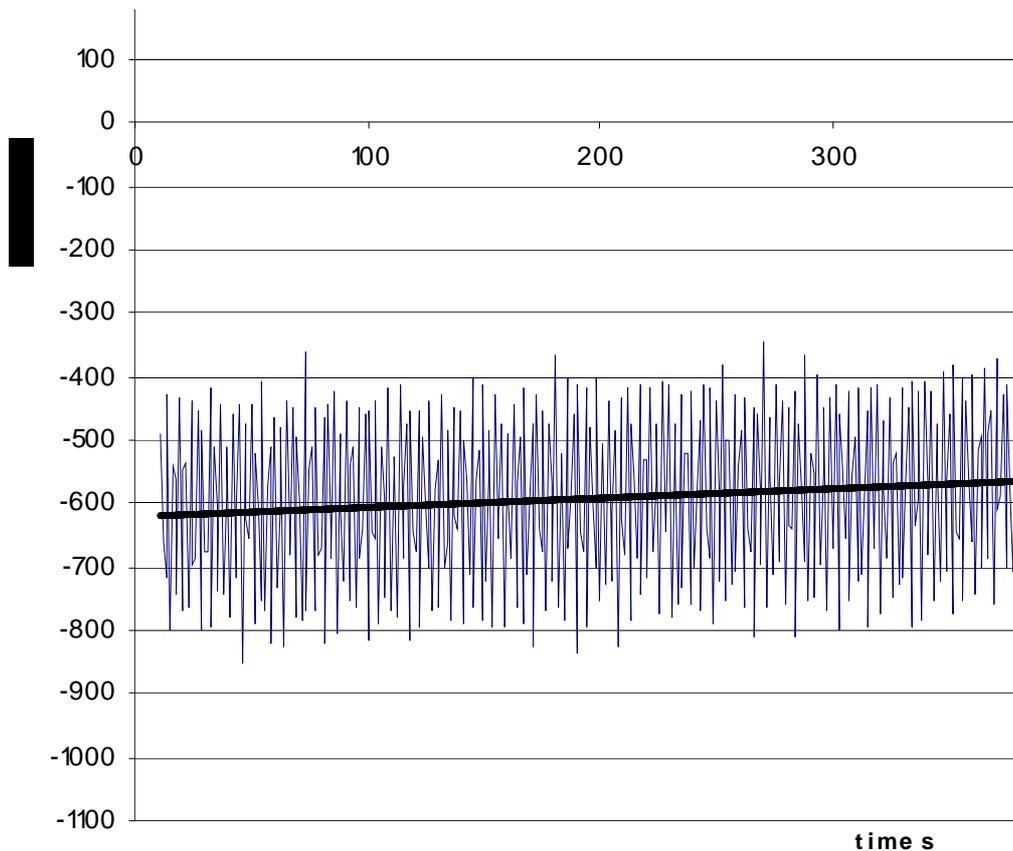


Figura 15-6 Diagramma carico/tempo

Nel grafico possiamo distinguere la linea blu che evidenzia la variazione del carico nel tempo e la linea rossa che mostra la variazione del valore target.

I risultati ricavati dalla sperimentazione, ci consentono di affermare che le proprietà meccaniche del pezzo non sono state in nessun caso inficiate, lo stesso, risulta quindi idoneo all'utilizzo per cui è stato realizzato.

Per quanto riguarda il sistema realizzato per ancorare il pezzo, costituito come visto in precedenza dalle tasche e dalle boccole, si è potuto osservare che tutti gli elementi una volta smontati non hanno subito alcun danno in seguito alle prove. In particolare si è analizzata la superficie dell'archetto a contatto con le boccole e se ne è constatata la perfetta integrità.

Capitolo 7

Effetti termici sul pantografo

7.1 Introduzione

Uno dei problemi più importanti da tenere in considerazione nell'interazione pantografo catenaria è l'innalzamento di temperatura dell'archetto che è influenzato in particolar modo dall'effetto joule, dall'attrito e dalle strumentazioni presenti nelle carrozze. Tale innalzamento di temperatura alle alte velocità viene ridotto notevolmente dallo scambio termico convettivo che si realizza tra l'aria e l'archetto che asporta una notevole aliquota di calore.

Come abbiamo visto in precedenza in Italia la quasi totalità della rete elettrica è a 3KV CC e il pantografo deve quindi assorbire dalla rete correnti molto elevate che raggiungono il valore di 2500 A, quando una corrente **I** attraversa una resistenza **R** si ha il riscaldamento di quest'ultima, questo fenomeno prende il nome di **effetto Joule**. La quantità di energia **W** (espressa in *Joule*) dissipata in calore nel tempo **t** (espresso in *secondi*) dipende dal quadrato della corrente **I** ed è definita dalla relazione in figura.



Ciò comporta, a causa dell'elevata intensità di corrente, un notevole riscaldamento dello strisciante e in seguito dell'archetto, nel caso in cui l'archetto viene realizzato in metallo le temperature raggiunte difficilmente inficiano le

caratteristiche meccaniche dello stesso, lo stesso non si può dire nel caso in cui l'archetto è realizzato in composito perché come vedremo le temperature a cui il composito comincia a perdere le sue proprietà meccaniche sono notevolmente minori rispetto a quelle relative ai metalli.

Un altro aspetto da tenere in considerazione nel valutare le temperature raggiunte dall'archetto è relativo all'aumento di temperatura presente nel momento in cui il treno è fermo in stazione.

Quando un treno è fermo è assente o comunque trascurabile l'effetto dell'aria che raffredda il pantografo alle alte velocità, ed è assente anche il riscaldamento dovuto all'attrito tra lo strisciante e il filo della catenaria, ma non si può trascurare l'innalzamento di temperatura dovuto a tutte le strumentazioni presenti sul treno. Anche quando il treno è fermo ha comunque bisogno infatti di energia per far funzionare l'impianto di illuminazione, l'impianto di climatizzazione, le strumentazioni di controllo e numerosissime altre che sono necessarie anche se il treno non è in movimento, tutto ciò porta quindi il pantografo a raggiungere temperature di circa 100°C che se l'archetto non fosse adeguatamente isolato sarebbero sufficienti ad inficiarne le proprietà meccaniche.

Come vedremo in seguito nell'esecuzione delle prove abbiamo voluto simulare le condizioni più critiche di funzionamento trascurando l'effetto refrigerante dell'aria e applicando al pantografo la massima temperatura che lo stesso potrebbe raggiungere in modo da tenerci in sicurezza rispetto qualsiasi condizione critica che si potrebbe presentare nel reale funzionamento del pezzo.

7.2 Dati in bibliografia

La ricerca bibliografica effettuata, per valutare lo stato dell'arte dei numerosi gruppi di ricerca che si occupano dell'interazione pantografo catenaria e per ottenere i dati necessari alla realizzazione delle prove, ha evidenziato, a differenza dei numerosi studi presenti per quanto riguarda la parte meccanica del pantografo, una notevole scarsità di notizie per quanto riguarda le temperature a cui è soggetto il pantografo.

Molto importante in questa ricerca è stato il materiale fornito dalla società di ricerca **MER-MEC**, che ci ha consentito di conoscere la temperatura dell'archetto al variare della velocità. Vado di seguito a mostrare questo materiale.

Le attività di progetto hanno riguardato test in linea per la determinazione dei valori di temperatura raggiunti dagli striscianti di pantografi di veicoli ferroviari a trazione elettrica. Il monitoraggio della temperatura è stato effettuato lungo la tratta ferroviaria Roma – Firenze, le prove sono state effettuate con il treno diagnostico **ARCHIMEDE**, prodotto da MER MEC per Rete Ferroviaria Italiana, che monta un pantografo Ansaldo ATR 90.

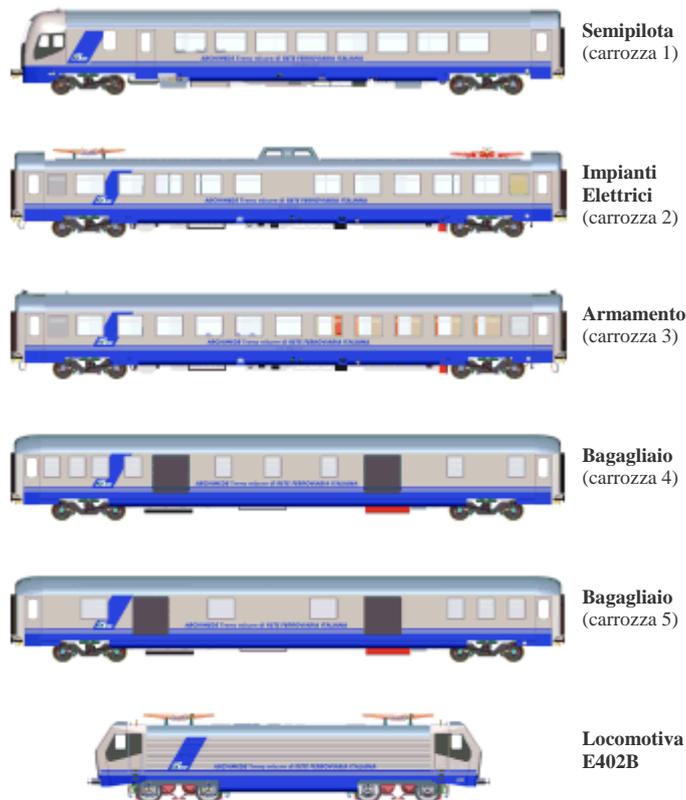


Figura 9-7 Treno Archimede

ROGER 2000

Treno per il monitoraggio dell'infrastruttura ad alta velocità composto da 1 locomotiva, 4 carrozze e 1 semipilota (Progetto ROGER 2000) *ARCHIMEDE* -

Composizione del Treno Diagnostico



Misure di temperatura sugli striscianti Ansaldo

I parametri fondamentali, relativi alla prova delle temperature degli striscianti sono:

- temperature striscianti
- corrente assorbita

- pressione dell'aria nel circuito sollevamento pantografo (solo pantografi a spinta impressa)
- riferimento progressiva chilometrica
- identificazione palificazione e gallerie
- velocità del convoglio.

Prima di iniziare le prove è necessario controllare le dimensioni degli striscianti ed effettuare una pesatura, al fine di poter stabilire, alla fine delle prove, la perdita di materiale in funzione dei km percorsi. Per la misura delle temperature sono installate delle termocoppie di **tipo K**, generalmente nella parete laterale degli striscianti, inserendole in appositi fori, praticati ad una profondità di circa 2 mm. Per valutare il contributo dovuto al solo effetto dell'attrito di strisciamento si devono ripetere le prove senza assorbimento di corrente, utilizzando una locomotiva di scorta per trainare il convoglio. La differenza fra le temperature massime raggiunte nelle due condizioni, può dare un'idea di massima del contributo termico sugli striscianti, dovuto al solo attrito di strisciamento, rispetto a quello dovuto all'effetto joule.

A fine prova si deve eseguire un controllo dei km percorsi e sugli striscianti, esaminando:

- il consumo rilevato dalle dimensioni geometriche
- il consumo rilevato in peso
- il mantenimento delle proprietà elettriche e meccaniche
- l'uniformità' di consumo, sia del singolo strisciante che fra striscianti
- i danni provocati dagli archi elettrici

- eventuali cricche, fusioni e deformazioni
- la presenza o meno di trucioli di rame asportati dal filo di contatto.

Sono state eseguite delle prove sulla tratta ferroviaria Roma - Firenze per la misura della temperatura raggiunta in corsa dallo strisciante. Le prove sono state eseguite con il veicolo ROGER 2000 della MER MEC, che monta un pantografo Ansaldo ATR 90.

Il sistema di rilievo della temperatura dello strisciante e' stato successivamente migliorato utilizzando a tale scopo 3 termocoppie di tipo K e 2 sonde di temperatura PT100; da notare che le termocoppie sono in grado di registrare variazioni di temperatura a frequenza più alta rispetto alle sonde PT100. Il sensore TC7 è ubicato all'interno del sistema di acquisizione, pertanto registra variazioni di temperatura abbastanza attenuate dovute al fatto che risente poco degli sbalzi di temperatura.

Disposizione dei sensori:



Tc = termocoppia, Rtd = sonda PT100.

Descrizione tratta:

- durata: 10 minuti.

- Partenza da fermo
- Da 0 a 100 Km/h c'è il raffreddamento rispetto alla temperatura ambiente dovuto alla ventilazione. Segue un tratto in galleria con ulteriore grado di abbassamento (maggiore pendenza sul tratto a pendenza negativa).
- Alla fine si ha una fase di accelerazione fino a 170km/h, con relativo innalzamento della temperatura.

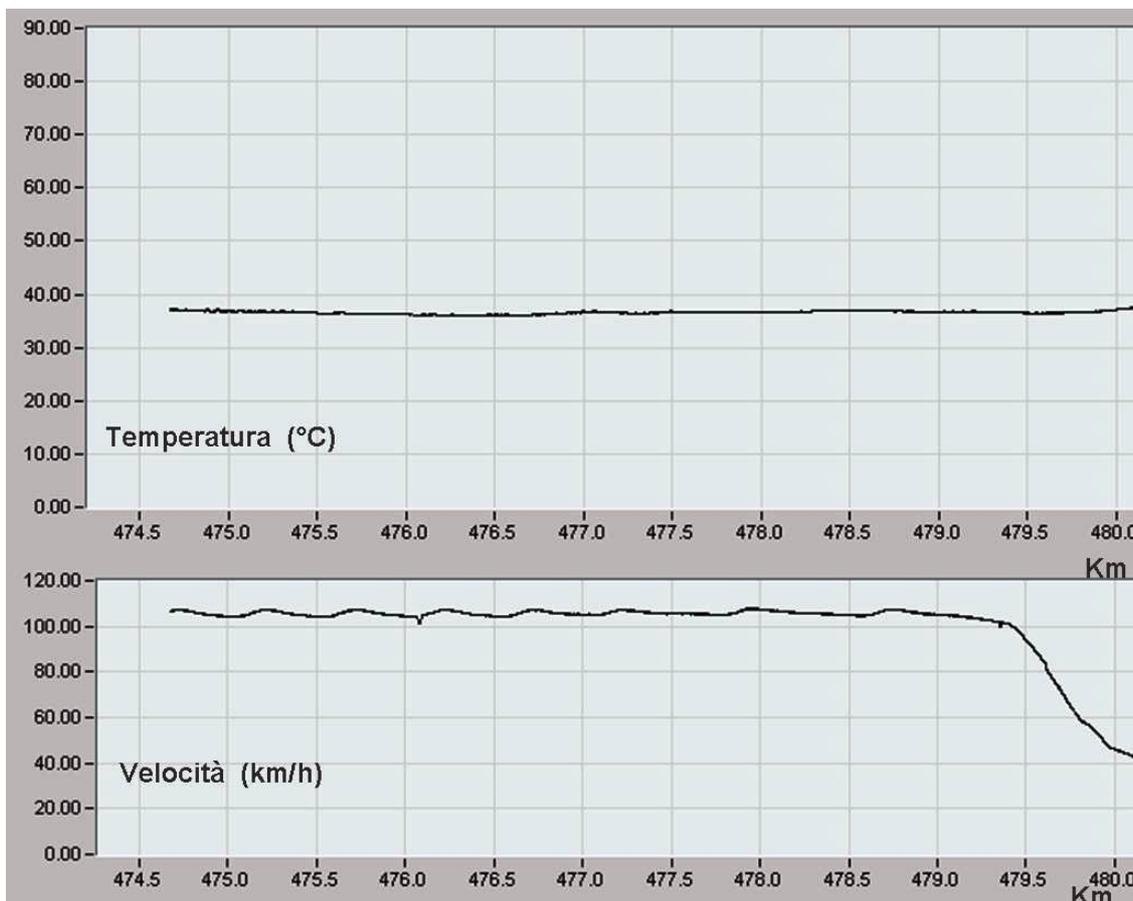


Figura 10-7 Variazione della temperatura

Questo diagramma riguarda l'ultima parte della tratta percorsa dal treno a una velocità quasi costante di 100Km/h che va poi diminuendo fino quasi ad

arrestarsi, come si può vedere la temperatura degli striscianti in tutto l'intervallo risulta inferiore a 100°C. La mer-mec ci ha confermato che per velocità inferiori ai 200Km/h la temperatura non supera i 100°C mentre da 200 a 250 km/h le temperature degli striscianti si innalzano fino a 400°C ed è proprio questo valore di temperatura che utilizzeremo nell'esecuzione delle prove.

Come possiamo osservare nella curva della temperatura del diagramma precedente sono presenti delle oscillazioni, tali oscillazioni sono relative alla presenza di archi elettrici, dovuti ai distacchi fra filo e strisciante.



Figura 11-7 Arco elettrico tra filo e strisciante

La mer-mec realizza anche misurazioni degli archi elettrici con un sistema di misurazione che può essere installato su locomotive dedicate oppure commerciali.

Tale sistema misura la radiazione ottica emessa dal rame del filo durante l'arco elettrico. La misura è eseguita nella gamma di lunghezza d'onda appropriata in qualsiasi condizione ambientale e i dati risultanti possono essere elaborati a

bordo o in-office al fine di identificare le caratteristiche degli archi elettrici della linea di contatto.

Il Sistema per la Misura degli Archi Elettrici è provvisto di software destinato all'elaborazione in tempo reale dei segnali dei sensori acquisiti.

I risultati ottenuti da mer-mec nella misurazione degli archi elettrici ci consentono di considerare trascurabili le variazioni di temperatura causate da questi ultimi, dato che tali variazioni comportano delle variazioni trascurabili della temperatura come si vede dal diagramma in *fig2-6*.

STOL TECNICO

Oltre ai dati forniti da mer-mec, di notevole importanza sono stati i dati forniti dal giornale spagnolo STOL (Spanish Trains On Line).

Su questo giornale è stato possibile reperire i dati relativi alle misurazioni di temperatura effettuate sulla linea ferroviaria spagnola che a differenza della linea italiana, che come visto ha una rete elettrica a 3 KV CC, è a 25 KV AC come in moltissimi paesi europei a differenza dell'Italia.

Dai risultati che possiamo vedere in tabella, si evince che la notevole riduzione di corrente dovuta alla maggiore tensione della rete spagnola riduce notevolmente la temperatura massima, riducendo in particolare l'aliquota relativa all'effetto joule.

Un altro dato importante fornitoci da questi risultati è che le temperature, durante i transitori di velocità, subiscono un incremento di temperatura apprezzabile

di cui abbiamo dovuto tener conto, come vedremo nel seguente capitolo, anche nella determinazione della temperatura alla quale è stato testato l'archetto da noi realizzato.

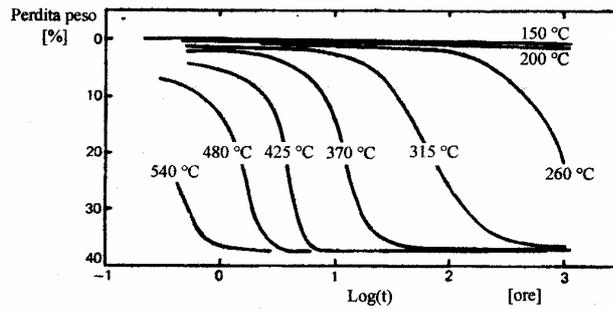
<i>STOL TECNICO</i>	Fili di alimentazione	Pendini	Striscianti
Regime permanente	80°C	80°C	80°C
Regime transitorio	100°C	100°C	85°C

Dato che le nuove linee ad alta velocità italiane saranno a 25 KV CA, sarebbe stato sufficiente testare il pezzo a temperature non superiori ai 100°C, valore che in questo caso non viene superato neanche a velocità superiori ai 200 Km/h ne, come si vede nella tabella, durante i transitori.

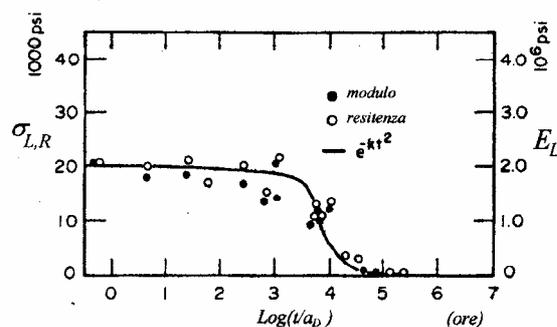
Come vedremo, abbiamo voluto invece testare il nostro pezzo nell' ipotesi che la linea fosse ancora a 3 KV CC, al fine di avere un notevole margine di sicurezza, che ci garantisse da qualsiasi evento accidentale.

7.3 Degradamento termico dei compositi

Com'è noto, a temperatura superiore a quella ambiente le materie plastiche sono soggette a un processo di degrado spesso associato anche a volatilizzazione (forma gassosa) di parte del materiale che porta ad una diminuzione del peso specifico ed ad un abbassamento delle caratteristiche meccaniche del materiale. In generale tali processi di degrado si verificano con evidenza a temperature superiori ai 150-200°C e sono caratterizzati da perdite in peso con andamenti nel tempo come quello mostrato in figura per un composito in fibra di vetro-resina.



Al degrado termico (volatilizzazione) del materiale è associata una riduzione della resistenza e dello stesso modulo di Young come mostrato per esempio nella seguente figura per lo stesso composito fibra di vetroresina di cui alla figura precedente.



Dalla figura si osserva come per qualunque temperatura di esercizio il decadimento di resistenza e rigidezza è bene approssimato da una legge esponenziale (decadimento esponenziale) del tipo

$$y = \exp(-kt^2)$$

essendo k una costante che segue con buona approssimazione la legge di Arrhenius

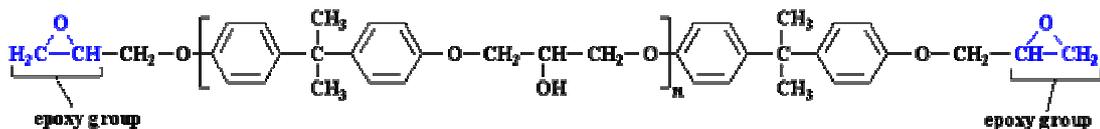
$$k = A \exp(-\Delta H/RT)$$

ovviamente il degrado dei compositi varia con la direzione, variando con questa il contributo alla resistenza dato da fibre e matrice. Per questo, almeno a temperatura

non molto superiore alla temperatura ambiente il decadimento della resistenza dei compositi in direzione delle fibre risulta relativamente modesto, mentre relativamente più elevato è il decadimento in direzione trasversale.

Il degrado del materiale alle elevate temperature ovviamente limita la massima temperatura alla quale un materiale composito può essere utilizzato almeno per tempi non brevi. Il campo di temperature superiori ai 200°C è, infatti, quello praticamente riservato ai compositi a matrice metallica.

Quando le resine sono riscaldate i polimeri cominciano a dissociarsi chimicamente a una temperatura che dipende fortemente dal tipo di resina ed in particolare dai monomeri che la costituiscono.



I compositi da noi realizzati come già visto sono compositi a matrice epossidica, per questo tipo di compositi già a temperature comprese tra i 65-75°C si comincia ad evidenziare un primo decadimento delle proprietà meccaniche che diventa inaccettabile a temperature superiori ai 120°C.

Per verificare che il pezzo da noi realizzato non subisca tale decadimento delle proprietà meccaniche, che potrebbe inficiarne il corretto funzionamento, sono state realizzate delle prove sperimentali con l'obiettivo di valutare la temperatura raggiunta dall'archetto in composito durante il suo funzionamento.

Capitolo 8

Prove termiche

8.1 Introduzione

Come si è visto nel capitolo precedente, a velocità superiori ai 200Km/h le temperature degli striscianti si innalzano fino a 400°C e contemporaneamente a temperature superiori ai 150-200°C si verifica un degrado termico del materiale composito al quale è associata una riduzione della resistenza e dello stesso modulo di Young. Tale riduzione delle proprietà meccaniche sarebbe molto dannosa per l'archetto che, essendo soggetto come visto a sollecitazioni meccaniche di entità non trascurabile, potrebbe arrivare rapidamente a rottura.

Tali considerazioni hanno evidenziato la necessità di isolare termicamente lo strisciante dall'archetto. E' stato quindi studiato un sistema per eseguire tale isolamento, realizzando nel frattempo anche un apposito portastrisciante in alluminio che serve a sostenere gli striscianti e a bloccarli sull'archetto.

8.2 Realizzazione della struttura di isolamento e sostegno striscianti

Esaminiamo ora la struttura realizzata per sostenere gli striscianti sull'archetto e contemporaneamente isolare termicamente quest'ultimo.

Gli striscianti da noi utilizzati che si possono vedere in fig. 2-8, sono quelli che sono solitamente utilizzati sul pantografo FS 52-92 che è stato il punto di partenza del nostro progetto.

Questi striscianti vengono collocati e bloccati su un portastrisciante in alluminio, realizzato rivettando tra loro varie pezze di alluminio di spessore 24mm, appositamente tagliate e deformate con un processo di calandratura, che vengono a formare una sagoma avente precisamente la stessa geometria dell'archetto ricoprendolo completamente.



Figura 12-8 Portastrisciante in alluminio

Sempre mediante rivettatura gli striscianti in rame sono stati collegati al portastrisciante approfittando di quattro degli otto fori presenti sugli striscianti e realizzando, in corrispondenza degli stessi, altrettanti fori sul portastrisciante di diametro 4 mm. Gli altri quattro fori presenti su ogni strisciante sono stati utilizzati, come vedremo in seguito, per collegare la struttura così ottenuta all'archetto.

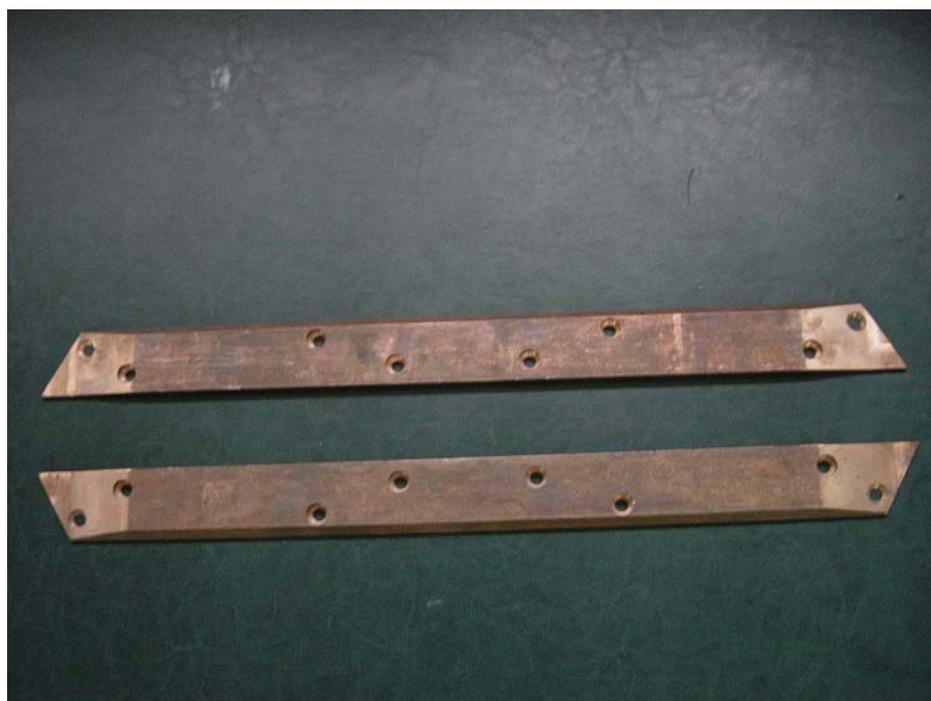


Figura 13-8 Striscianti di rame

Per garantire l'isolamento termico dell'archetto, quest'ultimo è stato distanziato dal portastrisciante mediante alcuni elementi ceramici appositamente progettati che sono stati realizzati da ' Porcellane tecniche meridionali S.p.A. che ci ha fornito una scheda tecnica del materiale da loro utilizzato per realizzare gli isolatori che è presente alla pagina seguente.



Sono state progettate e successivamente realizzate sia delle boccole che delle rondelle di porcellana, di cui vediamo le caratteristiche geometriche.

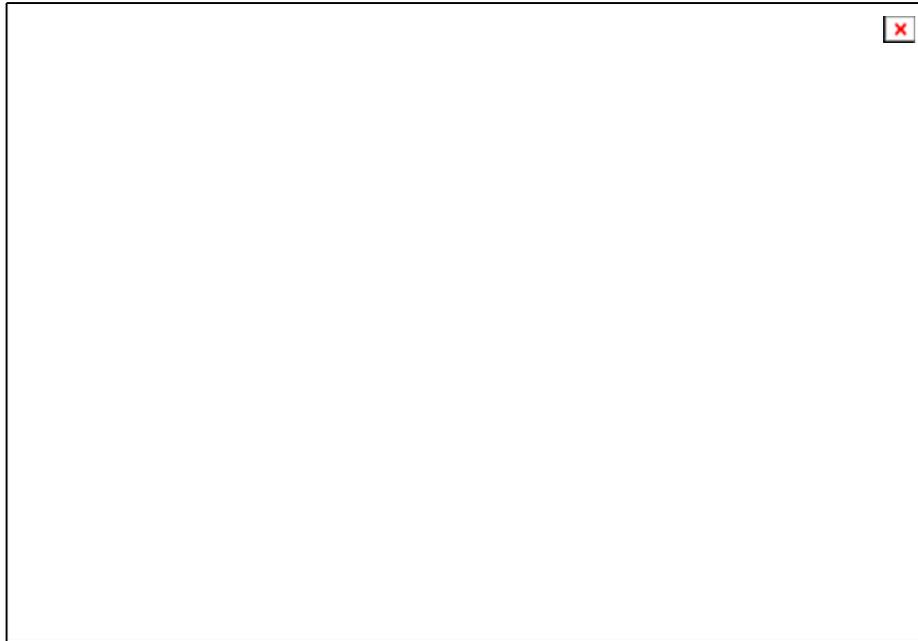


Figura 14-8 Isolatori ceramici

Queste boccole oltre ad essere termicamente isolanti, realizzano tra l'archetto e il portastrisciante un'intercapedine che consente una notevole asportazione di calore

da parte del flusso d'aria che lambisce questi ultimi, riducendo ulteriormente la temperatura dell'archetto.

Sull'archetto sono stati realizzati un totale di sei fori , quattro in corrispondenza dei fori ancora liberi presenti sugli striscianti e altri due in corrispondenza delle estremità dello stesso, nei quali sono state inserite altrettante boccole. Sopra ognuna delle boccole sono state quindi posizionate due rondelle in porcellana che oltre ad isolare termicamente i diversi elementi servono anche a realizzare un' intercapedine tra archetto e striscianti.

Altre quattro rondelle di porcellana sono state collocate su altrettante boccole di alluminio, utilizzate come già visto per realizzare il collegamento tra l'archetto e le tasche, al fine di evitare il contatto diretto tra il portastrisciante e le stesse boccole di alluminio, che avrebbe causato un rapido flusso termico tra archetto e strisciante.



Figura 15-8 Sistema di isolamento termico

8.3 Strumentazione di prova

Per la realizzazione della prove sono state utilizzati due elementi riscaldanti a infrarossi in ceramica con filo di resistenza al nichel-cromo presso fuso, dotati di termocoppia integrata di tipo K, che possono raggiungere una temperatura di 400°C.

Le termocoppie presenti nei riscaldatori sono state collegate ad un'apposita apparecchiatura dotata di un alimentatore e di un termostato in modo da poter controllare la temperatura raggiunta mantenendola costantemente al valore desiderato.



Figura 16-8 Lettore di termocoppia

La valutazione della temperatura raggiunta sul pezzo è stata valutata in diversi punti, come si vedrà in seguito, mediante un'ulteriore termocoppia che ha permesso la misurazione accurata dei gradienti di temperatura nei diversi elementi del sistema in esame.



Figura 17-8 Termocoppia

Anche questa termocoppia è stata collegata all'apparecchiatura di lettura di *fig.*
5-8.

8.4 Prove preliminari

Prima di procedere con l'esecuzione delle prove sull'archetto sono state realizzate alcune prove su un provino appositamente progettato, al fine di valutare la funzionalità del procedimento di prova e di evitare eventuali danni all'archetto, nel caso in cui le temperature raggiunte fossero state troppo elevate.

Per eseguire queste prove è stato realizzato un provino costituito da una piastra di materiale composito sulla quale sono state appoggiate le boccole ceramiche in precedenza descritte che sostengono a loro volta una piastra di alluminio.

La prima prova è stata eseguita disponendo in serie le due resistenze sopra ad uno strisciante in modo da riprodurre condizioni più gravose di quelle relative alla prova .



Figura 18-8 Prima prova

La seconda prova invece è stata eseguita disponendo le resistenze alla stessa distanza alla quale si sarebbero trovate sull'archetto senza utilizzare gli striscianti così da simulare anche in questo caso una condizione più gravosa rispetto alla prova effettuata sull'archetto, eliminando la dispersione dovuta agli striscianti.



Figura 19-8 Seconda prova

Entrambe le prove sono state realizzate facendo raggiungere ai riscaldatori 350°C e mantenendoli a questa temperatura per due ore, e alla fine delle prove è stata misurata la temperatura mediante la termocoppia di *fig. 6-8*.

La temperatura è stata misurata sulla superficie di alluminio sulle boccole e sul composito e risultati sono stati raggruppati nelle tabelle seguenti.

Tabella 1

	Alluminio	Boccole	Composito
Temperatura	160°C→100°C	45°C	35°C

Tabella 2

	Alluminio	Boccole	Composito
Temperatura	155°C→95°C	47°C	36°C

Dalle tabelle precedenti si può notare che, anche se i due risultati sono leggermente differenti tra loro, in entrambi i casi, le boccole hanno isolato in maniera efficace il composito, facendogli raggiungere temperature relativamente basse, e raggiungendo a loro volta temperature che non condizionano le proprietà del composito come abbiamo visto nel capitolo precedente.

8.5 Prove sull'archetto

Dati i buoni risultati delle prove di cui al paragrafo precedente si è proceduto a testare l'archetto.

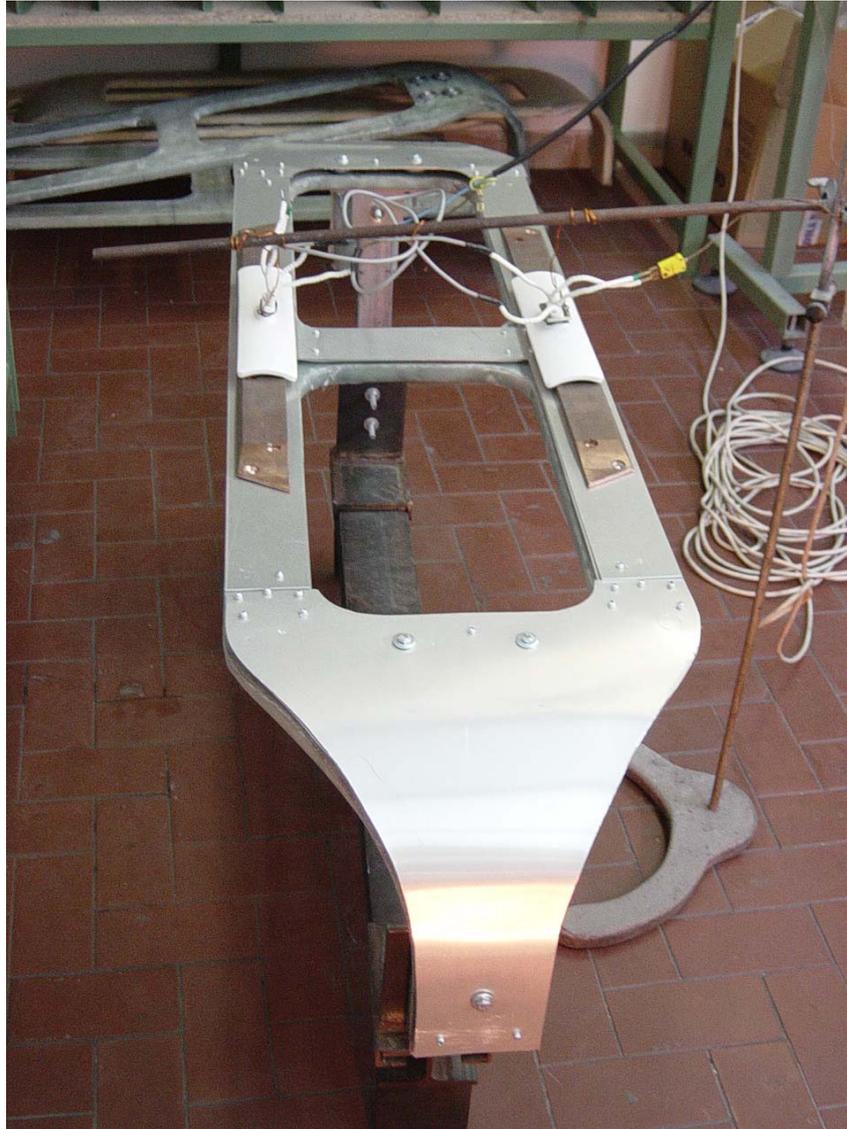
E' stata quindi realizzata una campagna di prove al fine di valutare il corretto funzionamento del sistema di isolamento in precedenza descritto.

Sono state realizzate quattro prove, due delle quali hanno avuto una durata di due ore e altre due di tre ore.

Per sostenere e movimentare le resistenze che a causa della temperatura erano di difficile e pericolosa movimentazione, è stato utilizzato un braccio metallico al quale sono state collegate tramite un filo di rame, sullo stesso braccio sono stati anche bloccati i vari fili di collegamento per evitare che si bruciassero a causa delle elevate temperature.



Figura 20-8 Strumentazione di prova



Come nelle prove precedentemente descritte le resistenze sono state portate a 350°C e mantenute a tale temperatura rispettivamente per due e tre ore.

Uno dei parametri che abbiamo dovuto tenere sotto controllo durante l'esecuzione delle prove, è la temperatura ambiente, infatti, quando le prove sono state realizzate la temperatura ambiente oscillava intorno ai 10°C , e questo valore della temperatura faceva sì che le resistenze non riuscissero a raggiungere le temperature desiderate a causa dell'inerzia termica. Per evitare quest'inconveniente la

camera di prova è stata portata a 22°C utilizzando delle semplici stufe, così da ridurre notevolmente l'inerzia termica, anche se comunque le resistenze hanno impiegato quasi trenta minuti per raggiungere la temperatura massima.

Fino alla fine del tempo di prova il lettore di termocoppia è stato collegato alla termocoppia presente all'interno delle resistenze per monitorare l'incremento di temperatura delle stesse, alla fine è stata staccata dal lettore questa termocoppia ed è stata collegata la termocoppia di *fig. 6-8* allo scopo di determinare la temperatura di tutti quei punti che sono di maggior interesse nel nostro studio, potendo valutare così anche i diversi gradienti di temperatura sui singoli pezzi.

8.6 risultati delle prove

Prima di mostrare la tabella con tutti i risultati delle prove effettuate bisogna fare delle considerazioni sulle misurazioni effettuate senza le quali la lettura della tabella risulterebbe poco chiara.

Le prime tre righe della tabella non hanno bisogno di chiarimenti indicando la durata delle prove la temperatura ambiente e la temperatura raggiunta dalle resistenze, sulle quali abbiamo già ampiamente parlato in precedenza.

La quarta riga della tabella indica il gradiente di temperatura misurato sugli striscianti, partendo dalla zona centrale fino alla parte estrema degli stessi, che naturalmente va diminuendo allontanandosi dalle resistenze.

Come si può notare, data la perfetta simmetria del sistema tanto dal punto di vista strutturale quanto dal punto di vista termico, sia per gli striscianti che per tutti gli altri pezzi che sono presenti in maniera simmetrica nell'archetto testato, si sono riportate le temperature una sola volta, dato che le misurazioni effettuate hanno evidenziato la perfetta simmetria dei flussi termici.

Anche per quanto riguarda il portastrisciante e le viti di collegamento viene riportato in tabella il gradiente che nel primo caso va dalla zona in prossimità degli striscianti alla zona centrale del corno, mentre nel secondo caso varia dalla parte superiore a quella inferiore delle viti



Figura 21-8 Particolare del collegamento realizzato

Nelle due righe seguenti, indicate rispettivamente come boccole su e giù sono riportati i valori di temperature misurati sulle boccole più vicine alle resistenze, visibili in *fig. 4-8*, dato che le altre boccole non subivano apprezzabili variazioni di temperatura neanche nelle prove di tre ore; l'indicazione su o giù è stata utilizzata per distinguere le boccole al di sopra e al di sotto del composito che come si vede hanno temperature nettamente differenti.

Le ultime due righe della tabella sono indicate come composito 1 e composito 2 riferendosi rispettivamente alle misurazioni effettuate in prossimità delle boccole e a quelle effettuate nella parte del composito che si trova al di sotto delle resistenze, come si può vedere nonostante nella zona centrale il calore si trasmette solo per irraggiamento dal portastrisciante al composito la temperatura raggiunta da quest'ultimo in questa zona è maggiore che nella zona in prossimità delle boccole dove vi è anche scambio termico conduttivo attraverso le stesse, ciò è dovuto sia al fatto che la temperatura del portastrisciante diminuisce notevolmente allontanandosi dalla zona centrale raggiungendo in prossimità delle boccole i 70°C, ma anche alla presenza delle boccole di ceramica che riducono notevolmente il trasferimento del calore per conduzione.

	Prova1	Prova2	Prova3	Prova4
Durata	2 ore	2 ore	3 ore	3 ore
T. amb.	22°C	22°C	22°C	22°C
Resistenze	330°C	330°C	330°C	330°C

Strisciante	330°C→95°C	330°C→95°C	330°C→96°C	330°C→97°C
P.strisciante	89°C→26°C	90°C→27°C	93°C→30°C	94°C→30°C
Vite	80°C→54°C	80°C→55°C	82°C→57°C	83°C→59°C
Boccole(su)	60°C	62°C	64°C	64°C
Boccole(giù)	40°C	41°C	43°C	45°C
Composito1	51°C→29°C	52°C→29°C	53°C→31°C	53°C→31°C
Composito2	47°C→32°C	47°C→32°C	48°C→34°C	48°C→34°C

I risultati ottenuti dalle misurazioni effettuate hanno evidenziato che in nessuna sezione l'archetto in composito raggiunge temperature tali da compromettere le sue caratteristiche dato che come abbiamo già visto in precedenza per temperature inferiori ai 90°C le proprietà del composito risultano inalterate.

Nell'esecuzione delle prove non è stato tenuto in considerazione l'effetto dell'aria che impatta sull'archetto, effetto che alle alte velocità riduce notevolmente le temperature raggiunte grazie allo scambio termico convettivo che si realizza, al fine di considerare le condizioni più sfavorevoli di funzionamento che si possono realizzare ad esempio durante le fasi transitorie, come le partenze o fermate improvvise, in cui il treno viaggia a velocità ridotte.

Nel leggere i risultati ottenuti si deve quindi tenere in considerazione che le temperature misurate in seguito alle prove risultano superiori rispetto a quelle che si rileverebbero a seguito del funzionamento del pezzo in condizioni reali.

Capitolo 9

Prova sul treno

9.1 Introduzione

Dati i buoni risultati ottenuti sia nelle prove meccaniche che nelle prove termiche, entrambe ampiamente trattate nei capitoli precedenti, si è deciso di testare il pezzo realizzato su un pantografo correntemente in uso sulla linea ferroviaria italiana.

Al fine di eseguire tale prova è stato necessario effettuare alcune modifiche che andiamo ora ad analizzare.

Come abbiamo già visto nel capitolo relativo alle prove termiche, il portastrisciante da noi realizzato era composto da undici pezzi di alluminio, dello spessore un millimetro l'una, rivettate tra loro al fine di ottenere un unico pezzo dello spessore totale di venti millimetri.



Figura 1.9

Questo portastrisciante era sufficiente allo scopo di testare termicamente l'archetto, ma non conferiva allo stesso una rigidità tale da poterlo utilizzare anche per la prova sul treno.

Per aumentare la rigidità del portastrisciante se ne è quindi realizzato uno nuovo utilizzando un'unica lamina di alluminio dello spessore di venti millimetri, che è stata opportunamente sagomata e curvata mediante operazioni di taglio e successiva calandratura allo scopo di far sì che il portastrisciante seguisse perfettamente la geometria dell'archetto.



Fig 2.9

Un'altra importante modifica è quella relativa agli striscianti in rame dato che anche in questo caso gli striscianti utilizzati per la prova termica non erano più sufficienti dato che erano necessari degli striscianti più lunghi per evitare danni nel caso in cui il filo di contatto avesse avuto un'oscillazione orizzontale più ampia rispetto alla lunghezza degli striscianti.

In commercio non esistono però degli striscianti sufficientemente lunghi, quindi per sopperire a tale mancanza si è deciso di sagomare opportunamente più striscianti al fine di ottenerne due più lunghi.

Per la realizzazione di ogni strisciante si sono utilizzati due striscianti identici a quelli utilizzati in precedenza, a uno dei due sono state tagliate le estremità, mentre l'altro strisciante è stato diviso in due parti identiche.

Per aumentare la conduzione elettrica, che diversamente sarebbe stata ridotta a causa della separazione dei diversi pezzi di rame, sui diversi pezzi è stato realizzato, mediante un'operazione di fresatura, un gradino di profondità 4mm (la metà dello spessore totale), e di lunghezza 2cm.



Fig 3.9



fig 4.9

Per mantenere insieme i pezzi così realizzati sono stati fatti due fori per ogni coppia di pezzi, realizzando sulla parte superiore una svasatura allo scopo di utilizzare delle viti con testa svasata che non interferiscono con il movimento del filo di contatto.

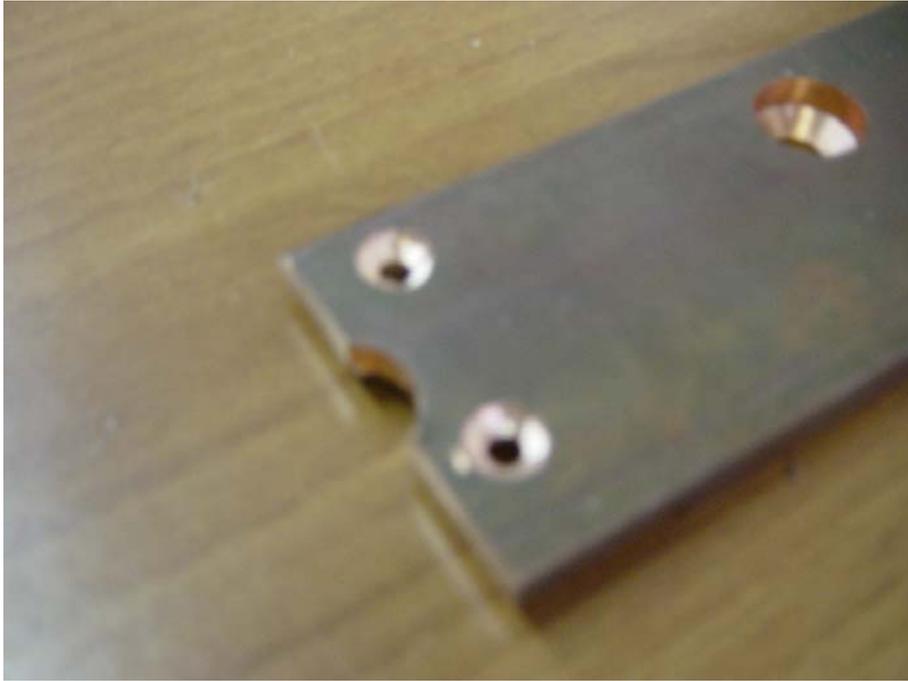


Fig 5.9

Per collegare gli striscianti al pantografo sono stati fatti fori da 6 mm, anche in questo caso svasati, nei quali sono state inserite delle viti che passano attraverso le boccole di ceramica, di cui abbiamo già parlato, al fine di evitare il riscaldamento del composito.

L'ultima modifica necessaria per effettuare la prova sul treno è l'applicazione sull'archetto delle trecce necessarie a trasmettere la corrente captata dall'archetto al treno.

Le trecce utilizzate sui normali archetti sono quattro e anche in questo caso abbiamo voluto utilizzare quattro trecce per non ridurre la corrente trasmessa al treno, le trecce come vediamo nelle foto sono posizionate ai quattro estremi degli striscianti, collegandole a questi ultimi tramite bullonatura.

Durante il moto del treno per vari fenomeni legati all'oscillazione dell'archetto, al vento o ad altre cause esterne, le trecce potrebbero andare a contatto con il

pantografo e data l'elevata temperatura raggiunta dalle stesse per effetto joule, potrebbero danneggiare l'archetto.

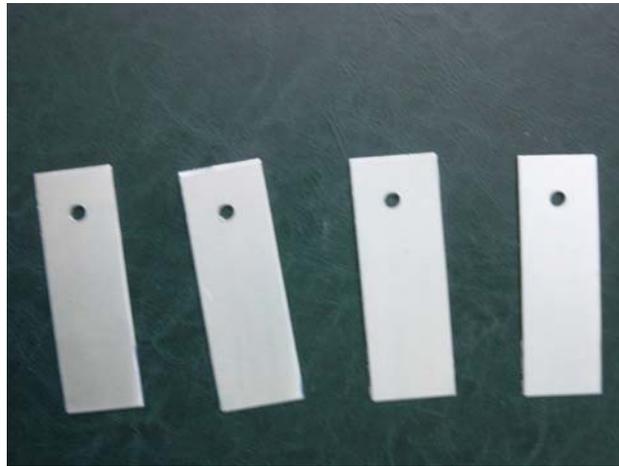


Fig 6.9

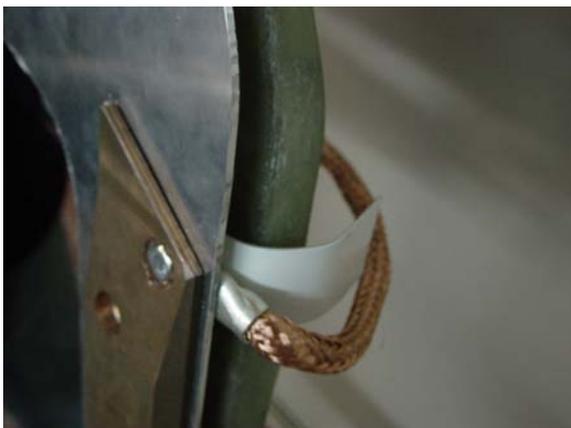


Fig 7.9



Fig 8.9

Al fine di evitare tale inconveniente sono state realizzate quattro piastrine in alluminio che come si vede in figura sono posizionate sotto ogni singola treccia guidandole ed evitando qualsiasi contatto con l'archetto che potrebbe inficiarne le proprietà meccaniche.

Un ultimo accorgimento che è stato necessario nell'allestimento dell'archetto è la piegatura dei bordi del portastrisciante.

Tale lavorazione è stata necessaria per evitare che eventuali slittamenti del cavo fino all'estremità dell'archetto lo avessero portato al di sotto del portastrisciante rischiando quindi di agganciarlo e di strappararlo dalla sua sede.

Per evitare ciò come si vede in figura entrambi i bordi sono stati ripiegati due volte, una prima volta a novanta gradi verso l'interno ed una seconda volta fino a raggiungere quasi il contatto con l'archetto.



Fig 9.9

Nella foto successiva vediamo quindi l'archetto completo che verrà montato sul treno come vedremo nei paragrafi seguenti.

9.2 Montaggio dell'archetto sul pantografo

L'archetto realizzato è stato quindi montato su di un pantografo in uso sui treni in circolazione sulla rete ferroviaria italiana al fine di verificarne la perfetta compatibilità.

Prima di montare l'archetto è stato necessario effettuare diverse operazioni su di un banco di prova in officina che andiamo ad esaminare.



Il pantografo è stato smontato dal treno e da questo è stato smontato l'archetto originale, per montare l'archetto da noi realizzato sul pantografo è stato necessario variare leggermente l'interasse tra le due tasche che anche se di pochi millimetri era maggiore di quello dei braccetti delle sospensioni sulle quali viene collocato.

Un altro passo importante è stato quello di tarare le sospensioni del pantografo che erano state in precedenza tarate per un archetto che come sappiamo è notevolmente più pesante.

L'archetto è stato quindi serrato sul pantografo mediante accoppiamento bullonato ed è stato possibile movimentarlo.



Uno degli aspetti che ha destato maggiore interesse è quello relativo agli elevati tempi necessari per lo smontaggio degli striscianti e per loro sostituzione.

Tale tempo di sostituzione è dovuto al fatto che, durante l'utilizzo del pantografo attuale, i fenomeni di usura e deformazione dello strisciante rendono di fatto impossibile il semplice smontaggio degli striscianti usurati dall'archetto. Si rendono invece necessarie una serie di operazioni che comportano in primis lo

smontaggio ed il trasporto dell'intero archetto ad una stazione di lavorazione, successivamente mediante foratura vengono eliminati i residui delle viti di collegamento strisciante – archetto, si passa poi a realizzare i nuovi fori di alloggio delle viti di collegamento ed infine è possibile montare i nuovi striscianti. Tale operazione è ad ora stimata da TRENITALIA in un ora di lavoro di due persone.

Nell'archetto realizzato , stante la presenza di un elemento portastrisciante è possibile ipotizzare una particolare conformazione del lamierino di sostegno degli striscianti per realizzare una conformazione tale da minimizzare i tempi di sostituzione degli striscianti usurati e quindi dei costi di manutenzione.

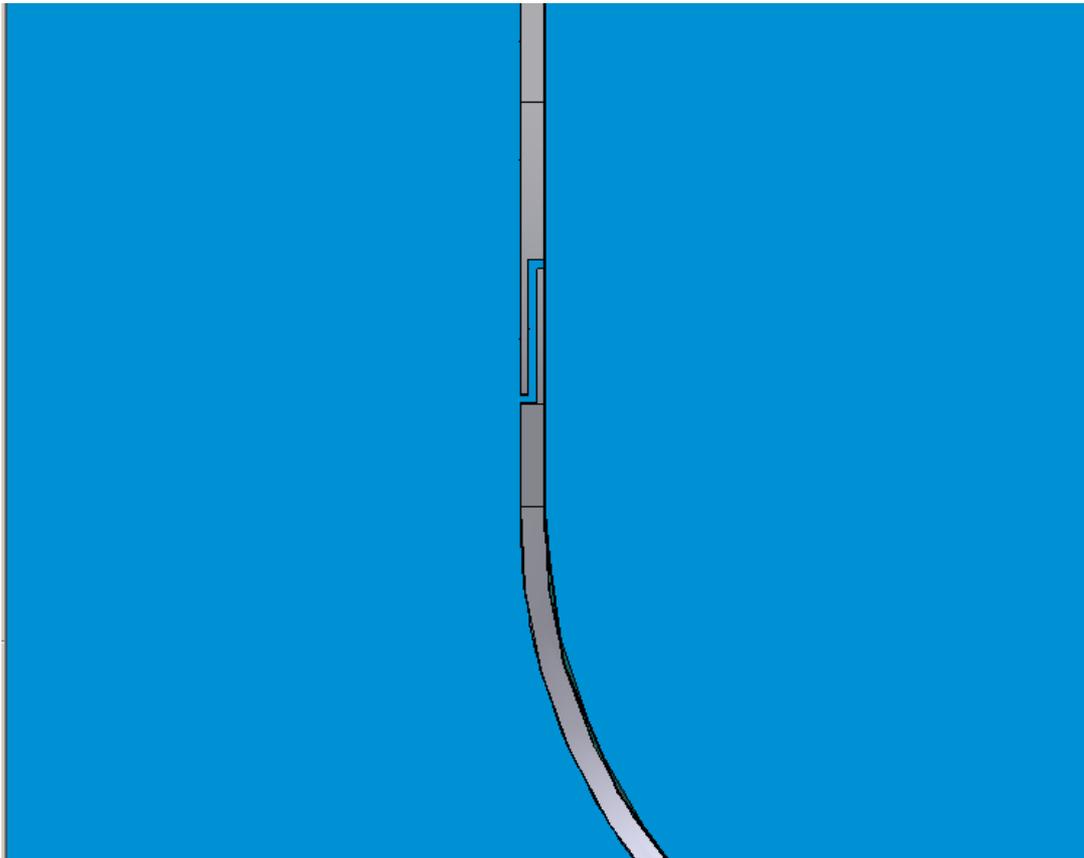


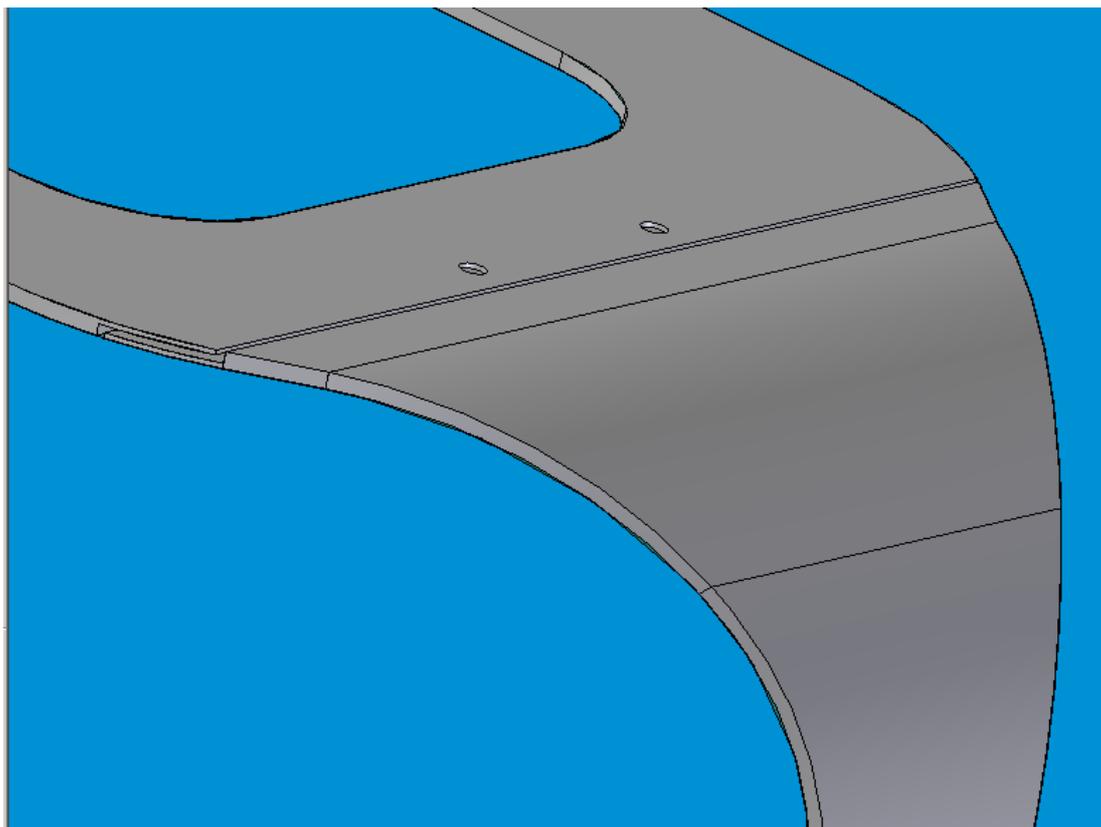
Fig 10.9

Stante il ridotto costo del portastrisciante in alluminio si è pensato di far sì che ogni qual volta si debbano sostituire gli striscianti viene sostituito tutto il gruppo strisciante portastrisciante, riducendo notevolmente, come vedremo, i tempi di manutenzione.

Ciò che si è pensato di fare, come possiamo vedere nella figura, è di separare la parte centrale del portastrisciante dalle appendici laterali collegandolo a queste ultime tramite quattro viti.

Sempre in figura si può vedere che per mantenere la continuità del portastrisciante, evitando punti di discontinuità che potrebbero interferire con lo strisciamento del cavo sullo stesso, si è ipotizzata la realizzazione, sia sulla parte centrale del portastrisciante che sulle due appendici, di uno scalino di 1mm rispettivamente che può essere realizzato con una semplice operazione di fresatura come è stato già fatto sugli striscianti.

Come si può vedere dalla figura si è pensato di posizionare le viti nella zona in cui, come abbiamo potuto vedere dalle prove termiche, la temperatura non è superiore a 40°C, temperatura che non comporta i fenomeni di saldatura appena descritti.



L'operazione di sostituzione in questo caso comporterebbe semplicemente l'utilizzo di un giravite per levare queste quattro viti riducendo il tempo necessario a tale operazione a non più di 20 min e riducendo quindi notevolmente i costi di manutenzione e rendendo allo stesso tempo il prototipo realizzato più competitivo.

9.3 Approfondimento delle semplificazioni manutentive

Come già detto nel precedente paragrafo oltre alla riduzione del peso dell'intera struttura (aspetto molto benefico in fase di marcia del treno) un altro importante aspetto considerato (individuato solo durante gli studi intrapresi) è quello della riduzione dei tempi di manutenzione.

Precedentemente infatti abbiamo stimato il tempo necessario per la sostituzione di un attuale archetto portastriscianti intorno all'ora di lavoro per due risorse.

Abbiamo voluto approfondire questo tema e per fare ciò abbiamo chiesto la collaborazione di TRENITALIA S.p.a. che ad oggi detiene la manutenzione completa del materiale rotabile attualmente in uso.

Entrati in possesso delle fiches manutentive certificate, che vengono utilizzate per qualsiasi operazione di manutenzione e diversificate per tipologia di rotabile sono stati calcolati in maniera puntuale e precisa i tempi necessari per compiere lo smontaggio dell'intero pantografo dall'imperiale, la sostituzione degli striscianti ed il rimontaggio per permetterne il corretto utilizzo.

Le operazioni prevedono utilizzo di apparecchiature particolari e di minimo 2 persone per concludere l'operazione nella maniera minore.

Con la situazione individuata durante la ricerca si è valutato che per il corretto svolgimento dell'attività manutentiva con la nuova struttura dell'archetto si necessita di un'unica risorsa, evitando anche l'uso di apparecchiature speciali.

Un'unica persona, infatti, riesce a salire sull'imperiale della locomotiva e provvedere alla sostituzione del lamierno sul quale sono montati gli striscianti in rame.

Oltre ad una riduzione dei tempi e di conseguenza anche dei costi, si riuscirebbe a concludere operazioni di questo tipo anche in sedi diverse dalle officine di manutenzione.

Basti pensare che molti locomotori, per striscianti eccessivamente usurati, non vengono considerati idonei all'esercizio, riducendo l'offerta commerciale.

Con questa nuova tipologia di pantografo sarebbe possibile provvedere alla sostituzione anche in una banale stazione di sosta del treno, sempre nel rispetto delle norme di sicurezza.

Conclusioni

Lo scopo di questo lavoro è stato quello realizzare un pantografo per treni ad alta velocità al fine di minimizzare l'usura della linea aerea, garantendo allo stesso tempo, un contatto continuo tra gli striscianti e catenaria. L'analisi bibliografica e lo studio della struttura del pantografo FS 52/92 hanno evidenziato la circostanza che la forza agente sul pantografo, maggiormente responsabile dei distacchi, è sicuramente la forza d'inerzia. Per tale motivo si è scelto di diminuire la massa dell'elemento maggiormente incidente sulla massa equivalente della struttura e cioè dell'archetto porta striscianti situato sulla sommità del pantografo.

E' stata effettuata quindi un'analisi agli elementi finiti in modo da caratterizzare il pantografo progettato.

L'uso del composito ha inoltre permesso la costruzione dell'archetto in un pezzo unico.

Delle diverse soluzioni valutate quella che maggiormente si addice al nostro caso risulta essere una sezione di tipo sandwich avente come core del poliuretano, interposto tra due lamine di vetro resina.

Definito il nuovo design si è passati allo studio di uno stampo che ricalcasse perfettamente le nuove caratteristiche geometriche.

E' stata verificata la possibilità d'impiego della tecnologia del RIFT, effettuando inizialmente una serie di provini, e si è poi passati ad una prima realizzazione dell'archetto con il design stabilito.

Per realizzare i prototipi con caratteristiche meccaniche quanto più vicine possibili al modello originale è stata curata la continuità tra gli strati inferiori al core e quelli superiori, cioè gli strati di fibre avvolgono completamente il core.

Si è quindi ottenuta una struttura simmetrica con due pelli esterne, ognuna costituita da 8 strati di materiale orientati a $0^\circ/90^\circ/\pm 45^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ/0^\circ$ e con un **CORE** in

poliuretano. Data la particolare geometria dell'archetto, ciascuno degli strati costituente le due pelli è ottenuto mediante l'accurato accostamento di più pezzi di diversa forma. Per la realizzazione di ciascun prototipo è stato necessario disporre opportunamente, 98 diversi pezzi di tessuto di vetro.

I prototipi sono stati sottoposti a prove di fatica, con una macchina di prova MTS 810(Material Test System), ciascuna della durata di sei ore (ottenendo 30000 cicli per ogni pezzo), al fine di analizzare l'archetto da noi realizzato. Le prove ci hanno consentito di verificare la resistenza strutturale dell'archetto e del sistema di ancoraggio dello stesso al resto della struttura.

Al fine di evitare che l'archetto in composito raggiungesse, a causa dell'effetto joule, temperature tali da inficiarne le caratteristiche fisiche è stato realizzato un sistema di isolamento termico tra gli striscianti e l'archetto.

Il sistema di isolamento termico è stato validato mediante una campagna di prove in laboratorio utilizzando dei riscaldatori termici che sono stati posizionati nella parte dell'archetto maggiormente a contatto con il filo.

Il risultato del lavoro di tesi è stato un archetto porta striscianti, dalle elevate caratteristiche meccaniche, con una riduzione del peso pari al 62% rispetto a quello di metallo.

Con questo prototipo il valore delle accelerazioni perturbatrici sopportabili dal pantografo, senza che si verifichi il distacco, aumenta notevolmente (fig. 7.5), assicurando la migliore aderenza degli striscianti con la catenaria anche per le perturbazioni così dette ad "onda corta", causa dei maggiori problemi per gli attuali archetti.

Inoltre, diminuendo il valore delle sollecitazioni, si aumenta la durata media degli striscianti , il cui consumo è causato proprio dall'attrito.

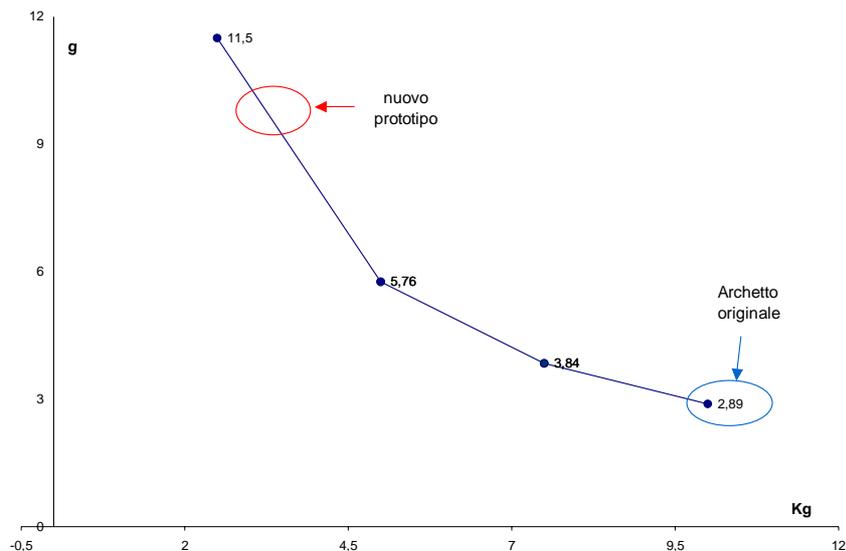


Fig. 7.5 Variazione accelerazione – massa

L'archetto realizzato è stato quindi montato su di un pantografo correntemente in uso sui treni in circolazione sulla rete ferroviaria italiana al fine di verificarne la perfetta compatibilità.

E' stata inoltre determinata una nuova configurazione del sistema portastrisciante che può consentire una drastica riduzione dei tempi di sostituzione degli striscianti usurati e quindi dei costi di manutenzione sempre nel rispetto delle procedure e degli standard di sicurezza ad oggi vigenti all'interno di "Trenitalia S.p.a.".

Bibliografia

1. Crivelli Visconti I., Materiali Compositi. Tecnologie e progettazione, Tamburini Editore, Milano, 1985.
2. Crivelli Visconti I., Appunti dalle lezioni del corso di Tecnologie dei Materiali non Convenzionali
3. G. Caprino R. Teti “Sandwich con anime polimeriche espanse: prontuario di analisi” Liguori Editore
4. Giancarlo Caprino, Appunti delle lezioni del corso di tecnologie dei materiali, Napoli, 2003.
5. Giancarlo Caprino, Roberto Teti, “Sandwich Structure”, Edizioni Il Prato
6. Schwarz, Mal M., “Composite Materials Handbook”, McGraw Hill, Inc., New York, 1992.
7. Bathe K.J., “Numerical Methods in Finite Element Analysis”, Prentice-Hall (1976).
8. Zienkiewicz O.C., “The Finite Element Method in Engineering Science”, vol. I – II - III, Mc Graw-Hill
9. MER.MEC, s.p.a. , “Progetto ROGER 2000” 1 www.mermec.it
10. Atti del convegno “Problemi di interazione pantografo – catenaria” , Firenze , 20 Dicembre 1996
11. Paolo Toni, “Tecnologie innovative per i pantografi” Dipartimento di energetica Sergio Stecco, Università degli studi di Firenze.
12. “Manuale dell’utente: Pro Engineer”, www.ptc.com.
13. Euro-Composities Zone Industrielle L-6401 Luxembourg, www.euro-composities.com.
14. D.J. Metolik, M. Czaplicki, T.J. Whalen, D.R. Day, “Analysis And Control of Resin Transfer Moulding Process Using In. Mould Sensor”, Proceeding Of ICCM/8, 1991, 15-F.

15. M.J. Owen, V. Middleton, C.D. Rudd, "Fiber Reinforcement For High Volume Resin Transfer Moulding" Composites Manufacturing Volume 1, Numero 2, June 1990.
16. Allen, R., Best P.F. and Short, "Vacuum Injection Moulding of High Volume Fraction Fiber Composites", I 3th Reinforced Plastics Congress, BPF RPG Brighton November 1982.
17. "Guida in linea: Laminator help", www.thelaminator.net.
18. "Material Proprieties", www.matweb.com.
19. Appunti del Prof. Paolo Toni, Sezione di meccanica Applicata alle Macchine, Dipartimento di energetica, Università di Firenze.
 - A. Balestrino, "Controlli innovativi nei sistemi di trasporto ad alta velocità" Sito ufficiale del progetto coordinato MURST-COFIN 2000
 - B. Allotta, "Progetto e sperimentazione di pantografi asserviti per la captazione di corrente nei treni ad alta velocità"
20. G. Galeotti, M. Galanti, S. Magrini. "Servo Actuated railway pantograph high speed running with constant contact force".
21. Cap. 14 del "Manuale dei materiali per l'ingegneria", AIMAT, Autori Vari Ed. Mc Graw Hill Libri Italia, Milano, 1996.
22. "Istituto nazionale di Fisica Nucleare" INFN, Torino.
23. "Materiali Compositi", www.lamiflex.it.
24. "Materiali Compositi", www.inetitalia.com.
25. Prof. Claudio Migliaresi, Alessandro Pegoretti, "Materiali Compositi", Univ. Di Trento.
26. Dottor Johann Delm, Dottor Wilhelm Baldauf "New Test Bench for Examination of the Catenary Interaction".
27. Ing. Gregorio Fava, Anna Stegagnini, "Banco di prova strisciante filo di contatto: Descrizione dei Risultati Sperimentali", Milano.
28. Da Hai He, Rafael R. Manory, Norm Grandy "Wear of railway contact wires against current collector materials".

29. Shunichi Kubo, Koji Kato “Effect of arc discharge on the wear rate and wear mode transition of a copper-impregnated metallized carbon contact strip sliding against a copper disk”
30. C.R.F. Azevedo, A. Sinatora “Failure analysis of a railway copper contact strip”
31. Johann Delm, Dr.-Ing. Wilhelm Baldauf, Deutsche Bahn AG, Research and Technology Centre (FTZ), Munich “A new test Bench for Examinations of the pantograph-catenary interaction”
32. B. Allotta, M. Papi, L. Pugi, P. Toni, A.G. Violi “Experimental Campaign on a Servo-Actuated Pantograph”
33. B. Allotta, L. Pugi, M. Rinchi, A. Rindi “Alcune esperienze su un pantografo dotato di sistema di regolazione della forza di contatto”
34. Tong-Jon Parka, Chang-Soo Hanb, Jin-Hee Jangc “Dynamic sensitivity analysis for the pantograph of a high-speed rail vehicle”.
35. G. Galeotti, P. Toni –Perugia University “Overhead contact line elasticity optimization for railway high speed running”
36. R. Giannetti, M. Macuccu, B. Tellini” Emi Measurements in Line-Pantograph contact Discontinuità in Railway Transportation System”.
37. Da Hai Hea, Rafael Manoryb “A novel electrical contact material with improved self-lubrication for railway current collectors”
38. C. Pronello “The measurement of train noise: a case study in northern Italy”
39. P. Sforza – MerMec “Progettazione di componenti con materiali innovative per striscianti di pantografi”