

The background of the slide features a large, faint watermark of the Politecnico di Milano seal. The seal is circular and contains a central illustration of several figures in classical attire, possibly representing the founding fathers of the institution. The text 'POLITECNICO' is arched across the top, and 'MILANO' is arched across the bottom. The entire seal is enclosed within a decorative border of small circles.

Caratteristiche Resine Biocompatibili

Author: M.A.Chehour
Relatore: Prof. Janszen Gerardus

17 luglio 2014

Dedicata alle persone che mi hanno influenzato ed aiutato a realizzare ciò che ho sempre sognato, un ringraziamento molto speciale alla Dott.ssa Cristiana Cortellezzi a cui devo molto, al sig. Ripamonti ed in modo molto particolare al prof. Janszen Gerardus

Indice

Introduzione	vi
1 Realizzazione dei campioni	1
1.1 Materiale isotropo ed anisotropo	1
1.2 Disposizione degli strati	3
1.3 Modulo di elasticità	3
1.4 Campioni di Canapa e fibre di Vetro	5
2 Caratteristiche DSC e Reometro	9
2.1 Calorimetria Differenziale a Scansione	9
2.1.1 Matrici nei materiali compositi	12
2.1.2 Le proprietà delle matrici dei materiali compositi	13
2.1.3 Matrici Polimeriche Termoplastiche	14
2.1.4 Matrici polimeriche termoindurenti	15
2.1.5 Processo di Cura	16
2.2 Analisi DSC della Resina	17
2.3 Reometro	18
2.3.1 La misura della viscosità con reometri rotazionali	18
2.3.2 Reometro a cono e piatto	19
2.3.3 Reometro a piatti paralleli	20
2.3.4 Reometro a capillare	21
2.4 Analisi reologica della resina	23
3 Le proprietà meccaniche del bioresina	30
3.1 Prova di flessione	30
3.1.1 Analisi numerica dei dati	31
4 Misure del livello d'isolamento acustico	41
4.1 Misure in laboratorio ed in opera	42
4.1.1 Le camere di prova	43
5 Conclusione	46
Appendice A	47
Appendice B	50

Elenco delle figure

1.1	Effetto dell'orientamento delle fibre sui materiali compositi	2
1.2	Sovrapposizione degli strati	3
1.3	Effetto dell'orientamento delle fibre sui materiali compositi	4
1.4	a) orientamento delle fibre e b) processo del sacco a vuoto	5
1.5	I costituenti del sacco a vuoto	6
2.1	Calorimetria a scansione differenziale	9
2.2	Schema transitorio del DSC	11
2.3	I polimeri termoplastici di piú impiego	15
2.4	Le trasformazioni del processo curing	16
2.5	Flusso di calore in funzione della temperatura a diversi stati	17
2.6	Il flusso di scorrimento tra due piatti paralleli	19
2.7	Spaccato di un reometro rotazionale	20
2.8	La geometria cono-piatto	21
2.9	La geometria piatto-piatto	21
2.10	Schema della geometria a capillare	22
2.11	Andamento viscosità a diverse temperature	23
2.12	La viscosità alla temperatura di 20°C	25
2.13	La viscosità alla temperatura di 30°C	27
2.14	La viscosità alla temperatura di 40°C	29
3.1	Prova di flessione (a)flessione a tre punti (b)flessione a quattro punti	30
3.2	Prova a tre punti	32
3.3	Le curve dello sforzo in funzione della deformazione	33
3.4	Le curve dello sforzo in funzione della deformazione	34
3.5	Le curve dello sforzo in funzione della deformazione	35
3.6	Le curve dello sforzo in funzione della deformazione	36
3.7	Le curve dello sforzo in funzione della deformazione	37
3.8	Le curve dello sforzo in funzione della deformazione	38
3.9	Le curve dello sforzo in funzione della deformazione	39
4.1	Le diverse parti dell'energia sonora incidente	41
4.2	Schema delle camere di prova	42
4.3	Camera di prova in 3D	44
4.4	Schizzo delle diverse sezioni	45

Elenco delle tabelle

1.1	Le dimensioni dei trentasei campioni	8
1.2	La media e l'incertezza delle diverse resine	8
2.1	La viscosità alla temperatura di 20°C	24
2.2	La viscosità alla temperatura di 30°C	26
2.3	La viscosità alla temperatura di 40°C	28
3.1	Le velocità predefinite	31
3.2	Le dimensioni del campione	32
3.3	Lo spessore t in funzione della larghezza W	32
3.4	Le caratteristiche meccaniche dei materiali	40
3.5	Le masse dei diversi materiali compositi	40

Sommario

I materiali compositi innovativi, biocompatibili e biodegradabili, sono molto importanti al giorno d'oggi. Per cui si è deciso di caratterizzare ed analizzare tali materiali che sono composti da matrici Eposidiche biocompatibili e rinforzate sia con fibre naturali di Canapa sia con fibre sintetiche di vetro. Al termine della preparazione della miscela resina-indurente, si è passati alla sua caratterizzazione via il Reometro e il DSC, per poi passare alla produzione di pannelli compositi utilizzando la tecnologia di infusione RTM che si propone come alternativa ai classici processi di impregnazione manuale o in autoclave. Infine si determinano le caratteristiche meccaniche, ricavando il (**modulo di Young a flessione** E_f), in più determinare lo (**sfuerzo massimo** $\sigma_{f_{max}}$) assieme alla (**deformazione massima** $\epsilon_{f_{max}}$) raggiungibile dal materiale prima della rottura, per analizzare i possibili impieghi in ambito industriale ingegneristico.

Introduzione

La scienza dei materiali é un campo molto importante, perché siamo sempre alla ricerca di trovare materiali ad alta resistenza, bassa densità e biocompatibili. Però tale compito non é semplice ma non é impossibile, una materia in natura si trova, a seconda delle condizioni esterne, sotto forma di un liquido, gas o solido. In campo aeronautico non tutti gli elementi metallici/non-metallici possono soddisfare le proprietà meccaniche necessari che ci permettono di costruire un velivolo leggero però allo stesso tempo resistente per cui si percorre alla creazione di un materiale composito che sarà una combinazione di diversi elementi dove ciascuno di essi contiene una parte delle proprietà meccaniche volute.

Classificazione dei materiali: I materiali solidi sono classificati in tre gruppi diversi; i metalli (il metallo é un materiale conduttore di calore e di elettricità e con buone caratteristiche di resistenza, esempio: l'Argento(Ag), l'Alluminio(Al), il Ferro(Fe) ecc), le ceramiche (la ceramica é un composto non metallico, inorganico e molto duttile allo stato naturale, é un cattivo conduttore di calore e di elettricità, esempio: la Terracotta/coccio, il Grés, le Terraglie ed infine la Porcellana) ed i polimeri. I polimeri includono la plastica familiare e i materiali in gomma. Molti di loro sono composti organici che si basano chimicamente su carbonio, idrogeno, ed altri elementi non metallici, inoltre, hanno delle strutture molecolari molto grandi. Questi materiali hanno tipicamente basse densità e possono essere estremamente flessibili.

I materiali polimerici sono generalmente il risultato della reazione di polimerizzazione di una quantità di molecole base (monomeri) per formare catene anche molto lunghe. Si parla di omopolimeri se il monomero é unico, copolimeri se il polimero é ottenuto da due o più monomeri diversi, e di leghe polimeriche se il materiale é il risultato della miscelazione di due monomeri che polimerizzano senza combinarsi chimicamente.

Un materiale polimerico é in genere composto da macromolecole costituite dalla stessa tipologia di unità ripetitiva, ma il numero di unità ripetitive varia per ciascuna macromolecola, per cui le macromolecole che costituiscono un materiale polimerico hanno diversa lunghezza, quindi é necessario conoscere la distribuzione dei pesi molecolari (ovvero la percentuale di macromolecole aventi una specifica lunghezza) per determinare le proprietà chimico-fisiche del materiale polimerico in esame.

Classificazione dei materiali polimerici: I materiali polimerici puri si dividono in:

- Termoplastici: acquistano malleabilità, cioè rammolliscono, sotto l'azione del calore; possono essere modellati o formati in oggetti finiti e quindi per raffreddamento tornano ad essere rigidi; tale processo può essere ripetuto tante volte
- Termoindurenti: dopo una fase iniziale di rammollimento per riscaldamento, induriscono per effetto della reticolazione; nella fase di rammollimento per effetto combinato di calore e pressione risultano formabili; se vengono riscaldati dopo l'indurimento non tornano più a rammollire, ma si decompongono carbonizzandosi;

- Elastomeri: Presentano elevata deformabilità

Dal punto di vista pratico, in genere si sfruttano delle opportune mescole, costituite da uno o più materiali polimerici più l'aggiunta di additivi. Per tale motivo, alla classificazione standard dei materiali polimerici si affianca una classificazione commerciale, secondo la quale i materiali polimerici si dividono in:

- Fibre: Dal punto di vista pratico, in genere si sfruttano delle opportune mescole, costituite da uno o più materiali polimerici più l'aggiunta di additivi. Per tale motivo, alla classificazione standard dei materiali polimerici si affianca una classificazione commerciale, secondo la quale i materiali polimerici si dividono in:
- Materie plastiche: Formulate a partire da termoplastici e termoindurenti;
 - Resine: Particolari materie plastiche formulate a partire da termoindurenti
- Gomme: Formulate a partire da elastomeri

Le caratteristiche vantaggiose delle materie plastiche rispetto ai materiali metallici e non metallici sono la grande facilità di lavorazione, l'economicità, la colorabilità, l'isolamento acustico, termico, elettrico, meccanico (vibrazioni), la resistenza alla corrosione e l'inertia chimica, nonché l'idrorepellenza e l'inattaccabilità da parte di muffe, funghi e batteri. Quelle svantaggiose sono l'attaccabilità da parte dei solventi (soprattutto le termoplastiche) e degli acidi (in particolare le termoindurenti) e scarsa resistenza a temperature elevate

Nei paesi occidentali, il consumo di plastica è cresciuto a un ritmo incredibile negli ultimi due o tre decenni. Nelle società consumatore di Europa e America, le scarse risorse petrolifere sono utilizzate per produrre una grande varietà di plastiche per una varietà ancora più ampia di prodotti. Molte delle applicazioni sono per i prodotti con un ciclo di vita di meno di un anno e poi la vasta maggioranza di queste plastiche vengono poi scartate. In più istanze di recupero di questi rifiuti di plastica è semplicemente non economicamente sostenibile.

Nel settore industriale (settore automobilistico, per esempio) vi è un crescente movimento verso il riutilizzo e ritrattamento di plastiche per motivi economici, nonché motivi ambientali, con molti lodevoli esempi di aziende che sviluppano tecnologie e le strategie per il riciclaggio di materie plastiche. Non solo è in plastica fatto da un non rinnovabile risorsa, ma è generalmente non biodegradabile (o il processo di biodegradazione è molto lento). Questo significa che la lettiera plastica è spesso il più discutibile tipo di lettiera e sarà visibile per settimane o mesi, e rifiuti siederanno in discarica per anni senza degradarsi.

Anche se c'è anche una rapida crescita del consumo di materie plastiche in via di sviluppo, il consumo di plastica pro capite nei paesi in via di sviluppo è molto più basso rispetto ai paesi industrializzati. Queste plastiche sono, tuttavia, spesso prodotte dai costosi materie prime importate. C'è un campo di applicazione molto più ampio per il riciclaggio nei paesi in via di sviluppo a causa di diversi fattori:

- I costi del lavoro sono più bassi
- In molti paesi vi è una cultura esistente del riuso e del riciclo, con il sistema associato di raccolta, la cernita, la pulizia e il riutilizzo dei 'rifiuti' o materiali utilizzati.
- Vi è spesso un 'settore informale', che è l'ideale per prendere in attività di riciclaggio di piccole dimensioni, Tali opportunità per guadagnare un piccolo reddito raramente sono mancati da parte dei poveri urbani.

- Ci sono meno leggi per controllare gli standard dei materiali riciclati. (Questo non significa che gli standard possono essere bassi - il consumatore richiederá sempre un certo livello di qualità)
- I costi di trasporto sono spesso piú bassi, con la mano o con i carri trainati da buoi spesso utilizzati.
- Materie prime a basso costo dá un vantaggio nel mondo produttivo competitivo.
- L'uso innovativo di macchinari rottami porta spesso bassi costi d'ingresso per l'elaborazione o lavorazione.

Nei paesi in via di sviluppo la possibilità di riciclaggio della plastica é in crescita come la quantità di plastica consumata aumenta.

Non tutte le plastiche sono riciclabili. Ci sono quattro tipi di plastica che sono comunemente riciclati:

- Polietilene (PE) - sia ad alta che bassa densità
- Polipropilene (PP)
- Polistirene (PS)
- Cloruro di polivinile (PVC)

Un problema comune con il riciclaggio delle plastiche é che le materie plastiche sono spesso costituite da piú di un tipo di polimero o ci può essere una sorta di fibra aggiunta alla plastica (un composto) per dare maggiore resistenza. Questo può rendere difficile il recupero.

I rifiuti industriali (o i rifiuti primari) possono essere ottenuti dalla lavorazione delle materie plastiche di grandi dimensioni, la produzione e le industrie di confezionamento. Respinto o materiale di scarto di solito ha buone caratteristiche per il riciclaggio e sarà puro. Sebbene la quantità di materiale disponibile é talvolta piccola, le quantità tendono ad essere in crescita come consumi, e quindi la produzione aumenta.

I rifiuti commerciali sono disponibili spesso dalle officine, artigiani, negozi, supermercati e grossisti. Un sacco di plastica a disposizione da queste fonti sarà PE, spesso contaminati.

I rifiuti agricoli sono disponibili presso le aziende agricole e vivai al di fuori delle aree urbane. Questi sono di solito sotto forma di confezioni (contenitori di plastica o fogli) o materiali da costruzione (irrigazione o tubi di gomma).

I rifiuti urbani possono essere raccolti da aree residenziali (rifiuti domestici o di famiglia), strade, parchi, depositi di raccolta e da discariche. Nelle città asiatiche questi tipi di rifiuti sono comuni e possono essere raccolti sia dalle strade che dalle famiglie in accordo con i cittadini.

Ci sono diverse prove semplici che possono essere utilizzate per distinguere tra i tipi comuni di polimeri in modo che possano essere separati per l'elaborazione. Il test dell'acqua. Dopo l'aggiunta di qualche goccia di detersivo liquido a dell'acqua messa in un piccolo pezzo di plastica per vedere poi se galleggia. Prova a fiamma. Tenere un pezzo di plastica con una pinzetta o sul retro di un coltello e applicare una fiamma.

Capitolo 1

Realizzazione dei campioni

I compositi a fibre lunghe vengono sovente combinati per uniformare la resistenza nelle diverse direzioni, in altre parole creare un materiale isotropo, realizzando sovrapposizioni di strati con le fibre orientate diversamente e ottenere un laminato con proprietà simili in tutta una giacitura. Gli strati del composito si mettono insieme inserendo della resina fra uno strato e l'altro, la resina può essere sintetica o naturale, gli strati sono a forma di un tessuto a fibre lunghe unidirezionale o bidirezionale. Genericamente una resina può essere definita come prodotto organico, solido o semisolido, senza preciso punto di fusione e, generalmente, d'alto peso molecolare. Molte resine sono polimeri. Le resine trovano molte applicazioni in numerosi settori industriali, in particolare l'attenzione è qui rivolta alle applicazioni dell'industria tessile dei materiali compositi.

1.1 Materiale isotropo ed anisotropo

I materiali sono classificati in materiali isotropi ed anisotropi, i materiali isotropi sono dei materiali che hanno le stesse proprietà in tutte le direzioni, e gli sforzi assiali creano soltanto deformazioni assiali. Per confronto, i materiali anisotropi hanno diverse proprietà in tutte le direzioni in un punto di un corpo. Non vi sono piani di simmetria e gli sforzi normali creano sia deformazioni normali che tangenziali. Un materiale è isotropo se le proprietà sono indipendenti dalla direzione nello stesso materiale. Per esempio, si consideri la figura ??, Se tale elemento è caricato lungo le direzioni, 0° , 45° , e 90° il modulo di elasticità (E) è lo stesso in tutte le direzioni. D'altronde, se il materiale è anisotropo (per esempio, lo strato composito mostrato in figura ??), esso ha le proprietà che variano con la direzione all'interno del materiale. In questo esempio, i moduli sono diversi in ciascuna direzione ($E_{0^\circ} \neq E_{45^\circ} \neq E_{90^\circ}$). Lo stesso discorso si applica alle proprietà del materiale, come il carico di rottura, il modulo di Poisson ed il coefficiente della dilatazione termica. una materia granulare, come il metallo ed il polimero, è considerata normalmente un materiale isotropo, mentre i compositi sono trattati come anisotropi. Tuttavia, anche le materie granulari come il metallo possono diventare anisotrope - per esempio, se sono altamente lavorate a freddo per produrre allineamento dei grani in una direzione specifica.

Si considera un composito unidirezionale mostrato nella porzione superiore della figura ??, dove le fibre unidirezionali sono orientati ad un angolo di 45 gradi rispetto all'asse x. Nel piccolo elemento quadrato isolato della regione indicata, perché l'elemento è inizialmente quadrato (in questo esempio), le fibre sono paralleli al diagonale AD dell'elemento. In contrasto, le fibre sono perpendicolari al diagonale BC. Ciò implica che l'elemento sia più rigido lungo il diagonale AD che lungo il diagonale BC. Nel caso in cui l'elemento sia soggetto ad un carico, l'elemento quadrato si deforma. Perché la rigidità lungo il diagonale AD è maggiore di quella lungo il diagonale BC, la lunghezza del diagonale AD non

aumenta a quanto aumenta quella del diagonale BC. Dunque, l'elemento inizialmente quadrato si deforma nella forma di un parallelogramma. Perché l'elemento è stato distorto in un parallelogramma, una deformazione di taglio γ_{xy} è indotta come un risultato di un accoppiamento fra le deformazioni assiali ϵ_{xx} e ϵ_{yy} .

Se le fibre sono allignate parallelamente alla direzione dello sforzo applicato, come nella porzione inferiore della figura ??, l'accoppiamento fra ϵ_{xx} e ϵ_{yy} non accade. In questo caso, l'applicazione del carico produce un allungamento nella direzione x e contrazione nella direzione y, e l'elemento distorto rimane rettangolare. Dunque, gli effetti di accoppiamento esibiti dai compositi si verificano soltanto se lo sforzo e la deformazione fanno riferimento ad un sistema di coordinate materiale non principale.

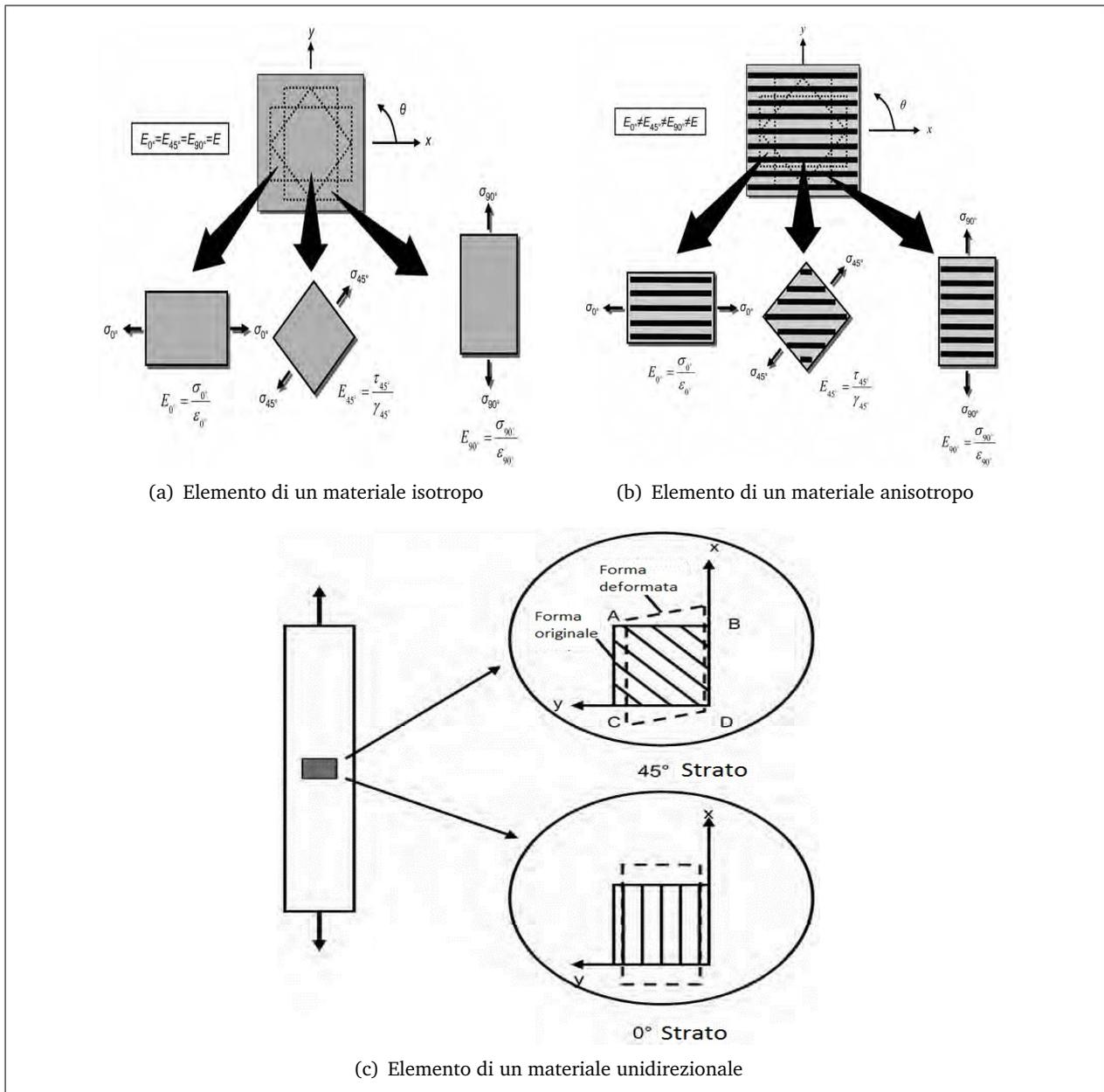


Figura 1.1: Effetto dell'orientamento delle fibre sui materiali compositi

1.2 Disposizione degli strati

Si considerino due tessuti di materiali diversi, quando il tessuto del primo materiale, in cui le fibre sono unidirezionali, é sovrapposto sull'altro tessuto del secondo materiale in cui le fibre sono unidirezionali e parallele alle fibre del primo materiale, il materiale composito viene definito come lamina, invece se le fibre del secondo materiale sono orientate diversamente dal primo in questo caso il materiale composito si definisce come laminato. Perché l'orientamento della fibra ha impatto diretto alle proprietà meccaniche, sembra logico orientare il maggior numero degli strati nella direzione principale di carico.

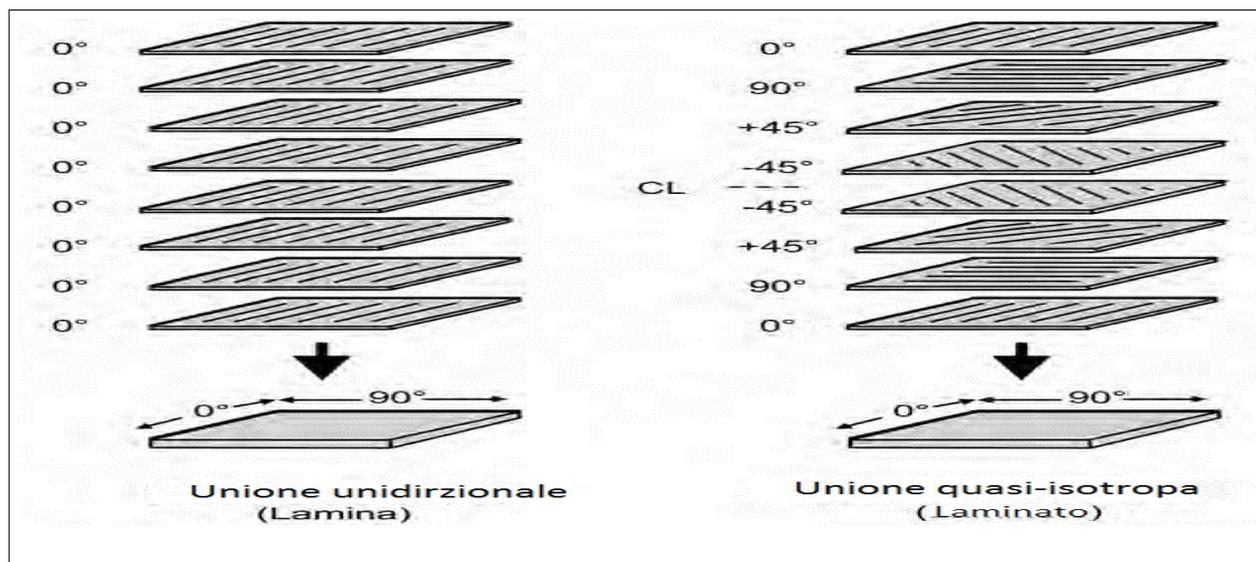


Figura 1.2: Sovrapposizione degli strati

1.3 Modulo di elasticità

Quando una lamina o un laminato di fibra continua e unidirezionale, é caricata/o in una direzione parallela alle sue fibre, il modulo longitudinale E_{11} può essere stimato dalle sue proprietà costitutive, utilizzando ciò che é noto come **regola delle miscele**.

$$E_{11} = E_f V_f + E_m V_m \quad (1.1)$$

Dove E_f é il modulo della fibra, V_f é la percentuale in volume della fibra, E_m é il modulo della matrice, e V_m é la percentuale in volume della matrice.

La resistenza alla trazione longitudinale σ_{11} può essere stimato dalla **regola delle miscele**:

$$\sigma_{11} = \sigma_f V_f + \sigma_m V_m \quad (1.2)$$

Dove σ_f e σ_m sono gli sforzi di rottura della fibra e della matrice, rispettivamente. Poiché le proprietà della fibra dominano per tutte le percentuali pratiche di volume, i valori della matrice possono essere spesso ignorati, pertanto: La figura 1.1 mostra il ruolo dominante delle fibre nella determinazione

$$\begin{aligned} E_{11} &= E_f V_f \\ \sigma_{11} &= \sigma_f V_f \end{aligned}$$

dello sforzo e della rigidezza. Quando i carichi sono paralleli alle fibre (0°), lo strato é piú forte e rigido di quelli carichi che sono trasversali (90°).

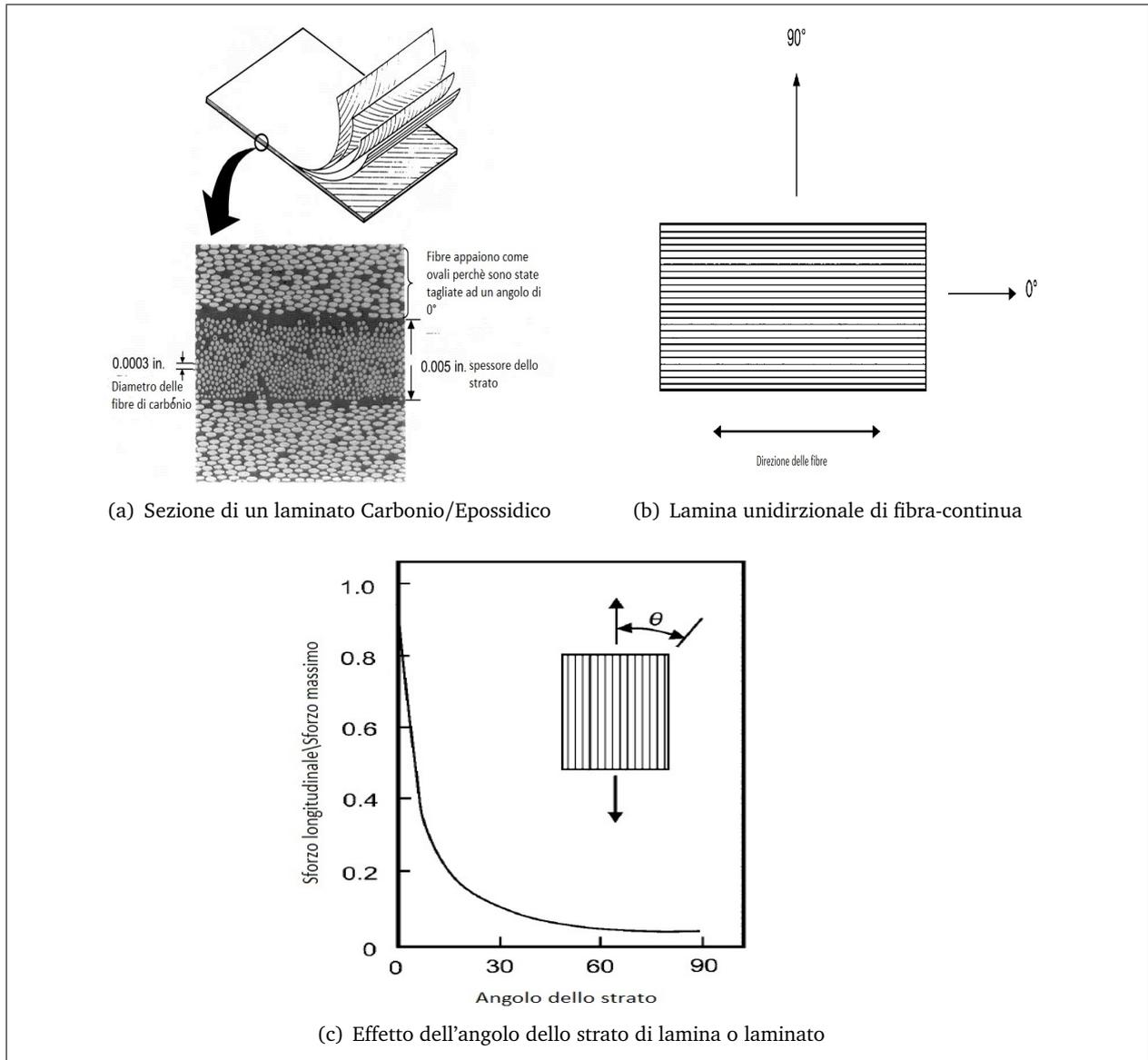


Figura 1.3: Effetto dell'orientamento delle fibre sui materiali composti

Quando una lamina mostrata in figura 1.3 é caricata trasversalmente (90° o 22-direzione), le fibre e la funzione matriciale in serie, con lo stesso carico applicato ad entrambi. Il modulo trasversale di elasticità E_{22} é dato come:

$$\frac{1}{E_{22}} = \frac{V_f}{E_f} + \frac{V_m}{E_m} \quad (1.3)$$

1.4 Campioni di Canapa e fibre di Vetro

La preparazione dei Campioni insieme alle prove di flessione sono state effettuate nei laboratori di Politecnico Di Milano. Al termine del lavoro si é ottenuto sei laminati di forma rettangolare con le seguenti dimensioni ($W = 16cm$ e $L = 20cm$), ciascuno dei quali contiene cinque strati dello stesso tessuto, ove si presentano due tipi di tessuto:

- Canapa
- Fibre di Vetro

Lo scopo del lavoro é quello di cercare di creare un laminato che sia isotropo, resistente, biocompatibile e nello stesso momento biodegradabile, per fare ciò una volta per tutte vengono applicate tre miscele di resina-indurente; due di loro sono composte da matrici Epossidiche biocompatibili mentre l'ultima é composta da matrice Epossidica sintetica che é utilizzata come riferimento:

1. Resina biocompatibile e biodegradabile, nominata GJ¹
2. Resina biocompatibile e biodegradabile, nominata LD²
3. Resina Epossidica, nominata E

Gli strati sono composti da fibre-continue, bidimensionali e l'orientamento delle fibre in ogni strato é diverso di quello seccessivo, in totale sono **cinque strati**, tre di loro con le fibre orientate nel seguente modo; $0^\circ/90^\circ$, mentre gli altri due hanno le fibre sfasate da quelle di prima; $-45^\circ/+45^\circ$, I tre strati di $0^\circ/90^\circ$ vengono alternati dagli altri strati di $-45^\circ/+45^\circ$, come mostra nella seguente figura 1.4(a), costituendo un materiale composito definito come laminato quasi-isotropo.

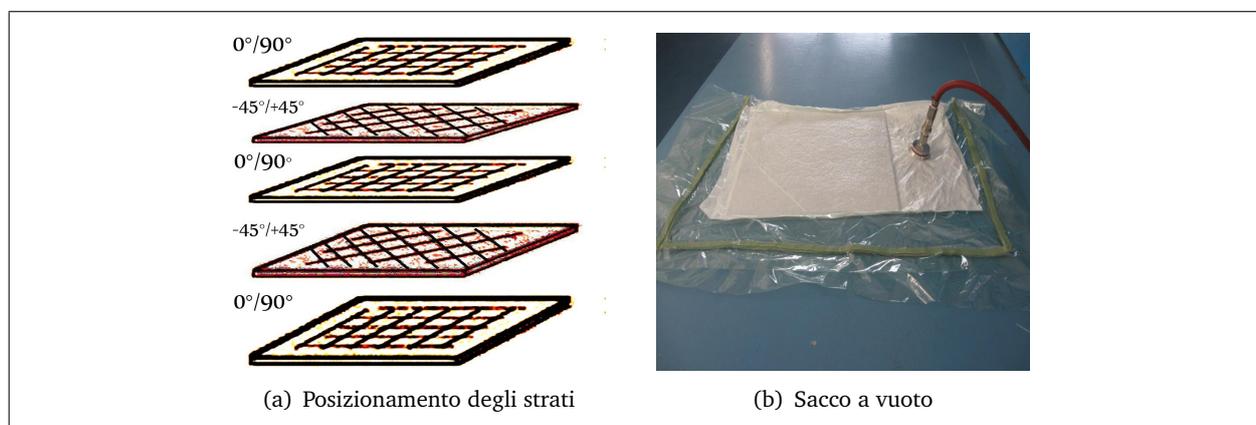


Figura 1.4: a) orientamento delle fibre e b) processo del sacco a vuoto

Come é ben noto aspirando l'aria contenuta in un recipiente non sufficientemente robusto, questo ver-
rá schiacciato dalla pressione esterna (quella atmosferica). Il principio su cui si basa la tecnologia del
sacco a vuoto é la stessa: il laminato 1.4(a) viene rivestito da un sacco di polietilene dal quale successi-
vamente viene estratta l'aria, la pressione atmosferica comprimerá così il sacco sul laminato esercitando
la medesima pressione su ogni punto della superficie per quanto essa possa essere complessa. Come

¹Resina del professor Gerardus Janszen

²Resina del professor Luca Di Landro

si può intuire, questa tecnologia è semplice e perciò economica. L'investimento necessario è quello di una pompa per vuoto aspirante, qualunque stampo convenzionale è adatto a questo scopo in quanto la pressione esercitata dal sacco su di un lato dello stampo è perfettamente equilibrata dall'altro lato della stessa pressione atmosferica. La tecnologia del sacco a vuoto 1.4(b) viene applicata in campo nautico principalmente per due scopi:

1. La realizzazione di manufatti per formatura a contatto con laminazione ad umido o pre-impregnati in modo da ottenere un rapporto resina/rinforzo predeterminato.
2. La costruzione a sandwich per realizzare quella pressione che garantisce la perfetta adesione dell'anima al laminato.

In linea generale la sequenza che permette di ottenere le migliori caratteristiche del laminato è:

1. Laminato
2. Peel Ply
3. Pellicola Microforata
4. Tessuto d'aerazione
5. Sacco per il vuoto

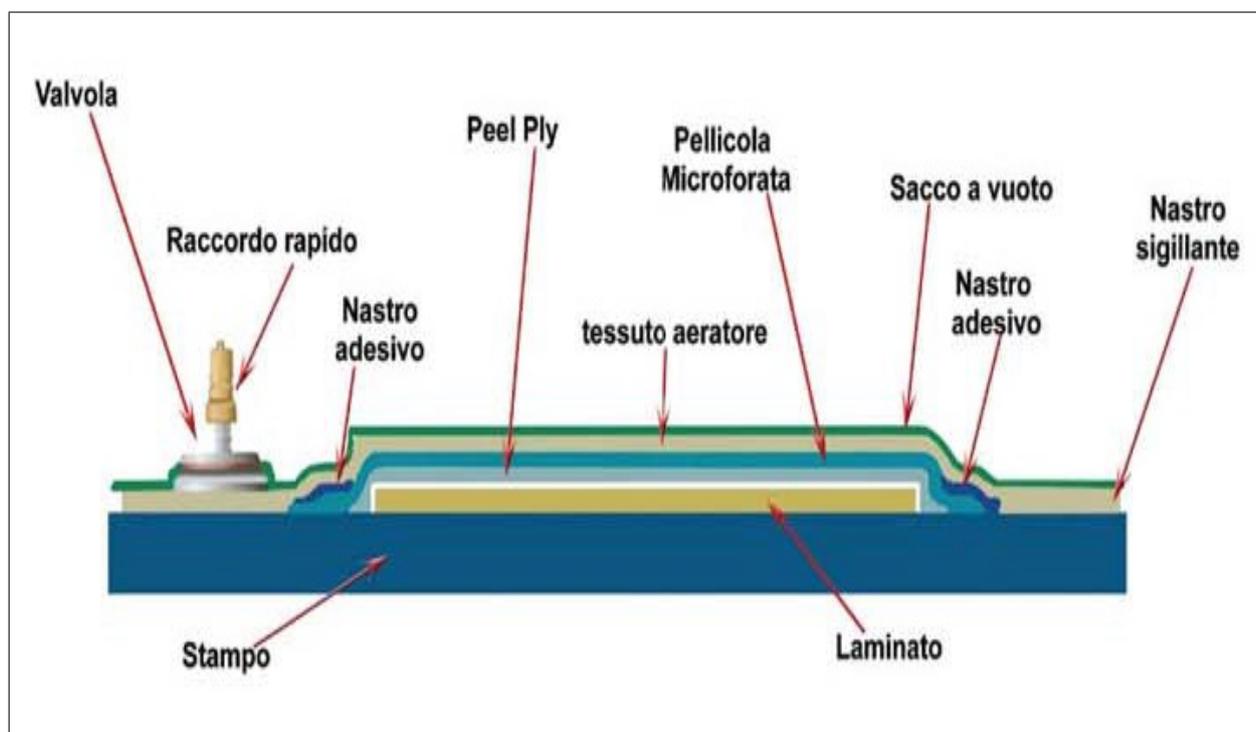


Figura 1.5: I costituenti del sacco a vuoto

Si crea il vuoto, il tessuto d'assorbimento e d'aerazione distribuirà la pressione uniformemente su tutta la superficie e assorbirà la resina in eccesso trasudata attraverso la pellicola microforata. Per portare

il sacco alla giusta pressione, abbiamo inserito nel sacco una presa d'aria dalla quale veniva aspirata l'aria. Ovviamente il sacco a vuoto era sigillato sulla superficie in Teflon con del mastice adesivo. Il materiale così ottenuto, dopo aver catalizzato a temperatura ambiente (circa 18°C), ha subito una fase di cura in cui è stato sottoposto ad un riscaldamento graduale di 1°C al minuto fino a raggiungere la temperatura di 60°C all'interno di un apposito forno. Dopodiché è rimasto in questa condizione per circa 6 ore. Una volta completata la fase di cura è stato possibile tagliare dai pannelli di compositi, tutti i campioni necessari ai test.

Per poter ottimizzare il processo di laminazione e valutare le proprietà del composito nel suo complesso ci si è voluti concentrare sullo studio di un materiale ecocompatibile e per questo motivo si è andati alla ricerca di una resina adatta, che conciliasse buone proprietà meccaniche mantenendo il più possibile elevata la percentuale di biocompatibilità del composito.

In campo aerospaziale la resina più utilizzata e qualificata per il settore è una resina epossidica denominata RTM6, la quale possiede buone caratteristiche meccaniche, elevata temperatura di transizione vetrosa successivamente alla cura e soprattutto richiede basse pressioni di iniezione, grazie al rapido decrescere della viscosità con l'aumento della temperatura: queste proprietà la rendono idonea alla tecnologia RTM, minimizzando le difficoltà di gestione del processo di produzione del composito.

Nell'ambito dei compositi a basso impatto ambientale, sono già stati fatti studi su fibre vegetali quali la juta, la ginestra, il bambú, ma sono sempre state utilizzate insieme a matrici polimeriche termoplastiche, quali il polipropilene e il polietilene; nel presente lavoro si è voluto ricercare una resina epossidica termoindurente biocompatibile per poter ottenere un composito maggiormente ecocompatibile da confrontare con quelli ottenuti con materiali classici, quali fibre di carbonio o vetro associati alla sopra citata RTM6. La scelta è ricaduta su una resina prodotta da Entropy Resins a partire da risorse rinnovabili e commercializzata in Italia da Alpas.

A differenza infatti delle normali resine epossidiche, che in larga parte sono composte da materie a base di petrolio, la Bioepoxy contiene materiali che derivano da sottoprodotti o da scarti di altri processi industriali, quali la pasta di legno (olio di pino) e dalla produzione di biocarburanti, che conferiscono al prodotto proprietà di allungamento e adesione peculiari.

Inoltre come si avrà modo di commentare successivamente, la viscosità di questo prodotto la rende adatta al processo di produzione del composito utilizzato, ovvero l'infusione con tecnologia RTM. Per poter attivare il processo di reticolazione la resina necessita di un catalizzatore che promuova la reazione. Come già detto prima per ogni tipo di resina si è riuscito ad ottenere due tipi di laminato, uno fatto di Canapa mentre l'altro fatto di fibre di vetro, in totale sono sei laminati. Ciascun laminato viene diviso a sua volta in altri sei pezzi di dimensioni eguali, però tale scopo è irrealizzabile dovuto all'imperfezione nelle misure durante il taglio. In seguito viene mostrata una tabella 1.1 in cui vengono presentate le dimensioni di tutti i trentasei pezzi ricavati alla fine.

Dove L=length, t=thickness e W=width, come si può notare dalla tabella 1.1, le dimensioni dei campioni variano sia da una resina ad un'altra che da un provino ad un altro. A questo punto è necessario calcolare per ogni tipo di resina la media μ e l'incertezza ³ δ dei sei campioni, però come si nota nella tabella 1.2 il calcolo della lunghezza è stato scartato perché come si vedrà più avanti, la lunghezza non dipende più dai campioni ma dai supporti su cui vengono messi tali campioni;

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad \delta = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2} \quad (1.4)$$

³Si è scelto una distribuzione Gaussiana

		E		GJ		LD	
		Canapa	Vetro	Canapa	Vetro	Canapa	Vetro
		[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
CP1	l	91.2	90.01	88.9	89.26	89.46	89.17
	t	2.35	0.95	2.35	0.93	2.31	0.93
	W	16.2	16.1	16.07	16.14	15.68	16.08
CP2	l	92.83	90.28	88.26	89.37	89.43	88.53
	t	2.35	0.92	2.34	0.9	2.36	0.92
	W	16.11	16.16	16.17	16.2	16.08	16.12
CP3	l	93.11	89.75	88.92	89.36	88.36	89.19
	t	2.35	0.92	2.32	0.92	2.3	0.95
	W	15.09	16.84	16	16.16	16.09	16.01
CP4	l	92.53	89.73	89.16	89.24	88.38	89.08
	t	2.35	0.91	2.35	0.94	2.36	0.93
	W	15.92	16.07	16.11	16.36	15.91	16.04
CP5	l	91.6	89.77	88.87	89.33	90.63	89.42
	t	2.35	0.91	2.32	0.9	2.36	0.94
	W	16.1	16.23	16.18	15.59	15.71	16.07
CP6	l	91.4	89.91	89.58	89.03	88.49	88.91
	t	2.35	0.92	2.38	0.93	2.35	0.92
	W	16.01	16.05	16.18	16.17	15.55	16.05

Tabella 1.1: Le dimensioni dei trentasei campioni

		μ_C	δ_C	μ_V	δ_V
GJ	t	2.335	0.0138	0.92	0.0167
	W	16.118	0.0731	15.936	0.3654
LD	t	2.338	0.0264	0.9317	0.0117
	W	15.746	0.3553	16.063	0.0372
E	t	2.35	0	0.9217	0.0147
	W	16.04	0.1175	16.241	0.3004

Tabella 1.2: La media e l'incertezza delle diverse resine

Capitolo 2

Caratteristiche DSC e Reometro

2.1 Calorimetria Differenziale a Scansione

La calorimetria differenziale a scansione, nota anche con l'acronimo DSC (dall'inglese differential scanning calorimetry) è una tecnica di analisi termica utilizzabile per misurare la temperatura e il flusso di calore associati alle transizioni che avvengono in un campione, le entalpie di fusione, le transizioni vetrose e le cinetiche di cristallizzazione di materiali polimerici. Il principio di base di questa tecnica

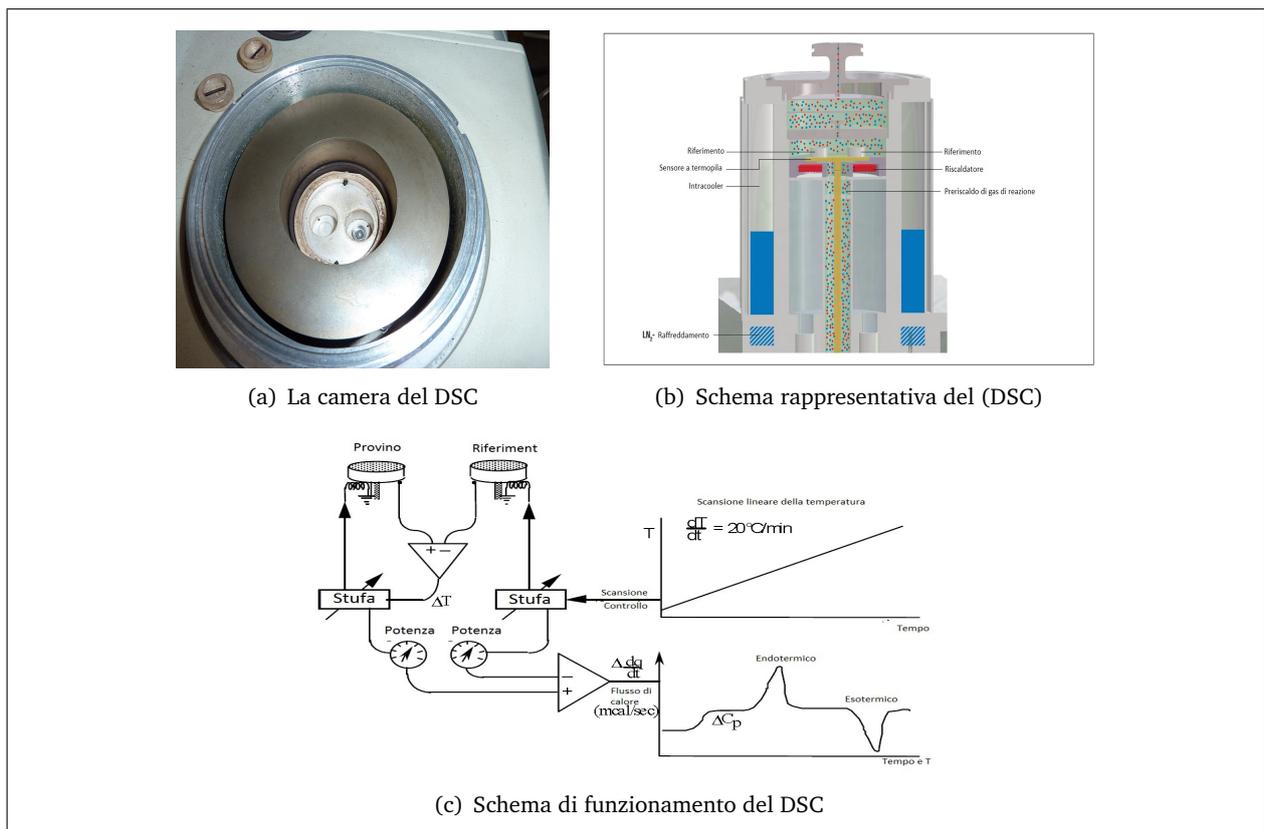


Figura 2.1: Calorimetria a scansione differenziale

consiste nel ricavare informazioni sul materiale riscaldandolo o raffreddandolo in maniera controllata. In particolare il DSC si basa sulla misura della differenza di flusso termico tra campione in esame e

uno di riferimento mentre i due sono vincolati ad una temperatura variabile definita da un programma prestabilito.

La macchina viene predisposta mettendo sugli alloggiamenti due crogioli identici scelti in modo da resistere alle temperature di prova senza interagire con il campione in esame. Uno dei due crogioli rimarrá vuoto in quanto servirá come riferimento per la misura differenziale.

Il riferimento é un materiale inerte come l'alluminio o solo una crogiola d'alluminio vuota. La temperatura di entrambi, il provino e il riferimento sono aumentati ad un ritmo costante. Siccome il DSC é a pressione costante, il flusso di calore é equivalente alla differenza di entalpia:

$$\left\{ \frac{dQ}{dt} \right\}_P = \left\{ \frac{dH}{dt} \right\} \quad (2.1)$$

La differenza di calore fra il provino e quello di riferimento é:

$$\Delta \left\{ \frac{dH}{dt} \right\} = \left\{ \frac{dH}{dt} \right\}_{\text{Provino}} - \left\{ \frac{dH}{dt} \right\}_{\text{Riferimento}} \quad (2.2)$$

e può essere sia positivo che negativo. In un processo endotermico, come accade nella maggior parte dei casi delle transizioni di fase, il calore viene assorbito e, quindi, il flusso di calore é superiore di quello di riferimento, per cui $\Delta \left\{ \frac{dH}{dt} \right\}$ é positiva.

Si chiude ermeticamente la fornace in modo da isolare l'ambiente di prova dall'esterno e una volta inserito il programma termico all'interno della fornace contenente il materiale da analizzare viene creata un'atmosfera inerte con un flusso continuo ed uniforme di Azoto che distribuisce il calore uniformemente tra il campione in esame e quello di riferimento. Durante tutto l'arco dell'esperimento un sistema di termocoppie raccoglie i dati di temperatura e li invia ad un elaboratore che mediante un apposito software li elabora per generare l'uscita per l'utente.

Altri processi endotermici includono transizioni spirali elicoidali nel DNA, denaturazione delle proteine, disidratazioni, reazioni di riduzioni, e alcune reazioni di decomposizione. In un processo esotermico, come cristallizzazione, alcuni processi di reticolazione, reazioni di ossidazione e alcune reazioni di decomposizione, é vero il contrario e $\Delta \left\{ \frac{dH}{dt} \right\}$ é negativa.

Il calorimetro consiste di un supporto del campione e quello del riferimento mostrato in figura ???. Entrambi sono costituiti di platino per consentire il funzionamento ad alta temperatura. Sotto ogni sostegno vi é un riscaldatore a resistenza e un sensore di temperatura. I correnti sono applicati ai due riscaldatori per aumentare la temperatura alla velocità selezionata.

La differenza di potenza nei due sostegni, necessario per mantenere i sostegni alla stessa temperatura, é usato per calcolare $\Delta \frac{dH}{dt}$. Un diagramma schematico del DSC é mostrato nella figura 3.3(b). Un flusso di gas di Azoto viene mantenuto nei campioni per creare un'atmosfera riproducibile e secco. L'atmosfera di Azoto elimina anche l'ossidazione all'aria dei campioni ad alte temperature.

Il campione é sigillato in un crogiolo di alluminio, il riferimento é solitamente un crogiolo vuoto e con coperchio. I crogioli possono contenere fino a circa 10mg di materiale.

Durante il riscaldamento di un campione, per esempio, da temperatura ambiente alla temperatura di decomposizione, picchi positivi e negativi $\Delta \left\{ \frac{dH}{dt} \right\}$ possono essere registrati, ogni picco corrisponde ad un effetto di calore associato un processo specifico come cristallizzazione o fusione figura 3.4(a).

Si pone la domanda, come ad esempio, che tipo di informazione é ottenibile da una curva DSC. La prima informazione e anche quella piú diretta é la temperatura alla quale si verifica un certo processo, per esempio, il punto di fusione di un polimero. La temperatura alla quale una reazione, come la decomposizione, può iniziare é un altro parametro importante.

La temperatura di picco é associata alla temperatura alla quale si verifica la massima velocità di reazione. Un caso particolare in cui la temperatura di una trasformazione di fase é di grande importanza nei

polimeri é la temperatura di transizione vetrosa, T_g . Questa é la temperatura a cui i polimeri amorfi (non cristallini) sono convertiti da una forma simile al vetro fragile a una forma flessibile gommosa. Tale transizione di fase non é una vera transizione invece un comportamento che modifica i gradi di libert a locali. Sopra della temperatura di transizione vetrosa certi movimenti segmentali del polimero sono relativamente senza ostacoli dall'interazione con le catene pi  vicine. Sotto della temperatura di transizione vetrosa, tali movimenti sono ostacolati notevolmente, ed i tempi di rilassamento associati a tali movimenti impediti sono solitamente lunghi rispetto alla durata dell'esperimento.

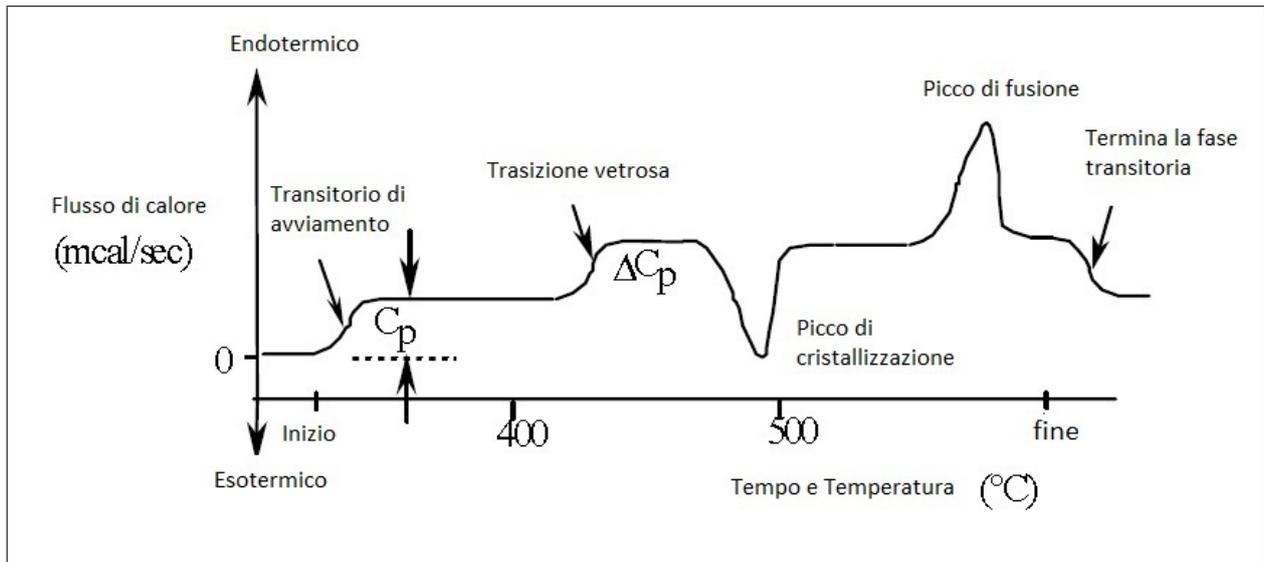
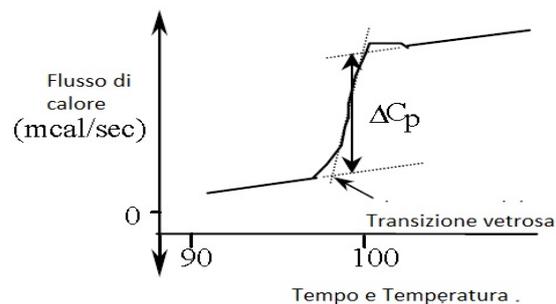


Figura 2.2: Schema transitorio del DSC

La definizione operativa della temperatura di transizione vetrosa é che a questa temperatura, o entro pochi gradi; il calore specifico, il coefficiente di espansione termica, il volume libero, e la costante di dielettrica (nel caso di un polimero polare) tutti cambiano rapidamente. Poich  il comportamento meccanico dei polimeri cambia notevolmente alla temperatura di transizione vetrosa, é una caratteristica importante di ogni polimero. Nell'esperimento del DSC, T_g si manifesta con un drastico cambiamento nella linea di base, che indica un cambiamento della capacit  termica del polimero.

Nell'esperimento DSC, T_g si manifesta con un drastico cambiamento nella linea di base, che indica un cambiamento della capacit  termica del polimero. L'entalpia non é associata a tale transizione (per cui il motivo é anche chiamato transizione del secondo ordine), quindi, l'effetto su una curva DSC é leggero ed é osservabile solo se lo strumento é abbastanza sensibile.

La seconda informazione diretta ottenibile dalla curva DSC é l'entalpia associata con alcuni processi. L'integrale sotto il picco DSC, sopra la linea di base, dá la variazione totale di entalpia del processo.



$$\int \left\{ \frac{dH}{dt} \right\} dt = \Delta H_{provino} \quad (2.3)$$

Supponendo che la capacità termica del riferimento è costante nel campo di temperatura coperto dal picco, $\Delta H_{\text{riferimento}}$ si annullerà. Le capacità termiche e i cambiamenti di capacità termica possono essere determinati dai cambiamenti nella linea di base del termogramma. La capacità termica è definita come:

$$C_p = \left(\frac{dQ}{dT} \right)_p = \left(\frac{dH}{dT} \right)_p \quad (2.4)$$

La velocità di scansione di temperatura è:

$$v = \left(\frac{dT}{dt} \right) \quad (2.5)$$

Usando la regola della catena:

$$C_p = \left(\frac{dH}{dT} \right) = \left(\frac{dH}{dt} \right) \left(\frac{dt}{dT} \right) \quad (2.6)$$

Dove $\frac{dH}{dt}$ è lo spostamento della linea di base del termogramma e $\frac{dt}{dT}$ è semplicemente l'inverso della velocità di scansione. Per misure differenziali, determiniamo la differenza nella capacità termica del campione e del riferimento:

$$\Delta C_p = C_{p_{\text{campione}}} - C_{p_{\text{riferimento}}} \quad (2.7)$$

$$\Delta C_p = \Delta \left(\frac{dH}{dT} \right) = \Delta \left(\frac{dH}{dt} \right) \quad (2.8)$$

2.1.1 Matrici nei materiali compositi

Questo tipo di materiali sono costituiti da due fasi diverse macroscopicamente separate da una superficie chiaramente identificabile detta **interfaccia**¹:

- Matrice
- Rinforzo

Per quanto riguarda le matrici si possono avere di tre tipologie:

1. Ceramiche
2. Metalliche
3. Polimeriche

Per applicazioni ad alte temperature si prediligono le matrici metalliche o ceramiche, avendo quest'ultime una temperatura massima di uso maggiore ma nella maggior parte delle applicazioni strutturali in cui si prediligono bassi pesi e determinate proprietà chimico/fisiche si opta per le matrici **polimeriche**. La matrice ha i seguenti ruoli:

- trasferire lo sforzo tra le fibre
- garantire un effetto barriera verso gli agenti atmosferici

¹<http://immaweb.unipa.it/immaweb/home.seam>

- proteggere la superficie delle fibre da abrasioni meccaniche
- dare forma al materiale

La matrice gioca un ruolo minore nella capacità di supportare carichi a trazioni nella struttura composta. Tuttavia, la scelta di una matrice:

- influenza la resistenza al taglio interlaminare che é un importante parametro di progettazione per strutture sottoposte a **flessione**, così come per sollecitazioni **torsionali**
- garantisce un supporto laterale contro la possibilità delle fibre d'infiattersi trasversalmente al carico, se la sollecitazione é di **compressione**
- influenza la processabilità ed i difetti del materiale composito

I materiali polimerici si suddividono in due principali classi:

1. **Polimeri Termoplastici**
2. **Polimeri Termoindurenti**

Nonostante esistano composti a matrice polimerica termoplastica sono i polimeri **Termoindurenti** ad essere principalmente utilizzati come matrici per i materiali composti fibrorinforzati.

2.1.2 Le proprietà delle matrici dei materiali composti

1. Alto modulo a trazione
 2. Alta resistenza a trazione
 3. Alta resistenza alla frattura
 4. Buona stabilità dimensionale alle elevate temperature
 5. Resistenza all'umidità ed i solventi
- Le prime due caratteristiche influenzano le proprietà **flessionali**, **torsionali** e a **compressione** del polimero
 - La resistenza alla frattura della matrice influenza la tendenza del composito alla **delaminazione** e alla **propagazione delle cricche**
 - La matrice non si deve dissolvere, criccare o degradare in generale in condizioni ambientali aggressive o in presenza di solventi

É importante elencare i vantaggi e gli svantaggi delle matrici termoindurenti e termoplastiche che influiscono poi sulle nostre scelte:

Matrici termoindurenti:

I vantaggi sono:

- Bassa viscosità della miscela, nell'istante in cui sono impregnate le fibre (non é necessario alcun riscaldamento per garantire una buona bagnabilità)

- Stabilità termica e resistenza chimica
- Risentono poco dei problemi di creep rispetto alle matrici termoplastiche

Gli svantaggio sono:

- Lunghi tempi di produzione (a seguito di tempi di cura relativamente lunghi)
- Nassa deformazione a rottura, che influisce sulla loro bassa resistenza all'impatto

matrici termoplastiche:

I vantaggi sono:

- Alta resistenza all'impatto e resistenza alla frattura
- Hanno una deformazione a rottura maggiore rispetto ai termoindurenti, con conseguente migliore resistenza alla propagazione della cricca nei laminati
- Possono subire ulteriori trattamenti termici ed infine possono essere riciclati

Gli svantaggi sono:

- É difficile effettuare l'incorporazione delle fibre all'interno della matrice fusa
- Alta viscosità con conseguenze negative sulla bagnabilità della resina

Per questo motivo lo sviluppo delle matrici termoplastiche é stato meno evidente di quello delle matrici termoindurenti.

2.1.3 Matrici Polimeriche Termoplastiche

I polimeri **termoplastici** sono costituiti da catene principali molto lunghe, formate da atomi di carbonio legati covalentemente, unite fra loro da legami secondari deboli (legami di Van der Waals, legami idrogeno) → Legami Fisici

- Mediante calore e pressione possono essere plasmati e dopo raffreddamento mantengono la forma in cui sono stati modellati
- Tali materiali possono dunque riscaldati e rimodellati in nuove forme un certo numero di volte senza cambiamenti significativi delle loro proprietà e morfologia

Riscaldando, i legami intermolecolari si rompono temporaneamente e le molecole hanno la possibilità di muoversi con maggior libertà intorno alla loro posizione.

Raffreddando, le molecole vengono congelate nella loro nuova posizione, ed i legami intermolecolari sono ripristinati portando ad uno stato solido identico al precedente.

I polimeri **Termoplastici** vengono così chiamati perché, per effetti del calore applicato, diventano plasmabili ossia si possono formare e stampare facilmente.

Principali Caratteristica → Elevata Lavorabilità

Tra i polimeri termoplastici ve ne sono quattro di più impiego che sono mostrate nella figura 3.4(b)

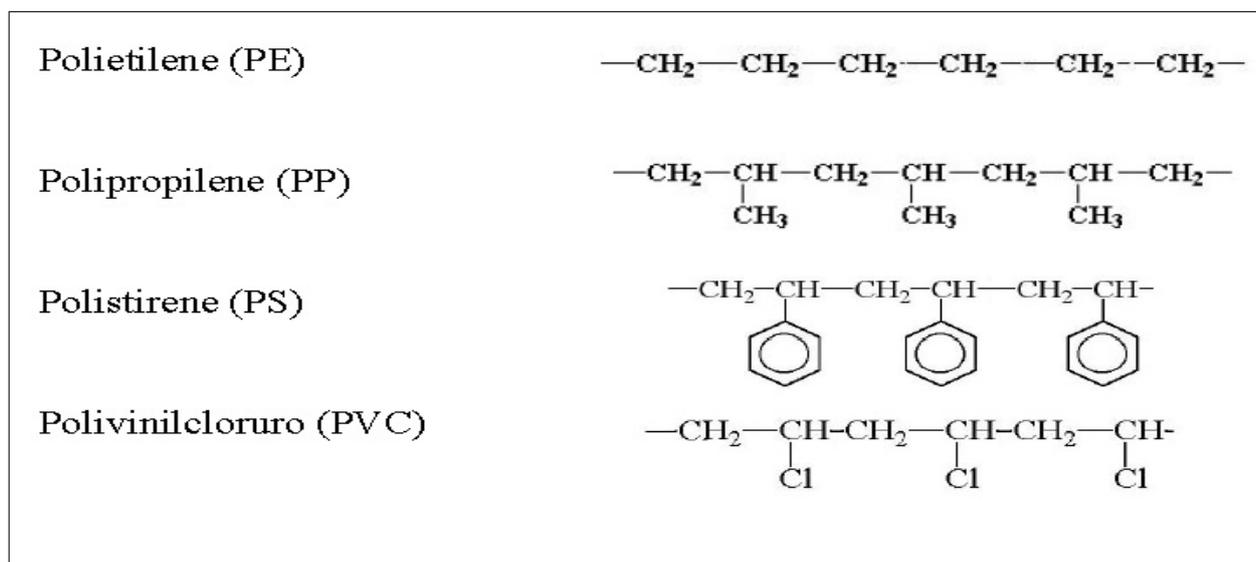


Figura 2.3: I polimeri termoplastici di piú impiego

2.1.4 Matrici polimeriche termoindurenti

Un polimero termoindurente é costituito da una rete tridimensionale di atomi di Carbonio legati covalentemente fra loro per formare un solido rigido: a volte anche azoto, ossigeno, zolfo ed altri atomi sono legati covalentemente nel reticolo tridimensionale → **Legami Chimici** fra le macromolecole

Come si ottiene un termoindurente allo stato solido: **CURING**

In partenza si ha in genere la resina a temperatura ambiente allo stato liquido. In tale stato essa é costituita da un insieme di molecole tutte uguali svincolate l'una dall'altra ossia libere di muoversi. Mediante l'utilizzo di opportuni **catalizzatori** (sostanze chimiche che promuovono le reazioni fra le varie molecole di partenza) e l'applicazione di **calore** e **pressione** avviene un processo chimico chiamato **CURING**.

Durante tale processo si formano dei legami covalenti (**cross-link**) che uniscono le varie molecole dando vita alla struttura tridimensionale tipica delle resine termoindurenti solide (curate).

In definitiva per i polimeri Termoindurenti si verifica che:

Prima del processo di cura

la resina si trova allo stato liquido in quanto le molecole sono libere di muoversi perché non legate fra loro

Dopo il processo di cura

la resina si trova allo stato solido in quanto le molecole sono ormai vincolate mediante i **Cross-link** (**legami chimici**) e non hanno piú libertà di movimento.

Differenza fra Termoplastici e Termoindurenti

Mentre un solido **termoplastico** può essere rimodellato mediante un ciclo di riscaldamento e raffreddamento, una resina termoindurente una volta solida non può piú essere riportata allo stato fuso

mediante calore.

Quando un **termoindurente** è stato conferito una certa forma (ossia una volta reticolato o indurito attraverso il **Curing**), un eventuale eccessivo riscaldamento condurrebbe alla **degradazione** del materiale (i **Cross-link** formatisi durante il **Curing** si romperebbero definitivamente).

2.1.5 Processo di Cura

La **Cura** di un prepolimero reattivo comporta la trasformazione di monomeri di basso peso molecolare dallo **stato liquido** inizialmente allo **stato gommoso** ed infine allo **stato solido** come risultato della formazione di una complessa struttura spaziale prodotta dalla reazione chimica dei gruppi reattivi presenti sulle molecole di partenza.

Gli stati di aggregazione sono dunque tre mentre le trasformazioni che avvengono durante il **Curing** sono due:

- **Gelificazione** → dallo stato liquido allo stato gommoso
- **Vetrificazione** → dallo stato gommoso allo stato solido (vetro)

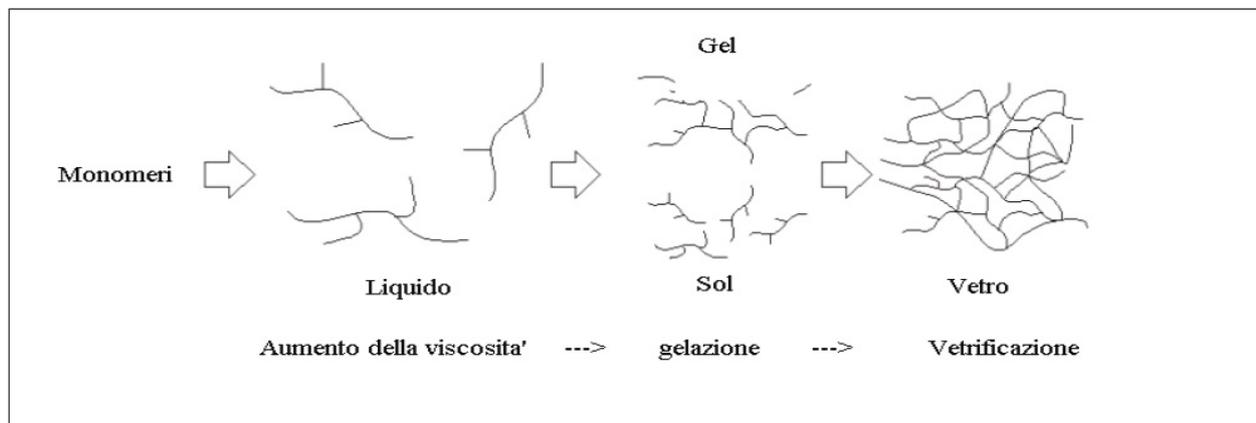


Figura 2.4: Le trasformazioni del processo curing

Nello stato gommoso di due fasi: sol e gel

La fase gel è la parte solidificata

La fase sol è la componente ancora liquida e può essere estratta con dei solventi

Ovviamente con il progredire della reazione si ha una riduzione della quantità di fase sol

Con il progredire della reazione si ha la **vetrificazione**, portando alla trasformazione da gommoso a solido vetroso gelificato (se è avvenuta la gelificazione) o da liquido a vetro non gelificato (se non è avvenuta la gelificazione).

La differenza fra la **Gelificazione** e la **Vetrificazione** consiste essenzialmente nel numero di **Cross-Link** che si sono formati fra le varie molecole.

La **gelificazione** è il passaggio della resina dallo stato fluido (in cui la resina è ancora lavorabile) allo stato gommoso (la resina non è più lavorabile) in cui le molecole sono legate da un certo numero di **Cross-Link** che permettono solo piccoli movimenti.

La **vetrificazione** è invece il passaggio dallo stato gommoso allo stato solido e avviene dopo la gelificazione (in realtà è una continuazione di quest'ultima). Alla fine di tale trasformazione, il numero di **Cross-Link** fra le varie molecole è talmente elevato da non permettere loro alcun movimento.

2.2 Analisi DSC della Resina

La prima prova, é una prova dinamica che prevede un progressivo riscaldamento del campione con un gradiente termico imposto. Tale prova puó essere suddivisa in diverse fasi: inserimento del campione nella camera di prova a temperatura ambiente, stabilizzazione alla temperatura desiderata di inizio prova e quindi avvio della prova. Tutte le prove effettuate utilizzando il DSC sono state eseguite da 20°C a 200°C con rampa di riscaldamento stabilita variabile, mentre il ritorno da 200°C a 20°C . Solo nella prima prova viene eseguita la prova con una velocità di $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$, mentre il campione era allo stato liquido. Nella seconda prova si é inserito il campione allo stato liquido e si é applicato lo stesso intervallo di temperatura come si é deciso di fare nella prima prova in piú la velocità é stata incrementata di $20^{\circ}\text{C}/\text{min}$. Invece nella terza prova il campione era allo stato solido. Nella scheda tecnica fornita dal rivenditore della resina, le proprietà finali dichiarate sono state ottenute analizzando un campione lasciato reticolare a temperatura ambiente per ventiquattro ore, quindi si é deciso di lasciare reticolare un campione di resina con lo stesso ciclo per poter confrontare i dati per quanto riguarda la temperatura di transizione vetrosa. Per completare il processo di reticolazione, il campione ottenuto é stato sottoposto ad un ciclo di post cura a 120°C per **due ore**, per poi ottenere la T_g sono state eseguite le prove dinamiche con un rateo di riscaldamento di $20^{\circ}\text{C}/\text{min}$. Un esempio di scansione dinamica é stata riportata nelle seguenti figure:

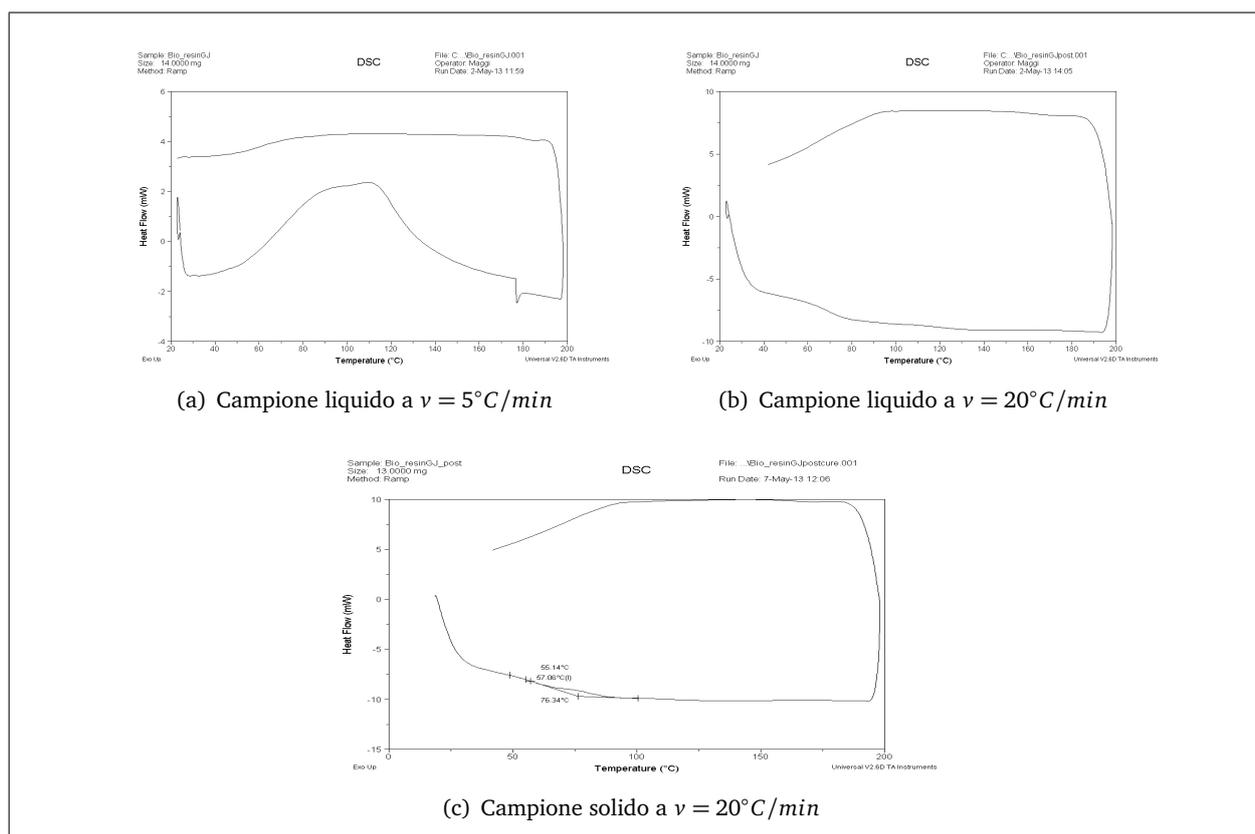


Figura 2.5: Flusso di calore in funzione della temperatura a diversi stati

La figura 3.5(a) dovuta alla velocità $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ mostra un transitorio di avviamento, una transizione vetrosa e poi un picco di cristallizzazione. Nella figura 3.5(b) dovuta alla velocità $20^{\circ}\text{C}/\text{min}$ non si vedono tali dettagli perché il processo era rapido, ed alla fine come si approva, dalla figura 3.5(c) il processo di post

cura di reticolazione del campione da cui si può ricavare la temperatura di transizione vetrosa T_g che è uguale a 57.06°C , mentre dai dati forniti dalla scheda del rivenditore, che è mostrata in appendice, si vede che la temperatura di transizione vetrosa T_g è uguale a 50°C

2.3 Reometro

I metodi di misura delle proprietà reologiche, come la viscosità, dipendono dal tipo di fluido. Per un fluido Newtoniano la viscosità η non dipende dalle condizioni di flusso del reometro. Nel caso di fluidi non-Newtoniani le misure sono rese più complesse dalla dipendenza della viscosità dal tipo e dall'intensità del flusso imposto. In alcuni casi non è possibile ottenere un valore di η e le misure sono di tipo empirico.

Data la dipendenza di η dal tipo di flusso, in reometria vengono considerati due flussi fondamentali:

- Scorrimento (shear)
- Elongazionale

Un esperimento reometrico consiste generalmente nella misurazione simultanea di due grandezze: una grandezza dinamica (una forza, una coppia, una pressione) e una grandezza cinematica (ad esempio una velocità, o uno spostamento, o un tempo). L'equazione del reometro è una relazione matematica che lega queste due grandezze tra loro. In essa, oltre a parametri geometrici del reometro ed eventualmente altri parametri fisici del fluido, comparirà anche la grandezza reologica che deve essere misurata, e il cui valore viene quindi determinato dai risultati della misura.

A titolo di esempio si considerino ancora una volta i due piatti paralleli di figura 3.6(a). Le grandezze misurate sono la forza tangenziale applicata sul piatto, F , e la velocità del piatto superiore, v . Siccome lo sforzo è dato da F/A e il gradiente di scorrimento da v/h , l'equazione di questo semplice reometro è:

$$\eta = \frac{Fh}{Av} \quad (2.9)$$

per cui la determinazione della viscosità richiede la misura di F e v e la conoscenza dei parametri geometrici A e h .

2.3.1 La misura della viscosità con reometri rotazionali

Il motivo principale che rende praticamente inutilizzabile il reometro ideale a piatti paralleli risiede nelle condizioni cinematiche di funzionamento. I due piatti traslano uno rispetto all'altro: ciò significa che, dopo un certo tempo, i piatti si separeranno completamente, rendendo impossibile la misura. Inoltre, sempre a causa della traslazione relativa, la superficie di applicazione della forza diminuisce progressivamente, portando ad una continua variazione dello sforzo applicato.

Il modo più semplice di eliminare questi effetti indesiderati è quello di permettere al fluido di muoversi secondo traiettorie chiuse, cioè ripetute indefinitamente nel tempo. Questo principio è messo in pratica nei reometri rotazionali, che sono tutti basati sul moto relativo rotatorio di due superfici. Il principio di funzionamento di questi reometri è molto semplice, ed è comprensibile osservando lo spaccato di un reometro rotazionale riportato in figura 3.6(b). Il reometro è costituito da due piatti (o altri elementi, com specificato nel seguito), uno fisso l'altro in movimento, tra i quali è interposto il fluido. Un motore permette di imporre una assegnata velocità di rotazione al piatto, che determina un flusso di scorrimento all'interno del fluido in esame. Un secondo dispositivo (trasduttore) provvede a misurare la coppia necessaria a mantenere in movimento il piatto. Dalla misura della coppia

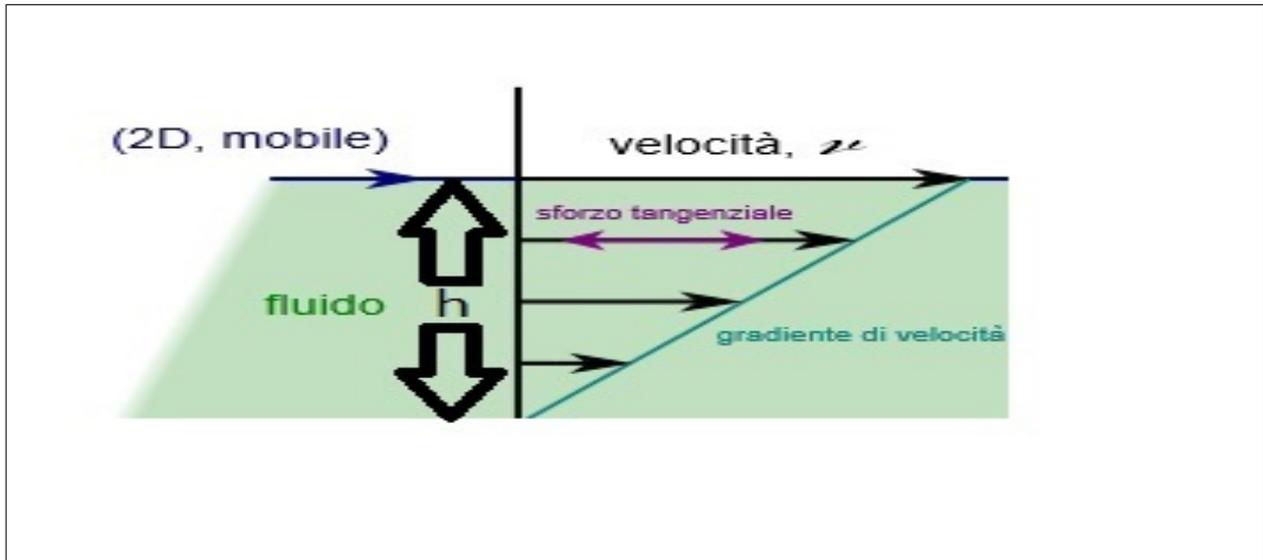


Figura 2.6: Il flusso di scorrimento tra due piattini paralleli

(grandezza dinamica) è possibile risalire allo sforzo applicato al fluido, mentre da quella della velocità di rotazione (grandezza cinematica) al gradiente di scorrimento. Ciò porta alla determinazione della viscosità del fluido.

I reometri rotazionali appartengono a due categorie concettualmente diverse. In quelli a sforzo controllato il trasduttore di coppia è lo stesso motore che impone il moto di rotazione del piatto mentre la velocità di rotazione è una grandezza derivata, nel senso che viene determinata attraverso una misura. I reometri a deformazione controllata sono storicamente precedenti rispetto a quelli a sforzo controllato. In questo caso il moto viene imposto da un motore indipendente, in modo da imporre il gradiente di velocità mentre la coppia viene misurata da un trasduttore posto in corrispondenza del piatto fisso del reometro. Motore e trasduttore di questo reometro sono gli elementi critici di questo tipo di reometri.

2.3.2 Reometro a cono e piatto

La viscosità dei fusi polimerici a bassi gradienti di velocità viene tipicamente misurata in reometri rotazionali equipaggiati con una geometria cono-piatto, schematizzata in figura 3.6(c). Il materiale è compreso tra un piatto piano ed un cono, uno dei quali viene posto in rotazione.

La scelta di questa geometria apparentemente esotica può essere compresa calcolando il gradiente di scorrimento. Ad ogni raggio r tale gradiente è dato dal rapporto tra la velocità del piatto in movimento e la distanza tra i piattini. Nel caso di angoli piccoli si può scrivere:

$$\dot{\gamma} = \frac{\omega r}{h} \equiv \frac{\omega r}{r a} = \frac{\omega}{a} \quad (2.10)$$

dove α è appunto l'angolo del cono. La 2.10 informa che in questa geometria il gradiente di scorrimento è uniforme in tutto il campione. Ciò rende possibile la determinazione della viscosità non-Newtoniana. È infatti possibile mostrare che lo sforzo tangenziale, anch'esso uniforme è dato da:

$$\sigma = \frac{3M}{2\pi R^3} \quad (2.11)$$



Figura 2.7: Spaccato di un reometro rotazionale

per cui in definitiva l'equazione del reometro cono-piatto diventa:

$$\eta = \frac{3M\alpha}{2\pi R^3 \omega} \quad (2.12)$$

La 2.12 fornisce con ottima approssimazione la viscosità di un fluido purché l'angolo del cono sia sufficientemente piccolo (in genere, quando $\alpha < 5^\circ$)

2.3.3 Reometro a piatti paralleli

Il reometro cono-piatto gode della importantissima proprietà di generare un gradiente di scorrimento uniforme. Il fluido viene deformato tutto allo stesso gradiente, cosa che corrisponde ad un valore di sforzo di taglio uguale in tutti i punti del reometro. Per questo motivo, una volta assegnate le condizioni di flusso, la viscosità misurata rappresenta l'effettivo valore al particolare gradiente di velocità imposto. Tale geometria è praticamente l'unica che permetta di raggiungere tali condizioni per un fuso polimerico. Tuttavia, per ragioni diverse che vanno dalla convenienza economica alla impossibilità di utilizzare tale geometria, altre geometrie rotazionali vengono spesso utilizzate. Una di queste è quella a piatti paralleli rotanti (vedi figura 3.7(a)). Confrontando quanto già detto per il reometro cono-piatto, è facile determinare il gradiente di scorrimento:

$$\dot{\gamma} = \frac{\omega r}{b} \quad (2.13)$$

che risulta quindi variabile con il raggio. Ciò significa che è possibile determinare la viscosità solo nel caso di fluido Newtoniano. L'analisi Newtoniana infatti fornisce la seguente equazione del reometro:

$$\eta = \frac{2Mh}{\pi R^4 \omega} \quad (2.14)$$

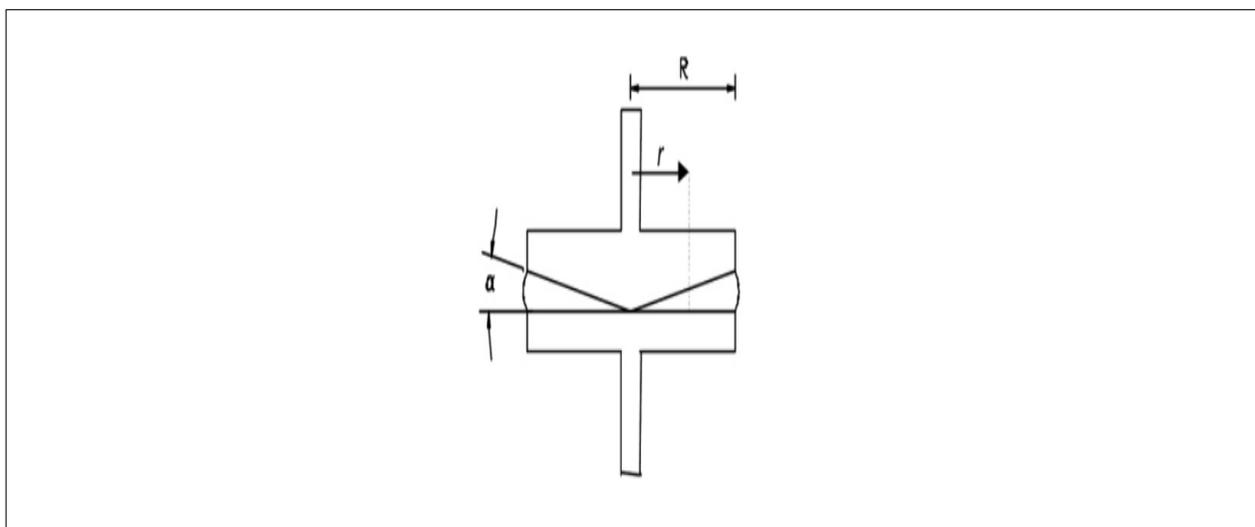


Figura 2.8: La geometria cono-piatto

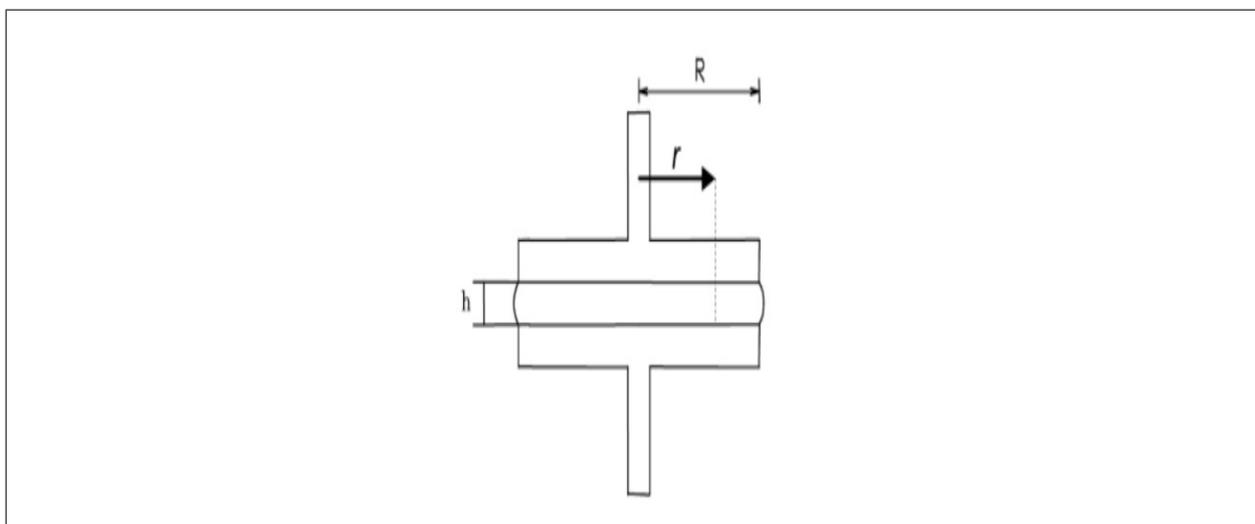


Figura 2.9: La geometria piatto-piatto

Nel caso di fluidi non-Newtoniani la 2.14 viene ancora usata, anche se costituisce un risultato approssimato. In questo caso la viscosità apparente così ricavata viene diagrammata in funzione del gradiente di scorrimento massimo, ottenibile dalla 2.13 per $r = R$:

$$\dot{\gamma}_{max} = \frac{\omega R}{h} \quad (2.15)$$

La geometria piatto-piatto viene utilizzata raramente per misure di viscosità. I suoi vantaggi rispetto a quelle cono-piatto sono una relativamente maggiore facilità nel caricamento e la possibilità di variare lo spessore di fluido. Invece la geometria piatto-piatto è ideale per misure di viscoelasticità.

2.3.4 Reometro a capillare

Il reometro a capillare è, insieme al reometro cono-piatto, l'apparecchiatura reologica maggiormente utilizzata per la misura della viscosità. Le traiettorie rettilinee e l'assenza di effetti di bordo, presenti in

tutte le geometrie rotazionali, permettono il raggiungimento di gradienti di scorrimento estremamente elevati (superiori a $100.000s^{-1}$). Inoltre, la possibilità di imporre forze estremamente alte permette la misura di fluidi con viscosità molto elevate, cosa che li rende ideali per i fusi polimerici. Il suo schema di funzionamento è illustrato in figura 3.7(b). Il liquido viene spinto (generalmente mediante un pistone) attraverso un canale di dimensioni trasversali relativamente piccole, appunto un capillare. Viene misurata la variazione di pressione all'imbocco e all'uscita del condotto (dove generalmente la pressione è atmosferica). Nota la portata passante nel condotto (determinata dalla velocità di avanzamento del pistone), è possibile misurare la viscosità del fluido. In un capillare a sezione circolare

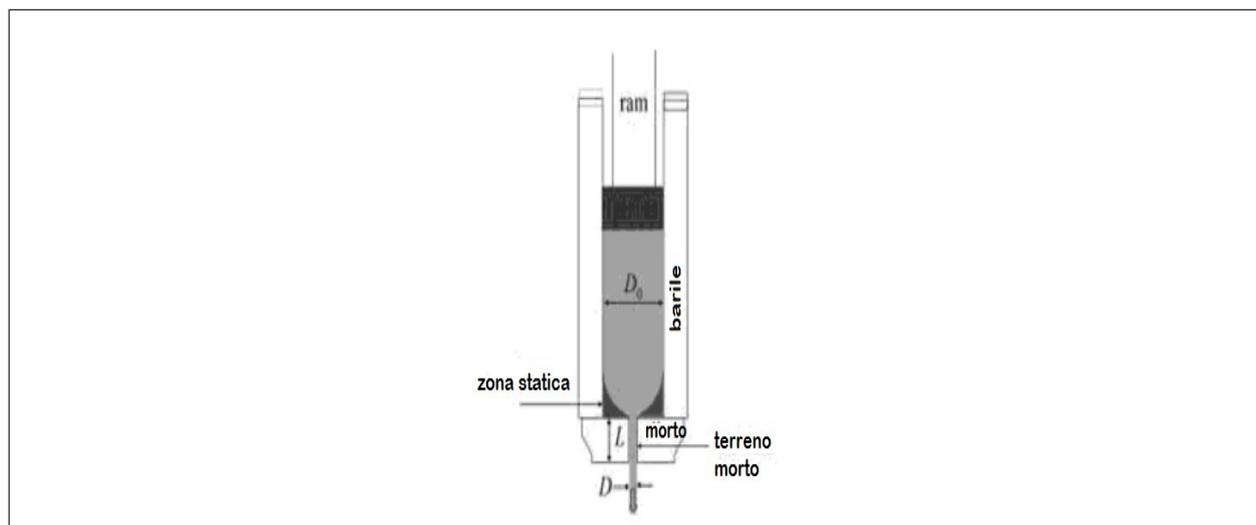


Figura 2.10: Schema della geometria a capillare

le superfici di scorrimento sono dei cilindri concentrici che si muovono a cannocchiale uno rispetto all'altro. L'analisi del moto in questa geometria parte dal calcolo dello sforzo di taglio, τ_p alla parete del capillare. Nell'ipotesi di trascurare gli effetti dovuti al restringimento della sezione di imbocco, tale analisi fornisce facilmente il legame tra la differenza di pressione ΔP (detta anche perdita di carico) agli estremi e lo sforzo di taglio alla parete:

$$\tau_p = \frac{\Delta P R}{2L} \quad (2.16)$$

La 2.16 include il raggio R e la lunghezza L del capillare, ed è universale, nel senso che non dipende dal particolare tipo di fluido che attraversa il capillare. Il passaggio successivo dell'analisi consiste nella determinazione del gradiente di scorrimento alla parete del capillare, calcolabile esplicitamente solo per il caso Newtoniano:

$$\dot{\gamma}_{p,N} = \frac{4Q}{\pi R^3} \quad (2.17)$$

dove Q è la portata volumetrica. Accoppiando 2.16 e 2.17 si ottiene l'equazione del reometro a capillare che fornisce la viscosità di un fluido Newtoniano:

$$\eta_N = \frac{\pi R^4 \Delta P}{8LQ} \quad (2.18)$$

Nel caso di fluidi non-Newtoniani, in cui la viscosità non è costante con il gradiente di velocità, il reometro a capillare può ancora essere utilizzato, ma i dati sperimentali richiedono una successiva manipolazione, nota come correzione di Mooney-Rabinowitsch. La logica di tale correzione è facilmente

spiegabile. Per un fluido a viscosità non costante la 2.16 per lo sforzo alla parete continua ad essere valida; non è così per il gradiente di scorrimento alla parete, che non è più pari a quello Newtoniano ma va corretto per tenere conto degli effetti non-Newtoniani. La correzione di Mooney-Rabinowitsch sul gradiente di velocità, i cui dettagli matematici non vengono qui riportati, risulta essere pari a:

$$\dot{\gamma}_p = \dot{\gamma}_{p,N} \frac{3n+1}{4n} \quad (2.19)$$

dove n è pari a:

$$n = \frac{d \log \sigma_p}{d \log \dot{\gamma}_{p,N}} \quad (2.20)$$

n è la pendenza del grafico (in doppia scala logaritmica) in cui si riporta lo sforzo alla parete in funzione del gradiente di scorrimento Newtoniano, detto anche gradiente apparente. Per meglio comprendere la 2.20 si consideri che n rappresenta, nel caso di un fluido a legge di potenza, proprio l'indice di flusso del liquido.

2.4 Analisi reologica della resina

È molto importante avere un modello reologico completo della resina con cui si lavora, in altre parole determinare la viscosità della resina, poiché nel lavoro in esame è un dato di cui bisogna tener conto durante il processo di iniezione della resina nello stampo. La misura della viscosità, effettuata sulla resina allo stato liquido, viene condotta utilizzando il reometro *TA-AR2000rx* con geometria piatto-piatto figura 3.7(c): dove si impongono le seguenti parametri: la temperatura di prova, gradiente di velocità e velocità angolare (pari a 0.1 rad/s) costanti e si ripete la prova per diverse temperature. Dopo aver aggiunto l'indurente alla resina, a temperatura ambiente, con un rapporto di 1:2 si è preso

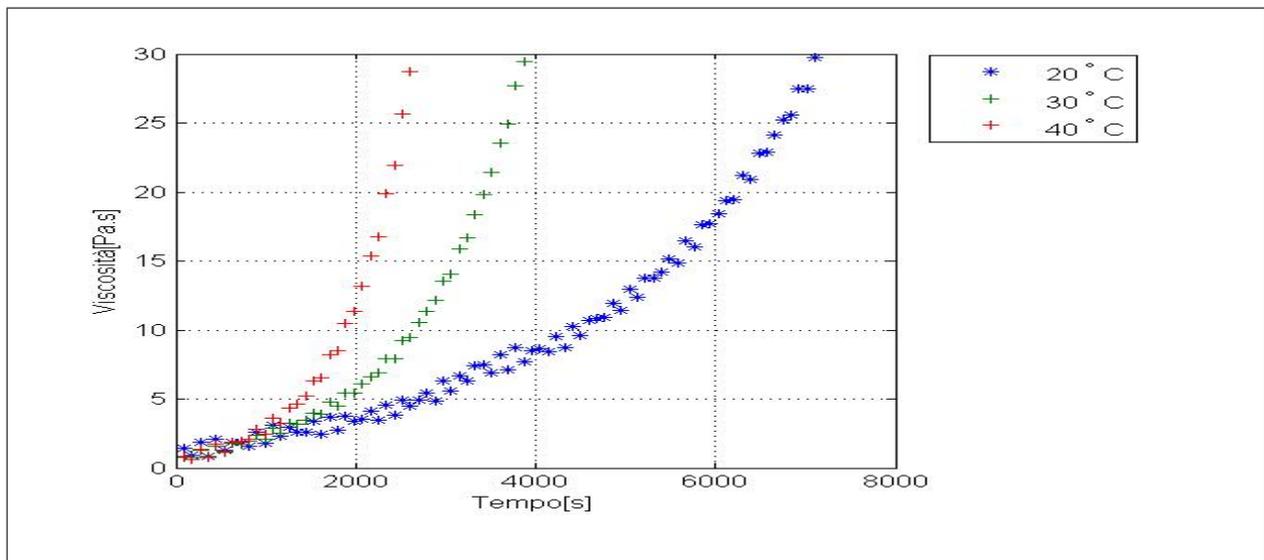


Figura 2.11: Andamento viscosità a diverse temperature

un campione per fare le analisi reologiche. si deve notare che il campione è stato allo stato liquido, tale campione viene messo sul piatto fisso del reometro mentre quello ruotante impone una coppia sul materiale di valore noto variando la temperatura durante tutto il processo. La figura 3.8(b) ci permette di notare come la viscosità raggiunga in tempi via via minori il valore limite imposto. Questi risultati

mostrano chiaramente come la temperatura influisce sulla velocità di reticolazione della resina. Appare sensata la scelta di effettuare le infusioni mantenendo la resina a temperatura ambiente, così da poter disporre di un intervallo di tempo sufficiente per portare a termine il processo di infusione prima che la reticolazione abbia inizio.

shear stress	shear rate	viscosity	time	temperature	normal stress	time	velocity
Pa	1/s	Pa.s	s	°C	Pa	min	rad/s
1.709	1.223	1.398	90	21.7	208.5	1.5	0.09999
1.132	1.223	0.926	180	21.6	199.9	3	0.1
2.251	1.223	1.841	270	21.6	198.7	4.5	0.09999
1.034	1.223	0.846	360	21.5	188.1	6	0.09999
2.525	1.223	2.065	450	21.5	158.8	7.5	0.1
1.539	1.223	1.259	540	21.5	149.2	9	0.1
2.294	1.223	1.876	630	21.4	115.3	10.5	0.1
2.291	1.223	1.874	720	21.4	122.7	12	0.1
1.947	1.223	1.592	810	21.3	118.9	13.5	0.09999
3.196	1.223	2.613	900	21.3	114.5	15	0.1
2.207	1.223	1.805	990	21.3	123.6	16.5	0.1
3.814	1.223	3.119	1,080	21.2	116.4	18	0.1
2.832	1.223	2.316	1,170	21.2	102.4	19.5	0.1
3.600	1.223	2.945	1,260	21.2	89.72	21	0.09999
3.188	1.223	2.607	1,350	21.1	91.44	22.5	0.09999
3.149	1.223	2.576	1,440	21.1	49.26	24	0.09999
4.113	1.223	3.363	1,530	21.1	56.06	25.5	0.1
3.033	1.223	2.481	1,620	21.1	38.81	27	0.09999
4.475	1.223	3.660	1,710	21.1	34.97	28.5	0.1
3.346	1.223	2.736	1,800	21.0	58.15	30	0.1
4.609	1.223	3.770	1,890	21.0	38.16	31.5	0.09999
4.188	1.223	3.425	1,980	21.0	24.65	33	0.1
4.294	1.223	3.511	2,070	21.0	51.71	34.5	0.1
5.038	1.223	4.120	2,160	21.0	61.2	36	0.1
4.229	1.223	3.458	2,250	21.0	49.88	37.5	0.1
5.570	1.223	4.555	2,340	21.0	42.34	39	0.1
4.700	1.223	3.843	2,430	21.0	24.02	40.5	0.1

Tabella 2.1: La viscosità alla temperatura di 20°C

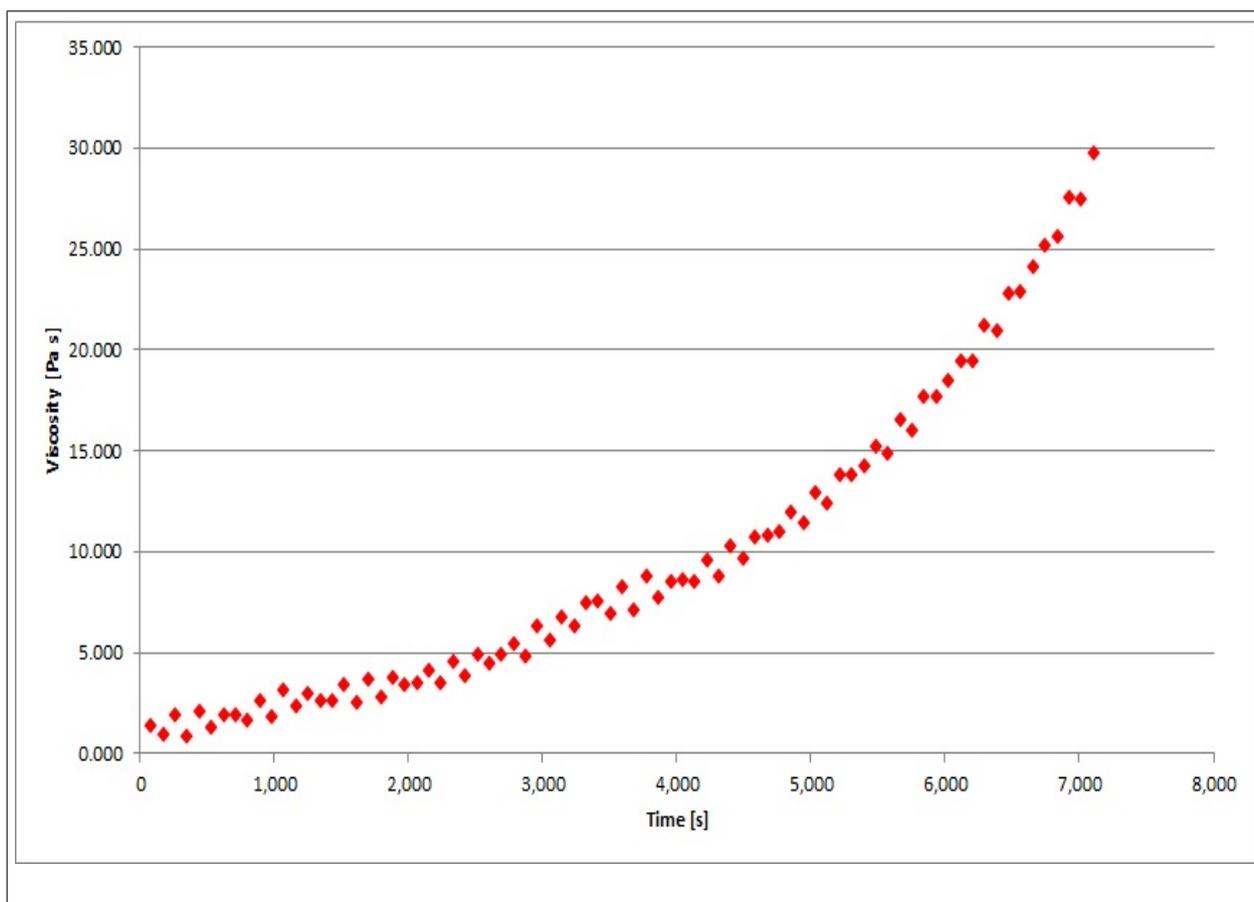


Figura 2.12: La viscosità alla temperatura di 20°C

shear stress	shear rate	viscosity	time	temperature	normal stress	time	velocity
Pa	1/s	Pa.s	s	°C	Pa	min	rad/s
0.848	1.147	0.7392	90	32.4	-400	1.5	0.1
0.910	1.147	0.7933	180	32.1	-386.3	3	0.1
1.439	1.147	1.2550	270	31.8	-395.9	4.5	0.1
0.941	1.147	0.8203	360	31.5	-382	6	0.09999
1.840	1.147	1.6050	450	31.2	-396.5	7.5	0.1
1.323	1.147	1.1540	540	30.9	-388.4	9	0.09999
2.016	1.147	1.7580	630	30.7	-374.3	10.5	0.09999
1.952	1.147	1.7010	720	30.4	-374.3	12	0.1
2.211	1.147	1.9280	810	30.2	-366.1	13.5	0.09999
2.748	1.147	2.3960	900	30.1	-373.3	15	0.09999
2.422	1.147	2.1120	990	30	-369.9	16.5	0.09999
3.345	1.147	2.9170	1,080	29.9	-384.2	18	0.1
2.875	1.147	2.5070	1,170	29.9	-383.6	19.5	0.1
3.702	1.147	3.2280	1,260	29.9	-378.9	21	0.1
3.600	1.147	3.1390	1,350	29.9	-363.9	22.5	0.1
4.013	1.147	3.4990	1,440	29.8	-367.7	24	0.09999
4.540	1.147	3.9590	1,530	29.9	-363.9	25.5	0.1
4.517	1.147	3.9390	1,620	29.8	-328.5	27	0.1
5.477	1.147	4.7760	1,710	29.9	-364.6	28.5	0.1
5.142	1.147	4.4840	1,800	29.8	-359	30	0.09999
6.229	1.147	5.4330	1,890	29.8	-338.7	31.5	0.09998
6.220	1.147	5.4240	1,980	29.8	-343.2	33	0.1
6.948	1.147	6.0590	2,070	29.8	-333.5	34.5	0.1
7.587	1.147	6.6150	2,160	29.9	-341.5	36	0.1
7.944	1.147	6.9270	2,250	29.8	-350.6	37.5	0.09999
9.075	1.147	7.9140	2,340	29.9	-364.2	39	0.09999
9.121	1.147	7.9540	2,430	29.8	-345.5	40.5	0.09999
10.600	1.147	9.2450	2,520	29.9	-351.8	42	0.09999

Tabella 2.2: La viscosità alla temperatura di 30°C

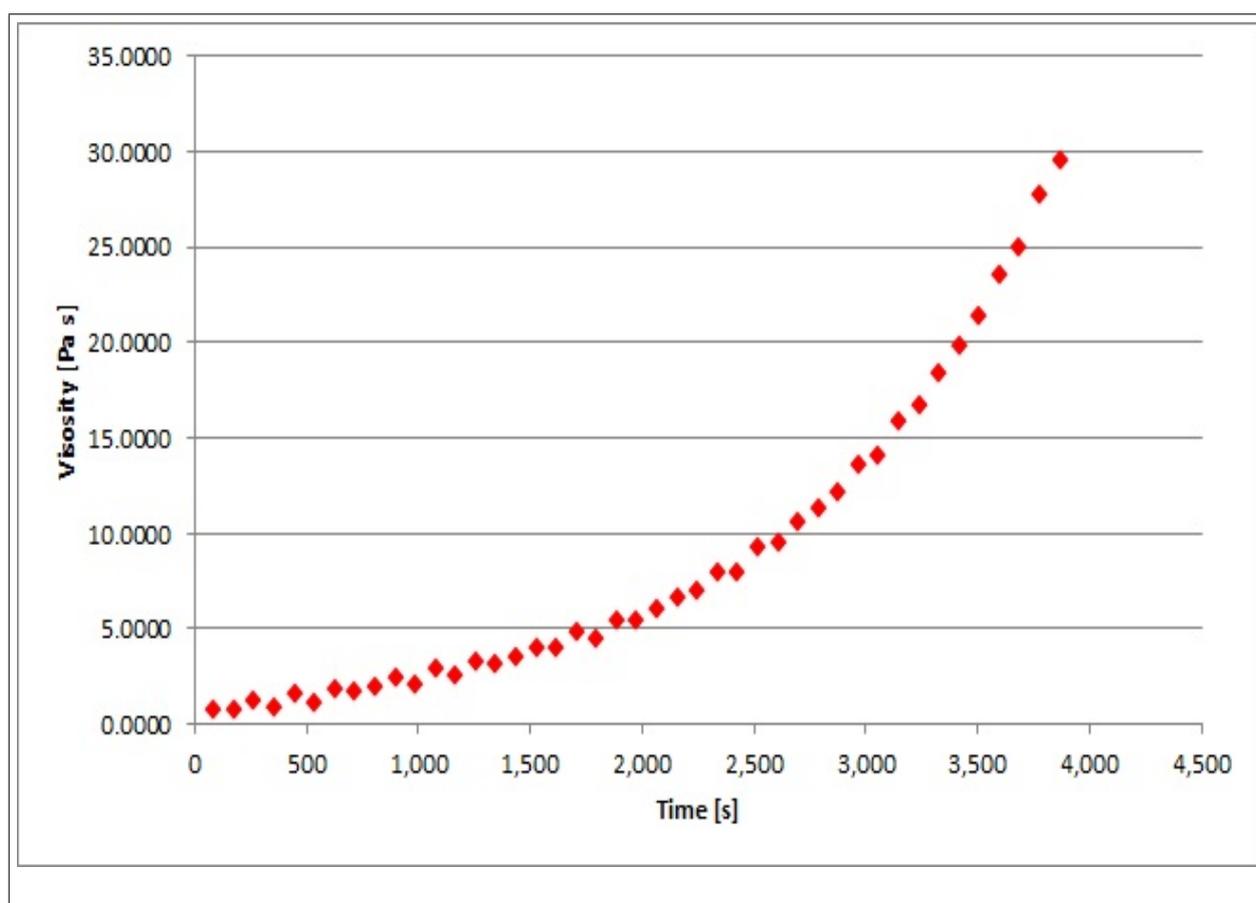


Figura 2.13: La viscosità alla temperatura di 30°C

shear stress	shear rate	viscosity	time	temperature	normal stress	time	velocity
Pa	1/s	Pa.s	s	°C	Pa	min	rad/s
1.041	1.283	0.8118	90	40.7	-380	1.5	0.1
0.8151	1.283	0.6355	180	40.3	-393.9	3	0.09999
1.708	1.283	1.332	270	40	-390.2	4.5	0.1
0.985	1.283	0.7681	360	39.8	-402.5	6	0.09999
2.194	1.283	1.711	450	39.6	-405.3	7.5	0.1
1.527	1.283	1.19	540	39.6	-406.7	9	0.1
2.364	1.283	1.843	630	39.5	-408.7	10.5	0.09999
2.525	1.283	1.968	720	39.5	-411.4	12	0.1
2.633	1.283	2.052	810	39.5	-438.9	13.5	0.1
3.595	1.282	2.804	900	39.5	-434	15	0.09998
3.176	1.283	2.476	990	39.4	-428.7	16.5	0.09999
4.618	1.283	3.601	1080	39.5	-423.6	18	0.1
4.174	1.283	3.254	1170	39.5	-448.5	19.5	0.09999
5.546	1.283	4.324	1260	39.4	-460.6	21	0.1
5.922	1.283	4.617	1350	39.5	-461.3	22.5	0.09999
6.702	1.283	5.225	1440	39.5	-462.2	24	0.1
8.123	1.283	6.333	1530	39.5	-465.6	25.5	0.1
8.409	1.283	6.556	1620	39.5	-470.9	27	0.09999
10.5	1.283	8.182	1710	39.5	-453.9	28.5	0.1
10.89	1.283	8.49	1800	39.5	-473.4	30	0.1
13.43	1.283	10.47	1890	39.5	-468.1	31.5	0.1
14.58	1.283	11.37	1980	39.5	-467	33	0.1
16.86	1.283	13.14	2070	39.5	-488.7	34.5	0.1
19.7	1.283	15.36	2160	39.5	-471.1	36	0.09999
21.52	1.283	16.78	2250	39.5	-478.1	37.5	0.09999
25.47	1.283	19.86	2340	39.5	-465	39	0.1
28.12	1.283	21.92	2430	39.5	-497.1	40.5	0.1
32.91	1.283	25.66	2520	39.5	-497.3	42	0.1

Tabella 2.3: La viscosità alla temperatura di 40°C

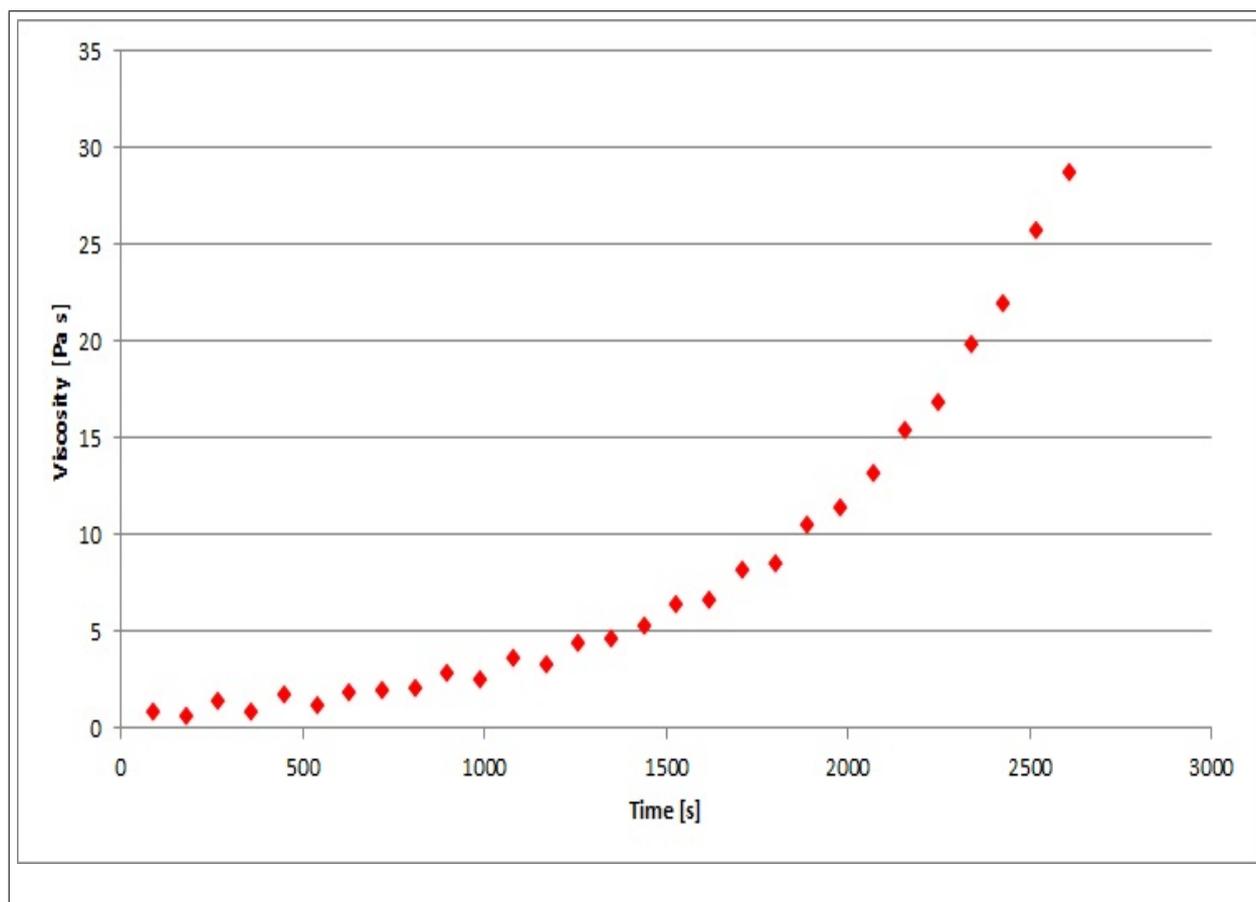


Figura 2.14: La viscosità alla temperatura di 40°C

Capitolo 3

Le proprietà meccaniche del bioresina

La norma (UNI-EN-ISO-178) definisce un metodo per la determinazione delle proprietà a flessione delle materie plastiche rigide e semirigide in condizioni definitive, per la resistenza a flessione, il modulo di flessione ed altri aspetti delle relazioni flessionali sforzo flessionale/deformazione.

La norma specifica due metodi:

- Il metodo A con una velocità di deformazione durante la prova dell'1%/min; e
- Il metodo B con due diverse velocità di deformazione:
 - 1%/min per la determinazione del modulo a flessione; e
 - del 5%/min o del 50%/min, in dipendenza della duttilità del materiale, per la determinazione della curva sforzo flessione/deformazione

3.1 Prova di flessione

Sovente i laminati compositi sono utilizzati per la realizzazione di elementi soggetti a sollecitazione con flessione predominante. In questi casi è particolarmente utile conoscere la resistenza a flessione di tali laminati.

Le prove più largamente utilizzate a tal fine sono la prova di **flessione a tre punti** e la prova di **flessione a quattro punti** (Si veda figura 3.1). La prova a tre punti è più semplice di quella a quat-

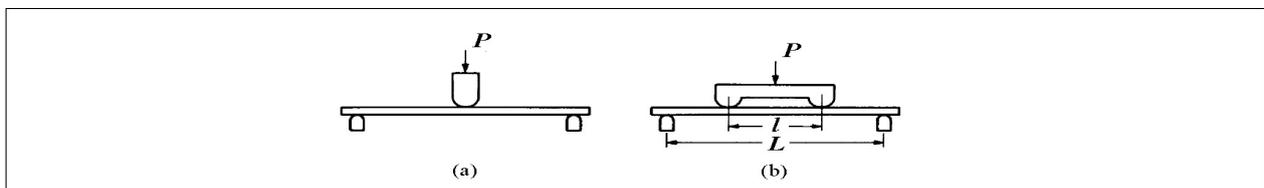


Figura 3.1: Prova di flessione (a)flessione a tre punti (b)flessione a quattro punti

tro punti ma dá luogo ad un momento flettente variabile lungo l'asse della trave, mentre la prova a quattro punti permette di ottenere nella zona centrale compresa tra i due carichi un momento flettente costante senza sforzi di taglio.

Nella prova a tre punti la presenza del taglio può indurre rottura per delaminazione piuttosto che per flessione (rottura delle fibre) rendendo così impossibile la corretta determinazione della resistenza a flessione. Questo fenomeno si può anche verificare nel provino a quattro punti, limitatamente alle due

zone laterali. Al fine di evitare tali inconvenienti è necessario aumentare quanto possibile il rapporto $R_{f/t}$ tra la massima sollecitazione di flessione (che avviene in superficie) e la massima sollecitazione di taglio (che avviene sull'asse neutro), cioè:

$$R_{f/t} = \frac{\sigma_{max}}{\tau_{max}} = \frac{6M/(bh^2)}{3P/(2bh)} = \frac{4M}{Ph} = \begin{cases} L/(2h) & \text{Tre punti} \\ (L-1)/(2h) & \text{Quattro punti} \end{cases} \quad (3.1)$$

L'uso di rapporti troppo elevati può però dar luogo a frecce eccessive (non linearità) con nascita di anomale reazioni vincolari orizzontali. Al fine di evitare tali inconvenienti è bene usare valori di $R_{f/t}$ non superiori a 16.

Nel caso di laminati non simmetrici, nei quali si ha un accoppiamento tra flessione e torsione, la prova può essere complicata da distacchi parziali del provino dagli appoggi causati dalla deformazione di torsione. In questi casi, al fine di minimizzare gli effetti sul risultato della prova, è necessario utilizzare provini relativamente allungati ed appoggi bilaterali.

3.1.1 Analisi numerica dei dati

Se si prende in considerazione un campione, poggiato su due sostegni separati da una distanza $L = 25.5mm$, di sezione rettangolare di dimensioni, dipendenti dal campione in esame, che variano da un campione all'altro come vengono dichiarate nella tabella 1.2. Durante la prova di flessione, il campione viene deflesso mediante un carico agente su di esso nel punto medio tra i due sostegni. Il campione viene deviato in questo modo con una velocità costante in mezzeria fino a rottura rispetto alla superficie esterna dello stesso o fino al raggiungimento di una deformazione del 5%, a seconda di quale si verifica prima. Intanto, sia la forza applicata al campione che la deformazione conseguente al campione nella mezzeria vengono misurate. I valori raccomandati delle velocità di spostamento del carico della macchina di prova si presentano nella tabella 3.1:

Velocità di prova [mm/min]	Tolleranza %
1	±20
2	±20
5	±20
10	±20
20	±10
50	±10
100	±10
200	±10

I provini di spessori tra 1mm e 3.5mm richiedono velocità minima

Tabella 3.1: Le velocità predefinite

Dopo aver posizionato il campione sui supporti, si è impostato la velocità, ad un valore di $3mm/min$, del carico, la prova si termina appena viene superato uno spostamento di $6mm$. Nei seguenti grafici si può vedere come varia lo sforzo nei diversi provini in funzione della deformazione, dovuto alla non simmetria tra i provini l'andamento delle curve varia da una prova fatta su un campione ad un'altra. Le dimensioni, in millimetri, del provino preferite sono mostrate nella tabella 3.2:

Però nel caso in cui non è possibile o auspicabile utilizzare i valori preferiti del campione, si utilizzano delle dimensioni come quelle indicate nella tabella 3.5:

Per quanto riguarda le dimensioni usate nella prova sono:

[mm]		
Lunghezza	L	80 ± 2
Larghezza	W	10 ± 0.2
Spessore	t	4 ± 0.2

Tabella 3.2: Le dimensioni del campione

Spessore, t	Larghezza, W
mm	mm
(±0.5)	
$1 < t \leq 3$	25
$3 < t \leq 5$	10
$5 < t \leq 10$	15
$10 < t \leq 20$	20
$20 < t \leq 35$	35
$35 < t \leq 50$	50

Tabella 3.3: Lo spessore t in funzione della larghezza W

- L ~ 25.5mm

mentre, la larghezza; W e lo spessore; t, sono mostrati nella tabella 1.2, dove si presentano la media μ insieme all'incertezza δ di ogni tessuto. Al termine della prova di flessione si è ottenuto dei grafici che evidenziano gli sforzi in funzione delle deformazioni conseguenti ai provini. Certi grafici presentano dei valori iniziali di deformazione, perché non sempre si resettava la macchina della prova di flessione. La **prova di flessione a tre punti** è il metodo utilizzato durante tutto l'esperimento, si è deciso anche di scartare il primo provino per il fatto che è andato male.

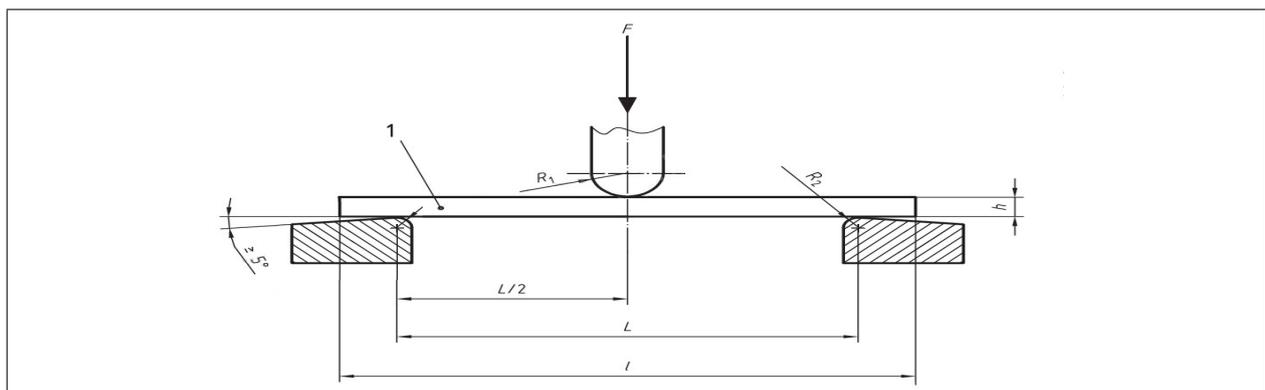


Figura 3.2: Prova a tre punti

I dati che si possono avere dalla prova di flessione sono; la forza (F) in kilonewton e lo spostamento (s) in millimetri, le relazioni necessarie a descrivere le proprietà meccaniche del materiale sono: lo sforzo σ in Pascal, la deformazione ϵ che è adimensionale ed il modulo di elasticità di flessione E_f in Pascal:

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bh^2} \quad \epsilon_f = \frac{6sh}{L^2} \quad e \quad E_f = \frac{\sigma_f}{\epsilon_f} \quad (3.2)$$

Material composito di Canapa LD:

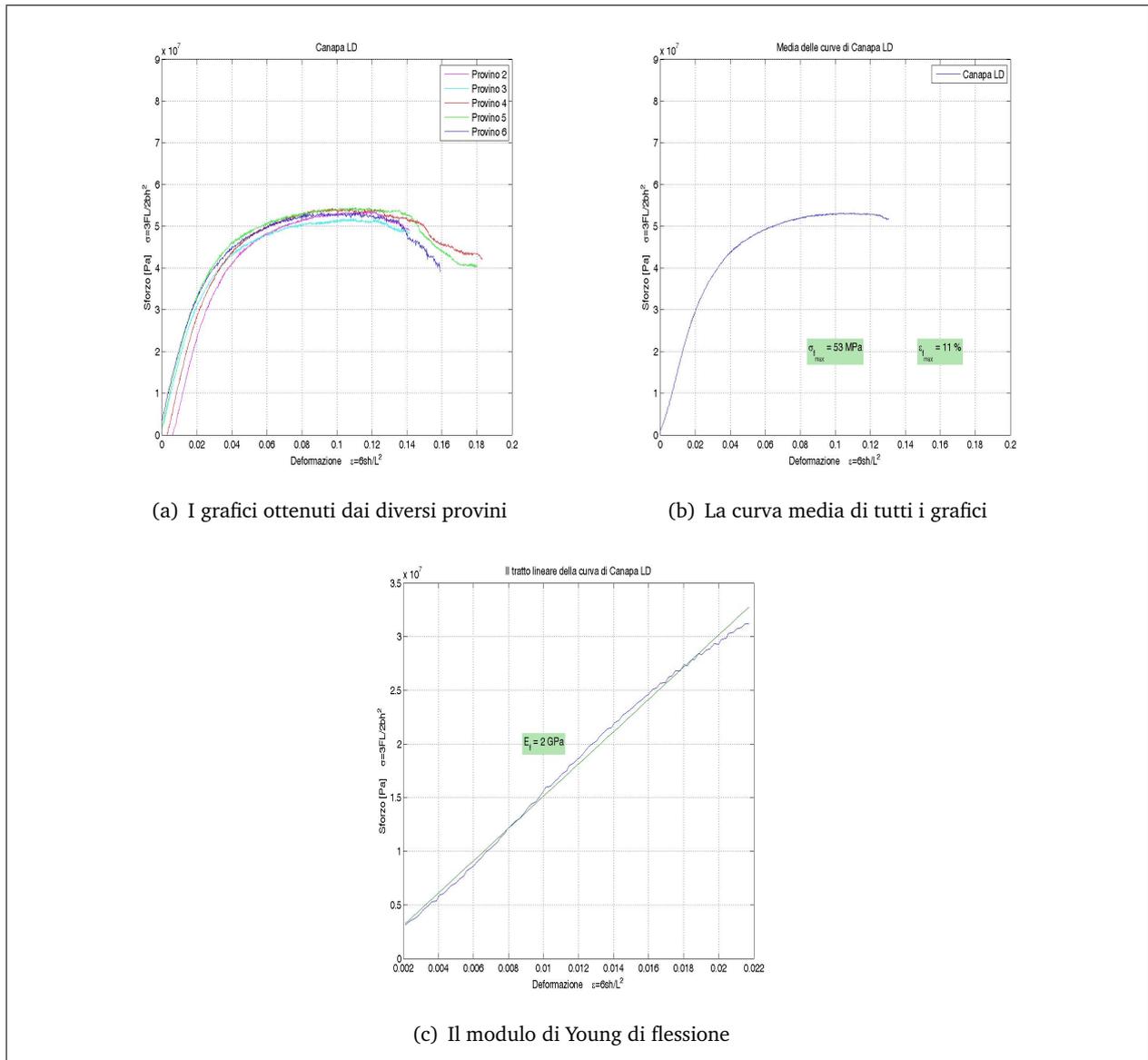


Figura 3.3: Le curve dello sforzo in funzione della deformazione

Material composito di Canapa GJ:

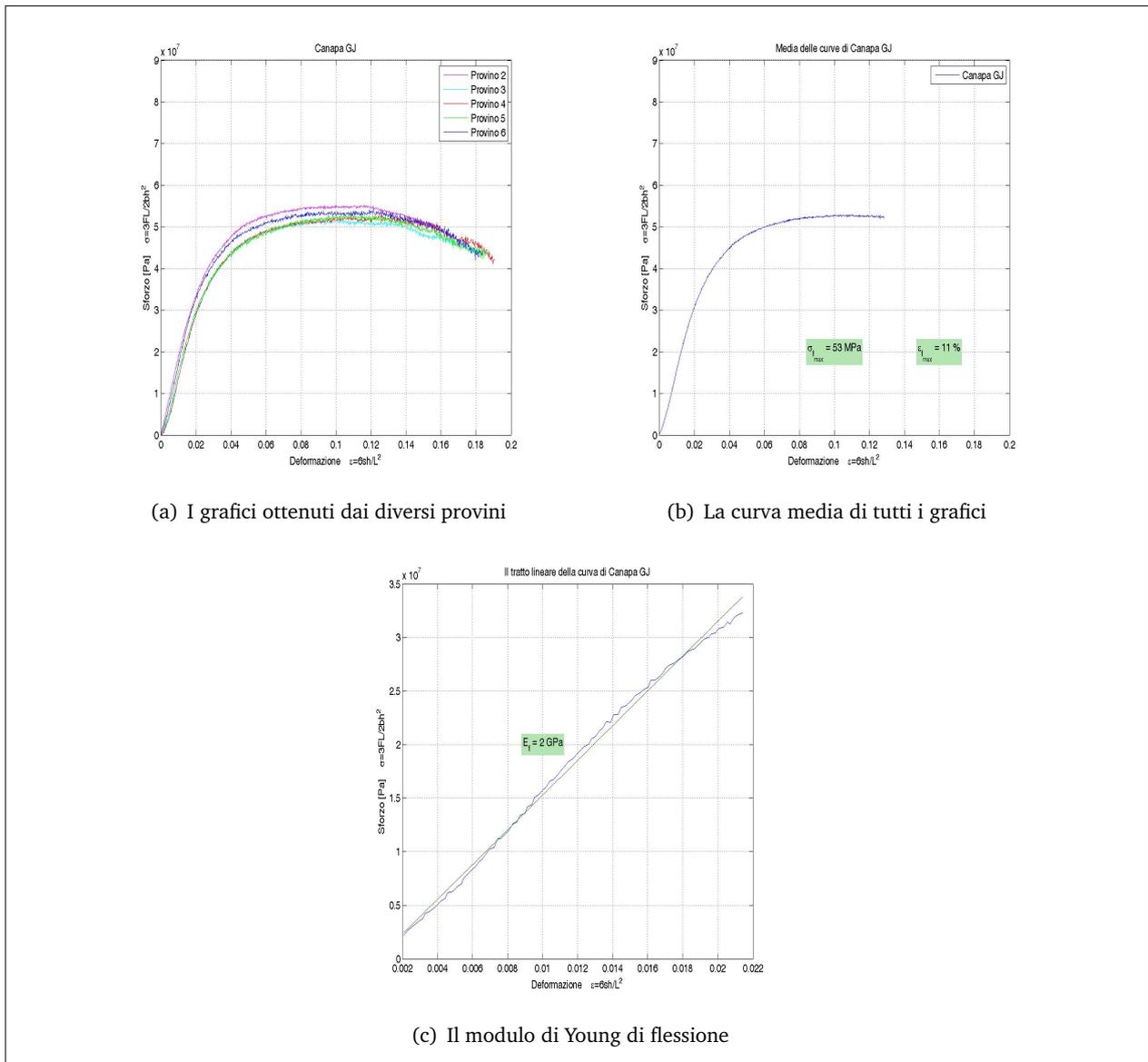


Figura 3.4: Le curve dello sforzo in funzione della deformazione

Material composito di Canapa E:

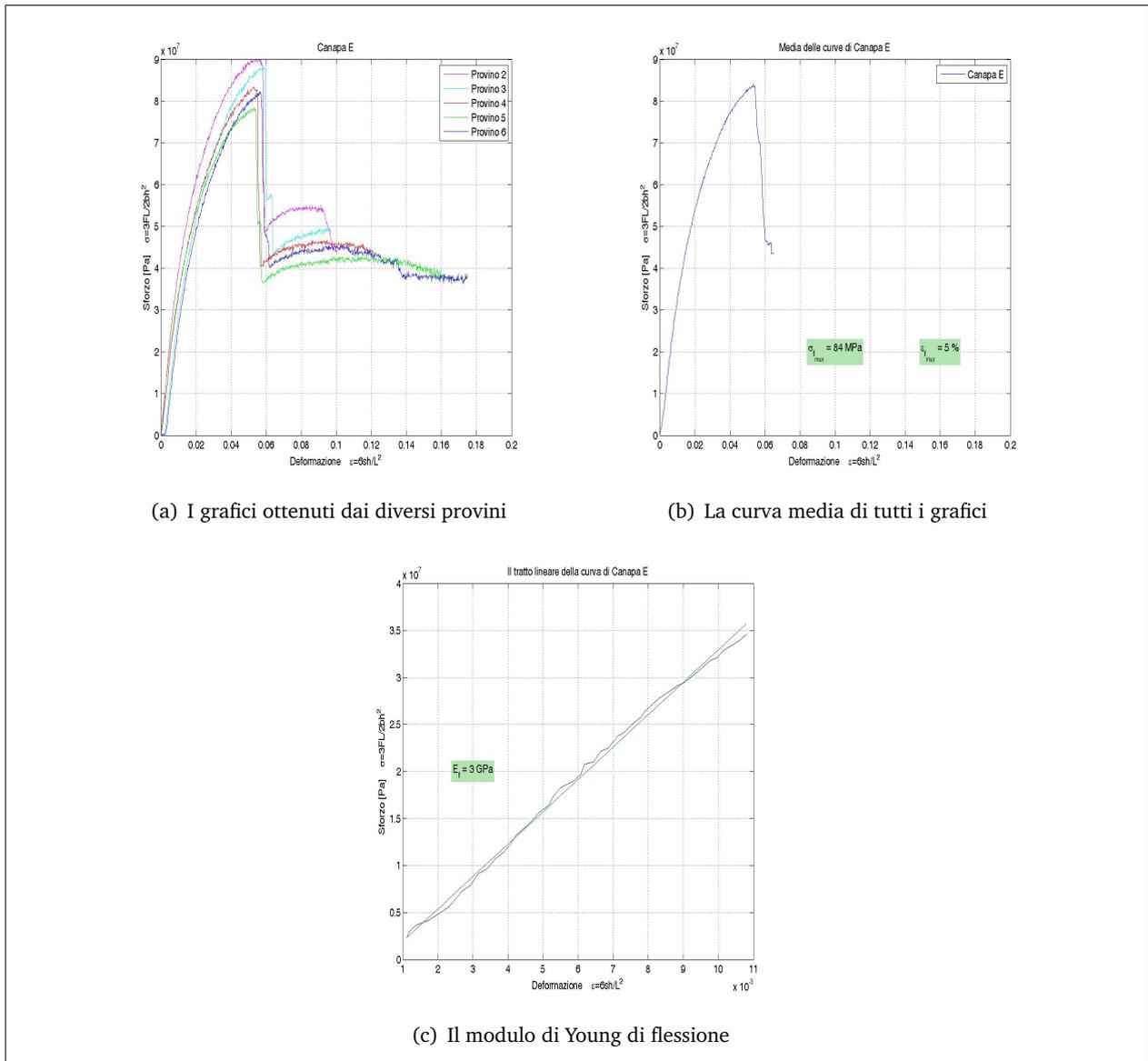


Figura 3.5: Le curve dello sforzo in funzione della deformazione

Material composito di Vetro LD:

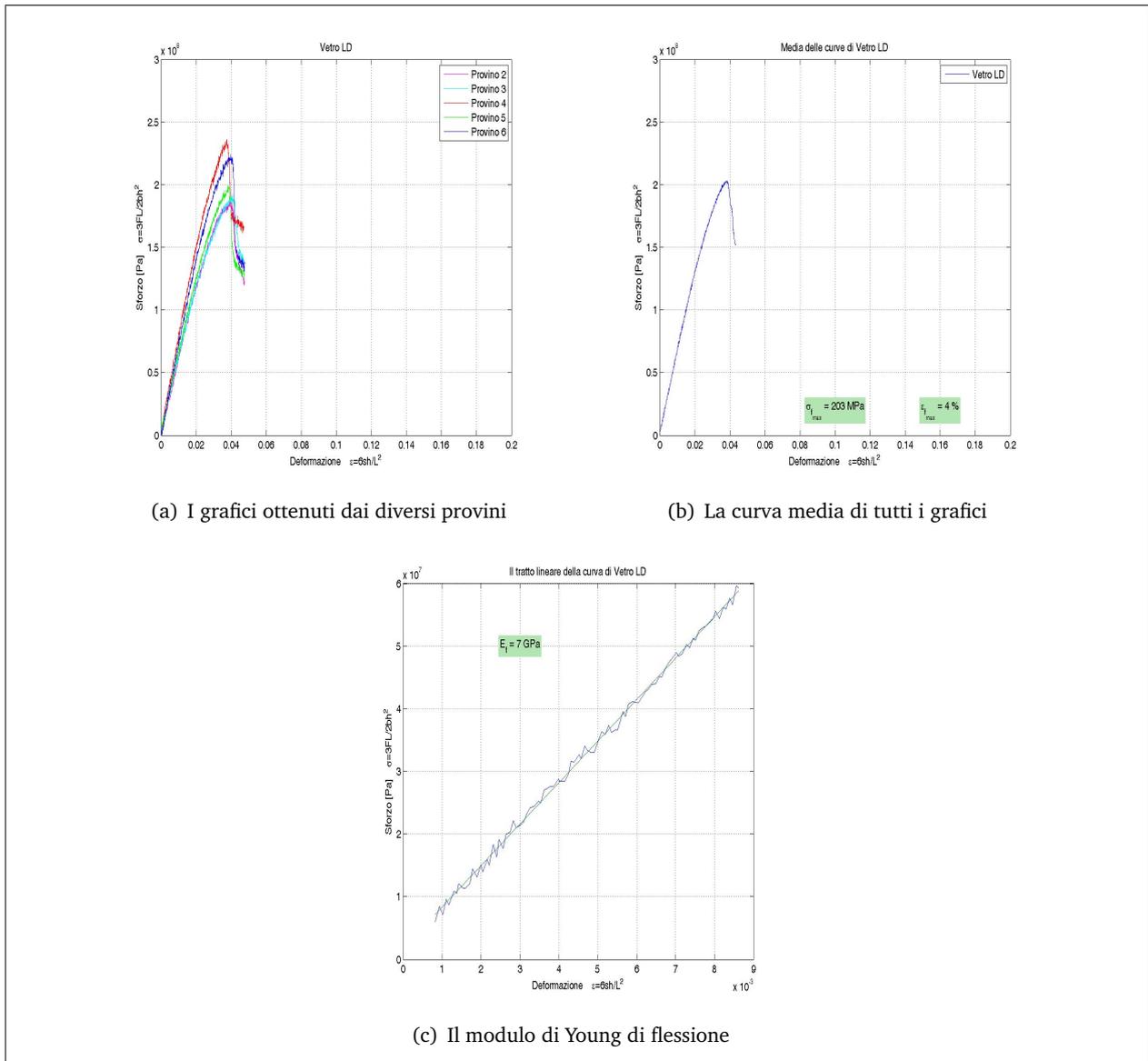


Figura 3.6: Le curve dello sforzo in funzione della deformazione

Material composito di Vetro GJ:

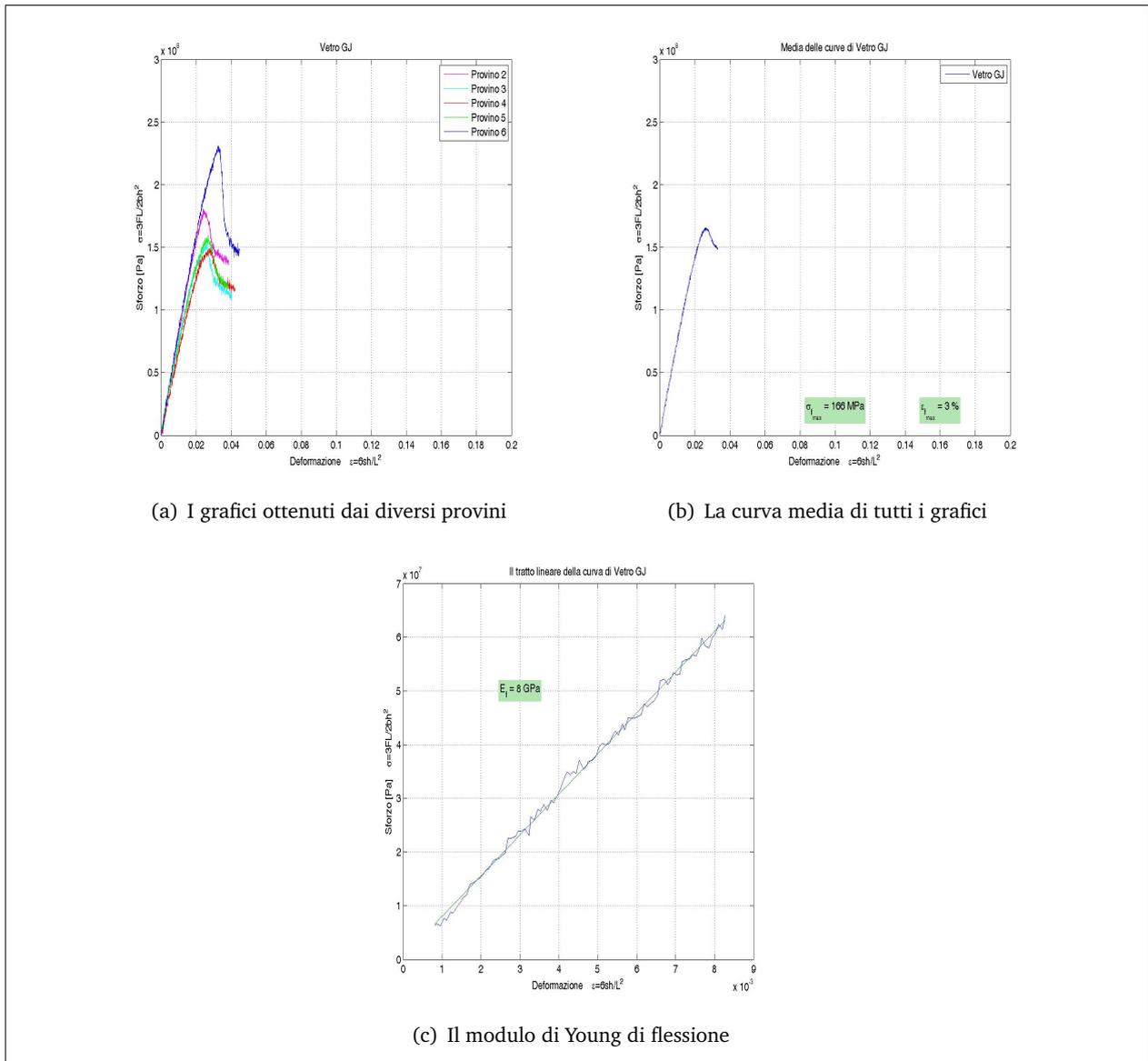


Figura 3.7: Le curve dello sforzo in funzione della deformazione

Material composito di Vetro E:

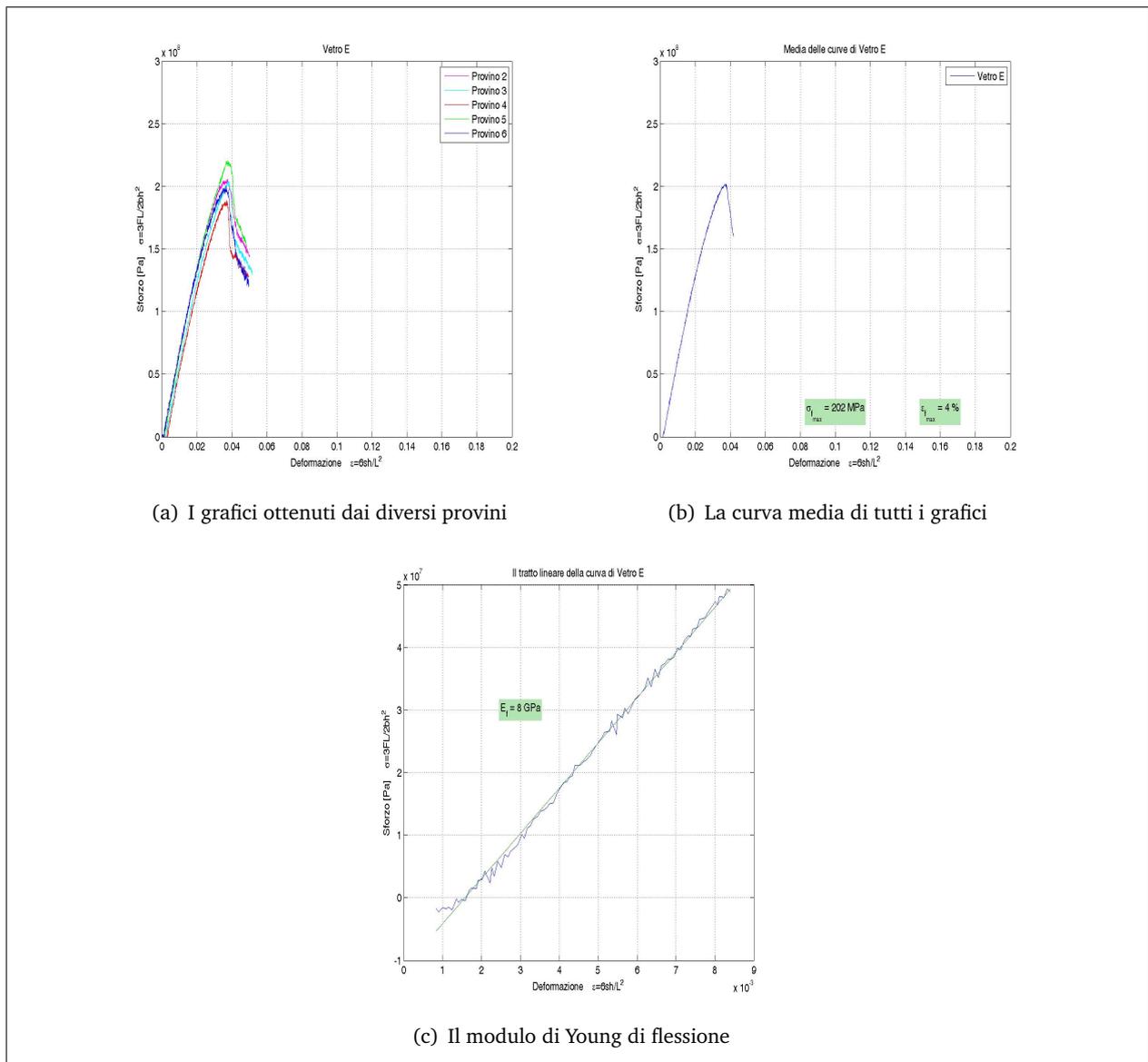
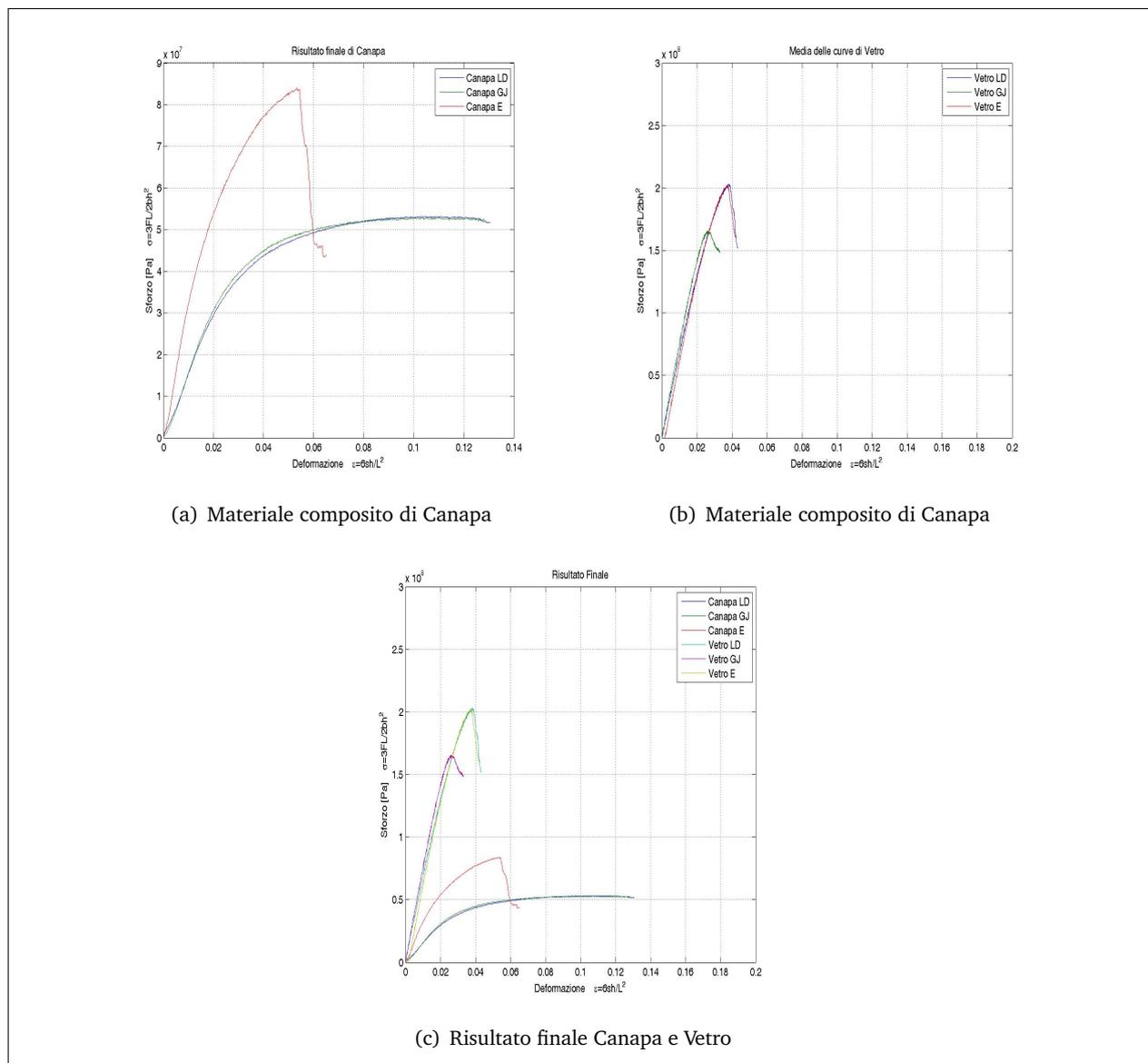


Figura 3.8: Le curve dello sforzo in funzione della deformazione

Confronto tra i diversi grafici:**Figura 3.9:** Le curve dello sforzo in funzione della deformazione

Sebbene il comportamento dei materiali compositi, rinforzati con fibre naturali di Canapa, di tipo GJ e LD sia del tutto uguale, si può osservare invece che tale comportamento cambia radicalmente nel caso dei materiali compositi, rinforzati con fibre sintetiche di Vetro, degli stessi tipi. Si nota nella figura 3.9(b) come i materiali compositi, rinforzati con fibre sintetiche di vetro, di tipo LD e E sono simmetrici. Da notare anche dalla figura 3.7(a), come il comportamento del sesto provino del materiale composito con fibre sintetiche di vetro di tipo GJ coincide con quello di tipo LD e di tipo E.

In fine si presentano i valori massimi di sforzo e deformazione insieme ai valori del modulo di Young a flessione, dei materiali compositi di tipo GJ LD e E, nella seguente tabella 3.5. In più ai valori già accennati è importante mostrare le masse dei provini dei materiali compositi, rinforzati sia di Canapa che di vetro, che insieme alle loro dimensioni ricavate prima si può trovare le densità in preciso quelle del materiale composito rinforzato sia con fibre sintetiche di Vetro che con fibre naturali di Canapa di

tipo GJ, a questo punto é necessario calcolare sia la media che l'incertezza di tali densità e sfruttando i dati delle dimensioni dei provini già esistenti nella tabella 1.2, si può anche calcolare la media e l'incertezza dei volumi di tali provini:

		$\sigma_{f_{max}}$ [MPa]	$\epsilon_{f_{max}}$ [%]	E_f [GPa]
Canapa	LD	53	11	2
	GJ	53	11	2
	E	84	5	3
Vetro	LD	203	4	7
	GJ	156	3	8
	E	202	4	8

Tabella 3.4: Le caratteristiche meccaniche dei materiali

		provino 1	provino 2	provino 3	provino 4	provino 5	provino 6
Canapa	LD	3g	3.1g	3g	3.1g	3.1g	3.1g
	GJ	3.1g	3.1g	3.1g	3.1g	3.2g	3.2g
	E	3.2g	3.4g	3.4g	3.3g	3.3g	3.3g
Vetro	LD	1.9g	1.9g	1.9g	1.9g	1.9g	1.9g
	GJ	1.9g	1.9g	1.9g	1.8g	1.8g	1.9g
	E	1.9g	2g	1.9g	1.9g	1.9g	1.9g

Tabella 3.5: Le masse dei diversi materiali compositi

$$\mu_\rho = \frac{\mu_m}{\mu_V} \quad \text{dove:} \quad \delta_\rho = \mu_\rho \sqrt{\left(\frac{\delta_m}{\mu_m}\right)^2 + \left(\frac{\delta_L}{\mu_L}\right)^2 + \left(\frac{\delta_W}{\mu_W}\right)^2 + \left(\frac{\delta_t}{\mu_t}\right)^2}$$

$$\mu_V = \mu_l \mu_W \mu_t \quad \text{dove:} \quad \delta_V = \mu_V \sqrt{\left(\frac{\delta_l}{\mu_l}\right)^2 + \left(\frac{\delta_W}{\mu_W}\right)^2 + \left(\frac{\delta_t}{\mu_t}\right)^2} \quad (3.3)$$

$$\begin{aligned} m_{GJ_{Canapa}} &= (3.130 \pm 0.0516)g \\ m_{GJ_{Vetro}} &= (1.870 \pm 0.0516)g \\ V_{GJ_{Canapa}} &= (3355. \pm 29.563)mm^3 \\ V_{GJ_{Vetro}} &= (1309. \pm 38.883)mm^3 \\ \rho_{GJ_{Canapa}} &= (0.933 \pm 0.0175)kg/m^3 \\ \rho_{GJ_{Vetro}} &= (1.430 \pm 0.0530)kg/m^3 \end{aligned} \quad (3.4)$$

Capitolo 4

Misure del livello d'isolamento acustico

Nei paragrafi precedenti, si é studiato le proprietá meccaniche del biocomposito, a questo punto é utile analizzare il comportamento di tale materiale quando viene sottoposto ad onde acustiche, le onde acustiche vengono fornite da un altoparlante definito sorgente, mentre il microfono definito pozzo ha il compito di ricevere e valutare il livello sonoro delle onde acustiche.

L'idea generale di questo capitolo, é riuscire ad introdurre i concetti teorici che ci permettono di misurare il livello d'isolamento acustico. L'apparato necessario a realizzare tale compito é composto da una scatola rettangolare uniforme, contenente due camere separate da una parete nella quale é presente una finestra in cui verrà inserito il campione in prova, le pareti delle camere di prova sono fatte di legno con dei spessori massici che isolano il sistema dall'esterno. La propagazione del suono in un mezzo omogeneo avviene in tutte le direzioni, il suono come ogni altra onda trasporta energia mentre si propaga, studiamo ora cosa accade quando un'onda sonora incide su un materiale, una parte dell'energia dell'onda incidente é riflessa, una parte é assorbita e una parte é trasmessa, come si mostra nella seguente figura: 4.1.

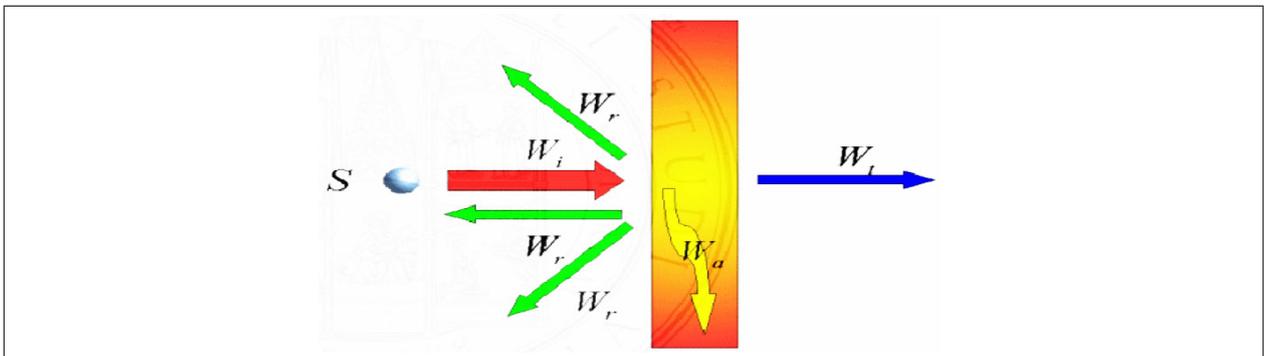


Figura 4.1: Le diverse parti dell'energia sonora incidente

$$\begin{aligned} W_i &= W_a + W_r + W_t \\ a &= \frac{W_a}{W_i} \quad r = \frac{W_r}{W_i} \quad e \quad t = \frac{W_t}{W_i} \\ \implies a + r + t &= 1 \end{aligned} \tag{4.1}$$

Si sono così definiti i coefficienti di: assorbimento (a), riflessione (r) e trasmissione (t), le stesse definizioni potevano essere date in termini di intensità acustica incidente, riflessa e trasmessa. Il campo di valori di frequenza f percepibili dall'orecchio umano varia tra circa 20Hz e 20000Hz, nel campo

dell'udibile la lunghezza d'onda λ varia tra circa 17m (corrispondenti a 20Hz) e 17mm (corrispondenti a 20000Hz).

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad \text{dove } c \text{ é la velocità di suono del mezzo.} \quad (4.2)$$

4.1 Misure in laboratorio ed in opera

Quando si parla di misure di isolamento acustico si deve distinguere tra misure in laboratorio e misure in opera. In laboratorio viene eseguita la misura del potere fonoisolante del divisorio in assenza di trasmissioni laterali come si vede nella figura: 4.2(a). Il potere fonoisolante R dalla parete é definito dalla seguente relazione:

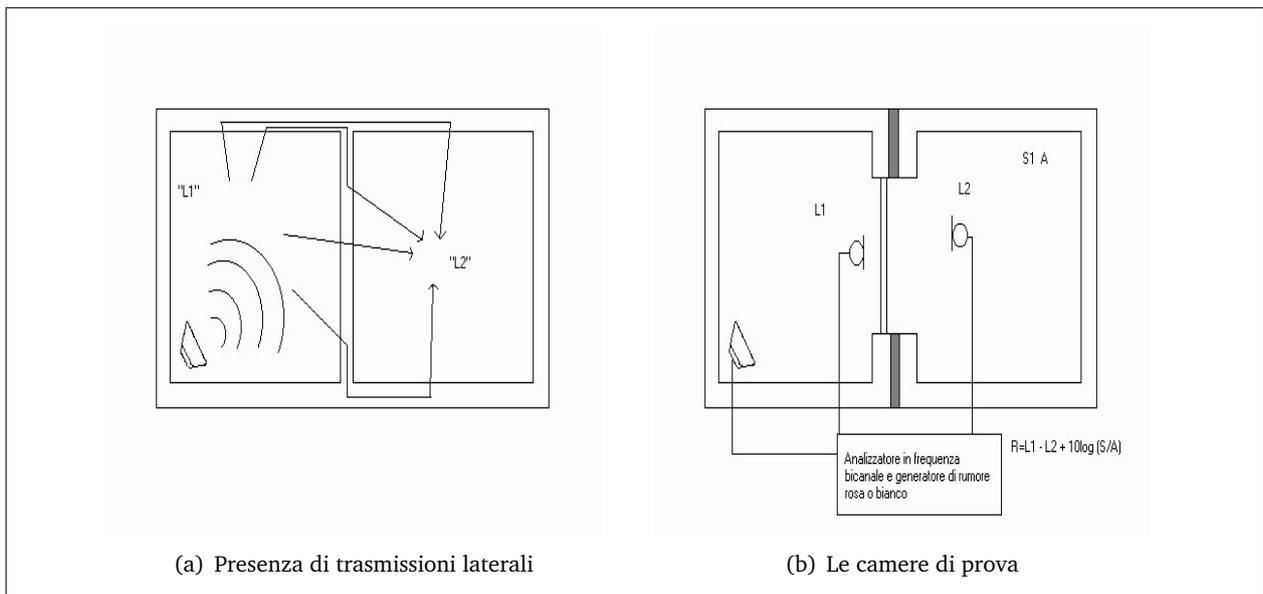


Figura 4.2: Schema delle camere di prova

$$R = -10 \cdot \log\{t\} \quad (\text{Decibel : } dB) \quad (4.3)$$

dove t é il coefficiente di trasmissione, dato dal rapporto tra la potenza trasmessa W_t e la potenza incidente W_i . Il valore del potere fonoisolante varia con la frequenza e la direzione di provenienza del suono oltre che con le proprietà geometriche e fisiche della parete. La determinazione sperimentale di R in campo acustico diffuso viene effettuata in laboratorio secondo il procedimento prescritto dalla Norma 20140 parte 3 [10]. La figura 4.2(b) rappresenta schematicamente le due camere di prova, per ogni banda di frequenza, noti i livelli di pressione sonora medi nell'ambiente disturbante L_1 e nell'ambiente ricevente L_2 , il potere fonoisolante R della parete in prova si ottiene dall'espressione:

$$R = L_1 - L_2 + 10 \cdot \log\left\{\frac{S}{A}\right\} \quad (dB) \quad (4.4)$$

Dove:

- L_1 livello di pressione sonora nell'ambiente emittente
- L_2 livello di pressione sonora nell'ambiente ricevente

- S é la superficie della partizione esaminata (m^2)
- A é l'area di assorbimento acustico equivalente dell'ambiente di ricezione (m^2)

Il termine A si calcola misurando il tempo di riverberazione del locale ricevente tramite la seguente equazione:

$$A = \frac{0.16V}{T} \quad (4.5)$$

Dove:

- V é il volume dell'ambiente ricevente (m^3)
- T é il tempo di riverberazione dell'ambiente ricevente (s)

Si rammenta che per tempo di riverberazione T si intende la durata necessaria affinché un segnale sonoro presente nell'ambiente decresca di $60dB$ dopo la sua interruzione. Per la pressione é stata assunta convenzionalmente una quantità di riferimento che corrisponde alla soglia di percezione di un orecchio normale alla frequenza di $1000Hz$, tale quantità vale $2 \times 10^{-5} Pa$. É stato quindi definito livello di pressione sonora L_p da esprimere in decibel (dB) il valore che si ottiene dall'espressione:

$$L_p = 10 \cdot \log \left\{ \frac{P}{P_0} \right\}^2 \quad (dB) \quad (4.6)$$

in cui:

- P é la pressione sonora misurata (Pa)
- P_0 é la pressione sonora di riferimento, pari a $2 \times 10^{-5} Pa$

4.1.1 Le camere di prova

La forma geometrica delle camere di prova é essenziale, in piú si considera che la lunghezza di un'onda sonora sia molto minore della lunghezza del lato piú piccolo di tutti i lati costituenti tali camere. Sotto tale ipotesi si trova in una condizione che tutte le onde incidenti sulle pareti vengono riflesse, e l'angolo di incidenza é uguale all'angolo di riflessione. La misura del potere fonoisolante di un pannello fatto di un materiale qualsiasi all'interno delle camere di prova, richiede che queste ultime siano isolate dall'interno verso l'esterno e vice versa, in altre parole che non ci siano interferenze o che il microfono riceva all'ingresso delle onde sonore che non devono esserci. Poste queste premesse, si deve posizionare la sorgente sonora insieme alle pareti che la circondano in maniera che tutte le onde uscenti dalla sorgente sonora sia dirette sia riflesse dalle pareti si dirigono verso il pannello in esame in maniera uniforme dove nell'altra camera si trova un microfono per quantificare il valore dell'onda sonora che viene assorbita dal pannello. Le camere di prova sono due dove il divisore delle due camere contiene una finestra in cui viene posizionato il pannello in esame, in una delle due camere viene posto un altoparlante e le pareti sono rastremate mentre nell'altra si colloca un microfono. Essendoci le pareti delle camere di prova non parallele tra di loro, obbligano le onde sonore di cambiare il loro angolo d'incidenza e nello stesso momento l'angolo di riflessione. Quindi, in base alla dimensione dell'ostacolo che incontra l'onda si possono avere diversi effetti:

- se la dimensione dell'ostacolo é minore di $1/3$ di λ non c'è riflessione.

- se la dimensione é comparabile con λ si ha una riflessione solo della metà dell'energia e si passa al fenomeno della diffrazione.
- se la dimensione é maggiore del triplo di λ allora si ha riflessione totale.

Immaginando una coppia di onde che si propaga in uno spazio delimitato da due superfici parallele riflettenti, si nota come l'onda stazionaria viene generata dalla somma delle due onde. A questo punto risulta necessario modificare l'equazione dell'onda, aggiungendo le condizioni al contorno che limitano il moto. Detto L lo spazio di propagazione, l'equazione dell'onda diventa:

$$\frac{\partial^2 \zeta(x,t)}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \cdot \frac{\partial^2 \zeta(x,t)}{\partial t^2} \quad (4.7)$$

$$\zeta(0, t) = A, \quad \zeta(L, t) = B$$

Si ottiene quindi la soluzione generale della formula:

$$\zeta(x, t) = A \cos(kx) + B \sin(kx) \quad (4.8)$$

Le onde stazionarie si possono quindi considerare come il risultato dell'interferenza di onde progressive e regressive sinusoidali aventi la stessa frequenza.

Come si può notare, le onde acustiche sono influenzate da diversi parametri, ad esempio: il mezzo in cui si propagano, la pressione, il volume e la temperatura del mezzo stesso. E come si é visto prima le dimensioni delle camere di prova sono molto importanti e devono essere scelte in modo che siano maggiori della lunghezza delle onde acustiche per evitare l'assorbimento di tali onde dalle pareti delle camere di prova ed ottenere la sola riflessione, in piú le pareti che costituiscono le camere di prova non devono essere parallele in modo da non permettere alle onde acustiche di incidere nello stesso punto, in seguito vengono mostrate le figure che contengono una descrizione dettagliata di una singola camera di prova perché l'altra é simmetrica a quella visualizzata:

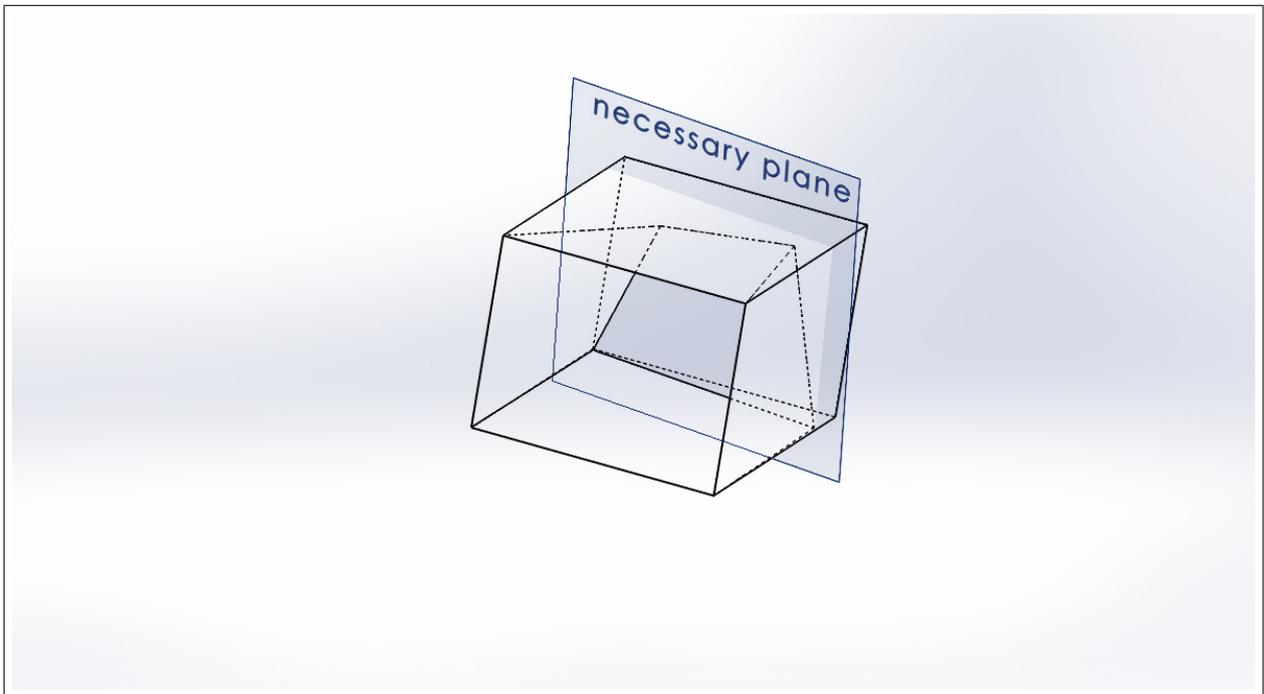


Figura 4.3: Camera di prova in 3D

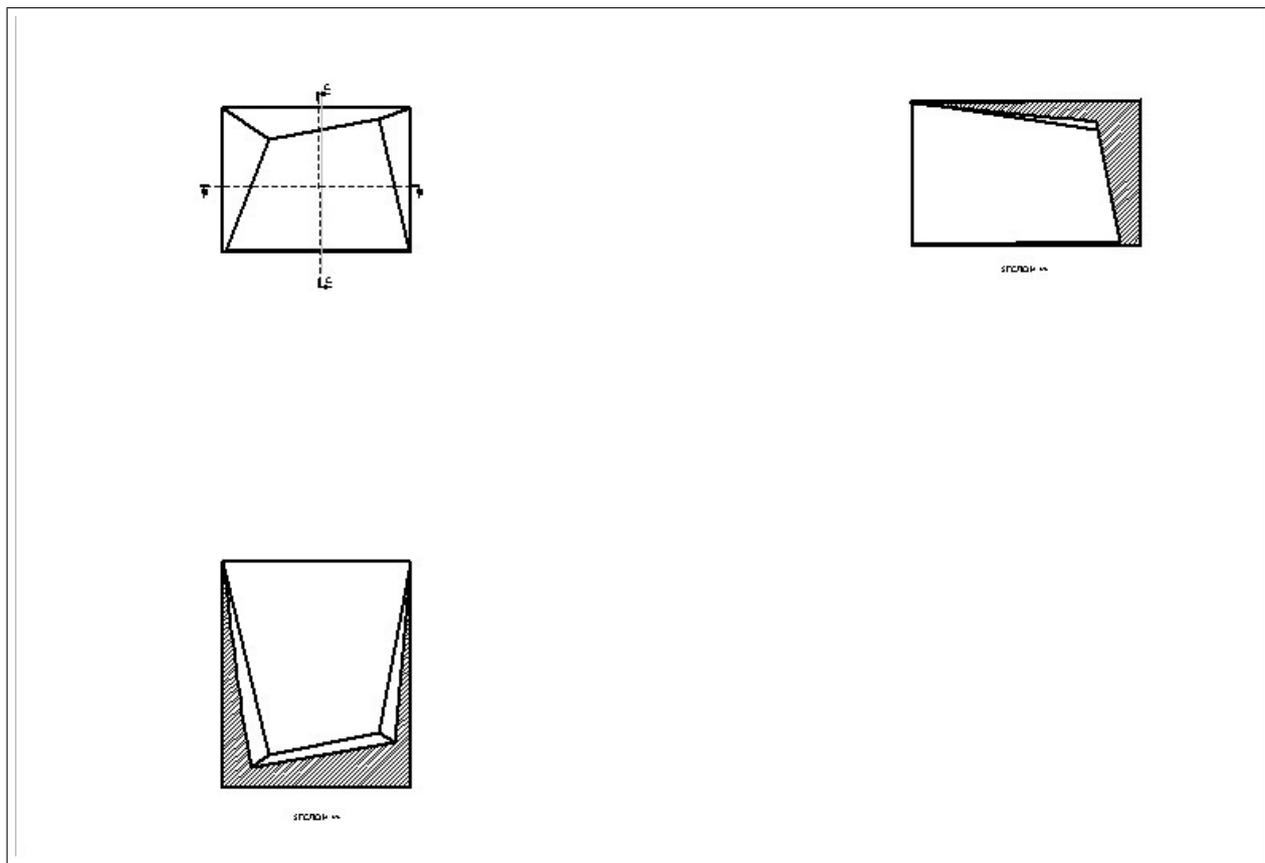


Figura 4.4: Schizzo delle diverse sezioni

Capitolo 5

Conclusione

La resina epossidica presenta resistenza maggiore delle altre due resine adoperata in Canapa, intanto quando viene superato lo sforzo massimo di rottura il materiale cede e viene mancato il tratto plastico, in altre parole il materiale si strappa. Tale materiale non supporta grandi spostamenti come si può vedere nei grafici sopra elencati, ad esempio; qualora viene raggiunto un valore di deformazione $\epsilon_f = 0.05$ accade la rottura e viene mancato il tratto plastico. In più la differenza di sforzo massimo di rottura (nel caso di Canapa) tra le tre resine non è molto elevato, i tre valori sono dello stesso ordine. Come si è potuto vedere dai valori dei moduli di Young di flessione E_f non cambiano di tanto, al contrario sono all'incirca uguali, i valori sono quasi uguali per tutte e tre resine. Nel momento in cui vengono adoperate le resine in fibra di Vetro hanno quasi le stesse caratteristiche, anzi il comportamento delle bioresine è migliore di quella epossidica.

Sia nella ricerca internazionale che nelle applicazioni d'avanguardia trovano attenzione sempre maggiore i biocompositi, cioè la versione più evoluta ed intelligente dei materiali compositi, già ampiamente utilizzati in vari campi, dall'edilizia, alla meccanica, alle applicazioni mediche ed in altri settori. I biocompositi, partendo dal concetto di base degli FRP (Fiber Reinforced Plastics), cioè dalla combinazione tridimensionale tra una resina polimerica ed una fibra di rinforzo, anziché sfruttare materiali di partenza di origine sintetica, derivanti da lavorazione del petrolio, sfruttano totalmente o almeno in parte elementi di origine vegetale, come fibra di lino, canapa, bambú, o iuta.

La nuova generazione di questi materiali punta invece l'attenzione sulla loro sostenibilità ed ecoefficienza, con prodotti derivanti da materie plastiche biodegradabili e polimeri naturali ricavati da coltivazioni rinnovabili di anno in anno, utilizzano biomasse come materie prime, formando un nuovo portfolio di prodotti sostenibili, eco-efficienti e competitivi sui mercati internazionali.

Un esempio è dato dai compositi naturali o derivati da biofibre (Bio-composites): l'alternativa ai materiali compositi rinforzati con fibra di vetro, che sta prendendo sempre più spazio soprattutto in campo edile. La combinazione di fibre naturali come il **Kenaf**, la **Canapa**, il **Lino**, la **Iuta**, **Henequen**, le foglie di **Ananas**, il **Sisal**, con matrici di polimeri di origine sia rinnovabile che non, viene utilizzata per produrre materiali sempre più competitivi rispetto ai compositi sintetici, anche se la loro produzione talvolta richiede attenzioni in più, come un particolare interfaccia tra biofibra e matrice e fasi più articolate di lavorazione. I cosiddetti biocompositi verdi si stanno quindi evolvendo conglomerando fibre naturali con polimeri naturali ricavati da fonti rinnovabili come le cellulose plastiche, polilattidi, fecola di materie plastiche/materie plastiche derivate da fecola, poliidrossialcanoati (poliesteri batterici), plastiche a base di soia.

Appendice A

```
1 clear all
2 close all
3 clc
4 L=25.5;
5
6 figure(1)
7 for i=1:6
8     m=sprintf('cd%d.dat',i);
9     a=load(m);
10    x=-6*a(:,2)*2.36/L^2; % y=-a(:,3)/(15.71*90.63)*10^9;
11    s=3/2*(-a(:,3))*L/(15.71*2.36^2)*1e3;
12    V=polyfit(x(1:round(length(x)/20)),s(1:round(length(s)/20)),1);
13    Y=polyval(V,x(1:round(length(x)/20)));
14    plot(x(1:round(length(x)/20)),s(1:round(length(s)/20)),...
15         x(1:round(length(x)/20)),Y)
16    hold on
17    grid on
18
19 end
20
21
22 figure(2)
23 for i=1:6
24     m1=sprintf('cj%d.dat',i);
25     a1=load(m1);
26     x1=-6*a1(:,2)*2.32/L^2; % y1=-a1(:,3)/(88.87*16.18)*10^9;
27     s1=3/2*(-a1(:,3))*L/(16.18*2.32^2)*1e3;
28     plot(x1,s1,'Color',[1/i 1-1/6*i 1-i/18])
29     hold on
30 end
31 grid on
32 axis([0 0.2 0 90])
33 title('Canapa Janszen')
34 xlabel('Deformazione \epsilon=6sh/L^2')
35 ylabel('Sforzo [MPa] \sigma=3FL/2bh^2')
36
```

```

37 figure (3)
38 for i=1:6
39     m2=sprintf ('cp%d.dat', i);
40     a2=load (m2);
41     x2=-6*a2 (:, 2) * 2.35 / L ^ 2; % y2=-a2 (:, 3) / (91.6 * 16.1) * 10 ^ 9;
42     s2=3/2 * (-a2 (:, 3)) * L / (16.1 * 2.35 ^ 2) * 1e3;
43     plot (x2, s2, 'Color', [1/(2*i) 1-1/(6*i) 1-i/18])
44     hold on
45 end
46 grid on
47 axis ([0 0.2 0 90])
48 title ('Canapa Epoxy p.5 ')
49 xlabel ('Deformazione \epsilon=6sh/L^2')
50 ylabel ('Sforzo [MPa] \sigma=3FL/2bh^2')
51
52 figure (4)
53 for i=1:6
54     m3=sprintf ('vd%d.dat', i);
55     a3=load (m3);
56     x3=-6*a3 (:, 2) * 0.94 / L ^ 2; % y3=-a3 (:, 3) / (89.42 * 16.07) * 10 ^ 9;
57     s3=3/2 * (-a3 (:, 3)) * L / (16.07 * 0.94 ^ 2) * 1e3;
58     plot (x3, s3, 'Color', [1/(12*i) 1/i 1-1/(18*i)])
59     hold on
60 end
61 grid on
62 axis ([0 0.05 0 250])
63 title ('Vetro Di-Landro p.5 ')
64 xlabel ('Deformazione \epsilon=6sh/L^2')
65 ylabel ('Sforzo [MPa] \sigma=3FL/2bh^2')
66
67 figure (5)
68 for i=1:6
69     m4=sprintf ('vj%d.dat', i);
70     a4=load (m4);
71     x4=-6*a4 (:, 2) * 0.9 / L ^ 2; % y4=-a4 (:, 3) / (89.33 * 15.59) * 10 ^ 9;
72     s4=3/2 * (-a4 (:, 3)) * L / (15.59 * 0.9 ^ 2) * 1e3;
73     plot (x4, s4)
74     hold on
75 end
76 grid on
77 axis ([0 0.05 0 250])
78 title ('Vetro Janszen p.5 ')
79 xlabel ('Deformazione \epsilon=6sh/L^2')
80 ylabel ('Sforzo [MPa] \sigma=3FL/2bh^2')
81
82 figure (6)
83 for i=1:6

```

```

84     m5=sprintf('vp%d.dat',i);
85     a5=load(m5);
86     x5=-6*a5(:,2)*0.91/L^2; % y5=-a5(:,3)/(89.77*16.23)*10^9;
87     s5=3/2*(-a5(:,3))*L/(16.23*0.91^2)*1e3;
88     plot(x5,s5)
89     hold on
90 end
91 grid on
92 axis([0 0.05 0 250])
93 title('Vetro Epoxy p.5')
94 xlabel('Deformazione \epsilon=6sh/L^2')
95 ylabel('Sforzo [MPa] \sigma=3FL/2bh^2')

```

```

1 clear all
2 close all
3 clc
4
5 w=load('1.dat');
6 med(1)=1/6*w(1,:)*ones(6,1);
7 for j=2:12
8     med(j)=1/6*w(j,:)*ones(6,1);
9 end
10
11 dev=sqrt(1/5*(w(1,:)-med(1))*(w(1,:)-med(1))');
12 for i=2:12
13     dev=[dev;sqrt(1/5*(w(i,:)-med(i))*(w(i,:)-med(i))')];
14 end
15 med=med'
16 dev

```

Appendice B



Technical Data Sheet

SUPER SAP® INF Epoxy System— Clear, Low Viscosity Epoxy Resin for Vacuum Infusion or RTM

Product Overview

SUPER SAP® INF SYSTEM is composed of Super Sap® CLR Epoxy, a modified, clear liquid epoxy resin, with two hardener speeds, Super Sap® INF (FAST) Hardener and Super Sap® INS (SLOW) Hardener. As opposed to traditional epoxies that are composed primarily of petroleum-based materials, Super Sap® formulations contain biobased renewable materials sourced as co-products or from waste streams of other industrial processes, such as wood pulp and bio-fuels production. These natural components have excellent elongation and exceptionally high adhesion properties.

Applications

SUPER SAP® INF System is a clear, UV stabilized, low viscosity epoxy system for applications that require a low color, low yellowing epoxy resin and low viscosity for vacuum infusion or resin transfer molding (RTM) processes. With two hardener speeds, INF System can meet the needs of infusion processes for both small and simple or large and complicated parts.

WHY CHOOSE SUPER SAP

Performance Grade:

- Improved mechanical performance
- Formulas catering a wide range of processes and applications

Reduced Environmental Impact:

- 50% minimum reduction in CO and greenhouse gas emissions¹
- Green chemistry eliminates harmful by-products
- Reduced power and water consumption

Considerations for the Environment & User Safety:

- Agricultural land use
- Reduced harmful by-products such as chlorinated hydrocarbons
- Reduced power and water consumption during processing
- Lowered sensitizing components for increased user safety

SUSTAINABLE TECHNOLOGY

Waste and Non-Food Grade Vegetable Oils

By-products of bio-fuels production provide a green chemistry route to one of the main components in our epoxy production. This renewable feedstock replaces additional petrochemical components in our resins with a rapidly renewable resource.

¹ As compared to 100% petroleum derived epoxies, depends on final system bio-content, LCA measurement using ISO 14040:2006.

Product Combo (Epoxy/Hardener)	CLR/INF	CLR/INS
Key Features	Excellent clarity, UV stability, Low yellowing, Low viscosity	Excellent clarity, UV stability, Low yellowing, Low viscosity, Long working time for large/complicated parts
Applications	Infusion, RTM, Lite RTM	Infusion, RTM, Lite RTM
Potential Use	Marine, Transportation	Marine, Transportation
Performance Data²		
Tensile Modulus (psi) ³	590,000	448,000
Tensile Strength (psi) ²	10,600	8,140
Elongation (%) ²	2.5	6
Flexural Modulus (psi) ⁴	525,500	390,000
Flexural Strength (psi) ³	18,050	11,850
Compression Strength (psi) ⁵	16,890	12,380
Onset Tg by DSC (°F) ⁶	122	90
Ultimate Tg by DSC (°F) ⁵	170	119
Hardness (Shore D) ⁷	70-80	70-80
Biobased Carbon Content ⁸	19%	18%
Processing Data		
Mix Ratio (by volume)	100:33	100:43
Mix Ratio (by weight)	-	-
Mixed Specific Density (@ 77°F)	1.105	1.098
Viscosity (A/B/Mixed, cPs, @ 77°F)	1850/42/490	1850/35/280
Pot Life (mins, @ 77°F)	45	90
Tack Free Time (hrs, @ 77°F)	8	24
Recommended Full Cure	7 days @ 77°F, Post cure recommended	7 days @ 77°F, Post cure recommended

² All performance data was taken from neat resin samples that underwent an initial cure at room temperatures for 24 hrs and a post cure at 120°F for 2 hrs

³ ASTM D638

⁴ ASTM D790

⁵ ASTM D695

⁶ ASTM D3418

⁷ ASTM D2240

⁸ ASTM D6866

PLANT POWER



PLANT-BASED
BIORESINS

No Compromises. Performance, Sustainability, Lower Environmental Impact

USDA BIOPREFERRED CERTIFIED

Super Sap® 100/1000 - The industry's FIRST USDA BioPreferredSM epoxy system

50% REDUCTION IN CARBON FOOTPRINT

ISO-based life cycle analysis figure comparing Super Sap® systems to conventional petroleum derived systems (ISO 14040:2006)

Every 1kg of standard epoxy replaced by Super Sap® saves 4 kg of green house gas equivalents

PERFORMANCE RESINS SYSTEMS

Formulas catering to a wide range of processes and applications

Hand Layup

Castings

RTM

Compression Molding

Filament Winding

Pre-pregs

Sports and Rec

Transportation

Fiber Reinforced Pipe

High Performance Coatings



WWW.ENTROPYRESINS.EU

Product Combo (Epoxy/Hardener)	100/1000	CLR/CLF	CLR/CLS	CLR/INF	CLR/INS	CCR/CCF	CCR/CCS	100/HVA	CPM/CPF	CPM/CPL	
Key Property	Room Temp Cure Systems							Heat Assisted Cure Systems			
Product Description	Key Features	USDA BioPreferred Certified, High elongation, Slight amber color	Excellent clarity, UV stability, Low yellowing	Excellent clarity, UV stability, Low yellowing, Long room temp working time	Excellent clarity, UV stability, Low yellowing, Low viscosity	Excellent clarity, UV stability, Low yellowing, low viscosity, Long working time for large/complicated parts	Excellent clarity, UV stability, Excellent air release	Excellent clarity, UV stability, Excellent air release, Low exotherms for large castings	High bio-content, Excellent adhesion, High elongation, Good thixotropic properties for use as an adhesive	Excellent adhesion, High modulus, Good elongation	Excellent adhesion, High modulus, High elongation, Long working times for complex layouts
	Applications	General laminating, adhesive, coating system, Hand layup, Vacuum molding	General laminating, adhesive, coating system, Hand layup, Vacuum molding	General laminating, adhesive, coating system, Hand layup, Vacuum molding	Infusion, RTM, Lite RTM	Infusion, RTM, Lite RTM	Casting, Potting, Embedments @ thicknesses less than 1in or volumes less than 1qt	Casting, Potting, Embedments @ thicknesses greater than 1in or volumes greater than 1qt	General adhesive, Compression molding, Wood bonding	Compression molding	Compression molding
	Potential Use	Woodworking, Wood laminates, Marine, Surfboards	Clear coatings, Tooling, Marine, Surfboards	Clear coatings, Tooling, Marine, Surfboards	Marine, Transportation	Marine, Transportation	Engineered countertops, Jewelry, Art/hobby projects	Engineered countertops, Jewelry, Art/hobby projects	Wood boat building, Wood laminates, Woodworking	Ski, Snowboard, Wakeboard, Skateboard, Wood laminates	Ski, Snowboard, Wakeboard, Skateboard, Wood laminates
Performance Data	Tensile Modulus (GPa)	2.62	3.03	3.23	4.07	3.09	3.09	3.04	1.52	3.00	3.01
	Tensile Strength (MPa)	56.54	65.50	67.57	73.08	56.12	56.12	54.54	32.54	61.09	61.98
	Elongation (%)	7	5	6	3	6	6	7	15	6	6
	Flexural Modulus (GPa)	2.28	3.03	2.96	3.62	2.69	2.69	2.82	0.61	2.80	2.84
	Flexural Strength (MPa)	77.01	93.08	100.53	124.45	81.70	81.70	76.53	21.37	93.49	92.73
	Compression Strength (MPa)	72.12	78.12	86.32	116.45	85.36	85.36	74.88	-	87.08	78.67
	Tg Onset (°C)	47	39	43	50	32	32	36	-	43	45
	Tg Ultimate (°C)	86	65	77	77	48	48	53	-	68	69
	Hardness (Shore D)	70-80	70-80	70-80	70-80	70-80	70-80	70-80	-	70-80	70-80
Biobased Carbon Content	37%	17%	21%	19%	18%	18%	18%	51%	28%	31%	
Processing Data	Mix Ratio (by volume)	2:1	2:1	2:1	-	-	2:1	2:1	4:3	2:1	2:1
	Mix Ratio (by weight)	100:48	100:47	100:48	100:33	100:43	100:43	100:43	100:70	100:43	100:40
	Viscosity (A/B/Mixed, cP, @ 25°C)	650/450/600	1850/140/725	1850/500/1030	1850/42/490	1850/35/280	1850/35/280	1850/25/195	650/14,000/5100	1300/2200/1230	1300/450/880
	Pot Life (mins, @ 25°C)	22	25	50	45	90	90	360	150	20	50
	Tack Free Time (hrs, @ 25°C)	3	4	8	8	24	24	72	n/a	n/a	n/a
	Recommended Full Cure	7 days @ 25°C	7 days @ 25°C	7 days @ 25°C, Post cure recommended	7 days @ 25°C, Post cure recommended	7 days @ 25°C, Post cure recommended	7 days @ 25°C, Post cure recommended	7 days @ 25°C, Post cure recommended	30 minutes @ 82°C	15 minutes @ 82°C	1820 minutes @ 82°C

All technical information is provided in good faith and is based on Entropy Resins, Inc. best knowledge. Entropy Resins, Inc. does not guarantee any of this data nor the misuse of its products or the consequences because of conditions that are beyond their control.

PARTNER
IN ITALY



RESINTEX TECHNOLOGY S.R.L.
Via le Lame, 11 | 03100 Frosinone - Italy
Tel. + 39 0775 89 80 99 | Fax. + 39 0775 83 74 01
www.resintex.it



WWW.ENTROPYRESINS.EU

Bibliografia

- [1] William D. Callister JR, Fundamentals Of Materials Science And Engineering, John Wiley & Sons, Inc, America, Fifth Edition, 2001
- [2] F.S. Cambell, Structural Composite Materials, ASM International, Materials Park, Ohio, America, First Edition 2010
- [3] Alessandra Carlucci Lombardi, Analisi Di Materiali Compositi Biocompatibili Prodotti Con Tecnologia RTM, Politecnico Di Milano, Tesi Di Laurea, 2012
- [4] Luca Battirossi, Analisi Di Materiali Compositi Con Fibre Naturali: Applicazione Su Un Componente Nautico, Università Di Bologna, Tesi Di Laurea, 2009
- [5] Ediz Durmaz, Preparation And Characterization Of Biocomposite And Application For A Nautical Component, Politecnico Di Milano, Tesi Di Laurea, 2011
- [6] Particle Analytical, <http://particle.dk/methods-analytical-laboratory/dsc-differential-scanning-calorimetry/dsc-theory/>
- [7] Nino Grizzuti, Reologia dei materiali polimerici. Scienza ed ingegneria, 2012, Edizioni Nuova Cultura - Roma
- [8] B. Zuccarello, Progettazione Meccanica Con Materiali Non Convenzionali
- [9] J. Blauert, N. Xiang, Acoustic For Engineers, ©Springer - Verlag Berlin Heidelberg
- [10] EN 20140 parte 3. Acoustics - Measurement of sound insulation in buildings and of building elements - Part 3: Laboratory measurements of airborne sound insulation of building elements (Misura dell'isolamento acustico di edifici e di elementi di edificio - Misura in laboratorio del potere fonoisolante di elementi di edifici)
- [11] Norma EN 20140 parte 6. Acoustics - Measurement of sound isolation in buildings and of building elements - Part 6: Laboratory measurements of impact sound insulation of floors (Misura dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio - Misura in laboratorio dell'isolamento dai rumori di calpestio di solai)
- [12] Isolamento Acustico, ©Lafarge Gessi
- [13] L'acustica Con Knauf Soluzioni Tecniche Per L'edilizia Civile E Industriale
- [14] Angelo Farina, Patrizio Fausti, Misure Dell'isolamento Al Rumore Aereo, Del Rumore Di Calpestio E Del Tempo Di Riverberazione
- [15] Paolo Guidorzi, Acustica Applicata E Illuminotecnica (Assorbimento E Trasmissione Del Suono)