

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MESSINA

Dipartimento di Ingegneria



Dottorato di Ricerca in Ingegneria e Chimica dei Materiali e
delle Costruzioni
(XXIX ciclo)

“OTTIMIZZAZIONE DI COMPONENTI IN COMPOSITO PER L’INDUSTRIA DELLE INFRASTRUTTURE DI RETI ELETTRICHE, TELEFONICHE E DEI TRASPORTI”



Dottorando:	Dott. Ing. Salvatore Molino
Tutor:	Chiar.mo Prof. Ing. Eugenio Guglielmino
Coordinatore:	Chiar.mo Prof. Signorino Galvagno

Triennio 2014-2016

Sommario

1.	Introduzione ai materiali compositi: tecnologie di produzione e modalità di rottura.....	10
1.1	Scopo della tesi.....	10
1.2	Generalità materiali compositi.....	10
1.2.1	Rinforzo: Fibre di vetro.....	12
1.2.2	Matrici: Resina poliestere.....	13
1.3	Tecnologie di produzione e campi di applicazione.....	14
1.3.1	Stampaggio a compressione (Sheet Mold Compound SMC).....	15
1.3.2	Pultrusione (Pultrusion).....	16
1.3.3	Centrifugazione (Centrifugal casting).....	17
1.3.4	Stampaggio ad iniezione (Injection molding).....	18
1.3.5	Estrusione per fibra ottica (Extrusion).....	20
1.3.6	Valutazione comparativa tra le diverse tecnologie produttive.....	20
1.4	Modalità di rottura e criteri di resistenza.....	21
1.4.1	Generalità.....	21
1.4.2	Cedimento sotto sollecitazione di trazione longitudinale.....	22
1.4.3	Cedimento sotto sollecitazione di compressione longitudinale.....	23
1.4.4	Cedimento sotto sollecitazione di trazione trasversale.....	24
1.4.5	Cedimento sotto sollecitazione di compressione trasversale.....	24
1.4.6	Cedimento sotto sollecitazione di taglio sul piano delle fibre.....	25
1.4.7	Principali criteri di resistenza.....	25
2.	Caratterizzazione dei materiali: prove sperimentali e analisi dei risultati.....	26
2.1	Classificazione materiali da analizzare.....	26
2.2	Stato dell’arte: materiali termoplastici stampati ad iniezione.....	27
2.2.1	Noryl.....	27
2.2.2	Lexan.....	30
2.3	Stato dell’arte: materiali termoindurenti stampati – pultrusi - centrifugati.....	34
2.4	Stato dell’arte: tecniche sperimentali utilizzate.....	34
2.4.1	Lo sviluppo della meccanica sperimentale: i metodi ottici.....	34
–	Digital Image Correlation: Preprocessing.....	36
–	Digital Image Correlation: preparazione provini.....	37
–	Digital Image Correlation: Post processing.....	37
2.4.2	Analisi Termografica: principi di funzionamento.....	38
–	Effetto termo-elastico. Correlazione ΔT - stress.....	39

PROVE SPERIMENTALI: MATERIALI TERMOPLASTICI	40
2.5 Prova di trazione.....	40
2.5.1 Analisi dei risultati Noryl SE1GFN2	41
2.5.2 Analisi dei risultati Lexan Resin 3412R.....	42
2.5.3 Analisi dei risultati Lexan 500R.....	43
2.5.4 Riepilogo prove di trazione termoplastici	45
2.6 Prova di compressione	46
2.7 Prova di flessione.....	47
2.8 Prova d’impatto	48
2.9 Prova di rigidità dielettrica	49
2.10 Prova di assorbimento d’acqua	50
2.11 Prova di resistività volumetrica	51
2.12 Prova di autoestinguenza	52
PROVE SPERIMENTALI: MATERIALI TERMOINDURENTI	53
2.13 Prova di trazione stampati – pultrusi – centrifugati.....	53
2.13.1 Dimensioni provini e valutazione parametri di prova	53
2.13.2 Analisi dei risultati stampati a compressione SMC.....	54
2.13.3 Analisi dei risultati pultrusi ortoftalici	56
2.13.4 Analisi dei risultati pultrusi isoftalici.....	58
2.13.5 Analisi dei risultati centrifugati.....	61
▪ Analisi dei risultati centrifugati: resistenza agli agenti chimici.....	64
▪ Analisi dei risultati centrifugati: resistenza ai raggi UV	64
▪ Analisi dei risultati centrifugati: Stabilità termica +70°C / -30°C.....	65
▪ Comparazione prove di trazione centrifugati.....	66
2.13.6 Confronto a trazione centrifugati – stampati - pultrusi	67
2.14 Prova di compressione centrifugati.....	69
2.14.1 Dimensioni provini e valutazione parametri di prova	69
2.14.2 Analisi dei risultati	70
2.15 Prova di flessione centrifugati	73
2.15.1 Dimensioni provini e valutazione parametri di prova	73
2.15.2 Analisi dei risultati	74
2.16 Prova di taglio interlaminare centrifugati	78
2.16.1 Dimensioni provini e valutazione parametri di prova	78
2.16.2 Analisi dei risultati: sezione 1m	80
2.16.3 Analisi dei risultati: sezione 3m	81

2.16.4	Analisi dei risultati: sezione 5m	82
2.16.5	Analisi dei risultati: sezione 8m	83
2.16.6	Conclusioni: Confronto τ alle varie sezioni	84
2.17	Prova per il calcolo della % Wf centrifugati	84
2.18	Prova di rigidità dielettrica centrifugati.....	85
2.19	Prova di assorbimento d’acqua centrifugati	86
2.20	Prova di autoestinguenza centrifugati	87
2.21	Riepilogo risultati prove centrifugati.....	89
3.	Processo di produzione e descrizione prove di collaudo sperimentale dei pali centrifugati.....	93
3.1	Stato dell’arte pali GFR centrifugati	93
3.2	Fase di tessitura delle stuoie	95
3.3	Fase di produzione palo (fibra + matrice).....	97
3.3.1	Agenti utilizzati per la realizzazione dei pali in GFR	98
3.3.2	Processo di catalisi pali in GFR.....	99
3.3.3	Sistema di taglio, imballaggio e trasporto.....	100
3.4	Fase di collaudo sperimentale	101
3.4.1	Esame a vista sui pali	101
3.4.2	Verifica di siglatura dell’etichetta.....	102
3.4.3	Prova di durezza superficiale	102
3.4.4	Prova su cappellotti di chiusura.....	103
3.4.5	Prova di caduta	103
3.4.6	Prova di schiacciamento in testa al palo	103
3.4.7	Attrezzature utilizzate per effettuare le prove sui pali	104
3.4.8	Prova di tiro rotatorio.....	105
3.4.9	Prova di tiro assiale.....	105
3.4.10	Prova ciclica	106
3.4.11	Prova di tiro in testa	107
4.	Analisi analitico – numerico - sperimentale su differenti prototipi centrifugati.....	108
4.1	Metodo Analitico	108
4.1.1	Analisi dei risultati: Metodo Analitico	109
4.2	Metodo Numerico	113
4.2.1	Schema di progetto	113
4.2.2	Engineering Data ACP	114
4.2.2.1	Proprietà lamina unidirezionale	115
4.2.2.2	Proprietà lamina chopped	116

4.2.3	Geometry and Model in ACP	117
4.2.4	Setup in ACP: Prototipo_01	117
4.2.5	Boundary Conditions	121
4.2.6	Analisi dei risultati: prototipo_01	121
–	Deflessione	121
–	Tensione normale	122
–	Riepilogo dati numerici prototipo_01	123
4.2.7	Simulazione prototipo_02	124
4.2.8	Analisi dei risultati: prototipo_02	126
–	Deflessione	126
–	Tensione normale	126
–	Riepilogo dati numerici prototipo_02	127
4.2.9	Simulazione prototipo_03	128
4.2.10	Analisi dei risultati: prototipo_03	130
–	Deflessione	130
–	Tensione normale	130
–	Riepilogo dati numerici prototipo_03	131
4.3	Metodo Sperimentale.....	132
4.3.1	Analisi dei risultati: prove sperimentali.....	134
4.4	Confronto analitico – numerico - sperimentale	135
–	Prototipo_01: deflessione	135
–	Prototipo_01: tensione normale	136
–	Prototipo_02: deflessione	138
–	Prototipo_02: tensione normale	139
–	Prototipo_03: deflessione	141
–	Prototipo_03: tensione normale	142
4.4.1	Riepilogo confronto prototipi.....	144
4.5	Progettazione committente Orange.....	145
4.5.1	Metodo Analitico: analisi dei risultati.....	145
4.5.2	Metodo Sperimentale: analisi dei risultati	148
4.5.3	Confronto analitico - sperimentale	149
–	Prototipi_L: deflessione.....	149
–	Prototipi_R: deflessione	151
4.5.4	Riepilogo confronto prototipi Orange	153

4.5.5	Attività svolta a Ningbo (CINA)	153
1)	Progettazione – realizzazione - collaudo dei cappellotti testa – base palo.....	153
2)	Progettazione – realizzazione - collaudo dei collari in acciaio	154
-	Prova di trazione.....	154
-	Prova di fatica	155
-	Prova di tiro assiale.....	155
3)	Realizzazione – collaudo reggipali SMC.....	155
5.	Life Cycle Assessment pali centrifugati e sistemi di riciclaggio materiali compositi termoindurenti ...	156
5.1	Stato dell’arte: le origini e lo sviluppo del LCA.....	156
5.2	Struttura e limiti di un LCA	158
5.2.1	Prima fase di un LCA: definizione degli scopi e degli obiettivi	159
-	Definizione del sistema.....	159
-	Definizione dell’unità funzionale	159
5.2.2	Seconda fase di un LCA: analisi di inventario (LCI)	159
5.2.3	Terza fase di un LCA: analisi degli impatti (LCIA).....	160
5.2.4	Quarta fase di un LCA: interpretazione e miglioramento.	163
5.3	Definizione obiettivo e unità funzionale	163
5.3.1	Caso studio 1: palo di illuminazione in acciaio	164
-	Analisi di inventario	164
-	Fasi del ciclo di vita e dati dei flussi.....	165
-	Analisi degli impatti (LCIA): Steel Pole 6 m.....	166
-	Analisi degli impatti (LCIA): Steel Pole 8 m.....	167
5.3.2	Caso studio 2: palo di illuminazione in GFR.....	169
-	Analisi di inventario	169
-	Fasi del ciclo di vita e dati dei flussi.....	170
-	Analisi degli impatti (LCIA): GFR Pole 6 m	172
-	Analisi degli impatti (LCIA): GFR Pole 8 m	174
5.3.3	Confronto analisi degli impatti Steel Pole – GFR Pole	175
5.3.4	Caso studio 3: palo per linea aerea telefonica GFR 8 m Telecom Italia	177
-	Analisi di inventario	177
-	Fasi del ciclo di vita e dati dei flussi.....	178
5.3.5	Confronto analisi degli impatti prototipi GFR Pole.....	179
5.4	Metodologie di riciclaggio di compositi termoindurenti.....	181
5.4.1	Smaltimento in discarica	181

5.4.2	Riciclaggio meccanico	181
–	Riciclaggio Primario	181
–	Riciclaggio Secondario	182
5.4.3	Recupero di energia tramite incenerimento	184
5.4.4	Riciclaggio Chimico - Pirolisi	184
6.	Conclusioni attività di ricerca	185
7.	Ringraziamenti.....	188
	Appendice.....	189
	Bibliografia.....	190

Struttura della tesi

L’attività di ricerca, sviluppata in collaborazione con l’azienda N.T.E.T. S.p.A., ha l’obiettivo di sviluppare nuove formulazioni di compositi in vetroresina al fine di ottenere pali con analoghe caratteristiche prestazionali, ma con una sensibile riduzione del peso di circa il 5%, rispetto a quelli attualmente prodotti. La struttura della tesi è organizzata come segue:

Capitolo 1. Introduzione ai materiali compositi: tecnologie di produzione e modalità di rottura

In questo capitolo iniziale viene fatta una panoramica dei materiali compositi in generale, soffermandoci sulle materie e tecnologie di produzione utilizzate presso l’azienda. Nello specifico sono state date delle indicazioni sulla fibra di vetro *E-glass*, sulla *resina poliestere insatura* e sui vari processi produttivi con cui sono stati realizzati i materiali indagati durante la tesi come: 1) stampaggio a compressione; 2) pultrusione; 3) centrifugazione; 4) stampaggio ad iniezione; 5) estrusione.

Successivamente vengono definiti i principali metodi di rottura al variare dell’applicazione del carico e i principali criteri di resistenza utilizzati.

Capitolo 2. Caratterizzazione dei materiali : prove sperimentali e analisi dei risultati

La prima fase dell’attività di ricerca è stata focalizzata sulle prove sperimentali di caratterizzazione dei materiali presenti nell’azienda N.T.E.T. S.p.A. Nello specifico in questo capitolo sono stati indagati materiali realizzati con le tecnologie di: stampaggio a iniezione, stampaggio a compressione, pultrusione, centrifugazione. Per gli stampati a compressione e i pultrusi è stata fatta esclusivamente una caratterizzazione meccanica di trazione mentre per i centrifugati e gli stampati a iniezione è stata fatta una caratterizzazione completa del materiale effettuando le seguenti prove: 1) prove per determinare la percentuale di fibre di vetro; 2) prove dielettriche; 3) prove di assorbimento di acqua; 4) prove di autoestinguenza; 5) prove di caratterizzazione meccanica (trazione, compressione, flessione, taglio interlaminare); 6) prove di caratterizzazione chimico-fisica (resistenza ai raggi UV, stabilità termica a +70 °C/-30 °C, resistenza agli agenti chimici). Durante le prove di trazione e compressione sono state applicate tecniche sperimentali a campo intero, del tipo contactless: la Digital Image Correlation (DIC) e la termografia ad infrarossi (IRT). Completate tutte le prove sperimentali è stato fatto un confronto dei materiali termoindurenti analizzati definendo vantaggi e limitazioni di ogni tecnologia di produzione.

Capitolo 3. Processo di produzione e descrizione prove di collaudo sperimentale di centrifugati

Definizione del processo di produzione dei pali in vetroresina:

- Fase di tessitura delle stuoie
- Fase di produzione palo (fibra + matrice)
- Fase di collaudo sperimentale: 1) esame a vista; 2) verifica siglatura etichetta; 3) prova di durezza superficiale con durometro Barcol; 4) prova di chiusura cappellotti testa – base palo; 5) prova di caduta dall’altezza di 2 metri sull’asfalto; 6) prova di schiacciamento collare in testa applicando una coppia di serraggio di 40 N*m; 7) prova di tiro rotatorio ruotando il palo di 120°; 8) prova di tiro assiale applicando una forza di 2200 N; 9) prova ciclica applicando un carico variabile di ± 2500 N per 20 cicli; prova di tiro in testa applicando un carico di 4000 N.

Capitolo 4. Analisi analitico – sperimentale – numerico su differenti prototipi centrifugati

La seconda fase della tesi è focalizzata sul reparto centrifugati andando ad effettuare una riprogettazione del palo 8 m Telecom Italia in modo da ottenere un risparmio in termini di fibra di vetro utilizzata, di resina iniettata all’interno dello stampo e quindi conseguentemente un risparmio in termini di peso e costo del palo ultimato (andando a ridurre tutti i possibili sfridi che si creano durante la fase di produzione). Per ottenere tale scopo sono stati applicati modelli analitici e numerici con i quali è stato possibile definire dei prototipi. Prima di entrare in regime di produzione tali prototipi di pali dovevano superare delle prove di collaudo sperimentale (descritte nel capitolo 3) prelevando a caso dalla produzione un lotto di 10 pali assicurandoci un identico tempo di invecchiamento. Successivamente è stato effettuato un confronto tra i modelli analitici e numerici e le prove di collaudo sperimentale per ogni singolo prototipo. Parallelamente, è stata svolta una seconda attività di ricerca, la quale è stata incentrata sulla progettazione di nuovi prototipi di pali dove i requisiti richiesti, secondo le normative di riferimento, ponevano come obiettivo da raggiungere non più la leggerezza del palo ma la rigidità dello stesso in modo da rientrare nei valori di deflessione richiesti dal committente in fase di progettazione. Parte di questa fase è stata svolta durante un periodo di stage e ricerca svolto a Ningbo (CINA), presso la sede dell’azienda N.T.E.T. S.p.A.

Capitolo 5. Life Cycle Assessment pali centrifugati e sistemi di riciclaggio materiali compositi termoindurenti

Durante la terza fase della tesi, in conformità con le indicazioni fornite dalla International Organization for Standardization (ISO) nello standard ISO 14040 e 14044 sono state svolte delle analisi LCA di due diversi prodotti (pali per illuminazione e pali per linee aeree di telecomunicazione) e processi di produzione. Sono stati analizzati tre casi studio. Nei primi due casi sono stati confrontati gli impatti ambientali di pali per illuminazione pubblica prodotti in acciaio zincato e in vetroresina. Nel terzo caso studio sono stati valutati e confrontati gli impatti ambientali di tre prototipi di pali in vetroresina realizzati per il committente Telecom Italia presso lo stabilimento dell’ N.T.E.T. S.p.A.

Infine è stata fatta un’analisi sul riciclaggio dei materiali compositi termoindurenti definendo tutte le possibili forme di smaltimento e successivamente una soluzione a costi non molto elevati. La soluzione messa a punto dalla N.T.E.T. S.p.A., definita RBMC - Recycled Bulk Molding Compound.

Capitolo 6. Conclusioni attività di ricerca

- È stata effettuata una caratterizzazione dei materiali presenti in azienda.
- È stato ridotto il peso del palo per linee aeree di telecomunicazione di 6,87 %, mantenendo al contempo buone caratteristiche meccaniche.
- È stato ridotto l’impatto ambientale dei pali per linee aeree di telecomunicazione di 6,25 %.

Capitolo 7. Ringraziamenti

Bibliografia

1. Introduzione ai materiali compositi: tecnologie di produzione e modalità di rottura

1.1 Scopo della tesi

L’interesse della ricerca verso i materiali compositi, in campo industriale, è andato via via crescendo negli ultimi anni grazie a una favorevole combinazione di vantaggi quali:

- elevato rapporto prestazioni meccaniche/peso, con conseguente diminuzione dei pesi e riduzione dei consumi ed emissioni inquinanti nei mezzi di trasporto;
- possibilità di realizzare forme complesse altrimenti impossibili con i materiali tradizionali;
- elevata dielettricità per applicazioni nei settori trasporto energia e telecomunicazione;
- resistenza agli agenti atmosferici;
- costi di produzione comparabili con prodotti aventi la stessa funzione realizzati con materiali tradizionali.

Lo studio di componenti in materiale composito è caratterizzato dal non poter separare la progettazione della geometria del componente, dalla definizione del materiale (percentuale e disposizione delle fibre) e dal processo di produzione. In tal senso, nella funzione del progettista si devono riassumere sinergicamente competenze riguardanti tre ambiti: - progettazione della forma - definizione del materiale - scelta della tecnologia produttiva.

La tesi è stata sviluppata in collaborazione con la N.T.E.T. S.p.A., azienda leader in Italia nel settore della produzione di grande e media serie di componenti in composito per infrastruttura di rete elettrica, telefonica e ferroviaria e nella costruzione di componenti di carrozzeria per veicoli industriali.



Figura 1 – Stabilimenti N.T.E.T. S.p.A

Grazie alla vasta gamma di prodotti, la N.T.E.T. S.p.A ricopre un'ampia fetta del mercato italiano dell'installazione per telecomunicazione e da qualche anno è sempre più presente su tutto il mercato Europeo, Americano ed Arabo.

Gli OBIETTIVI della seguente attività di ricerca sono molteplici: 1) effettuare una caratterizzazione meccanica generale di tutti i materiali che vengono prodotti presso l’azienda con le varie tecnologie di produzione, utilizzando le due tecniche sperimentali della DIC e della termografia; 2) focalizzare l’attenzione sulla tecnologia della centrifugazione, sviluppando nuove formulazioni per i pali in vetroresina in modo da ottenere prodotti con le medesime caratteristiche prestazionali di quelli esistenti, ma con una sensibile riduzione del peso di circa il 5 % rispetto a quelli precedentemente prodotti; 3) progettazione e realizzazione di vari prototipi di pali con diametri, lunghezze, spessori e conicità completamente differenti da quelli tipicamente prodotti; 4) LCA del prodotto per osservare gli impatti ambientali del prodotto ultimato.

1.2 Generalità materiali compositi

Diversi campi dell’ingegneria richiedono, al giorno d’oggi, l’impiego di materiali caratterizzati da combinazioni di proprietà che non possono essere riscontrate nelle 3 famiglie di materiali tradizionali (metalli, ceramici, polimeri). La risposta alle diverse e discordanti esigenze delle varie applicazioni è stata trovata nei materiali compositi.

Con il termine materiale composito, si intende una combinazione di due o più fasi unite artificialmente (e non come le leghe, derivate da processi naturali) in cui ogni fase mantiene una propria identità chimico – fisica ed è separata dalle altre da una distinta interfaccia. Il materiale così fatto risulterà avere proprietà meccaniche e fisiche complessivamente superiori rispetto a quelle dei suoi singoli componenti [1].

Nello specifico i principali elementi costituenti un materiale composito sono:

- la **matrice**, o fase continua, avente innumerevoli funzioni come:

1. collegamento tra le fibre, cioè tiene le fibre stabili nella loro posizione e nella loro geometria. Ciò è importante nel caso in cui si voglia dare una direzione preferenziale alle proprietà meccaniche;
2. mantenere le fibre separate, in quanto spesso le fibre sono composte da materiali con comportamento fragile a rottura. Ciò implica che se tutte le fibre sono attaccate tra loro, anche il composito risultante risentirà di un comportamento fragile;
3. protezione delle fibre dall’ambiente circostante, nel caso di ambienti corrosivi o ossidanti. Le fibre, non essendo a contatto diretto con l’ambiente, non risentono di deterioramento;
4. bloccaggio di eventuali cricche insorte nelle fibre nel caso di matrici più deformabili delle fibre. Infatti nel caso in cui sia presente una tensione che porti a rottura le fibre ma non della matrice, il composito continua a restare integro.

- il **materiale di rinforzo**, o fase discontinua, che può trovarsi in forma di fibre lunghe, corte o particelle e ha il compito di sostenere la maggior aliquota di carico del materiale composito ultimato.

In un materiale composito, oltre alla fase continua (matrice) e alla fase discontinua (fibra) sono innegabilmente presenti altri componenti come: gli agenti accoppianti o rivestenti e i riempitivi. Questi due componenti vengono utilizzati per migliorare le caratteristiche del materiale composito svolgendo dei compiti ben precisi.

Gli agenti accoppianti o rivestenti sono sostanze che vengono aggiunte affinché matrice e fibra possano interagire nel migliore dei modi; in pratica, la matrice deve vedere la fase dispersa come l’entità rinforzante e non come un’inclusione. Di fatto, esistono specie che hanno un’alta affinità chimico – fisica (in tal caso non è necessario l’impiego di un agente accoppiante: si dice che la matrice ha un’elevata bagnabilità nei confronti della fibra) e altre in cui l’affinità è minore e le 2 specie tendono a non interagire tra di loro (in tal caso l’impiego dell’agente accoppiante si rende necessario al fine di abbassare le tensioni superficiali all’interfaccia e assicurare una corretta interazione matrice – fibra). I riempitivi sono materiali economici (come il CaCO_3 che viene utilizzato nello stampaggio a compressione nella realizzazione dei pannelli), che servono per aumentare il peso, contenere il ritiro della matrice durante la reticolazione e diminuire i costi di produzione.

Definite le differenti fasi, a questo punto è possibile eseguire diverse classificazioni dei materiali compositi al variare di numerosi fattori. La classificazione più usata, è quella che si basa sul meccanismo di resistenza, strettamente legato a forma e orientamento del rinforzo. In base alla forma si distinguono materiali compositi *fibro – rinforzati* e materiali compositi *rinforzati con particelle*.

In base all’orientamento quest’ultimi si suddividono in compositi con particelle con orientamento casuale e compositi rinforzati con particelle con orientamento preferenziale [2].

I compositi fibro – rinforzati possono essere invece differenziarsi in compositi a *fibra continua* (fibra lunga, quando la lunghezza delle fibre è confrontabile con quella dei manufatti) e in compositi a *fibra discontinua* (fibra corta, quando la lunghezza della fibra è compresa tra 1 e 8 cm circa).

Le fibre lunghe possono essere: unidirezionale – continue (0°), con un orientamento delle fibre preferenziale lungo una determinata direzione, dando così un’elevata resistenza in direzione longitudinale; bidirezionale – continue ($0^\circ/90^\circ$) tipico per superfici piane, al fine di evitare la possibile rottura accidentale della lamina, che può avvenire a seguito anche di bassi carichi in direzione ortogonale alle fibre; bidirezionale – continue ($-45^\circ/45^\circ$) tipico per superfici curve in cui è necessaria

una migliore resistenza in direzione obliqua; random – continue, in modo da assicurare una certa resistenza in direzione trasversale.

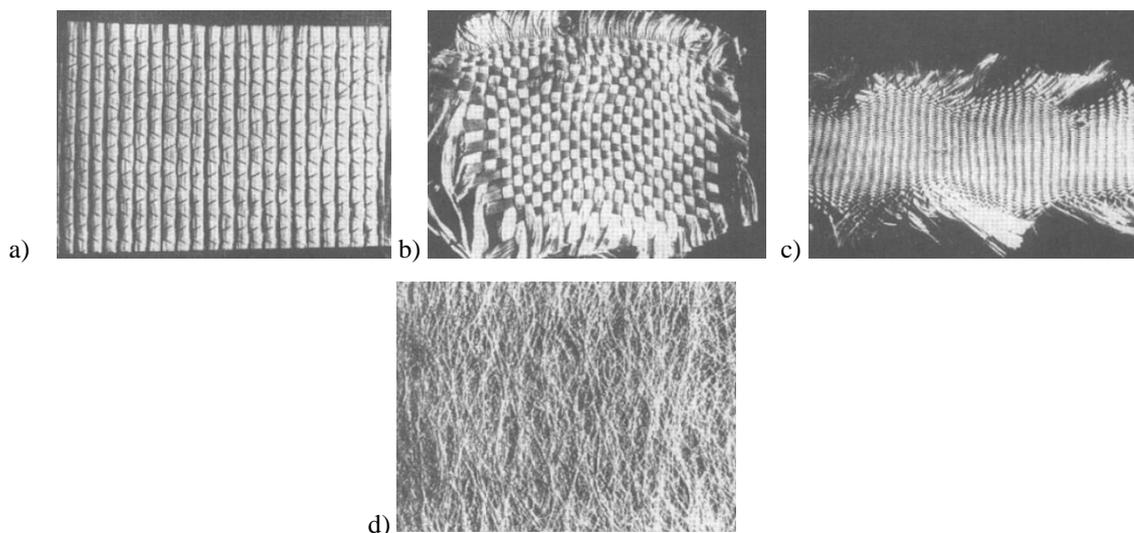


Figura 2: Fibre lunghe: a) Stiched mat; b) balanced woven mat; c) braided mat; d) continuous strand mat

Le fibre corte possono essere: unidirezionale - discontinue, con un orientamento preferenziale delle fibre nella direzione del flusso prodotto mediante estrusione o con procedimenti simili (forgiatura a iniezione); random - discontinue con un orientamento randomizzato con fibre parallele al piano di lavoro.

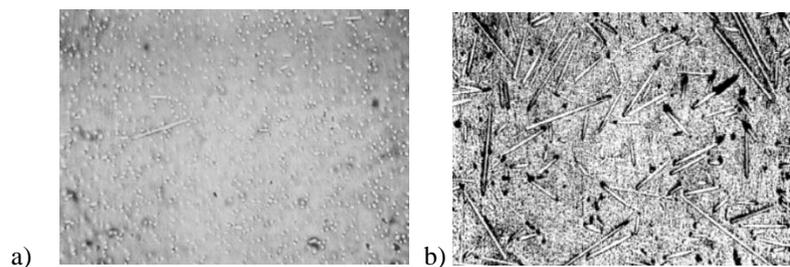


Figura 3 - Fibre corte: a) orientate lungo la direzione di estrusione b) random

1.2.1 Rinforzo: Fibre di vetro

Come detto nel paragrafo precedente, i rinforzi, sia nel caso di fibre che di particelle, possono essere orientati in modo casuale oppure secondo una direzione preferenziale. Inoltre, le fibre possono essere presenti singolarmente oppure aggregate: in questo caso le si trova concentrate in un fascio (roving) che ne contiene varie centinaia arrotolate oppure attorcigliate a trefolo ed avvolte (yarn). Il ruolo fondamentale che essi possiedono è quello di incrementare complessivamente le proprietà meccaniche del composito, in particolare resistenza e rigidità.

Le fibre utilizzate nel lavoro di tesi sono le fibre di vetro, che presentano i seguenti punti di forza rispetto a tutte le altre fibre presenti in commercio:

- il costo relativamente contenuto;
- l’elevatissima resistenza a trazione;
- l’ottima resistenza chimica fa sì che, accoppiata con matrici polimeriche si costituiscono compositi impiegabili in ambienti corrosivi;
- l’elevata resistività elettrica, la bassa conducibilità termica (sono buoni isolanti sia elettrici che termici) e il basso coefficiente di dilatazione termica li rende molto stabili.

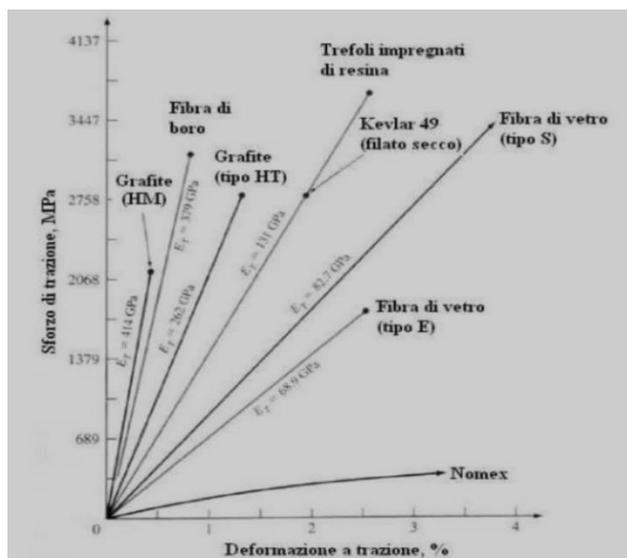


Figura 4 - Confronto proprietà meccaniche fibre

Le fibre di vetro sono al mondo d’oggi le fibre più utilizzate in campo industriale, e oltre ai numerosi vantaggi presentano alcune limitazioni come:

- La modesta rigidezza testimoniata da un modulo di Young basso;
- Densità maggiore rispetto a tutte le altre fibre
- Hanno un’elevata durezza e ciò rappresenta un inconveniente se annegate in matrici termoplastiche;
- Sono molto sensibili all’abrasione per sfregamento con materiali più duri: per evitare la formazione di microcricche superficiali vengono ricoperte, durante la fabbricazione con un “size” protettivo;
- Hanno una bassa resistenza a fatica;

Tabella 1 - Proprietà a trazione per differenti fibre di vetro commerciali

Tipo	Resistenza a trazione [MPa]	Allungamento [%]	Modulo [GPa]	Coeff. Poisson
A	3310	4.8	68.9	0.183
C	3310	4.8	68.9	0.276
E	3448	4.8	72.4	0.20
S	4585	5.4	86.0	0.22
S-2	4890	5.7	86.9	0.23

Le fibre di vetro si classificano in classi, diverse per composizione chimica, proprietà e dunque applicazioni.

Tabella 2 - Classificazione fibre di vetro a seconda del tipo

Designazione	Uso	Composizione
A	Isolante termico	SiO ₂ 72% Al ₂ O ₃ 1% K ₂ O 14% CaO 10% MgO 3%
C	Applicazioni chimiche	SiO ₂ 65% Al ₂ O ₃ 4% B ₂ O ₃ 6% CaO 14% MgO 3% K ₂ O 9%
E	Isolante elettrico	SiO ₂ 55% Al ₂ O ₃ 11% B ₂ O ₃ 6% CaO 18% MgO 5% altro 5%
S	Compositi ad alta resistenza	SiO ₂ 65% Al ₂ O ₃ 25% MgO 10%
S-2	Compositi ad alta resistenza	SiO ₂ 65% Al ₂ O ₃ 25% MgO 10%

1.2.2 Matrici: Resina poliesteri

Come detto precedentemente, le matrici insieme alle fibre rappresentano i componenti principali di un materiale composito. A seconda del tipo di composito in esame è possibile classificare le matrici in:

- Compositi a matrice metallica MMC (Metallic Matrix Composite);

- Compositi a matrice ceramica CMC (Ceramic Matrix Composite).
- Compositi a matrice polimerica PMC (Polymer Matrix Composite);

All’interno dei compositi a matrice polimerica avremo un ulteriore distinzione in matrici termoplastiche e matrici termoindurenti.

I materiali realizzati con *matrici termoplastiche* richiedono l’intervento del calore per essere plasmati e dopo raffreddamento mantengono la forma in cui sono stati modellati. Inoltre tali materiali possono facilmente essere riciclati e quindi riutilizzati riscaldandoli e rimodellandoli nuovamente in nuove forme per un certo numero di volte senza che questi possano avere cambiamenti significativi delle loro proprietà.

I materiali realizzati con *matrici termoindurenti* sono modellate in una forma permanente e reticolate o “indurite” attraverso una reazione chimica. Esse non possono essere nuovamente rimodellate con il calore in un’altra forma, ma si degradano o si decompongono dopo essere state riscaldate ad una temperatura troppo elevata e per tali motivi tali resine non possono essere riciclate.

Nel lavoro di tesi sono state utilizzate le resine poliestere, le quali possiedono un ruolo importante all’interno delle resine termoindurenti grazie alla possibilità di variare in modo molto esteso la composizione della resina e il processo di fabbricazione con l’effetto di poter sintonizzare le proprietà delle resine alle esigenze della singola applicazione industriale.

Tali tipi di resine hanno la caratteristica di possedere un basso costo e quindi di essere le resine di più largo consumo. Presentano, però, la pecca di emettere sostanze volatili, di essere infiammabili e potenzialmente di emettere sostanze cancerogene.

Tabella 3 - Proprietà tipiche delle resine poliestere

Densità [kg/m ³]	1100-1400
Resistenza a trazione [Mpa]	34.5-103.5
Modulo a trazione [Gpa]	2.1-3.45
Allungamento %	1-5
Coefficiente di Poisson	00.34
Resilienza J (prove Izod)	0.27-0.54
Durezza (Rc M)	115
Ritiro %	5-12
Temp. transizione vetrosa [°C]	100

1.3 Tecnologie di produzione e campi di applicazione

Le proprietà finali dei materiali compositi, oltre che dalle specifiche proprietà costituenti rinforzo e matrice, sono intrinsecamente legate alle tecniche di fabbricazione dei prodotti finali. Non basta, perciò, limitarsi a scegliere i tipi di materiali, bensì sarà di fondamentale importanza ponderare le tecniche di associazione dei singoli componenti al fine di garantire la qualità del prodotto.

In particolare è importante: rendere i processi ad alto grado di automazione; abbassare l’elevato costo delle materie prime; ridurre i lunghi tempi di trasformazione dei materiali e aumentare la coesione interlaminare strettamente connessa all’assenza di bolle d’aria durante la formatura del materiale composito.

Per la corretta ideazione, progettazione e sviluppo di un materiale composito l’ingegnere progettista deve tenere in considerazione 3 importanti parametri:

- geometria del componente;
- quantità, tipologia e disposizione dei rinforzi;
- tecnologia produttiva.

Queste fasi non possono essere disgiunte e sono tra di loro strettamente interconnesse, anche nel rispetto dei vincoli economici di produzione.

I campi di applicazione verso cui l’azienda N.T.E.T. S.p.A. fornisce i propri prodotti sono principalmente l’industria automotive, ferroviaria, telecomunicazione e dell’energia. Si descrivono qui brevemente il funzionamento delle tecnologie di produzione presenti all’interno dell’azienda.

1.3.1 Stampaggio a compressione (Sheet Mold Compound SMC)

Negli ultimi anni c’è stato un forte incremento nell’utilizzo industriale di compositi di tipo SMC soprattutto grazie alla loro processabilità: possono essere infatti stampati in geometrie molto complesse con elevate velocità di produzione e grazie alle matrici e agli additivi recentemente sviluppati consentono la realizzazione di prodotti con caratteristiche meccaniche decisamente interessanti da un punto di vista industriale [3]. Il loro utilizzo si è diffuso principalmente nell’industria automobilistica per paraurti, cofani o altri componenti di carrozzeria per i quali non ci sono elevate esigenze di resistenza o rigidità ma è decisamente importante la riduzione di peso.



Figura 5 – Schema di processo di stampaggio a compressione

Il pre-impregnato – SMC – è tipicamente costituito da resina poliestere insatura, fibre di vetro, additivi e catalizzatori che si attivano oltre i 100 °C. Per le applicazioni più diffuse abbiamo i seguenti componenti (frazione di peso):

- 25% rinforzo fibre di vetro di lunghezza variabile tipicamente da 1 cm a 2 cm, anche se esistono, per applicazioni particolari, preimpregnati a fibre lunghe;
- 25% resina poliestere insatura, catalizzatore, master colorante e additivi vari;
- 50% cariche riempitive, solitamente costituite da CaCO_3 o AlOH_3 .

Il processo di stampaggio del SMC – Sheet Molding Compound - consiste nel posizionamento manuale o in alcuni casi automatizzato dei preimpregnati, opportunamente sagomati e pesati, sulla parte inferiore di uno stampo riscaldato come mostrato in Figura 5. Lo scorrimento e la compattazione dell’ SMC all’interno dello stampo sono dovuti alla chiusura a pressione esercitata dalla pressa, circa 60-100 atm, ed all’elevata temperatura presente nello stampo. La temperatura dello stampo, si aggira sui 150-170°C (nel caso di resine poliestere orto ed isoftaliche) attiva la catalisi e completa la cura. Le elevate pressioni conformano il prepreg e fanno sì che siano riempite tutte le cavità dello stampo che definiscono la forma. In questo modo si possono realizzare forme anche molto complesse, impossibili da realizzare con lo stampaggio dei materiali metallici. Realizzato il pezzo la pressa si riporta alla posizione iniziale dopo un determinato periodo di tempo e si estrae il pezzo dallo stampo. Il prodotto estratto presenterà delle “sbavature di SMC” ai bordi le quali verranno successivamente eliminate con una lima metallica da parte di un operatore.

Le attrezzature di produzione sono realizzate solitamente in acciaio temperato o bonificato per garantire sufficiente durata e resistenza alle abrasioni dovute allo scorrimento delle fibre di rinforzo, specialmente se vetro. Qui di seguito in Figura 6 vengono riportati alcuni prodotti realizzati in SMC presso gli stabilimenti della N.T.E.T S.p.A.



Figura 6 – Prodotti realizzati con la tecnologia dello stampaggio a compressione

1.3.2 Pultrusione (Pultrusion)

La tecnologia della pultrusione non è altro che un processo continuo in grado di produrre manufatti in materiale polimerico fibro-rinforzato con la quale è possibile realizzare profili costanti, sia a sezione aperta sia a sezione chiusa [4].

Il profilo si ottiene facendo passare le fibre di rinforzo prima da una vasca di impregnazione e successivamente in uno stampo riscaldato dove si esegue la cura del composito. A differenza dell’estrusione in cui il materiale è spinto nello stampo, nella pultrusione il composito formato e catalizzato è tirato tramite dei traini al di fuori dello stampo.

Se l'applicazione lo richiede sullo strato esterno può essere inserito un velo poliestere che funge da stabilizzante ai raggi UV conferendo una elevata finitura superficiale formando uno strato che evita l'affioramento delle fibre di vetro.



Figura 7 - Schema di processo di pultrusione

I componenti realizzati con questa tecnologia sono caratterizzati dall’avere:

- un rinforzo continuo di fibre longitudinali, rowing, le quali conferiscono elevate caratteristiche meccaniche lungo la direzione longitudinale - preferenziale delle fibre;

- un rinforzo in direzione trasversale all’applicazione del carico dovuto all’inserimento di tessuti trama ordito o stuoie unifilo randomizzati -MAT-.

Il controllo della disposizione dei rinforzi è un fattore determinante per il controllo di processo e per la buona riuscita dello stesso.

I rinforzi, sia in forma di rowing sia in forma di tessuti, sono posizionati per mezzo di un complicato sistema di guide e mascherine.

Il sistema produttivo presenta elevati costi di attrezzaggio dovuto a numerosi fattori tra cui costose matrici di acciaio che devono essere termoregolate e resistenti all'usura in aggiunta ai complessi sistemi di guida e formatura dei rinforzi.

In compenso, essendo un processo continuo, il rateo produttore è molto elevato e con una bassa incidenza di manodopera, caratteristica che ha consentito un grande successo commerciale, grazie specialmente ai vantaggi economici e prestazionali del prodotto ultimato.



Figura 8 – Prodotti realizzati con la tecnologia della pultrusione

Il processo produttivo può arrivare sino anche a 5-10 m/min per sezioni molto piccole. Grazie a questi vantaggi, soprattutto di natura economica, ed all’elevata automazione di processo moltissimi componenti di largo consumo sono oggi realizzati con questa tecnologia. Qui di seguito in Figura 8 vengono riportati alcuni prodotti realizzati in pultruso presso gli stabilimenti della N.T.E.T S.p.A.

1.3.3 Centrifugazione (Centrifugal casting)

In questo processo, il rinforzo in forma di stuoie è posizionato all’interno dello stampo, di forma prevalentemente conica o tubolare, e la resina liquida è successivamente iniettata; la resina impregna i tessuti di vetro grazie alla forza centrifuga.

La forza centrifuga, oltre a consentire l’impregnazione dei tessuti, garantisce l’adesione del materiale, rinforzo e matrice, alla parete interna dello stampo. Dosando correttamente i due componenti si ottiene l’effetto per cui il pezzo prodotto rimane cavo lungo l’asse di rotazione dello stampo.

Si parlerà più nello specifico di questa tecnologia di produzione dei materiali compositi, quando nel capitolo 3 verrà esposto il processo di produzione dei pali troncoconici (Figura 9).



Figura 9 - Prodotti realizzati con la tecnologia della centrifugazione

1.3.4 Stampaggio ad iniezione (Injection molding)

Prodotti in materiale termoplastico come nylon, polistirene, polietilene e polipropilene possono essere realizzati mediante una tecnica che prende il nome di *injection moulding*.

Qui di seguito, Figura 10, viene descritto il processo di stampaggio ad iniezione:

- 1) il materiale precedentemente ridotto in granuli viene caricato attraverso una tramoggia e riscaldato in un cilindro fino a rammollimento;
- 2) raggiunto uno stato pressoché fluido il materiale fuso viene fatto passare attraverso un ugello grazie all’azione di una vite senza fine o di un pistone così da riempire lo stampo;
- 3) le piastre della macchina di stampaggio vengono mantenute fisse così da tenere sotto pressione il materiale per evitare la formazione di vuoti [3];
- 4) il materiale plastico viene lasciato solidificare all’interno dello stampo e solo quando successivamente il materiale all’interno dello stampo si è parzialmente raffreddato le due piastre si separano automaticamente espellendo il prodotto finito mediante aria soffiata.

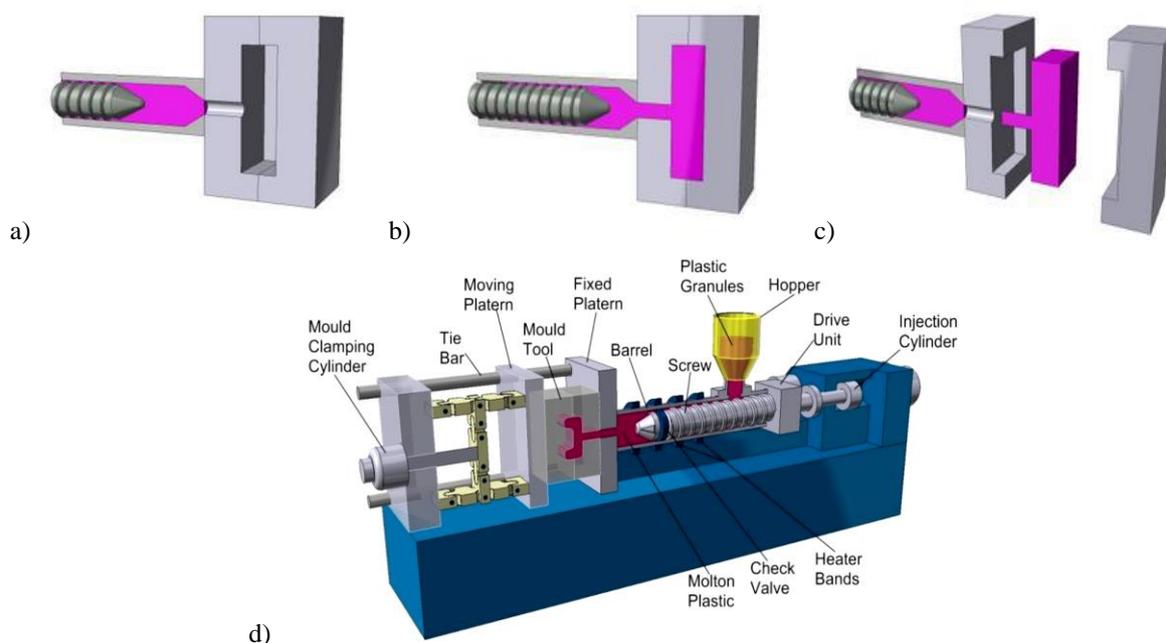


Figura 10 – Injection molding: a) passaggio del materiale nell’ugello; b) riempimento dello stampo; c) separazione piastre ed estrazione del prodotto finito; d) schema completo del processo di iniezione



Figura 11 - Presse di stampaggio ad iniezione N.T.E.T. S.p.A.

Questo processo tecnologico, largamente impiegato in ambito industriale, consente un elevato grado di libertà nelle forme realizzabili ad un costo relativamente contenuto.

Il processo di realizzazione, in fase di progettazione, rende molto difficile la modellazione delle caratteristiche meccaniche del materiale.

Essendo le fibre iniettate assieme al polimero fuso all’interno dello stampo, la distribuzione degli orientamenti delle fibre viene a dipendere dalla dinamica del flusso di materiale fuso che avanza nella cavità dello stampo, il cui comportamento è assimilabile a quello di un fluido ad elevata viscosità. L’orientamento delle fibre è quindi il risultato di un’interazione complessa di fenomeni che avviene all’interno dello stampo. Infatti, nel caso in cui le fibre di rinforzo disperse nella matrice non sono disposte ordinatamente dall’operatore (come nel caso di compositi a fibra lunga), esse si distribuiscono in funzione dei processi fluidodinamici che si sviluppano all’interno dello stampo. Tali fenomeni sono connessi direttamente a quelle che sono le condizioni di iniezione quali ad esempio la temperatura, la pressione, i punti di iniezione, ecc..

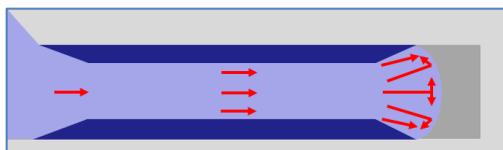


Figura 12 - Schema del flusso di materiale all’interno della camera di iniezione

Inoltre, gli input tecnologici (pressione di iniezione, temperatura dello stampo) dell’*injection moulding*, cambiano da produttore a produttore, variando così, inevitabilmente, le caratteristiche macro-meccaniche del composito.

Qui di seguito in Figura 13 vengono riportati alcuni prodotti realizzati con la tecnologia dello stampaggio ad iniezione presso gli stabilimenti della N.T.E.T S.p.A.

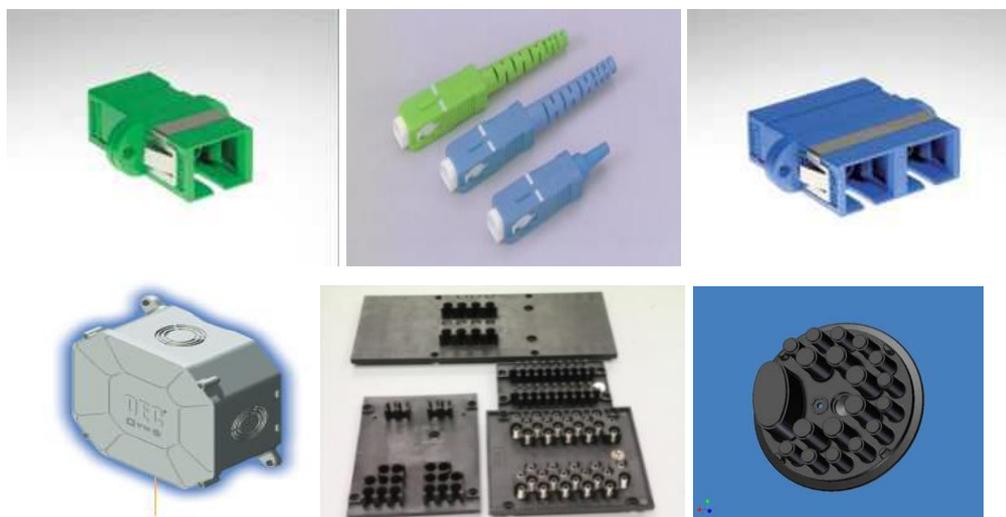


Figura 13 – Prodotti realizzati con la tecnologia dello stampaggio ad iniezione

1.3.5 Estrusione per fibra ottica (Extrusion)

Infine ultima tecnologia di produzione è quella dell’estrusione di tubicini della fibra ottica nel settore delle telecomunicazioni (Figura 14 e Figura 15).



Figura 14 - Prodotti realizzati con la tecnologia dell'estrusione



Figura 15 - Prodotti realizzati con la tecnologia dell'estrusione

1.3.6 Valutazione comparativa tra le diverse tecnologie produttive

Gli studi effettuati e la consolidata esperienza della N.T.E.T. S.p.A. hanno permesso il raggiungimento di una presa di coscienza dello stato dell’arte del settore, con particolare riferimento ai processi industriali per la produzione in media-grande serie con i relativi vantaggi, svantaggi e peculiarità sia in termini di prestazioni, sia in termini di costo che in termini di limitazione tecnologica [5].

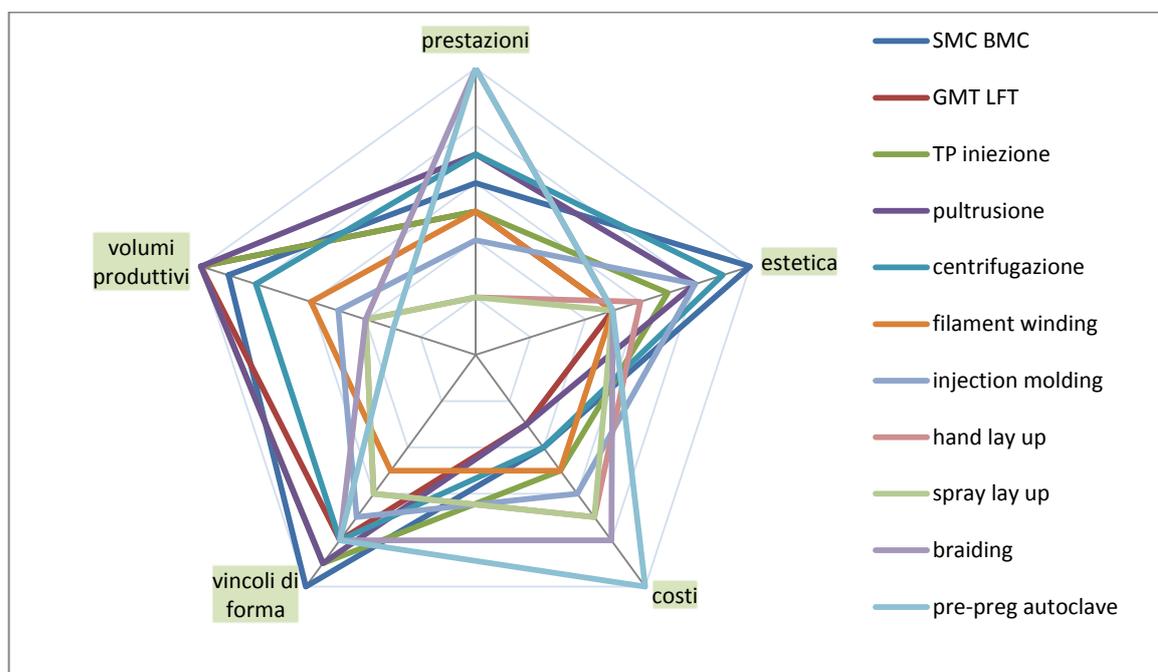


Figura 16 - Comparazione diverse tecnologie di produzione

L’approfondimento di queste caratteristiche ed il successivo studio del comportamento meccanico consentono di operare la scelta migliore del sistema materiale-tecnologia-design.

In particolare sono stati analizzati in modo qualitativo i seguenti requisiti:

- prestazioni meccaniche del pezzo finito;
- ratei produttivi - Costi di produzione;
- ripetibilità ed affidabilità;
- resa estetica;
- vincoli di forma.

Per rispondere a questi principali requisiti la tecnologia deve, però, poter essere significativamente automatizzabile, avere brevi tempi di ciclo ed essere caratterizzata da bassi costi di produzione.

Molto interessante è osservare la Figura 16, in cui vengono comparate varie tecnologie per la realizzazione dei materiali compositi in funzioni di cinque parametri come: 1) prestazioni; 2) estetica; 3) costi; 4) vincoli di forma; 5) volumi di produzione [6].

La prima parte del lavoro è stata, pertanto, dedicata a descrivere e caratterizzare, in modo qualitativo e quantitativo, le potenzialità ed i limiti delle più diffuse tecnologie e dei materiali utilizzati.

Nello specifico in Tabella 4 vengono rappresentate le caratteristiche dei materiali analizzati durante tutto il lavoro di tesi:

Tabella 4 - Caratteristiche materiali indagati

Tecnologia	Prestazioni	Estetica	Costi	Vincoli di forma	Volumi produttivi
Stampaggio a compressione	Medio	Alto	Basso	Alto	Alto
Pultrusione	Alto	Alto	Basso	Alto	Alto
Centrifugazione	Alto	Alto	Basso	Alto	Alto
Stampaggio a iniezione	Basso	Alto	Medio	Medio	Basso

1.4 Modalità di rottura e criteri di resistenza

1.4.1 Generalità

Per definire un criterio di resistenza è necessario tener conto dei particolari processi che portano al cedimento inteso come il verificarsi di quelle condizioni per cui il materiale stesso cessa di rispondere in modo soddisfacente alle esigenze di progetto [7]. Rispetto ai tradizionali materiali come l’alluminio e l’acciaio, tali materiali presentano i seguenti vantaggi:

- elevata resistenza meccanica;
- maggior leggerezza;
-  – manutenzione ridotta;
- inalterabilità della superficie in presenza di agenti corrosivi;
- isolamento elettrico;
- minore pericolosità in caso di urti.

Con riferimento ad una lamina composita, il cedimento può essere in alcuni casi coincidente con la rottura (comportamento fragile), in altri casi può invece coincidere con la deviazione dal comportamento elastico lineare (comportamento duttile). Più in dettaglio, con riferimento all’ intima struttura di un composito il cedimento può avvenire per le seguenti motivazioni:

-  – rottura delle fibre;
- separazione fibra – matrice (debonding);
- microfrattura della matrice (tipico della fatica);
- separazione delle lamine nei laminati (delaminazione).

Tali modalità di cedimento talvolta avvengono separatamente, altre volte risultano coesistenti. A titolo di esempio la Figura 17 (a,b,c) riporta delle micrografie di laminati compositi danneggiati per debonding (a), per microfrattura della matrice (b), e delaminazione (c) [8], [9], [10].

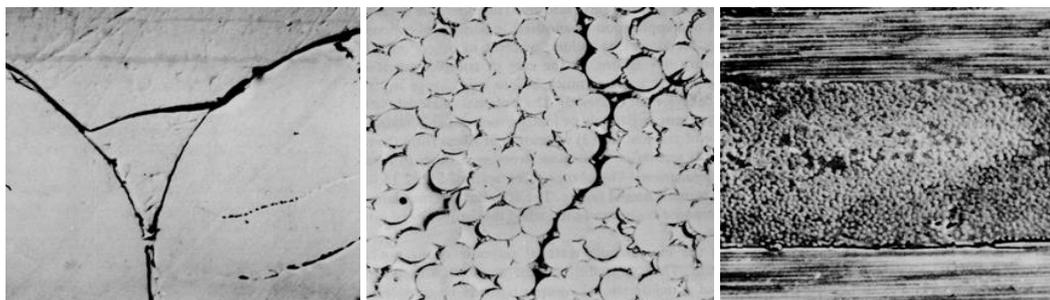


Figura 17 – Modalità di cedimento dei laminati: a) debonding; b) frattura matrice; c) delaminazione

In generale non esiste una relazione biunivoca tra modalità di rottura e caratteristiche del composito in quanto a causa della anisotropia del materiale e del diverso comportamento alle varie sollecitazioni, per uno stesso materiale, i meccanismi di rottura dipendono strettamente dalle modalità di sollecitazione (trazione, compressione, taglio ecc.). Contrariamente a quanto accade nei materiali isotropi in cui la formazione di un difetto è generalmente seguita da una crescita relativamente veloce della cricca, in un materiale composito il danneggiamento inizia molto prima del cedimento totale con la formazione di cricche all’ interno della struttura in composito. La rottura di una singola fibra blocca la sua funzione solo localmente e fornendo pertanto comunque un certo rinforzo al materiale composito. Avvenuta la rottura su di una fibra, la sollecitazione sulle fibre circostanti intatte subisce un innalzamento portandole più vicine al carico di rottura [11]. Per un palo in vetroresina, il principale meccanismo di rottura rilevato in fase di collaudo sperimentale è la delaminazione tra le varie lamine, manifestandosi con la formazione e propagazione di difetti sulla superficie del pezzo. Nel caso dei pali in vetroresina la rottura per delaminazione, partendo dalla base del palo, avviene subito dopo la sezione incastrata dove sperimentalmente si registrano i valori massimi di tensione. La rottura progressiva e non di schianto [12], avviene nella parte del palo sottoposta a compressione (Figura 18).



Figura 18 - Rottura per delaminazione

1.4.2 Cedimento sotto sollecitazione di trazione longitudinale

In un composito unidirezionale con fibre fragili soggetto a trazione longitudinale, il cedimento inizia sempre con la rottura di alcune fibre in corrispondenza della loro sezione più debole [13].

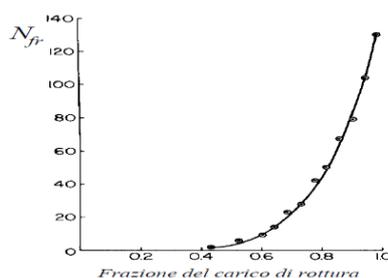


Figura 19 - Numero di fibre rotte al variare della frazione di carico applicato

Al crescere del carico segue la rottura di altre fibre causata anche dalla diminuzione della sezione resistente. Sperimentalmente si osserva che al crescere del carico applicato il numero cumulativo di fibre rotte N_{fr} cresce in modo esponenziale, sino alla rottura completa del materiale come mostra la Figura 19.

Da questa figura è possibile osservare come la rottura delle fibre inizia già a valori del carico relativamente bassi, pari a circa il 50% del carico di rottura. La rottura progressiva delle fibre dà luogo a fenomeni di concentrazione delle tensioni che possono produrre localmente oltre che la rottura fragile di altre fibre (1), fenomeni di sfilamento (pull-out) delle fibre (2) spesso accompagnata da rottura a taglio all’interfaccia della matrice (3a) o da rottura della matrice lungo la direzione delle fibre per debonding (3b). Tali modalità di rottura sono schematicamente illustrate in Figura 20.

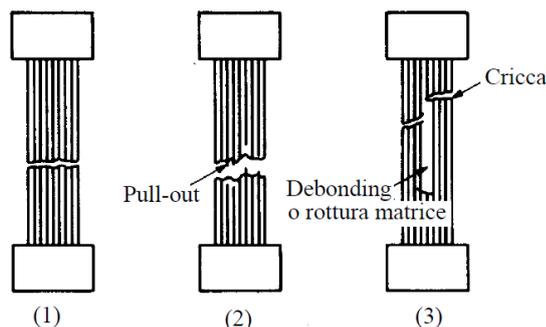


Figura 20 – Modi di rottura di un composito unidirezionale: (1) rottura fragile; (2) pull-out; (3) debonding

Ovviamente il verificarsi o meno del pull-out nonché l’entità dello stesso dipendono strettamente dalla bontà della adesione fibra-matrice e dal meccanismo di trasferimento del carico dalla matrice alle fibre. La rottura a taglio della matrice ed i fenomeni di debonding possono avvenire separatamente o essere coesistenti. Per un dato composito unidirezionale le modalità di rottura sono pure legate, oltre che alle caratteristiche di fibra e matrice, anche alla frazione in volume di fibre. Per esempio per un composito fibre di vetro-resina epossidica il cedimento avviene per rottura fragile per basse frazioni in volume di fibre ($V_f < 0.4$), per rottura fragile accompagnata da pull-out per percentuali intermedie ($0.4 < V_f < 0.65$), per rottura fragile accompagnata da taglio della matrice e/o debonding per elevate concentrazioni di fibre ($V_f > 0.65$). Tutti questi fenomeni possono comunque essere significativamente influenzati dalla percentuale di vuoti presenti nel composito.

1.4.3 Cedimento sotto sollecitazione di compressione longitudinale

La presenza di un carico di compressione longitudinale induce facilmente nelle fibre (colonne di piccolissime dimensioni) fenomeni di instabilità dell’equilibrio elastico (buckling). In presenza di basse percentuali di fibre lo svergolamento avviene molto facilmente. Esso si verifica per bassi carichi con matrice ancora in campo elastico. Per i comuni valori di V_f l’instabilità delle fibre è invece preceduta dallo snervamento della matrice e/o da fenomeni di debonding e fessurazione (microcricche) della matrice. In alcuni casi il cedimento del composito avviene per separazione fibra- matrice causata dalle deformazioni trasversali positive dovute all’effetto Poisson. In altri casi la compressione può dare luogo a rottura della matrice per taglio.

In sintesi il cedimento di un composito sotto compressione longitudinale può avvenire per:

- a) rottura per trazione trasversale (effetto Poisson, Figura 21-a);
- b) microsvergolamento delle fibre (Figura 21 b-c) con:
 - matrice elastica;
 - matrice plastica;
 - distacco dei componenti
- c) rottura per taglio (Figura 21-d).

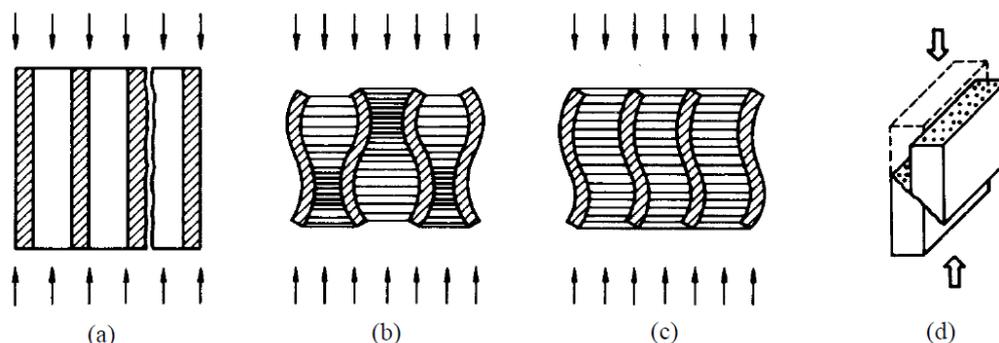


Figura 21 - Modalità di rottura di un composito unidirezionale soggetto a compressione unidirezionale

1.4.4 Cedimento sotto sollecitazione di trazione trasversale

In presenza di trazione trasversale il cedimento di una lamina composita può avvenire per:

- 1) cedimento della matrice (trazione);
- 2) debonding;
- 3) splitting delle fibre e rottura della matrice.

Nel modo (1) la superficie di frattura interessa esclusivamente la matrice, nel modo (2) invece essa si sviluppa all’interfaccia fibra-matrice mentre nel modo (3) essa si sviluppa inizialmente all’interno delle fibre. Quest’ultimo modo è piuttosto raro (la resistenza della matrice e/o l’adesione fibra-matrice sono molto più bassi della resistenza trasversale delle fibre) ed avviene quando la fibra presenta una marcata anisotropia ed una bassissima resistenza a trazione trasversale. I tre modi possono avvenire singolarmente o essere, a secondo dei casi, coesistenti (rottura mista). Per esempio nei compositi con fibre di carbonio ad elevata rigidità solitamente il cedimento avviene per debonding e splitting delle fibre.

1.4.5 Cedimento sotto sollecitazione di compressione trasversale

In presenza di compressione trasversale il cedimento di una lamina composita può avvenire per:

- 1) cedimento a taglio della matrice;
- 2) cedimento a taglio della matrice con debonding e/o rottura delle fibre;
- 3) rottura a taglio delle fibre.

La modalità più comune è la (1) per il semplice fatto che in genere la matrice ha una resistenza molto più bassa delle fibre. La rottura a taglio avviene in questi casi secondo piani paralleli alle fibre ed inclinati rispetto al carico di 45° (Figura 22)

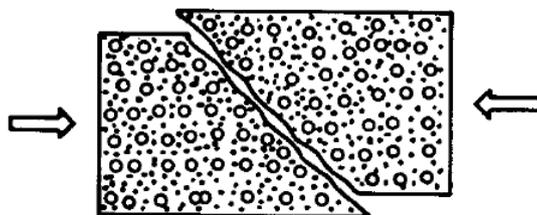


Figura 22 - Rottura tipica (a taglio) di compositi sotto compressione trasversale

A questa modalità di rottura corrisponde una resistenza molto più bassa della resistenza a compressione longitudinale, nella quale si ha una significativa collaborazione delle fibre. In presenza di bassa adesione fibra-matrice e/o scarsa resistenza trasversale delle fibre la rottura a taglio della matrice è accompagnata da debonding e rottura delle fibre.

Se la rottura a taglio della matrice è opportunamente prevenuta mediante irrigidimenti trasversali del provino che si oppongano allo scorrimento per taglio della matrice (es. *fabric*), allora la resistenza a compressione trasversale può divenire paragonabile a quella longitudinale. Ovviamente in questo caso essa cresce al crescere della frazione di fibre presenti. Tutte e tre le modalità di rottura sono caratterizzate da significative interazioni fibra-matrice e per questo difficilmente è possibile ottenere attendibili valutazioni teoriche della resistenza della lamina a partire da quella dei singoli componenti.

1.4.6 Cedimento sotto sollecitazione di taglio sul piano delle fibre

In presenza di sollecitazione di taglio sul piano della lamina la rottura di questa può avvenire per:

- 1) taglio della matrice;
- 2) taglio della matrice misto a debonding;
- 3) debonding.

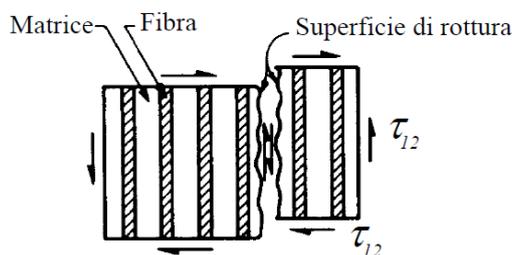


Figura 23 – Rottura di compositi unidirezionali sotto sollecitazione di taglio nel piano

In ogni caso, come mostra la Figura 23, la superficie di frattura risulta pressoché parallela alle fibre e può, a seconda dei casi, essere interna alla matrice (1), svilupparsi in parte sulla matrice ed in parte lungo l’interfaccia fibra matrice (2) oppure svilupparsi lungo l’interfaccia soltanto (3).

1.4.7 Principali criteri di resistenza

Per la verifica di resistenza di un generico elemento è necessario confrontare il campo tensionale presente con il corrispondente campo tensionale massimo ammissibile (incipiente cedimento) determinato attraverso l’uso di un opportuno criterio di resistenza a partire da dati sperimentali sulla resistenza del materiale determinati solitamente attraverso prove condotte in presenza di sollecitazioni semplici (trazione, compressione, taglio).

Per un materiale isotropo la resistenza del materiale non dipende dall’orientamento della sollecitazione né dall’orientamento delle tensioni principali e, conseguentemente, i criteri di resistenza in uso forniscono delle relazioni tra le massime tensioni o deformazioni principali presenti e la resistenza a trazione e/o compressione (più raramente a taglio) del materiale senza tener conto dell’orientamento della sollecitazione [14].

Diversa è la situazione per un materiale ortotropo in quanto per questo la resistenza varia con l’orientamento. In particolare essa è individuata da 5 diversi parametri: resistenza a trazione longitudinale $\sigma_{L,R}$ (1), resistenza a trazione trasversale σ_{TR} (2), resistenza a taglio $\tau_{LT,R}$ (3), resistenza a compressione longitudinale $\sigma'_{L,R}$ (4) e resistenza a compressione trasversale $\sigma'_{T,R}$ (5). La verifica di resistenza di una lamina ortotropa consiste quindi nel confrontare lo stato tensionale presente con tali 5 parametri attraverso l’uso di un opportuno criterio di resistenza. I criteri di resistenza di uso comune nella progettazione meccanica con materiali compositi sono il criterio della *massima tensione*, il criterio della *massima deformazione*, il criterio del *massimo lavoro* (*Tsai-Hill*) ed il criterio di *Tsai-Wu*.

2. Caratterizzazione dei materiali: prove sperimentali e analisi dei risultati

2.1 Classificazione materiali da analizzare

La prima fase dell’attività di ricerca è stata focalizzata sulle prove sperimentali di caratterizzazione dei materiali presenti nell’azienda N.T.E.T. S.p.A. Nello specifico sono stati indagati differenti materiali termoplastici e termoindurenti, in modo da dare delle indicazioni utili al progettista per la scelta dei componenti, della tecnologia e della forma più adeguate. I materiali termoplastici sono stati realizzati con la tecnica dello stampaggio a iniezione mentre i materiali termoindurenti sono realizzati con le tecnologie dello stampaggio a compressione, pultrusione e centrifugazione. Per gli stampati a compressione e i pultrusi è stata fatta esclusivamente una caratterizzazione meccanica di trazione mentre per i centrifugati e gli stampati a iniezione è stata fatta una caratterizzazione completa del materiale effettuando le seguenti prove: 1) prove per determinare la percentuale di fibre di vetro; 2) prove dielettriche; 3) prove di assorbimento di acqua; 4) prove di autoestinguenza; 5) prove di caratterizzazione meccanica (trazione, compressione, flessione, taglio interlaminare); 6) prove di caratterizzazione chimico-fisica (resistenza ai raggi UV, stabilità termica a +70 °C/-30 °C, resistenza agli agenti chimici). Durante le prove di trazione e compressione sono state applicate tecniche sperimentali a campo intero, del tipo contactless: la Digital Image Correlation (DIC), in grado di misurare tramite l’analisi delle immagini spostamenti e deformazioni dei campioni sottoposti ad un determinato carico, e la termografia ad infrarossi (IRT), in grado di misurare tramite l’analisi delle immagini il gradiente termico dei campioni sottoposti ad un determinato carico.

Al fine di non introdurre ulteriori variabili, legate al processo di produzione, e di fornire di conseguenza risultati rispondenti al reale ciclo di trasformazione del composito, i provini testati sono stati ricavati direttamente da prodotti commerciali realizzati nelle linee produttive della divisione compositi della N.T.E.T. S.p.A. Questa scelta è stata effettuata poiché le condizioni di produzione, tempi e temperatura di cura modificano, tra l’altro, il comportamento dell’interfaccia matrice - rinforzo modificando le performance meccaniche del composito. Completate tutte le prove sperimentali è stato fatto un confronto dei materiali termoindurenti analizzati definendo vantaggi e limitazioni di ogni tecnologia di produzione.

Per ciascuna condizione di prova, al fine di valutare la dispersione dei risultati e verificare l’attendibilità del test sono state eseguite da 3 a 5 prove.

Nella Tabella 5 seguente vengono riassunti brevemente i materiali analizzati, la tecnologia di produzione con cui sono realizzati e il campo di utilizzo.

Tabella 5 - Materiali indagati

Nome commerciale	Tecnologia	Utilizzo
Noryl SEIGFN2	Stampaggio a iniezione	Contropiastre per bassa e media tensione
Lexan 3412R	Stampaggio a iniezione	Contropiastre per bassa e media tensione
Lexan 500R	Stampaggio a iniezione	Contropiastre per bassa e media tensione
-	Stampaggio a compressione	Pannelli per cabinet TLC
-	Pultrusione ortoftalici	Scale con profili a sezione costante
-	Pultrusione isoftalici	Scale con profili a sezione costante
-	Centrifugati	Pali per linee aeree telefoniche

Prima di effettuare le prove sperimentali è stata fatta una breve ricerca bibliografica sui materiali che andremo ad analizzare.

2.2 Stato dell’arte: materiali termoplastici stampati ad iniezione

2.2.1 Noryl

Il Noryl è un composito a struttura amorfa estremamente versatile le cui caratteristiche chiave includono: alta resistenza al calore, alta resistenza alla fiamma, eccellente stabilità dimensionale, basso ritiro del materiale stampato, assorbimento d’acqua molto basso, valori di scorrimento viscoso a caldo relativamente bassi all’aumentare della temperatura e proprietà d’isolamento elettrico. Qui di seguito vengono riportate alcune proprietà tipiche descritte dalla ditta SABIC [15].

– Proprietà meccaniche

Nella Figura 24a vengono comparate le curve relative al Noryl non rinforzato e al Noryl rinforzato con una determinata percentuale di fibre. Come si può notare la rigidità delle tue tipologie di curve è completamente differente in funzione proprio della quantità di fibra immessa nella resina.

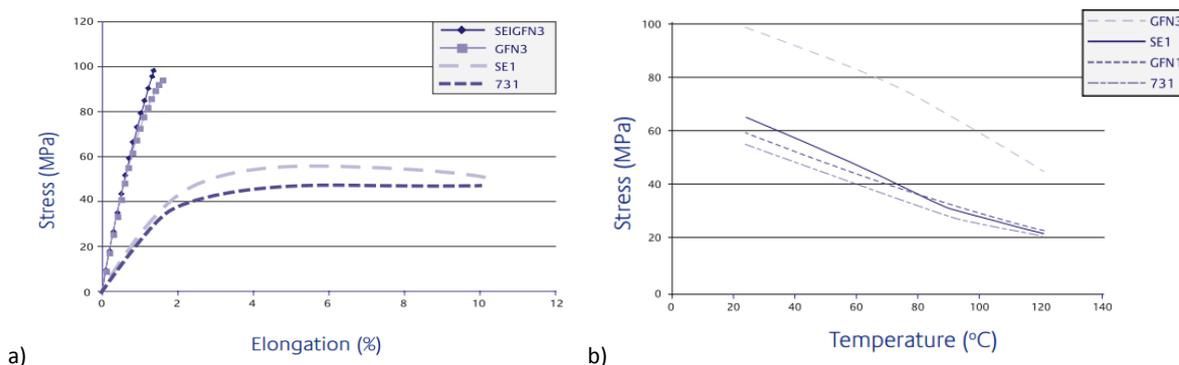


Figura 24 – a) curve $\sigma - \epsilon$ Noryl rinforzato e non rinforzato; b) resistenza a trazione in funzione della temperatura

Come per tutti i materiali termoplastici, la curva sforzo/deformazione è fortemente dipendente dalla temperatura e pertanto anche il modulo di Young del materiale viene enormemente influenzato da tale parametro (Figura 24). In Figura 25 e Figura 26 vengono riportate le curve ingegneristiche in funzione della temperatura di due tipologie di Noryl: il primo è il Noryl 731 materiale non rinforzato; il secondo è il Noryl SE1GFN2 materiale rinforzato con il 20% di fibre di vetro.

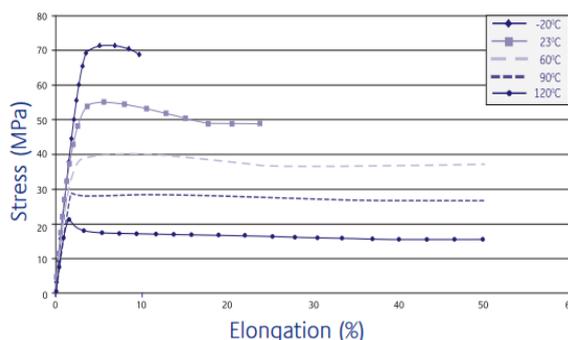


Figura 25 - Curve $\sigma - \epsilon$ Noryl 731 non rinforzato a differenti temperature

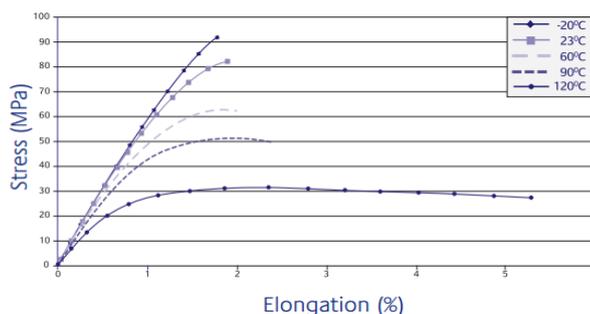


Figura 26 - Curve $\sigma - \epsilon$ Noryl SE1GFN2 rinforzato con il 20% di fibre a differenti temperature

– Comportamento nel tempo: creep e fatica

Un importante vantaggio della resina Noryl è la sua bassa variazione dello scorrimento a caldo anche ad elevate temperature. In Figura 27a si riportano i valori di scorrimento viscoso a caldo del Noryl 731 considerando una tensione costante di 10 MPa in funzione del tempo al variare delle temperature, mentre nella Figura 27b si riporta il valore di creep a vari livelli di tensione via via crescenti.

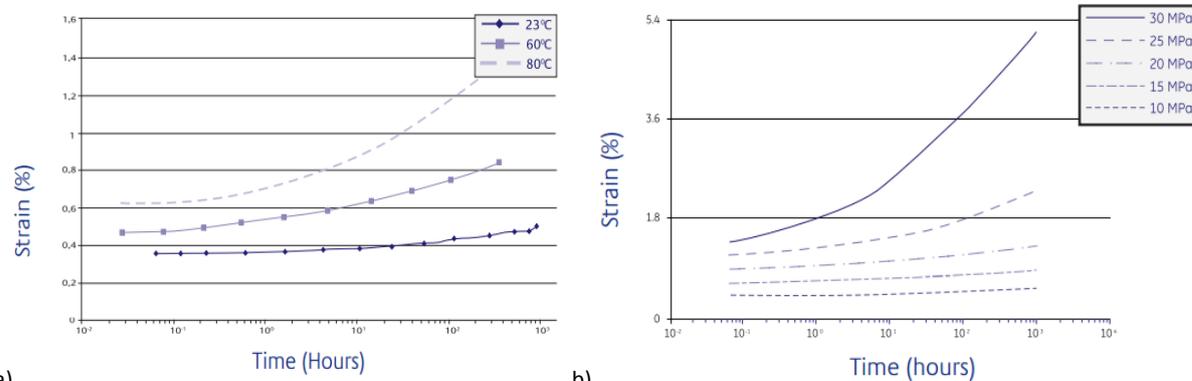


Figura 27 – a) creep Noryl 731 in funzione di ΔT ; b) creep Noryl 731 in funzione di $\Delta \sigma$

Nella Figura 28 invece si riporta il comportamento a fatica del Noryl SE1GFN2 con una frequenza di 5 Hz per un certo numero di cicli.

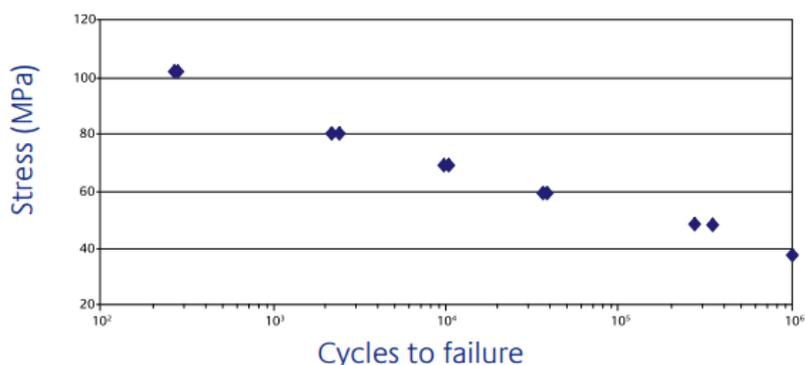


Figura 28 – Performance a fatica del Noryl SE1GFN2

– Resistenza all’urto

La famiglia di resina Noryl offre un’eccellente resistenza all’impatto solo leggermente influenzata dalla temperatura (Figura 29). Uno dei principali vantaggi di questi materiali è che, anche a bassa temperatura, mantengono un’elevata resistenza all’urto.

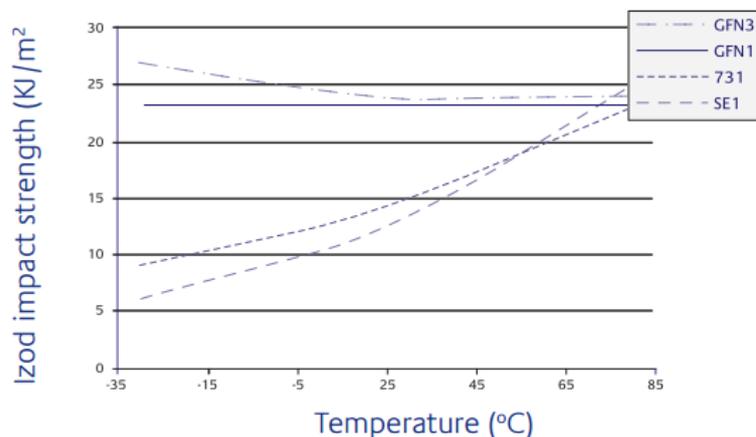


Figura 29 - Resistenza all’impatto in funzione della temperatura

– Proprietà elettriche

La resina Noryl generalmente presenta eccellenti proprietà elettriche che rimangono stabili in un ampio intervallo di temperatura, umidità e di variazioni di frequenza. Questa stabilità, insieme ad un perfetto equilibrio di proprietà termiche e di impatto, fa della resina Noryl un potenziale ottimo candidato per le più esigenti applicazioni elettriche ed elettroniche. Il Noryl di per se è un ottimo isolante elettrico presentando un fattore di dissipazione molto basso rispetto agli altri termoplastici, come si nota dalla Figura 30, e una rigidità dielettrica tra i16 e 18 KV / mm su uno spessore di 3.2 mm.

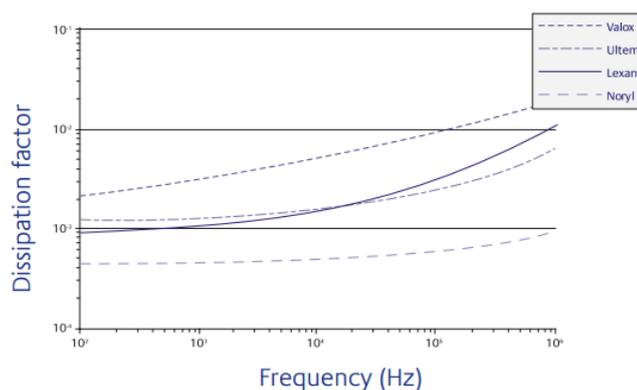


Figura 30 - Fattore di dissipazione a 23°C in funzione della frequenza

– Caratteristiche tecniche Noryl SE1GFN2

In Tabella 6 vengono mostrate le caratteristiche della tipologia di Noryl utilizzato nelle contropiastre

Tabella 6 – Caratteristiche tecniche Noryl SE1GFN2

TYPICAL PROPERTIES			
MECHANICAL	Value	U.M.	Standard
Taber Abrasion, CS-17, 1 kg	60	mg/1000cy	SABIC Method
Tensile Stress, yield, 5 mm/min	80	MPa	ISO 527
Tensile Stress, break, 5 mm/min	80	MPa	ISO 527
Tensile Strain, yield, 5 mm/min	2.5	%	ISO 527
Tensile Strain, break, 5 mm/min	2.5	%	ISO 527
Tensile Modulus, 1 mm/min	4500	MPa	ISO 527
Flexural Stress, break, 2 mm/min	120	MPa	ISO 178
Flexural Modulus, 2 mm/min	4500	MPa	ISO 178
Hardness, H358/30	100	MPa	ISO 2039-1
IMPACT	Value	Unit	Standard
Izod Impact, unnotched 80*10*4 +23°C	23	kJ/m ²	ISO 180/1U
Izod Impact, unnotched 80*10*4 -30°C	23	kJ/m ²	ISO 180/1U
Charpy 23°C, Unnotch Edgew 80*10*4 sp=62mm	25	kJ/m ²	ISO 179/1eU
Charpy -30°C, Unnotch Edgew 80*10*4 sp=62mm	25	kJ/m ²	ISO 179/1eU
THERMAL	Value	Unit	Standard
Thermal Conductivity	0.26	W/m·°C	ISO 8302
PHYSICAL	Value	Unit	Standard
Mold Shrinkage on Tensile Bar, flow (2) (5)	0.2 - 0.4	%	SABIC Method
Density	1.25	g/cm ³	ISO 1183
Water Absorption, (23°C/sat)	0.2	%	ISO 62
ELECTRICAL	Value	Unit	Standard
Volume Resistivity	1.E+15	Ohm-cm	IEC 60093
Surface Resistivity, ROA	>1.E+15	Ohm	IEC 60093
Dielectric Strength, in oil, 3.2 mm	18	kV/mm	IEC 60243-1
FLAME CHARACTERISTICS	Value	Unit	Standard
UL Recognized, 94HB Flame Class Rating (3)	1.5	mm	UL 94

2.2.2 Lexan

Lexan 3412R e Lexan 500R sono compositi realizzati con resina di polycarbonato rinforzati con un determinata percentuale di fibra di vetro. Nello specifico Lexan 3412R è un composito rinforzato con il 20% di fibre di vetro, mentre Lexan 500R è un composito rinforzato con il 10% di fibre di vetro.

I compositi Lexan sono resine in polycarbonato amorfo che presentano elevate proprietà meccaniche, ottiche, elettriche e termiche. Ulteriori caratteristiche sono: elevata trasparenza; eccezionale resistenza all’urto su una vasta gamma di temperature; durezza estrema; basso ritiro; buona stabilità dimensionale; lavorabilità costante; stabilità UV; rallentamento della fiamma; resistenza al calore. Qui di seguito vengono riportate alcune proprietà tipiche di questo materiale termoplastico riportate in [16].

– Proprietà meccaniche

In generale, la resina Lexan presenta eccellenti proprietà meccaniche in un ampio intervallo di temperatura. Nello specifico nelle Figura 31 viene mostrato come la resistenza a trazione e il modulo a flessione della resina Lexan diminuiscono leggermente all’aumentare della temperatura.

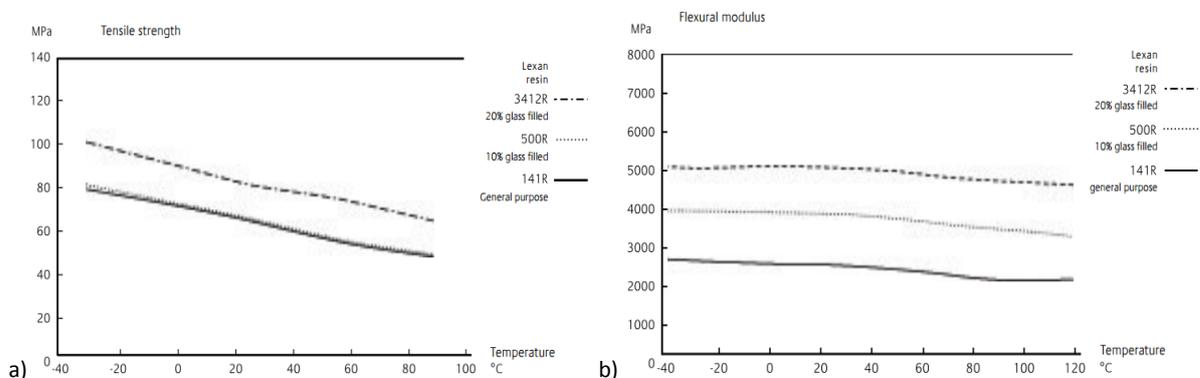


Figura 31 – a) resistenza a trazione in funzione di T; b) modulo a flessione in funzione di T

La Figura 32 confronta la tensione ricavata dalle prove di trazione su tre differenti tipi di Lexan: Lexan 141R resina non rinforzata; Lexan 500R resina rinforzata con il 10% di fibre di vetro; Lexan 3412R resina rinforzata con il 20% di fibre di vetro.

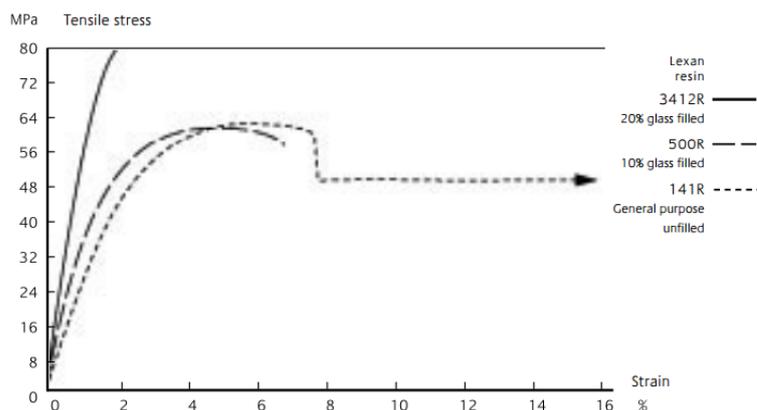


Figura 32 – Curve $\sigma - \epsilon$ per varie tipologie di Lexan

Successivamente in Figura 33 si osservano le curve ingegneristiche per vari Lexan al variare della temperatura notando come più la temperatura è bassa e più la curva avrà dei valori di tensione più elevati. Nello specifico si nota come a seconda della percentuale di fibra immessa nella matrice la curva ingegneristica cambia radicalmente forma. Nello specifico: inserendo il 10% di fibra di vetro si ha una deformazione del 6% presentando una vera e propria strizione al centro del provino; inserendo il 20% di fibra di vetro si ha una deformazione del 2% andando incontro a una rottura fragile.

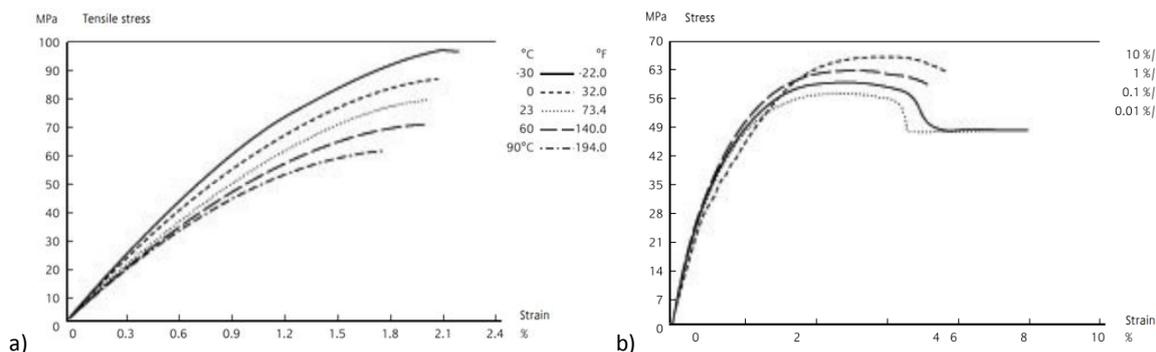


Figura 33 –a) curve $\sigma - \epsilon$ Lexan 3412R; b) curve $\sigma - \epsilon$ Lexan 500R

– **Comportamento nel tempo**

È importante considerare anche il comportamento di questi materiali termoplastici nel tempo sia da un punto di vista statico, effettuando prove di creep, Figura 34, sia da un punto di vista dinamico, effettuando prove di fatica applicando un carico ad un determinato numero di cicli.

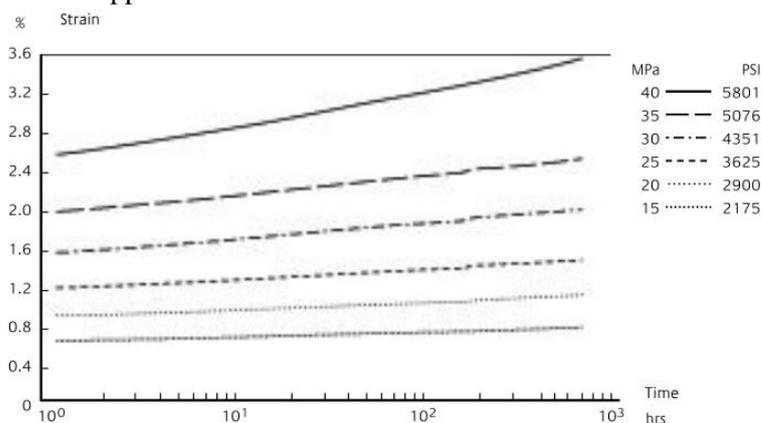


Figura 34 - Curva di creep Lexan

Il creep, per quanto riguarda il Lexan assume bassi valori anche a carichi elevati e ciò è dovuto alla struttura amorfa e la sua intrinseca resistenza al calore.

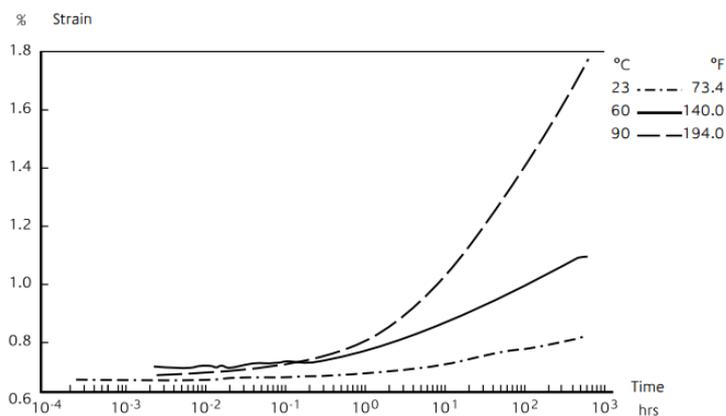


Figura 35 - Curve di creep al variare della temperatura

In Figura 35 si nota come all’aumentare della temperatura il valore delle curva di creep aumentano nel tempo.

In Figura 36 viene mostrato il comportamento a fatica del Lexan.

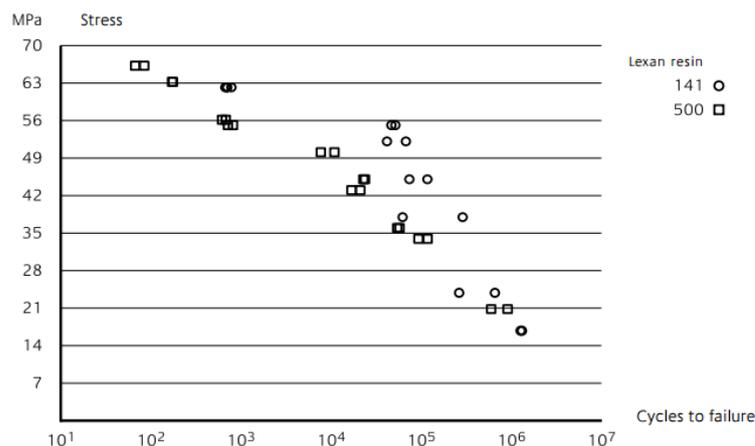


Figura 36 – Comportamento a fatica del Lexan rinforzato e non rinforzato.

– Resistenza all’urto

Al diminuire della temperatura la resistenza all’urto dei materiali realizzati con resina Lexan risultano essere più bassa come mostrato in Figura 37.

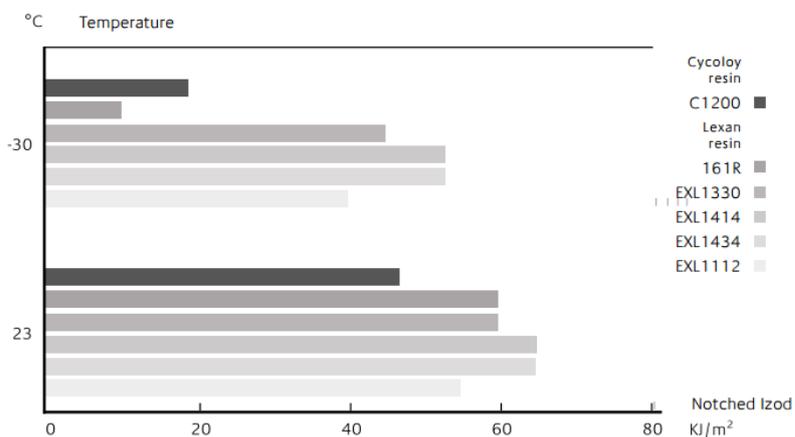


Figura 37 - Prove d’impatto in funzione della temperatura

– Proprietà elettriche

Il Lexan è un ottimo isolante elettrico. La rigidità dielettrica, come visibile in Figura 38, è non lineare con lo spessore e nello specifico è 17 kV / mm per uno spessore di 3,2 mm; 27 kV / mm per uno spessore di 1,5 mm; 35 kV / mm per uno spessore di a 1 mm e 67 kV / mm per uno spessore di a 0,25 mm.

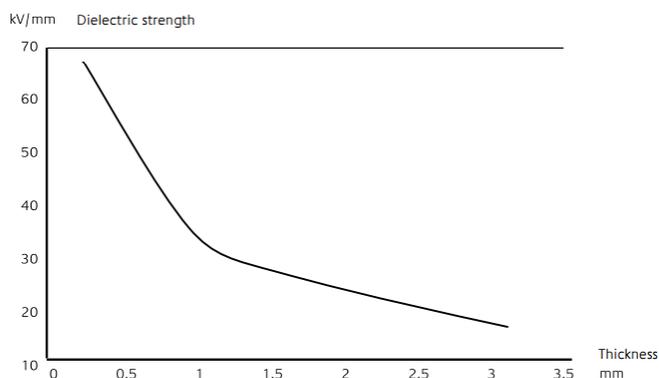


Figura 38 - Rigidità dielettrica

– **Caratteristiche tecniche Lexan 3412R e Lexan 500R**

Nelle tabelle seguenti vengono riportate le caratteristiche tecniche delle tipologie di Lexan utilizzati.

Tabella 7 – Proprietà Lexan 3412R

TYPICAL PROPERTIES			
MECHANICAL	Value	U.M.	Standard
Tensile Stress, brk, Type I, 5 mm/min	86	MPa	ASTM D 638
Tensile Strain, brk, Type I, 5 mm/min	2	%	ASTM D 638
Flexural Stress, yld, 1.3 mm/min, 50 mm span	120	MPa	ASTM D 790
Flexural Modulus, 1.3 mm/min, 50 mm span	5510	MPa	ASTM D 790
Hardness, Rockwell M	91	-	ASTM D 785
Hardness, Rockwell R	122	-	ASTM D 785
IMPACT	Value	Unit	Standard
Izod Impact, unnotched, 23°C	1014	J/m	ASTM D 4812
Izod Impact, notched, 23°C	106	J/m	ASTM D 256
Tensile Impact, Type S	63	kJ/m ²	ASTM D 1822
THERMAL	Value	Unit	Standard
Thermal Conductivity	0.21	W/m-°C	ASTM C 177
PHYSICAL	Value	Unit	Standard
Specific Volume	0.74	cm ³ /g	ASTM D 792
Density	1.356	g/cm ³	ASTM D 792
Water Absorption, 24 hours	0.16	%	ASTM D 570
Water Absorption, equilibrium, 23C	0.29	%	ASTM D 570
ELECTRICAL	Value	Unit	Standard
Volume Resistivity	>1.E+17	Ohm-cm	ASTM D 257
Dielectric Strength, in air, 3.2 mm	19.2	kV/mm	ASTM D 149
FLAME CHARACTERISTICS	Value	Unit	Standard
UL Recognized, 94V-1 Flame Class Rating (3)	1.47	mm	UL 94

Tabella 8 – Proprietà Lexan 500R

TYPICAL PROPERTIES			
MECHANICAL	Value	U.M.	Standard
Tensile Stress, yld, Type I, 5 mm/min	66	MPa	ASTM D 638
Tensile Stress, brk, Type I, 5 mm/min	55	MPa	ASTM D 638
Tensile Strain, yld, Type I, 5 mm/min	8	%	ASTM D 638
Tensile Strain, brk, Type I, 5 mm/min	15	%	ASTM D 638
Flexural Stress, yld, 1.3 mm/min, 50 mm span	103	MPa	ASTM D 790
Flexural Modulus, 1.3 mm/min, 50 mm span	3440	MPa	ASTM D 790
Hardness, Rockwell M	85	-	ASTM D 785
Hardness, Rockwell R	124	-	ASTM D 785
IMPACT	Value	Unit	Standard
Izod Impact, unnotched, 23°C	2136	J/m	ASTM D 4812
Izod Impact, notched, 23°C	106	J/m	ASTM D 256
Tensile Impact, Type S	157	kJ/m ²	ASTM D 1822
THERMAL	Value	Unit	Standard
Thermal Conductivity	0.2	W/m-°C	ASTM C 177
PHYSICAL	Value	Unit	Standard
Specific Volume	0.8	cm ³ /g	ASTM D 792
Density	1.245	g/cm ³	ASTM D 792
Water Absorption, 24 hours	0.12	%	ASTM D 570
Water Absorption, equilibrium, 23C	0.31	%	ASTM D 570
ELECTRICAL	Value	Unit	Standard
Volume Resistivity	>1.E+17	Ohm-cm	ASTM D 257
Dielectric Strength, in air, 3.2 mm	17.7	kV/mm	ASTM D 149
FLAME CHARACTERISTICS	Value	Unit	Standard
UL Recognized, 94V-0 Flame Class Rating (3)	1.52	mm	UL 94

2.3 Stato dell’arte: materiali termoindurenti stampati - pultrusi - centrifugati

Lo sviluppo sempre crescente dei materiali compositi ha stimolato l’attenzione di molti ricercatori che hanno effettuato notevoli ricerche in campo sperimentale in modo da caratterizzare al meglio, da un punto di vista meccanico e chimico – fisico, materiali e tecnologie di produzione.

Nel 1996, Grasso G. et al., [17] hanno dimostrato l’utilità dell’analisi termografica come tecnica non distruttiva anche per la determinazione della composizione di un materiale composito. Particolarmente, è stata investigata la percentuale di fibre di vetro in un elemento SMC. Su un pannello frontale di un camion, anche in zone teoricamente omogenee, sono state registrate differenti temperature, corrispondenti a discontinuità nella composizione del materiale. Le tradizionali analisi non distruttive, come l’elaborazione delle immagini a raggi x, e i successivi test distruttivi mostravano una buona accordanza con i risultati termici.

In [18] è stata effettuata un’analisi sulla qualità dei prodotti ottenuti per stampaggio a compressione. Il paper descriveva le linee guida della tecnologia e le soluzioni adoperate dall’azienda N.T.E.T S.p.A. per la realizzazione di alcune componentistiche per la ferrovia.

Nel 1998, Quaresimin M. et al [19] hanno realizzato un’indagine sperimentale sull’influenza dei condizionamenti ambientali sul comportamento statico e a fatica di un composito SMC-R25, caratterizzato da una matrice poliestere rinforzata con il 25% di fibra di vetro e da un riempitivo costituito dal 50% di idrossido di alluminio. Sono state considerate tre tipologie di condizionamento: cicli termici, nebbia salina e cicli termici in nebbia salina. La resistenza statica e a fatica del materiale dopo trattamento è stata confrontata con le caratteristiche del materiale non trattato. Altri lavori su tale argomento sono riportati in [20], [21], [22] e [23].

In [24] sono state fatte delle prove di trazione su dei profilati in materiale pultruso al variare della fibra di rinforzo. Nel 1995, in [25] si sono effettuati degli studi sperimentali su materiali compositi pultrusi con resina acrilica modificata. Tali risultati sperimentali successivamente sono stati comparati con i materiali pultrusi ottenuti con la classica ed economica resina poliestere insatura utilizzata presso l’azienda presso cui venivano fatte le prove sperimentali. Dei due prodotti pultrusi realizzati con le due differenti resine sono state indagate le caratteristiche meccaniche, la resistenza alla propagazione delle fiamme, la produzione di calore e infine l’emissione di fumo e gas tossici.

Nel 2000, Cirrone G. et al, [26] hanno fatto un’indagine sperimentale sui compositi fibro rinforzati realizzati con la tecnologia della centrifugazione. La prova standard di compressione utilizzata per i materiali compositi termoplastici non è attuabile ai materiali termoindurenti. Alcune metodologie di prova e alcuni risultati delle prove effettuate sono riportati in [27], [28] e [29].

Per quanto riguarda la prova di taglio interlaminare è importante analizzare il fenomeno di delaminazione e debonding che si verifica alla fine della prova [30].

Gli studi di caratterizzazione meccanica di tali materiali sono stati effettuati con l’ausilio delle tecniche sperimentali: DIC e termografia.

2.4 Stato dell’arte: tecniche sperimentali utilizzate

2.4.1 Lo sviluppo della meccanica sperimentale: i metodi ottici

L’analisi delle tensioni sui componenti strutturali incontra spesso delle serie difficoltà. Le forme complicate, determinate principalmente dal tipo di impiego a cui sono chiamati tali componenti, il complesso stato dei carichi meccanici e termici a cui essi sono sottoposti, sono le ragioni per le quali i risultati teorici devono essere verificati tramite l’indagine sperimentale.

Usualmente la meccanica sperimentale ha come scopo la determinazione delle tensioni, deformazioni o spostamenti di particolari meccanici, sia sul campo che tramite l’utilizzo di modelli o prototipi. Molti metodi sono utilizzati, tra i quali i più conosciuti sono gli estensimetri e le macchine prova, ma sono sempre più disponibili e stanno acquistando importanza giorno dopo giorno, i metodi ottici a tutto campo. In ogni caso, comunque, i metodi di misura disponibili sono molteplici e possono essere suddivisi, a grandi linee, tra ottici e non ottici: ai primi appartengono, tra gli altri, la fotoelasticità, l’interferometria olografica, il metodo moiré, la fotografia speckle, l’ESPI, mentre ai secondi, l’estensimetria, i metodi ad ultrasuoni e le vernici fragili. Il successo del processo sperimentale si poggia sulla scelta della tecnica d’indagine per lo scopo che ci si prefigge, sulle limitazioni degli apparati disponibili, sui costi, sull’accuratezza richiesta e sul carattere dell’informazione ottenuta. La meccanica sperimentale si è sviluppata nel corso del XX secolo come riportato nella Tabella 9 che mostra una cronologia sintetica riguardante i metodi in essa utilizzati, con l’indicazione di alcuni precursori e pionieri delle varie tecniche.

Tabella 9 - Lo sviluppo dei metodi ottici

ANNO	TECNICHE	PRECURSORI
1900	Fotoelasticità	Brewster (1815), Wertheim (1852), Mesnager (1901), Filon (1902), Coker (1910), Hetényi (1938), Drucker e Mindlin (1940), Manzella (1942), Mondina (≈ 1950)
1925	Tensiometria mediante raggi X	Lester e Aborn (1925), Sachs e Weerts (1930)
1930/ 1940	Vernici fragili	Sauerwald e Wieland (1925), Dietrich e Lehr (1932), De Forest (1939), Turra (1941), Ferro Milone (1948)
1940	Estensimetri elettrici a resistenza	Lord Kelvin (1856), Simmons e Ruge (1938), de Forest, Eisler, W.T. Bean, Smith, Campbell, Bray (≈ 1950)
1950	Metodi del moiré geometrico	Lord Rayleigh (1874), A. Righi (1887) Tolenaar (1945), Dantu (1954), Morse, Durelli e Sciammarella (1961), Theocaris (1969), Pirodda (1969), Durelli e Parks (1970)
1960	Olografia	Gabor (1948), Leith e Upatnieks (1961)
1970	Metodi speckle	Archbold, Burch, Ennos & Taylor (1969), Butters & Leendertz (1971), F.P Chiang (1973)
1980	Interferometria moiré	Lord Rayleigh (1874), A. Righi (1887), Post (≈1980)
1980	Metodi basati sull’effetto termoelastico(TSA)	Weber (1830), Lord Kelvin (1852), Belgen (1967), Mountain e Webber (1978)
1980	Metodi a correlazione di immagini digitali (DIC)	Peters e Ranson (1981), Sutton
1985 2005	Fotomeccanica digitale:	Per la fotoelasticità: Muller e Saackel (1979), Voloshin. e Burger (1983), Sanford e Iyengar (1885), Hecker e Morche (1986)
2025	?	?

Fino al 1950, a parte la tensiometria a raggi X adatta all’analisi delle tensioni residue, le tecniche fondamentali erano la fotoelasticità e l’estensimetria (con il complemento delle vernici fragili). A partire dal 1950 si sviluppano con continuità (cadenza all’incirca decennale) i metodi del moiré geometrico (1950) e quindi, con l’invenzione del laser (1960/63) i metodi interferometrici basati sull’impiego dell’ottica coerente, cioè l’interferometria olografica, l’effetto speckle e moiré; infine negli anni ’80, con la commercializzazione del sistema SPATE (*Stress Pattern Analysis by measurement of Thermal Emission*), si sviluppano i metodi basati sull’effetto termoelastico (*TSA – Thermoelastic Stress Analysis*).

A partire dagli anni ‘80 il maggiore sviluppo è dovuto all’impatto dei sistemi e dei metodi di acquisizione ed elaborazione delle immagini sulla fotomeccanica sia con la nascita e lo sviluppo dei metodi basati sulla correlazione delle immagini digitali (*DIC - Digital Image Correlation*), sia con l’automazione dei metodi della fotomeccanica. Nella seconda metà del secolo XX l’evoluzione, sopra

evidenziata dell’analisi sperimentale delle tensioni e, più in generale, della meccanica sperimentale, è legata principalmente ai seguenti fattori:

- il concomitante sviluppo della *meccanica computazionale* (modelli matematici) che ha prodotto uno spostamento di interesse dai metodi operanti sui *modelli analogici* (per esempio le analogie per lo studio della torsione) e su *modelli fisici strutturali* (per esempio fotoelasticità) ai metodi operanti *su prototipo* direttamente cioè sui materiali strutturali;
- all’invenzione del laser (1960/63) che ha permesso lo sviluppo dei metodi interferometrici basati sull’ottica coerente (interferometria olografica, speckle e moiré) operanti su prototipo;
- all’impatto del computer sulla sperimentazione ed in particolare sullo sviluppo dei sistemi digitali di acquisizione delle immagini con la conseguente automazione della fotomeccanica;
- allo sviluppo dei *micro e nanocomponenti*.

Grazie ai numerosi metodi operanti su prototipo così disponibili, l’analisi sperimentale delle tensioni è oggi utilizzata, oltre che come metodo di controllo per la validazione dei risultati delle analisi numeriche, quale insostituibile metodo di indagine per la caratterizzazione meccanica dei materiali, il collaudo ed il monitoraggio in esercizio di componenti, macchine e strutture.

– Digital Image Correlation: Preprocessing

La DIC è un sistema ottico senza contatto e può essere 2D (utilizzando una telecamera) o 3D (utilizzando due telecamere). Essa è in grado di misurare, tramite l’analisi delle immagini, il campo di spostamenti e deformazioni dei campioni sottoposti ad un determinato carico. Per correlare le immagini e gli spostamenti dei punti presi come riferimento di queste ultime, sono utilizzate due telecamere disposte davanti al campione.

La tecnologia DIC da noi utilizzata si basa sul sistema ARAMIS, il quale è stato applicato con successo a una vasta gamma di problemi sperimentali. In [31], [32], [33], [34], [35], [36], [37] vengono descritti alcuni studi effettuati tramite l’ausilio di questa tecnica sperimentale.

Prima di eseguire le varie prove è necessario fare una preliminare calibrazione delle due telecamere.

La “**calibrazione**” è un processo durante il quale il sistema di misura ARAMIS, con l’ausilio di opportuni oggetti (oggetti di calibrazione), è regolato in modo che sia garantita la coerenza dimensionale del sistema di misura stesso. L’operazione di calibrazione del sistema Aramis si articola nelle seguenti fasi:

- montaggio e regolazione tramite le livelle del treppiede così da rendere l’asse verticale dei sensori normale al piano;
- regolazione dell’asse orizzontale della fotocamera ortogonale alla superficie del campione.

Il **volume di misura** si stabilisce andando a misurare la lunghezza e la larghezza del provino (ad es. il provino di trazione ha dimensioni 250 x 12,5). Definito il volume di misura, bisogna scegliere il pannello di calibrazione adatto per fare la taratura della DIC. Il pannello di calibrazione utilizzato per la prova di trazione è pari a 250 x 200.

Utilizzando il manuale Software e Hardware della DIC e prendendo come riferimento le telecamere 12 MPixel e le lenti da 50 mm sono stati impostati i vari parametri per effettuare la corretta calibrazione. Dalla tabella del pannello di calibrazione 250 x 200, rappresentata sul manuale, si osserva che il volume di misura è di 250 x 190 (ricordiamo che il provino di trazione ha dimensioni 250 x 12,5).

Importante inoltre è stabilire la distanza tra la barra di calibrazione, dove scorrono le telecamere, e il pannello di calibrazione (640 mm circa) e la distanza tra il centro della barra calibrata e le telecamere (254 mm circa). Definiti la **distanza di calibrazione** e il volume di misura, bisogna accertarsi che le telecamere di destra e di sinistra puntino entrambe allo stesso punto attivando un puntatore laser, così da vedere nello stesso punto le immagini delle due telecamere sul pc (se le telecamere non puntassero

allo stesso punto nel pannello di calibrazione quando calcoleremo gli spostamenti e le deformazioni possiamo andar incontro a degli errori di misura).

Adesso che le telecamere emettono un fascio luminoso sul medesimo punto bisogna eseguire il **focus delle lenti** in modo da avere una buona nitidezza dell’immagine. Dopo aver messo a fuoco le lenti si osserva sul manuale il valore di **apertura lente** consigliato, in modo da avere la corretta profondità delle immagini (nel nostro caso bisogna utilizzare un’apertura delle lenti di 5,6 mm ma la nitidezza delle immagini risulta bassa, pertanto si aumenta l’apertura delle lenti e, quindi, la profondità delle immagini ad un valore tra gli 8 e gli 11 mm).

La **frequenza di acquisizione** delle immagini è stata impostata a 1 Hz in modo da avere, in seguito, una mappa dettagliata delle deformazioni che sono avvenute durante la prova.

Impostata l’attrezzatura, il software Aramis è pronto per eseguire la calibrazione delle due telecamere come mostrato in Figura 39. Affinché si possa avere un’ottima calibrazione delle telecamere e quindi poter fare correttamente la prova è necessario che il valore di **deviazione calibrazione** sia $< 0,4$.

Una volta conclusa la calibrazione, ed essendo state definite pertanto le posizioni relative delle fotocamere rispetto alla macchina, si può procedere all’avvio dei test. Si precisa che, se per una molteplicità di ragioni, la posizione delle telecamere calibrate viene modificata nel corso della durata delle prove o tra un test ed il successivo, la calibrazione non è più valida (con conseguente errata analisi delle immagini). Si deve procedere, di conseguenza, ad una nuova calibrazione.

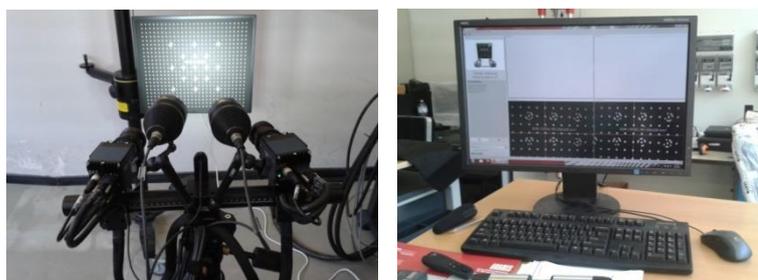


Figura 39 - 3D DIC - Calibrazione

– Digital Image Correlation: preparazione provini

Prima di procedere con le prove statiche, la superficie del provino è stata “preparata” realizzando un opportuno “pattern”, applicando su di essa dapprima un getto di colore bianco puro (RAL 9010) e poi, in seguito, al fine di creare il nostro pattern di riferimento, spruzzando un nero opaco (RAL 9005) in forma nebulizzata che copre circa il 50% della superficie, al fine di ottenere una superficie omogenea come nella Figura 40. Questa risulta essere una fase fondamentale per la corretta acquisizione delle immagini da parte del software. Prima di eseguire la prova il pattern creato è stato confrontato con dei modelli raffigurati sul manuale del software Aramis in modo tale da poter sfruttare appieno le potenzialità dei 12 Mpixel delle camere. Realizzato lo speckle sui provini, si lascia asciugare qualche minuto, dopodiché viene inserito il provino all’interno delle morse della macchina di prova.

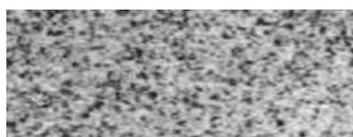


Figura 40 - Pattern realizzato sulla superficie del provino

– Digital Image Correlation: Post processing

Ultimata qualsiasi tipo di prova (trazione-compressione-flessione-taglio interlaminare) si computano i risultati in modo tale da capire dalle sequenze di immagini dove e in che modo si è verificata la rottura del provino in esame. Per effettuare una corretta computazione, è necessario selezionare la zona di **analisi, maschera di calcolo**, dove si intende calcolare il valore delle deformazioni e stabilire un punto

di riferimento, **start point**, sulla superficie del provino sottoposto alla prova in esame, di modo tale che, quando avvenga la computazione delle immagini frame by frame, si possa osservare lo spostamento di questo punto durante tutto l’andamento della prova (Figura 41).

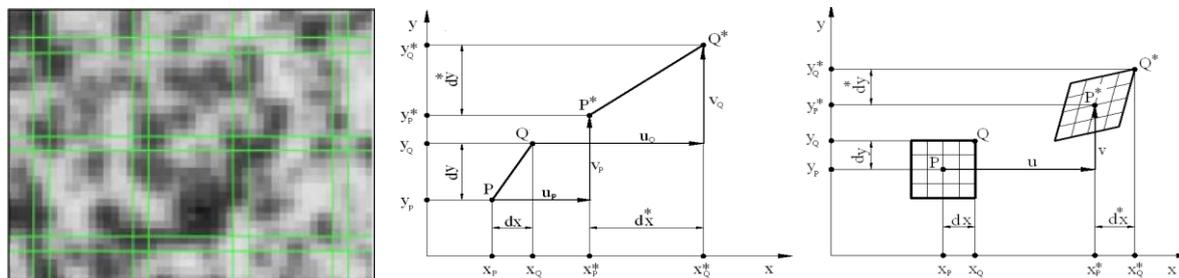


Figura 41 – Facet e spostamenti subiti da un elemento lineare

L’acquisizione delle immagini da parte del sistema si basa essenzialmente su un’entità geometrica creata dal software e denominata “**facet**”. L’insieme dei facet (quadrati o rettangolari) costituisce l’area da valutare, in altre parole la maschera di calcolo. Definita tale maschera, il software avvia il **calcolo** assumendo come riferimento un punto iniziale contenuto all’interno dell’area.

A questo punto, è possibile avviare la computazione dei risultati e fare le opportune considerazioni dei parametri da investigare. Per calcolare la deformazione in una particolare zona del provino si devono creare delle **sezioni di riferimento** in modo tale da poter calcolare la deformazione del provino lungo la linea di una medesima sezione.

Create le varie sezioni, si creano degli **stage point**, punti nei quali si vuole calcolare il valore delle deformazioni e degli spostamenti che sono avvenuti durante la prova. È necessario che gli stage point creati non siano in prossimità di eventuali “buchi” presenti nell’immagine, in modo da avere i risultati più chiari possibili e di evitare quindi gli effetti dovuti al rumore del segnale o alla non perfetta applicazione dello speckle di riferimento. A questo punto, è possibile osservare l’andamento degli **spostamenti** e delle **deformazioni** lungo i vari stage point creati in funzione del numero di immagini della prova. Tramite questa tecnica di misurazione ottica le coordinate, gli spostamenti e le deformazioni sono determinati solo sulla superficie degli oggetti. Ciò significa che il calcolo è limitato a sollecitazioni locali, che sono tangenti alla superficie.

2.4.2 Analisi Termografica: principi di funzionamento

Lo stato tensionale di un componente meccanico come ampiamente verificato in [38], [39], [40] e [41] è sempre legato ad una variazione di temperatura del componente stesso. Tale variazioni di temperatura sono facilmente misurabili tramite le moderne camere termografiche che hanno elevatissime precisioni e sono in grado di misurare variazioni dell’ordine del centesimo di grado. La tecnologia termografica è stata fino agli anni ‘60 utilizzata esclusivamente in campo militare, solo successivamente ha avuto un forte impulso nei controlli a tutto campo senza contatto. La termografia è una tecnica di telerilevamento, effettuata tramite l’acquisizione di immagini nel campo dell’infrarosso. Più precisamente questa tecnica permette di misurare l’energia nell’infrarosso emessa dai corpi a temperatura diversa dallo zero assoluto mediante opportuni sensori, e di correlarla alla temperatura superficiale del corpo stesso. Il sistema di acquisizione è, quindi, in condizione di restituire una mappa termica ed un andamento delle temperature nel tempo punto per punto in funzione dello stato tensionale. Lo spettro IR, è convenzionalmente diviso in 3 aree come viene anche mostrato in Figura 42:

- vicino IR (lunghezze d’onda comprese tra 0.78 e 1.5 μm)
- medio IR (lunghezze d’onda comprese tra 1.5 e 20 μm)
- lontano IR (lunghezze d’onda comprese tra 20 e 1000 μm)

Il campo di interesse per la tecnica termografica è quello del *vicino e medio IR*, nella banda delle radiazioni infrarosse con lunghezze d’onda comprese tra 0.75 e 14 µm. Misurando la radiazione in tale spettro è possibile ottenere la temperatura superficiale dei corpi in esame.

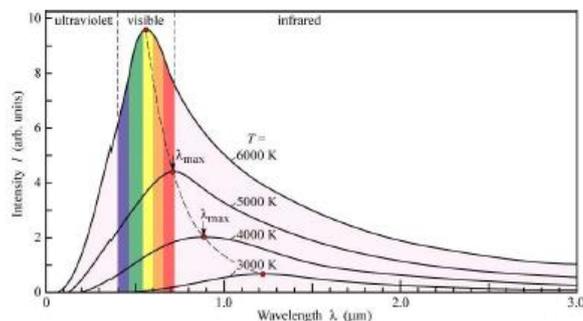


Figura 42 - Curve di Planck

Il sistema presenta i seguenti principali vantaggi: 1) permette di analizzare la temperatura di qualsiasi corpo senza entrarvi in contatto, permettendo la ripetizione delle misure nel tempo, potendo monitorare, quindi, un determinato fenomeno con cadenza temporale prefissata, ad esempio per verificare l’usura di un componente sotto stress; 2) può valutare differenze di temperatura dell’ordine dei centesimi di grado; 3) permette il rilevamento dei dati in un campo di misura molto esteso.

– **Effetto termo-elastico. Correlazione ΔT - stress**

La correlazione tra stress e delta termico della superficie del provino è stata ampiamente investigata. Come si può notare dalla Figura 43, l’evoluzione termica della superficie dei provini durante l’applicazione del carico è solitamente caratterizzata da tre fasi di risposta termica: fase 1: variazione iniziale approssimativamente lineare dovuto all’effetto termoelastico; fase 2: successiva variazione di pendenza sino a raggiungere un valore costante; fase 3: forte incremento di temperatura prima della rottura.

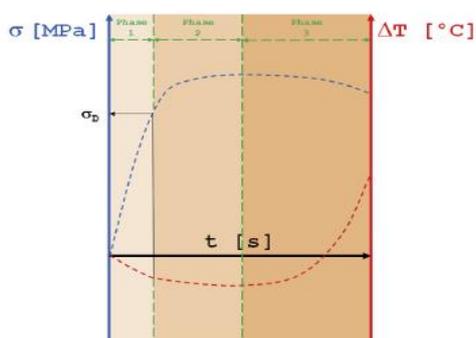


Figura 43 - Andamento teorico ΔT – σ - t applicando un carico a trazione

Per i materiali omogenei isotropi in condizioni adiabatiche la variazione di temperatura nella fase 1 è proporzionale alla seguente relazione:

$$\Delta T_s = - \frac{\alpha}{\rho \cdot c} T_0 \cdot (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$$

Nel caso di carico unidirezionale la relazione diventa:

$$\Delta T_s = - \frac{\alpha}{\rho \cdot c} T_0 \cdot \sigma_1$$

- Dove:
- **α**: Coefficiente di espansione termica lineare, per la resina poliesteri termoindurente pari a 2 E-5 [1/k];
 - **ρ**: Densità pari a 1.800 [kg/m³];
 - **c**: capacità termica specifica pari a 1.673 [kJ/(kg K)];

PROVE SPERIMENTALI: MATERIALI TERMOPLASTICI

In questa parte di tesi vengono riportate le prove sperimentali che sono state effettuate con i materiali termoplastici e nello specifico: il Noryl SE1GFN2 (contenente un 20% di fibre di vetro); il Lexan 3412R (contenente un 20% di fibre di vetro); il Lexan 500R (contenente un 10% di fibre di vetro).

2.5 Prova di trazione

Per effettuare le prove sono stati utilizzate le seguenti attrezzature: 1) un dinamometro, con il quale veniva registrato punto per punto la forza applicata al provino; 2) la tecnica DIC, che ha permesso di calcolare i valori degli spostamenti e delle deformazioni lungo l’asse longitudinale rispetto all’applicazione del carico; 3) la tecnica termografica con la quale è stato possibile registrare i valori delle variazioni termiche agenti sul provino durante la prova. I valori di deformazione e di variazione termica vengono calcolati realizzando 3 diverse aree sul provino (superiore-centrale-inferiore).

Successivamente si è cercato di realizzare un grafico $\sigma - t - \Delta T$ in cui sono stati plottati solo i valori di variazione termica ricavati nell’area maggiormente riscaldata, poiché risulterà essere la zona di futura rottura del provino. La prova, realizzata secondo la normativa ASTM D638, consentiva di realizzare provini a forma di osso di cane. Le dimensioni dei provini e i parametri di prova sono riportati in Tabella 10.

Tabella 10 - Dimensioni campioni e parametri di prova

UNI EN 61	b	l	L	v
U.M.	[mm]	[mm]	[mm]	[mm/min]
parametri	10	150	100	5

La prova viene effettuata applicando una velocità di 5 mm/min. La tensione massima a rottura, espressa in MPa, è stata determinata secondo la seguente formula:

$$\sigma_{trazione} = \frac{P_t}{b * h}$$

Dove: P_t è il carico massimo, [N]

b è la larghezza media del campione [mm]

h è lo spessore medio del campione [mm]

In Figura 44 sono mostrate le tre tipologie di provino termoplastico realizzato.



Figura 44 – Provini termoplastici: a) Noryl SE1GFN2; b) Lexan 3412R; c) Lexan 500R

Per effettuare la prova di trazione è stato necessario utilizzare delle semplici morse con una leggera zigrinatura in modo da non alterare la superficie di ammorsaggio dei provini sottoposti a prova.

Per evitare che i provini possano rompersi in prossimità delle ganasce della macchina è necessario stringerli uniformemente applicando una determinata coppia con una chiave dinamometrica in modo da evitare il possibile slittamento in fase di avanzamento della prova.

2.5.1 Analisi dei risultati Noryl SE1GFN2

In Figura 45 si mostrano le curve ingegneristiche relative al Noryl SE1GFN2 mentre in Figura 46 vengono raffigurate alcune immagini delle deformazioni longitudinali (ϵ_y) ricavate con la DIC 3D.

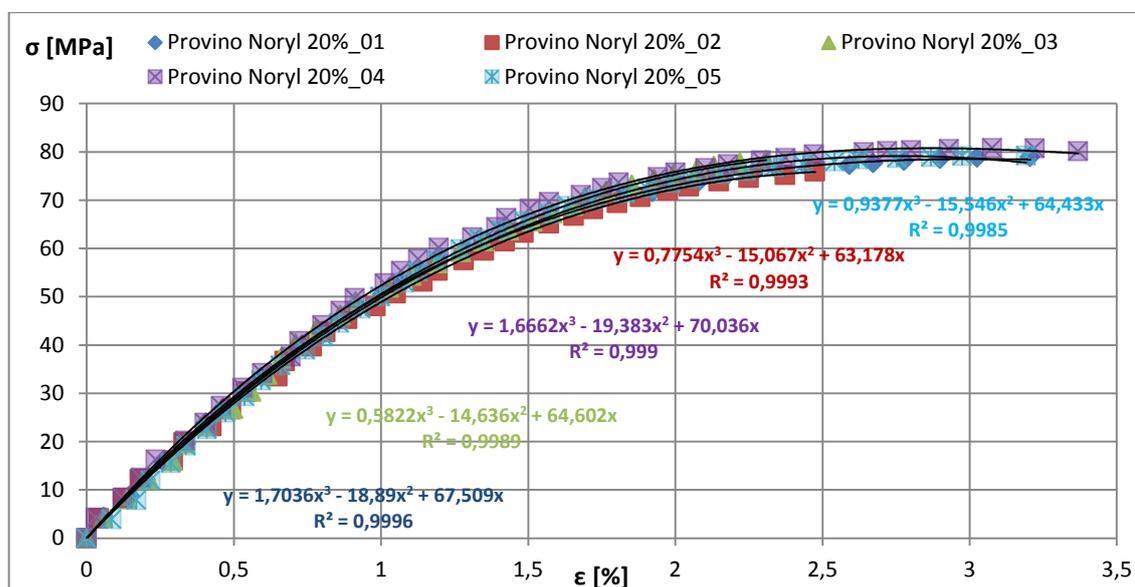


Figura 45 - Trazione provini stampati a iniezione Noryl SE1GFN2: Stress - Strain

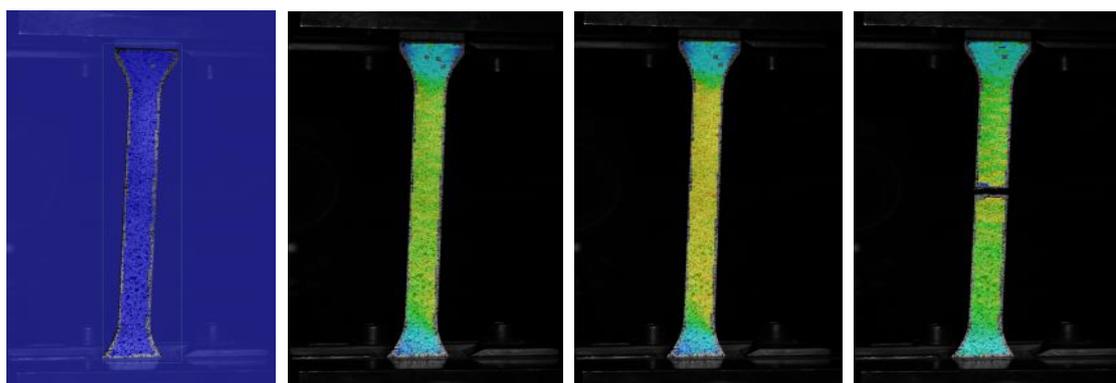


Figura 46 – Provino stampato a iniezione Noryl SE1GFN2: Strain Y

In Tabella 11 vengono rappresentati tutti i valori dei parametri ricavati tramite la prova di trazione.

Tabella 11 - Riepilogo prove Noryl SE1GFN2

TRAZIONE ASTM D638	U.M.	Prov. 1	Prov. 2	Prov. 3	Prov. 4	Prov. 5	Media	Dev.St.
Pmax (carico a rottura)	N	3110	3060	3210	3130	3100	3135	49,84
b (larghezza provino)	mm	9,84	9,89	9,98	9,74	9,81	9,86	0,08
h (spessore provino)	mm	4,01	4,06	4,11	3,97	3,99	4,03	0,05
δ (spostamento traversa)	mm	3,31	2,83	2,7	3,88	3,41	3,29	0,43
σ_{tmax} (tensione a rottura)	N/mm ²	80	76	79	81	79	79	1,67
ϵ_y	%	3,25	2,71	2,33	3,37	3,18	2,85	0,39
ϵ_x	%	-0,89	-0,95	-0,91	-0,91	-0,89	-0,92	0,02
E (modulo)	N/mm ²	4438	4353	4745	4532	4702	4549	150,16

2.5.2 Analisi dei risultati Lexan Resin 3412R

Stesso iter viene adottato per lo studio degli altri materiali e nello specifico in Figura 47 sono state riportate le curve ingegneristiche relative al Lexan 3412R.

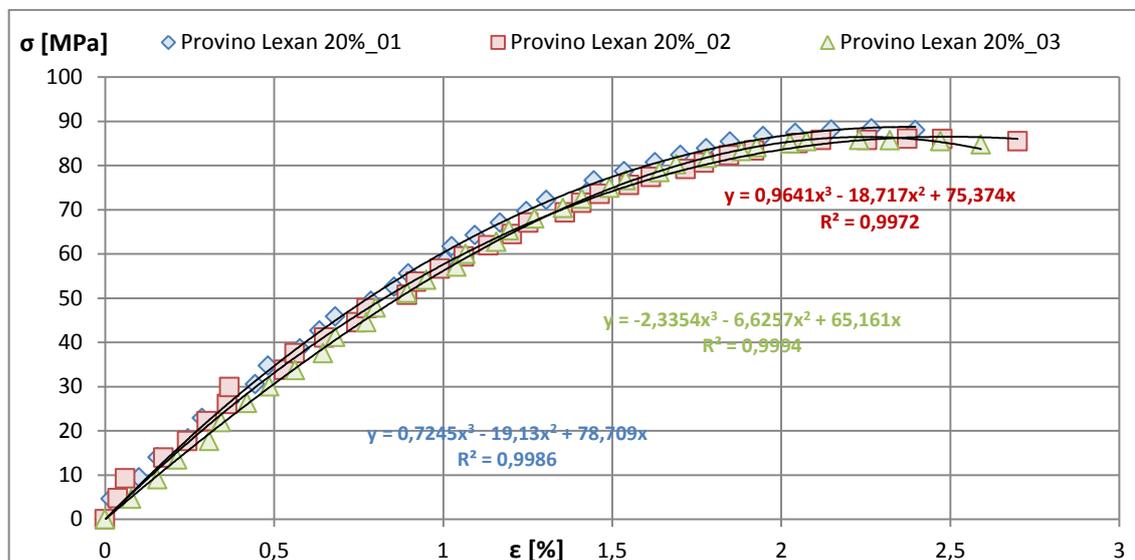


Figura 47 – Trazione provini stampati a iniezione Lexan 3412R: Stress - Strain

Nella Figura 48 vengono raffigurate alcune immagini ricavate con la DIC relativi alle deformazioni longitudinali.

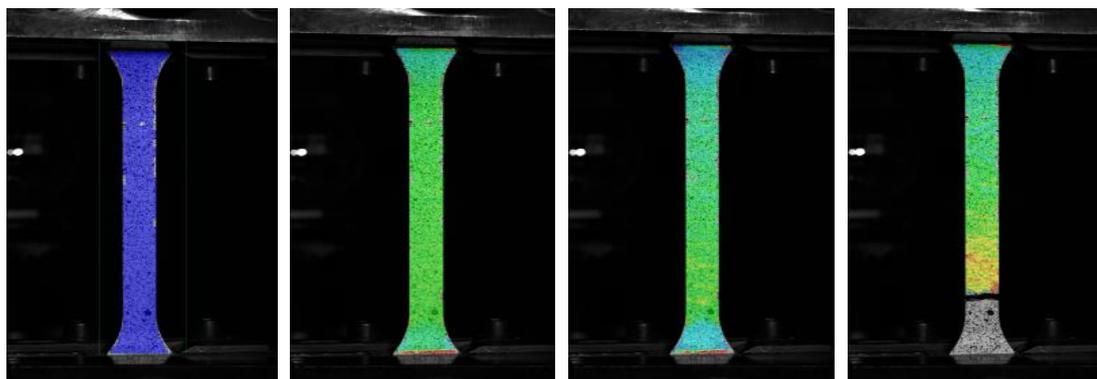


Figura 48 – Provino stampato a iniezione Lexan 3412R: Strain Y

In Tabella 12 vengono rappresentati tutti i valori dei parametri ricavati tramite la prova di trazione. Tabella 12 - Riepilogo prove Lexan 3412R

TRAZIONE ASTM D638	U.M.	Prov. 1	Prov. 2	Prov. 3	Media	Dev.St.
Pmax (carico a rottura)	N	3570	3500	3480	3525	38,81
b (larghezza provino)	mm	9,99	9,98	9,97	9,98	0,01
h (spessore provino)	mm	4,04	4,05	4,06	4,05	0,01
δ (spostamento traversa)	mm	2,74	2,93	2,88	2,83	0,08
σ_{max} (tensione a rottura)	N/mm ²	88	87	86	87	0,82
ϵ_y	%	2,48	2,70	2,59	2,57	0,09
ϵ_x	%	-0,93	-1,14	-0,94	-1,03	0,09
E (modulo)	N/mm ²	4573	4971	5125	4849	233,46

2.5.3 Analisi dei risultati Lexan 500R

Per questo materiale è possibile notare una curva ingegneristica differente a seconda di dove viene misurata la deformazione. Nello specifico in Figura 49 viene preso in considerazione una deformazione calcolata come se fosse installato un estensometro sul provino, mentre in Figura 50 vengono plottati i punti di maggior deformazione.

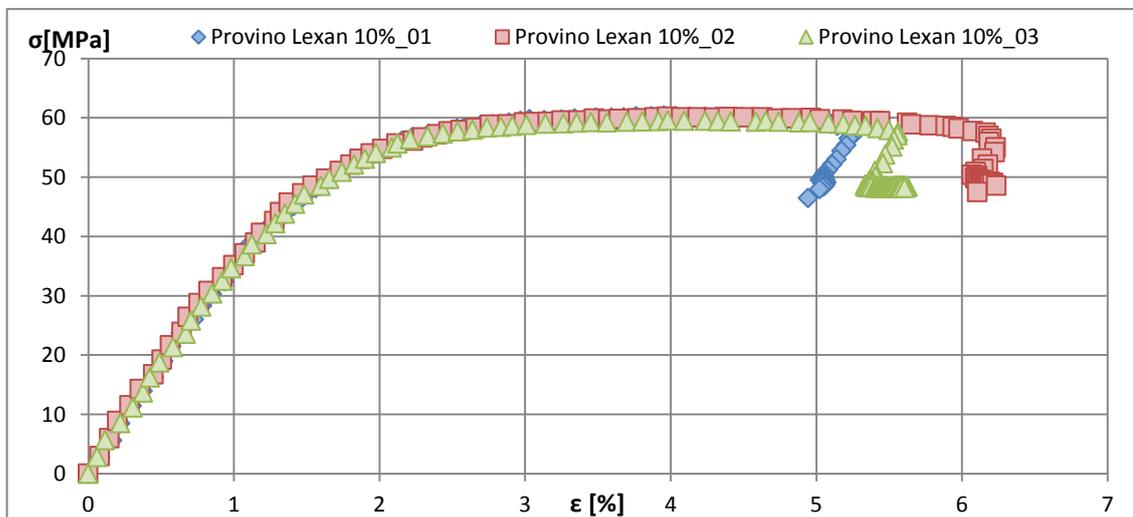


Figura 49 – Trazione provini stampati a iniezione Lexan 500R: Stress - Strain (Estensometer)

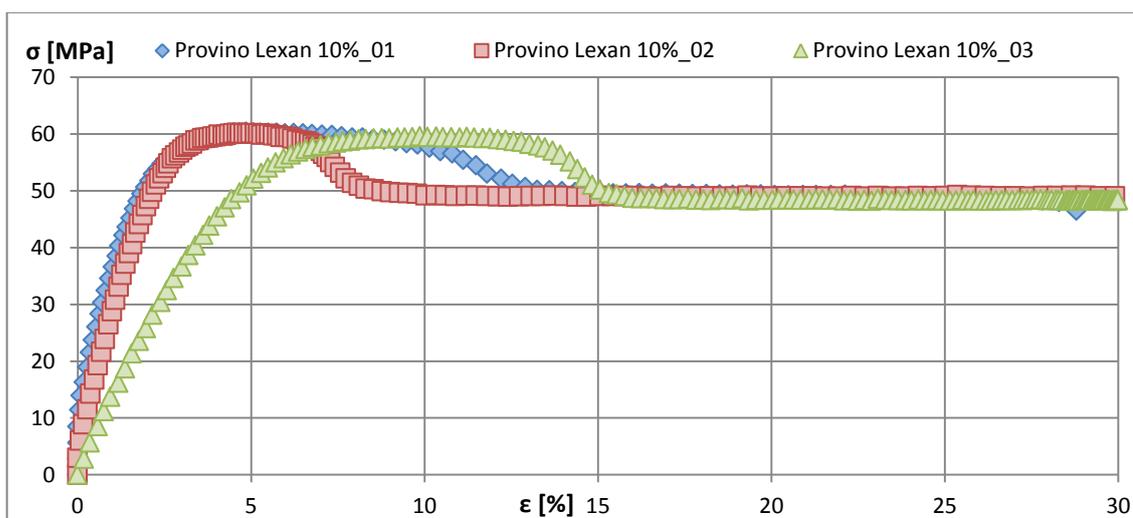


Figura 50 – Trazione provini stampati a iniezione Lexan 500R: Stress - Strain (DIC max)

Nella Figura 51 sono riportate alcune immagini della deformazione longitudinale agente sul provino.

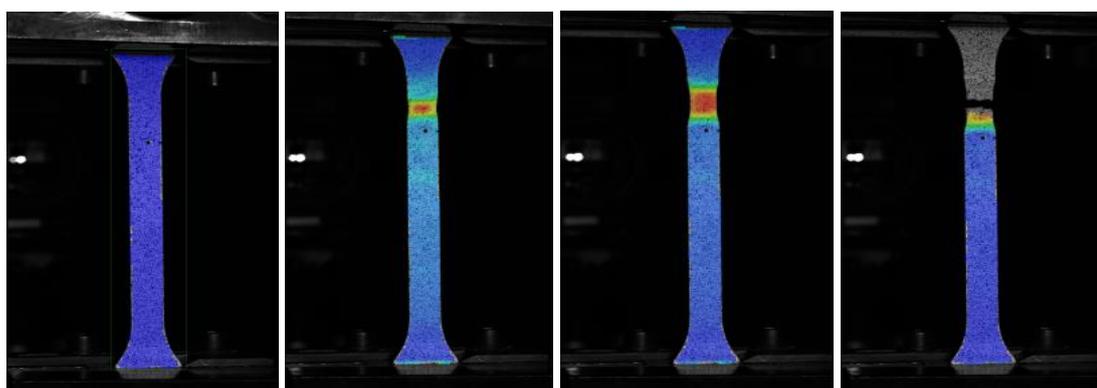


Figura 51 – Provino stampato a iniezione Lexan 500R: Strain Y

Per tale tipologia di materiale è stato molto interessante andare ad osservare il comportamento termico durante la prova. Come detto in fase introduttiva, si è suddiviso il provino in tre aree (superiore-centrale-inferiore) e si è successivamente realizzato un grafico σ -t- ΔT in cui si è plottato l’andamento termico dell’aria maggiormente riscaldata. Nella Figura 52 viene mostrata la curva σ -t- ΔT notando come ad un determinato istante si ha un aumento deciso di temperatura.

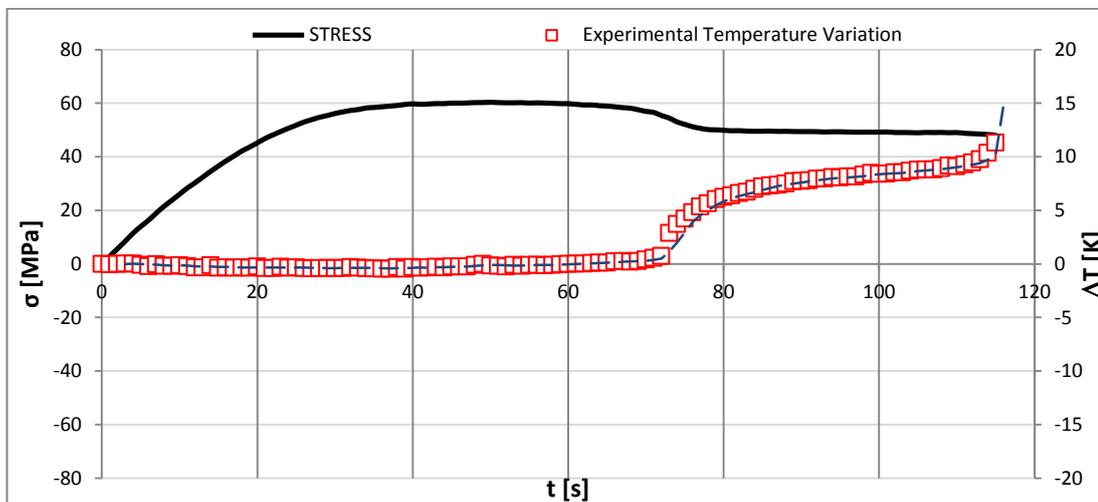


Figura 52 - Trazione provino stampato a iniezione Lexan 500R: Curva tensione - tempo – temperatura

Nella Figura 53 viene fatta un ingrandimento della scala termica in modo da poter individuare l’istante di tempo in cui il provino inizia a strizionarsi e quindi a risentire del carico applicato.

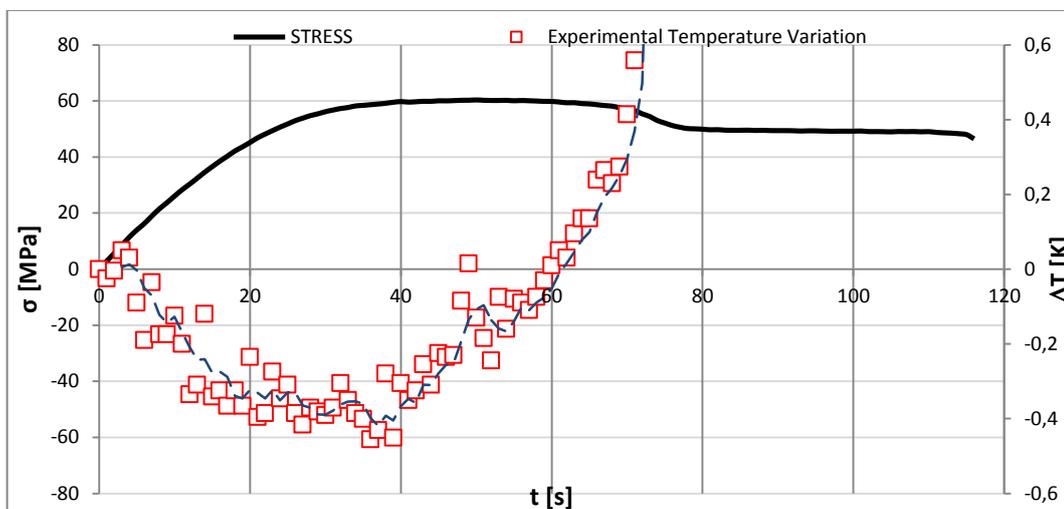


Figura 53 - Trazione provino stampato a iniezione Lexan 500R: ingrandimento scala termica

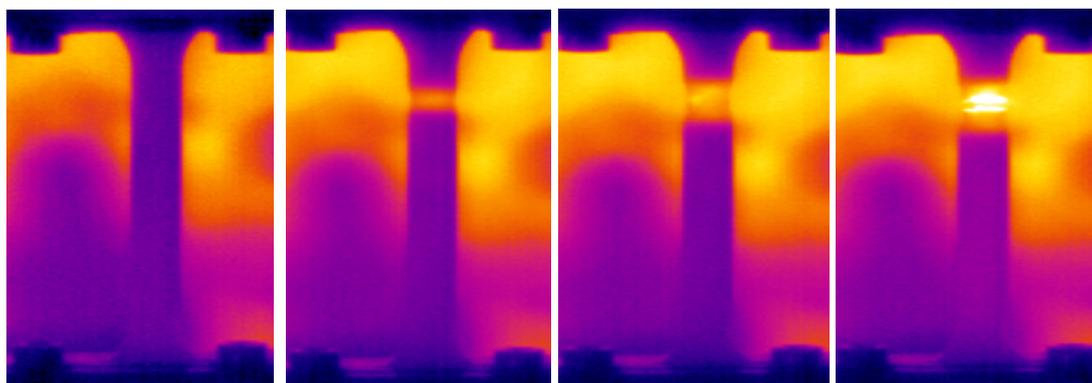


Figura 54 - Provino stampato a iniezione Lexan 500R: ΔT

Nella Figura 54 vengono rappresentate alcune immagini relative all’evoluzione termica del provino agli stessi istanti di tempo in cui sono state precedentemente osservate le immagini DIC. In Tabella 13 vengono rappresentati tutti i valori dei parametri ricavati.

Tabella 13 - Riepilogo prove Lexan 500R

TRAZIONE ASTM D638	U.M.	Prov. 1	Prov. 2	Prov. 3	Media	Dev.St.
P _{max} (carico a rottura)	N	2450	2500	2610	2520	66,83
b (larghezza provino)	mm	10	10	10,27	10,09	0,13
h (spessore provino)	mm	4,061	4,15	4,25	4,15	0,08
δ (spostamento traversa)	mm	9,68	12,14	22	14,6	5,32
σ _{max} (tensione a rottura)	N/mm ²	60	60	60	60	0,00
σ _{max} (tensione a snervamento)	N/mm ²	50	50	50	50	0,00
ε _y ext	%	5,62	6,05	5,47	5,71	0,25
ε _y max	%	70,92	71,12	78,27	74,43	3,45
ε _x ext	%	-2,44	-2,53	-2,39	-2,45	0,06
ε _x max	%	-16,81	-18,21	-19,64	-18,21	1,16
E (modulo)	N/mm ²	3134	3010	3055	3066	51,25

2.5.4 Riepilogo prove di trazione termoplastici

In Tabella 14 vengono riassunte tutte le varie prove di trazione effettuate sui vari materiali termoplastici analizzati.

Tabella 14 - Riepilogo prove di trazione termoplastici

TRAZIONE ASTM D638	U.M.	Prov. 1	Prov. 2	Prov. 3	Prov. 4	Prov. 5	Media	Dev.St.
Noryl SE1GFN2								
P _{max} (carico a rottura)	N	3110	3060	3210	3130	3100	3135	49,84
b (largh. provino)	mm	9,84	9,89	9,98	9,74	9,81	9,86	0,08
h (spes. provino)	mm	4,01	4,06	4,11	3,97	3,99	4,03	0,05
δ (spost. traversa)	mm	3,31	2,83	2,71	3,88	3,41	3,29	0,43
σ _{max} (tens. a rottura)	N/mm ²	80	76	79	81	79	79	1,67
ε _y	%	3,25	2,71	2,33	3,37	3,18	2,85	0,39
ε _x	%	-0,89	-0,95	-0,91	-0,91	-0,89	-0,92	0,02
E (modulo)	N/mm ²	4438	4353	4745	4532	4702	4549	150,16
Lexan 3412R								
P _{max} (carico a rottura)	N	3570	3500	3480			3525	38,81
b (largh. provino)	mm	9,99	9,98	9,97			9,98	0,01
h (spes. provino)	mm	4,04	4,05	4,06			4,05	0,01
δ (spost. traversa)	mm	2,74	2,93	2,88			2,83	0,08
σ _{max} (tens. a rottura)	N/mm ²	88	87	86			87	0,82
ε _y	%	2,48	2,71	2,59			2,57	0,09
ε _x	%	-0,93	-1,11	-0,91			-1,01	0,09
E (modulo)	N/mm ²	4573	4971	5125			4849	233,46
Lexan 500R								
P _{max} (carico a rottura)	N	2450	2500	2610			2520	66,83
b (largh. provino)	mm	10,01	10,01	10,27			10,09	0,13
h (spes. provino)	mm	4,06	4,15	4,25			4,15	0,08
δ (spost. traversa)	mm	9,68	12,14	22			14,6	5,32

σ_{\max} (tens. a rottura)	N/mm ²	60	60	60			60	0,00
σ_{\max} (tens. a snerv.)	N/mm ²	50	50	50			50	0,00
$\epsilon_{y \text{ ext}}$	%	5,62	6,05	5,47			5,71	0,25
$\epsilon_{y \text{ max}}$	%	70,92	71,12	78,27			74,43	3,45
$\epsilon_{x \text{ ext}}$	%	-2,44	-2,53	-2,39			-2,45	0,06
$\epsilon_{x \text{ max}}$	%	-16,81	-18,21	-19,64			-18,21	1,16
E (modulo)	N/mm ²	3134	3010	3055			3066	51,25

2.6 Prova di compressione

Per effettuare le prove di compressione sui materiali termoplastici viene adoperata la normativa UNI 4279. I provini sottoposti alla prova sono il Noryl SE1GFN2 e il Lexan 3213R come mostrato in Figura 55. La tensione massima a rottura, espressa in MPa, è stata determinata secondo la seguente formula:

$$\sigma_{\text{compressione}} = \frac{P_c}{b * h}$$

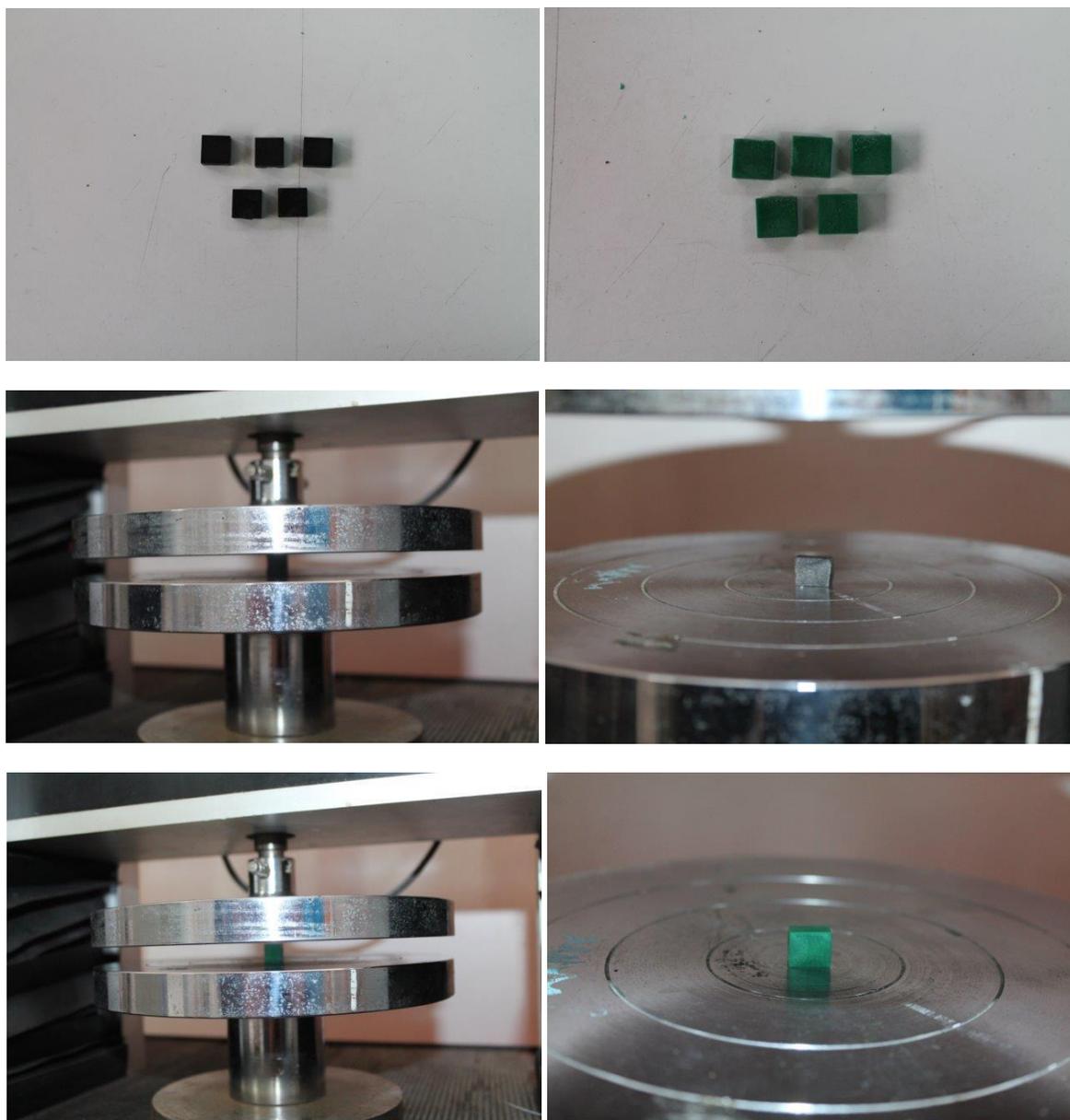


Figura 55 - Riepilogo prove di compressione termoplastici NTET

In Tabella 15 sono stati mostrati i valori delle prove di compressione.

Tabella 15 - Riepilogo prove di compressione termoplastici

COMPRESSIONE UNI 4279	U.M.	Prov. 1	Prov. 2	Prov. 3	Prov. 4	Prov. 5
Noryl SE1GFN2						
P _{max} (carico a rottura)	N	6000	6480	6490	6250	6350
a (larghezza provino)	mm	10,20	10,20	10,20	10,20	10,20
h (spessore provino)	mm	5,20	5,25	5,25	5,25	5,25
a (altezza provino)	mm	10,20	10,20	10,20	10,20	10,20
σ _{cmax} (tensione a rottura)	N/mm ²	113,12	121,01	121,20	116,71	118,58
Lexan 3412R						
P _{max} (carico a rottura)	N	5380	5320	5330	5310	5370
a (larghezza provino)	mm	10,20	10,20	10,20	10,20	10,20
h (spessore provino)	mm	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25
a (altezza provino)	mm	10,20	10,20	10,20	10,20	10,20
σ _{cmax} (tensione a rottura)	N/mm ²	100,47	99,35	99,53	99,15	100,28

2.7 Prova di flessione

Per effettuare le prove di flessione sui materiali termoplastici viene adoperata la normativa ASTM D790. I provini sottoposti alla prova sono il Noryl SE1GFN2 e il Lexan 3213R come mostrato in Figura 56. La tensione massima a rottura, espressa in MPa, è stata determinata secondo la seguente formula:

$$\sigma_{flessione} = \frac{3 \cdot P \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2}$$

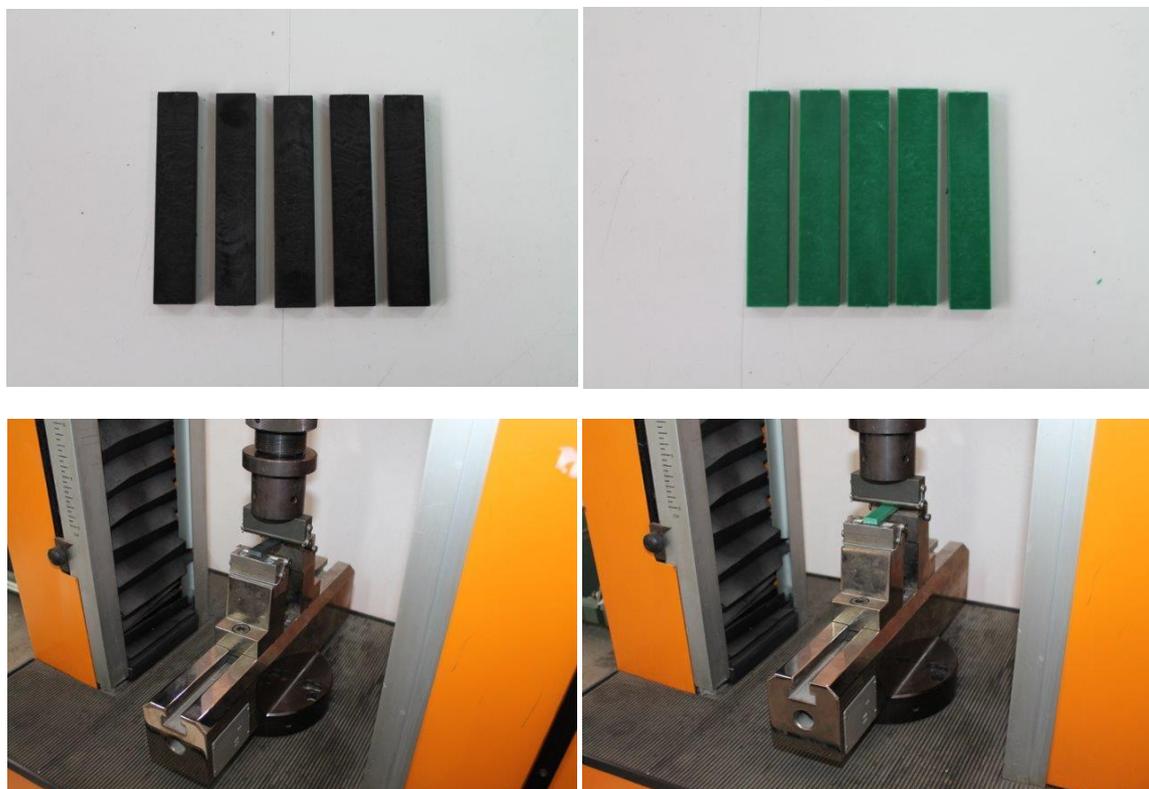


Figura 56 - Riepilogo prove di flessione termoplastici NTET

In Tabella 16 sono stati mostrati i valori delle prove di flessione.

Tabella 16 - Riepilogo prove di flessione termoplastici

FLESSIONE ASTM D790	U.M.	Prov. 1	Prov. 2	Prov. 3	Prov. 4	Prov. 5
<u>Noryl SE1GFN2</u>						
P _{max} (carico a rottura)	N	480	482	475	485	488
L (distanza appoggi)	mm	50	50	50	50	50
b (larghezza provino)	mm	13	13	13	13	13
h (spessore provino)	mm	5	5	5	5	5
σ _{fmax} (tensione a rottura)	N/mm ²	110,76	111,23	109,61	111,92	112,61
<u>Lexan 3412R</u>						
P _{max} (carico a rottura)	N	718	750	710	720	730
L (distanza appoggi)	mm	49	50	50	50	50
b (larghezza provino)	mm	13	13	13	13	13
h (spessore provino)	mm	5	5	5	5	5
σ _{fmax} (tensione a rottura)	N/mm ²	169,07	180,21	170,60	173,00	175,41

2.8 Prova d'impatto

Per effettuare le prove d'impatto sui materiali termoplastici viene adoperata la normativa ASTM D256. I provini sottoposti alla prova sono il Noryl SE1GFN2 e il Lexan 3213R come mostrato in Figura 57. La tensione massima a rottura, espressa in MPa, è stata determinata secondo la seguente formula:

$$\sigma_{resilienza} = \frac{E}{(b * h)} \cdot 10^3$$

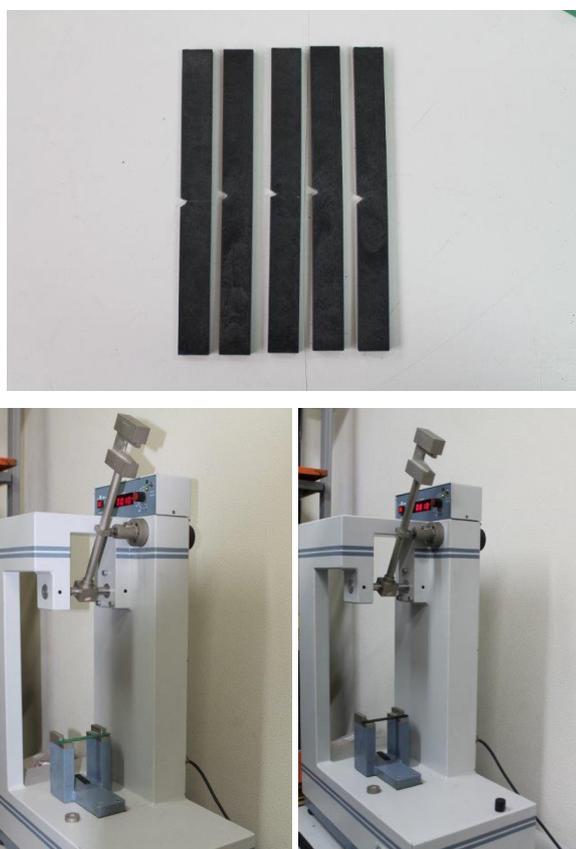


Figura 57 - Riepilogo prove di resilienza termoplastici NTET

In Tabella 17 sono stati mostrati i valori delle prove d'impatto.

Tabella 17 – Riepilogo prove d’impatto termoplastici

RESILIENZA ASTM D 256	U.M.	Prov. 1	Prov. 2	Prov. 3	Prov. 4	Prov. 5
Noryl SE1GFN2						
E (energia assorbita)	J	0,75	0,80	0,75	0,80	0,75
b (larghezza provino)	mm	12,7	12,7	12,7	12,7	12,7
h (spessore provino)	mm	3	3	3	3	3
l (lunghezza provino)	mm	127	127	127	127	127
σ_{imax} (tensione a rottura)	kJ/m ²	19,69	21,00	19,69	21,00	19,69
Lexan 3412R						
E (energia assorbita)	J	1,35	1,10	1,65	1,85	1,55
b (larghezza provino)	mm	12,71	12,72	12,73	12,72	12,71
h (spessore provino)	mm	3	3	3	3	3
l (lunghezza provino)	mm	127	127	127	127	127
σ_{imax} (tensione a rottura)	kJ/m ²	35,43	28,87	43,31	48,56	40,68

2.9 Prova di rigidità dielettrica

Per effettuare le prove di rigidità dielettrica sui materiali termoplastici viene adoperata la normativa ASTM D149. I provini sottoposti alla prova di flessione sono il Noryl SE1GFN2 e il Lexan 3213R come è stato mostrato nella Figura 58.

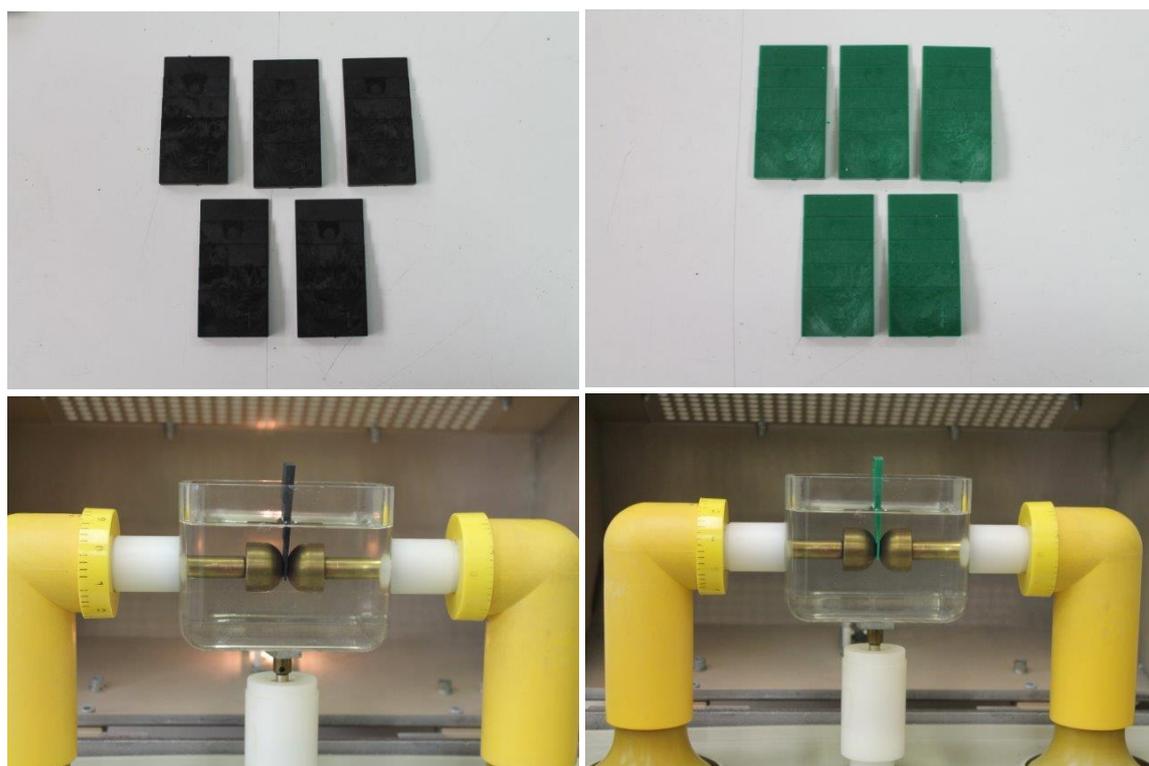


Figura 58 - Riepilogo prove di rigidità dielettrica termoplastici NTET

Tale prova ha consentito di determinare il valore limite di campo elettrico oltre il quale si produce una conduzione di elettricità (scarica elettrica) attraverso il materiale dielettrico. È importante che secondo normativa i valori di rigidità dielettrica siano superiori a 17 kV/mm per il Noryl SE1GFN2 e di 16 kV/mm per il Lexan 3412R.

In Tabella 18 sono stati mostrati i valori delle prove di rigidità dielettrica.

Tabella 18 - Riepilogo prove di rigidità dielettrica termoplastici

RIGIDITA' DIELETTRICA ASTM D149	U.M.	Prov. 1	Prov. 2	Prov. 3
Noryl SE1GFN2				
scarica elettrica riscontrata	kV/mm	20,10	23,40	23,60
scarica elettrica > 17	kV/mm	OK	OK	OK
Lexan 3412R				
scarica elettrica riscontrata	kV/mm	20,30	23,10	21,80
scarica elettrica > 16	kV/mm	OK	OK	OK

2.10 Prova di assorbimento d’acqua

Per effettuare le prove di assorbimento sui materiali termoplastici viene adoperata la normativa ASTM D570. I provini sottoposti alla prova sono il Noryl SE1GFN2 e il Lexan 3213R come mostrato in Figura 59.

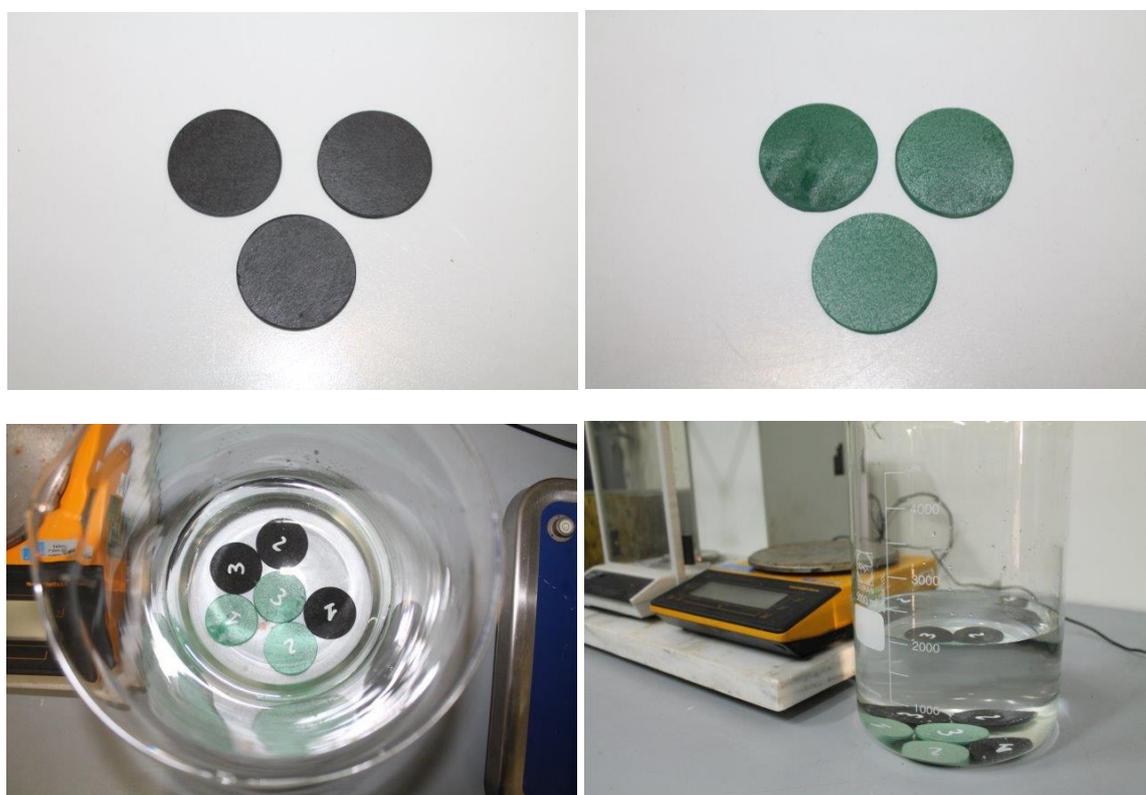


Figura 59 - Riepilogo prove di assorbimento acqua termoplastici NTET

In accordo con la normativa ASTM D570, per i materiali termoplastici sono stati ricavati dei provini di forma circolare con dimensioni del diametro dipendente dallo spessore del materiale da indagare. Ogni forma di contaminazione sulla superficie del provino, capace di influenzare l’assorbimento dell’acqua, deve essere eliminata con un agente pulente, ovviamente non aggressivo per la materia plastica in esame. Lasciare essiccare i provini a 23°C e 50% di umidità per almeno 2 ore dalla pulitura. Successivamente tutti i provini vengono essiccati in una stufa mantenuta a 50°C per 24 ore. I provini, dopo che sono stati raffreddati all’interno dell’essiccatore, vengono pesati su una bilancia elettronica e successivamente immersi in acqua distillata mantenuta a 23°C. All’interno del recipiente vengono utilizzati almeno 8 ml di acqua distillata per centimetro quadrato della superficie totale del provino, ma mai meno di 300 ml d’acqua per ogni provino per evitare una concentrazione eccessiva dei prodotti estratti dall’acqua nel corso della prova. I campioni sono immersi in un recipiente, contenente almeno 300 ml d’acqua distillata per ogni provino. In questo caso è di fondamentale importanza che

Università degli Studi di Messina: Salvatore Molino

nessun provino abbia superfici a contatto tra loro e che non siano a contatto con le pareti del recipiente. Dopo l’immersione per 24 ore, si ritirano i provini dall’acqua, si asciugano con un panno pulito e asciutto e si effettua la seconda pesatura. Infine, per ciascun provino si calcola la percentuale di variazione di massa, c , relativa alla massa iniziale, usando la formula:

$$c = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \%$$

Dove: m_1 = è la massa del provino, in milligrammi, dopo l’essiccamento iniziale e prima dell’immersione

m_2 = è la massa del provino, in milligrammi, dopo l’immersione in acqua distillata

Affinché la prova vada a buon fine è necessario che l’assorbimento d’acqua dei vari provini sia inferiore all’ 1%. I risultati vengono mostrati in Tabella 19.

Tabella 19 - Riepilogo prove di assorbimento termoplastici

ASSORBIMENTO ASTM D570	U.M.	Prov. 1	Prov. 2	Prov. 3
Noryl SE1GFN2				
Peso provino (prima)	g	56,62	58,32	59,82
Peso provino (dopo)	g	56,66	58,34	59,84
% assorbimento	%	0,06	0,04	0,04
Assorbimento	%	OK	OK	OK
Lexan 3412R				
Peso provino (prima)	g	62,69	66,25	63,06
Peso provino (dopo)	g	62,75	66,31	63,11
% assorbimento	%	0,09	0,09	0,08
Assorbimento	%	OK	OK	OK

2.11 Prova di resistività volumetrica

Per effettuare le prove di resistività volumetrica sui materiali termoplastici viene adoperata la normativa UNI 4288. I provini sottoposti alla prova sono il Noryl SE1GFN2 e il Lexan 3213R. La resistività volumetrica, espressa in ohm*cm, è stata determinata secondo la seguente formula:

$$\alpha = \frac{A}{h} \cdot R$$

In Tabella 20 sono stati mostrati i valori delle prove di resistività volumetrica.

Tabella 20 - Riepilogo prove di resistività volumetrica termoplastici

RESISTIVITA' VOLUME UNI 4288	U.M.	Prov. 1	Prov. 2	Prov. 3
Noryl SE1GFN2				
A (area)	mm ²	5.150,39	5.150,39	5.150,39
R (resistenza)	ohm	5,00E+15	4,00E+15	4,00E+15
h (spessore provino)	mm	3,00	3,00	3,00
α (Resistività)	ohm*cm	8,58398E+18	6,86718E+18	6,86718E+18
Lexan 3412R				
A (area)	mm ²	5.150,39	5.150,39	5.150,39
R (resistenza)	ohm	1,50E+14	3,00E+14	2,50E+14
h (spessore provino)	mm	3,00	3,00	3,00
α (Resistività)	ohm*cm	2,57519E+17	5,15039E+17	4,29199E+17

2.12 Prova di autoestinguenza

Ultimo test sperimentale fatto sui materiali termoplastici è il test di autoestinguenza eseguito secondo la normativa ASTM 635-97. La normativa prevedeva la realizzazione di 3 provini di lunghezza 125 ± 5 mm per una larghezza di $12,5 \pm 0,2$ mm con spessore di circa $3 \pm 0,5$ mm. La prova viene eseguita nel seguente modo: 1) stringere il provino ad una delle due estremità, in un supporto con l’asse longitudinale orizzontale e l’asse trasversale inclinato di 45° sull’orizzontale. Poiché tali materiali possono fondere, porre una bacinella d’acqua sotto il provino in modo tale da raccogliere eventuali particelle brucianti che possono cadere durante la prova; 2) regolare il bruciatore con le prese d’aria aperte per produrre una fiamma alta di circa 25 mm; 3) porre il bruciatore in modo che la fiamma tocchi l’estremità del provino facendo contemporaneamente partire il contasecondi; 4) rimuovere il bruciatore dopo 30 secondi e porre il bruciatore alla distanza di 450 mm dal provino e chiudere la cappa; 5) rimosso il bruciatore segnare con il contasecondi quando la fiamma raggiunge si estingue in modo tale da poter calcolare il tempo medio di combustione (ATB). Secondo normativa è necessario che il tempo di autoestinguenza del provino non superi i 100 secondi.

Ricavato il tempo di autoestinguenza per almeno 5 provini, si va adesso a calcolare il tempo medio di combustione dalla seguente formula:

$$ATB = \frac{\sum(t - 30 \text{ secondi})}{N^\circ \text{ provini}}$$

In Figura 60 viene mostrata la procedura di prova.

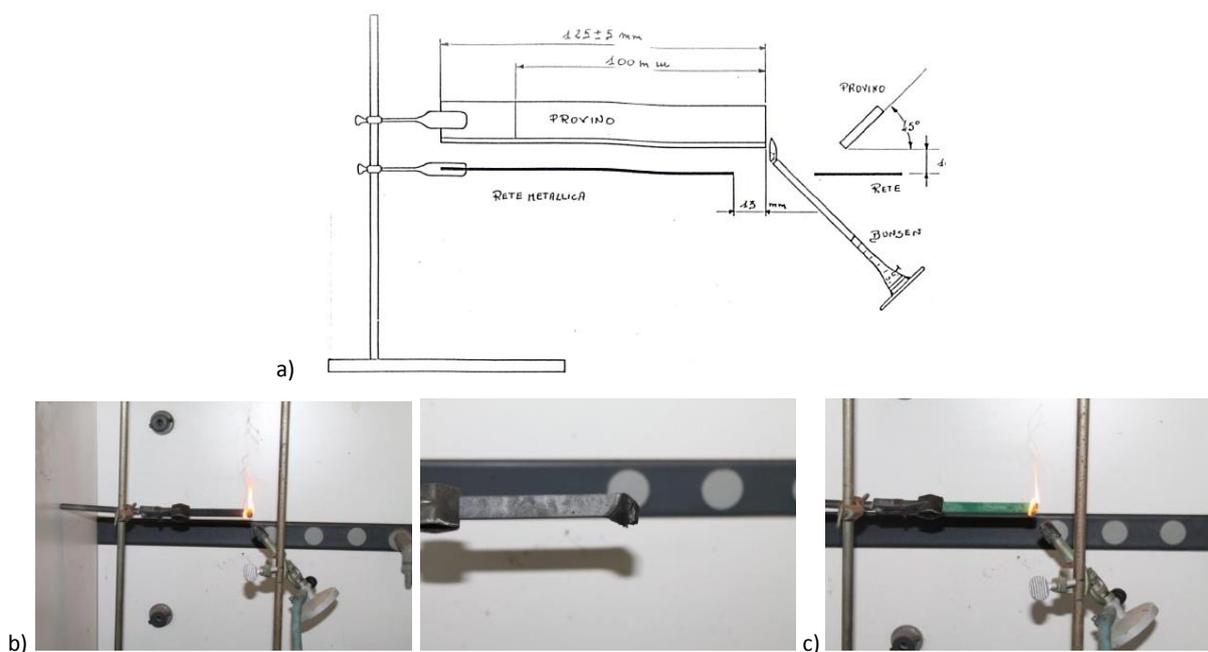


Figura 60 – a) descrizione prova; b) prova sul Noril SE1GFN2; c) prova sul Lexan 3412R

In Tabella 21 sono stati mostrati i valori delle prove di autoestinguenza.

Tabella 21 – Riepilogo prove di autoestinguenza

ASTM 635-97	U.M.	Prov. 1	Prov. 2	Prov. 3
Noryl SE1GFN2				
Tempo di spegnimento	s	52	58	49
Lexan 3412R				
Tempo di spegnimento	s	41	39	45

PROVE SPERIMENTALI: MATERIALI TERMOINDURENTI

In questa parte di tesi vengono riportate le varie prove sperimentali che sono state effettuate con i materiali termoindurenti e nello specifico: gli stampati a compressione SMC; i pultrusi lavorati con le resine poliestere ortoftalica e isoftalica; i centrifugati.

2.13 Prova di trazione stampati – pultrusi – centrifugati

2.13.1 Dimensioni provini e valutazione parametri di prova

Per effettuare le prove sono stati utilizzate le seguenti attrezzature: 1) un dinamometro, con il quale veniva registrato punto per punto la forza applicata al provino; 2) la tecnica DIC, che ha permesso di calcolare i valori degli spostamenti e delle deformazioni rispetto all’applicazione del carico; 3) la tecnica termografica con la quale è stato possibile registrare i valori delle variazioni termiche.

Per ricavare i valori delle deformazioni si utilizza la tecnica DIC, evitando di utilizzare i classici estensometri, perché la rottura a cui vanno incontro tali materiali è una rottura fragile che avviene di schianto e per tale motivo se non si arresta la prova al momento giusto l’estensometro potrebbe anche danneggiarsi. Con la tecnica DIC invece, essendo una tecnica di non contatto, questa problematica viene superata garantendoci comunque una buona precisione nella valutazione delle deformazioni agenti sul provino. Tramite il software Aramis è stato possibile calcolare le deformazioni sui due assi di riferimento considerando sei punti lungo la superficie del provino:

- asse trasversale all’asse di prova
- asse longitudinale all’asse di prova

Per ricavare i valori della variazione termica agente sul provino sono state create tre aree (superiore-centrale-inferiore). Successivamente nel grafico $\sigma - t - \Delta T$ si plotta solo i valori di variazione termica ricavati nell’area maggiormente riscaldata, poiché risulterà essere la zona di futura rottura del provino. La prova, realizzata secondo la normativa UNI EN 61, consentiva di realizzare provini di forma rettangolare. Le dimensioni dei provini e i parametri di prova sono riportati in Tabella 22.

Tabella 22 - Dimensioni campioni e parametri di prova

UNI EN 61	b	l	L	v
U.M.	[mm]	[mm]	[mm]	[mm/min]
parametri	25	250	170	2

La prova viene effettuata applicando una velocità di 2 mm/min. La tensione massima a rottura, espressa in MPa, è stata determinata secondo la seguente formula:

$$\sigma_{trazione} = \frac{P_t}{b * h}$$

Dove: P_t è il carico massimo, [N]

b è la larghezza media del campione [mm]

h è lo spessore medio del campione [mm]

Per effettuare la prova di trazione sui materiali stampati e pultrusi si utilizza un sistema di ammortaggio semplice con delle piastrine zigrinate, mentre per i materiali centrifugati, a causa della loro superficie, sono state utilizzate delle morse a cuneo autostringenti che avevano la funzione di mantenere sempre in presa il provino durante la prova, evitandogli quindi qualsiasi tipo di scivolamento. Le morse sono mostrate in (Figura 61).



Figura 61 – Prova di trazione centrifugati: campione in prova

2.13.2 Analisi dei risultati stampati a compressione SMC

Gli stampati a compressione sono costituiti da: 1) resina poliestere ortoftalica; 2) fibra di vetro tipo E tagliata ad una lunghezza di 25 mm e gettata in modo casuale; 3) cariche inerti che hanno la funzione di riempitivo. In Tabella 23 sono riportate le quantità in volume e in peso dei costituenti l’SMC indagata.

Tabella 23 - Percentuale in volume e peso di fibra e matrice

Frazioni componenti	Vetro tipo E	Resina >UP<	CaCO ₃	Additivi
Volume – (Peso)	14% - (20%)	60% - (41%)	24% - (37%)	2% - (2%)

Dalla Figura 62 si nota come il materiale risulta avere un comportamento essenzialmente fragile e mancante completamente di plasticità in quanto, raggiunto il carico massimo, il provino non è più in grado di poter sopportare altri incrementi di tensione rompendosi di schianto con cedimento di tutte le fibre facenti parte il provino in prova. Nello specifico dal grafico si nota come lo spostamento della traversa è di circa 1,5 mm.

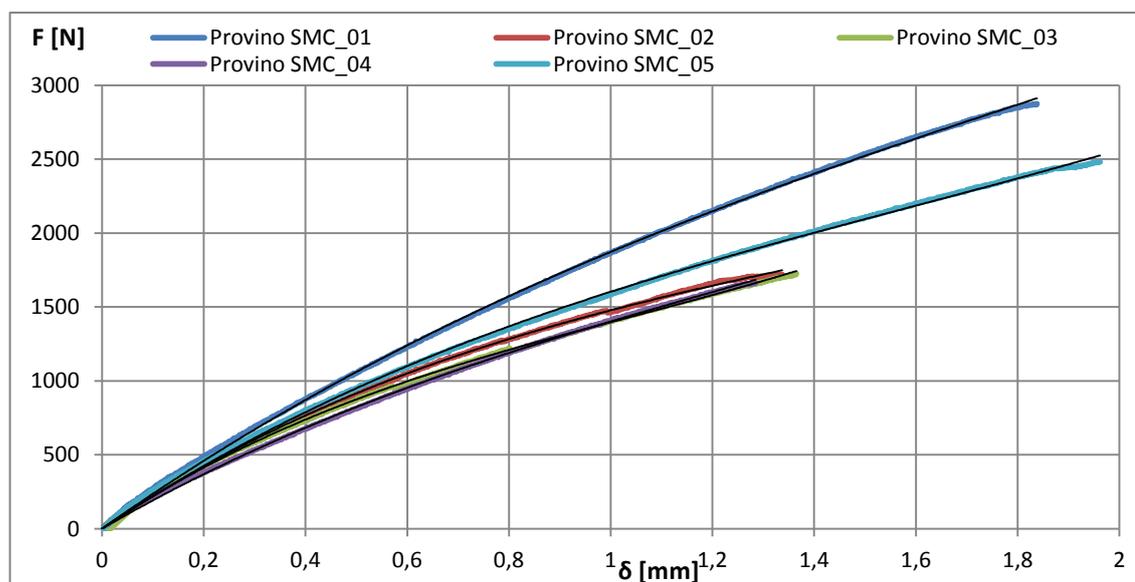


Figura 62 – Trazione provini stampati SMC: Carico – Spostamento Y

Tramite la *Digital Image Correlation* è stato possibile ricavare i valori di deformazione longitudinale (ϵ_y di circa 0,95 %) e trasversale (ϵ_x di circa -0,25%) lungo l’asse di prova (Figura 63). In Figura 64 sono riportate alcune immagini relative alla deformazione longitudinale agente sul provino.

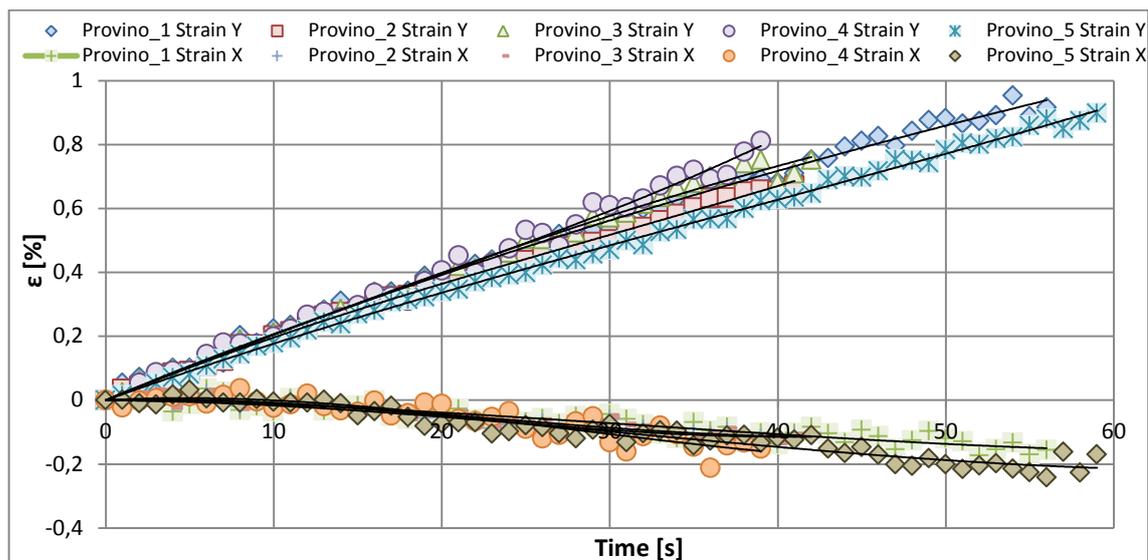


Figura 63 - Trazione provini stampati SMC: Y Strain – X Strain – Time

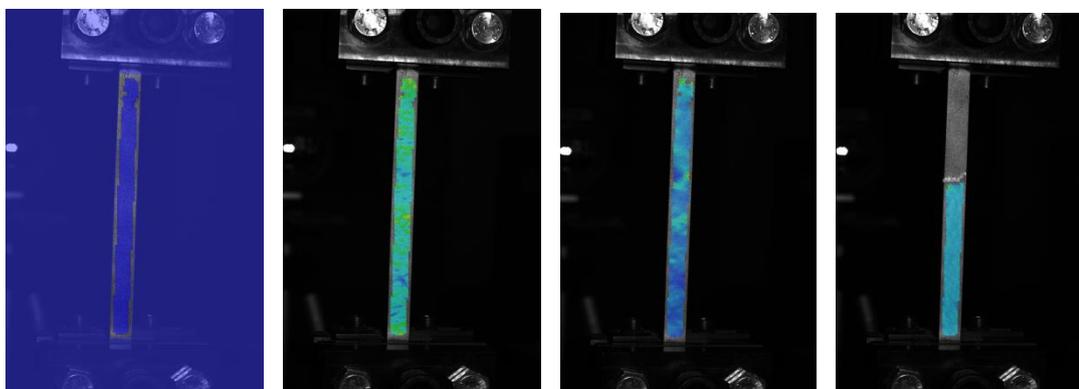


Figura 64 - Provino stampato SMC: Strain Y

È stata fatta un’analisi termografica, ma non è stato possibile apprezzare una rilevante variazione termica a causa dell’estrema fragilità del materiale analizzato. Qui in Figura 65 sono rappresentate le curve ingegneristiche $\sigma - \epsilon$ del materiale.

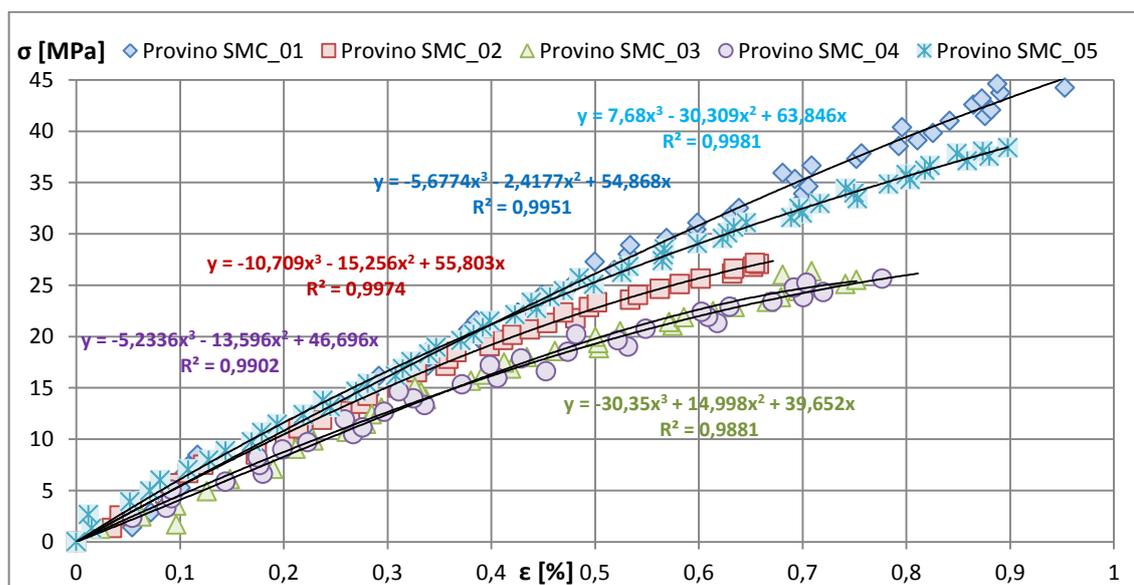


Figura 65 – Trazione provini stampati SMC: Grafico riassuntivo Stress – Strain

Come si può notare dai dati sperimentali, per tale materiale si ha una grande dispersione di dati e ciò è dovuto al fatto che i provini sono stati ricavati sul semilavorato finito e dal fatto ancor più importante che il materiale analizzato è costituito da fibre di vetro corte disposte in modo random e pertanto non si ha un’uniforme distribuzione delle fibre all’interno dello stampo. In Tabella 24 si mettono in risalto i valori riscontrati su di ogni prova.

Tabella 24 - Prove di trazione provini stampati SMC

TRAZIONE UNI EN 61	h (spessore)	b (largh.)	P _{max} (carico a rot.)	δ (Spost. traversa)	σ max	ε _y max	ε _y max	E max
U.M.	[mm]	[mm]	[N]	[mm]	[MPa]	[%]	[%]	[MPa]
Prov. 1	5,08	12,62	2875	1,84	45	0,94	-0,17	6190
Prov. 2	5,01	12,59	1722	1,34	27	0,49	-0,13	7563
Prov. 3	5,01	12,95	1739	1,36	27	0,78	-0,17	5345
Prov. 4	5,08	12,63	1665	1,28	26	0,81	-0,15	4845
Prov. 5	5,08	12,68	2480	1,96	39	0,9	-0,16	5890
Media	5,05	12,70	2097	1,55	33	0,77	-0,15	5966
Dev.St.	0,03	16,94	491,40	0,28	7,76	0,16	0,02	921

2.13.3 Analisi dei risultati pultrusi ortoftalici

I provini pultrusi ortoftalici sono costituiti da: 1) resina poliestere ortoftalica; 2) fibra di vetro tipo E di roving e in forma di MAT; 3) cariche inerti che hanno la funzione di riempitivo. In Tabella 27 sono riportate le quantità in volume e in peso dei costituenti i materiali pultrusi indagati.

Tabella 25 - Percentuale in volume e peso di fibra e matrice

Frazioni componenti	Vetro tipo E	Resina >UP<	CaCO ₃	Additivi
Volume – (Peso)	39% - (50%)	41% - (24%)	18% - (24%)	2% - (2%)

Dalla Figura 66 si nota come il materiale risulta avere un comportamento essenzialmente fragile e mancante completamente di plasticità in quanto, raggiunto il carico massimo, il provino non è più in grado di poter sopportare altri incrementi di tensione rompendosi di schianto con cedimento di tutte le fibre facenti parte il provino in prova. Nello specifico dal grafico si nota come lo spostamento della traversa è di circa 3,5 mm.

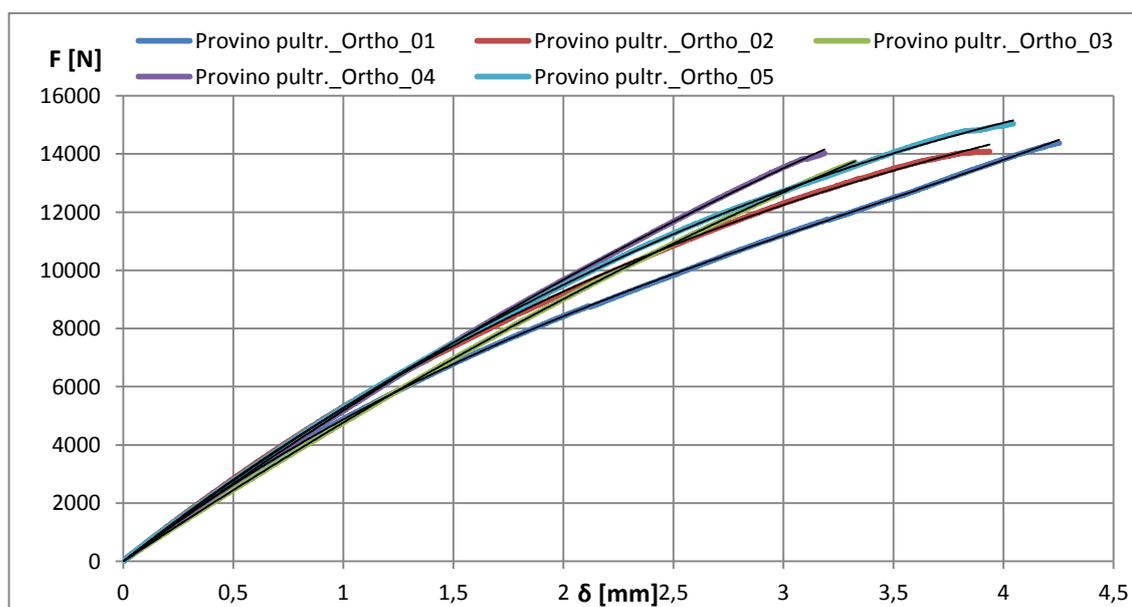


Figura 66 – Trazione provini pultrusi ortoftalici: Carico – Spostamento Y

Tramite la *Digital Image Correlation* è stato possibile ricavare i valori di deformazione longitudinale (ϵ_y di circa 1,59 %) e trasversale (ϵ_x di circa -0,51%) lungo l’asse di prova (Figura 68). In Figura 67 sono riportate alcune immagini relative alla deformazione longitudinale agente sul provino.

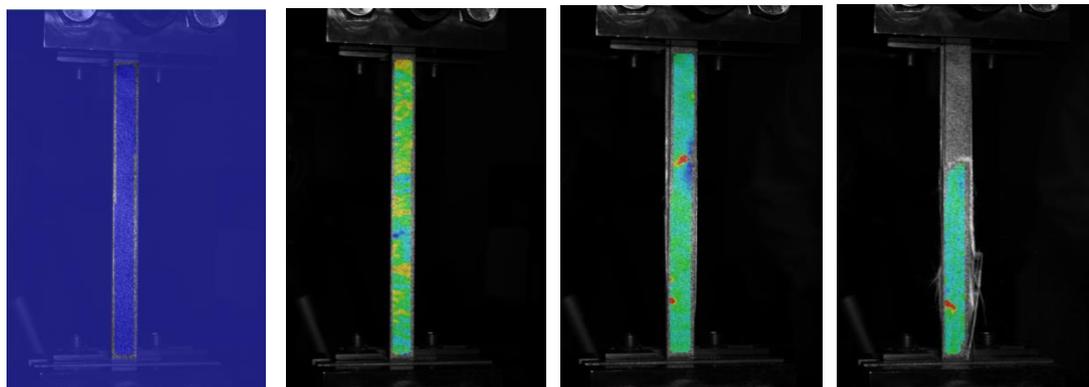


Figura 67 – Provino pultruso ortoftalico: Strain Y

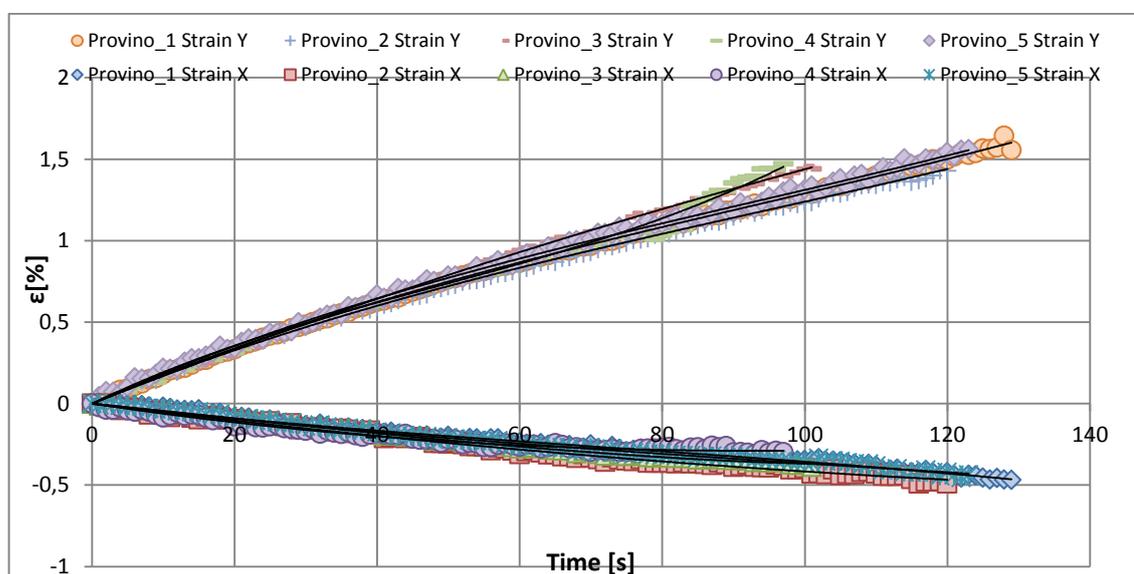


Figura 68 - Trazione provini pultrusi ortoftalici: Y Strain – X Strain – Time

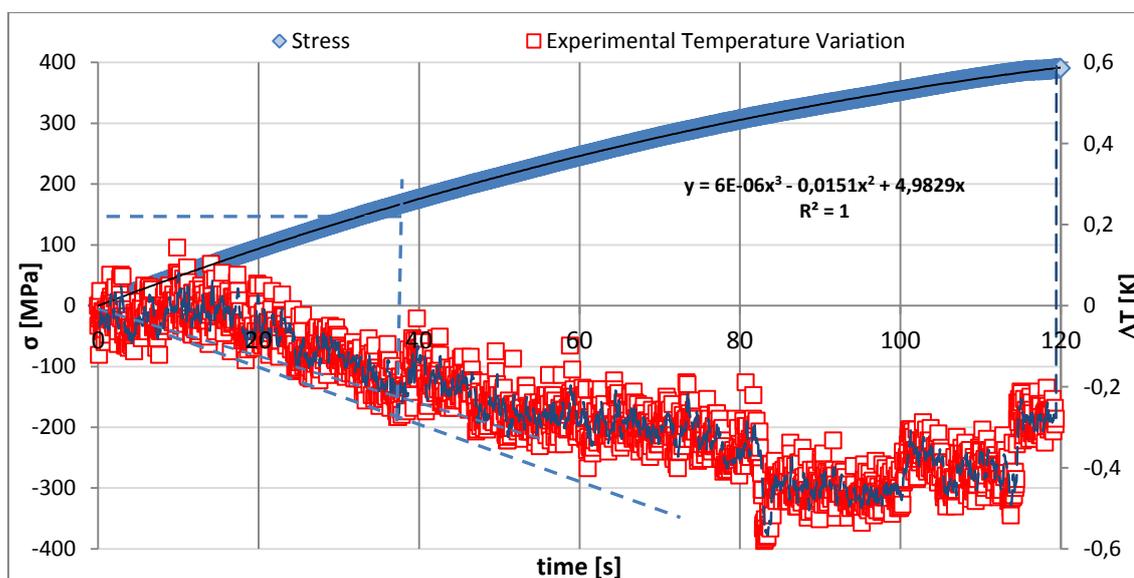


Figura 69 – Trazione provino pultruso ortoftalico: Curva tensione - tempo – temperatura

In Figura 69 si nota come il provino in fibra di vetro e resina poliestere sottoposto a trazione subisce prima un raffreddamento con gradiente termico massimo che si aggira attorno a 0,6 K per poi rompersi di schianto quando il provino non è più in grado di assorbire ulteriori incrementi di carico. I valori di tensione e temperatura sono correlati tra loro dalla variabile tempo che correla quindi i risultati della macchina con i dati della termocamera. Dall’andamento termico si nota come il provino inizia a subire un cedimento delle fibre una volta raggiunta una tensione di circa 175 MPa e ciò si può distintamente notare dal fatto che la pendenza della curva termica cambia, una volta raggiunta tale tensione di primo cedimento.

In Figura 70 sono rappresentate le curve ingegneristiche $\sigma - \epsilon$ notando come per tutte le prove effettuate si sono riscontrati dei valori analoghi di tensione a rottura, deformazione a rottura e modulo di rigidità.

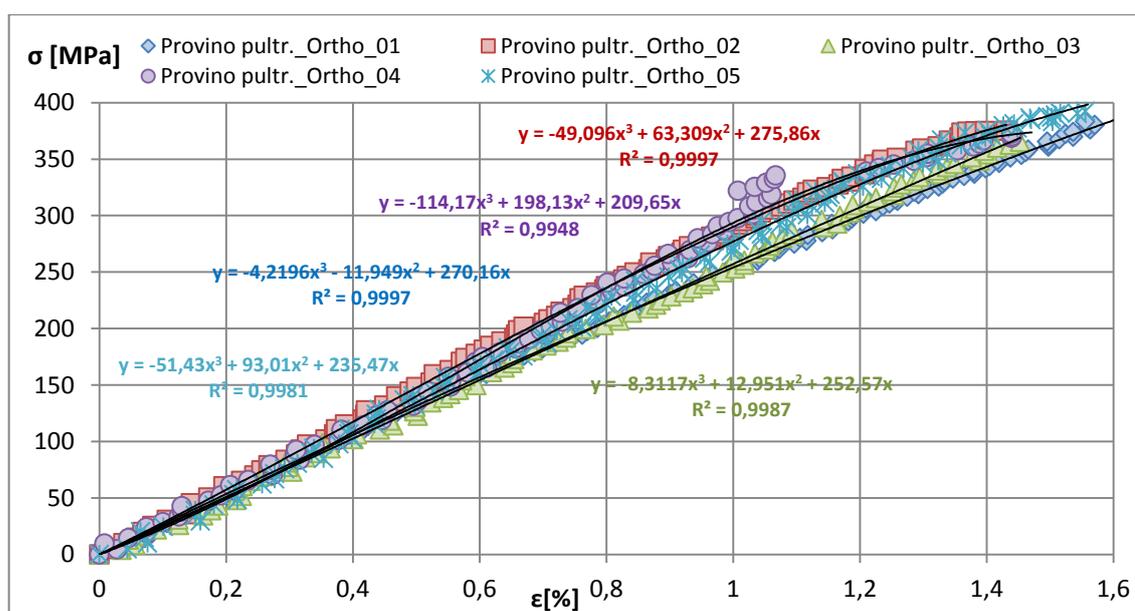


Figura 70 – Trazione provini pultrusi ortoftalici: Grafico riassuntivo Stress – Strain

In Tabella 26 si mettono in risalto i valori riscontrati su di ogni prova.

Tabella 26 - Prove di trazione provini pultrusi ortoftalici

TRAZIONE UNI EN 61	h (spessore)	b (largh.)	Pmax (carico a rot.)	δ (Spost. traversa)	σ max	ϵ_y max	ϵ_y max	E max
U.M.	[mm]	[mm]	[N]	[mm]	[MPa]	[%]	[%]	[MPa]
Prov. 1	3	12,50	14387	4,25	383	1,59	-0,41	25465
Prov. 2	3	12,50	14106	3,95	376	1,42	-0,51	29595
Prov. 3	3	12,45	13724	3,32	367	1,43	-0,4	24050
Prov. 4	3	12,50	14025	3,13	374	1,47	-0,29	27495
Prov. 5	3	12,75	15048	4,12	393	1,56	-0,29	24327
Media	3	12,54	14253	3,69	378	1,49	-0,39	26186
Dev.St.	0,00	0,11	447,95	0,45	8,83	0,07	0,08	2091,55

2.13.4 Analisi dei risultati pultrusi isoftalici

I provini pultrusi isoftalici sono costituiti da: 1) resina poliestere isoftalica; 2) fibra di vetro tipo E di roving e in forma di MAT; 3) cariche inerti che hanno la funzione di riempitivo. In Tabella 27 sono riportate le quantità in volume e in peso dei costituenti i materiali pultrusi indagati.

Tabella 27 - Percentuale in volume e peso di fibra e matrice

Frazioni componenti	Vetro tipo E	Resina >UP<	CaCO ₃	Additivi
Volume – (Peso)	39% - (50%)	42% - (25%)	19% - (25%)	2% - (2%)

Dalla Figura 71 si nota come il materiale risulta avere un comportamento essenzialmente fragile e mancante completamente di plasticità in quanto, raggiunto il carico massimo, il provino non è più in grado di poter sopportare altri incrementi di tensione rompendosi di schianto con cedimento di tutte le fibre facenti parte il provino in prova. Nello specifico dal grafico si nota come lo spostamento della traversa è di circa 4 mm. Tramite la *Digital Image Correlation* è stato possibile ricavare i valori di deformazione longitudinale (ϵ_y di circa 1,93 %) e trasversale (ϵ_x di circa -0,52%) lungo l’asse di prova (Figura 72). In Figura 73 sono riportate alcune immagini relative alla deformazione longitudinale agente sul provino.

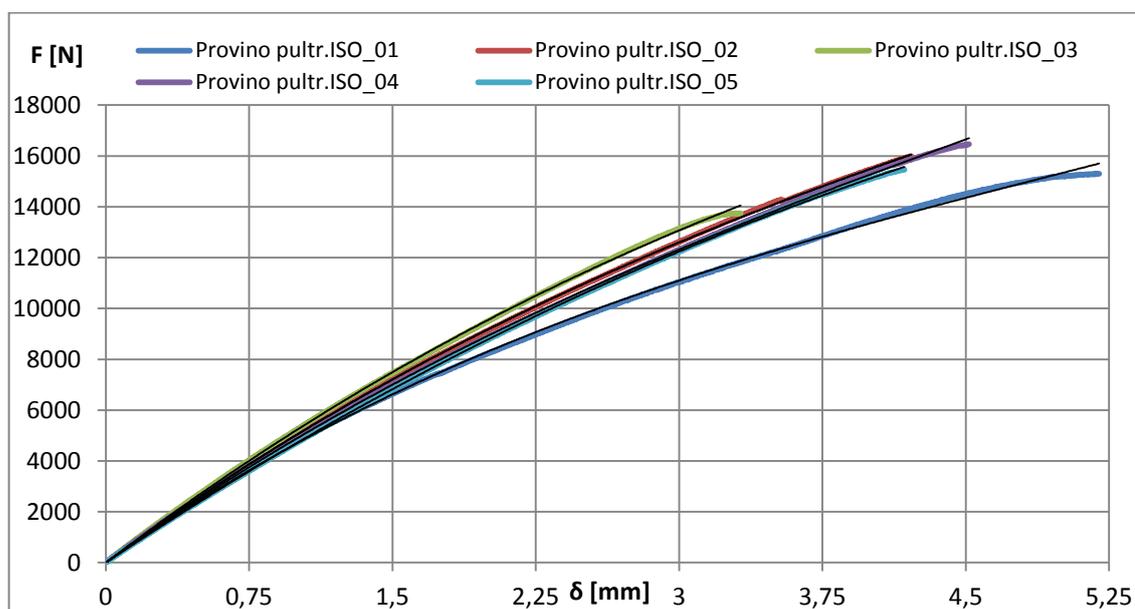


Figura 71 – Trazione provini pultrusi isoftalici: Carico – Spostamento Y

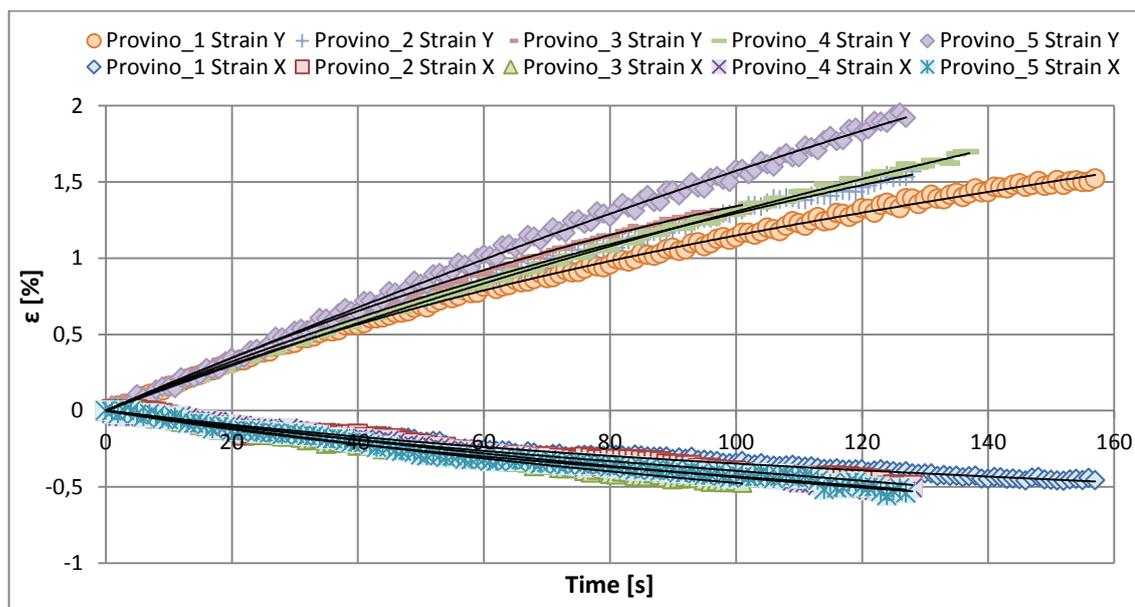


Figura 72 - Trazione provini pultrusi isoftalici: Y Strain – X Strain – Time

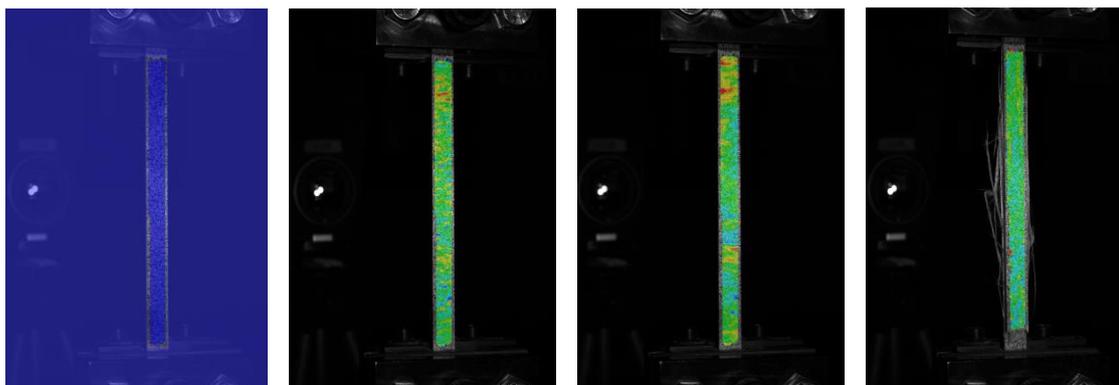


Figura 73 - Provino pultruso isoftalico: Strain Y

L’andamento termico dei materiali pultrusi con resina isoftalica è analogo al caso precedente. In Figura 74 sono rappresentate le curve ingegneristiche $\sigma - \epsilon$ notando come per tutte le prove effettuate si sono riscontrati dei valori analoghi di tensione a rottura, deformazione a rottura e modulo di rigidità.

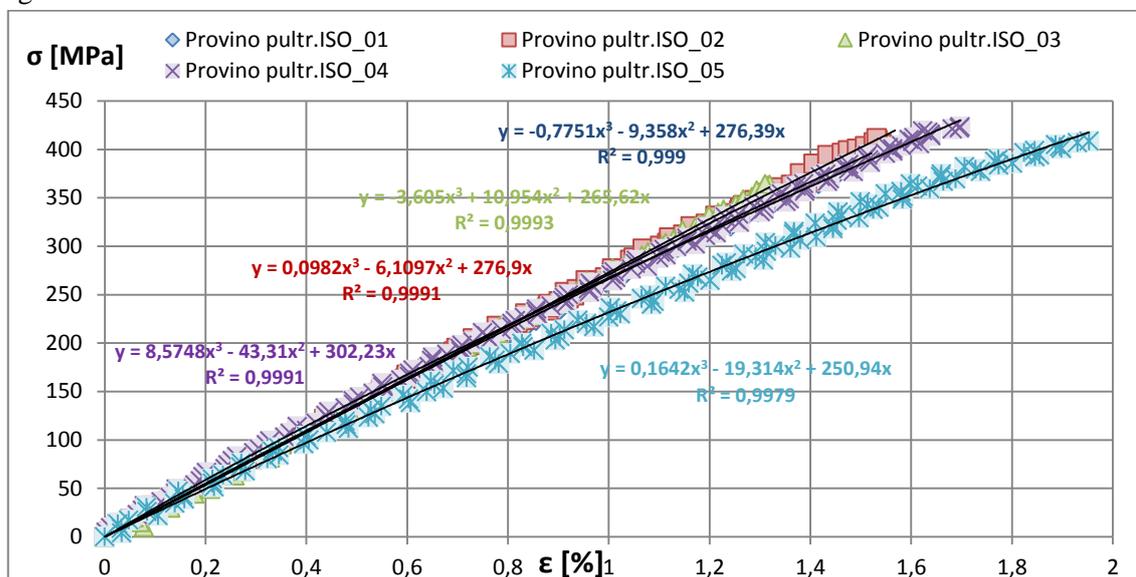


Figura 74 – Trazione provini pultrusi isoftalici: Grafico riassuntivo Stress – Strain

Le prove effettuate utilizzando una resina isoftalica mostrano come si abbiano analoghi valori di deformazione e una tensione leggermente superiore rispetto ai provini con resina ortoftalica analizzati precedentemente.

In Tabella 28 si mettono in risalto i valori riscontrati su di ogni prova.

Tabella 28 - Prove di trazione provini pultrusi isoftalici

TRAZIONE UNI EN 61	h (spessore)	b (largh.)	Pmax (carico a rot.)	δ (Spost. traversa)	σ max	ϵ y max	ϵ y max	E max
U.M.	[mm]	[mm]	[N]	[mm]	[MPa]	[%]	[%]	[MPa]
Prov. 1	3	12,95	15307	5,19	394	1,52	-0,45	28295
Prov. 2	3,1	12,50	15995	4,21	413	1,57	-0,48	27880
Prov. 3	3,04	12,43	13749	3,32	364	1,32	-0,47	27809
Prov. 4	3,04	12,80	16465	4,51	423	1,70	-0,5	29849
Prov. 5	3,02	12,51	15468	4,17	409	1,92	-0,54	26461
Media	3,04	12,63	15395	4,28	400	1,61	-0,48	28058
Dev.St.	0,03	0,20	919,49	0,60	20,54	0,20	0,03	1087,01

Definite le proprietà a trazione di stampati e pultrusi si effettua adesso una caratterizzazione meccanica completa del problema di nostro interesse, ovvero i pali in vetroresina centrifugati.

2.13.5 Analisi dei risultati centrifugati

I centrifugati sono costituiti da: 1) rinforzo sottoforma di stuoia di vetro con una composizione di 70% di fibre unidirezionali e un 30% di fibre gettate in modo random; 2) resina poliesteri. Le caratteristiche meccaniche e le percentuali dei principali costituenti sono riportate nelle tabelle sottostanti. In Tabella 29 sono riportate le quantità in volume e in peso dei costituenti i centrifugati.

Tabella 29 - Percentuali in volume e peso di fibra e matrice

Frazione componenti	Vetro tipo E	Resina >UP<
Volume - (Peso)	32% - (50%)	68% - (50%)

Per realizzare le prove di trazione dei materiali centrifugati, poiché il palo è troncoconico, i provini vengono prelevati necessariamente dalla base del palo, dove l’effetto di curvatura sul provino è minima. Successivamente tagliati tali provini mediante seghe diamantate, vengono spianati in modo da eliminare la curvatura. Questa risulta essere una fase molto delicata, in quanto il processo di spianatura del provino non deve influenzare i dati ottenuti alla fine della prova. Affinché i provini abbiano una curvatura minima, essi vengono prelevati lungo l’asse del palo.

Dalla Figura 75 si nota come il materiale risulta avere un comportamento essenzialmente fragile e mancante completamente di plasticità in quanto, raggiunto il carico massimo, il provino non è più in grado di poter sopportare altri incrementi di tensione rompendosi di schianto con cedimento di tutte le fibre facenti parte il provino in prova. Nello specifico dal grafico si nota come lo spostamento della traversa è di circa 3,25 mm.

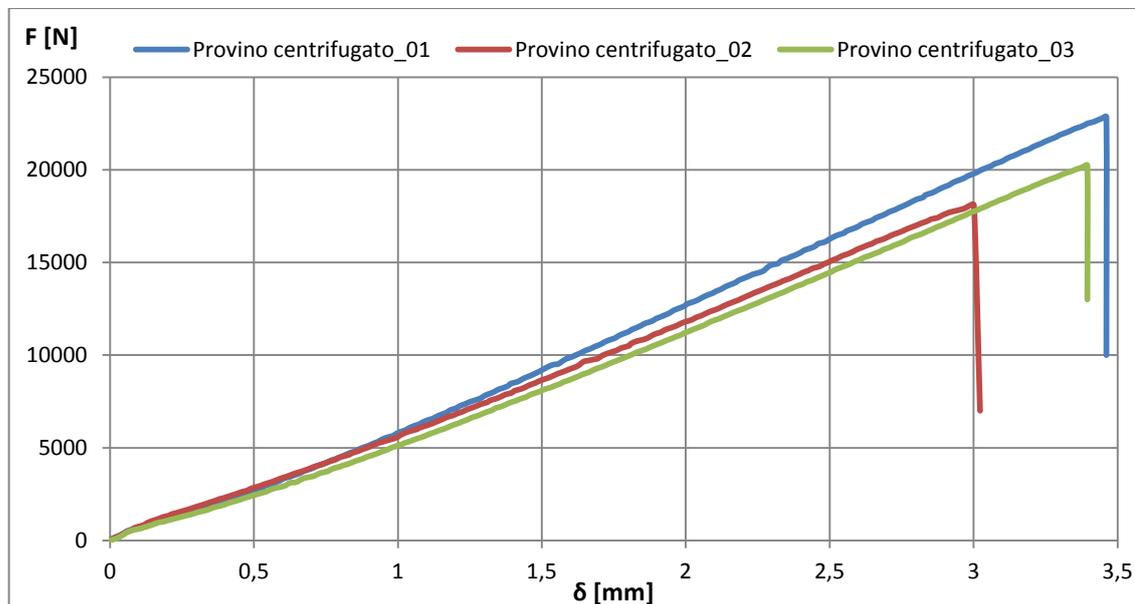


Figura 75 – Trazione centrifugati: Carico – Spostamento Y

Tramite la *Digital Image Correlation* è stato possibile ricavare i valori di deformazione longitudinale (ϵ_y di circa 1,75 %) e trasversale (ϵ_x di circa -0,75%) lungo l’asse di prova (Figura 76). In Figura 77 e Figura 78 sono riportate alcune immagini relative alla deformazione longitudinale e trasversale agente sul provino.

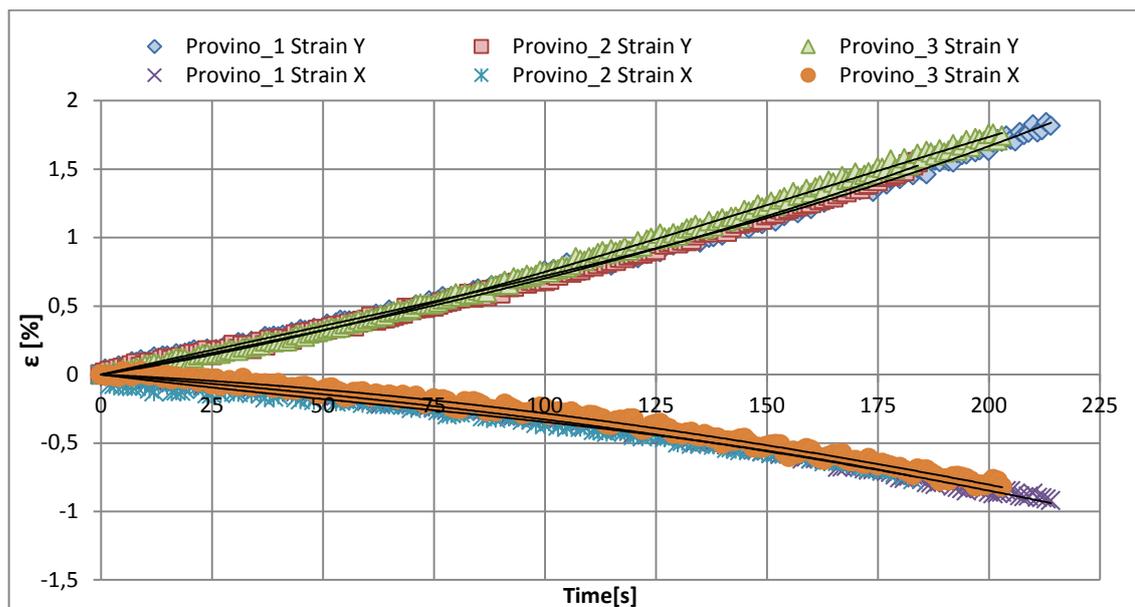


Figura 76 - Trazione centrifugati: Y Strain – X Strain – Time

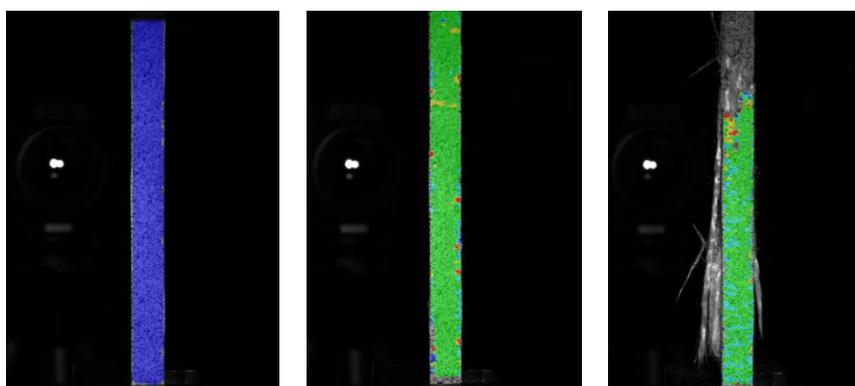


Figura 77 – Provino centrifugati: Strain Y

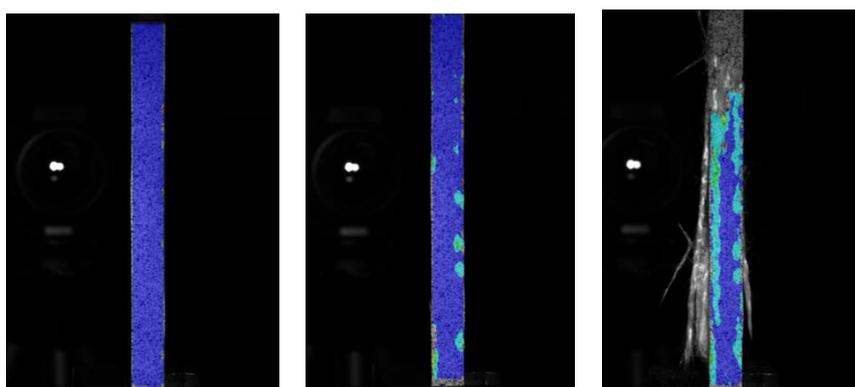


Figura 78 – Provino centrifugati: Strain X

In Figura 79 si nota come il provino in fibra di vetro e resina poliesteri sottoposto a trazione subisce prima un raffreddamento con gradiente termico massimo che si aggira attorno a 0,8 K per poi rompersi di schianto quando il provino non è più in grado di assorbire ulteriori incrementi di carico. I valori di tensione e temperatura sono correlati tra loro dalla variabile tempo che correla quindi i risultati della macchina con i dati della termocamera. Dall’andamento termico si nota come il provino inizia a subire un cedimento delle fibre una volta raggiunta una tensione di circa 180 MPa e ciò si può distintamente notare dal fatto che la pendenza della curva termica cambia, una volta raggiunta tale tensione di primo cedimento. In Figura 80 vengono rappresentate alcune immagini termiche del provino in esame.

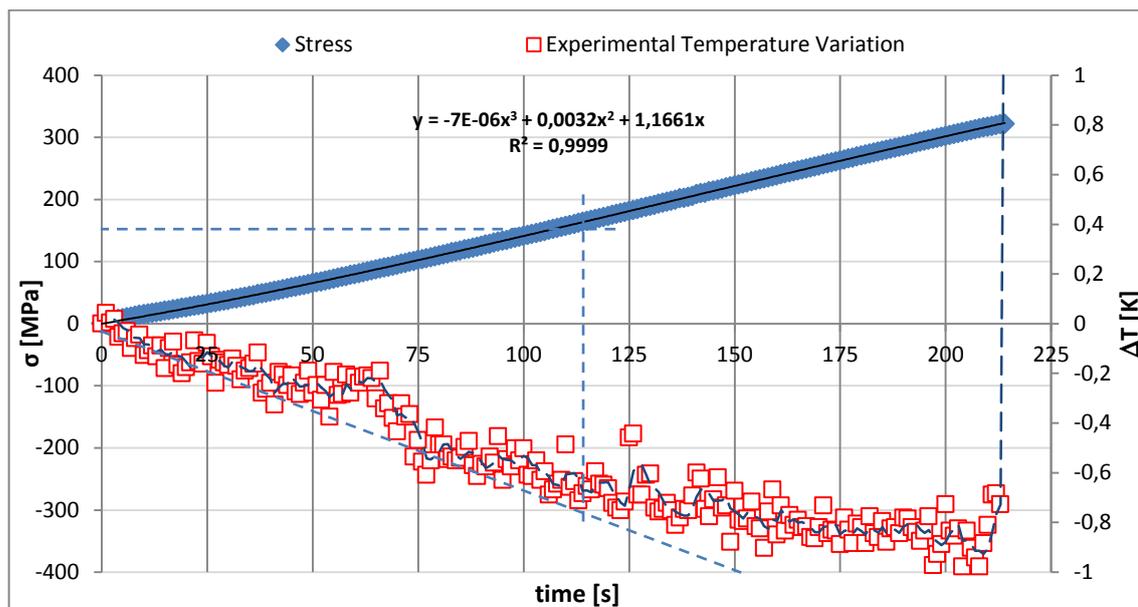


Figura 79 – Trazione centrifugati: Curva tensione - tempo – temperatura

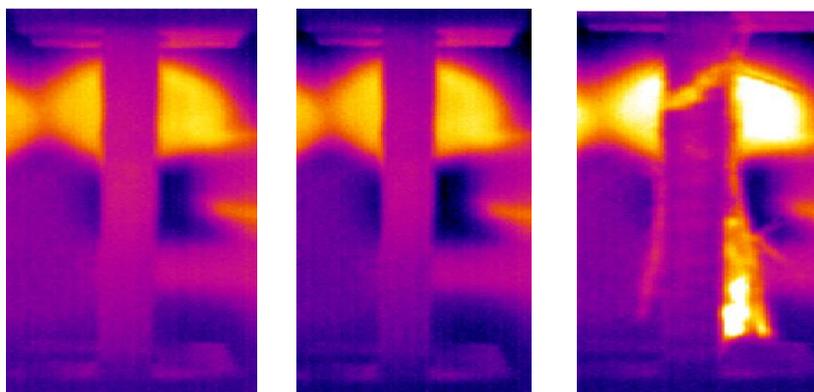


Figura 80 - Provino centrifugati: Immagini termografiche

In Figura 81 sono rappresentate le curve ingegneristiche $\sigma - \epsilon$ notando come per tutte le prove effettuate si sono riscontrati dei valori analoghi di tensione a rottura, deformazione a rottura e modulo di rigidità.

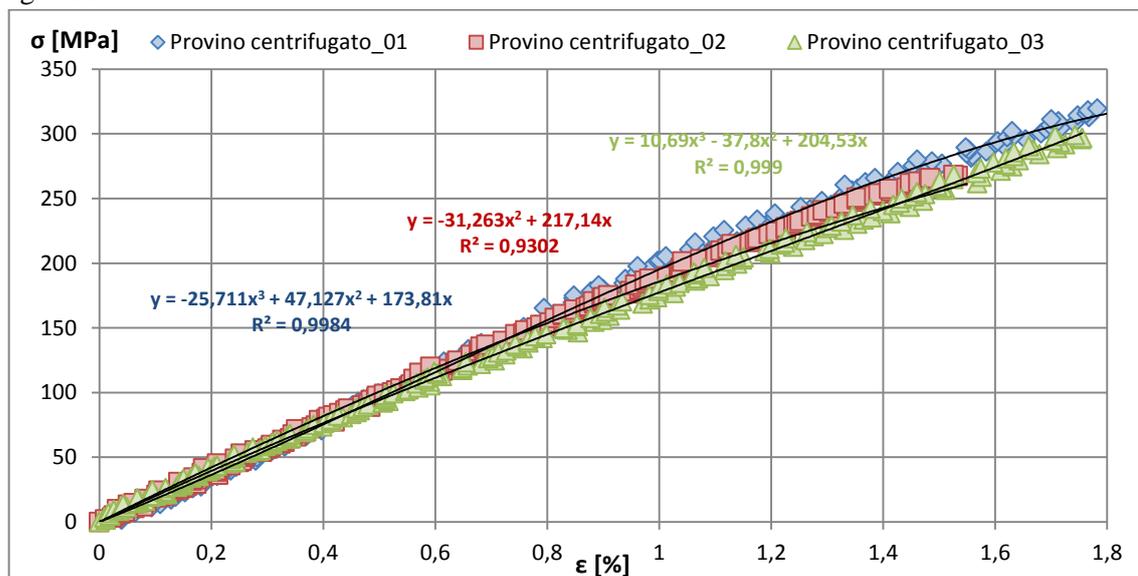


Figura 81 – Trazione centrifugati: Grafico riassuntivo Stress – Strain

In Tabella 30 si mettono in risalto i valori riscontrati su di ogni prova.

Tabella 30 - Prove di trazione centrifugati

TRAZIONE UNI EN 61	h (spessore)	b (largh.)	Pmax (carico a rot.)	δ (Spost. traversa)	σ_t max	ϵ_y max	ϵ_y max	E max
U.M.	[mm]	[mm]	[N]	[mm]	[MPa]	[%]	[%]	[MPa]
Prov. 1	5,9	12,04	22860	3,46	322	1,81	-0,92	20718
Prov. 2	5,6	12,04	18100	3,00	268	1,55	-0,77	21785
Prov. 3	5,5	12,30	20230	3,39	299	1,74	-0,81	21554
Media	5,75	11,95	20396	3,28	297	1,72	-0,83	21353
Dev.St.	0,21	0,15	2384,37	0,25	27,10	0,13	0,08	561,36

▪ **Analisi dei risultati centrifugati: resistenza agli agenti chimici**

La prova viene eseguita su 3 provini (prelevati alla base del palo) come mostrato in Figura 82. Le superfici tagliate dei provini devono essere ricoperte con resina addizionata dello 0,5% di paraffina. Successivamente i provini saranno + immersi a $23^{\circ} \pm 1^{\circ}C$ nelle seguenti soluzioni in successione:

- 48 ore in acido solforico (ph=3)
- 48 ore in carbonato – bicarbonato di sodio (ph=10)

Al termine del condizionamento, per i 3 provini è stato calcolato il modulo elastico a trazione ammettendo una variazione di 10 % rispetto ai provini non condizionati (in alternativa alla prova di trazione con le stesse considerazioni può essere calcolato il modulo elastico effettuando una prova di flessione). I risultati sono riportati in Tabella 31.



Figura 82 - Prova in nebbia salina

Tabella 31 - Prova in nebbia salina

TRAZIONE UNI EN 61	h (spessore)	Pmax (carico a rottura)	σ_t max	ϵ_y max	E max pre – cond.	E max post – cond.	E Variaz.
U.M.	[mm]	[N]	[MPa]	[%]	[MPa]	[MPa]	[%]
Prov. 1	5,74	20810	285	1,86	20718	20513	0,98
Prov. 2	5,82	19830	303	1,88	21785	21503	1,29
Prov. 3	5,6	21430	303	1,88	21554	20395	5,37
Media	5,72	20690	297	1,87	21352	20803	2,54
Dev.St.	0,09	658,69	8,49	0,01	458,35	496,84	2,00

▪ **Analisi dei risultati centrifugati: resistenza ai raggi UV**

Per effettuare la prova di resistenza ai raggi ultravioletti verranno inizialmente selezionati 3 provini (prelevati alla base del palo). La superficie esterna dei provini sarà sottoposta a radiazione UV per 72 ore (Figura 83).

Dopo l’esposizione dei provini ai raggi UV si effettua la prova di trazione andando a calcolare il modulo elastico a trazione.



Figura 83 - Resistenza ai raggi UV

Alla fine della prova i valori di modulo elastico ricavati non devono variare oltre il 5% rispetto ai valori iniziali. I risultati sono riportati in Tabella 32.

Tabella 32 - Prova con gli anti UV

TRAZIONE UNI EN 61	h (spessore)	Pmax (carico a rottura)	σ_t max	ϵ_y max	E max pre – cond.	E max post – cond.	E Variaz.
U.M.	[mm]	[N]	[MPa]	[%]	[MPa]	[MPa]	[%]
Prov. 1	5,35	20190	314	1,96	20718	21154	2,1
Prov. 2	5,21	22070	330	1,77	21785	22168	1,75
Prov. 3	5,17	20780	332	1,82	21554	20984	2,64
Media	5,24	21013	325	1,85	21352	21435	2,16
Dev.St.	0,08	785,04	8,06	0,08	458,35	522,70	0,37

▪ **Analisi dei risultati centrifugati: Stabilità termica +70°C / -30°C**

Per effettuare la prova di stabilità termica verranno prelevati 10 provini dalla base del palo e verranno sottoposti alla prova di trazione in modo da poter calcolare il modulo elastico a trazione.

- 5 campioni saranno mantenuti per 8 ore alla temperatura di -30°C (Figura 84)
- 5 campioni saranno mantenuti per 8 ore alla temperatura di +70°C (Figura 84)

Al termine i campioni saranno condizionati per 24 ore a temperatura ambiente e successivamente calcolato il modulo a trazione. Non si devono riscontrare differenze superiori al 15% rispetto ai valori dei loro moduli iniziali. I risultati sono riportati in Tabella 35 e Tabella 36.



Figura 84 - Stabilità termica + 70°C



Figura 85 - Stabilità termica -30°C

Tabella 33 - Prova stabilità termica - 30°C

TRAZIONE UNI EN 61	h (spessore)	Pmax (carico a rottura)	σ_t max	ϵ_y max	E max pre – cond.	E max post – cond.	E Variaz.
U.M.	[mm]	[N]	[MPa]	[%]	[MPa]	[MPa]	[%]
Prov. 1	5,95	20356	273	1,76	20718	20369	1,68
Prov. 2	5,85	19848	267	1,81	21785	20642	5,24
Prov. 3	5,73	22428	307	1,89	21554	20274	5,93

Media	5,84	20877	282	1,82	21352	20428	4,28
Dev.St.	0,11	1366,73	21,57	0,07	561,36	191,04	2,28

Tabella 34 - Stabilità termica +70°C

TRAZIONE UNI EN 61	h (spessore)	P _{max} (carico rottura)	σ_t max	ϵ_y max	E max pre – cond.	E max post – cond.	E Variaz.
U.M.	[mm]	[N]	[MPa]	[%]	[MPa]	[MPa]	[%]
Prov. 1	5,83	23190	309	1,87	20718	20496	1,07
Prov. 2	5,95	22157	288	1,94	21785	20195	7,29
Prov. 3	5,74	21364	283	1,83	21554	20412	5,29
Media	5,84	22237	293	1,88	21352	20367	4,55
Dev.St.	0,11	915,62	13,80	0,06	561,36	155,32	3,18

▪ **Comparazione prove di trazione centrifugati**

In Tabella 35 viene fatta una comparazione delle prove di trazione effettuate.

Tabella 35 - Calcolo Variazione % e Dev.Standard prove di trazione

Confronto trazione centrifugati	U.M	Palo	Prova nebbia salina	Prova Anti UV	Prova -30 °C	Prova +70°C
σ	[MPa]	297	286	319	282	293
E	[MPa]	21352	20804	21435	20428	20368
ϵ_y	[%]	1,72	1,87	1,85	1,82	1,88
Variazione σ	[%]	-	3,49	-7,54	4,72	1,01
Variazione E	[%]	-	2,57	-0,39	4,33	4,61
Variazione ϵ_y	[%]	-	-9,13	-7,77	-6,02	-9,51

2.13.6 Confronto a trazione centrifugati – stampati - pultrusi

In questo paragrafo viene fatto un confronto tra le varie prove effettuate cercando di capire quale tecnologia di produzione (centrifugazione, stampaggio o pultrusione) risponde meccanicamente meglio. Si riportano qui di seguito in Tabella 36 tutte le prove di trazione effettuate.

Tabella 36 - Tabella riepilogativa prove di trazione

Numero provino	h spessore)	Pmax (carico rottura)	σt max	εy max	εy max	E max
U.M.	[mm]	[N]	[MPa]	[%]	[%]	[MPa]
Provino centrifugato_01	5,90	22860	322	1,81	-0,92	20718
Provino centrifugato_02	5,60	18100	268	1,55	-0,77	21785
Provino centrifugato_03	5,50	20230	299	1,74	-0,81	21554
Media	5,75	20396	297	1,72	-0,83	21353
Provino SMC_01	5,08	2875	45	0,94	-0,17	6190
Provino SMC_02	5,00	1722	27	0,49	-0,13	7563
Provino SMC_03	5,01	1739	27	0,78	-0,17	5345
Provino SMC_04	5,08	1665	26	0,81	-0,15	4845
Provino SMC_05	5,08	2480	39	0,90	-0,16	5890
Media	5,05	2097	33	0,77	-0,15	5966
Provino pultr.Ortho_01	3,00	14387	383	1,59	-0,41	25465
Provino pultr.Ortho_02	3,00	14106	376	1,42	-0,51	29595
Provino pultr.Ortho_03	3,00	13724	367	1,43	-0,40	24050
Provino pultr.Ortho_04	3,00	14025	374	1,47	-0,29	27495
Provino pultr.Ortho_05	3,00	15048	393	1,56	-0,29	24327
Media	3,00	14253	378	1,49	-0,39	26186
Provino pultr.Iso_01	3,00	15307	394	1,521	-0,45	28295
Provino pultr.Iso_02	3,10	15995	413	1,568	-0,48	27880
Provino pultr.Iso_03	3,04	13749	364	1,319	-0,47	27809
Provino pultr.Iso_04	3,04	16465	423	1,697	-0,50	29849
Provino pultr.Iso_05	3,02	15468	409	1,921	-0,54	26461
Media	3,04	15395	400	1,605	-0,48	28058

In Tabella 36 si nota come tra tutti i materiali testati il materiale che da un punto di vista della trazione risponde meglio è certamente il pultruso in quanto su di esso si riscontrano i valori più elevati sia di tensione a rottura sia di modulo di Young. I profili a sezione costante, prodotti con la tecnologia della pultrusione, vengono utilizzati per la realizzazione delle scale ENEL e pertanto devono avere una certa resistenza per poter sopportare il peso di una persona che la utilizza (Figura 88).

Un valore intermedio viene riscontrato invece per i sostegni per corpi illuminanti, linee telefoniche e trasporto energia realizzati con la tecnologia della centrifugazione. Anche la resistenza dei pali in vetroresina deve essere elevata in quanto questi pali dopo che vengono installati vengono certificati per resistere almeno 20 anni, senza che si presentino sostanziali decadimenti delle caratteristiche meccaniche dovute alle condizioni atmosferiche (Figura 86).

Gli stampati a compressione – SMC – per cabinet TLC e parti automotive sono i materiali compositi che rispondono molto peggio a trazione. La ragione è dovuta al fatto che gli stampati sono realizzati da fogli di SMC costituiti da fibre corte legate ad una resina poliestere che poi vengono disposti casualmente su di uno stampo a compressione. Durante la messa in esercizio della pressa, il punzone schiaccia i fogli di SMC li fa aderire allo stampo. È proprio in questa fase che non si ha la perfetta conoscenza di come l’ SMC si distribuisce all’interno dello stampo e pertanto potrebbero esserci delle zone con una percentuale di fibre superiore e altre con una percentuale inferiore. Ecco spiegato anche il motivo per cui le prove di trazione sugli stampati presentavano delle caratteristiche meccaniche differenti da campione a campione (Figura 87).



Figura 86 - Provini centrifugati



Figura 87 - Provini stampati



Figura 88 - Provini pultrusi

2.14 Prova di compressione centrifugati

La resistenza a compressione di un composito è fortemente condizionata dal fenomeno del buckling localizzato delle fibre. Le singole fibre, sotto l’azione del carico di compressione, sono soggette a buckling, anche se il fenomeno è limitato dalla presenza della matrice, generando una serie di deformate energeticamente in equilibrio.

Il calcolo del carico massimo a compressione, essendo le fibre particolarmente "snelle", si effettua utilizzando i metodi tipici del buckling.

Il fenomeno del buckling si manifesta in due modi tipici, “Extension Mode” e “Shear Mode”, come mostrato in Figura 89.

La differenza del comportamento tra trazione e compressione diventa significativa nel caso di fibre unidirezionali, mentre si riduce fino ad annullarsi nel caso di tessuti trama orditi o con direzione random.

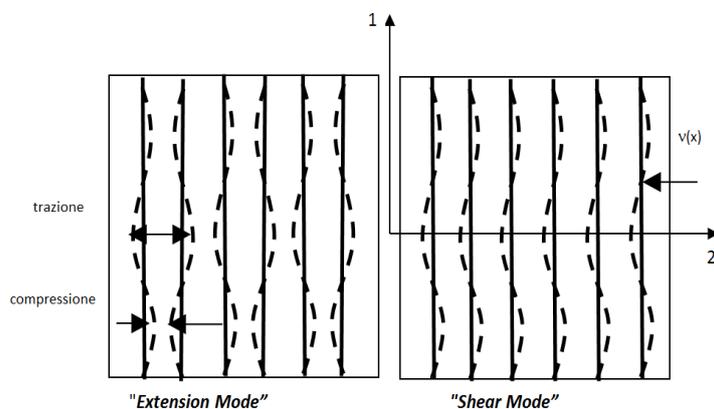


Figura 89 - Extension Mode e Shear Mode

Nel caso del "extension mode", le deformate sono ipotizzate in controfase; nello "shear mode", invece, le deformate sono in fase, quindi la matrice è soggetta a taglio.

2.14.1 Dimensioni provini e valutazione parametri di prova

La prova a compressione è eseguita in conformità alla norma ASTM D6641 e per utilizzarla è stata realizzata una speciale attrezzatura che consente di evitare gli effetti di bordo e i fenomeni di buckling. L’attrezzatura realizzata, CLC – Combined Loading Compression Text Fixture, è di dimensioni abbastanza contenute e di facile utilizzo, in quanto consente, grazie alla zona di afferraggio ad alto attrito, di evitare l’utilizzo di tabs e di applicare eccessive forze di serraggio, che possono creare concentrazioni di tensioni in prossimità degli incastrati. Nella Figura 90 vengono riportate le dimensioni del provino sottoposto a compressione.



Figura 90 - dimensioni provino a compressione

Nella Figura 91 seguente è riportata l’immagine della rottura del provino una volta effettuata la prova.



Figura 91 - Attrezzatura CLC per i test di compressione

È importante dire che i provini hanno un effetto di forma molto piccolo (alto rapporto lunghezza/spessore) e di conseguenza possono alterare significativamente i risultati del test, a maggior ragione nel caso di materiali eterogenei come i compositi.

Nella Tabella 37 sono riportate le dimensioni nominali dei provini.

Tabella 37 - Dimensioni provini ASTM D6641

ASTM D6641	b	l	L	v
U.M.	[mm]	[mm]	[mm]	[mm/min]
parametri	12,5	140	12,5	2

2.14.2 Analisi dei risultati

In Figura 92, si riporta il grafico relativo alla prova a compressione mostrando l’andamento del carico in funzione dello spostamento della traversa.

Dal grafico è facile notare come tutte le curve raggiungono un massimo in prossimità di un valore di forza di 9500 N e una corsa di circa 1,5 mm.

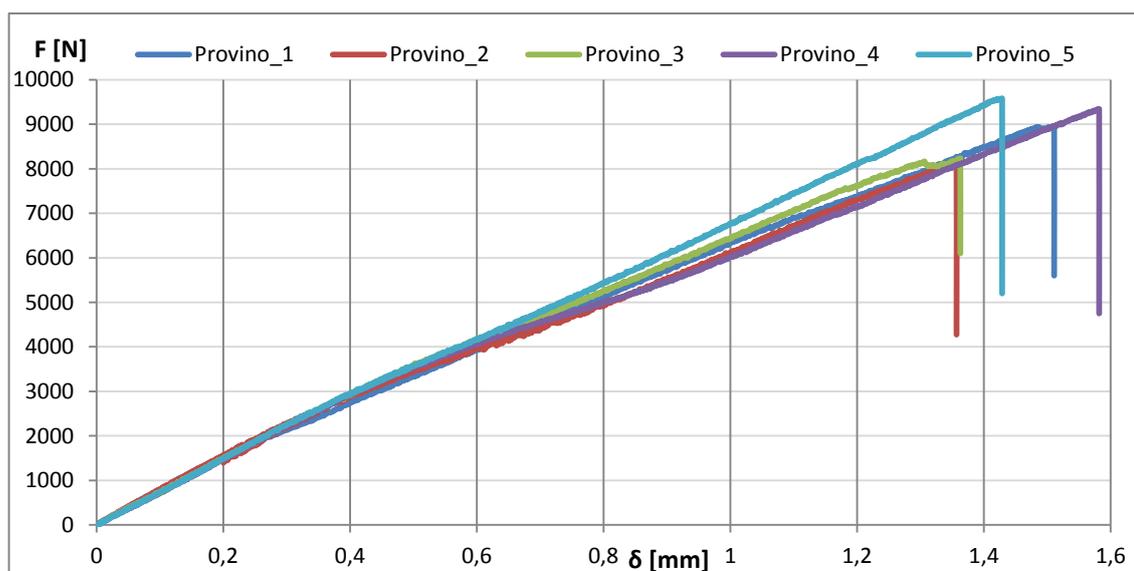


Figura 92 - Compressione centrifugati: Carico - Spostamento Y

Utilizzando il sistema 3D-DIC, come nel caso della trazione, possiamo ricavare i dati relativi alla deformazione negli assi “X” ed “Y” in funzione del tempo come si evince dalla Figura 93. In questo

caso per ricavare i valori delle deformazioni, viste le ridotte dimensioni del provino, sulla superficie del provino vengono presi tre punti ipotizzando di dividere il provino in tre ipotetiche aree. Come si può notare dal grafico si ottengono dei valori di deformazioni ϵ_y , ϵ_x paragonabili tra di loro.

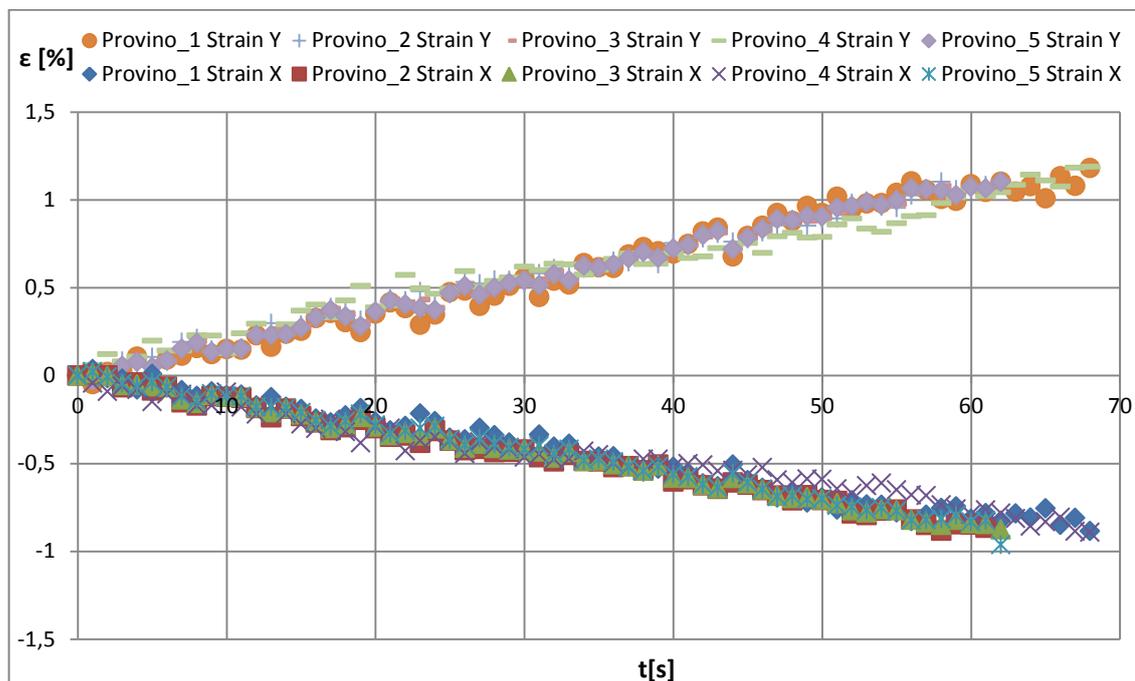


Figura 93 - Compressione centrifugati: Strain Y - Strain X - t

In Figura 94 vengono rappresentate alcune immagini DIC relative al provino sottoposto alla prova in esame.

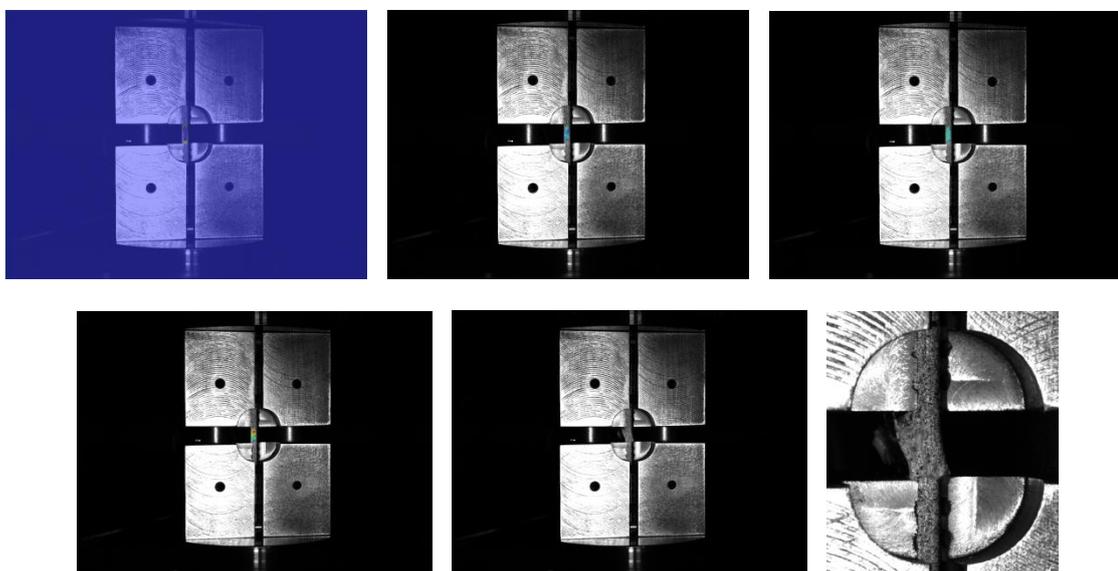


Figura 94 - Andamento deformazioni con tecnica DIC

Definito il carico applicato e le deformazioni si calcola il valore delle tensioni agenti alla fine della prova di compressione utilizzando la seguente formula:

$$\sigma = -\frac{P_c}{b * h}$$

Dove: P_c è il carico massimo, [N]
 b è la larghezza media del campione [mm]
 h è lo spessore medio del campione [mm]

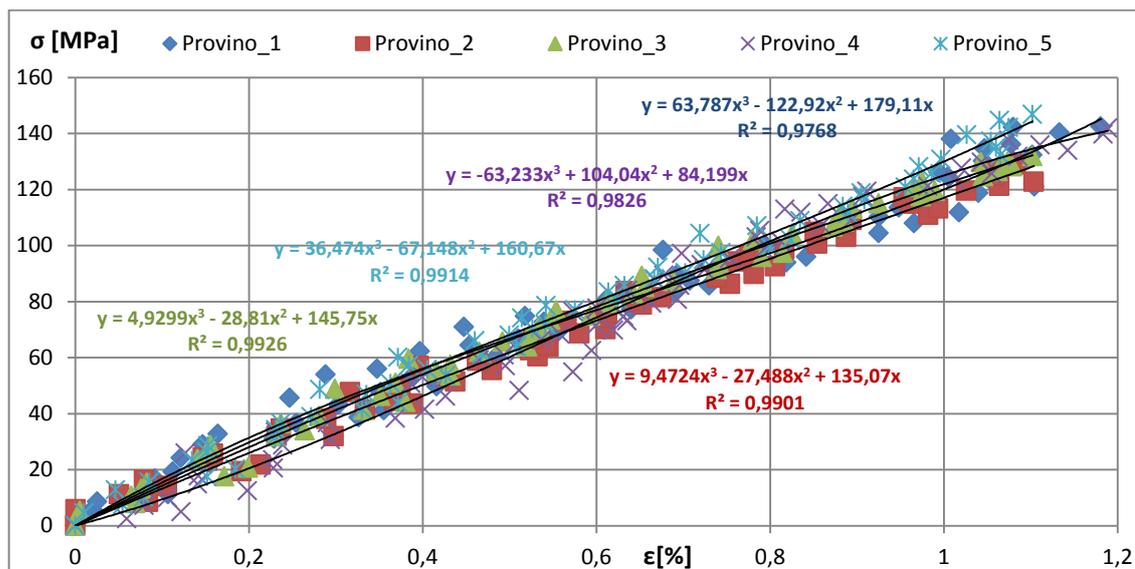


Figura 95 - Compressione centrifugati: Stress – Y Strain

Come si può notare dalla Figura 95 si ottengono dei valori di tensione di rottura a compressione che si aggirano attorno ai 140 MPa.

Durante la prova di compressione è stata effettuata anche una prova termica come si nota dalla Figura 96 ma senza dare dei risultati apprezzabili a causa delle ridotte dimensioni dei provini associate alle grandi dimensioni del sistema di afferraggio.

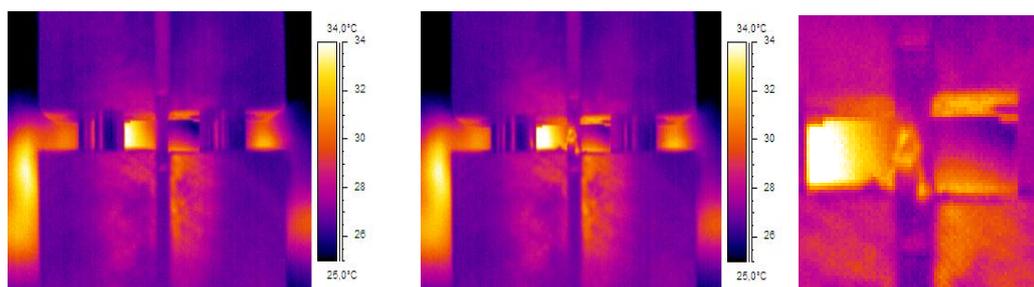


Figura 96 - Prova di compressione: Immagini termiche

Infine in Tabella 38 vengono riportati alcuni parametri ricavati con la prova ASTM D6641.

Tabella 38 - Prove di compressione ASTM D6641

TRAZIONE UNI EN 61	h (spessore)	b (largh.)	Pmax (carico a rot.)	δ (Spost. traversa)	σc max	εy max	εy max	E max
U.M.	[mm]	[mm]	[N]	[mm]	[MPa]	[%]	[%]	[MPa]
Prov. 1	5	12,5	8960	1,51	143	1,18	-0,88	12523
Prov. 2	5	12,5	8170	1,35	131	1,08	-0,86	12863
Prov. 3	5	12,5	8239	1,36	132	1,1	-0,87	12884
Prov. 4	5	12,5	9341	1,58	144	1,18	-0,89	12244
Prov. 5	5	12,5	9581	1,43	147	1,1	-0,96	12978
Media	5	12,5	8858	1,44	140	1,12	-0,89	12698
Dev.Standard	0	0,00	569,72	0,09	6,60	0,04	0,04	274,58

2.15 Prova di flessione centrifugati

Per effettuare le prove di flessione vengono messe a confronto due diverse normative (UNI 7219, ISO 14125) in modo da poter paragonare tra loro i valori ricavati a rottura.

L’apparecchiatura di prova è identica per le due diverse normative in quanto cambia esclusivamente la dimensione del provino e la luce tra i due appoggi.

L’apparecchiatura di prova è costituita da:

- un coltello con raggio di curvatura di 5 mm, che esercita una forza via via crescente sulla superficie del provino in corrispondenza della mezzeria dei supporti;
- due supporti a distanza regolabile con raggio di curvatura di 2 mm per campioni con spessore oltre i 3 mm;
- un sistema di rilevamento del carico applicato via via durante l’avanzamento della prova.

La velocità da impostare nella macchina di prova sarà pari a:

$$v = \frac{\varepsilon' \cdot L^2}{6 \cdot h}$$

Dove: $\varepsilon' = 0,01$ velocità di deformazione delle fibre esterne [min^{-1}]

L = distanza tra gli appoggi [mm]

h = spessore del provino [mm]

Il provino sottoposto a flessione con le due diverse dimensioni è mostrato in Figura 97 e Figura 98.



Figura 97 - Prova di flessione UNI 7219

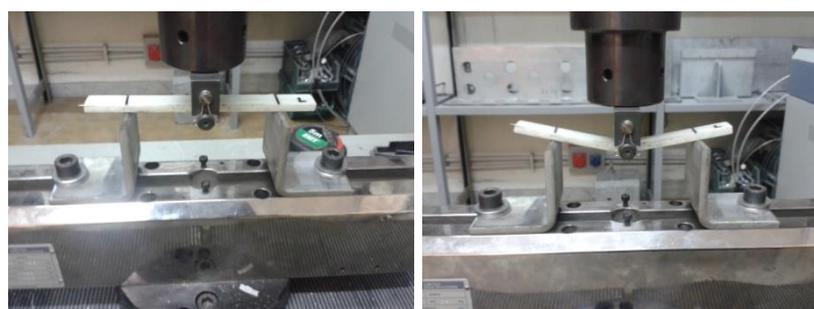


Figura 98 - Prova di flessione ISO 14125

2.15.1 Dimensioni provini e valutazione parametri di prova

I provini devono avere forma rettangolare e devono essere ricavati da semilavorati mediante lavorazioni con macchine utensili. La lavorazione deve essere fatta con estrema cura scartando tutte quelle provette che, risultano con bordi scheggiati o, comunque, con difetti visibili ad occhio nudo.

Le dimensioni dei provini bisogna estrapolarli in funzione dello spessore del semilavorato. Nel caso in esame lo spessore del semilavorato è di 5 mm.

Effettuata la prova di flessione è necessario andare a ricavare i seguenti fattori:

- Tensione a flessione, σ_f

$$\sigma_f = \frac{3 \cdot F \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2}$$

Dove: σ_f = tensione di flessione [N/mm²]

F = carico massimo registrato durante la prova [N]

L = luce tra gli appoggi [mm]

h = spessore della provetta [mm]

b = larghezza della provetta [mm]

- Modulo a flessione, E_f

$$E_f = \frac{F \cdot L^3}{4 \cdot b \cdot h^3 \cdot \delta}$$

Dove: E_f = modulo di flessione [N/mm²]

F = carico corrispondente ad un punto della curva carico – freccia preso nella zona in cui F ed f risultano proporzionali [N]

L = luce tra gli appoggi [mm]

h = spessore della provetta [mm]

b = larghezza della provetta [mm]

δ = spostamento massimo corrispondente al carico massimo [mm]

2.15.2 Analisi dei risultati

- Normativa UNI 7219

Secondo tale normativa le dimensioni di tali campioni (Figura 99) sono riportati in Tabella 39:

Tabella 39 - Dimensioni provini UNI 7219

UNI 7219	b	l	L	v
U.M.	[mm]	[mm]	[mm]	[mm/min]
parametri	15	100	80	2,13



Figura 99 - Provini normativa UNI 7219

In Figura 100 e Figura 101, si riportano i grafici relativi alla prova a flessione mostrando l’andamento del carico in funzione dello spostamento della traversa e il valore della tensione in funzione della deformazione implementata con una formula che sfrutta lo spostamento normale della traversa.

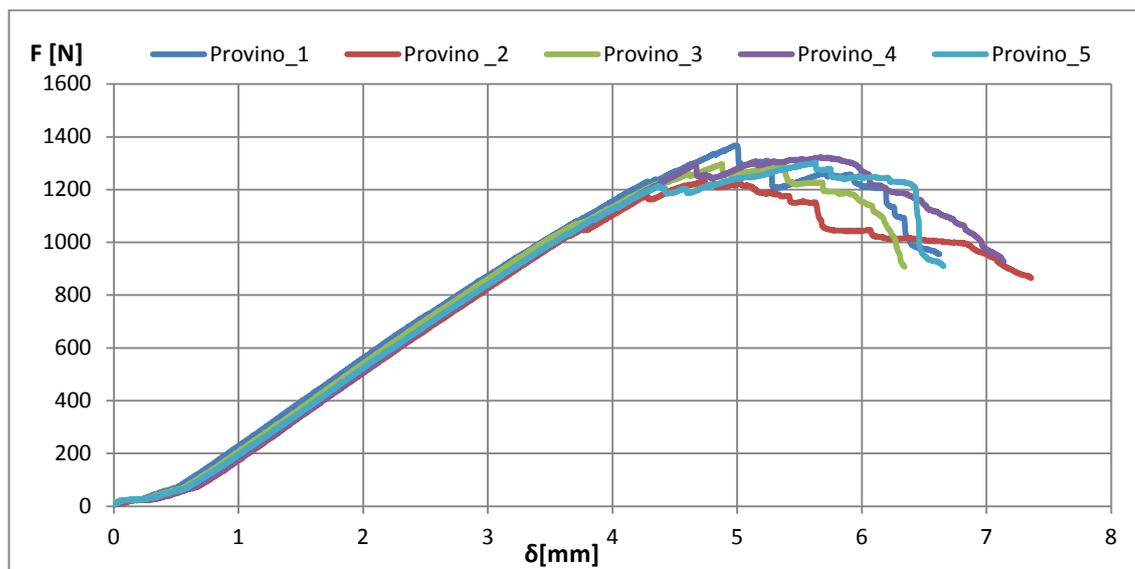


Figura 100 – Curva di flessione UNI 7219: Carico - Spostamento

Come si può notare dalla Figura 100 tutte le curve raggiungono un massimo in prossimità di un valore di forza di 1350 N e una corsa di circa 5 mm. Le curve presentano un primo tratto non lineare dovuto all’assestamento¹ della macchina, pertanto tale tratto è da considerarsi escluso dall’analisi di caratterizzazione meccanica della curva.

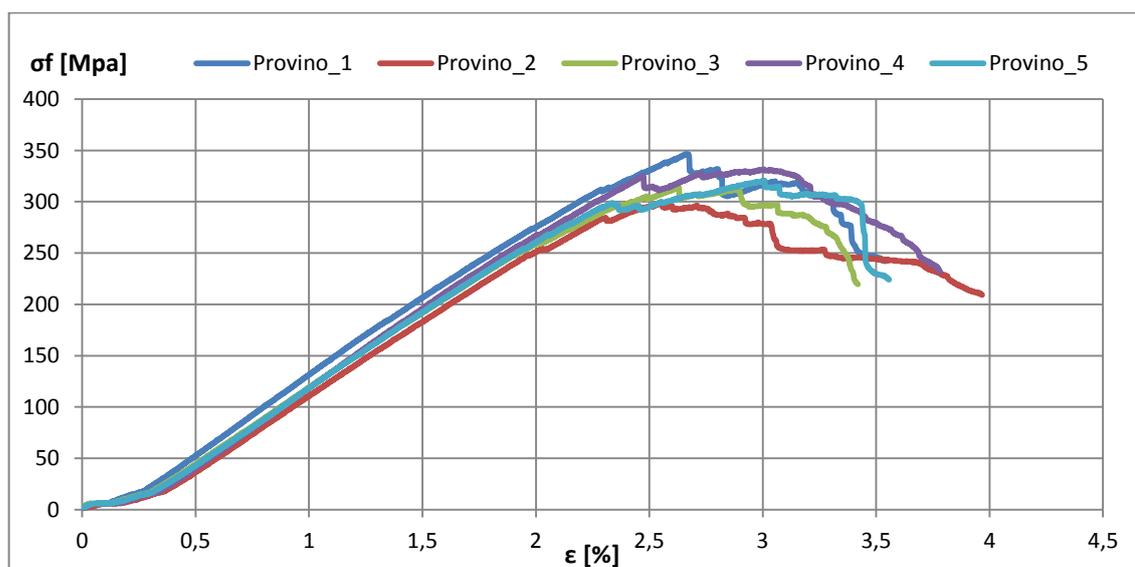


Figura 101 - Curva di flessione UNI 7219: Tensione - Deformazione

In Figura 101 si nota come il valore di tensione massima a flessione si riscontra tra i 300 e i 350 MPa, mentre il valore di deformazione massima percentuale si aggira attorno al 2,5%.

In Tabella 40 vengono riportati alcuni parametri ricavati con la prova UNI 7219:

Tabella 40 - Prova di flessione UNI 7219

FLESSIONE UNI 7219	h (spessore)	b (largh.)	P _{max} (carico a rot.)	δ (Spost. traversa)	σ max	ϵ _{fy} max	E max
U.M.	[mm]	[mm]	[N]	[mm]	[MPa]	[%]	[MPa]

¹ La non perfetta linearità della curva iniziale è dovuta al non perfetto contatto del coltello sul provino che avviene all’inizio della prova. Appena il coltello risulta stabile sulla superficie del provino la curva inizia a crescere linearmente fino alla rottura del campione.

Prov. 1	5,7	15,00	1367	4,9	346	2,66	12854
Prov. 2	5,7	15,12	1238	4,7	299	2,55	12137
Prov. 3	5,7	15,12	1297	4,8	313	2,63	12450
Prov. 4	5,5	15,40	1323	5,5	331	3,00	12337
Prov. 5	5,5	15,55	1302	5,5	320	2,99	12141
Media	5,7	15,00	1313	5,1	322	2,76	12383
Dev.Standard	0,11	0,23	46,72	0,39	17,82	0,21	294,76

- Normativa ISO 14125

Secondo tale normativa le dimensioni di tali campioni (Figura 102) sono riportati in Tabella 41:

Tabella 41 - Dimensioni provini ISO 14125

UNI 7219	b	l	L	v
U.M.	[mm]	[mm]	[mm]	[mm/min]
parametri	15	150	100	3,33

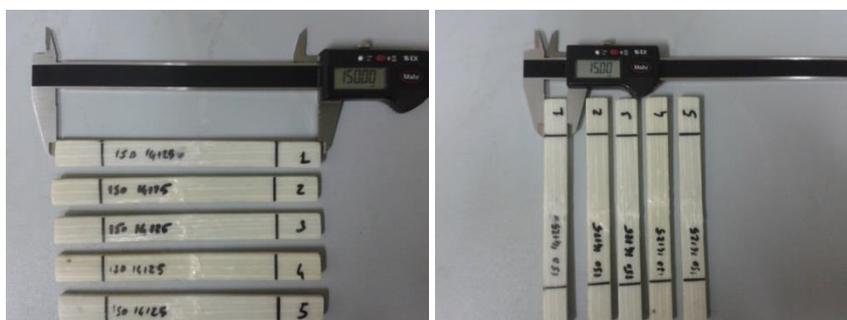


Figura 102 - Provini normativa ISO 14125

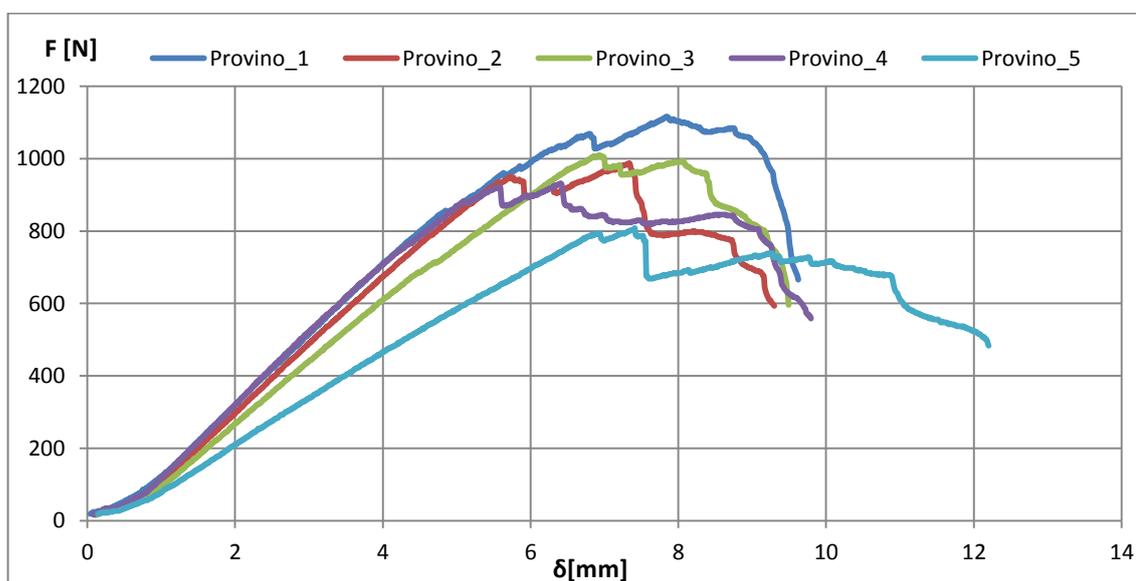


Figura 103 – Curva di flessione ISO 14125 Carico - Spostamento

Come si può notare dalla Figura 103 tutte le curve raggiungono un massimo in prossimità di un valore di forza di 1000 N e una corsa di circa 6,5 mm. Tali curve presentano una dispersione di dati maggiore rispetto alle curve ricavate con la precedente normativa. Inoltre è da considerare da scartare il provino numero 5 in quanto il provino presentava delle difettosità interne che ne hanno pregiudicato le caratteristiche meccaniche del provino in esame.

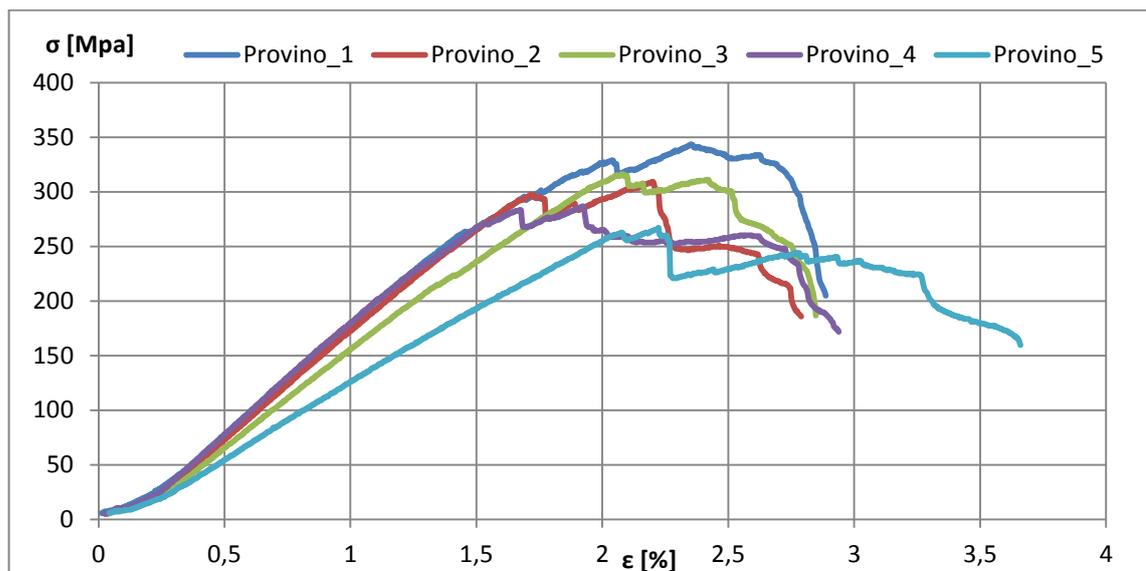


Figura 104 - Curva di flessione ISO 14125 Tensione - Deformazione

In Figura 104 si nota come il valore di tensione massima a flessione si riscontra tra i 300 e i 350 MPa, mentre il valore di deformazione massima percentuale si aggira attorno al 2,5%.

In Tabella 42 vengono riportati alcuni parametri ricavati con la prova ISO 14125:

Tabella 42 - Prova di flessione ISO 14125

FLESSIONE UNI 14125	h (spessore)	b (largh.)	Pmax (carico a rot.)	δ (Spost. traversa)	σf max	εfy max	E max
U.M.	[mm]	[mm]	[N]	[mm]	[MPa]	[%]	[MPa]
Prov. 1	5,7	85,5	1116	7,8	343	2,35	12876
Prov. 2	5,6	84,7	987	7,3	309	2,20	12831
Prov. 3	5,6	84,7	1009	7,8	316	2,08	12121
Prov. 4	5,7	85,5	931	6,4	286	1,92	13091
Prov. 5	5,4	82,5	808	7,4	267	2,22	11557
Media	5,6	84,7	970	7,1	304	2,15	12495
Dev.Standard	0,12	1,23	112,79	0,57	29,08	0,16	638,94

Dal confronto tra i risultati delle due norme si osserva come il test eseguito in accordo alla UNI 7219 ha fornito risultati con una più bassa dispersione di dati rispetto ai test eseguiti in accordo alla norma ISO 14125.

2.16 Prova di taglio interlaminare centrifugati

Per una corretta progettazione di un materiale composito, uno degli aspetti più delicati è certamente la valutazione dei meccanismi di delaminazione. La delaminazione di un materiale è estremamente complessa e di difficile valutazione. La tecnologia in cui è più presente tale fenomeno è sicuramente la centrifugazione (non a caso la differenza tra la tensione massima a trazione ed a compressione è di circa il 50%). Per analizzare il fenomeno della delaminazione sui compositi centrifugati è stata, dunque, eseguita una caratterizzazione all’interfaccia fibra - matrice mediante la normativa ISO 14130 (questa normativa risulta essere adatta sia per materiali compositi fibro-rinforzati a matrice termoindurente sia a matrice termoplastica). Lo scopo di tale test è quello di determinare la tensione di taglio interlaminare agente tra le varie lamine.

2.16.1 Dimensioni provini e valutazione parametri di prova

Per effettuare le prove di taglio interlaminare, i provini venivano ricavati in 4 differenti sezioni di palo aventi diversi raggi di curvatura. Durante tale prova, sono stati messi in correlazione sia i differenti spessori che i differenti raggi di curvatura del provino, per verificare se e come quest’ultimo parametro abbia influenza sul taglio interlaminare. Sono stati ricavati 5 provini nelle seguenti sezioni:

- raggio curvatura = 62,5 mm Sezione a 1 m dalla base
- raggio curvatura = 88 mm Sezione a 3 m dalla base
- raggio curvatura = 107 mm Sezione a 5 m dalla base
- raggio curvatura = 130,5 mm Sezione a 8 m dalla base

Le dimensioni dei provini sono stati riportati in Tabella 43 e mostrati in Figura 105.

Tabella 43 - Dimensioni e parametri di prova dei campioni

ISO 14130	b	l	L	R1	R2	v
U.M.	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm/min]
parametri	27,5	55	27,5	5	2	1

Dove : R1 = raggio di curvatura coltello
R2= raggio di curvatura appoggi

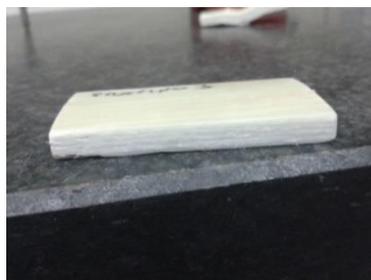


Figura 105 - Forma e dimensione del campione

La resistenza a taglio interlaminare, espressa in MPa, è stata determinata secondo la seguente formula:

$$\tau = 0,75 \cdot \frac{F}{b \cdot h}$$

Dove: F = carico massimo raggiunto al cedimento
 b = larghezza del campione
 h = spessore del campione

In Figura 106 viene mostrata l’esecuzione della prova di taglio interlaminare.

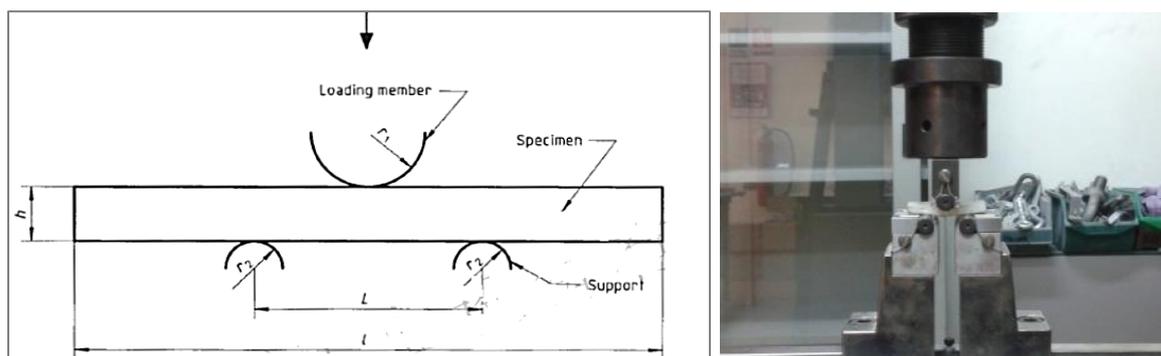


Figura 106 - Prova di shear strength

Le possibili modalità di cedimento che possono verificarsi durante la prova di taglio interlaminare sono rappresentate in Figura 107.

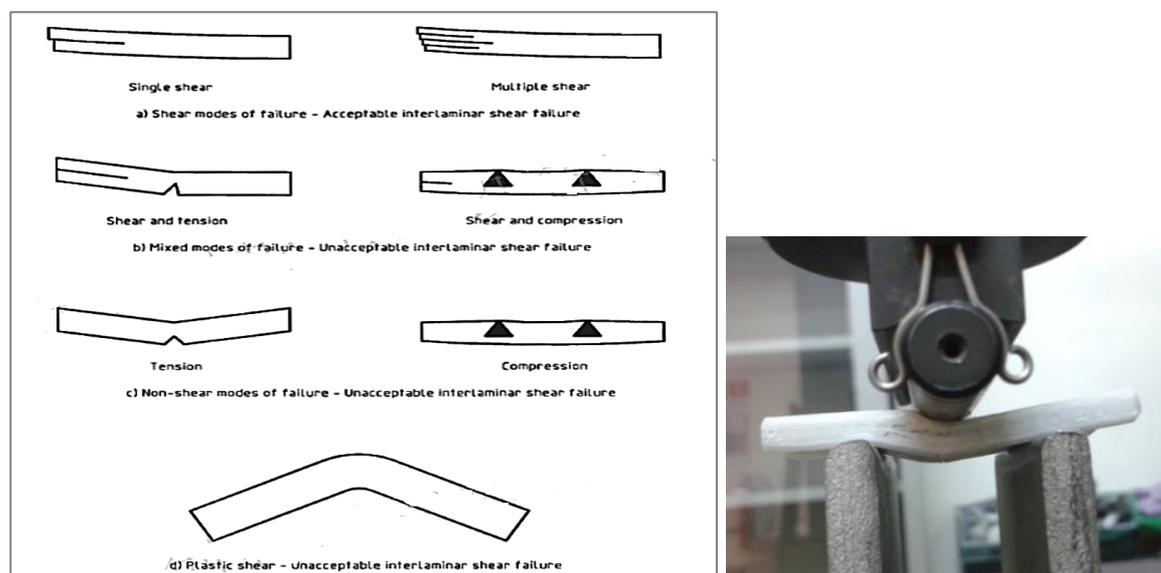


Figura 107 - Esempi di modalità di cedimento

Le modalità di cedimento accettabili per la valutazione del taglio interlaminare sono:

- single shear, multiple shear.

Le modalità di cedimento non accettabili per valutazione del taglio interlaminare sono;

- a) modalità miste di cedimento: shear – tension, shear – compression;
- b) modalità di cedimento non di taglio: tension, compression;
- c) plastic shear.

2.16.2 Analisi dei risultati: sezione 1m

Di seguito in Tabella 44, si riportano i valori numerici relativi allo spessore, al carico a rottura e al valore di taglio interlaminare ricavati nella sezione di 1 m.

Tabella 44 - Taglio interlaminare nella sezione di 1 m

TAGLIO INTERLAMINARE ISO 14125	h (spessore)	Pmax (carico a rot.)	τ max
U.M.	[mm]	[N]	[MPa]
Prov. 1	5,6	4.863	26,1
Prov. 2	5,6	4.850	25,9
Prov. 3	5,5	4.643	25,3
Prov. 4	5,6	4.858	26,0
Prov. 5	5,6	4.941	26,5
Media	5,6	4.831	25,9
Dev.Standard	0,04	111,31	0,43

In Figura 108 viene rappresentato il valore del carico massimo a rottura in funzione dello spostamento notando come la curva presentava vari plateau. Nel grafico in esame si notano due plateau: il primo si riscontrava intorno ai 1700 N e indicava un primo cedimento del provino; il secondo si riscontrava intorno ai 5000 N e indicava il cedimento definitivo. Ovviamente, come per le prove fatte precedentemente, la parte iniziale della curva, fino allo spostamento di 0,4 mm, è da escludere poiché è dovuta al non perfetto contatto del coltello sul provino (stabilito un perfetto contatto coltello - provino la macchina di prova inizia a leggere un carico via via crescente fino ai vari cedimenti).

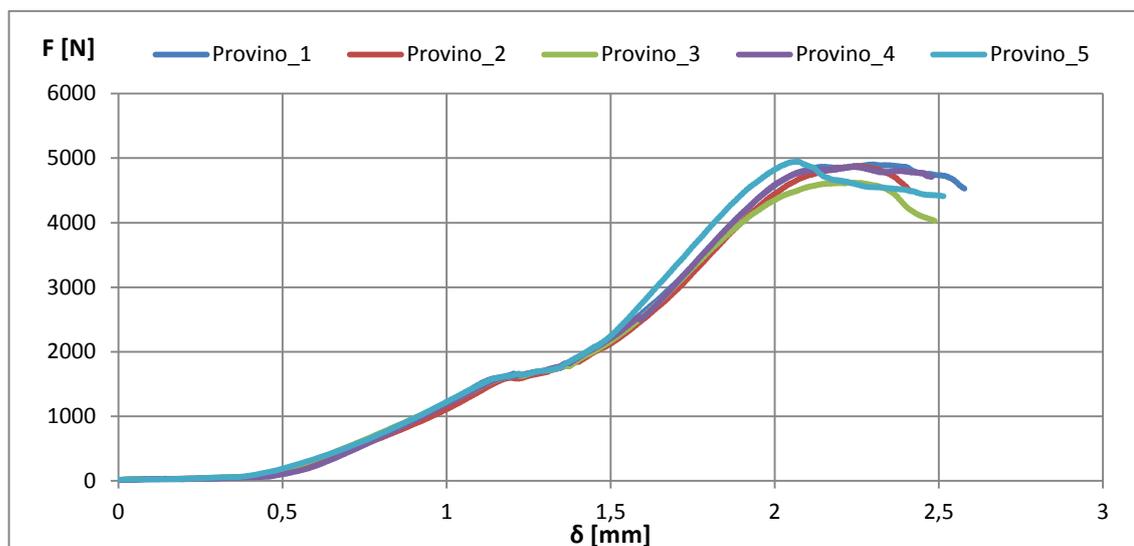


Figura 108 - τ sezione 1 m

Nella Figura 109 viene evidenziata la modalità di cedimento dei provini ricavati nella sezione di 1 metro.

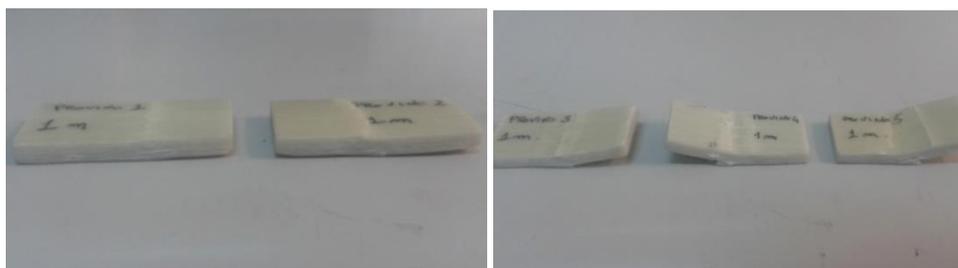


Figura 109 - Taglio interlaminare: provini sezione 1 m

2.16.3 Analisi dei risultati: sezione 3m

Di seguito in Tabella 45 si riportano i valori numerici relativi allo spessore, al carico a rottura e al valore di taglio interlaminare ricavati nella sezione di 3 m.

Tabella 45 - Taglio interlaminare nella sezione di 3 m

TAGLIO INTERLAMINARE ISO 14125	h (spessore)	Pmax (carico a rot.)	τ max
U.M.	[mm]	[N]	[MPa]
Prov. 1	4,7	3.558	22,7
Prov. 2	4,6	3.385	22,1
Prov. 3	4,7	3.575	22,8
Prov. 4	4,9	3.942	24,1
Prov. 5	4,8	4.025	25,4
Media	5,1	3.704	23,4
Dev.Standard	0,11	273,48	1,33

Nella Figura 110 si notano due plateau: il primo si riscontrava intorno ai 1500 N e indicava un primo cedimento del provino; il secondo si riscontrava intorno ai 4000 N e indicava il cedimento definitivo del provino.

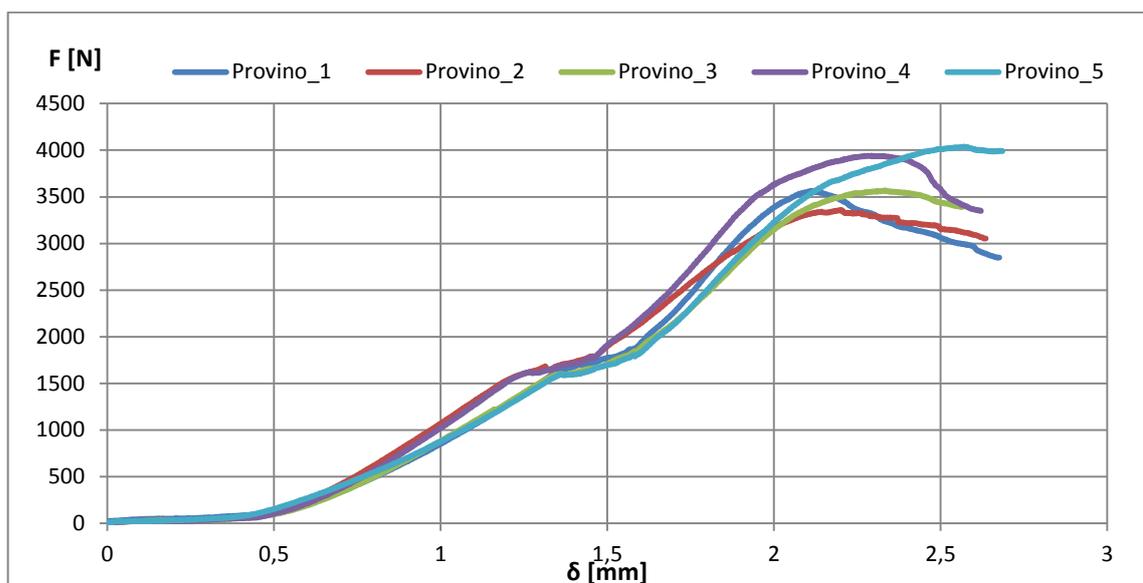


Figura 110 - τ sezione 3 m

Nella Figura 111 viene evidenziata la modalità di cedimento dei provini ricavati nella sezione di 3 metri.



Figura 111 - Taglio interlaminare: provini sezione 3 m

2.16.4 Analisi dei risultati: sezione 5m

Di seguito in Tabella 46 si riportano i valori numerici relativi allo spessore, al carico a rottura e al valore di taglio interlaminare ricavati nella sezione di 5 m.

Tabella 46 - Taglio interlaminare nella sezione di 5m

TAGLIO INTERLAMINARE ISO 14125	h (spessore)	Pmax (carico a rot.)	τ max
U.M.	[mm]	[N]	[MPa]
Prov. 1	5,9	4.224	21,5
Prov. 2	6,1	4.589	22,6
Prov. 3	5,8	4.099	21,2
Prov. 4	6,1	4.584	22,5
Prov. 5	6,0	4.484	22,4
Media	6,0	4.396	22,0
Dev.Standard	0,13	222,56	0,64

Nella Figura 112 si notano due plateau: il primo si riscontrava intorno ai 1500 N e indicava un primo cedimento del provino; il secondo si riscontrava intorno ai 4500 N e indicava il cedimento definitivo del provino. Il grafico presenta una maggiore dispersione dei dati dovuta alla maggiore curvatura che presentava il provino.

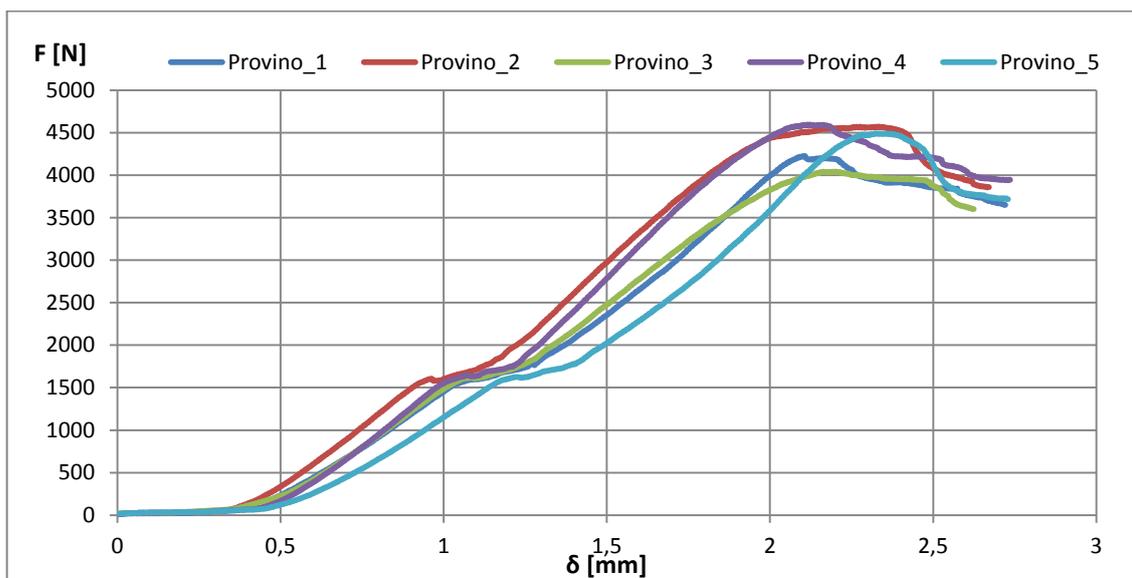


Figura 112 - τ sezione 5m

Nella Figura 113 viene evidenziata la modalità di cedimento dei provini ricavati nella sezione di 5 metri.

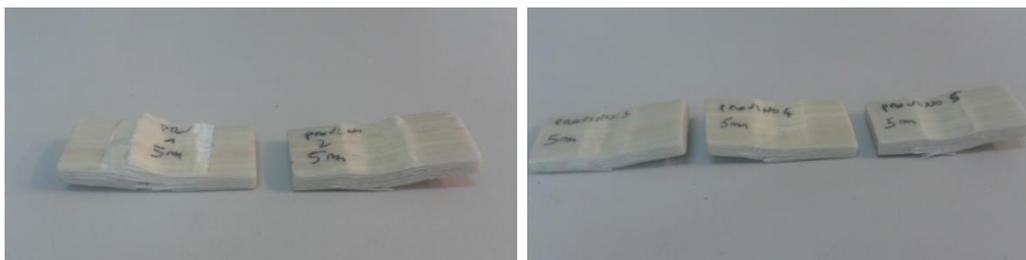


Figura 113 - Taglio interlaminare: provini sezione 5 m

2.16.5 Analisi dei risultati: sezione 8m

Di seguito in Tabella 47 si riportano i valori numerici relativi allo spessore, al carico a rottura e al valore di taglio interlaminare ricavati nella sezione di 8 m.

Tabella 47 - Taglio interlaminare nella sezione 8m

TAGLIO INTERLAMINARE ISO 14125	h (spessore)	Pmax (carico a rot.)	τ max
U.M.	[mm]	[N]	[MPa]
Prov. 1	4,5	2841	18,9
Prov. 2	4,5	2250	15,0
Prov. 3	4,6	3048	19,9
Prov. 4	4,6	2433	15,9
Prov. 5	4,6	2425	15,8
Media	4,5	2599	17,1
Dev.Standard	0,05	331,59	2,16

Nella Figura 114 si notano due plateau: il primo si riscontrava intorno ai 1500 N e indicava un primo cedimento del provino; il secondo si riscontrava intorno ai 2500 N e indicava il cedimento definitivo del provino. Il grafico presenta una maggiore dispersione dei dati dovuta alla maggiore curvatura che presentava il provino.

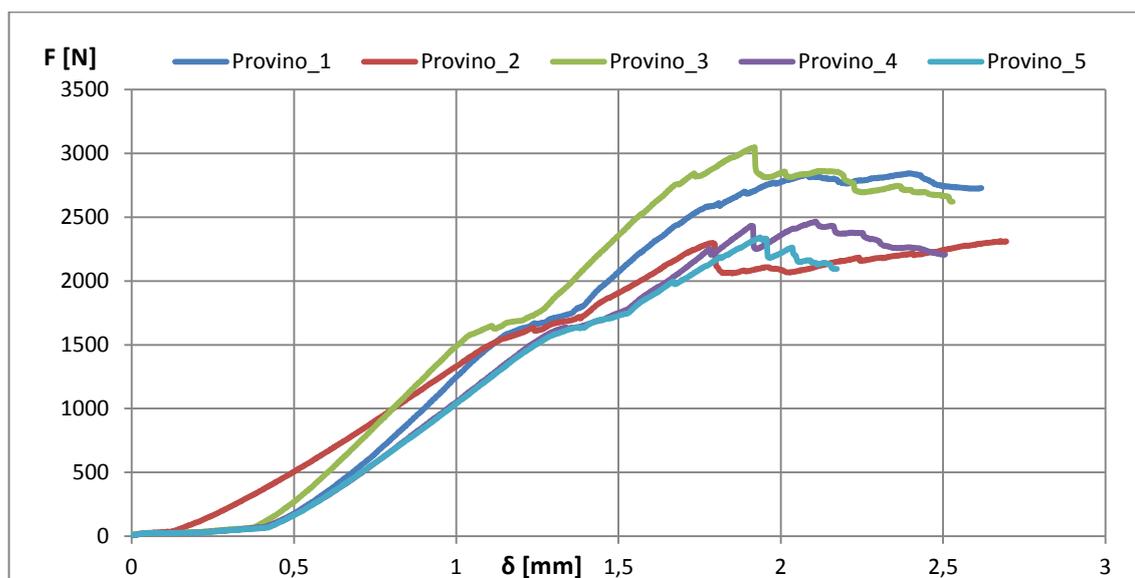


Figura 114 - τ sezione 8m

Nella Figura 115 viene evidenziata la modalità di cedimento dei provini ricavati nella sezione di 8 metri.



Figura 115 - Taglio interlaminare: provini sezione 8m

2.16.6 Conclusioni: Confronto τ alle varie sezioni

Dai test eseguiti, è stato facile notare che la tipologia di cedimento a cui vanno incontro tali provini è un distacco interlaminare e non una rottura delle fibre.

I risultati sperimentali risultano avere basse dispersioni a parità di sezione ma sono via via influenzati dalla curvatura del provino (Figura 116).

Possiamo ipotizzare quindi che l’aumento della curvatura riduce il valore di taglio interlaminare. Tale riduzione assume un andamento che è inversamente proporzionale al cubo di tale rigidezza fittizia secondo la seguente formula:

$$\tau = 0,75 \cdot \frac{F}{b \cdot h} \cdot \left(\frac{b}{b + s} \right)^3$$

Dove: s = altezza della corda nella sezione

$\frac{b}{b+s}$ = rappresenta il rapporto adimensionale tra la sezione rettangolare e la sezione con spessore maggiorato dell’altezza della corda.

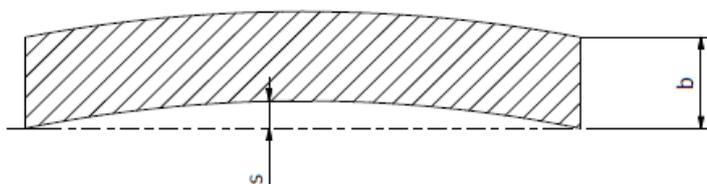


Figura 116 - Curvatura del provino

Nella Tabella 48 si riportano i risultati sperimentali e teorici raggruppati per raggio di curvatura del provino.

Tabella 48 - Confronto tau teorico - sperimentale

Sezione	Raggio di curvatura	τ max sperimentale	s	b + s	τ max teorico
U.M.	[mm]	[MPa]	[mm]	[mm]	[MPa]
1 m	62,5	25,9	0,62	5,62	25,9
3 m	88	23,4	0,77	5,77	23,9
5 m	107	22,0	0,95	5,95	21,9
8 m	130,5	17,1	1,38	6,38	17,8

In conclusione, l’analisi dei risultati su provini aventi diverse curvature ci fa notare che il valore di taglio interlaminare è legato alla curvatura stessa e che il valore ha un andamento inversamente proporzionale all’aumento della curvatura.

2.17 Prova per il calcolo della % W_f centrifugati

Le proprietà meccaniche del composito sono notevolmente influenzate dal valore della frazione in peso o in volume delle fibre, pertanto è fondamentale determinare con accuratezza tale caratteristica del laminato. La frazione volumetrica delle fibre, V_f , è pari al rapporto tra il volume delle fibre v_f ed il volume totale del composito v_c ; in maniera analoga la frazione ponderale delle fibre, W_f , è data dal rapporto tra il peso o massa, delle fibre, w_f , ed il peso totale o massa totale, del composito w_c . Il contenuto di fibra in un composito è determinabile sia dissolvendo il materiale in un opportuno solvente (secondo la normativa ISO 11667) che tramite processi di calcinazione (secondo la normativa

ISO 1172). In entrambi i casi si richiede di considerare almeno due campioni di materiale quanto più simili per dimensioni e geometria.

Nel primo caso, la percentuale di materiale non solubile (fibre ed eventuali cariche) viene ricavata misurando la differenza tra la massa del provino prima e dopo l’estrazione della parte solubile (resina) che è eseguita tramite dissoluzione in un solvente. Sono solitamente solventi appropriati il diclorometano, l’acetone, il metiletilchetone o l’etanolo denaturato. Qualora il campione contenga cariche, la separazione di fibre e cariche avviene tramite reazione delle cariche con acido idrocloridrico oppure tramite filtrazione senza l’uso di acidi. La massa dei campioni deve essere misurata prima della dissoluzione, dopo l’estrazione della resina e la separazione di fibre e cariche.

Nel secondo caso, in cui si valuti il contenuto di fibre tramite processi di calcinazione (Figura 117), il provino deve essere pesato, calcinato in determinate condizioni (700°C per 5 ore) e quindi nuovamente pesato per determinare il contenuto di materiale incombusto (fibre ed eventuali cariche). Per calcolare la frazione in peso di fibra per ogni campione basta effettuare il rapporto tra il peso del provino prima e dopo la calcinazione in muffola. Nello specifico sono stati ricavati tre provini su tre sezioni differenti lungo la lunghezza totale del palo in vetroresina in modo da poter vedere se si riscontrano sostanziali variazioni percentuali da sezione a sezione. Di fondamentale importanza è che la frazione in peso delle fibre di vetro nelle varie sezioni di palo su cui sono stati ricavati i provini non sia inferiore al 45 %. I risultati delle prove sono mostrati in Tabella 49.

$$W_f = \frac{w_f}{w_c} = \frac{w_f}{w_f + w_m}$$



Figura 117 - % in peso di fibra di vetro

Tabella 49 - Prove contenuto fibre di vetro

UNI ISO 1172	W_{pre}	W_{post}	X_f
U.M.	[g]	[g]	[%]
Prov. 1 (base)	9,5314	5,0866	53
Prov. 2 (base)	6,8946	3,8229	55
Prov. 3 (base)	6,5657	3,6613	55
Prov. 4 (middle)	8,9526	4,3760	49
Prov. 5 (middle)	9,0878	4,5086	50
Prov. 6 (middle)	9,5606	4,7756	50
Prov. 7 (top)	10,2555	4,8839	48
Prov. 8 (top)	10,4214	5,1956	50
Prov. 9 (top)	10,6108	5,0181	47

2.18 Prova di rigidità dielettrica centrifugati

Una prova molto importante per la caratterizzazione dei pali in vetroresina è sicuramente la prova di rigidità dielettrica. Tale prova ha consentito di determinare il valore limite di campo elettrico oltre il quale si produce una conduzione di elettricità (scarica elettrica) attraverso il materiale dielettrico, su dei campioni ricavati a caso sulla superficie del palo. È importante che secondo normativa i valori di

rigidità dielettrica siano superiori a 4,7 kV/mm (Figura 118). I risultati delle prove sono mostrati in Tabella 50.

Tabella 50 - Prove di isolamento elettrico

ASTM D149	h	σ	Rigidità dielettrica
U.M.	[mm]	[kV]	[kV/mm]
Prov. 1 (middle)	5,5	57,9	10,5
Prov. 2 (middle)	5,5	54,9	9,98
Prov. 3 (middle)	4,5	51,7	11,48

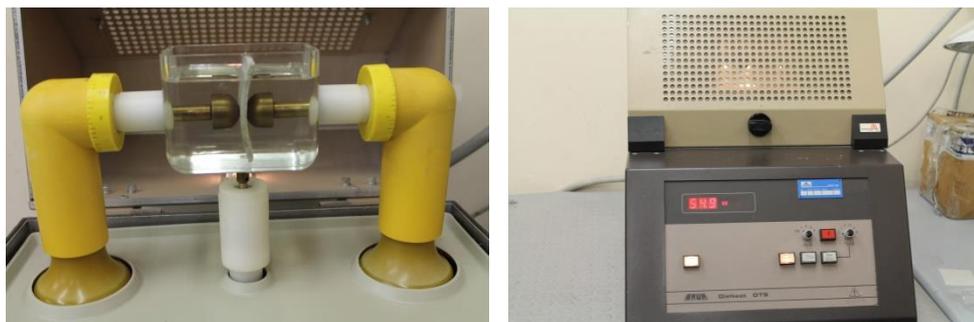


Figura 118 – Prova di rigidità dielettrica

2.19 Prova di assorbimento d’acqua centrifugati

Le materie plastiche esposte all’acqua possono essere soggette a parecchie azioni diverse:

- Variazioni dimensionali (per esempio rigonfiamento)
- Estrazione di componenti solubili in acqua

Per verificare l’assorbimento del palo, vengono ricavati tre provini a tre differenti lunghezze (base – centro - cima). Secondo la normativa UNI ISO 62, i provini devono avere forma quadrata e le loro dimensioni dipendono dallo spessore del prodotto ultimato.

$$w \leq 10 h$$

Dove: h = spessore nominale, in mm

w = lunghezza nominale di un lato, in mm

Ricavati i vari provini quadrati è necessario che ogni forma di contaminazione sulla superficie del provino, capace di influenzare l’assorbimento dell’acqua, deve essere eliminata con un agente pulente, ovviamente non aggressivo per la materia plastica in esame. Lasciare essiccare i provini a 23°C e 50% di umidità per almeno 2 ore dalla pulitura. Successivamente tutti i provini vengono essiccati in una stufa mantenuta a 50°C per 24 ore. I provini, dopo che sono stati raffreddati all’interno dell’essiccatore, vengono pesati su una bilancia elettronica e successivamente immersi in acqua distillata mantenuta a 23°C. All’interno del recipiente vengono utilizzati almeno 8 ml di acqua distillata per centimetro quadrato della superficie totale del provino, ma mai meno di 300 ml d’acqua per ogni provino per evitare una concentrazione eccessiva dei prodotti estratti dall’acqua nel corso della prova. I campioni sono immersi in un recipiente, contenente almeno 300 ml d’acqua distillata per ogni provino. In questo caso è di fondamentale importanza che nessun provino abbia superfici a contatto tra loro e che non siano a contatto con le pareti del recipiente. Dopo l’immersione per 24 ore, si ritirano i provini dall’acqua, si asciugano con un panno pulito e asciutto e si effettua la seconda

pesatura (Figura 119). Infine, per ciascun provino si calcola la percentuale di variazione di massa, c , relativa alla massa iniziale, usando la formula:

$$c = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \%$$

Dove: m_1 = è la massa del provino, in milligrammi, dopo l’essiccamento iniziale e prima dell’immersione

m_2 = è la massa del provino, in milligrammi, dopo l’immersione in acqua distillata



Figura 119 - Prova di assorbimento d’acqua

Affinché la prova vada a buon fine è necessario che l’assorbimento d’acqua dei vari provini sia inferiore all’ 1%. I risultati vengono mostrati in Tabella 51.

Tabella 51 - Prove di assorbimento

UNI ISO 62	W_{pre}	W_{post}	Assorbimento
U.M.	[g]	[g]	[%]
Prov. 1 (base)	16,9022	16,9343	0,18
Prov. 2 (base)	17,6547	17,6922	0,21
Prov. 3 (base)	18,0558	18,1060	0,27
Prov. 4 (middle)	25,4558	25,6578	0,79
Prov. 5 (middle)	28,0513	28,2911	0,85
Prov. 6 (middle)	29,6336	29,8190	0,62
Prov. 7 (top)	25,5071	25,7515	0,95
Prov. 8 (top)	27,3942	27,6429	0,90
Prov. 9 (top)	28,7710	28,9714	0,70

2.20 Prova di autoestinguenza centrifugati

Ultimo test sperimentale fatto sui centrifugati è il test di autoestinguenza eseguito secondo la normativa ASTM 635-97. La normativa prevedeva che il test veniva eseguito sulla superficie esterna di un tronco di palo prelevato ad una distanza di 1260 – 2260 mm dalla base del palo, già sottoposto alle prove di tiro. La prova viene eseguita in un laboratorio chiuso, totalmente e a tenuta stagna, con vetrate resistenti al calore. Durante la prova l’aspiratore viene spento ed acceso immediatamente dopo il test allo scopo di espellere i prodotti della combustione (prodotti tossici). Il provino viene fissato con un anello di arresto su due piccole ganasce regolabili, per mezzo di un dado di controllo, per consentire qualunque angolazione. Sotto il provino viene messa una bacinella d’acqua in modo da raccogliere tutte le particelle brucianti che possono cadere durante la prova. Successivamente si regola il bruciatore con le prese d’aria aperte per produrre una fiamma con un altezza di circa 25 mm. Tale bruciatore viene disposto in modo che la fiamma tocchi la superficie del provino facendo contemporaneamente partire il contasecondi. Dopo che sono trascorsi 30 secondi si rimuove il bruciatore ponendolo ad una distanza di 450 mm dal provino e chiudere la cappa. Affinché la prova

vada a buon fine la fiamma sulla superficie del palo deve spegnersi entro 5 secondi non danneggiando la superficie del palo in vetroresina. Dalla prova effettuata si osserva come la fiamma si spegne quasi istantaneamente quando il bruciatore viene allontanato dal provino. La prova viene effettuata ruotando il provino di 120° lungo il proprio asse ottenendo quindi tre tempi. Ricavati i valori dei tre tempi nelle tre varie angolazioni si fa una media dei tempi calcolata e successivamente si ripete tale prova per almeno altri 5 provini troncoconici andandoci a calcolare il tempo medio di combustione. I risultati vengono mostrati in Tabella 52.

$$ATB = \frac{\sum(t - 30 \text{ secondi})}{N^{\circ} \text{ provini}}$$

Tabella 52 - Prove di autoestinguenza

ASTM 635-97	Tempo di spegnimento
U.M.	[s]
Prov. 4 (middle)	1
Prov. 5 (middle)	1
Prov. 6 (middle)	1

Nella Figura 120 viene mostrata come viene eseguita la prova.



Figura 120 - Prova di autoestinguenza

2.21 Riepilogo risultati prove centrifugati

In Tabella 53 vengono riassunte le prove effettuate sul materiale costituente i pali centrifugati.

Tabella 53 – Riepilogo normative e limiti di accettazione sulle prove sul materiale

N°	Denominazione della prova	Norma di riferimento	Q.tà campioni	Valore numerico	Unità di misura	Limiti di accettazione	Esito
1	Verifica resistenza a trazione	UNI EN 61	3	Base: 322 Base: 268 Base: 299	MPa	Tensione a trazione superiore a 300 MPa	C
2.1	Resistenza agli agenti chimici: variazione modulo a trazione	ISO 175 - ASTM D 790	5	Base: 0,98 Base: 1,29 Base: 5,37	%	Variazione modulo a trazione ≤ 20%	C
2.2	Resistenza ai raggi UV: variazione modulo a trazione	UNI EN ISO 4892-2 - ASTM D 790	5	Base: 2,10 Base: 1,75 Base: 2,64	%	Variazione modulo a trazione ≤ 5%	C
2.3	Stabilità termica a -30°C: variazione modulo a trazione	ASTM D 790	10	Base: 1,68 Base: 5,24 Base: 5,93	%	Variazione modulo a trazione ≤ 15%	C
2.4	Stabilità termica a 65°C: variazione modulo a trazione	ASTM D 790	10	Base: 1,68 Base: 4,28 Base: 5,93	%	Variazione modulo a trazione ≤ 15%	C
3	Verifica resistenza a compressione	ASTM D 6641	3	Base: 143 Base: 131 Base: 132 Base: 144 Base: 147	MPa	Tensione a compressione superiore a 120 MPa	C
4.1	Verifica resistenza a flessione	UNI 7219	5	Base: 346 Base: 299 Base: 313 Base: 331 Base: 320	MPa	Tensione a flessione superiore a 300 MPa	C
4.2	Verifica resistenza a flessione	ISO 14125	5	Base: 343 Base: 309 Base: 316 Base: 286 Base: 267	MPa	Tensione a flessione superiore a 300 MPa	C
5.1	Verifica a taglio interlaminare sezione 1	ISO 14130	5	Base: 26,1 Base: 25,9 Base: 25,3 Base: 26,0 Base: 26,5	MPa	Tensione a taglio superiore a 15 MPa	C
5.2	Verifica a taglio interlaminare sezione 3	ISO 14130	5	Middle: 22,7 Middle: 22,1 Middle: 22,8 Middle: 24,1 Middle: 25,4	MPa	Tensione a taglio superiore a 15 MPa	C
5.3	Verifica a taglio interlaminare sezione 5	ISO 14130	5	Middle: 21,5 Middle: 22,6 Middle: 21,2 Middle: 22,5 Middle: 22,4	MPa	Tensione a taglio superiore a 15 MPa	C
5.4	Verifica a taglio interlaminare sezione 8	ISO 14130	5	Top: 18,9 Top: 15,0 Top: 19,9 Top: 15,9 Top: 15,8	MPa	Tensione a taglio superiore a 15 MPa	C

6	Verifica durezza superficiale	UNI EN 59	9	Base: 48 Base: 47 Base: 48 Middle: 45 Middle: 46 Middle: 44 Top: 43 Top: 45 Top: 42	Barcol	Valore medio superiore a 40° Barcol	C
7	Contenuto fibre di vetro	ISO 1172 (EX EN60)	9	Base: 53 Base: 55 Base: 55 Middle: 49 Middle: 50 Middle: 50 Top: 48 Top: 50 Top: 47	%	Percentuale di vetro superiore al 45%	C
8	Rigidità dielettrica	ASTM D149	3	Middle: 10,5 Middle: 9,98 Middle: 11,48	kV/mm	Valore di scarica superiore a 4,7-5kV/mm	C
9	Assorbimento acqua 24 ore	UNI ISO 62	9	Base: 0,18 Base: 0,21 Base: 0,27 Middle: 0,79 Middle: 0,85 Middle: 0,62 Top: 0,95 Top: 0,90 Top: 0,70	%	Assorbimento ≤ 1%	C
10	Verifica autoestinguenza	ASTM D 635	3	Base: 1 Base: 1 Base: 1	sec	Tempo di spegnimento inferiore a 5 sec	C

Dopo aver riportato tutte le prove effettuate sui centrifugati, si effettuano delle dovute osservazioni comparando i risultati sperimentali con i valori ricavati con i modelli teorici.

Dalle prove eseguite si può osservare una notevole differenza tra le tensioni massime a compressione e le tensioni massime a trazione in accordo con le aspettative.

Considerando il carico di rottura, si può notare un elevato scostamento tra i dati sperimentali ed i valori ricavati dai modelli teorici e ciò è dovuto a molteplici ragioni come:

- Elevati ritiri durante la cura e fragilità della matrice: nel caso delle prove di trazione si vengono a creare all'interfaccia fibra - matrice delle microcricche che al trascorre del tempo si propagano generando delle cricche vere e proprie che impediscono al rinforzo di poter svolgere il suo compito e quindi di conseguenza innescando la rottura nel materiale composito.
- Non perfetto legame fibra – matrice: la centrifugazione durante il processo crea una pressione sufficiente a impregnare completamente la stuoia, ma non sufficientemente elevata per garantire un perfetto legame fibra – matrice.
- Effetti di microbukling.

Questi fenomeni pertanto spiegano in parte i bassi valori riscontrati nel carico di trazione e la non completa attendibilità dei modelli teorici per la valutazione di tale parametro.

In Tabella 54 si mette in evidenza la comparazione tra i valori riscontrati sperimentalmente e i valori ricavati teoricamente con la teoria delle miscele per quanto riguarda una prova di trazione.

Tabella 54 - Comparazione teorica - sperimentale prova di trazione

	E_{11}	ν	σ_c	$\sigma_c \text{ modificata}$	Variazione σ_c
U.M.	[MPa]	-	[MPa]	[MPa]	%
Teoria delle miscele	22229	0,31	640,85	281	5,3
Sperim.trazione	21405	0,34	297	-	

A differenza della tensione massima, il modulo di Young ricavato in direzione longitudinale ed il coefficiente di Poisson presentano dei valori sostanzialmente allineati tra il modello teorico e il modello sperimentale.

Nel caso dei centrifugati si nota come l'allungamento a rottura del composito sottoposto alla prova di trazione presenta un valore inferiore rispetto ai valori nominali sia della matrice che del rinforzo. Tale anomalia giustifica, nel caso della trazione, l'elevata differenza tra i valori sperimentali ed i valori teorici. Inserendo nella formula delle miscele un opportuno parametro correttivo, che tenga conto della deformazione massima raggiunta dal composito, i valori sperimentali si allineano ai valori teorici.

Una curva stress – strain di un materiale composito può essere determinata conoscendo le curve sforzo deformazione dei suoi costituenti. Nello specifico avremo tre casi:

1. Fibra fragile - matrice fragile
2. Fibra fragile - matrice duttile
3. Fibra duttile - matrice fragile

Nel caso dei centrifugati ci troviamo nel terzo caso e pertanto modificando il grafico utilizzato per la determinazione del carico massimo, si può osservare che la riduzione dell'allungamento massimo a rottura del composito comporta una proporzionale riduzione del carico massimo, come si può notare nelle curva in rosso (Figura 121).

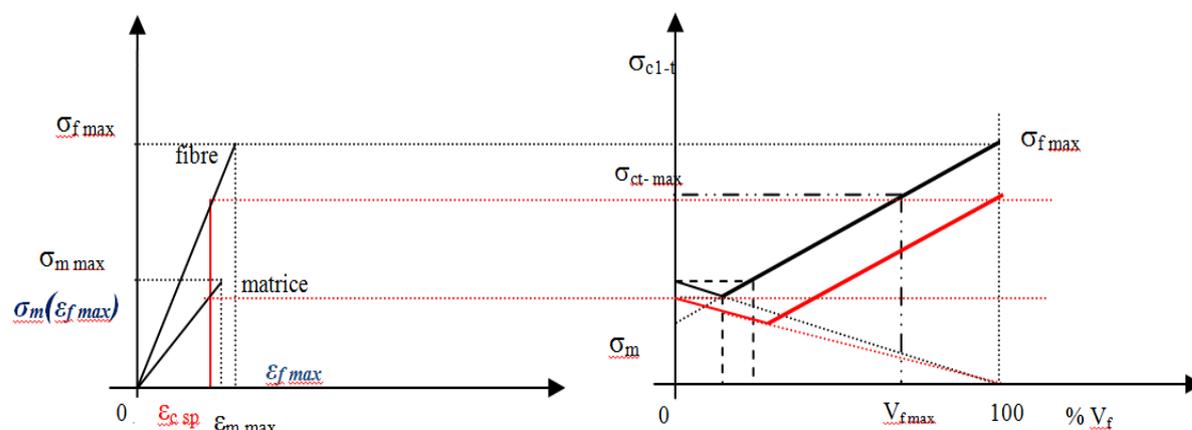


Figura 121 - Condizione fibra duttile - matrice fragile

Per calcolare il valore esatto della tensione di trazione agente lungo il provino bisogna sempre ricordare che la nostra stuoia è costituita da fibre continue unidirezionali (70%) e da fibre gettate in modo random (30%).

1) Fibre continue

$$\epsilon_{f_R} = \frac{\sigma_{f_R}}{E_f} \qquad \epsilon_{m_R} = \frac{\sigma_{m_R}}{E_m} \qquad \epsilon_{f_R} > \epsilon_{m_R}$$

Essendo nel caso di fibra duttile in matrice fragile la formula delle miscele viene modificata andando a inserire al posto della tensione a rottura della fibra σ_{f_R} , la tensione della fibra all'atto della rottura della matrice σ'_f .

$$\sigma_{c_Uni} = \sigma'_f V_f + \sigma_{m_R} (1 - V_f) \quad \text{dove} \quad \sigma'_f = E_f \varepsilon_{m_R}$$

Definita la formula delle miscele per un composito con fibre continue unidirezionali si inserisce all’interno della formula un opportuno coefficiente correttivo che tenga conto del limitato allungamento a rottura.

$$\sigma_{c_Uni} = \frac{\varepsilon_{c_sper}}{\varepsilon_{f_R}} \sigma'_f V_f + \frac{\varepsilon_{c_sper}}{\varepsilon_{m_R}} \sigma_{m_R} (1 - V_f)$$

2) Fibre discontinue

Si calcola innanzitutto il valore della lunghezza critica e poi a seconda che sia maggiore o minore della lunghezza della fibra si calcola il valore della tensione

$$l_c = \frac{d_f \sigma_{f_R}}{2\tau} \quad \text{poiché } l_f > l_c \text{ vale la seguente formula:}$$

$$\sigma_{c_Chopped} = \sigma_{f_R} \left(1 - \frac{l_c}{2l_f}\right) V_f + \sigma'_m (1 - V_f) \quad \text{dove} \quad \sigma'_m = E_m \varepsilon_{f_R}$$

Come fatto nel caso precedente, anche in questo caso si inserisce all’interno della formula un opportuno coefficiente correttivo che tenga conto del limitato allungamento a rottura.

$$\sigma_{c_Chopped} = \frac{\varepsilon_{c_sper}}{\varepsilon_{f_R}} \sigma_{f_R} \left(1 - \frac{l_c}{2l_f}\right) V_f + \frac{\varepsilon_{c_sper}}{\varepsilon_{m_R}} \sigma'_m (1 - V_f)$$

3) Calcolo tensione di trazione teorica

Definiti i valori di tensione per le fibre unidirezionali e per le fibre discontinue disposte in modo random si va a calcolare il valore della tensione teorica del composito ricordando di inserire il 70% per le fibre continue unidirezionali e il 30% per le fibre discontinue disposte in modo random.

$$\sigma_c = \sigma_{c_Uni} \cdot 0,7 + \sigma_{c_Chopped} \cdot 0,3$$

La variazione percentuale tra il valore di tensione ricavato sperimentalmente e il valore di tensione ricavato teoricamente utilizzando questo opportuno fattore correttivo è del 3,6%.

3. Processo di produzione e descrizione prove di collaudo sperimentale dei pali centrifugati

3.1 Stato dell’arte pali GFR centrifugati

Dopo aver effettuato una caratterizzazione completa dei materiali presenti in azienda N.T.E.T S.p.A. l’attenzione dell’attività di ricerca si è focalizzata sul un determinato reparto: il reparto centrifugati. L’obiettivo sarà quello di effettuare una riprogettazione del palo 8 m utilizzato per linee aeree di telecomunicazione in modo da ottenere un risparmio in termini di fibra di vetro utilizzata, di resina iniettata all’interno dello stampo e quindi conseguentemente un risparmio in termini di peso e costo del palo ultimato ottenendo quindi una struttura lightweight (andando a ridurre tutti i possibili sfridi che si creano durante la fase di produzione) senza andare ad alterare troppo sensibilmente la distribuzione delle tensioni lungo tutta la lunghezza del palo.

La produzione dei pali in vetroresina per linee aeree di telecomunicazione in sostituzione dei materiali tradizionali, come il legno e l’acciaio, è in continuo aumento ed ha già stimolato alcuni lavori sull’argomento. La validità dell’impiego dei materiali compositi sta anche, com’è noto, nella possibilità di “progettarli” in una caratterizzazione ottimizzata nei riguardi delle sollecitazioni [42] [43], tant’è che, con riferimento ai laminati, dai casi di anisotropia più spiccata si arriva fino alla considerazione delle componenti quasi isotrope. [44] [45]. Nelle realizzazioni con tali materiali sono usuali i componenti strutturali, o parte di essi, che presentano comportamenti elastici analizzabili nell’ambito di teorie di piastre o di gusci, quando si tratta di spessori relativamente piccoli, può essere sufficiente il riferimento all’ipotesi di Kirchhoff nelle piastre, o a quella analoga di Kirchhoff-Love nei gusci, operando in tal modo nei canoni della cosiddetta classica teoria della laminazione che presuppone stati piani di tensione per le lamine in materiale ortotropo costituenti il laminato. Al crescere dello spessore interviene l’esigenza di tenere conto delle tensioni interlaminari e degli effetti connessi al taglio trasversale con aspetti ancora tanto attuali da caratterizzare in merito approfonditamente la produzione scientifica relativa [46] [47].

Nel 1989, Esposito R. et al., [48] hanno analizzato il comportamento elastico di elementi tubolari, concepiti in stratificazioni di materiale ortotropo validando la teoria classica di laminazione. L’indagine condotta in via numerica con l’uso di un ordinario e disponibile codice di calcolo agli elementi finiti ha consentito di ricavare i moduli elastici equivalenti del materiale in funzione dei parametri preminenti assunti come diametro medio, angoli di impacchettamento, spessore, numero delle lamine e conicità, in modo da poter definire in modo corretto il materiale caratterizzante la singola lamina. Vengono inoltre evidenziati gli sbandamenti laterali connessi alle dissimmetrie di costituzione degli elementi stessi e l’effetto delle azioni taglianti.

Nel 1990, Soprano A. et al., [49] in relazione alle esigenze progettuali connesse alla possibilità di realizzare pali tubolari in vetroresina per il sostegno di linee aeree di telecomunicazione, si sono esposti i risultati numerici corrispondenti ad una casistica sufficientemente estesa relativa a semplici condizioni di carico e di vincolo ed ottenuta in doppio modo, con tecnica agli elementi finiti e con tecnica alle strisce finite. Sono state effettuate inoltre anche delle prove di carico dei componenti stessi, le quali hanno fornito dei risultati ben corrispondenti alle previsioni numeriche, con ciò consentendo di prendere nel caso specifico buoni vantaggi con un adatto perfezionamento del codice numerico impiegato.

Nel 1992, Riccobene M. et al., [50] hanno effettuato dei test prestazionali sul materiale composito fibro-rinforzato utilizzato nella produzione dei pali 8 m per linee di telecomunicazione. I risultati di tale lavoro dimostravano la convenienza dei prodotti fibro-rinforzati se utilizzati in strutture dove erano richieste un’alta resistenza meccanica in campo statico e in campo dinamico. Questo articolo forniva un quadro completo dei test necessari per l’accettazione, conformi agli standard tecnici

richiesti dalla S.I.P.. I risultati mostravano come la non omogeneità di tali materiali influenzava le caratteristiche meccaniche, le quali variavano da ogni singolo campione prelevato dal medesimo prototipo.

Nel 1992, Tricomi D. et al., [51], [52] [53] hanno svolto estensivamente un’analisi parametrica, con il metodo degli elementi finiti, tesa ad individuare i carichi assiali di biforcazione, per buckling elastico lineare, di pali tubolari in vetroresina stratificata. Allo scopo si sono premesse analisi e considerazioni rivolte a definire una densità di discretizzazione compatibile con la precisione desiderata. È stata fatta un’ulteriore sperimentazione, con la quale sono state determinate condizioni di collasso, al fine di determinare la capacità previsionale delle valutazioni teoriche di biforcazione sul fenomeno reale.

Nel 1994, Di Pietro G. et al., [54] sono state effettuate ulteriori ricerche su i pali per supporti di linee aeree di telecomunicazione. Pertanto sono stati impostati i metodi numerici – sperimentali per studiare il comportamento di un palo sotto carico con lo scopo di migliorare le performance meccaniche.

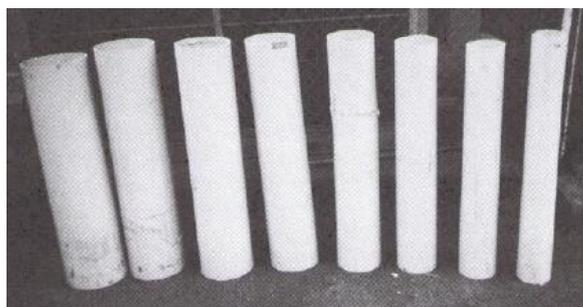


Figura 122 - Palo sezionato ad ogni metro

Informazioni più precise sullo spessore di ognuna delle lamine costituenti il palo (in generale ogni strato di fibra è impregnata da una quantità di resina stabilita), sono state ottenute realizzando otto sezioni trasversali di un palo a differenti quote, partendo dalla base, con passo costante pari ad 1 metro come si evince dalla Figura 122. Ogni sezione è stata osservata mediante un proiettore di profili Nikon V – 12, deducendo lo spessore medio di ogni lamina, pari a 1,1 mm, costante in ogni quota.

Nel 1995, Mirone G. et al., [55] si proposero di analizzare il comportamento sotto carico di un palo tubolare troncoconico utilizzato per il sostegno di corpi illuminanti. Alcune specifiche utilizzazioni prevedono che il palo sia opportunamente asolato con l’asportazione per fresatura di una certa quantità di materiale. Al fine di stabilire, quindi, la variazione dello stato tensionale e deformativo del palo asolato rispetto a quello integro, sono state effettuate alcune prove sperimentali che hanno consentito di calibrare un modello numerico agli elementi finiti. Tale modello, utilizzato per diverse condizioni di carico e di posizione dell’asola rispetto al carico applicato, ha dato utili informazioni su come intervenire, nella fase di processo, per ridurre i picchi di tensione evidentemente presenti in prossimità dell’intaglio.

Nel 1997, Guglielmino E. et al., [56] hanno effettuato uno studio su dei pali utilizzati per il sostegno di segnali ferroviari permanenti luminosi e delle sovrastrutture necessarie alla manutenzione degli stessi. Nello specifico è stato fatto un confronto numerico sperimentale sul comportamento di pali realizzati con due diverse tecnologie. Una prima versione del palo è stata realizzata con la tecnologia della centrifugazione utilizzando quindi vetro in stuoie e mat di grammatura e dimensioni opportune, avvolti all’interno di uno stampo rotante nel quale viene iniettata la resina liquida. Allo scopo di ottenere un palo più rigido si è passati ad una differente tecnologia di processo, utilizzando quella della pultrusione, nella quale vengono utilizzati fili intrecciati di roving monoassiale abbinati al mat per ottenere una buona consistenza anche in direzione circonferenziale. Nel lavoro si sono caratterizzate da vicino le differenze sul comportamento dei due manufatti, quantificando oltre che la differenza delle rigidità, anche le differenze nel comportamento dinamico in termini di frequenze proprie. Infine molto interessanti sono gli studi fatti negli anni 2000 da Cappello F. [57] e da Borrelli R. [58].

Dopo aver illustrato brevemente alcuni studi di seguito viene descritto il processo di produzione dei pali in vetroresina in uso presso l’azienda N.T.E.T. S.p.A. Il processo si articola in tre fasi:

- 1) Fase di tessitura delle stuoie
- 2) Fase di produzione palo (fibra + matrice)
- 3) Fase di collaudo sperimentale

3.2 Fase di tessitura delle stuoie

Le stuoie sono realizzate nel reparto tessitura presente all’interno dell’azienda e sono avvolte in bobine accuratamente pesate, sistemate su delle apposite pedane e infine trasportate al reparto pali.

Esse vengono prodotte tessendo fibre lunghe, di diversa densità lineare, poste longitudinalmente con fibre corte gettate sulle fibre unidirezionali in modo random (in tutte le direzioni). In Tabella 55 si è riportata la quantità in peso percentuale dei costituenti la stuoia.²

Tabella 55 - Calcolo % dei costituenti la stuoia

Chopped		UM	Roving		UM	Subbio		UM	Stuoia		UM
N. fili	n.d.		N. fili	n.d.		W	n.d.	[kg]	W	n.d.	[kg]
L filo	n.d.	[m]	W filo 1	n.d.	[g/m]	L filo	n.d.	[m]	L stuoia	n.d.	[m]
W bobina	n.d.	[kg]	W filo 2	n.d.	[g/m]	Sost.	n.d.	ogni 10 giorni	W stuoia	n.d.	[g/m]
Sost.	n.d.		W bobina	n.d.	[kg]	W tot subbi	n.d.	[g/m]			
W chopped	n.d.	[g/m]	W roving 1	n.d.	[g/m]						
%	n.d.		W roving 2	n.d.	[g/m]		n.d.	[g/m]			
			W totale roving	n.d.	[g/m]						
			% Roving 1	n.d.							
			% Roving 2	n.d.							
			% Roving tot	n.d.							
% Chopped	27,8%		% Roving	69,8%		% Subbio	2,5%		% Stuoia	100,0%	

Lo schema di funzionamento della macchina di tessitura è costituito da:

- 1) macchina di trasporto fibre: le bobine di roving 1, roving 2 e chopped vengono sistemate in una ben determinata posizione su degli scaffali opportunamente numerati, in modo da intercettare subito il filo di fibra mancante in caso di fine bobina o rottura filo. Le due tipologie di roving utilizzato danno un elevato rinforzo in direzione longitudinale lungo la direzione di stiro (Figura 123).
- 2) macchina di taglio fibre chopped: tali fibre vengono tagliate con un rullo ad una lunghezza di circa n.d. e hanno la funzione di dare rinforzo in direzione trasversale. La velocità del rullo tagliante viene regolata da un pannello di controllo nel quale viene inserito un valore di velocità di taglio costante (Figura 124).
- 3) macchina cucitura stuoia: le fibre di chopped tagliate vengono successivamente cucite con le due tipologie di roving tramite dei subbi (Figura 125). I subbi non sono altro che dei fili di poliestere che hanno l’importante funzione di unire le fibre unidirezionali di roving e le fibre corte di chopped creando la stuoia vera e propria che poi verrà utilizzata in fase di produzione.³ Nel “cuore” della macchina la cucitura dei roving avviene attraverso un sistema di aghi automatizzati e sincroni.

² Dove non specificato i dati non sono divulgabili per questione di riservatezza aziendale.

³ Il chopped nonostante abbia lo stesso peso del roving 2 risulta essere meno raffinato di quest’ultimo poiché il numero di fibre è inferiore al roving 2. Analoghe considerazioni possono farsi per quanto riguarda la differenza tra i due tipi di roving, in quanto il roving 1 risulta essere molto più raffinato del roving 2 presentando un numero di fibre superiori.

- 4) macchina di sicurezza e controllo lunghezza stuoia: nella macchina di tessitura è presente inoltre un sistema di controllo che ha due funzioni:
- arresta la macchina nel caso di mal funzionamento;
 - controlla la lunghezza della stuoia (la macchina è tarata ad arrestarsi quando vengono raggiunti n.d. metri di stuoia).⁴

- 5) macchina di avvolgimento e taglio stuoia: affinché vengono realizzate tre bobine di larghezza di n.d. cm vengono inserite due lame (Figura 126) che tagliano la stuoia in uscita dalla cucitura.

Qui nelle immagini seguenti vengono mostrate alcune fasi della tessitura della stuoia utilizzata.



Figura 123 - a) Roving 1 e Roving 2; b) chopped



Figura 124 – a) Macchina trasporto fibre unidirezionali; b) Macchina di taglio chopped

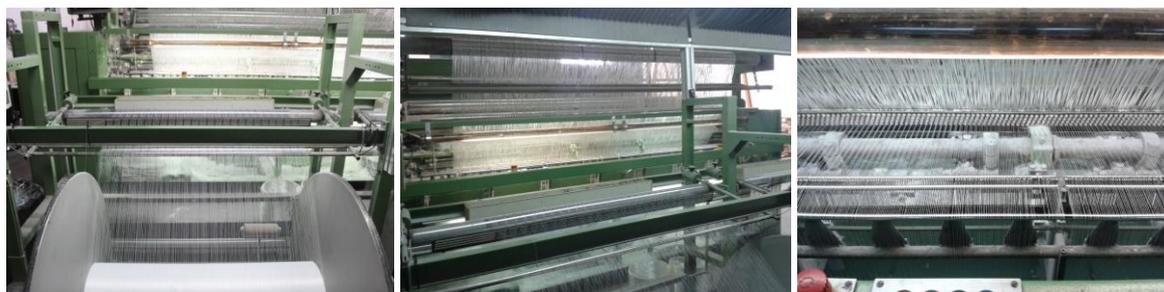


Figura 125 – Macchina di cucitura stuoia

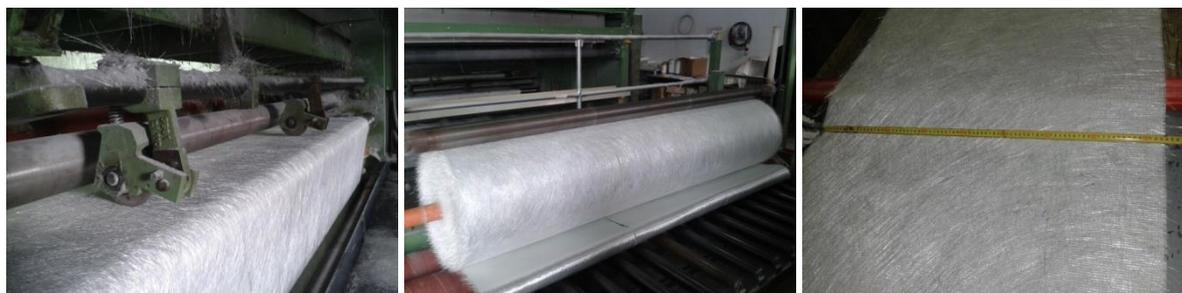


Figura 126 – Macchina di avvolgimento e taglio stuoia

⁴ n.d.= dati non divulgabili poiché coperti da segreto aziendale
Università degli Studi di Messina: Salvatore Molino

3.3 Fase di produzione palo (fibra + matrice)

Le stuoie, provenienti dal reparto tessitura, vengono accuratamente disposte su di un piano di lavoro, (Figura 127), dopo che è stato preventivamente steso un foglio di poliestere (peso di n.d. grammi al metro lineare) che svolge la funzione di rivestimento protettivo delle stuoie, in modo tale che le fibre di vetro siano completamente rivestite dando nel contempo una certa lucentezza al palo ultimato.



Figura 127 - Preparazione palo

Le modalità costruttive del palo 8 metri in vetroresina, prevedono una disposizione delle stuoie rettangolari di differente altezza e distanza dalla base maggiore, su di un anima centrale (che serve solo per dargli la forma cilindrica). Le stuoie vengono disposte ad una distanza di n.d. mm l’una dall’altra in maniera da facilitarne il suo svolgimento all’interno dello stampo centrifuga termoregolabile (Figura 128). All’interno dello stampo si introduce la resina liquida che polimerizza al seguito del riscaldamento della macchina, che avviene per mezzo di resistenze presenti ai lati dello stampo troncoconico.



Figura 128 – Stampo centrifuga termo – regolabile

Lo stampo del centrifugal casting ruota attorno a delle ruote gommate che via via tendono a consumarsi andando avanti nel tempo; pertanto periodicamente bisogna fare manutenzione e nei casi più estremi, in cui siano completamente usurate, bisogna sostituirle per garantire il corretto funzionamento della macchina (Figura 129).



Figura 129 - Ruote gommate

La macchina viene fatta ruotare ad un altissima velocità (circa n.d. giri/min) in modo tale da srotolare le varie stuoie e riscaldare lo stampo per il successivo inserimento della resina. La forza centrifuga ha il compito di forzare il rinforzo contro le pareti, ma anche la funzione importante di far scorrere la

resina spruzzata in testa verso la base del palo andando via via eliminando la resina in eccesso, la quale fuoriesce alla base del palo. Appena il palo è stato totalmente impregnato di resina la velocità di centrifugazione viene abbassata a n.d. giri/min finché la resina non catalizza ed inizia a emanare stirolo volatile. Affinché lo stirolo non si disperda nell’aria, essendo una sostanza tossica, alla base del centrifugal casting viene inserito un aspiratore Figura 130, che aspira lo stirolo prodotto nella fase di catalisi della resina.



Figura 130 – Cappa di aspirazione stirolo

L’impregnazione del palo in vetroresina è facile da notare in quanto le stuoie, inizialmente opache, messe in centrifuga, risultano essere lucide una volta che la resina ha impregnato tutto il palo. A tal punto il palo, indurito all’interno dello stampo, è pronto ad essere estratto dalla macchina. L’operazione di produzione di un palo in vetroresina si fa dura circa 15/20 min. I vantaggi di utilizzare un sistema di produzione come quello descritto è quello di ottenere una produzione di corpi cavi aventi due facce lisce (interna ed esterna); minimo impiego di manodopera, potendo utilizzare attrezzature altamente automatizzate; bassa incidenza degli sfridi di materiali; e infine possibilità di ottenere corpi troncoconici lunghi fino a 12 metri.

Punti critici nella produzione di un palo in vtr ovviamente saranno quelli di passaggio tra due sezioni con differente numero di strati ma anche le zone lungo la superficie laterale in cui gli strati di fibra si incrociano o terminano in differenti posizioni a causa della forma troncoconica del palo.

3.3.1 Agenti utilizzati per la realizzazione dei pali in GFR

Gli agenti utilizzati in fabbrica per la produzione dei pali in vetroresina sono:

- 1) resina poliester orto – ftalica: tale resina è ottenuta dall’unione di un glicole propilenico con un acido saturo (acido ftalico) , che facilita la compatibilità della resina con il monomero, e con un acido insaturo (acido maleico), nella cui struttura la presenza del doppio legame influenza la reattività della resina (Figura 131).

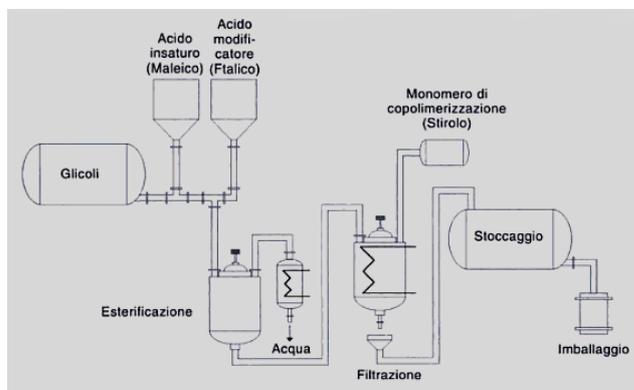


Figura 131 - Sistema di produzione resina orto – ftalica



Figura 132 - Resina poliester orto – ftalica

- 2) catalizzatore: i catalizzatori per le resine poliesteri sono normalmente dei perossidi organici dai quali si ottengono i radicali necessari per l’indurimento della resina. Tali perossidi sono delle

sostanze volatili e bisogna far molta attenzione quando li si manipola. Generalmente i perossidi si decompongono in radicali lentamente a temperatura ambiente poiché altrimenti sarebbero molto reattivi, ma tuttavia, per ottenere tempi di reazione sufficienti, si velocizza la loro decomposizione con acceleranti.⁵

- 3) accelerante di cobalto Co: gli acceleranti, sono riducenti chimici che attivano la decomposizione dei perossidi e la loro scelta dipende dal tipo di perossido stesso. L’accelerante utilizzato in azienda è il cobalto che essendo un sale di metallo pesante conferisce un certo peso alla resina. Su una vasca di n.d. kg di resina viene inserito dai n.d. ai n.d. grammi di cobalto a seconda della temperatura esterna. Infatti nel caso in cui esternamente viene registrata una temperatura molto bassa (durante la produzione notturna), l’operatore è costretto ad inserire una quantità maggiore di accelerante in modo tale da poter attaccare il perossido e far avvenire la catalisi.
- 4) pigmento grigio RAL 7035: il pigmento utilizzato nella produzione dei pali Telecom in vtr è un grigio RAL 7035 e nello specifico vengono inseriti n.d. kg di pigmento su un totale di n.d. kg di resina poliesteri.

3.3.2 Processo di catalisi pali in GFR

Le resine poliesteri insature, UP, si presentano in commercio sotto forma di liquidi più o meno viscosi a seconda dei tipi. L’indurimento avviene mediante l’aggiunta di catalizzatori perossidici che per azione del calore o di particolari attivatori detti acceleranti, come il naftenato, l’ottoato di cobalto o le ammine terziarie si decompongono in radicali liberi promuovendo così la copolimerizzazione radicalica delle resine poliesteri insature con i monomeri che le tengono in soluzione.

Il processo di copolimerizzazione delle resine poliesteri inizia con un progressivo inviscosamento della resina, la quale dopo essersi trasformata in stato gelatinoso, indurisce sviluppando calore. Le resine indurite assumono quindi struttura reticolata e con essa tutte le caratteristiche dei prodotti termoindurenti. Variando la natura dei componenti della resina, impiegando cioè glicoli di natura differente e acidi a peso molecolare più o meno elevato, si possono ottenere resine con le più diverse caratteristiche meccaniche, termiche, chimiche o elettriche.

Nel processo produttivo la resina viene miscelata con dei mescolatori a braccia o a elica (Figura 133) preferendo velocità lente e costanti, evitando di inglobare aria e quindi la possibilità di produrre pezzi difettosi. L’ordine di miscelazione è il seguente: resina, pigmenti, accelerante e catalizzatore.



Figura 133 – a) Vasche di miscelazione della resina; b) impostazione catalizzatore

Dopo che la resina UP è stata miscelata con il pigmento RAL 7035 ed il cobalto nelle vasche di miscelazione, passa all’interno di una tubazione ed arriva ad un sistema di comando in cui l’operatore va ad impostare il numero di battute (quantità di resina accelerata) per effettuare la completa impregnazione del palo. Dopo aver impostato la quantità di resina accelerata si imposta la % di catalizzatore e si procede all’impregnazione del palo tramite una pistola di insufflaggio.

I fattori che influiscono sul tempo di gelificazione, e quindi lo stato finale di polimerizzazione, sono:

⁵ Se si mescola un perossido con un accelerante puro o diluito, o con qualsivoglia sostanza riducente, può aver luogo una reazione di tipo esplosivo. Per tale motivo il perossido e l’accelerante non devono mai essere mescolati direttamente.

- a) contenuto di catalizzatore;
- b) contenuto di accelerante;
- c) temperatura di lavoro; (Nel nostro caso si è notato che la resina inizia a catalizzare quando viene raggiunta una temperatura tra i 60°C e i 70°C. Avvenuta la catalisi la temperatura dello stampo arriva ad oltre 100°C).

3.3.3 Sistema di taglio, imballaggio e trasporto.

Una volta estratto dal centrifugal casting e fatto un preliminare esame visivo, per notare se sono presenti delle difettosità, sui pali in vetroresina vengono effettuati dei tagli di testa e di base (Figura 134) e poi inseriti all’interno di bancali per poi essere spediti ai vari committenti (Figura 134).

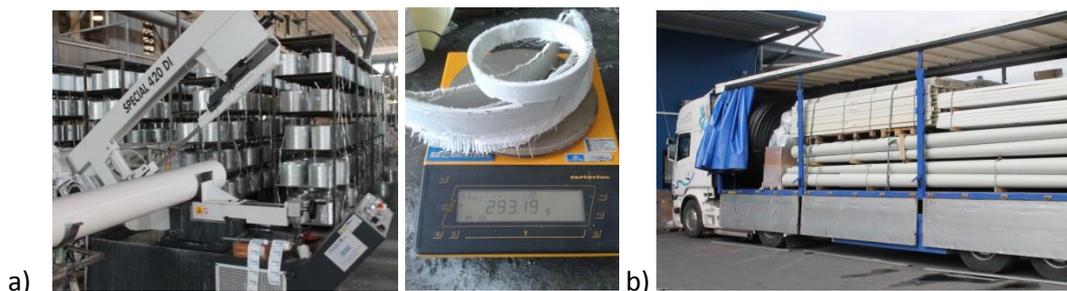


Figura 134 – a) Sistema di taglio palo; b) imballaggio e trasporto

3.4 Fase di collaudo sperimentale

I pali leggeri unificati Telecom da 8 m realizzati con resina poliestere e fibre di vetro, utilizzati per linee di telecomunicazioni, (Figura 135) devono rientrare all’interno di una specifica di riferimento, rispettando le caratteristiche tecniche, costruttive e le condizioni di accettazione al collaudo; in sintesi, detti pali devono avere i sotto - elencati requisiti Tabella 56:

Tabella 56 - Norme di riferimento capitolato Telecom

	Capitolato Telecom	Prototipo_01	Prototipo_02	Prototipo_03
Descrizione	Palo 8 m VTR	Palo 8 m VTR	Palo 8 m VTR	Palo 8 m VTR
Tiro in testa minimo di rottura	4000 N	5000 N	5000 N	5000 N
Spessore (s)	> 3,5 mm	> 3,5 mm	> 3,5 mm	> 3,5 mm
Lunghezza (L)	8 m	8 m	8 m	8 m
Diametro in testa (d)	115 ÷ 125 mm	120 ± 5 mm	120 ± 5 mm	120 ± 5 mm
Diametro alla base (D)	245 ÷ 280 mm	270 ± 5 mm	270 ± 5 mm	270 ± 5 mm
Massa	37 kg (valore minimo 34,4 kg)	44 ± 2 kg	42 ± 2 kg	41 ± 2 kg

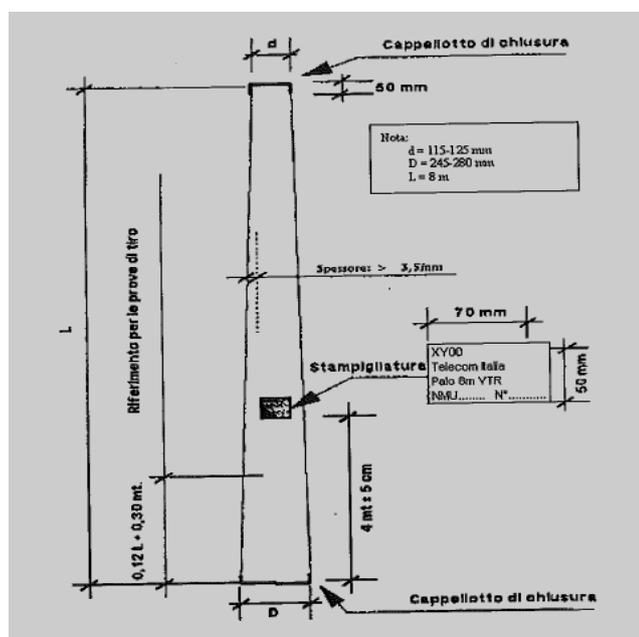


Figura 135 - Dimensioni palo troncoconico

Una volta realizzati i pali 8 m Telecom (costituito da un unico pezzo troncoconico, cavo, monolitico e da due cappellotti di chiusura alle due estremità) sono effettuate varie prove, prelevando a caso dalla produzione un lotto di 10 pali, assicurandoci identico tempo di stagionatura e composizione. Devono essere verificati preliminarmente i requisiti dell’apparecchiatura di prova, dopo di che si esegue una determinata sequenza di prove: esame a vista e verifiche, verifica di siglatura etichetta, prova di durezza, prova di caduta, prove di chiusura cappellotti, prova di schiacciamento, prova di tiro rotatorio, prova a carico variabile, prova di tiro in testa.

3.4.1 Esame a vista sui pali

L’esame a vista è il primo esame che viene effettuato su di un palo in vetroresina e viene fatto prima e dopo le prove meccaniche a cui il palo viene sottoposto in modo da scongiurare eventuali difettosità.

Le osservazioni che vengono fatte sul palo prima e dopo che vengono effettuate le prove meccaniche sono:

- a) la geometria del palo deve risultare troncoconica, rettilinea e priva di qualsiasi difetto che potrebbe compromettere il suo corretto utilizzo;
- b) il palo, costituito da resine poliesteri rinforzata con fibre di vetro, deve essere di colore grigio RAL 7035 uniforme o marrone RAL 1011 con trama in legno;
- c) verificare che la finitura di tutte le superfici esterne del palo evitando fibre di vetro affioranti, screpolature e delaminazioni che potrebbero indurre danni all’operatore che si occuperà all’installazione del palo;
- d) evitare la presenza di non corretti avvolgimenti delle stuoie all’ interno del palo;
- e) evitare la presenza di bolle sulla sua superficie (esterna ed interna) che possono creare punti di massima concentrazione degli sforzi;
- f) verificare la presenza del tessuto protettivo esterno su tutta la superficie del palo;
- g) verificare la non ovalizzazione della sezione alla base e alla testa del palo una volta che viene estratto dal bancale;
- h) verificare le dimensioni del palo (lunghezza 8 m, diametro esterno di base 270 mm, diametro esterno di testa 120 mm e spessore del palo circa 5 mm);
- i) verificare la massa del palo e controllare che rientri nelle specifiche tecniche Telecom;
- j) Una volta effettuate le prove meccaniche bisogna accertarsi che il palo non abbia subito deformazioni ed ammacchi che possono compromettere la funzionalità e l’efficienza.

3.4.2 Verifica di siglatura dell’etichetta

Subito dopo che i pali vengono prodotti e prima che i pali vengano testati vengono applicate delle targhette che precedentemente devono resistere a dei test di esposizione ai raggi UV per un dato periodo di tempo a Temperature variabili a seconda del clima e del luogo in cui verranno installati.

Su tale targhetta autoadesiva posta a 4 m dalla base (+/- 5 cm), devono essere riportate le seguenti indicazioni: nome o sigla del costruttore; anno di costruzione (è ammesso indicarlo con le ultime due cifre); logo Telecom Italia; dicitura “Palo 8 m vtr”; numero progressivo per la rintracciabilità.



Figura 136 – Verifica di siglatura dell’etichetta

3.4.3 Prova di durezza superficiale

La prova di durezza superficiale deve essere eseguita su tutti i pali in vtr prima di essere testati con le prove meccaniche e deve essere conforme alla Norma UNI EN 59.

La misura di durezza deve essere fatta direttamente sulla superficie esterna dei pali usando un durometro Barcol (Figura 137).

Il durometro di Barcol è un tester di durezza basato su un funzionamento semplice, rapido e non distruttivo. La prova viene effettuata posizionando il campione (in questo caso una qualsiasi sezione di palo) sotto l’ago dello strumento e viene applicata una pressione uniforme al campione. La profondità della penetrazione viene convertita nel valore di durezza Barcol in una scala da 0 a 100.

Il tester di durezza Barcol è il metodo più affidabile ed economico per verificare la durezza dei prodotti plastici rinforzati con fibra di vetro, alluminio e sue leghe, ottone, gomma, vetro e pelle.

La durezza media di 10 letture, eseguite su tutta la superficie esterna del palo per tutta la sua larghezza è pari a circa 48 Barcol.



Figura 137 - Durometro Barcol

3.4.4 Prova su cappellotti di chiusura

I cappellotti di chiusura alle estremità del palo, devono essere di PVC rigido o di vetroresina con identico colore del palo su cui si installano (grigio RAL 7035 o marrone RAL 1011) e devono essere ottenuti per stampaggio in un solo pezzo. Ovviamente per i cappellotti di chiusura valgono tutti i discorsi fatti precedentemente sul palo in vtr, ovvero devono essere privi di incrinature, lesioni, inclusioni, bruciature, deformazioni, ammacchi, e di qualsiasi altro difetto che possa compromettere la funzionalità e l’efficienza. Il montaggio di tali cappellotti di chiusura viene fatto manualmente (Figura 138).



Figura 138 - Cappellotti di chiusura

3.4.5 Prova di caduta

I pali selezionati, sostenuti orizzontalmente, dovranno subire una caduta libera dall’altezza di 2 metri sull’asfalto (Figura 139), o su suolo di equivalente consistenza, senza presentare screpolature o lesioni.



Figura 139 - Prova di caduta da 2 m sull'asfalto

3.4.6 Prova di schiacciamento in testa al palo

I pali selezionati, per una lunghezza fino a 80 cm dalla testa, devono sopportare una prova di schiacciamento effettuata mediante la chiusura di un collare (collari d’amarro ellittici, Figura 140) con

una coppia di serraggio dei due bulloni (M36) pari a 40 N*m effettuata con un opportuna chiave dinamometrica.

Prima di effettuare la prova di tiro rotatorio, la prova assiale, la prova ciclica e la prova di tiro in testa, bisogna preliminarmente fare una breve descrizione dell’attrezzature prese in esame.

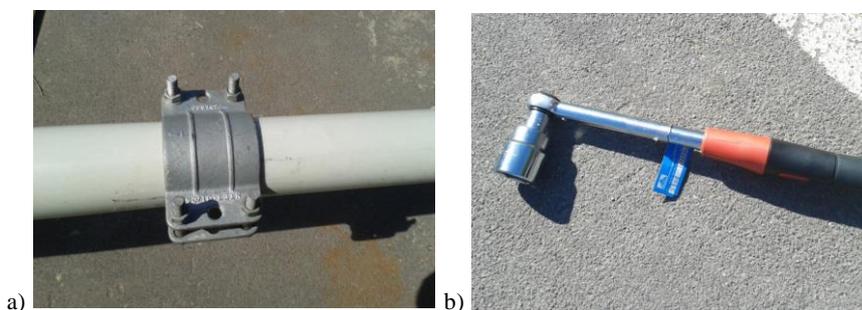


Figura 140 – a) collare di schiacciamento; b) chiave dinamometrica

3.4.7 Attrezzature utilizzate per effettuare le prove sui pali

Per effettuare le prove sui pali è preliminarmente necessario definire le attrezzature di lavoro:

- 1) **interramento**: per tutte le prove meccaniche è previsto alla base del palo un incastro, che ha il compito di simulare l’interramento del palo (Figura 141).

Secondo normativa tecnica l’interramento è calcolato dalla seguente formula:

$$\text{Interramento} = 0,12 H + 30 \text{ cm} \quad \longrightarrow \quad 0,12 * 800 \text{ cm} + 30 \text{ cm} = 126 \text{ cm}$$

Dove: “H” rappresenta l’altezza del palo

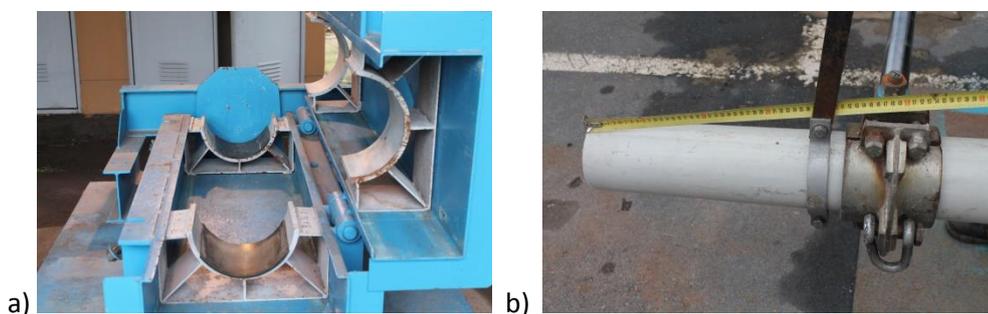


Figura 141 – a) Ganasce di bloccaggio palo in vtr; b) montaggio del collare

I pali selezionati per la realizzazione delle varie prove, devono sopportare una prova di schiacciamento che avviene mediante la chiusura del sistema di bloccaggio con gli appositi bulloni (4 M24), che hanno la funzione di bloccare le ganasce.

Tra il palo vtr e le ganasce metalliche, vengono messe delle gomme per non danneggiare il palo tramite gli spigoli vivi delle ganasce stesse e per avere un afferraggio superiore garantendo il perfetto incastro del palo. Effettuate le prove, si aprirà il sistema di bloccaggio ed il palo non dovrà presentare né lesioni né deformazioni permanenti.

- 2) **montaggio collare**: viene montato un collare unificato a 50 cm dalla testa del palo (Figura 141) che ha il compito di fissare il palo con il pistone tramite l’ausilio di opportune viti di fissaggio.
- 3) **laser e sistema di registro dati**: prima di effettuare le prove, viene posto un laser ad una determinata distanza dal palo, il quale emetterà un fascio luminoso contro uno schermo posto all’incirca sul collare del palo. Man mano che le prove vengono effettuate i valori numerici di deflessione e di carico vengono registrati ed inviati su di un pc (Figura 142).

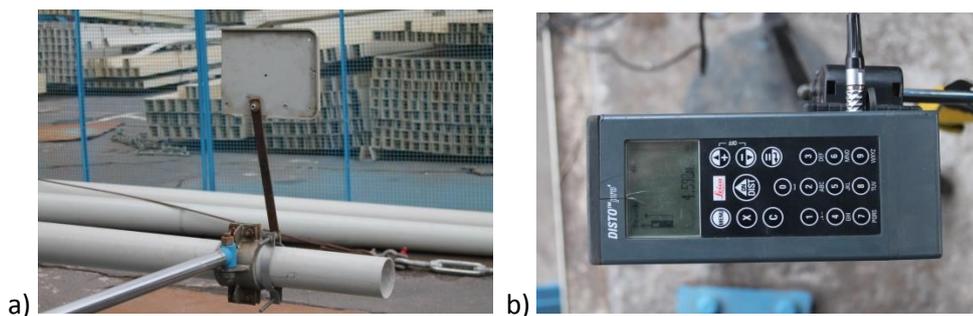


Figura 142 – a) schermo; b) laser

- 4) **pistone idraulico o argano a motore**: la prove di tiro rotatorio, la prova assiale, la prova ciclica e la prova di tiro in testa vengono effettuate tramite un pistone idraulico. Il funzionamento è molto semplice in quanto, quando viene avviata la prova, lo stelo o pistone, scorre all’interno del corpo cilindrico per effetto della pressione contenuta da un fluido (olio idraulico) presente all’ interno del cilindro. Ad un estremità il pistone è munito di attacchi ad occhiello, nei quali viene collegato un perno adatto a collegarlo all’organo meccanico da collegare (il collare posto in testa al palo).



Figura 143 – a) pistone idraulico; b) argano a motore

3.4.8 Prova di tiro rotatorio

I pali selezionati, vengono sottoposti ad una forza in testa di 1500 N in tre direzioni differenti poste a 120° tra loro e sarà mantenuto per 30 secondi.

Per ogni tiro dovrà essere registrato il valore della freccia corrispondente. I tre valori di freccia così ricavati andranno confrontati individuando la zona di maggior deflessione del palo. La direzione di maggior flessione del palo sarà quella in direzione della quale saranno applicate le sollecitazioni delle prove successive Figura 144.

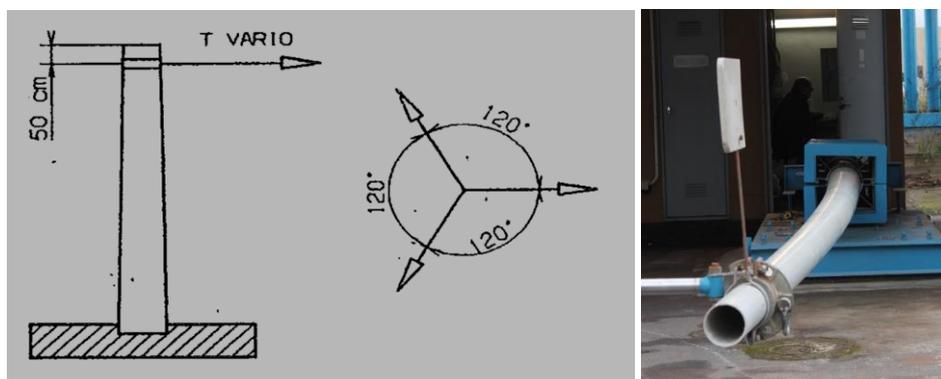


Figura 144 - Prova rotatoria

3.4.9 Prova di tiro assiale

I pali saranno sottoposti ad un carico assiale di 22000 N applicato secondo lo schema di Figura 145 per la durata di 15 minuti. Durante l’applicazione del carico non si dovrà verificare perdite di forma

(bukling) e al termine della prova, dopo la rimozione del carico, non si dovranno rilevare (mediante ispezione visiva) né rotture né deformazioni permanenti.

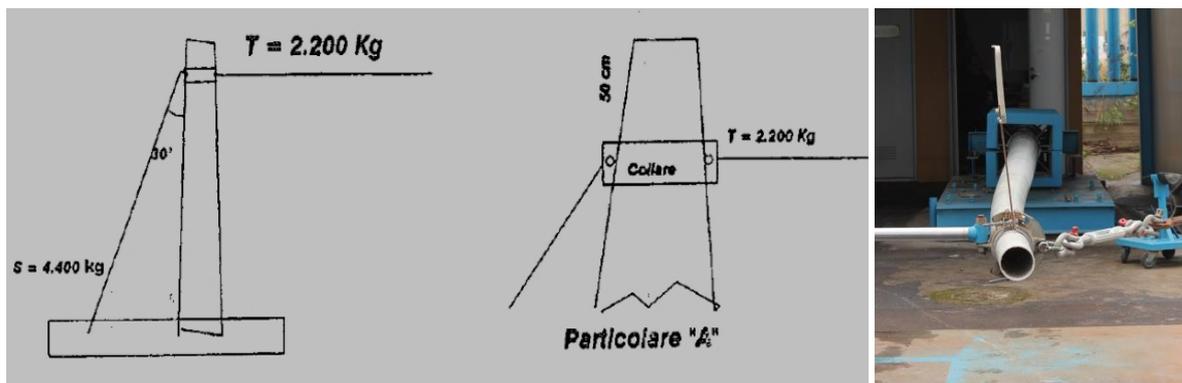


Figura 145 - Prova di tiro assiale

3.4.10 Prova ciclica

La prova ciclica sui pali 8 m VTR ha il compito di “stressare” le fibre di vetro e preparare il palo alla successiva prova di rottura. La forza viene applicata nella direzione di maggior flessione (precedentemente individuata), dovrà essere di ± 2500 N e dovrà essere applicato per 20 cicli complessivi con periodo di 1 min/ciclo. La forza viene applicata montando il collare a 20 cm dalla testa del palo. Nella Figura 146 si notano le due fasi che sono presenti in una prova ciclica.

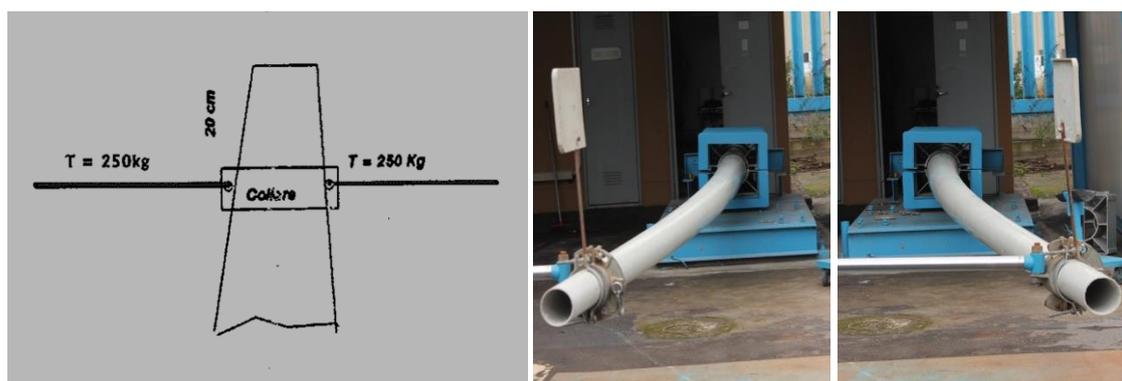


Figura 146 – Prova ciclica applicando una forza di ± 2500 N

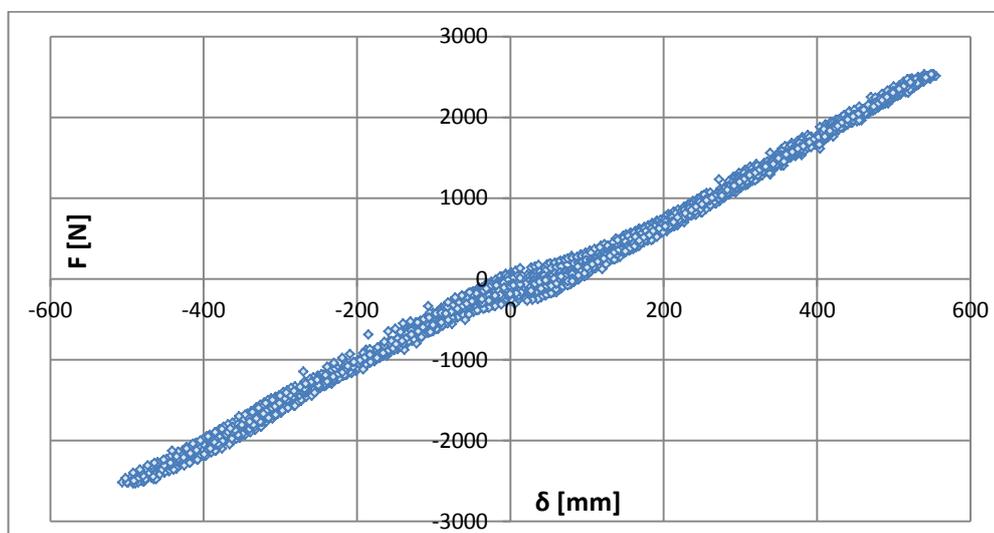


Figura 147 - Grafico prova ciclica

3.4.11 Prova di tiro in testa

La prova di tiro in testa (Figura 148) viene effettuata come ultima prova ed è utilizzata per testare la flessione del palo. La forza sarà applicata tramite apposito collare a 50 cm dalla cima del palo nella direzione di maggior flessione (precedentemente individuata dalla prova di tiro rotatorio).

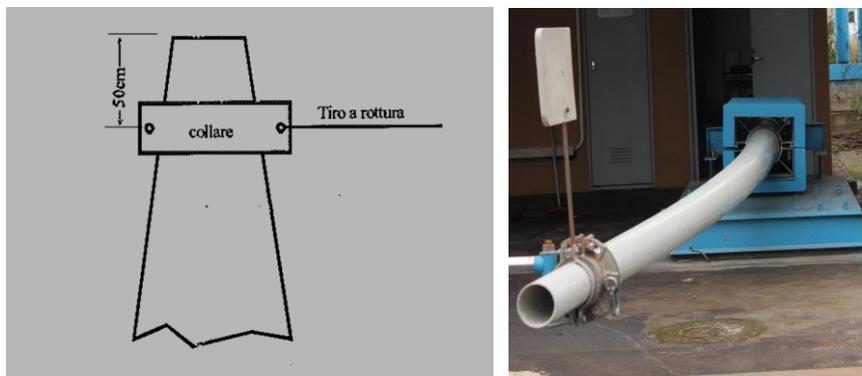


Figura 148 – Prova di tiro in testa

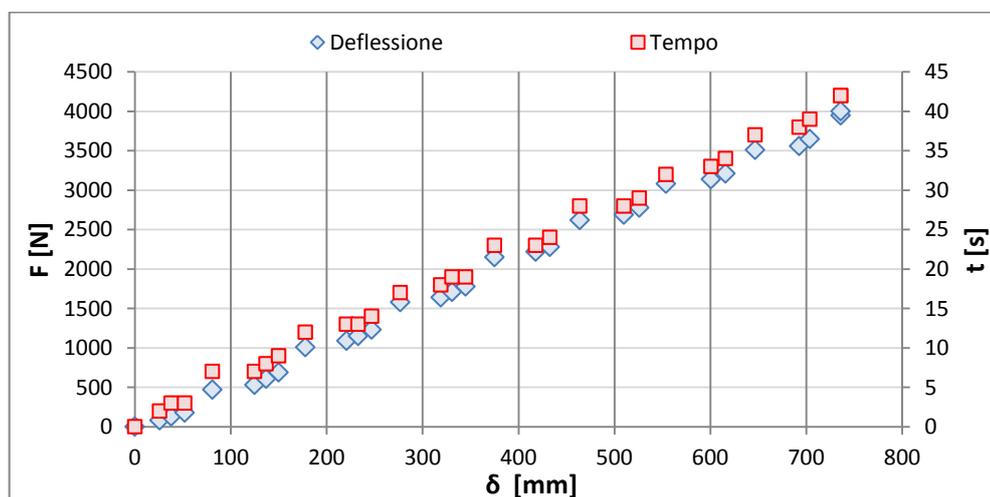


Figura 149 - Grafico prova di tiro in testa

Durante la prova saranno verificate le entità delle deflessioni, misurate nel punto di applicazione della forza. I valori delle deflessioni limite da rispettare secondo capitolato Telecom sono riportati in Tabella 57.

Tabella 57 - Valori limite frecce secondo capitolato Telecom

F [N]	δ [mm]
1000	420
2500	1070
4000	1900

Dove: F = forza applicata;
 δ = deflessione del palo

Per maggior sicurezza la prova di tiro in testa viene effettuata facendo arrivare il carico a 5000 N senza che il palo arrivi a rottura.

4. Analisi analitico – numerico - sperimentale su differenti prototipi centrifugati

4.1 Metodo Analitico

Durante il **secondo anno** di Dottorato, l’attività di ricerca si è focalizzata sul reparto centrifugati andando ad effettuare una riprogettazione del palo 8 m Telecom Italia in modo da ottenere un risparmio in termini di fibra di vetro utilizzata, di resina iniettata all’interno dello stampo e quindi conseguentemente un risparmio in termini di peso e costo del palo ultimato (andando a ridurre tutti i possibili sfridi che si creano durante la fase di produzione).

Partendo dal palo standard 8 m (prototipo_01) Telecom Italia in produzione presso N.T.E.T. S.p.A. sono state sviluppate nuove configurazioni di palo che hanno portato al raggiungimento dell’obiettivo richiesto in fase iniziale dell’attività di ricerca. Per realizzare tutto ciò è stato impostato un preliminare modello analitico con il quale sono realizzati due prototipi.

- 1) Il prototipo_02 modifica la lunghezza delle varie stuoie;
- 2) Il prototipo_03 modifica oltre che la lunghezza anche la geometria delle stuoie interne facenti parte la stratificazione del palo.

La necessità di impostare il prototipo_03 è nata poiché con i prototipi precedenti si è riscontrata una piccola quantità di pali che venivano scartati perché presentavano delle difettosità superficiali che non pregiudicavano l’aspetto meccanico ma l’ispezione visiva del palo ultimato. La progettazione analitica-numerica-sperimentale viene fatta simulando la prova di tiro in testa.

Le caratteristiche meccaniche di fibra e matrice sono riportate in capitolo 1 dove è stata fatta l’introduzione ai materiali compositi e le descrizioni delle tecnologie di lavorazione.

Si definisce innanzitutto la frazione volumetrica della fibra presente all’interno del palo in composito tramite la seguente formula:

$$V_f = \frac{W_f/\rho_f}{W_f/\rho_f + W_m/\rho_m} = \frac{W_f/\rho_f}{W_f/\rho_f + (1 - W_f)/\rho_m}$$

dove: $W_f = w_f/w_c$ frazione in peso di fibra

$W_m = w_m/w_c$ frazione in peso di matrice

ρ_f = densità della stuoia

ρ_m = densità della matrice

In Tabella 58 alcuni parametri fondamentali per impostare il modello analitico.

Tabella 58 - Calcolo V_f

Stuoia									
Parametri	L_{stuoia}	l_{stuoia}	h_{stuoia}	m_{stuoia}	V	ρ_f	ρ_m	V_f	V_m
U.M	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[mm ³]	[g/cm ³]	[g/cm ³]	-	-
-	1000	830	1	860	830000	2,56	1,14	0,32	0,68

Dove: L_{stuoia} = lunghezza; l = larghezza; h = spessore; m = peso su 1 metro di stuoia; V = volume; ρ_f = densità della fibra; ρ_m = densità della matrice; V_f = frazione volumetrica di fibra; V_m = frazione volumetrica di matrice. Definita V_f , si sono successivamente impostati tutti i restanti parametri per l’impostazione di un buon modello analitico che potesse dare una prima risposta iniziale sul come progettare i prototipi di palo che poi saranno sottoposti alle prove di collaudo sperimentale.

- 1) overlap (h_n) = $\frac{\sum h_{\text{stuoie non impregnate}} \cdot \text{larghezza stuoia}}{2 \cdot \pi \cdot r_e}$
- 2) Spessore (h) = $h_n \cdot \text{stuoia impregnata}$
- 3) Diametro interno (d_i) = $d_e - 2 \cdot h$
- 4) Momento flettente $M_f = F \cdot (z_i - z_{(i-1)})$
- 5) Momento d’inerzia (I) = $\frac{\pi}{4} \cdot (r_e^4 - r_i^4)$
- 6) Volume (V) = $\left[\pi \frac{(z_i - z_{(i-1)})}{3} \cdot (r_{ei}^2 + r_{e(i-1)} \cdot r_{ei} + r_{e(i-1)}^2) - \pi \frac{(z_i - z_{(i-1)})}{3} \cdot (r_{ii}^2 + r_{i(i-1)} \cdot r_{ii} + r_{i(i-1)}^2) \right]$
- 7) Tensione a flessione (σ_f) = $\frac{M_f}{I} \cdot y = \frac{32 \cdot M_f \cdot d_e}{\pi \cdot (d_e^4 - d_i^4)}$
- 8) Rotazioni (α) $\Delta \alpha_i = \frac{M_{i-1} - M_i}{2} \cdot \frac{l_i - l_{i-1}}{E \cdot I} \rightarrow \alpha = \sum \Delta \alpha_i$
- 9) Deflessioni (f) $\Delta f_i = \frac{2 \cdot M_{(i-1)} - M_i}{3} \cdot \frac{(l_i - l_{(i-1)})^2}{2 \cdot E \cdot I} \rightarrow f = f_{i-1} + (z_i - z_{(i-1)}) \cdot \alpha_{i-1} + \Delta f_i$
- 10) Peso specifico (p_c) = $p_m \cdot \chi_m + p_f \cdot \chi_f$
- 11) Peso teorico (Pt) = $V_{\text{tot}} \cdot p_c + (W_{\text{velo}})$

Dove: h_n = numero di avvolgimenti della stuoia non impregnata all’interno dello stampo; h= spessore stuoia impregnata; d_e = diametro esterno; d_i = diametro interno; F= forza applicata; $(z_i - z_{(i-1)})$ = variazione di quota; M_f = momento flettente; r_e = raggio esterno; r_i = raggio interno; Δf = variazione deflessione; $\Delta \alpha_i$ = variazione rotazione χ_m = frazione volumetrica matrice; χ_f = frazione volumetrica fibra; p_m = peso specifico matrice; p_f = peso specifico fibra; W_{velo} = peso del velo utilizzato come rivestimento del palo.

4.1.1 Analisi dei risultati: Metodo Analitico

Nelle tabelle seguenti vengono riportati brevemente tutti i valori di deflessione e di tensione ricavati con il metodo analitico relativi a ogni prototipo progettato. Di seguito verranno diagrammati:

- In Figura 150 i valori di deflessione analitica al variare della forza applicata;
- In Figura 151 i valori delle deflessioni analitiche, registrate a carico massimo, dei vari prototipi;
- In Figura 152 i valori delle tensioni normali analitiche, registrate a carico massimo, dei vari prototipi. Il grafico presenta dei salti dovuti a una discontinuità di spessore.

Tabella 59 – Riepilogo risultati analitici prototipo_01

L [mm]	Forza = 1000 [N]		Forza = 2500 [N]		Forza = 4000 [N]		Forza = 5000 [N]	
	δ	σ	δ	σ	δ	σ	δ	σ
UM	[mm]	[MPa]	[mm]	[MPa]	[mm]	[MPa]	[mm]	[MPa]
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1161,61	0,00
250	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1090,92	0,00
500	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1019,65	0,00
750	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	947,51	0,00
1000	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	875,35	0,00
1250	0,00	0,00	0,01	0,00	0,02	0,00	804,05	0,00
1500	0,33	28,80	0,83	72,00	1,33	115,20	734,41	144,00
1750	1,31	28,21	3,29	70,54	5,26	112,86	667,12	141,07
2000	2,95	27,60	7,37	69,01	11,79	110,41	602,75	138,01
2250	5,23	26,96	13,08	67,41	20,93	107,85	541,21	134,82
2500	8,16	26,30	20,41	65,74	32,66	105,18	482,34	131,48
2750	11,74	25,60	29,35	63,99	46,95	102,38	426,38	127,98
3000	15,95	24,86	39,88	62,15	63,80	99,45	373,56	124,31
3250	20,79	24,09	51,98	60,23	83,18	96,37	324,05	120,46
3500	26,26	23,28	65,65	58,21	105,05	93,13	278,03	116,41
3750	32,44	29,26	81,09	73,14	129,74	117,02	235,64	146,28
4000	39,40	28,05	98,49	70,13	157,59	112,21	196,98	140,26
4250	47,13	26,78	117,82	66,96	188,51	107,14	162,18	133,92
4500	55,61	25,44	139,02	63,61	222,43	101,77	131,31	127,22
4750	64,81	24,02	162,03	60,06	259,24	96,10	103,97	120,12
5000	74,71	22,52	186,78	56,30	298,85	90,08	79,75	112,60
5250	85,28	20,92	213,19	52,30	341,11	83,69	58,69	104,61
5500	96,47	19,22	241,17	48,05	385,87	76,87	40,82	96,09
5750	108,24	17,40	270,61	43,50	432,97	69,60	26,16	87,00
6000	120,55	15,45	301,37	38,63	482,20	61,81	14,74	77,26
6250	133,42	19,30	333,56	48,25	533,70	77,20	6,57	96,51
6500	146,88	16,01	367,21	40,02	587,53	64,03	1,66	80,04
6750	160,81	12,47	402,02	31,16	643,24	49,86	0,02	62,33
7000	175,07	8,64	437,68	21,61	700,28	34,57	0,01	43,21
7250	189,50	3,54	473,76	8,84	758,01	14,15	0,00	17,68
7500	203,93	0,00	509,82	0,00	815,72	0,00	0,00	0,00
7750	218,18	0,00	545,46	0,00	872,74	0,00	0,00	0,00
8000	232,32	0,00	580,81	0,00	929,29	0,00	0,00	0,00

Tabella 60 – Riepilogo risultati analitici prototipo_02

L [mm]	Forza = 1000 [N]		Forza = 2500 [N]		Forza = 4000 [N]		Forza = 5000 [N]	
	δ	σ	δ	σ	δ	σ	δ	σ
UM	[mm]	[MPa]	[mm]	[MPa]	[mm]	[MPa]	[mm]	[MPa]
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
250	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
500	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
750	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1000	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00
1250	0,00	0,00	0,01	0,00	0,02	0,00	0,02	0,00

1500	0,33	28,80	0,83	72,00	1,33	115,20	1,66	144,00
1750	1,31	28,21	3,29	70,54	5,26	112,86	6,57	141,07
2000	2,95	27,60	7,37	69,01	11,79	110,41	14,74	138,01
2250	5,23	26,96	13,08	67,41	20,93	107,85	26,16	134,82
2500	8,16	26,30	20,41	65,74	32,66	105,18	40,82	131,48
2750	11,74	25,60	29,35	63,99	46,95	102,38	58,69	127,98
3000	15,95	24,86	39,88	62,15	63,80	99,45	79,75	124,31
3250	20,79	24,09	51,98	60,23	83,18	96,37	103,97	120,46
3500	26,36	30,40	65,89	76,00	105,42	121,59	131,78	151,99
3750	32,72	29,26	81,80	73,14	130,87	117,02	163,59	146,28
4000	39,87	28,05	99,67	70,13	159,48	112,21	199,35	140,26
4250	47,79	26,78	119,47	66,96	191,16	107,14	238,95	133,92
4500	56,46	25,44	141,15	63,61	225,83	101,77	282,29	127,22
4750	65,85	24,02	164,63	60,06	263,41	96,10	329,26	120,12
5000	75,94	22,52	189,86	56,30	303,77	90,08	379,71	112,60
5250	86,70	20,92	216,74	52,30	346,79	83,69	433,48	104,61
5500	98,08	19,22	245,19	48,05	392,31	76,87	490,39	96,09
5750	110,16	25,24	275,41	63,11	440,66	100,97	550,82	126,21
6000	123,02	22,37	307,56	55,93	492,09	89,49	615,11	111,86
6250	136,57	19,30	341,41	48,25	546,26	77,20	682,83	96,51
6500	150,69	16,01	376,73	40,02	602,77	64,03	753,46	80,04
6750	165,29	12,47	413,22	31,16	661,15	49,86	826,44	62,33
7000	180,22	8,64	450,54	21,61	720,87	34,57	901,08	43,21
7250	195,32	3,54	488,29	8,84	781,27	14,15	976,58	17,68
7500	210,41	0,00	526,03	0,00	841,65	0,00	1052,06	0,00
7750	225,26	0,00	563,15	0,00	901,03	0,00	1126,29	0,00
8000	239,93	0,00	599,82	0,00	959,70	0,00	1199,63	0,00

Tabella 61 – Riepilogo risultati analitici prototipo_03

L [mm]	Forza = 1000 [N]		Forza = 2500 [N]		Forza = 4000 [N]		Forza = 5000 [N]	
	δ	σ	δ	σ	δ	σ	δ	σ
UM	[mm]	[MPa]	[mm]	[MPa]	[mm]	[MPa]	[mm]	[MPa]
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0,00	0,00
250	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
500	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
750	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1000	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00
1250	0,00	0,00	0,01	0,00	0,02	0,00	0,02	0,00
1500	0,33	28,80	0,83	72,00	1,33	115,20	1,66	144,00
1750	1,31	28,21	3,29	70,54	5,26	112,86	6,57	141,07
2000	2,95	27,60	7,37	69,01	11,79	110,41	14,74	138,01
2250	5,23	26,96	13,08	67,41	20,93	107,85	26,16	134,82
2500	8,16	26,30	20,41	65,74	32,66	105,18	40,82	131,48
2750	11,74	25,60	29,35	63,99	46,95	102,38	58,69	127,98
3000	15,95	24,86	39,88	62,15	63,80	99,45	79,75	124,31
3250	20,79	24,09	51,98	60,23	83,18	96,37	103,97	120,46
3500	26,36	30,40	65,89	76,00	105,42	121,59	131,78	151,99
3750	32,72	29,26	81,80	73,14	130,87	117,02	163,59	146,28
4000	39,87	28,05	99,67	70,13	159,48	112,21	199,35	140,26

4250	47,79	26,78	119,47	66,96	191,16	107,14	238,95	133,92
4500	56,46	25,44	141,15	63,61	225,83	101,77	282,29	127,22
4750	65,85	24,02	164,63	60,06	263,41	96,10	329,26	120,12
5000	76,00	26,65	190,01	66,61	304,01	106,58	380,02	133,23
5250	86,94	24,73	217,35	61,84	347,76	98,94	434,71	123,67
5500	98,62	22,70	246,55	56,75	394,47	90,80	493,09	113,50
5750	111,06	25,24	277,65	63,11	444,23	100,97	555,29	126,21
6000	124,27	22,37	310,67	55,93	497,08	89,49	621,35	111,86
6250	138,16	19,30	345,41	48,25	552,66	77,20	690,82	96,51
6500	152,64	16,01	381,61	40,02	610,58	64,03	763,22	80,04
6750	167,59	12,47	418,98	31,16	670,37	49,86	837,96	62,33
7000	182,91	11,26	457,27	28,16	731,64	45,05	914,55	56,32
7250	198,45	4,26	496,12	10,66	793,79	17,05	992,23	21,32
7500	213,98	0,00	534,95	0,00	855,92	0,00	1069,90	0,00
7750	229,26	0,00	573,14	0,00	917,03	0,00	1146,28	0,00
8000	244,36	0,00	610,89	0,00	977,42	0,00	1221,78	0,00

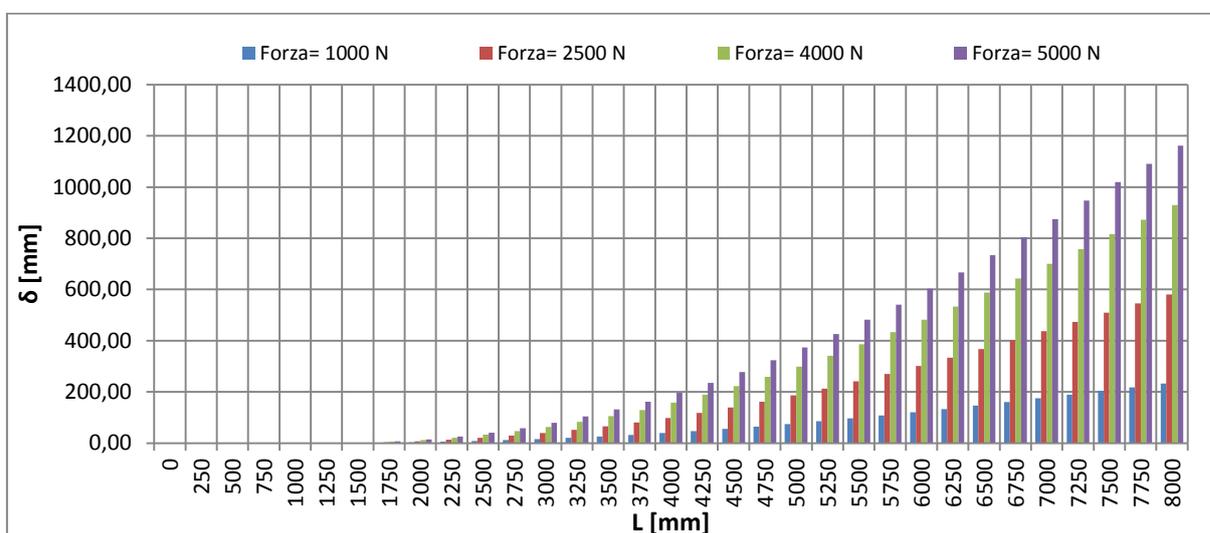


Figura 150 - Deflessione analitica ricavata al variare della forza applicata

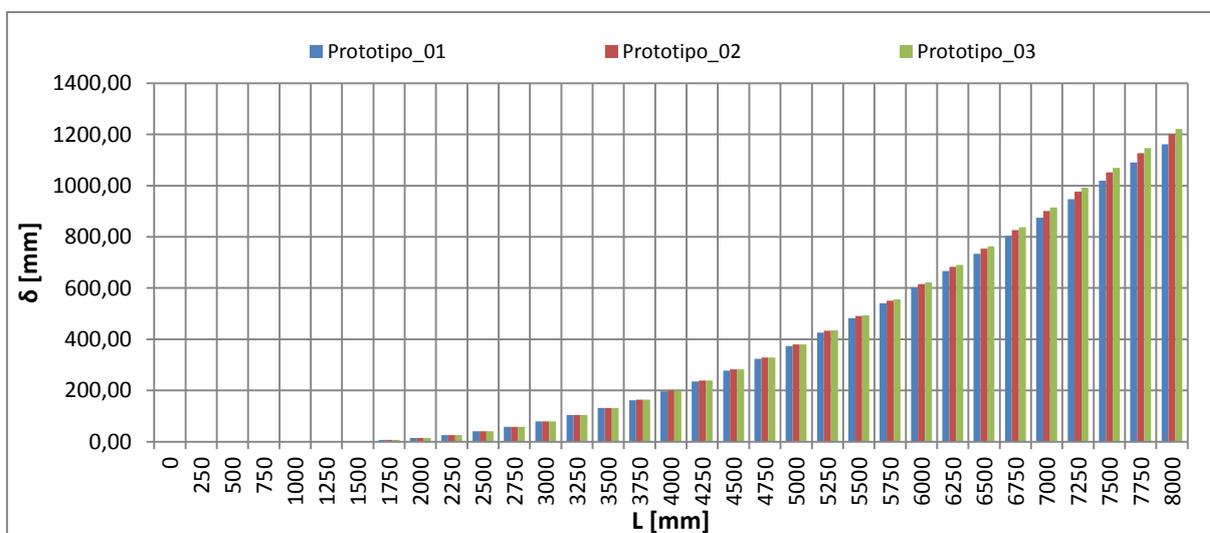


Figura 151 - Deflessioni analitiche a carico massimo dei vari prototipi

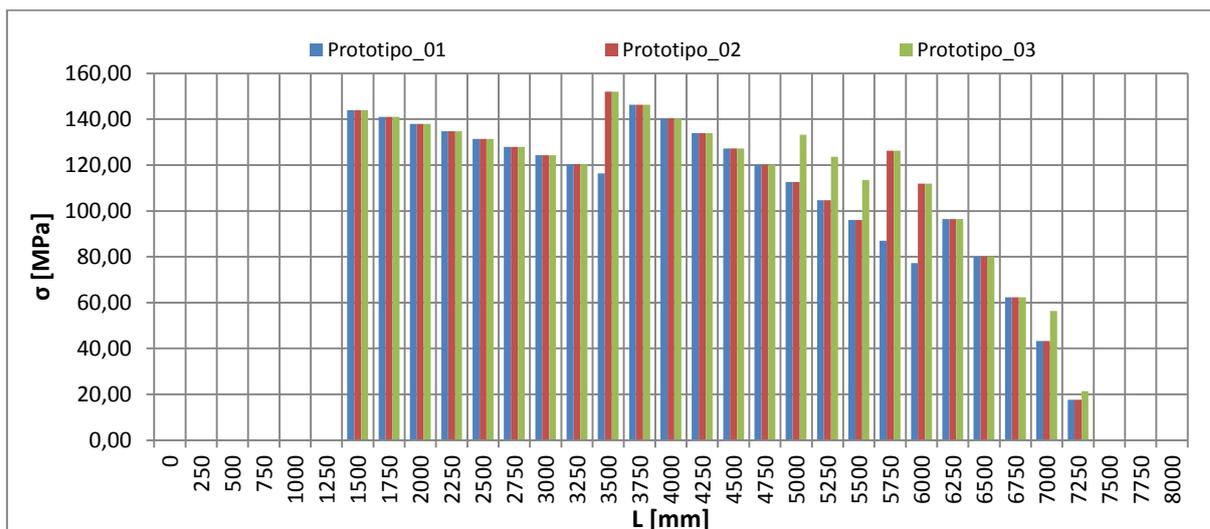


Figura 152 – Tensioni analitiche a carico massimo dei vari prototipi

4.2 Metodo Numerico

Dopo aver impostato un modello analitico che ci dava una prima previsione sui collaudi sperimentali, si è impostato un modello numerico utilizzando i parametri ricavati durante la caratterizzazione meccanica del materiale fatta nel capitolo 2. Per effettuare l’analisi è stato preso in considerazione il software Ansys Workbench, sul quale è stata realizzata sia la geometria, suddividendo il palo in varie sezioni aventi spessore differente, che la simulazione numerica dei diversi prototipi di palo.

4.2.1 Schema di progetto

Per impostare il modello si è definito inizialmente lo schema di progetto ed il software con il quale verrà fatta la simulazione numerica. Tramite il software ACP (Ansys Composite Pre - Post), pacchetto presente all’interno di Ansys Workbench, viene costruito il modello numerico andando a definire tre fasi:

- 1) **ACP (Pre)**: definizione di materiali; geometria; mesh e stratificazione del composito;
- 2) **analisi strutturale**: impostazione di tutti i parametri al contorno del progetto per avviare la simulazione (forze, condizioni di vincolo);
- 3) **ACP (Post)**: analisi dei risultati.

Nella Figura 153 viene rappresentato lo schema di progettazione del palo.

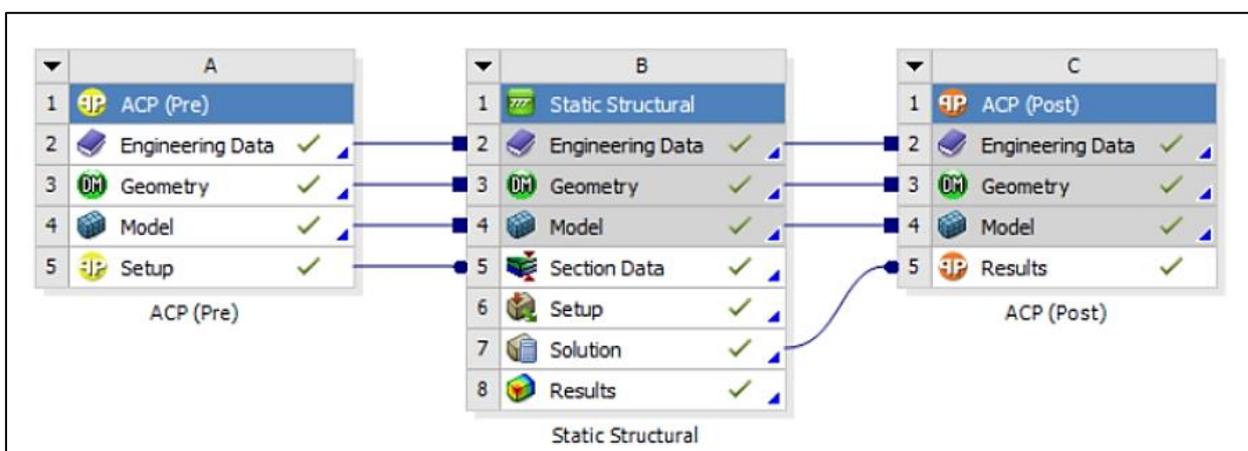


Figura 153 - Schema di progetto

4.2.2 Engineering Data ACP

Prima di mettere a punto il modello numerico si è pensato di fare varie simulazioni variando la composizione dei costituenti la stuovia. In Tabella 62 si può osservare la variazione dei moduli di Young longitudinale e trasversale del composito al variare della % di fibre unidirezionali e randomizzate. La % utilizzata presso lo stabilimento è di 70% - 30% poiché risulta essere il rapporto ottimale tra le esigenze di deflessione massima che bisogna rispettare secondo capitolato Telecom e il valore di resistenza a carico trasversale dovuto dal vento e ai tiranti che tengono uniti i vari pali lungo la linea.

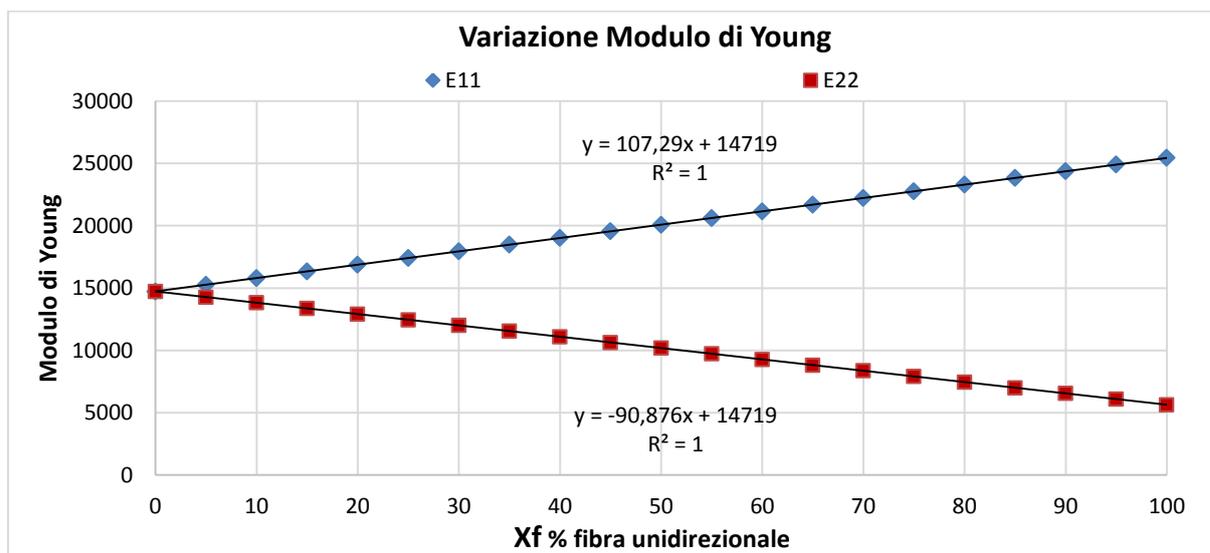


Figura 154 - Variazioni del modulo E11 e E22 in funzione della % di fibra

Tabella 62 - Variazione del modulo di Young al variare dei componenti la stuovia

% Unidirezionale	% Random	E11 [MPa]	E22 [MPa]
0%	100%	14719,06	14719,05
5%	95%	15255,51	14264,67
10%	90%	15791,95	13810,29
15%	85%	16328,39	13355,91
20%	80%	16864,84	12901,53
25%	75%	17401,29	12447,15
30%	70%	17937,73	11992,77
35%	65%	18474,18	11538,39
40%	60%	19010,63	11084,01
45%	55%	19547,07	10629,63
50%	50%	20083,52	10175,25
55%	45%	20619,96	9720,87
60%	40%	21156,41	9266,49
65%	35%	21692,86	8812,11
70%	30%	22229,32	8357,73
75%	25%	22765,75	7903,35
80%	20%	23302,24	7448,97
85%	15%	23838,64	6994,59
90%	10%	24375,09	6540,21
95%	5%	24911,53	6085,83
100%	0%	25447,98	5631,45

Di seguito vengono diagrammati i valori della deflessione e delle tensioni normali ricavate numericamente variando la percentuale di fibre unidirezionali e delle fibre randomizzate (Figura 155 e Figura 156).

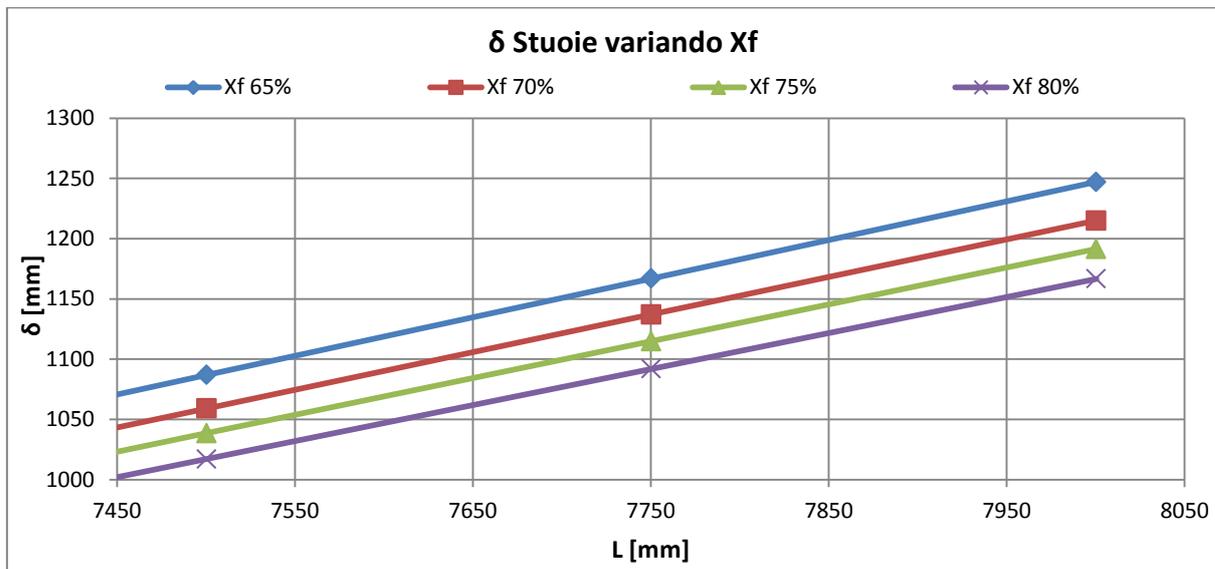


Figura 155 - Deflessione numerica al variare delle percentuali di fibra

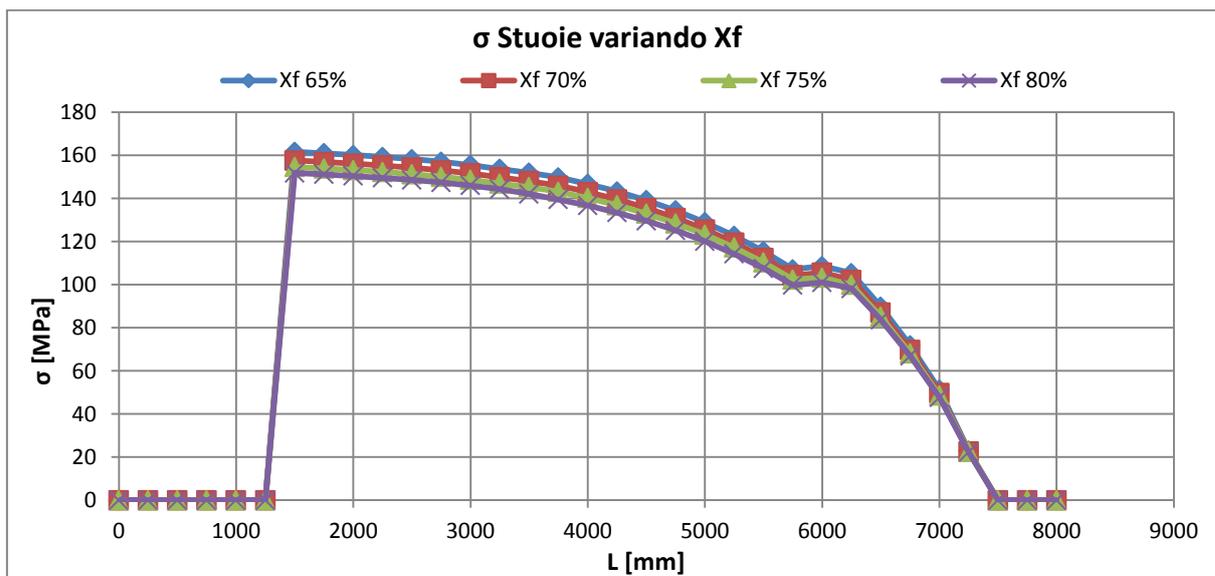


Figura 156 - Tensione numerica al variare delle percentuali di fibra

Definite le percentuali 70 – 30 (unidirezionale – randomizzato) si sono calcolati tutti i parametri da inserire in simulazione.

4.2.2.1 Proprietà lamina unidirezionale

Per stabilire le proprietà di una lamina unidirezionale si calcolano i seguenti parametri:

$$E_{11} = E_f V_f + E_m V_m \qquad E_{22} = \frac{E_f E_m}{E_f V_m + E_m V_f} \qquad E_{22} = E_{33}$$

$$\nu_{12} = \nu_f V_f + \nu_m V_m \qquad \nu_{23} = \frac{E_{22}}{E_{11}} \nu_{12} \qquad \nu_{23} = \frac{\nu_{12}(1 - \nu_{21})}{1 - \nu_{12}}$$

$$G_m = \frac{E_m}{2(1 - \nu_m)} \quad G_f = \frac{E_f}{2(1 - \nu_f)}$$

$$G_{12} = \frac{G_f G_m}{G_f \nu_m + G_m \nu_f} \quad G_{12} = G_{13} \quad G_{23} = \frac{E_{22}}{2(1 - \nu_{23})}$$

4.2.2.2 Proprietà lamina chopped

Per calcolare i valori dei parametri di una lamina chopped bisogna partire introducendo le proprietà elastiche delle fibre unidirezionali discontinue derivate dalle equazioni di Halpin – Tsai.

$$E_{11} = E_L = \frac{1 + 2(l_f/d_f)\eta_L V_f}{1 - \eta_L V_f} E_m \quad \eta_L = \frac{(E_f/E_m) - 1}{(E_f/E_m) + 2(l_f/d_f)}$$

$$E_{22} = E_T = \frac{1 + 2\eta_T V_f}{1 - \eta_T V_f} E_m \quad \eta_T = \frac{(E_f/E_m) - 1}{(E_f/E_m) + 2}$$

$$G_{12} = G_{21} = \frac{1 + \eta_G V_f}{1 - \eta_G V_f} G_m \quad \eta_G = \frac{(G_f/G_m) - 1}{(G_f/G_m) + 2}$$

$$E_{RANDOM} = \frac{3}{8} E_{11} + \frac{5}{8} E_{22}$$

$$G_{RANDOM} = \frac{1}{8} E_{11} + \frac{1}{4} E_{22}$$

$$\nu_{RANDOM} = \frac{E_{RANDOM}}{2G_{RANDOM}} - 1$$

Affinché le equazioni di Halpin – Tsai siano veritiere si devono fare le seguenti assunzioni:

- la sezione trasversale della fibra è circolare;
- le fibre sono disposte in una matrice quadrata;
- le fibre sono distribuite in modo uniforme in tutta la matrice;
- esiste perfetta aderenza fra le fibre e la matrice;
- nella matrice non ci devono essere ne vuoti ne inclusioni.

In Tabella 63 vengono rappresentati i valori delle proprietà meccaniche da inserire in fase di simulazione numerica.

Tabella 63 - Proprietà meccaniche lamina unidirezionale e lamina chopped

Unidirezionale (Ortho)	E_{11}	25447	[N/mm ²]
	E_{22}	5631	[N/mm ²]
	E_{33}	5631	[N/mm ²]
	ν_{12}	0,296	
	ν_{13}	0,296	
	ν_{23}	0,393	
	G_m	1473	[N/mm ²]
	G_f	30000	[N/mm ²]
	G_{12}	2106	[N/mm ²]
	G_{13}	2106	[N/mm ²]

	G_{23}	2022	[N/mm ²]
	$\nu_{12} = \nu_{13}$	$\nu_{21} = \nu_{31}$	$E_{22} = E_{33}$
Chopped (MAT)	l_f	50	[mm]
	d_f	0,02	[mm]
	η_L	0,003	
	η_T	0,852	
	η_G	0,906	
	$E_{11} = E_L$	25397	[N/mm ²]
	$E_{22} = E_T$	8312	[N/mm ²]
	$G_{12} = G_{21}$	2656	[N/mm ²]
	E_{RANDOM}	14719	[N/mm ²]
	G_{RANDOM}	5252	[N/mm ²]
	ν_{RANDOM}	0,401	
Composito	$E_{11\ COMPOSITO}$	22229	[N/mm ²]
	$E_{22\ COMPOSITO}$	8357	[N/mm ²]
	$G_{12\ COMPOSITO}$	3050	[N/mm ²]
	$\nu_{12\ COMPOSITO}$	0,327	

4.2.3 Geometry and Model in ACP

Definito il materiale costituente il laminato si realizza la geometria (Figura 157) del palo in composito ($D_e=270$; $D_i=120$); i path, ovvero i punti lungo i quali verranno diagrammati i risultati da analizzare; le name selection, dividendo la superficie del palo in varie sezioni lungo le quali successivamente si inseriranno i vari layer e la mesh. La mesh è costituita da 193527 nodi e da 193464 elementi.

Per quanto riguarda il disegno, viene realizzata la superficie del palo e non il volume poiché lo spessore verrà impostato in fase di progettazione del composito.

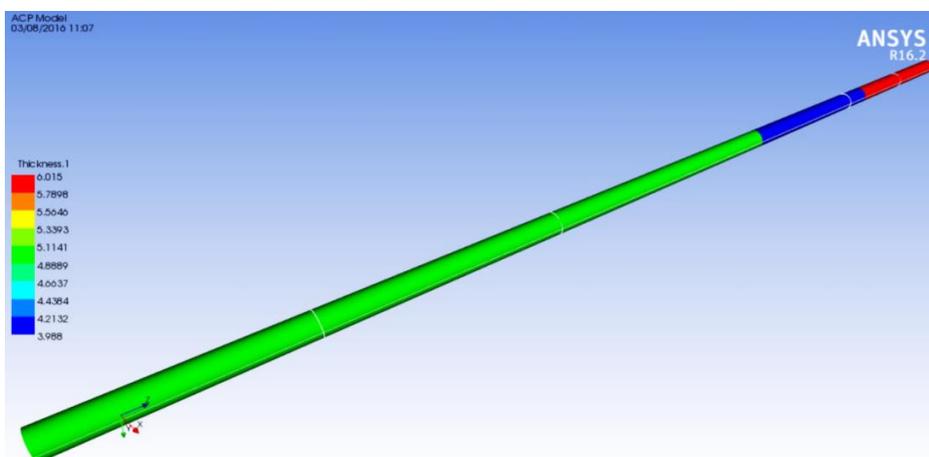


Figura 157 - Geometria e spessori prototipo_01

4.2.4 Setup in ACP: Prototipo_01

Il materiale composito viene impostato nel setup di ACP (Pre) seguendo il seguente ordine:

- definire il numero di lamine e il loro spessore;
- definire la corretta sequenza di impilamento;
- definire un sistema di riferimento cartesiano, dando così la direzione e l’orientazione delle fibre;
- assegnare le giuste proprietà ad ogni singolo tratto costituente il laminato composito;
- definire un piano di sezione per verificare l’esatta stratificazione dei vari layer.

1) Definizione numero lamine: Fabric Properties

Definite le proprietà dei materiali in Engeneering Data si vanno a realizzare le varie lamine che faranno parte del nostro laminato composito. Si definiscono due tipologie di lamine (lamina ortotropa, lamina chopped) per ogni tratto del palo in modo tale da poter inserire lo spessore corretto della singola lamina che farà parte del laminato. Nel chopped i valori di E1 e E2 coincidono essendo considerati come fosse un materiale isotropo con le stesse proprietà in ogni direzione.

Nella Figura 158 viene mostrato lo spessore delle lamine ortotrope, mentre nella Figura 159 viene mostrato lo spessore delle lamine chopped.

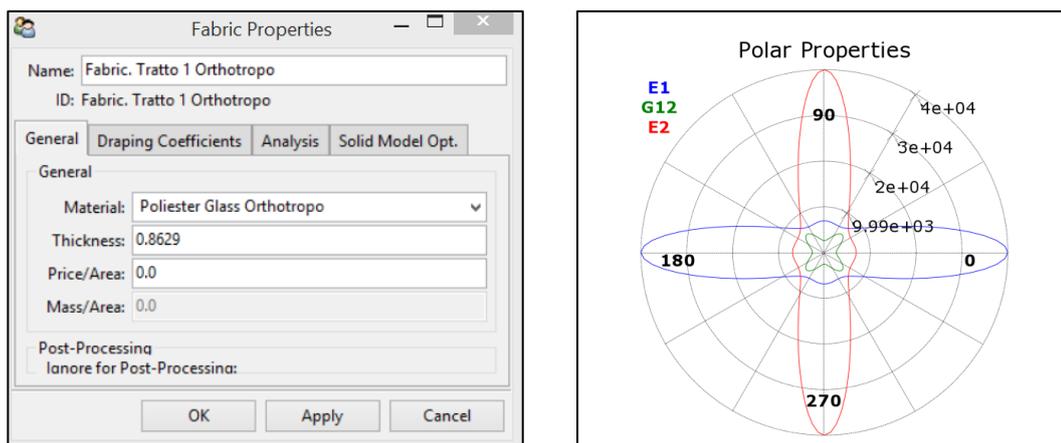


Figura 158 - Fabric Lamina Ortotropa Unidirezionale

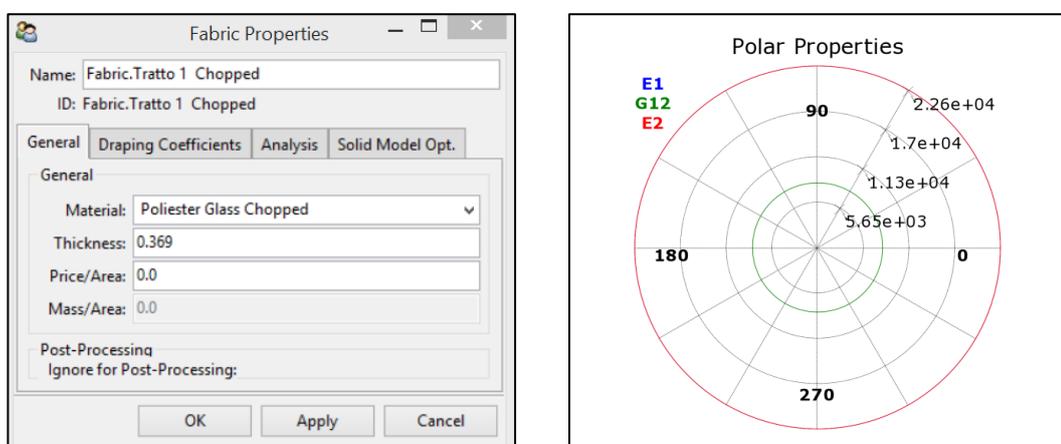


Figura 159 - Fabric Lamina Chopped

2) Sequenza di impilaggio: Stackup

Definiti i materiali e lo spessore delle due tipologie di lamine si va a realizzare la sequenza di impilamento con caratteristiche differenti, dipendenti dal numero di stuoie, in ogni sezione di palo. Nella Figura 160 viene mostrata la sequenza di impilamento del tratto 1 Figura 161 viene mostrata la sequenza di impilamento del tratto 2 Figura 162 viene mostrata la sequenza di impilamento del tratto 3 Figura 163 viene mostrata la sequenza di impilamento del tratto 4.

Ricordiamo che a seconda del numero di stuoie con cui è realizzato il palo, vengono realizzati quattro tronconi con diversa sequenza di impilamento del laminato composito.

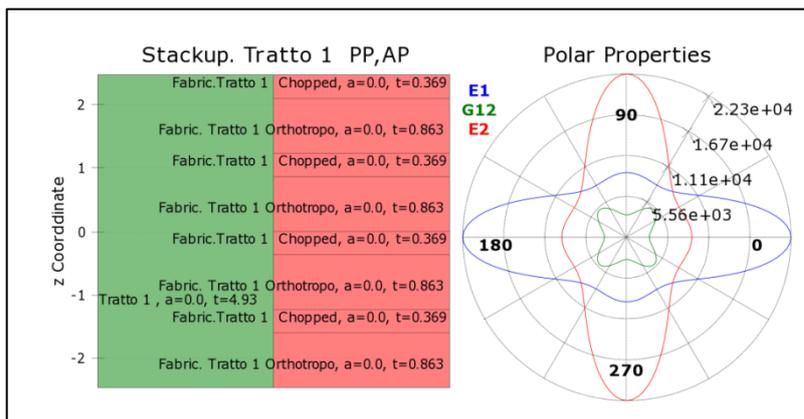


Figura 160 - Sequenza di impilamento tratto 1

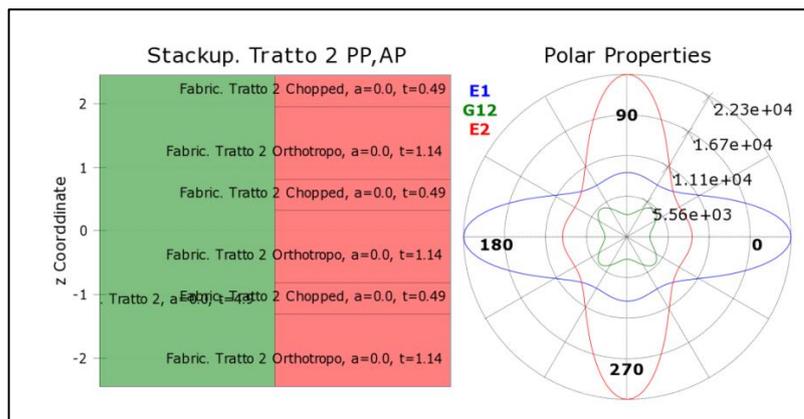


Figura 161 - Sequenza di impilamento tratto 2

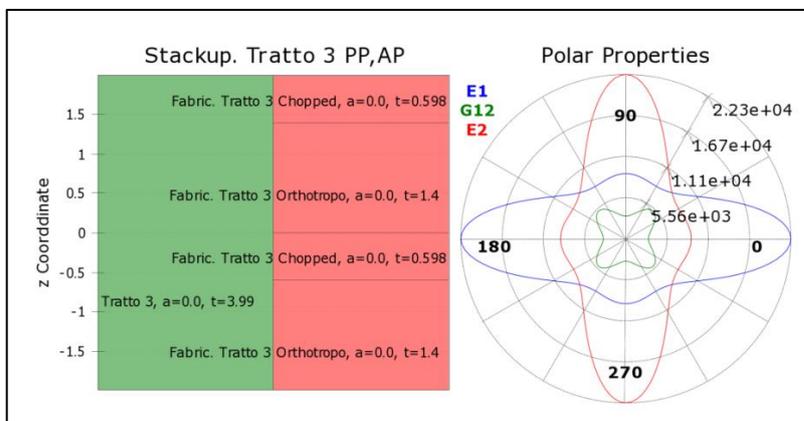


Figura 162 - Sequenza di impilamento tratto 3

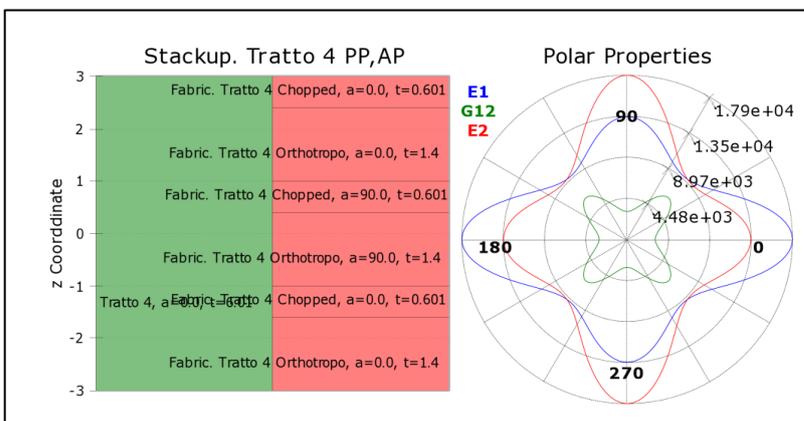


Figura 163 - Sequenza di impilamento tratto 4

3) Direzione e orientazione delle fibre: Modeling Groups

Realizzate le varie stratificazioni, si crea un sistema di riferimento sulla superficie del palo e si dispongono i vari layer. Per osservare la corretta disposizione dei vari layer vengono rappresentate l’orientazione e la direzione delle fibre (Figura 164 Figura 165).

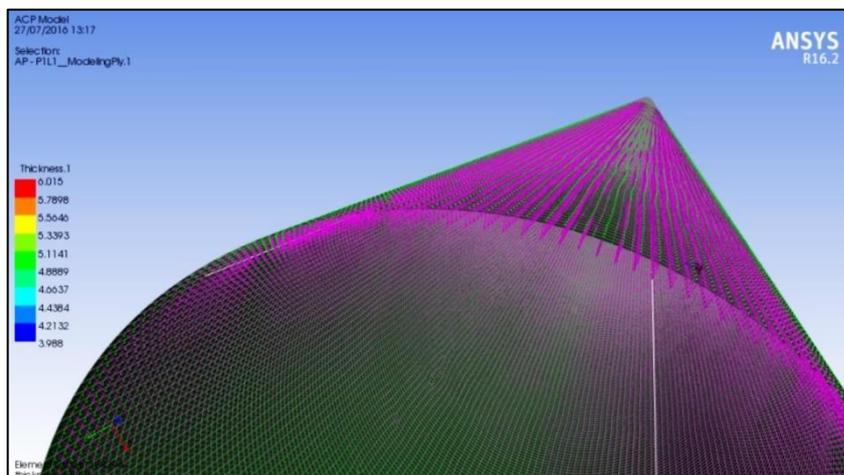


Figura 164 - Orientazione spessore e Direzione delle fibre

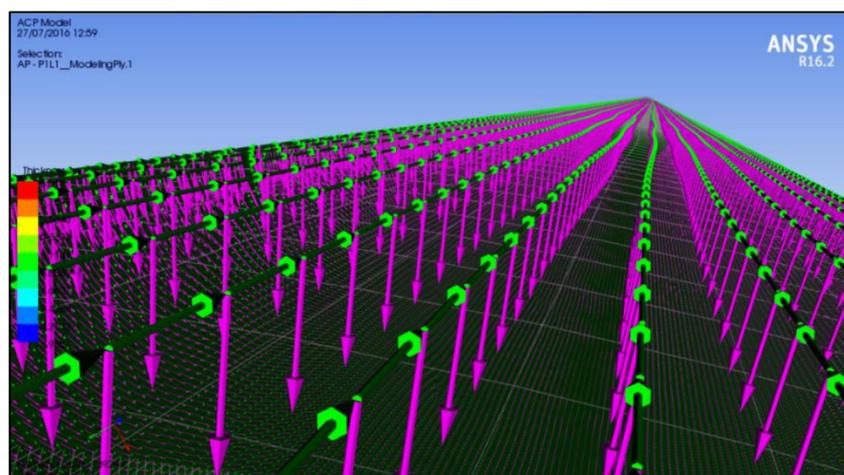


Figura 165 Particolare orientazioni spessore e direzione delle fibre

4) Piano di sezione: Section cut

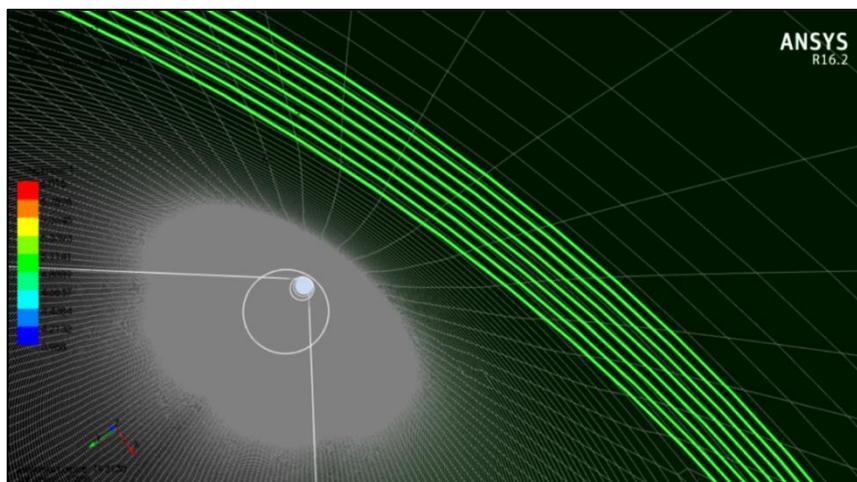


Figura 166 –Section cut tratto 1

Definito il materiale composito per la correttezza di quanto fatto si è deciso di sezionare il palo in ogni troncone e verificare il numero di layer inseriti in fase di progettazione del composito con ACP Ansys come si evince dalla Figura 166.

4.2.5 Boundary Conditions

Definito il materiale composito, in static structural si definiscono le condizioni al contorno andando a bloccare la parte inferiore del palo a 1260 mm e applicare una forza di 5000 N ad una distanza di 500 mm dalla testa del palo (Figura 167).

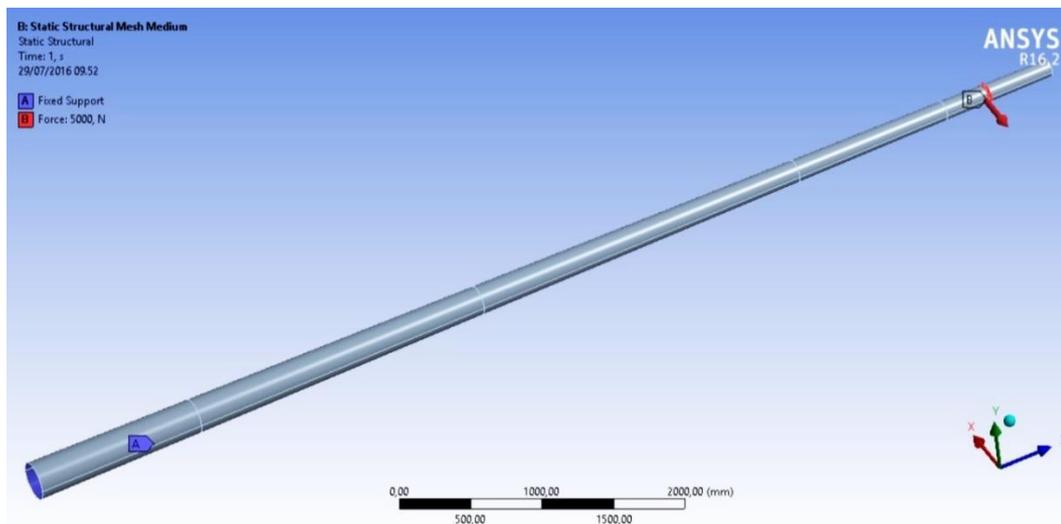


Figura 167 - Boundary Conditions

4.2.6 Analisi dei risultati: prototipo_01

In questo paragrafo viene fatta un analisi dei risultati tenendo in considerazione la deflessione e la tensione normale agente lungo l’asse x (asse su cui viene applicata la forza).

– Deflessione

In Figura 168 si riporta il valore di deflessione totale del palo applicando una forza di 5000 N a 500 mm dalla testa.

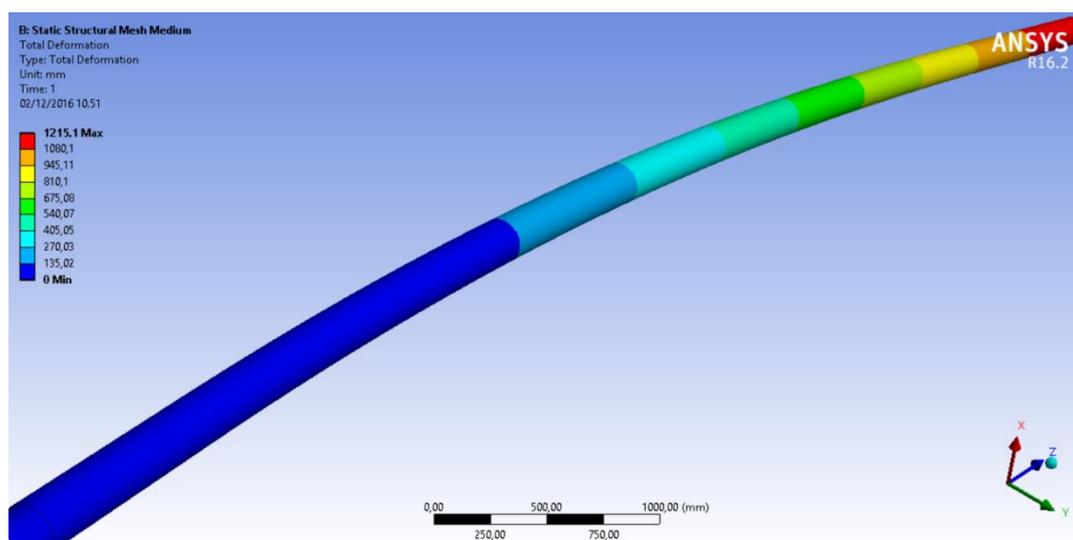


Figura 168 - Deflessione totale prototipo_01

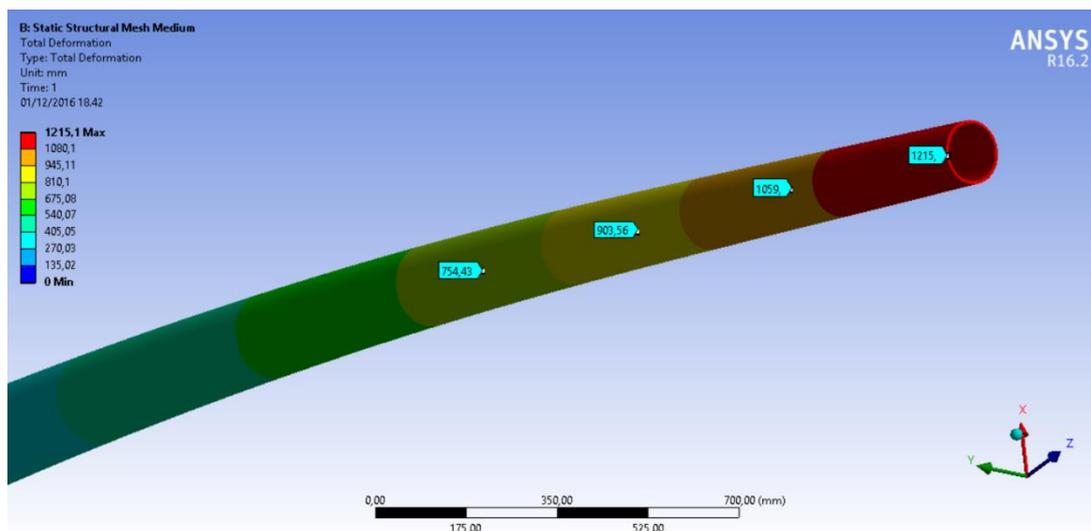


Figura 169 - Particolare deflessione prototipo_01

– Tensione normale

Nelle figure seguenti vengono messe in evidenza i valori delle tensioni normali agenti sul palo, notando come sia presente una parte in compressione ed una parte in trazione. Dalle immagini si nota altresì che in corrispondenza dell’incastro il software da dei valori alterati a causa proprio del vincolo imposto (e pertanto sono dei valori che bisogna scartare).

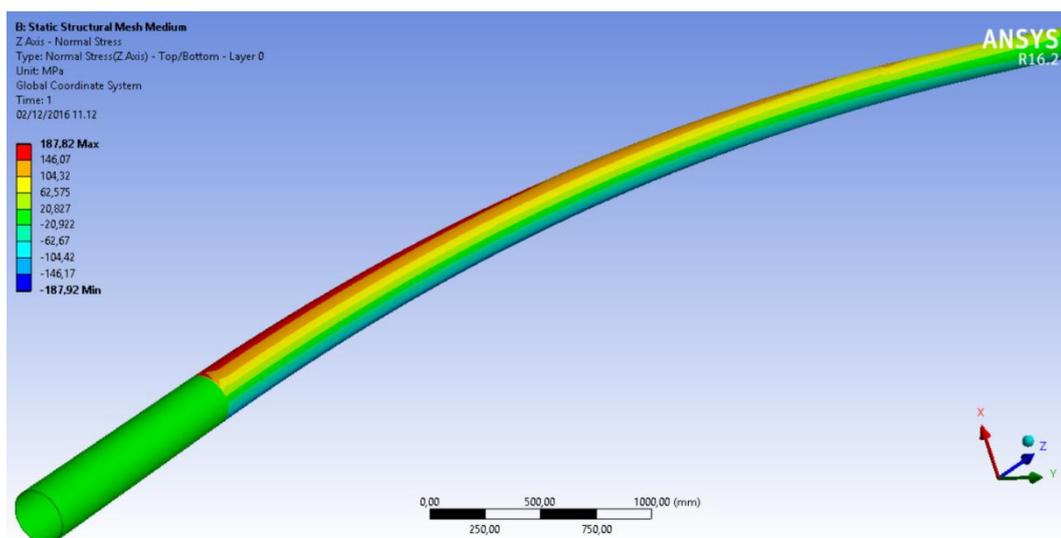


Figura 170 – Tensione normale: prototipo_01

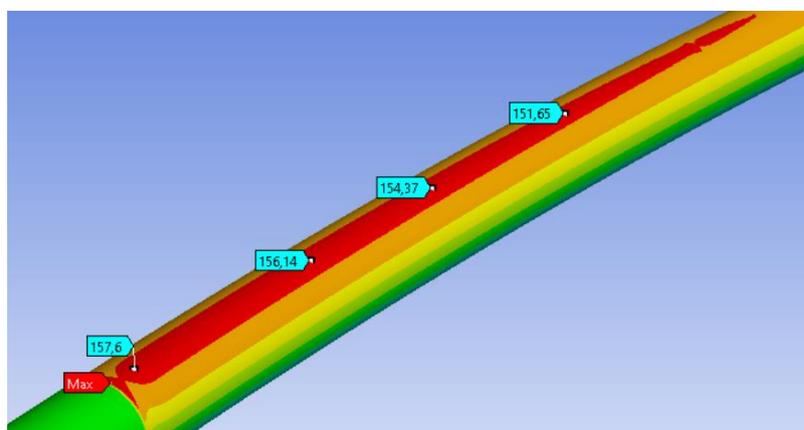


Figura 171 – Particolare tensione normale trazione prototipo_01

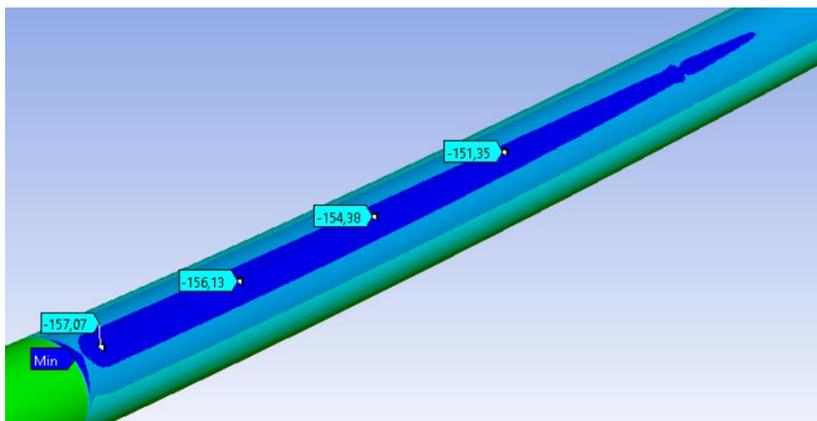


Figura 172 - Particolare tensione normale trazione prototipo_01

– **Riepilogo dati numerici prototipo_01**

In Tabella 64 si mettono in evidenza i dati numerici ricavati ad ogni sezione di palo, lunga 250 mm, al variare della forza applicata.

Tabella 64 – Riepilogo dati numerici prototipo_01

L [mm]	Forza = 1000 [N]		Forza = 2500 [N]		Forza = 4000 [N]		Forza = 5000 [N]	
	δ	σ	δ	σ	δ	σ	δ	σ
UM	[mm]	[MPa]	[mm]	[MPa]	[mm]	[MPa]	[mm]	[MPa]
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
250	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
500	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
750	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1250	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1500	0,47	31,52	1,18	78,80	1,88	126,09	2,35	157,61
1750	1,45	31,39	3,62	78,47	5,80	125,55	7,24	156,94
2000	3,06	31,24	7,64	78,09	12,22	124,95	15,28	156,19
2250	5,32	31,06	13,30	77,66	21,28	124,26	26,60	155,32
2500	8,25	30,86	20,64	77,15	33,02	123,44	41,27	154,30
2750	11,87	30,62	29,68	76,54	47,49	122,46	59,37	153,08
3000	16,19	30,32	40,46	75,81	64,74	121,29	80,92	151,61
3250	21,20	29,97	52,99	74,92	84,79	119,88	105,98	149,85
3500	26,92	29,62	67,29	74,05	107,67	118,48	134,59	148,10
3750	33,35	29,19	83,38	72,97	133,41	116,75	166,77	145,94
4000	40,51	28,60	101,28	71,50	162,05	114,40	202,56	143,00
4250	48,39	27,91	120,98	69,79	193,57	111,66	241,97	139,57
4500	57,00	27,12	142,50	67,80	228,00	108,48	285,00	135,60
4750	66,33	26,20	165,82	65,50	265,31	104,79	331,64	130,99
5000	76,37	25,13	190,93	62,83	305,49	100,53	381,86	125,67
5250	87,12	23,91	217,80	59,77	348,48	95,64	435,60	119,55
5500	98,56	22,50	246,39	56,24	394,23	89,99	492,79	112,49
5750	110,66	20,88	276,65	52,19	442,64	83,50	553,30	104,38
6000	123,40	21,11	308,51	52,78	493,62	84,44	617,02	105,55
6250	136,82	20,45	342,05	51,13	547,28	81,81	684,10	102,26
6500	150,90	17,43	377,24	43,58	603,58	69,73	754,48	87,16
6750	165,55	13,95	413,89	34,89	662,22	55,82	827,77	69,77

7000	180,69	9,95	451,73	24,87	722,78	39,79	903,47	49,74
7250	196,17	4,54	490,44	11,35	784,70	18,15	980,87	22,69
7500	211,82	0,00	529,56	0,00	847,29	0,00	1059,10	0,00
7750	227,42	0,00	568,56	0,00	909,70	0,00	1137,10	0,00
8000	243,03	0,00	607,57	0,00	972,12	0,00	1215,10	0,00

4.2.7 Simulazione prototipo_02

Dopo aver messo a punto il software modellando il prototipo_01 si è ripercorso lo stesso iter per i prototipi successivi. Il prototipo_02 è realizzato modificando la disposizione delle stuoie e quindi degli spessori lungo tutta la lunghezza del palo. Rispetto al prototipo precedente lo spessore massimo sarà sempre sulla cima del palo ma in questo caso è localizzato solo nel punto in cui verrà messo il collare reggifilo mantenendo in tiro i vari pali lungo la linea.

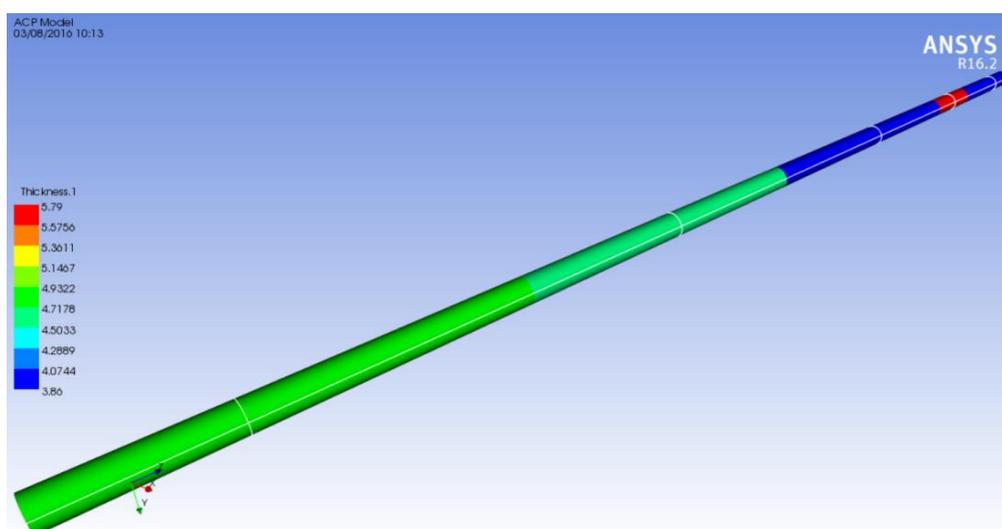


Figura 173 – Geometria e spessori prototipo_02

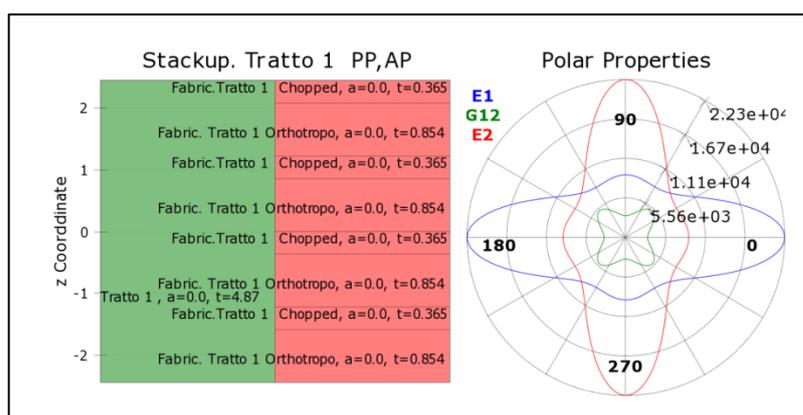


Figura 174 - Sequenza di impilamento tratto 1

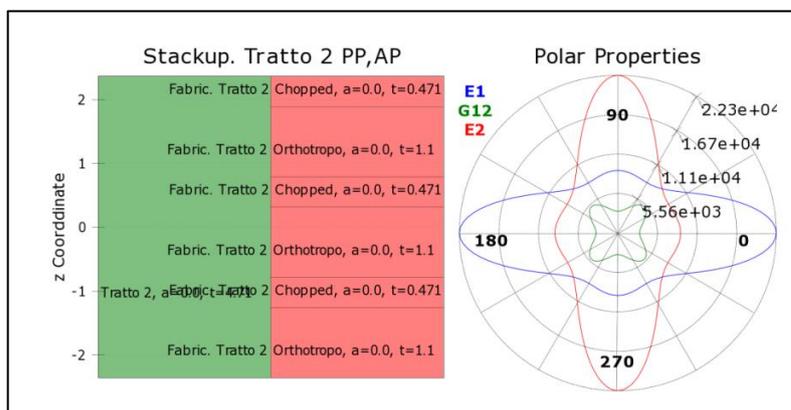


Figura 175 - Sequenza di impilamento tratto 2

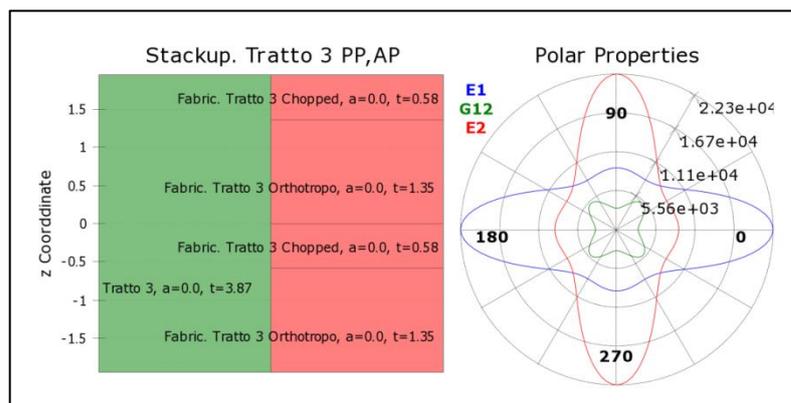


Figura 176 - Sequenza di impilamento tratto 3

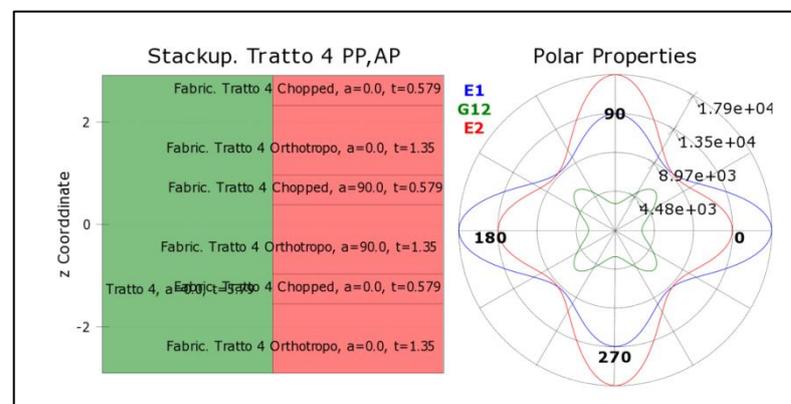


Figura 177 - Sequenza di impilamento tratto 4

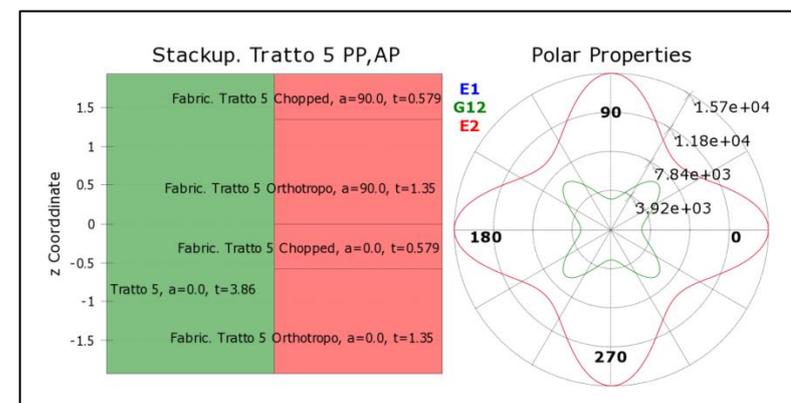


Figura 178 - Sequenza di impilamento tratto 5

4.2.8 Analisi dei risultati: prototipo_02

In questo paragrafo viene fatta un analisi dei risultati tenendo in considerazione la deflessione e la tensione normale agente lungo l’asse x (asse su cui viene applicata la forza).

– Deflessione

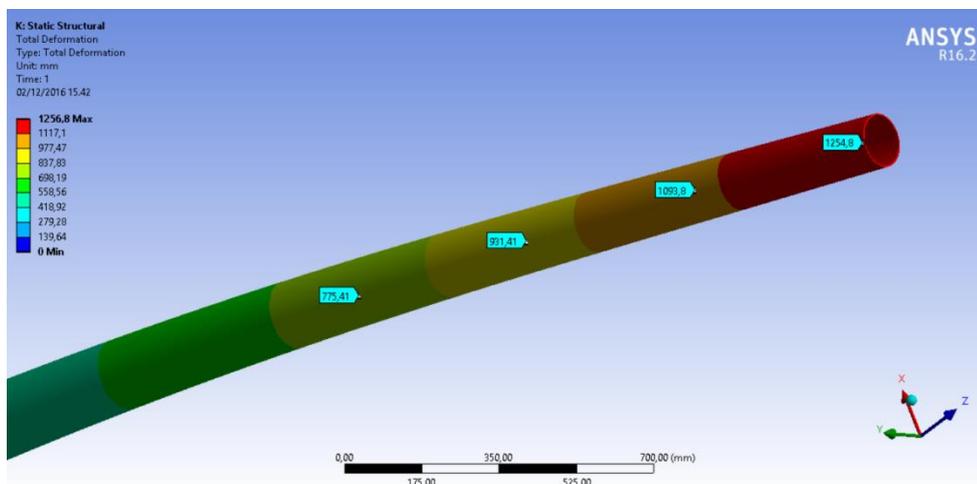


Figura 179 - Particolare deflessione prototipo_02

– Tensione normale

Nelle figure seguenti vengono messe in evidenza i valori delle tensioni normali agenti sul palo, notando come sia presente una parte in compressione ed una parte in trazione. Dalle immagini si nota altresì che in corrispondenza dell’incastro il software da dei valori alterati a causa proprio del vincolo imposto (e pertanto sono dei valori che bisogna scartare).

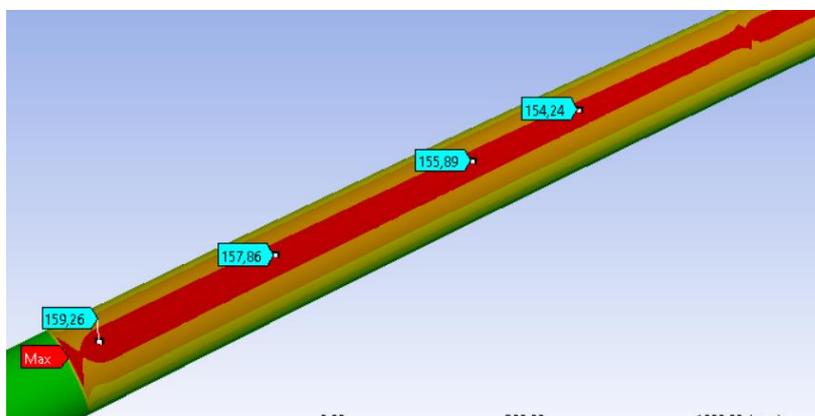


Figura 180 – Particolare tensione normale trazione prototipo_02

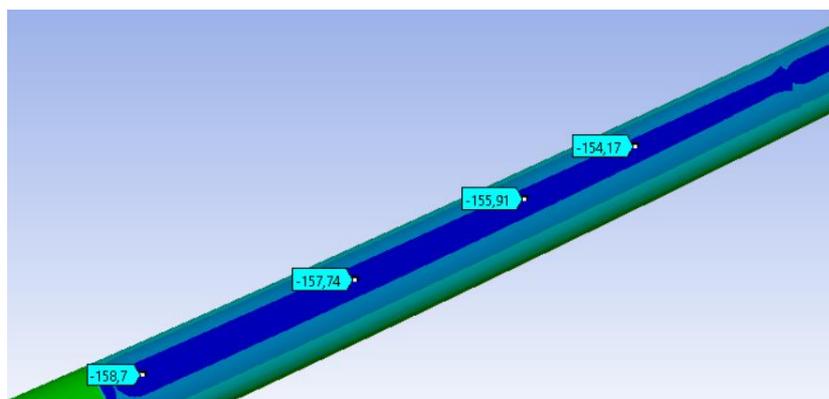


Figura 181 - Particolare tensione normale trazione prototipo_02

– Riepilogo dati numerici prototipo_02

In Tabella 65 si mettono in evidenza i dati numerici ricavati ad ogni sezione di palo, lunga 250 mm, al variare della forza applicata.

Tabella 65 – Riepilogo dati numerici prototipo_02

L [mm]	Forza = 1000 [N]		Forza = 2500 [N]		Forza = 4000 [N]		Forza = 5000 [N]	
	δ	σ	δ	σ	δ	σ	δ	σ
UM	[mm]	[MPa]	[mm]	[MPa]	[mm]	[MPa]	[mm]	[MPa]
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
250	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
500	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
750	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1250	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1500	0,46	31,85	1,16	79,64	1,86	127,42	2,32	159,27
1750	1,45	31,72	3,62	79,30	5,80	126,88	7,24	158,60
2000	3,08	31,57	7,69	78,92	12,30	126,27	15,38	157,84
2250	5,37	31,39	13,42	78,48	21,47	125,56	26,84	156,95
2500	8,34	31,18	20,85	77,96	33,35	124,74	41,69	155,92
2750	12,00	30,94	30,00	77,35	47,99	123,76	59,99	154,69
3000	16,36	30,64	40,89	76,60	65,42	122,57	81,78	153,21
3250	21,42	30,79	53,56	76,97	85,69	123,16	107,11	153,95
3500	27,22	30,85	68,04	77,11	108,87	123,38	136,09	154,23
3750	33,76	30,32	84,39	75,81	135,03	121,29	168,78	151,61
4000	41,05	29,71	102,61	74,27	164,18	118,84	205,23	148,55
4250	49,09	29,00	122,72	72,49	196,35	115,99	245,43	144,98
4500	57,88	28,17	144,70	70,42	231,52	112,67	289,40	140,84
4750	67,42	27,21	168,56	68,03	269,69	108,84	337,11	136,05
5000	77,71	26,11	194,27	65,27	310,84	104,43	388,55	130,53
5250	88,73	24,84	221,82	62,09	354,91	99,34	443,63	124,17
5500	100,47	25,80	251,17	64,50	401,87	103,20	502,34	129,00
5750	112,98	26,09	282,45	65,23	451,91	104,36	564,89	130,45
6000	126,28	23,74	315,71	59,35	505,13	94,95	631,41	118,69
6250	140,33	21,04	350,83	52,60	561,33	84,16	701,66	105,19
6500	155,06	17,93	387,66	44,83	620,25	71,73	775,31	89,66
6750	170,39	14,36	425,98	35,89	681,56	57,43	851,95	71,79
7000	186,22	10,23	465,54	25,59	744,86	40,94	931,08	51,17
7250	202,39	4,70	505,98	11,76	809,57	18,82	1012,00	23,52
7500	218,74	0,00	546,86	0,00	874,97	0,00	1093,70	0,00
7750	235,04	0,00	587,61	0,00	940,18	0,00	1175,20	0,00
8000	251,35	0,00	628,37	0,00	1005,40	0,00	1256,70	0,00

4.2.9 Simulazione prototipo_03

Dopo aver effettuato una prima ottimizzazione del palo andando a modificare la lunghezza delle varie stuoie, si è sviluppato un nuovo prototipo andando a modificare la geometria delle stesse in modo da avere uno svolgimento più uniforme delle varie stuoie all’interno dello stampo centrifuga.

In Figura 182 si nota come la parte più spessa del palo sarà la base e la parte in testa dove va inserito il collare.

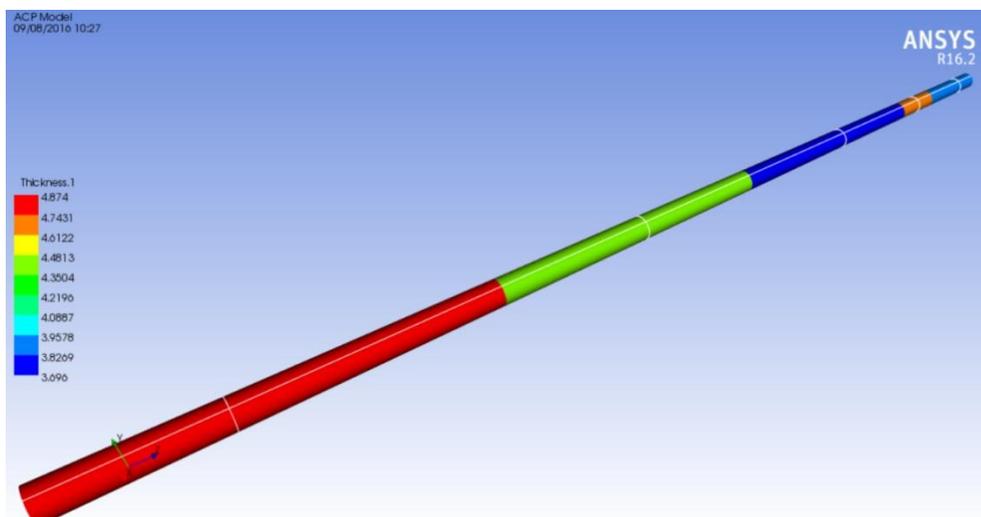


Figura 182 - Geometria e spessori prototipo_03

Nelle figure seguenti è rappresentata la sequenza di impilamento dei vari tratti di palo.

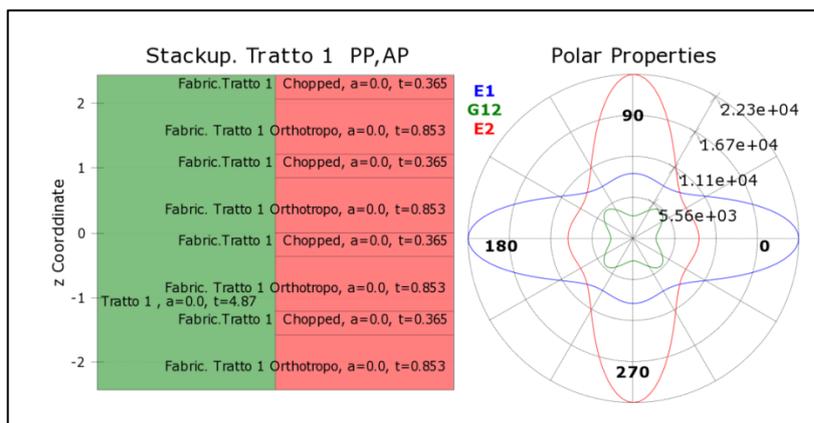


Figura 183 - Sequenza di impilamento tratto 1

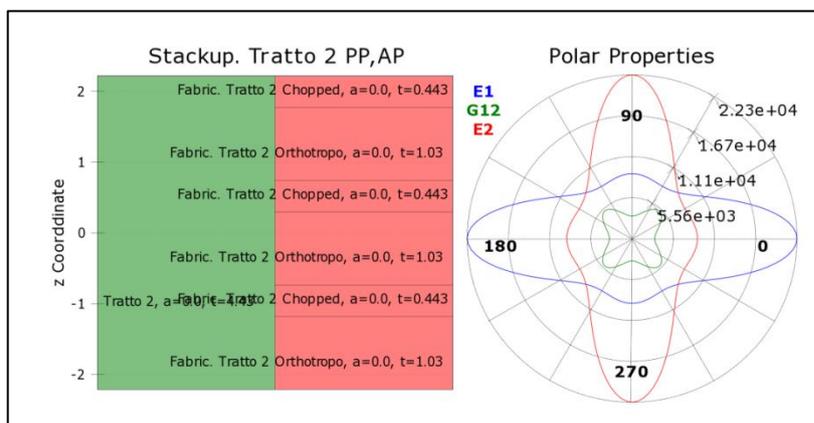


Figura 184 - Sequenza di impilamento tratto 2

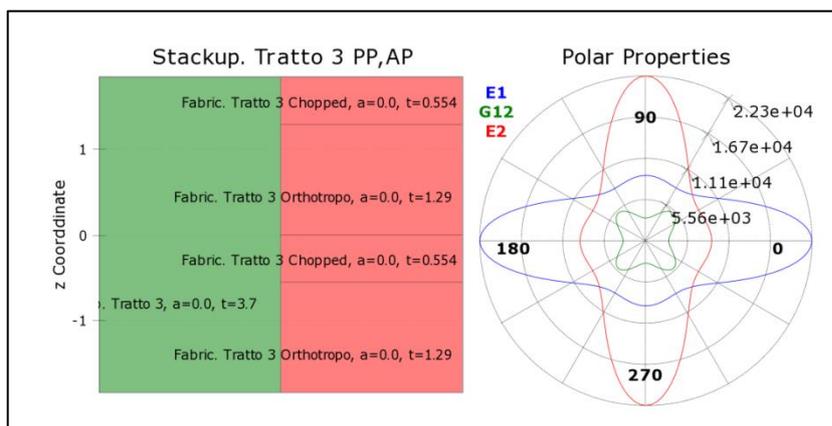


Figura 185 - Sequenza di impilamento tratto 3

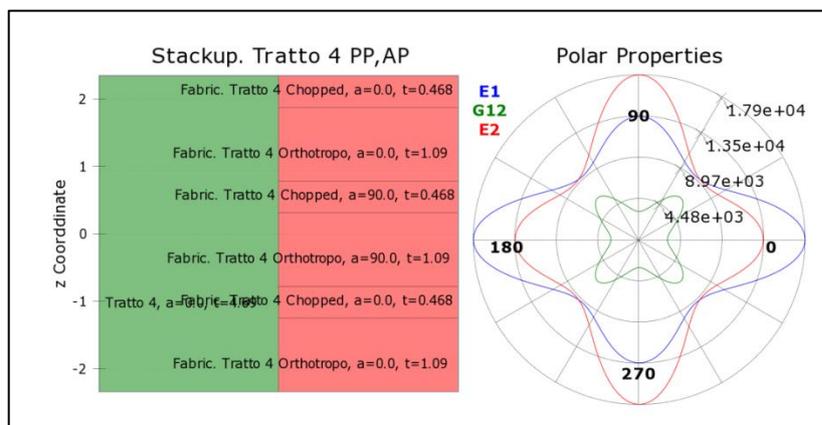


Figura 186 - Sequenza di impilamento tratto 4

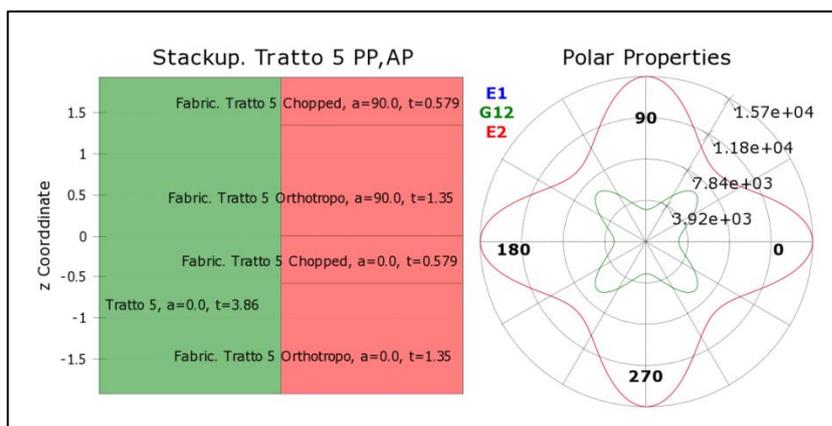


Figura 187 - Sequenza di impilamento tratto 5

4.2.10 Analisi dei risultati: prototipo_03

In questo paragrafo viene fatta un analisi dei risultati tenendo in considerazione la deflessione e la tensione normale agente lungo l’asse x (asse su cui viene applicata la forza).

– Deflessione

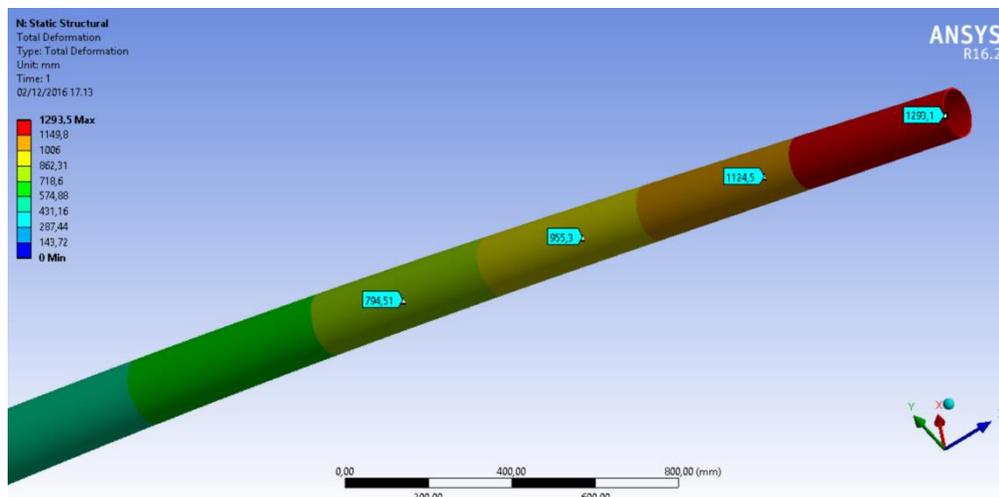


Figura 188 - Particolare deflessione prototipo_03

– Tensione normale

Nelle figure seguenti vengono messe in evidenza i valori delle tensioni normali agenti sul palo, notando come sia presente una parte in compressione ed una parte in trazione. Dalle Figura 189 e Figura 190 si nota altresì che in corrispondenza dell’incastro il software da dei valori alterati a causa proprio del vincolo imposto (e pertanto sono dei valori che bisogna scartare).

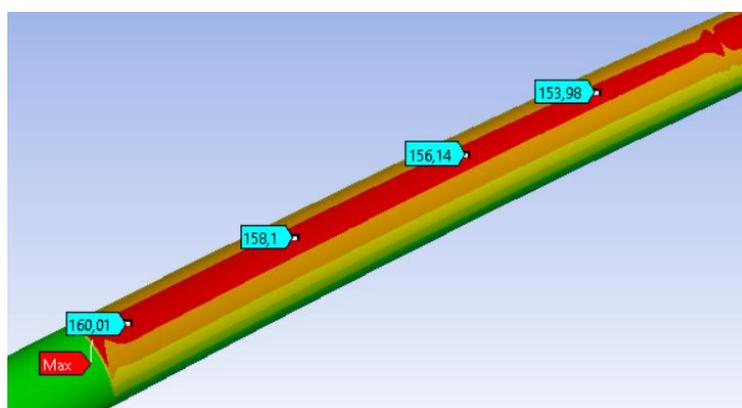


Figura 189 – Particolare tensione normale trazione prototipo_03

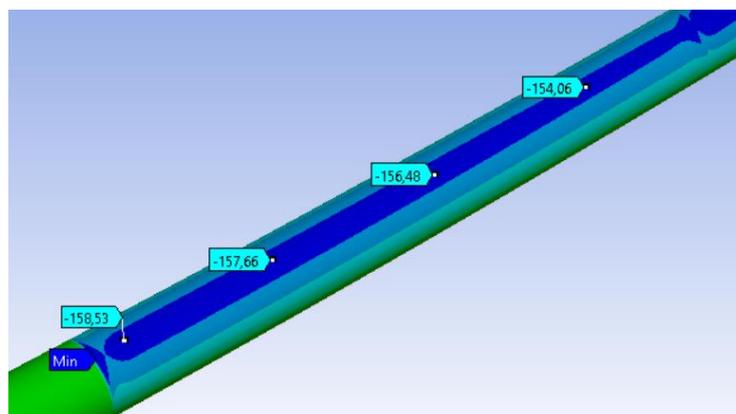


Figura 190 - Particolare tensione normale compressione prototipo_03

– Riepilogo dati numerici prototipo_03

In Tabella 66 si mettono in evidenza i dati numerici ricavati ad ogni sezione di palo, lunga 250 mm, al variare della forza applicata.

Tabella 66 – Riepilogo dati numerici prototipo_03

L [mm]	Forza = 1000 [N]		Forza = 2500 [N]		Forza = 4000 [N]		Forza = 5000 [N]	
	δ	σ	δ	σ	δ	σ	δ	σ
UM	[mm]	[MPa]	[mm]	[MPa]	[mm]	[MPa]	[mm]	[MPa]
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
250	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
500	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
750	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1250	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1500	0,46	31,85	1,16	79,64	1,86	127,42	2,32	159,27
1750	1,45	31,72	3,62	79,30	5,80	126,88	7,24	158,60
2000	3,08	31,57	7,69	78,92	12,30	126,27	15,38	157,84
2250	5,37	31,39	13,42	78,48	21,47	125,57	26,84	156,96
2500	8,34	31,19	20,85	77,96	33,35	124,74	41,69	155,92
2750	12,00	30,94	30,00	77,35	47,99	123,76	59,99	154,70
3000	16,36	30,64	40,89	76,61	65,42	122,57	81,78	153,22
3250	21,43	31,74	53,57	79,35	85,70	126,97	107,13	158,71
3500	27,25	32,73	68,12	81,81	108,99	130,90	136,24	163,62
3750	33,86	32,17	84,65	80,42	135,44	128,67	169,29	160,84
4000	41,26	31,51	103,16	78,79	165,06	126,06	206,32	157,57
4250	49,47	30,76	123,67	76,89	197,87	123,02	247,34	153,78
4500	58,47	29,88	146,17	74,69	233,88	119,50	292,35	149,37
4750	68,27	28,86	170,66	72,14	273,06	115,43	341,33	144,29
5000	78,85	27,68	197,12	69,21	315,40	110,73	394,25	138,42
5250	90,21	26,33	225,52	65,83	360,84	105,33	451,05	131,66
5500	102,33	27,14	255,84	67,84	409,34	108,55	511,67	135,68
5750	115,27	27,26	288,17	68,16	461,08	109,05	576,35	136,31
6000	129,03	24,80	322,58	62,01	516,14	99,21	645,17	124,02
6250	143,58	21,98	358,94	54,95	574,31	87,93	717,88	109,91
6500	158,83	18,74	397,08	46,84	635,32	74,94	794,15	93,67
6750	174,71	15,00	436,78	37,50	698,84	59,99	873,55	74,99
7000	191,11	10,69	477,77	26,73	764,43	42,76	955,54	53,46
7250	207,88	5,74	519,69	14,34	831,51	22,95	1039,40	28,68
7500	224,85	0,00	562,13	0,00	899,41	0,00	1124,30	0,00
7750	241,77	0,00	604,43	0,00	967,08	0,00	1208,90	0,00
8000	258,69	0,00	646,73	0,00	1034,80	0,00	1293,50	0,00

4.3 Metodo Sperimentale

I pali in GFR, utilizzati per linee di telecomunicazioni, devono rispettare le caratteristiche tecniche, costruttive e le condizioni di accettazione al collaudo presenti all'interno della specifica di riferimento come mostrato in Tabella 67.

Tabella 67 - Specifica pali centrifugati

Parametri	Capitolato	UM	Prototipo_01	Prototipo_02	Prototipo_03
Forza (F)	4000	[N]	5000	5000	5000
Spessore (s)	> 3,5	[mm]	> 3,5	> 3,5	> 3,5
Lunghezza (L)	8000	[mm]	8000 ± 5	8000 ± 5	8000 ± 5
Diametro testa (Dt)	115 ÷ 125	[mm]	120 ± 5	120 ± 5	120 ± 5
Diametro base (Db)	245 ÷ 280	[mm]	270 ± 5	270 ± 5	270 ± 5
Peso (W)	37 (valore minimo 34,4)	[kg]	n.d. ± 2	n.d. ± 2	n.d. ± 2

Una volta realizzati i pali sono effettuate varie prove di collaudo sperimentale⁶, prelevando a caso dalla produzione un lotto di 10 pali, assicurandoci identico tempo di stagionatura e composizione. In Tabella 68 si riportano tutti i valori delle deflessioni ricavate sperimentalmente per ogni prototipo, con le prove di collaudo di tiro in testa al palo.

I dati indicati con n.d. sono dati non divulgabili poiché coperti da segreto aziendale.

Tabella 68 - Prove sperimentali sui vari prototipi

Numero palo	Prototipo_01			Prototipo_02			Prototipo_03		
	W	F	δ	W	F	δ	W	F	δ
UM	[kg]	[N]	[mm]	[kg]	[N]	[mm]	[kg]	[N]	[mm]
1		1000	185		1000	178		1000	197
	n.d.	2500	462	n.d.	2500	448	n.d.	2500	494
		4000	770		4000	737		4000	800
		5000	974		5000	916		5000	960
2		1000	188		1000	170		1000	212
	n.d.	2500	467	n.d.	2500	505	n.d.	2500	547
		4000	805		400	799		4000	854
		5000	973		5000	1043		5000	1064
3		1000	189		1000	225		1000	197
	n.d.	2500	467	n.d.	2500	540	n.d.	2500	467
		4000	794		4000	878		4000	800
		5000	968		5000	1083		5000	948
4		1000	189		1000	184		1000	189
	n.d.	2500	469	n.d.	2500	524	n.d.	2500	452
		4000	800		4000	858		4000	840
		5000	984		5000	1035		5000	990

⁶ Le prove di collaudo sono descritte nel capitolo 3
 Università degli Studi di Messina: Salvatore Molino

5		1000	190		1000	182		1000	200
	n.d.	2500	473	n.d.	2500	459	n.d.	2500	505
		4000	809		4000	810		4000	857
		5000	990		5000	987		5000	1055
6		1000	187		1000	177		1000	191
	n.d.	2500	470	n.d.	2500	500	n.d.	2500	501
		4000	799		4000	838		4000	825
		5000	984		5000	1007		5000	1038
7		1000	186		1000	217		1000	224
	n.d.	2500	471	n.d.	2500	486	n.d.	2500	528
		4000	785		4000	873		4000	830
		5000	977		5000	1028		5000	1066
8		1000	190		1000	212		1000	167
	n.d.	2500	485	n.d.	2500	486	n.d.	2500	496
		4000	816		4000	873		4000	834
		5000	1000		5000	988		5000	990
9		1000	191		1000	199		1000	191
	n.d.	2500	476	n.d.	2500	484	n.d.	2500	507
		4000	808		4000	853		4000	833
		5000	989		5000	1032		5000	1045
10		1000	189		1000	197		1000	219
	n.d.	2500	478	n.d.	2500	451	n.d.	2500	523
		4000	805		4000	737		4000	856
		5000	987		5000	925		5000	1064
Media		1000	188,4		1000	194,1		1000	198,7
	n.d.	2500	471,8	n.d.	2500	488,3	n.d.	2500	502
		4000	799,1		4000	825,6		4000	832,9
		5000	982,6		5000	1004,4		5000	1022,0

Confrontando i vari prototipi si nota: 1) una riduzione del peso di 6,87%; 2) un leggero incremento della deflessione massima di 4,02%; 3) e una riduzione del costo su singolo palo a 4,01 € come mostrato nella Tabella 69.

Tabella 69 - Variazione % di peso e deflessione palo

Variazione %	Peso stuoia	Peso resina accelerata	Peso palo	Deflessione	Risparmio in peso	Risparmio in costo
UM	[%]	[%]	[%]	[%]	[kg]	[€]
Prototipo_02	-4,94%	-4,44%	-4,78%	+2,22%	-2,12	-2,79
Prototipo_03	-6,84%	-6,67%	-6,87%	+4,01%	-3,05	-4,02

4.3.1 Analisi dei risultati: prove sperimentali

Nelle figure seguenti si riportano:

- Deflessione sperimentale

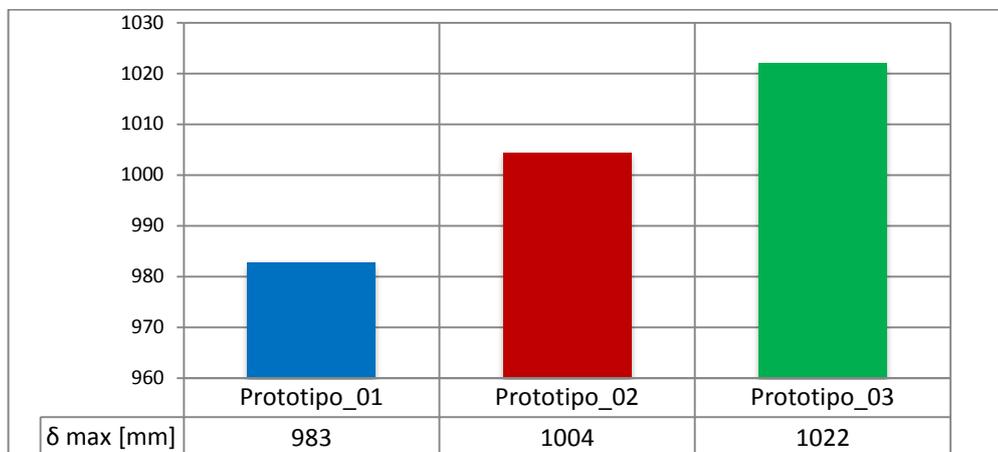


Figura 191 – Deflessione dei vari prototipi

- Rigidezza sperimentale

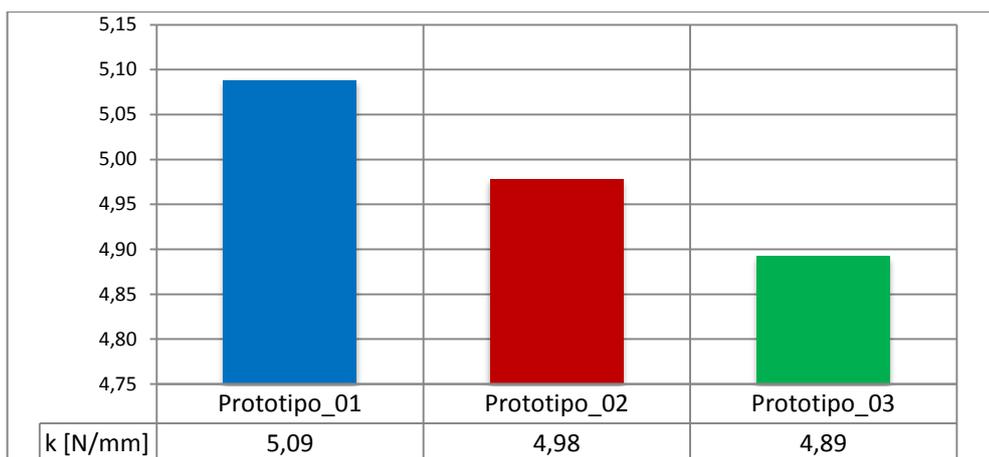


Figura 192 - Rigidezza dei vari prototipi

- Variazioni %

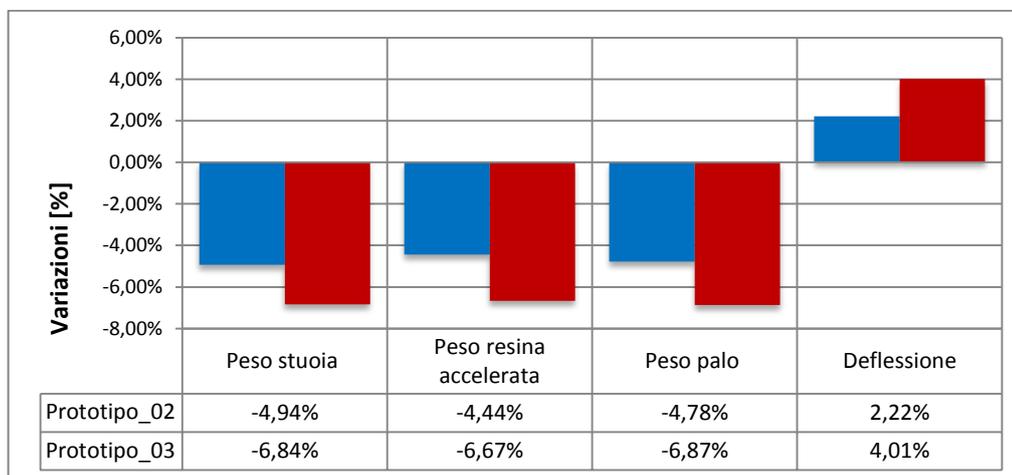


Figura 193 - Variazioni %

4.4 Confronto analitico - numerico - sperimentale

Si confrontano adesso i vari modelli per ogni singolo prototipo, in modo da poter stabilire la % di errore dei modelli realizzati.

– Prototipo_01: deflessione

In Tabella 70 si confrontano i valori di deflessione ricavati con i tre metodi definiti, mentre in Tabella 71 si mostra la % di errore: 7,62 % metodo analitico – sperimentale; 11,06 % metodo numerico – sperimentale.

Tabella 70 – Confronto δ

L [mm]	Forza = 1000 [N]			Forza = 2500 [N]			Forza = 4000 [N]			Forza = 5000 [N]		
	δ analit. [mm]	δ numer. [mm]	δ sperim. [mm]	δ analit. [mm]	δ numer. [mm]	δ sperim. [mm]	δ analit. [mm]	δ numer. [mm]	δ sperim. [mm]	δ analit. [mm]	δ numer. [mm]	δ sperim. [mm]
UM												
0	0,00	0,00		0,00	0,00		0,00	0,00		0,00	0,00	
250	0,00	0,00		0,00	0,00		0,00	0,00		0,00	0,00	
500	0,00	0,00		0,00	0,00		0,00	0,00		0,00	0,00	
750	0,00	0,00		0,00	0,00		0,00	0,00		0,00	0,00	
1000	0,00	0,00		0,01	0,00		0,01	0,00		0,01	0,00	
1250	0,00	0,00		0,01	0,00		0,02	0,00		0,02	0,00	
1500	0,33	0,47		0,83	1,17		1,33	1,88		1,66	2,35	
1750	1,31	1,44		3,29	3,62		5,26	5,79		6,57	7,24	
2000	2,95	3,05		7,37	7,63		11,79	12,22		14,74	15,27	
2250	5,23	5,31		13,08	13,29		20,93	21,27		26,16	26,59	
2500	8,16	8,25		20,41	20,63		32,66	33,01		40,82	41,27	
2750	11,74	11,87		29,35	29,68		46,95	47,49		58,69	59,36	
3000	15,95	16,18		39,88	40,46		63,80	64,73		79,75	80,92	
3250	20,79	21,19		51,98	52,99		83,18	84,78		103,97	105,98	
3500	26,26	26,91		65,65	67,29		105,05	107,67		131,31	134,59	
3750	32,44	33,35		81,09	83,38		129,74	133,41		162,18	166,77	
4000	39,40	40,51		98,49	101,28		157,59	162,05		196,98	202,56	
4250	47,13	48,39		117,82	120,98		188,51	193,57		235,64	241,97	
4500	55,61	57,00		139,02	142,50		222,43	228,00		278,03	285,00	
4750	64,81	66,32		162,03	165,82		259,24	265,31		324,05	331,64	
5000	74,71	76,37		186,78	190,93		298,85	305,49		373,56	381,86	
5250	85,28	87,12		213,19	217,80		341,11	348,48		426,38	435,60	
5500	96,47	98,55		241,17	246,39		385,87	394,23		482,34	492,79	
5750	108,24	110,66		270,61	276,65		432,97	442,64		541,21	553,30	
6000	120,55	123,40		301,37	308,51		482,20	493,62		602,75	617,02	
6250	133,42	136,82		333,56	342,05		533,70	547,28		667,12	684,10	
6500	146,88	150,90		367,21	377,24		587,53	603,58		734,41	754,48	
6750	160,81	165,55		402,02	413,89		643,24	662,22		804,05	827,77	
7000	175,07	180,69		437,68	451,73		700,28	722,78		875,35	903,47	
7250	189,50	196,17		473,76	490,44		758,01	784,70		947,51	980,87	
7500	203,93	211,82	188,40	509,82	529,56	471,80	815,72	847,29	799,10	1019,65	1059,10	982,60
7750	218,18	227,42		545,46	568,56		872,74	909,70		1090,92	1137,10	
8000	232,32	243,03		580,81	607,57		929,29	972,12		1161,61	1215,10	

In Figura 194 viene rappresentato l'istogramma delle deflessioni ricavate a vari carichi.

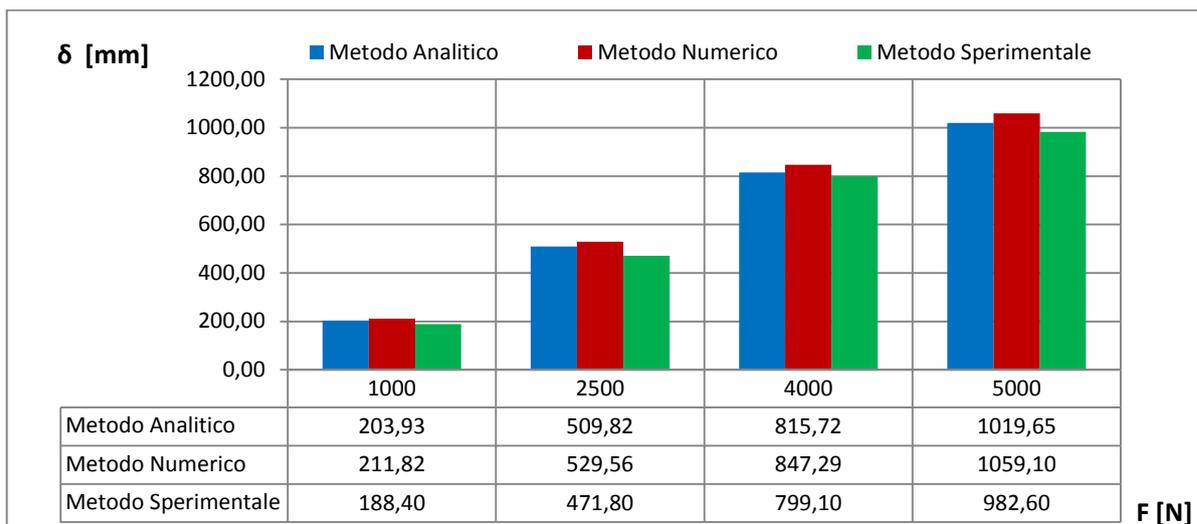


Figura 194 – Confronto δ analitico - sperimentale – numerico

Tabella 71 - Variazione δ %

δ [mm]	Prototipo_01				
	F [N]				
	0	1000	2500	4000	5000
Riferimento	-	420	1070	1900	-
Metodo Analitico	-	203,93	509,82	815,72	1019,65
Metodo Numerico	-	211,82	529,56	847,29	1059,10
Metodo Sperimentale	-	188,40	471,80	799,10	982,60
Variazione % Sp-An	-	7,62%	7,46%	2,04%	3,63%
Variazione % Sp-Num	-	11,06%	10,91%	5,69%	7,22%

– **Prototipo_01: tensione normale**

In Tabella 72 si confrontano i valori di tensione ricavati con i tre metodi definiti, mentre in Tabella 73 si mostra la % di errore: 9,45 % metodo analitico – numerico.

Tabella 72 - Confronto σ

L [mm]	Forza = 1000 [N]		Forza = 2500 [N]		Forza = 4000 [N]		Forza = 5000 [N]	
	σ analit.	σ numer.						
UM	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
250	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
500	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
750	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1250	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1500	28,80	31,52	72,00	78,80	115,20	126,09	144,00	157,61
1750	28,21	31,39	70,54	78,47	112,86	125,55	141,07	156,94
2000	27,60	31,24	69,01	78,09	110,41	124,95	138,01	156,19
2250	26,96	31,06	67,41	77,66	107,85	124,26	134,82	155,32
2500	26,30	30,86	65,74	77,15	105,18	123,44	131,48	154,30

2750	25,60	30,62	63,99	76,54	102,38	122,46	127,98	153,08
3000	24,86	30,32	62,15	75,81	99,45	121,29	124,31	151,61
3250	24,09	29,97	60,23	74,92	96,37	119,88	120,46	149,85
3500	23,28	29,62	58,21	74,05	93,13	118,48	116,41	148,10
3750	29,26	29,19	73,14	72,97	117,02	116,75	146,28	145,94
4000	28,05	28,60	70,13	71,50	112,21	114,40	140,26	143,00
4250	26,78	27,91	66,96	69,79	107,14	111,66	133,92	139,57
4500	25,44	27,12	63,61	67,80	101,77	108,48	127,22	135,60
4750	24,02	26,20	60,06	65,50	96,10	104,79	120,12	130,99
5000	22,52	25,13	56,30	62,83	90,08	100,53	112,60	125,67
5250	20,92	23,91	52,30	59,77	83,69	95,64	104,61	119,55
5500	19,22	22,50	48,05	56,24	76,87	89,99	96,09	112,49
5750	17,40	20,88	43,50	52,19	69,60	83,50	87,00	104,38
6000	15,45	21,11	38,63	52,78	61,81	84,44	77,26	105,55
6250	19,30	20,45	48,25	51,13	77,20	81,81	96,51	102,26
6500	16,01	17,43	40,02	43,58	64,03	69,73	80,04	87,16
6750	12,47	13,95	31,16	34,89	49,86	55,82	62,33	69,77
7000	8,64	9,95	21,61	24,87	34,57	39,79	43,21	49,74
7250	3,54	4,54	8,84	11,35	14,15	18,15	17,68	22,69
7500	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7750	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

In Figura 195 viene rappresentato l'istogramma delle tensioni ricavate a vari carichi.

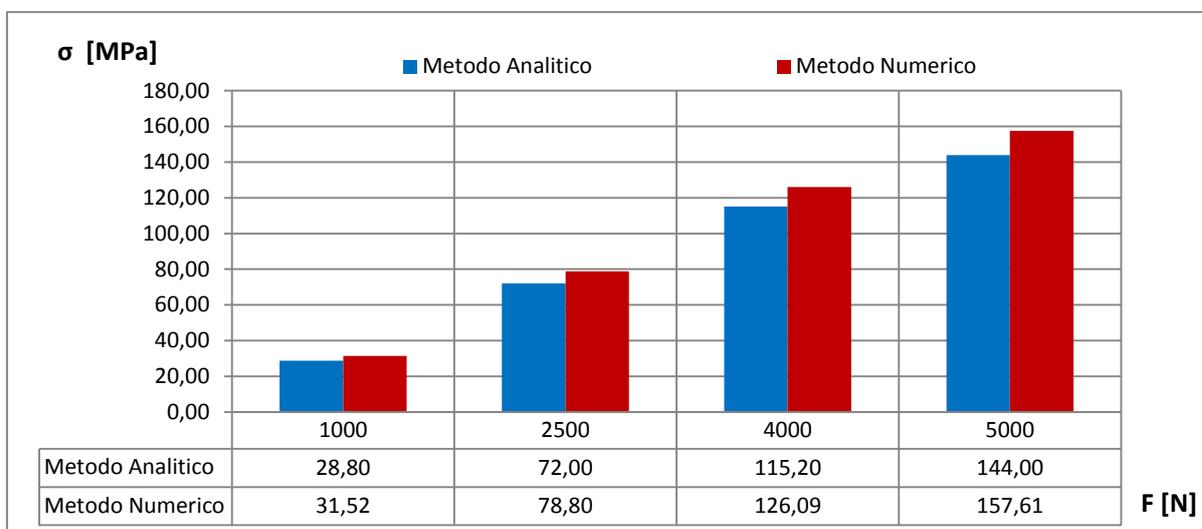


Figura 195 - Confronto σ analitico – numerico

Tabella 73 - Variazione σ %

σ [mm]	Prototipo_01				
	F [N]				
	0	1000	2500	4000	5000
Metodo Analitico	-	28,80	72,00	115,20	144,00
Metodo Numerico	-	31,52	78,80	126,09	157,61
Variazione % An-Num	-	9,45%	9,45%	9,45%	9,45%

– Prototipo_02: deflessione

In Tabella 74 si confrontano i valori di deflessione ricavati con i tre metodi definiti, mentre in Tabella 75 si mostra la % di errore: 7,75 % metodo analitico – sperimentale; 11,26 % metodo numerico – sperimentale.

Tabella 74 - Confronto δ

L [mm]	Forza = 1000 [N]			Forza = 2500 [N]			Forza = 4000 [N]			Forza = 5000 [N]		
	δ analit.	δ numer.	δ sperim.	δ analit.		δ analit.	δ numer.	δ sperim.	δ analit.		δ analit.	δ numer.
UM	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	UM	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	UM	[mm]	[mm]
0	0,00	0,00		0,00	0	0,00	0,00		0,00	0	0,00	0,00
250	0,00	0,00		0,00	250	0,00	0,00		0,00	250	0,00	0,00
500	0,00	0,00		0,00	500	0,00	0,00		0,00	500	0,00	0,00
750	0,00	0,00		0,00	750	0,00	0,00		0,00	750	0,00	0,00
1000	0,00	0,00		0,01	1000	0,00	0,00		0,01	1000	0,00	0,00
1250	0,00	0,00		0,01	1250	0,00	0,00		0,01	1250	0,00	0,00
1500	0,33	0,46		0,83	1500	0,33	0,46		0,83	1500	0,33	0,46
1750	1,31	1,45		3,29	1750	1,31	1,45		3,29	1750	1,31	1,45
2000	2,95	3,08		7,37	2000	2,95	3,08		7,37	2000	2,95	3,08
2250	5,23	5,37		13,08	2250	5,23	5,37		13,08	2250	5,23	5,37
2500	8,16	8,34		20,41	2500	8,16	8,34		20,41	2500	8,16	8,34
2750	11,74	12,00		29,35	2750	11,74	12,00		29,35	2750	11,74	12,00
3000	15,95	16,36		39,88	3000	15,95	16,36		39,88	3000	15,95	16,36
3250	20,79	21,42		51,98	3250	20,79	21,42		51,98	3250	20,79	21,42
3500	26,36	27,22		65,89	3500	26,36	27,22		65,89	3500	26,36	27,22
3750	32,72	33,76		81,80	3750	32,72	33,76		81,80	3750	32,72	33,76
4000	39,87	41,05		99,67	4000	39,87	41,05		99,67	4000	39,87	41,05
4250	47,79	49,09		119,47	4250	47,79	49,09		119,47	4250	47,79	49,09
4500	56,46	57,88		141,15	4500	56,46	57,88		141,15	4500	56,46	57,88
4750	65,85	67,42		164,63	4750	65,85	67,42		164,63	4750	65,85	67,42
5000	75,94	77,71		189,86	5000	75,94	77,71		189,86	5000	75,94	77,71
5250	86,70	88,73		216,74	5250	86,70	88,73		216,74	5250	86,70	88,73
5500	98,08	100,47		245,19	5500	98,08	100,47		245,19	5500	98,08	100,47
5750	110,16	112,98		275,41	5750	110,16	112,98		275,41	5750	110,16	112,98
6000	123,02	126,28		307,56	6000	123,02	126,28		307,56	6000	123,02	126,28
6250	136,57	140,33		341,41	6250	136,57	140,33		341,41	6250	136,57	140,33
6500	150,69	155,06		376,73	6500	150,69	155,06		376,73	6500	150,69	155,06
6750	165,29	170,39		413,22	6750	165,29	170,39		413,22	6750	165,29	170,39
7000	180,22	186,22		450,54	7000	180,22	186,22		450,54	7000	180,22	186,22
7250	195,32	202,39		488,29	7250	195,32	202,39		488,29	7250	195,32	202,39
7500	210,41	218,74	194,10	526,03	7500	210,41	218,74	194,10	526,03	7500	210,41	218,74
7750	225,26	235,04		563,15	7750	225,26	235,04		563,15	7750	225,26	235,04
8000	239,93	251,35		599,82	8000	239,93	251,35		599,82	8000	239,93	251,35

In Figura 196 viene rappresentato l'istogramma delle deflessioni ricavate a vari carichi.

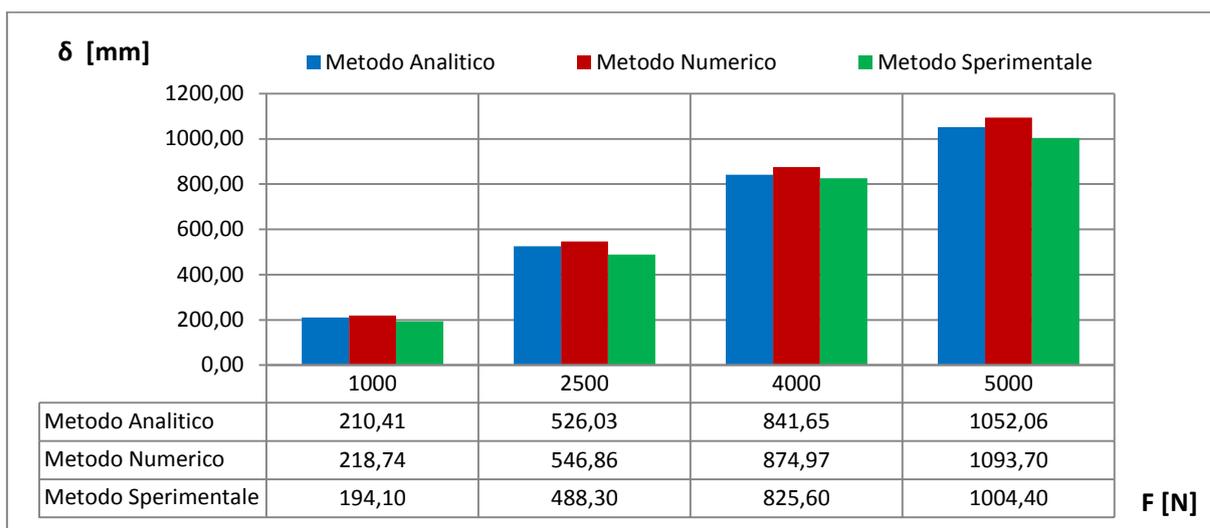


Figura 196 - Confronto δ analitico - sperimentale – numerico

Tabella 75 - Variazione δ %

δ [mm]	Prototipo_02				
	F [N]				
	0	1000	2500	4000	5000
Riferimento	-	420	1070	1900	-
Metodo Analitico	-	210,41	526,03	841,65	1052,06
Metodo Numerico	-	218,74	546,86	874,97	1093,70
Metodo Sperimentale	-	194,10	488,30	825,60	1004,40
Variazione % Sp-An	-	7,75%	7,17%	1,91%	4,53%
Variazione % Sp-Num	-	11,26%	10,71%	5,64%	8,16%

– **Prototipo_02: tensione normale**

In Tabella 76 si confrontano i valori di tensione ricavati con i tre metodi definiti, mentre in Tabella 77 si mostra la % di errore: 10,60 % metodo analitico – numerico.

Tabella 76 - Confronto σ

L [mm]	Forza = 1000 [N]		Forza = 2500 [N]		Forza = 4000 [N]		Forza = 5000 [N]	
	σ analit. [MPa]	σ numer. [MPa]						
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
250	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
500	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
750	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1250	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1500	28,80	31,85	72,00	79,64	115,20	127,42	144,00	159,27
1750	28,21	31,72	70,54	79,30	112,86	126,88	141,07	158,60
2000	27,60	31,57	69,01	78,92	110,41	126,27	138,01	157,84
2250	26,96	31,39	67,41	78,48	107,85	125,56	134,82	156,95
2500	26,30	31,18	65,74	77,96	105,18	124,74	131,48	155,92

2750	25,60	30,94	63,99	77,35	102,38	123,76	127,98	154,69
3000	24,86	30,64	62,15	76,60	99,45	122,57	124,31	153,21
3250	24,09	30,79	60,23	76,97	96,37	123,16	120,46	153,95
3500	30,40	30,85	76,00	77,11	121,59	123,38	151,99	154,23
3750	29,26	30,32	73,14	75,81	117,02	121,29	146,28	151,61
4000	28,05	29,71	70,13	74,27	112,21	118,84	140,26	148,55
4250	26,78	29,00	66,96	72,49	107,14	115,99	133,92	144,98
4500	25,44	28,17	63,61	70,42	101,77	112,67	127,22	140,84
4750	24,02	27,21	60,06	68,03	96,10	108,84	120,12	136,05
5000	22,52	26,11	56,30	65,27	90,08	104,43	112,60	130,53
5250	20,92	24,84	52,30	62,09	83,69	99,34	104,61	124,17
5500	19,22	25,80	48,05	64,50	76,87	103,20	96,09	129,00
5750	25,24	26,09	63,11	65,23	100,97	104,36	126,21	130,45
6000	22,37	23,74	55,93	59,35	89,49	94,95	111,86	118,69
6250	19,30	21,04	48,25	52,60	77,20	84,16	96,51	105,19
6500	16,01	17,93	40,02	44,83	64,03	71,73	80,04	89,66
6750	12,47	14,36	31,16	35,89	49,86	57,43	62,33	71,79
7000	8,64	10,23	21,61	25,59	34,57	40,94	43,21	51,17
7250	3,54	4,70	8,84	11,76	14,15	18,82	17,68	23,52
7500	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7750	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

In Figura 197 viene rappresentato l'istogramma delle tensioni ricavate a vari carichi.

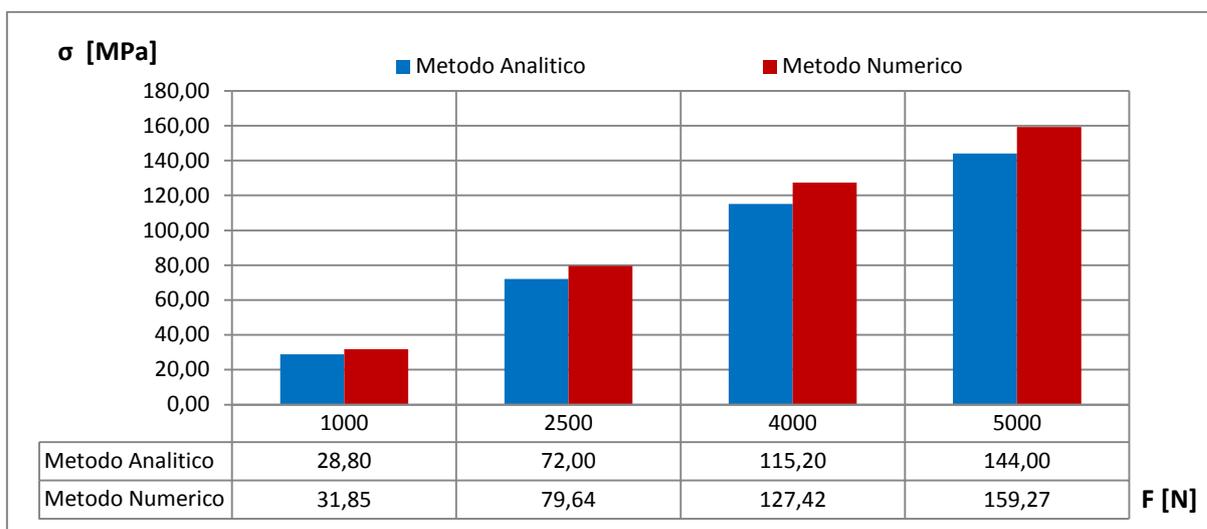


Figura 197 - Confronto σ analitico – numerico

Tabella 77 - Variazione σ %

σ [mm]	Prototipo_02				
	F [N]				
	0	1000	2500	4000	5000
Metodo Analitico	-	28,80	72,00	115,20	144,00
Metodo Numerico	-	31,854	79,635	127,42	159,27
Variazione % An-Num	-	10,60%	10,60%	10,60%	10,60%

– Prototipo_03: deflessione

In Tabella 78 si confrontano i valori di deflessione ricavati con i tre metodi definiti, mentre in Tabella 79 si mostra la % di errore: 7,14 % metodo analitico – sperimentale; 11,63 % metodo numerico – sperimentale.

Tabella 78 - Confronto δ

L [mm]	Forza = 1000 [N]			Forza = 2500 [N]			Forza = 4000 [N]			Forza = 5000 [N]		
	δ analit. [mm]	δ numer. [mm]	δ sperim. [mm]	δ analit. [mm]	δ numer. [mm]	δ sperim. [mm]	δ analit. [mm]	δ numer. [mm]	δ sperim. [mm]	δ analit. [mm]	δ numer. [mm]	δ sperim. [mm]
0	0,00	0,00		0,00	0,00		0,00	0,00		0,00	0,00	
250	0,00	0,00		0,00	0,00		0,00	0,00		0,00	0,00	
500	0,00	0,00		0,00	0,00		0,00	0,00		0,00	0,00	
750	0,00	0,00		0,00	0,00		0,00	0,00		0,00	0,00	
1000	0,00	0,00		0,01	0,00		0,01	0,00		0,01	0,00	
1250	0,00	0,00		0,01	0,00		0,02	0,00		0,02	0,00	
1500	0,33	0,46		0,83	1,16		1,33	1,86		1,66	2,32	
1750	1,31	1,45		3,29	3,62		5,26	5,80		6,57	7,24	
2000	2,95	3,08		7,37	7,69		11,79	12,30		14,74	15,38	
2250	5,23	5,37		13,08	13,42		20,93	21,47		26,16	26,84	
2500	8,16	8,34		20,41	20,85		32,66	33,35		40,82	41,69	
2750	11,74	12,00		29,35	30,00		46,95	47,99		58,69	59,99	
3000	15,95	16,36		39,88	40,89		63,80	65,42		79,75	81,78	
3250	20,79	21,43		51,98	53,57		83,18	85,70		103,97	107,13	
3500	26,36	27,25		65,89	68,12		105,42	108,99		131,78	136,24	
3750	32,72	33,86		81,80	84,65		130,87	135,44		163,59	169,29	
4000	39,87	41,26		99,67	103,16		159,48	165,06		199,35	206,32	
4250	47,79	49,47		119,47	123,67		191,16	197,87		238,95	247,34	
4500	56,46	58,47		141,15	146,17		225,83	233,88		282,29	292,35	
4750	65,85	68,27		164,63	170,66		263,41	273,06		329,26	341,33	
5000	76,00	78,85		190,01	197,12		304,01	315,40		380,02	394,25	
5250	86,94	90,21		217,35	225,52		347,76	360,84		434,71	451,05	
5500	98,62	102,33		246,55	255,84		394,47	409,34		493,09	511,67	
5750	111,06	115,27		277,65	288,17		444,23	461,08		555,29	576,35	
6000	124,27	129,03		310,67	322,58		497,08	516,14		621,35	645,17	
6250	138,16	143,58		345,41	358,94		552,66	574,31		690,82	717,88	
6500	152,64	158,83		381,61	397,08		610,58	635,32		763,22	794,15	
6750	167,59	174,71		418,98	436,78		670,37	698,84		837,96	873,55	
7000	182,91	191,11		457,27	477,77		731,64	764,43		914,55	955,54	
7250	198,45	207,88		496,12	519,69		793,79	831,51		992,23	1039,40	
7500	213,98	224,85	198,70	534,95	562,13	502,00	855,92	899,41	833,00	1069,90	1124,30	1022,00
7750	229,26	241,77		573,14	604,43		917,03	967,08		1146,28	1208,90	
8000	244,36	258,69		610,89	646,73		977,42	1034,80		1221,78	1293,50	

In Figura 198 viene rappresentato l'istogramma delle deflessioni ricavate a vari carichi.

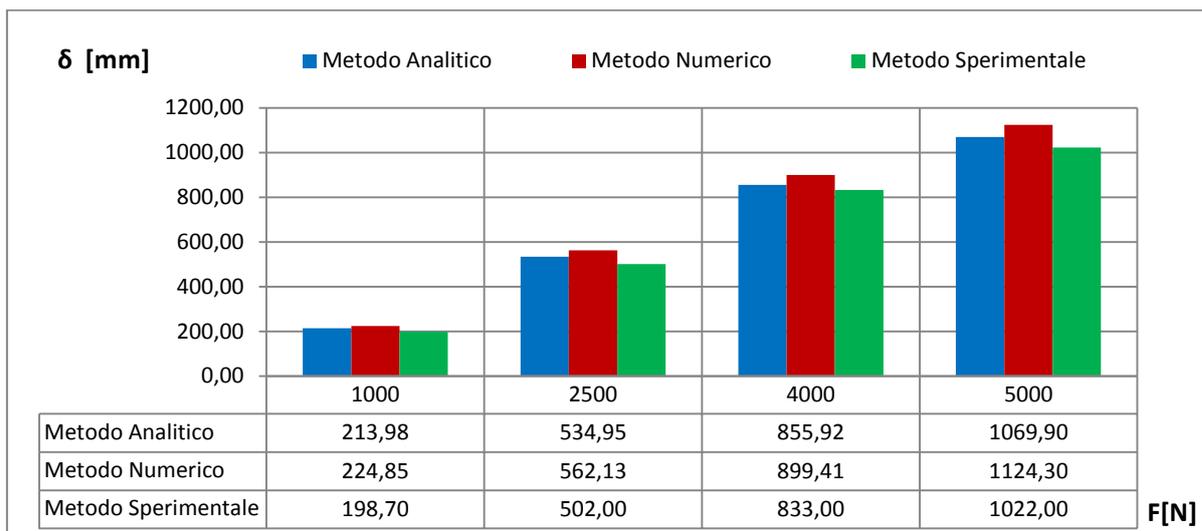


Figura 198 - Confronto δ analitico - sperimentale – numerico

Tabella 79 - Variazione δ %

δ [mm]	Prototipo_03				
	F [N]				
	0	1000	2500	4000	5000
Riferimento	-	420	1070	1900	-
Metodo Analitico	-	213,98	534,95	855,92	1069,90
Metodo Numerico	-	224,85	562,13	899,41	1124,30
Metodo Sperimentale	-	198,70	502,20	833,40	1022,00
Variazione % Sp-An	-	7,14%	6,16%	2,68%	4,48%
Variazione % Sp-Num	-	11,63%	10,70%	7,38%	9,10%

– Prototipo_03: tensione normale

In Tabella 80 si confrontano i valori di tensione ricavati con i tre metodi definiti, mentre in Tabella 81 si mostra la % di errore: 13,62 % metodo analitico – numerico.

Tabella 80 - Confronto σ

L [mm]	Forza = 1000 [N]		Forza = 2500 [N]		Forza = 4000 [N]		Forza = 5000 [N]	
	σ analit. [MPa]	σ numer. [MPa]						
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
250	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
500	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
750	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1250	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1500	28,80	31,85	72,00	79,64	115,20	127,42	144,00	159,27
1750	28,21	31,72	70,54	79,30	112,86	126,88	141,07	158,60
2000	27,60	31,57	69,01	78,92	110,41	126,27	138,01	157,84
2250	26,96	31,39	67,41	78,48	107,85	125,57	134,82	156,96
2500	26,30	31,19	65,74	77,96	105,18	124,74	131,48	155,92

2750	25,60	30,94	63,99	77,35	102,38	123,76	127,98	154,70
3000	24,86	30,64	62,15	76,61	99,45	122,57	124,31	153,22
3250	24,09	31,74	60,23	79,35	96,37	126,97	120,46	158,71
3500	30,40	32,73	76,00	81,81	121,59	130,90	151,99	163,62
3750	29,26	32,17	73,14	80,42	117,02	128,67	146,28	160,84
4000	28,05	31,51	70,13	78,79	112,21	126,06	140,26	157,57
4250	26,78	30,76	66,96	76,89	107,14	123,02	133,92	153,78
4500	25,44	29,88	63,61	74,69	101,77	119,50	127,22	149,37
4750	24,02	28,86	60,06	72,14	96,10	115,43	120,12	144,29
5000	26,65	27,68	66,61	69,21	106,58	110,73	133,23	138,42
5250	24,73	26,33	61,84	65,83	98,94	105,33	123,67	131,66
5500	22,70	27,14	56,75	67,84	90,80	108,55	113,50	135,68
5750	25,24	27,26	63,11	68,16	100,97	109,05	126,21	136,31
6000	22,37	24,80	55,93	62,01	89,49	99,21	111,86	124,02
6250	19,30	21,98	48,25	54,95	77,20	87,93	96,51	109,91
6500	16,01	18,74	40,02	46,84	64,03	74,94	80,04	93,67
6750	12,47	15,00	31,16	37,50	49,86	59,99	62,33	74,99
7000	11,26	10,69	28,16	26,73	45,05	42,76	56,32	53,46
7250	4,26	5,74	10,66	14,34	17,05	22,95	21,32	28,68
7500	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7750	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

In Figura 199 viene rappresentato l'istogramma delle tensioni ricavate a vari carichi.

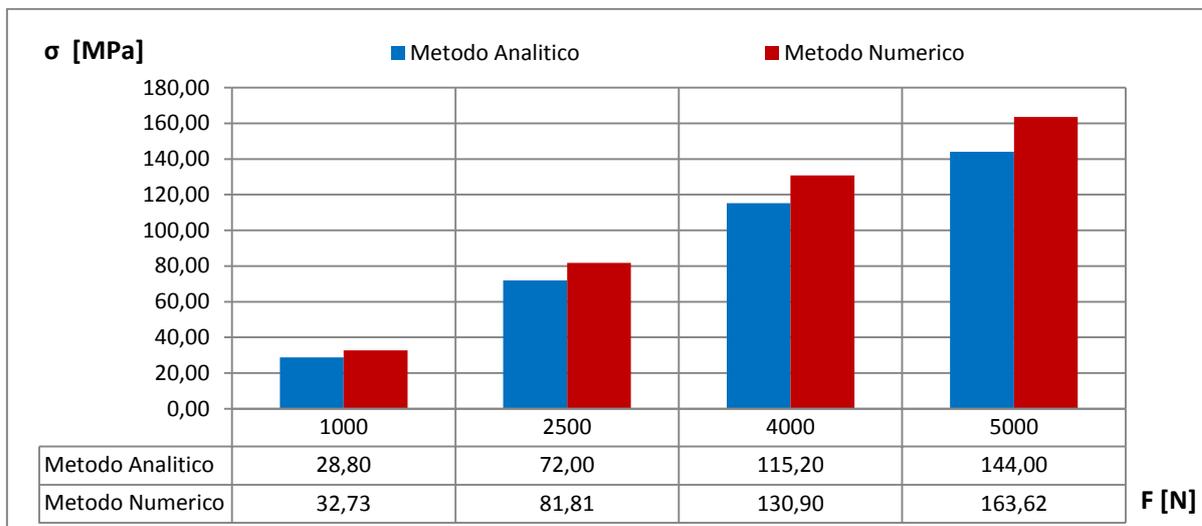


Figura 199 - Confronto σ analitico – numerico

Tabella 81 - Variazione σ %

σ [mm]	Prototipo_03				
	F [N]				
	0	1000	2500	4000	5000
Metodo Analitico	-	28,80	72,00	115,20	144,00
Metodo Numerico	-	32,725	81,812	130,9	163,62
Variazione % An-Num	-	13,62%	13,62%	13,62%	13,62%

4.4.1 Riepilogo confronto prototipi

In Tabella 82 è stata fatta una tabella riassuntiva in cui vengono mostrati i principali valori di deflessione e tensione relative ad ogni prototipo notando come in generale si avrà:

- una variazione percentuale massima di deflessione pari a circa l’11% ;
- una variazione percentuale massima di tensione pari a circa l’13% ;

Tabella 82 - Confronto modelli

Prototipo	Metodo	F [N]				F [N]			
		1000	2500	4000	5000	1000	2500	4000	5000
		δ [mm]				σ [MPa]			
	Riferimento	420	1070	1900	-	-	-	-	-
01	Met. Analit.	203,93	509,82	815,72	1019,65	28,80	72,00	115,20	144,00
	Met.Num.	211,82	529,56	847,29	1059,1	31,52	78,80	126,09	157,61
	Met. Sperim	188,4	471,8	799,1	982,6	-	-	-	-
	Var. % Sp-An	7,62%	7,46%	2,04%	3,63%	-	-	-	-
	Var. % Sp-Num	11,06%	10,91%	5,69%	7,22%	-	-	-	-
	Var. % An-Num	3,72%	3,73%	3,73%	3,72%	9,45%	9,45%	9,45%	9,45%
02	Met. Analit.	210,41	526,03	841,65	976,58	28,80	72,00	115,20	144,00
	Met.Num.	218,74	546,86	874,97	1093,7	31,85	79,64	127,42	159,27
	Met. Sperim	194,1	488,3	825,6	1004,4	-	-	-	-
	Var. % Sp-An	7,75%	7,17%	1,91%	4,53%	-	-	-	-
	Var. % Sp-Num	11,26%	10,71%	5,64%	8,16%	-	-	-	-
	Var. % An-Num	3,81%	3,81%	3,81%	3,81%	10,60%	10,60%	10,60%	10,60%
03	Met. Analit.	213,98	534,95	855,92	1069,90	28,80	72,00	115,20	144,00
	Met.Num.	224,85	562,13	899,41	1124,30	32,73	81,81	130,90	163,62
	Met. Sperim	198,7	502	833	1022	-	-	-	-
	Var. % Sp-An	7,14%	6,16%	2,68%	4,48%	-	-	-	-
	Var. % Sp-Num	11,63%	10,70%	7,38%	9,10%	-	-	-	-
	Var. % An-Num	4,83%	4,84%	4,84%	4,84%	13,62%	13,62%	13,62%	13,62%

4.5 Progettazione committente Orange

Durante il secondo anno di attività di ricerca è stata effettuata una nuova progettazione per il committente Orange Telecom. Pertanto per soddisfare le richieste del committente sono stati realizzati 4 prototipi ex novo e realizzati gli stampi.

Anche in questo caso prima di eseguire le prove di collaudo sperimentale viene fatta un’analisi preliminare impostando un modello analitico definendo preliminarmente le caratteristiche a cui bisogna strettamente attenersi affinché il prototipo realizzato possa rispondere in modo corretto alle esigenze del committente.

In particolare per effettuare la prova era importante definire:

- 1) **Interramento**: a seconda della lunghezza del prototipo da collaudare era necessario cambiare l’ammorsaggio delle ganasce alla base del palo, rispettando la seguente funzione:

$$\frac{H}{10} + 700 \text{ mm} \quad \text{dove H: altezza palo}$$

- 2) **Punto di applicazione forza**: il collare di collegamento al pistone viene messo a 150 mm di distanza dalla cima dei prototipi da collaudare.

Quanto detto fin adesso è mostrato in Figura 200, mentre in Tabella 83 vengono riassunte le caratteristiche tecniche richieste.



Figura 200 – a) interramento; b) collare collegamento pistone

Tabella 83 - Caratteristiche tecniche richieste

Parametri	UM	Prototipo_L		Prototipo_R	
L	[mm]	7000	8000	7000	8000
Interramento	[mm]	1400	1500	1400	1500
Applicazione F	[mm]	150	150	150	150
F	[N]	1440	1750	3000	3000
δ	[mm]	330	440	330	440

Per la progettazione dei pali Orange Telecom possiamo quindi affermare:

- Obiettivo: basse deflessioni garantendo quindi una buona rigidità del palo
- Soluzione: aumento del diametro di testa (DT) del palo

4.5.1 Metodo Analitico: analisi dei risultati

Nelle tabelle seguenti vengono riportati brevemente tutti i valori di deflessione e di tensione ricavati con il metodo analitico relativi a ogni prototipo progettato. Di seguito verranno diagrammati:

- In Figura 201 vengono diagrammati i valori delle deflessioni analitiche, registrate a carico massimo, dei vari prototipi;

– In Figura 202 vengono diagrammati i valori delle tensioni analitiche, registrate a carico massimo, dei vari prototipi;

Tabella 84 - Riepilogo risultati analitici prototipi_L

L	Prototipo 7 m_L				Prototipo 8 m_L			
	Forza= 1000 N		Forza= 1440 N		Forza= 1000 N		Forza= 1750 N	
UM	δ	σ	δ	σ	δ	σ	δ	σ
	[mm]	[Mpa]	[mm]	[Mpa]	[mm]	[Mpa]	[mm]	[Mpa]
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
250	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
500	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
750	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1000	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
1250	0,01	0,00	0,02	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00
1500	0,02	0,00	0,03	0,00	0,01	0,00	0,02	0,00
1750	0,40	32,67	0,57	47,05	0,40	35,99	0,69	62,98
2000	1,52	31,75	2,19	45,73	1,55	35,21	2,71	61,62
2250	3,38	30,80	4,87	44,35	3,47	34,40	6,07	60,20
2500	5,98	29,79	8,61	42,90	6,15	33,55	10,76	58,72
2750	9,46	42,35	13,62	60,98	9,58	32,67	16,76	57,18
3000	13,97	40,70	20,12	58,60	13,76	31,75	24,07	55,57
3250	19,51	38,97	28,09	56,12	18,67	30,80	32,68	53,89
3500	26,03	37,16	37,49	53,51	24,32	29,79	42,56	52,14
3750	33,52	35,26	48,27	50,77	30,69	28,75	53,70	50,31
4000	41,93	33,26	60,38	47,90	37,76	27,65	66,08	48,39
4250	51,24	31,16	73,78	44,87	45,52	26,50	79,66	46,37
4500	61,39	28,94	88,40	41,67	53,96	25,29	94,42	44,26
4750	72,34	26,60	104,16	38,30	63,05	24,02	110,33	42,04
5000	84,03	24,12	121,00	34,73	72,77	22,68	127,35	39,70
5250	96,39	21,49	138,81	30,95	83,24	31,16	145,67	54,53
5500	109,37	18,70	157,49	26,93	94,55	28,94	165,46	50,65
5750	122,86	15,73	176,92	22,66	106,66	26,60	186,66	46,55
6000	136,79	12,57	196,97	18,10	119,51	24,12	209,15	42,21
6250	151,00	6,35	217,44	9,15	133,04	21,49	232,82	37,61
6500	165,34	3,85	238,09	5,54	147,18	18,70	257,56	32,73
6750	179,72	1,65	258,80	2,37	161,84	15,73	283,21	27,54
7000	194,11	0,00	279,52	0,00	176,92	12,57	309,61	21,99
7250					192,29	6,35	336,51	11,12
7500					207,80	3,85	363,66	6,74
7750					223,35	1,14	390,87	2,00
8000					238,91	0,00	418,08	0,00

Tabella 85 - Riepilogo risultati analitici prototipi_R

L	Prototipo 7 m_R				Prototipo 8 m_R			
	Forza= 1000 N		Forza= 3000 N		Forza= 1000 N		Forza= 3000 N	
UM	δ	σ	δ	σ	δ	σ	δ	σ
	[mm]	[Mpa]	[mm]	[Mpa]	[mm]	[Mpa]	[mm]	[Mpa]

0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
250	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
500	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
750	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1000	0,01	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
1250	0,01	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
1500	0,01	0,00	0,04	0,00	0,01	0,00	0,02	0,00
1750	0,25	22,75	0,76	68,25	0,21	20,39	0,63	61,16
2000	0,98	22,08	2,93	66,24	0,82	19,93	2,45	59,78
2250	2,17	21,38	6,51	64,14	1,82	19,45	5,47	58,35
2500	3,83	20,65	11,49	61,96	3,23	18,96	9,68	56,87
2750	5,95	19,89	17,84	59,68	5,02	18,44	15,07	55,32
3000	8,51	19,10	25,53	57,30	7,21	17,91	21,63	53,72
3250	11,51	18,27	34,53	54,81	9,78	17,35	29,34	52,04
3500	14,93	17,40	44,79	52,21	12,72	16,77	38,17	50,30
3750	18,82	21,60	56,47	64,81	16,08	19,89	48,25	59,68
4000	23,23	20,34	69,70	61,02	19,89	19,10	59,67	57,30
4250	28,14	19,02	84,41	57,05	24,13	18,27	72,39	54,81
4500	33,51	17,63	100,52	52,88	28,80	17,40	86,39	52,21
4750	39,32	16,16	117,95	48,49	33,87	16,50	101,62	49,49
5000	45,53	14,62	136,58	43,87	39,34	15,54	118,03	46,63
5250	52,19	19,04	156,56	57,13	45,24	19,02	135,73	57,05
5500	59,33	16,51	177,98	49,53	51,61	17,63	154,84	52,88
5750	66,88	13,83	200,63	41,49	58,42	16,16	175,26	48,49
6000	74,76	11,00	224,29	33,00	65,63	14,62	196,89	43,87
6250	82,87	5,49	248,61	16,47	73,21	13,00	219,64	39,00
6500	91,08	3,31	273,24	9,92	81,12	11,28	243,36	33,85
6750	99,32	0,98	297,96	2,93	89,36	13,83	268,09	41,49
7000	107,56	0,00	322,69	0,00	97,95	11,00	293,84	33,00
7250					106,75	6,20	320,26	18,61
7500					115,68	3,74	347,04	11,21
7750					124,64	1,10	373,93	3,31
8000					133,61	0,00	400,83	0,00

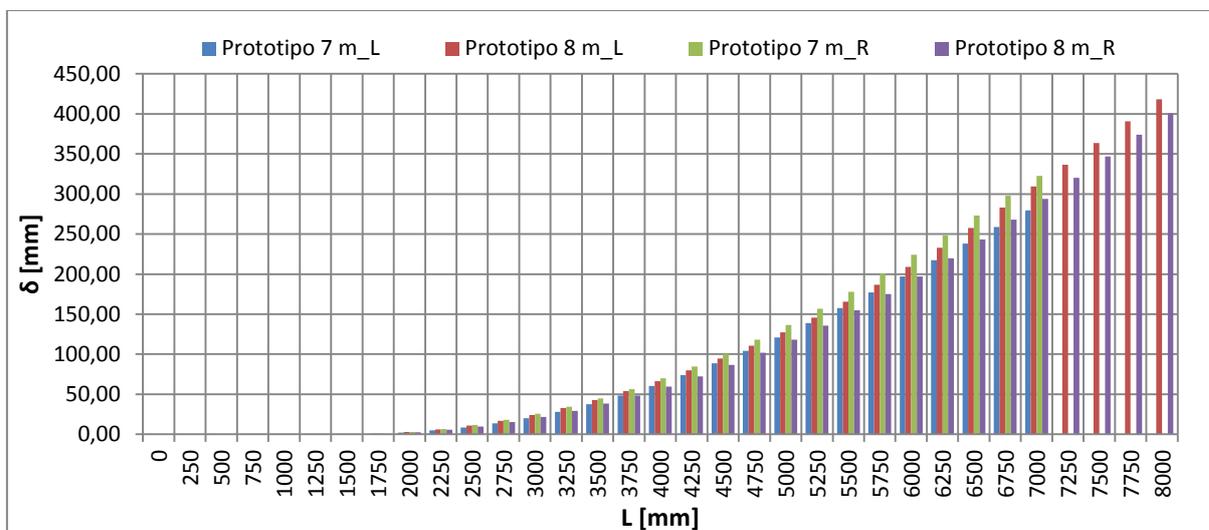


Figura 201 - Deflessioni analitiche a carico massimo dei vari prototipi

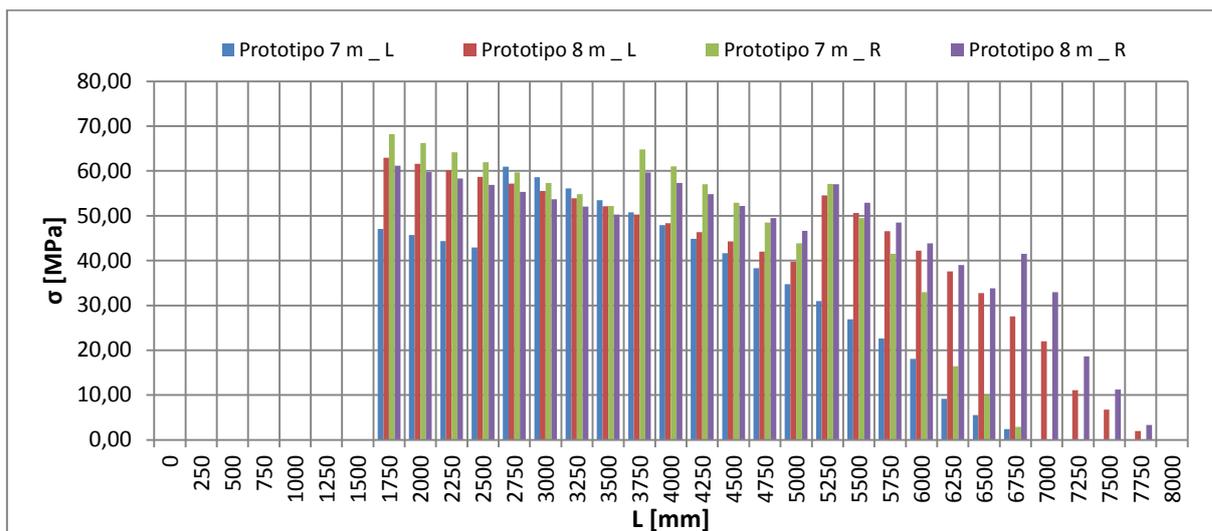


Figura 202 - Tensioni normali a carico massimo dei vari prototipi

4.5.2 Metodo Sperimentale: analisi dei risultati

Una volta realizzati i pali sono effettuate varie prove di collaudo sperimentale, prelevando a caso dalla produzione un lotto di 10 pali, assicurandoci identico tempo di stagionatura e composizione. Nelle tabelle seguenti si riportano tutti i valori delle deflessioni ricavate sperimentalmente per ogni prototipo, con le prove di collaudo di tiro in testa al palo.

Tabella 86 - Prove sperimentali prototipi_R

			Prototipi_R						
Dt	Palo	Rotazione	Carico applicato [N]			δ [mm]	deve rientrare in	Peso	Rigidezza
			0	1000	3000				
n.d.	Palo 7m R1	a	0	94	294	330 mm	n.d.	10,204	
		b	0	116	305			9,836	
		c	0	107	320			9,375	
n.d.	Palo 8m R1	a	0	115	386	440 mm	n.d.	7,772	
		b	0	140	397			7,557	
		c	0	106	399			7,519	

Tabella 87 - Prove sperimentali prototipo 7 m_L

			Prototipo_L						
Dt	Palo	Rotazione	Carico applicato [N]			δ [mm]	deve rientrare in	Peso	rigidezza
			0	1000	1440				
n.d.	Palo 7m L	a	0	140	240	330 mm	n.d.	6	
		b	0	204	284			5,070	
		c	0	197	289			4,983	

Tabella 88 - Prove sperimentali prototipo 8 m_L

			Prototipo_L						
Dt	Palo	Rotazione	Carico applicato [N]			δ [mm]	deve rientrare in	Peso	rigidezza
			0	1000	1750				

n.d.	Palo 8m L	a	0	240	415	δ [mm]	deve rientrare in 440 mm	n.d.	4,217
		b	0	272	426				4,108
		c	0	250	406				4,310

I dati indicati con n.d. non sono dati divulgabili.

Nelle Figura 203, Figura 204 si mettono in evidenza i valori di deflessione massima e rigidezza di ogni prototipo analizzato.

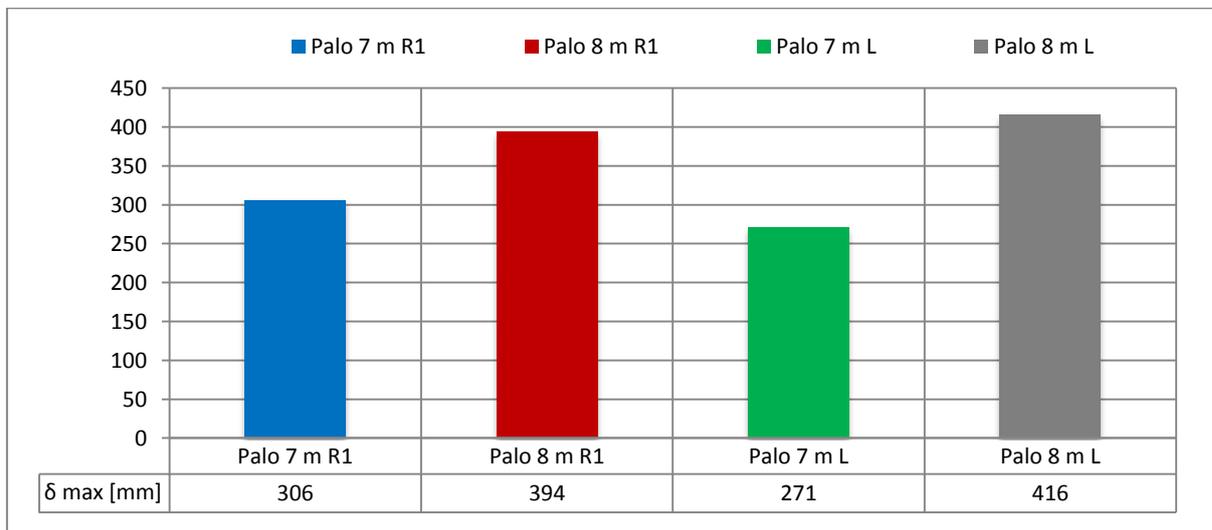


Figura 203 - Deflessione dei vari prototipi

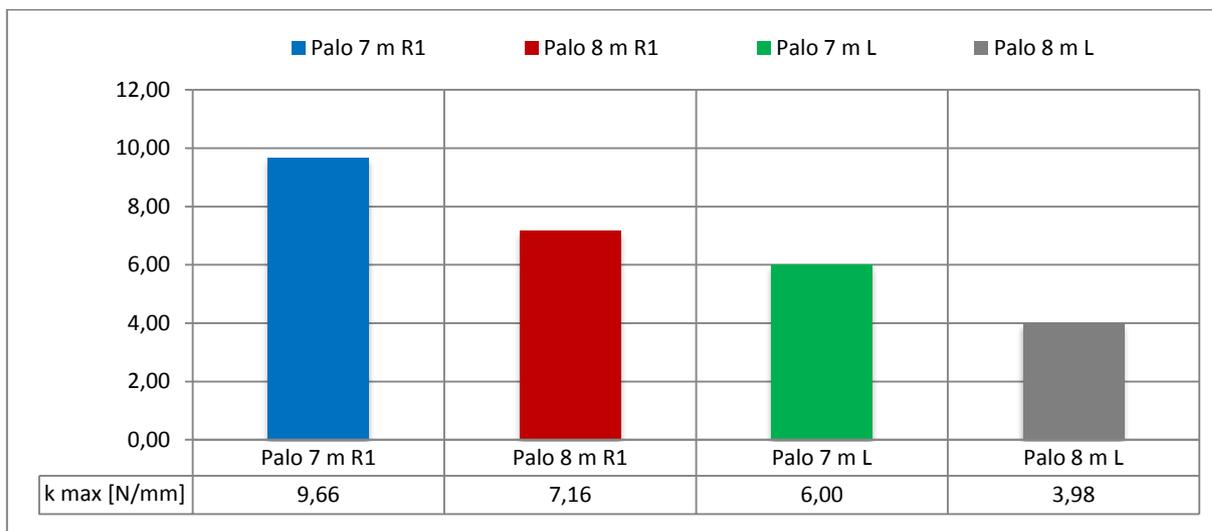


Figura 204 - Rigidezza dei vari prototipi

4.5.3 Confronto analitico - sperimentale

Si confrontano adesso i vari modelli per ogni singolo prototipo, in modo da poter stabilire la % di errore del modello analitico impostato.

– Prototipi_L: deflessione

In Tabella 89 si confrontano i valori di deflessione ricavati con il metodo analitico e le prove di collaudo sperimentale, mentre in Tabella 90 si mostra la % di errore: 9,90 %.

Tabella 89 – Confronto δ

L [mm]	Prototipo 7 m_L				Prototipo 8 m_L			
	Forza= 1000 [N]		Forza= 1440 [N]		Forza= 1000 [N]		Forza= 1750 [N]	
	δ analit.	δ sperim.						
UM	[mm]							
0	0,00		0,00		0,00		0,00	
250	0,00		0,00		0,00		0,00	
500	0,00		0,01		0,00		0,00	
750	0,01		0,01		0,00		0,00	
1000	0,01		0,01		0,00		0,01	
1250	0,01		0,02		0,01		0,01	
1500	0,02		0,03		0,01		0,02	
1750	0,40		0,57		0,40		0,69	
2000	1,52		2,19		1,55		2,71	
2250	3,38		4,87		3,47		6,07	
2500	5,98		8,61		6,15		10,76	
2750	9,46		13,62		9,58		16,76	
3000	13,97		20,12		13,76		24,07	
3250	19,51		28,09		18,67		32,68	
3500	26,03		37,49		24,32		42,56	
3750	33,52		48,27		30,69		53,70	
4000	41,93		60,38		37,76		66,08	
4250	51,24		73,78		45,52		79,66	
4500	61,39		88,40		53,96		94,42	
4750	72,34		104,16		63,05		110,33	
5000	84,03		121,00		72,77		127,35	
5250	96,39		138,81		83,24		145,67	
5500	109,37		157,49		94,55		165,46	
5750	122,86		176,92		106,66		186,66	
6000	136,79		196,97		119,51		209,15	
6250	151,00		217,44		133,04		232,82	
6500	165,34		238,09		147,18		257,56	
6750	179,72	180,33	258,80	271,00	161,84		283,21	
7000	194,11		279,52		176,92		309,61	
7250					192,29		336,51	
7500					207,80		363,66	
7750					223,35	254,00	390,87	415,67
8000					238,91		418,08	

Tabella 90 - Variazione δ %

Prototipo_L	δ [mm]	F [N]		
		1000	1440	1750
	Riferimento	-	330	440
7 m	Metodo Analitico	186,92	269,16	-
	Metodo Sperimentale	180,33	271,00	-
	Variazione % Sp-An	3,52%	0,68%	

8 m	Metodo Analitico	231,13	-	404,48
	Metodo Sperimentale	254,00	-	415,67
	Variazione % Sp-An	9,90%		2,77%

In Figura 205 viene rappresentato l'istogramma delle deflessioni ricavate a vari carichi.

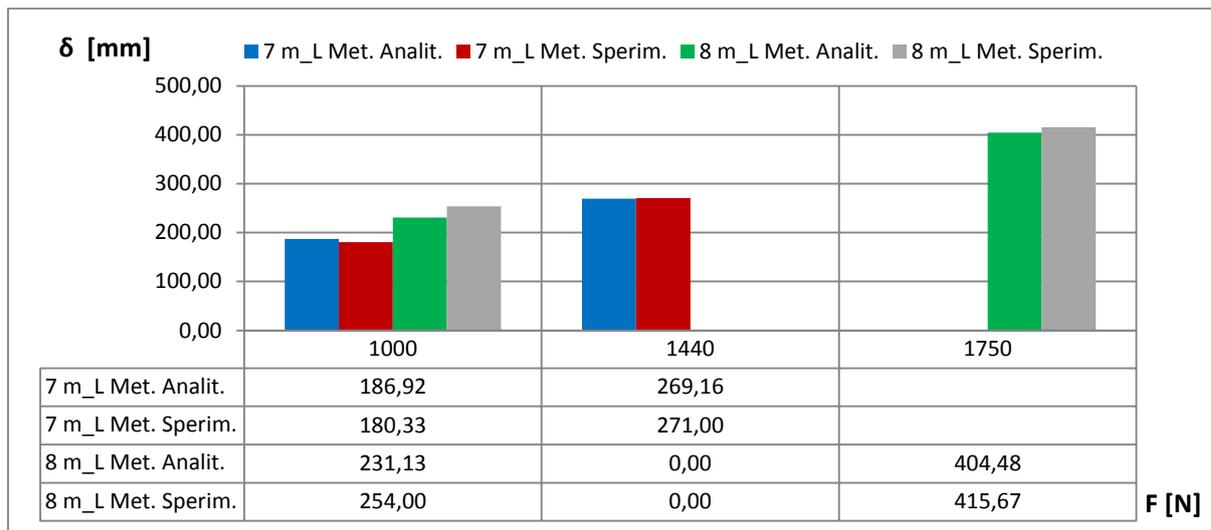


Figura 205 – Confronto δ analitico - sperimentale – numerico

– Prototipi_R: deflessione

In Tabella 91 si confrontano i valori di deflessione ricavati con il metodo analitico e le prove di collaudo sperimentale, mentre in Tabella 92 si mostra la % di errore: 6,81 %. In Figura 206 viene rappresentato l'istogramma delle deflessioni ricavate a vari carichi.

Tabella 91 – Confronto δ

L [mm]	Prototipo 7 m_R				Prototipo 8 m_R			
	Forza= 1000 [N]		Forza= 3000 N		Forza= 1000 [N]		Forza= 3000 N	
UM	δ analit. [mm]	δ speriment. [mm]						
0	0,00		0,00		0,00		0,00	
250	0,00		0,00		0,00		0,00	
500	0,00		0,01		0,00		0,00	
750	0,00		0,01		0,00		0,00	
1000	0,01		0,02		0,00		0,01	
1250	0,01		0,03		0,00		0,01	
1500	0,01		0,04		0,01		0,02	
1750	0,25		0,76		0,21		0,63	
2000	0,98		2,93		0,82		2,45	
2250	2,17		6,51		1,82		5,47	
2500	3,83		11,49		3,23		9,68	
2750	5,95		17,84		5,02		15,07	
3000	8,51		25,53		7,21		21,63	
3250	11,51		34,53		9,78		29,34	

3500	14,93		44,79		12,72		38,17	
3750	18,82		56,47		16,08		48,25	
4000	23,23		69,70		19,89		59,67	
4250	28,14		84,41		24,13		72,39	
4500	33,51		100,52		28,80		86,39	
4750	39,32		117,95		33,87		101,62	
5000	45,53		136,58		39,34		118,03	
5250	52,19		156,56		45,24		135,73	
5500	59,33		177,98		51,61		154,84	
5750	66,88		200,63		58,42		175,26	
6000	74,76		224,29		65,63		196,89	
6250	82,87		248,61		73,21		219,64	
6500	91,08		273,24		81,12		243,36	
6750	99,32	105,67	297,96	306,33	89,36		268,09	
7000	107,56		322,69		97,95		293,84	
7250					106,75		320,26	
7500					115,68		347,04	
7750					124,64	120,33	373,93	394,00
8000					133,61		400,83	

Tabella 92 - Variazione δ %

Prototipo_R	δ [mm]	Carico applicato [N]	
		1000	3000
	Riferimento	-	330
7 m	Metodo Analitico	103,44	310,33
	Metodo Sperimentale	105,67	306,33
	Variazione % Sp-An	2,15%	1,29%
8 m	Metodo Analitico	129,13	387,38
	Metodo Sperimentale	120,33	394,00
	Variazione % Sp-An	6,81%	1,71%

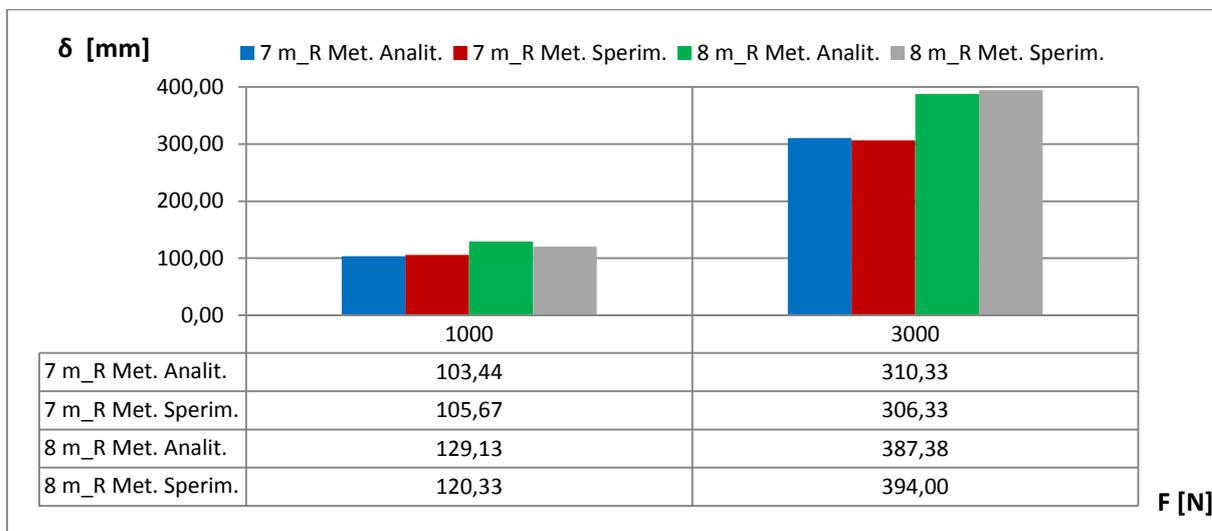


Figura 206 – Confronto δ analitico - sperimentale – numerico

4.5.4 Riepilogo confronto prototipi Orange

In Tabella 93 è stata fatta una tabella riassuntiva in cui vengono mostrati i principali valori di deflessione e tensione relative ad ogni prototipo.

Tabella 93 - Confronto modelli Orange

Prototipo	Metodo	F [N]				F [N]			
		1000	1440	1750	3000	1000	1440	1750	3000
		δ [mm]				σ [MPa]			
7 m_L	Riferimento	-	330	-	-	-	-	-	-
	Met. Analit.	186,92	269,16	-	-	32,67	47,05	-	-
	Met.Num.	180,33	271,00	-	-	-	-	-	-
	Var. % Sp-An	3,52%	0,68%	-	-	-	-	-	-
8 m_L	Riferimento	-	-	440	-	-	-	-	-
	Met. Analit.	231,13	-	404,48	-	35,99	-	62,98	-
	Met.Num.	254,00	-	415,67	-	-	-	-	-
	Var. % Sp-An	9,90%	-	2,77%	-	-	-	-	-
7 m_R	Riferimento	-	-	-	330	-	-	-	-
	Met. Analit.	103,44	-	-	310,33	22,75	-	-	68,25
	Met.Num.	105,67	-	-	306,33	-	-	-	-
	Var. % Sp-An	2,15%	-	-	1,29%	-	-	-	-
8 m_R	Riferimento	-	-	-	440	-	-	-	-
	Met. Analit.	129,13	-	-	387,38	20,39	-	-	61,16
	Met.Num.	120,33	-	-	394,00	-	-	-	-
	Var. % Sp-An	6,81%	-	-	1,71%	-	-	-	-

4.5.5 Attività svolta a Ningbo (CINA)

Durante il secondo anno di dottorato sono state sviluppate alcune attività a Ningbo (Cina), presso la sede dell’azienda N.T.E.T. S.p.A.



Figura 207 - Stabilimento cinese N.T.E.T. S.p.A

- 1) **Progettazione - realizzazione - collaudo dei cappellotti testa - base palo** dei prototipi L e R. I cappellotti di chiusura alle estremità del palo, devono essere di PVC rigido o di vetroresina con identico colore del palo su cui si installano e devono essere ottenuti per stampaggio in un solo pezzo. Anche per i cappellotti di chiusura bisogna che si effettuino dei collaudi sperimentali, garantendo l’assenza di incrinature, lesioni, inclusioni, bruciature, deformazioni, ammacchi, e di qualsiasi altro difetto che possa compromettere la funzionalità e l’efficienza. Questa tipologia di cappellotti testa - base devono essere inseriti in modo tale che si incastrino perfettamente sul palo. Nelle Figura 208 e Figura 209 vengono riportate le dimensioni e la produzione dei cappellotti di chiusura.

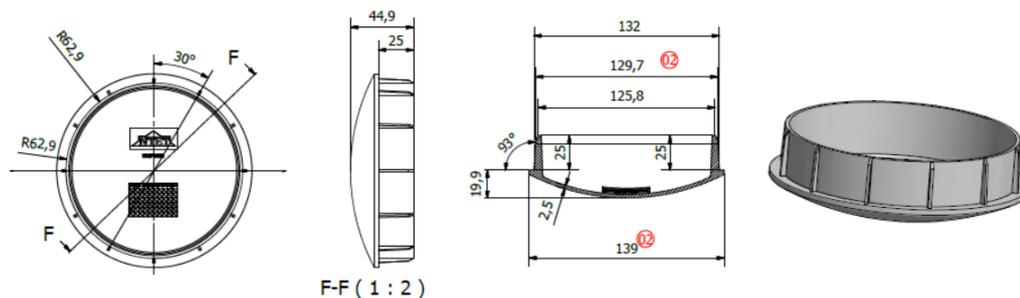


Figura 208 – Progettazione cappello DT prototipo_L



Figura 209 - Stampaggio cappellotti testa – base palo

- 2) **Progettazione - realizzazione - collaudo dei collari in acciaio** dei prototipi L e R. I collari in acciaio (Figura 210) sono previsti per l’impiego sui pali in vtr in tutte le condizioni di installazione (es. per l’amarro, tiranti, funi di passaggio ed attraversamenti su palificazioni).



Figura 210 - Collare pali in vtr

Tali collari, con profilo interno lievemente conico, devono essere realizzati per stampaggio a caldo ed avere una struttura componibile costituita da 2 parti unite tra loro da 4 viti con relativi dadi e rondelle. Le parti costituenti i collari devono poi successivamente essere zincate a caldo mentre le staffe devono risultare prive di cricche, inclusioni, ammacchi, pori, distorsioni, fratture, rigature, bruciature e di qualsiasi altro difetto che ne compromette la funzionalità.

Affiché i collari risultano essere conformi alle normative devono superare delle prove di collaudo sperimentale.

- Prova di trazione

Il collare⁷ viene applicato ad uno spezzone di palo (a circa 50 cm dalla sommità) ancorando il carico ad una delle viti con opportune funi in acciaio e morsetti. A questa fune verrà fissato un dinamometro. Per testare il collare verrà svolta la prova a basse velocità fino al raggiungimento di 60 kN con tempo a carico massimo costante di 5 min. Successivamente, adottando sempre le stesse

⁷ I bulloni di serraggio del collare sul palo devono essere stretti con una coppia di 80 N*m.

modalità operative si dovrà raggiungere un carico di 80 kN con tempo a carico massimo costante di 15 min. Al termine della prova non si dovranno rilevare rotture o incrinature dei vari elementi. La prova sarà superata se la rottura del collare avverrà sopra gli 80 kN e dovrà verificarsi in corrispondenza dei fori (Figura 211).



Figura 211 - Prova di trazione sui collari per pali in vtr

- Prova di fatica

Il collare deve essere sottoposto ad una prova a fatica, effettuando un tiro variabile periodicamente nel tempo, con frequenza di 50 Hz, con una forza minima di 2000 N e una forza massima di 15000 N. Dopo 2000000 cicli il collare non dovrà presentare rotture o incrinature.

- Prova di tiro assiale

Il collare deve essere fissato su di un palo a 50 cm dalla testa con configurazione capolinea con tiro assiale e rinvio del tirante a 30°; il sistema palo + collare deve essere sottoposto per 15 min ad un tiro ≥ 2200 daN senza che si verificano scorrimenti significativi ed incisioni sul palo.

3) **Realizzazione - collaudo reggipali SMC:** i reggipali vengono utilizzati per sorreggere e tenere in modo stabile i pali in legno. I primi reggipali utilizzati per pali in legno risultavano essere costituiti in cemento armato. Negli ultimi decenni con lo sviluppo sempre crescente dei materiali compositi, si è iniziato a fare i reggipali in SMC rinforzata con barre di metallo. Questo nuovo modo di realizzare i reggipali ha consentito di ridurre il peso e contemporaneamente aumentare le caratteristiche meccaniche.



Figura 212 - Reggipalo in SMC

Ogni reggipalo realizzato in SMS, è costituito da due gusci identici uniti tra loro da 4 barre filettate M 18x270 con dadi e rondelle di serraggio che consentono di poter alloggiare pali con diametro compreso tra 150 e 250 mm come mostrato in Figura 212. Prima di esser installati in campo devono superare vari collaudi, tra i quali la prova di flessione chiudendo le due sezioni del reggipalo su di un tubo in acciaio avente diametro esterno di 150 mm e alla distanza di 3 m viene applicato un carico di 4500 N. A prova ultimata non si devono riscontrare deformazioni e rotture alle condizioni di carico applicato.

5. Life Cycle Assessment pali centrifugati e sistemi di riciclaggio materiali compositi termoindurenti

5.1 Stato dell’arte: le origini e lo sviluppo del LCA

Negli ultimi anni le preoccupazioni per le problematiche ambientali legate ai prodotti fabbricati e consumati, hanno favorito lo sviluppo di numerose iniziative finalizzate all’avviamento di piani e programmi per la riduzione e il contenimento degli impatti sull’ambiente. Alcuni ricercatori, che incominciavano a occuparsi con approccio scientifico al problema del consumo di risorse (con particolare riferimento a quelle non rinnovabili) e della generazione di reflui nei processi industriali, si resero conto che l’unica strada efficace per studiare in maniera completa i sistemi produttivi da un punto di vista ambientale era quella di esaminarne le prestazioni seguendo passo per passo il cammino percorso delle materie prime, a partire dalla loro estrazione, attraverso tutti i processi di trasformazione e trasporto, fino al loro ritorno alla terra sotto forma di rifiuti. Ed è lo slogan “from cradle to grave” e cioè “dalla culla alla tomba”, a prendere piede per illustrare sinteticamente i contenuti della metodologia che a poco a poco prende forma: quella dell’analisi del ciclo di vita (LCA). Questo approccio costituisce per quel tempo un’assoluta novità, dal momento che nello studio inteso a migliorare le prestazioni energetiche e ambientali di un sistema industriale veniva presa in considerazione l’intera filiera produttiva, mentre fino ad allora, chiaramente i miglioramenti dell’efficienza erano stati costantemente ricercati concentrando l’attenzione sui singoli componenti dei processi produttivi. In Figura 213 viene riportata la valutazione del ciclo vita di un prodotto.



Figura 213 - Valutazione del ciclo di vita di un prodotto

Le origini della Life Cycle Assessment possono essere rintracciate agli inizi degli anni '70 quando ancora le crisi petrolifere non erano ancora esplose, ma la consapevolezza che si stavano sfruttando a ritmi sempre più elevati risorse energetiche limitate era già sufficientemente sviluppata, tanto da indurre studiosi e ricercatori del mondo accademico e industriale ad affrontare temi riguardanti lo sfruttamento delle risorse e i conseguenti effetti sull’ambiente.

In seguito, gli allarmi lanciati da molti scienziati su questi temi (massicci consumi di risorse non rinnovabili e preoccupanti livelli di inquinamento), la pressione del movimento ambientalista e ciò che concretamente succedeva in quel periodo (crisi energetiche e problema crescente della destinazione dei rifiuti), hanno dato una spinta determinante all’impegno comune per la messa a punto sia di metodologie sia di strumenti che potessero in qualche modo correggere l’approccio della teoria economica classica portando al concetto di sviluppo ecosostenibile. Considerato che non esistono processi produttivi (e quindi prodotti) a costo energetico e ambiente nullo, la strada da percorrere è

quella di comprendere il funzionamento di tali processi per poi essere in grado di proporre azioni di miglioramento. Nel 1972 Meadows D.H. et al [59] hanno incautamente previsto l’esaurimento delle fonti fossili di energia in tempi brevi, riconoscendo loro il merito di aver divulgato un segnale di allarme ambientale in tempi in cui l’argomento non era certo di interesse diffuso.

Durante gli anni ’80 molte ricerche furono svolte dalla REPA (Resource and Environmental Profile Analysis) che avevano come obiettivo la caratterizzazione del ciclo di vita di alcuni materiali impiegati in importanti produzioni industriali. Importante è ricordare il lavoro commissionato alla REPA da parte della Coca Cola Company e della Mobil Chemical Company: la prima, descritta da Bonfiglioli A. et al. in [60] intendeva determinare le conseguenze ambientali della produzione di diversi tipi di contenitori per bevande allo scopo di identificare quale materiale (plastica, vetro, acciaio o alluminio) e quale strategia di impiego a fine vita del contenitore (a perdere o a rendere) fosse energeticamente ed ecologicamente migliore; la seconda, descritta da Franklin W e Hunt R. in [61] puntava a stabilire se i fogli in poliestere usati per incartare i prodotti alimentari fossero più o meno compatibili dei concorrenti fogli di carta.

Nei primi anni ’90 Del Tin et al. hanno analizzato l’impatto ambientale dei tre più famosi combustibili fossili (petrolio, carbonio e gas naturale) [62]. Il termine LCA, venne coniato solo durante il congresso SETAC (Society of Environmental Toxicology and Chemistry) a Smuggler Notch (Vermont, U.S.A.) del 1991, proprio per meglio caratterizzare l’obiettivo delle analisi fino ad allora svolte. L’organizzazione originaria di una LCA, secondo lo schema proposto dalla SETAC, come descritto da Fava et al. [63], comprendeva tre fasi principali da attuare successivamente e ciclicamente. Tale organizzazione, che costituisce anche la struttura fondamentale della metodologia attuale, è composta da una prima fase di inventario, in cui le informazioni e i dati raccolti vengono organizzati e convertiti in forma standard per fornire una descrizione completa delle caratteristiche fisiche del sistema produttivo oggetto dello studio; una successiva fase di interpretazione, dove i dati fisici dell’inventario sono correlati a problemi di carattere ambientale; infine da una fase di miglioramento, in cui il sistema produttivo è oggetto di campagne di simulazione per cercare di migliorare la sua efficienza complessiva. Pertanto la valutazione include l’intero ciclo di vita del prodotto, processo o attività: dall’estrazione e la lavorazione delle materie prime, alla produzione, trasporto e distribuzione, all’uso, riuso e manutenzione, fino al riciclo e lo smaltimento finale. Nel 1992, Boustead I. et al., hanno effettuato numerosi studi sul ciclo vita, con attenzione sul riciclaggio e riutilizzo di innumerevoli materiali termoplastici [64] come PE, PP, [65], PS, [66], PVC, [67], PET, [68], nylon 66, [69]. Nel 1993, Guerriero et al. hanno definito i consumi energetici e gli impatti ambientali su 40 metalli non ferrosi [70]. Nel 1994, Gianmusso et al [71] e Kainz et al [72] hanno mostrato come il ciclo vita e il riciclaggio di un determinato prodotto rappresentava sempre più un prerequisito importante per le aziende. Nel 1996, De Smet et al. [73] hanno condotto uno studio su come i risultati degli eco-indicatori di impatto ambientale sono influenzati dalla qualità dei dati raccolti nella fase di inventario del ciclo di vita. Baumann e Rydberg [74] hanno effettuato una valutazione dei risultati utilizzando diversi database nella fase inventario per una valutazione del ciclo di vita. Un altro aspetto importante è l’incertezza di dati in fase di inventario, così Maurice et al. hanno condotto studi in questa parte del [75] LCA. Oltre agli aspetti teorici LCA, i ricercatori si sono focalizzati sugli aspetti pratici, determinando le parti di LCA che necessitavano uno studio più specifico per ottenere una conclusione più solida [76]. Nel 1994 Balestrini et al, presso lo stabilimento FIAT di Orbassano hanno effettuato numerosi studi per stabilire tramite un LCA quale materiale tra l’alluminio e la ghisa era meglio utilizzare in fase di produzione dei basamenti motore per autovetture [77]. Sempre presso FIAT inoltre sono state effettuate analisi energetiche per la produzione del vetro delle autovetture dalle materie prime al riciclo [78] e [79].

Nei primi anni 2000 a causa delle norme ambientali sempre più stringenti la LCA è diventato uno strumento imprescindibile per la realizzazione di un prodotto. Nel 2001, Baldo et al. [80] e

successivamente nel 2003, Brimacombe et al. [81], si sono interessati sullo studio della sostenibilità e il riciclaggio di prodotti in acciaio. Poiché il riciclaggio delle materie plastiche iniziava ad essere un problema sempre più importante nel 2003, De Benedetti et al. [82] hanno fatto uno studio sul ciclo vita e riciclaggio di materie plastiche utilizzate per componentistica elettronica.

Negli ultimi 30 anni sono stati condotti molti sviluppi e una sintesi di questi è riportata da Nepote [83], da Raggi [84] e Baldo et al. [85]. La maggior attenzione posta agli aspetti ambientali, che porta ad una visione completa delle problematiche di prodotto, può diventare fattore di differenziazione in un mercato di accresciuta competitività e quindi trasformarsi in fattore di successo. La metodologia LCA diventa così uno strumento per supportare la trasformazione che la variabile ambientale ha subito all’interno delle aziende: da "vincolo" ad "opportunità" di mercato.

5.2 Struttura e limiti di un LCA

Con gli anni '90 si è avviato un processo di standardizzazione concretizzatosi sia nella pubblicazione di manuali da parte di diversi gruppi di ricerca, sia nella pubblicazione nel 1997 delle ISO 14040.

Una definizione di LCA si trova nelle ISO 14040 appena citate e recita: "*compilazione e valutazione attraverso tutto il ciclo di vita dei flussi in entrata e in uscita, nonché i potenziali impatti ambientali, di un sistema di prodotto*".

Le linee guida di riferimento per una LCA, come detto, sono le norme ISO della serie 14040:

- UNI EN ISO 14040 (1998) Gestione ambientale, Valutazione del ciclo di vita, Principi di riferimento.
- UNI EN ISO 14041 (1999) Gestione ambientale, Valutazione del ciclo di vita, Definizione dell’obiettivo e del campo di applicazione e analisi d’inventario.
- UNI EN ISO 14042 (2000) Gestione ambientale, Valutazione del ciclo di vita, Valutazione dell’impatto del ciclo di vita.
- UNI EN ISO 14043 (2000) Gestione ambientale, Valutazione del ciclo di vita, Interpretazione del ciclo di vita.

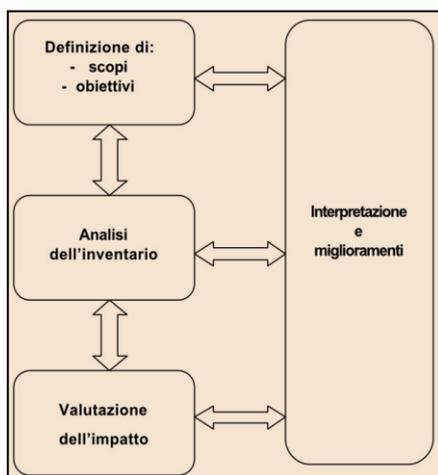


Figura 214: Schema delle fasi di una LCA

In pratica la standardizzazione introdotta dalla norma ISO 14040 permette di poter eseguire e, in caso, certificare uno studio LCA secondo uno schema prestabilito che consenta, in particolare, di evidenziare le caratteristiche di completezza, affidabilità e riproducibilità dell’analisi.

La procedura di natura tipicamente iterativa, come evidenziato anche in Figura 214, in base alla quale condurre una LCA passa attraverso quattro fasi ben distinte.

Nonostante le numerose applicazioni e la capacità d’identificazione dell’impatto ambientale in riferimento al processo produttivo di un servizio o un bene, la metodologia LCA presenta dei limiti

che riguardano, soprattutto, la disponibilità di dati completi e precisi. Ciò si verifica maggiormente quando bisogna analizzare un prodotto nuovo ma, a questo problema, si può ovviare facendo delle ipotesi coerenti ed utilizzando dei dati presenti nel database, ritenuti affidabili.

5.2.1 Prima fase di un LCA: definizione degli scopi e degli obiettivi

E’ la prima fase dello studio nella quale vengono definiti: le finalità dello studio (oggetto, destinatari, applicazioni), la definizione del sistema considerato (comprensivo dei confini), l’Unità Funzionale, l’individuazione dei dati e delle assunzioni necessarie e le procedure di verifica.

A proposito degli obiettivi da raggiungere, la norma UNI EN ISO 14040 afferma: *“Gli obiettivi e gli scopi dello studio di una LCA devono essere definiti con chiarezza ed essere coerenti con l’applicazione prevista. L’obiettivo di una LCA deve stabilire senza ambiguità quale sia l’applicazione prevista, le motivazioni che inducono a realizzare lo studio e il tipo di pubblico a cui è destinato, cioè a quali persone si intendono comunicare i risultati dello studio”*.

– Definizione del sistema

Nella LCA viene definito “sistema” un qualsiasi insieme di dispositivi e/o operazioni che realizzano una o più precise funzioni; esso è delimitato da appropriati confini fisici rispetto al sistema ambiente e con questo ha rapporti di scambio caratterizzati da una serie di input e output.

– Definizione dell’unità funzionale

Fin dall’inizio dello studio, è importante definire un unità di misura di riferimento, chiamata “unità funzionale”, con cui trattare ed esporre i dati e le informazioni di una LCA. Secondo quanto espresso dalla norma ISO 14040: *“l’unità funzionale costituisce una misura della prestazione del flusso in uscita dal sistema prodotto”*. Lo scopo dell’unità funzionale è fornire un riferimento a cui legare i flussi in entrata e in uscita. Questo riferimento è necessario per consentire la comparabilità dei risultati di un LCA. È inoltre importante che tale comparabilità venga fatta tra sistemi analoghi.

Nella Tabella 94 sono riportati alcuni esempi di unità funzionale.

Tabella 94 - Esempi di unità funzionali

SCOPO DELL'ANALISI	UNITÀ FUNZIONALE
Confronto di impatto ambientale tra bottiglie di plastica e bottiglie di vetro	Distribuzione di 1 milione di litri di acqua imbottigliata
Confronto di impatto ambientale tra diverse tipologie di tazze per il caffè	Servizio di una bevanda calda (300cc) 3 volte al giorno per 1 anno
Verniciatura di una parete	L’unità di superficie protetta dalla pittura per una durata minima garantita
Analisi di confronto sui sistemi di asciugatura mani presenti nei luoghi pubblici	Numero di mani asciugate in un tempo prefissato
Produzione di un imballaggio	Quantità di imballaggio necessaria per contenere un certo volume di prodotto
Confronto di impatto ambientale tra una discarica controllata e un impianto di compostaggio	Gestione di 1000 kg di rifiuti

5.2.2 Seconda fase di un LCA: analisi di inventario (LCI)

L’analisi di inventario è il momento più importante di un LCA, nel quale si procede alla costruzione di un modello analogico della realtà in grado di rappresentare nella maniera più fedele possibile tutti gli scambi tra le singole operazioni appartenenti alla catena produttiva (e distruttiva) effettiva.



Figura 215 - Analisi di inventario attraverso i principali processi che appartengono al generico sistema indagato

In Figura 215 si fornisce un'idea di come impostare questo processo di modellizzazione nella sua fase preliminare. I dati raccolti durante la fase di inventario potranno essere distinti in 3 categorie:

- Dati Primari (provenienti da rilevamenti diretti);
- Dati Secondari (ricavati dalla letteratura come database e da altri studi);
- Dati Terziari (provenienti da stime e da valori medi).

In considerazione della sua importanza cruciale ai fini dell’attendibilità di un LCA, l’accertamento dell’affidabilità dei dati raccolti durante l’inventario costituisce un’importante fase preparatoria, che permette anche di ottimizzare i tempi nelle fasi successive dello studio.

5.2.3 Terza fase di un LCA: analisi degli impatti (LCIA)

Per valutare in maniera appropriata l’inquinamento dell’ambiente su diverse scale, devono essere tenuti in conto tre diversi fattori essenziali, quali l’emanazione di sostanze nocive (emissione), la diffusione e l’eventuale trasformazione che le sostanze subiscono una volta introdotte nell’ambiente (trasmissione), la concentrazione o la deposizione di inquinanti nel luogo d’azione (immissione).

Si definisce così “impatto ambientale” una qualsiasi modificazione causata da un dato aspetto ambientale, ossia da qualsiasi elemento che può interagire con l’ambiente. Le categorie di impatto variano a seconda della scala con la quale manifestano il loro effetto nei confronti dell’ambiente (Tabella 95). In particolare, esse possono essere classificate in:

- impatti *globali*, quelli che interessano tutto il pianeta;
- impatti *regionali*, quelli che interessano una vasta area (qualche migliaio di km) attorno al luogo in cui si è manifestato l’impatto;
- impatti *locali*, quelli che interessano esclusivamente l’area circostante il punto di impatto.

Tabella 95 - Principali effetti ambientali e scala di influenza

SCALA	EFFETTO
Globale	Effetto serra
	Assottigliamento della fascia di ozono
	Consumo di risorse non rinnovabili
Regionale	Acidificazione
	Eutrofizzazione
	Formazione di smog fotochimico
	Tossicità cronica
Locale	Effetti sulla salute dell'uomo
	Degradazione dell'area

Si descrivono qui di seguito alcuni impatti ambientali:

- **Effetto serra:** l’effetto serra è un fenomeno naturale e utile, che assicura il riscaldamento del pianeta Terra ed è legato alla presenza di alcuni gas atmosferici quali l’anidride carbonica (CO₂), l’ozono (O₃), l’ossido di azoto (N₂O), il vapore acqueo e il metano (CH₄). Questi gas agiscono come una sorta di vetro trasparente che, avvolgendo il pianeta, consente alle radiazioni provenienti dal sole di filtrare, ostacolando invece il ritorno di parte delle radiazioni infrarosse (IR) riflesse dalla Terra e dalla bassa atmosfera, trattenendo quindi calore. Proprio come una serra la temperatura tende conseguentemente a salire.⁸ Tramite l’effetto serra quindi si determina la temperatura del pianeta e conseguentemente la distribuzione e il funzionamento dei sistemi climatici. Con la rivoluzione industriale, l’uso massiccio di combustibili fossili, le attività agricole intensive e i cambiamenti di uso del suolo hanno determinato un aumento drammatico delle concentrazioni dei gas serra. Pertanto la capacità dell’atmosfera di trattenere il calore è dunque molto aumentata, causando la modifica del sistema climatico terrestre rispetto all’era preindustriale, sia a scala globale che regionale e locale. Considerando la stretta relazione esistente tra l’incremento della concentrazione dei gas a effetto serra e l’aumento di temperatura del pianeta, è probabile che la maggior parte di questi cambiamenti siano da attribuire all’azione dell’uomo.
- **Acidificazione:** con il termine acidificazione si intende il processo di ricaduta dall’atmosfera di particelle, gas e precipitazioni acide. Se questo fenomeno avviene sotto forma di precipitazioni (piogge, neve, nebbie, rugiade, ecc.) si parla di deposizione umida, in caso contrario di deposizione secca. L’acidificazione è essenzialmente causata dagli ossidi di zolfo (SO_x) e, in minor parte dagli ossidi d’azoto (NO_x), presenti in atmosfera sia per cause naturali (rilascio da suolo e microrganismi, emissioni vulcaniche, spray marino, dilavamento e disgregazione delle rocce) sia per cause artificiali dovute alle attività dell’uomo (estrazione, lavorazione e utilizzo di combustibili fossili, combustione di biomassa, traffico aereo, estrazioni di minerali, agricoltura). In genere, la maggior parte dei composti a base di zolfo si deposita entro 2-4 giorni dall’emissione e le maggiori ricadute si verificano nelle regioni più prossime alle sorgenti (aree civilizzate e industrializzate). Gli ossidi di azoto tendono invece a restare più a lungo in atmosfera, per cui vicino alle fonti di emissione se ne depositano quantità relativamente inferiori.⁹
- **Eutrofizzazione:** l’eutrofizzazione è la crescita degli organismi viventi limitata dall’apporto di sostanze nutrienti essenziali quali l’azoto e il fosforo. Un rilascio di tali sostanze nell’ambiente causa l’abbassamento della concentrazione di ossigeno con effetti negativi sull’intero ecosistema. L’uso agricolo di fertilizzanti e gli scarichi industriali e urbani, in genere ricchi in azoto (N) e fosforo (P), sono le fonti principali di eutrofizzazione. Questo effetto deve essere considerato separatamente per i suoli e per le acque superficiali, poiché il comportamento della fauna e della flora è diverso nei due habitat. In questa sede però ci si limita a considerare l’eutrofizzazione nelle acque superficiali, dove l’effetto più evidente risulta essere la crescita smisurata di alghe acquatiche.
- **Assottigliamento della fascia di ozono stratosferico:** l’ozono, molecola triatomica di ossigeno (O₃), pur rappresentando meno di una parte per milione dei gas atmosferici, assorbe quasi interamente la radiazione ultravioletta (UV) proveniente dal Sole. Tale radiazione ha sufficiente

⁸ Effetto serra: senza la regolazione dovuta all’effetto serra, la temperatura media terrestre sarebbe inferiore di 33 gradi centigradi, ovvero pari a -18°C contro gli attuali 15°C e la Terra sarebbe un pianeta freddo e inospitale.

⁹ Acidificazione: il problema dell’acidificazione è particolarmente grave in Canada e in Scandinavia dove l’abbassamento del pH di migliaia di laghi ha provocato la scomparsa di numerose specie animale e vegetali. In Italia, l’azione dell’acidificazione viene in parte tamponata dalla particolare costituzione geologica carbonatica del suolo. Inoltre, l’eliminazione dello zolfo dai carburanti ha contribuito in gran parte alla diminuzione del fenomeno, riducendo la concentrazione di zolfo nell’aria e riducendone gli effetti rispetto al passato.

energia per danneggiare molecole biologiche fondamentali quali il DNA, determinando un aumento dei tumori della pelle e delle deficienze immunitarie. La maggiore causa dell'assottigliamento della fascia di ozono stratosferica è da imputare al cloro (Cl) presente in atmosfera.¹⁰

- **Ecotossicità delle acque, del suolo e del uomo:** questo tipo di impatto ambientale si riferisce alla tossicità che può colpire qualsiasi organismo vivente o ecosistema. Nello specifico si parlerà di ecotossicità delle acque dolci e salate, ecotossicità del suolo e ecotossicità sulla salute umana dovute a sostanze nocive, in genere cancerogene.
- **Formazione di smog fotochimico:** il photosmog è un particolare tipo di inquinamento dell'aria che si produce in giornate caratterizzate da condizioni meteorologiche di stabilità e di forte insolazione, in presenza di abbondanti quantità di ossidi di azoto e di composti organici volatili. Gli ossidi di azoto (NOX) e i composti organici (VOC), emessi nell'atmosfera da molti processi naturali e artificiali, vanno incontro a un complesso sistema di reazioni fotochimiche indotte dalla luce ultravioletta (UV) presente nei raggi solari, che portano alla formazione di ozono (O₃), perossiacetil nitrato (PAN), perossibenzoil nitrato (PBN), aldeidi e centinaia di altre sostanze. Tali inquinanti secondari vengono indicati con il nome collettivo di smog fotochimico poiché sono generati da reazioni chimiche catalizzate dalla luce e costituiscono il componente principale dello smog che affligge molte città e aree industrializzate.

L'analisi e la valutazione dell'impatto ambientale nella LCA, si articola generalmente in quattro punti:

- **Classificazione:** Dopo aver individuato quali sono le categorie di impatto che si intende prendere in considerazione, si passa alla fase di classificazione che, dal punto di vista operativo consiste nell'organizzare i dati dell'inventario. Questo significa distribuire i valori di tutte le emissioni, gassose, liquide e solide, provocate direttamente e indirettamente dalle operazioni considerate nelle varie categorie di impatto. Alla fine di questa fase, all'interno di ciascuna categoria di impatto ambientale saranno contenuti tutti gli input ed output del ciclo di vita (le emissioni) che potenzialmente possono contribuire a quel problema ambientale (la stessa sostanza o materiale potrà essere quindi contenuta all'interno di più categorie ambientali).
- **Caratterizzazione:** Dopo aver completato la classificazione dei diversi impatti causati dal processo, i metodi di caratterizzazione permettono di determinare in modo omogeneo e quantitativo il contributo delle singole emissioni. Ciascuna emissione contribuisce in maniera differente allo stesso problema ambientale. Nello specifico, le quantità di ciascun input ed output vengono quindi moltiplicate per un "fattore di peso" che misura l'intensità dell'effetto di un'emissione sul problema ambientale considerato. Questi "fattori di peso" vengono calcolati sulla base di dati puramente scientifici. I dati, una volta moltiplicati per i "fattori di peso", possono essere sommati all'interno di ciascuna categoria ambientale e si ottiene così un insieme di valori adimensionali che definisce il profilo ambientale del sistema.
- **Normalizzazione:** I valori precedentemente ottenuti in fase di caratterizzazione vengono normalizzati, divisi cioè per un "valore di riferimento" o "effetto normale" (ad es: gli effetti sull'ambiente causati da una "persona normale" durante un determinato periodo di tempo) in modo da poter stabilire la magnitudo di ciascun effetto ambientale rispetto ad un valore di riferimento, rappresentato generalmente da dati medi su scala mondiale, regionale o europea e riferiti ad un determinato intervallo di tempo. Attraverso la normalizzazione si può stabilire quindi l'entità relativa di ciascun problema ambientale.

¹⁰ Assottigliamento della fascia di ozono stratosferico: ogni atomo di cloro è in grado di distruggere fino a 100000 molecole di ozono prima di essere inattivo.

- **Valutazione:** L’obiettivo della fase di valutazione è quello di potere esprimere, attraverso un valore numerico, l’impatto ambientale associato ad un prodotto nell’arco del suo ciclo di vita. I valori degli effetti normalizzati vengono quindi moltiplicati per dei “fattori di peso”, che esprimono l’importanza intesa come criticità, che vengono attribuiti a ciascun problema ambientale. Sommando i valori degli effetti così ottenuti si ottiene un unico valore adimensionale: eco-indicatore, che quantifica l’impatto ambientale associato al prodotto.

5.2.4 Quarta fase di un LCA: interpretazione e miglioramento.

L’interpretazione e il miglioramento di un LCA è definita come il momento in cui realizzare una valida correlazione tra i risultati dell’analisi dell’inventario e di quella degli impatti, per proporre utili raccomandazioni in conformità con gli scopi e gli obiettivi dello studio. In tale fase quindi si valutano le opportunità per minimizzare l’impatto associato ad un sistema e identificare gli ambiti in cui si potrebbero attuare dei miglioramenti. Si possono così valutare le varie proposte di miglioramento costruendo i relativi profili ambientali e tenendo conto di altri criteri decisionali, al fine di scegliere l’alternativa più appropriata.

5.3 Definizione obiettivo e unità funzionale

L’obiettivo di questo studio, in conformità con le indicazioni fornite dalla International Organization for Standardization (ISO) nello standard ISO 14040 [86] e 14044 [87] è il confronto dell’impatto ambientale di due diversi prodotti (pali per illuminazione e pali per linee aeree di telecomunicazione) e processi di produzione. Sono stati analizzati tre casi studio. Nei primi due casi si confrontano gli impatti ambientali di pali per illuminazione pubblica prodotti in acciaio zincato e in vetroresina. Lo scopo di questi pali è garantire un supporto di illuminazione ad una altezza da terra di 6 e 8 metri, per un periodo di 60 anni (unità funzionale), considerando che i pali sono installati a distanza equivalente. La vita di utilizzo di un palo in acciaio è di circa 60 anni [88] così per il periodo in esame è sufficiente una quantità. Nel caso del palo in vetroresina la vita di uso è stimato in circa 20 anni, quindi sono necessari 3 pali per coprire l’intero periodo (tutti gli impatti ambientali ricavati pertanto devono essere moltiplicati per 3). Il confine del sistema è stato definito dall’utente (dall’estrazione delle materie prime alla fase di smaltimento) e le aree geografiche di produzione di questi pali sono due diversi impianti nel Sud Italia. Nel terzo caso studio sono stati valutati e confrontati gli impatti ambientali di tre prototipi di pali in vetroresina realizzati per il committente Telecom Italia. L’unità funzionale definita in questo caso è di 20 anni.

Esistono diversi metodi e sono disponibili numerosi software per effettuare l’analisi dell’impatto ambientale associato al ciclo di vita, in quanto non è stata ancora sviluppata una metodologia standard. Per lo studio del sistema in esame, si è deciso di utilizzare un software commerciale, il Gabi 6, sviluppato dalla PE International, società di consulenza con sede in Germania.

GaBi permette di modellare ogni elemento di un prodotto o sistema di prodotti in un’ottica di ciclo di vita. Nel caso in cui i dati raccolti in fase d’inventario non siano sufficienti, e per tutti i processi non direttamente eseguiti all’interno degli impianti (produzione di fibre di vetro, il processo di galvanizzazione della lamiera in acciaio) la valutazione gate-to-gate viene effettuata grazie all’utilizzo della banca dati all’interno del software (GaBi Database) che è completamente aggiornata e sviluppata in conformità con lo standard LCA. In GaBi sono pertanto presenti diversi database, sempre aggiornati, relativi a differenti categorie come: energia, trasporto, materiale da costruzione, materie plastiche, prodotti chimici, elettronici, meccanici, sistemi di smaltimento e trattamento dei rifiuti.

L’iter seguito nei vari casi studio è stato:

1. Analisi d’inventario (quantità di prodotti, energie e trasporti)
2. Definizione di ingressi e uscite ambientali (diagramma di flusso)
3. Valutazione degli eco-indicatori d’impatto di ogni prodotto (impatti ambientali)

4. Confronto e interpretazione dei risultati

Per calcolare gli impatti ambientali si è deciso di utilizzare il metodo CLM. Gli impatti valutati saranno:

- ✓ Global Warming Potential (potenziale effetto serra), **GWP**
- ✓ Acidification Potential (potenziale acidificazione), **AP**
- ✓ Eutrophication Potential (potenziale di eutroficazione), **EP**
- ✓ Ozone Layer Depletion Potential (potenziale assottigliamento strato di ozono), **ODP**
- ✓ Abiotic Depletion elements, **ADP**
- ✓ Abiotic Depletion fossil, **ADPF**
- ✓ Freshwater Aquatic Ecotoxicity Pot. (potenziale di ecotossicità in acqua dolce), **FAETP**
- ✓ Marine Aquatic Ecotoxicity Pot. (potenziale di ecotossicità in acqua salata), **MAETP**
- ✓ Terrestrial Ecotoxicity Potential (potenziale di ecotossicità sul suolo), **TETP**
- ✓ Human Toxicity Potential (potenziale tossicità per l’uomo), **HTP**
- ✓ Photochem. Ozone Creation Potential (potenziale di formazione di ozono fotochimico), **POCP**

Questo studio, tuttavia, non considera il tempo di utilizzo dei sistemi e le relative manutenzioni, ma si basa esclusivamente sul processo di produzione e di dismissione.

5.3.1 Caso studio 1: palo di illuminazione in acciaio

– Analisi di inventario

Qui nelle tabelle seguenti vengono riportati tutti i dati di inventario utili per la realizzazione del diagramma a blocchi del ciclo di vita del prodotto analizzato. Nelle Tabella 96, Tabella 97 e Tabella 98 vengono riportate tutte le informazioni relative ai pali di illuminazione in acciaio 6 e 8 metri realizzati presso la ditta S.I.P.A. S.p.A..

Tabella 96 - Informazioni palo in acciaio 6 m e 8 m

Parametri	PALO 6 m		PALO 8 m	
		UM		UM
Forma	Cilindrica	-	Cilindrica	-
Altezza palo in acciaio	6000	mm	8000	mm
Materiale	Lamiera in acciaio S355JR	-	Lamiera in acciaio S355JR	-
Spessore	5 ± 0,5	mm	5,5 ± 0,5	mm
Diametro	200 ± 3	mm	270 ± 3	mm
Superficie lamiera	3,768	mm ²	6,782	mm ²
Peso palo zincato	148 ± 2	kg	293 ± 2	kg

Tabella 97 - Consumi energetici palo in acciaio

MACCHINA	POTENZA ASSORBITA [KW]	TEMPO		ENERGIA	
		[s]	[h]	kWh	MJ
Potenza Punzonatrice (per creare fori sulla lamiera)	4	60	0,02	0,07	0,24
Potenza Piegatrice (per piegare la lamiera)	44	600	0,17	7,33	26,40
Potenza Saldatrice a flusso (per saldare il palo)	14	424	0,12	1,65	5,93
Potenza saldatrice ad filo continuo (per saldare gli accessori)	4	300	0,08	0,33	1,20

Potenza smerigliatrice (per molare alcune saldature)	2,2	300	0,08	0,18	0,66
Potenza trapano (per la messa in opera di accessori)	100	120	0,03	3,33	12,00
Potenza carroponete (per la movimentazione del palo)	18	240	0,07	1,20	4,32

Tabella 98 - Provenienza materiali e tipo di trasporto

TRASPORTI			
OGGETTO	LUOGO	DISTANZA	TIPO DI TRASPORTO
Lamiera	Siderurgica Gabrielli S.p.a. Cittadella (PD)	735 km	Su gomma
Zincheria	Irpinia Zinco Lacedonia (AV)	61 km	Su gomma (a/r)

– **Fasi del ciclo di vita e dati dei flussi**

Definita la fase d’inventario è stato composto il diagramma a blocchi definendo ogni singolo processo. In ogni fase del processo interno alla fabbrica, il palo viene spostato con l’ausilio di un carroponete. Le fasi del ciclo vita del palo di trasmissione della luce in acciaio sono così riassunte:

- Produzione e zincatura delle lamiere in acciaio
- Trasporto in fabbrica della lamiera
- Punzonatura
- Piegatura a freddo con una pressa piegatrice
- Saldatura ad arco sommerso
- Messa in opera degli accessori (testata, dado di messa a terra, etc.) con una saldatrice a filo continuo
- Utilizzo del palo
- Fine vita: dismissione e smaltimento con un eventuale riciclo di alcuni pezzi, riutilizzo di altri e trasporto in discarica di altri ancora.

Il ciclo vita, all’interno del programma Gabi, per i pali 6 e 8 metri in acciaio, è stato così schematizzato (Figura 216):

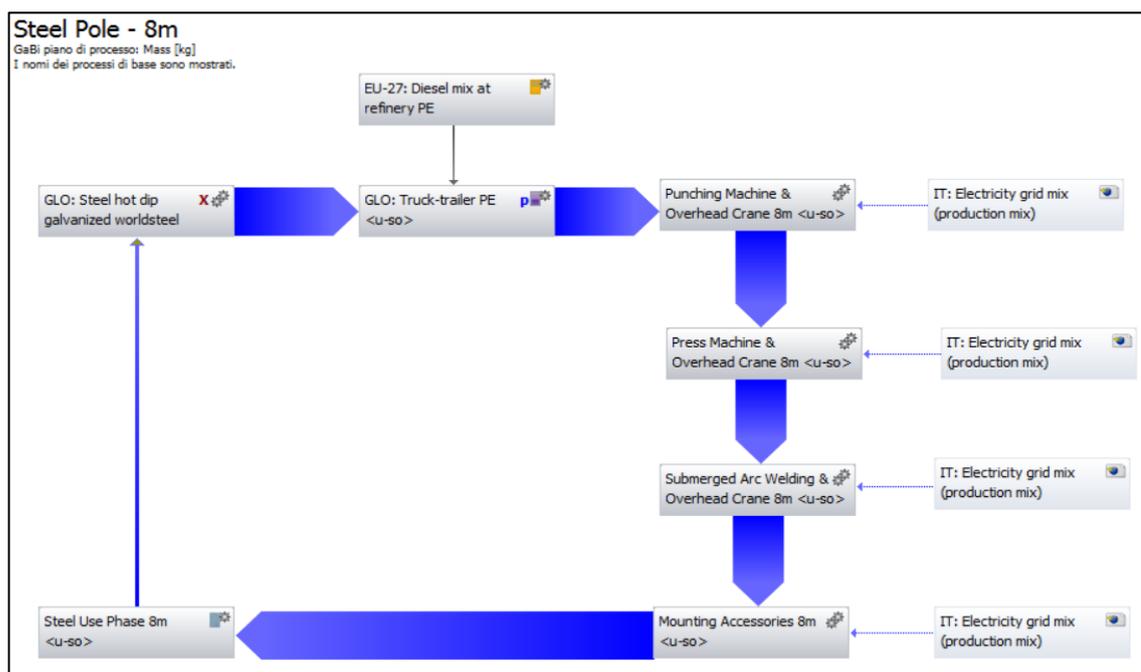
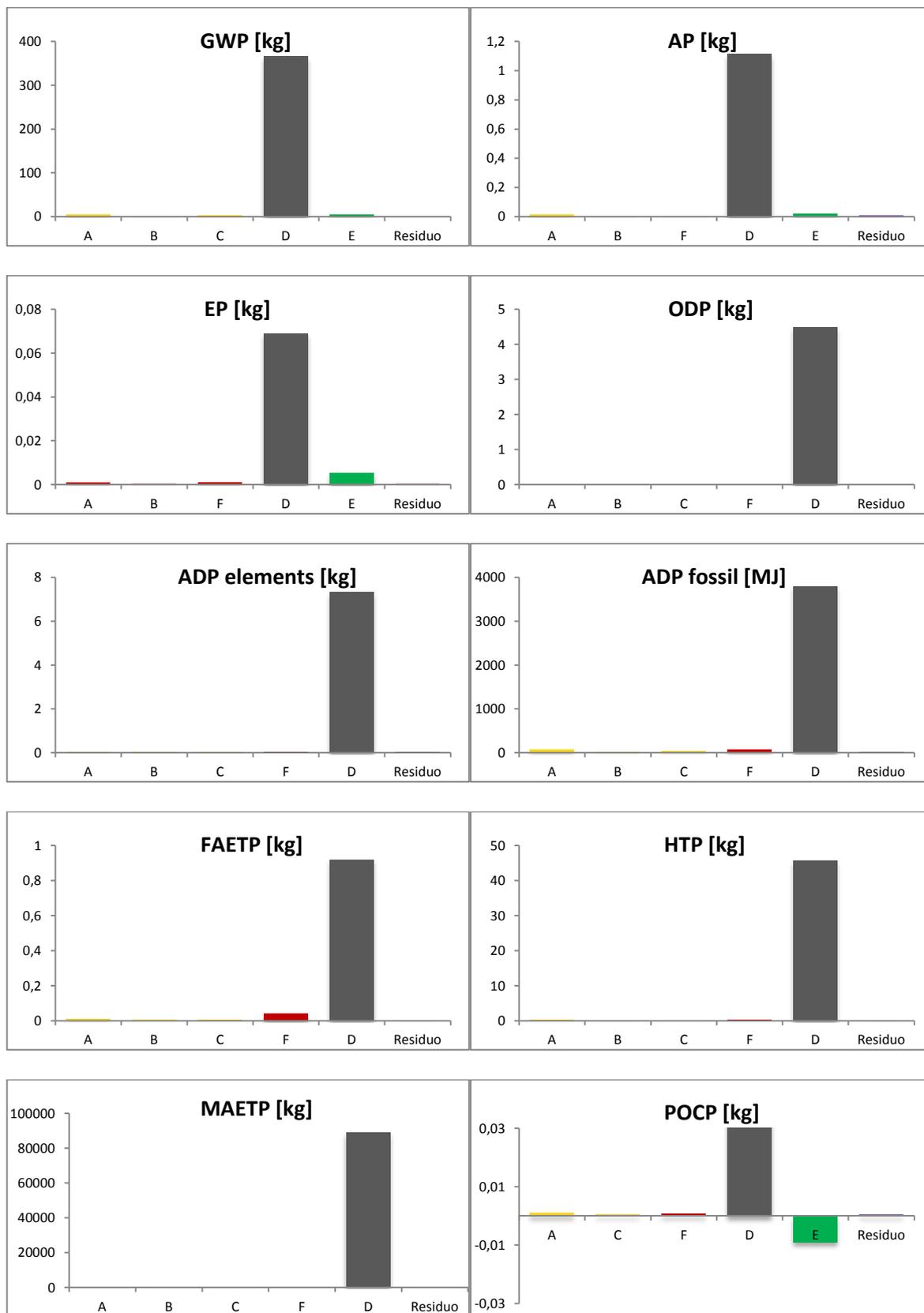


Figura 216 - Diagramma di flusso palo in acciaio

– **Analisi degli impatti (LCIA): Steel Pole 6 m**

In Figura 217 vengono evidenziati gli impatti ambientali di un palo in acciaio di 6 m. In Tabella 99 vengono riassunti tutti i valori numerici degli impatti ambientali analizzati.



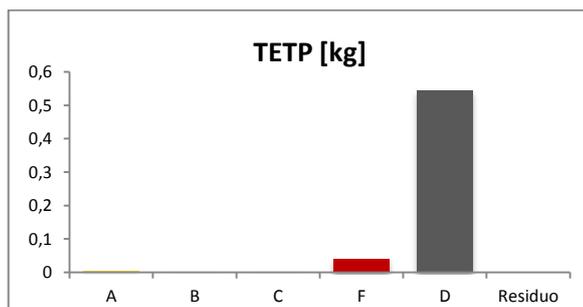


Figura 217 - Analisi degli impatti: Steel Pole 6 m

A	IT: Electricity grid mix (production mix)
B	IT: Electricity grid mix (production mix)
C	IT: Electricity grid mix (production mix)
D	GLO: Steel hot dip galvanized worldsteel
E	GLO: Truck-trailer PE <u-so>
F	EU-27: Diesel mix at refinery PE

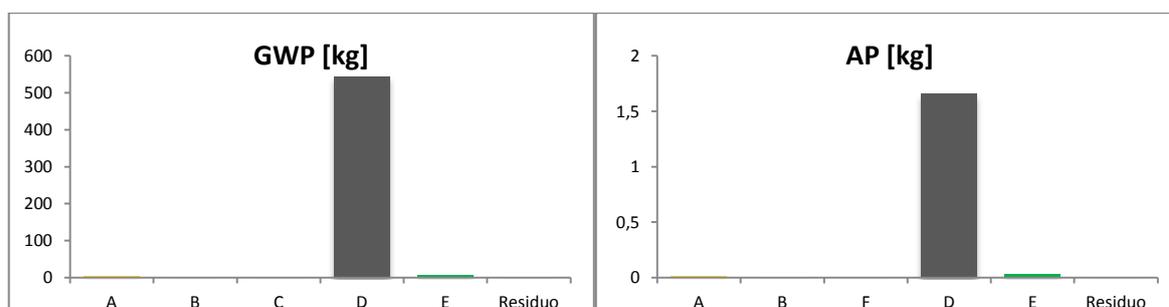
Tabella 99 - Impatti ambientali: Steel Pole 6 m

TIPOLOGIA DI IMPATTO	UM	STEEL POLE 6 m
GWP	kg	381
AP	kg	1,160
EP	kg	0,077
ODP	kg	4,50E-06
ADP	kg	7,34E-03
ADPF	MJ	4,00E+03
FAETP	kg	0,974
HTP	kg	46,100
MAETP	kg	8,96E+04
POCP	kg	1,73E-01
TETP	kg	0,596

– **Analisi degli impatti (LCIA): Steel Pole 8 m**

In Figura 218 vengono evidenziati gli impatti ambientali di un palo in acciaio di 8 m. In

Tabella 100 vengono riassunti tutti i valori numerici degli impatti ambientali analizzati.



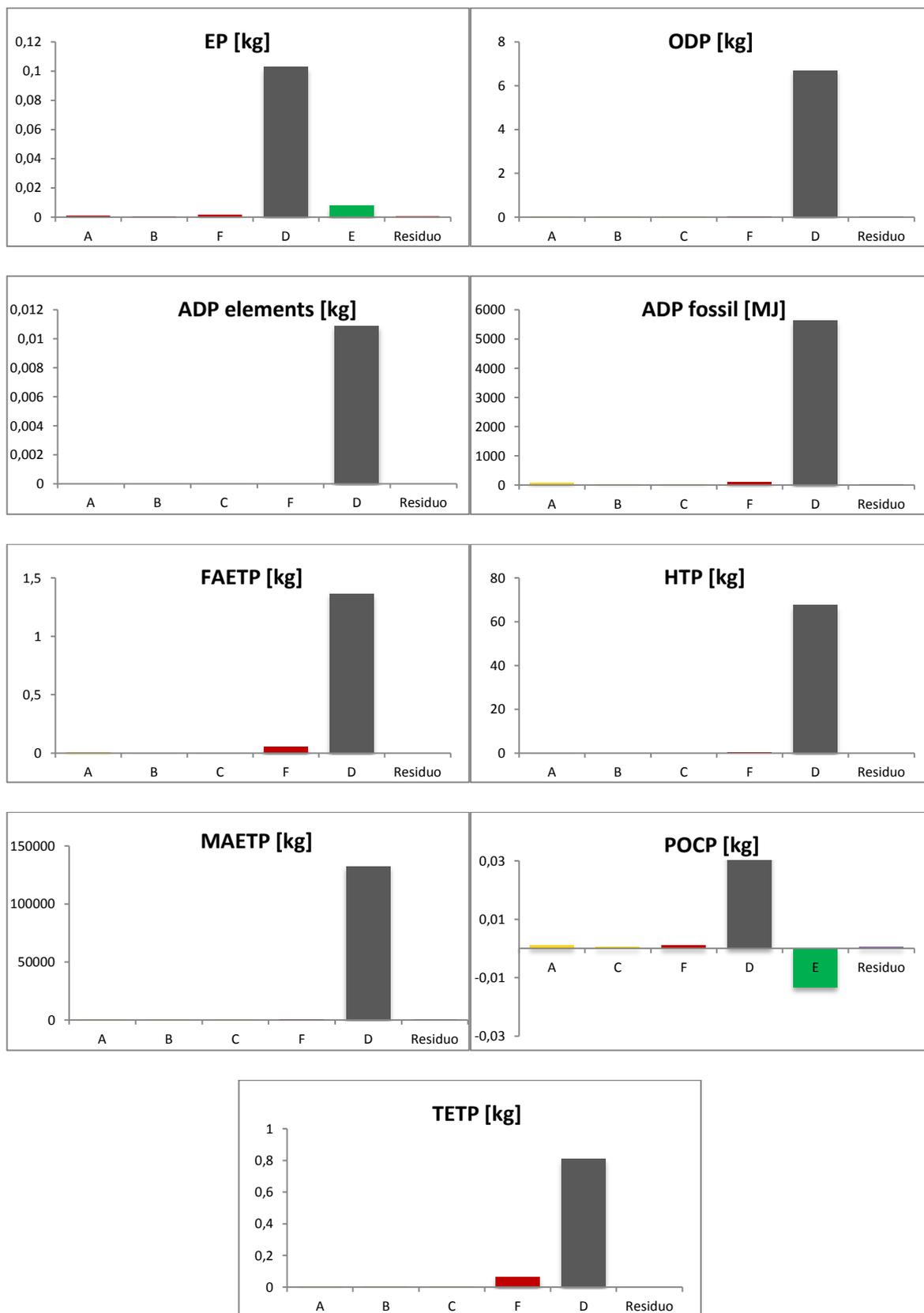


Figura 218 - Analisi degli impatti: Steel Pole 8 m

Tabella 100 - Impatti ambientali: Steel Pole 8 m

TIPOLOGIA DI IMPATTO	UM	STEEL POLE 8 m
GWP	kg	563
AP	kg	1,720
EP	kg	0,114
ODP	kg	6,68E-06
ADP	kg	1,09E-02
ADPF	MJ	5,90E+03
FAETP	kg	1,44
HTP	kg	68,400
MAETP	kg	1,33E+05
POCP	kg	2,56E-01
TETP	kg	0,883

5.3.2 Caso studio 2: palo di illuminazione in GFR

– Analisi di inventario

Qui nelle Figura 101, Figura 102 e Figura 103 vengono riportati tutti i dati di inventario utili per la realizzazione del diagramma a blocchi del ciclo di vita del prodotto analizzato. Nello specifico vengono riportate tutte le informazioni relative ai pali di illuminazione in vetroresina 6 e 8 metri realizzati presso la ditta N.T.E.T. S.p.A..

Tabella 101 - Informazioni palo in vetroresina 6m e 8m

Parametri	PALO 6m		PALO 8m	
		UM		UM
Forma	Tronco-conica		Tronco-conica	
Altezza palo	6000	mm	8000	mm
Materiale	Vetroresina		Vetroresina	
Spessore	5 ± 0,5	mm	5,5 ± 0,5	mm
Diametro base	174,5 ± 3	mm	270 ± 3	mm
Peso del palo	21 ± 2	kg	34 ± 2	kg

Tabella 102 - Inventario palo in vetroresina: Potenza – Energia macchinari

MACCHINA	POTENZA ASSORBITA [kW]	TEMPO		ENERGIA		TIPO DI ENERGIA
		[s]	[h]	[kWh]	[MJ]	
Macchina taglio Chopped	2	4800	1,33	2,67	9,60	fotovoltaico
Macchina cucitura stuoia	3	4800	1,33	4,00	14,40	fotovoltaico
Macchina controllo lunghezza stuoia	0,5	4800	1,33	0,67	2,40	fotovoltaico
Macchina avvolgimento e taglio stuoia	1,5	4800	1,33	2,00	7,20	fotovoltaico
Pompa	1	600	0,17	0,17	0,60	fotovoltaico
Miscelatore	1	300	0,08	0,08	0,30	fotovoltaico
Centrifugal Casting	12	1800	0,50	6,00	21,60	fotovoltaico
Macchina Imballaggio	2	60	0,02	0,03	0,12	fotovoltaico

Per la determinata analisi, la ditta N.T.E.T. S.p.A. ha fornito le informazioni necessarie alla descrizione del singolo flusso. Alcuni dati non sono stati divulgati poiché coperti da segreto aziendale.

Tabella 103 - Inventario palo in vetroresina: Distanza – Trasporto – Quantità di materiale

MATERIALE	PERCORSO		TRASPORTO	PALO 6 m		PALO 8 m	
	Distanza	UM		Peso	UM	Peso	UM
Roving1200	1400	km	Via Camion	n.d.	kg	n.d.	kg
Roving 2400	1400	km	Via Camion				
Chopped 2400	1400	km	Via Camion	n.d.	kg	n.d.	kg
Subbi	2654	km	Via Camion	n.d.	kg	n.d.	kg
Stuoia senza subbio				n.d.		n.d.	
Stuoia peso				n.d.	kg	n.d.	kg
Stuoia metri				n.d.	m	n.d.	m
Velo	1400	km	Via Camion	n.d.	kg	n.d.	kg
Impostazione battute di resina				n.d.		n.d.	
Resina	1400	km	Via Camion	n.d.	kg	n.d.	kg
Accelerante	1400	km	Via Camion	n.d.	kg	n.d.	kg
Colorante	1400	km	Via Camion	n.d.	kg	n.d.	kg
Catalizzatore	800	km	Via Camion	n.d.	kg	n.d.	kg
Miscela				n.d.	kg	n.d.	kg
Peso palo				n.d.	kg	n.d.	kg
Sfridi Centrifugal - resina				n.d.	kg	n.d.	kg
Peso palo senza sfridi resina				n.d.	kg	n.d.	kg
Sfridi Taglio testa/base palo				n.d.	kg	n.d.	kg
Peso palo senza sfridi totali				20,230	kg	33,680	kg

– **Fasi del ciclo di vita e dati dei flussi**

Le fasi del ciclo vita di un palo di trasmissione della luce in vetroresina sono riassumibili nei seguenti punti:

- Produzione delle materie prime: fibre di vetro, subbi, velo poliestere, resina, accelerante, colorante, catalizzatore
- Trasporto in azienda delle materie prime
- Macchina di talio chopped
- Tessitura della stuoia
- Controllo della lunghezza, taglio e avvolgimento in rulli della stuoia
- Miscela di resina colorante, accelerante e catalizzatore
- Avvolgimento stuoia e inserimento nel centrifugal casting
- Taglio e imballaggio del palo
- Utilizzo
- Dismissione

In Gabi si è inserito il seguente schema di input e output per ogni flusso di entrambi i pali (Figura 219):

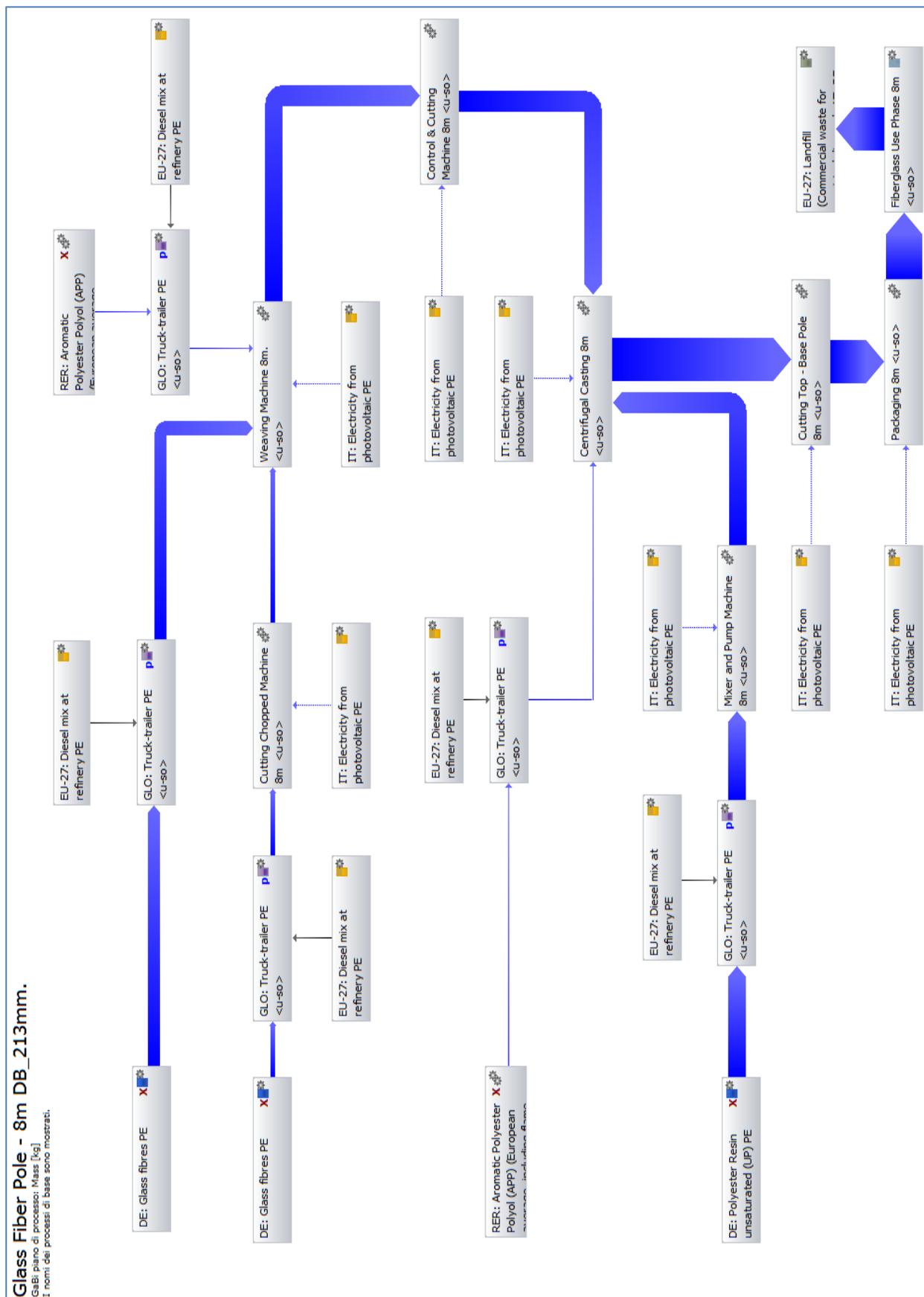
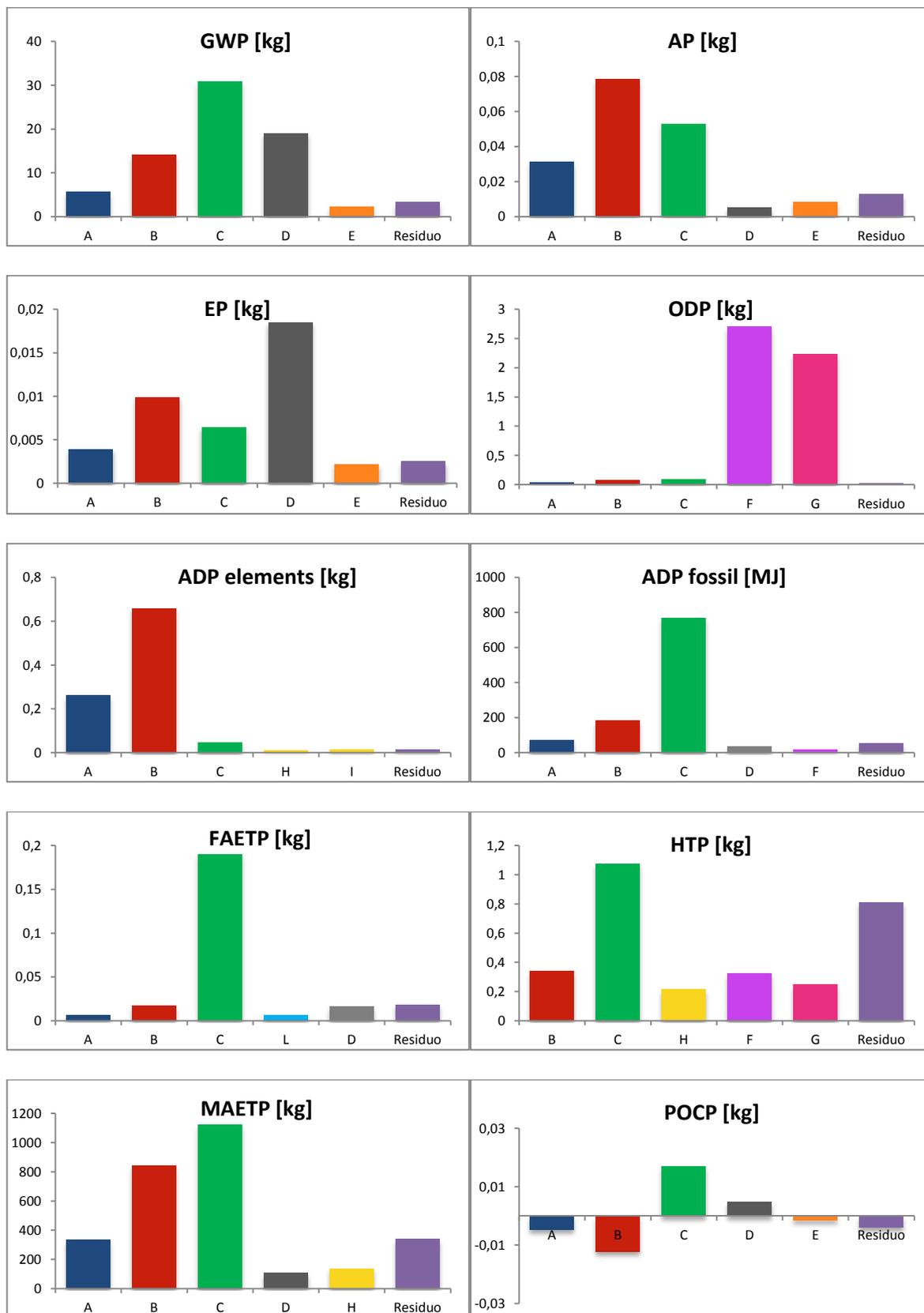


Figura 219 – Diagramma di flusso palo illuminazione in vetroresina

– **Analisi degli impatti (LCIA): GFR Pole 6 m**

In Figura 220 vengono evidenziati gli impatti ambientali di un palo in acciaio di 6 m. In Tabella 104 vengono riassunti tutti i valori numerici degli impatti ambientali analizzati.



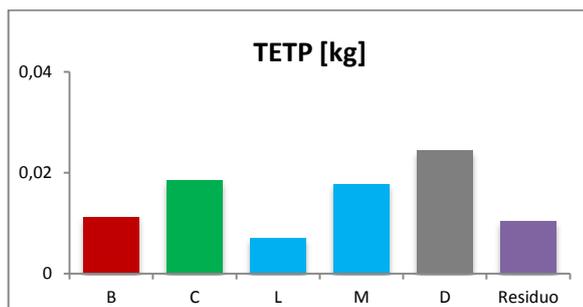


Figura 220 - Analisi degli impatti: Fiberglass Pole 6 m

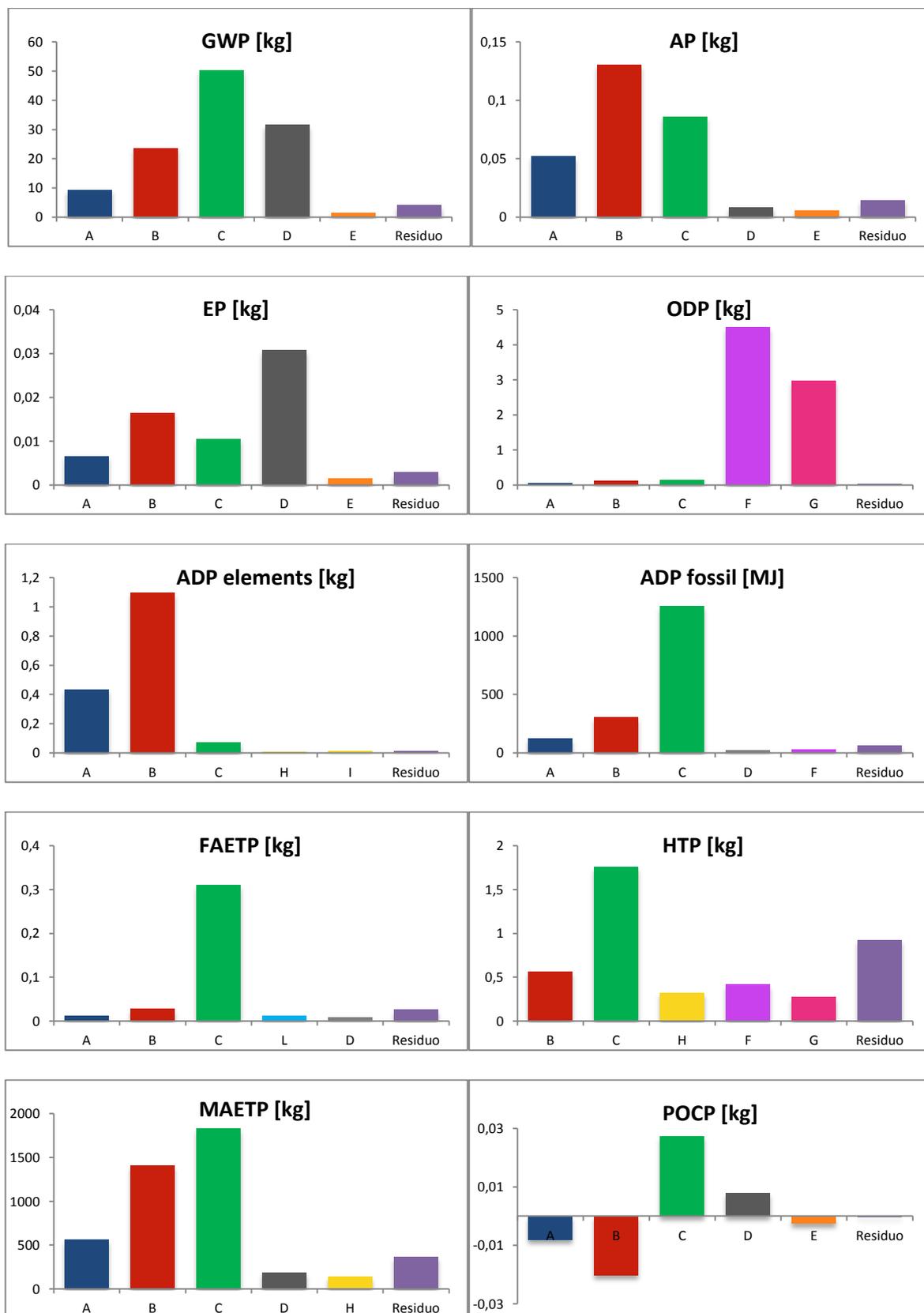
A	DE: Glass fibres PE chopped
B	DE: Glass fibres PE roving
C	DE: Polyester Resin unsaturated (UP) PE
D	EU-27: Landfill (Commercial waste for municipal disposal; AT, DE, IT, LU, NL, SE, CH) PE <p-agg>
E	GLO: Truck-trailer PE <u-so>
F	RER: Aromatic Polyester Polyol (APP) Subbi (European average, including flame retardant) PU Europe
G	RER: Aromatic Polyester Polyol (APP) velo (European average, including flame retardant) PU Europe
H	IT: Electricity from fotovoltaic PE
I	IT: Electricity from fotovoltaic PE
L	EU-27: Diesel mix at refinery PE
M	EU-27: Diesel mix at refinery PE

Tabella 104 - Impatti ambientali: GFR Pole 6 m

TIPOLOGIA DI IMPATTO	UM	GFR POLE 6 m
GWP	kg	75,3
AP	kg	0,189
EP	kg	0,044
ODP	kg	5,14E-08
ADP	kg	1,01E-03
ADPF	MJ	1,13E+03
FAETP	kg	0,255
HTP	kg	3,010
MAETP	kg	2,89E+03
POCP	kg	6,40E-04
TETP	kg	0,090

– **Analisi degli impatti (LCIA): GFR Pole 8 m**

Qui in Figura 221 vengono evidenziati gli impatti ambientali di un palo in acciaio di 8 m. Per valutare l’impatto ambientale del prodotto analizzato si è utilizzato il metodo CLM. Infine in Tabella 105 vengono riassunti tutti i valori numerici degli impatti ambientali analizzati.



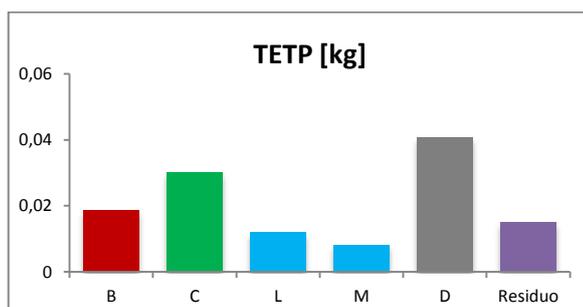


Figura 221 - Analisi degli impatti: Fiberglass Pole 8 m

Tabella 105 - Impatti ambientali: GFR Pole 8 m

TIPOLOGIA DI IMPATTO	UM	GFR POLE 8 m
GWP	kg	121
AP	kg	0,298
EP	kg	0,069
ODP	kg	7,81E-08
ADP	kg	1,65E-03
ADPF	MJ	1,80E+03
FAETP	kg	0,393
HTP	kg	4,250
MAETP	kg	4,49E+03
POCP	kg	4,39E-03
TETP	kg	0,125

5.3.3 Confronto analisi degli impatti Steel Pole - GFR Pole

Secondo standard ISO, i risultati sono normalizzati dividendoli per un valore di riferimento. Il set di normalizzazione scelto in questo studio è il CML 2001; i fattori di impatto ambientale in questo tipo di normalizzazione sono descritti in [89]. I risultati normalizzati sono mostrati nella Figura 222 e nella Figura 223, in cui il palo in acciaio è impostato come valore di riferimento pari all’unità.

Gli eco-indicatori di impatto ambientale, del palo in vetroresina sono sempre inferiori a quelle del palo in acciaio eccezion fatta per il potenziale di eutrofizzazione (EP) ovvero l’esaurimento dell’ossigeno in un ambiente marino. Per il palo 6 metri in vetroresina, l’indice della potenziale eco-tossicità terrestre (TETP) e il potenziale di tossicità per l’uomo (HTP) è più elevato rispetto al palo 8 metri dello stesso materiale e ciò indica la non linearità del comportamento del eco-indicatori di impatto rispetto alla lunghezza del palo.

La differenza principale nei due diversi processi produttivi è il peso del materiale utilizzato. La LCA del palo in acciaio è fortemente influenzata dalla massa e dall’energia introdotta nel processo (ad esempio la notevole quantità di energia esercitata durante l’estrazione delle materie prime).

Per osservare quale processo ha un maggiore impatto ambientale tramite LCA è possibile inoltre analizzare ogni singolo processo. La divisione in sotto-processi permette di intervenire, in un ciclo di ottimizzazione focalizzata nel miglioramento dell’impatto ambientale dell’intero prodotto. Lo scopo è stato quindi quantificare la differenza tra i due prodotti in modo da avere, in fase di scelta, un criterio aggiuntivo oltre quelli classici (strutturali e costi) secondo nuove politiche europee.

In Tabella 106 vengono riportati i valori normalizzati degli impatti ambientali del palo in acciaio e del palo in vetroresina.

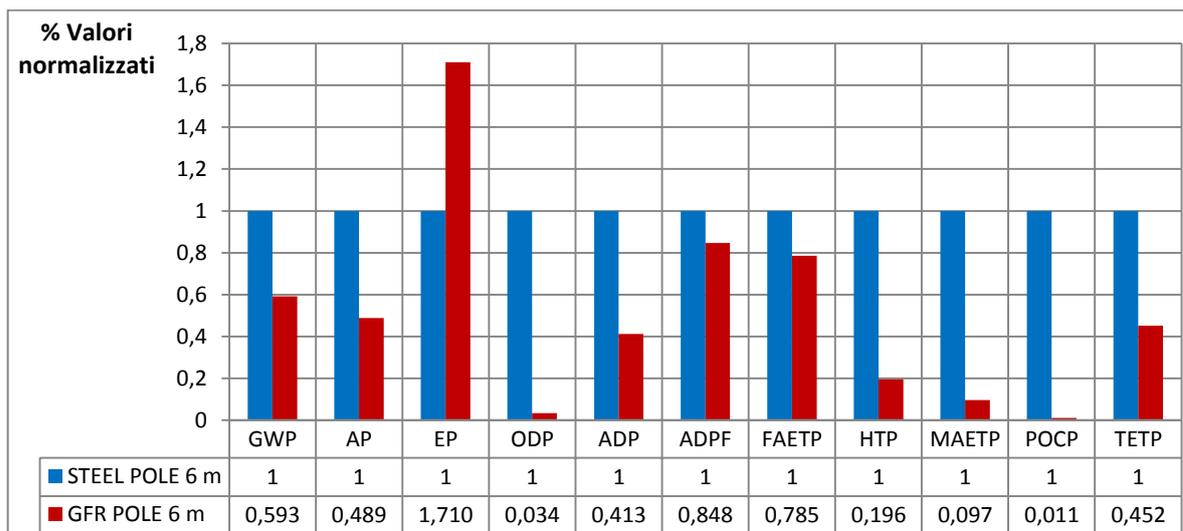


Figura 222 – Valori normalizzati degli indicatori d’impatto pali 6 m

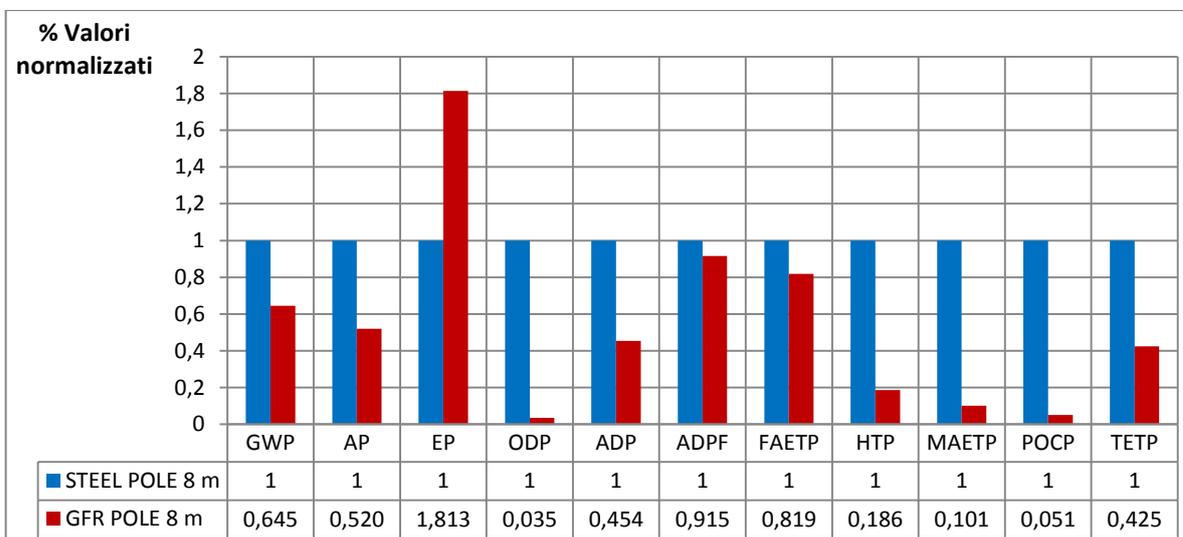


Figura 223 – Valori normalizzati degli indicatori d’impatto pali 8 m

Tabella 106 - Valori normalizzati riassuntivi del palo in acciaio e del palo in vetroresina

TIPOLOGIA D’IMPATTO	STEEL POLE 6 m	GFR POLE 6 m	STEEL POLE 8 m	GFR POLE 8 m	VALORE UNITARIO	VALORI NORM. 6 m	VALORI NORM. 8 m
GWP	381	75,3	563	121	1	0,198	0,215
AP	1,160	0,189	1,720	0,298	1	0,163	0,173
EP	0,077	0,044	0,114	0,069	1	0,570	0,604
ODP	4,50E-06	5,14E-08	6,68E-06	7,81E-08	1	0,011	0,012
ADP	7,34E-03	1,01E-03	1,09E-02	1,65E-03	1	0,138	0,151
ADPF	4,00E+03	1,13E+03	5,90E+03	1,80E+03	1	0,283	0,305
FAETP	0,974	0,255	1,44	0,393	1	0,262	0,273
HTP	46,100	3,010	68,400	4,250	1	0,065	0,062
MAETP	8,96E+04	2,89E+03	1,33E+05	4,49E+03	1	0,032	0,034
POCP	1,73E-01	6,40E-04	2,56E-01	4,39E-03	1	0,004	0,017
TETP	0,596	0,090	0,883	0,125	1	0,151	0,142

5.3.4 Caso studio 3: palo per linea aerea telefonica GFR 8 m Telecom Italia

– Analisi di inventario

Dopo aver fatto un’analisi di confronto dei pali di illuminazione variando il materiale (acciaio e vetroresina) si è deciso di fare un’analisi LCA sui prototipi Telecom 8 m in GFR realizzati presso l’azienda N.T.E.T S.p.A. In tal modo è stato possibile osservare una riduzione non solo in termini di peso ma anche in termini di impatto ambientale del prototipo_03 rispetto al prototipo_01. Qui nelle Tabella 107 e Tabella 108 vengono riassunti tutti i parametri di inventario dei vari prototipi. I valori di energia sono analoghi a quelli inseriti nel precedente caso studio.

Tabella 107 - Informazioni sui prototipi pali Telecom

Parametri	PROTOTIPO_01		PROTOTIPO_02		PROTOTIPO_03	
		UM		UM		UM
Forma	Tronco-conica		Tronco-conica		Tronco-conica	
Altezza palo	8000	mm	8000	mm	8000	mm
Materiale	Vetroresina		Vetroresina		Vetroresina	
Spessore	5,5 ± 0,5	mm	5,5 ± 0,5	mm	5,5 ± 0,5	mm
Diametro base	270 ± 3	mm	270 ± 3	mm	270 ± 3	mm
Peso del palo	44 ± 2	kg	42 ± 2	kg	41 ± 2	kg

Tabella 108 - Inventario palo in vetroresina: Distanza – Trasporto – Quantità di materiale

MATERIALE	PERCORSO		TRASPORTO	Prototipo_01		Prototipo_02		Prototipo_03	
	Distanza	UM		Peso	UM	Peso	UM	Peso	UM
Roving1200	1400	km	Via Camion	n.d.	kg	n.d.	kg	n.d.	kg
Roving 2400	1400	km	Via Camion						
Chopped 2400	1400	km	Via Camion	n.d.	kg	n.d.	kg	n.d.	kg
Subbi	2654	km	Via Camion	n.d.	kg	n.d.	kg	n.d.	kg
Stuoia senza subbio				n.d.		n.d.		n.d.	
Stuoia peso				n.d.	kg	n.d.	kg	n.d.	kg
Stuoia metri				n.d.	m	n.d.	m	n.d.	m
Velo	1400	km	Via Camion	n.d.	kg	n.d.	kg	n.d.	kg
Impostazione battute di resina				n.d.		n.d.		n.d.	
Resina	1400	km	Via Camion	n.d.	kg	n.d.	kg	n.d.	kg
Accelerante	1400	km	Via Camion	n.d.	kg	n.d.	kg	n.d.	kg
Colorante	1400	km	Via Camion	n.d.	kg	n.d.	kg	n.d.	kg
Catalizzatore	800	km	Via Camion	n.d.	kg	n.d.	kg	n.d.	kg
Miscela				n.d.	kg	n.d.	kg	n.d.	kg
Peso palo				n.d.	kg	n.d.	kg	n.d.	kg
Sfridi Centrifugal - resina				n.d.	kg	n.d.	kg	n.d.	kg
Peso palo senza sfridi resina				n.d.		n.d.		n.d.	
Sfridi Taglio testa/base palo				n.d.	kg	n.d.	kg	n.d.	kg
Peso palo senza sfridi totali				44,34	kg	42,22	kg	41,29	kg

– Fasi del ciclo di vita e dati dei flussi

Le fasi del ciclo vita di un palo 8 m in vetroresina per linee aeree di telecomunicazione sono analoghe a quelle trattate nel precedente caso studio con l’unica differenza dell’assenza della fase di impacchettamento dei pali.

In Figura 224 viene rappresentato lo schema a blocchi del ciclo di vita dei pali Telecom Italia.

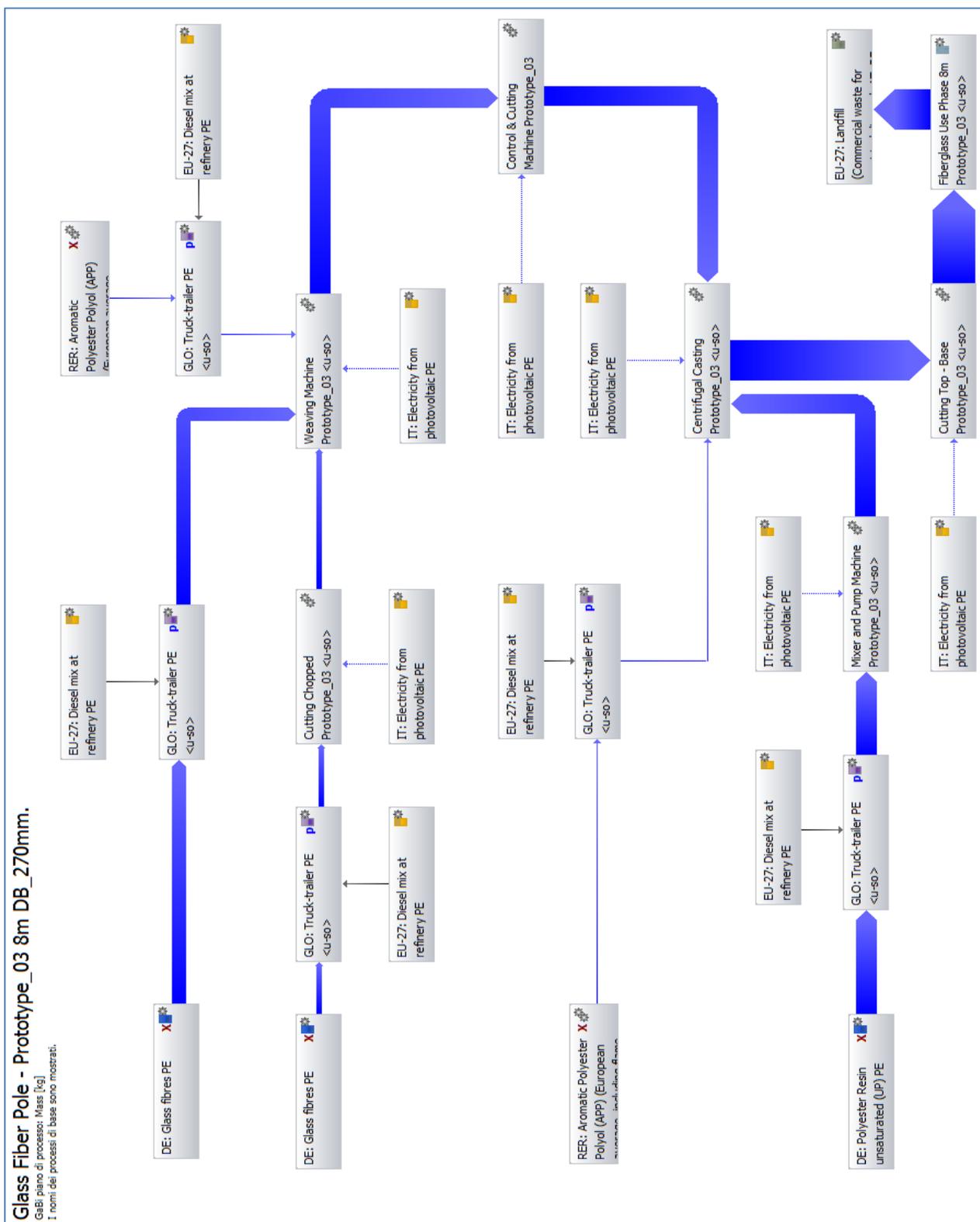
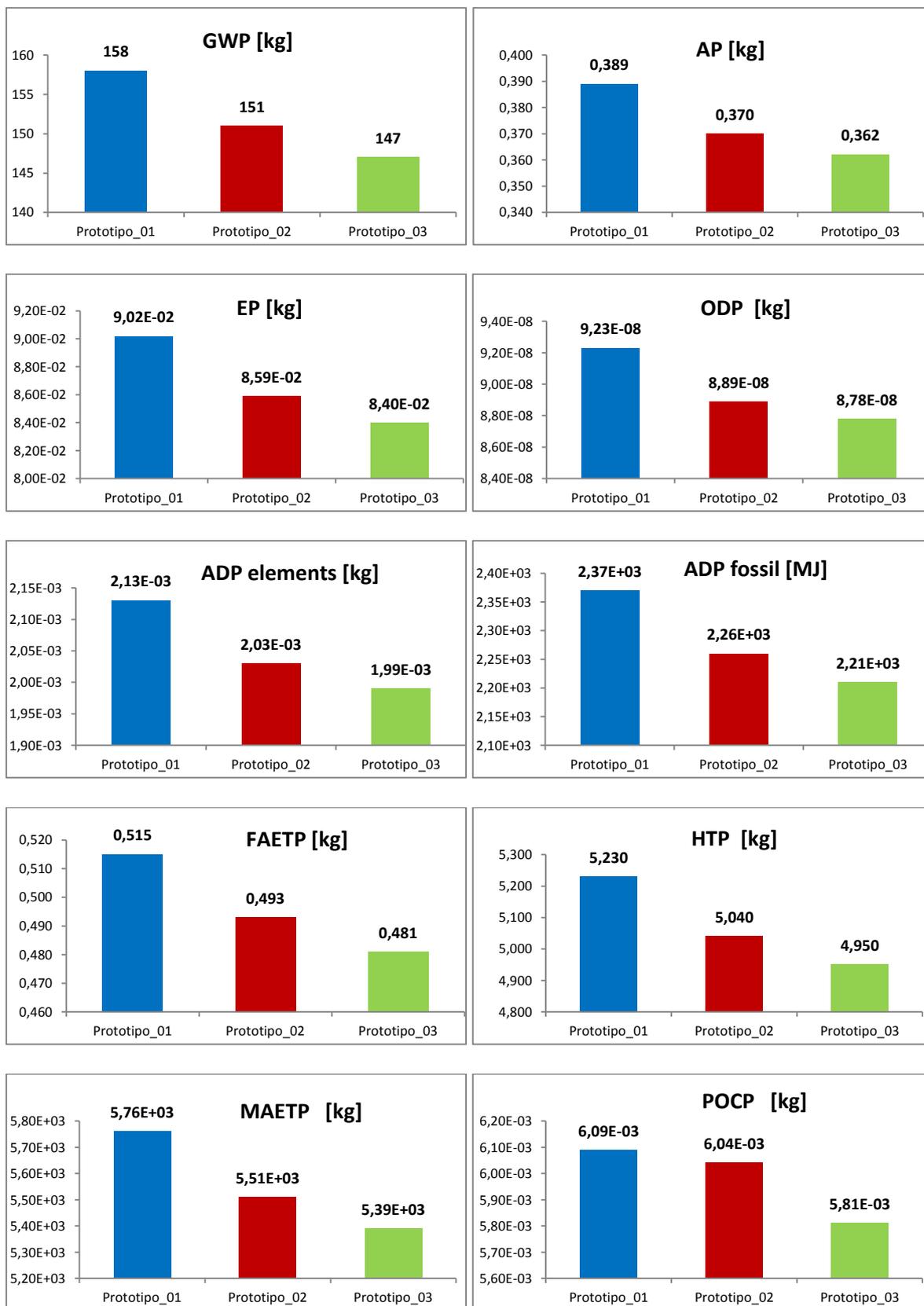


Figura 224 - Diagramma di flusso prototipi in vetroresina 8 m Telecom Italia

5.3.5 Confronto analisi degli impatti prototipi GFR Pole

In questo paragrafo finale è stato fatto un confronto degli impatti ambientali riferendoci ai prototipi realizzati per i pali per linee aeree di telecomunicazione Telecom Italia (Figura 225).



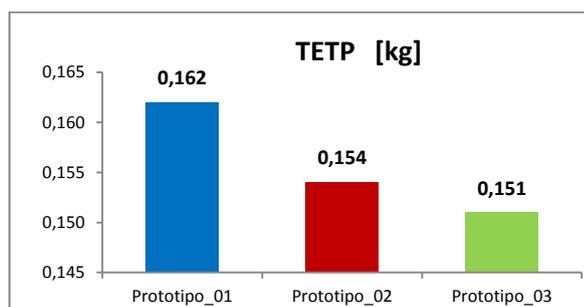


Figura 225 - Variazione impatti ambientali prototipi pali Telecom

Nello specifico si nota come grazie alla riduzione del peso che si è fatta in fase di progettazione dei tre prototipi, si è riscontrato anche una riduzione delle emissioni in fase di produzione e quindi degli impatti ambientali verso l’ambiente del prototipo_03. Come si può notare dalla Tabella 109 e dalla Figura 226 tutti gli eco-indicatori del prototipo_03 sono inferiori al prototipo_01 preesistente in azienda prima dell’ottimizzazione.

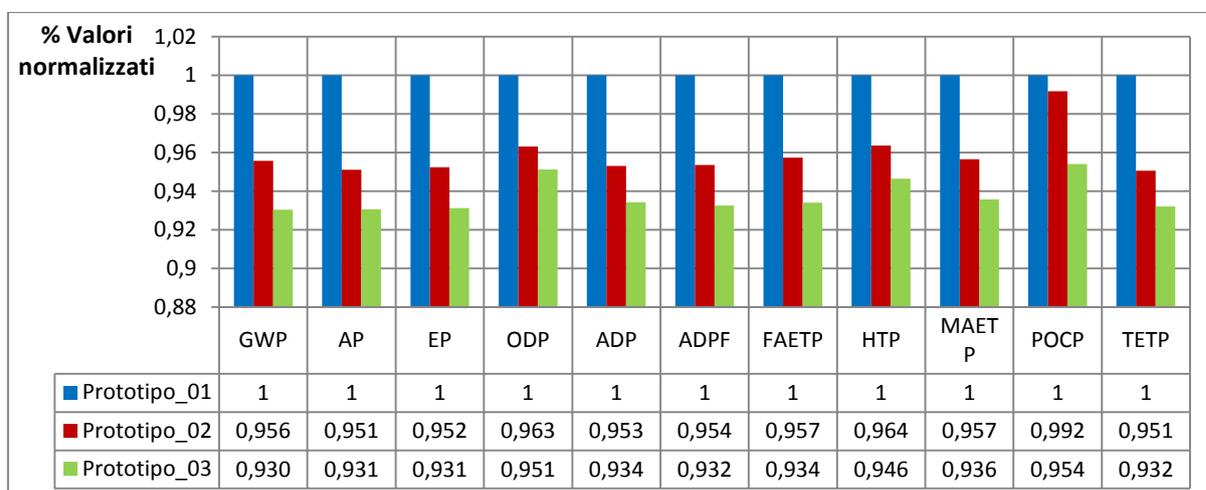


Figura 226 - Valori normalizzati degli indicatori d’impatto dei prototipi Telecom Italia

Tabella 109 - Valori normalizzati prototipi pali 8 m Telecom Italia

TIPOLOGIA D’IMPATTO	PROTOTIPO_01	PROTOTIPO_02	PROTOTIPO_03	VALORE UNITARIO	VALORI NORM. PROTOTIPO_02	VALORI NORM. PROTOTIPO_03
GWP	158	151	147	1	0,956	0,930
AP	0,389	0,370	0,362	1	0,951	0,931
EP	0,0902	0,0859	0,084	1	0,952	0,931
ODP	9,23E-08	8,89E-08	8,78E-08	1	0,963	0,951
ADP	2,13E-03	2,03E-03	1,99E-03	1	0,953	0,934
ADPF	2,37E+03	2,26E+03	2,21E+03	1	0,954	0,932
FAETP	0,515	0,493	0,481	1	0,957	0,934
HTP	5,230	5,040	4,950	1	0,964	0,946
MAETP	5,76E+03	5,51E+03	5,39E+03	1	0,957	0,936
POCP	6,09E-03	6,04E-03	5,81E-03	1	0,992	0,954
TETP	0,162	0,154	0,151	1	0,951	0,932

Dal grafico si nota come con il prototipo_02 è possibile riscontrare una riduzione degli impatti ambientali totale del 4,10 %, mentre per il prototipo_03 è possibile riscontrare una riduzione del 6,25% degli impatti totali sul singolo palo.

5.4 Metodologie di riciclaggio di compositi termoindurenti

Tenendo conto degli sviluppi normativi attuali e futuri, a partire dalla fase di progettazione e nelle successive fasi di produzione, devono essere presi in considerazione tutti gli aspetti legati allo smaltimento degli scarti di lavorazione e dei prodotti alla fine del loro ciclo di vita.

Pertanto, devono essere presi in considerazione tutti gli aspetti *tecnologici* ed *economici* legati alle differenti metodologie di smaltimento dei rifiuti.

Tale problematica è molto complessa nel caso di compositi a matrice polimerica termoindurente rinforzati con fibra di vetro ed è stata analizzata negli ultimi anni da Munaretto [90] che fa un’analisi di riciclo e riutilizzo di materiali compositi termoindurenti per l’industria automobilistica. Le possibili forme di smaltimento note sono:

- smaltimento in discarica;
- riciclaggio meccanico;
 - riciclaggio primario;
 - riciclaggio secondario;
- recupero di energia tramite incenerimento;
- riciclaggio Chimico – Pirolisi;

Le opzioni di riciclaggio esistenti hanno, allo stato attuale, costi più elevati rispetto all’interramento, pertanto sino ad oggi quest’ultima è la soluzione più diffusa, almeno in Italia.

Al fine di trovare una soluzione al problema, al di fuori delle varie opzioni esistenti che hanno o un elevato costo ambientale, oppure un elevato costo economico, è stata sviluppata in collaborazione con la N.T.E.T. S.p.A. una soluzione che evita l’opzione dell’interramento senza avere costi economici non sostenibili. La soluzione messa a punto dalla N.T.E.T. S.p.A. prevede un processo di frantumazione economico ed efficace per la realizzazione di nuovi compound. Nei paragrafi successivi saranno descritti i principali processi di riciclaggio con una particolare attenzione alla soluzione della N.T.E.T. S.p.A. definita RBMC - Recycled Bulk Molding Compound. Il modello N.T.E.T. S.p.A. si differenzia dagli altri metodi di riciclaggio meccanico poiché il costo di frantumazione è di circa un ordine di grandezza in meno rispetto ai costi di micronizzazione necessari nel caso di riciclaggio primario. L’analisi dei vari scenari di smaltimento e delle varie tecnologie di riciclaggio rappresenta un fondamentale ambito di studio in quanto tale problematica riveste sempre maggiore importanza nel ciclo di vita del prodotto.

5.4.1 Smaltimento in discarica

La pratica dell’interramento dei rifiuti attualmente, molto diffusa nonostante sia la meno tecnologica, diviene sempre meno praticabile in virtù della evoluzione legislativa. Infatti, già oggi in alcuni paesi della U.E. l’interramento è vietato, o comunque molto costoso. La tecnica dell’interramento, nonostante i rifiuti siano considerati speciali ma non pericolosi, richiede aree sempre più grandi con costi sempre più alti.

5.4.2 Riciclaggio meccanico

Il riciclaggio meccanico prevede la riduzione del composito tramite macinazione in dimensioni variabile al fine di utilizzare le residue proprietà fisiche e meccaniche del macinato.

– Riciclaggio Primario

Il riciclaggio primario prevede la macinazione – micronizzazione dei prodotti, dopo aver eliminato le parti metalliche, e la successiva frantumazione degli stessi sino a livello micrometrico, in modo da

utilizzare lo scarto come cariche inerti per manufatti della stessa natura dei prodotti di origine, sostituendo quindi quota parte delle cariche inerte, solitamente utilizzate.

Nel caso di riciclaggio primario, il filler deve avere una granulometria variabile dai $50\div 200\ \mu\text{m}$ in relazione alle tecnologie di trasformazione della PRFV, quindi il costo di micronizzazione risulta molto elevato. I limiti del processo sono:

- l’elevato costo per micronizzare gli scarti;
- la limitata possibilità di riutilizzo del macinato che non può essere superiore al $5\div 10\%$ della frazione in peso del prodotto finale, al fine di non far decadere eccessivamente le caratteristiche estetiche e meccaniche dei nuovi manufatti;
- l’impossibilità di riutilizzare tutti gli scarti prodotti; infatti, ipotizzando un utilizzo del 10% di riciclato su tutti i nuovi componenti realizzati, per poter smaltire gli scarti di ogni ciclo di vita dei prodotti si dovrebbero decuplicare i volumi di produzione per ogni ciclo di vita.

In questa direzione, in Europa sono state sviluppate e realizzate delle applicazioni sia in Francia (VALCOR) sia in Germania (ERCOM).

Questi progetti prevedono, infatti, il riutilizzo degli scarti frantumati, in piccole percentuali, come filler per BMC ed SMC da utilizzare nel settore automotive, tuttavia allo stato attuale, viste le precedenti considerazioni economiche, in nessuno dei casi si è avuto un particolare successo tecnico economico.

– Riciclaggio Secondario

Nel caso del riciclaggio secondario la frantumazione è effettuata ad un livello più grossolano, quindi con costi di frantumazione molto più bassi, al fine di realizzare cariche inerti da utilizzare come inerti di manufatti di differente natura rispetto ai prodotti di origine. Nella Figura 227 viene rappresentato lo schema di processo per il riciclaggio dei materiali compositi.

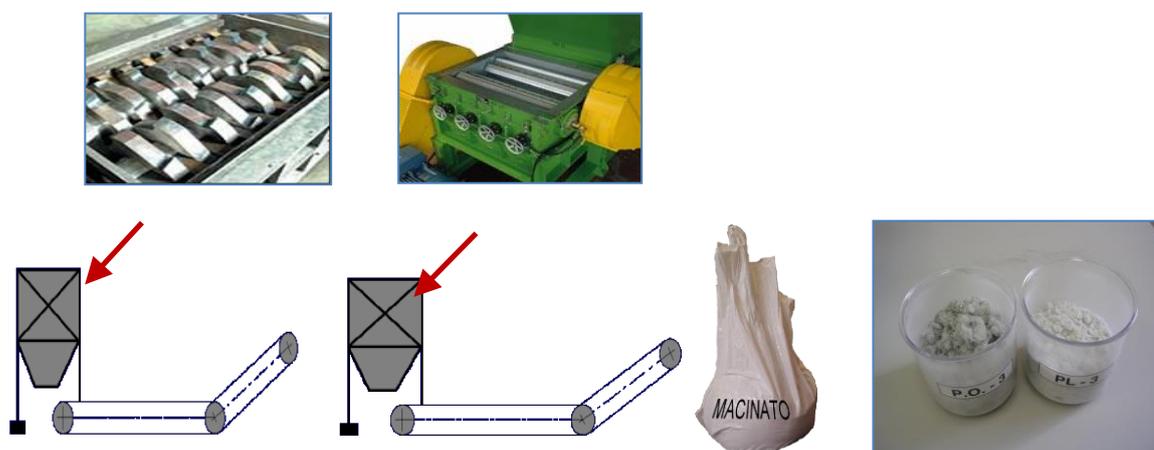


Figura 227 - Schema del processo di triturazione per il riciclaggio secondario

Il processo di triturazione avviene tramite un doppio processo di triturazione, attraverso un tritratore ad ingranaggi ed un successivo mulino. In questa fattispecie, gli scarti sono triturati con una prefissata granulometria ed hanno una elevata percentuale di componente fibrosa.

Le dimensioni possono essere anche superiori al millimetro; questo scarto può essere utilizzato non solo come filler ma anche come componente strutturale, in quanto ha mantenuto una forma fibrosa.

Pertanto le possibili applicazioni sono:

- componente fibroso strutturale di nuovi compound con caratteristiche inferiori ai prodotti di partenza, quali basamenti e pozzetti interrati, ecc;

- filler per core di sandwich;
- filler per bitumi, asfalti.

Per quanto riguarda la realizzazione di nuovi compound, è stato messo a punto, da N.T.E.T. S.p.A., un processo brevettato per la produzione di RBMC - Recycled Bulk Molding Compound (Figura 228).

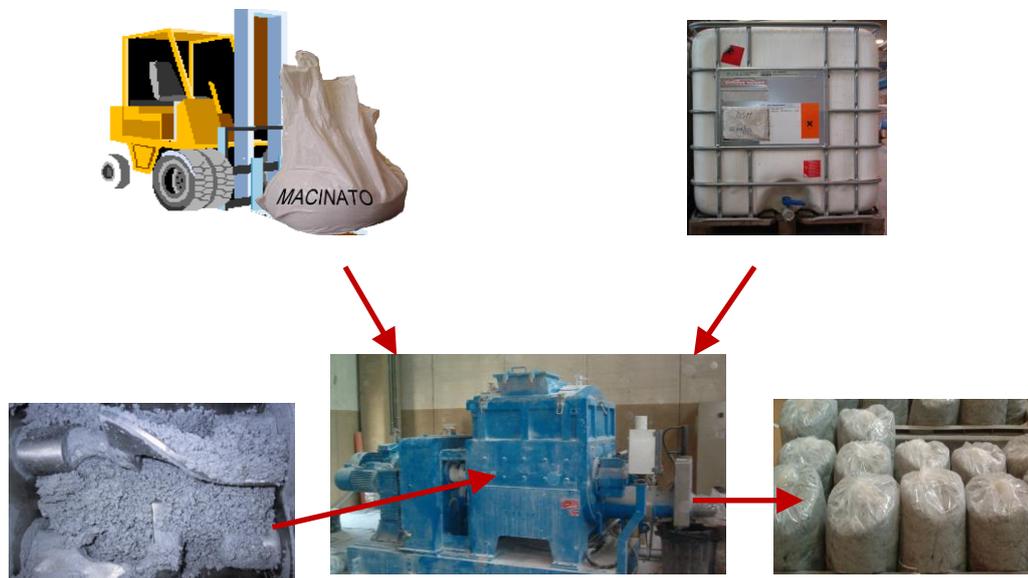


Figura 228 - Processo di produzione RBMC

Con la tecnologia di produzione del RBMC è possibile realizzare nuovi prodotti contenenti una percentuale fino al 50% di triturato.



Figura 229 - Processo di produzione di componenti in RBMC.

Le immagini precedenti mostrano il ciclo di produzione del triturato. Gli scarti di produzione ed i componenti a fine vita sono triturati con una granulometria variabile in forma fibrosa con lunghezza che può arrivare sino a 5-10 mm.

La triturazione avviene in più fasi e con diverse tipologie di trituratori e mulini. Il triturato è poi inserito assieme agli altri componenti con resina ed additivi in uno speciale miscelatore braccia Z.

La Figura 229 mostra la produzione di alcuni componenti realizzati con tale tecnologia. Come si può osservare sono stati realizzati varie tipologie di componenti con forme e dimensioni variabili. La tecnologia si presta in modo particolare a quei componenti che debbano essere incassati o interrati, tipo pozzetti e basamenti per cabinet.

Il processo realizzato presenta numerosi ed indubbi vantaggi, la criticità è, invece, legata alla possibilità di legare mercati ed utilizzi differenti e, nel caso di bitumi, in applicazioni che hanno volumi di utilizzo di alcuni ordini di grandezza superiore, dovendo garantire quindi il costante apporto di filler.

5.4.3 Recupero di energia tramite incenerimento

Nel caso dei PRFV a matrice termoindurente con rinforzo fibroso solo con fibre di vetro, solo il 25÷40% del composito è costituito da componenti organici, mentre la restante parte è costituita da vetro e/o cariche.

Si riesce dunque a ricavare energia solo dal 25÷40% dello scarto, mentre la restante parte rimane come scoria della combustione. Inoltre è da considerare che in molte applicazioni è frequente l’utilizzo di ritardanti di fiamma, che per loro natura durante l’incenerimento riducono l’apporto energetico che può addirittura diventare nullo.

5.4.4 Riciclaggio Chimico - Pirolisi

Attuando un processo di riscaldamento ad altissima temperatura, in assenza di ossigeno, si ha un processo di pirolisi da cui si ottiene tipicamente:

- 12 ÷ 15 % di sostanze gassose (facilmente combustibili);
- 12 ÷ 15 % di sostanze oleose (combustibili).

Anche in questo caso è da verificare il comportamento dei ritardanti di fiamma nel processo di pirolisi. Esistono differenti tecniche termiche per la pirolisi e idrogenazione dei compositi e generalmente la frazione organica combustibile è in grado di alimentare il processo.

Il rinforzo recuperato può essere utilizzato per la realizzazione di nuovi compound. Infatti, in particolari applicazioni come il BMC le caratteristiche meccaniche, nel caso di fibre ricavate da pirolisi, non subiscono degrado rilevante rispetto all’utilizzo di fibra vergine.

Tale processo risulta ancora più interessante nel caso di compound realizzati con fibre di carbonio, visto il costo elevato delle stesse.

6. Conclusioni attività di ricerca

L’attività di ricerca effettuata durante il periodo di dottorato ha riguardato lo studio di componenti in composito a matrice termoindurente e termoplastica fibro-rinforzati per l’industria delle infrastrutture di reti elettriche, telefoniche e dei trasporti. Nello specifico sono stati presi in considerazione, materiali e tecnologie per la produzione di componenti di media-grande serie per svariate applicazioni industriali in cui l’aspetto economico assume un’importanza rilevante, pari almeno all’aspetto tecnico. L’obiettivo della tesi di Dottorato sviluppata in collaborazione con l’azienda N.T.E.T. S.p.A. è stato quello di sviluppare delle nuove formulazioni dei compositi in modo da ottenere pali in vetroresina, con le stesse caratteristiche prestazionali, ma con una sensibile riduzione del peso di circa il 5% rispetto a quelli prodotti. L’attività di ricerca è divisa in 3 fasi:

La prima fase dell’attività di ricerca è stata focalizzata sulle prove sperimentali di caratterizzazione dei materiali presenti nell’azienda N.T.E.T. S.p.A. Nello specifico sono stati indagati materiali realizzati con le tecnologie di: stampaggio a compressione, pultrusione, centrifugazione e stampaggio a iniezione. Per gli stampati a compressione e i pultrusi è stata fatta esclusivamente una caratterizzazione meccanica di trazione mentre per i centrifugati e gli stampati a iniezione è stata fatta una caratterizzazione completa del materiale effettuando le seguenti prove: 1) prove per determinare la percentuale di fibre di vetro; 2) prove dielettriche; 3) prove di assorbimento di acqua; 4) prove di autoestinguenza; 5) prove di caratterizzazione meccanica (trazione, compressione, flessione, taglio interlaminare); 6) prove di caratterizzazione chimico-fisica (resistenza ai raggi UV, stabilità termica a +70 °C/-30 °C, resistenza agli agenti chimici). Durante le prove di trazione e compressione sono state applicate tecniche sperimentali a campo intero, del tipo contactless: la Digital Image Correlation (DIC) e la termografia ad infrarossi (IRT). Utilizzando queste tecniche sperimentali è stato possibile ottenere utili informazioni sulle proprietà locali dei materiali compositi investigati. Tale indagine è molto utile poiché i materiali compositi per loro natura hanno una struttura non omogenea ed un comportamento fortemente anisotropo. Completate tutte le prove sperimentali è stato fatto un confronto dei materiali termoindurenti realizzati definendo vantaggi e limitazioni di ogni tecnologia di produzione. Nello specifico per tutti i materiali termoindurenti analizzati si è potuto notare un comportamento meccanico a trazione migliore per i materiali pultrusi, intermedio per i materiali centrifugati e peggiore per gli stampati.

La seconda fase dell’attività di ricerca è stata focalizzata sul reparto centrifugati andando a ricercare nuove soluzioni per ottenere pali più leggeri mantenendo sempre ottime caratteristiche meccaniche e sono stati applicati modelli analitici e numerici. Questi modelli sono stati validati da tutte le prove sperimentali di collaudo cui deve sottostare ogni prototipo realizzato prima di entrare in regime di produzione. Confrontando le varie prove di collaudo sperimentale per vari prototipi si è notato: 1) una riduzione del peso di 6,87 %; 2) un leggero incremento della deflessione massima di 4,02 %; 3) una riduzione del costo su singolo palo pari a 4,01 €.

Successivamente è stato effettuato un confronto tra i modelli analitici e numerici e le prove di collaudo sperimentale per ogni singolo prototipo in modo da poter apprezzare la bontà dei modelli impostati. Il confronto è stato effettuato al variare del carico applicato durante la prova di collaudo. Al valore di forza massima applicata (5000 N) si è registrata una variazione media della deflessione per ogni prototipo di circa pari a:

- variazione del 4% tra il valore calcolato dal modello analitico e quello sperimentale;
- variazione del 8% tra il valore calcolato dal modello numerico e quello sperimentale.

Parallelamente, è stata svolta una seconda attività di ricerca, la quale è stata incentrata sulla progettazione di nuovi prototipi di pali dove i requisiti richiesti, secondo le normative di riferimento, ponevano come obiettivo da raggiungere non più la leggerezza del palo ma la rigidità dello stesso in modo da rientrare nei valori di deflessione richiesti dal committente in fase di progettazione. Anche

per questi nuovi prototipi di pali è stata fatta una iniziale progettazione e una successiva prova di collaudo sperimentale. Successivamente effettuando un confronto analitico-sperimentale al valore della forza massima applicata è stata registrata una variazione media della deflessione per ogni prototipo di circa pari a:

- variazione del 1,5% tra il valore calcolato dal modello analitico e quello sperimentale per i prototipi_L;
- variazione del 1,5% tra il valore calcolato dal modello analitico e quello sperimentale per i prototipi_R.

Parte di questa fase è stata svolta durante un periodo di stage e ricerca svolto a Ningbo (CINA), presso la sede dell’azienda N.T.E.T. S.p.A., durante la quale sono state svolte le seguenti attività:

- 1) progettazione – realizzazione - collaudo dei cappellotti testa – base palo dei prototipi L e R;
- 2) progettazione – realizzazione - collaudo dei collari in acciaio dei prototipi L e R;
- 3) realizzazione – collaudo reggipali SMC.

Durante la terza fase di ricerca sono state condotte delle analisi di Life Cycle Assessment (LCA).

L’obiettivo, in conformità con le indicazioni fornite dalla International Organization for Standardization (ISO) nello standard ISO 14040 e 14044 è stato quello di confrontare l’impatto ambientale di due diversi prodotti (pali per illuminazione e pali per linee aeree di telecomunicazione) e processi di produzione. Sono stati analizzati tre casi studio. Nei primi due casi sono stati confrontati gli impatti ambientali di pali per illuminazione pubblica prodotti in acciaio zincato e in vetroresina. L’obiettivo di questi pali è quello di garantire un supporto di illuminazione ad una altezza da terra di 6 e 8 metri, per un periodo di 60 anni (unità funzionale), considerando che i pali siano installati a distanza equivalente. La vita di utilizzo di un palo in acciaio è di circa 60 anni così per il periodo in esame è sufficiente una quantità. Nel caso del palo in vetroresina la vita di uso è stimato in circa 20 anni, quindi sono necessari 3 pali per coprire l’intero periodo (tutti gli impatti ambientali ricavati pertanto devono essere moltiplicati per 3). Il confine del sistema è stato definito dall’utente (dall’estrazione delle materie prime alla fase di smaltimento) e le aree geografiche di produzione di questi pali sono due diversi impianti nel Sud Italia (S.I.P.A. S.p.A e N.T.E.T. S.p.A.). Nel terzo caso studio sono stati valutati e confrontati gli impatti ambientali di tre prototipi di pali in vetroresina realizzati per il committente Telecom Italia presso lo stabilimento dell’ N.T.E.T. S.p.A. L’unità funzionale definita in questo caso è di 20 anni. I risultati ottenuti con il metodo CML 2001 sono normalizzati dividendoli per un valore preso come riferimento (palo in acciaio). Ogni caso studio ha riportato i seguenti impatti ambientali:

- LCA al variare del materiale (palo 6 - 8 metri illuminazione). Per quanto riguarda i primi due casi studio si è notato come tutti gli eco-indicatori di impatto ambientale, del palo in vetroresina sono sempre inferiori a quelle del palo in acciaio eccezion fatta per il potenziale di eutrofizzazione (EP) ovvero l’esaurimento dell’ossigeno in un ambiente marino. Per il palo 6 metri in vetroresina, l’indice della potenziale ecotossicità terrestre (TETP) è più elevato rispetto al palo 8 metri dello stesso materiale e ciò indica la non linearità del comportamento degli indicatori di impatto rispetto alla lunghezza del palo. La differenza principale nei due diversi processi produttivi è il peso del materiale utilizzato. Il LCA del palo in acciaio è fortemente influenzato dalla massa e dall’energia introdotta nel processo (ad esempio la notevole quantità di energia esercitata durante l’estrazione delle materie prime).
- LCA al variare del prototipo di palo in vetroresina (palo 8 metri telecomunicazione). Nello specifico si nota come grazie alla riduzione del peso che si è fatta in fase di progettazione dei tre prototipi, si è riscontrato anche una riduzione delle emissioni in fase di produzione e quindi degli impatti ambientali verso l’ambiente. Tutti gli eco-indicatori del prototipo attualmente in produzione sono inferiori rispetto al prototipo preesistente in azienda. Nello specifico è stata riscontrata una riduzione di circa 6,25% degli impatti totali sul singolo palo.

Infine è stata fatta un analisi sul riciclaggio dei materiali compositi termoindurenti definendo tutte le possibili forme di smaltimento e successivamente una soluzione a costi non molto elevati. La soluzione messa a punto dalla N.T.E.T. S.p.A., definita RBMC - Recycled Bulk Molding Compound, prevede un processo di frantumazione economico ed efficace per la realizzazione di nuovi compound che poi saranno riutilizzati per altre applicazioni in cui sono richieste prestazioni inferiori.

Nei 3 anni di svolgimento dell’attività di ricerca della tesi di dottorato, non sono state prodotte pubblicazioni scientifiche in quanto, come riportato nella tesi di dottorato, tutti i dati sperimentali ottenuti sono dati non divulgabili poiché sono coperti da segreto aziendale.

7. Ringraziamenti

Alla fine di questo lungo percorso desidero ringraziare:

- tutti i miei insegnanti di una vita che mi hanno consentito di essere qua
- il Cav. Francesco Tornatore che mi ha dato l’occasione di crescere professionalmente
- l’Ing. Cirrone efficace guida nel difficile mondo del lavoro
- tutti gli ingegneri, tecnici e operai con cui mi sono interfacciato in azienda
- il Prof.Ing. Eugenio Guglielmino che ha sempre creduto nelle mie capacità
- il Prof.Ing. Vincenzo Crupi che mi ha sempre dedicato del tempo quando io ne avevo bisogno
- tutti i miei colleghi della “squadra” del Dipartimento di Costruzioni di Macchine
- alla mia famiglia che mi ha sostenuto quando ne avevo bisogno
- ai miei amici di una vita e a quelli conosciuti durante questo percorso

Infine per ultimo intendo ringraziare tutte quelle persone che con i loro consigli mi hanno fatto crescere come persona e che adesso purtroppo non ci sono più.

Appendice

Nella Tabella 110 seguente vengono riportate le normative utilizzate per effettuare le prove sperimentali sui materiali termoplastici e termoindurenti.

Tabella 110 - Normative prove di caratterizzazione dei materiali

<u>Prova</u>	<u>Normative termoplastici</u>	<u>Normative termoindurenti</u>
Trazione	ASTM D638	UNI EN 61
Compressione	UNI 4279	ASTM D6641
Flessione	ASTM D790	UNI 7219 – ISO 14125
Taglio interlaminare	-	ISO 14130
Impatto	ASTM D256	ASTM D256
Durezza	-	UNI EN 59
% X _f	-	ISO 1172
Rigidità dielettrica	ASTM D149	ASTM D149
Assorbimento d’acqua	ASTM D570	ASTM D570
Resistività volumetrica	UNI 4288	-

Bibliografia

- [1] Mallick P.K., «Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing and design,» *Department of mechanical engineering University of Michigan-Dearborn, U.S.A., 2007.*
- [2] Chou T. et al., «Microstructural design of fiber composites,» *Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1992.*
- [3] Guglielmino E., Rizzo G., «Quality in moulding fiberglass in the preimpregnated form,» *11th International Conference on engineering design, Tampere, Finlandia, 1997.*
- [4] Fonseca G., Pirolo A., «Materiali compositi stato dell’arte e prospettive di sviluppo della tecnologia della pultrusione,» *Casa editrice Edizioni Scientifiche Italiane, 1994.*
- [5] Brosius D., Clarke S., «Textile preforming techniques for low cost structural composites, advanced composite materials: new developments and applications,» *ASM International, 1991.*
- [6] Berube K.A., Lopez-Anido R., «Variability in the material properties of polymer matrix composites for marine structures,» *Journal of ASTM International, USA, 2010.*
- [7] Zuccarello B. et al., «Progettazione meccanica con materiali non convenzionali: modalità di rottura e criteri di resistenza,» *Università di Bologna, Italy, 2013..*
- [8] Bolotin V. V. et al. , «Mechanics of delaminations in laminate composite structures,» *Mechanics of Composite Materials, USA, 2001.*
- [9] Bruno D., «An analysis of delamination in laminated composite plates,» *9th Congresso Nazionale AIMETA, Bari, Italy, 1988.*
- [10] Di Sciuva M., «Analysis of delaminated beam: a comparative study of some theories,» *9th Congresso Nazionale AIMETA, Torino, Italy, 1986.*
- [11] Walker C.A., «Fracture mechanics in composites,» *Seminar on experimental techniques and design in composite materials, Cagliari, Italy, 1992.*
- [12] Guglielmino E., Riccobene M., «Performance testing of fiberglass composite poles for telecommunication lines,» *International AIPnD Conference, Firenze, Italy, 1992.*
- [13] Jones R.M., «Mechanics of composite materials,» *Scripta Book Company, Washington, U.S.A., 1975.*
- [14] Greszczul L.B., «Effect of material orthotropy on the directions of principal stresses and strains - Orientation effects in the mechanical behavior of anisotropic structural materials,» *U.S.A., 1966.*
- [15] Sabic Innovative Plastics, Data sheet Noryl resin, U.S.A., 2007.
- [16] Sabic Innovative Plastics, Data sheet Lexan PC resin, U.S.A., 2007.
- [17] Grasso G., Guglielmino E., La Rosa G., «Thermographic analysis of a lorry component in SMC,»

25th National AIAS Conference, Gallipoli-Lecce, Italy, 1996.

- [18] Guglielmino E., Rizzo G., «Quality in moulding fiberglass in the preimpregnated foam,» *International Conference on Engineering Design, Tampere, Finland, 1997.*
- [19] Quaresimin M., Guglielmino E., Perrone S., «Influenza di condizionamenti ambientali sul comportamento a fatica di un composito SMC,» *27th Convegno Nazionale AIAS, Perugia, Italy, 1998.*
- [20] Lazzarin P., Molina G., Molinari L., Quaresimin M., «Numerical simulation of SMC component moulding,» *4th Seminar of experimental techniques and design in composite materials, Cagliari, Italy, 1998.*
- [21] Atzori B., Quaresimin M., Trattenero G., «Short fiber composite materials: effects of test conditions and constituents on the fatigue behavior,» *2th Seminar of experimental techniques and design in composite materials, Sheffield, UK, 1994.*
- [22] Quaresimin M., Trattenero G., Di Carlo S., Serra R., «Analisi del comportamento statico e a fatica di un SMC – R25,» *ATA, ingegneria automobilistica, 1996.*
- [23] La Rosa G., Perrone S., Quaresimin M., «Determinazione della resistenza a fatica di materiali compositi con tecniche termografiche,» *27th Convegno Nazionale AIAS, Perugia, Italy, 1998.*
- [24] Bibbo M.A., Gutowski T.G., «An analysis of the pulling force in pultrusion,» *44th Annual Technical Conference, Society of Plastics Engineers, p. 1430, 1986.*
- [25] Guglielmino E., La Rosa G., «Experimental analysis of modified acrylic resin pultruded composites,» *7th International Conference on mechanical behavior materials, The Netherlands congress centre, The Hague, 1995.*
- [26] Cirrone G., Guglielmino E., «Experimental investigation on the characteristics of glass reinforced plastic manufactured using different processing techniques,» *9th International machine design and production conference, Ankara, Turkey, 2000.*
- [27] Short G.J., Guild F.J., Pavier M.J., «Delaminations in flat and curved composite laminates subjected to compressive load,» *Department of Mechanical Engineering, University of Bristol, UK, 2005.*
- [28] Schultheisz C.R., Waas A.M., «Compressive failure of composites, part I: Testing and micromechanical theories,» *Prog. Aerospace Sci., U.S.A., 1996.*
- [29] Budiansky B., Fleck N.A., «Compressive failure of fibre composites,» *U.S.A., 1993.*
- [30] Conti P., Paulis A.D., «A simple model to simulate the interlaminar stresses generated near the free edge of a composite laminate, delamination and debonding of materials,» *U.S.A., 1985.*
- [31] Lopez-Anido R.A., El-Chiti F.W., Muszynski L., Dagher H.J., Thompson L., Hess P.E., «Composite material testing using a 3-D Digital Image Correlation system,» *U.S.A., 2004.*
- [32] Hild F., Roux S., «Digital Image Correlation: from displacement measurement to identification of elastic properties,» *U.S.A., 2005.*

- [33] Goodman J. W. et al., «Speckle phenomena in optics: theory and applications,» *Roberts and Company Publishers, U.S.A., 2007.*
- [34] Giancane S., Panella F.W., Dattoma V., «Localizzazione e valutazione del danneggiamento mediante tecnica di correlazione di immagini,» *37th National AIAS Conference, Università di Roma “La Sapienza”, Italy, 2008.*
- [35] Berube K. A., Lopez-Anido R., «Full-field strain measurements for determining mechanical properties of marine composite laminates,» *11th International Congress exposition on experimental and applied mechanics, Orlando, U.S.A., 2008.*
- [36] Coatti R., Olmi G., «Analisi comparativa di metodi ottici per la meccanica sperimentale,» *Università di Bologna, Italy, 2009.*
- [37] Keith A. B. et al., «Integration of process parameter control and digital image correlation methods in an investigation of the variability of marine polymer matrix composite material properties,» *The University of Maine, 2012.*
- [38] Guglielmino E., La Rosa G., Oliveri S.M., «Thermographic and numerical analysis of stress concentration in composite laminates,» *2th International seminar on experimental techniques and design in composite materials, Sheffield, UK, 1994.*
- [39] Goidescu C, Weleman H, Garnier C, Fazzini M, Brault R, Peronnet E, et al., «Damage investigation in CFRP composites using full-field measurement techniques combination of digital image stereo-correlation, infrared thermography and X-ray tomography,» *U.K., 2013.*
- [40] Vergani L, Colombo C, Libonati F., «A review of thermographic techniques for damage investigation in composites,» *Frat Integ Strut*, 2014.
- [41] Baraccani D., Dal Re V., «La termografia: una tecnica di controllo non distruttivo,» *Università di Bologna, Italy, 2012.*
- [42] Conti P. et al., «Un metodo di ottimizzazione di laminati in materiale composito basato sull'analisi agli elementi finiti,» *16th National AIAS Conference, L'Aquila, Italy, 1988.*
- [43] Corvi A., Pulcinelli R., «Validazione sperimentale di un criterio di progetto di strutture in materiale composito,» *15th National AIAS Conference, Pisa, Italy, 1987.*
- [44] Cervenka A., «Mechanical behaviour of quasi-isotropic peek/carbon fiber laminates: theory/experiment correlation,» *Proceedings of Advancing with Composites, Milan, Italy, 1988.*
- [45] Picasso B., Priolo P., «Fatigue behaviour of graphite-peek laminates,» *Proceedings of Advancing with Composites, Milan, Italy, 1988.*
- [46] Bruno et al., «An analysis of delamination in laminated composite plates,» *9th Congresso Nazionale AIMETA, Bari, Italy, 1988.*
- [47] Di Sciuva M., «Development of an anisotropic multilayered, shear-deformable rectangular plate element,» *Computers & Structures, Milan, Italy, 1985.*
- [48] Esposito R., Guglielmino E., Soprano A., Tricomi D., «Aspetti progettuali di componenti

tubolari in composito,» *17th National AIAS Conference, Ancona, Italy, 1989.*

- [49] Soprano A., Esposito R., Guglielmino E., Tricomi D., «Indagine numerico sperimentale su pali tubolari in vetroresina,» *18th Convegno Nazionale AIAS, Salerno, Italy, 1990.*
- [50] Riccobene M., Guglielmino E., «Performance testing of fiberglass composite poles for telecommunication lines,» *International Conference on: monitoring and predictive maintenance of plants and structures, Firenze, Italy, 1992.*
- [51] Tricomi D., Esposito R., Guglielmino E., Soprano A., «Risposta a carichi assiali di tubi conici in vetro resina,» *21th Convegno Nazionale AIAS, Genova, Italy, 1992.*
- [52] Geier B., «The prediction of buckling behaviour of composite shells,» *2th Conference on computational mechanics, Stuttgart, Germany, 1990.*
- [53] Cali C., Esposito R., «Numerical buckling response for some axially loaded cylindrical CFRP panels,» *4th International Conference on advanced materials, Strasbourg, France, 1991.*
- [54] Di Pietro G., Guglielmino E., La Rosa G., «Optimization of composite material poles for telecommunication lines,» *2th International seminar on experimental technique and design in composite materials, Sheffield, UK, 1994.*
- [55] Mirone G., Guglielmino E., La Rosa G., «Studio del comportamento di un palo in frp. asolato,» *14th Convegno Nazionale AIAS, Parma, Italy, 1995.*
- [56] Guglielmino E., Mirone G., Rizzo G., «Confronto numerico sperimentale sul comportamento di pali di sostegno in vetroresina realizzati con due diverse tecnologie,» *26th National AIAS Conference, Aci-Castello, Italy, 1997.*
- [57] Cappello F., Tumino D., «Numerical analysis of composite plates with multiple delaminations subjected to uniaxial buckling load,» *Dipartimento di Meccanica, Università degli Studi di Palermo, Italy, 2005.*
- [58] Borrelli R., Giorleo G., «Sviluppo di procedure numeriche per la simulazione del danno in strutture in composito,» *Università di Napoli, Italy, 2011.*
- [59] Meadows D.H., Meadows D.L., Randers J., Behrens W.B., «The limits to growth,» *Pan books, Vermont, U.S.A., 1972.*
- [60] Bonfiglioli A., Cadeddu G., «il risparmio energetico potenziale nel ciclo dei contenitori in vetro per bevande. Confronto con altri materiali.,» *ENEA-FARE, Cagliari, Italia, 1985.*
- [61] Franklin W., Hunt R., «Environmental impacts of polystyrene and moulded pulp meat trays,» *Summary, Mobil Chemical Company, New York, U.S.A., 1972.*
- [62] Del Tin G et al., «Impatto ambientale dei combustibili fossili (petrolio, carbone e gas naturale),» *Atti e rassegna tecnica Società ingegneri e architetti, Torino, Italy, 1990.*
- [63] Fava J., Denison R., Curran M., Vigon B., Selke S., Barnum J., «A technical framework for life cycle assessment,» *Florida, U.S.A., 1991.*
- [64] Boustead I., «The relevance of re-use and re-cycling activities for the LCA profile of products,»

3th CESIO International Surfactants Congress, London, U.K., 1992.

- [65] Boustead I., «Eco-profiles of the european plastics industry: polyethylene and polypropylene,» *Report for PWMI, Brussels, Belgium, 1993.*
- [66] Boustead I., «Eco-profiles of the european plastics industry: polystyrene,» *Report for PWMI, Brussels, Belgium, 1993.*
- [67] Boustead I., «Eco-profiles of the european plastics industry: polyvynyl chloride,» *Report for APME, Brussels, Belgium, 1994.*
- [68] Boustead I., «Eco-profiles of the european plastics industry: polyethylene terephthalate (PET),» *Report for APME, Brussels, Belgium, 1995.*
- [69] Boustead I., «Eco-profiles of the european plastics industry: nylon 66,» *Report for APME, Brussels, Belgium, 1997.*
- [70] Guerriero R. et al., «Consumi energetici ed impatto ambientale nell'industria dei 40 metalli non ferrosi,» *La metallurgia italiana, Torino, Italy, 1993.*
- [71] Gianmusso S. et al., «Quando il riciclaggio diventa business,» *L'impresa ambiente, Milano, Italy, 1994.*
- [72] Kainz R.J., Simpson M.S., Moeser W.C., «Life cycle management: a solution for decisions making in the global market,» *SAE International Congress and Exposition, Detroit, Michigan, U.S.A., 1994.*
- [73] De Smed B., Stalmans M., «LCI and data quality,» *The International Journal of LCA, U.S.A., 1996.*
- [74] Baumann H., Rydberg T., «Life cycle assesment,» *U.S.A., 1994.*
- [75] Maurice B., Frischknecht, R., Coelho-Schwartz, V., Hungerbühler, K, «Uncertainty analysis in life cycle inventory. Application to the production of electricity with French coal power plants.,» *U.S.A., 2000.*
- [76] Heijungs, R., «Identification of key issues for further investigation in improving the reliability of life-cycle assessments.,» *U.S.A., 1996.*
- [77] Balestrini A., Baldo G.L., «Applicazione LCA: confronto AL e ghisa per fusione basamenti-motore,» *Rapporto Centro di Ricerche FIAT, Orbassano (TO), Italy, 1994.*
- [78] Balestrini A., Baldo G.L., «Analisi energetica della produzione del vetro per autovetture dalle materie prime al riciclo,» *50° Congresso ATI, St. Vincent, Italy, 1995.*
- [79] Fruh T. et al., «A new process for recycling of laminated safety glass,» *University of Hannover, Germany, 1994.*
- [80] Baldo G.L., Del Carlo A., Pernice L., Ranfagni R., Ricciolino C., Rossi S., «Life cycle assessment of hot-dip zinc galvanizing,» *Amsterdam, Netherlands, 2003.*
- [81] Brimacombe L., Shonfiled P., Buridard M., «Sustainability and steel recycling,» *The Proceedings of the 2001 Enviromental Sustainability Conference and Exhibition, Graz, Austria,*

2001.

- [82] De Benedetti B., Maffia L., Baldo G.L., «LCA experience in the field of recycling of plastics from electronic waste,» *Workshop on Recycling of Polymeric Materials (MODEST), Karlsruhe, Germany, 2003.*
- [83] Nepote V. , «La Life Cycle Analysis, guida alle scelte progettuali,» *Convegno: "L'impresa eco-efficiente", Torino, Italy, 1993.*
- [84] Raggi A. , «Life Cycle Costing: sviluppi e prospettive,» *ENEA, Bologna, Italy, 1998.*
- [85] Baldo G.L., Marino M., Rossi S., «Analisi del ciclo di vita, LCA. Materiali, prodotti e processi.,» *Edizione Ambiente, Milano, Italy, 2005.*
- [86] ISO, «Environmental Management. Life cycle assesment. Principles and framework,» *EN ISO 14040, U.S.A., 2006.*
- [87] ISO, «Environmental management. Life cycle assesment. Requirements and guidelines,» *EN ISO 14044, U.S.A., 2006.*
- [88] Bolin, C.A., Smith, S.T., «LCA of pentachlorophenol-treated wooden utility poles with comparisons to steel and concrete utility poles.,» *U.S.A., 2011.*
- [89] CML, «CML-IA Characterisation Factors, universiteitleiden.nl/en/research/research-output/science/cml-ia-characterisation-factors,» *Department of Industrial Ecology, 2001.*
- [90] Munaretto P., Bernardo E., «Studio dei materiali compositi per l'industria automobilistica: riciclo e riutilizzo,» *Università di Padova, Italy, 2013.*