

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITA' DI BOLOGNA

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA
Sede di Forlì

CORSO DI LAUREA IN
INGEGNERIA MECCANICA
Classe LM-33

ELABORATO FINALE DI LAUREA

In “TECNOLOGIE SPECIALI LM”

Studio del decadimento delle proprietà meccaniche di compositi CFRP sottoposti a invecchiamento termico.

CANDIDATO
FABIO MARIOTTI

RELATORE
Prof. LORENZO DONATI

CORRELATORE
Ing. PAOLO PROLI

Anno Accademico 2013/2014

Sessione II^a

*Dedico questa tesi
alla persona che mi ha ispirato a volere diventare
un ingegnere meccanico.*

“Forza e coraggio”

Cit. Maria Ceccaroni

INDICE

INTRODUZIONE

Capitolo 1

1. L'azienda "Riba Composites"

1.1. Settori di utilizzo dei compositi avanzati

Capitolo 2

2. I materiali compositi

2.1. Matrice

2.2. Fibra

2.3. Prepregs

2.4. Classificazione delle fibre e metodi di produzione

2.5. Compositi, metodi di produzione, sacco a vuoto con ciclo in autoclave

2.6. Processo di degradazione delle caratteristiche meccaniche e fisiche dei CFRP

Capitolo 3

3. Prove sperimentali

3.1. Produzione della lastra composito CFRP e caratteristiche preliminari

3.1.1. Taglio della lastra e marcatura dei provini

3.2. Misurazione dei provini

3.3. Campagna Sperimentale

3.3.1. Determinazione Tg

3.3.1.1. Rilevamento della temperatura di transizione vetrosa tramite analisi dinamo-meccanica e termica(DMTA) di materiali compositi in fibra di carbonio e matrice epossidica ER450

3.3.2. Campo di estrazione e temperatura d'invecchiamento

3.4. Attrezzatura utilizzata

Capitolo 4

4. Prove di caratterizzazione

4.1. Verifica del peso

4.1.1. Risultati della verifica del peso

4.2. Verifica della flessione

4.2.1. Risultati della verifica di flessione

4.3. Verifica del taglio interlaminare

4.3.1. Risultati della verifica del taglio interlaminare

4.4. Studio dell'invecchiamento a 100% Tg con estrazione ogni 1h per 6h

4.5. Regressione lineare

Capitolo 5

5. Parametrizzazione dei risultati

5.1. Metodo utilizzato

5.2. Risultati Parametrizzazione

5.2.1. Parametrizzazione dell'andamento del peso

5.2.2. Parametrizzazione dell'andamento della flessione

5.2.3. Parametrizzazione dell'andamento del taglio

Capitolo 6

6. Conclusioni

Capitolo 7

7. Direttive e Schede tecniche

7.1. Scheda tecnica resina epossidica e fibra di carbonio

7.2. Direttiva sulla flessione

7.3. Direttiva sul taglio interlaminare

Capitolo 8

8. Bibliografia

INTRODUZIONE

Si presenta come atto conclusivo del percorso di studi della laurea magistrale in Ingegneria Meccanica dell'Università di Bologna – sede di Forlì - la seguente tesi che descrive lo studio dell'invecchiamento dei compositi CFRP.

I componenti del carbonio in ambito strutturale (aeronautico, navale, automobilistico) sono soggetti a deterioramenti ambientali di difficile determinazione, in particolare alla temperatura e umidità.

Scopo di questa tesi è determinare i danneggiamenti dei materiali compositi CFRP in funzione di un invecchiamento a diverse percentuali della temperatura di transizione vetrosa T_g .

In particolare si vuole studiare e approfondire il processo di reazione della matrice e del carbonio, interesse scaturito dal continuo aumento dell'utilizzo dei componenti di composito nel settore strutturale dove si sofferma la mia attenzione in ambito universitario e possibilmente in un prossimo futuro lavorativo.

Per meglio descrivere il procedimento di deterioramento e reazione del materiale composito dovuto ad alti livelli di temperatura, mi sono avvalso del supporto pratico dell'azienda "Riba Composites" di Faenza che in particolare si occupa della prototipazione e produzione di componenti strutturali in materiali compositi avanzati e che si è dimostrata leader nel settore dei compositi CFRP.

Pochi studi sono stati condotti su tale argomento. Da qui il mio interesse specifico nel volere studiare e dimostrare come questo processo possa ulteriormente apportare un aiuto agli studi in ambito strutturale già effettuati e pubblicati precedentemente.

La dimostrazione pratica della seguente tesi è avvenuta, con l'aiuto dell'Ing. Paolo Proli, nel laboratorio di MaSTeR Lab dell'Università di Bologna, dove si è deciso di eseguire vari invecchiamenti termici a diverse temperature per constatare i livelli di deterioramento e influenza delle variazioni di temperatura sulla matrice del composito preso in analisi.

Gli effetti di tale studi sono stati sostenuti anche grazie alla guida del Professore Lorenzo Donati, e verranno dettagliatamente evidenziati nello specifico con spiegazioni in ambito teorico e dimostrazioni pratiche affiancate da schemi dimostrativi e supporto grafico.

Mentre nel capito 1 viene introdotta l'azienda Riba Composites, nel capitolo 2, invece, viene introdotto l'argomento vero e proprio di discussione della seguente tesi. Vengono descritti i materiali compositi nelle loro generalità e i loro componenti principali nei dettagli, così come le

proprietà dei materiali meccanici, i metodi di produzione, i tipi di matrice e fibra e le varie problematiche che possono insorgere dovute all'invecchiamento.

Nel capitolo 3 vengono esposti i vari step dalla produzione della lastra all'ottenimento dei provini, la misurazione, la determinazione della Tg e la descrizione delle attrezzature utilizzate.

Nel capitolo 4 vengono spiegate nel dettaglio le prove di verifica del peso, flessione a tre punti e taglio interlaminare, tutto correlato da grafici, tabelle esplicative e formule.

Il capitolo 5 è dedicato alle conclusioni. Verrà esposto il risultato finale delle varie prove di invecchiamento e il modo in cui la percentuale di transizione vetrosa scelta influisce sul processo stesso, in funzione della temperatura.

CAPITOLO 1

➤ ***L'azienda "Riba Composites"***

Riba Composites di Faenza è un'azienda italiana leader nella creazione di parti strutturali e nel settore della produzione di prototipi e componentistica in materiali compositi avanzati.

I compositi avanzati soggetti a tale lavorazione sono diversi e tra di loro si possono citare la fibra di carbonio, il vetro, e l'aramidica.

Alte prestazioni di tecnica, peso e qualità hanno permesso di sviluppare un risultato tecnologico che si caratterizza specificatamente nella semplificazione del processo di progettazione. Le forme prendono una conformazione flessibile, dove la rigidità e leggerezza dei componenti si fonde, riducendo la quantità delle parti di lavorazione e stabilendo un'ottima resistenza e stabilità dei materiali, come carichi, temperatura, corrosione, fatica e impatti.

1.1 Settori di utilizzo dei compositi avanzati

Nata nel 1988, Riba Composites ha fondato le prime solide basi del suo processo lavorativo in ambito automobilistico. La tecnologia dei materiali compositi avanzati è andata man mano sviluppandosi fino a raggiungere una vasta gamma di applicazione.

I settori nei quali Riba Composites svolge la propria funzione di progettazione, prototipazione e produzione di tali compositi avanzati variano in diversi campi e possono essere sintetizzati nei seguenti:

- Automobilistico:
 - Supercars e automobilistico di lusso
 - Automobilistico da competizione
- Aeronautico
- Militare
- Spaziale
- Industriale:
 - Industria generica

- Energia
- Energia nucleare
- Automazione industriale
- Motociclistico e ciclistico
- Arredamento generico e design
- Applicazioni speciali

Come Riba Composites ribadisce più volte, “Pensare composito” è diventato al giorno d’oggi un’alternativa concreta di ampio sviluppo nei diversi settori industriali.

CAPITOLO 2

➤ *I materiali compositi*

I materiali compositi sono materiali risultanti dalla costituzione di due o più componenti differenti. Ogni materiale, a sua volta, espone proprietà anch'esse differenti. L'unione di questi due materiali crea proprietà chimico-fisiche non precedentemente presenti nei singoli componenti.

Il composito è formato da fibre e una matrice.

La fibra fornisce le caratteristiche meccaniche (resistenza), mentre la matrice determina le caratteristiche di applicazione (peso, temperatura, forma).

La matrice ha la funzione di mantenere l'orientamento delle fibre e di trasferire i carichi. Inoltre, protegge le fibre dai danni ambientali.

Le fibre hanno la proprietà di sopportare il carico. Non risentono delle elevate temperature, dato che vengono prodotte con processi che arrivano fino a 3000°C.

2.1. *Matrice*

La matrice utilizzata in questa tesi è un materiale polimerico, epossidico, termoindurente. Nella seguente tabella 1 sono riportate le varie resine con le relative proprietà.

Tipo di resina	Poliestere	Vinilestere	Fenolica	Epossidica
Quantità di catalizzatore %	0,5 ÷ 2,5	0,5 ÷ 2,5	2,0 ÷ 8,0	10 ÷ 100
Temperatura di processo (°C)	20 ÷ 80	20 ÷ 80	20 ÷ 100	20 ÷ 150
Tempo di ciclo	4 ÷ 20 min	4 ÷ 20 min	10 min	1 ÷ 16 ore

Tabella 1: Proprietà resine.

I materiali termoindurenti sono materiali che si presentano in stato liquido prima della polimerizzazione, processo in seguito al quale i suddetti materiali non possono più essere riportati allo stato iniziale e sono indicati con le iniziali TI.

Un aumento della temperatura, dopo la completa polimerizzazione, porta inizialmente a un rammollimento, e con un ulteriore aumento si arriva al degrado del materiale. Nella figura 1 la resina termoindurente è la evidenziata con la lettera C e si denota il comportamento sopra descritto.

Non sono materiali bio-degradabili; solo le resine oleose (di soia o ricino) lo sono.

Per generare i materiali termoindurenti viene utilizzato un catalizzatore al fine di iniziare la procedura di polimerizzazione. Una volta formata la resina, il processo di formazione è irreversibile. I polimeri che sono stati sottoposti al trattamento termico, risultano insolubili e infusibili.

Durante la polimerizzazione si formano delle macromolecole ramificate con reticolazione covalenti inter ed intra molecolari. Di conseguenza si ha come un'unica e gigantesca molecola.

La suddetta molecola, durante il processo, continua ad arricchirsi di più terminali reattivi. Quindi si ha una velocità di accrescimento sempre maggiore all'aumentare del grado di polimerizzazione. Allo stesso tempo, si ha un aumento della viscosità come in figura 1.

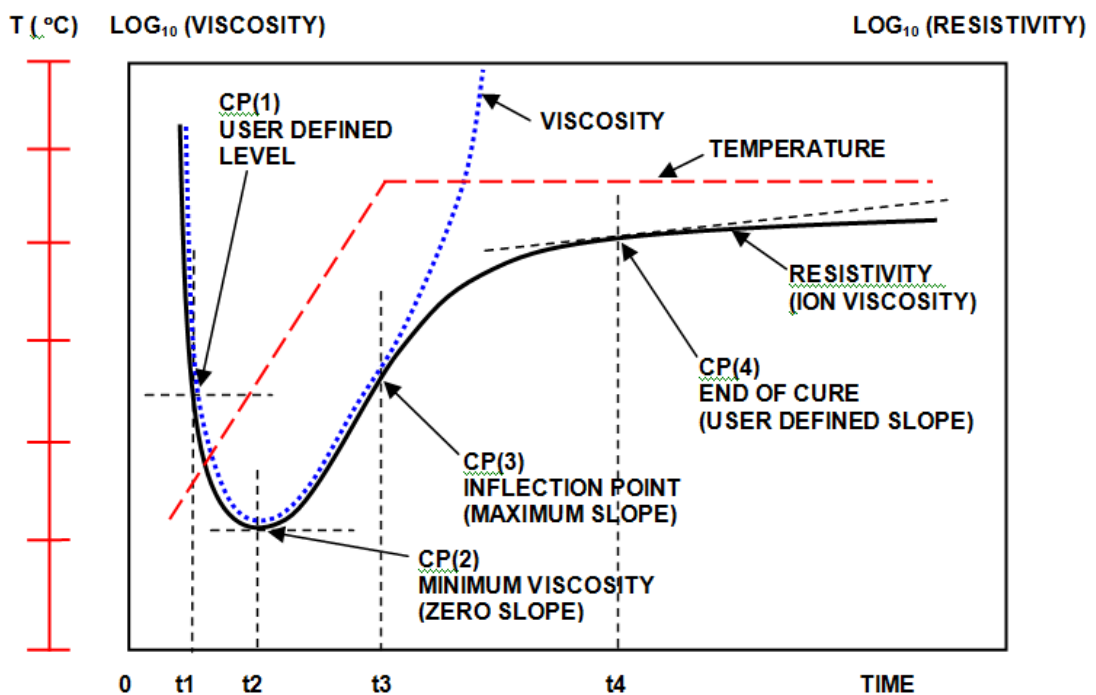


Figura 1: andamento della viscosità in funzione della temperatura e tempo

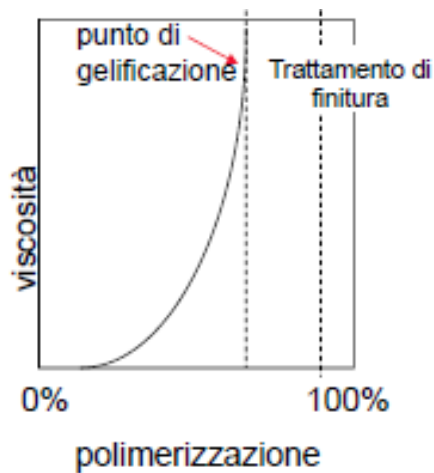


Figura 2: Andamento fase Gel in funzione della % di polimerizzazione

Dal grafico e dalla figura 2, si può notare il punto di gelificazione, il quale si suddivide in due fasi.

1) Fase gel.

Il materiale in questa fase è insolubile e infusibile.

2) Fase sol.

In questa fase il materiale è ancora solubile. E' utile sottolineare che all'aumentare della polimerizzazione, la fase sol diminuisce.

Nella realtà, il 100% di polimerizzazione non è raggiungibile perché i tempi del processo stesso sarebbero alquanto lunghi. Di conseguenza, le caratteristiche meccaniche sono riferite ai seguenti range di polimerizzazione:

- 30-40% basse caratteristiche
- 50-70% alte caratteristiche

La quantità di catalizzatore va ad influenzare il tempo nel quale varia la viscosità.

Dalla figura 2 si evince un inizio che presenta una bassa viscosità, e poi un aumento repentino dovuto all'aumento del catalizzatore. Dopodiché, vi è un trattamento di post-curing per completare il processo di termo-indurimento.

Il trattamento di post-curing è utilizzato per adottare il 100% di polimerizzazione, in quanto solo con il catalizzatore si arriva ad una polimerizzazione massima del 70-80%.

Il materiale fornito dall'azienda Riba Composites di Faenza, ha avuto un ciclo di post-curing proprio per ottenere una completa polimerizzazione della resina e quindi aumentare le caratteristiche. Le eccellenti caratteristiche meccaniche delle resine epossidiche comportano un costo maggiore.

Le caratteristiche dei termoindurenti sono:

- Bassa viscosità iniziale
- Materiali iniziali stabili nel tempo
- Prepolimeri
- Possibilità di controllare la conversione fermando la fase intermedia
- Reattività controllabile e regolabile
- Miscelazione con molti carichi e additivi

Le resine epossidiche richiedono elevate temperature per la polimerizzazione, tra gli 80 e 180°C.

2.2. Fibra

Nelle fibre viene utilizzato l'effetto grandezza, cioè al diminuire delle dimensioni, le proprietà meccaniche aumentano, dato che i difetti si riducono. Di conseguenza, fibre di dimensioni ridotte presentano una resistenza meccanica elevata, modulo elastico elevato, peso specifico ridotto e comportamento elastico quasi lineare fino alla rottura.

Le fibre sono composte da uno o più filamenti riuniti in maniera ordinata. Passando da un filamento ad una fibra, le proprietà meccaniche diminuiscono per l'effetto grandezza. Inoltre sono estremamente fragili e possono essere continue o corte.

Le fibre continue hanno una migliore trasmissione delle sollecitazioni, ma anche più difetti. Il difetto delle fibre continue è dato dalla difficoltà di mantenerle allineate. Quelle corte, al contrario, hanno meno difetti interni, quindi proprietà meccaniche maggiori, ma la resistenza globale è inferiore, dato che la trasmissione delle sollecitazioni avviene tramite la matrice, che ha delle proprietà minori.



Figura 3: Disposizione delle fibre all'interno della matrice

Le fibre si possono suddividere in:

- Staples, ovvero fibre tagliate con spessore da pochi micron a 50 mm.
- Mat (feltro), una specie di tessuto, ma con fibre disposte in modo casuale. Esso si suddivide in Chopped strand mat, cioè fibre corte lunghe 2,5 – 5 cm con disposizione casuale, e Continuous strand mat, ossia fibre lunghe disposte in modo casuale collegate con spirali.
- Tessuto o Fabrics, inteso come la tessitura di più fili ortogonali fra loro.

L'ordito si sviluppa lungo la lunghezza del rotolo, mentre la trama perpendicolarmente, figura 4.

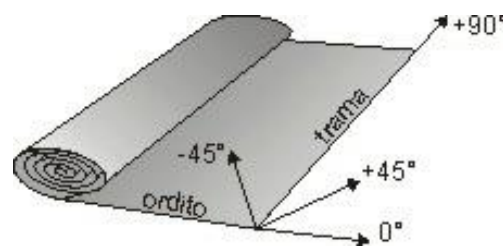


Figura 4: Disposizione di trama e ordito.

Per lo sviluppo di questa tesi è stato utilizzato un tessuto di tipo bilanciato plain weave con i filamenti di trama che passano una volta sopra e una volta sotto a quelli di ordito, come in figura 5.



Figura 5: Parte di prepregs usato, si nota il tessuto di tipo plain.

2.3. Prepregs

I prepregs sono tessuti preimpregnati di resina termoindurente già catalizzata, il tessuto dopo essere stato preimpregnato viene posto a -20°C per rallentarne la polimerizzazione per una durata massima di 12 mesi, oltre questo tempo limite il materiale è da considerarsi scaduto.

I prepregs sono utilizzati per parti molto sagomate e in applicazioni in cui la flessibilità è fondamentale. Inoltre variano in funzione della resina utilizzata. Molto comuni sono quelli con resina epossidica e termoindurenti.

Con i prepregs si ottiene un'ottima costanza di spessori. Di seguito viene riportata una tabella 2 di classificazione dei prepregs e una tabella Y di proprietà sui prepregs.

Prepreg	HX40	HX42	HX44	HX50	TC40	3M™ FTP140 TC24-Si	3M™FTP TC44-Si
Onset Tg (DMTA) following post-cure	203°C (397°F)	200°C (392°F)	188°C (370°F)	190°C (374°F)	213°C (415°F)	203°C (397°F)	213°C (415°F)
Minimum cure temp	50°C (122°F)	50°C (122°F)	50°C (122°F)	40°C (104°F)	182°C (360°F)	60°C (140°F)	182°C (360°F)
Outlife	10 days	5 days	4 days	60 hours	30 days	5 days	30 days
End use temperature	190°C (374°F)	190°C (374°F)	177°C (350°F)	180°C (356°F)	199°C (390°F)	198°C (390°F)	204°C (400°F)
Benefits	Long outlife with high end use temp	Excellent surface finish at high temps	General tooling applications	Fast curing, excellent surface finish	Ultra high use temp BMI	Low temp cure High use temp Nano-silica technology	High use temp Nano-silica technology

Tabella 2: Proprietà di vari prepregs

Il materiale preimpregnato si ottiene con i seguenti metodi di produzione:

- Impregnazione con l'utilizzo di solventi: in questo metodo le fibre passano attraverso una soluzione con un solvente. Lo step successivo avviene con il passaggio delle fibre attraverso una sequenza di rulli che regolano la quantità del solvente applicata. La rimozione del solvente è attuata tramite un essiccatore.

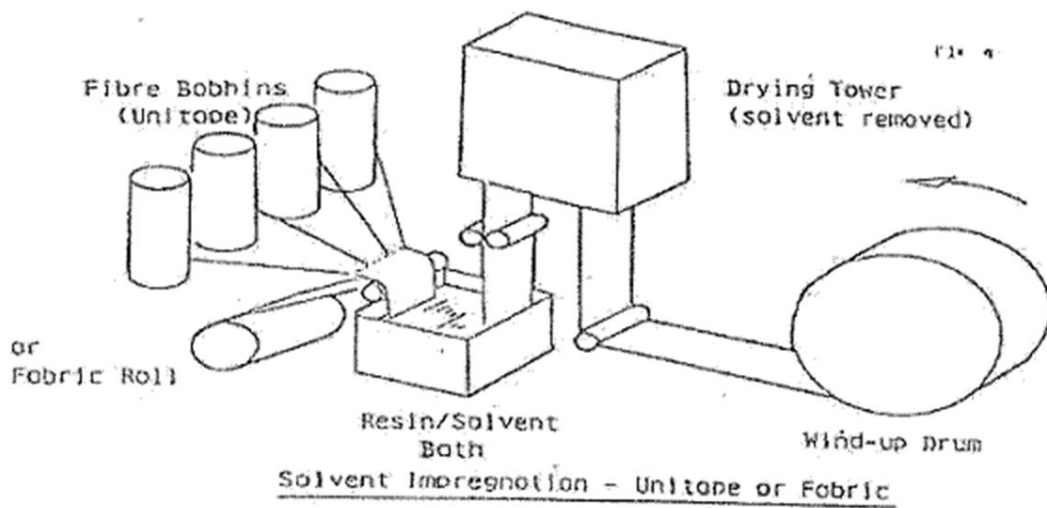


Figura 6: Impregnazione con solvente

- Impregnazione a caldo: l'applicazione della resina sulle fibre avviene tramite rulli riscaldati.

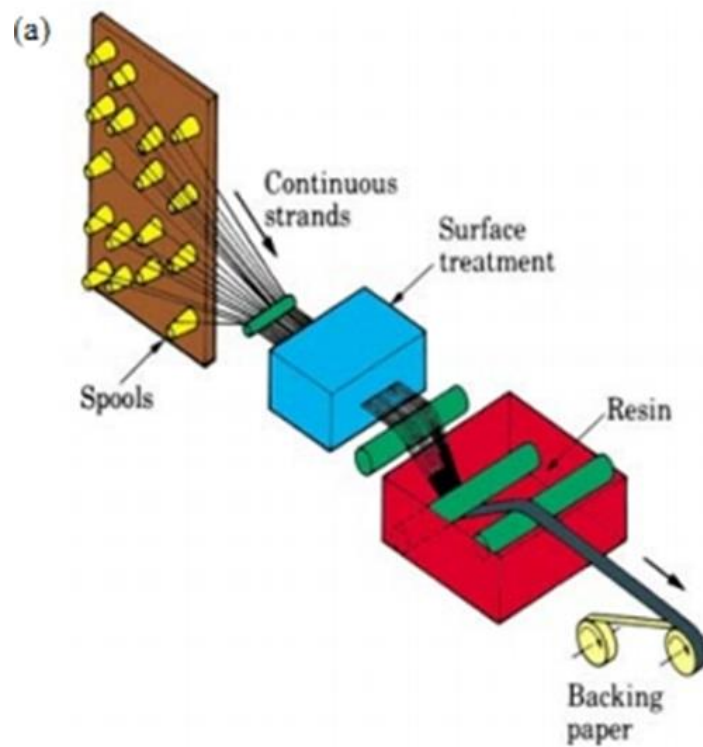


Figura 7: Impregnazione a caldo

2.4. Classificazione delle fibre e metodi di produzione

Esistono diversi tipi di fibre, fra le quali le fibre di vetro, kevlar, di boro, di allumina e carburo di silicio. In dettaglio verranno trattate le fibre di carbonio ad alto modulo e resistenza. Di seguito è inserita la tabella 3 con le proprietà meccaniche delle fibre maggiormente utilizzate.

Tabella 17.6 Proprietà di alcuni materiali compositi a matrice metallica rinforzati con fibre continue ed allineate

Fibra	Matrice	Contenuto di fibra (%Vol)	Densità (Mg/m ³)	Modulo a trazione longitudinale (GPa)	Carico di rottura longitudinale (MPa)
Carbonio	Al 6061	41	2.44	320	620
Boro	Al 6061	48	—	207	1515
SiC	Al 6061	50	2.93	230	1480
Allumina	Al 380.0	24	—	120	340
Carbonio	Mg AZ31	38	1.83	300	510
Borsic	Ti	45	3.68	220	1270

Fonte: Ripreso da J.W. Weeton, D.M. Peters e K.L. Thomas *Engineer's guide to composite materials*, ASM International Materials Park, OH, 1987.

Tabella 3: Classificazione delle proprietà meccaniche in funzione della fibra usata

Le fibre di carbonio vengono generate tramite pirolisi, in atmosfera inerte, con l'utilizzo del precursore. I precursori sono i seguenti:

- Rayon: è una fibra trasparente ottenuta dalla cellulosa.
- Poliacrilonitrile (PAN): è un polimero generato dalla polimerizzazione dell'acrinolitrile.
- Catrame o pece: è il bitume.

Nella seguente tabella 4 vengono riportate le fibre di uso più comune in correlazione con i precursori

Fiber	Density [g/cm ³ (Pci)]	Axial Modulus [GPa (Msi)]	Tensile Strength [MPa (ksi)]	Axial Coefficient of Thermal Expansion [ppm/K (ppm/°F)]	Axial Thermal Conductivity (W/m·K)
E-glass	2.6 (0.094)	70 (10)	2000 (300)	5 (2.8)	0.9
HS glass	2.5 (0.090)	83 (12)	4200 (650)	4.1 (2.3)	0.9
Aramid	1.4 (0.052)	124 (18)	3200 (500)	-5.2 (-2.9)	0.04
Boron	2.6 (0.094)	400 (58)	3600 (520)	4.5 (2.5)	—
SM carbon (PAN)	1.7 (0.061)	235 (34)	3200 (500)	-0.5 (-0.3)	9
UHM carbon (PAN)	1.9 (0.069)	590 (86)	3800 (550)	-1 (-0.6)	18
UHS carbon (PAN)	1.8 (0.065)	290 (42)	7000 (1000)	-1.5 (-0.8)	160
UHM carbon (pitch)	2.2 (0.079)	895 (130)	2200 (320)	-1.6 (-0.9)	640
UHK carbon (pitch)	2.2 (0.079)	830 (120)	2200 (320)	-1.6 (-0.9)	1100
SiC monofilament	3.0 (0.11)	400 (58)	3600 (520)	4.9 (2.7)	—
SiC multifilament	3.0 (0.11)	400 (58)	3100 (450)	—	—
Si-C-O	2.6 (0.094)	190 (28)	2900 (430)	3.9 (2.2)	1.4
Si-Ti-C-O	2.4 (0.087)	190 (27)	3300 (470)	3.1 (1.7)	—
Aluminum oxide	3.9 (0.14)	370 (54)	1900 (280)	7.9 (4.4)	—
High-density polyethylene	0.97 (0.035)	172 (25)	3000 (440)	—	—

Tabella 4: Proprietà delle fibre maggiormente utilizzare in correlazione con i precursori

La pirolisi è un processo di decomposizione termochimica di materiali organici ottenuto mediante l'applicazione di calore in un ambiente completamente privo di ossigeno. In queste condizioni, il materiale subisce una scissione di legami dinamici originari passando dunque alla formazione di molecole più semplici.

Il processo di produzione è formato dalle seguenti fasi:

- 1) Spinning (filatura): il percussore viene trasformato in un filamento attraverso una filiera. In questa fase il percussore è in stato liquido. Il rayon, essendo in forma fibrosa, salta l'operazione di spinning.
- 2) Ossidazione o stabilizzazione: viene ottenuta tramite la pirolisi ad una temperatura di 220/300°C. Vengono liberati i prodotti volatili quali CO₂, H₂O, HNC. Il filamento ottenuto è infusibile e resiste ai successivi cicli senza subire variazioni di forma.
- 3) Carbonizzazione: il filamento viene riscaldato in atmosfera inerte da 300°C fino a circa 1500°C. Vengono liberati altri composti volatili: CO, CH₄, NH₃, N₂. La sezione trasversale si restringe e vengono creati cristalli esagonali di grafite.
- 4) Grafitizzazione: viene applicato un ulteriore riscaldamento fino a 3000°C, sempre in atmosfera inerte.
- 5) Stretching: per il rayon e il PAN si effettua una trazione delle fibre tale che i cristalli di graffite aumentino la compattazione.

Le ultime due fasi vengono effettuate per migliorare le proprietà meccaniche e a non tutte le fibre vengono applicate, bensì per alcune ci si ferma alla carbonizzazione.

In funzione delle proprietà meccaniche, le fibre vengono suddivise nelle seguenti tipologie:

- HTS: High Tensile strenght, carbonio ad alta resistenza.
- HM: High Modulus, carbonio ad alto modulo.
- IM: Intermediate Modulus, simili alle HTS ma con un modulo elastico di circa 300 GPa

Nella tabella 5 vengono riportate alcune caratteristiche meccaniche delle varie fibre in confronto all'acciaio.

		Carbonio ad alta resistenza	Carbonio ad alto modulo	Carbonio ad altissimo modulo	Acciaio FeB 44K
Densità	Kg/m ³	1800	1850	2100	7850
Modulo elastico	GPa	230	400	700	210
Resistenza meccanica a trazione	MPa	5000	3000	1500	540
Deformazione a rottura	%	2.0	0.9	0.3	20
Resistenza specifica	MPa/Kg	2.78	1.62	0.71	0.07

Tabella 5: Caratteristiche meccaniche delle fibre di carbonio

2.5. *Compositi, metodi di produzione, sacco a vuoto con ciclo in autoclave*

Esistono varie tecnologie per la realizzazione dei materiali compositi, fra i quali stampo aperto, stampo chiuso, RTM, VARTM e VARTM-SCRMPT. Il processo applicato nella realizzazione del composito utilizzato in questa tesi è il processo del sacco a vuoto in autoclave.

Questo processo è il più impiegato per la creazione dei compositi, dato che si ottengono una migliore compattazione delle fibre ed elevati rapporti fibra-resina fino al 80%. Si tratta di un processo molto laborioso ma molto standardizzato e ripetibile.

Viene effettuato con una pressione maggiore che va a garantire una minore presenza di vuoti, porosità e un aumento del rapporto fibra-matrice. E' utilizzato per la produzione di componenti alto-prestazionali con un quantitativo non eccessivo.

In autoclave vengono usati tessuti pre-impregnati e resine di tipo epossidico. La preparazione del sacco a vuoto avviene nella *clean room* e una volta completato il sacco sarà trasportato nell'autoclave, figura 8, per il successivo svolgimento del ciclo.



Figura 8: Autoclave della Riba Composites

I parametri di processo sono i seguenti:

- Vuoto circa -0,5 bar
- Pressione fra 5-15 bar
- Temperatura in funzione della Tg della resina fra 80-180 °C

Nella figura 9 successiva viene riportato un ciclo in autoclave.

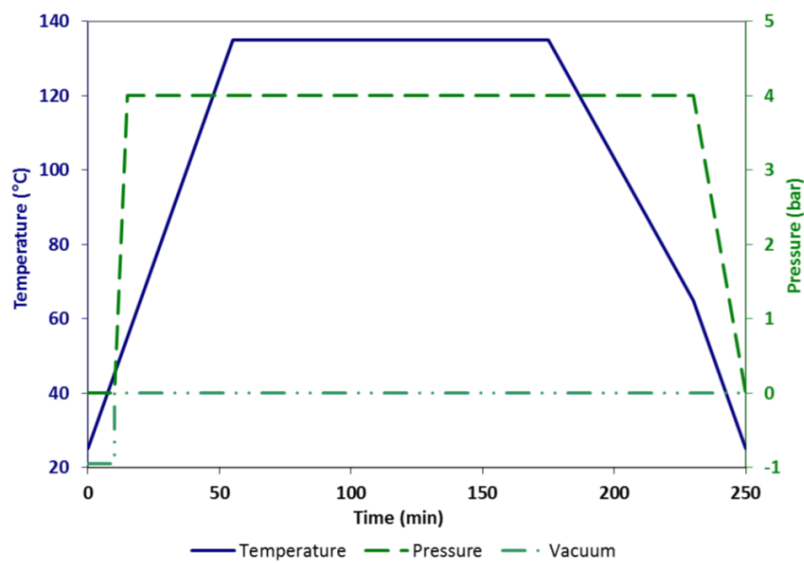


Figura 9: Rappresentazione ciclo in autoclave

Di seguito viene riportato il ciclo di cura che subisce il composito all'interno dell'autoclave.

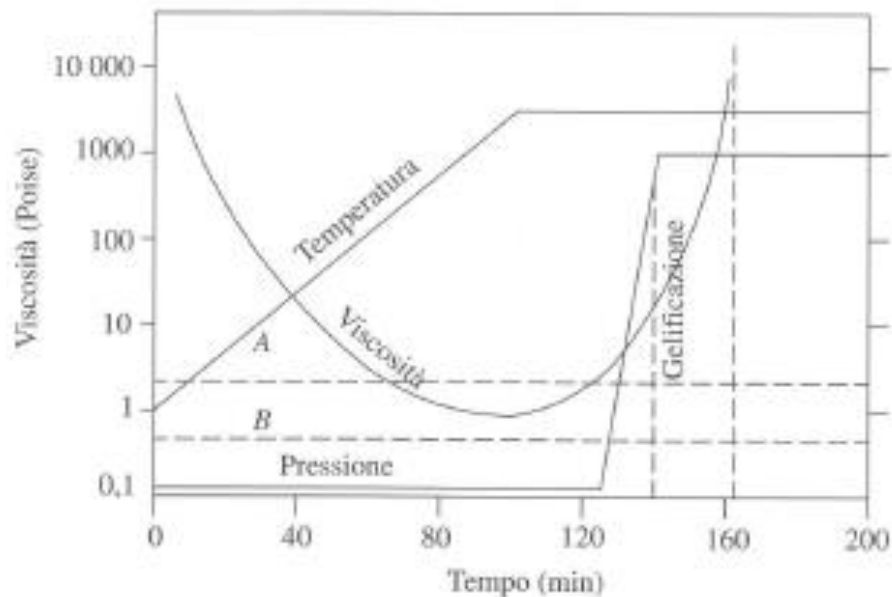


Figura 10: Diagramma che rappresenta la viscosità in funzione della temperatura e tempo

Il ciclo di cura può essere suddiviso nelle seguenti fasi:

- 1) La polimerizzazione, a raggiungimento di una temperatura tra gli 80 e i 100°C, inizia ad accelerare e la resina ritorna viscosa. Tutti i gas in questa fase devono essere stati estratti dal manufatto.
- 2) Mantenendo la temperatura di cura tra i 100 e i 150°C, la resina gelifica. Come si nota dal grafico, si ha un aumento esponenziale della viscosità.
- 3) Se è presente un eccesso di resina nel composito, è consigliabile applicare la pressione prima di raggiungere la temperatura di mantenimento, altrimenti la resina gelificherà e non potrà fuoriuscire.
- 4) Se è presente una ridotta percentuale di resina, è consigliabile applicare la pressione massima contemporaneamente o dopo il raggiungimento della temperatura di mantenimento, in modo tale da non fare fuoriuscire la resina.

Si rimanda al Capitolo 3 per una dettagliata descrizione delle varie operazioni necessarie per produrre il sacco a vuoto.

2.6. Processo di degradazione delle caratteristiche meccaniche e fisiche dei CFRP

I CFRP sono compositi rinforzati in fibra, chiamati con il termine inglese Carbon Fiber Reinforced Polymers, ovvero compositi di carbonio fibro-rinforzati a matrice polimerica. Questi compositi sono composti da fibre ad alta resistenza e modulo elastico.

Nei materiali compositi le proprietà meccaniche vengono date dalle fibre: le fibre sopportano i carichi mentre le matrici trasmettono i carichi alle fibre, proteggendole da eventuali danni di tipo ambientale e mantenendole nella corretta direzione.

Di seguito viene riportato il grafico, figura 11, che schematizza le proprietà della fibra e della matrice in linea generale.

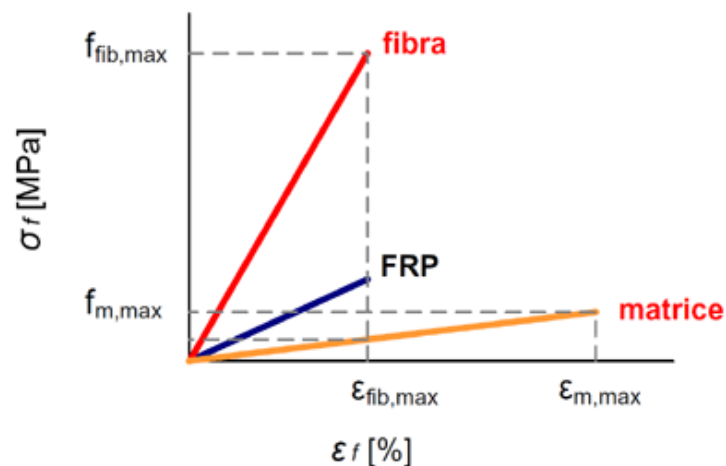


Figura 11: Grafico che rappresenta le proprietà meccaniche di fibra, matrice e CFRP

Il materiale composito è essenzialmente anisotropo, quindi non dispone delle caratteristiche e proprietà uguali in tutte le direzioni, come succede invece per i metalli, ma dipendono dalla direzione in cui vengono testati. Nel nostro caso si è utilizzato un laminato con disposizione dei fogli di prepregs 0/90°, denominato plain width, in modo tale da avere delle proprietà all'incirca costanti da tutte le direzioni.

Sono presenti vari tipi di deterioramento ambientale:

- Esposizione ai raggi UV
- Esposizione ad agenti chimici H_2O , O_2 , H_2
- Alte temperature

Con un invecchiamento di tipo isotermico (cioè a temperatura costante a lungo periodo), si vanno a degradare le proprietà della matrice. Di conseguenza, tramite le prove caratteristiche soprattutto di taglio interlaminare, si va a verificare il miglioramento o peggioramento della matrice. All'aumentare della temperatura si dovrebbe notare un aumento del decadimento delle proprietà della matrice. Avvicinandosi alla T_g , il decadimento dovrebbe essere sempre più repentino.

Applicando un invecchiamento con un ciclo di fatica termica, cioè un ciclo ad alta temperatura per 12h e a -20°C per altre 12h, si va a sottoporre due materiali con caratteristiche diverse ad una dilatazione termica e contrazione. Questi materiali hanno dei coefficienti di dilatazione termica diversi.

Questo tipo di invecchiamento va a creare all'interno della matrice delle microfrotture e anche del debonding, che avviene quando la matrice, a causa delle continue dilatazioni e contrazioni, smette di aderire in maniera ottimale alla fibra, come da figura 12.

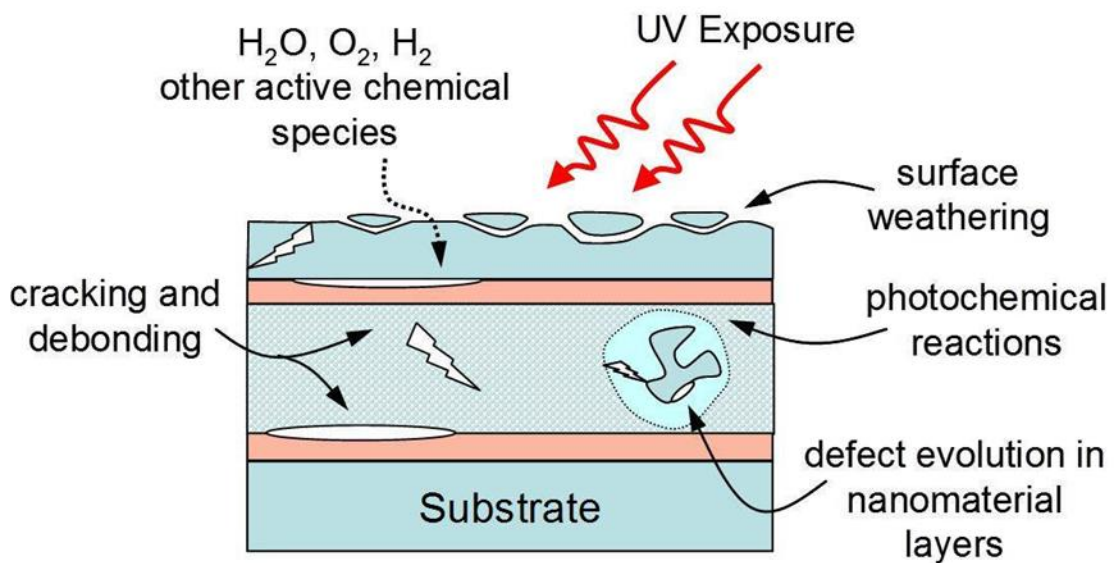


Figura 12: Rappresentazione tipi di invecchiamento ambientale

Vi possono essere anche difetti interni come cricche dovute al ciclo di produzione o porosità che vanno a velocizzare il decadimento delle proprietà meccaniche.

Fondamentale è anche la perdita di peso dovuta ad entrambi i tipi di invecchiamento, che può essere legata al decadimento del modulo di elasticità e delle proprietà meccaniche.

Nell'invecchiamento si possono determinare le seguenti fasi:

- 1) Ageing: gli effetti non sono visibili.
- 2) Creep: fase che trascorre prima che la deformazione aumenti nel tempo, a sforzo costante.
- 3) Rilassamento: presente prima che lo sforzo diminuisca per avere una deformazione costante.

In condizioni critiche, come elevatissime temperature, i compositi con matrice polimerica possono perdere fino all'80% delle proprietà meccaniche.

CAPITOLO 3

3. Prove sperimentali

3.1. Produzione della lastra composito CFRP e caratteristiche preliminari

La lastra di composito CFRP è stata ottenuta grazie alla sovrapposizione di 4 strati di prepregs dello spessore di 0,9 mm posizionati a 0/90° in modo da potere bilanciare le caratteristiche meccaniche e di forma quadrata. La fibra utilizzata è classificata CC631R 450 – T700 mentre la resina epossidica è SAATI ER450.

La forma quadrata è stata scelta per evitare:

- Distorsioni durante il ciclo di cura
- Ottenere un bilanciamento migliore

Nella preparazione della produzione della lastra di composito CFRP, per il ciclo in autoclave, sono state utilizzate due piastre di vetro per ottenere una superficie del composito a specchio.

Di seguito si riportano le operazioni utili volte all'utilizzo del sacco a vuoto:

- 1) Posizionamento della prima lastra di vetro sul banco di lavoro
- 2) Utilizzo del distaccante ad acqua (release film) fra piastra inferiore e primo strato di prepregs per fare in modo che il composito non resti attaccato alla piastra di vetro
- 3) Posizionamento del primo strato di prepregs a 0°
- 4) Posizionamento del secondo strato di prepregs a 90° atto al bilanciamento delle caratteristiche meccaniche
- 5) Posizionamento del terzo strato di prepregs a 0°
- 6) Posizionamento del secondo strato di prepregs a 90° atto al bilanciamento delle caratteristiche meccaniche
- 7) Utilizzo del distaccante ad acqua (release film) fra piastra superiore e ultimo strato di prepregs per fare in modo che il composito non resti attaccato alla piastra di vetro
- 8) Applicazione del Bleeder, utile per l'attuazione della sua funzione di assorbimento della resina residua.
- 9) Applicazione di una pellicola non perforata o porosa in modo da rendere possibile la fuoriuscita dell'aria in eccesso e altre sostanze volatili

10) Aggiunta del Breather, termine inglese che indica la traspirazione del tessuto per potere creare in tutta la zona interessata una pressione costante, azione volta allo scopo di fare uscire l'aria in eccesso e le altre sostanze volatili

11) Posizionamento della seconda lastra di vetro sul banco di lavoro

12) Vacuum Bag, pellicola più esterna di poliamide o di elastomero riutilizzata con la funzione di creare un vuoto al suo interno grazie all'utilizzo di una valvola posta centralmente su di essa. La valvola viene collegata con una pompa per creare il suddetto vuoto ad una pressione di circa - 0.9 bar. Il sacco a vuoto è collegato allo stampo mediante un nastro sigillante resistente alle alte temperature.

Le operazioni appena descritte vengono schematizzare in figura 13.

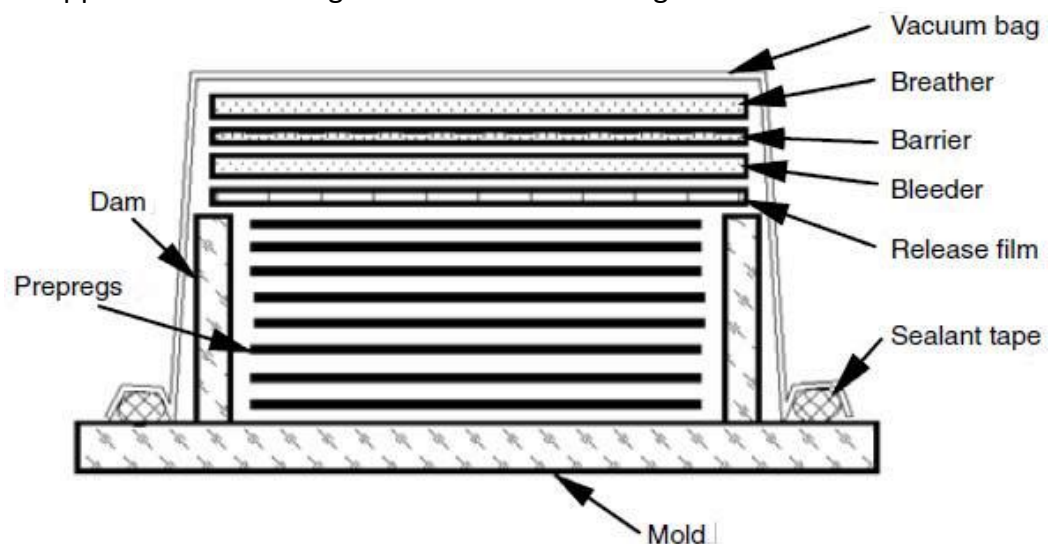


Figura 13: Sacco a vuoto

La lastra è stata prodotta attraverso un ciclo in autoclave con le caratteristiche prese dalla scheda tecnica del materiale stesso:

- $T = 135^{\circ}\text{C}$
- $t = 2 \text{ h}$
- $P = 4 \text{ bar}$
- $P_{\text{vuoto}} = -0,9 \text{ bar}$

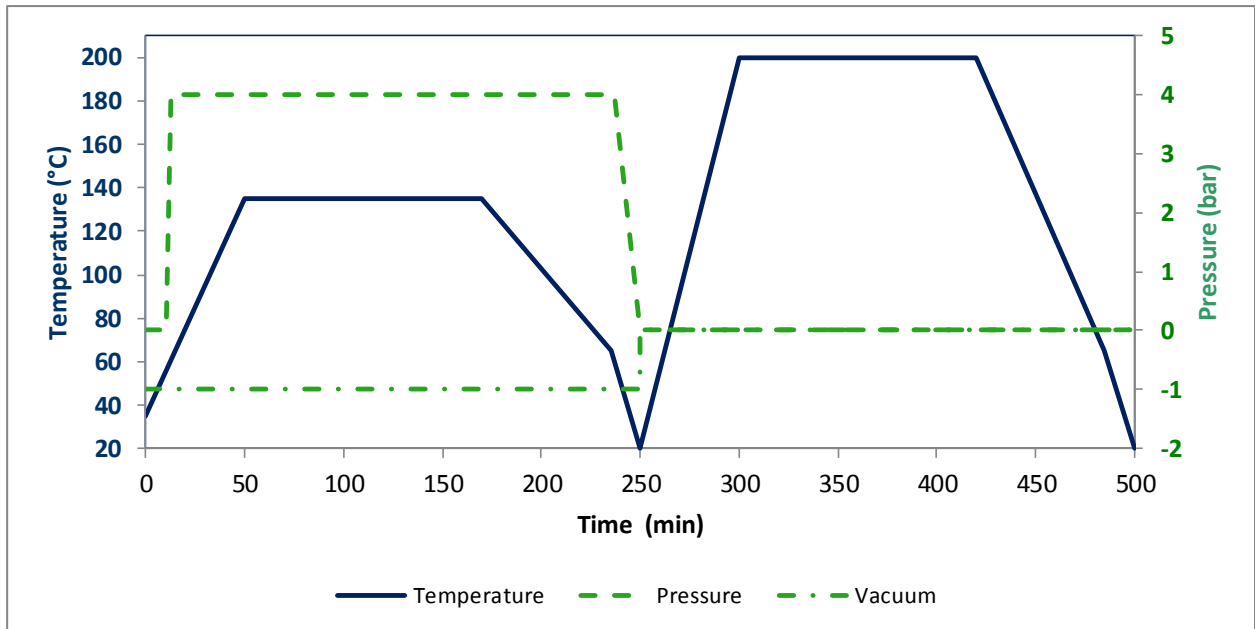


Figura 14: Ciclo di cura in autoclave del sacco a vuoto.

Successivamente la lastra è stata sottoposta ad un trattamento di post-cura per ottenere, teoricamente, la completa polimerizzazione della resina epossidica, con i seguenti parametri:

- $T = 200^{\circ}\text{C}$
- $t = 2\text{h}$

Il ciclo di post cura è avvenuto con l'utilizzo della lastra senza sacco a vuoto.

Nella figura 15 è rappresentato il sacco a vuoto dopo la cura in autoclave.



Figura15: Sacco a vuoto post cura in autoclave.

Dopo il ciclo in autoclave si è ottenuta la seguente lastra a specchio:

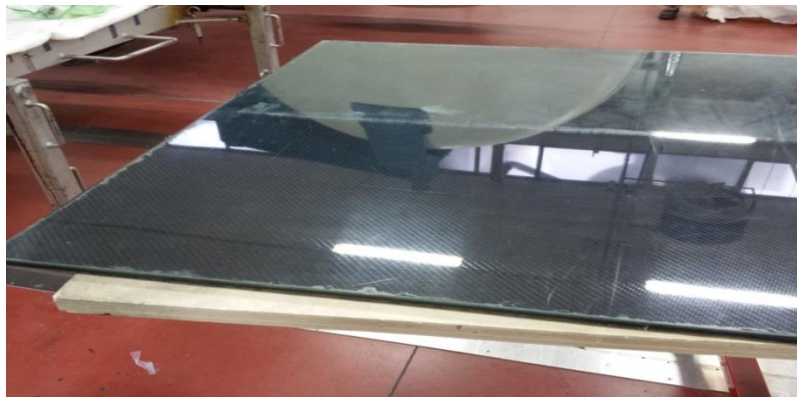


Figura 16: Lastra di composito con superficie a specchio dopo il ciclo in autoclave, tolta dal sacco a vuoto

3.1.1. Taglio della lastra e marcatura provini

Per il taglio è stata usata una sega circolare come in figura 17:



Figura17: Sega utilizzata per il taglio della lastra

Una volta ottenuta la lastra di dimensioni 1100x1000 sono state eseguite le seguenti operazioni:

- 1) Suddivisione della lastra lungo la mezziera del lato 1000 mm denominandole A e B, eseguita da Riba Composites.
- 2) Taglio del bordo della lastra con una larghezza di 20 mm.
- 3) Taglio della lastra A partendo dal bordo numerato con numero 0 e proseguendo sino al numero 51.
- 4) Taglio della lastra B partendo dal bordo numerato 52 e proseguendo sino al 103.
- 5) Taglio della striscia a partire dalla lastra numero 0 con $l = 123$ mm.

Viene riportato lo schema di taglio realizzato con Solid Edge, figura 17.

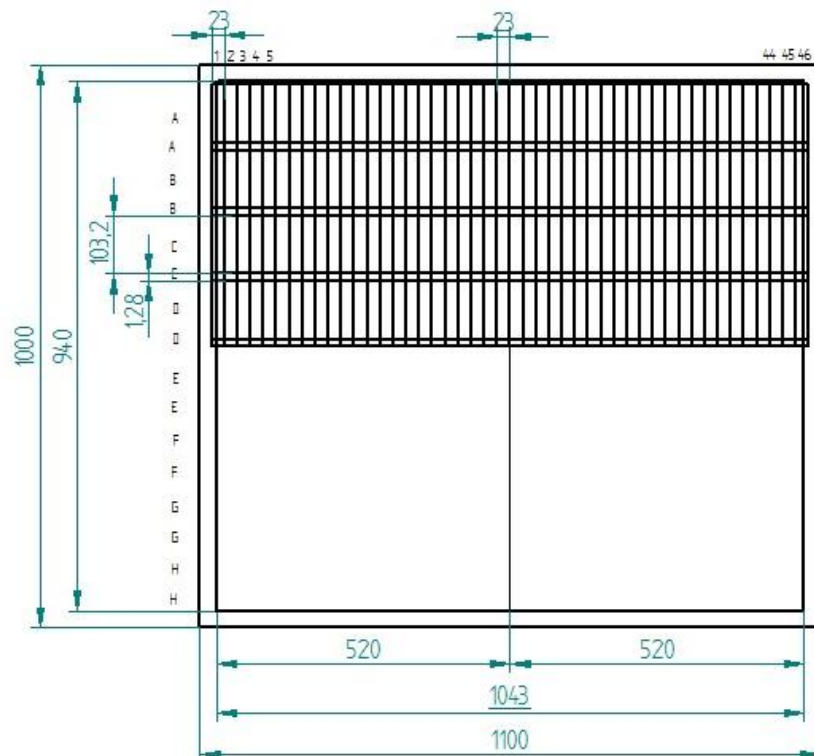


Figura 17: Schema di taglio realizzato tramite Solid Edge



Figura 18: Foto lastra suddivisa in due porzioni A e B (operazione 1)

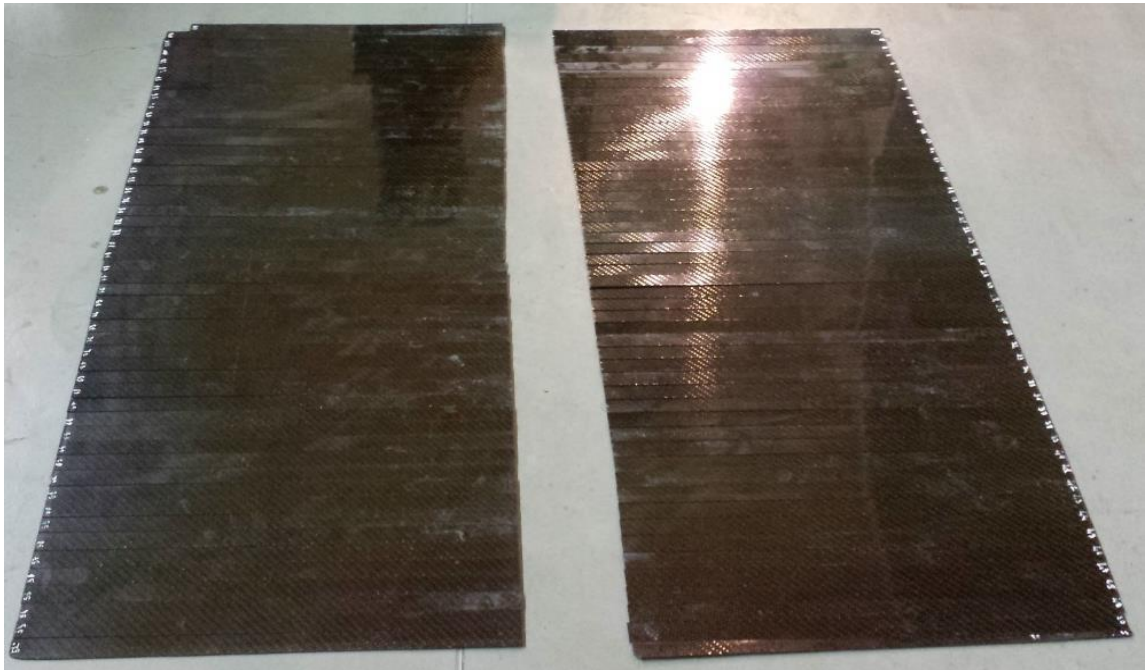


Figura 19: Strisce ottenute dopo il primo taglio (operazione 3 e 4)

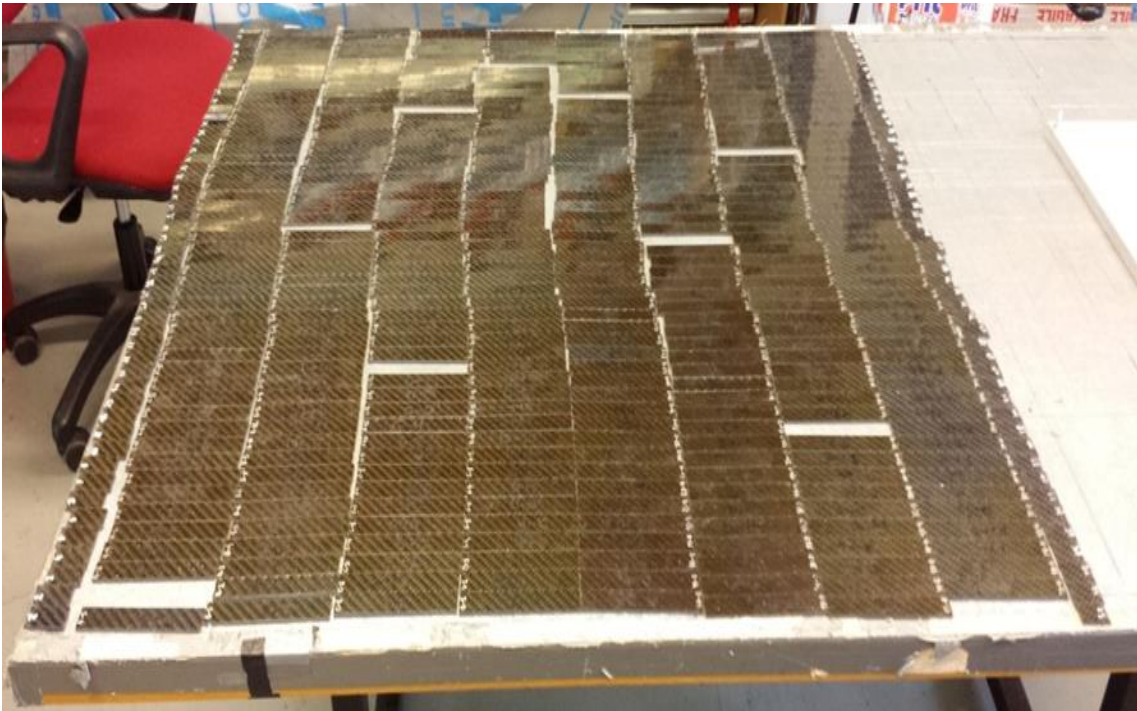


Figura 20: Provini ottenuti dall'operazione 5

Con questo procedimento si sono ottenuti circa 430 provini dei quali circa 300 sono stati utilizzati per il successivo processo di invecchiamento. Per ogni estrazione sono stati utilizzati un numero di provini pari a 5.

Questi provini sono composti a loro volta da due elementi al loro interno: una per la flessione di 100 mm e uno per il taglio di 20 mm. Sommando i mm di lunghezza di tali provini si ottiene 120 mm, ai quali sono aggiunti 3 mm di spessore della sega, per un totale di 123 mm.

Questa decisione è stata presa per semplificare le operazioni della pesatura, una prima dell'invecchiamento e una dopo, in modo da considerare per tale procedura un singolo provino e non due. Successivamente, dopo l'invecchiamento e la seconda pesatura, si procederà con un altro taglio con la sega circolare di figura 21 per ottenere un provino di flessione e uno di taglio interlaminare (fig. 22) partendo dal provino iniziale, come descritto precedentemente.



Figura 21: Sega circolare utilizzata per la separazione dei provini

Infine si sono ottenuti i seguenti provini

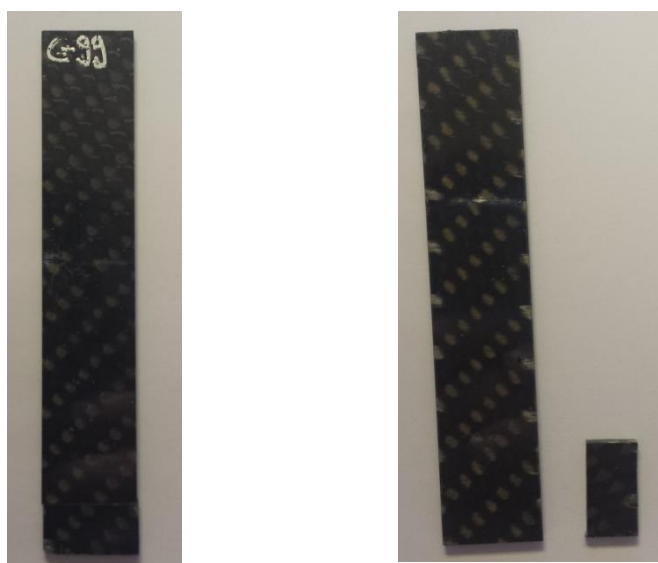


Figura 22: Provino intero e dopo l'operazione di taglio

Per ottenere un taglio regolare viene utilizzato come battuta un elemento ad L in alluminio, avvitato attorno alla parte superiore della morsa di afferraggio, come in figura 23.

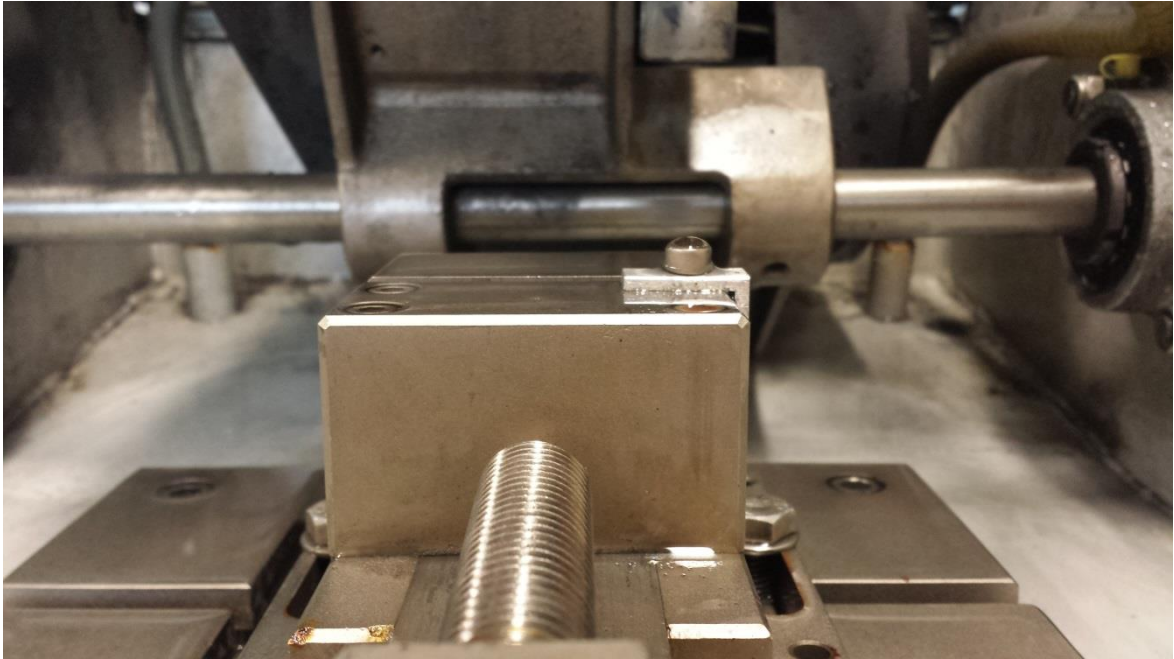


Figura 23: Particolare della morsa con dispositivo di battuta (colore argento chiaro) per il taglio dei provini.

3.2. Misurazione dei provini

La misurazione dei provini viene suddivisa tra misurazione per la prova di flessione e per la prova di taglio interlaminare. I provini vengono misurati, con l'utilizzo di un calibro, dopo il trattamento di invecchiamento e dopo la separazione dal provino iniziale. Si riporta a titolo esemplificativo una tabella di riassunto delle misure a 50% Tg, questa tabella è presente per ognuna delle prove effettuate.

PROVINI PROVA DI FLESSIONE

I provini devono avere le seguenti caratteristiche da normativa europea UNI EN ISO 14125:

3. profondità di 15 ± 0.5 mm;
4. spessore di 2 ± 0.2 mm.

50% Tg Flessione

Provino	Tempo Invecchiamento [h]	Largh. b (mm)	Spess. h (mm)
A-92	0	19,8	2,6
C-83	0	19,1	2,7
D-65	0	19,1	2,65
D-2	0	19,4	2,6
C-93	0	18,75	2,75
A-67	0	19	2,7
C-59	0	18,3	2,7
D-32	6	18,8	2,65
C-75	6	19,05	2,7
D-96	6	19,35	2,7
C-92	6	19,5	2,7
B-89	6	20,2	2,65
C-36	24	19,45	2,6
D-78	24	19	2,6
A-77	24	19,2	2,65
A-66	24	19,5	2,7
B-1	24	19,85	2,65
B-54	72	18,9	2,55
D-11	72	19,35	2,7
A-102	72	20,5	2,6
C-100	72	19,9	2,65
A-12	72	19,1	2,65
B-72	168	19,2	2,6
B-81	168	19,1	2,6
D-19	168	19,1	2,65
C-62	168	19,25	2,7
C-23	168	19,4	2,65
B-36	360	19,5	2,65
A-37	360	20,3	2,65
A-93	360	18,55	2,7
C-48	360	19,4	2,6
A-71	360	18,7	2,7
B-49	720	19,4	2,55
B-95	720	19,75	2,6
D-71	720	19	2,6
D-4	720	19,3	2,65
A-24	720	18,35	2,65
A-3	2160	17,4	2,6
D-84	2160	19,2	2,65
C-32	2160	18,7	2,65
C-7	2160	19,1	2,65
C-27	2160	19,1	2,65

	Largh. b (mm)	Spess. h (mm)
Media Rif.	19,1375	2,65
Media 50% Tg	19,212	2,648
Media 75% Tg	19,232	2,645
Media 100% Tg	19,293	2,670
Media 110 % Tg	19,150	2,634
Media 145% Tg	19,169	2,854

Tabella 6: Esempio di riepilogo per le misure caratteristiche per la prova di flessione

PROVINI PROVA DI TAGLIO INTERLAMINARE

I provini devono avere le seguenti caratteristiche da normativa europea ISO 14130:

5. profondità di 10 ± 0.2 mm;
6. spessore di 2 ± 0.2 mm.

50% Tg Taglio

Provino	Tempo Invecchiamento	Largh. b (mm)	Spess. h (mm)
A-92	0	10,4	2,7
D-48	0	10,4	2,6
C-83	0	10,3	2,6
D-65	0	10,25	2,6
D-2	0	10,4	2,6
C-93	0	10,3	2,6
A-67	0	10,1	2,6
C-59	0	10,3	2,7
C-75	6	10	2,6
D-32	6	10,05	2,7
C-92	6	10,15	2,7
B-89	6	10,2	2,6
D-96	6	10,2	2,7
A-77	24	10,1	2,6
A-66	24	10,2	2,7
D-78	24	9,8	2,75
C-36	24	10,2	2,7
B-1	24	10,35	2,65
C-100	72	10	2,7
A-102	72	10,1	2,5
B-54	72	10,1	2,6
A-12	72	9,7	2,7
D-11	72	10,35	2,7

D-19	168	9,85	2,6
C-62	168	10,2	2,65
B-72	168	10,3	2,7
C-23	168	10,05	2,7
B-81	168	10	2,6
A-93	360	10,1	2,6
A-37	360	10	2,55
C-48	360	10,1	2,6
A-71	360	10,35	2,6
B-36	360	10	2,6
B-95	720	10,7	2,7
D-71	720	10,8	2,7
B-49	720	9,5	2,55
A-24	720	10,4	2,55
D-4	720	10,4	2,6
A-3	2160	9,8	2,55
D-84	2160	9,75	2,75
C-32	2160	9,6	2,7
C-7	2160	10,4	2,7
C-27	2160	10,55	2,7
		Largh. b (mm)	Spess. h (mm)
	Media Rif.	10,206	2,626
	Media 50% Tg	10,158	2,642
	Media 75% Tg	10,149	2,636
	Media 100% Tg	10,155	2,649
	Media 110 % Tg	10,302	2,617
	Media 145% Tg	10,266	2,802

Tabella 7: Esempio di riepilogo per le misure caratteristiche per la prova di taglio

Per problemi tecnologici lo spessore risulta maggiore di quello dato dalla normativa e per semplificare le operazioni di taglio si è scelto di utilizzare una larghezza dei provini di flessione coincidente con quella del taglio interlaminare cioè di 20 mm. Si è optato per questa scelta dato che nella flessione la profondità del provino incide in misura minore che nel taglio.

3.3. Campagna Sperimentale

Per campagna sperimentale si intende il complesso sperimenti ai quali vengono sottoposti gli elementi presi in considerazione.

In primo luogo viene determinato la temperatura di transizione vetrosa (Tg) tramite l'analisi del composito prima e dopo la post-cura con l'utilizzo in entrambi i casi di due campioni. Successivamente, vengono scelti i cicli di estrazione dei provini con determinazione dei giorni in cui vengono prelevati dai forni.

3.3.1. Determinazione Tg

La determinazione della temperatura di transizione vetrosa, ovvero Tg, è stata effettuata con la collaborazione del dipartimento di Chimica dell'Università di Bologna, grazie all'aiuto del Professor Maurizio Fiorini e dell'Ing. Raffaele Morelli.

Di seguito viene riportata la relazione di riferimento sull'analisi del rilevamento della Tg in collaborazione con il Professor Maurizio Fiorini, l'Ing. Raffaele Morelli e il Professor Lorenzo Donati.

3.3.1.1. Rilevamento della temperatura di transizione vetrosa tramite analisi dinamo-meccanica e termica (DMTA) di materiali compositi in fibra di carbonio e matrice epossidica ER450

**Analisi svolta dal prof. Maurizio Fiorini (Unibo) e dall'ing. Raffaele Morelli,
revisione e verifica: Fabio Mariotti, prof. Lorenzo Donati**

L'analisi dinamo-meccanica e termica o DMTA è largamente usata nello studio delle resine termoindurenti e dei loro compositi rinforzati con fibre. Il grande interesse per questo strumento risiede nel fatto di poter misurare simultaneamente cambiamenti strutturali e morfologici del materiale, quindi modulo dinamico complesso, tangente di perdita, temperatura di transizione vetrosa e l'energia di attivazione ad essa associata, rilassamenti secondari delle catene polimeriche, il grado di reticolazione di una resina, viscosità complessa e dinamica, rilassamento degli sforzi etc.

Strumentazione

Lo strumento a nostra disposizione è un analizzatore termo-meccanico della Rheometric Scientific(ora TA Instruments) in grado di misurare le proprietà viscoelastiche del materiale variando le condizioni di temperatura e frequenza(figura 1).



Figura 1: DMTA V 3E della Rheometric Scientific

Il funzionamento dello strumento è relativamente semplice da spiegare. Viene applicata una forza e trasmessa da un semiassa sul campione da testare; lo strumento, inoltre, offre una varietà di configurazioni per l'afferraggio dello specimen: single e dual-cantilever, three-point bend, tension/compression e modalità shear sandwich (figura 2).

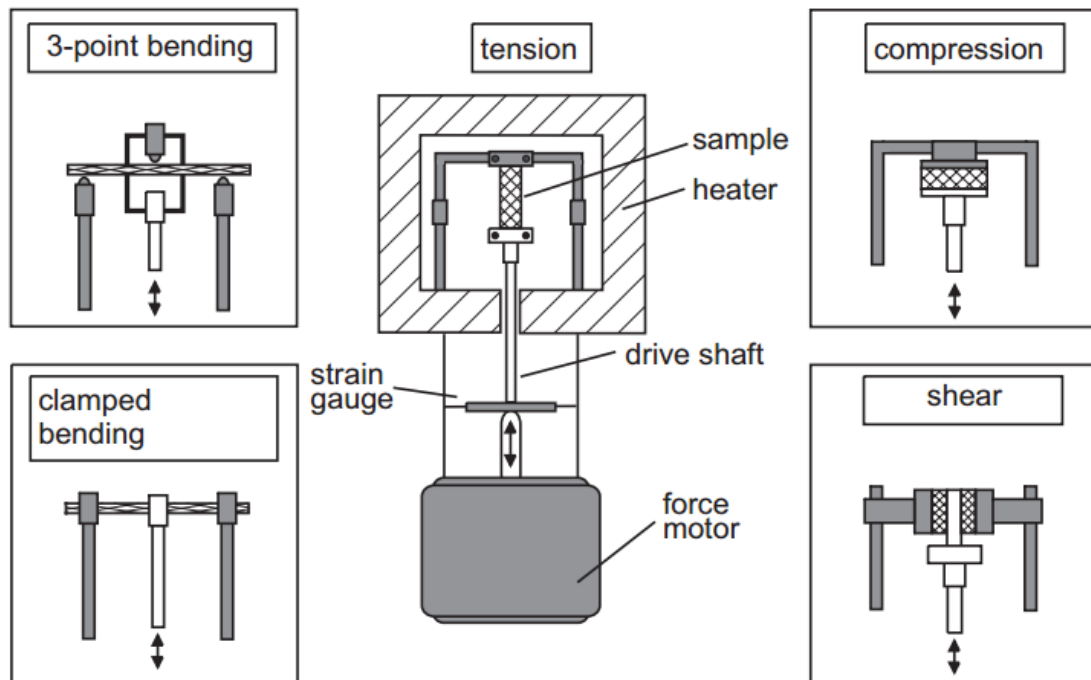


Figura 2: rappresentazione schematica di un analizzatore dinamico-meccanico con caricamento verticale e varie possibilità di afferraggio del provino

Nel momento in cui il campione si deforma, l'ammontare dello spostamento viene determinato da un sensore di posizione. La forza viene applicata sinusoidalmente e la risultante deformazione calcolata.

Se il campione da testare si comporta come un solido elastico allora sforzo e deformazione saranno in fase tra loro; al contrario, in un materiale puramente viscoso l'angolo di sfasamento (indicato con δ) è di 90° . I polimeri sono materiali viscoelastici e si collocano esattamente tra questi due estremi.

Tradizionalmente, il modulo dinamico complesso E^* , è rappresentato come:

$$E^* = E' + iE''$$

dove la componente reale, E' , è definita come modulo elastico di immagazzinamento (storage modulus), proporzionale all'energia recuperata per ciclo di deformazione; la componente immaginaria, E'' , rappresenta il modulo di perdita (loss modulus), proporzionale all'energia netta dissipata per ciclo sotto forma di calore.

$E' = (\sigma_0/\varepsilon_0)\cos\delta$ è la componente in fase con la deformazione, mentre $E'' = (\sigma_0/\varepsilon_0)\sin\delta$ la componente fuori fase, dove δ rappresenta l'angolo di sfasamento.

Quindi risulterà che $\tan\delta = E''/E'$. Per solidi puramente elastici $\tan\delta$ sarà nullo.

Uno dei motivi del successo di questa tecnica dinamica per la caratterizzazione delle proprietà viscoelastiche dei materiali risiede nel fatto che i dati ottenuti rappresentano le due funzioni complementari, l'elasticità e la viscosità. La risposta viscosa, descritta da E'' o da $\tan\delta$, è evidenziata da una serie di massimi (o picchi di perdita) associati a precise transizioni, vere e proprie impronte meccaniche del materiale.

A seconda della modalità di caricamento, E' può rappresentare il modulo a taglio, a flessione o a trazione. I valori di E' sono relativi piuttosto che assoluti, visto che le misurazioni sono influenzate dalle condizioni al contorno e dalla sensibilità dello strumento. La componente reale, infatti, è molto influenzata dal rapporto lunghezza/spessore del campione, dall'ampiezza della deformazione, dal tipo di afferraggio utilizzato, dal condizionamento del materiale, dall'allineamento di quest'ultimo. Pertanto, i valori di E' misurati con la tecnica DMTA possono differire significativamente dai valori dei moduli (elastico, di Young) ottenuti con i dinamometri tradizionali.

Strain sweep test

Prima di iniziare con le misurazioni, è stato eseguito uno strain sweep test a temperatura ambiente e frequenza di 6.28 rad/s in modo da verificare le condizioni di forza e deformazione per cui il materiale mantiene un comportamento viscoelastico lineare. La forza viene man mano incrementata fino a quando non si raggiunge il limite massimo dello strumento, per il DMTA 3E è di 5 N, oppure il materiale comincia a mostrare un comportamento viscoelastico non lineare. In realtà la forza ceduta viene usata per calcolare la rigidità K del provino, piuttosto che E' , dove $K = \text{drive force}/\text{displacement}$. Il software dello strumento, a questo punto, calcolerà E' con una equazione che tiene conto delle dimensioni geometriche del provino (nel caso del three point bend la relazione usata è la seguente):

$$E' = K \cdot (l^3/2wt^2)$$

con l lunghezza, w larghezza e t spessore del provino. In single cantilever la formula utilizzata è invece:

$$E' = K \cdot (l^3 / wt^3)$$

Calcolo della temperatura di transizione vetrosa nei materiali compositi (ASTM D 7028)

In un classico termogramma E' e E'' vengono riportati in scala logaritmica, mentre la tangente di perdita linearmente. Durante la transizione vetrosa la parte reale del modulo si riduce drasticamente, mentre la parte immaginaria cresce (figura 3).

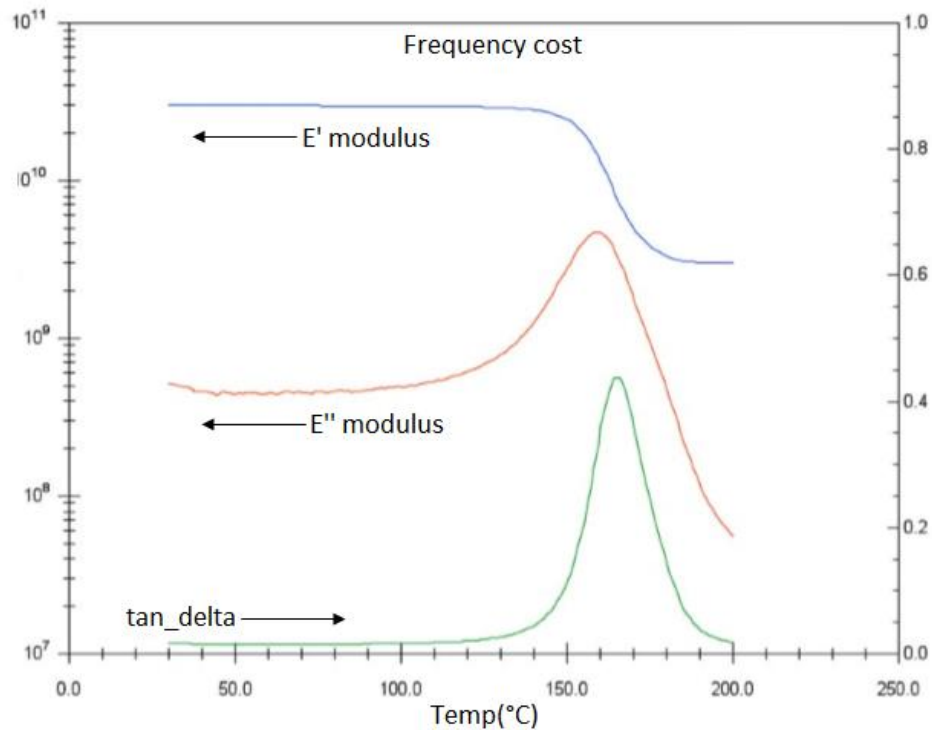


Figura 3: un esempio di un termogramma DMA ideale che mostra l'andamento del modulo E' , E'' e della tangente di perdita

L'identificazione della T_g non è univoca; può essere determinata dall'intersezione delle due rette tangenti alla curva sigmoideale del modulo E' : la prima può essere tracciata ad una temperatura di poco inferiore alla transizione, mentre la seconda viene costruita a partire dalla mezziera dell'inflessione della curva. Nelle norme tedesche (DIN 53765) la T_g è presa a metà dell'inflessione.

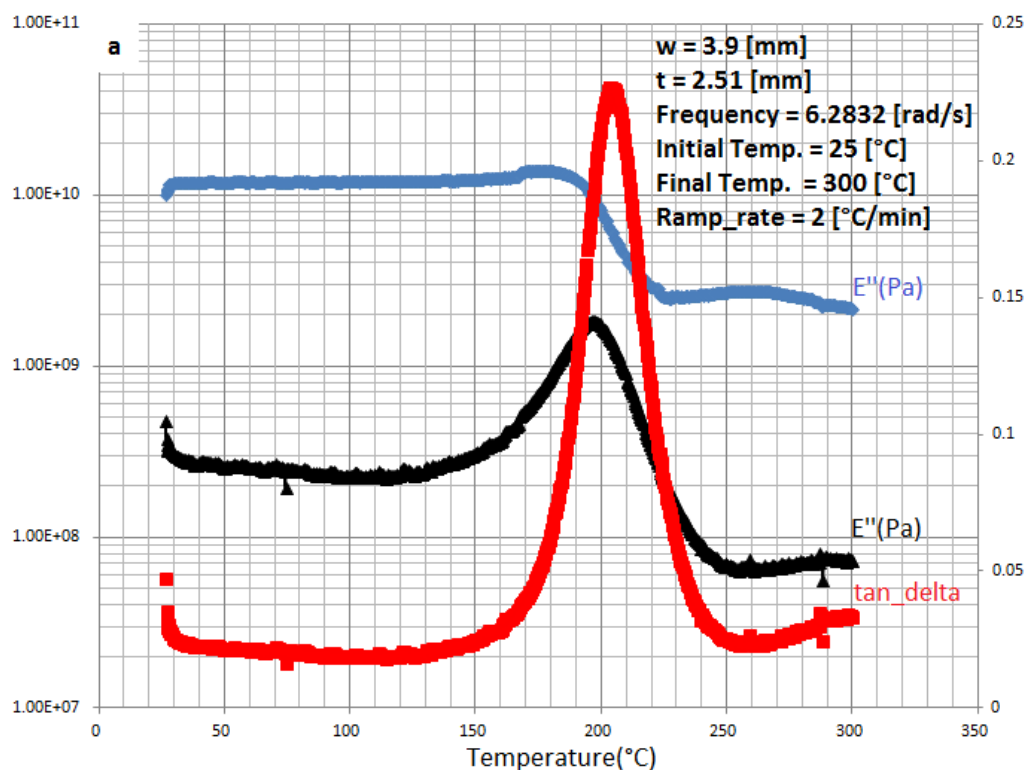
Può essere però anche individuata come quella temperatura a cui corrisponde il picco del modulo di perdita E'' e della tangente di perdita, che corrisponde anche al criterio più utilizzato in letteratura per l'identificazione di questa temperatura.

Risultati e discussione

Sono stati forniti due campioni in forma di lastra piana, realizzata con materiale pre-preg con resina ER450 (SAATI) e tessuto in carbonio bilanciato plain weave curati in autoclave. Un campione di piccole dimensioni (40x10mm) estratto dopo ciclo di cura in autoclave a 135°C per 2 ore 6 bar di pressione (denominato tal quale) ed un secondo campione di dimensioni maggiori (10x300mm) sottoposto ad un successivo ciclo di post-cura in forno per 2 ore a 200°C.

Dalla lastra del materiale con trattamento di post-cura sono stati tagliati quattro provini da 30 mm di lunghezza ciascuno e larghezza variabile dai 3.9 ai 5.8 mm.

In modalità three point bending, particolarmente adatto per materiali molto rigidi, sono state eseguite tre prove. I risultati che ne sono scaturiti non sono soddisfacenti in quanto mostrano andamenti completamente differenti e, specialmente la seconda e la terza, soffrono di scattering dei dati e anomalie nell'andamento della sigmoide (figura 4). E' possibile però che queste differenze siano da attribuire a problemi di caricamento del campione nella seconda prova. Per superare questi problemi abbiamo deciso di provare la geometria single cantilever, dove la riproducibilità dei dati è risultata migliore rispetto al three point bending. La figura 5 mostra un esempio di come la Tg venga calcolata dalla curva sigmoide di E' vs. temperatura.



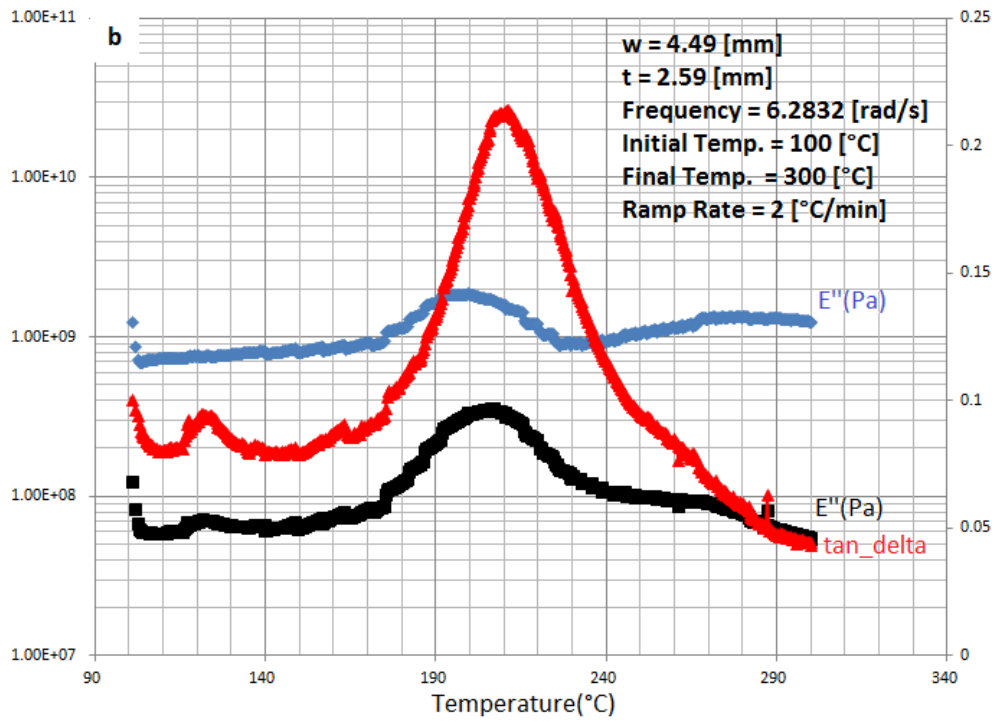


Figura 4: DMTA del campione post-cure. (a) prova 1 e (b) prova 2 in modalità three point bending

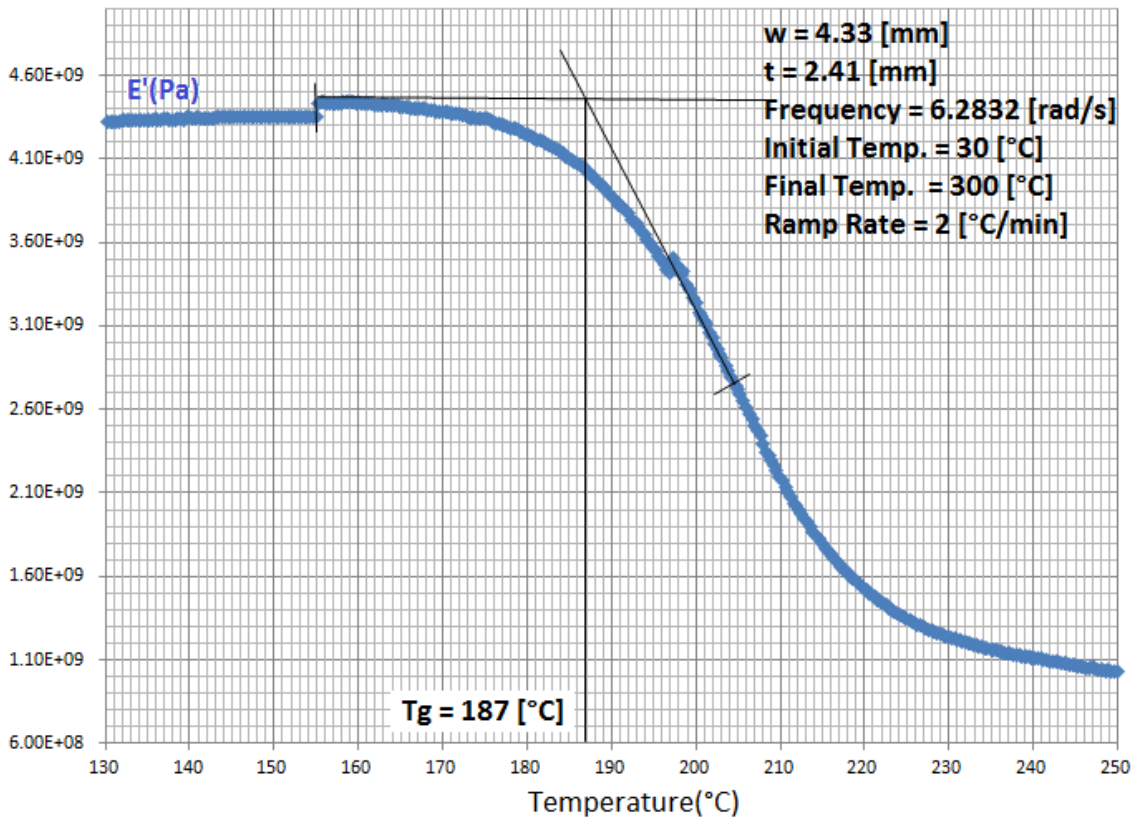


Figura 5: DMTA del campione post-cura: prova 4 in modalità single cantilever. Tg è stata calcolata dalla curva di E'

Per il campione con trattamento di post-cure, il valore di Tg calcolato dalla curva di E' è di 187°C, mentre dal picco di tan δ (non riportato in figura 5 per semplicità di lettura della figura) Tg è 212°C. Dalla scheda tecnica della resina ER450 della Saati Composites, reticolata in autoclave a 135°C per due ore e successivamente post-trattata a 200°C per due ore, la Tg calcolata rispetto ad E' risulta essere di 167°C, mentre rispetto al picco della tangente di perdita di 184°C. I valori ottenuti sono di 20 e 28°C superiori rispetto a quelli riportati nel bollettino tecnico di Saati. Essendo stato effettuato un trattamento di post-cure di due ore invece di un'ora i risultati ottenuti sono da considerarsi accettabili. Per avere un dato più significativo dal punto di vista statistico, verranno effettuate altre prove con il materiale con trattamento di post-cure.

Nelle stesse condizioni sperimentali sono stati poi esaminati i due provini tagliati dal piccolo pezzo senza trattamento di post-cure (denominato tal quale, nel resto del report) (figura 6).

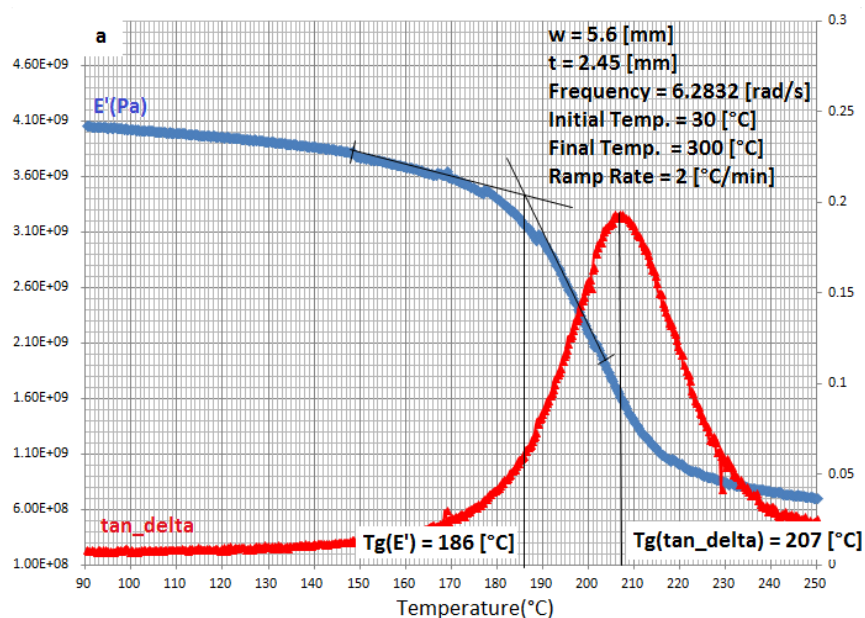


Figura 6: temperatura di transizione vetrosa dei due provini tal quale (a) e (b) , calcolata rispetto ad E' ed alla tangente di perdita

Per le due prove sul campione tal quale, il calcolo della Tg porta a due risultati notevolmente discordanti. Per la prima prova, Tg (da E') = 186 °C e Tg (tan δ) = 207°C. Per la seconda prova, Tg (da E') = 154.5 °C e Tg (tan δ) = 203°C rispettivamente. La scheda del produttore indicava Tg=161°C per un ciclo in autoclave di 2 ore a 135°C.

Ci possono essere diverse ragioni che spiegano i valori discordanti: lente rampe di raffreddamento in autoclave che abbiano facilitato una ulteriore reticolazione della resina; una non omogeneità della lamina trattata in autoclave; problemi con la seconda prova che presenta un picco di $\tan \delta$ molto più allargato in cui c'è un flesso, quindi in realtà potrebbero essere due picchi fusi insieme, ma allora si tratta di capire quale fenomeno determina il secondo rilassamento. Si nota anche che per la seconda prova l'altezza del picco di $\tan \delta$ è inferiore alla prima. Questo fatto in letteratura è stato correlato con l'assorbimento di acqua (umidità).

Riassumendo:

Speciment	State	Tg(E') (°C)	Tg(tan δ) (°C)
a- three point bending	post-cured	-	205°
b- three point bending	post-cured	-	210°
c- single cantilever	post-cured	187°	212°
d- single cantilever	tal quale	186°	207°
e- single cantilever	tal quale	154,5°	203°

Nelle medesime condizioni sono state svolte altre prove per il materiale trattato con post-cure, di seguito sono riportati i risultati (Tab 1).

Speciment	Tg(E') (°C)	Tg(tan δ) (°C)
1°	178.0	203.5
2°	181.0	204.0
3°	180.5	202.0
4°	180.0	202.0
5°	178.0	202.0

	Media(°C)	σ (°C)
Tg(E')	179.5	1.41
Tg(tan δ)	202.7	0.97

Tabella1 1:ulteriori prove per il materiale con trattamento di post-cure

Si può notare che c'è sempre differenza tra la Tg presa dallo scalino nella curva di E' vs tempo oppure dal picco di tan delta. I valori delle prove sono molto vicini fra loro.

Per cui si può riassumere che, il materiale post-cure ha una Tg di circa 202.7°C (se calcolato con tanδ, di 179,5°C se calcolato con E'), il materiale dopo sola cura in autoclave (tal quale) è incerto fra 203-207°C (se calcolato con tanδ, di 154,5-186°C se calcolato con E'), ma sembra comunque molto vicino al valore del post-cura.

Sono state poi effettuate altre prove dinamiche con preconditionamento (ossia ulteriore invecchiamento) a 250°C per 3 h. Si è ottenuto:

Tg (E') 162°C, Tg (tan delta) 189 °C.

rispetto ai 179.5°C e 202.7°C medi delle prove precedenti, i provini mostrano un decadimento non così marcato come ci si sarebbe potuto aspettare. Si è eseguita un'altra prova, sempre con stesso preconditionamento della prova precedente (250°C, 3h) ma senza flusso di azoto, con atmosfera (ossigeno) in camera:

Tg (E') 163 °C, Tg (tan delta) 186 °C.

Si può concludere che non è entrato azoto nella prova precedente o che la presenza di azoto (ossia invecchiamento in atmosfera protetta), non altera il decadimento.

3.3.2. Campo di estrazione e temperatura d'invecchiamento

La parte fondamentale della tesi è l'invecchiamento. Avendo scelto, grazie all'analisi DMTA, una temperatura di transizione vetrosa $T_g = 180^\circ\text{C}$, sono state definite le seguenti temperature di invecchiamento:

- I. 145% T_g : la temperatura utilizzata è di 260°C , con un periodo di estrazione di 6h, 24h, 72h, 168h.
- II. 130% T_g : la temperatura utilizzata è di circa 235°C , con estrazione a 6h, 24h, 72h, 168h, 360h, 720h, 2160h.
- III. 110% T_g : la temperatura utilizzata è di circa 200°C , con estrazione a 6h, 24h, 72h, 168h.
- IV. 100% T_g : la temperatura utilizzata è la T_g , quindi 180°C , con un periodo di estrazione a 6h, 24h, 72h, 168h, 360h, 720h, 2160h.
- V. 100% T_g : la temperatura utilizzata è la T_g , quindi 180°C , con un periodo di estrazione a 1h, 2h, 3h, 4h, 5h, 6h.
- VI. 75% T_g : la temperatura utilizzata è 135°C , con estrazione uguale a 6h, 24h, 72h, 168h, 360h, 720h, 2160h.
- VII. 50% T_g : la temperatura utilizzata è 90°C , con estrazione a 6h, 24h, 72h, 168h, 360h, 720h, 2160h.
- VIII. 50% $T_g - 20^\circ\text{C}$ Ciclo di fatica termica: la temperatura utilizzata è 90°C , con estrazione a 6h, 24h, 72h, 168h, 360h, 720h, 2160h. Per avere una fatica termica ottimale, si è utilizzato un tempo di esposizione di 12h per entrambe le temperature limite.
- IX. Temperatura ambiente: è stata utilizzata come riferimento, con estrazioni a 168h, 360h, 720h, 1440h e 2160h.

L'invecchiamento è di tipo isothermico (invecchiamento a temperatura costante in funzione delle percentuali di % T_g scelte). Un altro tipo di invecchiamento possibile è quello di fatica termica, ponendo il materiale per 12h a una determinata % di temperatura T_g (in questo caso 50%) e dopo un raffreddamento sufficientemente lento per evitare shock termici, viene posto a una condizione di -20°C nelle successive 12h.

Le prove a 150% T_g e 120% T_g , soprattutto quelle a 150% T_g , sono superiori alla T_g del composito e questa scelta è stata volontaria per meglio determinare il deterioramento del

composito stesso in caso si ipotizzi un malfunzionamento che ne fa derivare un aumento di temperatura eccessivo.

Un'altra prova è stata eseguita a 100% Tg con estrazione ad ogni ora per 6h. In questo modo, si è voluto studiare e capire come risponde il composito nelle prime 6h del processo di invecchiamento.

In seguito alla scelta della Tg, si è optato per i seguenti campi di estrazione:

%Tg	Temp. [°C]	Ore estrazione [h]
Rif.	T ambiente	168 - 360 - 720 - 1440 - 2160
50%	90	6 - 24 - 72 - 168 - 360 - 720 - 2160
75%	135	6 - 24 - 72 - 168 - 360 - 720 - 2160
100%	180	6 - 24 - 72 - 168 - 360 - 720 - 2160
110%	200	6 - 24 - 72 - 168
130%	235	6 - 24 - 72 - 168 - 360 - 720 - 2160
145%	260	6 - 24 - 72 - 168
fatica termica 50% Tg - 20°C	50/-20	0,5 - 1 - 3 - 7 - 15 - 30 - 90

Tabella 8: Ore e cicli di estrazione in funzione della %Tg

3.4. Attrezzatura utilizzata

Per la realizzazione dell'invecchiamento sono stati utilizzati due fornetti elettrici e due forni da fonderia.

Le seguenti temperature di invecchiamento sono state assegnate ai **due fornetti elettrici**:

- 1) Il primo fornello elettrico a due temperature di **50% Tg e 50% Tg -20** figura24
- 2) Il secondo fornello elettrico ad una temperatura di **75% Tg** figura25

Le seguenti temperature di invecchiamento sono state assegnate ai **due forni da fonderia**:

- 3) Il primo forno da fonderia a una temperatura di **100% Tg** figura26
- 4) Il secondo forno da fonderia alle **altre temperature rimaste** figura27

Per eventuali emergenze era presente un terzo fornello.



Figura 24: Forno impiegato nell'invecchiamento 50% Tg e 50% Tg – 20°C



Figura 25: Forno utilizzato nell'invecchiamento a 75% Tg



Figura 26: Forno adoperato per l'invecchiamento a 100% Tg



Figura 27: Forno per le restanti prove.

La regolazione della temperatura, per i forni e i fornelli, è stata effettuata con una termocoppia digitale di tipo K vedi figura 28.



Figura 28: Termocoppia utilizzata per la regolazione della temperatura dei forni e fornelli.

Nel ciclo di fatica termica è stato impiegato un congelatore a pozzo con la temperatura di -20°C e una esposizione alternata di 12 ore tra fornello elettrico e congelatore in modo tale da raggiungere l'equilibrio termico e mantenerlo per un tempo accettabile (fig. 29).



Figura 29: Congelatore a pozzo utilizzato per il ciclo di fatica termica

Nelle prove di flessione e di taglio interlaminare è stata utilizzata una pressa oleodinamica.



Figura 30: Caratteristica Pressa oelodinamica



Figura 31: Pressa oleodinamica utilizzata per le prove di flessione a tre punti e taglio interlaminare

L'operazione di pesatura è stata effettuata, prima e dopo l'invecchiamento, con l'utilizzo di una bilancia con precisione al millesimo di grammo vedi figura 32.



Figura 32: Bilancia utilizzata per la pesatura pre e post invecchiamento

CAPITOLO 4

4. PROVE DI CARATTERIZZAZIONE

Le prove di caratterizzazione, scelte per verificare il deterioramento del composito, sono le seguenti:

- Peso
- Flessione a tre punti seguendo la normativa UNI EN ISO 14125
- Taglio Interlaminare seguendo la normativa UNI EN ISO 14130

4.1. Verifica del peso

La verifica del peso è avvenuta pesando i provini prima e dopo dell'invecchiamento.

La perdita di peso è importante perché va ad incidere sulle resistenze meccaniche, dato che la matrice, nel caso di invecchiamento termico, tende a seccarsi e quindi perde la sua principale proprietà di collante fra le fibre di carbonio.

Una volta completata la pesatura è stata calcolata la variazione di peso dei singoli provini per tutte le prove eseguite.

Per facilitare la realizzazione del grafico si è scelta una variazione del peso positiva.

4.1.1. Risultati verifica del peso

L'elaborazione dei dati è avvenuta tramite l'utilizzo di fogli Excel, da cui si sono ottenuti i grafici in cui si hanno in ascissa il tempo di invecchiamento e in ordinata la variazione di peso. Nella tabella X è rappresentato un foglio Excel per il calcolo della variazione di peso nella prova 50% Tg.

Provino	Peso iniziale	Peso finale	Tempo inve	Delta peso	Tempo Inve	Delta Pe	Deviazione	Valore Mi	Valore Ma
A-92	9,085	9,085	1,00E-144	0,00E+00					
D-48	8,753	8,753	1,00E-144	0,00E+00					
C-83	8,852	8,852	1,00E-144	0,00E+00					
D-65	8,724	8,724	1,00E-144	0,00E+00					
D-2	8,687	8,687	1,00E-144	0,00E+00					
C-93	8,856	8,856	1,00E-144	0,00E+00					
A-67	8,785	8,785	1,00E-144	0,00E+00					
C-59	8,572	8,572	1,00E-144	0,00E+00	1,00E-144	-	-	-	-
D-32	8,585	8,579	6	0,006					
B-89	9,164	9,159	6	0,005					
C-75	8,816	8,808	6	0,008					
D-96	8,948	8,942	6	0,006					
C-92	9,144	9,14	6	0,004	6	0,006	0,001327	0,004473	0,007127
B-1	8,831	8,819	24	0,012					
D-78	8,746	8,737	24	0,009					
A-66	8,99	8,982	24	0,008					
A-77	8,782	8,771	24	0,011					
C-36	8,754	8,742	24	0,012	24	0,0104	0,001625	0,008775	0,012025
C-100	9,123	9,11	72	0,013					
A-102	9,09	9,077	72	0,013					
A-12	8,697	8,684	72	0,013					
B-54	8,345	8,325	72	0,02					
D-11	8,834	8,819	72	0,015	72	0,015	0,002713	0,012087	0,017513
C-23	8,777	8,754	168	0,023					
D-19	8,736	8,71	168	0,026					
C-62	8,974	8,955	168	0,019					
B-81	8,609	8,589	168	0,02					
B-72	8,657	8,636	168	0,021	168	0,022	0,002482	0,019318	0,024282
B-36	8,864	8,834	360	0,03					
A-71	8,599	8,571	360	0,028					
A-93	8,546	8,52	360	0,026					
C-48	8,717	8,683	360	0,034					
A-37	9,164	9,133	360	0,031	360	0,030	0,002713	0,027087	0,032513
D-4	8,803	8,769	720	0,034					
B-49	8,6	8,558	720	0,042					
A-24	8,365	8,327	720	0,038					
D-71	8,63	8,591	720	0,039					
B-95	9,063	9,026	720	0,037	720	0,038	0,002608	0,035392	0,040608
C-32	8,473	8,43	2160	0,043					
A-3	7,702	7,656	2160	0,046					
D-84	8,807	8,765	2160	0,042					
C-27	8,658	8,618	2160	0,04					
C-7	8,679	8,638	2160	0,041	2160	0,042	0,002727	0,039673	0,045127

Tabella 9: Foglio Excel per la prova a 50% Tg

Una volta determinata la variazione di peso si sono determinati i grafici in funzione della variazione di peso e del tempo di invecchiamento

Di seguito vengono riportati i grafici in funzione delle varie temperature di invecchiamento.

Nei grafici di riepilogo si sono utilizzati i dati medi in funzione dell'intervallo di confidenza. Di seguito vengono riepilogati i grafici di variazione del peso in funzione delle prove scelte.

➤ Prova di Riferimento

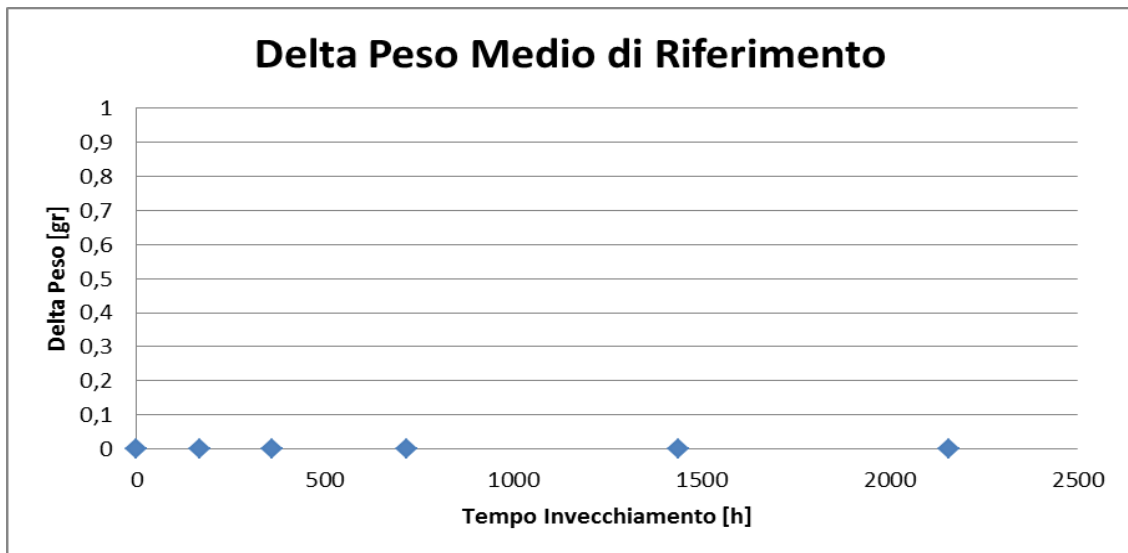


Figura 33: Delta peso per la prova di riferimento

Per il grafico della variazione del peso, riferito alla prova di riferimento ad una temperatura di 20°C, risulta una variazione dei dati nulla.

➤ Prova a 50% Tg (90°C)

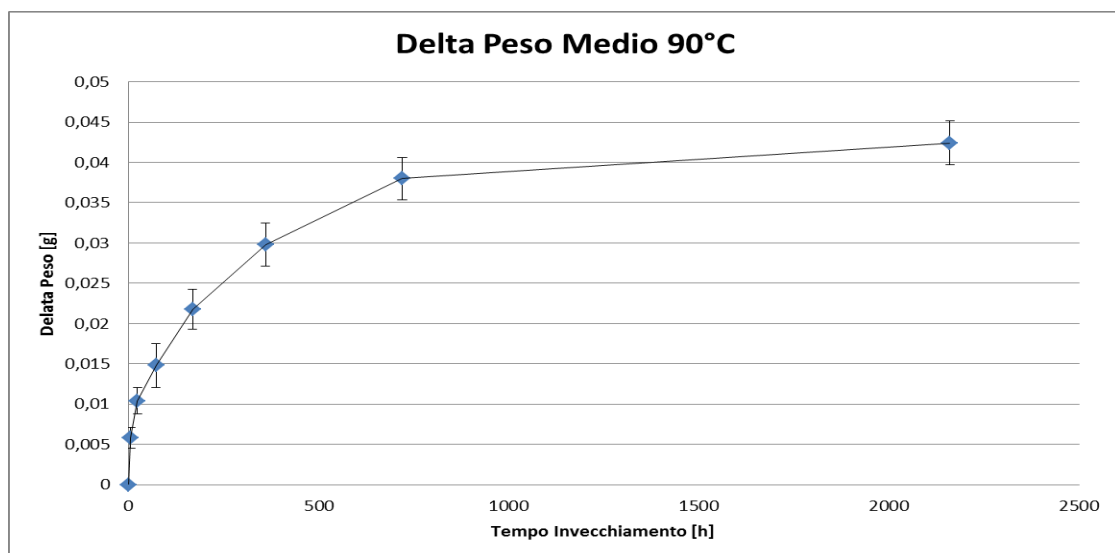


Figura 34: Delta peso per un invecchiamento a 50% Tg

Dalla figura 34 si nota una diminuzione del peso dopo le sei ore di invecchiamento di circa 0,006 gr in aumento costante fino al raggiungimento di 0,042 gr al tempo di 2160 h di invecchiamento.

➤ Prova a 50% Tg -20 °C

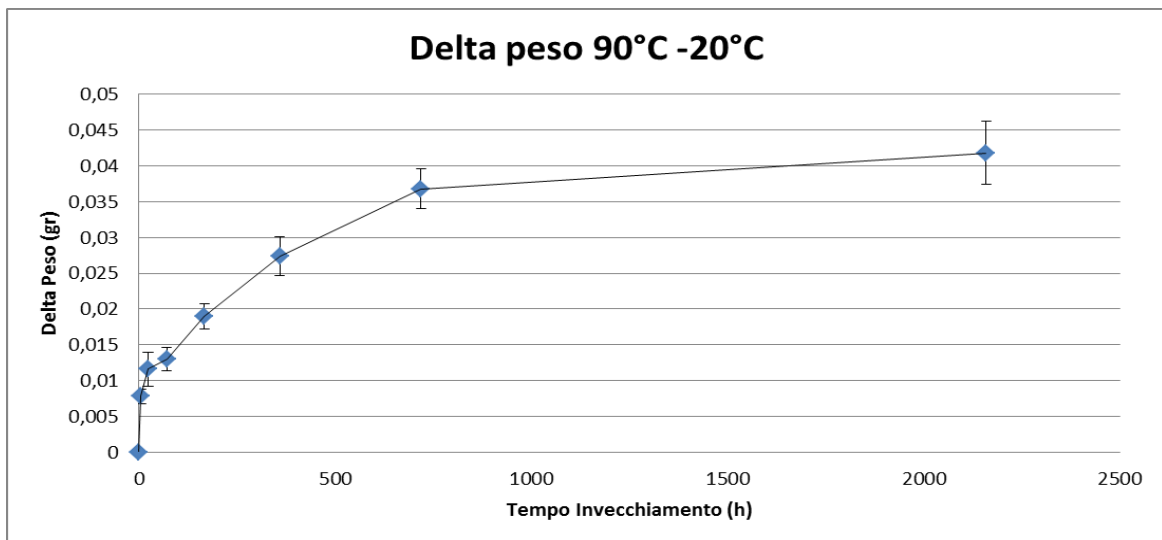


Figura 35: Delta peso per un invecchiamento a 50% Tg -20°C

Questa prova è un invecchiamento a fatica termica con cicli di 12h partendo da una temperatura di -20°C. Si può notare un aumento della perdita di peso, questo però non risulta inferiore al ciclo a 50% Tg; la non variazione di peso può essere dovuta proprio al ciclo di fatica termica che va a creare una dilatazione e contrazione della matrice provocandone un decadimento simile al ciclo a 50% Tg ma senza fatica termica.

➤ Prova a 75% Tg (135°C)

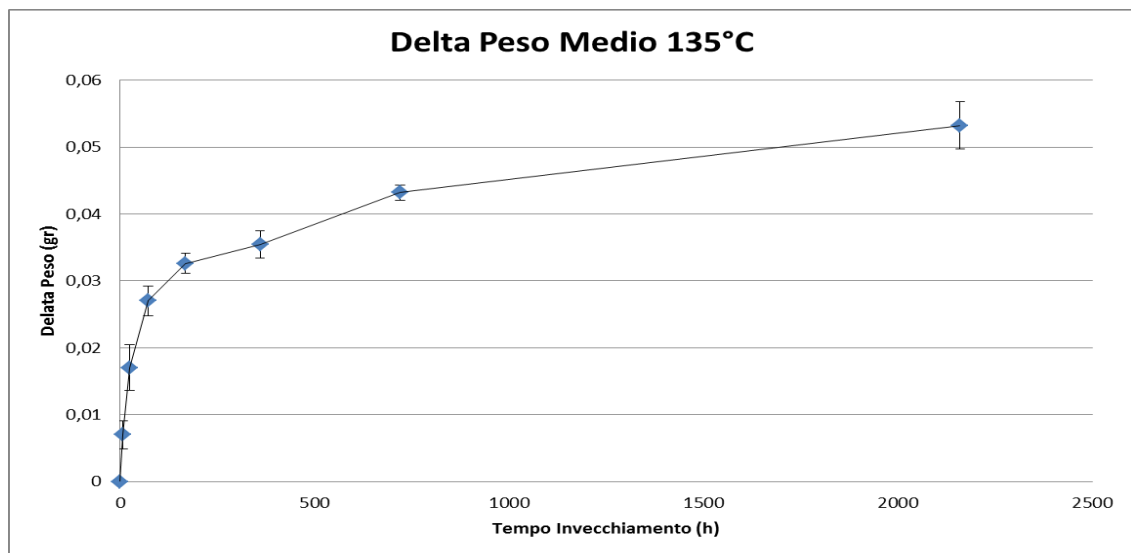


Figura 36: Delta peso per un invecchiamento a 50% Tg -20°C

Nella figura 36 si denota un aumento della perdita di peso rispetto alle prove precedenti questo è dovuto all'aumento di temperatura di invecchiamento 135°C che provoca una perdita di peso maggiore.

➤ Prova a 100% Tg S (180°C S)

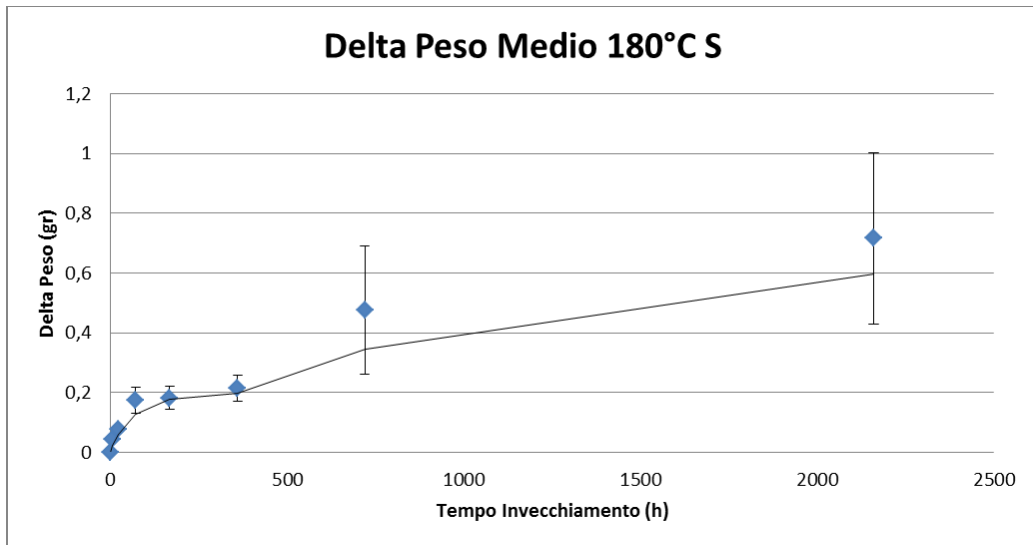


Figura 37: Delta peso per un invecchiamento a 100%Tg S (180°C)

Questa prova non è da ritenersi attendibile dato che il forno ha avuto un aumento repentino della temperatura arrivando a 230°C per alcune ore. Questo aumento della temperatura ha portato a valori di variazione di peso inattendibili. La prova è stata utile per capire come un aumento repentino della temperatura anche per un periodo di tempo breve porta ad una compromissione del composito inevitabile.

➤ Prova a 100% Tg C (180°C C)

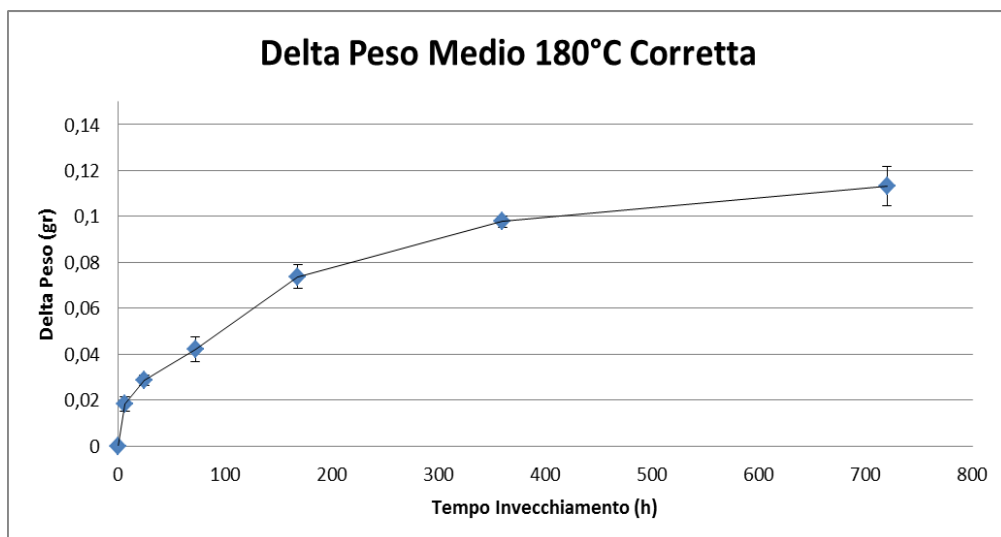


Figura 38: Delta peso per un invecchiamento a 100%Tg S (180°C S)

In questa prova la temperatura di invecchiamento è corretta. Dal grafico si può notare che , utilizzando una temperatura di invecchiamento pari alla tg, si ha un aumento quasi esponenziale della perdita di peso.

➤ Prova a 110% Tg (200°C)

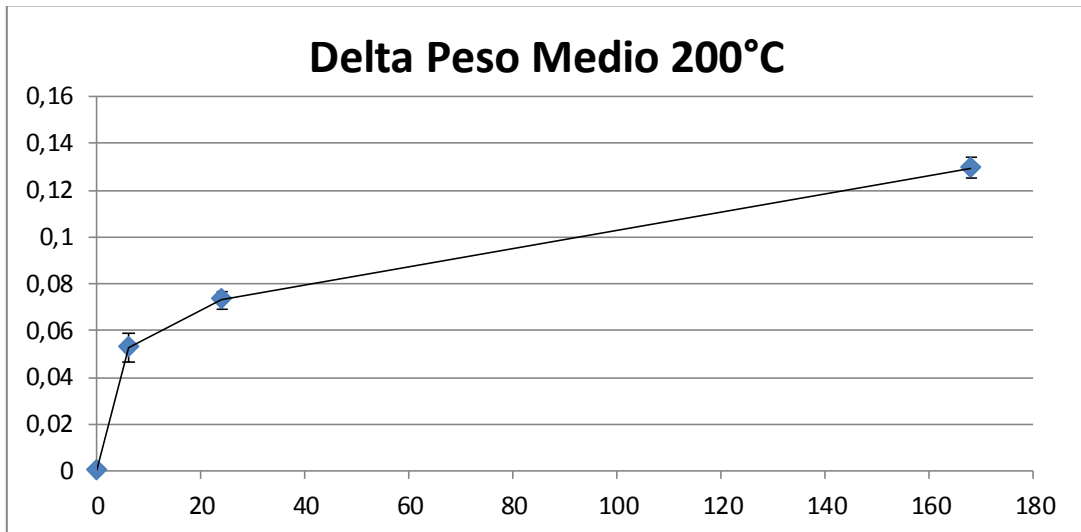


Figura 39: Delta peso per un invecchiamento a 100%Tg S (200°C S)

La temperatura utilizzata in questo caso è superiore al 100% Tg di conseguenza la perdita di peso deve essere maggiore; questo è dovuto al fatto che si è utilizzata una resina epossidica e termindurente che per temperature superiore alla Tg si ha un deterioramento. Nei dati riportati nella figura X si nota un aumento della perdita di peso superiore a quello a 100% Tg.

➤ Prova a 145% Tg (260°C)

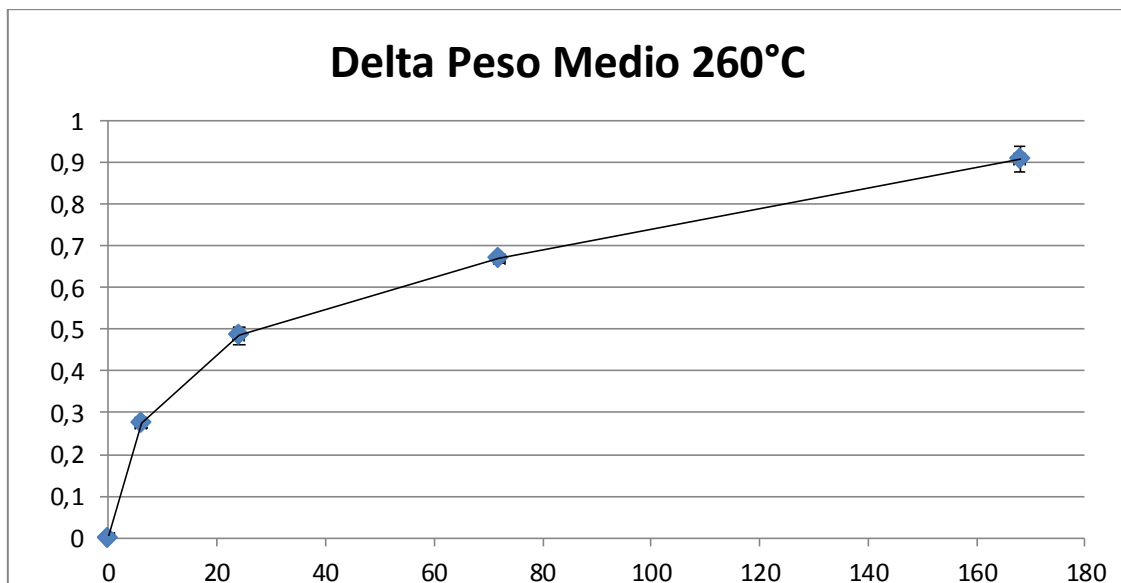


Figura 40: Delta peso per un invecchiamento a 100%Tg S (260°C)

Dalla figura 40 si nota che per altissime temperature si ha un deterioramento della matrice repentino entro poche ore dall'esposizione.

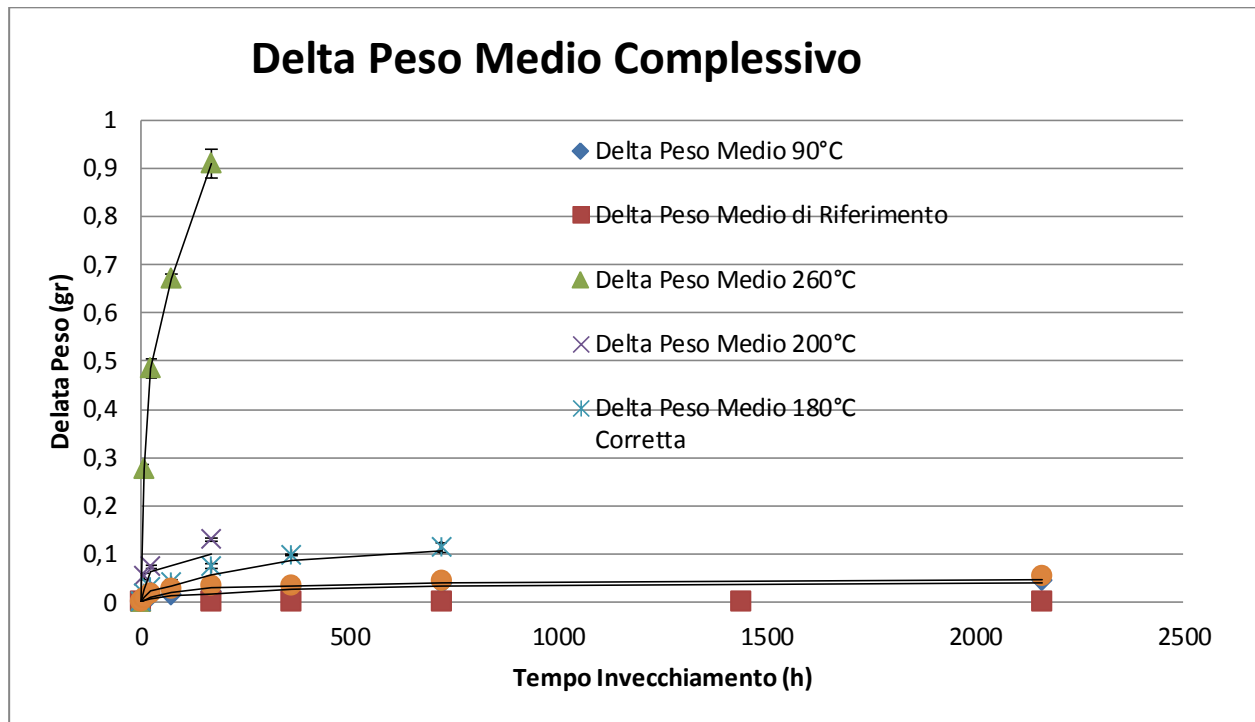


Figura 41: Tabella di riepilogo per la variazione di peso

Si nota che all'aumentare della temperatura la variazione di peso aumenta e oltre il 100% Tg la perdita di massa diventa più che proporzionale.

4.2. Verifica della flessione a 3 punti

La prova di flessione a tre punti è stata scelta perché simula una condizione di esercizio e impiego molto frequente ed è semplice da realizzare; con questa prova si vanno a determinare la resistenza a flessione e il modulo flessionale per verificarne il peggioramento a seguito dell'invecchiamento termico.

Nel provino la parte superiore è soggetta a compressione mentre la parte inferiore a trazione. Il valore che si è scelto per determinare la forza nella flessione è detto first ply failure, che in pratica è la prima variazione grafica ed anche sonora con un crepitio del provino. Viene utilizzata per questa prova la normativa UNI EN ISO 14125.

I dati ottenuti dalla macchina sono i seguenti:

- Tempo t [ms]

- Forza F [kN]
- LVDT [mm]

Si è determinata la velocità di prova, per la flessione a tre punti, dalla seguente formula:

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

Dove:

v= velocità di avanzamento della testa della cella di carico [mm/min]

h = spessore del provino [mm]

L = interasse fra i cilindri di appoggio R₁ e R₂ [mm]

ε' = velocità di deformazione di 0.01 [1/min]

Ed andando nella tabella della normativa si è verificata la correttezza della velocità di avanzamento. Si è scelta una velocità di 0,05 mm/sec

Successivamente si è posizionato il provino nella pressa come nella figura 42 e come da normativa figura 43

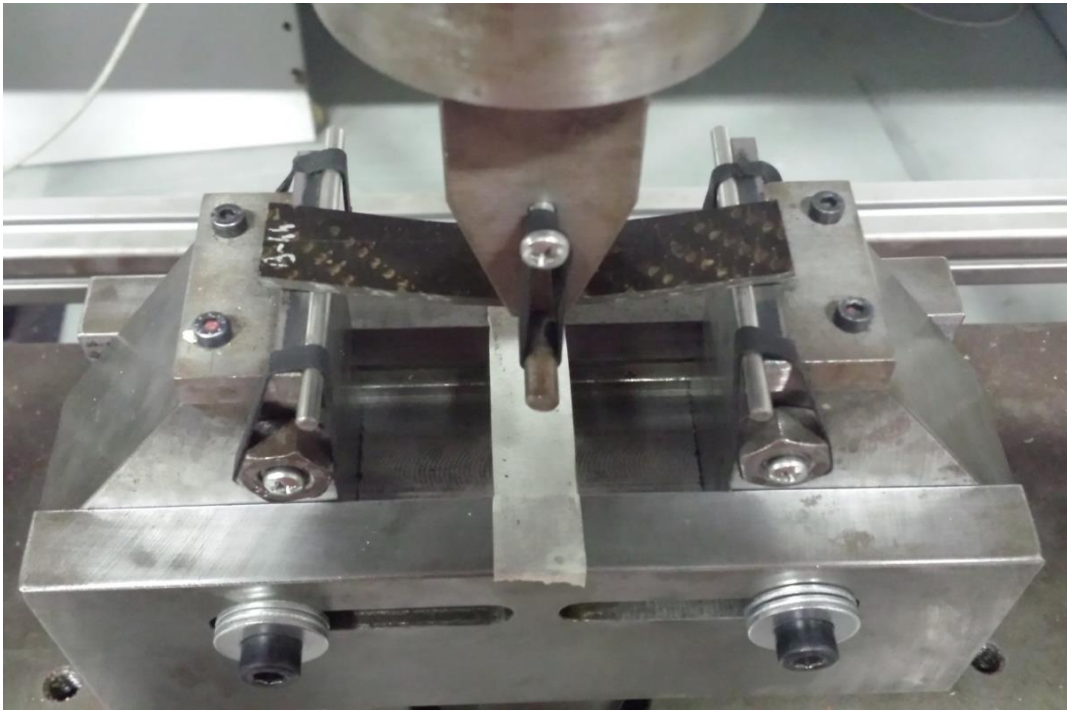


Figura 42: Posizionamento provino di flessione a tre punti

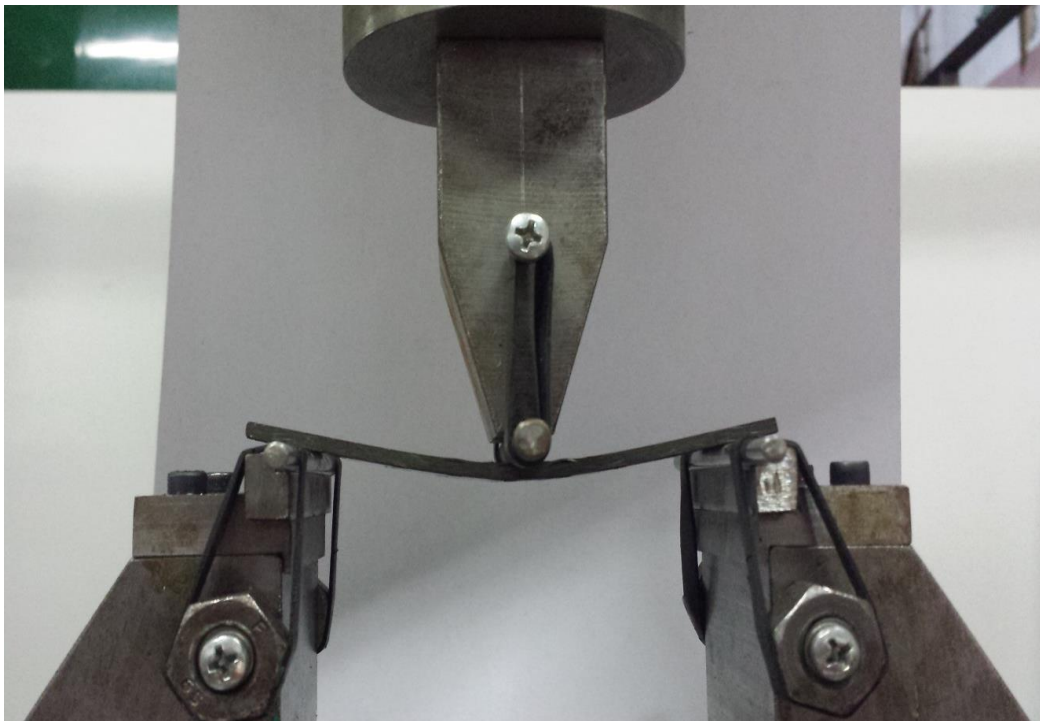


Figura 43: Posizionamento provino di flessione a tre punti

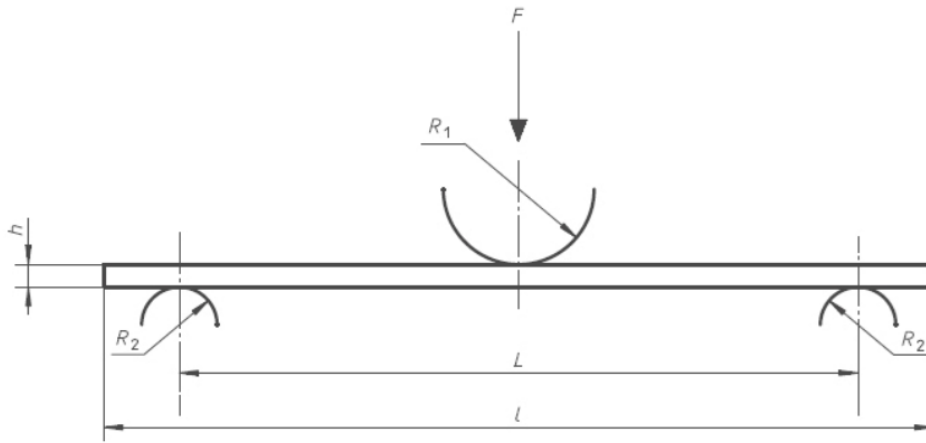


Figura 44: Posizionamento provino di flessione a tre punti

Rispettando i valori delle seguente tabella 10:

R_1	R_2	L/h
$5 \pm 0,2$	$2 \pm 0,2$	30

Tabella 10: Valori dei raggi per i supporti

Infine si è iniziata la prova.

Una volta terminata la prova ed arrivati a rottura si è verificato se la rottura fosse accettabile, confrontandola con la seguente tabella data da normativa.

Per l'elaborazione dei dati sono state utilizzate le seguenti formule:

Calcolo della tensione di flessione σ_f

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bh^2} \quad [\text{MPa}]$$

Dove:

σ_f = tensione di rottura a flessione [MPa]

F = carico applicato [N]

L = interasse fra i cilindri di appoggio R_1 e R_2 [mm]

h = spessore del provino [mm]

b = profondità del provino [mm]

Le deformazioni sono calcolate rispetto alla superficie esterna del provino:

$$\varepsilon = \frac{6sh}{L^2}$$

Dove:

s = distanza con cui la superficie, superiore o inferiore del provino, rispetto alla mezzeria si è inflessa durante la flessione riguardo alla sua posizione originale [mm]

h = spessore del provino [mm]

L = interasse fra i cilindri di appoggio R1 e R2 [mm]

4.2.1. Risultati della prova di flessione a 3 punti

Una volta finite le prove sono stati analizzati i dati raccolti tramite l'avvalersi di fogli di calcolo Excel, da cui sono stati prodotti vari grafici che vanno a dimostrare il comportamento dei provini in funzione di σ/ε .

Di seguito si riporta un esempio di foglio Excel per un solo provino, in questo caso il C-75, con i relativi grafici della prova a 50% Tg, figura X.

Time [ms]	load [kN]	LVDT [mm]	Delta L [mm]	Stress [MPa]	Strain
1,99E+02	-9,16E-03	1,74E+01	2,42E-02	7,910739553	-5,06E-05
3,99E+02	-6,10E-03	1,74E+01	1,33E-02	5,274402428	-5,06E-05
5,99E+02	-1,83E-02	1,74E+01	-1,14E-02	15,82147911	0,00E+00
7,99E+02	-6,10E-03	1,74E+01	2,63E-02	5,274402428	0,00E+00
9,99E+02	-2,14E-02	1,74E+01	2,78E-02	18,45695214	5,06E-05
1,20E+03	-2,75E-02	1,74E+01	1,79E-02	23,73653911	2,53E-05
1,40E+03	-6,10E-03	1,74E+01	6,31E-03	5,274402428	7,59E-05
1,60E+03	-3,05E-02	1,74E+01	-1,04E-02	26,37201214	1,01E-04
1,80E+03	-3,97E-02	1,73E+01	1,26E-02	34,27843125	1,52E-04
2,00E+03	-4,58E-02	1,73E+01	1,02E-02	39,55801821	1,77E-04
2,20E+03	-1,83E-02	1,73E+01	-1,30E-02	15,82147911	1,77E-04
2,40E+03	-3,36E-02	1,73E+01	-3,30E-03	29,00748518	2,02E-04
2,60E+03	-1,53E-02	1,73E+01	-6,10E-03	13,18600607	2,78E-04
2,80E+03	-2,75E-02	1,73E+01	-4,50E-03	23,73653911	2,53E-04
3,00E+03	-3,66E-02	1,73E+01	1,03E-02	31,64295821	2,78E-04
3,20E+03	-3,97E-02	1,73E+01	-9,42E-05	34,27843125	3,29E-04
3,40E+03	-1,83E-02	1,73E+01	-6,90E-03	15,82147911	3,29E-04
3,60E+03	-1,53E-02	1,73E+01	-2,23E-03	13,18600607	3,80E-04
3,80E+03	-1,53E-02	1,72E+01	3,91E-03	13,18600607	4,05E-04
4,00E+03	-3,05E-02	1,72E+01	-1,03E-03	26,37201214	4,05E-04

4,20E+03	-2,14E-02	1,72E+01	4,39E-04	18,45695214	4,30E-04
4,40E+03	-3,05E-02	1,72E+01	-5,70E-03	26,37201214	4,81E-04
4,60E+03	-3,05E-02	1,72E+01	-3,03E-03	26,37201214	4,81E-04
4,80E+03	-2,14E-02	1,72E+01	-6,28E-04	18,45695214	5,57E-04
5,00E+03	-1,83E-02	1,72E+01	-8,10E-03	15,82147911	5,32E-04
5,20E+03	-3,36E-02	1,72E+01	2,17E-03	29,00748518	5,82E-04
5,40E+03	-2,44E-02	1,72E+01	6,84E-03	21,09242518	6,07E-04
5,60E+03	-3,05E-02	1,72E+01	8,18E-03	26,37201214	6,33E-04
5,80E+03	-2,75E-02	1,71E+01	-3,70E-03	23,73653911	6,58E-04
6,00E+03	-3,36E-02	1,71E+01	7,24E-03	29,00748518	6,58E-04
6,20E+03	-2,75E-02	1,71E+01	4,17E-03	23,73653911	6,58E-04
6,40E+03	-3,97E-02	1,71E+01	-7,83E-03	34,27843125	7,09E-04
6,60E+03	-3,66E-02	1,71E+01	2,71E-03	31,64295821	7,34E-04
6,80E+03	-4,27E-02	1,71E+01	5,51E-03	36,91390428	7,85E-04
7,00E+03	-4,27E-02	1,71E+01	-1,03E-03	36,91390428	7,59E-04
7,20E+03	-4,27E-02	1,71E+01	-9,43E-03	36,91390428	8,10E-04
7,40E+03	-5,49E-02	1,71E+01	3,24E-03	47,46443732	8,35E-04
7,60E+03	-6,10E-02	1,71E+01	-1,16E-03	52,74402428	8,61E-04
7,80E+03	-5,80E-02	1,71E+01	-6,28E-04	50,09991035	8,86E-04
8,00E+03	-5,19E-02	1,71E+01	-3,83E-03	44,82896428	8,86E-04
8,20E+03	-5,19E-02	1,70E+01	-5,96E-03	44,82896428	9,37E-04
8,40E+03	-4,27E-02	1,70E+01	-6,28E-04	36,91390428	9,62E-04
8,60E+03	-7,32E-02	1,70E+01	3,06E-04	63,28591642	9,87E-04
8,80E+03	-4,88E-02	1,70E+01	-7,56E-03	42,19349125	1,01E-03
9,00E+03	-8,55E-02	1,70E+01	1,73E-04	73,83644946	1,04E-03
9,20E+03	-5,80E-02	1,70E+01	-4,50E-03	50,09991035	1,06E-03
9,40E+03	-4,88E-02	1,70E+01	-9,43E-03	42,19349125	1,11E-03
9,60E+03	-6,10E-02	1,70E+01	3,92E-05	52,74402428	1,11E-03
9,80E+03	-5,19E-02	1,70E+01	4,39E-04	44,82896428	1,14E-03
1,00E+04	-6,10E-02	1,70E+01	-4,76E-03	52,74402428	1,14E-03
1,02E+04	-6,41E-02	1,69E+01	-7,61E-04	55,37949732	1,16E-03
1,04E+04	-6,10E-02	1,69E+01	-3,30E-03	52,74402428	1,24E-03
1,06E+04	-9,16E-02	1,69E+01	-2,28E-04	79,10739553	1,24E-03
1,08E+04	-6,10E-02	1,69E+01	-4,94E-04	52,74402428	1,27E-03
1,10E+04	-5,19E-02	1,69E+01	-1,03E-03	44,82896428	1,32E-03
1,12E+04	-7,63E-02	1,69E+01	-5,16E-03	65,92138946	1,32E-03
1,14E+04	-7,02E-02	1,69E+01	-6,28E-04	60,65044339	1,37E-03
1,16E+04	-7,94E-02	1,69E+01	-2,63E-03	68,56550339	1,37E-03
1,18E+04	-8,85E-02	1,68E+01	-1,09E-02	76,47192249	1,42E-03
1,20E+04	-7,02E-02	1,69E+01	9,73E-04	60,65044339	1,39E-03
1,22E+04	-7,94E-02	1,68E+01	2,04E-03	68,56550339	1,42E-03
1,24E+04	-7,94E-02	1,68E+01	-8,37E-03	68,56550339	1,44E-03
1,26E+04	-1,04E-01	1,68E+01	3,92E-05	89,69249214	1,49E-03
1,28E+04	-7,02E-02	1,68E+01	-1,56E-03	60,65044339	1,54E-03

1,30E+04	-8,85E-02	1,68E+01	5,73E-04	76,47192249	1,54E-03
1,32E+04	-1,07E-01	1,68E+01	-7,96E-03	92,2847607	1,59E-03
1,34E+04	-6,71E-02	1,68E+01	-1,03E-03	58,01497035	1,57E-03
1,36E+04	-8,85E-02	1,68E+01	-6,28E-04	76,47192249	1,59E-03
1,38E+04	-1,16E-01	1,67E+01	1,77E-03	100,2343843	1,67E-03
1,40E+04	-8,55E-02	1,67E+01	-2,28E-04	73,83644946	1,67E-03
1,42E+04	-1,04E-01	1,67E+01	-2,36E-03	89,69249214	1,70E-03
1,44E+04	-1,19E-01	1,67E+01	-2,10E-03	102,8266528	1,72E-03
1,46E+04	-9,77E-02	1,67E+01	5,38E-03	84,38698249	1,75E-03
1,48E+04	-8,24E-02	1,67E+01	-9,30E-03	71,20097642	1,77E-03
1,50E+04	-1,13E-01	1,67E+01	3,51E-03	97,55570677	1,80E-03
1,52E+04	-1,01E-01	1,67E+01	3,51E-03	87,01381463	1,82E-03
1,54E+04	-9,46E-02	1,67E+01	-7,30E-03	81,74286856	1,85E-03
1,56E+04	-1,28E-01	1,67E+01	-2,76E-03	110,7762764	1,87E-03
1,58E+04	-9,46E-02	1,66E+01	-1,21E-02	81,74286856	1,92E-03
1,60E+04	-9,16E-02	1,66E+01	-5,70E-03	79,10739553	1,92E-03
1,62E+04	-1,16E-01	1,66E+01	-3,70E-03	100,2343843	1,95E-03
1,64E+04	-1,16E-01	1,66E+01	8,40E-04	100,2343843	2,00E-03
1,66E+04	-1,01E-01	1,66E+01	-5,03E-03	87,01381463	2,02E-03
1,68E+04	-1,07E-01	1,66E+01	7,06E-04	92,2847607	2,10E-03
1,70E+04	-1,01E-01	1,66E+01	-6,36E-03	87,01381463	2,02E-03
1,72E+04	-1,07E-01	1,66E+01	-7,96E-03	92,2847607	2,10E-03
1,74E+04	-1,13E-01	1,66E+01	-2,36E-03	97,55570677	2,10E-03
1,76E+04	-1,22E-01	1,65E+01	-7,03E-03	105,5053304	2,18E-03
1,78E+04	-1,07E-01	1,65E+01	-7,03E-03	92,2847607	2,18E-03
1,80E+04	-1,10E-01	1,65E+01	2,31E-03	94,96343821	2,18E-03
1,82E+04	-1,16E-01	1,65E+01	7,91E-03	100,2343843	2,20E-03
1,84E+04	-1,16E-01	1,65E+01	-2,63E-03	100,2343843	2,23E-03
1,86E+04	-1,25E-01	1,65E+01	8,58E-03	108,0975989	2,25E-03
1,88E+04	-1,31E-01	1,65E+01	-1,34E-02	113,368545	2,30E-03
1,90E+04	-1,22E-01	1,65E+01	1,02E-02	105,5053304	2,30E-03
1,92E+04	-1,37E-01	1,65E+01	1,07E-02	118,6394911	2,35E-03
1,94E+04	-1,40E-01	1,65E+01	-1,25E-02	121,3181686	2,33E-03
1,96E+04	-1,16E-01	1,65E+01	1,26E-02	100,2343843	2,38E-03
1,98E+04	-1,10E-01	1,65E+01	7,64E-03	94,96343821	2,40E-03
2,00E+04	-1,50E-01	1,64E+01	-8,37E-03	129,1813832	2,43E-03
2,02E+04	-1,28E-01	1,64E+01	6,58E-03	110,7762764	2,43E-03
2,04E+04	-1,50E-01	1,64E+01	1,02E-02	129,1813832	2,51E-03
2,06E+04	-1,43E-01	1,64E+01	-8,95E-04	123,9104371	2,51E-03
2,08E+04	-1,34E-01	1,64E+01	1,00E-02	116,0472225	2,53E-03
2,10E+04	-1,34E-01	1,64E+01	-5,96E-03	116,0472225	2,58E-03
2,12E+04	-1,40E-01	1,64E+01	1,14E-02	121,3181686	2,56E-03
2,14E+04	-1,43E-01	1,64E+01	-3,56E-03	123,9104371	2,63E-03
2,16E+04	-1,37E-01	1,64E+01	1,07E-02	118,6394911	2,61E-03

2,18E+04	-1,37E-01	1,64E+01	5,24E-03	118,6394911	2,63E-03
2,20E+04	-1,71E-01	1,63E+01	1,38E-02	147,6728989	2,68E-03
2,22E+04	-1,34E-01	1,63E+01	1,34E-02	116,0472225	2,73E-03
2,24E+04	-1,56E-01	1,63E+01	-5,16E-03	134,4523293	2,73E-03
2,26E+04	-1,43E-01	1,63E+01	2,04E-03	123,9104371	2,73E-03
2,28E+04	-1,56E-01	1,63E+01	1,14E-02	134,4523293	2,76E-03
2,30E+04	-1,77E-01	1,63E+01	1,45E-02	152,943845	2,81E-03
2,32E+04	-1,53E-01	1,63E+01	4,71E-03	131,8600607	2,83E-03
2,34E+04	-1,53E-01	1,63E+01	1,77E-02	131,8600607	2,89E-03
2,36E+04	-1,56E-01	1,63E+01	1,03E-02	134,4523293	2,91E-03
2,38E+04	-1,56E-01	1,63E+01	7,91E-03	134,4523293	2,91E-03
2,40E+04	-1,77E-01	1,62E+01	9,51E-03	152,943845	2,94E-03
2,42E+04	-1,71E-01	1,62E+01	2,17E-03	147,6728989	2,94E-03
2,44E+04	-1,65E-01	1,62E+01	1,18E-02	142,4019528	2,96E-03
2,46E+04	-1,86E-01	1,62E+01	4,39E-04	160,8934686	2,99E-03
2,48E+04	-1,50E-01	1,62E+01	1,45E-02	129,1813832	3,09E-03
2,50E+04	-1,68E-01	1,62E+01	1,41E-02	144,9942214	3,06E-03
2,52E+04	-1,56E-01	1,62E+01	1,15E-02	134,4523293	3,06E-03
2,54E+04	-1,74E-01	1,62E+01	-4,36E-03	150,3515764	3,11E-03
2,56E+04	-1,80E-01	1,62E+01	1,08E-02	155,6225225	3,14E-03
2,58E+04	-1,77E-01	1,62E+01	9,78E-03	152,943845	3,16E-03
2,60E+04	-1,80E-01	1,62E+01	6,58E-03	155,6225225	3,16E-03
2,62E+04	-1,68E-01	1,61E+01	3,91E-03	144,9942214	3,21E-03
2,64E+04	-1,71E-01	1,61E+01	5,38E-03	147,6728989	3,21E-03
2,66E+04	-2,05E-01	1,61E+01	1,77E-03	176,7063068	3,27E-03
2,68E+04	-1,71E-01	1,61E+01	4,44E-03	147,6728989	3,29E-03
2,70E+04	-1,77E-01	1,61E+01	-3,96E-03	152,943845	3,32E-03
2,72E+04	-1,77E-01	1,61E+01	4,71E-03	152,943845	3,32E-03
2,74E+04	-1,77E-01	1,61E+01	-2,50E-03	152,943845	3,39E-03
2,76E+04	-2,05E-01	1,61E+01	2,04E-03	176,7063068	3,39E-03
2,78E+04	-1,86E-01	1,61E+01	-4,10E-03	160,8934686	3,42E-03
2,80E+04	-1,95E-01	1,61E+01	-1,70E-03	168,7566832	3,42E-03
2,82E+04	-1,83E-01	1,60E+01	-1,24E-02	158,2147911	3,47E-03
2,84E+04	-1,83E-01	1,60E+01	1,91E-03	158,2147911	3,49E-03
2,86E+04	-2,01E-01	1,60E+01	-6,28E-04	174,0276293	3,49E-03
2,88E+04	-1,95E-01	1,60E+01	4,04E-03	168,7566832	3,54E-03
2,90E+04	-1,89E-01	1,60E+01	-7,61E-04	163,4857371	3,59E-03
2,92E+04	-1,92E-01	1,60E+01	-6,90E-03	166,1644146	3,59E-03
2,94E+04	-1,92E-01	1,60E+01	-2,23E-03	166,1644146	3,64E-03
2,96E+04	-1,95E-01	1,60E+01	-6,90E-03	168,7566832	3,62E-03
2,98E+04	-2,35E-01	1,60E+01	5,38E-03	203,0610371	3,67E-03
3,00E+04	-1,89E-01	1,59E+01	-1,30E-03	163,4857371	3,70E-03
3,02E+04	-1,98E-01	1,59E+01	3,06E-04	171,4353607	3,72E-03
3,04E+04	-2,32E-01	1,59E+01	-8,95E-04	200,3823596	3,75E-03

3,06E+04	-1,95E-01	1,59E+01	-1,56E-03	168,7566832	3,77E-03
3,08E+04	-2,11E-01	1,59E+01	-3,03E-03	181,9772528	3,82E-03
3,10E+04	-2,14E-01	1,59E+01	8,40E-04	184,5695214	3,82E-03
3,12E+04	-2,20E-01	1,59E+01	-1,56E-03	189,8404675	3,87E-03
3,14E+04	-2,35E-01	1,59E+01	-5,43E-03	203,0610371	3,90E-03
3,16E+04	-2,20E-01	1,59E+01	-5,96E-03	189,8404675	3,90E-03
3,18E+04	-2,14E-01	1,59E+01	-5,83E-03	184,5695214	3,92E-03
3,20E+04	-2,05E-01	1,58E+01	-4,63E-03	176,7063068	3,95E-03
3,22E+04	-2,44E-01	1,58E+01	-5,30E-03	210,9242518	3,97E-03
3,24E+04	-2,23E-01	1,58E+01	-5,83E-03	192,519145	4,00E-03
3,26E+04	-2,17E-01	1,58E+01	-1,02E-02	187,2481989	4,02E-03
3,28E+04	-2,41E-01	1,58E+01	-6,63E-03	208,3319832	4,08E-03
3,30E+04	-2,20E-01	1,58E+01	-5,83E-03	189,8404675	4,05E-03
3,32E+04	-2,23E-01	1,58E+01	-6,28E-04	192,519145	4,10E-03
3,34E+04	-2,29E-01	1,58E+01	-3,96E-03	197,7900911	4,13E-03
3,36E+04	-2,44E-01	1,58E+01	-4,63E-03	210,9242518	4,15E-03
3,38E+04	-2,44E-01	1,58E+01	3,06E-04	210,9242518	4,18E-03
3,40E+04	-2,26E-01	1,58E+01	-1,03E-03	195,1114135	4,18E-03
3,42E+04	-2,38E-01	1,57E+01	8,44E-03	205,6533057	4,23E-03
3,44E+04	-2,26E-01	1,57E+01	6,84E-03	195,1114135	4,25E-03
3,46E+04	-2,38E-01	1,57E+01	-2,23E-03	205,6533057	4,25E-03
3,48E+04	-2,69E-01	1,57E+01	1,73E-04	232,094445	4,33E-03
3,50E+04	-2,38E-01	1,57E+01	8,18E-03	205,6533057	4,33E-03
3,52E+04	-2,29E-01	1,57E+01	3,51E-03	197,7900911	4,33E-03
3,54E+04	-2,38E-01	1,57E+01	-6,90E-03	205,6533057	4,38E-03
3,56E+04	-2,38E-01	1,57E+01	-6,36E-03	205,6533057	4,40E-03
3,58E+04	-2,35E-01	1,57E+01	-5,43E-03	203,0610371	4,43E-03
3,60E+04	-2,35E-01	1,57E+01	-3,96E-03	203,0610371	4,43E-03
3,62E+04	-2,53E-01	1,56E+01	-1,70E-03	218,8738753	4,48E-03
3,64E+04	-2,72E-01	1,56E+01	-3,96E-03	234,6867135	4,51E-03
3,66E+04	-2,44E-01	1,56E+01	-2,36E-03	210,9242518	4,51E-03
3,68E+04	-2,41E-01	1,56E+01	-4,94E-04	208,3319832	4,61E-03
3,70E+04	-2,41E-01	1,56E+01	-1,83E-03	208,3319832	4,58E-03
3,72E+04	-2,78E-01	1,56E+01	-3,56E-03	239,9576596	4,61E-03
3,74E+04	-2,44E-01	1,56E+01	-7,16E-03	210,9242518	4,68E-03
3,76E+04	-2,59E-01	1,56E+01	3,92E-05	224,1448214	4,63E-03
3,78E+04	-2,53E-01	1,56E+01	-4,23E-03	218,8738753	4,68E-03
3,80E+04	-2,53E-01	1,55E+01	-6,10E-03	218,8738753	4,71E-03
3,82E+04	-2,63E-01	1,55E+01	-1,43E-03	226,8234989	4,73E-03
3,84E+04	-2,53E-01	1,55E+01	4,39E-04	218,8738753	4,81E-03
3,86E+04	-2,90E-01	1,55E+01	2,17E-03	250,4995518	4,76E-03
3,88E+04	-2,69E-01	1,55E+01	-7,61E-04	232,094445	4,78E-03
3,90E+04	-2,63E-01	1,55E+01	2,17E-03	226,8234989	4,83E-03
3,92E+04	-2,63E-01	1,55E+01	4,39E-04	226,8234989	4,86E-03

3,94E+04	-2,72E-01	1,55E+01	8,40E-04	234,6867135	4,89E-03
3,96E+04	-2,72E-01	1,55E+01	1,23E-02	234,6867135	4,89E-03
3,98E+04	-2,87E-01	1,55E+01	-2,76E-03	247,9072832	4,91E-03
4,00E+04	-2,69E-01	1,55E+01	-6,90E-03	232,094445	4,94E-03
4,02E+04	-2,87E-01	1,54E+01	9,11E-03	247,9072832	4,96E-03
4,04E+04	-2,90E-01	1,54E+01	-1,70E-03	250,4995518	5,01E-03
4,06E+04	-2,78E-01	1,54E+01	8,04E-03	239,9576596	5,04E-03
4,08E+04	-2,90E-01	1,54E+01	1,73E-04	250,4995518	5,06E-03
4,10E+04	-2,78E-01	1,54E+01	-9,57E-03	239,9576596	5,09E-03
4,12E+04	-2,81E-01	1,54E+01	7,06E-04	242,6363371	5,09E-03
4,14E+04	-3,17E-01	1,54E+01	5,24E-03	274,2620135	5,14E-03
4,16E+04	-2,84E-01	1,54E+01	-2,36E-03	245,2286057	5,14E-03
4,18E+04	-2,81E-01	1,54E+01	-1,30E-03	242,6363371	5,19E-03
4,20E+04	-2,81E-01	1,53E+01	4,31E-03	242,6363371	5,21E-03
4,22E+04	-3,11E-01	1,53E+01	-2,36E-03	268,9910675	5,21E-03
4,24E+04	-2,87E-01	1,53E+01	-3,56E-03	247,9072832	5,24E-03
4,26E+04	-3,14E-01	1,53E+01	-3,03E-03	271,583336	5,29E-03
4,28E+04	-2,84E-01	1,53E+01	-1,04E-02	245,2286057	5,32E-03
4,30E+04	-2,93E-01	1,53E+01	-3,03E-03	253,1782293	5,32E-03
4,32E+04	-2,99E-01	1,53E+01	1,77E-03	258,4491753	5,37E-03
4,34E+04	-2,90E-01	1,53E+01	1,73E-04	250,4995518	5,39E-03
4,36E+04	-2,93E-01	1,53E+01	-2,90E-03	253,1782293	5,42E-03
4,38E+04	-3,24E-01	1,53E+01	-2,23E-03	279,5329596	5,44E-03
4,40E+04	-3,20E-01	1,52E+01	-6,23E-03	276,8542821	5,47E-03
4,42E+04	-2,99E-01	1,52E+01	-5,30E-03	258,4491753	5,52E-03
4,44E+04	-2,96E-01	1,52E+01	3,06E-04	255,7704978	5,54E-03
4,46E+04	-2,96E-01	1,52E+01	-3,43E-03	255,7704978	5,57E-03
4,48E+04	-3,08E-01	1,52E+01	-5,30E-03	266,31239	5,57E-03
4,50E+04	-3,11E-01	1,52E+01	-6,10E-03	268,9910675	5,59E-03
4,52E+04	-3,36E-01	1,52E+01	-2,76E-03	290,0748518	5,64E-03
4,54E+04	-3,20E-01	1,52E+01	-7,03E-03	276,8542821	5,59E-03
4,56E+04	-3,05E-01	1,51E+01	-2,50E-03	263,7201214	5,72E-03
4,58E+04	-3,11E-01	1,52E+01	-3,70E-03	268,9910675	5,70E-03
4,60E+04	-3,17E-01	1,52E+01	-8,50E-03	274,2620135	5,70E-03
4,62E+04	-3,17E-01	1,51E+01	-5,70E-03	274,2620135	5,75E-03
4,64E+04	-3,24E-01	1,51E+01	-8,95E-04	279,5329596	5,75E-03
4,66E+04	-3,11E-01	1,51E+01	-1,83E-03	268,9910675	5,82E-03
4,68E+04	-3,20E-01	1,51E+01	-7,56E-03	276,8542821	5,80E-03
4,70E+04	-3,20E-01	1,51E+01	-1,96E-03	276,8542821	5,85E-03
4,72E+04	-3,24E-01	1,51E+01	-3,83E-03	279,5329596	5,85E-03
4,74E+04	-3,54E-01	1,51E+01	-7,03E-03	305,88769	5,90E-03
4,76E+04	-3,24E-01	1,51E+01	-4,23E-03	279,5329596	5,92E-03
4,78E+04	-3,24E-01	1,50E+01	-3,43E-03	279,5329596	5,97E-03
4,80E+04	-3,27E-01	1,50E+01	-8,23E-03	282,1252282	5,97E-03

4,82E+04	-3,48E-01	1,50E+01	-3,30E-03	300,6167439	6,00E-03
4,84E+04	-3,27E-01	1,50E+01	-3,83E-03	282,1252282	6,05E-03
4,86E+04	-3,51E-01	1,50E+01	-8,90E-03	303,2954214	6,05E-03
4,88E+04	-3,88E-01	1,50E+01	-3,96E-03	334,9210978	6,08E-03
4,90E+04	-3,27E-01	1,50E+01	-6,23E-03	282,1252282	6,10E-03
4,92E+04	-3,63E-01	1,50E+01	-4,36E-03	313,8373135	6,13E-03
4,94E+04	-3,57E-01	1,50E+01	-5,83E-03	308,5663675	6,13E-03
4,96E+04	-3,48E-01	1,50E+01	-5,03E-03	300,6167439	6,18E-03
4,98E+04	-3,85E-01	1,50E+01	-5,96E-03	332,2424203	6,18E-03
5,00E+04	-3,45E-01	1,50E+01	-4,76E-03	297,9380664	6,20E-03
5,02E+04	-3,42E-01	1,49E+01	-4,10E-03	295,3457978	6,23E-03
5,04E+04	-3,54E-01	1,49E+01	-6,63E-03	305,88769	6,25E-03
5,06E+04	-3,48E-01	1,49E+01	-5,83E-03	300,6167439	6,30E-03
5,08E+04	-3,42E-01	1,49E+01	-5,96E-03	295,3457978	6,35E-03
5,10E+04	-3,48E-01	1,49E+01	-7,43E-03	300,6167439	6,35E-03
5,12E+04	-3,75E-01	1,49E+01	-6,23E-03	324,3792057	6,38E-03
5,14E+04	-3,45E-01	1,49E+01	-6,76E-03	297,9380664	6,40E-03
5,16E+04	-3,42E-01	1,49E+01	-5,83E-03	295,3457978	6,43E-03
5,18E+04	-3,69E-01	1,49E+01	-5,96E-03	319,1082596	6,45E-03
5,20E+04	-3,94E-01	1,48E+01	-4,10E-03	340,1920439	6,51E-03
5,22E+04	-3,63E-01	1,48E+01	-6,90E-03	313,8373135	6,51E-03
5,24E+04	-3,66E-01	1,48E+01	-4,36E-03	316,4295821	6,51E-03
5,26E+04	-3,57E-01	1,48E+01	-5,16E-03	308,5663675	6,56E-03
5,28E+04	-3,72E-01	1,48E+01	-1,70E-03	321,7005282	6,58E-03
5,30E+04	-3,63E-01	1,48E+01	-5,96E-03	313,8373135	6,58E-03
5,32E+04	-3,85E-01	1,48E+01	-5,43E-03	332,2424203	6,61E-03
5,34E+04	-3,60E-01	1,48E+01	-9,17E-03	311,158636	6,63E-03
5,36E+04	-3,60E-01	1,48E+01	-5,56E-03	311,158636	6,68E-03
5,38E+04	-3,85E-01	1,48E+01	-5,30E-03	332,2424203	6,71E-03
5,40E+04	-3,72E-01	1,47E+01	-6,10E-03	321,7005282	6,73E-03
5,42E+04	-4,00E-01	1,47E+01	-5,16E-03	345,46299	6,78E-03
5,44E+04	-3,82E-01	1,47E+01	-4,50E-03	329,6501518	6,78E-03
5,46E+04	-3,60E-01	1,47E+01	-6,36E-03	311,158636	6,81E-03
5,48E+04	-3,69E-01	1,47E+01	-7,70E-03	319,1082596	6,83E-03
5,50E+04	-3,88E-01	1,47E+01	-4,50E-03	334,9210978	6,89E-03
5,52E+04	-4,09E-01	1,47E+01	-5,43E-03	353,3262046	6,89E-03
5,54E+04	-3,78E-01	1,47E+01	-5,56E-03	326,9714742	6,89E-03
5,56E+04	-3,97E-01	1,47E+01	-4,23E-03	342,7843125	6,94E-03
5,58E+04	-3,82E-01	1,47E+01	-5,56E-03	329,6501518	6,94E-03
5,60E+04	-3,78E-01	1,46E+01	-8,37E-03	326,9714742	6,99E-03
5,62E+04	-3,82E-01	1,46E+01	-5,03E-03	329,6501518	6,99E-03
5,64E+04	-3,78E-01	1,46E+01	-5,83E-03	326,9714742	7,04E-03
5,66E+04	-4,06E-01	1,46E+01	-7,96E-03	350,733936	7,04E-03
5,68E+04	-3,82E-01	1,46E+01	-7,96E-03	329,6501518	7,11E-03

5,70E+04	-4,30E-01	1,46E+01	-5,83E-03	371,8177203	7,11E-03
5,72E+04	-4,03E-01	1,46E+01	-7,56E-03	348,0552585	7,14E-03
5,74E+04	-4,12E-01	1,46E+01	-8,37E-03	356,0048821	7,16E-03
5,76E+04	-3,94E-01	1,46E+01	-4,76E-03	340,1920439	7,16E-03
5,78E+04	-4,00E-01	1,46E+01	-5,16E-03	345,46299	7,21E-03
5,80E+04	-4,18E-01	1,46E+01	-7,03E-03	361,2758282	7,21E-03
5,82E+04	-4,30E-01	1,45E+01	-6,76E-03	371,8177203	7,29E-03
5,84E+04	-3,91E-01	1,45E+01	-8,90E-03	337,5133664	7,32E-03
5,86E+04	-4,30E-01	1,45E+01	-5,56E-03	371,8177203	7,32E-03
5,88E+04	-4,06E-01	1,45E+01	-6,76E-03	350,733936	7,34E-03
5,90E+04	-4,00E-01	1,45E+01	-8,50E-03	345,46299	7,34E-03
5,92E+04	-4,15E-01	1,45E+01	-7,16E-03	358,5971507	7,37E-03
5,94E+04	-4,03E-01	1,45E+01	-7,96E-03	348,0552585	7,42E-03
5,96E+04	-4,12E-01	1,45E+01	-7,43E-03	356,0048821	7,44E-03
5,98E+04	-4,46E-01	1,45E+01	-7,56E-03	385,03829	7,47E-03
6,00E+04	-4,18E-01	1,45E+01	-6,90E-03	361,2758282	7,47E-03
6,02E+04	-4,03E-01	1,44E+01	-6,76E-03	348,0552585	7,52E-03
6,04E+04	-4,52E-01	1,44E+01	-7,16E-03	390,309236	7,54E-03
6,06E+04	-4,33E-01	1,44E+01	-7,96E-03	374,4099889	7,54E-03
6,08E+04	-4,21E-01	1,44E+01	-7,16E-03	363,8680967	7,59E-03
6,10E+04	-4,21E-01	1,44E+01	-7,70E-03	363,8680967	7,62E-03
6,12E+04	-4,15E-01	1,44E+01	-8,50E-03	358,5971507	7,67E-03
6,14E+04	-4,33E-01	1,44E+01	-7,43E-03	374,4099889	7,64E-03
6,16E+04	-4,21E-01	1,44E+01	-6,23E-03	363,8680967	7,67E-03
6,18E+04	-4,30E-01	1,44E+01	-7,56E-03	371,8177203	7,70E-03
6,20E+04	-4,30E-01	1,43E+01	-6,63E-03	371,8177203	7,75E-03
6,22E+04	-4,33E-01	1,43E+01	-6,90E-03	374,4099889	7,80E-03
6,24E+04	-4,46E-01	1,43E+01	-7,56E-03	385,03829	7,80E-03
6,26E+04	-4,36E-01	1,43E+01	-6,50E-03	377,0886664	7,80E-03
6,28E+04	-4,21E-01	1,43E+01	-6,50E-03	363,8680967	7,85E-03
6,30E+04	-4,40E-01	1,43E+01	-6,50E-03	379,7673439	7,85E-03
6,32E+04	-4,46E-01	1,43E+01	-7,43E-03	385,03829	7,90E-03
6,34E+04	-4,40E-01	1,43E+01	-6,63E-03	379,7673439	7,92E-03
6,36E+04	-4,30E-01	1,43E+01	-7,56E-03	371,8177203	7,97E-03
6,38E+04	-4,46E-01	1,43E+01	-7,56E-03	385,03829	7,95E-03
6,40E+04	-4,40E-01	1,43E+01	-7,83E-03	379,7673439	7,97E-03
6,42E+04	-4,36E-01	1,42E+01	-7,16E-03	377,0886664	8,02E-03
6,44E+04	-4,76E-01	1,42E+01	-7,43E-03	411,3930203	8,02E-03
6,46E+04	-4,46E-01	1,42E+01	-5,70E-03	385,03829	8,07E-03
6,48E+04	-4,61E-01	1,42E+01	-5,83E-03	398,1724507	8,10E-03
6,50E+04	-4,46E-01	1,42E+01	-6,50E-03	385,03829	8,10E-03
6,52E+04	-4,76E-01	1,42E+01	-6,90E-03	411,3930203	8,15E-03
6,54E+04	-4,70E-01	1,42E+01	-4,94E-04	406,1220742	8,18E-03
6,56E+04	-4,46E-01	1,42E+01	-7,03E-03	385,03829	8,23E-03

6,58E+04	-4,58E-01	1,41E+01	-7,96E-03	395,5801821	8,25E-03
6,60E+04	-4,58E-01	1,42E+01	-5,16E-03	395,5801821	8,23E-03
6,62E+04	-4,64E-01	1,41E+01	2,31E-03	400,8511282	8,28E-03
6,64E+04	-4,82E-01	1,41E+01	-2,50E-03	416,6639664	8,28E-03
6,66E+04	-4,55E-01	1,41E+01	-7,56E-03	392,9015046	8,33E-03
6,68E+04	-4,43E-01	1,41E+01	-1,16E-03	382,3596125	8,38E-03
6,70E+04	-4,58E-01	1,41E+01	3,92E-05	395,5801821	8,38E-03
6,72E+04	-4,61E-01	1,41E+01	-2,63E-03	398,1724507	8,40E-03
6,74E+04	-4,82E-01	1,41E+01	3,06E-04	416,6639664	8,40E-03
6,76E+04	-4,64E-01	1,41E+01	9,73E-04	400,8511282	8,45E-03
6,78E+04	-4,67E-01	1,41E+01	-3,03E-03	403,4433967	8,48E-03
6,80E+04	-4,61E-01	1,41E+01	-8,95E-04	398,1724507	8,48E-03
6,82E+04	-4,55E-01	1,40E+01	-5,70E-03	392,9015046	8,58E-03
6,84E+04	-4,79E-01	1,40E+01	-1,70E-03	413,9852889	8,53E-03
6,86E+04	-4,88E-01	1,40E+01	-1,30E-03	421,9349125	8,56E-03
6,88E+04	-4,67E-01	1,40E+01	5,73E-04	403,4433967	8,61E-03
6,90E+04	-4,79E-01	1,40E+01	-4,90E-03	413,9852889	8,63E-03
6,92E+04	-4,52E-01	1,40E+01	-1,03E-03	390,309236	8,68E-03
6,94E+04	-4,58E-01	1,40E+01	-7,30E-03	395,5801821	8,66E-03
6,96E+04	-4,97E-01	1,40E+01	-3,30E-03	429,7981271	8,71E-03
6,98E+04	-4,70E-01	1,40E+01	-5,43E-03	406,1220742	8,71E-03
7,00E+04	-4,64E-01	1,39E+01	4,39E-04	400,8511282	8,76E-03
7,02E+04	-4,64E-01	1,39E+01	-3,30E-03	400,8511282	8,78E-03
7,04E+04	-4,79E-01	1,39E+01	-1,06E-02	413,9852889	8,78E-03
7,06E+04	-4,82E-01	1,39E+01	-9,70E-03	416,6639664	8,86E-03
7,08E+04	-4,64E-01	1,39E+01	1,91E-02	400,8511282	8,86E-03
7,10E+04	-4,91E-01	1,39E+01	2,42E-02	424,527181	8,88E-03
7,12E+04	-4,76E-01	1,39E+01	1,51E-02	411,3930203	8,88E-03
7,14E+04	-4,73E-01	1,39E+01	2,57E-02	408,7143428	8,94E-03
7,16E+04	-5,13E-01	1,39E+01	-6,76E-03	443,0186967	8,96E-03
7,18E+04	-4,88E-01	1,39E+01	-2,36E-03	421,9349125	8,96E-03
7,20E+04	-4,88E-01	1,39E+01	1,59E-02	421,9349125	8,99E-03
7,22E+04	-4,76E-01	1,38E+01	5,24E-03	411,3930203	9,06E-03
7,24E+04	-4,79E-01	1,38E+01	1,43E-02	413,9852889	9,06E-03
7,26E+04	-4,82E-01	1,38E+01	1,50E-02	416,6639664	9,09E-03
7,28E+04	-5,10E-01	1,38E+01	1,30E-02	440,3400192	9,11E-03
7,30E+04	-4,73E-01	1,38E+01	1,37E-03	408,7143428	9,16E-03
7,32E+04	-4,97E-01	1,38E+01	1,28E-02	429,7981271	9,14E-03
7,34E+04	-4,85E-01	1,38E+01	7,11E-03	419,2562349	9,16E-03
7,36E+04	-5,07E-01	1,38E+01	1,31E-02	437,7477507	9,21E-03
7,38E+04	-4,88E-01	1,38E+01	1,12E-02	421,9349125	9,21E-03
7,40E+04	-4,82E-01	1,38E+01	1,73E-04	416,6639664	9,24E-03
7,42E+04	-4,94E-01	1,37E+01	1,77E-03	427,2058585	9,26E-03
7,44E+04	-5,07E-01	1,37E+01	1,20E-02	437,7477507	9,29E-03

7,46E+04	-5,19E-01	1,37E+01	9,78E-03	448,2896428	9,34E-03
7,48E+04	-5,25E-01	1,37E+01	2,44E-03	453,5605889	9,37E-03
7,50E+04	-5,01E-01	1,37E+01	-4,63E-03	432,4768046	9,37E-03
7,52E+04	-4,94E-01	1,37E+01	8,71E-03	427,2058585	9,42E-03
7,54E+04	-5,07E-01	1,37E+01	-3,43E-03	437,7477507	9,47E-03
7,56E+04	-5,10E-01	1,37E+01	-2,36E-03	440,3400192	9,47E-03
7,58E+04	-5,37E-01	1,37E+01	8,18E-03	464,102481	9,47E-03
7,60E+04	-5,01E-01	1,36E+01	3,77E-03	432,4768046	9,54E-03
7,62E+04	-5,22E-01	1,36E+01	1,77E-03	450,9683203	9,52E-03
7,64E+04	-4,97E-01	1,36E+01	3,77E-03	429,7981271	9,59E-03
7,66E+04	-5,07E-01	1,36E+01	1,51E-03	437,7477507	9,62E-03
7,68E+04	-5,04E-01	1,36E+01	2,57E-03	435,0690732	9,59E-03
7,70E+04	-4,85E-01	1,36E+01	4,84E-03	419,2562349	9,62E-03
7,72E+04	-4,85E-01	1,36E+01	3,24E-03	419,2562349	9,67E-03
7,74E+04	-5,01E-01	1,36E+01	-2,10E-03	432,4768046	9,69E-03
7,76E+04	-4,85E-01	1,36E+01	3,77E-03	419,2562349	9,75E-03
7,78E+04	-4,94E-01	1,36E+01	1,11E-03	427,2058585	9,75E-03
7,80E+04	-5,37E-01	1,35E+01	-9,97E-03	464,102481	9,77E-03
7,82E+04	-4,97E-01	1,35E+01	1,51E-03	429,7981271	9,77E-03
7,84E+04	-5,07E-01	1,35E+01	-2,90E-03	437,7477507	9,85E-03
7,86E+04	-5,01E-01	1,35E+01	-9,97E-03	432,4768046	9,82E-03
7,88E+04	-5,37E-01	1,35E+01	-5,03E-03	464,102481	9,87E-03
7,90E+04	-4,94E-01	1,35E+01	-4,50E-03	427,2058585	9,87E-03
7,92E+04	-4,94E-01	1,35E+01	-5,16E-03	427,2058585	9,90E-03
7,94E+04	-5,04E-01	1,35E+01	-2,10E-03	435,0690732	9,97E-03
7,96E+04	-4,97E-01	1,35E+01	-1,43E-03	429,7981271	1,00E-02
7,98E+04	-5,22E-01	1,34E+01	-1,96E-03	450,9683203	1,00E-02
8,00E+04	-5,10E-01	1,34E+01	-1,83E-03	440,3400192	1,00E-02
8,02E+04	-5,16E-01	1,34E+01	-2,23E-03	445,6109653	1,00E-02
8,04E+04	-5,22E-01	1,34E+01	-3,16E-03	450,9683203	1,01E-02
8,06E+04	-4,97E-01	1,34E+01	-2,90E-03	429,7981271	1,01E-02
8,08E+04	-5,31E-01	1,34E+01	-2,63E-03	458,8315349	1,01E-02
8,10E+04	-5,10E-01	1,34E+01	4,17E-02	440,3400192	1,02E-02
8,12E+04	-5,16E-01	1,34E+01	7,95E-02	445,6109653	1,02E-02
8,14E+04	-5,16E-01	1,34E+01	6,15E-02	445,6109653	1,02E-02
8,16E+04	-5,55E-01	1,34E+01	6,41E-02	479,9153192	1,02E-02
8,18E+04	-5,40E-01	1,34E+01	2,38E-02	466,7811585	1,02E-02
8,20E+04	-5,07E-01	1,34E+01	2,51E-02	437,7477507	1,03E-02
8,22E+04	-5,34E-01	1,33E+01	7,06E-02	461,5102125	1,03E-02
8,24E+04	-5,19E-01	1,33E+01	3,98E-02	448,2896428	1,03E-02
8,26E+04	-5,31E-01	1,33E+01	4,46E-02	458,8315349	1,03E-02
8,28E+04	-5,28E-01	1,33E+01	4,53E-02	456,2392664	1,04E-02
8,30E+04	-5,37E-01	1,33E+01	2,73E-02	464,102481	1,04E-02
8,32E+04	-5,31E-01	1,33E+01	3,30E-02	458,8315349	1,04E-02

8,34E+04	-5,10E-01	1,33E+01	4,14E-02	440,3400192	1,05E-02
8,36E+04	-5,22E-01	1,33E+01	-3,83E-03	450,9683203	1,05E-02
8,38E+04	-5,55E-01	1,33E+01	3,41E-02	479,9153192	1,05E-02
8,40E+04	-5,31E-01	1,33E+01	8,37E-02	458,8315349	1,05E-02
8,42E+04	-5,37E-01	1,32E+01	1,08E-02	464,102481	1,06E-02
8,44E+04	-5,28E-01	1,32E+01	8,63E-02	456,2392664	1,06E-02
8,46E+04	-5,40E-01	1,32E+01	7,66E-02	466,7811585	1,06E-02
8,48E+04	-5,37E-01	1,32E+01	3,03E-02	464,102481	1,06E-02
8,50E+04	-5,31E-01	1,32E+01	4,10E-02	458,8315349	1,07E-02
8,52E+04	-5,37E-01	1,32E+01	7,18E-02	464,102481	1,07E-02
8,54E+04	-5,31E-01	1,32E+01	6,79E-02	458,8315349	1,07E-02
8,56E+04	-5,28E-01	1,32E+01	2,19E-02	456,2392664	1,07E-02
8,58E+04	-5,46E-01	1,32E+01	3,02E-02	472,0521046	1,08E-02
8,60E+04	-5,52E-01	1,32E+01	3,74E-02	477,3230507	1,08E-02
8,62E+04	-5,62E-01	1,31E+01	3,37E-02	485,1862653	1,08E-02
8,64E+04	-5,65E-01	1,31E+01	2,89E-02	487,8649428	1,08E-02
8,66E+04	-5,40E-01	1,31E+01	1,04E-02	466,7811585	1,09E-02
8,68E+04	-5,40E-01	1,31E+01	1,49E-02	466,7811585	1,09E-02
8,70E+04	-5,62E-01	1,31E+01	7,64E-03	485,1862653	1,09E-02
8,72E+04	-5,77E-01	1,31E+01	-1,70E-03	498,4068349	1,09E-02
8,74E+04	-5,46E-01	1,31E+01	3,70E-02	472,0521046	1,09E-02
8,76E+04	-5,49E-01	1,31E+01	4,17E-02	474,6443732	1,10E-02
8,78E+04	-5,49E-01	1,31E+01	2,38E-02	474,6443732	1,10E-02
8,80E+04	-5,43E-01	1,30E+01	-2,52E-02	469,3734271	1,10E-02
8,82E+04	-5,49E-01	1,30E+01	3,94E-02	474,6443732	1,11E-02
8,84E+04	-5,49E-01	1,30E+01	1,63E-02	474,6443732	1,11E-02
8,86E+04	-5,74E-01	1,30E+01	3,35E-02	495,7281574	1,11E-02
8,88E+04	-5,46E-01	1,30E+01	1,62E-02	472,0521046	1,11E-02
8,90E+04	-5,80E-01	1,30E+01	3,14E-02	500,9991035	1,11E-02
8,92E+04	-5,92E-01	1,30E+01	7,91E-03	511,5409956	1,12E-02
8,94E+04	-5,55E-01	1,30E+01	9,91E-03	479,9153192	1,12E-02
8,96E+04	-5,83E-01	1,30E+01	-1,65E-02	503,677781	1,12E-02
8,98E+04	-6,17E-01	1,30E+01	1,73E-02	532,7111889	1,12E-02
9,00E+04	-5,62E-01	1,29E+01	-1,30E-03	485,1862653	1,13E-02
9,02E+04	-5,65E-01	1,29E+01	2,57E-03	487,8649428	1,13E-02
9,04E+04	-5,65E-01	1,29E+01	2,19E-02	487,8649428	1,13E-02
9,06E+04	-5,65E-01	1,29E+01	-1,29E-02	487,8649428	1,13E-02
9,08E+04	-5,68E-01	1,29E+01	1,71E-02	490,4572114	1,14E-02
9,10E+04	-6,01E-01	1,29E+01	1,83E-02	519,4906192	1,14E-02
9,12E+04	-5,80E-01	1,29E+01	1,24E-02	500,9991035	1,14E-02
9,14E+04	-5,83E-01	1,29E+01	1,74E-02	503,677781	1,14E-02
9,16E+04	-5,71E-01	1,29E+01	1,59E-02	493,1358889	1,15E-02
9,18E+04	-5,68E-01	1,29E+01	1,64E-03	490,4572114	1,15E-02
9,20E+04	-5,77E-01	1,28E+01	2,17E-03	498,4068349	1,15E-02

9,22E+04	-5,74E-01	1,28E+01	1,35E-02	495,7281574	1,15E-02
9,24E+04	-5,80E-01	1,28E+01	-4,63E-03	500,9991035	1,16E-02
9,26E+04	-5,80E-01	1,28E+01	-2,50E-03	500,9991035	1,16E-02
9,28E+04	-5,71E-01	1,28E+01	1,11E-02	493,1358889	1,16E-02
9,30E+04	-5,80E-01	1,28E+01	4,39E-04	500,9991035	1,17E-02
9,32E+04	-6,29E-01	1,28E+01	1,06E-02	543,253081	1,17E-02
9,34E+04	-5,80E-01	1,28E+01	2,31E-03	500,9991035	1,17E-02
9,36E+04	-6,01E-01	1,28E+01	8,40E-04	519,4906192	1,18E-02
9,38E+04	-5,86E-01	1,28E+01	-8,37E-03	506,2700496	1,18E-02
9,40E+04	-6,07E-01	1,28E+01	4,39E-04	524,7615653	1,18E-02
9,42E+04	-5,86E-01	1,28E+01	1,77E-03	506,2700496	1,18E-02
9,44E+04	-6,04E-01	1,27E+01	1,37E-03	522,0828878	1,18E-02
9,46E+04	-5,95E-01	1,27E+01	6,04E-03	514,2196732	1,19E-02
9,48E+04	-6,23E-01	1,27E+01	-8,23E-03	537,9821349	1,19E-02
9,50E+04	-5,83E-01	1,27E+01	-9,42E-05	503,677781	1,19E-02
9,52E+04	-5,95E-01	1,27E+01	2,31E-03	514,2196732	1,19E-02
9,54E+04	-5,86E-01	1,27E+01	3,24E-03	506,2700496	1,20E-02
9,56E+04	-6,10E-01	1,27E+01	4,04E-03	527,4402428	1,20E-02
9,58E+04	-6,04E-01	1,27E+01	1,37E-03	522,0828878	1,20E-02

Tabella 11: Foglio di calcolo Excel per un provino

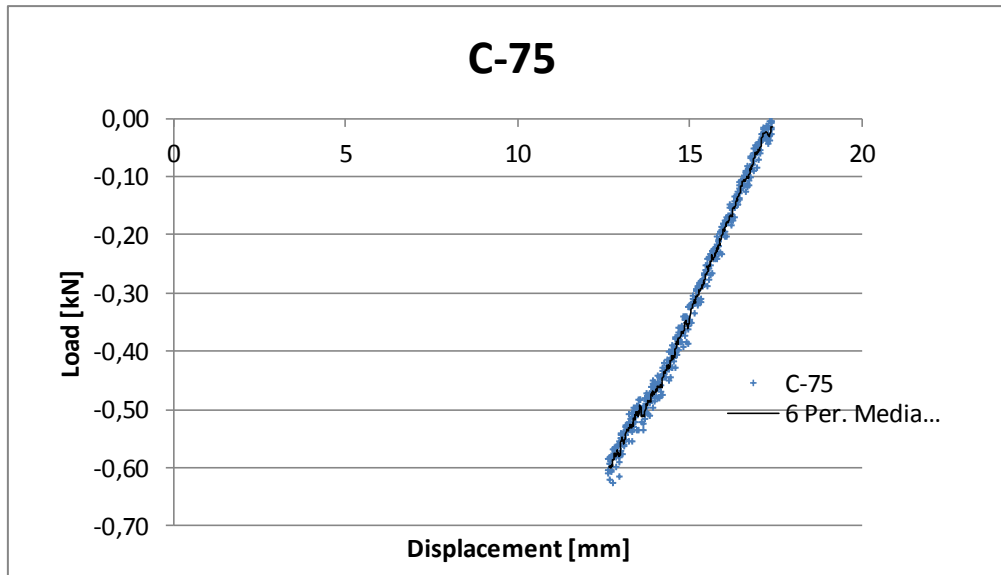


Figura 45: Grafici utilizzati nell'elaborazione dati

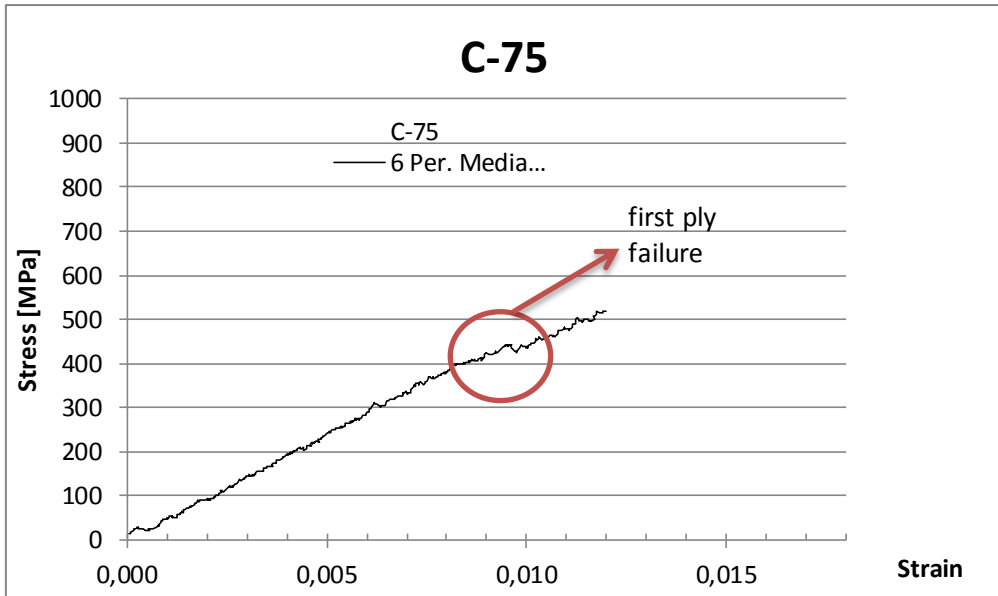


Figura 46: Grafico utilizzato nell'elaborazione dati.

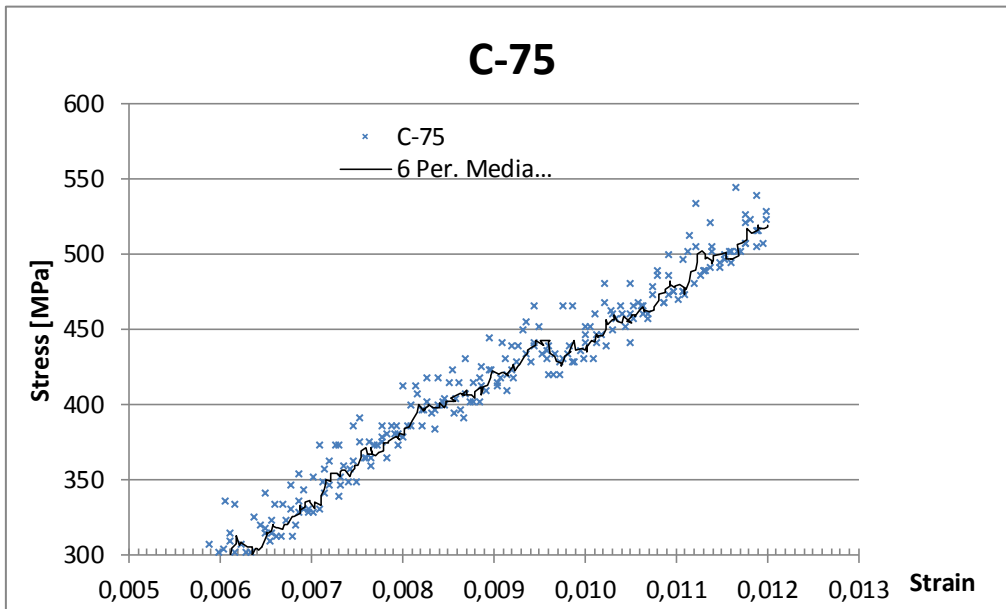


Figura 47: Grafico che rappresenta il punto di primo cedimento fpf.

Eseguita l'analisi dei dati per ogni provino vengono riportati nella seguente tabella X di riepilogo, in questo esempio è la tabella di riepilogo per il 50% Tg.

Provino	Tempo invecchi	Larghezza b	Spessore h	Apertura L	Forza F [KN]	Flessione s [mm]	Velocità di prova	Stress di Flessione	Deformazione	Tipo di rottura
A-92	1,00E-144	19,8	2,6	80	6,29E-01	4,24	0,05	563,654	1,03E-02	Compressione
C-83	1,00E-144	19,1	2,7	80	7,26E-01	4,81	0,05	625,945	1,22E-02	Compressione
D-65	1,00E-144	19,1	2,65	80	7,20E-01	5,42	0,05	644,331	1,35E-02	Compressione
D-2	1,00E-144	19,4	2,6	80	5,98E-01	4,17	0,05	547,276	1,02E-02	Compressione + tr
C-93	1,00E-144	18,75	2,75	80	5,92E-01	4,33	0,05	500,998	1,12E-02	Compressione
A-67	1,00E-144	19	2,7	80	5,83E-01	3,68	0,05	505,003	9,32E-03	Compressione
C-59	1,00E-144	18,3	2,7	80	5,65E-01	4,11	0,05	507,859	1,04E-02	Compressione
D-32	6	18,8	2,65	80	6,81E-01	5,46	0,05	618,529	0,013564688	Compressione
C-75	6	19,05	2,7	80	5,22E-01	3,76	0,05	450,968	0,0095175	Compressione
D-96	6	19,35	2,7	80	7,45E-01	5,87	0,05	633,426	0,014858438	Compressione
C-92	6	19,5	2,7	80	6,29E-01	4,24	0,05	530,716	0,0107325	Compressione
B-89	6	20,2	2,65	80	6,38E-01	4,29	0,05	539,539	0,010657969	Compressione
C-36	24	19,45	2,6	80	5,95E-01	4,56	0,05	543,131	0,011115	Compressione
D-78	24	19	2,6	80	5,92E-01	4,3	0,05	553,099	0,01048125	Compressione
A-77	24	19,2	2,65	80	7,36E-01	5,55	0,05	654,592	0,013788281	Compressione
A-66	24	19,5	2,7	80	7,39E-01	5,42	0,05	623,404	0,013719375	Compressione
B-1	24	19,85	2,65	80	8,42E-01	6,16	0,05	725,096	0,01530375	Compressione
B-54	72	18,9	2,55	80	5,10E-01	4,26	0,05	497,586	0,010184063	Compressione
D-11	72	19,35	2,7	80	7,26E-01	5,28	0,05	617,858	0,013365	Compressione
A-102	72	20,5	2,6	80	6,01E-01	4,5	0,05	520,595	0,01096875	Compressione
C-100	72	19,9	2,65	80	5,55E-01	3,98	0,05	476,916	0,009887813	Compressione
A-12	72	19,1	2,65	80	6,50E-01	5,02	0,05	581,526	0,012471563	Compressione
B-72	168	19,2	2,6	80	6,47E-01	5,16	0,05	598,188	0,0125775	Compressione
B-81	168	19,1	2,6	80	6,47E-01	4,99	0,05	601,320	0,012163125	Compressione
D-19	168	19,1	2,65	80	7,05E-01	5,34	0,05	630,733	0,013266563	Compressione
C-62	168	19,25	2,7	80	7,08E-01	5,04	0,05	605,419	0,0127575	Compressione
C-23	168	19,4	2,65	80	6,99E-01	5,27	0,05	615,606	0,013092656	Compressione
B-36	360	19,5	2,65	80	8,03E-01	6,03	0,05	703,322	0,014980781	Compressione
A-37	360	20,3	2,65	80	5,40E-01	3,87	0,05	454,724	0,009614531	Compressione
A-93	360	18,55	2,7	80	6,04E-01	4,2	0,05	536,155	0,01063125	Compressione
C-48	360	19,4	2,6	80	6,01E-01	4,46	0,05	550,113	0,01087125	Compressione
A-71	360	18,7	2,7	80	6,74E-01	4,97	0,05	593,649	0,012580313	Compressione
B-49	720	19,4	2,55	80	5,01E-01	4,32	0,05	476,106	0,0103275	Compressione
B-95	720	19,75	2,6	80	7,26E-01	5,01	0,05	652,805	0,012211875	Compressione
D-71	720	19	2,6	80	6,01E-01	4,98	0,05	561,694	0,01213875	Compressione
D-4	720	19,3	2,65	80	6,32E-01	4,59	0,05	559,298	0,011403281	Compressione
A-24	720	18,35	2,65	80	5,40E-01	4,02	0,05	503,046	0,009987188	Compressione
A-3	2160	17,4	2,6	80	5,46E-01	4,29	0,05	557,335	1,05E-02	Compressione
D-84	2160	19,2	2,65	80	6,71E-01	4,72	0,05	597,544	1,17E-02	Compressione
C-32	2160	18,7	2,65	80	5,31E-01	4,06	0,05	485,224	1,01E-02	Compressione
C-7	2160	19,1	2,65	80	5,77E-01	3,9	0,05	516,038	9,69E-03	Compressione
C-27	2160	19,1	2,65	80	6,71E-01	4,76	0,05	600,672	1,18E-02	Compressione

Tabella 12: Tabella di riepilogo per la prova a 50% Tg

Nei grafici di riepilogo si sono utilizzati i dati medi in funzione dell'intervallo di confidenza. Successivamente vengono riepilogati i grafici di variazione della resistenza a flessione in funzione della %Tg scelta.

➤ Prova di Riferimento

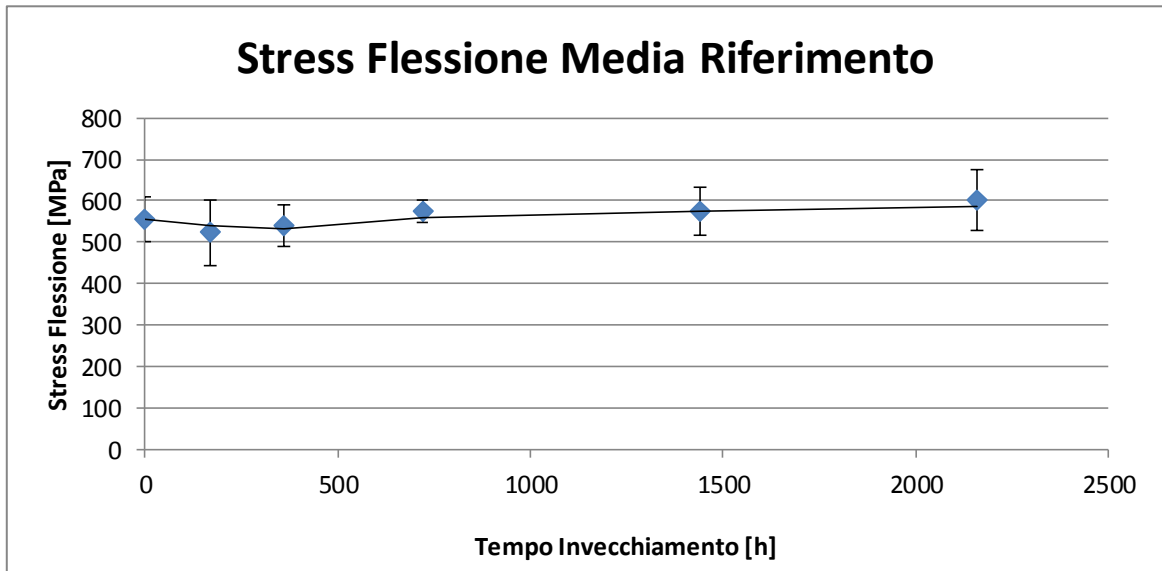


Figura 48: Andamento della resistenza a flessione nel caso del riferimento

Nel caso del riferimento si nota una costanza dei dati dovuta al non invecchiamento ad alte temperature. Per il lungo periodo di invecchiamento si può avere un aumento delle caratteristiche meccaniche data dalla polimerizzazione residua.

➤ Prova a 50% Tg (90°C)

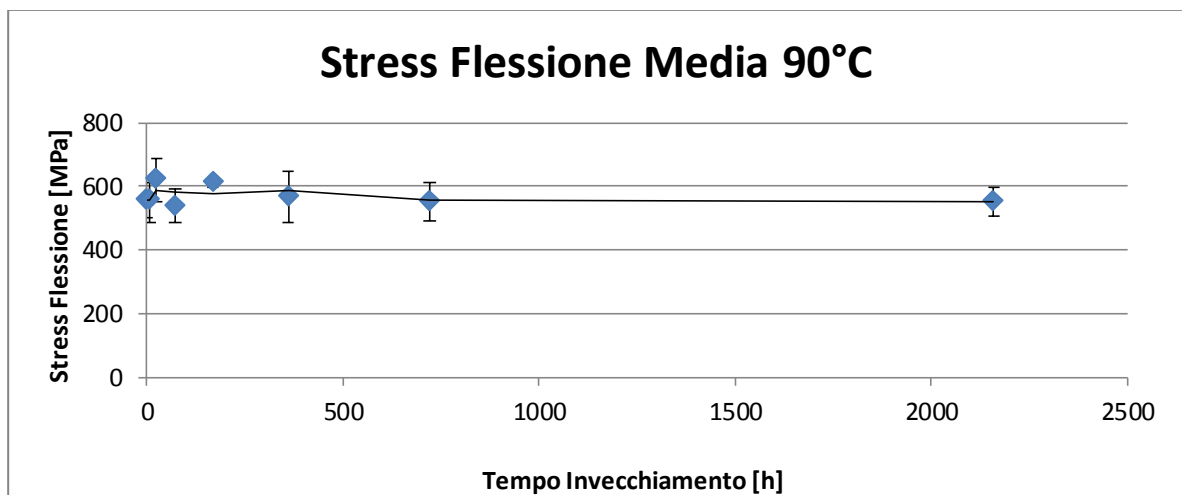


Figura 49: Andamento della resistenza a flessione nel caso a 50% Tg

Dai valori medi si nota un aumento delle proprietà meccaniche nelle prime 6h, questo porta a pensare che la polimerizzazione anche dopo un ciclo di post cura, della durata di 2h, non sia completa; quindi si ha un incremento delle proprietà meccaniche dovute alla completa polimerizzazione. Infine si può notare come l'andamento generale è circa costante.

➤ Prova a 50% Tg -20 °C

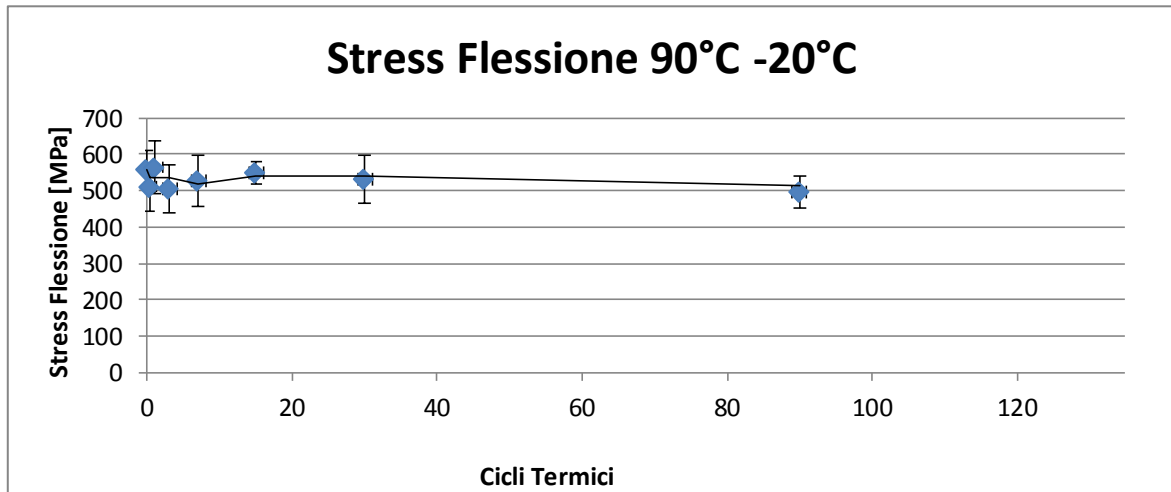


Figura 50: Andamento della resistenza a flessione nel caso a 50% Tg -20°C

Questa prova è un invecchiamento a fatica termica con cicli di 12h partendo da una temperatura di -20°C. Il ciclo di fatica termica va a creare un maggiore stress sulla matrice che si ripercuote sulle proprietà meccaniche. Dalla figura X si nota un aumento delle proprietà meccaniche dovute al raggiungimento della completa polimerizzazione, in questo caso a 24 h e non a 6h come per la 50% Tg. All'aumentare del tempo di invecchiamento si ha un calo più marcato rispetto a 50% Tg.

➤ Prova a 75% Tg (135°C)

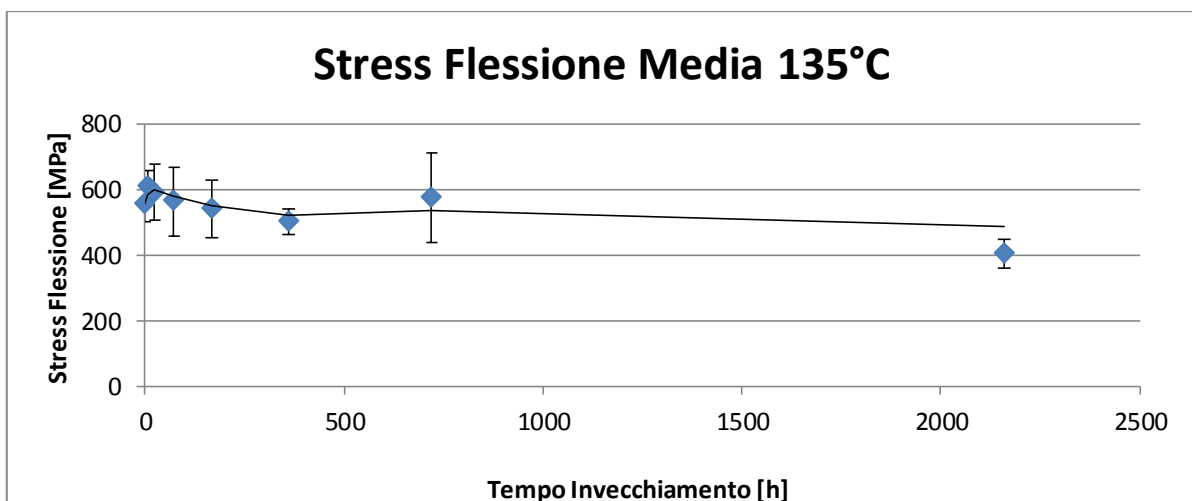


Figura 51: Andamento della resistenza a flessione nel caso a 50% Tg -20°C

Nella figura 51 si denota un aumento delle proprietà meccaniche nelle prime 6h per poi avere un continuo calo fino al valore di 400 MPa. Si nota che all'aumentare della temperatura di invecchiamento la completa polimerizzazione avviene in tempi più brevi.

➤ Prova a 100% Tg S (180°C S)

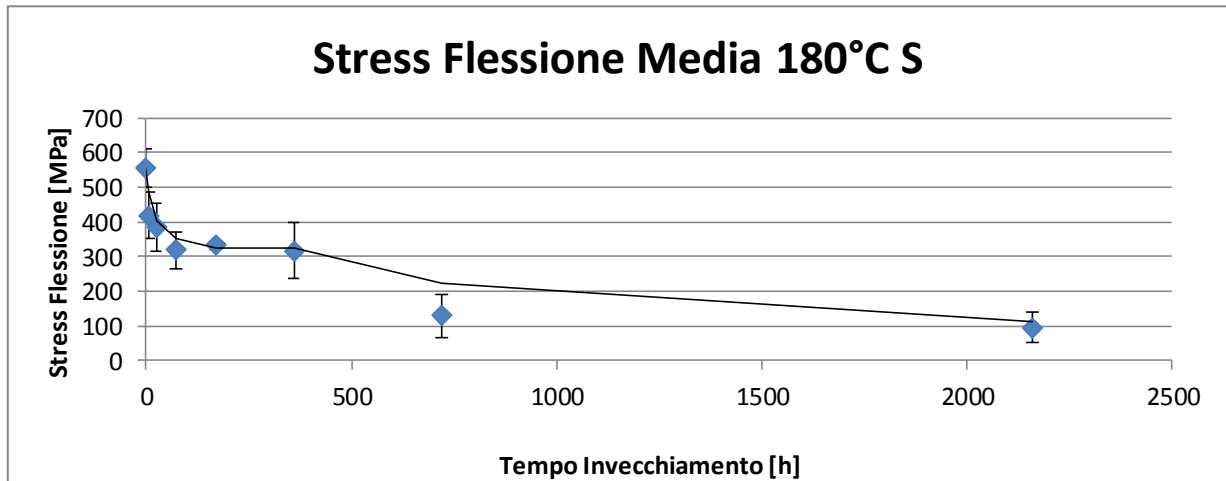


Figura 52: Andamento della resistenza a flessione nel caso a 50% Tg -20°C

Questa prova non è da ritenersi attendibile dato che il forno ha avuto un aumento repentino della temperatura arrivando a 230°C per alcune ore. Questo aumento della temperatura ha portato a valori di resistenza a flessione inattendibili. La prova è stata utile per capire come un aumento repentino della temperatura anche per un periodo di tempo breve porta ad una compromissione del composito.

➤ Prova a 100% Tg C (180°C C)

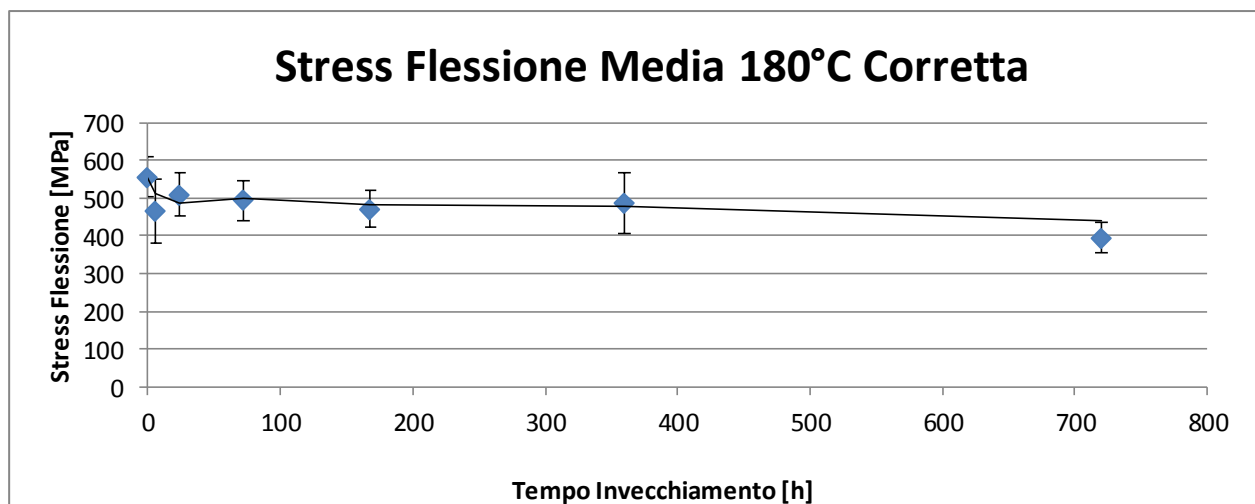


Figura 53: Andamento della resistenza a flessione nel caso a 100% Tg

In questa prova la temperatura di invecchiamento è corretta. Dal grafico si può notare che, utilizzando una temperatura di invecchiamento pari alla tg, si ha un decadimento delle proprietà di resistenza a flessione che aumenta con l'aumentare del tempo di invecchiamento.

➤ Prova a 110% Tg (200°C)

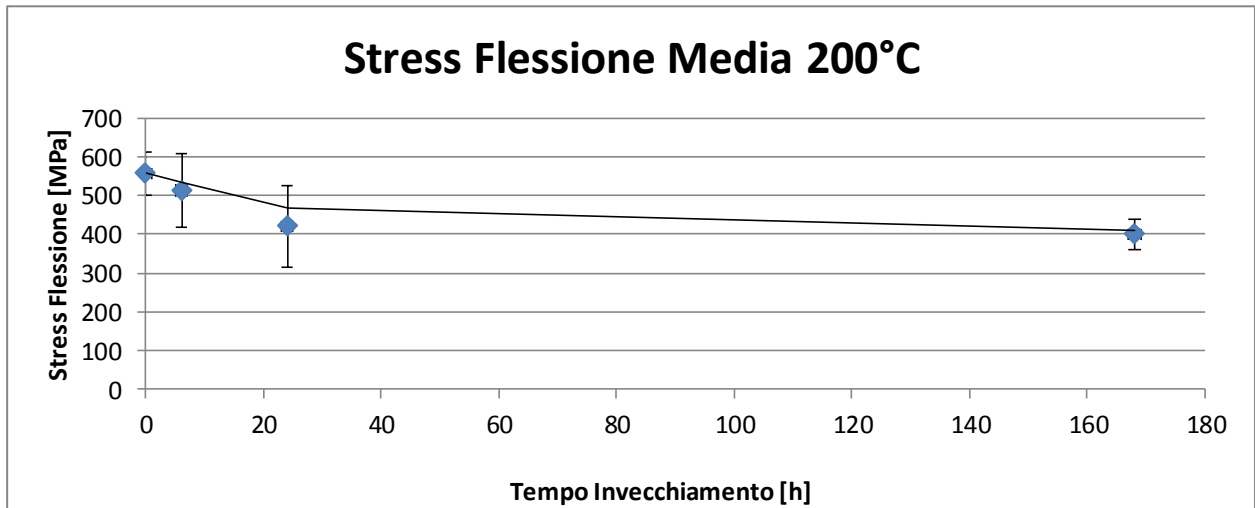


Figura 54: Andamento della resistenza a flessione nel caso a 110% Tg

La temperatura utilizzata in questo caso è superiore al 100% Tg di conseguenza il calo della proprietà meccaniche deve essere maggiore; questo è dovuto al fatto che si è utilizzata una resina epossidica e termoindurente che per temperature superiore alla Tg si ha un deterioramento. Nei dati riportati nella figura 54 si nota un calo sempre più marcato.

➤ Prova a 145% Tg (260°C)

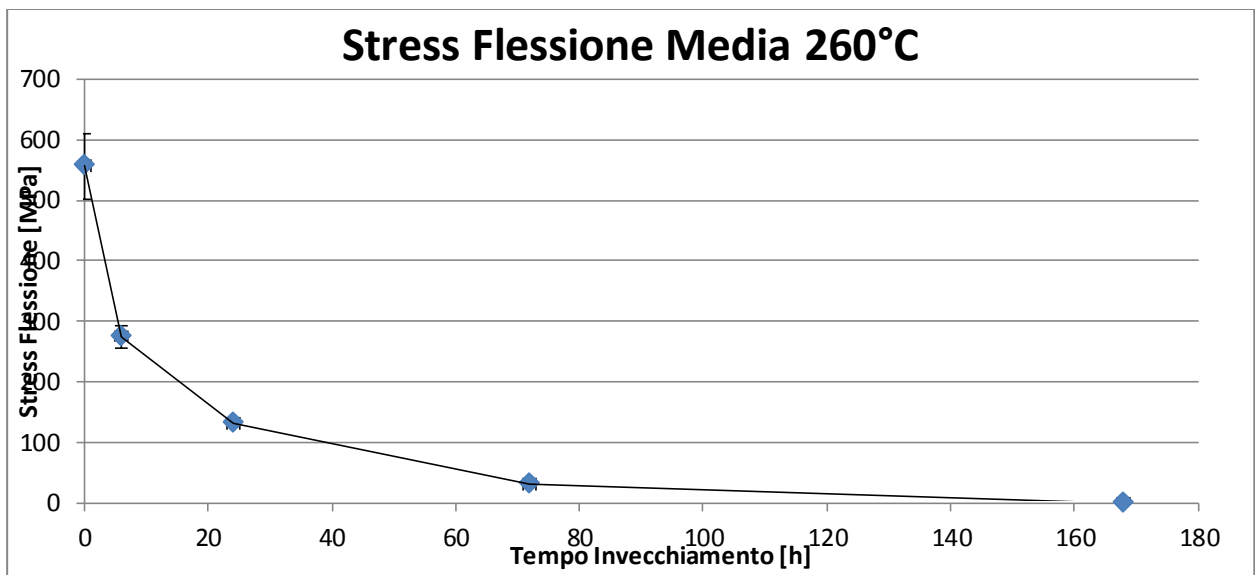


Figura 55: Andamento della resistenza a flessione nel caso a 145% Tg

Dalla figura 55 si nota che per altissime temperature si ha un deterioramento del composito repentino entro poche ore dall'esposizione. Per un tempo di invecchiamento di 168h la resina risulta deterioramento della matrice che comporta la delaminazione dei fogli di prepregs.

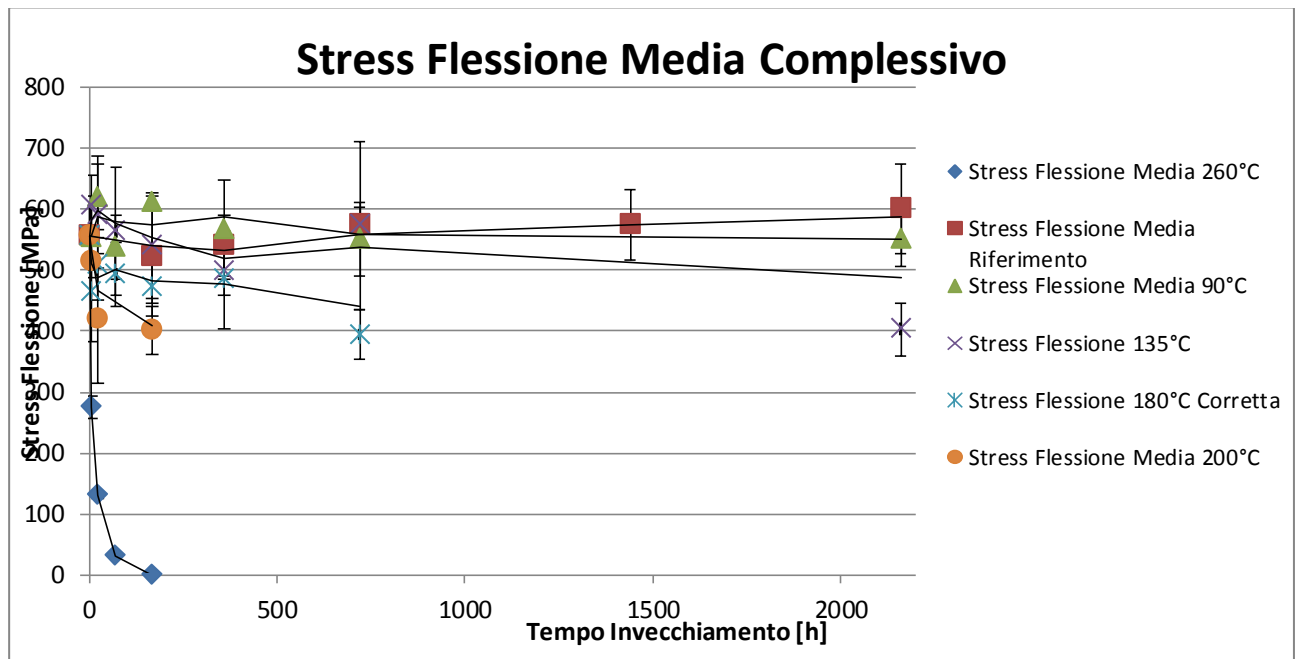


Figura 56: Riepilogo Stress di flessione media

Nella figura 56 si nota un andamento coerente con le aspettative con l'aumento della temperatura di invecchiamento le proprietà di resistenza a flessione del composito calano. Per temperature superiore al 100% Tg si ha un crollo della resistenza del composito.

4.3. Verifica a taglio interlaminare

La prova di taglio interlaminare è stata scelta per verificare l'incollaggio tra le lamine e analizzarne il peggioramento dovuto all'invecchiamento termico. Da questa prova si determina la resistenza al taglio interlaminare da parte della matrice.

In questo caso si è utilizzata, nell'elaborazione dei dati, la massima forza ottenuta a rottura. La prova è stata effettuata seguendo la normativa UNI EN ISO 14130.

I dati ottenuti dalla macchina sono i seguenti:

- Tempo t [ms]
- Forza F [kN]
- LVDT [mm]

Si è utilizzata una velocità di prova di 0,01 mm/sec.

Il posizionamento del provino è avvenuto come in figura:

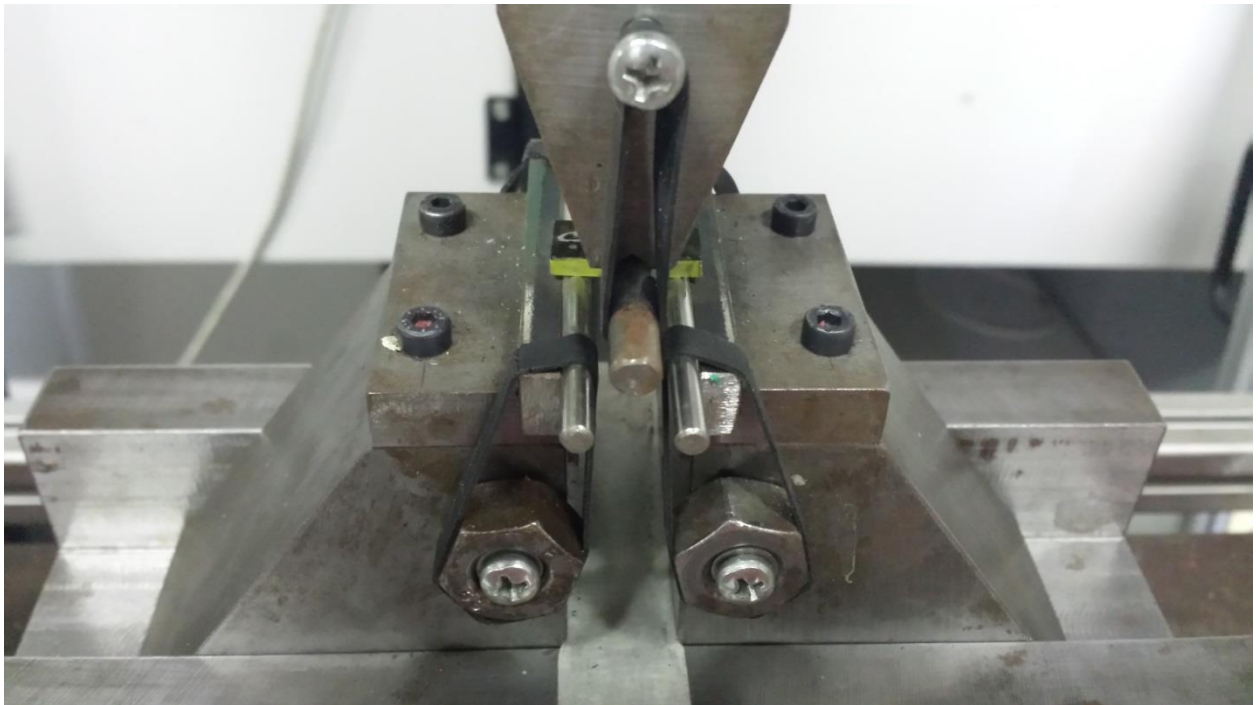


Figura 57: Posizionamento del provino del taglio interlaminare

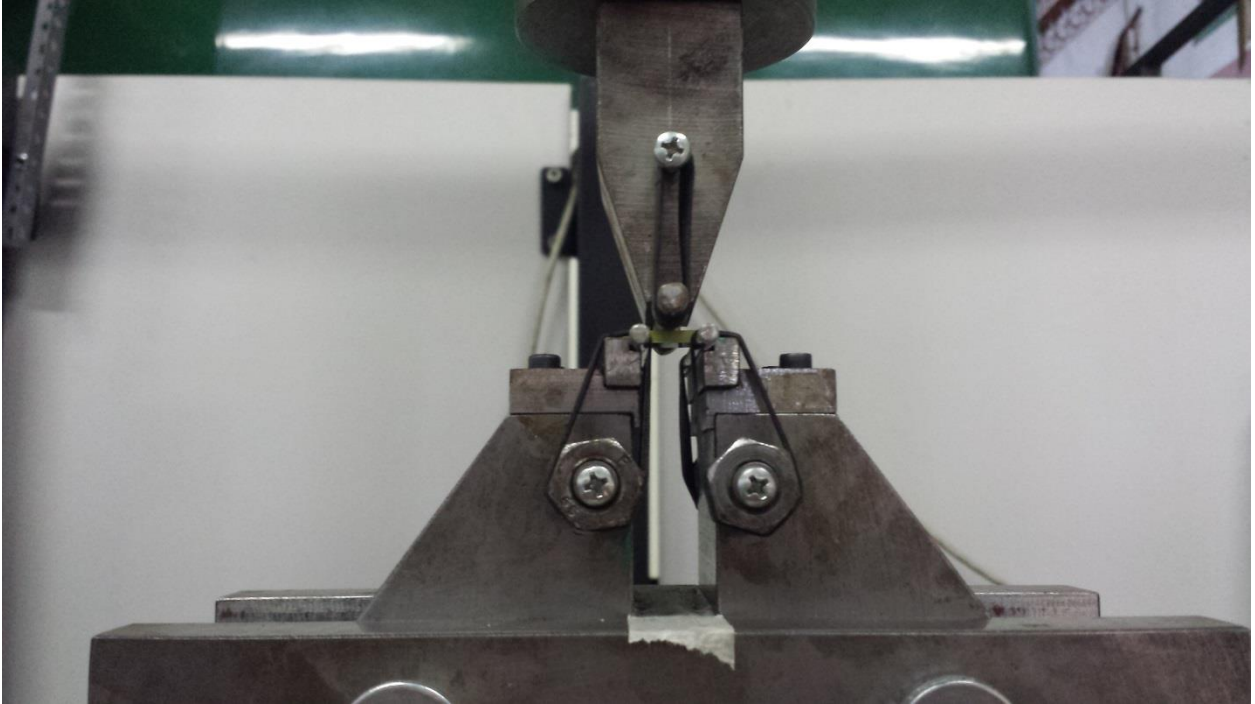


Figura 58: Posizionamento del provino del taglio interlaminare

Rispettando i seguenti vincoli da normativa:

- $R_1 = 5 \pm 0,2$ [mm]
- $R_2 = 2 \pm 0,2$ [mm]
- $L = 5h \pm 0,3$ [mm]

Il provino è stato colorato di giallo per accentuare il modo di rottura.



Figura 59: Colorazione spessore del provino per la prova di taglio interlaminare da ambo i lati

Una volta terminata la prova si è verificata se la rottura era accettabile, confrontandola con i metodi di rottura accettati dalla normativa.

Per l'elaborazione è stata utilizzata la seguente formula:

Calcolo dello sforzo di taglio interlaminare τ

$$\tau = \frac{3F}{4bh} \quad [\text{MPa}]$$

Dove:

τ = sforzo di taglio interlaminare [MPa]

F = forza alla rottura o forza massima [N]

h = spessore del provino [mm]

b = larghezza del provino [mm]

4.3.1. Risultati della prova di taglio interlaminare

Una volta finite le prove sono stati analizzati i dati raccolti tramite l'avvalersi di fogli di calcolo Excel, da cui sono stati prodotti vari grafici che vanno a dimostrare il comportamento dei provini in funzione di τ/ε .

Di seguito si riporta un esempio di foglio Excel per un solo provino.

Time [ms]	load [kN]	LVDT [mm]	Delta L [mm]	Stress [MPa]	LVDT Tr. [mm]
2,00E+02	3,66E-02	3,35E+01	2,30E-03	-1,056346154	-1,60E-01
4,00E+02	3,05E-02	3,34E+01	-3,44E-03	-0,880384615	-1,40E-01
6,00E+02	1,83E-02	3,34E+01	4,30E-04	-0,528173077	-1,40E-01
8,00E+02	3,36E-02	3,34E+01	1,90E-03	-0,968365385	-1,50E-01
1,00E+03	-1,22E-02	3,34E+01	-1,17E-03	0,352211538	-1,40E-01
1,20E+03	-9,16E-03	3,34E+01	-3,04E-03	0,264086538	-1,30E-01
1,40E+03	-3,05E-03	3,34E+01	6,97E-04	0,088038462	-1,50E-01
1,60E+03	2,14E-02	3,34E+01	2,97E-05	-0,616153846	-1,30E-01
1,80E+03	1,53E-02	3,34E+01	4,43E-03	-0,440192308	-1,10E-01
2,00E+03	2,14E-02	3,34E+01	-1,17E-03	-0,616153846	-1,40E-01
2,20E+03	3,05E-02	3,34E+01	2,43E-03	-0,880384615	-1,40E-01
2,40E+03	2,75E-02	3,34E+01	-1,44E-03	-0,792403846	-1,10E-01
2,60E+03	3,05E-02	3,34E+01	2,70E-03	-0,880384615	-1,30E-01
2,80E+03	6,10E-03	3,34E+01	3,10E-03	-0,176076923	-1,20E-01
3,00E+03	3,66E-02	3,34E+01	-1,84E-03	-1,056346154	-1,10E-01
3,20E+03	3,05E-03	3,34E+01	3,63E-03	-0,088038462	-1,30E-01
3,40E+03	2,75E-02	3,34E+01	7,77E-03	-0,792403846	-1,10E-01
3,60E+03	0,00E+00	3,34E+01	6,70E-03	0	-1,20E-01
3,80E+03	-9,16E-03	3,34E+01	7,77E-03	0,264086538	-1,10E-01
4,00E+03	1,83E-02	3,34E+01	5,37E-03	-0,528173077	-1,10E-01
4,20E+03	1,53E-02	3,34E+01	-3,84E-03	-0,440192308	-1,10E-01
4,40E+03	1,53E-02	3,34E+01	8,30E-03	-0,440192308	-1,10E-01
4,60E+03	3,05E-02	3,34E+01	7,77E-03	-0,880384615	-1,00E-01
4,80E+03	1,53E-02	3,34E+01	-3,17E-03	-0,440192308	-1,10E-01
5,00E+03	2,75E-02	3,34E+01	4,43E-03	-0,792403846	-1,10E-01
5,20E+03	3,36E-02	3,34E+01	2,70E-03	-0,968365385	-9,00E-02
5,40E+03	-1,22E-02	3,34E+01	9,64E-04	0,352211538	-9,00E-02
5,60E+03	3,36E-02	3,34E+01	2,83E-03	-0,968365385	-9,00E-02
5,80E+03	1,22E-02	3,34E+01	5,90E-03	-0,352211538	-9,00E-02
6,00E+03	3,36E-02	3,34E+01	4,03E-03	-0,968365385	-9,00E-02
6,20E+03	2,14E-02	3,34E+01	1,36E-03	-0,616153846	-9,00E-02
6,40E+03	9,16E-03	3,34E+01	2,56E-03	-0,264086538	-9,00E-02
6,60E+03	-9,16E-03	3,34E+01	3,77E-03	0,264086538	-8,00E-02
6,80E+03	3,05E-03	3,34E+01	5,10E-03	-0,088038462	-8,00E-02
7,00E+03	3,05E-03	3,34E+01	5,37E-03	-0,088038462	-8,00E-02

7,20E+03	0,00E+00	3,34E+01	4,30E-03	0	-9,00E-02
7,40E+03	3,05E-02	3,34E+01	6,97E-04	-0,880384615	-8,00E-02
7,60E+03	2,14E-02	3,34E+01	3,50E-03	-0,616153846	-6,00E-02
7,80E+03	1,83E-02	3,34E+01	-2,77E-03	-0,528173077	-8,00E-02
8,00E+03	3,36E-02	3,34E+01	1,63E-04	-0,968365385	-6,00E-02
8,20E+03	3,05E-02	3,34E+01	1,90E-03	-0,880384615	-7,00E-02
8,40E+03	-1,22E-02	3,34E+01	2,43E-03	0,352211538	-7,00E-02
8,60E+03	1,83E-02	3,34E+01	4,83E-03	-0,528173077	-7,00E-02
8,80E+03	2,44E-02	3,34E+01	2,83E-03	-0,704134615	-7,00E-02
9,00E+03	-1,22E-02	3,34E+01	1,23E-03	0,352211538	-7,00E-02
9,20E+03	2,44E-02	3,34E+01	2,03E-03	-0,704134615	-6,00E-02
9,40E+03	1,22E-02	3,34E+01	-9,04E-04	-0,352211538	-6,00E-02
9,60E+03	3,05E-02	3,34E+01	4,30E-04	-0,880384615	-6,00E-02
9,80E+03	2,44E-02	3,33E+01	1,63E-04	-0,704134615	-5,00E-02
1,00E+04	1,83E-02	3,34E+01	-1,44E-03	-0,528173077	-6,00E-02
1,02E+04	-1,22E-02	3,34E+01	2,03E-03	0,352211538	-7,00E-02
1,04E+04	-3,05E-03	3,34E+01	-1,04E-03	0,088038462	-6,00E-02
1,06E+04	3,05E-03	3,33E+01	3,50E-03	-0,088038462	-4,00E-02
1,08E+04	1,53E-02	3,33E+01	1,23E-03	-0,440192308	-4,00E-02
1,10E+04	2,14E-02	3,33E+01	1,63E-03	-0,616153846	-5,00E-02
1,12E+04	1,53E-02	3,33E+01	4,83E-03	-0,440192308	-4,00E-02
1,14E+04	2,14E-02	3,33E+01	4,57E-03	-0,616153846	-2,00E-02
1,16E+04	-1,22E-02	3,33E+01	2,96E-03	0,352211538	-4,00E-02
1,18E+04	0,00E+00	3,33E+01	4,70E-03	0	-3,00E-02
1,20E+04	1,22E-02	3,33E+01	2,83E-03	-0,352211538	-3,00E-02
1,22E+04	-2,75E-02	3,33E+01	7,23E-03	0,792403846	-2,00E-02
1,24E+04	2,44E-02	3,33E+01	1,76E-03	-0,704134615	-3,00E-02
1,26E+04	1,83E-02	3,33E+01	7,10E-03	-0,528173077	-3,00E-02
1,28E+04	0,00E+00	3,33E+01	1,10E-03	0	-2,00E-02
1,30E+04	0,00E+00	3,33E+01	9,64E-04	0	-3,00E-02
1,32E+04	6,10E-03	3,33E+01	3,50E-03	-0,176076923	-3,00E-02
1,34E+04	0,00E+00	3,33E+01	-3,57E-03	0	-1,00E-02
1,36E+04	-2,14E-02	3,33E+01	3,90E-03	0,616153846	-2,00E-02
1,38E+04	2,75E-02	3,33E+01	2,83E-03	-0,792403846	2,00E-02
1,40E+04	9,16E-03	3,33E+01	2,16E-03	-0,264086538	-1,00E-02
1,42E+04	3,05E-03	3,33E+01	4,83E-03	-0,088038462	0,00E+00
1,44E+04	1,83E-02	3,33E+01	5,23E-03	-0,528173077	-2,00E-02
1,46E+04	-3,05E-03	3,33E+01	3,23E-03	0,088038462	1,00E-02
1,48E+04	-2,44E-02	3,33E+01	2,03E-03	0,704134615	0,00E+00
1,50E+04	2,14E-02	3,33E+01	2,70E-03	-0,616153846	1,00E-02
1,52E+04	3,05E-03	3,33E+01	3,10E-03	-0,088038462	0,00E+00
1,54E+04	-3,05E-03	3,33E+01	8,30E-04	0,088038462	0,00E+00
1,56E+04	-3,05E-02	3,33E+01	2,96E-03	0,880384615	1,00E-02
1,58E+04	-3,05E-03	3,33E+01	5,23E-03	0,088038462	1,00E-02

1,60E+04	9,16E-03	3,33E+01	8,30E-04	-0,264086538	1,00E-02
1,62E+04	-1,83E-02	3,33E+01	3,37E-03	0,528173077	0,00E+00
1,64E+04	-1,83E-02	3,33E+01	2,83E-03	0,528173077	2,00E-02
1,66E+04	-3,05E-03	3,33E+01	8,30E-04	0,088038462	3,00E-02
1,68E+04	-1,53E-02	3,33E+01	3,10E-03	0,440192308	2,00E-02
1,70E+04	-4,88E-02	3,33E+01	3,77E-03	1,408557692	2,00E-02
1,72E+04	-2,75E-02	3,33E+01	-5,04E-04	0,792403846	3,00E-02
1,74E+04	-9,16E-03	3,33E+01	2,83E-03	0,264086538	3,00E-02
1,76E+04	-2,14E-02	3,33E+01	1,63E-04	0,616153846	2,00E-02
1,78E+04	-5,80E-02	3,33E+01	2,16E-03	1,6725	3,00E-02
1,80E+04	-2,44E-02	3,33E+01	-5,04E-04	0,704134615	4,00E-02
1,82E+04	-2,75E-02	3,33E+01	2,03E-03	0,792403846	3,00E-02
1,84E+04	-3,97E-02	3,33E+01	3,10E-03	1,144326923	4,00E-02
1,86E+04	-3,97E-02	3,33E+01	3,63E-03	1,144326923	3,00E-02
1,88E+04	-6,41E-02	3,33E+01	8,30E-04	1,84875	4,00E-02
1,90E+04	-4,58E-02	3,33E+01	3,50E-03	1,320576923	4,00E-02
1,92E+04	-5,80E-02	3,32E+01	9,64E-04	1,6725	5,00E-02
1,94E+04	-4,27E-02	3,33E+01	2,70E-03	1,232307692	4,00E-02
1,96E+04	-2,75E-02	3,32E+01	3,23E-03	0,792403846	6,00E-02
1,98E+04	-7,94E-02	3,32E+01	3,37E-03	2,288942308	6,00E-02
2,00E+04	-6,41E-02	3,32E+01	-1,97E-03	1,84875	5,00E-02
2,02E+04	-1,01E-01	3,32E+01	-1,30E-03	2,904807692	6,00E-02
2,04E+04	-9,77E-02	3,32E+01	4,03E-03	2,817115385	5,00E-02
2,06E+04	-1,07E-01	3,32E+01	3,50E-03	3,080769231	6,00E-02
2,08E+04	-7,63E-02	3,32E+01	2,70E-03	2,200673077	5,00E-02
2,10E+04	-6,10E-02	3,32E+01	-1,84E-03	1,760769231	5,00E-02
2,12E+04	-7,94E-02	3,32E+01	3,23E-03	2,288942308	6,00E-02
2,14E+04	-1,13E-01	3,32E+01	1,50E-03	3,256730769	6,00E-02
2,16E+04	-9,16E-02	3,32E+01	1,63E-04	2,640865385	7,00E-02
2,18E+04	-1,37E-01	3,32E+01	5,63E-04	3,960576923	8,00E-02
2,20E+04	-1,16E-01	3,32E+01	6,30E-03	3,346153846	6,00E-02
2,22E+04	-1,28E-01	3,32E+01	-2,91E-03	3,698076923	7,00E-02
2,24E+04	-1,04E-01	3,32E+01	6,97E-03	2,994230769	7,00E-02
2,26E+04	-9,77E-02	3,32E+01	1,07E-02	2,817115385	9,00E-02
2,28E+04	-1,10E-01	3,32E+01	1,18E-02	3,170192308	8,00E-02
2,30E+04	-1,13E-01	3,32E+01	1,34E-02	3,256730769	8,00E-02
2,32E+04	-1,22E-01	3,32E+01	1,52E-02	3,522115385	8,00E-02
2,34E+04	-1,47E-01	3,32E+01	-4,51E-03	4,225961538	9,00E-02
2,36E+04	-1,34E-01	3,32E+01	6,03E-03	3,874038462	9,00E-02
2,38E+04	-1,31E-01	3,32E+01	9,37E-03	3,784615385	1,00E-01
2,40E+04	-1,80E-01	3,32E+01	1,24E-02	5,195192308	9,00E-02
2,42E+04	-1,80E-01	3,32E+01	1,43E-02	5,195192308	9,00E-02
2,44E+04	-1,59E-01	3,32E+01	1,15E-02	4,577884615	8,00E-02
2,46E+04	-1,53E-01	3,32E+01	8,17E-03	4,401923077	1,10E-01

2,48E+04	-1,92E-01	3,32E+01	1,06E-02	5,547115385	9,00E-02
2,50E+04	-1,65E-01	3,32E+01	1,00E-02	4,753846154	1,00E-01
2,52E+04	-1,86E-01	3,32E+01	-9,04E-04	5,371153846	1,10E-01
2,54E+04	-1,92E-01	3,32E+01	1,15E-02	5,547115385	1,10E-01
2,56E+04	-1,98E-01	3,32E+01	1,47E-02	5,723076923	8,00E-02
2,58E+04	-1,83E-01	3,32E+01	-2,64E-03	5,281730769	1,10E-01
2,60E+04	-2,11E-01	3,32E+01	1,35E-02	6,075	1,10E-01
2,62E+04	-2,01E-01	3,32E+01	1,03E-02	5,809615385	1,20E-01
2,64E+04	-2,47E-01	3,32E+01	8,97E-03	7,130769231	1,10E-01
2,66E+04	-2,11E-01	3,32E+01	1,30E-02	6,075	1,30E-01
2,68E+04	-2,41E-01	3,32E+01	1,38E-02	6,954807692	1,30E-01
2,70E+04	-2,75E-01	3,32E+01	5,77E-03	7,924038462	1,20E-01
2,72E+04	-2,44E-01	3,32E+01	1,35E-02	7,041346154	1,10E-01
2,74E+04	-2,81E-01	3,32E+01	-8,51E-03	8,1	1,30E-01
2,76E+04	-2,81E-01	3,32E+01	1,07E-02	8,1	1,10E-01
2,78E+04	-2,69E-01	3,32E+01	5,10E-03	7,748076923	1,20E-01
2,80E+04	-2,66E-01	3,32E+01	1,16E-02	7,658653846	1,40E-01
2,82E+04	-2,93E-01	3,32E+01	1,16E-02	8,451923077	1,30E-01
2,84E+04	-2,81E-01	3,32E+01	6,70E-03	8,1	1,30E-01
2,86E+04	-3,05E-01	3,32E+01	1,27E-02	8,803846154	1,20E-01
2,88E+04	-3,11E-01	3,32E+01	1,42E-02	8,979807692	1,30E-01
2,90E+04	-3,14E-01	3,32E+01	7,10E-03	9,066346154	1,30E-01
2,92E+04	-3,45E-01	3,32E+01	1,63E-03	9,946153846	1,40E-01
2,94E+04	-3,57E-01	3,32E+01	2,03E-03	10,30096154	1,40E-01
2,96E+04	-3,69E-01	3,32E+01	8,03E-03	10,65288462	1,40E-01
2,98E+04	-3,57E-01	3,32E+01	9,90E-03	10,30096154	1,40E-01
3,00E+04	-3,51E-01	3,31E+01	1,63E-03	10,125	1,50E-01
3,02E+04	-3,72E-01	3,31E+01	4,57E-03	10,73942308	1,60E-01
3,04E+04	-3,97E-01	3,31E+01	7,37E-03	11,44326923	1,50E-01
3,06E+04	-3,82E-01	3,31E+01	3,10E-03	11,00480769	1,50E-01
3,08E+04	-4,30E-01	3,31E+01	1,90E-03	12,4125	1,60E-01
3,10E+04	-4,30E-01	3,31E+01	3,50E-03	12,4125	1,50E-01
3,12E+04	-4,58E-01	3,31E+01	-3,71E-04	13,20576923	1,60E-01
3,14E+04	-4,24E-01	3,31E+01	6,43E-03	12,23653846	1,60E-01
3,16E+04	-4,30E-01	3,31E+01	5,50E-03	12,4125	1,70E-01
3,18E+04	-4,58E-01	3,31E+01	3,90E-03	13,20576923	1,80E-01
3,20E+04	-4,61E-01	3,31E+01	1,76E-03	13,29230769	1,80E-01
3,22E+04	-5,34E-01	3,31E+01	4,43E-03	15,40673077	1,60E-01
3,24E+04	-4,88E-01	3,31E+01	4,30E-04	14,08557692	1,70E-01
3,26E+04	-4,91E-01	3,31E+01	5,63E-03	14,17211538	1,80E-01
3,28E+04	-5,28E-01	3,31E+01	1,50E-03	15,23076923	1,80E-01
3,30E+04	-5,40E-01	3,31E+01	2,03E-03	15,58269231	1,90E-01
3,32E+04	-5,52E-01	3,31E+01	1,50E-03	15,93461538	1,80E-01
3,34E+04	-5,62E-01	3,31E+01	1,90E-03	16,19711538	1,80E-01

3,36E+04	-5,86E-01	3,31E+01	-1,04E-03	16,90096154	1,80E-01
3,38E+04	-5,86E-01	3,31E+01	-1,70E-03	16,90096154	1,90E-01
3,40E+04	-6,17E-01	3,31E+01	3,50E-03	17,78365385	1,90E-01
3,42E+04	-5,80E-01	3,31E+01	4,30E-04	16,725	2,00E-01
3,44E+04	-5,80E-01	3,31E+01	9,64E-04	16,725	1,80E-01
3,46E+04	-6,23E-01	3,31E+01	1,90E-03	17,95961538	1,90E-01
3,48E+04	-6,17E-01	3,31E+01	2,43E-03	17,78365385	1,90E-01
3,50E+04	-6,20E-01	3,31E+01	1,63E-04	17,87019231	2,00E-01
3,52E+04	-6,20E-01	3,31E+01	1,63E-04	17,87019231	2,00E-01
3,54E+04	-6,32E-01	3,31E+01	2,03E-03	18,22211538	2,00E-01
3,56E+04	-6,04E-01	3,31E+01	1,10E-03	17,42884615	2,00E-01
3,58E+04	-6,53E-01	3,31E+01	-1,57E-03	18,83942308	2,00E-01
3,60E+04	-6,81E-01	3,31E+01	2,03E-03	19,62980769	1,90E-01
3,62E+04	-6,78E-01	3,31E+01	9,64E-04	19,54326923	2,10E-01
3,64E+04	-7,11E-01	3,31E+01	-3,71E-04	20,5125	2,10E-01
3,66E+04	-7,36E-01	3,31E+01	6,97E-04	21,21634615	1,90E-01
3,68E+04	-7,17E-01	3,31E+01	2,70E-03	20,68846154	2,10E-01
3,70E+04	-7,39E-01	3,31E+01	1,63E-04	21,30288462	2,30E-01
3,72E+04	-7,48E-01	3,31E+01	2,03E-03	21,56826923	2,20E-01
3,74E+04	-7,51E-01	3,31E+01	-1,57E-03	21,65480769	2,20E-01
3,76E+04	-7,42E-01	3,31E+01	2,03E-03	21,39230769	2,30E-01
3,78E+04	-7,66E-01	3,31E+01	2,30E-03	22,09615385	2,20E-01
3,80E+04	-6,99E-01	3,31E+01	-1,57E-03	20,16057692	2,10E-01
3,82E+04	-7,87E-01	3,31E+01	-1,70E-03	22,71346154	2,20E-01
3,84E+04	-8,18E-01	3,31E+01	1,76E-03	23,59326923	2,30E-01
3,86E+04	-8,27E-01	3,31E+01	2,03E-03	23,85576923	2,40E-01
3,88E+04	-8,33E-01	3,31E+01	1,23E-03	24,03173077	2,30E-01
3,90E+04	-8,33E-01	3,31E+01	3,50E-03	24,03173077	2,30E-01
3,92E+04	-8,64E-01	3,31E+01	2,70E-03	24,91153846	2,30E-01
3,94E+04	-8,70E-01	3,31E+01	8,30E-04	25,09038462	2,40E-01
3,96E+04	-8,55E-01	3,31E+01	3,50E-03	24,64903846	2,30E-01
3,98E+04	-8,76E-01	3,30E+01	4,70E-03	25,26634615	2,50E-01
4,00E+04	-9,28E-01	3,31E+01	1,24E-02	26,76057692	2,40E-01
4,02E+04	-9,00E-01	3,31E+01	2,12E-02	25,97019231	2,40E-01
4,04E+04	-9,28E-01	3,31E+01	4,57E-03	26,76057692	2,40E-01
4,06E+04	-9,52E-01	3,30E+01	2,27E-02	27,46442308	2,50E-01
4,08E+04	-9,58E-01	3,31E+01	-5,17E-03	27,64326923	2,40E-01
4,10E+04	-9,64E-01	3,30E+01	1,03E-02	27,81923077	2,50E-01
4,12E+04	-9,61E-01	3,30E+01	3,63E-03	27,72980769	2,50E-01
4,14E+04	-9,64E-01	3,30E+01	2,86E-02	27,81923077	2,50E-01
4,16E+04	-9,98E-01	3,30E+01	9,64E-04	28,78557692	2,60E-01
4,18E+04	-1,00E+00	3,30E+01	1,96E-02	28,96153846	2,60E-01
4,20E+04	-1,01E+00	3,30E+01	2,54E-02	29,13461538	2,70E-01
4,22E+04	-9,89E-01	3,30E+01	3,35E-02	28,52307692	2,60E-01

4,24E+04	-1,07E+00	3,30E+01	-1,22E-02	30,80769231	2,70E-01
4,26E+04	-1,06E+00	3,30E+01	1,99E-02	30,46153846	2,70E-01
4,28E+04	-1,06E+00	3,30E+01	2,34E-02	30,63461538	2,70E-01
4,30E+04	-1,06E+00	3,30E+01	3,06E-02	30,54807692	2,70E-01
4,32E+04	-1,07E+00	3,30E+01	3,75E-02	30,72115385	2,90E-01
4,34E+04	-1,11E+00	3,30E+01	1,20E-02	32,04807692	2,80E-01
4,36E+04	-1,15E+00	3,30E+01	2,10E-02	33,08653846	2,90E-01
4,38E+04	-1,13E+00	3,30E+01	3,08E-02	32,56730769	2,90E-01
4,40E+04	-1,16E+00	3,30E+01	2,80E-02	33,375	2,80E-01
4,42E+04	-1,15E+00	3,30E+01	2,31E-02	33,08653846	2,80E-01
4,44E+04	-1,18E+00	3,30E+01	-6,24E-03	33,98076923	2,90E-01
4,46E+04	-1,16E+00	3,30E+01	2,39E-02	33,375	2,80E-01
4,48E+04	-1,16E+00	3,30E+01	-1,12E-02	33,54807692	2,90E-01
4,50E+04	-1,24E+00	3,30E+01	2,31E-02	35,74038462	2,90E-01
4,52E+04	-1,23E+00	3,30E+01	-7,57E-03	35,48076923	2,90E-01
4,54E+04	-1,24E+00	3,30E+01	2,51E-02	35,74038462	3,00E-01
4,56E+04	-1,24E+00	3,30E+01	7,37E-03	35,82692308	3,10E-01
4,58E+04	-1,27E+00	3,30E+01	2,32E-02	36,51923077	3,00E-01
4,60E+04	-1,26E+00	3,30E+01	1,94E-02	36,43269231	3,00E-01
4,62E+04	-1,25E+00	3,30E+01	8,03E-03	36,17307692	3,00E-01
4,64E+04	-1,26E+00	3,30E+01	9,10E-03	36,34615385	2,90E-01
4,66E+04	-1,32E+00	3,30E+01	1,88E-02	37,93269231	3,10E-01
4,68E+04	-1,30E+00	3,30E+01	1,79E-02	37,5	3,10E-01
4,70E+04	-1,28E+00	3,30E+01	4,83E-03	36,80769231	3,00E-01
4,72E+04	-1,32E+00	3,30E+01	9,10E-03	38,19230769	3,20E-01
4,74E+04	-1,33E+00	3,30E+01	1,23E-03	38,30769231	3,00E-01
4,76E+04	-1,36E+00	3,30E+01	1,47E-02	39,17307692	3,10E-01
4,78E+04	-1,36E+00	3,30E+01	7,50E-03	39,34615385	3,20E-01
4,80E+04	-1,35E+00	3,30E+01	1,00E-02	38,82692308	3,20E-01
4,82E+04	-1,35E+00	3,30E+01	5,50E-03	38,91346154	3,20E-01
4,84E+04	-1,40E+00	3,30E+01	5,37E-03	40,5	3,20E-01
4,86E+04	-1,43E+00	3,30E+01	1,22E-02	41,19230769	3,40E-01
4,88E+04	-1,39E+00	3,30E+01	1,02E-02	40,15384615	3,40E-01
4,90E+04	-1,43E+00	3,30E+01	7,10E-03	41,36538462	3,30E-01
4,92E+04	-1,43E+00	3,30E+01	1,50E-03	41,10576923	3,40E-01
4,94E+04	-1,44E+00	3,30E+01	7,77E-03	41,45192308	3,30E-01
4,96E+04	-1,45E+00	3,30E+01	-3,57E-03	41,74038462	3,40E-01
4,98E+04	-1,47E+00	3,30E+01	1,03E-02	42,25961538	3,40E-01
5,00E+04	-1,43E+00	3,29E+01	9,10E-03	41,36538462	3,50E-01
5,02E+04	-1,47E+00	3,30E+01	-2,37E-04	42,25961538	3,40E-01
5,04E+04	-1,48E+00	3,29E+01	7,90E-03	42,69230769	3,50E-01
5,06E+04	-1,43E+00	3,30E+01	7,23E-03	41,36538462	3,30E-01
5,08E+04	-1,42E+00	3,30E+01	-1,97E-03	40,93269231	3,40E-01
5,10E+04	-1,47E+00	3,30E+01	6,03E-03	42,34615385	3,40E-01

5,12E+04	-1,49E+00	3,29E+01	2,16E-03	42,86538462	3,50E-01
5,14E+04	-1,43E+00	3,29E+01	3,10E-03	41,27884615	3,70E-01
5,16E+04	-1,46E+00	3,29E+01	3,90E-03	42,08653846	3,70E-01
5,18E+04	-1,46E+00	3,29E+01	5,90E-03	42,08653846	3,60E-01
5,20E+04	-1,51E+00	3,29E+01	6,83E-03	43,58653846	3,60E-01
5,22E+04	-1,48E+00	3,29E+01	2,03E-03	42,69230769	3,60E-01
5,24E+04	-1,48E+00	3,29E+01	3,10E-03	42,60576923	3,60E-01
5,26E+04	-1,48E+00	3,29E+01	2,30E-03	42,69230769	3,70E-01
5,28E+04	-1,49E+00	3,30E+01	1,76E-03	42,95192308	3,40E-01
5,30E+04	-1,50E+00	3,29E+01	2,96E-03	43,21153846	3,70E-01
5,32E+04	-1,56E+00	3,29E+01	1,76E-03	45,05769231	3,60E-01
5,34E+04	-1,55E+00	3,29E+01	2,83E-03	44,625	3,80E-01
5,36E+04	-1,53E+00	3,29E+01	3,50E-03	44,19230769	3,80E-01
5,38E+04	-1,58E+00	3,29E+01	2,16E-03	45,60576923	3,60E-01
5,40E+04	-1,55E+00	3,29E+01	1,90E-03	44,79807692	3,80E-01
5,42E+04	-1,55E+00	3,29E+01	1,63E-04	44,625	3,90E-01
5,44E+04	-1,58E+00	3,29E+01	3,90E-03	45,43269231	4,00E-01
5,46E+04	-1,58E+00	3,29E+01	2,97E-04	45,51923077	3,80E-01
5,48E+04	-1,59E+00	3,29E+01	6,97E-04	45,86538462	4,00E-01
5,50E+04	-1,39E+00	3,29E+01	2,03E-03	40,15384615	3,90E-01
5,52E+04	-1,39E+00	3,29E+01	1,63E-04	39,95192308	4,10E-01
5,54E+04	-1,40E+00	3,29E+01	-1,17E-03	40,5	4,00E-01
5,56E+04	-1,39E+00	3,29E+01	-5,04E-04	40,15384615	4,10E-01

Tabella 13: Foglio Excel utilizzato per l'analisi dei dati della prova di taglio interlaminare.

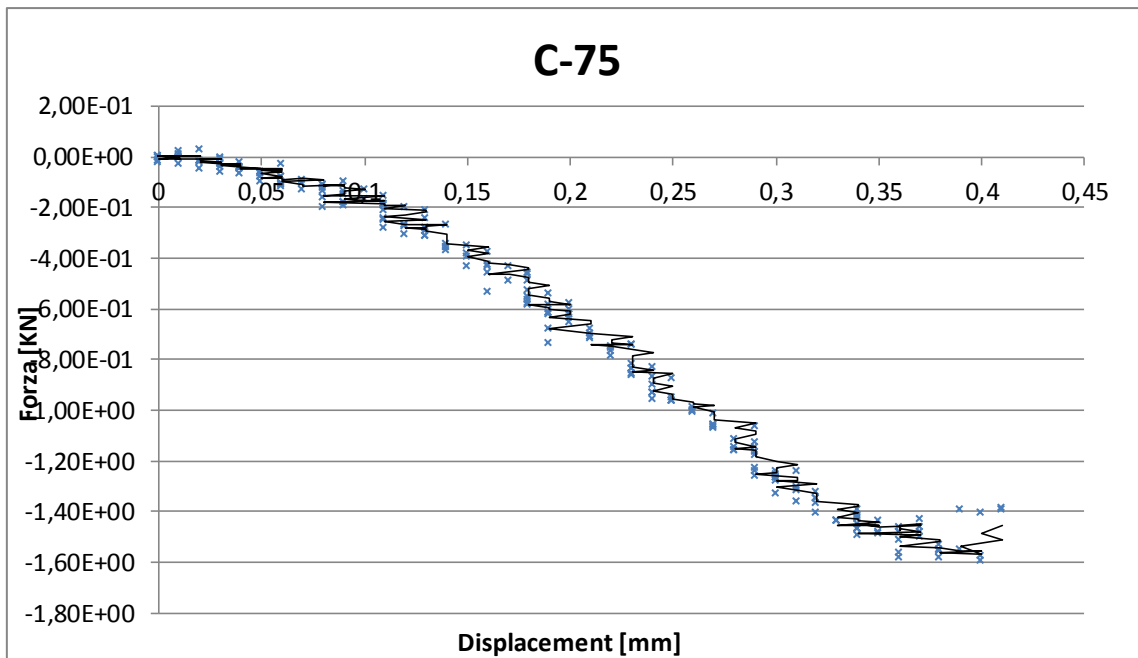
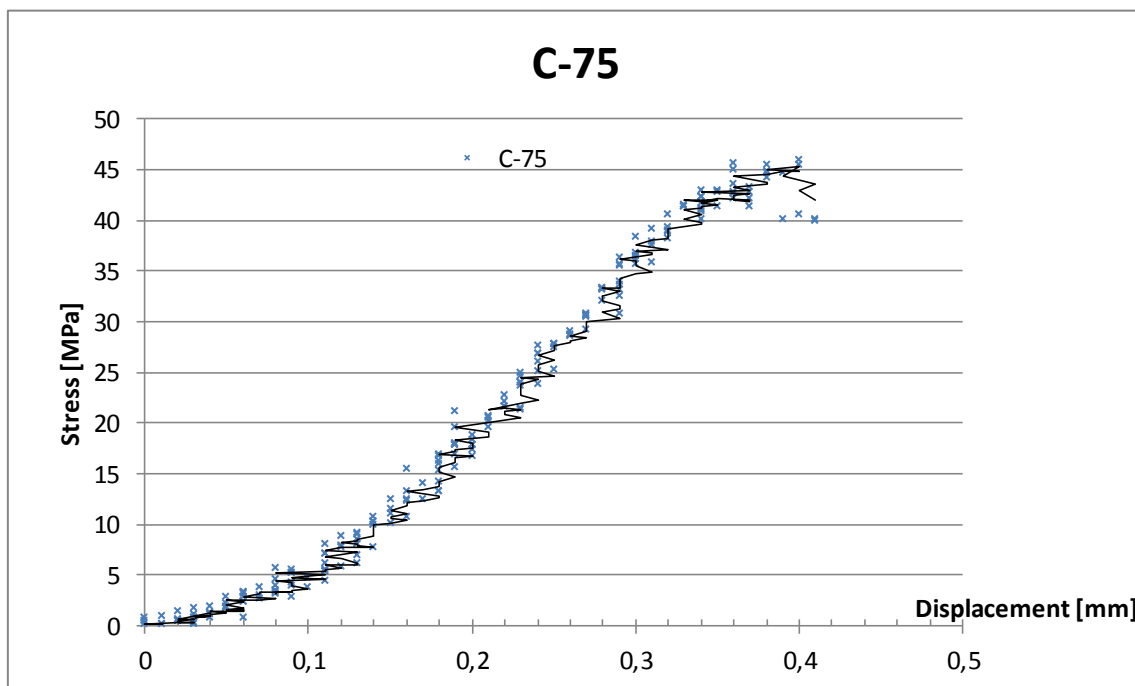


Figura 60: Grafico che rappresenta l'andamento della forza in funzione della freccia



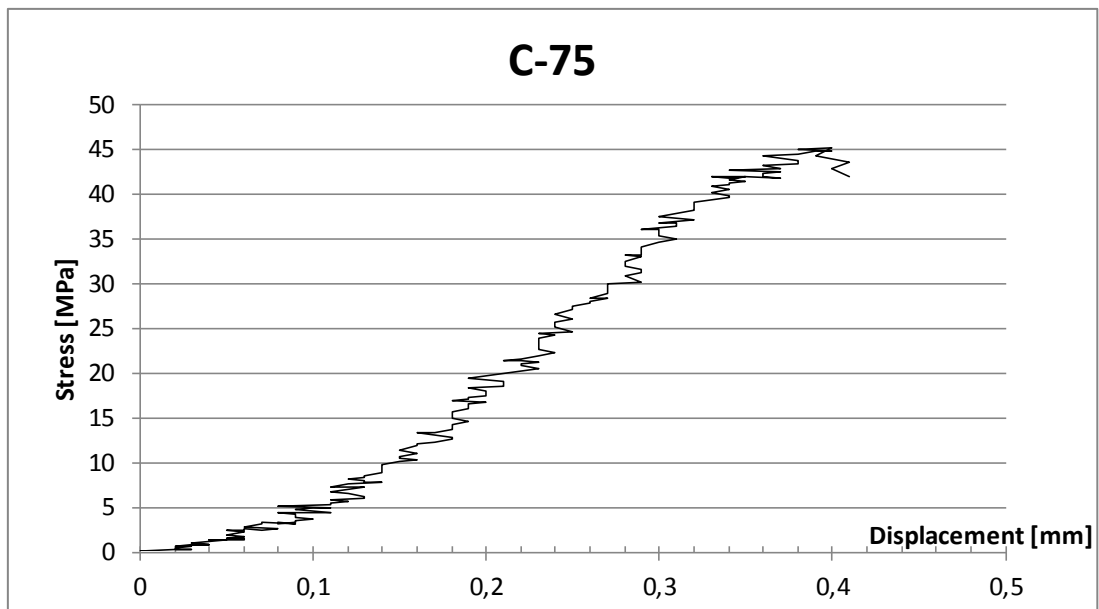


Figura 61: Grafico che rappresenta l'andamento dello stress in funzione della freccia

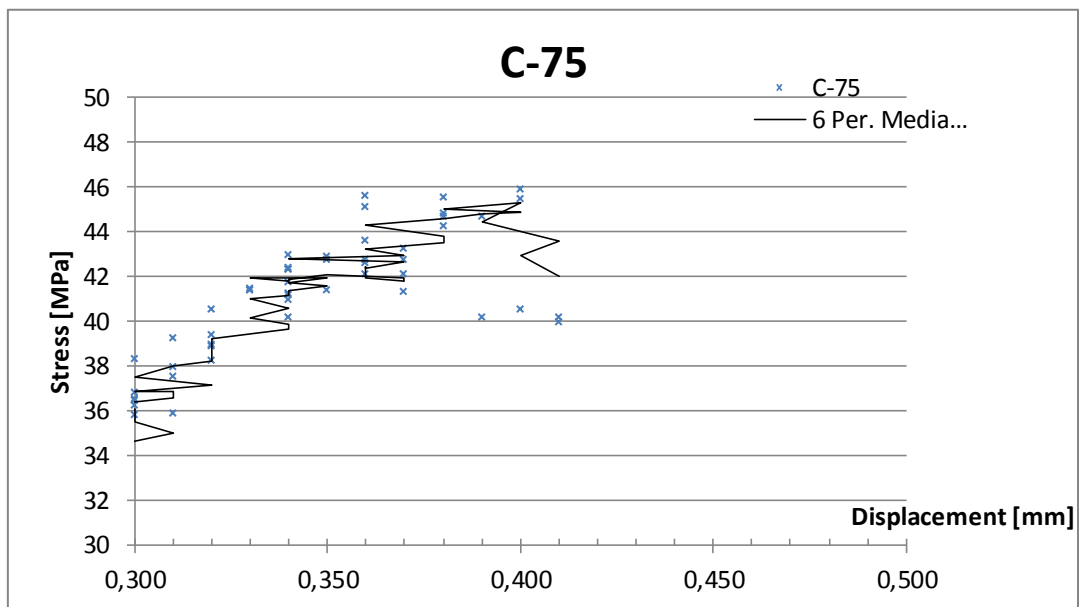


Figura 62: Particolare a rottura del provino

Nei grafici di riepilogo si sono utilizzati i dati medi in funzione dell'intervallo di confidenza. Di seguito vengono riepilogati i grafici di variazione della resistenza a flessione in funzione della %Tg scelta.

➤ **Prova di Riferimento**

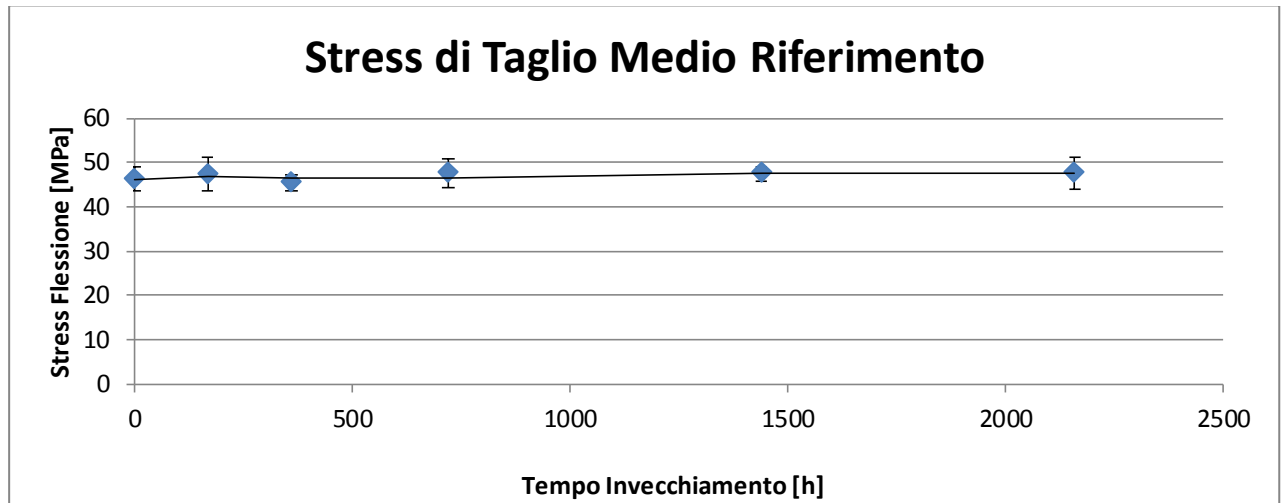


Figura 63: Andamento della resistenza a taglio interlaminare nel caso del riferimento.

Nel caso della prova di riferimento si nota una costanza dei dati dovuta al non invecchiamento ad alte temperature. Per il lungo periodo di invecchiamento si può avere un aumento delle caratteristiche meccaniche data dalla polimerizzazione resina residua.

➤ **Prova a 50% Tg (90°C)**

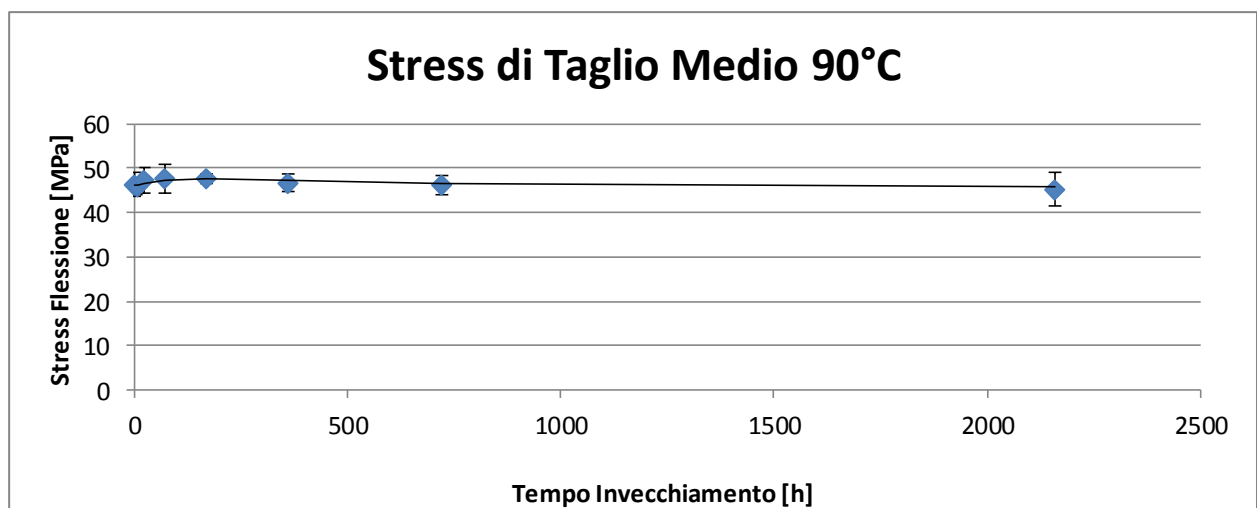


Figura 64: Andamento della resistenza a taglio interlaminare nel caso caso a 50% Tg.

Dai valori medi si nota un aumento delle proprietà meccaniche per le prime 24h, questo porta a pensare che la polimerizzazione anche dopo un ciclo di post cura, della durata di 2h, non sia

completa; quindi si ha un incremento delle proprietà dovuto a questo effetto. Infine si può notare come l'andamento generale è circa costante.

➤ Prova a 50% Tg -20 °C

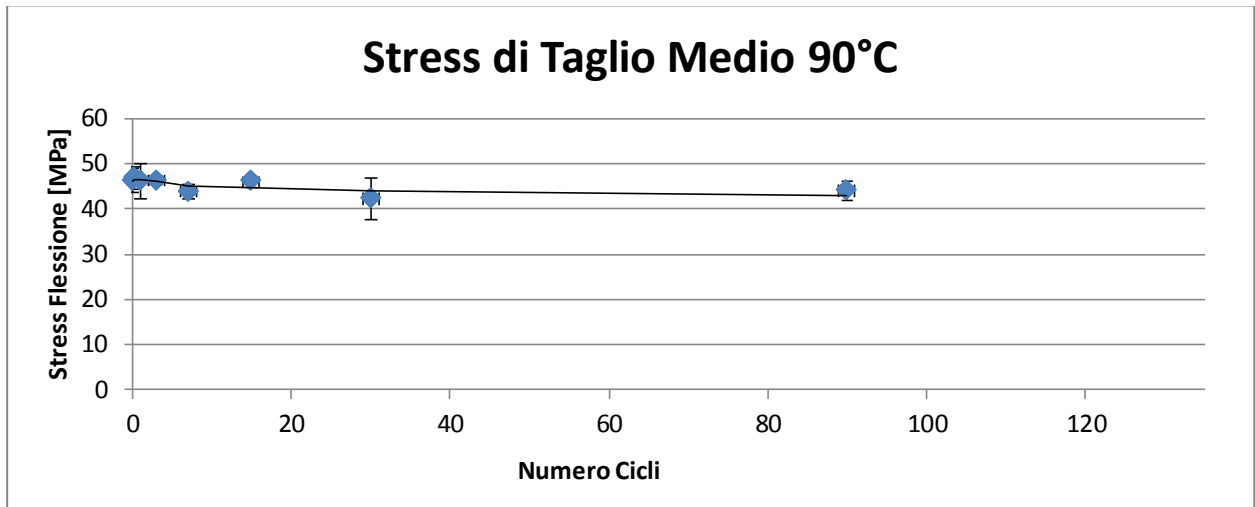


Figura 65: Andamento della resistenza a taglio interlaminare nel caso a 50% Tg -20°C

Questa prova è un invecchiamento a fatica termica con cicli di 12h partendo da una temperatura di -20°C. Il ciclo di fatica termica va a creare un maggiore stress sulla matrice che si ripercuote sulle proprietà meccaniche. Dalla figura 65 si nota un aumento delle proprietà meccaniche causate dal raggiungimento della completa polimerizzazione, in questo caso a 24h. All'aumentare del tempo di invecchiamento si ha un calo più marcato rispetto a 50% Tg.

➤ Prova a 75% Tg (135°C)

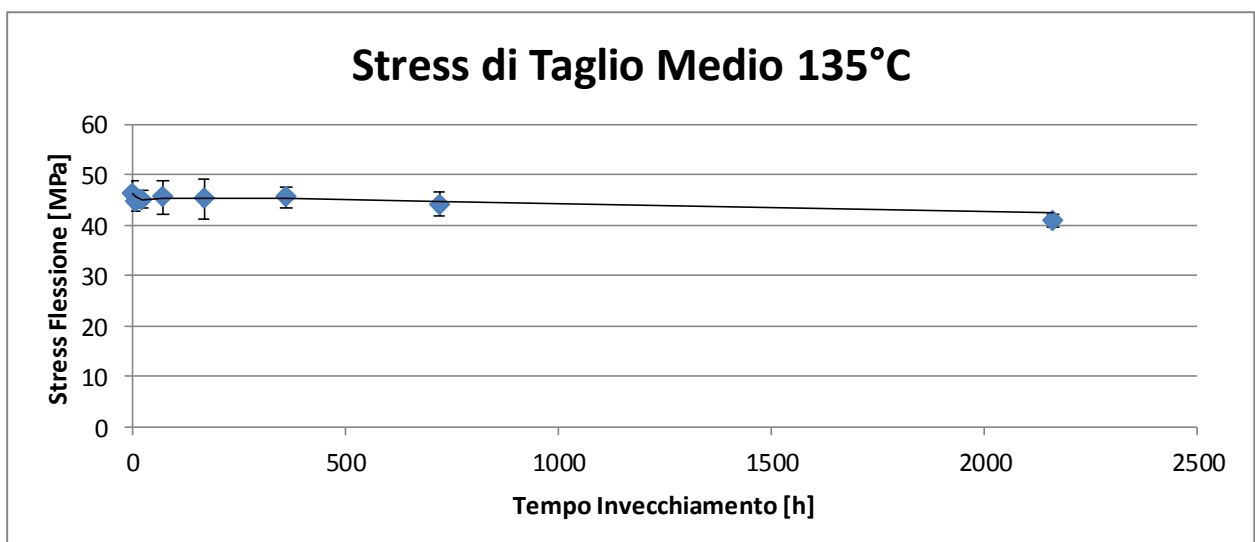


Figura 66: Andamento della resistenza a taglio interlaminare nel caso a 75% Tg.

Nella figura 66 si denota un calo medio delle proprietà meccaniche nelle prime 6h per poi avere una ripresa entro le 24h ed infine un calo fino al valore di 40 MPa per 2160h.

➤ Prova a 100% Tg S (180°C S)

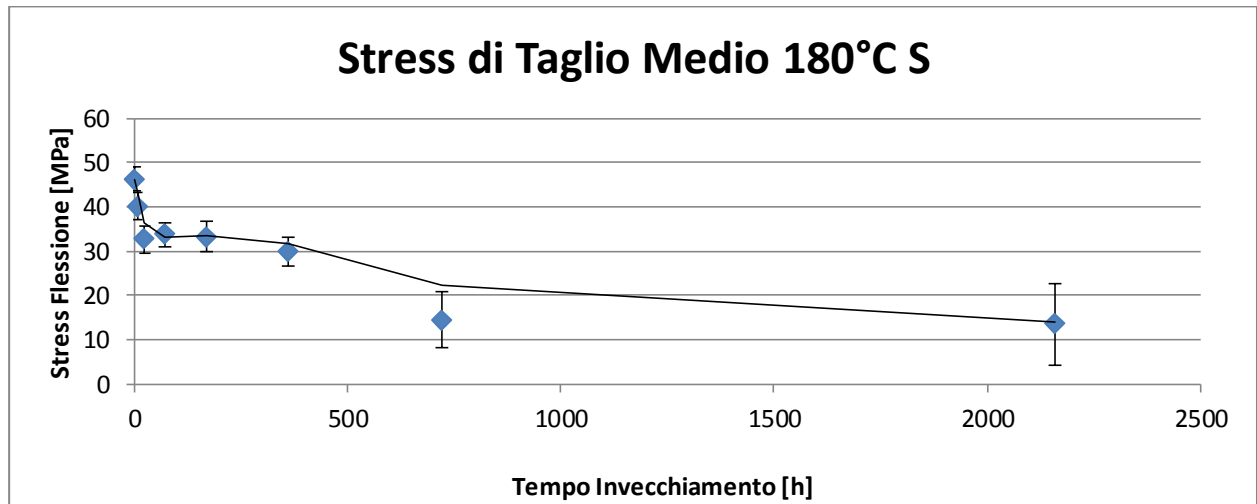


Figura 67: Andamento della resistenza a taglio interlaminare nel caso a 50% Tg -20°C

Questa prova non è da ritenersi attendibile dato che il forno ha avuto un aumento repentino della temperatura arrivando a 230°C per alcune ore. Questo aumento della temperatura ha portato a valori di resistenza a flessione inattendibili. La prova è stata utile per capire come un aumento repentino della temperatura anche per un periodo di tempo breve porta ad una compromissione del composito.

➤ Prova a 100% Tg C (180°C C)

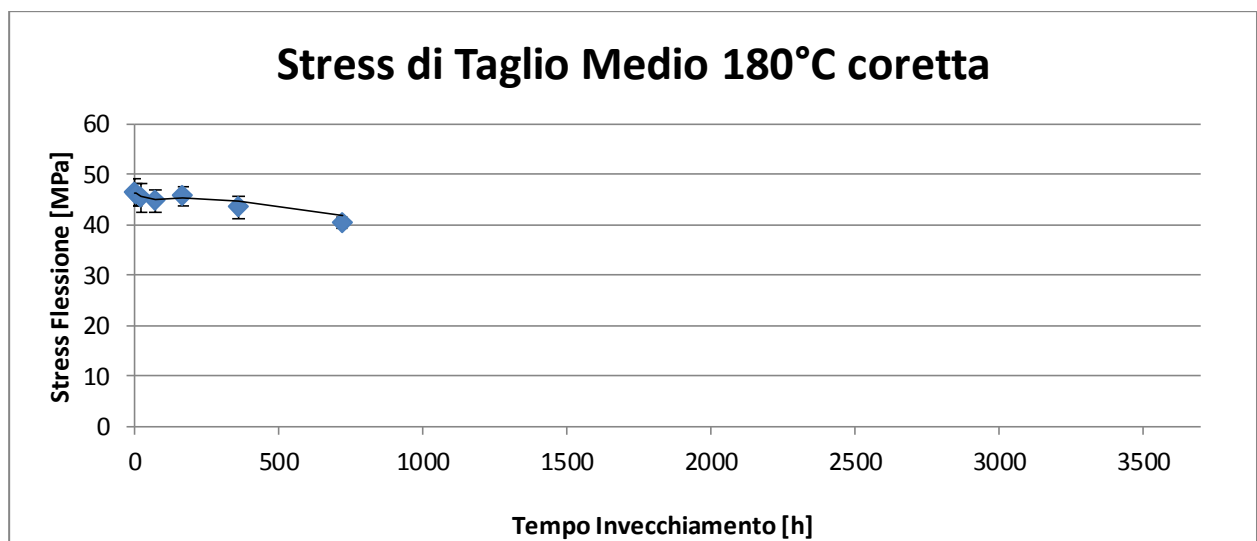


Figura 68: Andamento della resistenza a taglio interlaminare nel caso a 50% Tg -20°C

In questa prova la temperatura di invecchiamento è corretta. Dal grafico si può notare che, utilizzando una temperatura di invecchiamento pari alla T_g , si ha un decadimento delle proprietà di resistenza a taglio interlaminare che aumenta con l'aumentare del tempo di invecchiamento.

➤ Prova a 110% T_g (200°C)

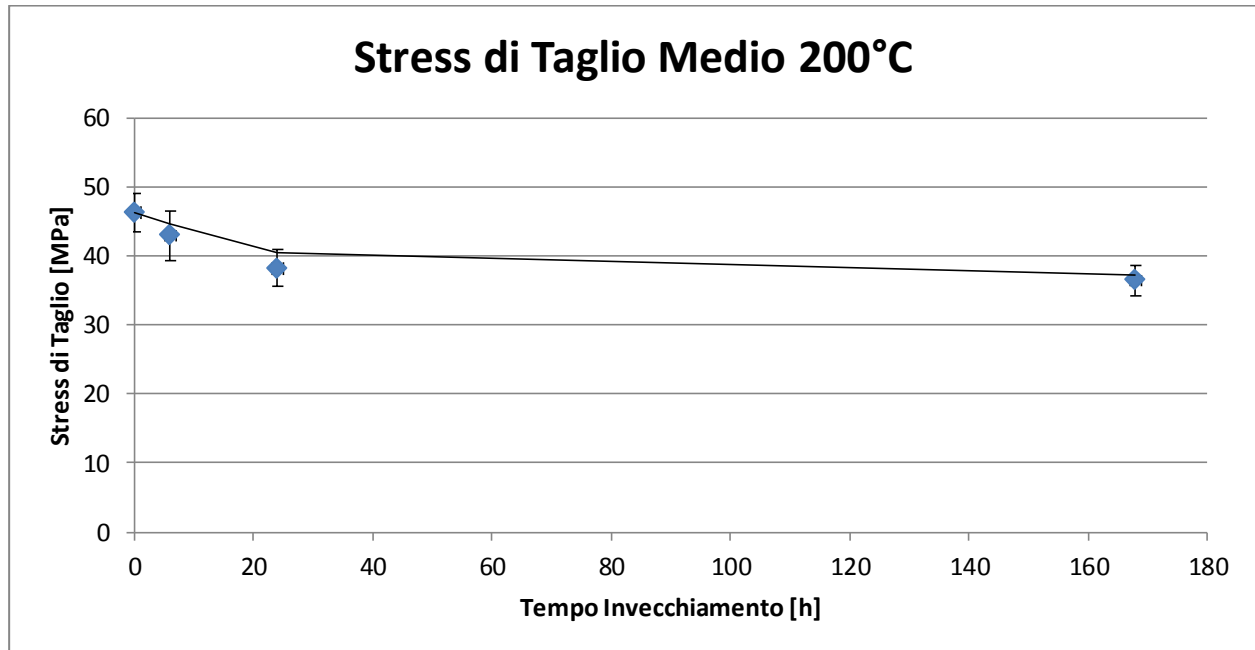


Figura 69: Andamento della resistenza a taglio interlaminare nel caso a 50% T_g -20°C

La temperatura utilizzata in questo caso è superiore al 100% T_g di conseguenza il calo della proprietà della matrice di unione fra i vari fogli di prepregs deve essere maggiore; questo è dovuto al fatto che si è utilizzata una resina epossidica e termoindurente che per temperature superiori alla T_g si ha un decadimento. Nei dati riportati nella figura 69 si nota un calo sempre più marcato.

➤ Prova a 145% Tg (260°C)

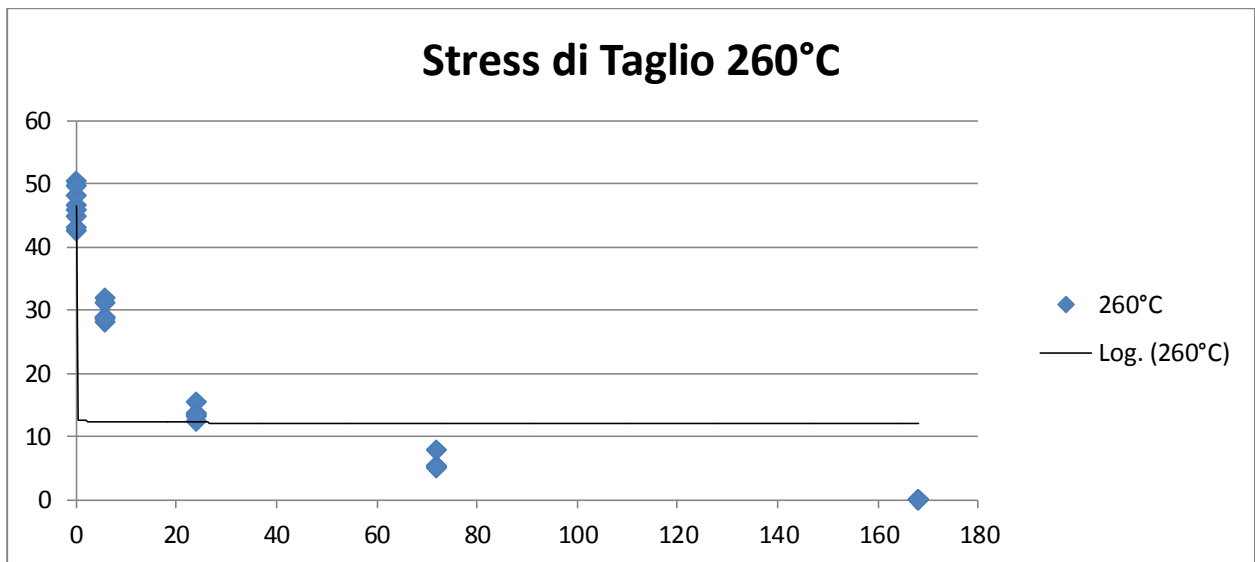


Figura 70: Andamento della resistenza a taglio interlaminare a 145% Tg

In figura 70 si nota che per altissime temperature si ha un deterioramento della matrice repentino entro poche ore dall'esposizione. Per un tempo di invecchiamento di 168h la resina risulta deteriorata della matrice che comporta la delaminazione dei fogli di prepregs.

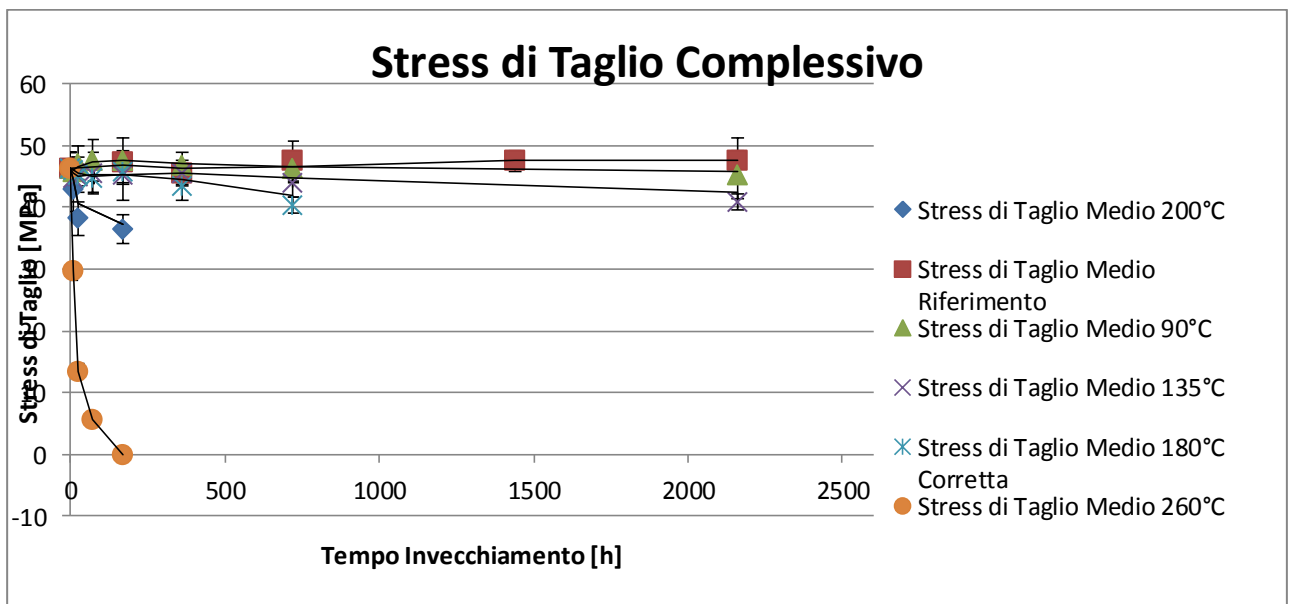


Figura 71: Riepilogo stress di taglio complessivo

Dalla figura 71 si nota un andamento coerente con le aspettative con l'aumento della temperatura di invecchiamento le proprietà di resistenza a taglio del composito decrescono in modo quasi esponenziale. Per temperature superiore al 100% Tg si ha un crollo della resistenza del composito dovuto al decadimento della resina.

Dall'analisi dei dati si è arrivati alla conclusione che non si è raggiunta la completa polimerizzazione dopo il ciclo di post cura; quindi è stata analizzata la resistenza a flessione e taglio interlaminare per le prime 6h, dato che per temperature vicino alla T_g la polimerizzazione avviene in questo arco di tempo. La temperatura di prova è 100% T_g con estrazione ad ogni ora e 5 provini per prova.

Risultati per la prova di flessione

➤ Prova a 100% T_g (180°C) 1-6h

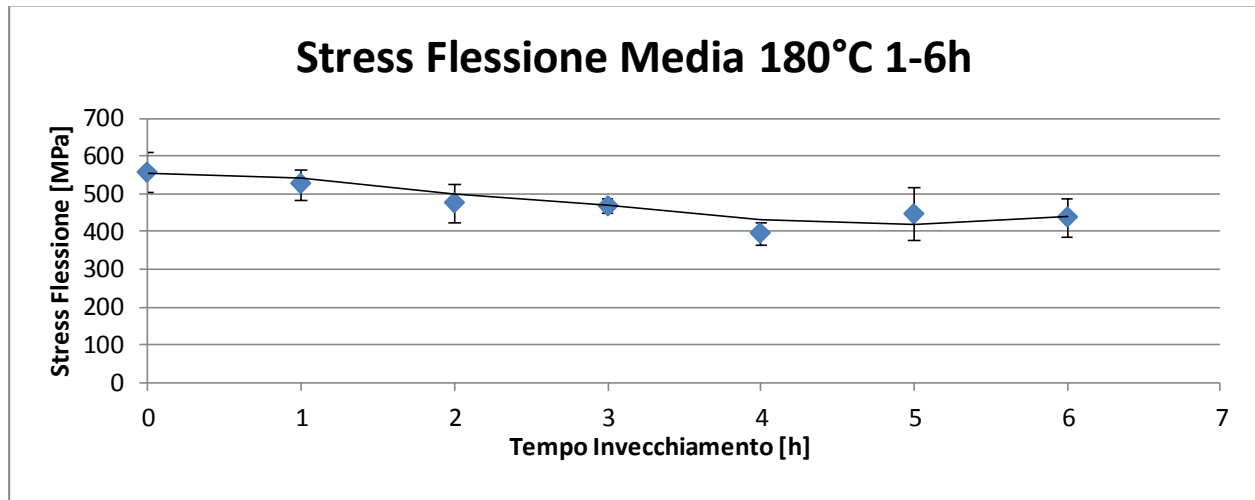


Figura 72: Andamento della resistenza a flessione per 100% T_g 1-6h

Nella figura 72 si evince un calo delle proprietà per le prime quattro ore fino a raggiungere un valore all'incirca costante fino alle 6h. Questo denota come per le prime sei ore si ha un decadimento delle proprietà del composito.

Risultati per la prova di taglio interlaminare

➤ Prova a 100% Tg (180°C) 1-6h

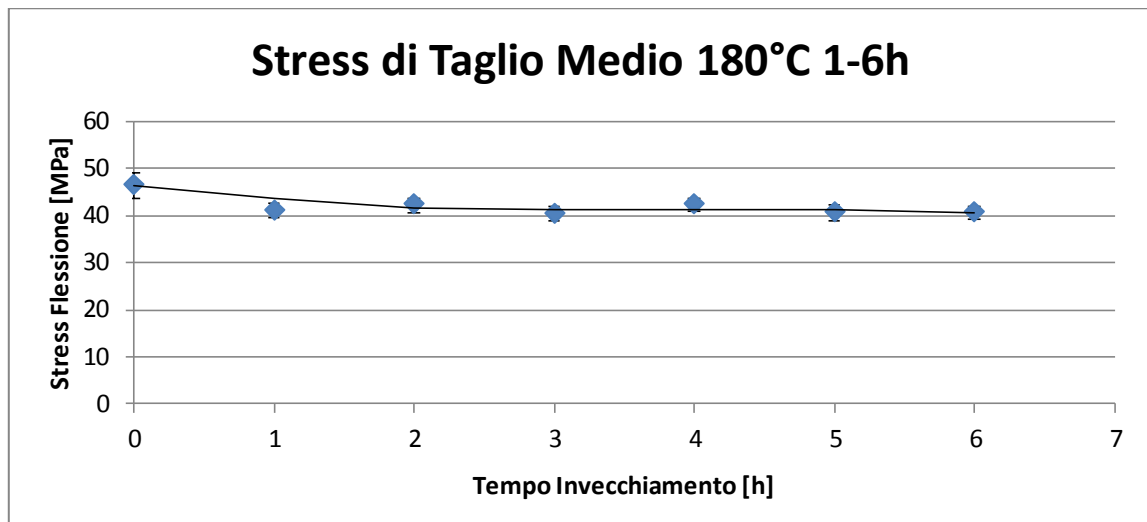


Figura 73: Andamento della resistenza a taglio interlaminare per 100% Tg 1-6h

Dalla figura 73 si evince un calo repentino della resistenza a taglio nella prima ora dove si raggiunge un valore che rimane costante fino alle 6h.

CAPITOLO 6

5. PARAMETRIZZAZIONE DEI RISULTATI

5.1. Metodo utilizzato

Il seguente capitolo viene dedicato alla parametrizzazione dei risultati ottenuti dall'analisi sperimentale, si vuole ottenere una formula che descriva la variazione dei dati in base alla prova di caratterizzazione usata. La formula deve essere funzione dei seguenti parametri:

- Tempo di invecchiamento
- Temperatura di invecchiamento

Per la parametrizzazione si è utilizzato il programma Matlab in unione ad Excel. La formula che approssima meglio i dati delle varie prova è la seguente:

$$y = a * x^b + c$$

dove

a, b = coefficienti in funzione di T/Tg

c = coefficiente costante pari al valore di riferimento di ogni prova di caratterizzazione

I coefficienti sono stati determinati utilizzando una procedura che approssima i dati sperimentali minimizzando lo scarto quadratico medio.

5.2. Risultati della parametrizzazione

Nel seguito vengono rappresentati e descritti i grafici determinati con la formula precedentemente utilizzata. I grafici sono in funzione di T/tg.

5.2.1. Parametrizzazione dell'andamento del Peso

Nella parametrizzazione del peso sono stati utilizzati i valori medi per intervallo di estrazione. Utilizzando la formula descritta precedentemente e applicando a c il valore medio di riferimento zero, si sono ottenuti i seguenti risultati riportati nella tabella 14.

	20°C	90°C	135°C	180°C	200°C	260°C
a	0	0,005	0,01032	0,009745	0,03092	0,1527
b	6,32E-01	0,2875	0,2109	0,379	0,2794	0,3501
c	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
T/Tg	0,111111111	0,5	0,75	1	1,111111111	1,44444444
T_inve	20	90	135	180	200	260

Tabella 14: Risultati ottenuti con Matlab e valori riportati in Excel.

Si riportano i grafici con gli andamenti dei coefficienti a e b.

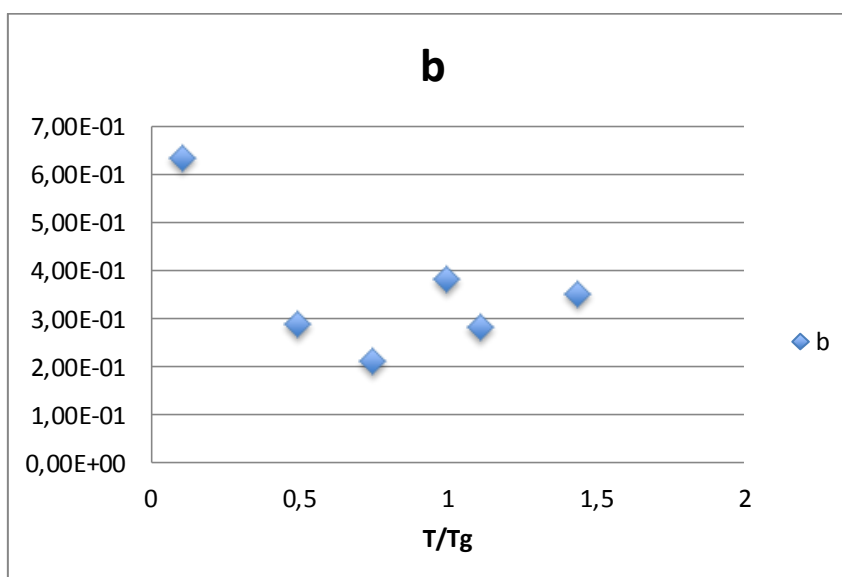
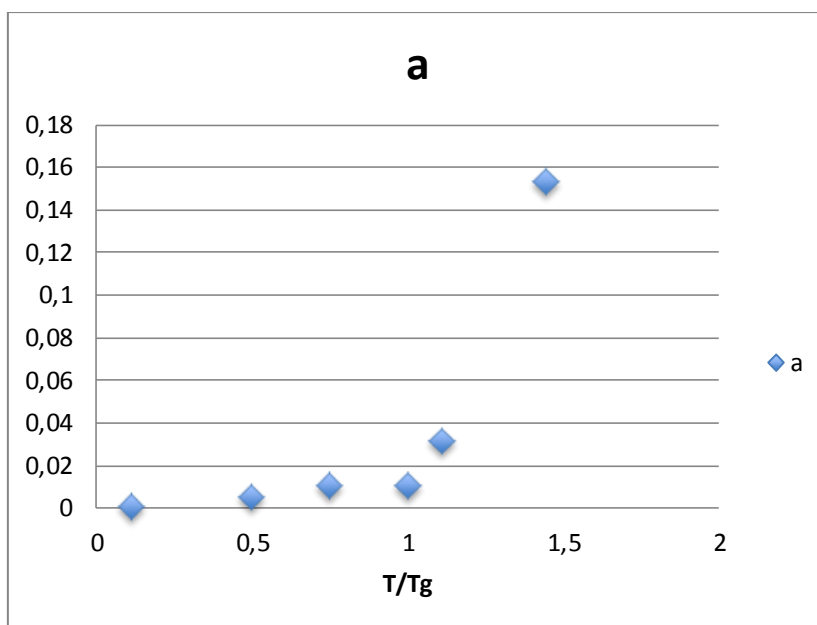


Figura 74: Coefficienti a e b per la parametrizzazione del peso

Di seguito vengono riportati i grafici su Matlab ed Excel.

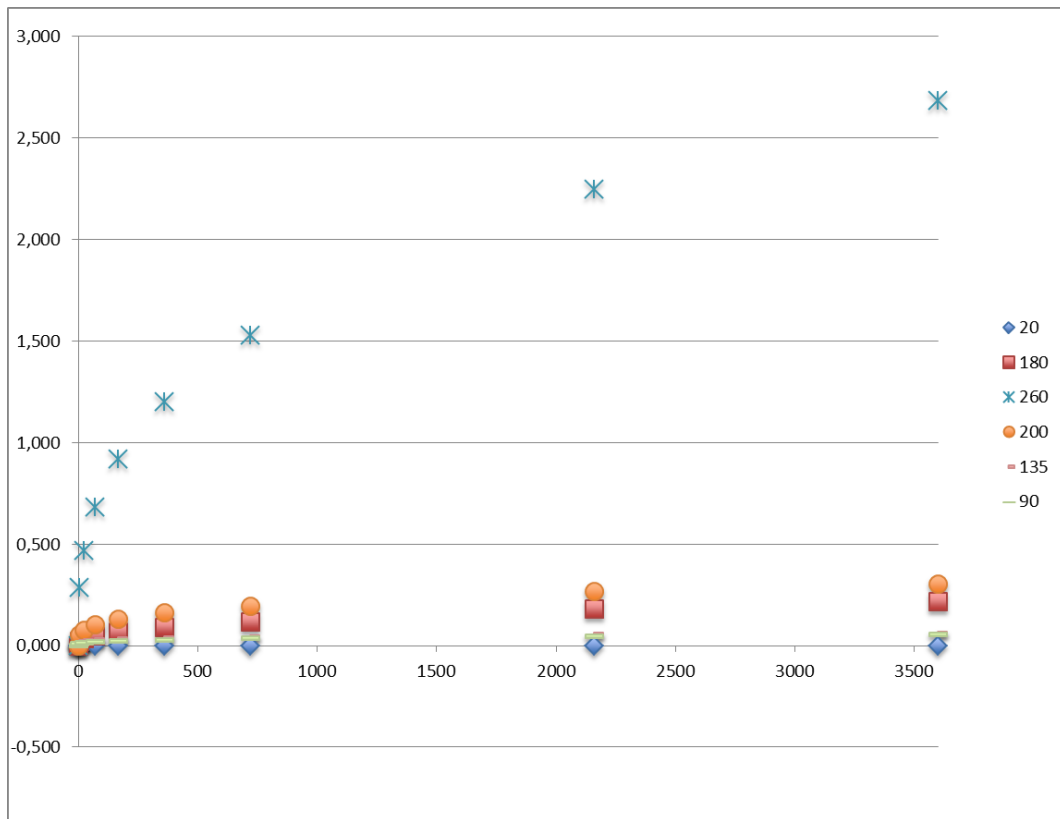


Figura 75: Risultati ottenuti dalla parametrizzazione utilizzando Excel.

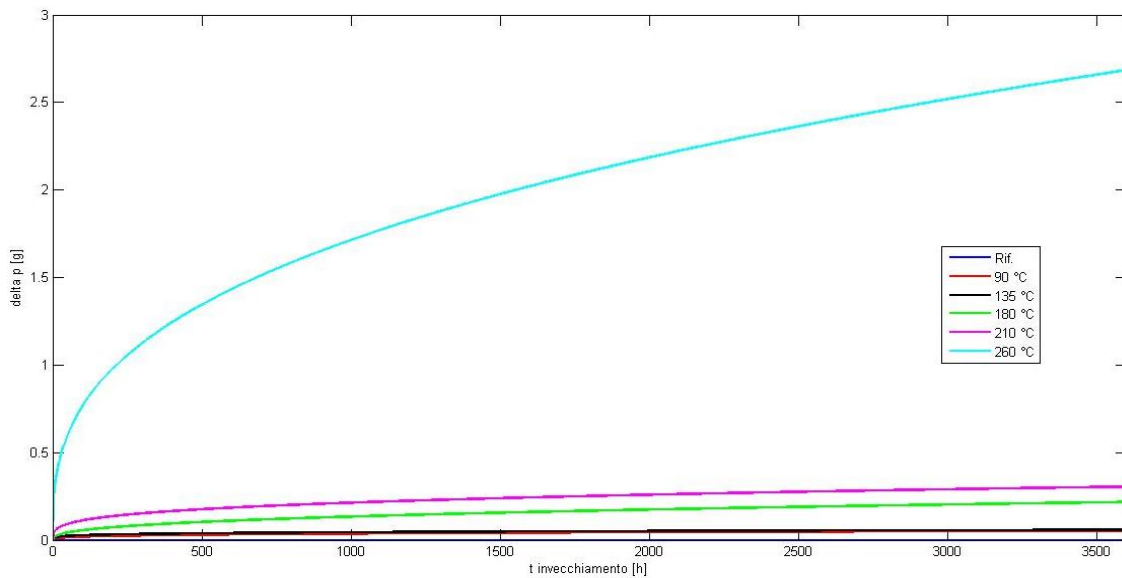


Figura 76: Risultati ottenuti dalla parametrizzazione della variazione di peso utilizzando Matlab.

Per ultimo vengono inseriti grafici che rappresentano il fitting sulle singole prove di invecchiamento.

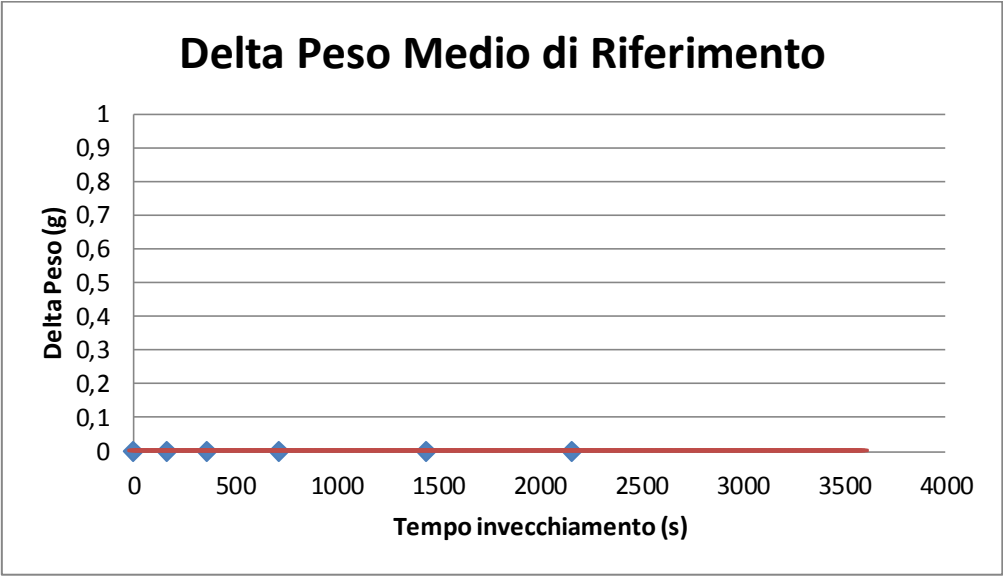


Figura 77: Parametrizzazione per il riferimento

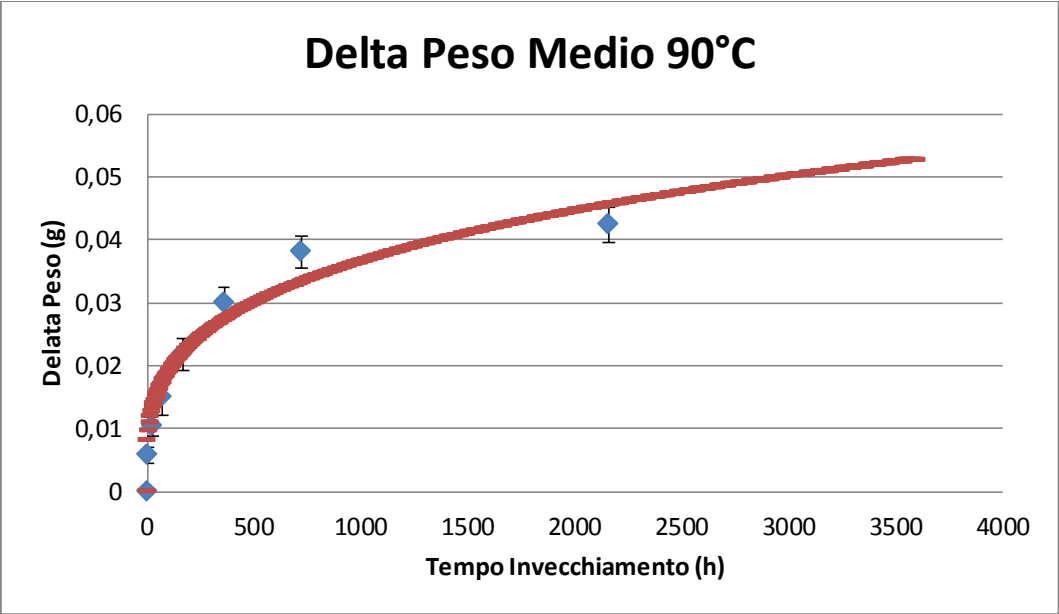


Figura 78: Parametrizzazione per 50% Tg

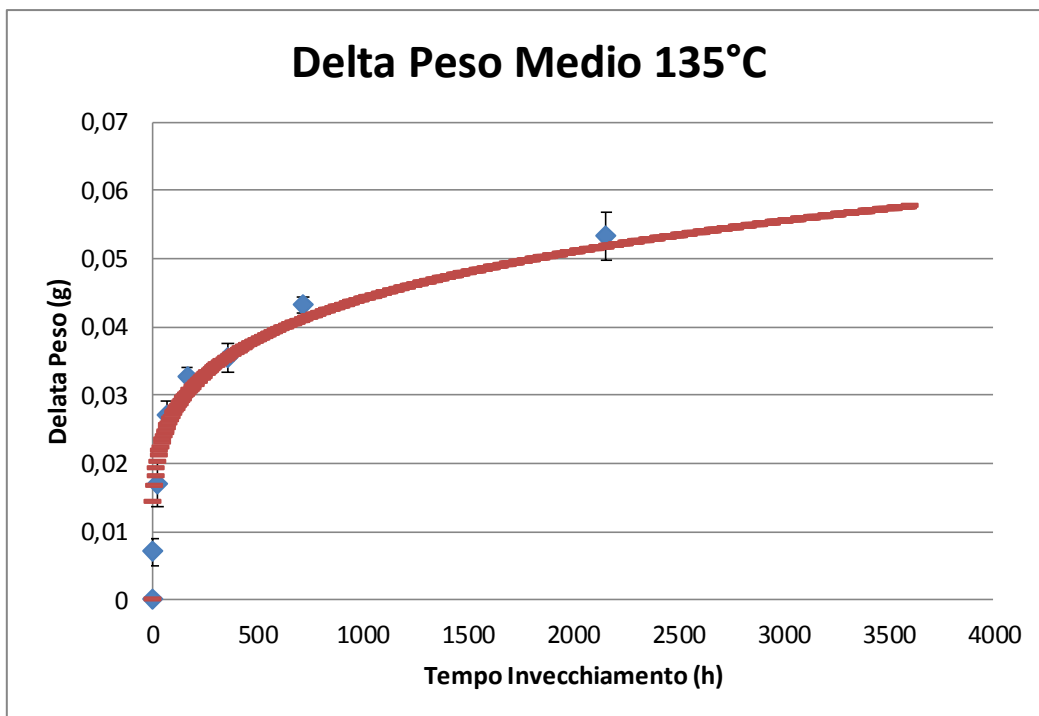


Figura 79: Parametrizzazione per 75 %Tg

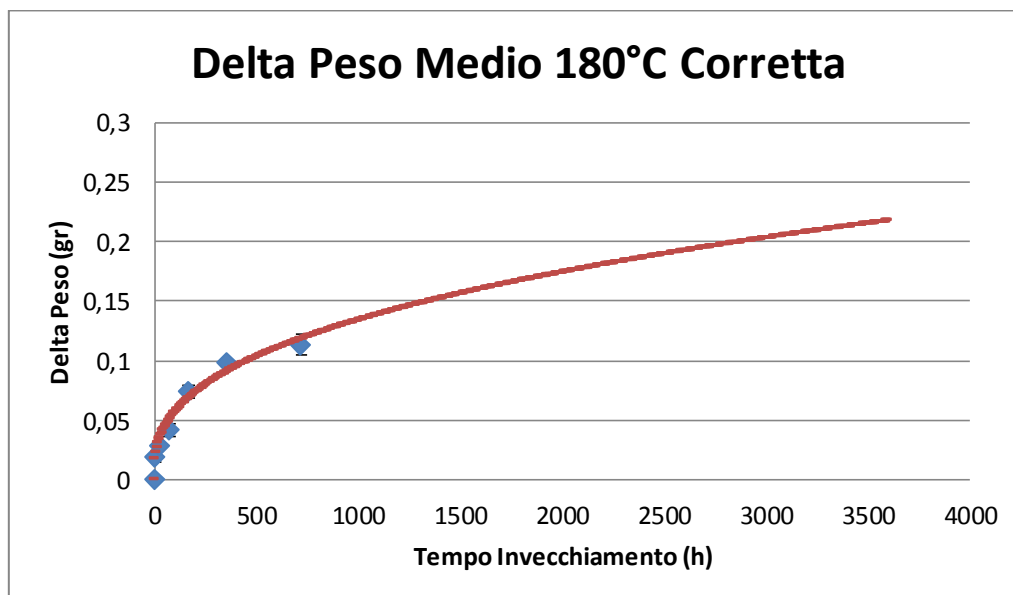


Figura 80: Parametrizzazione per 100% Tg

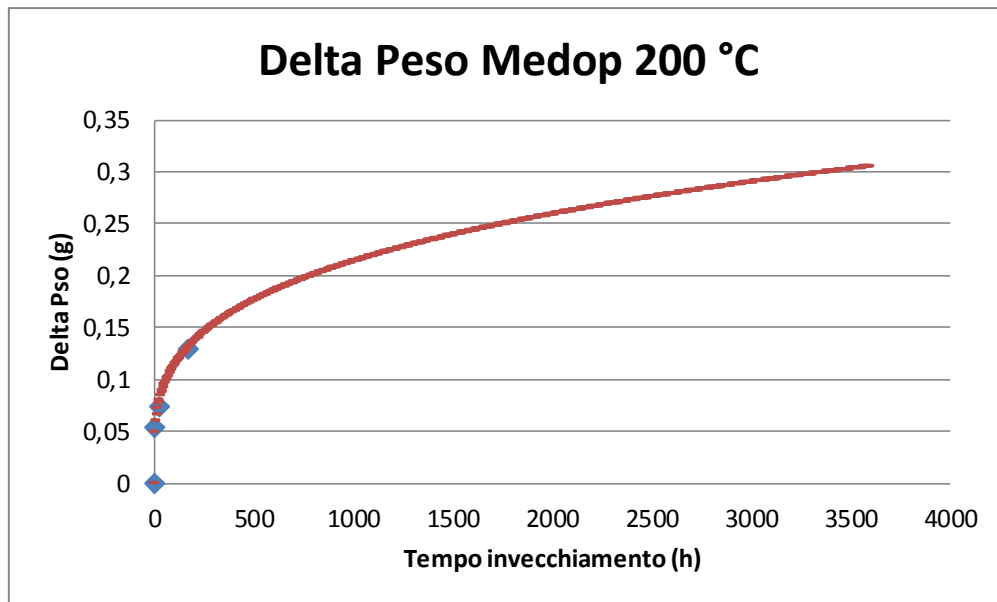


Figura 81: Parametrizzazione per 110 %Tg

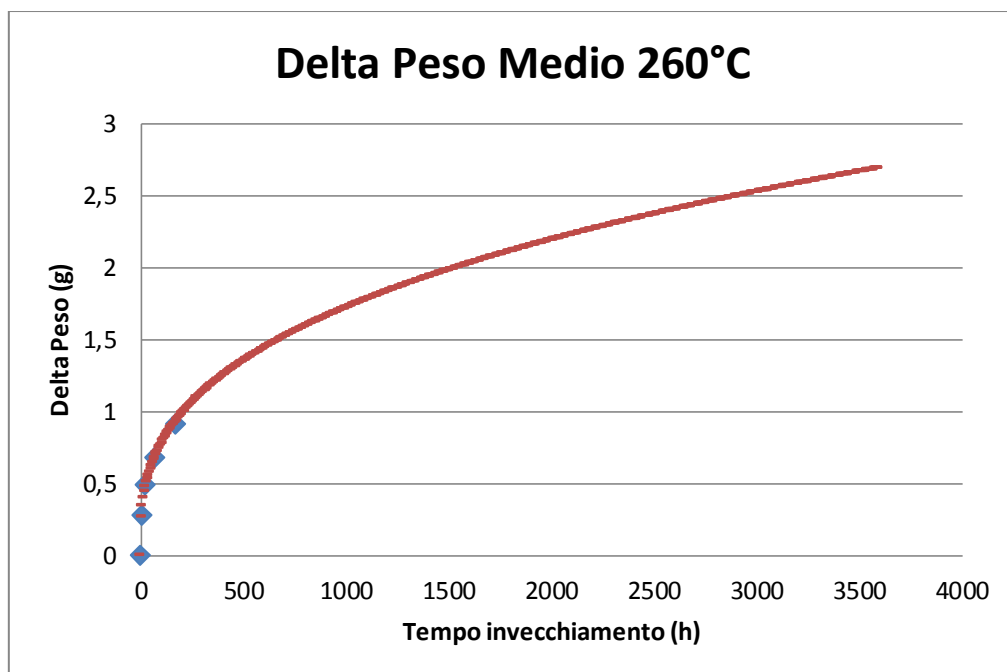


Figura 82: Parametrizzazione per 145% Tg

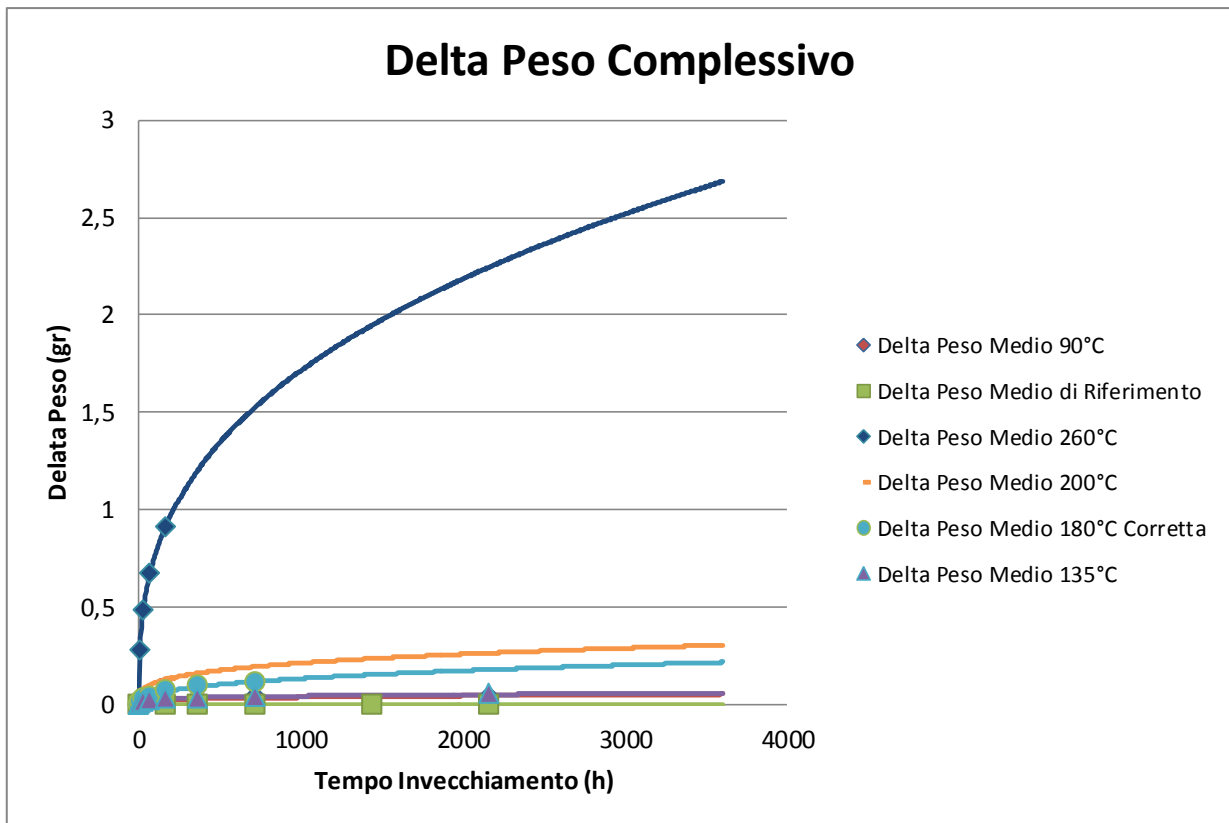


Figura 83: Riepilogo parametrizzazione dell'andamento della variazione di peso

La parametrizzazione per la variazione di peso è coerente con i dati sperimentali e li rappresenta in modo corretto.

5.2.2. Parametrizzazione dell'andamento a flessione

Nella parametrizzazione dell'andamento della flessione sono stati utilizzati i valori medi per intervallo di estrazione. Utilizzando la formula descritta precedentemente e applicando a c il valore medio di riferimento 562 , si sono ottenuti i seguenti risultati riportati nella tabella 15.

	20°C	90°C	135°C	180°C	200°C	260°C
a	0,0000089	0,0001	-5	-24,43	-49,96	-223,2
b	1,149	0,6	0,4	0,2382	0,2395	0,1876
c	562	562	562	562	562	562
T/Tg	0,11111111	0,5	0,75	1	1,11111111	1,44444444
T_inve	20	90	135	180	200	260

Tabella 15: Risultati ottenuti con Matlab e valori riportati in Excel.

Si riportano i grafici con gli andamenti dei coefficienti a e b.

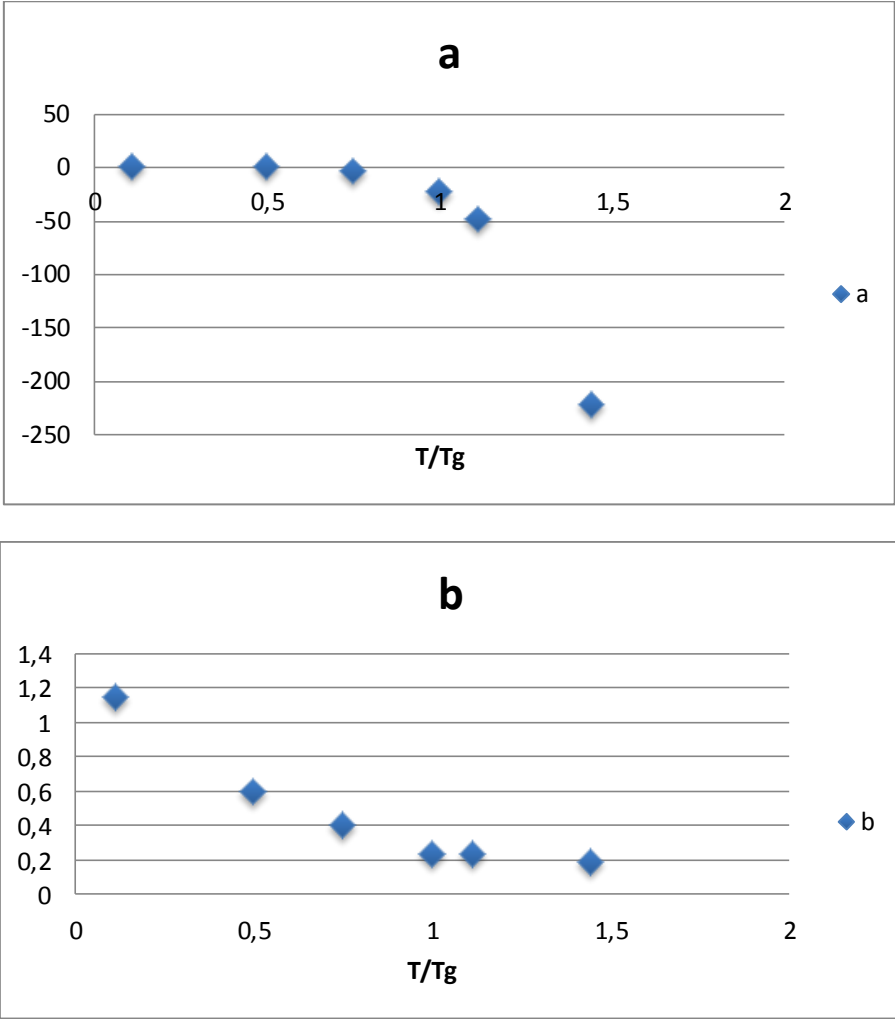


Figura 84: Coefficienti a e b per la parametrizzazione della flessione

Di seguito vengono riportati i grafici su Matlab ed Excel.

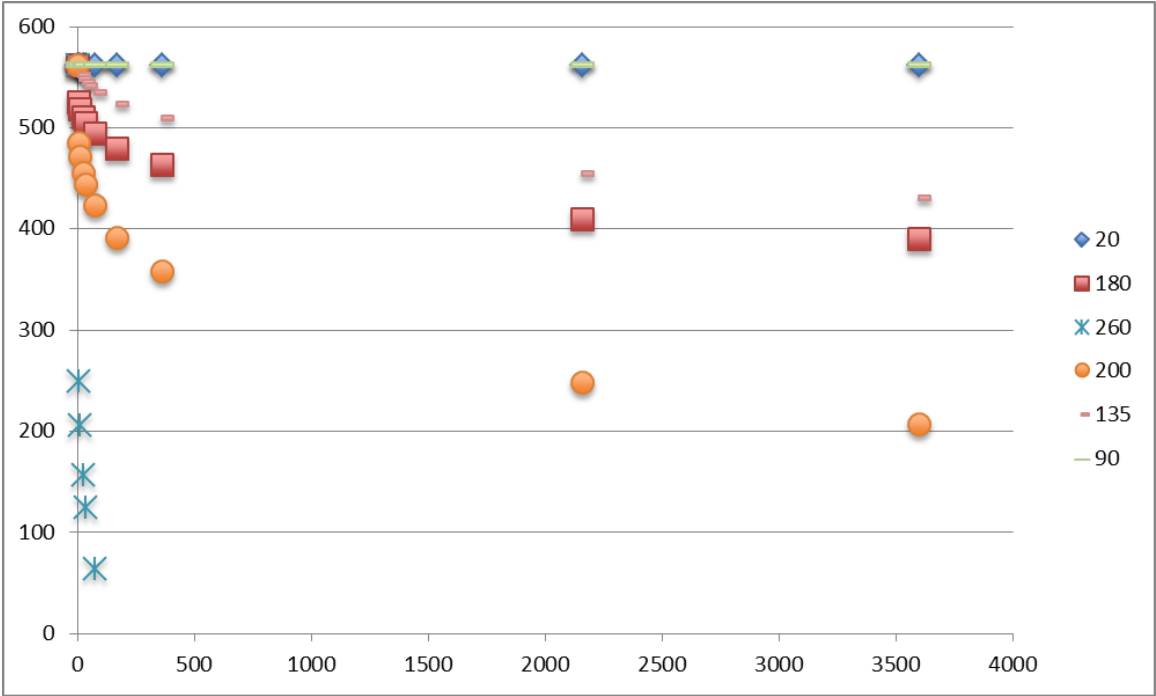


Figura 85: Risultati ottenuti dalla parametrizzazione utilizzando Excel.

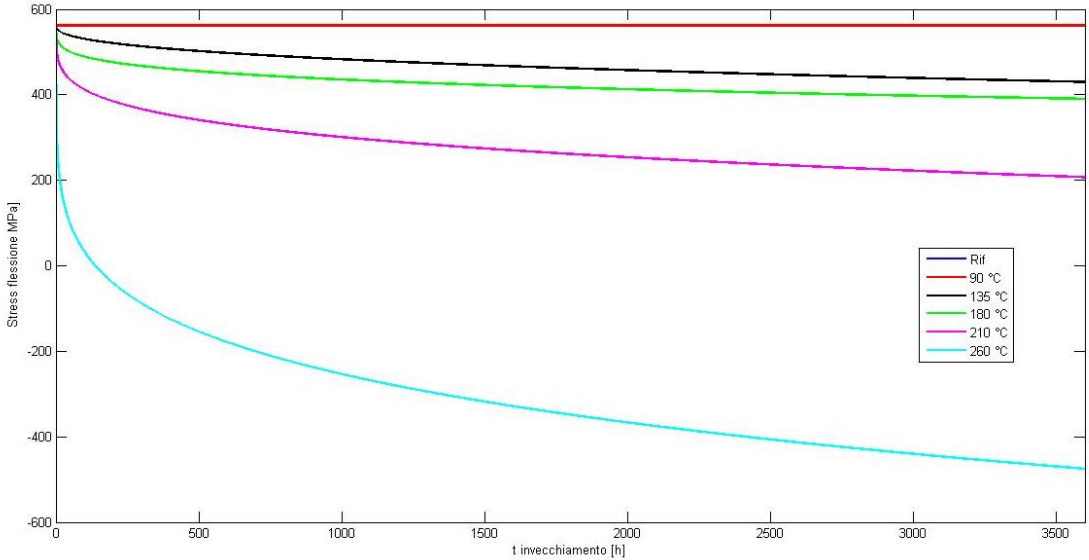


Figura 86: Risultati ottenuti dalla parametrizzazione dell'andamento di flessione utilizzando Matlab.

Per ultimo vengono inseriti grafici che rappresentano il fitting sulle singole prove di invecchiamento.

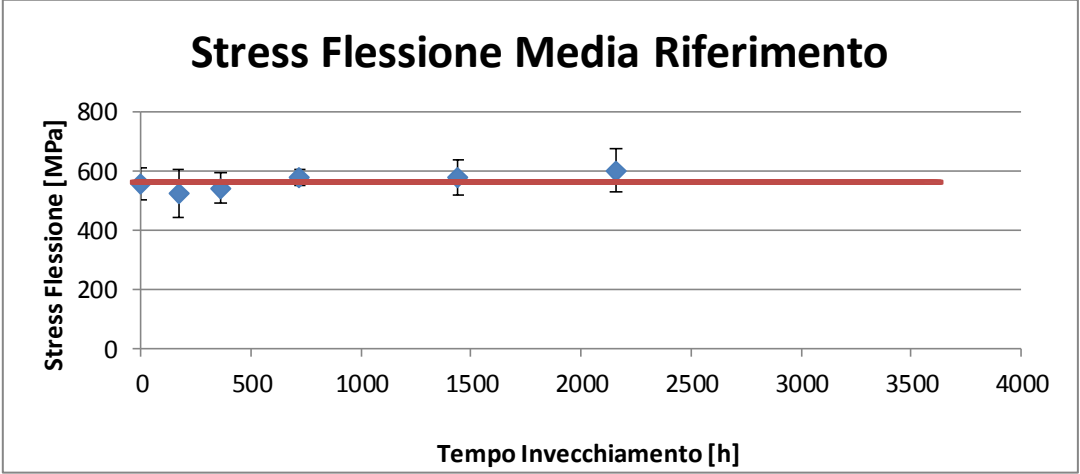


Figura 87: Parametrizzazione dell'andamento a flessione per il riferimento

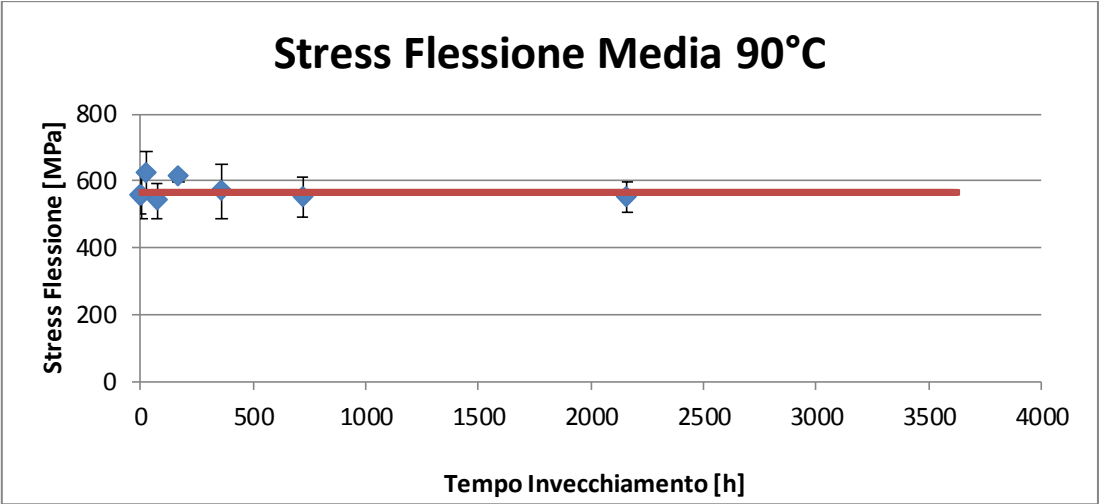


Figura 88: Parametrizzazione dell'andamento a flessione per 50% Tg

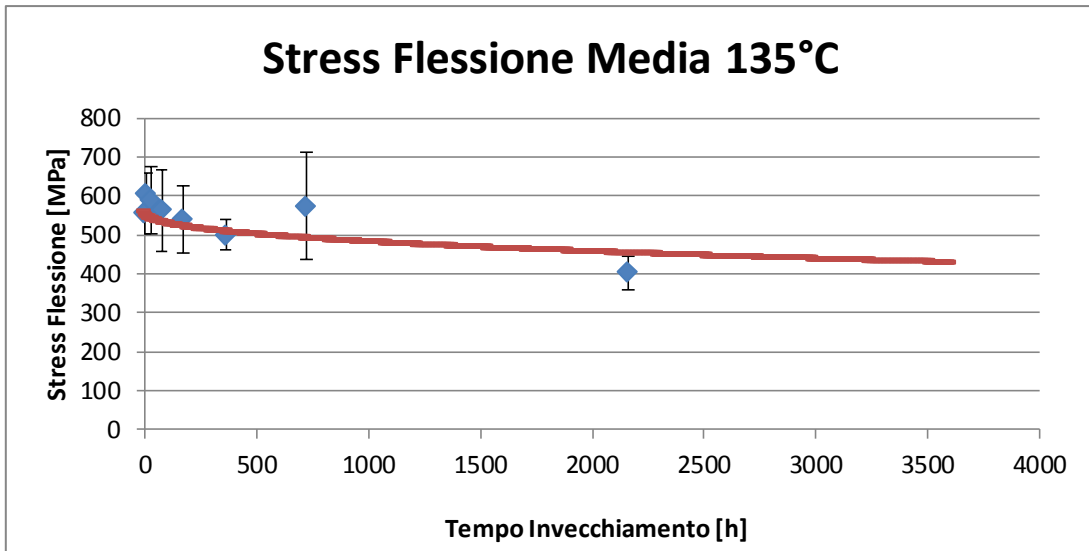


Figura 89: Parametrizzazione dell'andamento a flessione 75% Tg

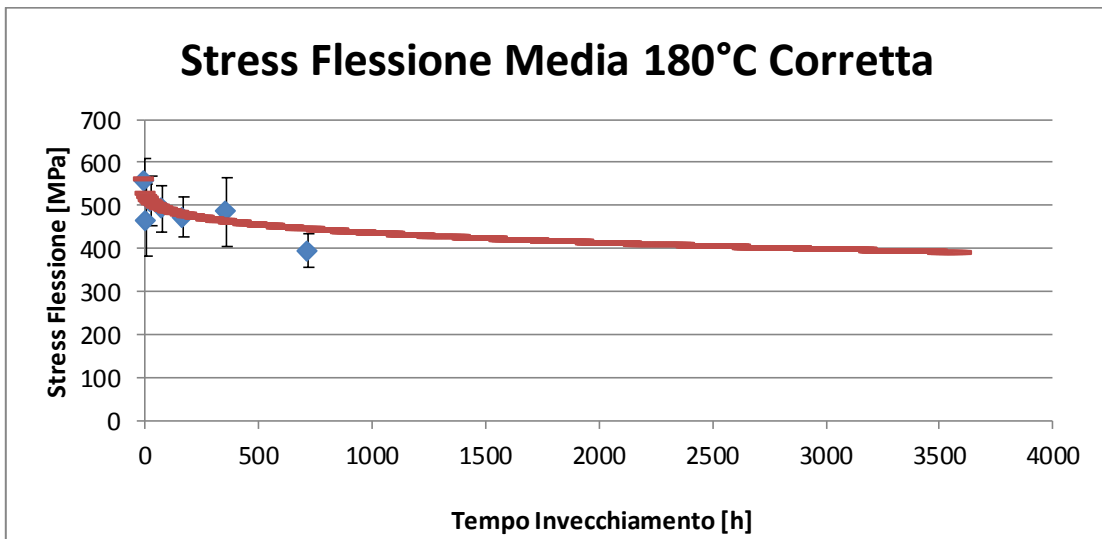


Figura 90: Parametrizzazione dell'andamento a flessione per 100% Tg

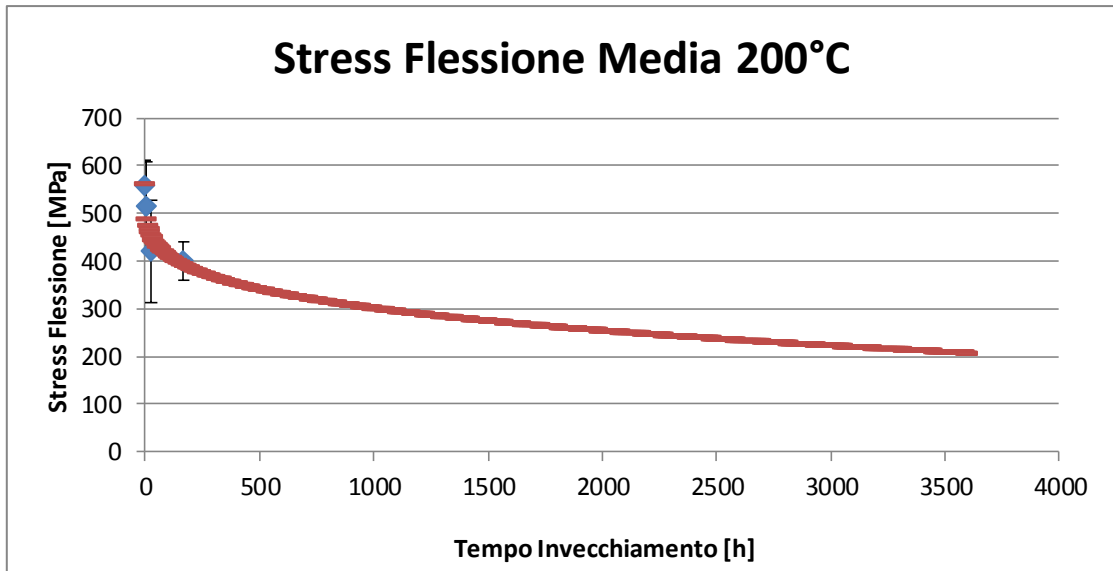


Figura 91: Parametrizzazione dell'andamento a flessione per 110% Tg

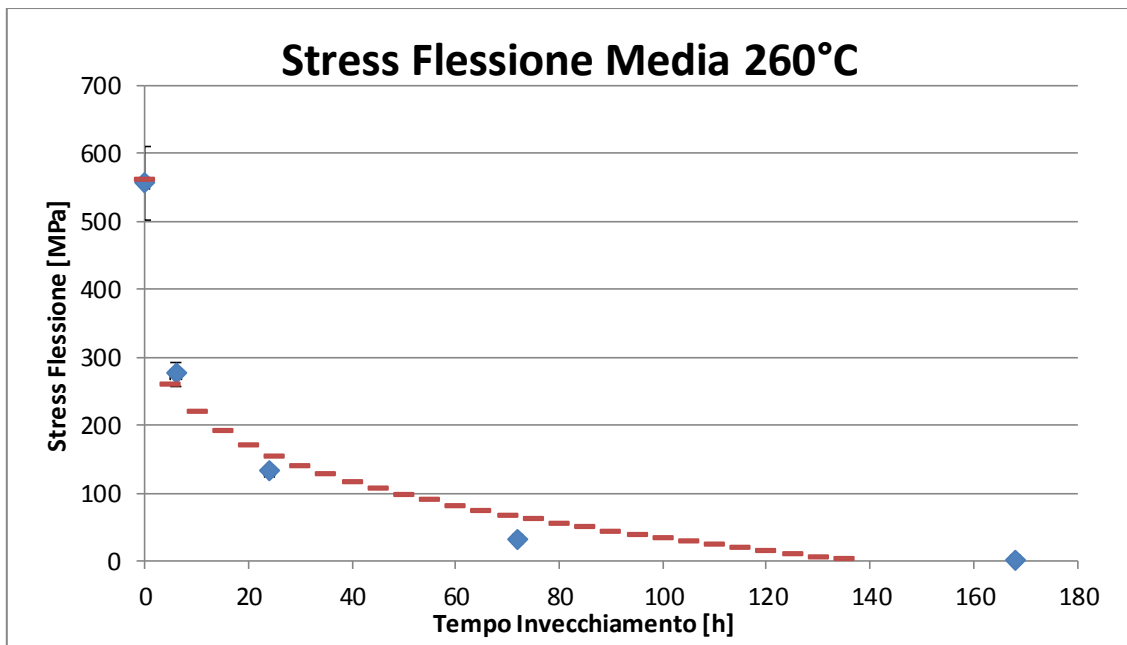


Figura 92: Parametrizzazione dell'andamento a flessione per 145% Tg

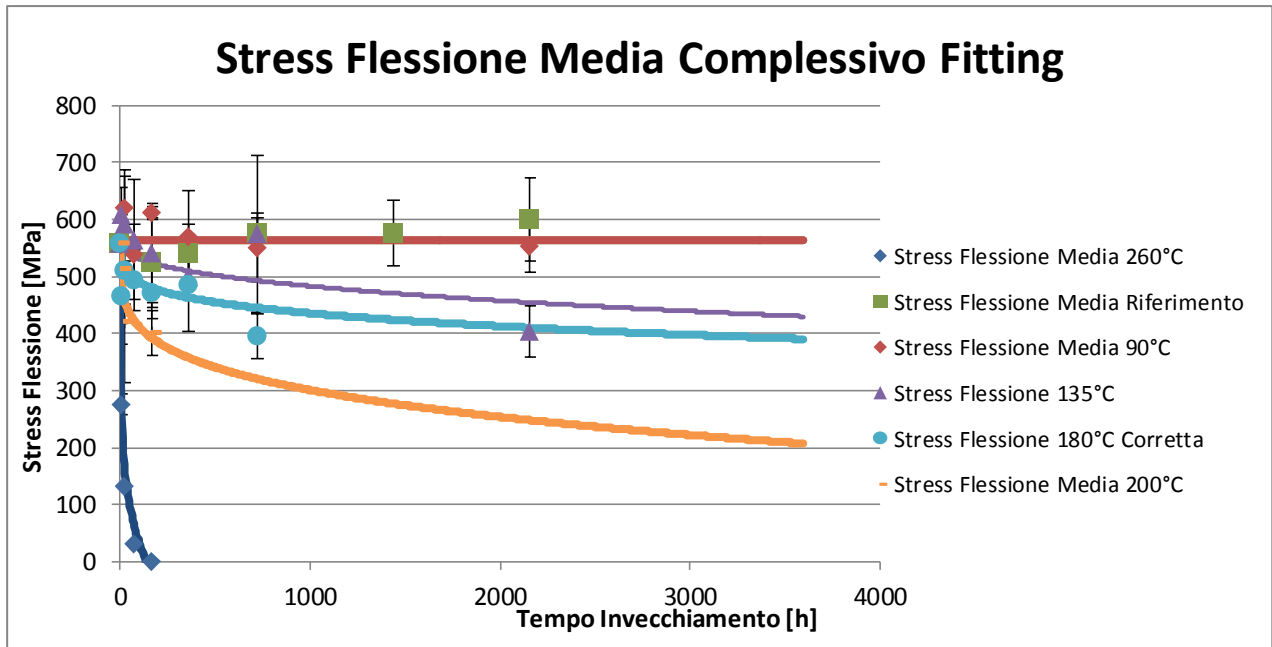


Figura 93: Riepilogo parametrizzazione dell'andamento a flessione

La parametrizzazione per la flessione è coerente con i dati sperimentali e li rappresenta in modo corretto.

5.2.3. Parametrizzazione dell'andamento del taglio

Nella parametrizzazione dell'andamento del taglio sono stati utilizzati i valori medi per intervallo di estrazione. Utilizzando la formula descritta precedentemente e applicando a c il valore medio di riferimento 562 , si sono ottenuti i seguenti risultati riportati nella tabella 16.

	20°C	90°C	135°C	180°C	200°C	260°C
a	1,90E-07	-0,0001743	-0,29	-0,3993000	-3,634	-13
b	1	1,205	0,3799	0,4	0,2162	0,2521
c	47	47	47	47	47	47
T/Tg	0,11111111	0,5	0,75	1	1,11111111	1,44444444
T_inve	20	90	135	180	200	260

Tabella 16: Risultati ottenuti con Matlab e valori riportati in Excel.

Si riportano i grafici con gli andamenti dei coefficienti a e b.

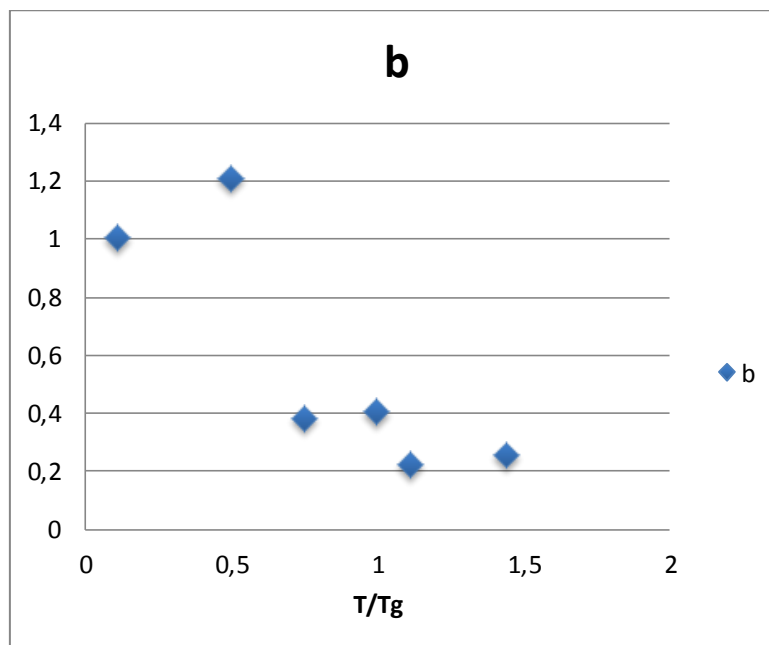
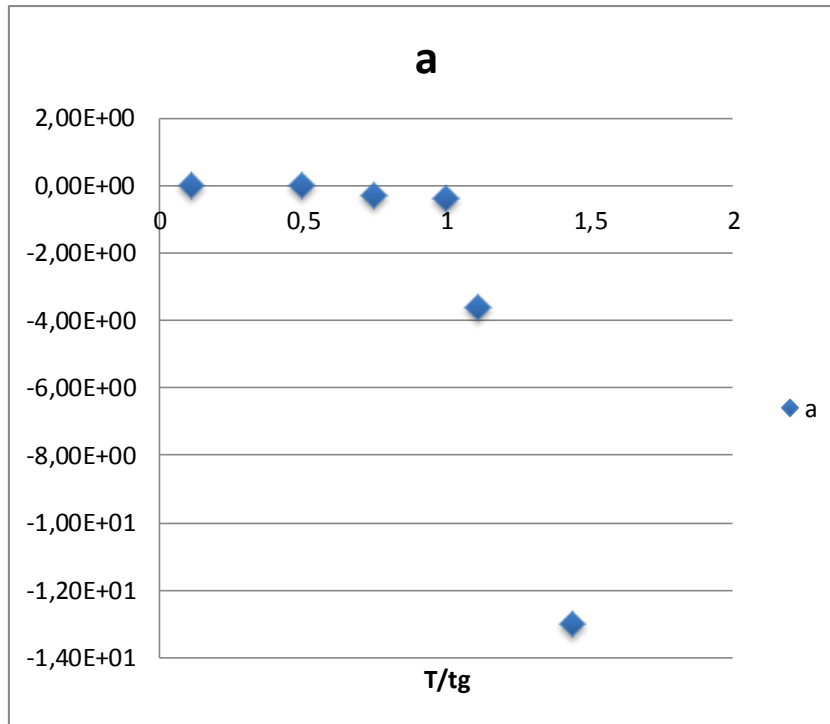


Figura 94: Coefficienti a e b per la parametrizzazione del taglio

Di seguito vengono riportati i grafici su Matlab ed Excel.

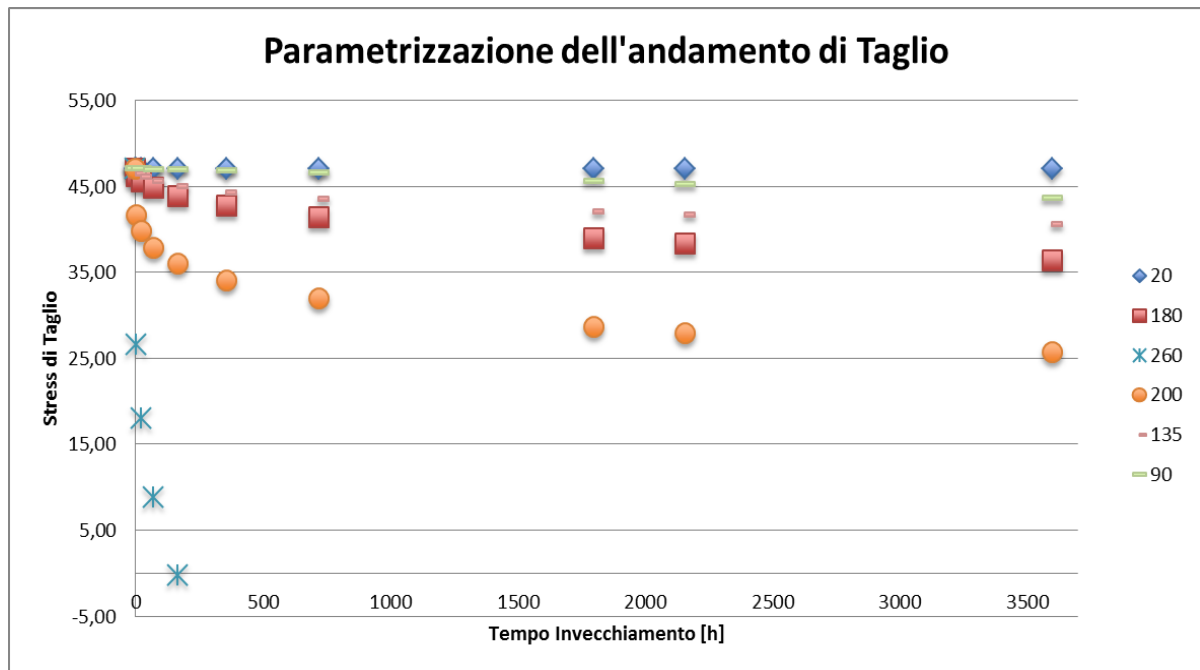


Figura 95: Risultati ottenuti dalla parametrizzazione utilizzando Excel

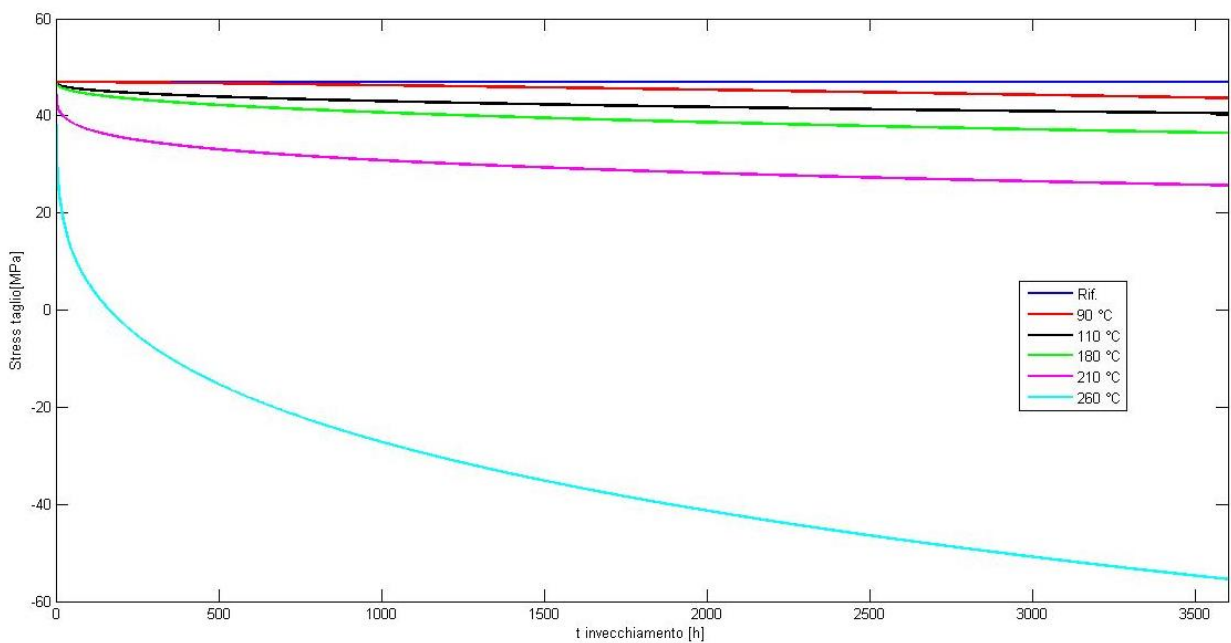


Figura 96: Risultati ottenuti dalla parametrizzazione utilizzando Matlab.

Per ultimo vengono inseriti grafici che rappresentano il fitting sulle singole prove di invecchiamento.

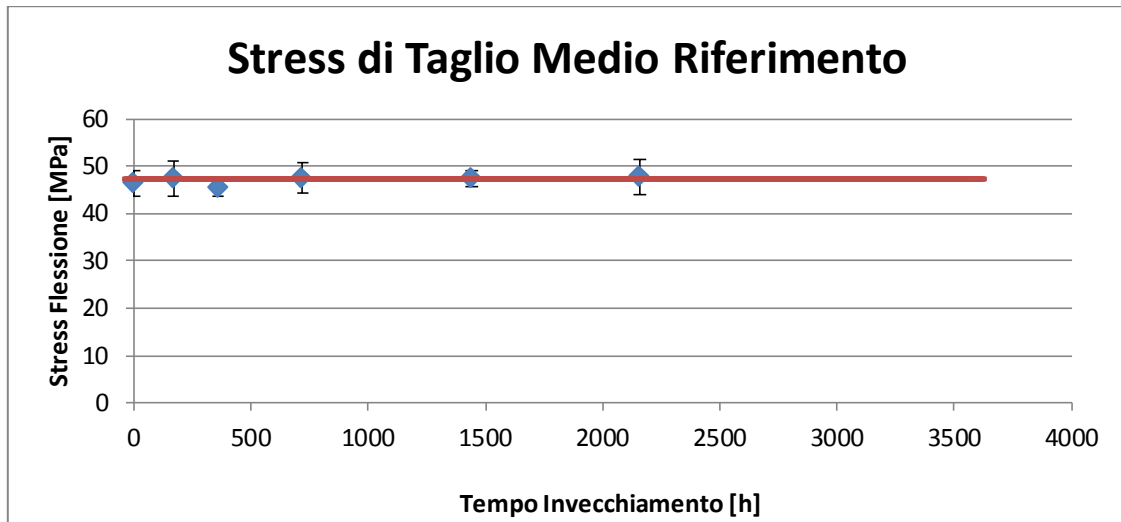


Figura 97: Parametrizzazione dell'andamento a taglio per il riferimento

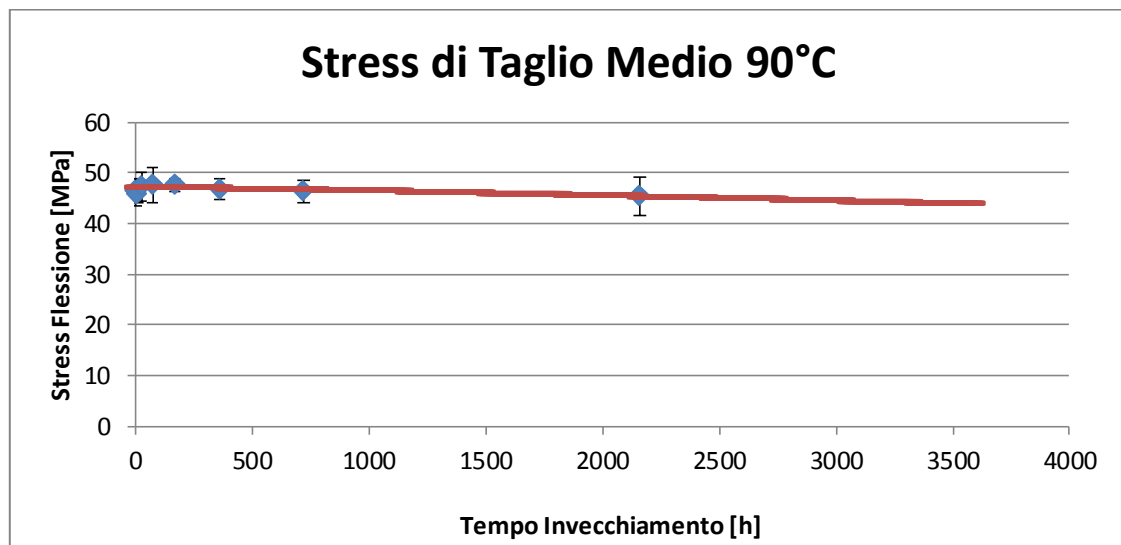


Figura 98: Parametrizzazione dell'andamento a taglio per 50% Tg

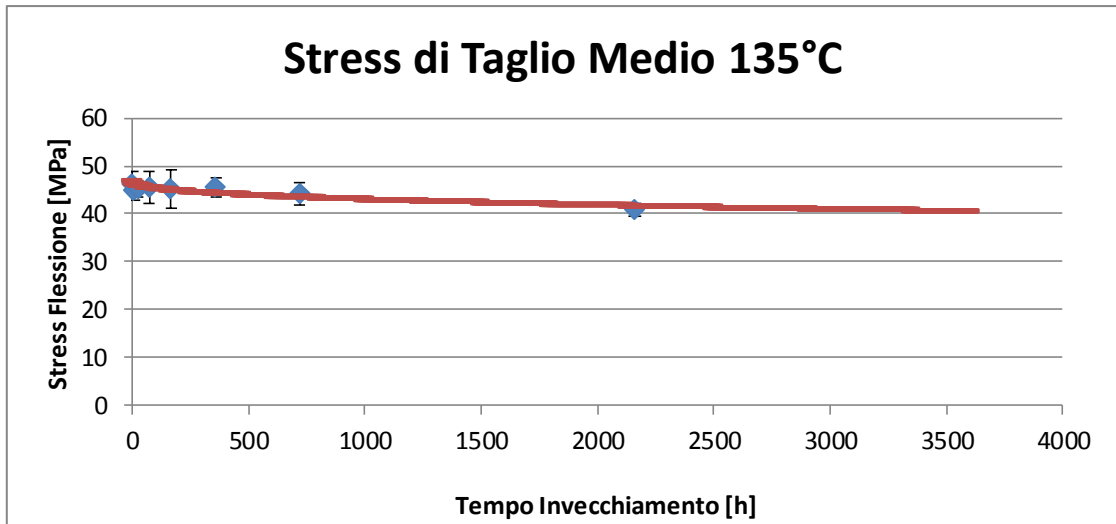


Figura 99: Parametrizzazione dell'andamento a taglio 75% Tg

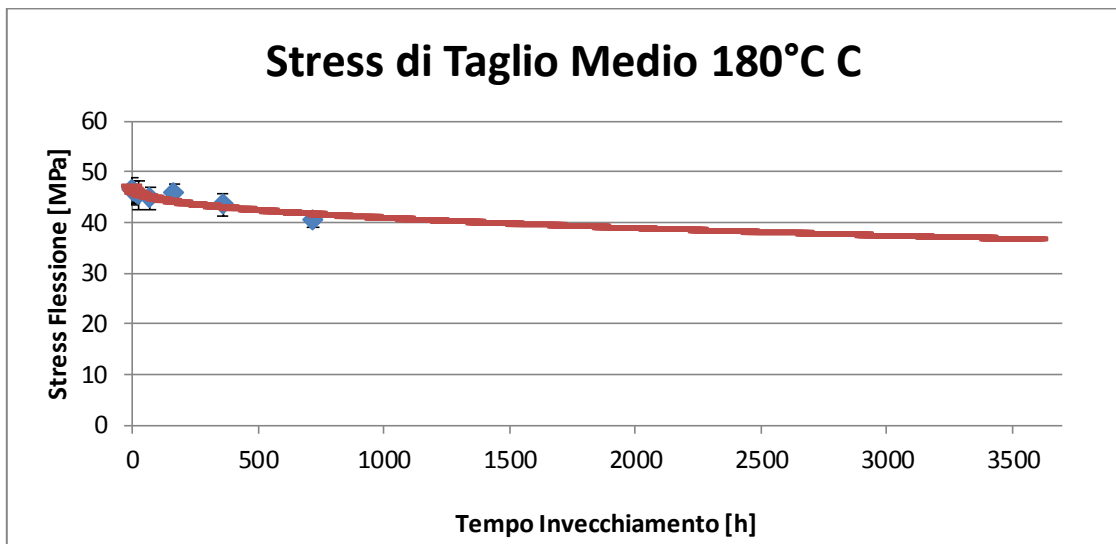


Figura 100: Parametrizzazione dell'andamento a taglio per 100 % Tg C

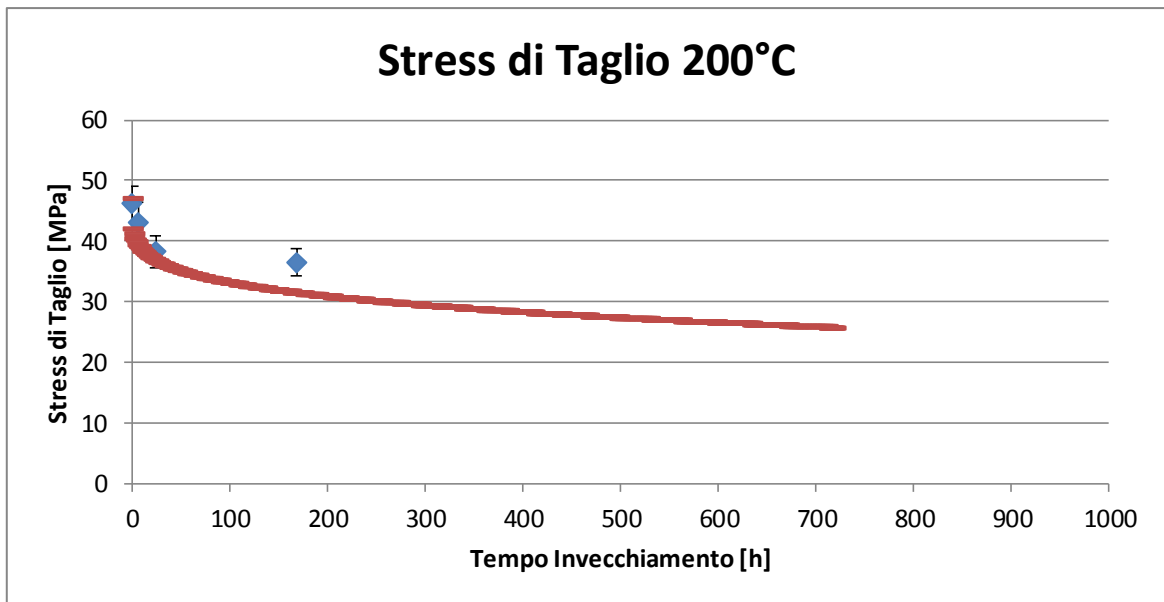


Figura 101: Parametrizzazione dell'andamento a taglio per 110% Tg

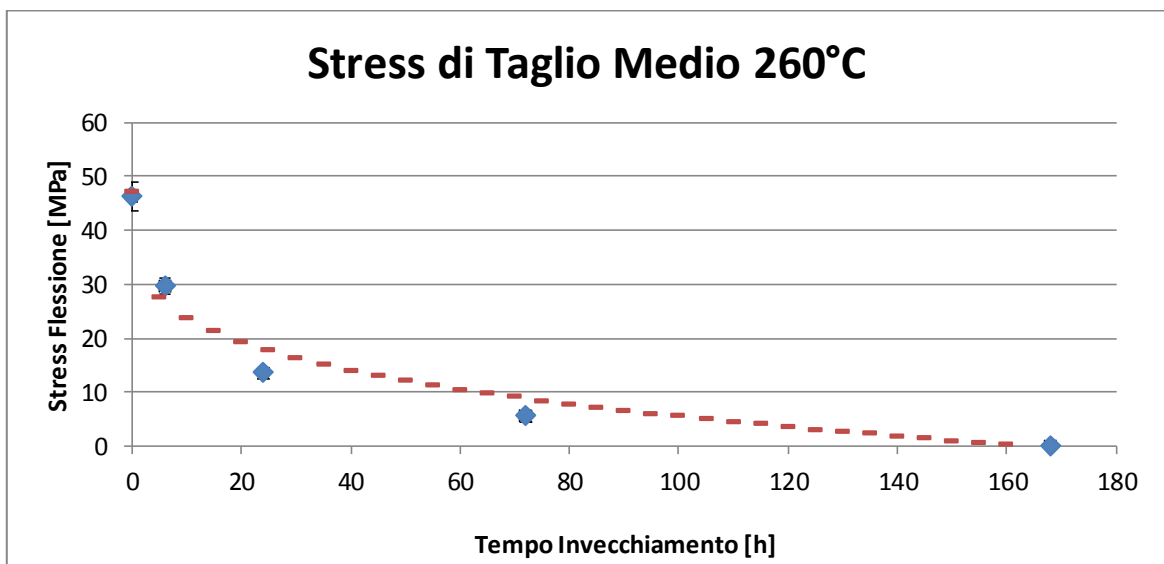


Figura 102: Parametrizzazione dell'andamento a taglio per 150% Tg

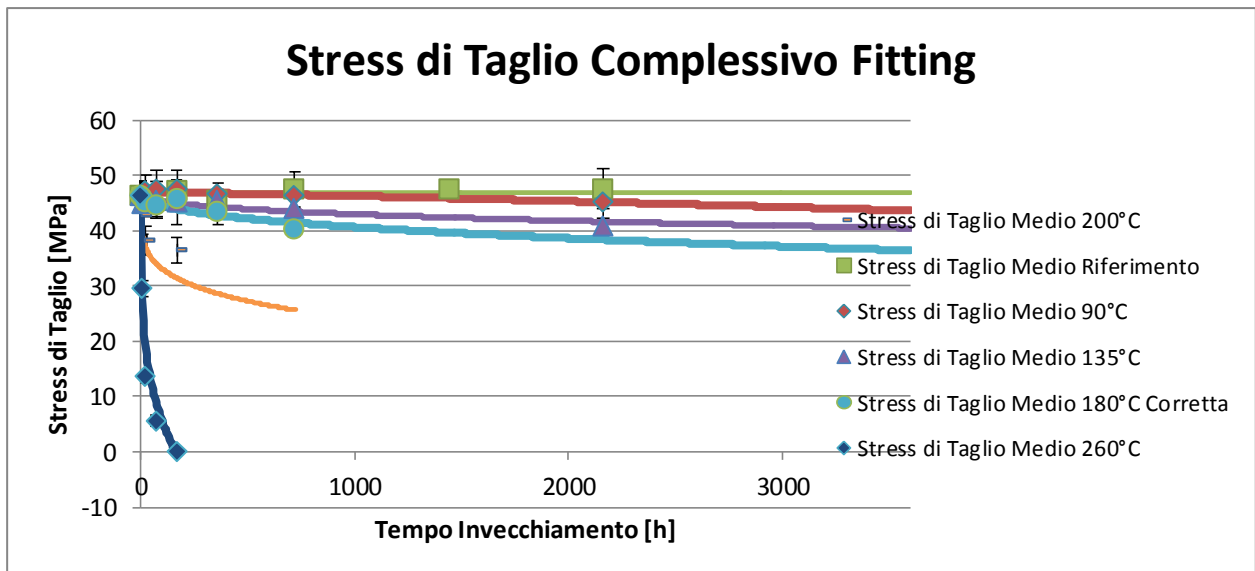


Figura 103: Riepilogo parametrizzazione dell'andamento a taglio

In conclusione si nota che la parametrizzazione dell'andamento del peso, flessione e taglio sono corrette per tutte le prove. In alcuni casi vi sono dei piccoli discostamenti dall'intervallo di confidenza ma essendo piccoli sono accettati perché ritenuti influenti.

CAPITOLO 6

6. CONCLUSIONI

Il seguente capitolo viene dedicato ai risultati conclusivi del processo di invecchiamento del materiale composito studiato.

Di seguito si elencano e descrivono i principali risultati ottenuti. Si è notato che, dopo il ciclo di post-cura, non si è ottenuta una completa polimerizzazione, quindi con l'invecchiamento termico si è determinato che:

- 1) Per invecchiamenti a partire da 75% Tg, 50% Tg e 50% Tg-20, la completa polimerizzazione della resina avviene entro il primo giorno di invecchiamento. Nei restanti casi, con temperatura più elevate quali 100% Tg, 110% Tg, 145% Tg, la polimerizzazione avviene entro le prime 6h.
- 2) Con la prova a 145% Tg si è notata una completa degradazione della matrice entro i primi 3 giorni. All'estrazione del settimo giorno le proprietà meccaniche sono nulle. L'invecchiamento 50% Tg, rispetto ai provini di riferimento, mantiene all'incirca inalterate le proprietà meccaniche, e in alcuni casi sono leggermente superiori.
- 3) Si è osservato che il ciclo di fatica termica 50% Tg -20 è più dannoso sul composito, in particolare sulla matrice, rispetto all'invecchiamento 50% Tg. In generale vi è un peggioramento delle proprietà meccaniche di circa 10% mentre la perdita di massa è simile.
- 4) La matrice subisce una maggiore degradazione, questo perché è la parte più esposta ed essendo una resina epossidica e termoindurente all'aumentare della temperatura il decadimento delle proprietà aumenta. Questo comportamento viene evidenziato nella prova di taglio interlaminare.
- 5) La variazione di peso è legata alla degradazione della resina ed aumenta all'aumentare della temperatura di invecchiamento. Conseguentemente le proprietà meccaniche, come specificato precedentemente, peggiorano dal 10% fino al caso 100% di deterioramento.
- 6) Si è dimostrato come un aumento di temperatura maggiore o uguale alla Tg, anche per brevi periodi, compromette in maniera definitiva le proprietà del materiale composito. Questo pone un serio limite sull'utilizzo dei compositi. Si può notare come con temperature dal 110% Tg al 150% Tg si ha avuto un decadimento sempre più notevole e veloce con l'aumentare della temperatura di prova.
- 7) Il modello analitico sviluppato permette di ben descrivere dati sperimentali ottenuti. La generalizzazione del modello tramite adimensionalizzazione della temperatura di

invecchiamento (rapporto T/Tg) potrebbe permettere l'estensione dei risultati a resine epossidiche di tipologia differente: questa verifica sarà oggetto di studi futuri. Ad oggi il modello individuato permette comunque la stima del decadimento delle proprietà meccaniche per tutti i materiali che adottano la resina ER450 EPOXY MATRIX.

- 8) I coefficienti a e b della formula di parametrizzazione dipendono dal rapporto T/Tg. Per ogni condizione di prova i parametri "best fit" sono stati individuati e poi riportati come andamento in funzione del rapporto T/Tg.

CAPITOLO 7

7. DIRETTIVE

7.1. Scheda tecnica resina epossidica e fibra di carbonio

Per la redazione della seguente tesi è stata consultata la scheda tecnica della resina epossidica ER450 EPOXY MATRIX, come descritto secondo l'azienda produttrice della resina stessa Saati Composites.

La fibra di carbonio utilizzata è la T700S, dell'azienda produttrice Torayca.

Si rimanda alla scheda tecnica per maggiori dettagli tecnici.

7.2. *Direttiva sulla flessione*

Per quanto riguarda la prova di flessione, è stata presa in considerazione la normativa Europea UNI EN ISO 14125.

Si rimanda alla scheda tecnica per maggiori dettagli tecnici.

7.3. *Direttiva sul taglio interlaminare*

Per la prova di taglio interlaminare, invece, si è utilizzata la normativa Europea UNI EN ISO 14130.

Si rimanda alla scheda tecnica per maggiori dettagli tecnici.

CAPITOLO 8

8. BIBLIOGRAFIA

Libri, pubblicazioni e ricerche

A. Corigliano, O. Allix, Some aspects of interlaminar degradation in composites, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 185 (2000) 203-224

A. Jumahat, C. Soutis, F.R. Jones, A. Hodzic, Fracture mechanisms and failure analysis of carbon fibre/toughened epoxy composites subjected to compressive loading, *Composite Structures*, 92 (2), pp. 295-305 (2009)

D. Lévêque, H. Katoh, J. Cinquin, K. Hasegawa, Durability evaluation of carbon/BMI composites after thermal aging, 18th International conference on composite materials

L.A. Khan, A. Nesbitt, R. J. Day, Hygrothermal degradation of 977-2A carbon/epoxy composite laminates cured in autoclave and Quickstep, *Composites: Part A* 41 (2010) 942-953

L. Donati, *Tecnologie speciali LM*, 2012-2013

E. Troiani, L. Donati, R. Di Sante, P. Proli, Invecchiamento termico di CFRP, MaSTeR Lab – Dipartimento di Ingegneria Industriale – Campus di Forlì, Università di Bologna

G.M. Odegard and A. Bandyopadhyay, Physical Aging of Epoxy Polymers and Their Composites, *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics* 49 (24) 1695-1716 (2011)

H. Zhu, D. Li, D. Zhang, B. Wu, Y. Chen, Influence of voids on interlaminar shear strength of carbon/epoxy fabric laminates, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 19 (2009) s470-s475

K Giannadakis and J Varna, Effect of thermal aging and fatigue on failure resistance of aerospace composite materials, 5th International EEIGM/AMASE/FORGEMAT Conference on Advanced Materials Research, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 5 (2009) 012020, IOP Publishing

M.C. Lafarie-Frenot, S. Rouquie, Influence of oxidative environments on damage in c/epoxy laminates subjected to thermal cycling, *Composites Science and Technology* 64 (2004) 1725-1735

M.P. Foule, A. Bergeret, L. Ferry, P. Ienny, A. Crespy, Study of hygrothermal ageing of glass fibre reinforced PET composites, *Polymer Degradation and Stability* 89 (2005) 461 - 470

R. Martin, *Ageing of Composites*, Woodhead Publishing and Maney Publishing on behalf of The Institute of Materials, Minerals & Mining, CRC Press (2008)

T. Shimokawa, H. Katoh, Y. Hamaguchi, S. Sanbongi, H. Mizuno, H. Nakamura, R. Asagumo & H. Tamura, Effect of Thermal cycling on Microcracking and Strength Degradation of High-Temperature Polymer Composite Materials for Use in Next Generation SST Structures, *Journal of Composite Materials* (2002) 36:885

Thomas K. Tsotsis, Scott Keller, Kyejune Lee, Jason Bardis, Jack Bish, Aging of polymeric composite specimens for 5000 hours at elevated pressure and temperature, Composites Science and Technology 61 (2001) 75-86

W. Stanley, Engineering Mechanics of Plastics and Composites, ME6072, Spring Semester 8 (2) (2013), University of Limerick lecture sheets

RINGRAZIAMENTI

Tengo in modo speciale a ringraziare ogni persona che mi ha seguito durante questo importante percorso di studi. Ogni professore che, con pazienza e dedizione, mi ha dedicato tempo ed ha investito energia nell'insegnamento dell'ingegneria meccanica è ampiamente ringraziato in questa sezione.

In maniera particolare, vorrei ringraziare il relatore di questa tesi, Professor Lorenzo Donati, per essersi mostrato ottimo mentore e guida professionale durante la fase finale del mio cammino universitario. Vorrei menzionare anche il correlatore, Ingegnere Paolo Proli, per il prezioso

aiuto nel laboratorio MasterLab e per avere dispensato consigli utili sul miglioramento di questa tesi.

Sono altrettanto grato all'azienda Riba Composites di Faenza per avere reso possibile l'analisi dell'invecchiamento dei compositi CFRP.

Infine, un ricordo particolare va alla mia amata nonna Maria Ceccaroni, che mi ha spinto in primo luogo a coltivare la passione per l'Ingegneria Meccanica, per i sogni impegnativi e che mi ha insegnato a non mollare mai.

Infine ringrazio la mia ragazza, la mia famiglia, i miei amici Barto, Bini, Dede, Grend e Carletto per l'aiuto e la pazienza che hanno avuto con me. Un saluto viene infine dedicato a chi mi ha aperto l'orizzonte durante il periodo di Erasmus presso l'Università di Limerick, in Irlanda.