



**Politecnico  
di Torino**



**POLITECNICO DI TORINO**

Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale

Tesi di Laurea Magistrale

A.A. 2021/2022

Sessione di Laurea Aprile 2022

**MODELLAZIONE MULTI-SCALA DI UN  
COMPONENTE IN MATERIALE  
COMPOSITO CF-SMC**

Creazione carta materiale, analisi FEM e Digital Twin.

**Tutor Accademico:**

Prof. Davide Paolino S.

**Candidato:**

Carlo Sismonda

**Tutor Aziendale:**

Ing. Salvatore Sottile



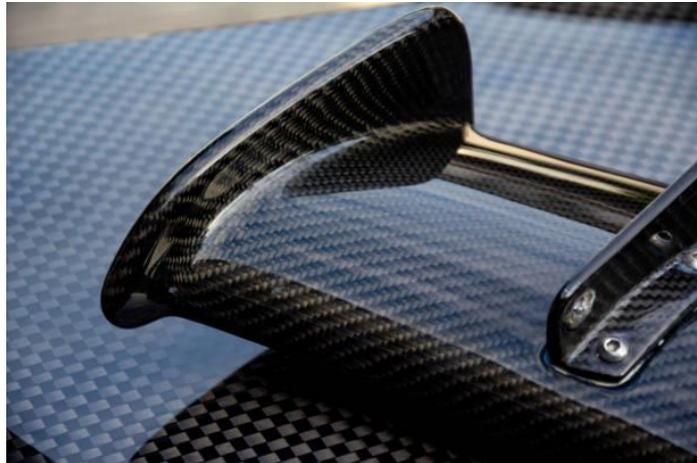
*A chi mi vuole bene,  
a chi non molla mai.*



# Introduzione

In ambito automotive, la prima apparizione dei materiali compositi risale agli anni Cinquanta poiché le forti tassazioni sull'acciaio nel periodo del dopoguerra imposero la ricerca di nuovi materiali da poter sostituire a quelli metallici in uso [1]. Con il passare degli anni questa motivazione è chiaramente venuta meno, ma la ricerca sui compositi non è cessata, anzi, è aumentata sempre di più fino a giungere ai giorni nostri. Infatti, negli ultimi decenni, il materiale composito è passato dall'essere un materiale con poche applicazioni di nicchia fino ad essere ampiamente utilizzato in molteplici ambiti a causa di una leggera ma progressiva diminuzione dei costi di produzione e una maggiore comprensione dei metodi di processo e di sviluppo. I settori *Aerospace* e *Automotive* sono stati i primi ad utilizzare in maniera diffusa i materiali compositi grazie alle eccellenti proprietà di resistenza meccanica unite ad una leggerezza sorprendente, caratteristica quest'ultima, fondamentale nei due settori citati.

Quando si pensa ai materiali compositi, la prima cosa che viene in mente è la fibra di carbonio e probabilmente, l'immagine a cui l'associamo è la seguente.



*Figura 1: Profilo Alare in Fibra di Carbonio*

Questa rappresentazione è corretta, ma come verrà illustrato nella prima metà della trattazione della tesi, il processo produttivo che porta alla costruzione di questo componente non è semplice ed economico per via del fatto che sono necessarie attrezzature costose e personale fortemente specializzato per il corretto posizionamento dei fogli in materiale composito. Per questo motivo negli ultimi anni sono comparse nuove tecnologie innovative di produzione.

Il focus di questa tesi è rivolto a un materiale definito CF-SMC, ossia *Carbon Fiber Sheet Moulding Compound*. Questo materiale, come verrà spiegato con maggiore dettaglio nei successivi capitoli, è composto da un mix di resina e piccoli *chopped carbon fiber*, cioè delle piccole chips di carbonio casualmente distribuite in tutto il materiale.



Figura 2: Vano motore della Lamborghini progettato con il loro SMC, Forged Composites®

Questo materiale oltre a mantenere i benefici classici di un composito con rinforzo fibroso, presenta un'ottima lavorabilità senza la necessità di personale particolarmente qualificato nella stesura dei fogli di carbonio sugli stampi. Molte aziende automobilistiche stanno scoprendo questo tipo di materiale e lo stanno implementando nei loro modelli di punta. La Marelli Ride Dynamics si è anch'essa interessata e, grazie a degli investimenti mirati, ha deciso di implementare nel plant di Torino tutte le tecnologie necessarie per la progettazione e la costruzione di componenti in SMC. L'obiettivo di questa tesi è quello di narrare il lavoro svolto durante i mesi di tirocinio nel plant della Marelli, partendo dalla comprensione dei materiali compositi fino all'analisi di un componente in SMC. Infatti, possiamo suddividere la tesi in due metà.

Nella prima metà viene mostrata una panoramica globale sui materiali compositi, le loro varietà, le differenti proprietà meccaniche sulla base del tipo di rinforzo, matrice e processo produttivo utilizzato. Oltre a questo, ovviamente, verrà condotto un focus specifico sull'SMC.

Nella seconda metà, dal Capitolo 6 in avanti, verrà invece spiegato il lavoro vero e proprio svolto in Marelli.

Infatti, si è deciso di progettare un dimostratore tecnologico (un componente che non ha una applicazione vera e propria, ma possiede una certa complessità strutturale) da poter costruire in SMC, attraverso il processo dello stampaggio a compressione. Successivamente lo si è sottoposto a delle prove al banco per rilevare la sua rigidità e la resistenza al collasso.

Oltre a questo, sono state condotte delle simulazioni virtuali dei rispettivi step sperimentali. Quindi, partendo dalla caratterizzazione sperimentale del materiale, si è passati attraverso la simulazione di processo, la creazione della carta materiale con la rispettiva legge di danneggiamento e l'analisi strutturale finale del componente con un software per l'analisi agli elementi finiti. L'ultimo passo è stato ovviamente il *Digital Twin*, ovvero la comparazione tra i risultati sperimentali e quelli numerici per vedere se la simulazione virtuale è stata in grado di rappresentare fedelmente il comportamento reale del materiale in esame.

La parte di modellazione virtuale è stata delicata perché l'SMC è un materiale anisotropo, quindi in una zona del componente potremmo avere proprietà meccaniche differenti rispetto ad un'altra zona solo perché le fibre saranno orientate diversamente. Per poter aver una carta materiale che rappresenti fedelmente il materiale reale è stato quindi necessario passare attraverso una modellazione multi-scala, che partendo da un'analisi micromeccanica del materiale, è stata in grado di prevedere con una eccellente precisione le caratteristiche macroscopiche, e quindi macromeccaniche, del materiale.

Il Digital Twin ha infatti confermato che attraverso questo approccio è possibile analizzare, come per un componente metallico, anche un componente composito in SMC. Quest'ultimo inoltre ha mostrato tutte le sue eccellenti caratteristiche, unendo eccellenti proprietà meccaniche con leggerezza e costi contenuti rispetto ad altri materiali compositi.



# Indice

1.	Dinamica di un'auto in funzione del Peso.....	1
2.	Materiali Compositi.....	7
2.1.	Generalità .....	7
2.2.	Matrici Polimeriche.....	10
2.2.1.	Matrici Termoplastiche.....	10
2.2.2.	Matrici Termoindurenti.....	12
2.2.3.	Confronto tra le Matrici Polimeriche.....	15
2.3.	Elementi di Rinforzo .....	17
3.	Proprietà meccaniche dei Materiali Compositi .....	23
3.1.	Elasticità.....	23
3.1.1.	Carico parallelo alle fibre .....	23
3.1.2.	Carico perpendicolare alle fibre.....	24
3.1.3.	Elasticità con fibre di orientazione casuale.....	25
3.2.	Trasferimento di carico tra matrice e fibra.....	26
3.3.	Propagazione della cricca nei compositi .....	28
3.4.	Resistenza a compressione .....	29
4.	Principali processi tecnologici.....	31
4.1.	Stampaggio ad Iniezione .....	31
4.2.	Hand Lay Up .....	32
4.3.	Autoclave-Vacuum Lay Up .....	33
4.4.	Resin Transfer Moulding (RTM).....	33
4.5.	Poltrusione.....	34
4.6.	Braiding.....	35
5.	SMC.....	37
5.1.	Generalità .....	37

5.2.	Reologia nello Stampo e Microstruttura Finale .....	40
5.3.	Orientamento delle Fibre.....	49
5.4.	Comportamento Meccanico e Rottura .....	51
6.	Caratterizzazione Materiale.....	55
7.	Simulazione di Processo.....	61
8.	Definizione Carta Materiale .....	69
8.1.	Approccio Multi Scala .....	70
8.2.	Mean Field Homogenization.....	71
8.3.	Eshelby's Problem .....	73
8.4.	Modello di Mori – Tanaka .....	74
8.5.	Modellazione SMC Bundles .....	77
8.6.	Creazione della Carta Materiale.....	78
9.	Criterio di Danneggiamento .....	81
10.	Simulazione FEM.....	85
11.	Digital Twin .....	89
12.	Conclusioni.....	101
	Ringraziamenti.....	103
	Bibliografia .....	105

## Indice delle Figure

Figura 1.1: Consumi di carburante in funzione del peso dell'auto.....	1
Figura 1.2: Masse sospese e non sospese .....	2
Figura 1.3: Modello fisico del sistema sospensione .....	3
Figura 1.4: Risposta in frequenza della massa sospesa .....	4
Figura 1.5: Dynamic Tyre Deflection.....	5
Figura 2.1: Comportamento meccanico fibre, matrice e composito.....	8
Figura 2.2: Esempio di macromolecole .....	10
Figura 2.3: Esempio di catene per matrici termoplastiche.....	10
Figura 2.4: Proprietà fisico-meccaniche di alcune matrici termoplastiche [6].....	11
Figura 2.5: Esempio di catene per matrici termoindurenti .....	12
Figura 2.6: Rappresentazione schematica delle catene di Poliestere (prima della cura) .....	13
Figura 2.7: Rappresentazione schematica delle catene di Poliestere (dopo la cura) .....	13
Figura 2.8: Rappresentazione schematica delle catene di Vinilestere (dopo la cura) .....	13
Figura 2.9: Rappresentazione schematica delle catene di Resina Epossidica (dopo la cura) .....	14
Figura 2.10: Comportamento meccanico delle principali matrici termoindurenti (curate per 5 ore a 80 °C).....	15
Figura 2.11: Resistenza a Trazione e Modulo di Young .....	16
Figura 2.12: Pellet compositi di fibra corta e fibra lunga .....	17
Figura 2.13: Tessuto di fibre di vetro monodirezionali .....	18
Figura 2.14: Diverse tipologie di Tessuti.....	18
Figura 2.15: Proprietà meccaniche dei filati in base ai diversi prodotti dei fornitori .....	20
Figura 2.16: Proprietà meccaniche delle principali tipologie di Fibre .....	22
Figura 2.17: Costo delle principali tipologie di Fibre.....	22
Figura 3.1: Disposizione delle fibre e modulo elastico in funzione della percentuale di frazione volumica di fibra.....	23
Figura 3.2: Disposizione delle fibre e modulo elastico in funzione della percentuale di frazione volumica di fibra.....	24

Figura 3.3: Modulo elastico in funzione dell'orientazione .....	25
Figura 3.4: Fibra e matrice sotto l'effetto di un carico di trazione .....	26
Figura 3.5: Forze agenti su un infinitesimo di fibra .....	26
Figura 3.6: Distribuzione della tensione nella fibra, con due diversi valori stress interfacciale.....	27
Figura 3.7: Andamento della cricca nel composito .....	28
Figura 3.8: Propagazione cricca e Pull-Out della fibra.....	28
Figura 3.9: Pull-Out .....	29
Figura 3.10: Deformazione sotto l'azione di un carico di compressione, in-fase o fuori-fase.....	30
Figura 4.1: Rappresentazione del processo di iniezione.....	31
Figura 4.2: Processo alternativo di iniezione.....	31
Figura 4.3: Operazione di posa .....	32
Figura 4.4: Processo di Lay Up sottovuoto.....	33
Figura 4.5: Processo RTM.....	34
Figura 4.6: Processo di Poltrusione .....	34
Figura 4.7: Braiding.....	35
Figura 5.1: Componente in SMC.....	37
Figura 5.2: Processo produttivo dei rotoli .....	38
Figura 5.3: Stampaggio dei fogli SMC.....	39
Figura 5.4: Posizione della carica nello stampo e orientazione delle fibre.....	40
Figura 5.5: Squish con velocità di chiusura stampo 15 mm/s, temperatura stampo 135° .....	41
Figura 5.6: Squish con velocità chiusura stampo 2 mm/s, temperatura stampo inferiore 135 C° e superiore 165 °C .....	41
Figura 5.7: Schematizzazione del processo di compressione [16] .....	42
Figura 5.8: (a) Scansione in prossimità della superficie, (b) Scansione nel cuore del materiale.....	42
Figura 5.9: Flow.....	43
Figura 5.10: Processo di formazione delle bolle.....	43
Figura 5.11: Formazione di bolle di Stirene durante lo stampaggio.....	44
Figura 5.12: Scan che evidenzia i difetti nella microstruttura .....	44
Figura 5.13: (a) Andamento di pressione dei sensori durante lo stampaggio. (b) Posizione della carica nello stampo e posizione sensori di pressione.....	45

Figura 5.14: Viscosità, a temperatura ambiente, in funzione dello strain rate e della percentuale in volume di fibra .....	45
Figura 5.15: Viscosità della resina a temperatura ambiente .....	46
Figura 5.16: Viscosità, a temperatura ambiente, in funzione dello strain rate e della temperatura .....	46
Figura 5.17: Viscosità in funzione del tempo .....	47
Figura 5.18: Cura di un SMC con due diverse velocità di riscaldamento, (a) in funzione del tempo, (b) in funzione della temperatura .....	48
Figura 5.19: Orientazione singola fibra .....	49
Figura 5.20: Curva Sforzo-Deformazione di un composito con fibre random.....	51
Figura 5.21: Distribuzione del Modulo di elasticità in provini di trazione.....	52
Figura 5.22: Sezione di rottura dei provini .....	52
Figura 5.23: Mappa di deformazione dei provini a (a) 0° e (b) 90°, prima e dopo la rottura.....	53
Figura 5.24: Linee di giunzione e zone di rottura.....	54
Figura 6.1: SMC .....	55
Figura 6.2: Sopra, pressa per lo stampaggio a compressione. Sotto, stampo inferiore della lastra piana .....	56
Figura 6.3: Esempio di lastra piana in SMC.....	57
Figura 6.4: Provini SMC.....	57
Figura 6.5: Macchina di Trazione Galdabini .....	58
Figura 6.6: Strumentazione per la prova di trazione.....	58
Figura 6.7: Rilevazione ottica dell'estensimetro e osservazione dei marker sul provino.....	59
Figura 6.8: Caratterizzazione delle due tipologie di SMC.....	59
Figura 7.1: Componente oggetto di studio.....	61
Figura 7.2: A sinistra, disposizione cariche nella simulazione di processo. A destra, le cariche e la loro posizione nello stampo. ....	62
Figura 7.3: Parametri di Processo .....	62
Figura 7.4: Linee di giunzione in funzione della temperatura .....	63
Figura 7.5: Linee di giunzione in funzione dell'angolo con cui i flussi si incontrano .....	64
Figura 7.6: Grado di cura in funzione del tempo .....	64
Figura 7.7: Componenti principali del tensore orientamento delle fibre .....	65

Figura 7.8: Dimostratore sezionato.....	66
Figura 7.9: Dall’alto verso il basso, le componenti principali del tensore orientamento delle fibre nella sezione .....	67
Figura 8.1: Tipiche curve sforzo-deformazione in funzione dell'orientamento delle fibre.....	69
Figura 8.2: Schematizzazione del processo di definizione della carta materiale...70	
Figura 8.3: Transizione Micro-Macro tramite l'RVE .....	70
Figura 8.4: Idea di Omogeneizzazione .....	71
Figura 8.5: Eshelby's Problem .....	73
Figura 8.6: Singola inclusione in un corpo infinito .....	73
Figura 8.7: Modello di Mori – Tanaka .....	74
Figura 8.8: Transizione macro – micro - macro .....	75
Figura 8.9: Processo di Omogeneizzazione .....	75
Figura 8.10: Schematizzazione dei bundles.....	77
Figura 8.11: Creazione Microstruttura.....	77
Figura 8.12: Proprietà Fibra.....	78
Figura 8.13: Proprietà Matrice.....	78
Figura 8.14: Microstruttura dell'inclusione.....	79
Figura 8.15: Costanti Ingegneristiche del Materiale.....	80
Figura 9.1: Sistema di riferimento locale.....	81
Figura 9.2: Danneggiamento Progressivo con Leggi Differenti.....	83
Figura 9.3: Esempio di danneggiamento progressivo Power Law .....	84
Figura 10.1: Modello FEM per l’analisi di Rigidezza .....	85
Figura 10.2: Modello FEM per l’analisi di Collasso .....	86
Figura 10.3: Modellazione del contatto inserto-SMC .....	87
Figura 11.1: In alto, rilevazione spostamento nel caso di forzante centrale. In basso, con forzante laterale.....	89
Figura 11.2: Plot degli spostamenti nodali nel caso con forzante su inserto centrale, sopra, e con forzante su inserto laterale, sotto. ....	90
Figura 11.3: Configurazione sperimentale della prova di Collasso del componente .....	91
Figura 11.4: Carico Reattivo Sperimentale.....	92
Figura 11.5: Carico Reattivo Numerico.....	92
Figura 11.6: Zone di Rottura Sperimentali .....	94

Figura 11.7: In rosso, l'evoluzione delle zone di rottura nel fronte e nel retro del componente.....	96
Figura 11.8: Massima tensione principale al time-step numero (1) di Figura 11.7 .....	97
Figura 11.9: (a) La componente $a_{11}$ del tensore orientamento delle fibre e (b) la componente $a_{22}$ . .....	97
Figura 11.10: Tensioni applicate alla fibra .....	98
Figura 11.11: Carico Reattivo rispettivamente di Mat1 in blu e Mat2 in rosso ....	99
Figura 11.12: Sopra, le zone di rottura del Mat1, sotto quelle del Mat2 .....	99



# 1. Dinamica di un'auto in funzione del Peso

Nell'introduzione abbiamo già detto che questi materiali, oltre che un'elevata resistenza, possiedono una caratteristica che gli altri materiali strutturali esibiscono con maggiore difficoltà: la leggerezza.

La leggerezza è diventato un tema sempre più centrale in ogni ambito con il passare del tempo e l'ambito automotive non fa eccezione perché per un'auto la leggerezza è fondamentale.

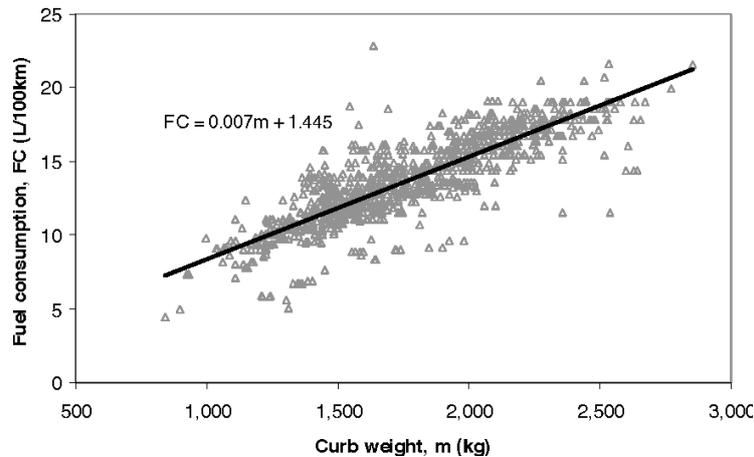


Figura 1.1: Consumi di carburante in funzione del peso dell'auto

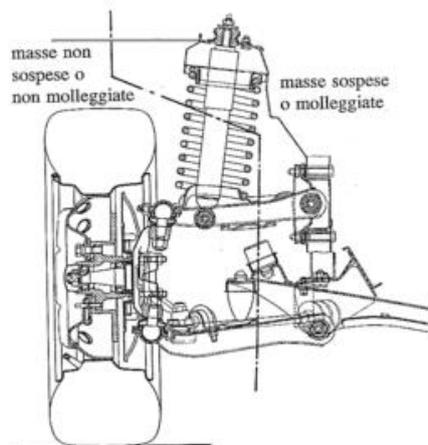
Un veicolo più leggero richiede minore potenza per muoversi e quindi una ridotta dimensione del motore, le doti dinamiche del veicolo migliorano e i consumi di carburante diminuiscono, oltretutto, minori consumi di carburante comportano una minore emissione di gas inquinanti, che sono il vero problema centrale al giorno d'oggi. Il settore dei trasporti è responsabile di circa il 30% del totale di gas serra emesso sulla Terra e del 12% dell'emissione di CO<sub>2</sub> in Europa, con l'obiettivo da parte dei costruttori di autoveicoli, di abbattere del 30% queste emissioni entro il 2030. Come abbiamo appena accennato, per diminuire la quantità di emissioni inquinanti è necessario che i veicoli pesino di meno, ma purtroppo il paradosso è che con l'avanzare degli anni le auto hanno raggiunto pesi sempre più alti.

Questo trend è dovuto in parte alla richiesta dei clienti che vogliono auto sempre più grandi, spaziose e confortevoli, ma anche per via dei maggiori standard di sicurezza che le auto hanno dovuto raggiungere.

Come anticipato nell'introduzione, la tesi è stata condotta presso la sezione Ride Dynamics della Marelli e quindi è evidente che il tesista ha osservato e studiato quotidianamente componenti che hanno un'applicazione nel reparto sospensivo, o adiacente ad esso, nell'autoveicolo (bracci oscillanti, montanti ruota, ammortizzatori, telai, ecc...). Un'auto, dal punto di vista della sua massa totale, può essere divisa in masse sospese e masse non sospese:

- Masse sospese: sono le masse che si trovano al di sopra del sistema di sospensione e che durante la marcia subiscono una variazione di altezza da terra (telaio, motore, trasmissione, carrozzeria, carico...)
- Masse non sospese: sono le masse che si trovano al di sotto del sistema sospensivo e che durante la marcia non subiscono variazioni di altezza da terra (ruote, mozzo, impianto frenante...)

La seguente figura può chiarire maggiormente il concetto.



*Figura 1.2: Masse sospese e non sospese*

Nella suddivisione non sono state citate le sospensioni, i bracci oscillanti o i semi-assi perché spesso la massa di queste componenti viene suddivisa in parte alle masse sospese e in parte a quelle non sospese in base alla loro distribuzione spaziale.

Durante la progettazione di un veicolo è necessario tenere conto delle inerzie coinvolte perché un maggiore peso implica maggiori sollecitazioni meccaniche, una maggiore resistenza del reparto sospensivo e della trasmissione con conseguente irrobustimento di quest'ultime e del reparto frenante che dovrà dissipare più energia in seguito alle forti inerzie a cui esso è soggetto. Quindi, in fase di progetto, è importante valutare attentamente le masse coinvolte e questo solitamente lo si fa introducendo un rapporto tra le masse sospese e quelle non sospese.

Più questo rapporto è alto e più il veicolo sarà confortevole per via della trasmissione del moto da un corpo a massa inferiore ad uno di massa superiore (un valore superiore a 5 in letteratura definisce un veicolo “confortevole”) [2]. Le masse non sospese, in seguito alle sollecitazioni dal manto stradale, modificano la risposta del sistema sospensivo e quindi tanto più sarà alto il valore delle masse non sospese e tanto più sarà rilevante questo trasferimento del moto, invece, tanto più basse saranno le suddette e tanto più il sistema sospensivo sarà in grado di tenere a contatto con il suolo le ruote del veicolo limitando le sollecitazioni sui punti di attacco delle sospensioni. Per dimostrare queste cose possiamo dotarci di una semplice schematizzazione del sistema sospensivo di un’auto, rappresentando un modello di  $\frac{1}{4}$  di auto.

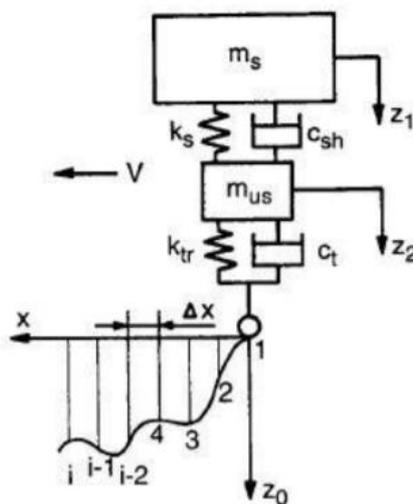


Figura 1.3: Modello fisico del sistema sospensione

Se si schematizza l’architettura sospensiva come nella Figura 1.3, si può fare un’analisi dinamica del sistema partendo dalle equazioni del moto del sistema a due gradi di libertà, fino alla rappresentazione delle funzioni di trasferimento. Infatti, se andiamo a plottare la funzione di trasferimento che generalmente viene definita *Trasmittibilità*, possiamo osservare come varia la risposta in frequenza della massa sospesa (in questo caso la sua coordinata spaziale) in funzione della sollecitazione fornita dal manto stradale alla ruota.

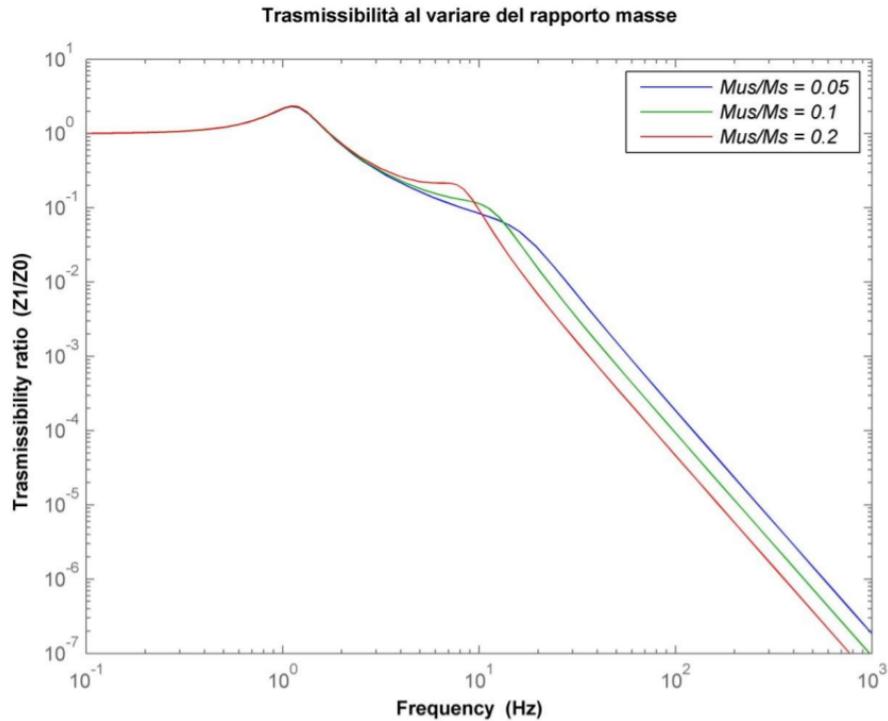


Figura 1.4: Risposta in frequenza della massa sospesa

Nel grafico possiamo vedere tre curve corrispondenti a tre valori diversi di rapporto tra la massa sospesa e quella non sospesa. Si può osservare che se la frequenza di eccitazione è sulla seconda frequenza naturale, più piccola sarà il valore della massa non sospesa e minore sarà la *Trasmissibilità* e quindi minori saranno le vibrazioni che il sistema auto sentirà. Diverso sarà invece il comportamento quando il range di frequenza aumenterà. Si può fare la stessa cosa con quella che viene definita *Roadholding*. In pratica, per fare in modo che il “grip” del veicolo sia ottimale, ci deve essere una consistente forza normale che deriva dalla ruota e si scarica sul suolo in modo tale da massimizzare l’aderenza. Questo vuol dire che la distanza dal baricentro ruota al suolo deve sempre essere non più grande rispetto a quella che si verifica a veicolo fermo e quindi con deflessione statica dello pneumatico. Questa distanza può essere anch’essa plottata e viene definita anche *Dynamic Tyre Deflection*:

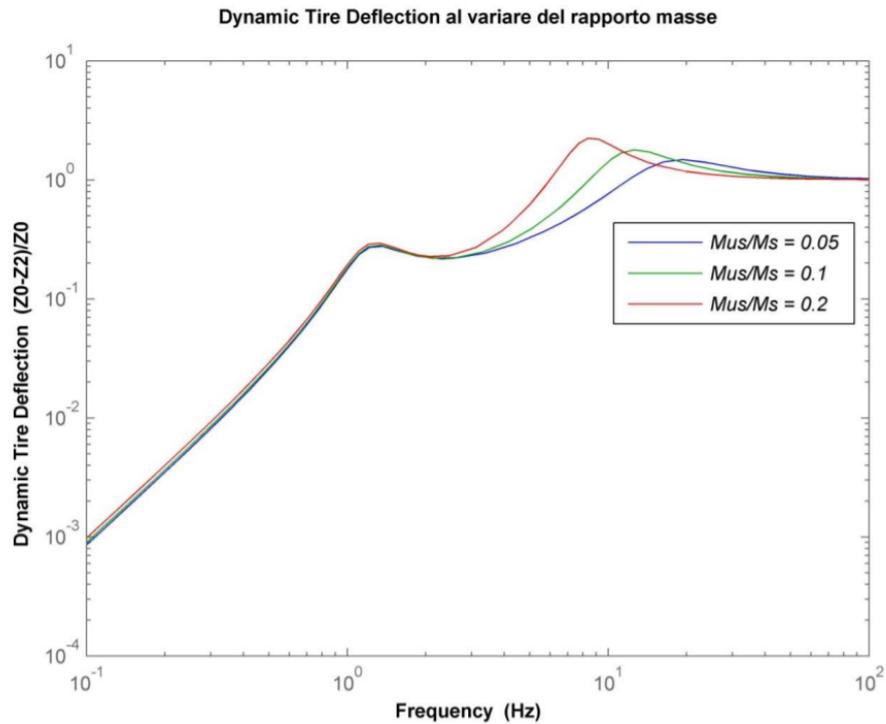


Figura 1.5: Dynamic Tyre Deflection

In questo caso si può vedere che se la frequenza di eccitazione è intorno alla seconda frequenza naturale, una massa non sospesa di valore alto può comportare una risposta non indifferente e provocare, nel peggiore dei casi, un distacco tra pneumatico e suolo [3].

Queste considerazioni sono state necessarie per esplicitare meglio il concetto illustrato nell'introduzione del capitolo. Dotare il sistema sospensivo di componenti leggere è la chiave per ottenere ottime doti dinamiche del veicolo e maggiore confort per gli occupanti. Nei capitoli successivi vedremo quali sono i vantaggi dei materiali compositi e come è possibile raggiungere ottime proprietà di resistenza meccanica unite a doti di leggerezza.



## 2. Materiali Compositi

### 2.1. Generalità

I materiali compositi sono una categoria di materiali formati da due o più materiali diversi, tendenzialmente insolubili l'uno nell'altro, combinati su scala macroscopica formando un terzo materiale eterogeneo con caratteristiche differenti da quelle dei materiali di partenza.

Generalmente un materiale svolge il compito di matrice e gli altri di rinforzo. La matrice ha il compito di tenere in posizione il rinforzo, dando una forma ben definita al componente finale e proteggendolo dai fattori ambientali, dall'usura e da eventuali azioni di taglio. Oltre a questo, serve per distribuire il carico esterno nella maniera più omogenea possibile trasferendolo agli elementi di rinforzo.

Il rinforzo è la parte "strutturale" del materiale. Esso, infatti, ha il principale compito di sostenere i carichi esterni fornendo resistenza al componente finale. Ricoprono un ruolo importante anche l'interfaccia tra i due costituenti e la porosità. Infatti, da un punto di vista progettuale, è importante che ci sia un'ottima distribuzione del carico tra la matrice ed il rinforzo, senza che si formino vuoti o discontinuità tra i due costituenti. La variazione delle interazioni interfacciali tra matrice e rinforzo è responsabile di tangibili variazioni delle proprietà meccaniche del prodotto finale che devono essere attentamente studiate in fase di progetto.

In commercio ci sono molteplici materiali compositi di diversa natura, con matrici e rinforzi di ogni tipo, ma in ambito automotive, i materiali compositi più utilizzati sono quelli con rinforzo sotto forma di fibre e matrice polimerica.

Le matrici polimeriche più utilizzate sono:

- matrici termoplastiche
- matrici termoindurenti

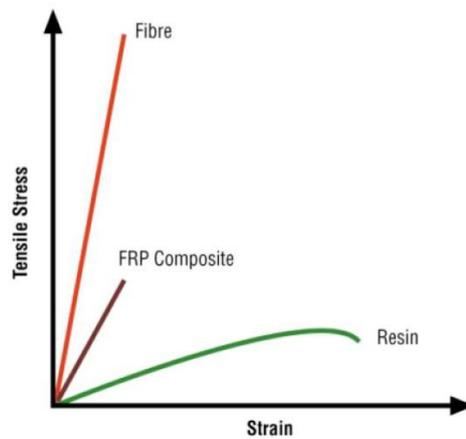
D'altro canto, le fibre più comuni sono:

- fibre di vetro
- fibre di carbonio
- fibre aramidiche (o Kevlar)

- fibre di boro
- fibre di carburo di silicio
- fibre di lino
- fibre di basalto

Ogni fibra ha diverse proprietà, ma le prime due sono quelle che oggi giorno vengono maggiormente utilizzate in ambito automotive.

L'unione di questi materiali consente di ottenere un prodotto finale prestazionalmente molto efficiente per via del fatto che si uniscono due materiali differenti.



*Figura 2.1: Comportamento meccanico fibre, matrice e composito*

Le fibre sono tendenzialmente fragili con elevati moduli elastici, mentre la matrice, essendo generalmente polimerica, è molto duttile con bassi moduli elastici. Le rispettive proprietà verranno spiegate maggiormente in dettaglio in seguito. Due proprietà importanti per il materiale composito:

- Fibre Volume Fraction (FVF)
- Orientamento e Geometria delle fibre nel composito

La FVF deriva dal processo produttivo utilizzato per combinare matrice e rinforzo, dalla dimensione delle fibre e dal tipo di matrice utilizzata. Essendo che le proprietà meccaniche delle fibre sono largamente superiori a quelle della matrice, sembra ovvio dire che una maggiore frazione in volume delle fibre porterà a caratteristiche meccaniche migliori nel componente finale. Questo è vero fino ad un certo punto

perché nella pratica c'è un limite di percentuale volumica oltre al quale non c'è più una corretta adesione tra fibra e matrice e quindi la distribuzione del carico non avviene più efficacemente.

Alcuni processi produttivi come l'Hand Lay Up non permettono di andare oltre il 40% di percentuale volumica per la fibra, ma grazie a più sofisticati e precisi processi di produzione, si possono raggiungere anche percentuali attorno al 70%.

Come potremo vedere meglio successivamente, l'orientamento delle fibre è un parametro fondamentale nella progettazione dei componenti in composito. Le fibre esibiscono le migliori prestazioni se vengono sollecitate lungo la loro direzione principale di estensione, mentre esibiscono proprietà meccaniche piuttosto scarse se sollecitate perpendicolarmente ad essa. Questo parametro è importante da tenere a mente quando si progetta un componente in composito; infatti, i materiali metallici hanno un comportamento tendenzialmente isotropo nello spazio, mentre i compositi esibiscono proprietà anisotrope (o ortotrope) e quindi prima di progettare il componente è necessario conoscere bene quali saranno le condizioni al contorno in cui il componente si troverà ad operare. Infine, è importante sottolineare un ultimo aspetto: quando si utilizza un materiale metallico (il più utilizzato in ambito strutturale) le caratteristiche meccaniche vengono definite dal fornitore della lega e una volta prodotto il componente, le suddette caratteristiche vengono confermate. Questa non è una regola con i compositi. Essendo un'unione di due materiali diversi, il processo produttivo utilizzato per produrre il componente, influisce in maniera marcata sulle proprietà meccaniche finali del componente [4].

## 2.2. Matrici Polimeriche

Come suggerito precedentemente, le matrici polimeriche sono quelle più utilizzate in ambito automotive e non solo. Sono sostanze composte da macromolecole formate dalla ripetizione di un piccolo gruppo molecolare che si sussegue in modo uguale per centinaia o migliaia di volte, dove l'unità ripetente è il monomero.

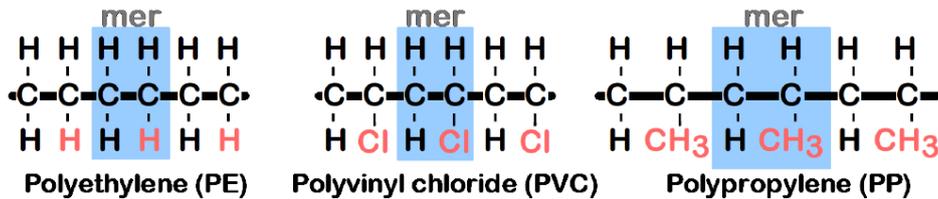


Figura 2.2: Esempio di macromolecole

A seconda di come procede la polimerizzazione (il processo che porta dal monomero al polimero), la configurazione delle macromolecole può essere differente, portando a polimeri lineari se tra le catene si instaurano solo deboli interazioni o a polimeri ramificati e/o reticolati se i legami tra le catene diventano sempre più forti impedendo lo scorrimento tra una catena polimerica e l'altra. Questa suddivisione è importante perché è il fattore che differenzia maggiormente le matrici termoplastiche da quelle termoindurenti [5].

### 2.2.1. Matrici Termoplastiche

Sono costituite da polimeri a catena lineare o leggermente ramificata e hanno la possibilità di essere fuse ripetutamente purché non si superi la loro temperatura di degradazione.

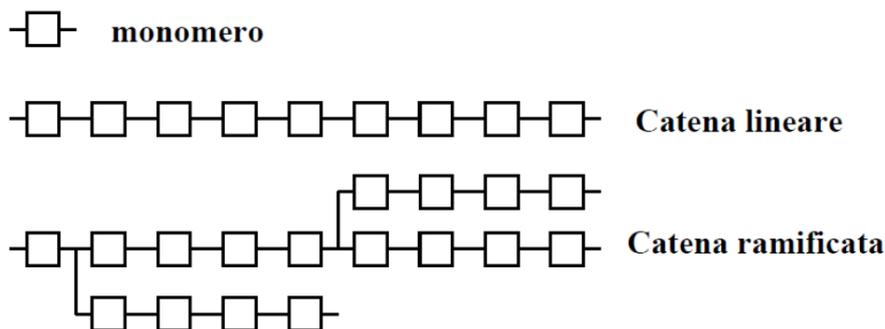


Figura 2.3: Esempio di catene per matrici termoplastiche

Infatti, se riscaldate rammolliscono fino alla scorrevolezza, per poi riacquistare una consistenza solida una volta riportate a basse temperature [5].

Questa caratteristica dà la possibilità di riutilizzare il materiale una volta finito il suo ciclo di vita (nei materiali compositi si può fondere il componente e poi dividere le fibre dalla matrice). I principali polimeri termoplastici utilizzati per la produzione di materiali compositi sono:

- **PA-Poliammide:** Questo polimero è molto diffuso grazie all'ottimo rapporto prezzo/performance che fornisce. Resiste bene alle sollecitazioni meccaniche (anche a basse temperature), ha una buona malleabilità e finitura superficiale. Ha una buona resistenza chimica alle soluzioni organiche e inorganiche, ma le proprietà degradano velocemente in presenza di umidità. Ha una temperatura di formatura di circa 280 °C.
- **PE-Polietilene:** Ha un basso costo, resiste bene agli attacchi chimici e isola bene termicamente, ma ha proprietà meccaniche di medio/basso livello. Ha una temperatura di formatura che va dai 150 ai 200 °C.
- **PP-Polipropilene:** Risulta essere un termoplastico molto diffuso grazie alle buone proprietà meccaniche e ad un basso costo. Temperatura di formatura tra i 185 e i 200 °C.
- **PEEK-Polyetheretherketone:** Questo termoplastico è di gran lunga quello più prestazionale dal punto di vista meccanico. Ha inoltre un'ottima resistenza chimica e all'usura ma presenta costi molto più alti rispetto alle altre tipologie di polimeri termoplastici [6].

La scelta di un termoplastico piuttosto che un altro è fortemente influenzata dall'applicazione del componente finale e dalle condizioni in cui esso dovrà operare. Inoltre, bisogna considerare anche i costi di produzione perché i polimeri termoplastici vengono prodotti solitamente con uno stampaggio ad iniezione e quindi la viscosità, ad esempio, è una proprietà importante che andrà a definire le temperature e le pressioni di iniezione.

ABB.	MATERIALE	DENSITA' [g/cm <sup>3</sup> ]	MODULO DI YOUNG [Gpa]	TENSIONE MASSIMA [Mpa]	ALLUNGAMENTO A ROTTURA [%]	COSTO [€/kg]	ENERGIA DI PRODUZIONE [MJ/kg]
PA66	Poliammide 66	1,14	3,3	82	15-80	3,2	107
PP	Polipropilene	0,9	1,2	35	200-500	0,9	80
PEI	Polieterimmide	1,27	2,9	85	55,8-64,5	14	150
PBT	PoliButilenTereftalato	1,31	2,6	58	50-300	3,2	105
PEEK	Polyetheretherketone	1,28	3,85	85	30-150	97	230

Figura 2.4: Proprietà fisico-meccaniche di alcune matrici termoplastiche [6]

## 2.2.2. Matrici Termoindurenti

Le matrici termoindurenti sono costituite da grosse molecole tridimensionali le cui catene sono collegate tra loro attraverso una fitta rete di legami trasversali.

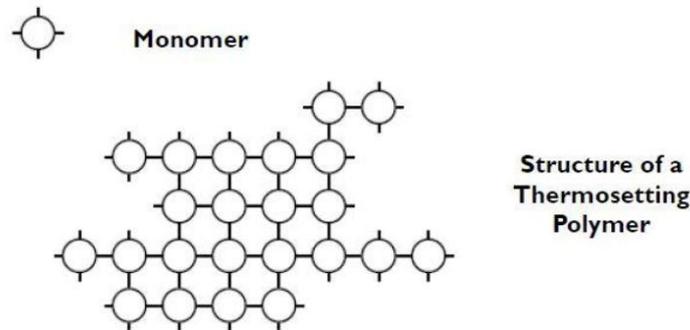


Figura 2.5: Esempio di catene per matrici termoindurenti

Durante la polimerizzazione, si crea il reticolo che non sarà più possibile dividere. Infatti, a differenza dei termoplastici, una volta completato il processo di “cura” (nome alternativo alla polimerizzazione) grazie all’azione degli opportuni catalizzatori, non sarà possibile rifondere il materiale. Questa proprietà però comporta che il polimero non è riciclabile e quindi sarà necessario applicare un corretto processo di riutilizzo del materiale [5]. Il tempo necessario per “curare” il materiale dipende fortemente dalla temperatura, ma più è alta e più i tempi saranno ridotti. Inoltre, questi polimeri sono spesso sotto forma di resina e non hanno bisogno di grandi pressioni per poter essere utilizzate, ma è “sufficiente” che si applichi la corretta temperatura per tutto il processo di cura e il materiale sarà indurito.

Ci sono differenti tipologie di termoindurenti, ma le principali sono le seguenti [4]:

- **Poliestere:** Le resine in poliestere sono molto utilizzate oggi grazie alle buone proprietà meccaniche e alle basse temperature di reticolazione. Nel polimero è presente anche lo Stirene come monomero, che permette di maneggiare la resina più facilmente riducendo la viscosità e permettendo l’unione delle catene polimeriche senza generare ulteriori sottoprodotti dalla reazione di cura.

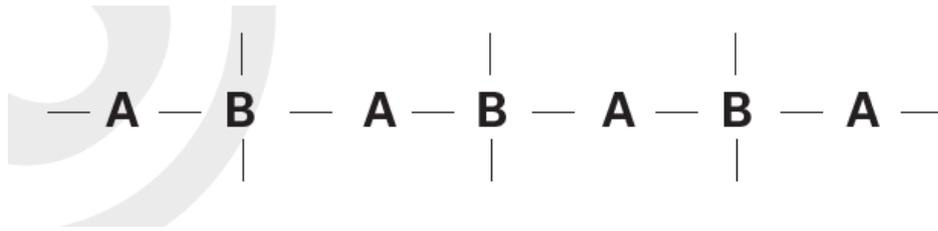


Figura 2.6: Rappresentazione schematica delle catene di Poliesteri (prima della cura)

Nella Figura 2.6, dove con B si indica il sito reattivo della molecola, si può vedere lo schema delle catene di Poliesteri prima della cura, mentre in Figura 2.7 è rappresentato lo schema dopo la cura del materiale con lo Stirene sotto forma di catalizzatore della reazione.

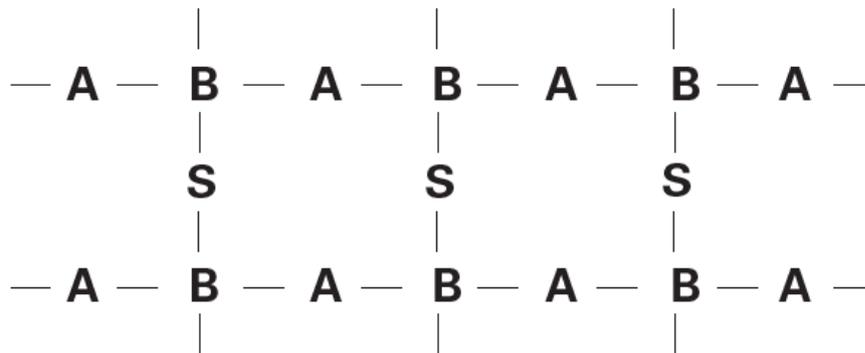


Figura 2.7: Rappresentazione schematica delle catene di Poliesteri (dopo la cura)

- **Vinilestere:** Questo tipo di resina è simile alla precedente, ma differisce solo dalla posizione del gruppo reattivo nella catena polimerica. Questa modifica conferisce una resistenza e una resilienza maggiore rispetto al Poliesteri e, grazie ad una minore presenza di gruppi esteri, si ottiene un polimero con una migliore resistenza all'acqua e agli agenti chimici.

In Figura 2.8 si può vedere lo schema della catena polimerica, dove si osserva la posizione differente dei gruppi reattivi e dello Stirene, ottenibile solamente se la temperatura di cura è più alta rispetto a quella del Poliesteri.

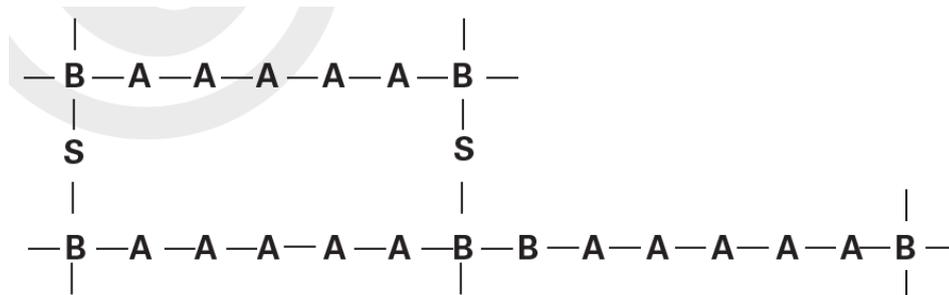
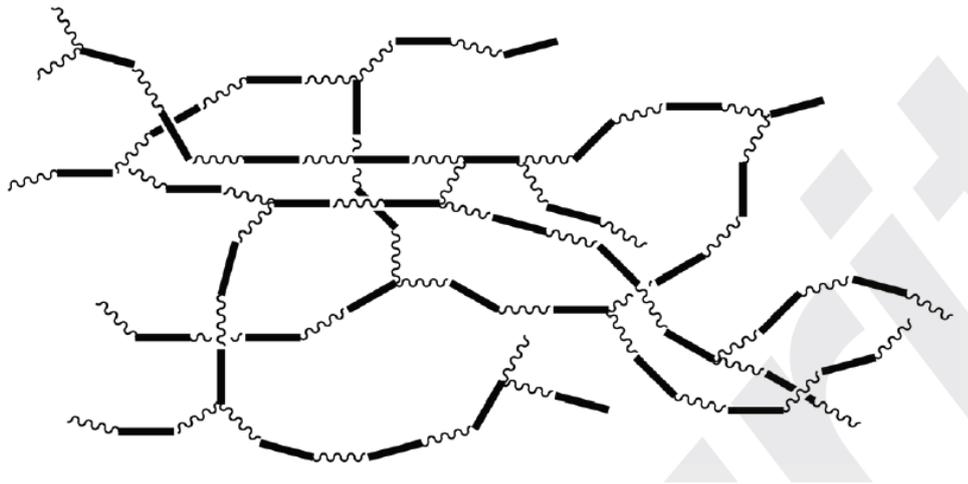


Figura 2.8: Rappresentazione schematica delle catene di Vinilestere (dopo la cura)

- **Resina Epossidica:** Questo tipo di resina è tra le tre, quella più performante dal punto di vista delle proprietà meccaniche e della degradazione dagli agenti ambientali esterni. È caratterizzata da una temperatura di cura che va dai 5 ai 150 °C (in funzione del tipo di indurente) e da un ritiro volumetrico molto basso durante la fase di cura, che permette di minimizzare le tensioni residue interne. Le catene polimeriche sono simili a quelle delle Vinilestere, ma a differenza del gruppo estere c'è un gruppo epossidico che permette di incrementare la sua rigidità e la resistenza alle alte temperature. A differenza del Poliestere, in questo caso non si ha un catalizzatore, ma un indurente che partecipa a tutti gli effetti alla reazione chimica di cura, producendo una struttura tridimensionale simile a quella illustrata di seguito:



*Figura 2.9: Rappresentazione schematica delle catene di Resina Epossidica (dopo la cura)*

### 2.2.3. Confronto tra le Matrici Polimeriche

Se l'obiettivo è quello di progettare dei componenti strutturali in grado di resistere a importanti sollecitazioni mantenendo un peso contenuto, l'utilizzo delle matrici termoindurenti è da preferire, per via della loro bassa viscosità che permette di avere una maggiore penetrazione tra le fibre e una maggiore adesione tra esse e la matrice stessa. D'altro canto, le matrici termoplastiche sono da preferire quando i volumi produttivi sono più grandi, grazie ai tempi ciclo molto più bassi rispetto alle resine termoindurenti e si vogliono produrre componenti non destinati a particolari utilizzi strutturali [6]. Il nostro obiettivo è quello di progettare elementi strutturali, quindi ci concentreremo maggiormente sulle resine termoindurenti.

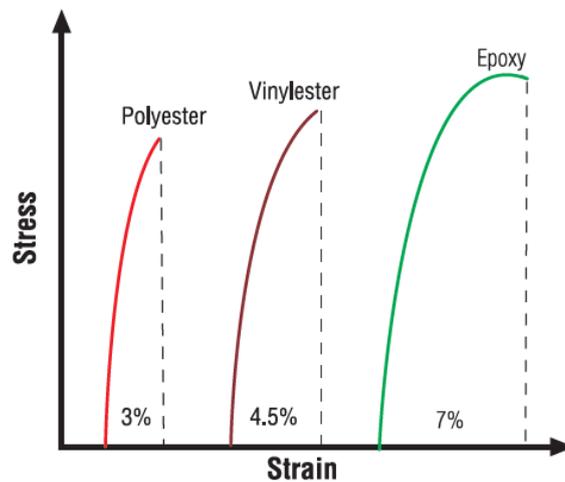


Figura 2.10: Comportamento meccanico delle principali matrici termoindurenti (curate per 5 ore a 80 °C)

Le proprietà che dobbiamo prendere in considerazione quando dobbiamo scegliere una resina piuttosto che un'altra sono molte, ma tre sono particolarmente importanti: proprietà adesive, proprietà meccaniche e degradazione sotto l'effetto di acqua e umidità [4].

Come abbiamo già discusso, è importante che tra le fibre e la matrice ci sia una perfetta adesione per fare in modo che i carichi vengano ripartiti in maniera adeguata nel componente. Nelle resine in Poliestere non si riesce ad ottenere un livello di adesione molto alto, al contrario delle resine Epossidiche che sono molto efficaci da questo punto di vista, ma senza dimenticare che questo fattore è fortemente influenzato anche dalla finitura superficiale delle fibre.

Le proprietà meccaniche delle diverse resine sono illustrate in Figura 2.10, ma in Figura 2.11 è possibile osservare un'ulteriore descrizione delle suddette.

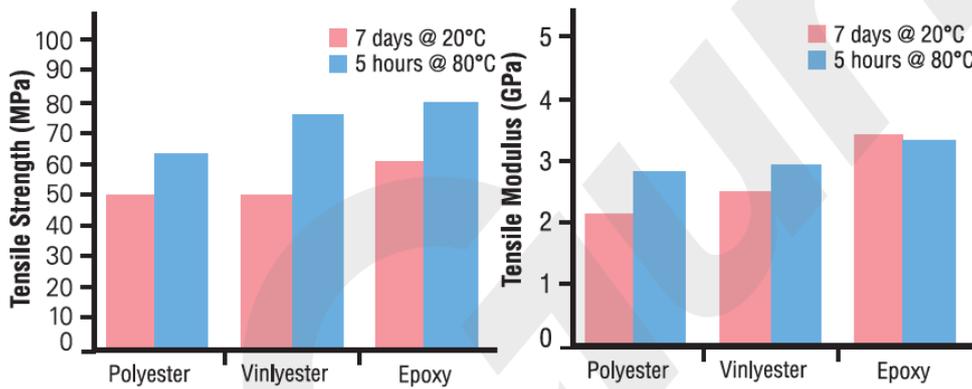


Figura 2.11: Resistenza a Trazione e Modulo di Young

Le tre resine di interesse mostrano proprietà differenti, ma si vede chiaramente, come la resina epossidica sia quella che da un punto di vista meccanico performi meglio, esibendo una maggiore resistenza, tenacità e modulo di Young. Anche il tempo e la temperatura di cura sono parametri importanti da tenere in considerazione, come il ritiro volumetrico, che per le resine in Poliestere e Vinilestere si aggira attorno all'8%. Questo ritiro può portare a delle tensioni residue difficili da eliminare e che possono condizionare la resistenza meccanica del materiale composito. La resina epossidica subisce molto meno questo effetto perché il ritiro si aggira attorno al 2%.

Molti materiali compositi trovano applicazione in ambienti marini o comunque ambienti in cui l'acqua e l'umidità sono ben presenti, per questo resistere bene a questi effetti ambientali è importante. Tutte le resine assorbono un certo grado di umidità durante il loro utilizzo, ma è importante che lo facciano senza inficiare l'adesione tra la resina e le fibre. Anche in questo caso la resina Epossidica è quella che riesce a subire meno la degradazione da parte dell'acqua, mantenendo fino al 90% della sua resistenza al taglio interlaminare [4].

## 2.3. Elementi di Rinforzo

In un materiale composito gli elementi di rinforzo possono essere di varia natura, ma in generale si possono osservare in due forme: particellare e fibrosa. Il rinforzo particellare lo si può osservare nei conglomerati cementizi o nelle leghe metalliche, che possono essere trattati anche loro come dei materiali compositi per via dei vari costituenti che ne fanno parte. In questo caso il rinforzo, seppur di elevata resistenza, non riesce ad aumentare significativamente le caratteristiche meccaniche del composito perché rispetto al rinforzo fibroso non è in grado di prendersi carico delle sollecitazioni esterne e non riesce ad ostacolare efficacemente la propagazione di cricche o difetti [1]. Questi compositi non verranno trattati in questa tesi. Quelli che in letteratura vengono definiti generalmente materiali compositi, sono quelli dotati di un rinforzo fibroso.

Le fibre sono generalmente suddivise in fibre corte, fibre lunghe e fibre continue. Le fibre corte e le fibre lunghe, nel componente finale, hanno rispettivamente lunghezze che vanno dai 200 ai 500  $\mu\text{m}$  per quelle corte e al più 1-1.2 mm per quelle lunghe. Queste lunghezze però si riferiscono al componente finale. Se il componente viene prodotto per iniezione, e quindi con l'utilizzo di piccoli *pellet* di materiale termoplastico, la lunghezza dei granuli prima dell'iniezione si attesta a quelli che si possono osservare in Figura 2.12 per fibre corte e fibre lunghe [7].



Figura 2.12: Pellet compositi di fibra corta e fibra lunga

L'utilizzo delle fibre lunghe, teoricamente, porta ad avere dei componenti più resistenti, ma questo non sempre si verifica perché durante l'iniezione i granuli si sciolgono e le fibre possono rompersi durante l'iniezione del materiale. Oltretutto, un beneficio tangibile nell'utilizzo di fibre lunghe lo si ha quando il componente finale ha una forma piuttosto semplice e regolare con una lunghezza (quella nella

direzione di iniezione) prevalente rispetto alle altre due. Quando il componente però incomincia ad avere una forma complessa, le fibre corte riescono a distribuirsi meglio e la resistenza finale risulta più alta rispetto a quella ottenuta con fibre lunghe. Questa non è una regola, ma è un comportamento osservato durante la sperimentazione di alcuni componenti in Marelli.

Le fibre lunghe, oltre ad essere utilizzate con i materiali termoplastici, vengono utilizzate anche con le resine termoindurenti sottoforma di fogli, definiti *mat* [6]. Essi sono fogli preimpregnati contenenti fibre con lunghezze che variano dai 3 ai 25 mm di lunghezza, con orientazione definita o casuale, come avviene ad esempio nel processo SMC che vedremo successivamente.

Diversamente dai casi appena citati, possiamo avere delle fibre continue che derivano dai *roving*, gruppi di fibre continue parallele avvolte in bobine. Se la maggior parte delle fibre sono orientate nella medesima direzione, abbiamo dei tessuti UD (monodirezionali) come in Figura 2.13.

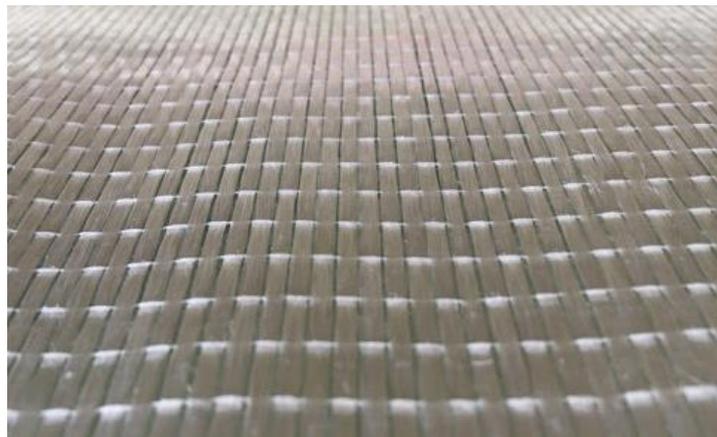


Figura 2.13: Tessuto di fibre di vetro monodirezionali

I fasci di *roving* possono anche essere intrecciati in modo tale da ottenere dei *tessuti* [4] [6], che sono quelli più diffusi quando si parla di materiali compositi.

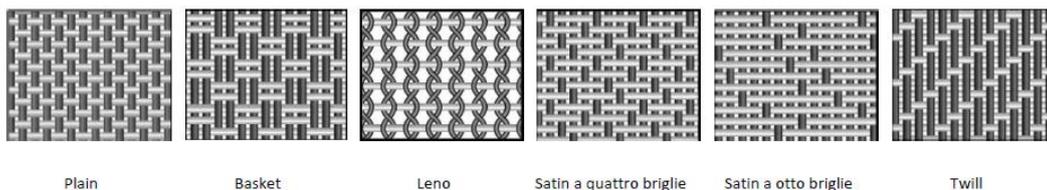


Figura 2.14: Diverse tipologie di Tessuti

- **Plain:** sono formati da filati intrecciati forma alternata perpendicolarmente, uno sopra e uno sotto. Il tessuto mantiene bene la sua forma senza mostrare particolari difetti, ma è un tessuto poco pieghevole.
- **Basket:** è simile al Plain ma in questo caso i filati possono essere due o più nelle due direzioni. Questo tessuto è più resistente, piatto e facile da piegare, ma ha una stabilità inferiore.
- **Leno:** lo si utilizza quando si hanno pochi filati.
- **Satin a quattro briglie:** ha una intrecciatura tre a uno che permette una più facile piegatura, soprattutto sulle superfici emisferiche.
- **Satin a otto briglie:** in questo caso l'intrecciatura è sette a uno esibendo una pieghevolezza ancora maggiore, adatta per superfici curve.
- **Twill:** ha una pieghevolezza maggiore rispetto al Plain e una stabilità maggiore rispetto al Satin.

Al giorno d'oggi ci sono diverse tipologie di materiali per le fibre, dove alcune di queste sono [6] [1] [8]:

- **Fibre di Carbonio:** Sono quelle che vengono usate maggiormente in ambito automotive, insieme a quelle di vetro. Possono essere prodotte per trattamento termico di differenti precursori termici, quali il *rayon* o il *PAN*. Nell'ultimo caso, quello che si fa è una reazione di ciclicazione che produce il PAN ossidato. Questa fase è molto importante perché bisogna controllare la ritrazione della fibra, in quanto si determina l'allineamento dei segmenti molecolari che determinerà il modulo elastico finale. Una volta fatto ciò, il processo successivo è la carbonizzazione in atmosfera inerte. In un primo stadio (ad una temperatura tra i 400 e i 600 °C) avviene l'espulsione di atomi di idrogeno ottenendo un polimero a nastro, mentre nel secondo stadio, la temperatura viene portata a 1300 °C ottenendo l'espulsione degli atomi di azoto in seguito alla fusione dei polimeri a nastro in modo tale da ottenere nastri sempre più larghi. Quello che si ottiene è la formazione di polimeri con una struttura grafitica pura, regolare lungo la fibra. Si può ottenere la fibra di carbonio anche dal cosiddetto *pitch*, che è un residuo della distillazione del petrolio, ma pur essendo molto utilizzato per via dei tempi di produzione più brevi, sono necessarie temperature nettamente più alte.

Molto comunemente le fibre di carbonio vengono suddivise in base al modulo elastico e alla resistenza: fibre HS ad alta resistenza (230-280 GPa), fibre IM a modulo intermedio (280-450 GPa) e fibre HM ad alto modulo elastico (300-680 GPa).

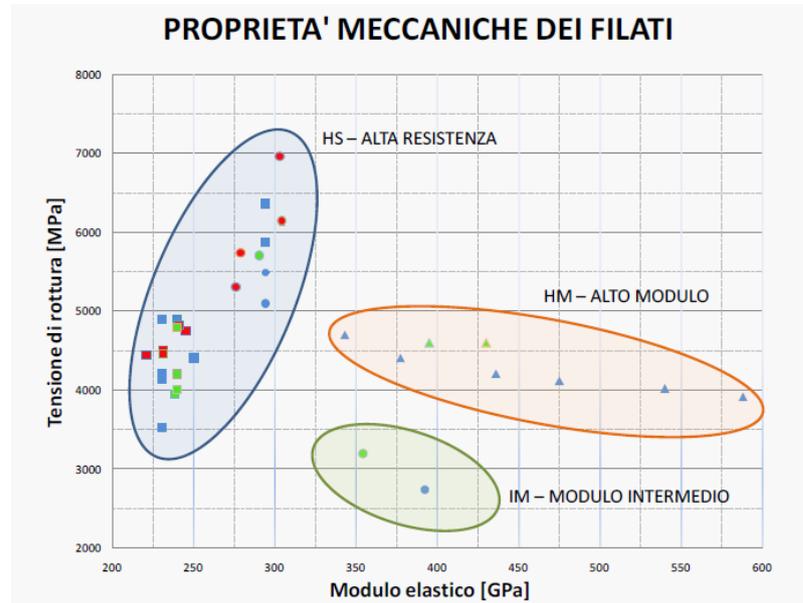


Figura 2.15: Proprietà meccaniche dei filati in base ai diversi prodotti dei fornitori

Oltre a questa suddivisione, una classificazione piuttosto comune è quella in base al Titolo, dove quest'ultimo è definito in base al numero di migliaia di filamenti per *tow* (K). Un titolo maggiore comporta una grammatura più alta, ma un filato più grosso non è sinonimo di resistenza più alta, perché l'intreccio può portare alla formazione di alcuni avvallamenti tra la trama e l'ordito che possono generare delle tensioni indotte e alla conseguente rottura del filato. Durante la progettazione di un materiale composito si tende a preferire dei filati con un basso Titolo per via delle minori tensioni di taglio che si generano con un filato sottile (essi riescono a conferire anche una migliore finitura superficiale al componente) ma il prezzo è più alto per via della maggiore difficoltà da parte del fornitore a produrre filamenti molto sottili. Quindi è una pratica comune acquistare filati con un alto Titolo e poi, attraverso alcuni processi di divisione, ottenere dei filati con un titolo più basso. In commercio si possono trovare filamenti che partono da 3K fino a 50K, con un diametro della fibra che tendenzialmente va dai 5 ai 10  $\mu\text{m}$ .

- **Fibre di Vetro:** come accennato in precedenza, questa tipologia di rinforzo è largamente utilizzata grazie al suo ottimo rapporto qualità/prezzo e alla sua leggerezza, ma difficilmente viene utilizzata per applicazioni strutturali per via dell'importante allungamento a rottura che esibisce rispetto alle altre tipologie di fibre. Oltre a queste proprietà, esibisce anche una eccellente resistenza a flessione, un'ottima resistenza all'urto (per via dell'elevata flessibilità) e delle buone proprietà di isolamento termico. Le fibre di vetro vengono comunemente suddivise in Tipo E, quelle meno prestazionali ma anche più economiche, Tipo C, con buona resistenza alla corrosione chimica e Tipo S, che esibisce un'alta resistenza ma anche prezzi più alti. Quest'ultima tipologia viene anche spesso utilizzata nei processi SMC.
- **Fibre aramidiche:** vengono comunemente chiamate con il nome Kevlar. Hanno una massa volumica molto bassa unita ad una buona resistenza a trazione (a discapito di quella a compressione che non è buona), con un modulo di elasticità che si colloca a metà strada tra le fibre di carbonio e quelle di vetro. Questo tipo di rinforzo è adatto per applicazioni balistiche perché resiste bene all'impatto per via dell'elevata dissipazione di energia che esibisce quando si sfibra. Ha anche un'ottima resistenza all'usura, ma il calore è un problema e il costo di questa fibra non la rende competitiva rispetto alla fibra di carbonio.
- **Fibre vegetali:** a causa dell'emergente necessità di trovare delle soluzioni ecocompatibili, le fibre vegetali stanno sempre più prendendo piede. Le proprietà meccaniche non sono eccezionali, ma sono sufficienti per la produzione di pannelli esterni di autoveicoli o come smorzatori di vibrazioni in quanto possono essere alternate ai layer di carbonio. A fine vita le fibre possono essere separate dalla matrice e, ad esempio, degradate per compostaggio o bruciate. La più popolare fibra vegetale è quella di Lino.

Di seguito è possibile osservare un confronto tra le varie tipologie di fibre, effettuato con prove sperimentali secondo la normativa ASTM D2343:

	Lino	Basalto	Vetro – E	Vetro – S	Kevlar– 49	T800 Carbon
Tensione Massima [MPa]	1035	3300	2600	4280	3620	5500
Modulo Elastico [GPa]	70	95	76	90	131	294
Densità [kg/dm <sup>3</sup> ]	1,45	2,67	2,57	2,47	1,44	1,8
Resistenza Specifica [MPa ·dm <sup>3</sup> /kg]	714	1236	1012	1733	2514	3056
Modulo Specifico [GPa ·dm <sup>3</sup> /kg]	48	36	30	36	91	163

Figura 2.16: Proprietà meccaniche delle principali tipologie di Fibre

Da questi dati si può chiaramente osservare come la fibra di Lino sia da escludere per qualsiasi applicazione strutturale e che, sulla base dei moduli elastici, le fibre di Vetro e di Basalto non vadano bene per una progettazione a rigidità. Se invece si cercano delle doti di elasticità, le fibre di vetro sono quelle da preferire. Un aspetto da considerare è la densità, perché se si riportano i dati in funzione di essa (Resistenza Specifica e Modulo Specifico), si vede chiaramente come la fibra di carbonio sia quella più performante sotto tutti gli aspetti.

Un'ultima considerazione da fare è il costo. Di seguito sono riportati i costi di alcune fibre unidirezionali [4].

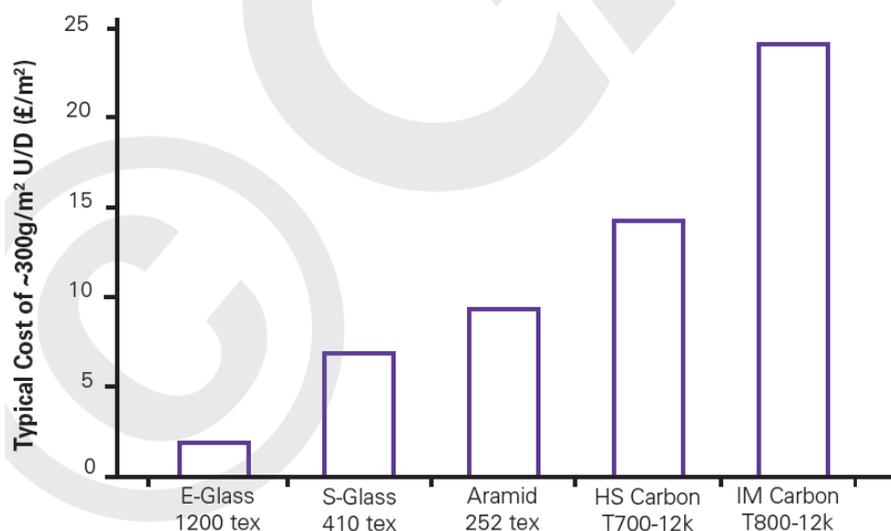


Figura 2.17: Costo delle principali tipologie di Fibre

### 3. Proprietà meccaniche dei Materiali Compositi

Durante la progettazione è di fondamentale importanza capire e conoscere in dettaglio le proprietà geometriche e meccaniche dell'accoppiamento fibra + matrice. In questo capitolo verranno affrontati i meccanismi di base che regolano il comportamento meccanico di un materiale composito, ma per una trattazione dettagliata sul comportamento meccanico del materiale SMC, si rimanda ai capitoli successivi.

#### 3.1. Elasticità

Il modulo elastico di un composito è fortemente influenzato dalla direzione di applicazione del carico, rispetto all'orientazione delle fibre. Se prendiamo ad esempio un composito con fibre unidirezionali, possiamo individuare i principali meccanismi che regolano la determinazione del modulo elastico [9].

##### 3.1.1. Carico parallelo alle fibre

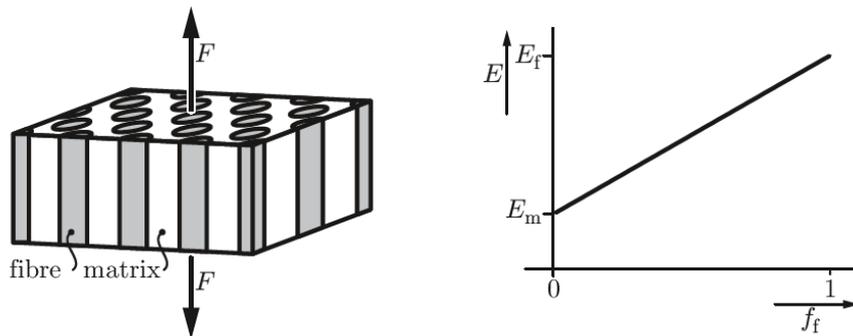


Figura 3.1: Disposizione delle fibre e modulo elastico in funzione della percentuale di frazione volumica di fibra

Nel caso in cui il carico sia parallelo alla direzione delle fibre, la deformazione delle fibre e della matrice sarà la stessa, quindi, applicando la *regola delle miscele*:

$$\varepsilon_f = \varepsilon_m, \quad \sigma_f \neq \sigma_m \quad (3.1)$$

$$\sigma = \sigma_f f_f + \sigma_m (1 - f_f) \quad (3.2)$$

$$E_{||} = E_m f_m + E_f f_f = E_m \left[ 1 + f_f \left( \frac{E_f}{E_m} - 1 \right) \right] \quad (3.3)$$

dove  $f_f$  e  $f_m$  sono rispettivamente le frazioni in volume di fibra e matrice e  $E_{||}$  è il modulo elastico finale.

### 3.1.2. Carico perpendicolare alle fibre

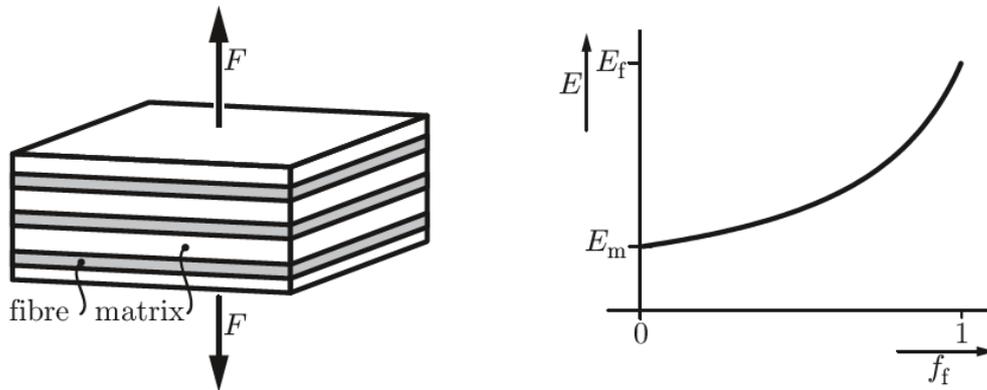


Figura 3.2: Disposizione delle fibre e modulo elastico in funzione della percentuale di frazione volumica di fibra

In questo caso le deformazioni saranno differenti, ma con le medesime tensioni:

$$\varepsilon_f \neq \varepsilon_m, \quad \sigma_f = \sigma_m \quad (3.4)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_f f_f + \varepsilon_m (1 - f_f) \quad (3.5)$$

$$E_{\perp} = \frac{E_M}{1 + f_f \left( \frac{E_m}{E_f} - 1 \right)} \quad (3.6)$$

Nel caso di lamine di materiale composito con fibre monodirezionali, lo spessore delle lamine è piuttosto piccolo e quindi possiamo pensare che le lamine siano in stato di tensione piano ed esibiscano un comportamento non isotropo, ma ortotropo. A questo punto quindi le costanti elastiche sono 5 e le equazioni costitutive possono essere ottenute in modo semplificato, imponendo come direzione 1 quella delle fibre e direzione 2 quella perpendicolare alle fibre:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_1 & -\nu_{12}/E_2 & 0 \\ -\nu_{12}/E_1 & 1/E_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1/G_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{12} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

### 3.1.3. Elasticità con fibre di orientazione casuale

Nel caso in cui le fibre abbiano nel piano una orientazione random, le proprietà elastiche macroscopiche possono essere considerate isotrope perché c'è una probabilità di distribuzione uniforme delle fibre nel range  $-\pi/2$  e  $\pi/2$ . In realtà, come vedremo in seguito, nel caso dell'SMC questa isotropia non sempre è verificata perché il modo in cui vengono prodotti i laminati può comportare delle proprietà meccaniche differenti tra una direzione e l'altra nel piano.

Può però essere dedotto un modulo elastico medio sulla base dell'approccio adottato da Nielsen & Chen [10]:

$$\bar{E} = 2\pi \int_0^{\pi/2} E(\theta) d\theta \quad (3.8)$$

$$\frac{1}{E(\theta)} = \frac{1}{E_{11}} c^4 + \left( \frac{1}{G_{12}} - \frac{2\nu_{12}}{E_{11}} \right) c^2 s^2 + \frac{1}{E_{22}} s^4 \quad (3.9)$$

dove  $c = \cos\theta$ ,  $s = \sin\theta$  e  $E(\theta)$  è la dipendenza del modulo elastico in funzione dell'angolo di orientazione. In Figura 3.3 possiamo vedere la dipendenza del modulo elastico di un composito in fibra di vetro-poliestere in funzione dell'orientazione, nel caso di fibre monodirezionali e fibre random.

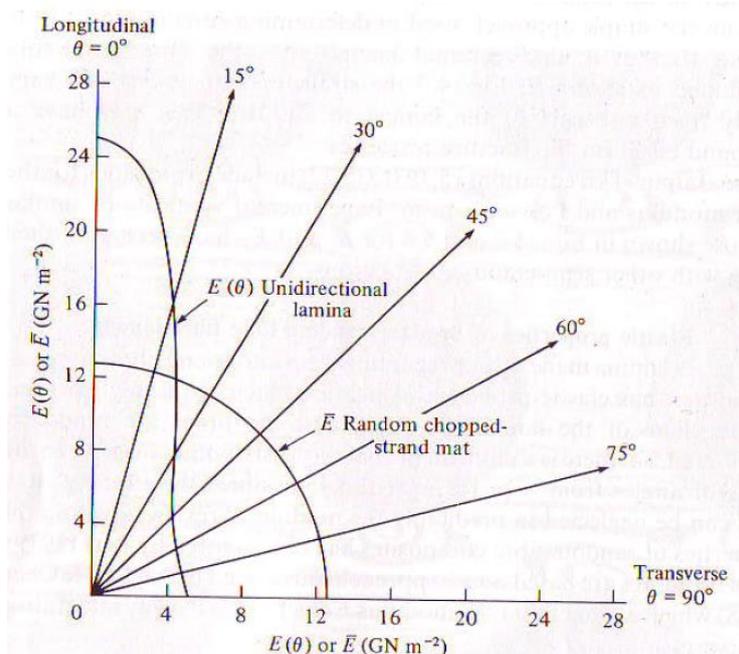


Figura 3.3: Modulo elastico in funzione dell'orientazione

## 3.2. Trasferimento di carico tra matrice e fibra

Come è stato detto nei precedenti capitoli, quando un composito viene sollecitato, è la fibra che si occupa di reggere il carico garantendo l'integrità strutturale. Quindi, a meno che le fibre non siano continue e si estendano lungo tutto il componente reggendo direttamente il carico, in tutti gli altri casi è necessario investigare come il carico si trasferisce dalla matrice alla fibra [9].

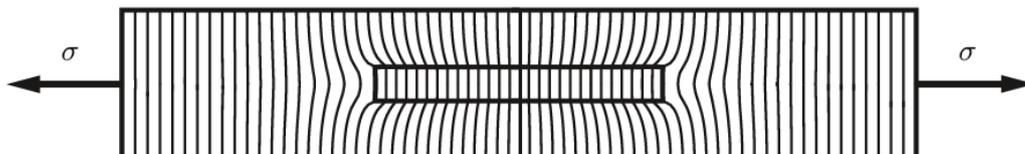


Figura 3.4: Fibra e matrice sotto l'effetto di un carico di trazione

Nella Figura 3.4 è presente una rappresentazione della fibra annegata nella matrice, in cui è presente un carico di trazione. A causa della grande differenza di modulo elastico, all'estremità della fibra avviene una grande deformazione della matrice che fa aumentare vertiginosamente gli sforzi taglio all'interfaccia mentre lo sforzo di trazione viene distribuito sulla lunghezza della fibra, annullandosi all'estremità.

Il trasferimento di carico dalla matrice alla fibra è prevalentemente dovuto al legame fisico e chimico che si instaura tra matrice e la superficie laterale della fibra e quindi, un parametro fondamentale per la determinazione delle proprietà meccaniche del composito è lo *sforzo di taglio interfacciale*  $\tau_i$ .

Per determinare lo stress che agisce sulla fibra, per semplicità di trattazione possiamo considerare un infinitesimo di fibra su cui agisce uno stress  $\tau_i$  costante.

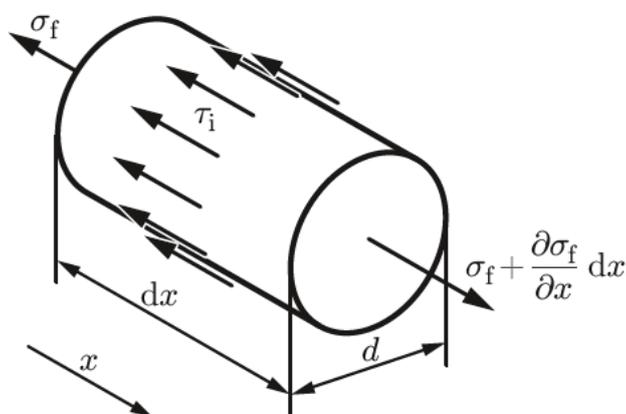


Figura 3.5: Forze agenti su un infinitesimo di fibra

Facendo un equilibrio:

$$-\pi d \, dx \, \tau_i - \sigma_f \pi \frac{d^2}{4} + \left( \sigma_f + \frac{\partial \sigma_f}{\partial x} dx \right) \pi \frac{d^2}{4} = 0 \quad (3.10)$$

portando a:

$$\frac{\partial \sigma_f}{\partial x} = \frac{4}{d} \tau_i \quad (3.11)$$

Si denota che se lo stress interfacciale è costante, lo stress nella fibra varia linearmente e il massimo che può raggiungere è pari a:

$$\sigma_{f,max} = E_f \varepsilon_m \quad (3.12)$$

questo perché chiaramente la massima deformazione che si può raggiungere è definita dalla massima deformazione ammessa dalla matrice. La distribuzione della tensione sulla fibra è illustrata in Figura 3.6.

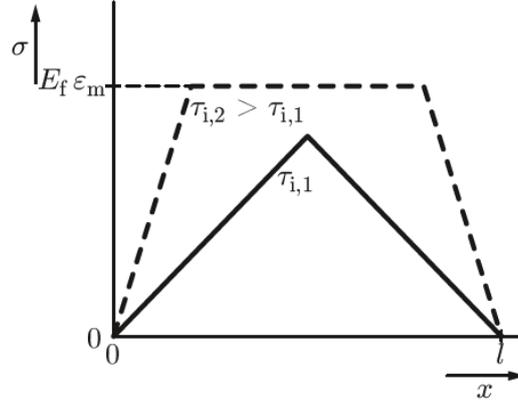


Figura 3.6: Distribuzione della tensione nella fibra, con due diversi valori stress interfacciale

Se assumiamo di non raggiungere il valore  $E_f \varepsilon_m$ , il massimo stress a cui viene sottoposta la fibra:

$$\sigma_{f,max} = \int_0^{l/2} \frac{4}{d} \tau_i \, dx = 2 \frac{l}{d} \tau_i \quad (3.13)$$

quindi, più la fibra è lunga e più si va a rafforzare il nostro composito e allora, è necessario che la fibra possa assumere almeno una lunghezza minima tale per cui può essere in grado di sopportare tensioni fino a quelle di rottura della stessa  $\sigma_{f,B}$ .

$$l_c = \frac{d \sigma_{f,B}}{2 \tau_i} \quad (3.14)$$

La lunghezza  $l_c$  viene definita *lunghezza critica* della fibra, e da come si evince nella formula (3.14), essa è funzione del diametro della fibra. Quindi, si può concludere che un parametro fondamentale per il rafforzamento del composito è il rapporto d'aspetto delle fibre, in quanto una fibra lunga e fine è in grado di garantire un rafforzamento alto ed efficiente, non dimenticando che senza un'ottimizzazione del legame fisico e chimico tra la fibra e la matrice, queste considerazioni vengono inevitabilmente meno.

### 3.3. Propagazione della cricca nei compositi

Nei compositi tendenzialmente la cricca si propaga nella matrice e quando raggiunge la fibra si comporta nella seguente maniera [9].

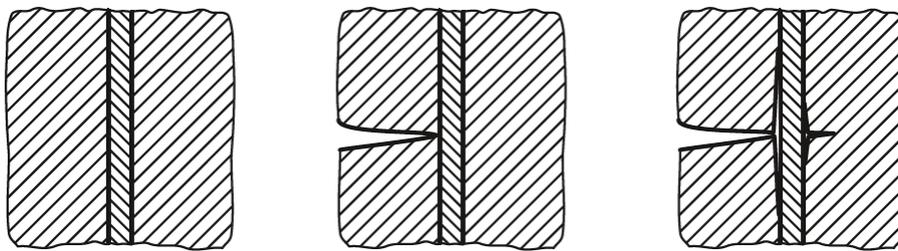


Figura 3.7: Andamento della cricca nel composito

La cricca procede perpendicolarmente alla direzione della fibra, ma non la rompe, la circonda provocando lentamente il distacco della matrice dalla fibra (il cosiddetto *Debonding*). La perdita graduale di adesione all'interfaccia consente alla fibra di deformarsi elasticamente e alla cricca di avanzare, ma al di fuori di questa zona continua a sussistere il legame tra matrice e fibra e quindi quest'ultima continuerà a reggere il carico. Il fenomeno di *Debonding* procederà con l'avanzare della cricca fino a quando lo sforzo responsabile del distacco interesserà una porzione di fibra con un difetto, provocando la rottura di quest'ultima.

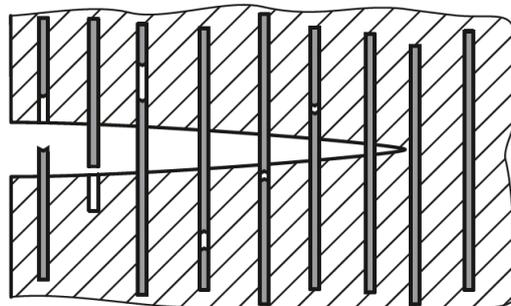


Figura 3.8: Propagazione cricca e Pull-Out della fibra

Al momento della rottura, la fibra rilascerà l'energia elastica immagazzinata, si contrarrà in direzione longitudinale e si espanderà in quella trasversale recuperando il contatto con la matrice. La progressione della cricca provocherà uno scorrimento della fibra rispetto alla matrice, opponendosi alle forze di attrito, fino a quando non avverrà la definitiva frattura e si osserverà l'estrazione della fibra dalla matrice, definito *Pull-Out* [11].

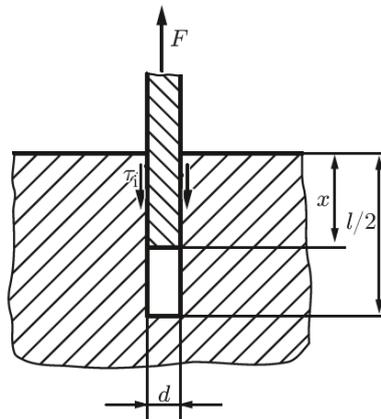


Figura 3.9: *Pull-Out*

Il fenomeno del *Pull-Out* spesso lo si vede ad occhio nudo perché la sezione di frattura esibisce un aspetto a “spazzola”, tipico di questo meccanismo di frattura. Inoltre, il *Pull-Out* si può verificare non solo dopo la rottura della fibra, ma anche prima. Infatti, se le fibre hanno una lunghezza inferiore a quella critica, il carico che potranno sopportare sarà limitato e quindi non si riuscirà ad arrivare alla condizione di rottura della fibra, ma avverrà subito il *Debonding* con il conseguente distacco tra fibra e matrice.

### 3.4. Resistenza a compressione

Se un materiale composito viene caricato in compressione, il meccanismo di deformazione è differente rispetto a quello che abbiamo analizzato fin qui e possiamo osservare che in molti materiali compositi la resistenza a compressione è inferiore rispetto a quella in trazione. Le fibre sono solitamente lunghe e sottili e quindi possono soffrire del fenomeno ben noto del *buckling* [9]. Questo fenomeno sarebbe ancora più evidente se non ci fosse la matrice, ma essa c'è ed è molto importante per impedire che il fenomeno si presenti in maniera importante. Inoltre, visto che le fibre sono molto spesso ravvicinate tra di loro, il loro comportamento

non è indipendente, ma condiviso, tant'è che sono noti due comportamenti solitamente riscontrabili nei compositi soggetti a carichi di compressione. Può esserci una deformazione in-fase e una deformazione fuori-fase.

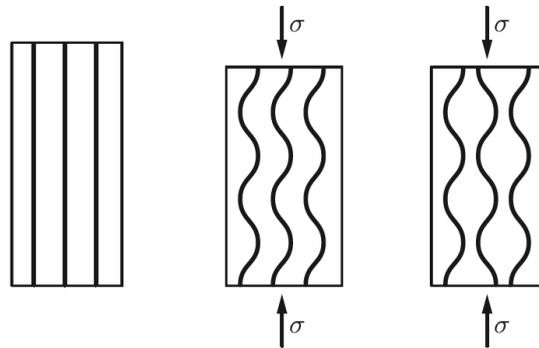


Figura 3.10: Deformazione sotto l'azione di un carico di compressione, in-fase o fuori-fase

Solitamente, la resistenza del composito a compressione è inferiore quando si manifesta una deformazione in-fase perché la matrice è sottoposta a maggiori sforzi di taglio ed essa, tendenzialmente tende ad esibire un comportamento plastico. Se assumiamo una resistenza di snervamento pari a  $\sigma_{m,F}$  e facciamo delle ipotesi semplificative, la resistenza a compressione:

$$R_{c,inphase} = \sqrt{\frac{f_f \sigma_{m,F} E_f}{3(1 - f_f)}} \quad (3.15)$$

chiaramente questa formula è valida solo se la frazione in volume della fibra non è vicino ad 1, altrimenti restituisce un risultato fuorviante. Inoltre, la suddetta formula non tiene conto dell'orientazione delle fibre e del fatto che il rateo d'aspetto delle fibre ha una sua influenza.

## 4. Principali processi tecnologici

La produzione dei materiali compositi è oggi piuttosto varia e molteplici processi tecnologici vengono utilizzati per produrli. Questi processi sono differenti perché chiaramente le resine termoindurenti vanno trattate diversamente da quelle termoplastiche e quindi, per produrre eventualmente il medesimo componente, nel caso si utilizzi una matrice piuttosto che un'altra, il processo tecnologico da seguire sarà diverso. Di seguito verranno elencati alcuni dei processi tecnologici più utilizzati, per poi focalizzarci sul processo SMC nel prossimo capitolo.

### 4.1. Stampaggio ad Iniezione

Lo stampaggio ad iniezione è un processo tecnologico molto utilizzato per produrre compositi termoplastici rinforzati con fibre.

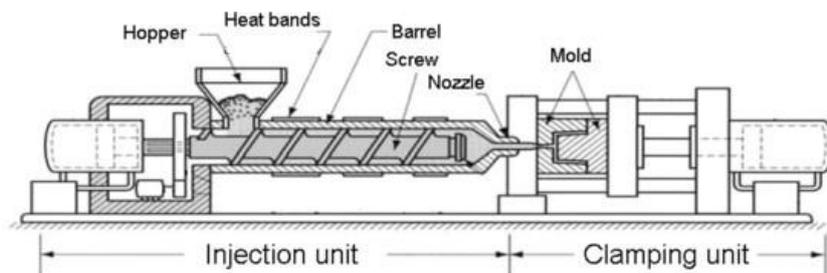


Figura 4.1: Rappresentazione del processo di iniezione

Il processo produttivo non è molto diverso da quello utilizzato nella normale produzione dei polimeri termoplastici, con l'unica differenza che all'interno dei granuli di materiale plastico, ci sono delle fibre rinforzanti. Solitamente una cosa che si fa è anche modificare leggermente la forma della vite di iniezione perché si vorrebbe evitare di rompere le fibre, facendo in modo che il movimento della vite serva solo a riscaldare il polimero preparandolo per l'iniezione.

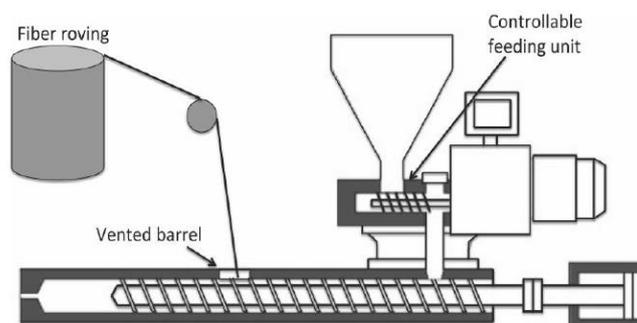


Figura 4.2: Processo alternativo di iniezione

In Figura 4.2 si può vedere anche la schematizzazione di un processo alternativo di iniezione [12]. In questo caso il rinforzo fibroso non viene inserito nei pallet di materiale plastico nella tramoggia di inserimento, ma viene inserito come fibra continua da una apertura nella parte terminale della vite di iniezione. Questo processo ha l'intenzione di limitare la rottura della fibra durante l'iniezione, ma è necessario porre attenzione ai parametri di processo come temperature e velocità di iniezione perché è facile creare dei "grumi" di fibra nel cuore del pezzo finale che implicano una bassa resistenza a causa della scarsa adesione tra fibra e matrice.

## 4.2. Hand Lay Up

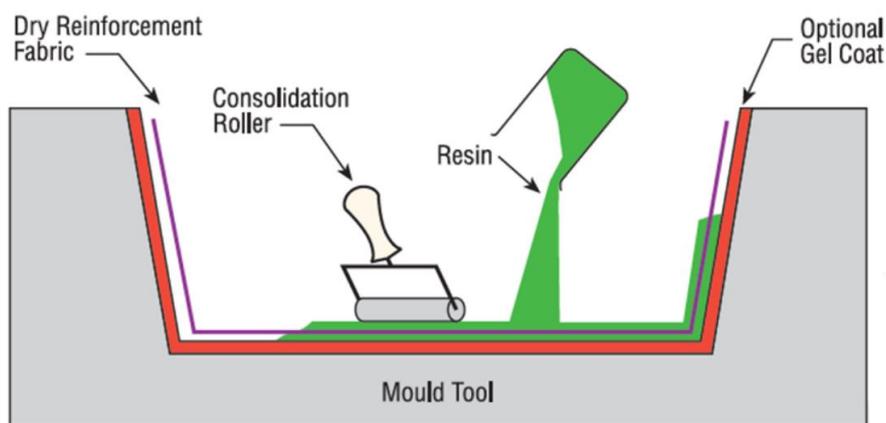


Figura 4.3: Operazione di posa

Questo processo consiste nella posa su uno stampo aperto del materiale di rinforzo, solitamente fibre continue in tessuti, in cui si va poi ad impregnarle con una resina termoindurente. Il processo di cura si svolge a temperatura ambiente. Si riescono ad ottenere buoni manufatti con un prezzo non troppo elevato, ma è necessario che l'operatore faccia attenzione a tutte le fasi di processo perché è molto facile creare dei vuoti nella resina e la cura in atmosfera fa in modo che l'ambiente venga contaminato da tutti i gas che la resina emette durante l'indurimento [4].

### 4.3. Autoclave-Vacuum Lay Up

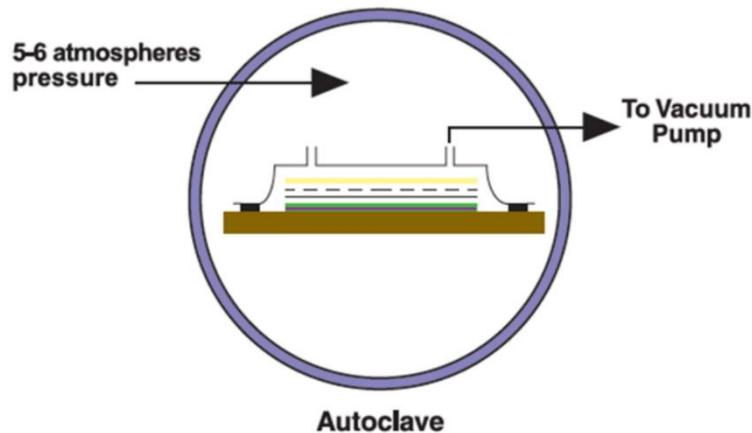


Figura 4.4: Processo di Lay Up sottovuoto

Il processo descritto in precedenza può essere migliorato notevolmente se si decide di applicare qualche passaggio tecnologico in più. Infatti, una volta posato il materiale è possibile chiudere il tutto dentro una sacca in cui si fa il vuoto per poi inserirla in autoclave dove si possono applicare temperature e pressioni più alte rispetto a quelle in atmosfera a stampo aperto (tipicamente le pressioni sono nell'ordine dei 5-6 bar con temperature di 150-180 °C). Questo procedimento consente di riempire bene tutti i vuoti e ottimizzare il processo di cura in modo tale da ottenere dei manufatti di qualità molto alta, sia strutturalmente che da un punto di vista estetico. Ovviamente, è un processo che richiede tempi di produzione piuttosto alti e costosi e quindi viene utilizzato solo per piccole produzioni [4]. Il composito può essere prodotto per Hand Lay Up ma anche utilizzando dei *ply* già pre-impregnati di fibra e resina in cui è necessario “solo” posarli sullo stampo aperto.

### 4.4. Resin Transfer Moulding (RTM)

Questo processo è illustrato in Figura 4.5. In questo caso il materiale di rinforzo è posato su uno stampo e sopra di esso, si posiziona il secondo stampo che va a creare una cavità in cui verrà iniettata la resina termoindurente sotto pressione. Si può fare questo processo anche sottovuoto per facilitare la resina a scorrere nello stampo e ad alte temperature per velocizzare la cura della matrice. Questo è un processo molto usato in ambito automotive e aerospace per via degli elevati valori di frazione volumica di fibra nel manufatto e la poca presenza di vuoti nella matrice [4].

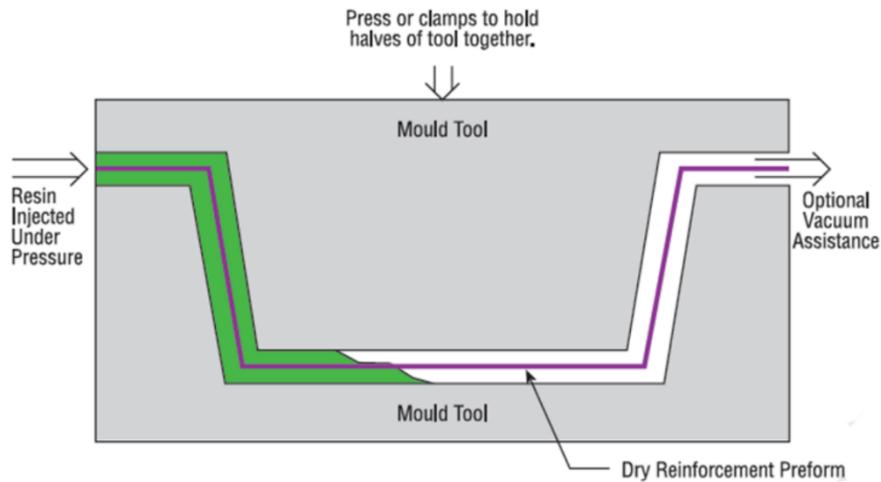


Figura 4.5: Processo RTM

## 4.5. Poltrusione

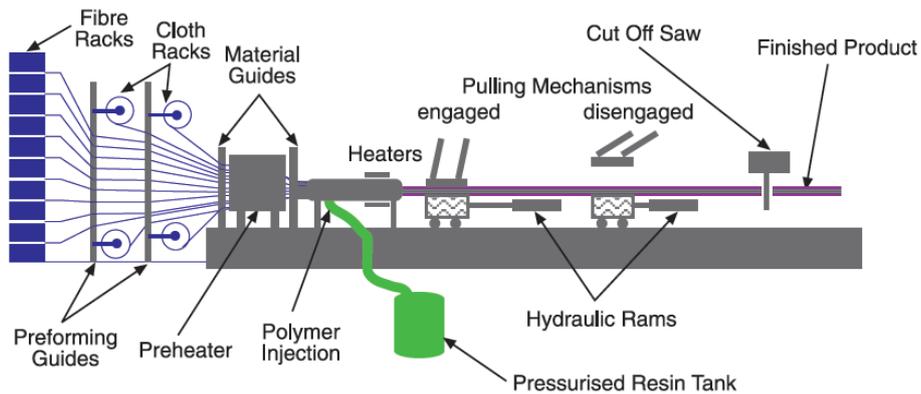
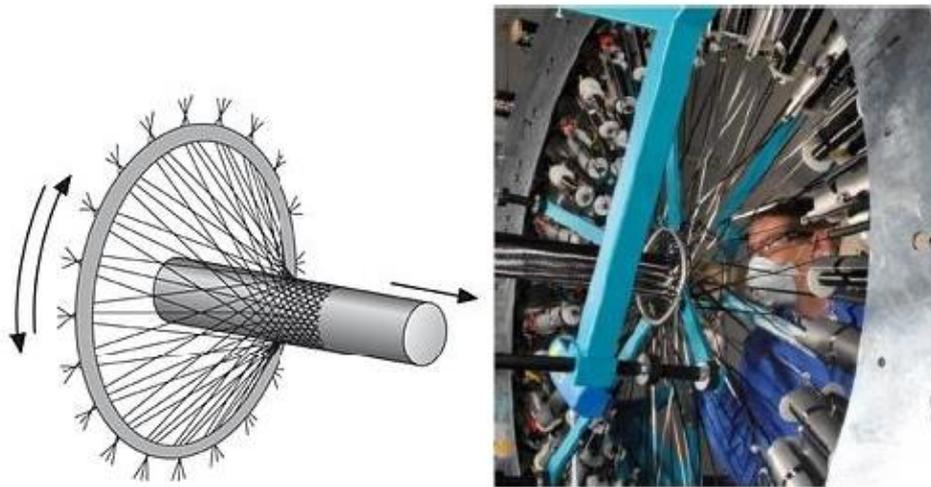


Figura 4.6: Processo di Poltrusione

Questo processo viene utilizzato solitamente per produrre barre o manufatti continui a sezione costante (si può modificare il processo per ottenere manufatti con sezione variabile). Le fibre continue vengono fatte passare in un bagno di resina e grazie a dei riscaldatori si procede con la cura della stessa. Si parla di un processo non particolarmente costoso e complicato, ma ovviamente non si possono ottenere manufatti con forme complesse [4].

## 4.6. Braiding



*Figura 4.7: Braiding*

Anche in questo caso si ottengono principalmente profilati di sezione circolare o comunque con una forma non molto complessa, ma attraverso l'utilizzo di un telaio automatizzato è possibile intrecciare i vari filamenti che provengono da diverse bobine. Questo processo è altamente automatizzato con velocità molto alte e scarti di produzione molto limitati [6].



## 5. SMC

### 5.1. Generalità

Con la dicitura SMC possiamo individuare sia il materiale che il processo tecnologico. Infatti, in letteratura essa viene tradotta come *Sheet Moulding Compound* oppure *Sheet Moulding Compression* in modo da individuare per l'appunto o il materiale o il processo, ma la sostanza è la stessa.

Nei capitoli precedenti abbiamo visto come molto spesso si vadano ad utilizzare fibre continue o tessuti in modo tale da poter raggiungere alte proprietà meccaniche nei componenti, ma questi materiali hanno un difetto: sono costosi e complessi da produrre. Oggigiorno è necessario trovare soluzioni che siano facilmente riproducibili, con bassi costi e con processi tecnologici il più possibile automatizzati per poter creare una vera e propria linea di produzione per questi componenti. Nell'introduzione abbiamo mostrato come sia fondamentale inseguire il tema della leggerezza in ambito automotive per molteplici motivi, ma se le tecnologie per comporre questi componenti sono eccessivamente complesse e costose, questo obiettivo non potremmo mai raggiungerlo. Negli ultimi anni il processo SMC sembra aver trovato un ottimo compromesso come proprietà meccaniche e costi, quindi, Marelli non ha avuto esitazioni nello studio e nell'implementazione di questa tecnologia nei suoi impianti di ricerca. Ma che cos'è l'SMC?



Figura 5.1: Componente in SMC

Se lo consideriamo come processo tecnologico, esso consiste nella compressione di fogli pre-impregnati di resina (solitamente termoindurente) con all'interno fibre lunghe di carbonio o vetro aventi orientazione random nel piano.

I fogli vengono ottenuti in seguito al taglio dei rotoli che vengono consegnati dai fornitori.

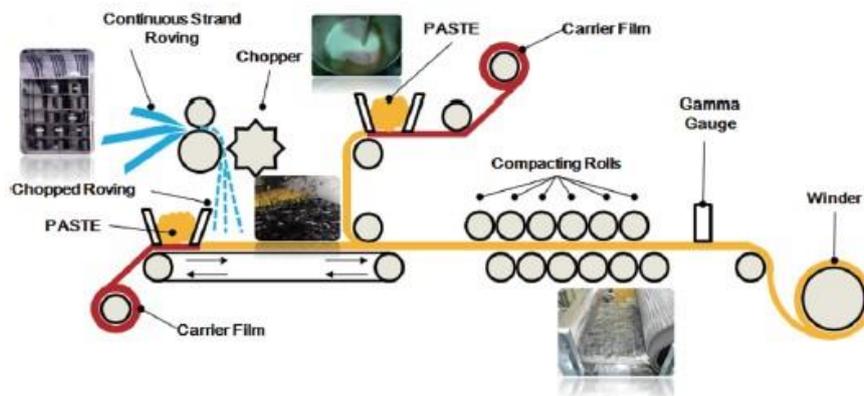


Figura 5.2: Processo produttivo dei rotoli

In Figura 5.2 possiamo vedere qual è il processo di fabbricazione dei rotoli [13]. I film di resina sono due, uno inferiore e uno superiore, ma si uniscono in uno dopo aver raccolto tra di essi le fibre sminuzzate nella dimensione scelta. Anche se abbiamo detto che l'orientazione delle fibre è random, in realtà non lo è totalmente se guardiamo il processo, perché c'è una direzione di avanzamento del rotolo che influisce sulla disposizione delle fibre una volta che vengono posate sui film di resina e quindi, la direzione di avanzamento può essere considerata quella a  $0^\circ$  per i fogli, mentre la direzione trasversale può considerarsi quella a  $90^\circ$ . Questo tema verrà discusso anche in seguito.

Una volta prodotto il foglio, prima di essere arrotolato formando un grande rotolo, esso verrà compattato attraverso una serie di rulli che serviranno ad aumentare l'adesione tra fibre e resina e a rimuovere eventuali bolle d'aria. I rotoli solitamente sono composti da: resina, fibra, catalizzatori, agenti che limitano il ritiro volumetrico, agenti che vanno ad inibire la reticolazione e distaccanti. C'è da considerare il fatto che la resina usata per produrre i rotoli è già parzialmente curata perché essi devono avere una consistenza tale per cui possano essere maneggiati facilmente, tagliati e sufficientemente compatti per tenere assieme la fibra. I rotoli di SMC devono essere utilizzati nell'arco di qualche settimana altrimenti la resina si cura e si perde la maneggevolezza. Per evitare questo problema e rendere possibile l'utilizzo di un rotolo anche dopo qualche mese, è necessario conservare

i rotoli in celle frigo con temperature attorno ai  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ , rendendolo maneggiabile anche dopo 5/6 mesi.

I fogli di SMC hanno percentuali in volume di fibra variabili in base al tipo di applicazione, ma tendenzialmente si arriva ad un massimo del 60-65% di fibra.

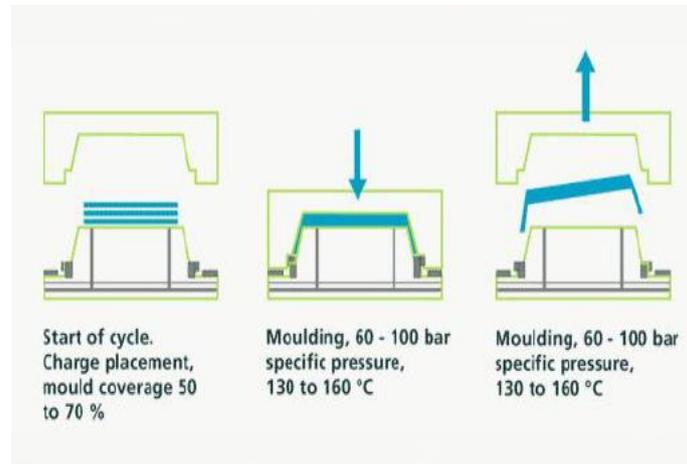


Figura 5.3: Stampaggio dei fogli SMC

In Figura 5.3 è illustrato il processo di stampaggio SMC. In questo caso lo stampo ha una forma molto semplice, ma come vedremo in seguito si possono utilizzare anche stampi con forme molto più complesse. La carica solitamente non copre tutto lo spazio disponibile, ma si ha una copertura del 70% circa dello stampo, questo perché i fogli hanno uno spessore più grande rispetto a quello che sarà lo spessore del componente finito e ci penserà il processo di fluidificazione della resina a riempire tutto lo spazio disponibile. Una volta posizionata la carica, lo stampo viene chiuso e si applica la pressione, che insieme alla temperatura si occuperanno di curare il materiale per il tempo necessario. Tempo di cura, pressione e temperatura sono parametri di processo che solitamente vengono dati dai fornitori del materiale e che vengono poi ottimizzati se sono state fatte delle simulazioni di processo in precedenza. Una volta esaurito il tempo di cura, è possibile aprire lo stampo ed estrarre il componente.

## 5.2. Reologia nello Stampo e Microstruttura Finale

Come abbiamo già accennato in precedenza, l'orientamento delle fibre nell'SMC è random nel piano. Questo è vero, ma non è totalmente esatto perché durante la caduta delle chips di rinforzo, esse hanno un orientamento che tendenzialmente segue il senso di arrotolamento del rotolo. Quindi, quello che si ottiene come prodotto finale è un rotolo che non ha fibre con una orientazione definita, ma una direzione preferenziale quella sì. Questa caratteristica viene evidenziata anche dai fornitori del materiale che molto spesso forniscono due moduli di elasticità, uno a  $0^\circ$  e l'altro a  $90^\circ$ . Queste considerazioni però devono essere contestualizzate solo al foglio che ci viene fornito e non al componente finale. L'orientazione delle fibre nel componente finale è qualcosa di difficile da prevedere perché funzione dello scorrimento della resina all'interno dello stampo. Infatti, l'orientazione delle fibre viene definita nel modo in cui si fluidifica nello stampo la resina e da come è stata posizionata la carica al suo interno.

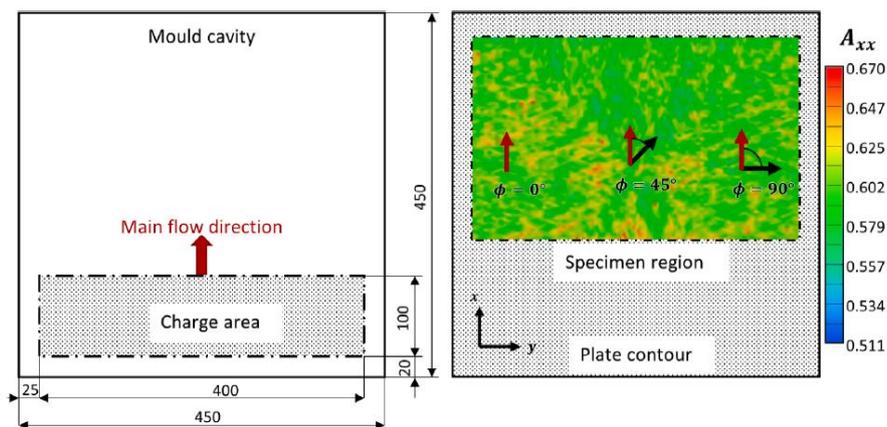


Figura 5.4: Posizione della carica nello stampo e orientazione delle fibre

Ad esempio, possiamo vedere nell'immagine sovrastante come siano orientate le fibre in una lastra piana dopo lo stampaggio. I colori vogliono rappresentare quanto le fibre sono orientate nella direzione x nella lastra e in base ad essi, possiamo vedere che c'è una grande densità di fibre nella direzione di fluidificazione del materiale [14]. La morfologia del manufatto finale quindi è funzione di come scorre la resina nello stampo e quindi del processo produttivo.

In letteratura, il processo di compressione SMC viene solitamente suddiviso in tre step: *squish*, *flow* e *boiling*.

Nel primo step, cioè nei primi istanti di compressione del materiale, quello che si verifica è una brusca accelerazione dal basso verso l'alto del materiale, come si può vedere nelle seguenti immagini [15].

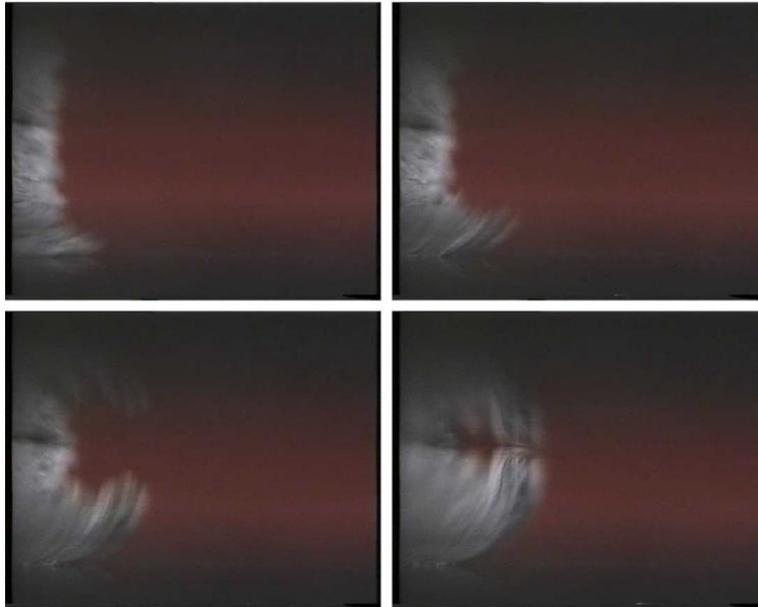


Figura 5.5: Squish con velocità di chiusura stampo 15 mm/s, temperatura stampo 135°

Il motivo per cui il flusso parte dalla superficie inferiore risiede nel fatto che lì il materiale è più caldo rispetto alla superficie superiore, che è in attesa che lo stampo si chiuda. L'entità e la forma dello *squish* sono quindi funzione della temperatura dello stampo e della velocità di chiusura dello stesso.

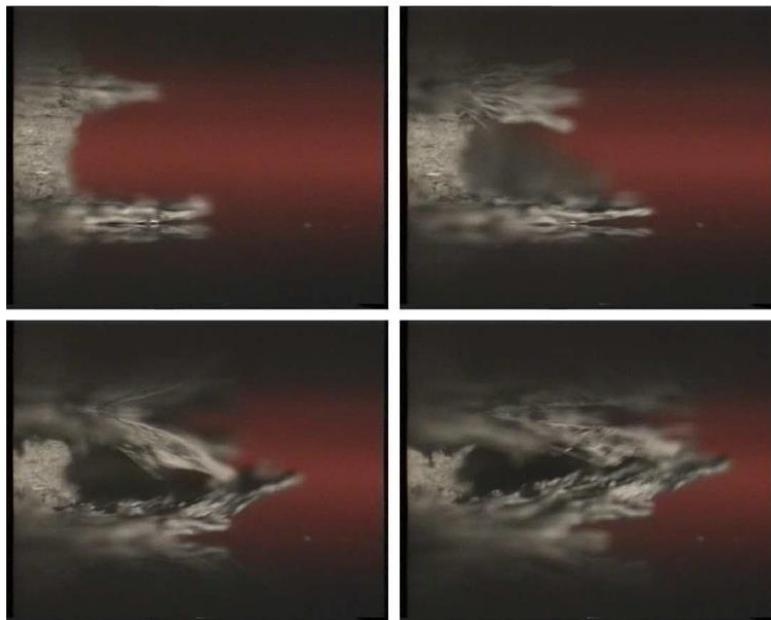


Figura 5.6: Squish con velocità chiusura stampo 2 mm/s, temperatura stampo inferiore 135 C° e superiore 165 °C

In Figura 5.6 possiamo vedere come il fenomeno dello *squish* possa partire anche dall'alto a causa di una temperatura più alta dello stampo superiore, creando quello che spesso viene definito come uno strato lubrificante tra il cuore del materiale e lo stampo.

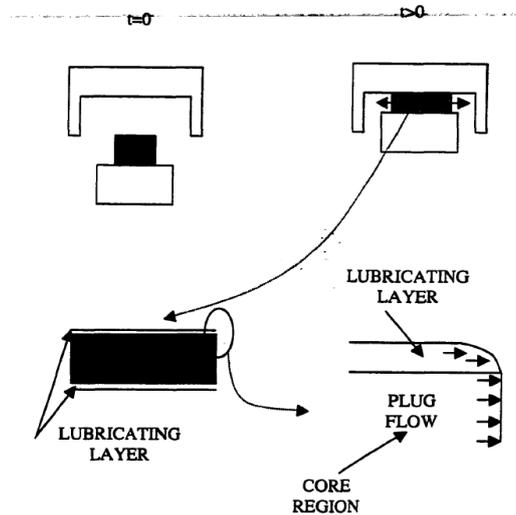


Figura 5.7: Schematizzazione del processo di compressione [16]

Questo comportamento è anche motivato dal fatto che gli strati esterni dei fogli sono ricchi di resina e quindi, con una temperatura più alta, diminuisce la viscosità, facilitando lo scorrimento e provocando l'espulsione dell'aria presente. Questo fenomeno porta ad un aumento delle tensioni di taglio, ed esse, saranno inevitabilmente responsabili della disposizione finale delle fibre nel componente. Questo lo possiamo facilmente osservare grazie a delle tomografie effettuate a diverse profondità di alcuni provini, la prima più esterna e la seconda più a cuore [14].

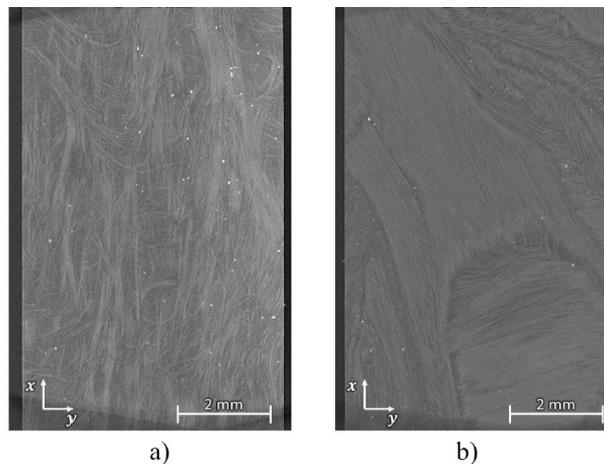


Figura 5.8: (a) Scansione in prossimità della superficie, (b) Scansione nel cuore del materiale

Il secondo step è il *flow* ed esso consiste nel semplice avanzamento del materiale nello stampo in modo da riempire la cavità. In questo caso il fronte di materiale assume una forma più regolare, mantenendo però sempre una differenza di temperatura tra gli strati esterni ed il cuore.

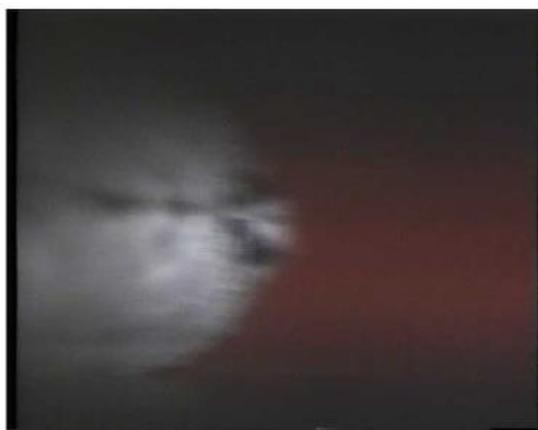


Figura 5.9: Flow

L'ultimo step viene definito *boiling* perché è stato osservato che durante la chiusura dello stampo, prima che avvenga la reticolazione del materiale, delle bolle compaiono nel fronte di flusso nelle zone a bassa pressione, come è schematizzato nella seguente immagine.

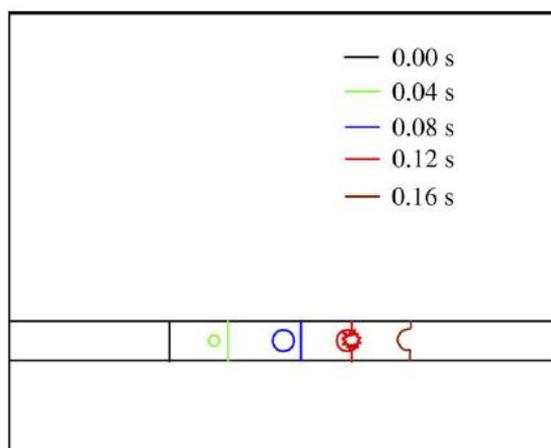


Figura 5.10: Processo di formazione delle bolle

Il componente finale sarà quindi oggetto di piccoli vuoti. Alcuni di essi si formeranno da subito, senza che il processo di compressione riesca ad espellerli, ed altri, nella fase di riempimento della cavità, nella quale avverrà la volatilizzazione di alcuni additivi (molto spesso Stirene).

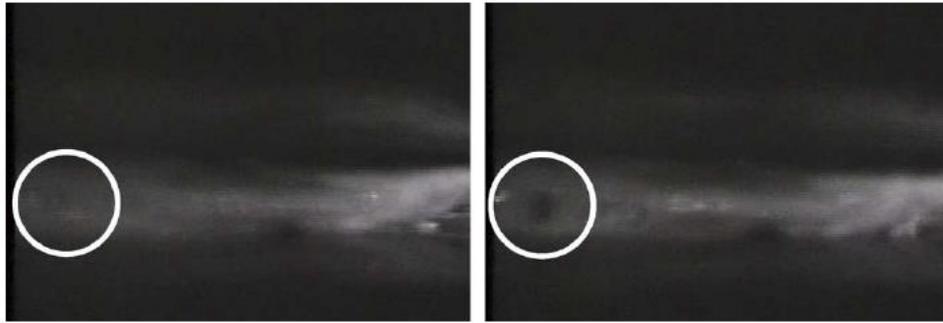


Figura 5.11: Formazione di bolle di Stirene durante lo stampaggio

Il processo di stampaggio, oltre che alla presenza di vuoti, può portare anche ad altri difetti, come cricche o zone ricche di resina e quindi povere di elementi rinforzanti.

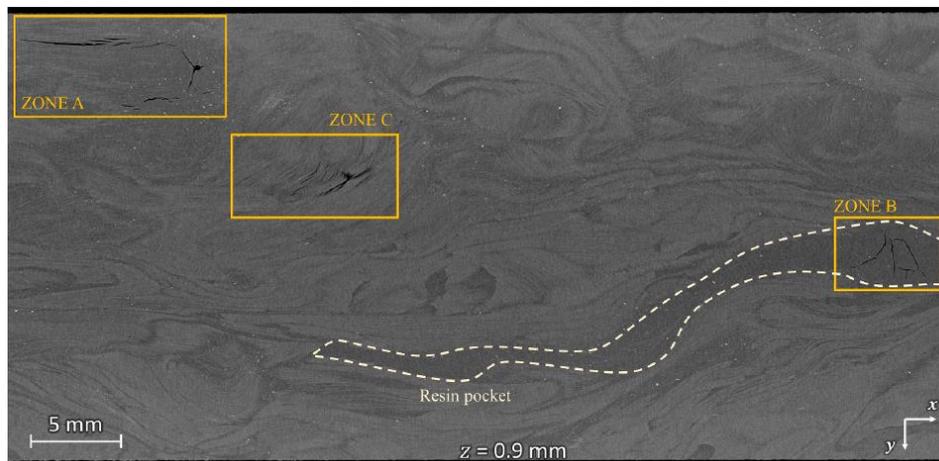
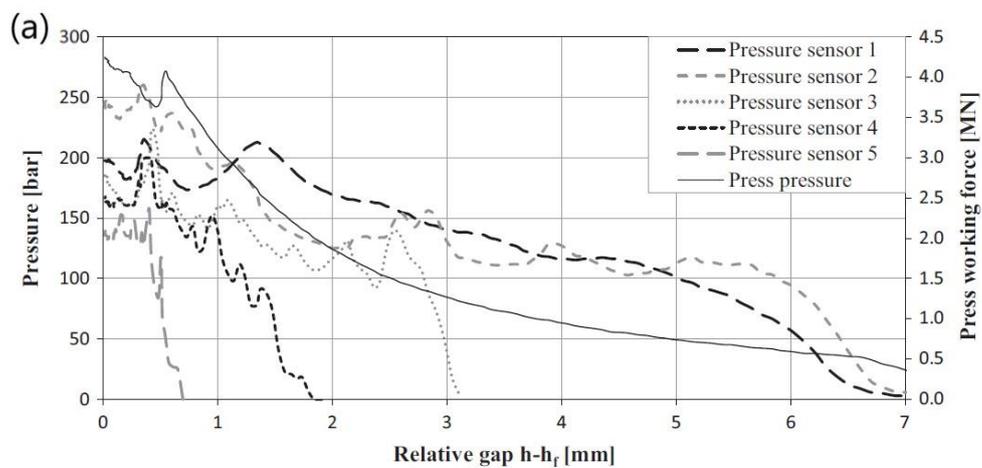


Figura 5.12: Scan che evidenzia i difetti nella microstruttura

Una cosa interessante da osservare può essere l'andamento di pressione durante lo stampaggio [17].



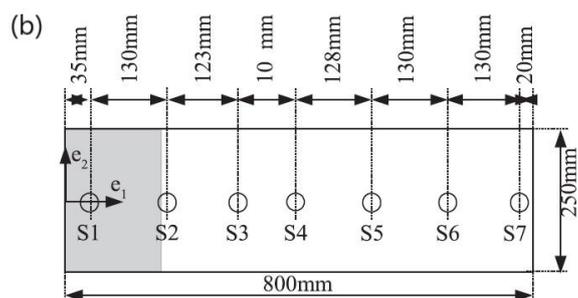


Figura 5.13: (a) Andamento di pressione dei sensori durante lo stampaggio.  
 (b) Posizione della carica nello stampo e posizione sensori di pressione.

Nella Figura 5.13 è illustrato un esempio di stampaggio in cui lo stampo è rettangolare, la carica posizionata sul bordo laterale e lungo la direzione del flusso sono posizionati dei sensori di pressione. Nel grafico è plottato l'andamento di pressione per ogni sensore in funzione del gap tra lo stampo superiore e quello inferiore. Quello che si può osservare è che le pressioni più basse sono quelle che si verificano alla fine dello stampaggio sul fronte del flusso, in cui avviene appunto il *boiling* e poi, è interessante evidenziare l'andamento del primo sensore di pressione. Infatti, nel primo tratto la pressione aumenta, poi per un attimo si stabilizza e successivamente torna a salire. Questo andamento è proprio dovuto allo *squish*, che provoca la spinta in avanti del materiale superficiale piuttosto che l'avanzamento di un fronte di flusso regolare.

Abbiamo appena visto che il flusso di materiale nello stampo è differente tra cuore e superficie esterna, a causa di una diversa viscosità. La suddetta è stata investigata in varie sperimentazioni ed è stato osservato che esibisce un comportamento simile a quello rappresentato [18]:

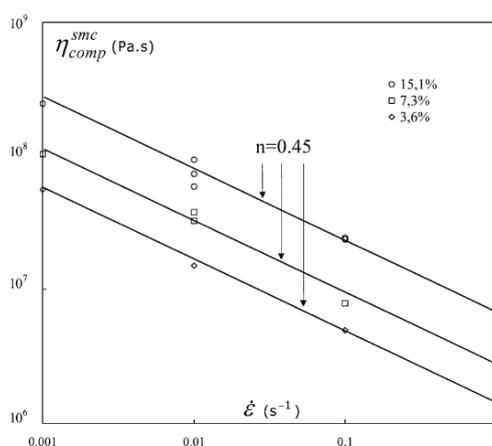


Figura 5.14: Viscosità, a temperatura ambiente, in funzione dello strain rate e della percentuale in volume di fibra

dove  $\dot{\epsilon} = \dot{h}/h$ ,  $h$  è l'altezza istantanea dello stampo superiore da quello inferiore e  $n$  è il valore esponenziale che regola la pendenza delle curve. Si può vedere che la viscosità esibisce un comportamento con decrescita esponenziale in maniera simile a quello che fa la resina senza la presenza del rinforzo, come in Figura 5.15.

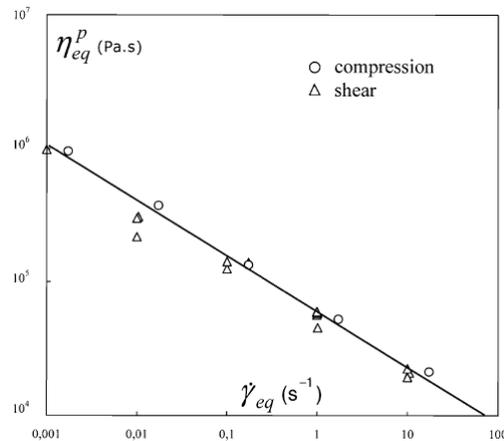


Figura 5.15: Viscosità della resina a temperatura ambiente

Inoltre, di seguito, si può vedere come la temperatura influisca sulla viscosità, ma essa, come la percentuale di fibre, non influisce sulla pendenza della curva.

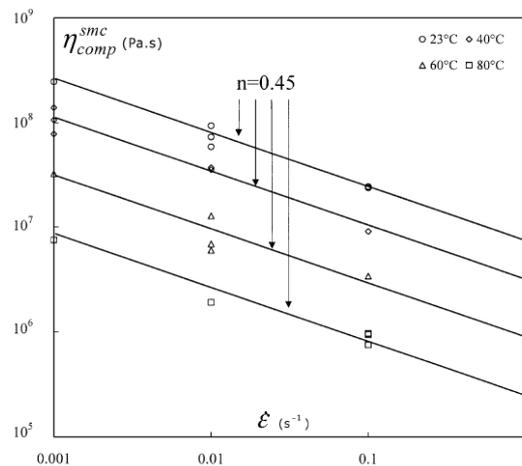


Figura 5.16: Viscosità, a temperatura ambiente, in funzione dello strain rate e della temperatura

Possiamo quindi dire che alte velocità di stampaggio, alte temperature e basse quantità di rinforzo sono elementi favorevoli per una decrescita di viscosità. Queste condizioni, come abbiamo già detto, si verificano facilmente sui bordi esterni dei fogli perché sono a contatto diretto con lo stampo caldo e hanno una percentuale di fibre più bassa rispetto al cuore del materiale. Ecco perché durante lo stampaggio si verifica quella condizione tale per cui la parte superficiale funge da strato lubrificante per il cuore.

Un ultimo aspetto importante da considerare quando si parla di stampaggio a compressione, è la cura della resina termoindurente. Prima dello stampaggio i rotoli di materiale necessitano di essere opportunamente conservati a basse temperature perché altrimenti, il processo di cura si avvia, attivando la reticolazione e rendendo il materiale impossibile da maneggiare. Di seguito si può osservare un esempio di due SMC conservati a 32 °C [19]:

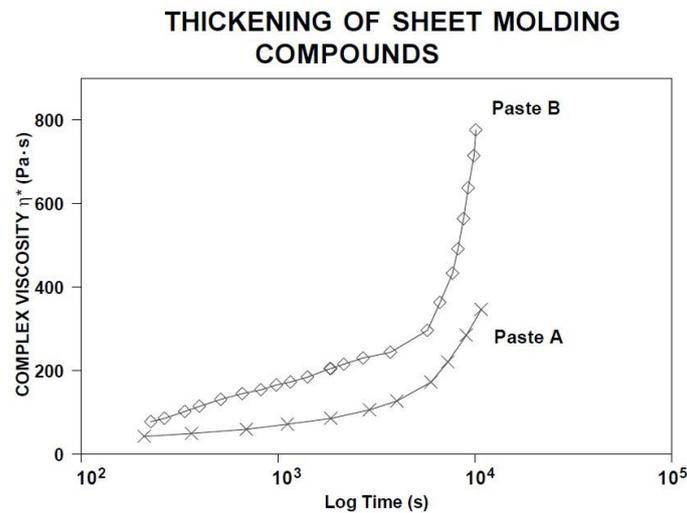
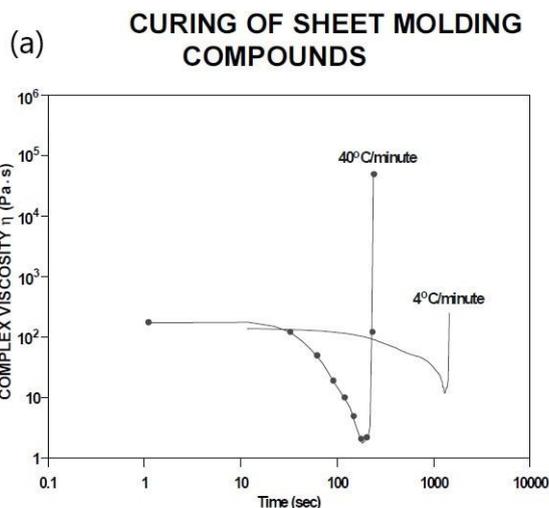


Figura 5.17: Viscosità in funzione del tempo

Nel caso dell'SMC prodotto con la *Paste B*, la viscosità aumenta repentinamente nel tempo, rendendo il *prepreg* totalmente impossibile da maneggiare dopo un certo lasso di tempo.

Quando si procede con lo stampaggio, l'andamento della temperatura ricopre un ruolo importante sull'identificazione del tempo di cura.



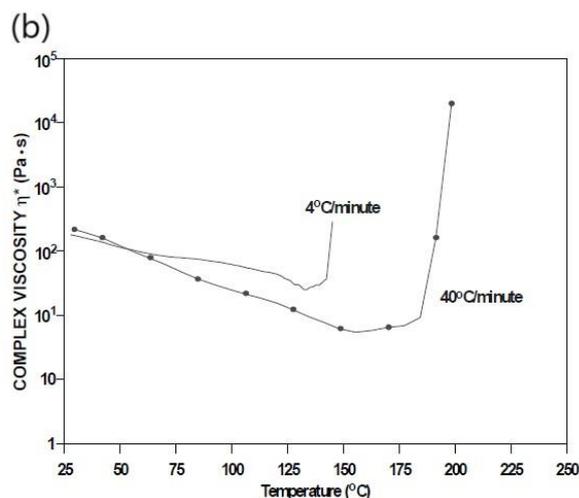


Figura 5.18: Cura di un SMC con due diverse velocità di riscaldamento, (a) in funzione del tempo, (b) in funzione della temperatura

Nella Figura 5.18 è possibile osservare come la cura di un medesimo SMC, sia differente se il materiale viene riscaldato diversamente, cioè, con due velocità diverse di riscaldamento. Nel caso in cui il materiale venga scaldato velocemente (40°C/min.), la viscosità minima che raggiungerà durante lo stampaggio sarà bassa, ma la temperatura necessaria per la cura sarà più alta. Invece, nel caso in cui il materiale venga sottoposto ad un riscaldamento più lento (4°C/min.), la viscosità minima sarà più alta, il tempo per la cura sarà più elevato, ma la temperatura massima raggiunta potrà essere mantenuta più bassa.

Come abbiamo visto, la microstruttura dell'SMC è fortemente influenzata dai parametri di processo di stampaggio e questa cosa influisce notevolmente sulla posizione e l'orientazione delle fibre nel componente finale. Un flusso ordinato e monodirezionale provocherà un forte orientamento delle fibre, ma questo diventa più difficile quando il manufatto ha delle forme piuttosto complesse. Per conoscere le proprietà meccaniche finali è quindi necessario sapere come sono posizionate le fibre e quindi, il loro orientamento spaziale. L'orientamento delle suddette può essere definito tramite quello che viene chiamato *Tensore di Orientamento*, spiegato nel paragrafo successivo.

### 5.3. Orientamento delle Fibre

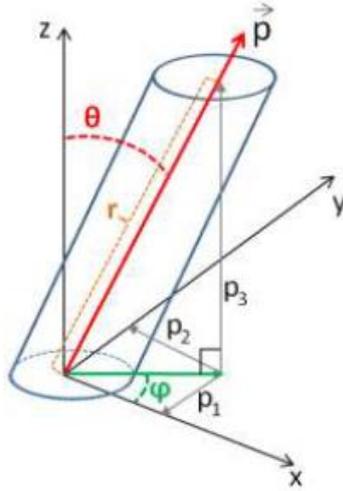


Figura 5.19: Orientazione singola fibra

Il vettore  $\vec{p}$  rappresenta la singola fibra nello spazio, definita dalle coordinate cartesiane  $p_1, p_2, p_3$ . Si può anche definire in coordinate sferiche ( $r = 1, \theta, \varphi$ ) e la trasformazione da un sistema di coordinate all'altro:

$$\begin{cases} p_1 = \sin \theta \sin \varphi \\ p_2 = \sin \theta \cos \varphi \\ p_3 = \cos \theta \end{cases} \quad (5.1)$$

A questo punto possiamo definire un tensore di orientamento  $T$  della fibra:

$$T = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_1^2 & p_1 p_2 & p_1 p_3 \\ p_2 p_1 & p_2^2 & p_2 p_3 \\ p_3 p_1 & p_3 p_2 & p_3^2 \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

in cui, la forma generale

$$a_{ij} = \oint p_i p_j \psi(\vec{p}) dp \quad (5.3)$$

in forma discretizzata per un gruppo  $n$  di fibre:

$$a_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n a_{ij}^k = \frac{1}{n} \left( \sum_{k=1}^n p_i^k p_j^k \right) \quad (5.4)$$

Possiamo ora definire dei parametri di confronto che ci forniscono una visione più precisa dell'orientazione delle fibre [20] [21]:

- **Grado di Orientazione:** è un valore scalare che esprime la differenza tra la distribuzione spaziale della fibra in questione e l'orientazione isotropica. Questo valore non ci dice quale sia l'orientazione di un determinato gruppo di fibre, ma solo se sono maggiormente allineate in una direzione o hanno una orientazione intermedia tra le 3 disponibili nello spazio. Infatti, se si guardano i valori sulla diagonale principale:

$$a_{11} + a_{22} + a_{33} = 1, \quad 0 < a_{ij} < 1, \quad 0 < i < 3 \quad (5.5)$$

Il grado di orientazione  $O_D$  lo si ottiene normalizzando l'autovalore più grande e visto che la somma degli autovalori è 1, il valore più basso che può assumere l'autovalore più grande è  $1/3$ . Il più grande autovalore è definito  $\lambda_1$  e quindi:

$$O_D = \frac{3}{2} \left( \lambda_1 - \frac{1}{3} \right) \quad (5.6)$$

- **Cosine Similarity:** questo valore fornisce un confronto tra le principali orientazioni delle fibre. Quello che si fa è fare il prodotto vettoriale tra due vettori  $(V_1, V_2)$  rappresentativi delle direzioni principali delle fibre, estraendo l'angolo  $\alpha$  tra i due vettori. Se il risultato è pari ad 1 allora i due vettori (e quindi le direzioni) sono uguali, se invece è pari a -1 sono diversi. Ci può essere una simmetria tra le direzioni delle fibre e quindi, per limitare il risultato tra 0 ( $90^\circ$ ) e 1 ( $0^\circ$ ) viene fatto il valore assoluto:

$$Similarity_C = |\cos \alpha| = |V_1 \cdot V_2| \quad (5.7)$$

- **Tensor Similarity:** in questo caso, a differenza del caso precedente, possiamo fare un confronto non degli autovalori, ma dell'intero tensore:

$$Similarity_T = \sqrt{\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 (a_{ij} - b_{ij})^2} \quad (5.8)$$

## 5.4. Comportamento Meccanico e Rottura

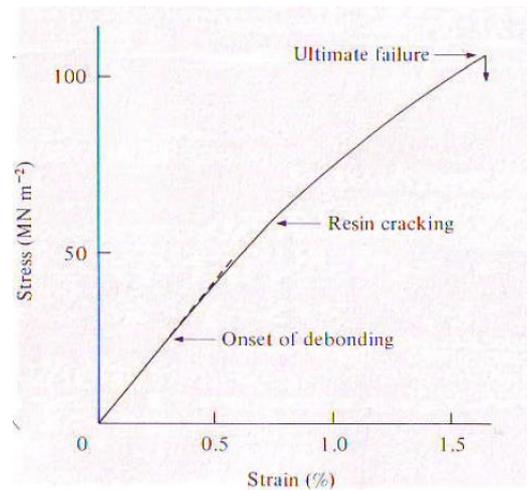


Figura 5.20: Curva Sforzo-Deformazione di un composito con fibre random

In Figura 5.20 possiamo osservare una tipica curva Sforzo – Deformazione di un composito polimerico con fibre random [10], come può essere appunto l'SMC. Nella suddetta curva possiamo osservare che dopo una primissima fase elastica del materiale, la curva incomincia a cambiare leggermente la sua pendenza per via del fatto che avviene un primo *Debonding* tra matrice e fibra. Man mano che il carico aumenta il trasferimento delle tensioni tra la matrice e la fibra diventa sempre più complicato e solo le fibre orientate nella direzione del carico riescono a reggere la sollecitazione. Infatti, essendo un materiale con fibre random, le zone in cui le fibre sono disposte trasversalmente al carico generano una forte riduzione di resistenza del materiale e provocano l'insorgenza e la propagazione delle cricche. Quando il carico diventa troppo alto, i fenomeni di *Pull Out* e *Cracking* delle fibre diventano dominanti e nell'arco di poco tempo il materiale esibisce il collasso finale. Questi meccanismi di *Pull Out* e rottura delle fibre sono riscontrabili sia nell'evoluzione della curva (il cambio di pendenza) sia nell'osservazione delle prove di trazione, in cui è possibile udire chiaramente la rottura delle fibre qualche attimo prima della rottura del provino. Come abbiamo appena accennato le zone critiche nel materiale sono quelle in cui le fibre sono disposte trasversalmente alla direzione del carico, perché in quel caso il modulo di elasticità è inferiore rispetto alle altre zone del provino. Questa evidenza la si può riscontrare anche all'atto pratico se si analizza la zona di rottura di alcuni provini soggetti a prove di trazione.

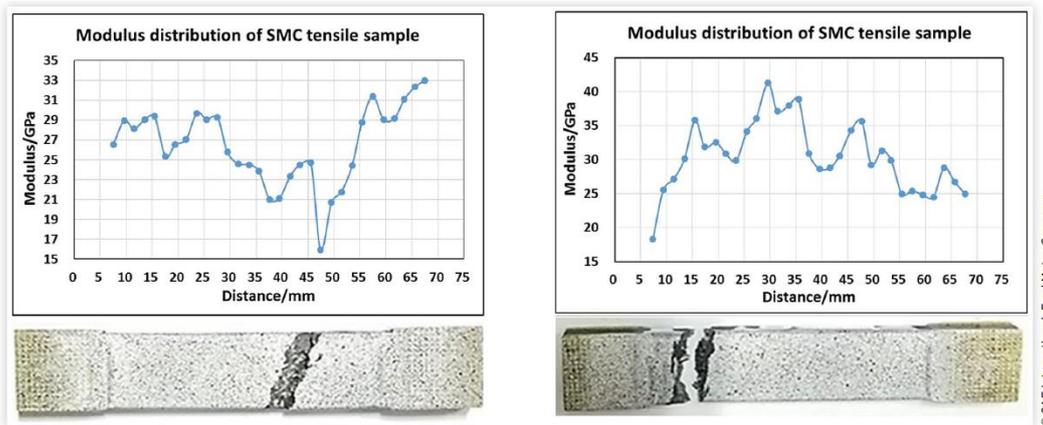


Figura 5.21: Distribuzione del Modulo di elasticità in provini di trazione

Nella Figura 5.21 possiamo osservare la zona di rottura di alcuni provini su cui sono state fatte delle prove di trazione da parte della *Nanjing University of Aeronautics and Astronautics* in collaborazione con la *Ford Motor Company* [22]. La ricerca evidenzia come le zone di rottura dei provini siano coincidenti con le zone in cui il modulo di elasticità è più basso e quindi, zone in cui le fibre non hanno la stessa direzione del carico.

La direzione delle fibre è anche il fattore che influenza l'insorgenza di un criterio di rottura piuttosto che un altro. Lo si può osservare in Figura 5.22 dove sono illustrate le sezioni di rottura per provini con orientazione preferenziale delle fibre rispettivamente a  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $90^\circ$  rispetto alla direzione del carico di trazione.

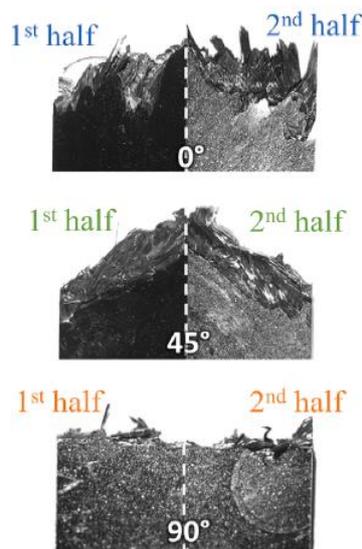


Figura 5.22: Sezione di rottura dei provini

Si vede chiaramente come nella prima sezione il meccanismo di rottura principale sia il *Pull Out* (in alcuni casi si verifica anche la rottura della fibra) a causa di una superficie di frattura molto frastagliata a differenza degli altri due casi in cui la superficie è molto più regolare e in cui il meccanismo preferenziale è il *Debonding*. I due meccanismi sono quindi diversi per loro natura, il primo più legato alle fibre mentre il secondo alla matrice e questa cosa la si può osservare meglio se si plotta una mappa di deformazione subito prima e subito dopo la rottura nel provino a  $0^\circ$  e a  $90^\circ$ .

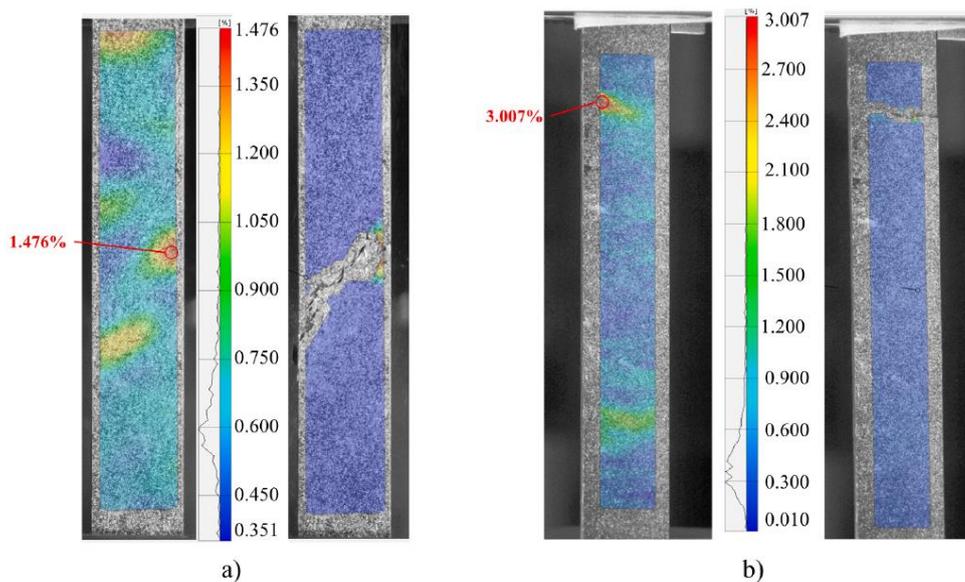


Figura 5.23: Mappa di deformazione dei provini a (a)  $0^\circ$  e (b)  $90^\circ$ , prima e dopo la rottura

Il provino a  $0^\circ$  ha esibito una deformazione media a rottura dello 0.683 % con un picco locale dell'1.476 %, vicino alla deformazione a rottura della fibra del 2 %. Nel caso del provino a  $90^\circ$  la deformazione media è dello 0.573 %, con un picco però di poco più del 3%, dimostrando come in quest'ultimo caso l'influenza della matrice nella rottura sia molto più importante rispetto al primo caso. Una cosa importante da sottolineare è che questo materiale non è particolarmente condizionato dalla presenza di possibili difetti. Infatti, abbiamo illustrato in Figura 5.12 quali possono essere questi difetti insorti dopo lo stampaggio, ma essi erano comunque presenti nei provini rotti mostrati in Figura 5.23. Quindi, è evidente come questi difetti seppur presenti nel materiale, non influenzino eccessivamente il comportamento meccanico, ma anzi, siano meno influenti rispetto alla direzione e forma delle fibre nel composito.

Un ultimo parametro su cui posare l'attenzione è la presenza di eventuali linee di giunzione. Nei casi appena mostrati i provini erano stati estratti da delle lastre piane, ma lo stampaggio a compressione SMC può essere utilizzato anche per lo stampaggio di componenti con un certo spessore e forme complicate. In tal caso, è necessario fare attenzione a come posizionare le cariche all'interno dello stampo perché in base alla loro posizione, il materiale scorrerà in modo o in un altro. Evitare molte linee di giunzione è importante perché è stato riscontrato che sono delle zone facilmente soggette a rottura, come è possibile vedere:

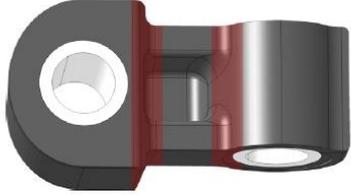
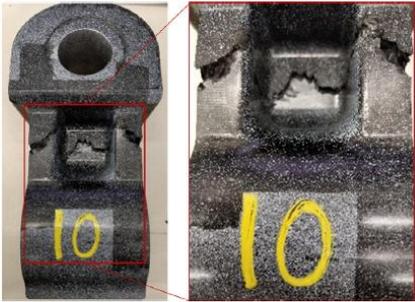
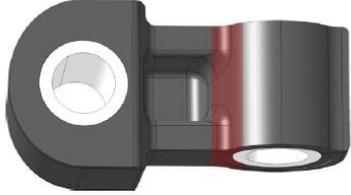
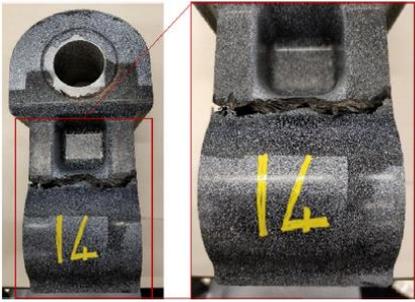
Location of the weld surfaces and ultimate failure.		
CP	Expected weld surfaces location (in red)	Failure location
A		<p>Varied between both fillets and middle section</p> 
B		<p>All in bottom fillet</p> 

Figura 5.24: Linee di giunzione e zone di rottura

Molte osservazioni presenti in questo paragrafo riguardanti il comportamento dell'SMC sono state oggetto di studio da parte di Luca Martulli & Co. da parte della sezione di *Ingegneria dei Materiali della Toyota Motor Europe* in collaborazione con il *Dipartimento di Ingegneria dei Materiali dell'Università Cattolica di Leuven* [14] [23].

## 6. Caratterizzazione Materiale

Nei precedenti capitoli abbiamo visto le generalità dei materiali compositi, i principali processi produttivi e abbiamo affrontato, con maggiore attenzione, il processo SMC, che è il focus di questa tesi. Da questo capitolo in poi, verrà illustrato il lavoro svolto durante la permanenza in Marelli Ride Dynamics, passando dalla caratterizzazione del materiale, focus di questo capitolo, fino alla finale validazione sperimentale del modello FEM di un dimostratore tecnologico in composito.

Il primo passo è la scelta del materiale da utilizzare e la sua caratterizzazione sperimentale. Per lo svolgimento di questa tesi sono stati scelti due SMC differenti, derivanti da due fornitori diversi che chiameremo rispettivamente *Mat1* e *Mat2*. Entrambi gli SMC hanno filamenti di carbonio con una lunghezza di circa 25 mm, ma nel primo caso abbiamo una percentuale in peso di fibra pari al 63% circa e un titolo 12K, mentre nel secondo, una percentuale pari al 52% e un titolo 3K.

In Figura 6.1 è possibile osservare un foglio SMC del *Mat1*. Il numero di fogli necessari per lo stampaggio è definito dal peso. Conoscendo il volume della cavità da riempire e la densità del materiale, è possibile sapere quanto materiale inserire nello stampo e di conseguenza il numero di fogli da utilizzare. La superficie occupata dai fogli per lo stampaggio di lastre piane necessarie per la caratterizzazione è pari a circa il 75% della superficie disponibile.

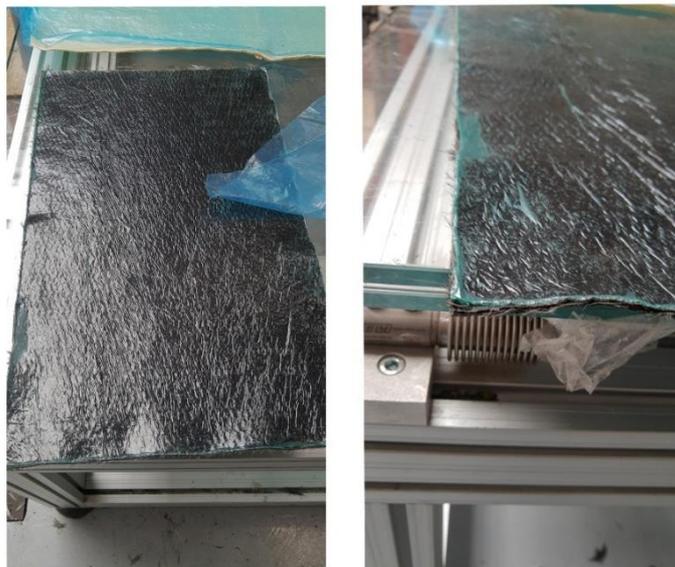
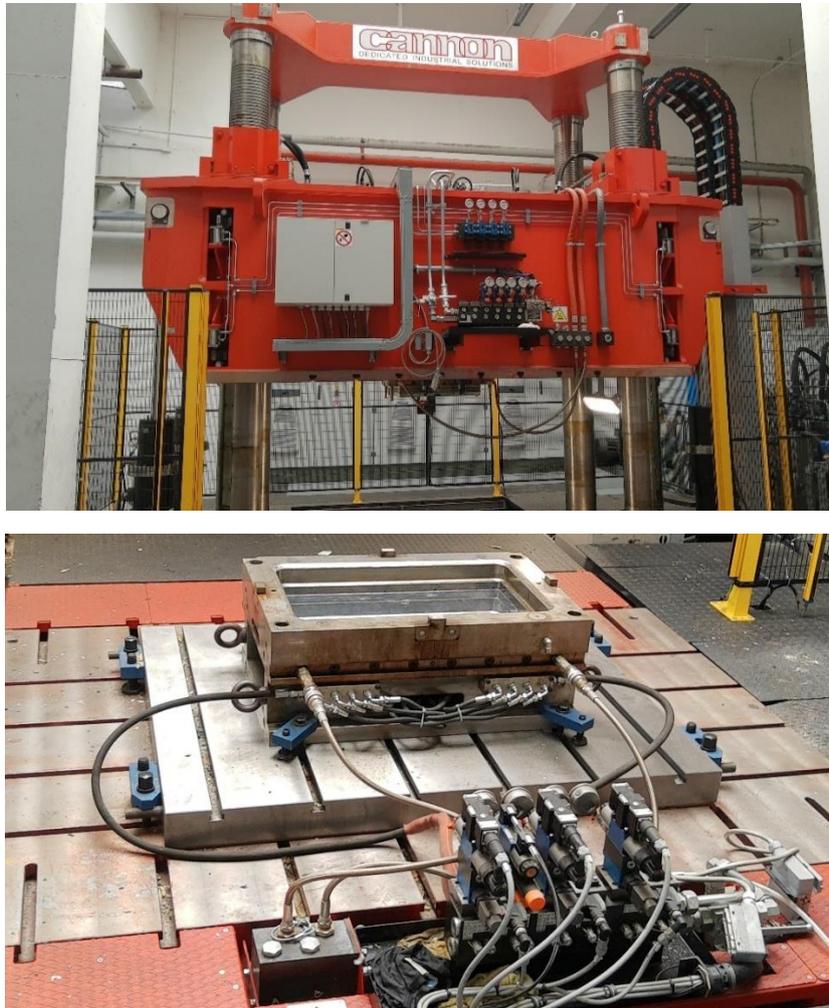


Figura 6.1: SMC

Nelle seguenti immagini è possibile osservare la pressa che viene utilizzata in Marelli per lo stampaggio SMC, con una forza massima di chiusura di circa 1500 tonnellate.



*Figura 6.2: Sopra, pressa per lo stampaggio a compressione. Sotto, stampo inferiore della lastra piana*

I parametri di processo per lo stampaggio dipendono ovviamente dal tipo di stampo utilizzato e dal tipo di materiale utilizzato, ma per quanto riguarda temperature e tempi di cura, essi vengono dati solitamente dai fornitori del materiale che, assieme alle proprietà meccaniche ricavate dalle loro sperimentazioni, forniscono dei grafici simili a quelli illustrati in Figura 5.18 per sapere il comportamento reologico del materiale. In questo caso possiamo dire che, per entrambi i materiali, la temperatura degli stampi è stata impostata a circa 150 °C, con un tempo di cura sui 5 minuti. Il movimento della pressa è composto da quattro step: nei primi tre step si comanda con un controllo di velocità, in cui si passa dai 20 mm/s fino ad 1 mm/s di velocità per la chiusura dello stampo.

Nell'ultimo step, si passa dal controllo di velocità a quello di forza, in cui si imposta la forza di chiusura da mantenere per tutto il periodo di cura del materiale.

Una volta completato l'intero processo, si estrae la lastra finale.



*Figura 6.3: Esempio di lastra piana in SMC*

A questo punto, il passaggio successivo da svolgere è la vera e propria caratterizzazione del materiale. Si procede prima di tutto al taglio dei provini utilizzando una macchina Water Jet, come illustrato nella seguente immagine:



*Figura 6.4: Provini SMC*

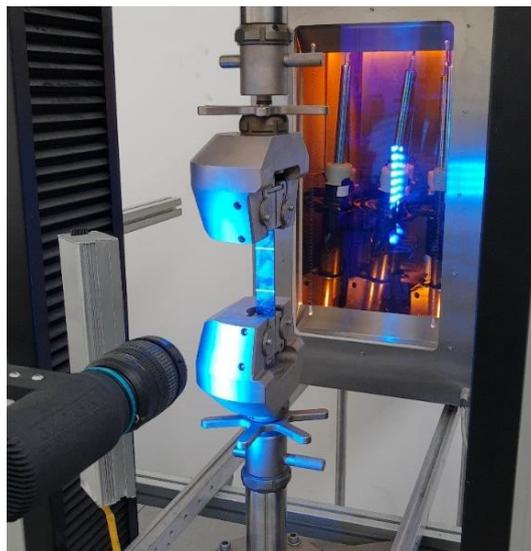
In Figura 6.4 si vede come i provini siano stati ritagliati dalla lastra in diverse posizioni e con diverse orientazioni. Nella figura sono presenti provini solamente con orientazione  $0^\circ$  e  $90^\circ$ , ma nel nostro caso sono state condotte delle prove anche con provini a  $45^\circ$ . Inoltre, il grande numero di provini ritagliati è motivato dal fatto che può anche essere interessante notare le differenze tra provini estratti in una posizione laterale della lastra (sui bordi) piuttosto che in una posizione centrale.

La determinazione delle costanti elastiche avviene tramite una prova di trazione su una macchina Galdabini.



*Figura 6.5: Macchina di Trazione Galdabini*

I provini hanno una dimensione di 200 x 25 x 3.25 mm e la prova di trazione viene eseguita in controllo di velocità (pari a 2 mm/min.) seguendo la normativa ISO 527 [24]. La prova viene condotta in controllo di velocità perché il controllo di deformazione non andrebbe bene per questo materiale essendo un composito che esibisce un comportamento fragile. Nelle immagini precedenti si può vedere che i provini non hanno una forma ad osso di cane come avviene solitamente per i materiali metallici, ma sono rettangolari perché la normativa consiglia questa geometria quando si ha a che fare con materiali termoidurenti (la forma ad osso di cane può presentare delle rotture del provino dinanzi gli afferraggi).



*Figura 6.6: Strumentazione per la prova di trazione*

In Figura 6.6 è possibile osservare che la deformazione del provino viene rilevata mediante un video estensimetro ottico che restituisce la seguente immagine su schermo.

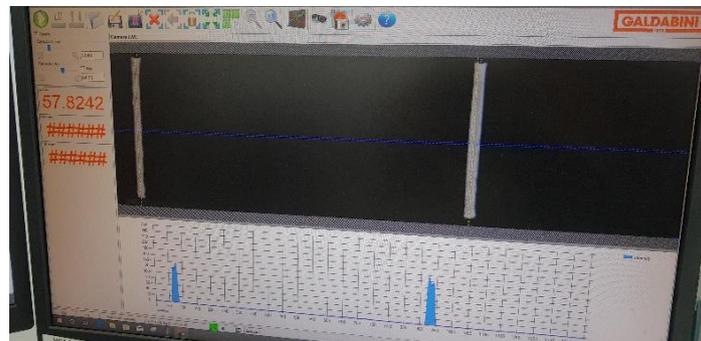


Figura 6.7: Rilevazione ottica dell'estensimetro e osservazione dei marker sul provino

Questo metodo di rilevazione della deformazione è molto preciso e permette di ottenere dei risultati molto validi, a patto che i marker siano ben definiti.

Come è stato precedentemente detto, i provini sono stati ricavati rispettivamente con orientazioni a  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $90^\circ$  e sono state condotte delle campagne di caratterizzazione per entrambi i materiali, *Mat1* e *Mat2*.

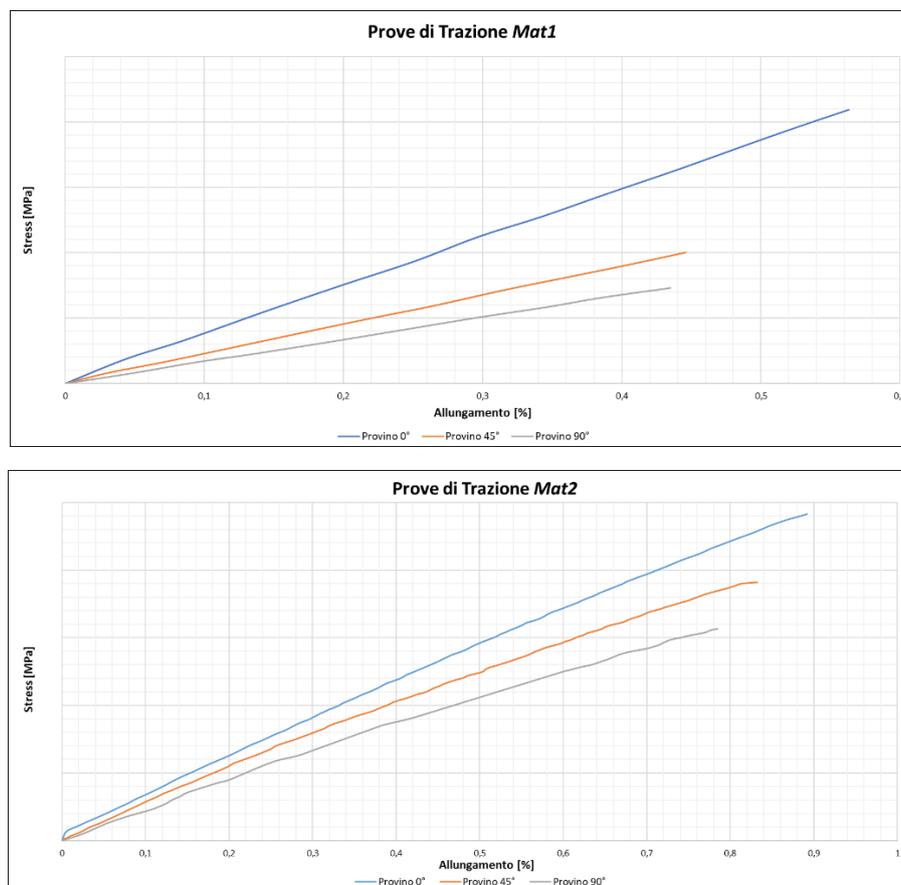


Figura 6.8: Caratterizzazione delle due tipologie di SMC

Le curve ottenute sono una media delle prove condotte per ogni orientazione.

Si può subito vedere come i moduli di elasticità e le relative resistenze a trazione siano inferiori se si passa a sollecitare i provini in direzione trasversale piuttosto che longitudinale, rispetto alla direzione delle fibre. Inoltre, possiamo annotare un aspetto interessante comparando i due materiali. Nel primo caso, il *Mat1*, abbiamo una percentuale in peso più alta rispetto al secondo materiale, ma il limite di rottura è inferiore. Questo comportamento che a primo avviso può sembrare incongruente, ha una logica se si osserva il titolo delle fibre perché nel *Mat1* abbiamo un titolo 12K, mentre nel *Mat2* abbiamo un titolo 3K. Questo implica che nel secondo caso le chips di carbonio sono molto più piccole perché composte da un numero minore di filamenti per chips e, grazie ad una minore tensione di taglio sulle fibre, il composito è in grado di resistere a carichi più elevati.

Infine, se osserviamo entrambi i materiali, possiamo notare come le curve non esibiscano un iniziale tratto elastico, per poi passare ad un tratto plastico. Questa distinzione non è chiaramente visibile per via del fatto che il materiale è abbastanza fragile e quindi, il carico aumenta sempre in maniera piuttosto proporzionale per poi cedere, in maniera più o meno distruttiva, una volta raggiunto il limite di rottura.

## 7. Simulazione di Processo

Una volta raccolti i dati riguardanti le proprietà meccaniche del materiale, è necessario svolgere una simulazione di processo che simuli il totale processo produttivo del componente che vogliamo produrre. A tal proposito, è necessario prima di tutto presentare il componente sulla quale verrà svolta la simulazione numerico – sperimentale.



*Figura 7.1: Componente oggetto di studio*

Il componente sulla quale verrà fatta la simulazione numerica e le relative prove al banco sperimentali è un *Omega* in SMC. L'*Omega* non è un componente che trova impiego in ambito automotive, ma è un dimostratore con una serie di caratteristiche che lo trovano ideale per lo studio che vogliamo compiere a causa della sua geometria complessa e completa.

Gli spessori non sono tutti uguali e questo comporta che venga posta una particolare attenzione durante l'analisi di processo (spessori diversi significa velocità di scorrimento diverse e raffreddamenti diversi del materiale). La presenza di tre inserti in alluminio rende delicata sia la modellazione FEM, perché è importante capire come modellare correttamente l'interfaccia tra il materiale SMC e l'alluminio, ma anche il processo vero e proprio perché gli inserti dovranno essere posizionati con cura nello stampo e, una volta prodotto il componente, sarà necessario garantire un'adeguata adesione tra composito e metallo. La simulazione di processo viene svolta con il software Moldex3D e oltre a definire i parametri di processo da impostare nella pressa illustrata nel capitolo precedente, ci fornisce molti risultati degni di nota. La prima cosa che possiamo vedere è la disposizione delle cariche all'interno dello stampo in Figura 7.2.

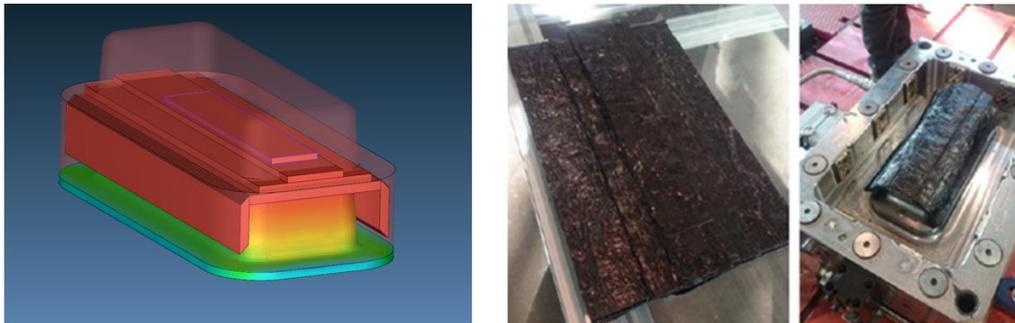


Figura 7.2: A sinistra, disposizione cariche nella simulazione di processo. A destra, le cariche e la loro posizione nello stampo.

Dopo la posa delle cariche e una volta definiti i parametri di processo, può iniziare lo stampaggio. Nella seguente figura è possibile vedere i parametri impostati.

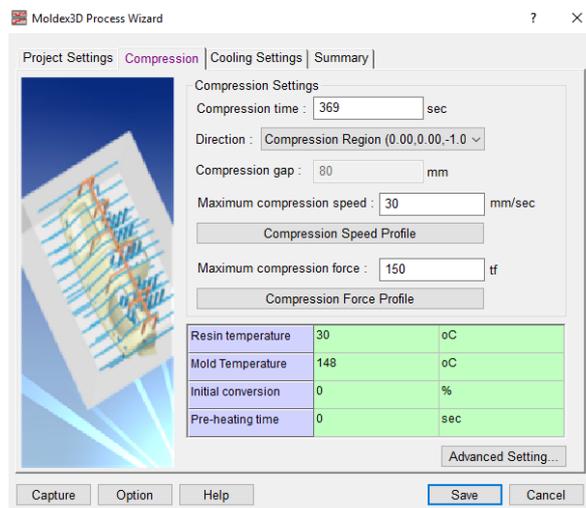


Figura 7.3: Parametri di Processo

In figura sono indicati circa 370 secondi come *compression time*, ma questo valore necessita di essere contestualizzato. Infatti, durante la simulazione questo tempo viene suddiviso in tre fasi:

- da 0 a 8 secondi il materiale passa dallo stato solido a quello liquido, riempiendo la cavità dello stampo;
- da 8 a 95 secondi avviene la fase di compressione del materiale nello stampo. In questo caso, infatti, la pressa passa da un controllo in velocità a quello in forza;
- da 95 a 370 secondi si procede alla cura del materiale.

La temperatura degli stampi è tarata sulla base delle indicazioni date dal fornitore del materiale e la temperatura che viene indicata come *resin temperature* è la temperatura indicativa delle cariche un attimo prima di essere stampate. Infatti, c'è un lasso di tempo che intercorre dalla posa delle cariche sullo stampo caldo fino a quando non avviene la vera e propria compressione.

Un risultato interessante da osservare che ci fornisce la simulazione di processo è anche la posizione delle linee di giunzione.

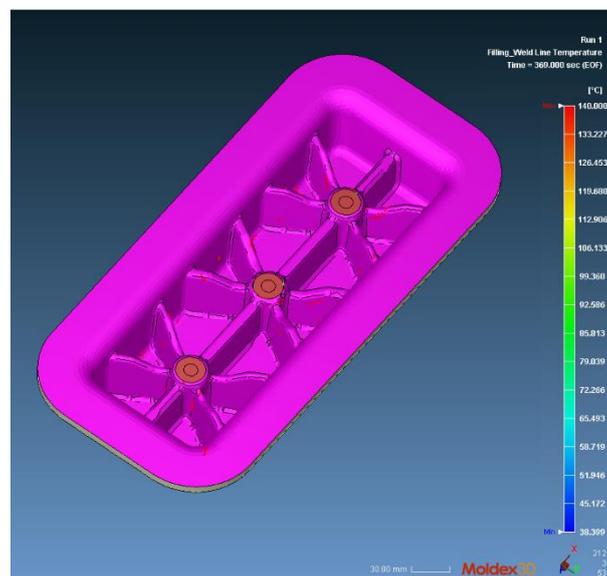


Figura 7.4: Linee di giunzione in funzione della temperatura

In Figura 7.4 sono rappresentate le linee di giunzione in funzione della temperatura, ovvero, il loro colore è indicativo della temperatura alla quale i flussi si incontrano. Più la temperatura è alta, quindi tendente al rosso, meno la linea di giunzione potrà portare problemi di natura strutturale al componente finito. Possiamo vedere che solo alcune giunzioni in prossimità dell'inserto centrale sono ad una temperatura

bassa ed infatti, come vedremo successivamente, quella zona si rivelerà critica come resistenza meccanica.

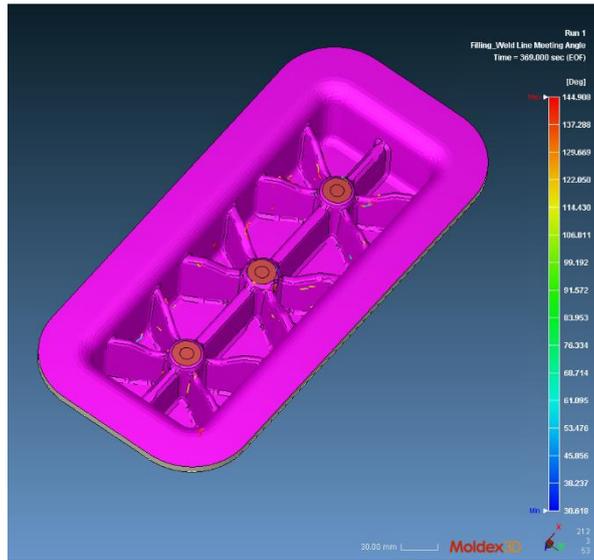


Figura 7.5: Linee di giunzione in funzione dell'angolo con cui i flussi si incontrano

Moldex3D può anche dirci con quale angolo si incontrano i flussi che creano la linea di giunzione. Infatti, quando una linea di giunzione si forma grazie all'unione di due flussi che si uniscono formando un angolo maggiore di  $135^\circ$ , essa può definirsi *meld line*. Queste indurranno un indebolimento minore al componente rispetto ad una *weld line* formatasi, ad esempio, in seguito all'unione di due flussi uniti “di punta”.

Un ulteriore risultato molto importante che è in grado di fornirci il software, è il grado di cura del materiale nel tempo.

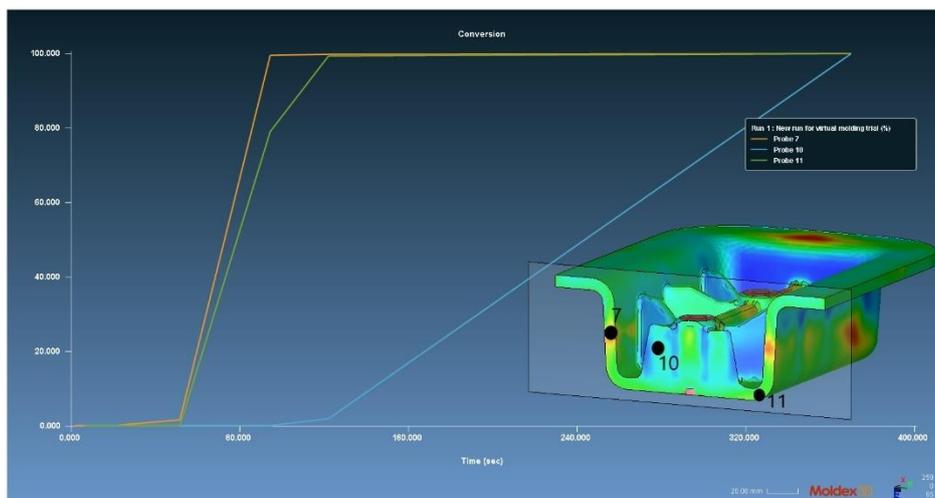


Figura 7.6: Grado di cura in funzione del tempo

In questo caso possiamo vedere come si evolve la cura del materiale termoidurente nello stampo durante tutto il processo di stampaggio in ogni punto del componente. Come si vede, la cura del materiale inizia dopo la fase di compressione e quindi nel momento in cui il materiale incomincia a passare dallo stato liquido a quello solido. In questo caso, i punti evidenziati esibiscono tempi diversi per la cura perché gli spessori sono differenti. Nei punti in cui si hanno piccoli spessori, la cura del materiale avverrà in fretta mentre nel caso in cui ci sia uno spessore importante, il tempo per curare il materiale sarà necessariamente più grande per via del maggior calore da fornire. Questi sono parametri virtuali che ci dicono che alla fine del processo si otterrà una cura del materiale al 100%, ma per avere una comparazione con il componente reale stampato, potrebbe essere utile fare delle analisi DSC che ci forniscono il grado di cura del componente finito. Bisogna infatti ricordare che un materiale solido non è indice di una cura completa, perché la solidificazione può avvenire anche se il materiale non è totalmente reticolato. Nel caso in cui avvenga questa condizione, il materiale non sarà in grado di esprimere il massimo delle sue performance da un punto di vista strutturale.

Un ultimo risultato che ci restituisce il software di processo, forse il più importante per la nostra applicazione, è il tensore orientamento delle fibre nel componente, funzione dello scorrimento del materiale nello stampo.

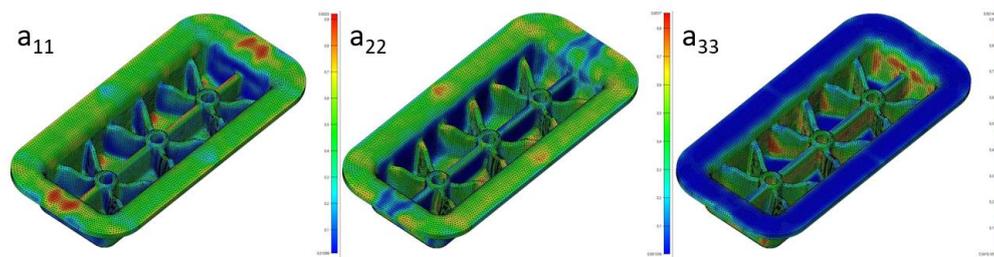


Figura 7.7: Componenti principali del tensore orientamento delle fibre

In Figura 7.7 sono rappresentate le componenti  $a_{11}$ ,  $a_{22}$  e  $a_{33}$  del tensore orientamento che, se prese punto per punto, sommate devono portare ad un risultato pari a 1, riprendendo la formula (5.5)

$$a_{11} + a_{22} + a_{33} = 1 \quad (7.1)$$

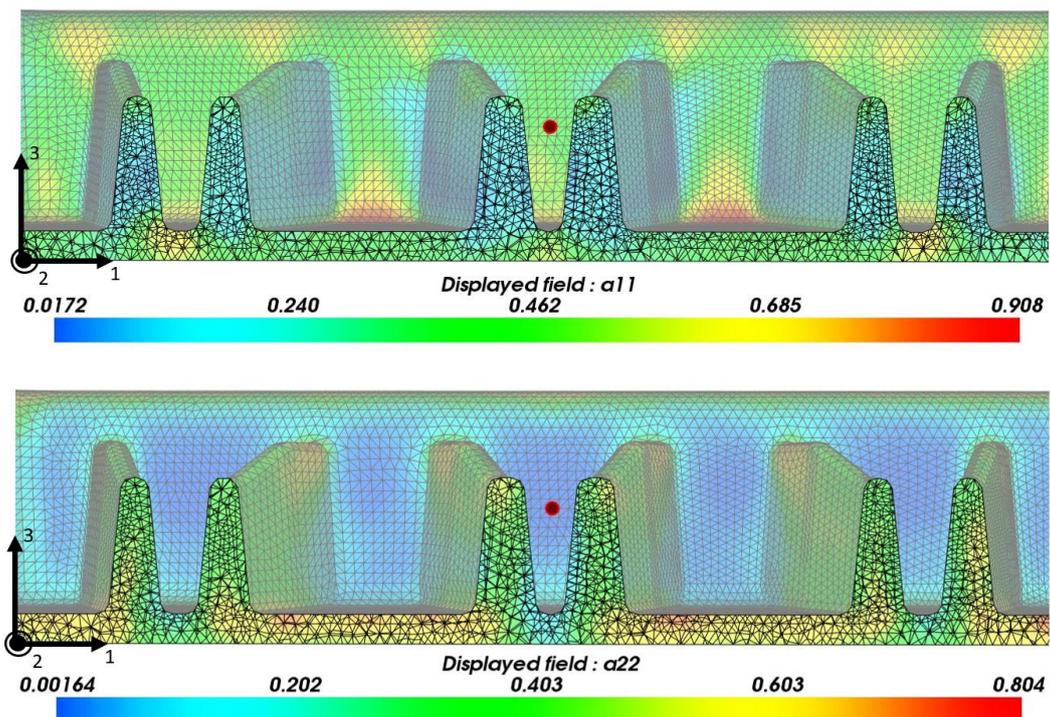
Le direzioni 1,2 e 3 sono rispettivamente associate alle direzioni x, y e z del componente. Rispetto ad un materiale polimerico tradizionale senza fibre, in questo caso per validare la simulazione di processo è necessario osservare se nel

componente reale, la disposizione delle fibre è simile a quella prevista dalla simulazione. Per fare questa analisi è necessario fare delle rilevazioni tomografiche che attraverso delle scansioni, rilevano l'orientazione delle fibre nel pezzo. Queste rilevazioni non sono semplici perché le densità di fibra e matrice sono simili e quindi è necessario dotarsi di macchinari con una risoluzione molto elevata. Queste rilevazioni non vengono condotte direttamente dalla Marelli, ma da aziende esterne che grazie ai loro tomografi molto precisi, sono in grado di fornire l'orientazione delle fibre. In questo caso non è stata fatta questa analisi tomografica, ma possiamo fare comunque delle considerazioni. Infatti, grazie ad una sezione virtuale e reale del componente è possibile vedere qual è la disposizione finale delle fibre. Di seguito possiamo vedere il dimostratore sezionato:



Figura 7.8: Dimostratore sezionato

Nelle seguenti immagini, il risultato che ci fornisce la simulazione di processo:



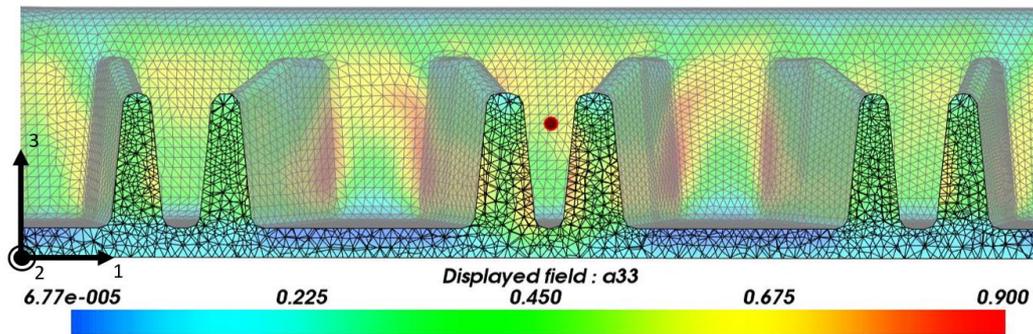


Figura 7.9: Dall'alto verso il basso, le componenti principali del tensore orientamento delle fibre nella sezione

Se facciamo un confronto tra i risultati numerici e quelli sperimentali possiamo osservare una certa analogia. Nella sezione inferiore orizzontale la simulazione evidenzia una orientazione delle fibre prettamente planare lungo le direzioni 1 e 2 e la stessa cosa la si può osservare nel componente reale sezionato. Invece se ci si sposta lungo le nervature si può osservare che le fibre incominciano ad orientarsi lungo la direzione 3, che è quella di scorrimento nello stampo e la stessa cosa si verifica nella simulazione. Infatti, la componente  $a_{11}$  diventa trascurabile mentre le componenti  $a_{22}$  e  $a_{33}$  diventano prevalenti. I risultati confermano dunque la precisione da parte del simulatore nel prevedere la disposizione delle fibre.

Una considerazione interessante che la sezione reale del componente ci permette di fare è l'analisi dei difetti. Infatti, in Figura 7.8 possiamo chiaramente vedere che sono presenti delle zone in cui ci sono dei vuoti, come se fosse avvenuto un distacco. Questa tipologia di difetto era stata menzionata anche nella ricerca di Martulli [14] mostrata nel Paragrafo 5.2. Nei successivi capitoli, quando analizzeremo le zone di rotture in seguito ad un test di resistenza al collasso, vedremo che le suddette zone con i difetti non saranno oggetto di rottura. Il motivo può essere ricondotto al fatto che quella zona, sulla base del tipo di carico, è effettivamente scarica e quindi l'indebolimento causato dal difetto non è significativo. Anche in questo caso, per avere una idea più chiara della eventuale presenza di difetti e della loro posizione ed estensione, si raccomanda di fare un'analisi tomografica dettagliata di tutto il componente.



## 8. Definizione Carta Materiale

A questo punto, una volta che la simulazione di processo è conclusa, abbiamo tutte le informazioni riguardanti l'evoluzione del processo tecnologico e le conseguenze che esso porta nel componente finale. Per poter fare un'analisi strutturale, abbiamo però bisogno di sapere come si comporta il materiale se sottoposto ad una sollecitazione esterna. A differenza di un materiale metallico, in questo caso abbiamo a che fare con un materiale anisotropo in cui l'orientazione delle fibre influisce fortemente sulle proprietà meccaniche del materiale. Durante la caratterizzazione abbiamo potuto osservare il suo comportamento se sollecitato in direzione longitudinale, diagonale a 45° e trasversale rispetto alla direzione di scorrimento nello stampo, ma dobbiamo sapere come si comporta se sollecitato in altre direzioni. Inoltre, dobbiamo sapere come variano le proprietà meccaniche da un punto ad un altro perché le direzioni e le velocità di scorrimento sono differenti punto per punto e quindi lo saranno anche le proprietà meccaniche. Quello che dobbiamo fare è quindi investigare l'anisotropia del materiale partendo da un'analisi micromeccanica, a livello di fase, per poi poterci spostare sulla macro scala analizzando il materiale come se fosse un continuo. Per farlo, utilizziamo il software multi-scala Digimat.

Le considerazioni che verranno ora mostrate seguono il processo illustrato nel manuale del software Digimat [25].

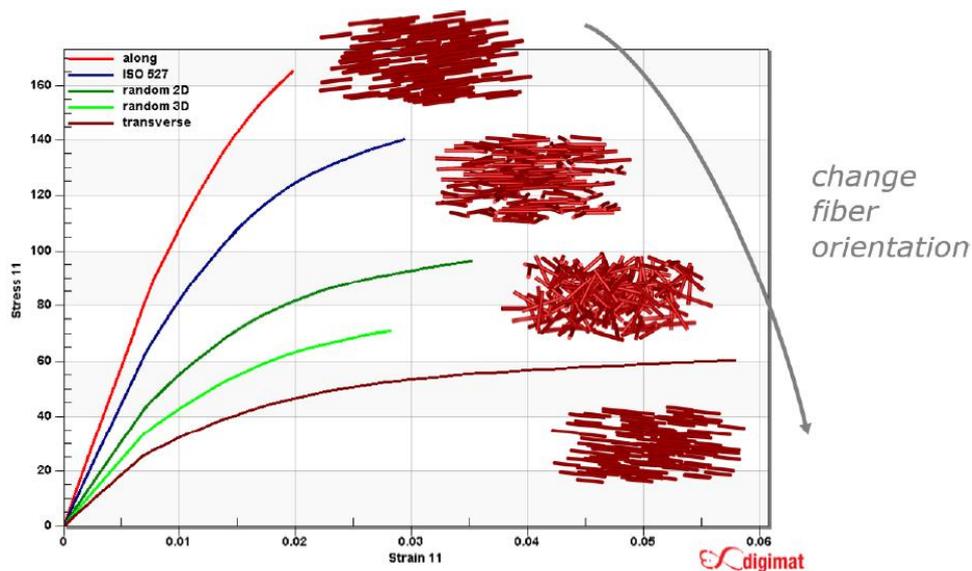


Figura 8.1: Tipiche curve sforzo-deformazione in funzione dell'orientamento delle fibre

## 8.1. Approccio Multi Scala

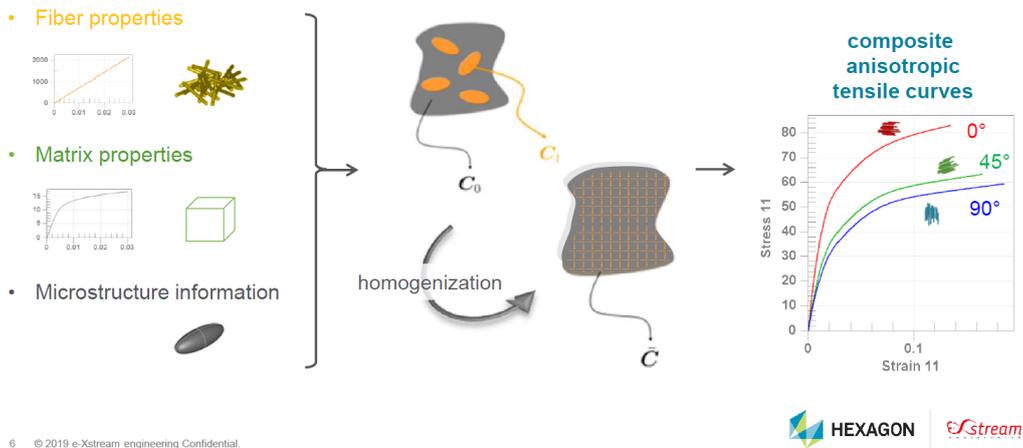


Figura 8.2: Schematizzazione del processo di definizione della carta materiale

Quello che si fa è un modello micromeccanico utilizzando un approccio multi-scala che sia in grado di prevedere le interazioni tra le proprietà macroscopiche e microscopiche del componente, partendo dalle proprietà della matrice e del rinforzo, come illustrato in Figura 8.2. Infatti, dobbiamo distinguere il nostro materiale composito secondo due scale: una microscopica in cui il materiale è eterogeneo, e una macroscopica in cui nel complesso non si osservano distinzioni e c'è una omogeneità globale. Il passaggio tra una scala e l'altra avviene grazie all'RVE, un elemento volumetrico rappresentativo del materiale in cui, su scala microscopica è abbastanza grande da poter contenere tutti gli elementi e le caratteristiche eterogenee del materiale, ma in scala macroscopica è sufficientemente piccolo che può essere visto come un punto materiale omogeneo.

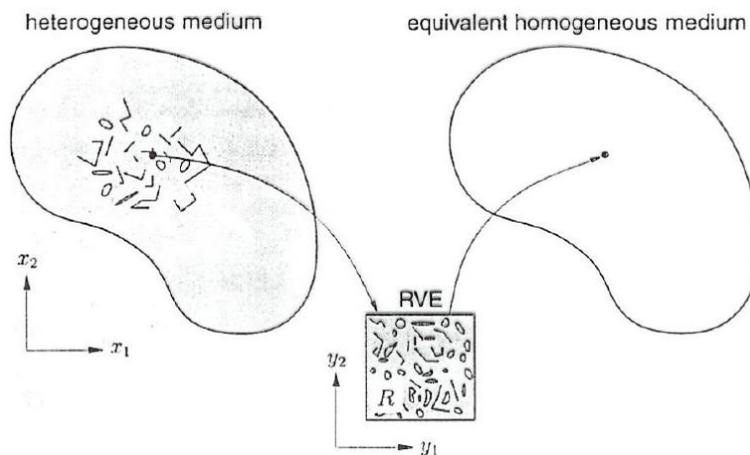


Figura 8.3: Transizione Micro-Macro tramite l'RVE

## 8.2. Mean Field Homogenization

Il processo che ci porta da un materiale eterogeneo ad uno omogeneo è chiamato omogeneizzazione.

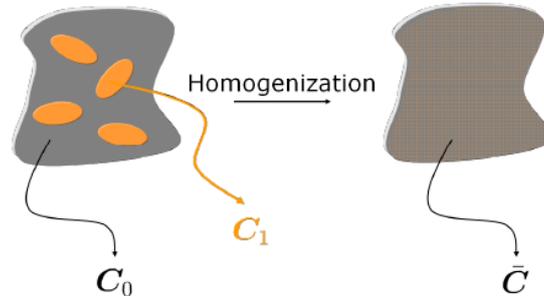


Figura 8.4: Idea di Omogeneizzazione

Da un punto di vista della meccanica del continuo, il problema dell'omogeneizzazione si può vedere nel seguente modo: nella macro-scala, in ogni macro-punto materiale, se noi sappiamo il macro strain possiamo trovare il macro-stress e viceversa, quindi possiamo dire:

$$\text{Relazione } \mathbf{E} \text{ e } \boldsymbol{\sigma} \Leftrightarrow \text{Relazione } \langle \boldsymbol{\varepsilon} \rangle \text{ e } \langle \boldsymbol{\sigma} \rangle$$

dove  $\langle \boldsymbol{\varepsilon} \rangle$  e  $\langle \boldsymbol{\sigma} \rangle$  sono i micro strain e stress mediati nell'RVE. Ergo, si può esplicitare il problema in maniera molto semplice: trovare la macro-rigidezza tale per cui:

$$\langle \boldsymbol{\sigma} \rangle = \bar{\mathbf{C}} : \langle \boldsymbol{\varepsilon} \rangle \quad (8.1)$$

Il problema fondamentale che l'omogeneizzazione intende risolvere è proprio questo: trovare un equivalente materiale omogeneo che abbia la stessa macro-rigidezza del reale materiale composito eterogeneo, soggetto alle stesse condizioni al contorno. Questa transizione di scala è possibile farla grazie a quella che viene definita *Mean Field Homogenization (MFH)*.

Questa omogeneizzazione si pone l'obiettivo di risolvere i livelli di stress e strain mediati sul volume sia per quanto riguarda l'RVE sia per quanto riguarda ogni fase presente nel materiale. Ci sono diversi modelli MFH, dove i più noti e semplici sono quelli di Voigt e Reuss, che sono stati citati nei Paragrafi 3.1.1. e 3.1.2..

Il modello di Voigt assume che la macro-rigidezza è la media in volume della micro-rigidezza e il modello di Reuss che la macro-compliance (l'inverso della rigidezza) è la media in volume della micro-compliance.

Questi modelli però non sono appropriati per una descrizione precisa dei livelli di stress e strain in tutto il componente perché considerano che i suddetti siano uniformi in tutto il componente, che non è vero. Inoltre, considerando l'isotropia di matrice e rinforzo, il modello predice un comportamento isotropo del composito, senza tenere conto della forma e dell'orientamento delle fibre e quindi giungendo a delle conclusioni non affidabili.

Se studiamo un composito costituito da due fasi, una matrice e un rinforzo sotto forma di inclusione (inclusioni tutte uguali come materiale, forma e orientazione), possiamo scrivere lo strain medio volumetrico nell'RVE:

$$\langle \varepsilon \rangle_{\omega} = \nu_0 \langle \varepsilon \rangle_{\omega_0} + \nu_1 \langle \varepsilon \rangle_{\omega_1} \quad (8.2)$$

Dove 0 e 1 rappresentano rispettivamente matrice e fibra,  $\nu_0$  e  $\nu_1$  la loro frazione in volume nell'RVE. Questa relazione è valida anche per il micro-stress.

Ogni modello MFH può essere definito da quelli che vengono chiamati tensori di concentrazione degli strain, in modo tale che:

$$\langle \varepsilon \rangle_{\omega_1} = \mathbf{B}^{\varepsilon} : \langle \varepsilon \rangle_{\omega_0}, \quad \langle \varepsilon \rangle_{\omega_1} = \mathbf{A}^{\varepsilon} : \langle \varepsilon \rangle_{\omega} \quad (8.3)$$

Ergo, lo strain medio nelle inclusioni è legato allo strain medio nella matrice grazie al primo tensore e lo strain medio nelle inclusioni è legato allo strain medio sull'intero RVE. I due tensori non sono indipendenti e il secondo può essere estrapolato grazie al primo:

$$\mathbf{A}^{\varepsilon} = \mathbf{B}^{\varepsilon} : [\nu_1 \mathbf{B}^{\varepsilon} + (1 - \nu_1) \mathbf{I}]^{-1} \quad (8.4)$$

A questo punto, se consideriamo un materiale elastico lineare possiamo ottenere la macro-rigidezza:

$$\bar{\mathbf{C}} = [\nu_1 \mathbf{C}_1 : \mathbf{B}^{\varepsilon} + (1 - \nu_1) \mathbf{C}_0] : [\nu_1 \mathbf{B}^{\varepsilon} + (1 - \nu_1) \mathbf{I}]^{-1} \quad (8.5)$$

Nel caso del modello di Voigt e di Reuss, abbiamo rispettivamente queste condizioni:

$$\mathbf{B}^{\varepsilon} = \mathbf{I}, \quad \mathbf{B}^{\varepsilon} = \mathbf{C}_1^{-1} : \mathbf{C}_0 \quad (8.6)$$

Che costituiscono il limite superiore e inferiore per quanto riguarda la rigidezza.

I sofisticati modelli MFH utilizzano come base la formulazione di *Eshelby*.

### 8.3. Eshelby's Problem

Nel 1957 Eshelby propose e risolse il seguente problema. In un corpo infinito di rigidità uniforme  $C_0$ , un volume di forma ellissoidale ( $I$ ) viene estratto dal corpo stesso, soggetto ad un *eigenstrain*  $\varepsilon^*$  (una deformazione che non è conseguenza di una tensione applicata, ma ad una differenza di temperatura ad esempio) e poi reinserito nel corpo da cui è stato estratto.

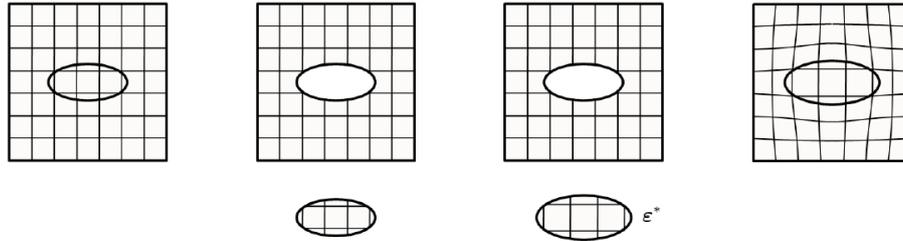


Figura 8.5: Eshelby's Problem

Eshelby trovò che la deformazione all'interno del volume ellissoidale ( $I$ ) era uniforme e legata all'eigenstrain nel seguente modo:

$$\varepsilon(x) = \zeta(I, C_0) : \varepsilon^*, \quad \forall x \in (I) \quad (8.7)$$

dove  $\zeta(I, C_0)$  è il tensore di Eshelby che dipende dalla rigidità  $C_0$  e dalla forma (non dalla dimensione) e orientazione di  $I$ . La formulazione di Eshelby dà la possibilità di risolvere il problema per una singola inclusione.

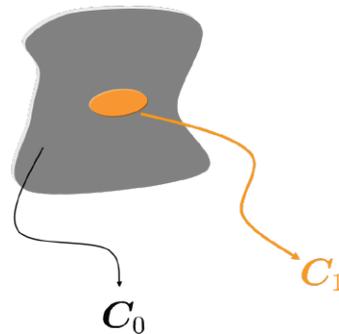


Figura 8.6: Singola inclusione in un corpo infinito

In questo caso abbiamo un corpo infinito composto da una matrice di rigidità  $C_0$  e una inclusione ellissoidale ( $I$ ) di rigidità  $C_1$ . Il corpo ha come condizione al contorno uno spostamento lineare provocato da uno strain remoto  $\mathbf{E}$ . Utilizzando la soluzione di Eshelby, si può risolvere il problema. Lo strain nell'inclusione è uniforme ed è legato al macro-strain nel seguente modo:

$$\varepsilon(x) = \mathbf{H}^\varepsilon(I, C_0, C_1) : \mathbf{E}, \quad \forall x \in I \quad (8.8)$$

dove  $\mathbf{H}^\varepsilon$  è il tensore degli strain della singola inclusione, tale che:

$$\mathbf{H}^\varepsilon(I, C_0, C_1) = \{\mathbf{I} + \zeta(I, C_0) : C_0^{-1} : [C_1 - C_0]\}^{-1} \quad (8.9)$$

Sulla base della teoria di Eshelby, quindi, avere un'inclusione all'interno di una matrice sotto l'azione di un carico esterno è uguale ad avere un'inclusione sottoposta ad un *eigenstrain* all'interno di una matrice esente da qualsivoglia carico esterno applicato. Questa considerazione evidenzia quindi che è possibile risolvere gli stress e gli strain prodotti dalla presenza di un'inclusione di rigidezza  $C_1$  in una matrice di rigidezza  $C_0$  rendendo questa formulazione equivalente ad una in cui inclusione e rigidezza hanno stessa rigidezza  $C$  e l'inclusione è soggetta ad un *eigenstrain*. La risoluzione di questo problema utilizza le funzioni di Green che però esulano da questa trattazione e che quindi non verranno trattate in dettaglio [26].

#### 8.4. Modello di Mori – Tanaka

Nel nostro caso però non abbiamo una singola inclusione, ma ne abbiamo di più. Infatti, generalmente abbiamo una matrice di rigidezza  $C_0$  e diverse inclusioni di rigidezza  $C_1$ . In questo caso, a differenza del caso precedente, non abbiamo una soluzione analitica, ma dobbiamo utilizzare dei modelli facendo delle assunzioni. Un modello affidabile e molto utilizzato è quello di *Mori – Tanaka*.

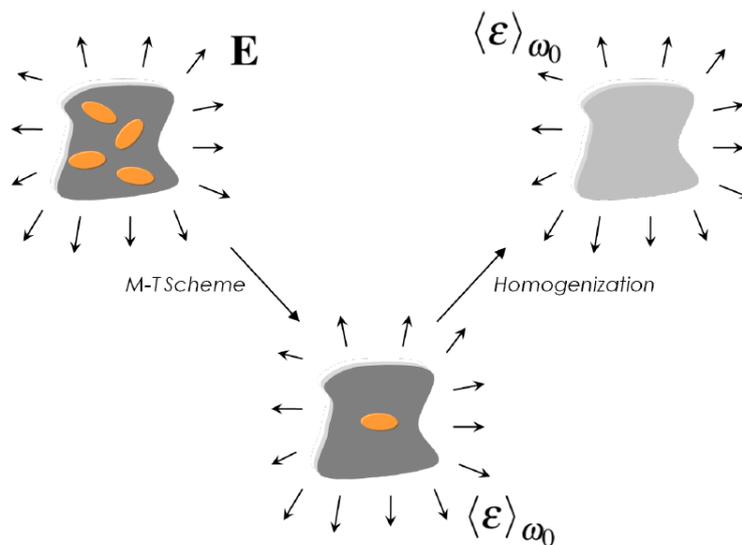


Figura 8.7: Modello di Mori – Tanaka

Questo modello deriva da un'approssimazione del problema formulato da Eshelby. Infatti, possiamo scrivere il tensore degli strain che lega gli strain mediati sul volume per tutte le inclusioni, a partire dallo strain medio della matrice:

$$\mathbf{B}^\varepsilon = \mathbf{H}^\varepsilon(I, C_0, C_1) \quad (8.10)$$

che corrisponde esattamente al tensore degli strain formulato nel problema con la singola inclusione. Quindi, ogni inclusione dell'RVE si comporta come se fosse isolata nella matrice.

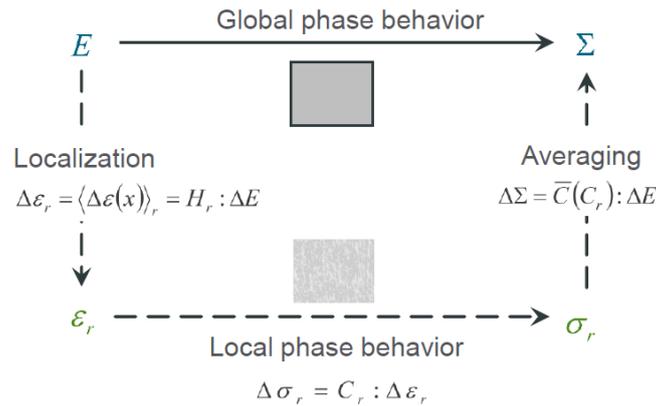


Figura 8.8: Transizione macro – micro - macro

In Figura 8.8 possiamo vedere i vari step che vengono seguiti durante la modellazione. Dal macro-strain andiamo a risolvere il micro-strain a livello di fase, successivamente risolviamo il micro-stress a partire dalla rigidità delle fasi, otteniamo la rigidità globale e poi risolviamo il macro-stress.

Se osserviamo tutto il processo di omogeneizzazione, a partire dalla definizione dell'RVE, possiamo osservare i seguenti passaggi.

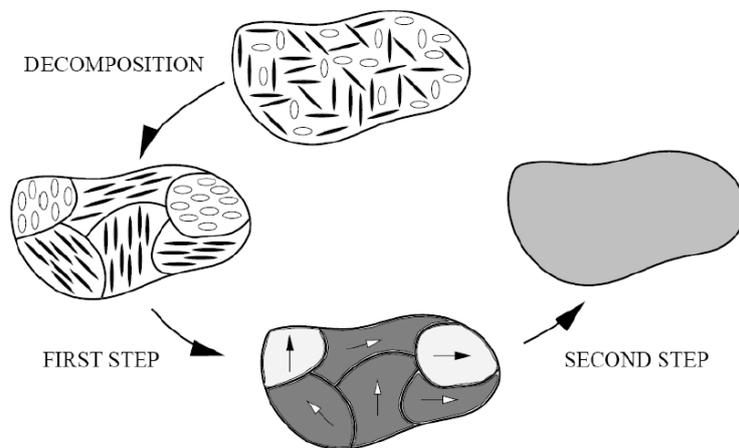


Figura 8.9: Processo di Omogeneizzazione

Il reale RVE del composito è sostituito da un modello di RVE che è un aggregato di tanti *pseudo-grani*. Ogni pseudo-grano occupa un dominio:  $\omega_{i,p}$  composto da due fasi, una matrice e delle inclusioni (i) con orientazioni da  $\mathbf{p}$  a  $\mathbf{p}+\mathbf{d}\mathbf{p}$  (Paragrafo 5.3). L'omogeneizzazione del modello di RVE è fatta in due step.

Nel primo, ogni pseudo-grano è omogeneizzato utilizzando un modello appropriato (nel nostro caso Mori – Tanaka). A questo punto, ogni grano è formato da inclusioni monodirezionali in cui è possibile utilizzare i modelli semplificati, ad esempio, quelli di Voigt e Reuss.

## 8.5. Modellazione SMC Bundles

Per poter applicare la teoria della *Mean Field Homogenization* è necessario fare delle assunzioni per quanto riguarda le inclusioni: le fibre devono essere rettilinee, con forma ellissoidale e devono essere uniformemente distribuite nello spazio. L'SMC difficilmente obbedisce a queste assunzioni perché nel componente finale le fibre non hanno una forma ellissoidale ma filiforme, possono assumere una geometria curvilinea e sono distribuite con ordinazione casuale. Per poter quindi applicare la teoria di omogeneizzazione è necessario fare una semplificazione e considerare le fibre raccolte in gruppi o pacchetti, definiti *bundles*.



Figura 8.10: Schematizzazione dei bundles

Questi bundles sono composti da fibra e matrice con forma ellissoidale e solo al loro interno si possono trovare le fibre, mentre al di fuori c'è solo matrice. Nella Figura 8.11 è possibile vedere gli step di omogeneizzazione per creare i bundles.

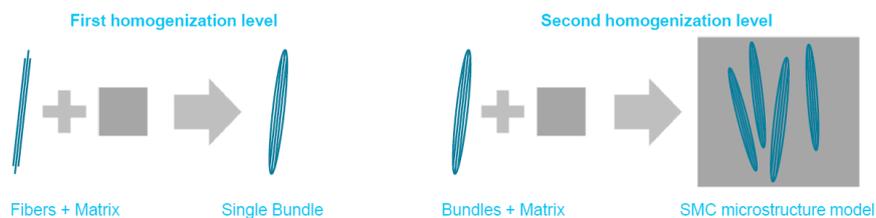


Figura 8.11: Creazione Microstruttura

I bundles vengono modellati con un comportamento elastico trasversalmente isotropico, con l'obiettivo di raggiungere la rigidità dell'SMC finale.

La forma e la composizione del bundle ci permette di trattarla adeguatamente come inclusione e quindi, passando dalla teoria di Eshelby, ci dà la possibilità di creare una carta materiale idonea a rappresentare fedelmente il materiale SMC.

## 8.6. Creazione della Carta Materiale

Per creare la carta materiale, è quindi necessario seguire i seguenti step:

- Inserire, e modificare se necessario, le proprietà di fibra e matrice in modo tale che la densità finale sia comparabile a quella reale dell'SMC.
- Modellare la dimensione e l'orientamento delle fibre in modo tale da creare dei modelli di provini a  $0^\circ$  e  $90^\circ$  comparabili meccanicamente a quelli reali sperimentati in laboratorio.

Il primo passo per completare gli step soprastanti è quello di inserire le proprietà di matrice e fibra. Inserendo un primo valore di densità per entrambi, si va a vedere se il valore finale del composito è uguale a quello di riferimento che ci è stato dato dal fornitore. Nel nostro caso, una volta inseriti dei valori presi dalla letteratura, si sono svolti due step iterativi per raggiungere la densità finale voluta che nei due materiali che abbiamo testato sono rispettivamente di 1.4 e 1.38 g/cm<sup>3</sup>. Una volta fatto ciò, si lavora sulle proprietà meccaniche singole di fibra e resina. In prima battuta si inseriscono anche in questo caso dei dati che derivano in parte dai fornitori e in parte dalla letteratura, così da poter far combaciare i moduli di elasticità in direzione assiale e trasversale. Di seguito si riportano solo i passaggi per il *Mat1*.

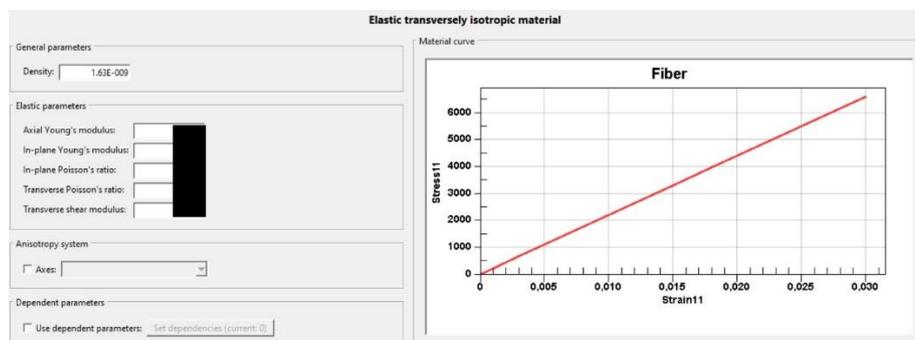


Figura 8.12: Proprietà Fibra

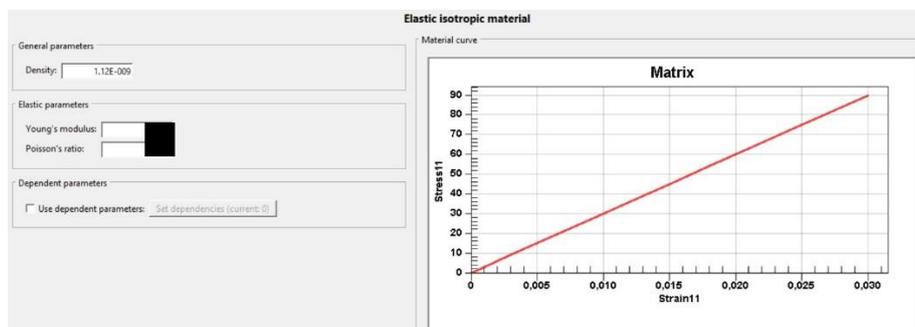


Figura 8.13: Proprietà Matrice

Si può vedere dai grafici che in entrambi i casi sono stati settati dei materiali che esibiscono un comportamento elastico lineare. Si è optato per questa scelta perché l'implementazione nel software di un materiale elastoplastico per la resina comportava una complicazione e poi perché si è considerato che questa impostazione non avrebbe portato ad errori significativi. Infatti, se si osservano le curve caratteristiche del materiale (nel Capitolo 6) si può vedere che non esibiscono un brusco cambiamento di pendenza tipica della transizione tra comportamento elastico e quello plastico, ma le curve hanno un andamento sempre piuttosto lineare giustificato dal fatto che nei provini si osserva una rottura fragile, non duttile. Infine, il decadimento delle proprietà meccaniche del materiale, tipicamente nel range plastico di deformazione, verrà modellato attraverso il danneggiamento progressivo che sarà illustrato successivamente.

A questo punto ci si ritrova con dei valori di modulo elastico che sono vicini a quelli reali, ma non ancora sufficientemente accurati. Per raggiungere un valore molto vicino a quelli misurati sperimentalmente, bisogna svolgere dei passaggi iterativi modificando la microstruttura del rinforzo fibroso. I parametri fondamentali che influiscono sulle proprietà meccaniche sono: forma dell'inclusione e orientamento preferenziale delle fibre.

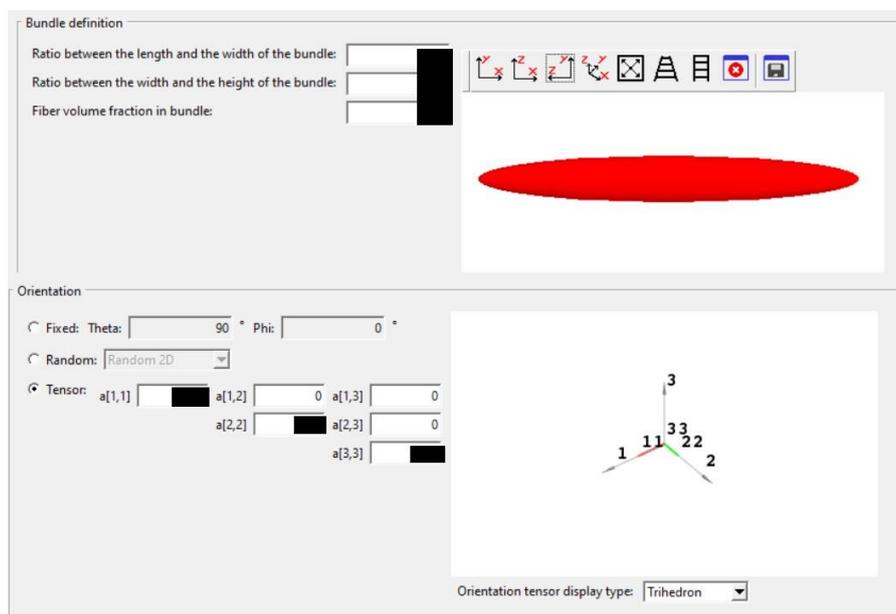


Figura 8.14: Microstruttura dell'inclusione

Dalla Figura 8.14 si può notare come la componente  $a_{33}$  del tensore sia molto piccola. Questo è motivato dal fatto che l'SMC, come abbiamo già detto in precedenza, non presenta mai delle fibre con una orientazione perpendicolare al piano, ma esse hanno sempre una distribuzione planare per via del metodo con cui si producono i rotoli. Inoltre, se si ricavano dei provini da una lastra piana, sarà molto difficile vedere delle fibre orientate perpendicolarmente al piano di stampaggio per via del fatto che lo scorrimento della resina sulla superficie planare dello stampo è responsabile dell'orientazione del rinforzo. Una volta settati tutti i parametri caratteristici del materiale, è possibile ottenere la nostra carta materiale.

Engineering constants	
	Value
E11	
E22	
E33	
nu12	
nu21	
nu13	
nu31	
nu23	
nu32	
G12	
G13	
G23	
Theta Angle 1	
Phi Angle 1	
Theta Angle 2	
Phi Angle 2	
Theta Angle 3	
Phi Angle 3	
Global density	1.4004E-009

Figura 8.15: Costanti Ingegneristiche del Materiale

## 9. Criterio di Danneggiamento

La definizione della carta materiale è fondamentale, ma non basta, perché a questo punto è necessario definire il modo in cui il materiale si danneggia e si rompe, per avere una visione completa sul comportamento del materiale.

Questo viene fatto implementando in Digimat degli indicatori di danneggiamento, chiamati *Failure Indicator*, che mettono in relazione gli stress presenti con i limiti di rottura rilevati sperimentalmente restituendo una indicazione di danneggiamento per ogni RVE. Gli indicatori sono valutati in un sistema di riferimento locale dell'RVE, dove la direzione 1 è quella concorde all'orientazione delle fibre, mentre la direzione 2 è quella trasversale. Queste informazioni derivano dall'omogeneizzazione degli pseudo grani con la relativa informazione del tensore orientamento delle fibre.

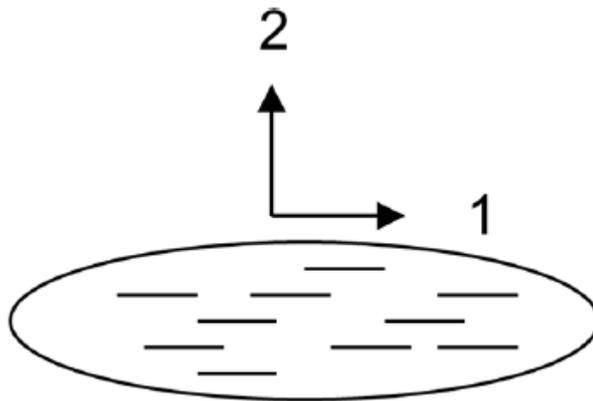


Figura 9.1: Sistema di riferimento locale

Per definire la rottura è necessario che si verifichi la seguente condizione:

$$F(\boldsymbol{\sigma}, \boldsymbol{\varepsilon}) \geq 1 \quad (9.1)$$

dove  $F(\boldsymbol{\sigma}, \boldsymbol{\varepsilon})$  è un indicatore rappresentativo del modello di rottura impostato.

Digimat mette a disposizione molteplici modelli di rottura disponibili per l'utente:

- Maximum component (stress or strain based);
- Tsai – Hill 2D/3D/Transv. Isotropic 3D;
- Tsai – Wu 2D/3D/Orthotropic 3D/Transv. Isotropic 3D;
- Multi – Component 2D/3D;
- Hashin 2D/3D
- Ecc...

Tutti questi modelli di danneggiamento sono stati prodotti negli anni in modo tale da poter ottenere una buona correlazione tra i risultati numerici e quelli sperimentali con diverse tipologie di materiali. Nel caso dell'SMC, il modello consigliato è quello *Multi – Component 3D Orthotropic*, perché è stato osservato sperimentalmente che riesce a raggiungere un buon livello di precisione. Questo criterio è *stress based* e utilizza 9 parametri indipendenti:

$$\begin{aligned}
 F_A(\boldsymbol{\sigma}) &= \frac{\sigma_{11}}{X_t} & F_F(\boldsymbol{\sigma}) &= -\frac{\sigma_{33}}{Z_c} \\
 F_B(\boldsymbol{\sigma}) &= -\frac{\sigma_{11}}{X_c} & F_G(\boldsymbol{\sigma}) &= \frac{|\sigma_{12}|}{S_{xy}} \\
 F_C(\boldsymbol{\sigma}) &= \frac{\sigma_{22}}{Y_t} & F_H(\boldsymbol{\sigma}) &= \frac{|\sigma_{13}|}{S_{xz}} \\
 F_D(\boldsymbol{\sigma}) &= -\frac{\sigma_{22}}{Y_c} & F_I(\boldsymbol{\sigma}) &= \frac{|\sigma_{23}|}{S_{yz}} \\
 F_E(\boldsymbol{\sigma}) &= \frac{\sigma_{33}}{Z_t}
 \end{aligned} \tag{9.2}$$

dove:

- $X_t, X_c$ : resistenza assiale a trazione e compressione;
- $Y_t, Y_c$ : resistenza trasversale a trazione e compressione;
- $Z_t, Z_c$ : resistenza a trazione e compressione perpendicolare al piano;
- $S_{xy}, S_{xz}, S_{yz}$ : resistenze a taglio.

Nel caso in cui uno di questi parametri superi il valore unitario, si registrerà la rottura.

Quando abbiamo definito il modello di danneggiamento, l'ultima cosa che ci rimane da fare è calibrare correttamente il danneggiamento progressivo. Infatti, l'obiettivo di questa funzione, è quello di conferire un graduale decadimento delle proprietà meccaniche al materiale che abbiamo in esame. Questa funzione è utile anche quando si lavora con lamine unidirezionali, in quanto una rottura in direzione trasversale non comporta una tangibile perdita di rigidità in direzione longitudinale rispetto le fibre.

Il danneggiamento progressivo può essere introdotto scegliendo fra tre diverse leggi: *Instantaneous*, *Linear* e *Power Law*.

Queste tre leggi differiscono nel modo in cui le proprietà meccaniche del materiale decadono sotto l'effetto del carico e per capire quale utilizzare è importante fare un confronto tra i risultati numerici e quelli sperimentali. Infatti, per decidere quale legge di danneggiamento può essere quella corretta è consigliabile svolgere prima una prova di collasso sperimentale, per capire quali sono le zone di rottura che esibisce il componente e quali sono i carichi reattivi che il materiale è in grado di restituire. Per quanto riguarda il *Mat1*, possiamo osservare nella seguente figura come la curva di collasso sia sensibilmente differente nel caso in cui si utilizzino leggi di danneggiamento differenti.

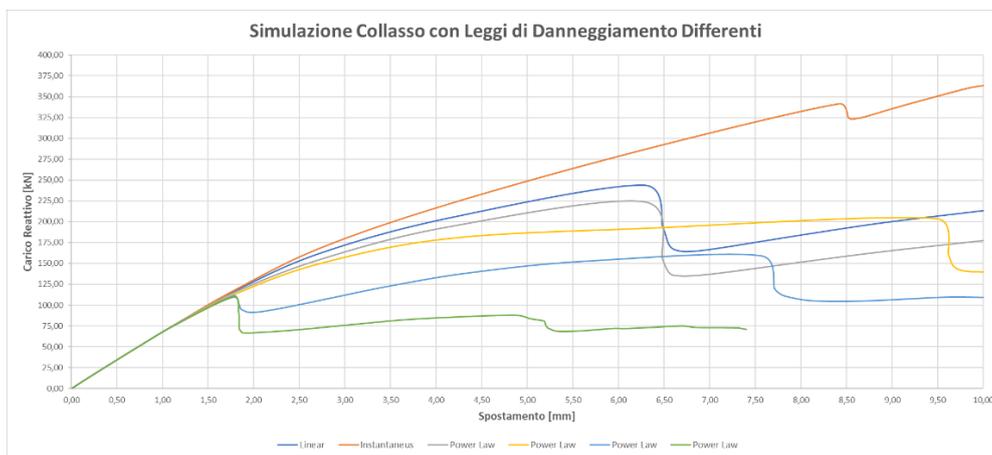


Figura 9.2: Danneggiamento Progressivo con Leggi Differenti

Nella documentazione Digimat [27] viene consigliato agli utenti di utilizzare la legge Power Law con il materiale SMC. Nel Capitolo 11 verrà mostrata con maggior dettaglio la curva di collasso scelta, ma possiamo dire che nel nostro caso sono state provate diverse leggi e quella che si è avvicinata maggiormente ai risultati sperimentali è appunto la Power Law. In questa legge vanno specificati 3 parametri: *Damage Equivalent Strain*, *Power Law Exponent* e *Maximum Damage*.

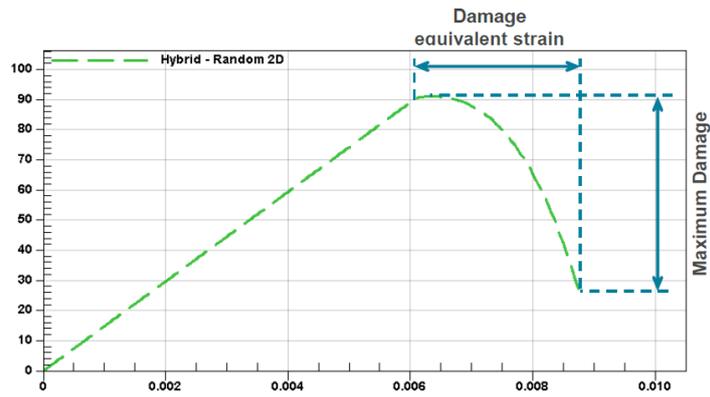


Figura 9.3: Esempio di danneggiamento progressivo Power Law

Nella Figura 9.3 si può vedere come agiscono questi parametri.

Il Power Law Exponent è l'esponente della curva, la pendenza, che se assume valore pari a -1 indica un comportamento lineare. Il Damage Equivalent Strain indica la differenza tra lo strain al massimo picco di stress e lo strain a rottura, mentre il Maximum Damage rappresenta il massimo danneggiamento possibile e controlla la minima rigidità residua.

## 10. Simulazione FEM

Lo step che dobbiamo svolgere ora è quello di unire tutti passaggi svolti fino a questo momento. Grazie alle prove di trazione sperimentali, abbiamo potuto definire la nostra carta materiale, inserendo un appropriato criterio di danneggiamento. Abbiamo a disposizione anche i dati che derivano dalla simulazione di processo e quindi se uniamo tutte queste informazioni usando il modello FEM come “ponte” di collegamento, possiamo svolgere finalmente la nostra simulazione.

La simulazione viene svolta utilizzando il modulo RP di Digimat e gli step che bisogna seguire sono quattro:

- *Structural Model*: in questo step viene inserito il modello FEM del nostro componente che ci servirà successivamente per svolgere la nostra analisi strutturale;
- *Digimat Material*: in questo caso viene richiamata la nostra carta materiale che abbiamo prodotto in Digimat-MF e Digimat-CAE;
- *Manufacturing Data*: si richiamano le informazioni riguardanti la simulazione del processo di compressione;
- *Solution Settings*: si definiscono le impostazioni per svolgere la simulazione.

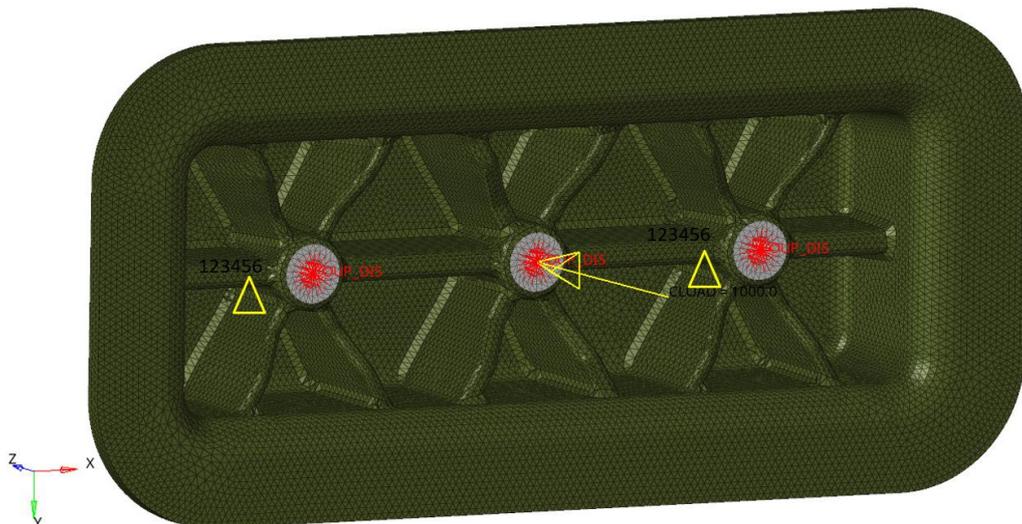


Figura 10.1: Modello FEM per l'analisi di Rigidezza

Prima di avviare la simulazione, osserviamo i modelli FEM utilizzati per fare le nostre analisi. Vogliamo condurre due analisi, una di Rigidezza e l'altra di Collasso. Per quanto riguarda l'analisi di Rigidezza, possiamo osservare in Figura 10.1 il modello FEM con le relative BC's. Oltre al corpo in composito e agli inserti in alluminio, sono presenti degli elementi *rigids* necessari per la corretta applicazione delle BC's sul modello. Negli inserti laterali sono vincolati tutti i gradi di libertà, mentre nell'inserto centrale viene applicata una forzante di 1000 N in direzione Z. La prova di rigidezza viene condotta anche quando la forzante non è sull'inserto centrale, ma su uno di quelli laterali. Il modello per la suddetta prova non viene mostrato perché è identico a quello di Figura 10.1, con l'unica differenza del punto di applicazione della forzante.

In Figura 10.2 è invece raffigurato il modello per l'analisi di Collasso.

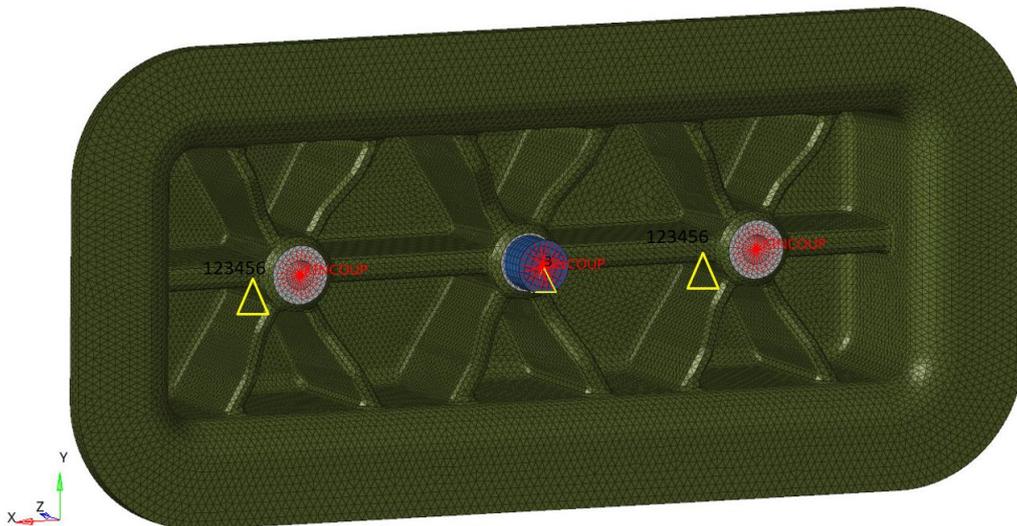


Figura 10.2: Modello FEM per l'analisi di Collasso

In questo caso oltre al materiale composito, gli inserti e i rigids, sono presenti anche le viti di collegamento tra il componente e il supporto della prova e l'attuatore di spinta. Nel modello in cui si vogliono ottenere solamente dei risultati in termini di rigidezza, non viene fatta una modellazione delle viti e dell'attuatore perché il loro contributo in termini di rigidezza è trascurabile ai fini della prova statica di rigidezza visto che gli spostamenti generati sono di entità ridotta. Le condizioni al contorno sono simili a quelle precedenti, ma a differenza di prima non abbiamo una forzante, ma uno spostamento imposto.

Infine, il contatto tra il materiale in composito e gli inserti in alluminio è stato simulato con dei *Contact Pairs Surface to Surface*.



*Figura 10.3: Modellazione del contatto inserto-SMC*

A questo punto, una volta pronto il modello FEM, si può importare la carta materiale creata precedentemente insieme ai risultati della simulazione di processo. Digimat, infatti, si occuperà di svolgere il processo di Omogeneizzazione e di calcolare gli stress per ogni RVE sulla base delle informazioni fornite dalla orientazione delle fibre (dalla simulazione di processo) e dalle proprietà meccaniche del materiale (dalla carta materiale).



## 11. Digital Twin

Siamo arrivati al punto conclusivo del lavoro, perché dopo che Digimat ha svolto la simulazione, possiamo prendere i suoi risultati e aprirli con un software di analisi Post Processing FEM come HyperView.

La prima analisi che andiamo a discutere è l'analisi di Rigidezza.

Come abbiamo detto nel capitolo precedente, l'analisi di Rigidezza è stata condotta sollecitando rispettivamente due punti nel modello, in un caso la forzante è stata applicata sull'inserto centrale e nell'altro caso in uno dei due inserti laterali. Nelle seguenti foto è possibile osservare la configurazione sperimentale adottata.



*Figura 11.1: In alto, rilevazione spostamento nel caso di forzante centrale. In basso, con forzante laterale.*

Nelle foto si può vedere che l'attuatore non applica la forzante direttamente sull'inserto, ma su una piattabanda di acciaio. Questo viene fatto per poter rilevare lo spostamento nel punto di applicazione del carico.

La stessa analisi viene fatta in ambiente virtuale, dove è possibile andare a plottare gli spostamenti nei nodi di tutto il nostro componente.

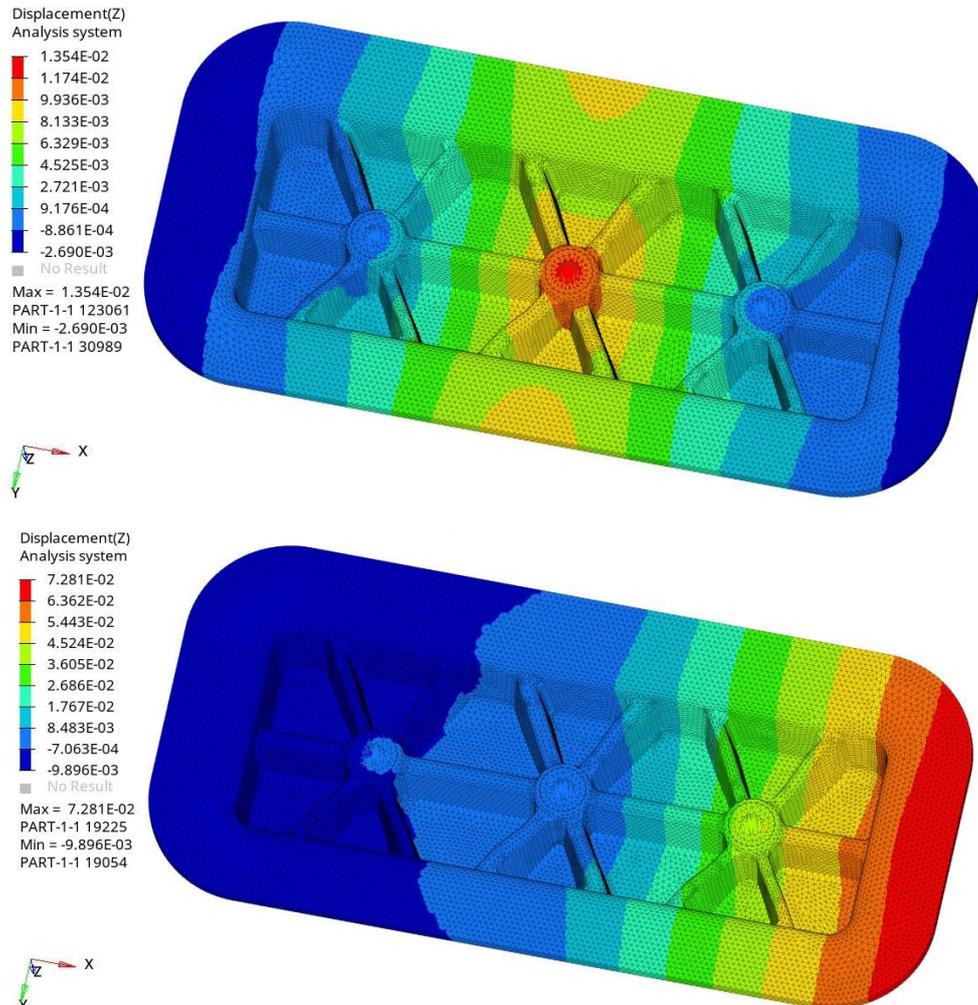


Figura 11.2: Plot degli spostamenti nodali nel caso con forzante su inserto centrale, sopra, e con forzante su inserto laterale, sotto.

Una volta individuata la posizione dei nodi su cui è applicata la forzante nei due casi, possiamo fare un confronto tra i dati sperimentali e quelli numerici.

	Forza	Spostamento	Rigidità Numerica	Rigidità Sperimentale
	[N]	[mm]	[N/mm]	[N/mm]
INSERTO CENTRALE	1000	1,27E-02	78740	49960
INSERTO LATERALE	1000	4,48E-02	22320	13405

Osservando i risultati ottenuti, si può osservare che la rigidità numerica è più grande di quella sperimentale di un fattore che va da 1.6 a 1.7 nei due casi rispettivamente. Si potrebbe dedurre che lo scarto tra i due risultati sia ingente, ma in realtà non è così. Queste tipologie di analisi sono complicate anche quando abbiamo a che fare con dei componenti metallici per via di alcune variabili che sono presenti durante la misurazione sperimentale (sensibilità degli strumenti di rilevazione, eventuali sorgenti di disturbo, qualità del componente prodotto, ecc...). In questo caso un numero ingente di variabili deriva anche dalle simulazioni virtuali perché il nostro punto di partenza, la carta materiale, è già essa una possibile fonte di errore in seguito al processo di omogeneizzazione. Da tenere in considerazione sono anche gli errori che possono provenire dalla simulazione di processo, perché non è semplice simulare correttamente la reologia dell'SMC nello stampo ed infine anche la modellazione FEM può comportare l'insorgenza di alcuni errori, mitigabili solo con molti loop di simulazione. Gli errori numerici e quelli sperimentali possono allora essere molteplici e quindi, un valore 1.6-1.7 di scarto tra le due rigidità è un risultato molto buono. I risultati si riferiscono solo al primo materiale utilizzato, il *Mat1*, ma da un punto di vista numerico sono analoghi a quelli mostrati dal *Mat2* in prova. Per quanto riguarda quest'ultimo, non è stato ancora possibile fare delle prove sperimentali al banco e quindi non ci sarà un confronto numerico – sperimentale per questo materiale. Un'analisi ancora più delicata da fare è quella di Collasso del componente.

In questa analisi, quello che si è fatto è stato spingere sull'inserto centrale del nostro componente con un attuatore, rilevare il carico reattivo sullo stesso fino a quando non si verifica la rottura del materiale e quindi osservare il finale e conseguente decadimento del carico reattivo. Le condizioni di prova sono le seguenti.

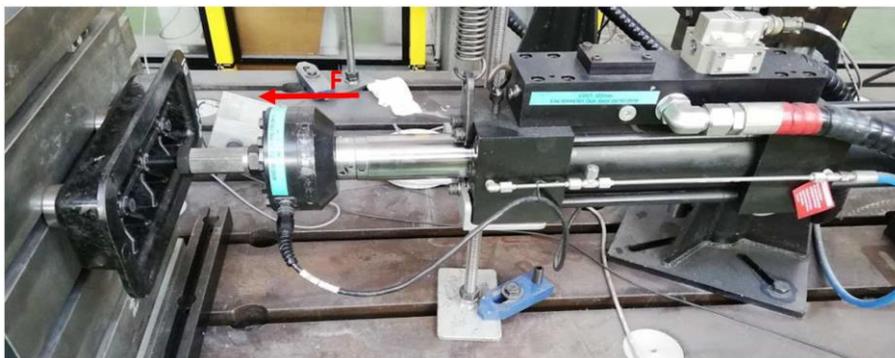


Figura 11.3: Configurazione sperimentale della prova di Collasso del componente

Durante le prove sperimentali sono stati ottenuti i seguenti risultati.

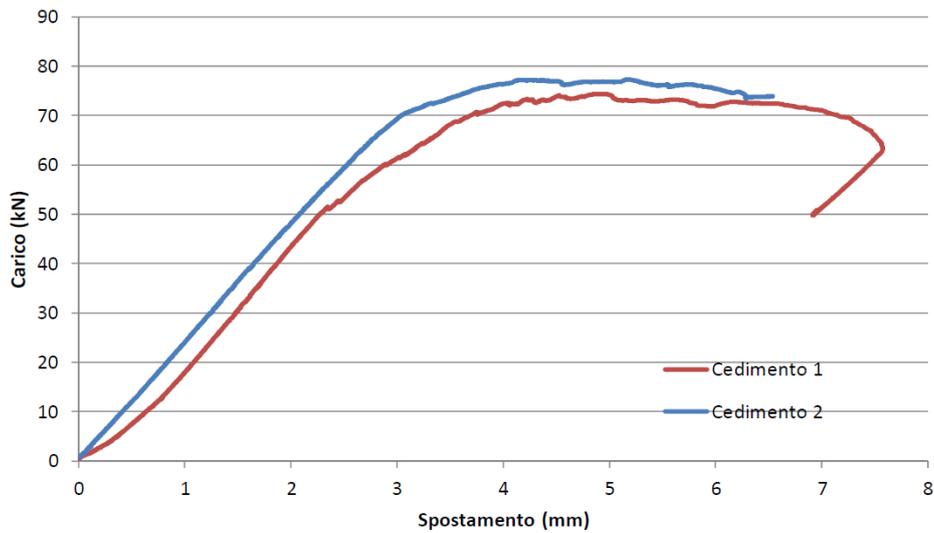


Figura 11.4: Carico Reattivo Sperimentale

Sono state effettuate due prove ed entrambe hanno mostrato il collasso del componente attorno ai 7 mm di spostamento.

Per quanto riguarda la simulazione numerica, è necessario fare una considerazione. Come è stato spiegato nel Capitolo 9, la curva che si ottiene plottando il carico reattivo, è fortemente condizionata dal tipo di legge di danneggiamento che viene scelta. In seguito a numerose prove, come è stato già detto, si è utilizzata una legge *Power Law*, che è stata quella in grado di simulare al meglio il comportamento sperimentale. Possiamo vedere di seguito il risultato della simulazione.

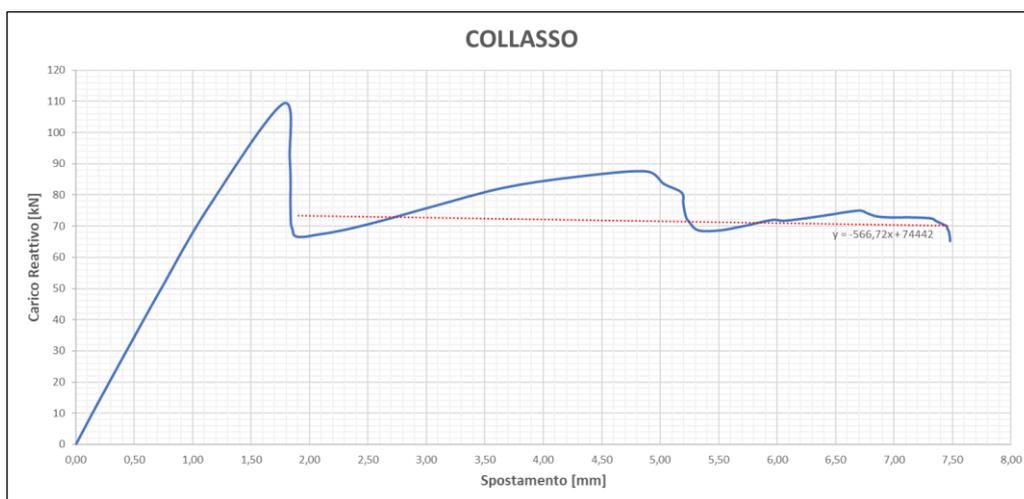


Figura 11.5: Carico Reattivo Numerico

Come abbiamo potuto vedere nella prova di Rigidezza, l'analisi numerica non riesce a rappresentare con assoluta precisione la prova sperimentale, ma anche in questo caso il risultato ottenuto si può ritenere soddisfacente. Infatti, si può subito notare come la rottura finale del materiale avvenga attorno ai 7-7.5 mm di spostamento, un risultato simile a quello ottenuto tra le due prove sperimentali. Inoltre, se si plotta una linea di tendenza del carico reattivo dopo il picco massimo, si potrà osservare che il risultato è anche in questo caso molto simile a quello che è stato misurato nella prova al banco. Questo è sinonimo di una corretta modellazione della curva di danneggiamento e delle proprietà inserite nella carta materiale. Numericamente si può vedere come nell'intorno di 1.75 mm di spostamento ci sia un picco di carico reattivo, una decrescita importante e poi nuovamente un incremento di carico reattivo con una rigidezza inferiore fino alla rottura. Questo comportamento sperimentalmente non è stato osservato.

Un aspetto da considerare è il tipo di informazione che si conferisce al software ed il tipo di analisi che svolge. Infatti, il software non si occupa di fare un'analisi di propagazione della cricca. Il modo in cui il materiale si danneggia è funzione dei limiti di rottura che abbiamo osservato sperimentalmente nella caratterizzazione, ma non del modo in cui si propaga la cricca. La nucleazione della cricca avverrà sicuramente prima del limite di rottura e il meccanismo di propagazione sarà impossibile da prevedere in ambiente virtuale. La sovrastima di rigidezza e l'impossibilità di svolgere una meticolosa analisi di propagazione della cricca ha portato a questa discrepanza iniziale tra l'analisi numerica e quella sperimentale.

Quando vengono condotte delle prove al banco, la presenza di un picco con una conseguente decrescita di carico reattivo, è anch'essa riscontrabile nel componente reale. Il materiale non si rompe ma continua ad esibire una certa resistenza, trovando una condizione di "assestamento", fino a quando la cricca non si propaga in maniera distruttiva. Nelle nostre prove al banco il materiale è invece subito passato in uno stato di assestamento. Il motivo può essere ricondotto al fatto che nelle prove al banco, a differenza di una simulazione numerica, c'è tutta una catena cinematica da tenere in considerazione e la rilevazione stessa del carico reattivo non è sempre così semplice. Infine, a differenza di altri casi in cui si conducono prove di collasso che introducono configurazioni simili a quelle di una trave a sbalzo con importanti distanze tra il punto di applicazione del carico e i vincoli, qui le distanze

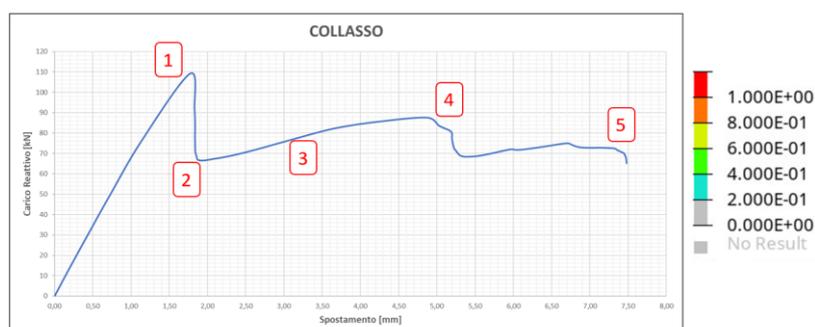
tra carico e vincoli sono ravvicinate e la configurazione è rappresentativa di una prova flessionale. Tra poco potremo vedere le zone di rottura, ma possiamo già dire che la loro configurazione è un'ulteriore indicazione perché a differenza di altri componenti dove l'innesco e la propagazione della cricca è locale in una zona ben definita, in questo caso l'innesco e la propagazione della cricca è in più punti del componente. Non c'è una sola zona che cede e perde rigidità, ma è un aspetto generalizzato. Tutte queste considerazioni sono esplicative della leggera, ma tangibile, differenza tra l'analisi sperimentale e quella numerica.

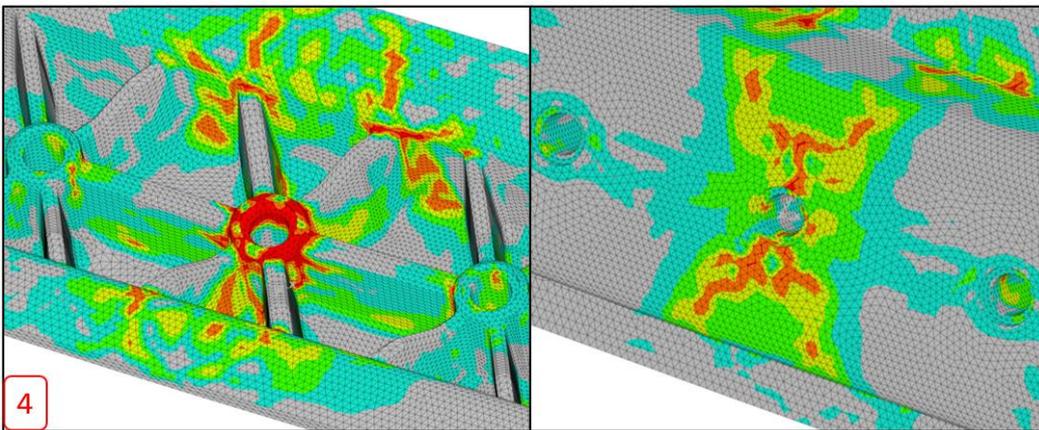
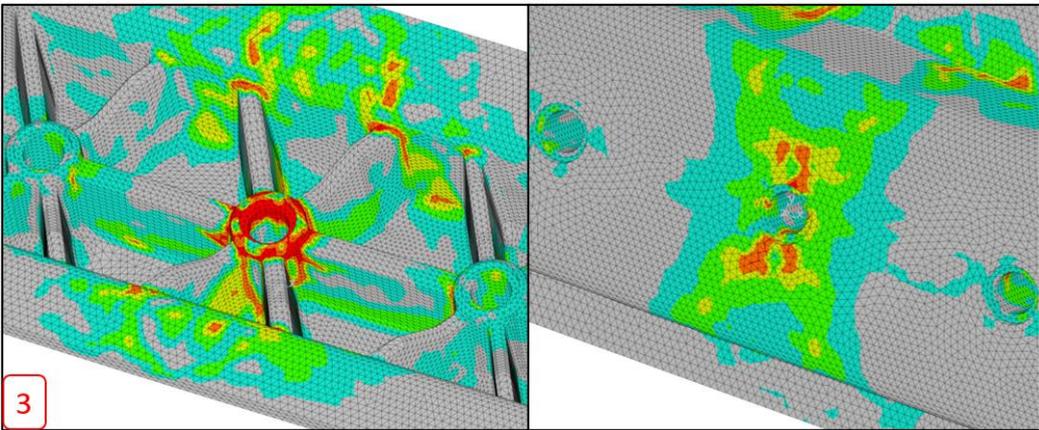
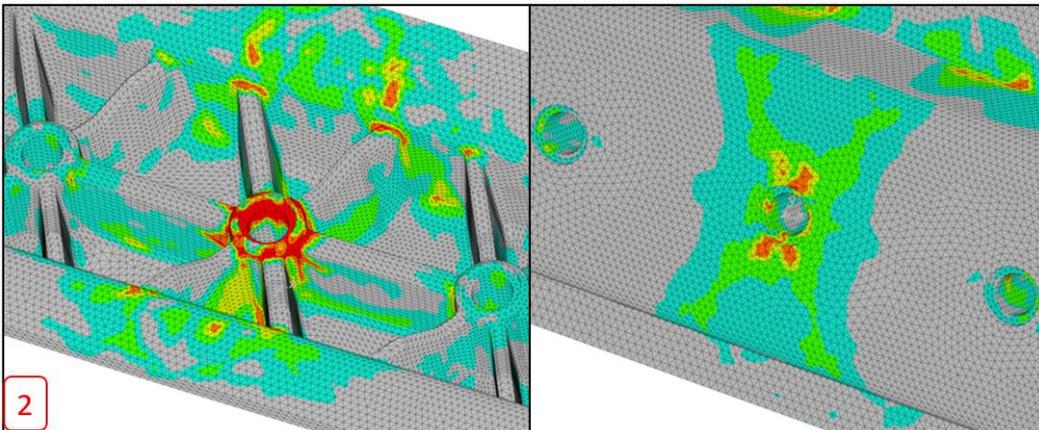
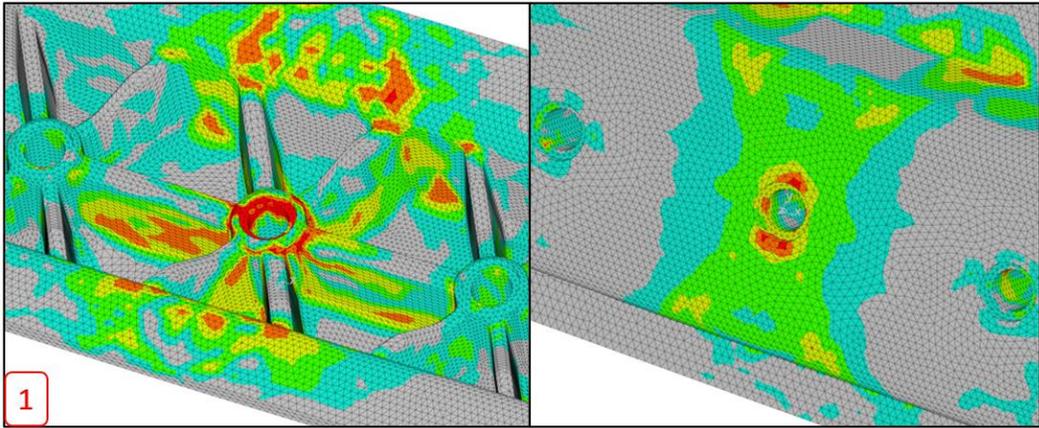
A questo punto i risultati ottenuti non sono ancora sufficienti per validare la nostra simulazione perché è importante vedere se è presente un'adeguata correlazione nelle zone di rottura del componente tra la simulazione numerica e la prova sperimentale. Nelle prove al banco, durante le prove di collasso, sono state osservate le seguenti zone di rottura.



Figura 11.6: Zone di Rottura Sperimentali

Per quanto riguarda la simulazione numerica.





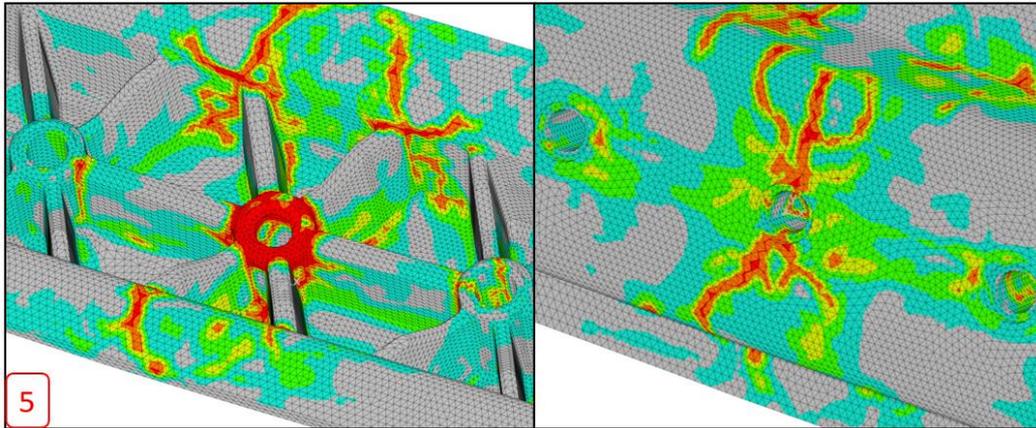


Figura 11.7: In rosso, l'evoluzione delle zone di rottura nel fronte e nel retro del componente.

Le tre zone di rottura evidenziate nelle prove hanno trovato un certo riscontro anche nella simulazione numerica. Infatti, le aree in cui ci sono degli elementi di colore rosso stanno ad indicare zone in cui gli elementi hanno raggiunto e superato un *Failure Indicator* pari a 1. Questo non vuol dire che in quel punto il componente è totalmente danneggiato ed inutilizzabile, ma che sicuramente i livelli di tensione saranno superiori a quelli limite e che quindi sarà sicuramente presente una cricca importante nel materiale, che se sollecitata ulteriormente, potrà propagare in maniera distruttiva nel componente.

Risulta interessante notare come la simulazione riesca a “copiare” bene il comportamento a banco del componente, evidenziando il danneggiamento sia in prossimità dell'inserto centrale (con relativa propagazione ad X nel retro) che nei collegamenti tra le nervature e i bordi esterni del pezzo.

In Figura 11.7 è presente l'analisi temporale della rottura del componente ed è chiaramente visibile quella che abbiamo precedentemente definito come condizione di “assestamento”, infatti dopo il picco di carico reattivo, le zone di rottura diventano più piccole in estensione, entrando in quella condizione, per poi diventare lentamente più grandi man mano che la prova di Collasso avanza.

Il motivo per il quale le zone di rottura sono proprio quelle evidenziate, non è casuale, ma può essere motivato guardando l'orientazione delle fibre e le proprietà meccaniche del composito. Infatti, la zona di rottura dinanzi l'alloggiamento dell'inserto centrale è sollecitata a compressione e quindi, avendo un materiale composito con un carico limite di compressione molto più basso di quello di

trazione, è plausibile che quella sia una zona di rottura. Inoltre, in quella zona sono presenti anche delle *weld lines* “fredde” e quindi critiche.

Durante la prova sperimentale, si è osservata una rottura esattamente nell’unione tra una nervatura centrale e il bordo interno dell’Omega e la stessa zona è stata predetta dalla simulazione. Quella può essere sicuramente una zona delicata per via della sua forma geometrica, visto che la presenza di un raggio di raccordo piuttosto piccolo può far insorgere una concentrazione di tensioni e influire sulla disposizione delle fibre perché dovranno incurvarsi per poter copiare la forma del raccordo. Inoltre, nella seguente figura, possiamo osservare l’entità della massima tensione principale in quella zona di raccordo.

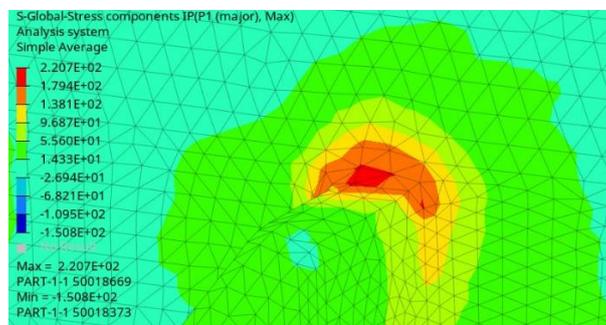


Figura 11.8: Massima tensione principale al time-step numero (1) di Figura 11.7

Dalla figura si vede chiaramente che abbiamo un picco di tensione piuttosto pronunciato che provoca un indebolimento strutturale al componente e alla nucleazione e successiva propagazione di una cricca. L’ultima zona da analizzare rimane quella del retro del componente, quindi quella in cui in Figura 11.7 si vede l’evoluzione ad X della rottura. Quella zona, sulla base delle forze e dei vincoli presenti, è sollecitata a trazione e risulta interessante osservare anche in questo caso qual è la disposizione delle fibre.

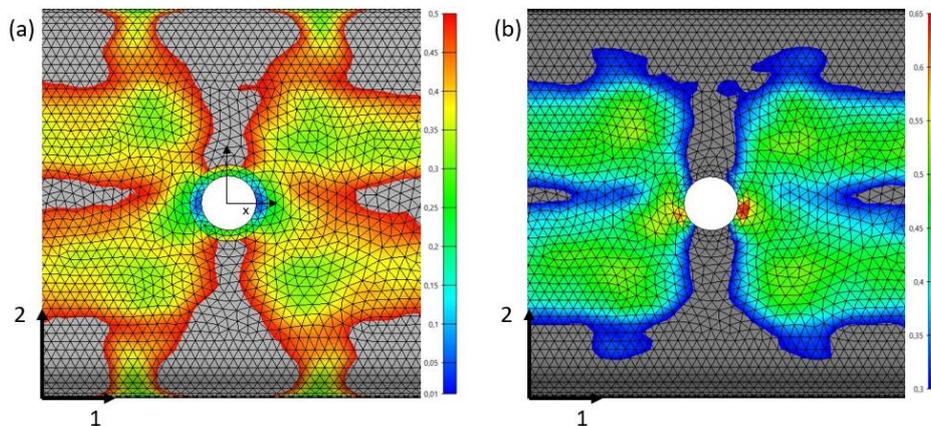


Figura 11.9: (a) La componente a11 del tensore orientamento delle fibre e (b) la componente a22.

In Figura 11.9 (a) la zona grigia è caratterizzata da un valore superiore a 0.5 mentre nella (b) da un valore inferiore lo 0.3. Possiamo vedere che se ci posizioniamo al centro del foro e ci muoviamo in direzione 1 e 2, le fibre saranno principalmente orientate in direzione 1. Questa condizione non si verifica più se ci muoviamo in una direzione diagonale, a  $45^\circ$  rispetto i due assi di riferimento. In quel caso la componente  $a_{11}$  diminuisce leggermente mentre la componente  $a_{22}$  diviene preponderante.

Questa disposizione si dimostra sfavorevole perché, essendo la parte retrostante del componente essenzialmente sollecitata a trazione, le fibre in quelle zone non troveranno delle tensioni nella loro direzione longitudinale, ma in quella trasversale.

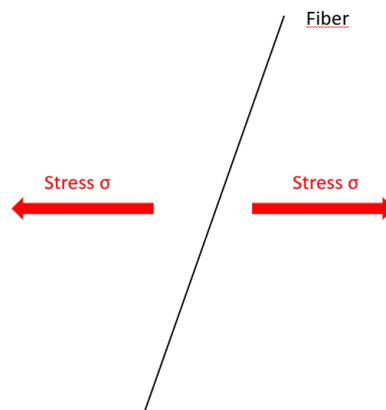


Figura 11.10: Tensioni applicate alla fibra

In questo caso si potrà assistere a quello che solitamente viene definito *Debonding*, quindi un distaccamento e una perdita di adesione tra matrice e fibra che si protrae lungo le direzioni in cui le fibre hanno questa orientazione e quindi, proprio nella zona ad X evidenziata precedentemente.

Come abbiamo detto in precedenza, non c'è stata la possibilità di fare delle prove al banco anche con il *Mat2*, ma questo non ci preclude la possibilità di svolgere comunque le medesime simulazioni numeriche.

Da un punto di vista dell'analisi di Rigidezza ne abbiamo già parlato, ma per quanto riguarda il Carico Reattivo possiamo anche in questo caso plottarlo confrontandolo con quello del *Mat1*.

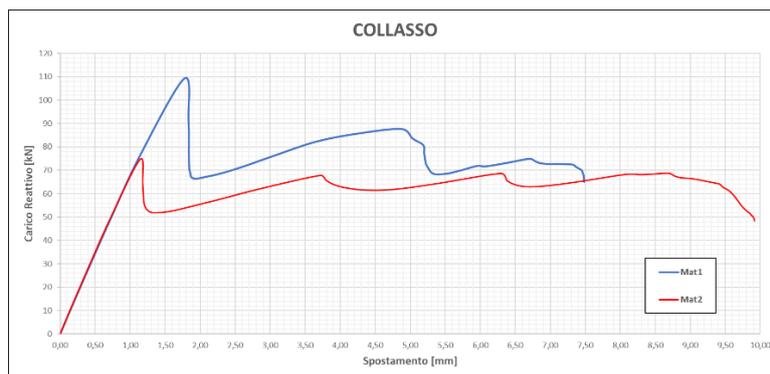


Figura 11.11: Carico Reattivo rispettivamente di Mat1 in blu e Mat2 in rosso

Si può vedere come il Carico Reattivo del secondo materiale sia numericamente inferiore a quello esibito dal primo materiale per tutta la durata della prova. Abbiamo detto in precedenza che i risultati per quanto riguardava l'analisi di Rigidezza erano simili ed infatti possiamo osservarlo anche dall'andamento iniziale delle due curve, che manifestano una pendenza iniziale molto simile, sintomo appunto di una rigidezza molto simile.

Un'ulteriore osservazione che si può fare è invece la diversa collocazione delle zone di rottura del componente. Infatti, nelle seguenti figure è possibile osservare un confronto tra i due modelli nel medesimo time-step della prova di Collasso. Il time-step considerato è quello numero (4) della Figura 11.7.

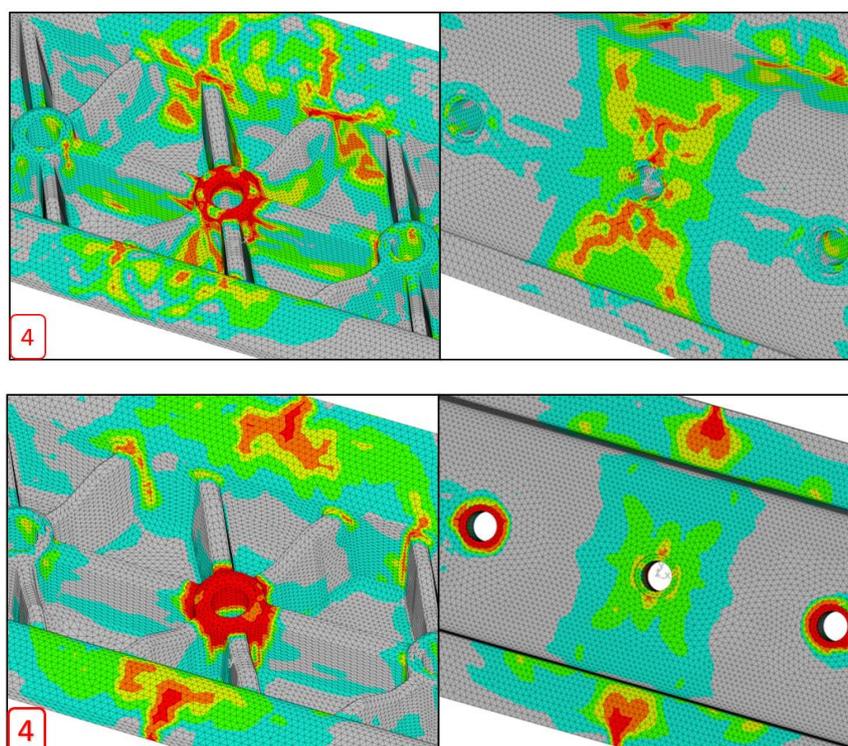


Figura 11.12: Sopra, le zone di rottura del Mat1, sotto quelle del Mat2

Dalle figure si vede molto bene come le zone di rottura siano differenti, soprattutto nella zona retrostante il componente. Infatti, nel caso in cui il componente venga costruito con il *Mat2*, si può vedere come il composito si rompa nelle zone limitrofe agli inserti laterali, cosa che con il *Mat1* non si manifesta. Questa differenza di comportamento può essere attribuibile solo alla diversa configurazione della carta materiale, visto che tutti i passaggi della simulazione sono rimasti inalterati. Infatti, la carta materiale utilizzata per il secondo modello, è diversa rispetto la prima per quanto riguarda le caratteristiche di fibra e matrice, e quindi queste differenze ricadranno inevitabilmente anche nelle costanti ingegneristiche del composito.

Tutte queste differenze hanno portato al risultato che abbiamo appena visto, ma per poter confermare queste evidenze numeriche, sarà necessario effettuare delle prove al banco anche per l'Omega costruita con il *Mat2*. Questo tema sarà infatti oggetto di ulteriori approfondimenti all'interno della Marelli, con l'intento di installare nuovamente lo stampo dell'Omega nella pressa a stampaggio a compressione, in modo tale da validare definitivamente anche questo secondo materiale.

## 12. Conclusioni

L'obiettivo dell'attività di tesi è stato quello di mostrare le diverse fasi relative allo sviluppo di un dimostratore tecnologico, focalizzandosi sui passaggi chiave per lo svolgimento di una simulazione virtuale in grado di integrare prodotto, processo e carta materiale. L'SMC si è dimostrato valido da un punto di vista strutturale grazie alle buone doti di resistenza meccanica tipica dei compositi con rinforzo fibroso, ma al tempo stesso ha mostrato un'eccellente versatilità. Il fatto che i fogli SMC siano già pronti per l'uso e che non siano necessarie particolari competenze manifatturiere, lo rende ideale per applicazioni in larga scala, dove gli unici prerequisiti necessari sono la presenza di una pressa a stampaggio a compressione e una cella frigorifera per la conservazione dei rotoli di materiale. Una volta che i requisiti sono soddisfatti, è "sufficiente" prendere dimestichezza con il processo di produzione tarando correttamente alcuni parametri come temperatura, pressione e tempo di cura in modo tale da ottenere i risultati desiderati. Non è un processo immediato e semplice, sono necessarie molte sperimentazioni perché bisogna costruire correttamente gli stampi e conoscere il comportamento del materiale al suo interno, ma una volta superato questo periodo di apprendimento, il processo può essere ripetuto molte volte con una cadenza paragonabile a quella per la produzione in serie.

Per quanto riguarda la simulazione numerica, abbiamo visto che il processo che ci porta dall'analisi di processo fino all'analisi strutturale vera e propria è composta da molteplici passaggi che richiedono l'inserimento di molte variabili e da una continua iterazione dei passaggi chiave. Il punto più delicato è chiaramente rivolto alla creazione della carta materiale che, utilizzando l'approccio multi-scala, necessita di essere tarato correttamente. I risultati ottenuti sono stati soddisfacenti perché si è riuscito a simulare con buona precisione il comportamento micro e macro-meccanico del materiale.

L'utilizzo del software Digimat, fino ad oggi, si è rivelato efficace con compositi laminati o per compositi ottenuti per stampaggio ad iniezione, ma la tesi ha dimostrato che l'approccio multi-scala, assieme ad una adeguata attenzione nella simulazione di processo, può essere applicato anche per componenti ottenuti attraverso lo stampaggio a compressione SMC.

Durante l'attività sono stati evidenziati anche i limiti e le difficoltà di questo approccio di modellazione, per questo è chiaro che sono previsti ulteriori sviluppi. I modelli utilizzati possono ancora essere affinati svolgendo ulteriori loop di simulazione, un maggior numero di dati possono essere disponibili con delle rilevazioni tomografiche sia a livello di provini che di componente finale in modo tale da ottenere dei valori più precisi ed attendibili del tensore di orientamento delle fibre. Infine, può essere svolta una campagna di sperimentazione più estesa e completa sulla caratterizzazione reologica del materiale, in modo tale da modellare con maggiore precisione anche la fase di simulazione dello stampaggio a compressione. Tutte questi miglioramenti potranno sicuramente portare ad una maggiore comprensione del materiale in modo tale da ottenere risultati ancora più precisi ed affidabili rispetto a quelli già ottenuti in questa attività.

## Ringraziamenti

Desidero ringraziare il Prof. Paolino per la sua disponibilità che mi ha sempre mostrato durante il periodo di tirocinio in azienda e per avermi dato la possibilità di sviluppare questo lavoro che ho trovato molto affascinante e stimolante sotto tutti i punti di vista.

Desidero inoltre ringraziare profondamente l'Ing. Sottile Salvatore per tutto il supporto che mi ha fornito durante questi mesi. Le sue profonde conoscenze sull'argomento mi hanno dato l'opportunità di approcciare con passione questi temi aumentando di giorno in giorno le mie competenze grazie ai suoi continui suggerimenti, non solo sulle analisi condotte, ma sulle molteplici dinamiche lavorative e non. Oltre ad un professionista esemplare, ho conosciuto una grande persona.

Infine, desidero ringraziare tutte le figure che in questi anni mi hanno accompagnato nel completamento del percorso accademico. Gli amici, che grazie alla loro spensieratezza hanno smorzato quei momenti di tensione inevitabili in un percorso del genere, ma soprattutto la mia famiglia, che grazie al loro continuo supporto mi hanno permesso di raggiungere l'obiettivo della laurea. Mio fratello insieme ad Erika ed Elisa, che nel corso degli anni sono stati una fonte di consiglio, ispirazione e gioia. E ovviamente i miei genitori, che oltre ad un contributo economico non indifferente, mi sono sempre stati vicini aiutandomi in ogni momento, dispensandomi consigli vitali di volta in volta e supportandomi anche quando le difficoltà sembravano insormontabili.

Questo traguardo è soprattutto loro.

Grazie.



## Bibliografia

- [1] F. Manfrin, «Tesi: Materiali Compositi per l'Automotive,» Università degli Studi di Padova - Dipartimento di Ingegneria Industriale, Padova, 2013.
- [2] P. Staccone, «Incidenza della diminuzione delle masse non sospese sull'handling del veicolo,» [Online]. Available: <http://www.staccone-engineering.com/articoli-tecnici/incidenza-della-diminuzione-delle-masse-non-sospese-sullhandling-del-veicolo/>.
- [3] A. Schirinzi, «Tesi: Dinamica Verticale del Veicolo Stradale,» Università del Salento, Lecce, 2013.
- [4] Gurit Holding, «Guide To Composites - Delivering the Future of Composite Solution,» Gurit Holding.
- [5] A. Salmi, «Introduzione alle Materie Plastiche,» in *Slide del Corso di Progettazione di Processo con Metodi Numerici*, Dipartimento di Ingegneria Gestionale e della Produzione.
- [6] I. M. Carello, «Benchmarking sui Materiali Compositi per Applicazioni Autoveicolistiche,» Dipartimento di Meccanica del Politecnico di Torino in collaborazione con Magneti Marelli Suspension Systems, Torino, 2011.
- [7] XPolymers, «Cariche e Fibre,» [Online]. Available: <https://www.xpolymers.it/fibre%20di%20vetro%20corte.html>.
- [8] P. M. Pasquali, «Le Fibre di Carbonio,» in *Slide del Corso di Chimica dei Materiali non Metallici per l'Ingegneria*, Roma, Università della Sapienza - Dipartimento di Ingegneria dei Materiali.
- [9] J. Roesler, H. Harders e M. Baeker, «Mechanical Behaviour of Fibre Reinforced Composites,» in *Mechanical Behaviour of Engineering Materials*, Springer, 2006, pp. 295-325.
- [10] D. Hull, *An Introduction to Composite Materials*, Press Syndicate of the University of Cambridge, 1981.
- [11] C. Badini, *Materiali Compositi per l'Ingegneria*, Torino: Celid, 2015.

- [12] X. YAN, P. UAWONGSUWAN, M. MURAKAMI, A. IMAJO, Y. YANG e H. HAMADA, «Tensile Properties of Glass Fiber/Carbon Fiber Reinforced Polypropylene Hybrid Composites Fabricated by Direct Fiber Feeding Injection Molding Process,» 2016.
- [13] H. Lee e M. Huh, «Fabrication of carbon fiber SMC composites with vinyl ester resin and effect of carbon fiber content on mechanical properties,» Carbon Letters - Korea Institute of Carbon Convergence Technology, 2016.
- [14] L. Martulli, L. Muyschondt, M. Kerschbaum, S. Pimenta, S. Lomov e Y. Swolfs, «Carbon fibre sheet moulding compounds with high in-mould flow: Linking morphology to tensile and compressive properties,» Elsevier - Toyota Motor Europe , 2019.
- [15] P. Odenberger, H. Andersson e T. Lundström, «Experimental flow-front visualisation in compression moulding of SMC,» Elsevier - Division of Fluid Mechanics, Luleå University of Technology, 2004.
- [16] L. Abrams, «Processing Studies in Sheet Molding Compounds Compression Molding,» UMI Microform - The Ohio State University, 2001.
- [17] M. Hohberg, L. Kärger, F. Henning e A. Hrymak, «Rheological measurements and rheological shell model Considering the compressible behavior of long fiber reinforced sheet molding compound (SMC),» Elsevier - Karlsruhe Institute of Technology - University of Western Ontario, 2017.
- [18] S. Le Corre, L. Orgeas e D. Favier, «Shear and compression behaviour of sheet moulding compounds,» Elsevier - Laboratory Soils Solids Structures, University Joseph Fourier , 2002.
- [19] TA Instruments, «RHEOLOGY SOLUTIONS - Characterization of Sheet Molding Compounds (SMC),» TA Instruments.
- [20] J. Weissenböck, M. Arikan, D. Salaberger e J. Kastner, «Comparative Visualization of Orientation Tensors in Fiber-Reinforced Polymers,» 8th Conference on Industrial Computed Tomography, Wels, Austria - University of Applied Sciences Upper Austria, 2018.

- [21] R. Karamov, L. Martulli e M. Kerschbaum, «Micro-CT based structure tensor analysis of fibre orientation in random fibre composites versus high-fidelity fibre identification methods,» Elsevier - Skolkovo Institute of Science and Technology - Toyota Motor Europe, 2020.
- [22] X. Sun, C. Engler Pinto, L. Huang e S. Huang, «Investigation of Mechanical Behavior of Chopped Carbon Fiber Reinforced Sheet Molding Compound (SMC) Composites,» SAE International - Nanjing University of Aeronautics and Astronautics - Ford Motor Company, 2020.
- [23] L. Martulli, T. Creemers e E. Schöberl, «A thick-walled sheet moulding compound automotive component: Manufacturing and performance,» Elsevier - Toyota Motor Europe - Department of Materials Engineering of Leuven, 2020.
- [24] ISO International Standards, «Plastics - Determination of tensile properties,» IHS, 2012.
- [25] MSC Software Company - Extreme Engineering, «User's Manual Digimat 2019.1,» Hexagon.
- [26] C. Weinberger e W. Cai, «Lecture Note 2. Eshelby's Inclusion I,» in *Elasticity of Microscopic Structures*, Stanford, Stanford University, 2004.
- [27] H. D. Florian Matzke, «Digimat Training for SMC,» Hexagon Engineering, 2020.