



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

Laurea magistrale in ingegneria meccanica

A.a. 2024/2025

Sessione di laurea Ottobre 2025

Progettazione di una bielletta in materiale composito SMC piezoresistivo con capacità di monitoraggio dei carichi trasmessi

Relatori:

Alberto Ciampaglia

Davide Salvatore Paolino

Raffaele Ciardiello

Candidati:

Emanuele Mattei

Sommario

La tesi affronta la progettazione di una bielletta di sospensione automobilistica che collega l'unità smorzante alla ruota, con l'obiettivo di sviluppare componenti leggeri e multifunzionali. Il materiale di riferimento è lo Sheet Moulding Compound (SMC) rinforzato con fibra di carbonio, un composito a fibre corte ma di lunghezza relativamente elevata (25–50 mm), che unisce leggerezza, buona resistenza meccanica e possibilità di produzione automatizzata. La previsione delle proprietà effettive è tuttavia complessa, a causa dell'orientamento non uniforme delle fibre. Per affrontare questa sfida è stato sviluppato un modello numerico agli elementi finiti basato su un approccio multiscala con fibre modellate come travi immerse in una matrice solida, in cui gli orientamenti sono stati ricostruiti a partire da dati di tomografia computerizzata ed elaborati in MATLAB. Il modello è stato validato mediante prove sperimentali condotte su provini in carbon forged, materiale con caratteristiche analoghe all'SMC ma più agevole da produrre in laboratorio. Oltre alla caratterizzazione meccanica, è stato studiato il comportamento piezoresistivo del materiale, correlando la variazione della resistenza elettrica con la deformazione. I risultati confermano la possibilità di integrare funzioni di monitoraggio strutturale nei componenti, aprendo la strada a bielletture leggere, economiche e in grado di autodiagnosticare il proprio stato di integrità.

Ringraziamenti

Ebbene sì, sono arrivato finalmente al raggiungimento di questo traguardo. Vorrei innanzitutto ringraziare i miei relatori Ciampaglia Alberto, Ciardiello Raffaele e Paolino Salvatore Davide, per la loro disponibilità, per tutti i consigli che mi hanno dato durante lo svolgimento della tesi e, soprattutto, per la loro grande simpatia. Ringrazio i miei genitori che mi hanno sempre supportato da lontano e che mi hanno permesso di formarmi al meglio. A tutte le persone che mi sono state vicine, dedico con affetto questo risultato.

♡ GRAZIE A TUTTI ♡

Indice

Elenco delle figure	VII
1 Introduzione	2
1.1 Struttura della tesi	4
2 SMC	8
2.1 Compositi a fibre corte	9
2.2 Processo tecnologico di produzione	12
2.2.1 Orientamento delle fibre nello stampo	13
2.3 Proprietà meccaniche	14
2.3.1 Anisotropia e disomogeneità delle proprietà meccaniche . . .	18
3 Carbon Forged	24
3.1 Processo di produzione	25
3.1.1 Materiale utilizzato e stampo	26
3.1.2 Processo ottimizzato	27
3.2 Microstruttura del materiale	30
3.3 Proprietà meccaniche	32
3.3.1 Normative e macchinari utilizzati per la caratterizzazione meccanica	33
3.3.2 Preparazione dei provini	34
3.3.3 Curve tensione-deformazione medie	36
3.3.4 Curve tensione-deformazione locali	38
4 Capacità piezoresistive della fibra di carbonio	46
4.1 Correlazione tra la variazione di resistenza e deformazione	47
4.1.1 Andamento della resistenza sotto carichi ciclici	51
4.2 Set-up per la misurazione della resistenza dei provini	54

4.3	Risultati sperimentali	56
5	Simulazione FEM di un provino SMC/Carbon Forged	62
5.1	Modello FEM su LsDyna con il constrain CONSTRAINED BEAM IN SOLID	65
5.2	Tensore di orientamento e simulazione di processo	67
5.2.1	Tensore di orientamento	71
5.2.2	Tomografia per l'acquisizione del tensore di orientamento nel Carbon Forged	73
5.3	Creazione del modello utilizzando MATLAB	77
5.3.1	Funzionamento dei file .k	77
5.3.2	Idea alla base dell'algoritmo	78
5.3.3	Funzionamento dell'algoritmo	82
5.3.4	Risultati del file .k	89
5.4	Impostazione del modello FEM	91
5.5	Coerenza del modello	93
5.5.1	Carichi e vincoli applicati	94
5.5.2	Variazione di orientamento dei beam	95
5.5.3	Variazione del numero di beam inseriti	97
5.5.4	Variazione del diametro dei beam	98
6	Validazione del modello FEM	102
6.1	Confronto con la deformazione lungo l'asse del provino	103
6.2	Tensioni assiali all'interno dei beam	107
6.3	Eventuali miglorie al modello	110
7	Progettazione della bielletta in Carbon Forged	112
7.1	Inseriti per l'accoppiamento con il gruppo sospensivo	114
7.1.1	Dimensionamento dello snodo sferico radiale	116
7.1.2	Progettazione dell'inserito	118
7.2	Realizzazione di un prototipo di bielletta	119
7.2.1	Progettazione dello stampo	121
7.2.2	Realizzazione del prototipo	122
7.3	Implementazione della FEM sul prototipo	125
7.3.1	Prova FEM con modello di danneggiamento	130
7.4	Prove meccaniche sul prototipo di bielletta	133
7.4.1	Carico ciclico	133
7.4.2	Prova di trazione	136

7.4.3	Variazione della resistenza del prototipo di bielletta	136
7.5	Geometria finale della bielletta	139
8	Conclusioni	142
	Bibliografia	145

Elenco delle figure

2.1	Modello di trasferimento del carico.[2]	9
2.2	Andamento delle tensioni di taglio e tensioni assiali sulla lunghezza della fibra.[2]	10
2.3	Variazione della tensione assiale nella fibra, al variare della lunghezza.[2]	11
2.4	Processo di fabbricazione di un rotolo [3]	12
2.5	Processo di stampaggio dei fogli SMC [4]	13
2.6	Simulazione di processo di uno stampo ad iniezione fatta con Moldex3D [6], nella figura (a) è riportata la zona in cui viene piazzata la carica iniziale, nella (b) la componente x del tensore di orientamento in ogni punto dello stampo finito, nel (c) i provini ritagliati lungo la direzione 0%, (d) 45% ed (e) 90%. [7]	15
2.7	Risultati dei test meccanici sui provini e profili di frattura. [7] . . .	16
2.8	Curve Stress-Strain ricavate da prove di trazione su provini dogbone SMC, con matrice composta da resina vinilestere e rinforzo in fibra di vetro. Vengono riportati due orientamenti e due diverse percentuale di rinforzante. [8]	16
2.9	Schema dei meccanismi di danneggiamento nei compositi rinforzati con fibre; (a) danneggiamento nel piano, (b) delaminazione per instabilità (buckling), (c) micro-instabilità (micro-buckling), (d) pseudodelaminazione e (e) delaminazione. [9]	17
2.10	Prove di trazione quasi-statiche per il composito RO-A-SMC (SMC con orientamento casuale e con una percentuale in massa di rinforzo al di sopra del $M_f = 50\%$) abbinate all'osservazione della microstruttura: (1): decohesione fibra/matrice, (2): propagazione della decohesione fibra/matrice e microfessurazione della matrice, (3), (4) e (5): microfessurazione della matrice e meccanismi di pseudo-delaminazione.[9]	17

2.11	Superfici di frattura per una prova di trazione quasi statica.[9]	18
2.12	Superfici di frattura dei provini, (A) provino con $V_f = 25\%$ a $50\mu m$, (B) provino con $V_f = 45\%$ a $50\mu m$, (C) sezione trasversale superiore del provino con $V_f = 25\%$ a $100\mu m$, (D) sezione trasversale superiore del provino con $V_f = 45\%$ a $100\mu m$. [8]	18
2.13	Analisi DIC (Digital Image Correlation) su una prova di trazione di un provino in materiale SMC. [10]	19
2.14	Analisi DIC di una prova di trazione su materiale SMC, Nelle immagini superiori viene riportato il modulo elastico misurato durante la prova in ogni sezione. [11]	20
2.15	Microstruttura della parte esteriore dei provini, in particolare vengono riportate le sezioni riquadrate in figura 2.14.[11]	20
2.16	Zona a minor concentrazione di fibre M_f ridotta all'interno del materiale.[11]	21
3.1	Backplate un volante realizzato in carbon forged usando scarti di lavorazione di tessuto in fibra di carbonio	24
3.2	Fasi della procedura di produzione di una piastra in carbon forged consigliata da easy composites	25
3.3	Meccanismo di estrazione	27
3.4	Interfaccia tra la resina e la parete dello stampo, realizzato mediante stampante 3D, in blu la resina in tratteggiato lo stampo	28
3.5	Posizionamento dell'impasto di fibra e resina nello stampo	29
3.6	Piastra estratta dallo stampo subito dopo l'indurimento della resina	30
3.7	Superficie di un provino realizzato in carbon forged	31
3.8	Meccanismo di chiusura con peso e guide che permettono la dilatazione del componente durante la cura della resina	32
3.9	Provino con forma ad osso di cane "Type I", da normativa ASTM D638 - 14	33
3.10	Provino dogbone per le prove di trazione, nella parte inferiore e superiore sono presenti i tab in fibra di vetro, al di sotto ci sono i contatti per la misura della resistenza elettrica	34
3.11	Set-Up della prova di trazione	35
3.12	Disposizione dei provini ricavati da ogni piastra	35
3.13	Provini dopo il taglio ad acqua	36
3.15	Grafici tensione-deformazione dei provini	37

3.14	Deformazioni ricavate dalle analisi DIC per ogni provino, vengono riportati 4 frame, il primo è la situazione iniziale, l'ultimo è il frame prima della rottura	38
3.16	Curve Deformazione media-Stress medio e Deformazione massima-Stress medio Provino 12	39
3.17	Curve Deformazione media-Stress medio e Deformazione massima-Stress medio Provino 13	40
3.18	Curve Deformazione media-Stress medio e Deformazione massima-Stress medio Provino 14	40
3.19	Curve Deformazione media-Stress medio e Deformazione massima-Stress medio Provino 21	40
3.20	Curve Deformazione media-Stress medio e Deformazione massima-Stress medio Provino 22	41
3.21	Curve Deformazione media-Stress medio e Deformazione massima-Stress medio Provino 23	41
3.22	Variazione della deformazione puntuale nel provino 13, sulla sinistra c'è la deformazione lungo l'asse di carico, successivamente viene riportato il modulo elastico medio sezionale, questo è stato calcolato andando a prendere delle porzioni di 5 mm lungo l'asse di carico, sulla destra c'è la scansione ricavata dalla tomografia del provino, in particolare nel punto in cui si concentra la deformazione	43
3.23	Variazione della deformazione puntuale nel provino 14, sulla sinistra c'è la deformazione lungo l'asse di carico, successivamente viene riportato il modulo elastico medio sezionale, questo è stato calcolato andando a prendere delle porzioni di 5 mm lungo l'asse di carico, sulla destra c'è la scansione ricavata dalla tomografia del provino, in particolare nel punto in cui si concentra la deformazione	43
3.24	Variazione della deformazione puntuale nel provino 22, sulla sinistra c'è la deformazione lungo l'asse di carico, successivamente viene riportato il modulo elastico medio sezionale, questo è stato calcolato andando a prendere delle porzioni di 5 mm lungo l'asse di carico, sulla destra c'è la scansione ricavata dalla tomografia del provino, in particolare nel punto in cui si concentra la deformazione	44
4.1	Variazione della resistenza in un provino realizzato con 6 ply di fibra di carbonio monodirezionale, in disposizione $[0]_6$, la resistenza è stata misurata lungo la direzione di carico che corrisponde alla direzione 0° del laminato.[16]	49

4.2	Modi di scorrere della corrente non nella direzione principale delle fibre, a) conduzione attraverso la matrice epossidica con un comportamento dielettrico, b) conduzione attraverso il contatto fibra fibra. [17]	49
4.3	Dipendenza della conduttività trasversale di un laminato dalla frazione in volume di fibra di carbonio.[18]	50
4.4	Test di trazione su un provino unidirezionale composto da 6 ply di fibra di carbonio, viene riportata sia la curva Stress-Strain che la variazione di resistenza.[18]	50
4.5	Misurazioni della resistenza su un provino realizzato con 12 ply prepreg di carbonio unidirezionale, con posizionamento $[0/90]_{3s}$, quindi un laminato con orientazione non mono direzionale. Nella figura a) La resistenza viene misurata nella direzione 0° cioè la stessa della direzione di applicazione del carico. Nella figura b) la resistenza viene misurata nella direzione 90° , la tensione e la deformazione viene misurata lungo 0° . [19]	52
4.6	a) Piastra crossply realizzata con ply pre-preg di carbonio unidirezionale, con disposizione $[0/90]_{3s}$, $\frac{\Delta R}{R_0}$, deformazione e carico misurati lungo la direzione 0° , carico ciclico con che va da stress nullo fino ad uno stress pari al 0.35%. b) Piastra crossply realizzata con ply prepreg di carbonio unidirezionale, con disposizione $[0/90]_{3s}$, $\frac{\Delta R}{R_0}$ letto in direzione 90° , mentre carico e deformazione applicati nella direzione 0° , carico ciclico con che va da stress nullo fino ad uno stress pari al 0.35%. c) Piastra monodirezionale realizzata con ply pre-preg di carbonio unidirezionale, con disposizione $[90]_{32}$, $\frac{\Delta R}{R_0}$, deformazione e carico misurati lungo la direzione 0° . [19]	53
4.7	Gage factor/Strain sensivity trovati durante le analisi su carichi ciclici da Wang X. e Chung D [19]	54
4.8	Metodo di misura a 4 elettrodi, 2 vengono usati per misurare la corrente, e 2 per applicare la tensione. [22]	54
4.9	Immagine del provino con elettrodi e tabs	56
4.10	Variazione della resistenza sulla deformazione media dei provini . .	57
4.11	Deformazione, tensione e variazione di resistenza nel tempo del provino 14, durante il pre-tensionamento con carico ciclico. Sulla sinistra vengono riportati le deformazioni lungo l'asse di carico in 3 istanti ottenuti dalle analisi DIC	58

5.1	Passaggi fondamentali di una modellazione multiscala agli elementi finite per un provino in materiale SMC basato su una ricostruzione stocastica della mesostruttura. [24]	63
5.2	Relazione tra orientamento delle fibre a_{11} e le componenti della matrice di rigidezza. [24]	63
5.3	Comparazione tra il modulo elastico ottenuto e le prove meccaniche sperimentali per diversi provini ricavati in posizioni diverse: A,B,E e con orientamenti diversi 0, 90. [24]	64
5.4	Esempio di modello che sfrutta una matrice solida per ricreare la resina e un insieme di elementi beam per ricreare le fibre. [31] . . .	65
5.5	Opzioni di accoppiamento del modello CBIS, a sinistra quello più semplice in cui vengono accoppiati in modo rigido spostamenti, velocità e accelerazione dei nodi beam con i nodi della mesh solida. [31]	66
5.6	All'interno di un elemento solido possono essere inseriti anche più beam con orientamenti diversi	66
5.7	Test di compressione statica su un componente realizzato in SMC, nelle figura in basso vengono riportate i risultati delle simulazioni con la deformazione plastica calcolata sulla mesh solida, quindi la resina e la forza assiale a cui sono sottoposti i beam. In questo caso sono stati simulati non semplici fibre, ma vengono posizionate all'interno del componente fasci di fibre. [28]	67
5.8	Simulazione di processo per un componente realizzato in SMC, andamento della deformazione della mesh solida sulla sinistra e della deformazione dei beam sulla destra	69
5.9	Comportamento della funzione di rimeshing adattivo sulla mesh solida	70
5.10	Comparazione tra i risultati di un componente stampato in SMC e una simulazione di processo realizzata mediante LsDyna. [31], [28] .	71
5.11	Rappresentazione di una fibre nello spazio tridimensionale. Il vettore p indica la direzione della fibra [33]	72
5.12	Set-up per l'acquisizione della tomografia computerizzata	74
5.13	Tomografia del provino 24, in particolare è riportata la superficie posteriore. In nero i vuoti presenti (più evidenti in superficie), in bianco le fibre di carbonio (a densità maggiore) e in grigio la resina che ricopre le fibre.	75
5.14	Percentuale di fibra in volume locale ricavata dalle analisi della tomografia	76

5.15	Beam generata aprendo il file con il codice 5.1	79
5.16	Mesh di appoggio generata in LS PrePost avente le stesse dimensioni del provino	80
5.17	Elementi Beam creati dal file .k generato con il codice MATLAB con il provino 14.	89
5.18	Mesh solida con al suo interno i beam visti in figura 5.17	90
5.19	Diagramma schematico della curva sforzo–deformazione di un com- posito a fibre continue allineate sottoposto a carico longitudinale. Sono mostrate anche le curve sforzo–deformazione di una fibra di carbonio con comportamento fragile e di una matrice epossidica con comportamento duttile. [38]	92
5.20	Curva di carico per le prove di trazione	94
5.21	Vincoli applicati sul provino	94
5.22	Modelli con variazione di orientamento dei beam	95
5.23	Variazione della rigidezza del provino al variare dell’orientamento del- le fibre al suo interno. a) viene riportato il grafico forza-spostamento, b) c’è l’andamento della rigidezza al variare dell’angolo delle fibre con l’asse di carico.	96
5.24	Modelli con variazione di orientamento dei beam	97
5.25	Variazione della rigidezza del provino al variare del numero di elemen- ti beam al suo interno. a) viene riportato il grafico forza-spostamento, b) c’è l’andamento della rigidezza al variare del numero di elementi beam generati.	98
5.26	Variazione della rigidezza del provino al variare del diametro degli elementi beam. a) viene riportato il grafico forza-spostamento, b) c’è l’andamento della rigidezza al variare del diametro impostato in <i>mm</i>	98
6.1	Andamento della rigidezza assiale dei provini, al variare del diametro dei beam	103
6.2	Plot della deformazione ε_{yy} lungo l’asse di carico nel tempo per ogni elemento superficiale di una sezione.	104
6.3	Provino 13. a) Deformazione ε_{yy} ottenuta dalla scansione DIC, b) Variazione della rigidezza lungo l’asse y ricavata dalla DIC, c) Deformazione ε_{yy} ottenuta dalla FEM	105
6.4	Provino 14. a) Deformazione ε_{yy} ottenuta dalla scansione DIC, b) Variazione della rigidezza lungo l’asse y ricavata dalla DIC, c) Deformazione ε_{yy} ottenuta dalla FEM	105

6.5	Provino 21. a) Deformazione ε_{yy} ottenuta dalla scansione DIC, b) Variazione della rigidezza lungo l'asse y ricavata dalla DIC, c) Deformazione ε_{yy} ottenuta dalla FEM	106
6.6	Provino 22. a) Deformazione ε_{yy} ottenuta dalla scansione DIC, b) Variazione della rigidezza lungo l'asse y ricavata dalla DIC, c) Deformazione ε_{yy} ottenuta dalla FEM	106
6.7	Proprietà meccaniche della grafite.[2]	107
6.8	Provino 13: a) Frame acquisito dal sistema DIC della rottura del provino, b) Deformazioni lungo l'asse di carico ricavate dalle analisi DIC ε_{yy} , c) Stress assiali dei beam all'interno delle zone più sollecitate del modello FEM.	108
6.9	Provino 14: a) Frame acquisito dal sistema DIC della rottura del provino, b) Deformazioni lungo l'asse di carico ricavate dalle analisi DIC ε_{yy} , c) Stress assiali dei beam all'interno delle zone più sollecitate del modello FEM.	109
6.10	Provino 21: a) Frame acquisito dal sistema DIC della rottura del provino, b) Deformazioni lungo l'asse di carico ricavate dalle analisi DIC ε_{yy} , c) Stress assiali dei beam all'interno delle zone più sollecitate del modello FEM.	109
6.11	Provino 22: a) Frame acquisito dal sistema DIC della rottura del provino, b) Deformazioni lungo l'asse di carico ricavate dalle analisi DIC ε_{yy} , c) Stress assiali dei beam all'interno delle zone più sollecitate del modello FEM.	110
7.1	Assieme del gruppo sospensivo di una Alfa Romeo Stelvio, in blu c'è l'assieme dell'active dumper, questo è collegato attraverso una manovella ed una biella allo smorzatore.	113
7.2	Modello cinematico del meccismo biella manovella	113
7.3	Giunto sferico	114
7.4	Assieme del giunto sferico con i vari componenti utilizzati.	115
7.5	Inserto realizzato per un componente in SMC da Martulli L., Creemers T.. [40]	116
7.6	Snodo GEH 15 C	117
7.7	Fattore y per snodi sferici radiali esenti da manutenzione, la curva rossa è quella che fa riferimento al cuscinetto scelto. [41]	117
7.8	Dimensioni dello spallamento per uno snodo sferico radiale GEH 15 C. [42]	118
7.9	Dimensioni Cava Seeger JV, per un foro da 30mm. [43]	118

7.10	Tavola inserto per l'alloggio dello snodo sferico radiale.	119
7.11	Prototipo di bielletta: a) vista isometrica, b) vista frontale, c) vista laterale	120
7.12	Sezione ridotta del prototipo di bielletta	121
7.13	Afferraggio previsto per la parte superiore	122
7.14	Assieme dello stampo del prototipo di bielletta, all'interno della parte inferiore ci sono i tappi per il meccanismo di estrazione (quelli di dimensione inferiore), e la forma che permette di realizzare un foro di 20 <i>mm</i> nello stampo.	123
7.15	Parte superiore ed inferiore dello stampo	124
7.17	Bielletta finale: a) faccia superiore del componente a contatto con lo stampo superiore; b) faccia inferiore.	124
7.16	Primo prototipo di bielletta: a) faccia superiore del componente, in contatto con lo stampo superiore; b) faccia inferiore in contatto con lo stampo inferiore.	125
7.18	Risultati del codice MATLAB per la creazione del prototipo di bielletta, dopo la pulizia dei beam esterni alla regione del provino .	127
7.19	Vincoli applicati sul prototipo di bielletta	128
7.20	Risultati di simulazione con una mesh solida di dimensione target 1mm: a) deformazione della mesh solida lungo l'asse di carico; b) tensione assiale nei beam	129
7.21	Curva forza-spostamento ottenuta dalla simulazione FEM del prototipo di bielletta	129
7.22	Risultati di simulazione con una mesh solida di dimensione target 2mm: a) deformazione della mesh solida lungo l'asse di carico; b) tensione assiale nei beam	130
7.23	a) Curva forza-spostamento: confronto tra modello con e senza danneggiamento; b) deformazione della mesh solida lungo l'asse di carico.	131
7.24	Evoluzione del danneggiamento nel modello.	132
7.25	Set-up della prova di carico ciclico	133
7.26	Forza-spostamento con carico ciclico ad ampiezza 1 mm e offset nullo	134
7.27	Forza-spostamento con carico ciclico ad ampiezza 1.5 mm e offset 1 mm	135
7.28	Forza-spostamento con carico ciclico ad ampiezza 1.5 mm e offset 1.25 mm	135

7.29	Posizione degli elettrodi sul prototipo di bielletta: CH1 e CH3 nella cava della sezione ristretta; CH2 e CH4 sui lati della stessa zona . .	137
7.30	Andamento della resistenza in ogni canale per la prova ciclica con ampiezza 1 mm e offset nullo	137
7.31	Andamento della resistenza in ogni canale per la prova ciclica con ampiezza 1.5 mm e offset 1 mm	138
7.32	Andamento della resistenza in ogni canale per la prova ciclica con ampiezza 1.5 mm e offset 1.25 mm	138
7.33	Assieme della biella finale	139

Capitolo 1

Introduzione

L'impiego dei materiali compositi nel settore automobilistico risale agli anni Cinquanta, quando le forti tassazioni sull'acciaio nel periodo post-bellico spinsero l'industria a ricercare soluzioni alternative ai tradizionali materiali metallici. Se inizialmente l'utilizzo dei compositi rispondeva a esigenze contingenti, negli anni successivi questi materiali hanno progressivamente conquistato applicazioni di sempre maggiore rilievo grazie alla riduzione dei costi di produzione e al miglioramento delle tecniche di processo. Oggi i materiali compositi rappresentano una tecnologia chiave nei settori aerospaziale e automotive, dove la combinazione di elevata resistenza meccanica e ridotta densità costituisce un vantaggio fondamentale. Tra le varie famiglie di compositi, particolare interesse rivestono gli SMC (Sheet Moulding Compounds) a base di fibra di carbonio tranciata (chopped carbon fiber). Questi materiali uniscono le proprietà tipiche dei compositi rinforzati fibrosi a una maggiore lavorabilità e automazione di processo rispetto ai laminati in fibra continua, che richiedono personale altamente specializzato e attrezzature costose. Prodotti come il Forged Composites® di Lamborghini [1] hanno dimostrato come gli SMC possano essere adottati con successo in componenti automobilistici complessi, e diverse aziende, tra cui Marelli Ride Dynamics, hanno avviato programmi di ricerca e sviluppo dedicati. Nonostante i vantaggi, l'utilizzo degli SMC presenta sfide progettuali rilevanti. Le proprietà meccaniche risultano anisotrope e disomogenee, poiché dipendono dal flusso del materiale durante lo stampaggio e dall'orientamento locale delle fibre. Ciò rende difficile ottenere modelli predittivi accurati, condizione essenziale per il loro impiego in componenti strutturali automobilistici. In letteratura, due approcci principali sono stati sviluppati per affrontare questo problema:

- **Metodi analitici micromeccanici** (Eshelby, Mori-Tanaka, auto-consistente), che consentono di stimare le proprietà elastiche medie di compositi con fibre corte ma sono limitati nel descrivere variazioni locali e fenomeni non lineari come il danneggiamento.
- **Metodi numerici basati su analisi agli elementi finiti (FEA)**, che integrano micro- e mesostrutture nei modelli e migliorano la capacità predittiva, a fronte però di costi computazionali elevati.

Elemento chiave in questo contesto è la ricostruzione della mesostruttura. Algoritmi come il Random Sequential Adsorption (RSA) permettono di generare volumi rappresentativi (RVE) statisticamente equivalenti al materiale reale, ma risultano limitati a basse frazioni volumiche e orientazioni casuali. Altri metodi, come le simulazioni Monte Carlo, i processi di Poisson o le tecniche basate su immagini microscopiche e tessellazioni di Voronoi, hanno migliorato la rappresentazione della complessità locale, pur senza descrivere compiutamente la geometria tridimensionale e i meccanismi di rottura. Le ricerche più recenti hanno quindi sviluppato framework multiscala integrati che combinano simulazioni di processo, modelli mesoscopici e tecniche di riduzione del costo computazionale (es. metamodeling con Kriging), aprendo la strada alla realizzazione di veri e propri Digital Twin dei materiali SMC. Parallelamente, un ulteriore filone di ricerca riguarda le proprietà piezoresistive della fibra di carbonio. Questa caratteristica permette di correlare la variazione di resistenza elettrica con la deformazione meccanica, rendendo possibile lo sviluppo di componenti strutturali smart, capaci di monitorare i carichi applicati. L'integrazione delle funzionalità piezoresistive nei compositi strutturali apre nuove prospettive per applicazioni nell'automotive, in cui la riduzione del peso si accompagna a requisiti sempre più stringenti di sicurezza e monitoraggio in esercizio. In questo contesto si colloca la presente tesi, che ha come obiettivo la progettazione di una bielletta automobilistica, questa fa parte di un assieme sospensivo di un'autovettura. La bielletta collega l'active dumper con l'ammortizzatore. Questa viene realizzata in materiale composito SMC piezoresistivo, capace non solo di resistere ai carichi meccanici ma anche di monitorarne l'entità in tempo reale. Va precisato che, nella tesi, non vengono valutate sperimentalmente le proprietà meccaniche dell'SMC, ma quelle di un materiale simile, il Carbon Forged. Questo perché il Carbon Forged è più semplice da lavorare in un laboratorio di piccole dimensioni, pur mantenendo caratteristiche analoghe: si tratta infatti di un composito a fibre corte con lunghezza relativamente lunga, come l'SMC. L'attività ha previsto un percorso articolato che comprende:

- Caratterizzazione sperimentale delle proprietà meccaniche e piezoresistive del Carbon Forged.
- Ricostruzione della mesostruttura a partire da dati tomografici e statistiche locali.
- Sviluppo e validazione di un modello numerico multiscala FEM

Il modello FEM utilizza un approccio constrained beam-in-solid per rappresentare in modo efficiente la mesoscala: le fibre o le chip sono modellate tramite elementi trave (beam) inseriti nella matrice continua solida e vincolati cinematicamente al volume solido mediante constraint di tipo tie/embedded. Questo accoppiamento consente di catturare l'anisotropia locale e la trasmissione degli sforzi senza dover risolvere esplicitamente una mesh estremamente dettagliata per ogni fibra, riducendo i tempi computazionali e permettendo di assegnare leggi costitutive differenziate per la componente fibrosa e per la matrice. Il modello è implementato e validato con simulazioni numeriche (script MATLAB per preprocessamento e mesh, solver FEA per analisi meccanica e confronto con tomografia e DIC). Infine, un prototipo di bielletta è stato prodotto mediante stampaggio a compressione in SMC.

1.1 Struttura della tesi

La tesi è organizzata nel seguente modo:

- **Capitolo 2: SMC.** Breve introduzione sui compositi a fibre corte. Compositi SMC, processo tecnologico di produzione, orientamento delle fibre nello stampo e proprietà meccaniche.
- **Capitolo 3: Carbon Forged.** Processo di produzione, microstruttura del materiale e similarità con l'SMC, a seguire caratterizzazione meccanica.
- **Capitolo 4: Capacità piezoresistive della fibra di carbonio.** Comportamento della resistenza nella fibra di carbonio, correlazione con la deformazione, a seguire risultati sperimentali sui provini in carbon forged.
- **Capitolo 5: Simulazione FEM di un provino SMC/Carbon Forged.** Stato dell'arte sui modelli FEM per i materiali compositi SMC e spiegazione del modello con constrained beam in solid. Tensore di orientamento all'interno del provino e come ottenerlo nel caso di materiale SMC o nel caso del Carbon Forged, implementazione del tensore in LS Dyna. Verifica della coerenza del modello al variare di alcuni parametri.

- **Capitolo 6: Validazione del modello FEM.** Modello FEM dei provini in Carbon Forged testati nel capitolo 3, con confronto delle rigidezze, deformazioni del provino e tensioni all'interno dei beam.
- **Capitolo 7: Progettazione della bielletta in Carbon Forged.** Progettazione della bielletta finale, con test sulla stampabilità, proprietà meccaniche e proprietà piezoelettriche di un prototipo di bielletta.

Capitolo 2

SMC

Per SMC possiamo individuare sia il materiale che il processo di tecnologico di produzione, infatti in letteratura SMC sta per "Sheet Moulding Compound" oppure "Sheet Moulding Compression", in modo da individuare sia il materiale che il processo. E' composto da resina, fibre di rinforzo, cariche ed additivi. Il compito della resina è quello di tenere le fibre insieme come una colla, in modo tale da trasferire il carico su di esse, inoltre protegge da danni meccanici e ambientali. La matrice di solito è termoindurente come la resina epossidica o resina vinilestere, il rinforzo può essere fibra di carbonio o fibra di vetro. Viene classificato nell'area dei materiali compositi, come composito a fibre corte, infatti il materiale di rinforzo è composto da fibre tagliate con una lunghezza che spazia tra i valori di $12 - 50 \text{ mm}$. La percentuale in massa del materiale di rinforzo può arrivare anche a valori elevati fino a $M_f = 60\% - 65\%$, in alcuni casi però si utilizzano valori inferiori per migliorare le qualità di stampa, chiaramente per frazioni in massa di rinforzante inferiori corrispondono caratteristiche meccaniche inferiori. Le proprietà meccaniche di questo materiale sono inferiori rispetto ai compositi prodotti nella maniera tradizionale con fibre continue o tessuti, ma diversamente da questi il processo produttivo è facilmente automatizzabile, inoltre è meno costoso. Il processo di produzione in poche parole è molto simile ad un processo di stampaggio ad iniezione, infatti c'è uno stampo, in cui viene inserita una carica di composito pre impregnato, lo stampo si chiude e la carica si deforma nello stampo. Le elevate pressioni e temperature presenti nello stampo favoriscono la polimerizzazione della resina, ottenendo così rapidamente un semilavorato che somiglia al prodotto finale.

2.1 Compositi a fibre corte

Per capire il comportamento meccanico dell'SMC e i vantaggi di avere un composito a fibre corte con una lunghezza delle fibre relativamente elevata, bisogna capire come il carico si trasferisce tra la resina e le fibre. Nei compositi infatti, le fibre sono immerse all'interno di una matrice, quando viene applicato un carico esterno, questo è applicato direttamente sulla matrice e da lì si propaga verso le fibre. Immaginando le fibre come dei cilindri perfettamente dritti, si può pensare che una piccola parte del carico viene trasferita dalla matrice alla fibra sulle basi del cilindro, mentre la maggior parte del carico viene trasferita lungo la superficie laterale del cilindro. Nei compositi a fibra corta, in certi casi la superficie laterale del cilindro non è abbastanza estesa da permettere un grande scambio di carico. Andando a prendere una fibra di lunghezza infinitesimale dx in una piastra caricata, questa avrà un carico assiale σ_f lungo la direzione della fibra, e un carico di taglio τ lungo la superficie cilindrica. La variazione del carico assiale, lungo la lunghezza della porzione infinitesimale della fibra è dovuta al fatto che la matrice trasferisce il carico sulla fibra applicando uno sforzo di taglio sulla superficie cilindrica.

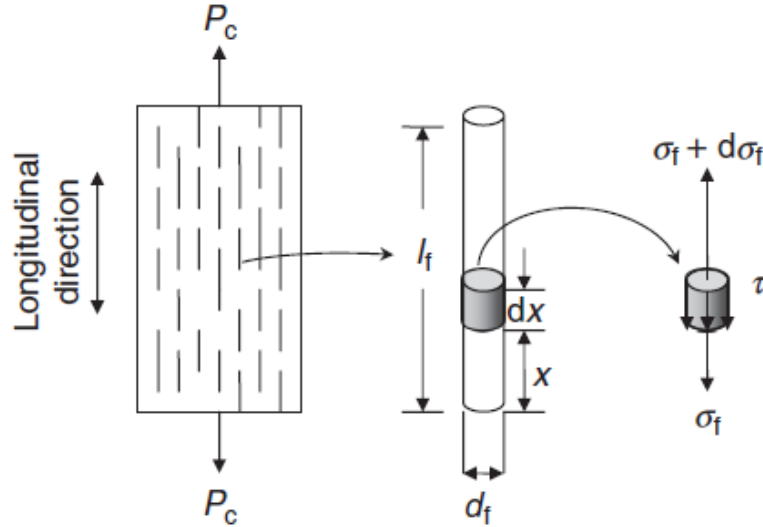


Figura 2.1: Modello di trasferimento del carico.[2]

Andando a fare l'equilibrio delle forze sulla porzione infinitesima di fibra ho:

$$(\sigma_f + d\sigma_f) \pi r_f^2 - \sigma_f \pi r_f^2 - \sigma_f \pi r_f^2 - \tau_m 2\pi r_f dx = 0$$

Dove r_f è il raggio della fibra, σ_f il carico assiale applicato sulla fibra e τ_m la tensione di taglio scaricata dalla matrice sulla fibra. Semplificando i passaggi:

$$d\sigma_f \pi r_f^2 = \tau_m 2\pi r_f dx$$

$$\frac{d\sigma_f}{dx} = 2 \frac{\tau_m}{r_f}$$

$$\sigma_f = \frac{2}{r_f} \int_{l_f} \tau_m dx \quad (2.1)$$

Se τ_m è costante lungo la lunghezza della fibra l_f , ottengo una variazione lineare della σ_f . Imponendo una tensione assiale nulla agli estremi della fibra ottengo:

$$\begin{cases} \sigma_f = \frac{2\tau_y}{r_f} x + \sigma_{f,0} \\ \sigma_f(z=0) = 0 \end{cases} \Rightarrow \sigma_f = \frac{2\tau_y}{r_f} x \quad (2.2)$$

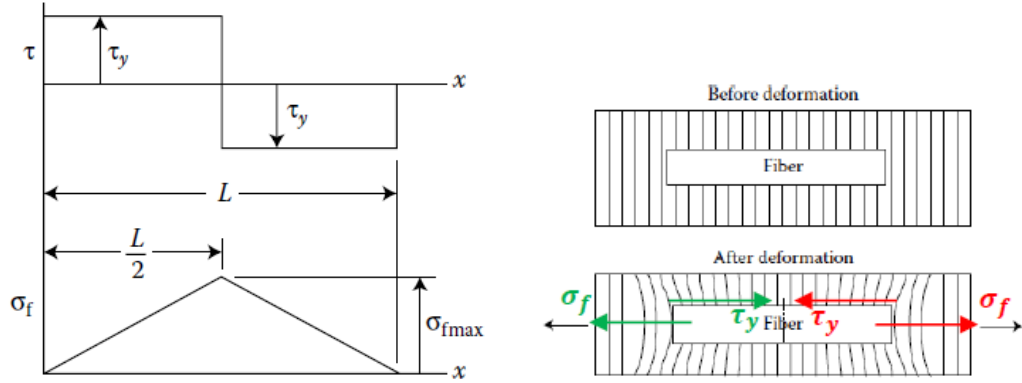


Figura 2.2: Andamento delle tensioni di taglio e tensioni assiali sulla lunghezza della fibra.[2]

Quindi la tensione assiale della fibra varia linearmente con la distanza da un estremo, e deve essere nulla in entrambi gli estremi. Perciò la tensione assiale deve essere simmetrica lungo la lunghezza della fibra, e deve avere un massimo al centro, vedi figura 2.2. Il valore massimo è pari a:

$$\sigma_{f,max} = \tau_y \frac{l_f}{r_f} \quad (2.3)$$

Questo significa che il carico massimo che può sostenere la fibra è direttamente proporzionale alla lunghezza della fibra, ed è limitato chiaramente dal carico di rottura del grafene σ_{Tfu} . La lunghezza per il quale si raggiunge il carico massimo della fibra σ_{Tfu} nel centro della fibra è detta lunghezza critica della fibra l_c .

$$\tau_y \frac{l_f}{r_f} = \sigma_{Tfu} \rightarrow l_c = r_f \frac{\sigma_{Tfu}}{\tau_y}$$

Si sviluppano quindi 3 casistiche:

- Se $l_f < l_c$ la fibra non andrà sicuramente in contro a rottura, il cedimento del composito è guidato dalla matrice.
- Se $l_f \geq l_c$ la rottura può avvenire in una singola porzione della fibra, nel caso in cui $l_f = l_c$ può avvenire in un solo punto.
- Se $l_f \gg l_c$ la fibra corta si comporta come una fibra lunga e la rottura può avvenire in tutta la fibra.

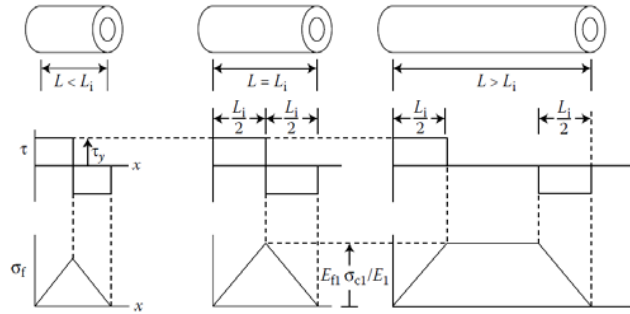


Figura 2.3: Variazione della tensione assiale nella fibra, al variare della lunghezza.[2]

Questo spiega le motivazioni dietro alle ottime proprietà meccaniche dell'SMC, questo materiale pur essendo classificato come composito a fibre corte, ha una lunghezza della fibra che permette una buona ripartizione del carico tra matrice e fibra. Naturalmente maggiore è la lunghezza della fibra e maggiori saranno le difficoltà nell'ottenere componenti meccanici con forme complesse. L'SMC ha lunghezze della fibra nel range di 25 – 50 mm, tra i materiale compositi a fibre corte è quello con lunghezze della fibra più elevate.

2.2 Processo tecnologico di produzione

Il processo tecnologico parte dalla produzione della carica/foglio di composito pre impregnati, nella figura 2.4 viene riassunto il processo. Si parte quindi da un film di resina, dove vengono inserite le fibre tagliate, successivamente, un secondo film di resina viene posizionato al di sopra. Questo sandwich viene poi compattato da una serie di rulli fino a raggiungere lo spessore della carica desiderata. Questa fase è molto importante poiché migliora l'adesione tra matrice e rinforzo, inoltre rimuove eventuali bolle d'aria intrappolate all'interno. Successivamente questo nastro viene arrotolato formando un grande rotolo.

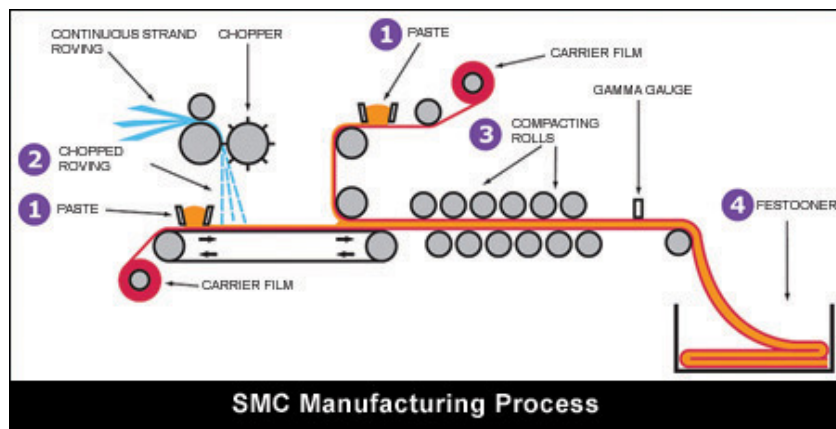


Figura 2.4: Processo di fabbricazione di un rotolo [3]

I rotoli di solito sono composti da resina, fibra, catalizzatori e agenti che limitano il ritiro volumetrico, agenti che limitano la reticolazione e distaccanti. C'è da considerare il fatto che la resina utilizzata è già parzialmente curata, questo perché i rotoli devono garantire una certa consistenza per essere maneggiati e trasportati agevolmente. I rotoli di solito devono essere utilizzati nell'arco di qualche settimana, altrimenti la resina si cura e non è più possibile utilizzarli. Per evitare questo e prolungare la vita dei rotoli prima di essere utilizzati vengono messi in frigorifero, infatti ad una temperatura di -18°C è possibile maneggiarli anche dopo 5/6 mesi. Una cosa da sottolineare durante il processo è che le fibre in realtà non hanno un orientamento totalmente casuale, ma sono orientate soprattutto lungo la direzione di scorrimento del nastro durante la produzione, infatti di solito viene considerata la direzione 0° del rotolo la direzione di avanzamento, mentre 90° la direzione trasversale. Questo argomento è molto importante e verrà affrontato nei prossimi paragrafi. Successivamente alla produzione del rotolo di composito si passa allo

stampaggio, questo inizia mettendo all'interno dello stampo la carica, lo stampo viene pre-riscaldato. Solitamente questa non viene distribuita in tutto lo spazio ma in circa il 70%, questo deriva dal fatto che lo spessore della carica è maggiore di quello del componente finale, viene fatta quindi fluire nelle cavità scoperte dello stampo.

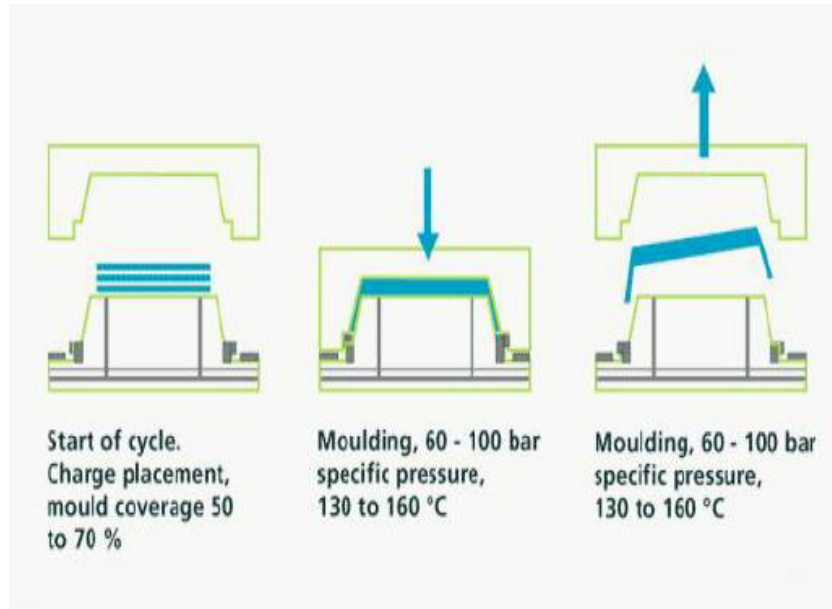


Figura 2.5: Processo di stampaggio dei fogli SMC [4]

Successivamente lo stampo viene chiuso utilizzando pressioni elevate, nell'intorno dei 60 – 100 *bar* ed alte temperature 130° – 160°C, permettendo quindi una rapida polimerizzazione della carica. Per dare un ordine di grandezza dei tempi di produzione, utilizzando una resina vinilestere e fibra di carbonio, alla temperatura di 150°C e pressione di 100 *bar*, il composito cura in 5 minuti [5].

2.2.1 Orientamento delle fibre nello stampo

Le proprietà meccaniche del prodotto finale dipendono molto dal processo di produzione, infatti le fibre all'interno del semilavorato non sono orientate del tutto in modo casuale, ma hanno un'orientamento influenzato da più fattori, queste variazioni di orientamento e densità di fibre nel materiale lo rendono anisotropo e non omogeneo. Partendo dal rotolo di composito iniziale, come anticipato in precedenza, le fibre sono orientate secondo una direzione preferenziale cioè quella a 0°, mantenendo questa predisposizione, andando a posizionare in un modo o in un

altro la carica, si avrà un prodotto finito con proprietà meccaniche molto diverse tra la direzione 0° e 90° (comportamento ortotropo). Ma la vera variabile nelle proprietà meccaniche di questo materiale è il modo in cui le fibre scorrono all'interno dello stampo, infatti durante il processo di stampaggio, la carica viene deformata, quindi questa si deforma andando ad occupare tutto lo spazio. L'orientazione delle fibre nel componente finale quindi è qualcosa di difficile da prevedere, in figura 2.6 vengono riportate delle simulazioni di processo, fatte tramite il software Moldex3D [6] nell'articolo [7]. In questo lavoro viene accentuato l'effetto di scorrimento, infatti la carica è posizionata in una piccola zona dello stampo, occupa il 20% dell'area, viene usata una carica con resina vinilestere rinforzata con il 53% in massa di fibra di carbonio, con fibre lunghe 25.4 mm. Questa simulazione è stata calibrata con una piastra effettivamente realizzata. Nella figura (b) viene riportato il campo della componente x del tensore di orientamento, questo valore è sempre al di sopra dello 0.5, quindi c'è una forte tendenza delle fibre ad orientarsi verso l'asse x, questo è abbastanza scontato poichè la carica deve scorrere lungo questa direzione per riempire lo stampo.

Nelle figure (c), (d) ed (e) sono riportati i provini che sono stati ricavati da questa piastra, vengono tagliati diversi provini con diverso orientamento in modo tale da vedere la variazione delle proprietà meccaniche. Nella figura 2.7 vengono riportati i risultati delle prove di trazione, come ci si poteva aspettare i provini tagliati lungo l'asse x (0°) hanno un modulo elastico maggiore $42.3 \pm 1.8 \text{ GPa}$, mentre quelli tagliati lungo l'asse y (90°) hanno modulo elastico inferiore $17.1 \pm 1.1 \text{ GPa}$.

Una differenza di circa ~ 2 volte e mezzo di modulo elastico, in questo caso l'orientamento delle fibre è facile da prevedere, ma nel caso di pezzi con forme complesse, il problema non è scontato.

2.3 Proprietà meccaniche

In figura 2.8 vengono riportate le curve Stress-Strain di prove di trazione condotte da Josh Kelly e altri [8] su provini DogBone in materiale SMC. Questo è composto da una matrice in resina vinilestere e rinforzante in fibra di vetro, vengono riportati due tipi di composizioni, una al $V_f = 25\%$ di rinforzante e una al $V_f = 45\%$. Le curve di trazione sono nel primo tratto molto lineari e man mano che lo stress avanza ci sono dei fenomeni di riduzione della rigidità, per capire meglio il comportamento bisogna osservare cosa accade al livello della microstruttura. In figura 2.9 vengono riportate le principali cause di danneggiamento nei materiali compositi, nel caso di compositi a fibra corta e in particolare nel materiale SMC, i meccanismi più

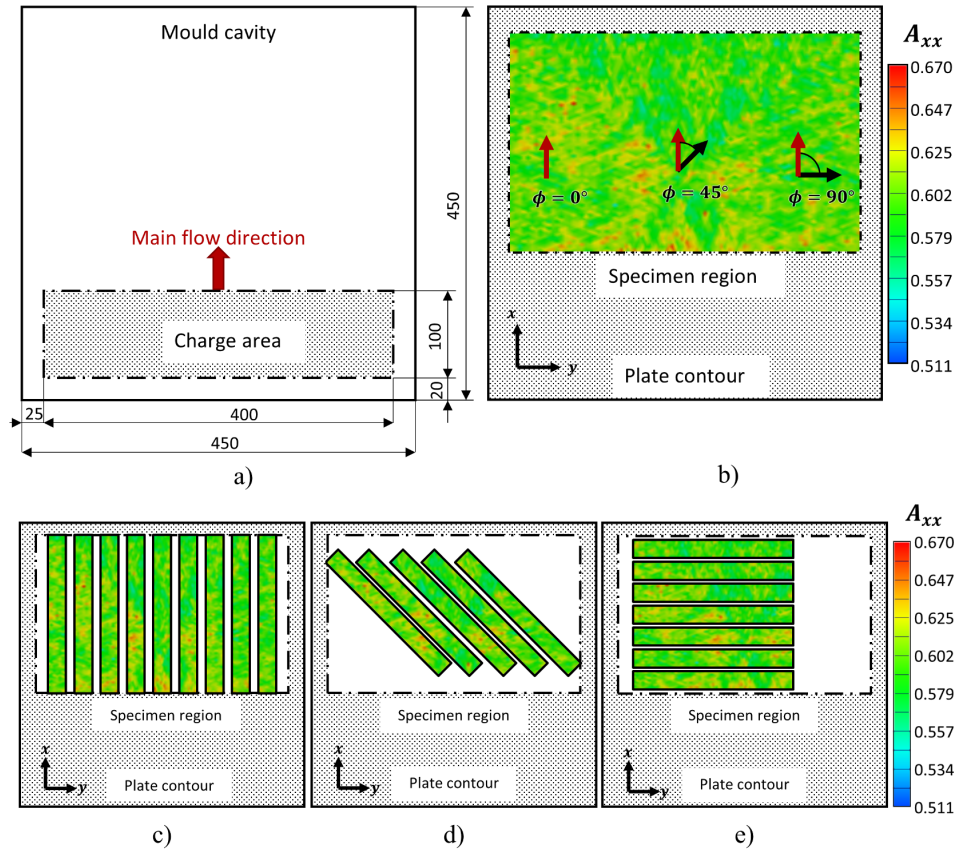


Figura 2.6: Simulazione di processo di uno stampo ad iniezione fatta con Moldex3D [6], nella figura (a) è riportata la zona in cui viene piazzata la carica iniziale, nella (b) la componente x del tensore di orientamento in ogni punto dello stampo finito, nel (c) i provini ritagliati lungo la direzione 0%, (d) 45% ed (e) 90%. [7]

comuni sono: tutti i fenomeni di danneggiamento del piano quindi, estrazione delle fibre, danneggiamento di fibre, danneggiamento della matrice, ed altri. Molto importante è il fenomeno di pseudo-delaminazione, la struttura è formata da varie zone in cui c'è predominanza di fibre posizionate in una certa direzione, le cricche di solito propagano sul bordo di queste zone. L'insorgere di un meccanismo di danneggiamento rispetto ad un altro è dettato dal caso di carico, dalla velocità di deformazione e orientamento delle fibre all'interno del provino.

Per velocità di deformazioni meno elevate come è stato fatto nella prova di trazione in figura 2.10 da Mohammadali Shirinbayan, ed altri [9], in cui viene riportata anche la relativa microstruttura presente al punto nella curva di trazione, i meccanismi di danneggiamento dipendono principalmente dall'orientamento

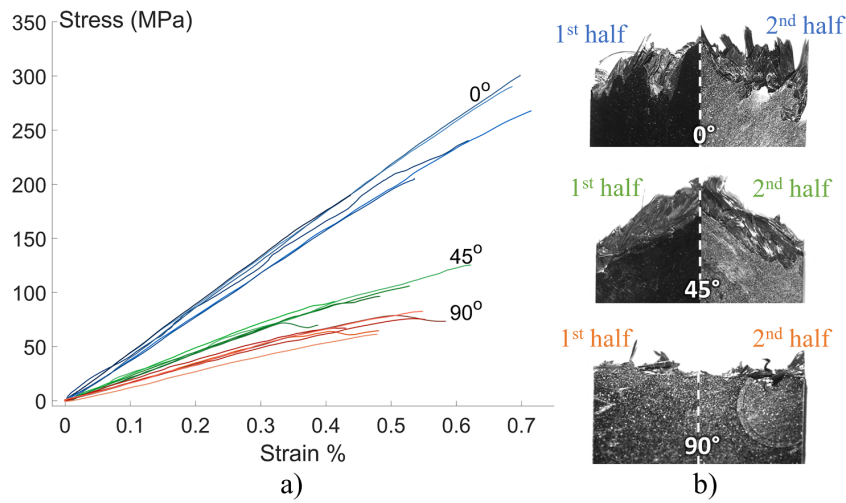


Figura 2.7: Risultati dei test meccanici sui provini e profili di frattura. [7]

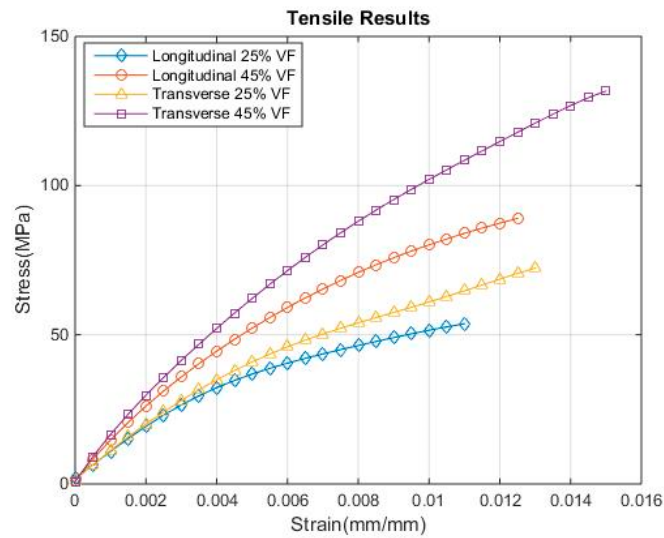


Figura 2.8: Curve Stress-Strain ricavate da prove di trazione su provini dogbone SMC, con matrice composta da resina vinilestere e rinforzo in fibra di vetro. Vengono riportati due orientamenti e due diverse percentuale di rinforzante. [8]

delle fibre all'interno del provino. Ci sono infatti due fenomeni principali che concorrono alla rottura, cioè il distacco dell'interfaccia tra fibra e matrice e la pseudo-laminazione.

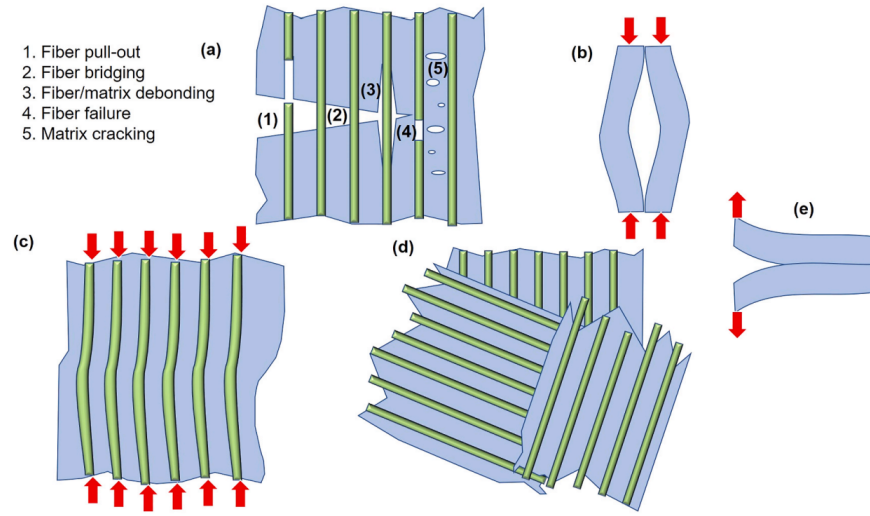


Figura 2.9: Schema dei meccanismi di danneggiamento nei compositi rinforzati con fibre; (a) danneggiamento nel piano, (b) delaminazione per instabilità (buckling), (c) micro-instabilità (micro-buckling), (d) pseudodelaminazione e (e) delaminazione. [9]

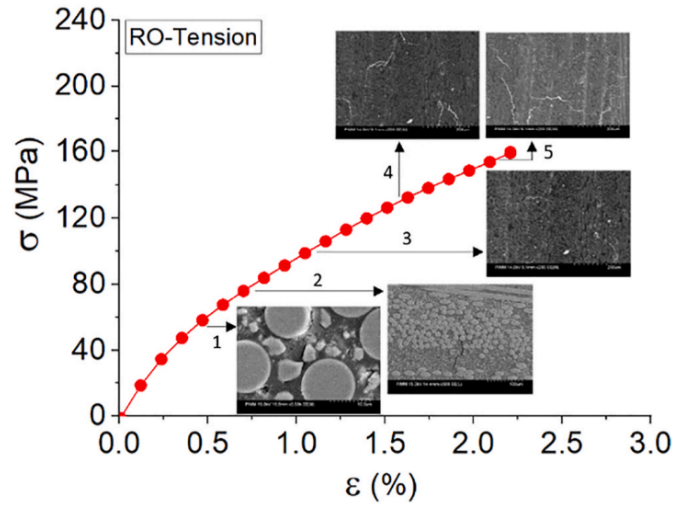


Figura 2.10: Prove di trazione quasi-statiche per il composito RO-A-SMC (SMC con orientamento casuale e con una percentuale in massa di rinforzo al di sopra del $M_f = 50\%$) abbinate all'osservazione della microstruttura: (1): decohesione fibra/matrice, (2): propagazione della decohesione fibra/matrice e microfessurazione della matrice, (3), (4) e (5): microfessurazione della matrice e meccanismi di pseudodelaminazione. [9]

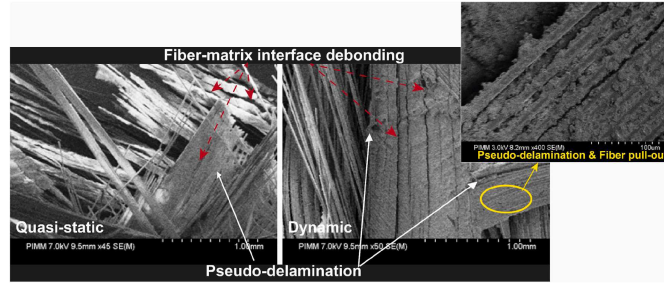


Figura 2.11: Superfici di frattura per una prova di trazione quasi statica.[9]

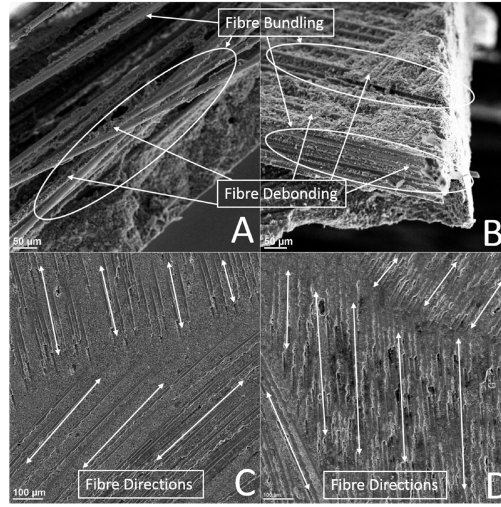


Figura 2.12: Superfici di frattura dei provini, (A) provino con $V_f = 25\%$ a $50\mu m$, (B) provino con $V_f = 45\%$ a $50\mu m$, (C) sezione trasversale superiore del provino con $V_f = 25\%$ a $100\mu m$, (D) sezione trasversale superiore del provino con $V_f = 45\%$ a $100\mu m$. [8]

2.3.1 Anisotropia e disomogeneità delle proprietà meccaniche

Le curve Stress-Strain viste in precedenza in realtà danno un'indicazione di come si comporta in media il provino, infatti come detto in precedenza, questo è un materiale anisotropo e non omogeneo. Si possono infatti notare attraverso un'analisi DIC (Digital Image Correlation) di una prova di trazione, come sulla superficie del provino ci siano zone molto più deformate rispetto ad altre. Nella figura 2.13 viene riportata un'analisi DIC di una prova di trazione effettuata su un provino in SMC condotta da Tiefenthaler M. ed altri [10]. Nell'immagine viene raffigurato un frame della prova di trazione, si può notare come il provino non ha deformazione costante

lungo tutta la sua lunghezza, infatti andando poi a vedere nella figura in basso, dove viene riportata la frequenza di acquisizione di una certa fascia di strain per ogni punto di campionamento del provino, la maggior parte dei punti si attestano nell'intorno dei $0.4 - 0.8\%$ di strain, ma ci sono punti che si trovano a valori al di sopra del 3% .

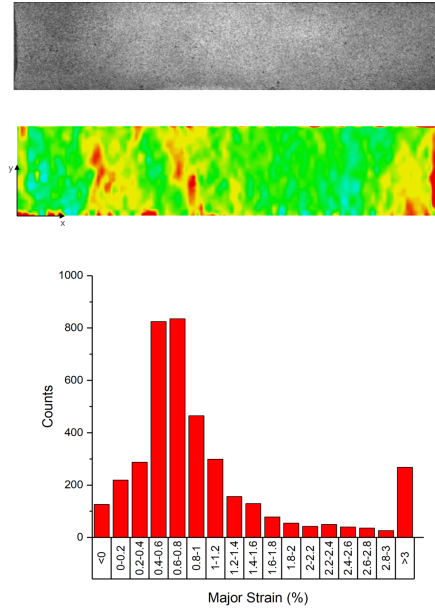


Figura 2.13: Analisi DIC (Digital Image Correlation) su una prova di trazione di un provino in materiale SMC. [10]

E' proprio in questi picchi di deformazione che poi il provino inizia a danneggiarsi portando alla rottura, diventa quindi essenziale andare a capire le cause per caratterizzare meglio il materiale. Nella figura 2.14 viene riportato il modulo elastico lungo ogni sezione del provino, ricavato mediante analisi DIC da una prova di trazione eseguita da Haibin Tang ed altri [11]. Nella parte inferiore viene riportato un frame subito prima della rottura del provino dell'analisi DIC, in particolare sono evidenziati da dei quadrati delle zone del provino del quale viene riportata la microstruttura in figura 2.15.

Da queste immagini è chiaro come a modulo elastico inferiore corrisponde nella sezione un orientamento delle fibre sfavorevole alla direzione del carico, infatti nel punto in cui si raggiungono moduli elastici inferiori nel provino (a), corrisponde un orientamento trasversale delle fibre rispetto all'orientamento del carico. Mentre nel provino (b) la zona in cui si ha modulo elastico maggiore è quella in cui si hanno le

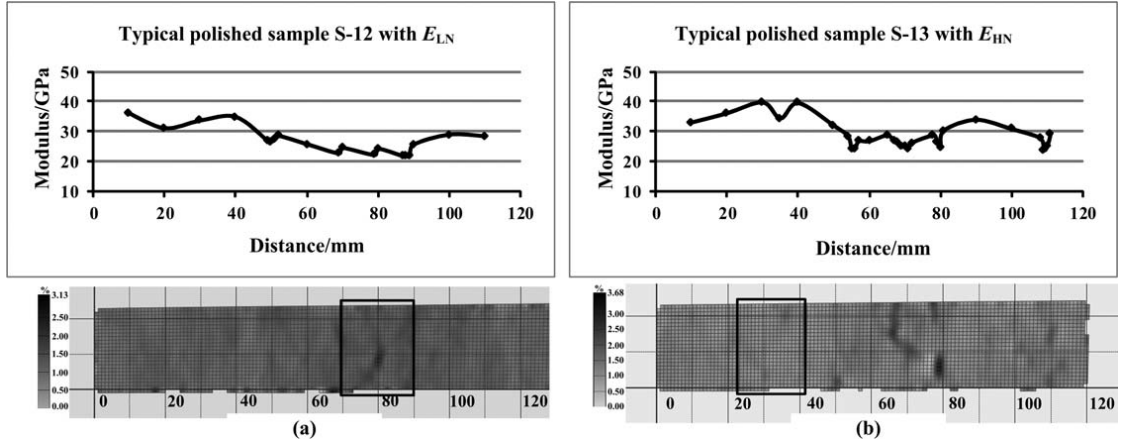


Figura 2.14: Analisi DIC di un prova di trazione su materiale SMC, Nelle immagini superiori viene riportato il modulo elastico misurato durante la prova in ogni sezione. [11]

fibre orientate nella maggior parte nella direzione del carico. Nel caso di questo materiale a complicare le cose c'è anche la M_f non costante in tutto il provino, infatti le fibre scorrendo nello stampo, possono creare delle zone più ricche di resina e zone meno ricche, con conseguente diminuzione del modulo elastico locale. In figura 2.16 viene riportato un esempio di zona più ricca di resina.

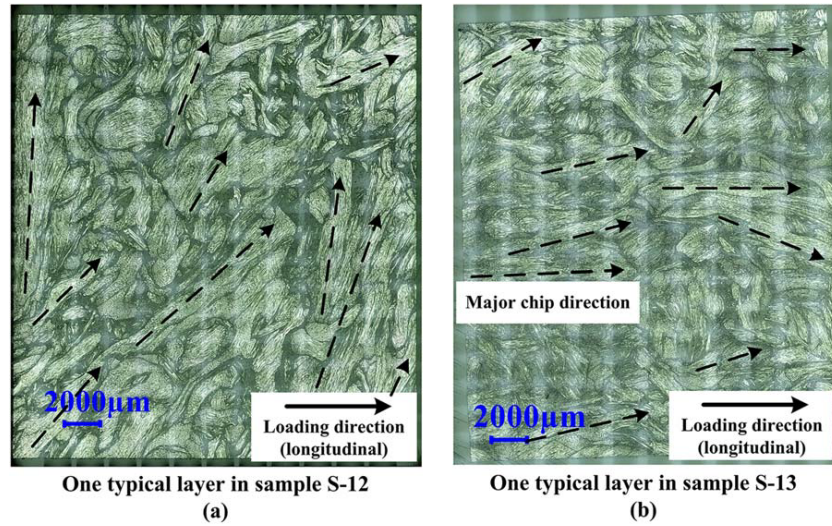


Figura 2.15: Microstruttura della parte esteriore dei provini, in particolare vengono riportate le sezioni riquadrate in figura 2.14.[11]

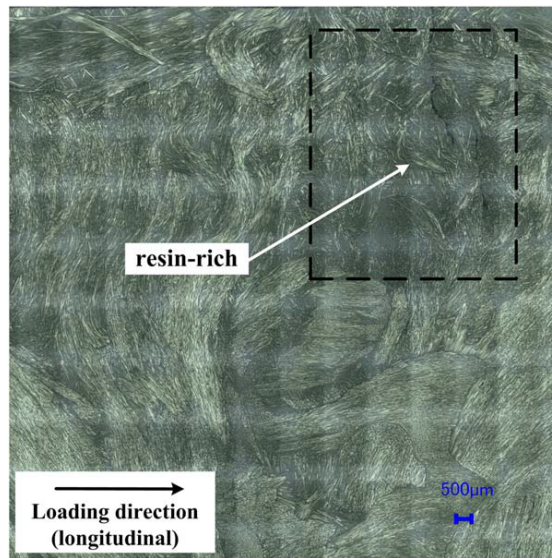


Figura 2.16: Zona a minor concentrazione di fibre M_f ridotta all'interno del materiale.[11]

L'analisi dell'SMC ha evidenziato i limiti legati alla complessità del processo e alla difficoltà di caratterizzazione meccanica dovuta alla disomogeneità interna. Per ovviare a tali criticità, nel capitolo 3 si introduce il Carbon Forged, materiale analogo per struttura e comportamento ma più facilmente lavorabile in laboratorio, utilizzato per sviluppare prove sperimentali e modelli numerici utili alla successiva applicazione sull'SMC.

Capitolo 3

Carbon Forged

Il carbon forged come l'SMC è un materiale composito a fibre corte, la matrice è di solito in resina epossidica, i rinforzi più utilizzati sono fibra di vetro o fibra di carbonio. Anche in questo caso le fibre sono tagliate abbastanza lunghe $5 - 30 \text{ mm}$, e la mass fraction si aggira nell'intorno del $M_f = 50\%$. Il prodotto finale che si ottiene è molto simile a quello che si ottiene con l'SMC, cambia il processo di produzione, viene utilizzato sempre uno stampo, solo che in questo caso le fibre e la resina vengono posizionati a mano al suo interno, l'orientamento delle fibre non dipende da come queste scorrono all'interno dello stampo.



Figura 3.1: Backplate un volante realizzato in carbon forged usando scarti di lavorazione di tessuto in fibra di carbonio

E' possibile realizzare anche manufatti molto complessi, mediante stampi realizzati con una stampante 3D a filamento, le temperature infatti sono più basse

rispetto ad un processo SMC, e le pressioni in gioco non richiedono l'utilizzo di uno stampo metallico. Il processo quindi è molto più snello e più praticabile in un piccolo laboratorio, queste caratteristiche lo rendono un buon sostituto all'SMC per una prima caratterizzazione meccanica, e lo sviluppo di un modello FEM applicabile sull'SMC. Questo materiale ha però dei limiti, e sono collegati soprattutto al processo, infatti a causa delle condizioni in cui cura la resina, il pezzo finale avrà al suo interno una quantità maggiore di pori, rispetto all'SMC, questo aspetto verrà poi approfondito nei paragrafi successive.

3.1 Processo di produzione

Il processo di produzione del Carbon Forged non è univoco, infatti ci sono più modi per produrre un manufatto. Il metodo più utilizzato è quello consigliato anche da EasyComposites [12] in cui si parte da uno stampo, realizzato mediante una stampante 3D a filamento.

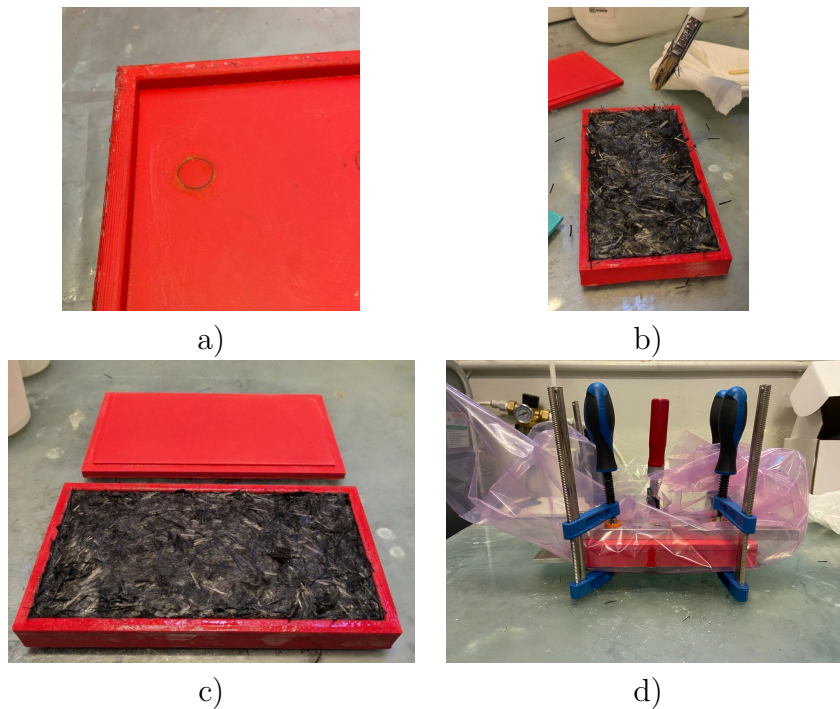


Figura 3.2: Fasi della procedura di produzione di una piastra in carbon forged consigliata da easy composites

Successivamente si ricopre lo stampo con uno staccante spray a base di cera, e

si inizia con la fase di laminazione. Qui viene posizionato prima di tutto uno strato di resina, e viene applicato il primo strato di fibra di carbonio, questa viene fissata mediante un pennello. Si continua con il processo fino a completo riempimento dello stampo. Una volta completato lo stampo viene chiuso e pressato mediante delle morse, questo rimane così fino ad indurimento della resina, che nel nostro caso si tratta di 24h. Le fasi sono illustrate nella figura 3.2. Questo processo, per quanto semplice, nasconde delle insidie, queste sono legate alla quantità di fibre e resina da utilizzare. EasyComposites consiglia di utilizzare resina epossidica in eccesso, di solito una quantità pari al 125% di quella necessaria calcolata. Questo è fatto in modo tale da garantire di riuscire a bagnare tutte le fibre con la resina, dato che sia resina che fibre vengono posizionate a mano, durante il processo bisogna far sì che in tutte le zone ci sia la giusta quantità di resina e fibre, altrimenti si rischia di peggiorare le caratteristiche meccaniche del manufatto finale. Questo processo quindi non è molto ripetibile poichè sta alla bravura dell'operatore dosare bene durante il processo, inoltre si rischia che a fine pezzo si inserisca più resina del dovuto. Si è pensato quindi ad un nuovo processo, che riprende molto il processo produttivo dell'SMC, infatti la fibra e la resina vengono mescolati prima del processo, in modo tale da bagnare uniformemente tutte le fibre, ed essere sicuri delle quantità di resina e fibra utilizzati.

3.1.1 Materiale utilizzato e stampo

Per il processo si è utilizzato il Forged Carbon Fibre Development Kit prodotto da EasyComposites [13], in cui è contenuto tutto il necessario per realizzare un manufatto in Carbon Forged:

- Fibra di carbonio già tagliata con una lunghezza di 10 *mm*.
- Resina epossidica IN2: questa ha un tempo di indurimento di 12h a temperatura ambiente.
- Cera spray RW4
- Cera per sigillatura: questa è solida e viene utilizzata per turare eventuali fori o possibili fughe nello stampo
- Pennelli per la laminazione

Una parte fondamentale è la creazione dello stampo per la laminazione, questo viene realizzato mediante una stampante 3D a filamento, di solito vengono utilizzati

materiali come ABS o PETG, poichè hanno buona stampabilità, buone caratteristiche meccaniche alta temperatura di rammollimento (relativamente ai materiali utilizzati nella stampa 3D), inoltre sono meno compatibili con la resina epossidica. Nella progettazione dello stampo bisogna rispettare delle linee guida, questo per evitare di distruggerlo subito dopo una laminazione, e per facilitare l'estrazione:

- Evitare angoli di spoglia nulli: vengono utilizzati angoli al di sopra dei 3° in modo tale da facilitare l'estrazione.
- Evitare zone eccessivamente rastremate: avendo fibre relativamente lunghe (nel mio caso 12 mm), è importante non creare cavità in cui queste non possano penetrare agevolmente.
- Creare dei meccanismi di estrazione: nel mio caso ho utilizzato un meccanismo molto semplice, in cui viene inserito un dado scaldandolo e spingendolo con un saldatore a stagno in un'apposita cavità dello stampo. Questo viene poi ricoperto con un tappo e sigillato mediante la cera. Una volta curata la resina si inserisce una vite nella parte inferiore dello stampo che spingerà il tappo e quindi il manufatto all'esterno.

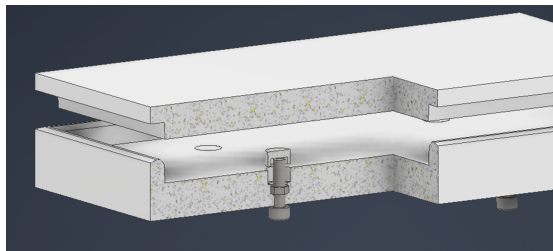


Figura 3.3: Meccanismo di estrazione

3.1.2 Processo ottimizzato

Il processo quindi si articola nei seguenti passaggi:

1. Preparazione dello stampo:

- (a) Carteggio dello stampo, questo passaggio è fondamentale, soprattutto per le pareti parallele alla direzione di estrazione del manufatto. Infatti essendo lo stampo realizzato mediante una stampante 3D a filamento queste pareti sono caratterizzate da un pattern simile a quello in figura 3.4, per questioni geometriche una volta che la resina indurisce, e si

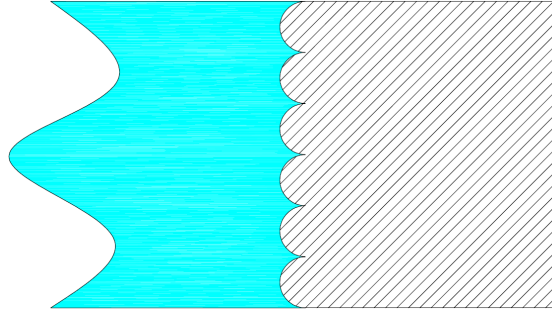


Figura 3.4: Interfaccia tra la resina e la parete dello stampo, realizzato mediante stampante 3D, in blu la resina in tratteggiato lo stampo

vuole estrarre il manufatto è impossibile farlo. Bisogna quindi carteggiare obbligatoriamente le pareti laterali, e per migliorare la finitura superficiale del pezzo finale anche il resto delle superfici.

- (b) Applicare la cera per sigillatura nei punti in cui ci potrebbe essere trafilamento di resina, nel mio caso è stata applicata nei tappi di estrazione.
- (c) Applicare lo staccante spray: bisogna dare come minimo 3 mani, ognuna va fatta asciugare per almeno 5/10 minuti. E' molto importante applicare anche lo staccante sul retro in modo tale da evitare che la resina che fuoriesce aderisca al fondo.

2. Preparazione dell'impasto di resina e fibra di carbonio

- (a) Calcolo il peso di fibra e resina necessari: si parte andando a trovare il volume del manufatto finale, questo viene di solito calcolato dal programma CAD utilizzato. La densità del composito finale si ottiene con la densità delle fibre di carbonio $\rho_f = 1800 \frac{g}{cm^3}$, la densità della resina utilizzata $\rho_m = 1200 \frac{g}{cm^3}$ e la percentuale di fibre in massa che si vuole utilizzare, nel mio caso ho utilizzato $M_F = 50\%$, quindi si ottiene:

$$\rho_c = \frac{1}{\frac{M_f}{\rho_f} + \frac{M_m}{\rho_m}} = 1400 \frac{g}{cm^3}$$

E' possibile ora calcolare la massa del manufatto finale e da questo risalire alla quantità di fibre e di resina necessari.

- (b) Una volta preparata la quantità di resina necessaria e la quantità di fibre necessarie si procede alla preparazione dell'impasto. Qui viene miscelata poca resina alla volta nel contenitore delle fibre, in modo tale da avere un'impasto più uniforme.

3. **Fase di laminazione:** in questa fase l'impasto viene posizionato all'interno dello stampo. È fondamentale monitorare accuratamente gli spessori poiché, considerando che la successiva fase di compressione avviene a pressioni e velocità ridotte, il materiale non fluisce agevolmente all'interno dello stampo. Di conseguenza, eventuali variazioni di spessore rispetto al componente finale risulteranno difficili da compensare.



Figura 3.5: Posizionamento dell'impasto di fibra e resina nello stampo

4. **Fase di compressione:** una volta completata la stesura dell'impasto si passa alla chiusura dello stampo, la compressione avviene mediante delle morse, queste vanno chiuse poco alla volta in modo tale da dare il tempo al materiale di assestarsi. Una cosa importante durante questa fase è controllare l'allineamento della parte superiore con quella inferiore.
5. **Fase di indurimento della resina:** la durata di questa fase dipende dalla velocità con cui cura la resina, quella presente nel kit ha un tempo di indurimento di 12h a temperatura ambiente, durante la realizzazione di alcuni provini ho testato anche altre resine con tempi di cura più lunghi 24h.
6. **Fase di cura:** per completare la cura della resina il manufatto finale è stato messo in forno ad una temperatura di 100°C per 3h.



Figura 3.6: Piastra estratta dallo stampo subito dopo l'indurimento della resina

3.2 Microstruttura del materiale

Per capire come questo materiale si comporta durante l'applicazione di un carico, bisogna studiare la microstruttura, questa è molto simile a quella vista per l'SMC ma con una presenza di vuoti dovuta al processo di produzione. In figura 3.7 viene riportata la scansione CT di un provino in carbon forged, in particolare viene presa la superficie esterna, i punti in grigio chiaro sono le fibre di carbonio (avendo una densità maggiore della resina epossidica assorbono una maggior quantità di raggi X, quindi appaiono più chiari), in grigio scuro c'è la resina e in nero il vuoto. Viene subito all'occhio la grande presenza di vuoti, questi possono raggiungere anche grandezze al di sopra del 1 mm di diametro, una situazione molto diversa rispetto a quella vista nelle tomografie dell'SMC (vedi 2.16 e 2.15). La presenza di questi vuoti è dovuta soprattutto al processo di produzione, dovuto soprattutto al processo di cura. La polimerizzazione della resina epossidica è un processo esotermico, infatti durante la fase di indurimento questa sviluppa calore, quindi espande all'interno dello stampo, questo però non può accompagnare la dilatazione, poichè la parte superiore e la parte inferiore sono bloccate in spostamento dalle morse. Si sviluppano quindi all'interno delle pressioni elevate che portano la resina a fuoriuscire dalle fessure nello stampo una volta uscita questa non può più rientrare all'interno portando quindi di fatto ad una diminuzione della massa di resina utilizzata.

La quantità di resina varia in base alla geometria, infatti su pezzi poco massivi e con grandi superfici di scambio termico come può essere una piastra il problema è ridotto, ma quando si vanno a produrre manufatti con dimensioni maggiori il

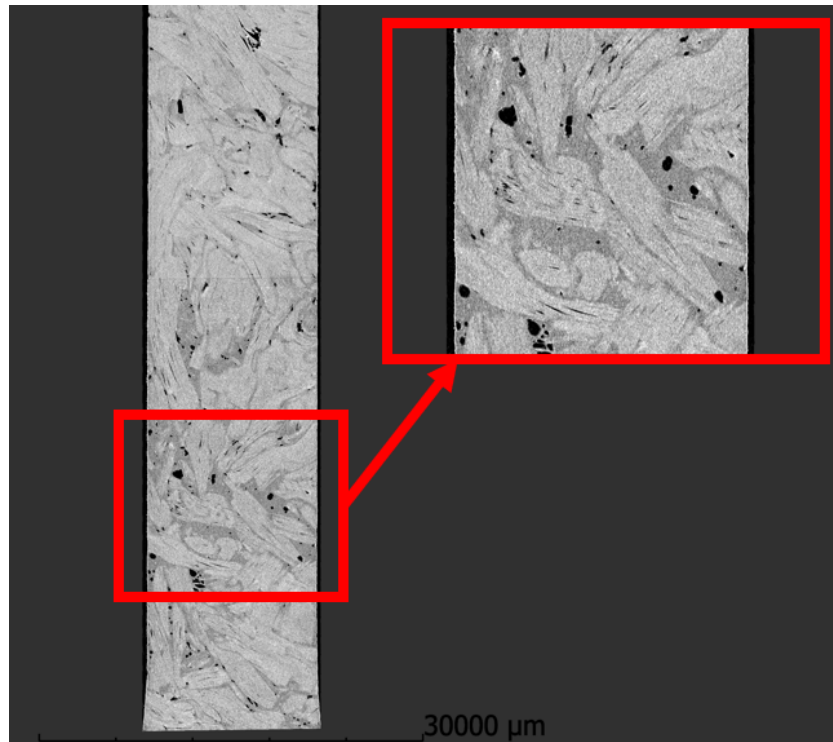


Figura 3.7: Superficie di un provino realizzato in carbon forged

problema non è di poco conto. Dalle prove fatte su piastre con dimensioni 90x180x3 mm, avente una massa ideale totale di circa $m_c = 70\text{ g}$, la quantità di fibre inserite è di $m_f = 35,05\text{ g}$ e di resina $m_m = 34,99\text{ g}$, la quantità di resina fuoriuscita misurata è pari a $m_{m,out} = 6,79\text{ g}$, una quantità pari al 27% della resina inserita, e in rapporto alla massa totale del manufatto il 10%. La quantità di resina fuoriuscita rimane più o meno costante, tenendo fisse le quantità di fibra e resina inseriti e lo stampo utilizzato. Per migliorare questo aspetto si è pensato a due modi:

- Cambiare il meccanismo di chiusura dello stampo: le morse vincolano lo stampo inferiore allo stampo superiore, infatti l'accoppiamento è rigido e lascia poco spazio ad espansioni della resina. Si è pensato quindi di realizzare uno stampo, con una guida di inserimento dello stampo superiore più alta, in modo da permettere la dilatazione del composito evitando rotazioni o traslazione dello stampo superiore. In più lo stampo viene pressato utilizzando un peso, quindi permettendo all'aumentare del volume e quindi della pressione di espandere. Vedi figura 3.8 Questo metodo però potrebbe nascondere delle insidie, infatti la resina potrebbe solidificare durante la fase di dilatazione, e

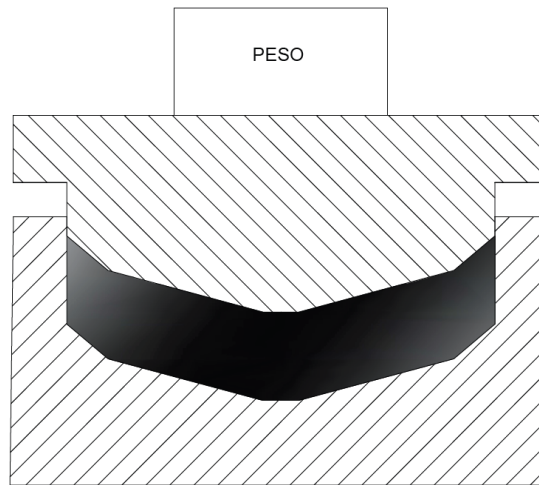


Figura 3.8: Meccanismo di chiusura con peso e guide che permettono la dilatazione del componente durante la cura della resina

nel caso in cui ci sono bolle d'aria nell'impasto queste comunque espandono portando alla formazione di vuoti al suo interno.

- Aumentare la temperatura a cui viene lasciato solidificare lo stampo: una volta chiuso lo stampo, questo potrebbe essere messo in forno in modo tale da ridurre lo sbalzo termico della resina, diminuendo di fatto l'espansione. Il limite in questa procedura è il materiale con cui viene realizzato lo stampo, infatti avendo uno stampo realizzato in PETG, questo per temperature superiori ai 70°C inizia a rammollire, con una possibile rottura dello stampo dovuto alle pressioni.

Durante il ciclo di questa tesi, questi metodi non sono stati utilizzati.

3.3 Proprietà meccaniche

La caratterizzazione meccanica di questo materiale non è semplice, infatti come l'SMC il carbon forged è un materiale anisotropo e disomogeneo. Andando ad acquisire la deformazione mediante i classici estensimetri, si va a catturare il comportamento locale del materiale, diverso dal comportamento medio del provino, ottenendo quindi valori molto diversi tra un provino e l'altro ma anche tra posizioni diverse sul provino. In questa tesi si è fatta la caratterizzazione a trazione di questo materiale.

3.3.1 Normative e macchinari utilizzati per la caratterizzazione meccanica

Per la caratterizzazione meccanica del carbon forged sotto carichi di trazione assiale, è stata utilizzata la normativa ASTM D638 - 14 [14], questa consiglia per provini realizzati mediante materiali compositi la forma "type I", le dimensioni sono riportate in figura 3.9. Sul provino inoltre vengono utilizzati dei tabs in fibra di vetro, questi sono stati realizzati secondo normativa D3039/D3039M - 08 [15]. Questi hanno lo scopo di migliorare l'afferraggio tra provino e macchinario, evitando quindi eventuali rotture dovute ad eccessivi carichi triassiali, ma soprattutto come vedremo nel prossimo capitolo ad isolare elettricamente il provino dal macchinario per la misura della resistenza del provino. La prova viene svolta in condizioni quasi statiche, la velocità della traversa viene quindi impostata a $2 \frac{mm}{s}$. La macchina utilizzata per le prove è la Instron 8801. Durante la prova vengono misurati:

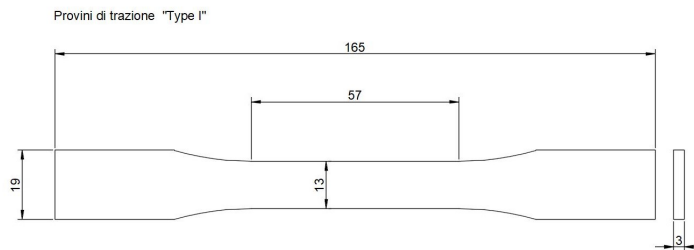


Figura 3.9: Provino con forma ad osso di cane "Type I", da normativa ASTM D638 - 14

- Lo **spostamento della traversa** in mm , acquisita mediante i sensori del macchinario.
- Il **carico applicato** sul provino in kN , questo viene acquisito mediante una cella di carico.
- **Variazione della resistenza elettrica del provino**, questo punto verrà approfondito nel prossimo capitolo.

Acquisizione della deformazione l'acquisizione della deformazione viene fatta mediante un sistema DIC (Digital Image Correlation), questa è una tecnica ottica che sfrutta delle telecamere per acquisire gli spostamenti sulla superficie del provino.



Figura 3.10: Provino dogbone per le prove di trazione, nella parte inferiore e superiore sono presenti i tab in fibra di vetro, al di sotto ci sono i contatti per la misura della resistenza elettrica

Durante la prova meccanica, la superficie del campione viene preparata mediante l'applicazione di uno speckle pattern, ossia una puntinatura ad alto contrasto che consente di identificare in maniera univoca le aree dell'immagine. Due telecamere acquisiscono sequenze di immagini della superficie, prima e durante la deformazione. Il software suddivide ogni immagine in sottoinsiemi di pixel (subset) e ne traccia lo spostamento confrontando le immagini acquisite in diversi istanti. Attraverso algoritmi di correlazione digitale, è possibile ricostruire i campi di spostamento locali della superficie. A partire da questi spostamenti si calcolano le deformazioni, fornendo una mappa completa e ad alta risoluzione dei campi di strain bidimensionali. Questa metodologia permette di ottenere misure non a contatto, con elevata accuratezza e applicabilità su geometrie e materiali anche complessi.

3.3.2 Preparazione dei provini

I provini sono stati ottenuti a partire da piastre con dimensioni nominali pari a $180 \text{ mm} \times 90 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$. Lo spessore effettivo risulta tuttavia inferiore al valore nominale, in quanto influenzato dalla pressione di compressione esercitata dallo stampo durante il processo produttivo. Le misure reali dei provini verranno riportate in seguito. I provini sono stati ottenuti da due piastre differenti, per ogni piastra vengono ricavati 4 provini, la disposizione con cui vengono ricavati non è essenziale poichè il materiale non ha orientamenti preferenziali. I provini sono stati tagliati mediante una tagliatrice ad acqua Wazer. Successivamente, sui provini vengono incollati i tab mediante un adesivo a base di cianoacrilato. Prima

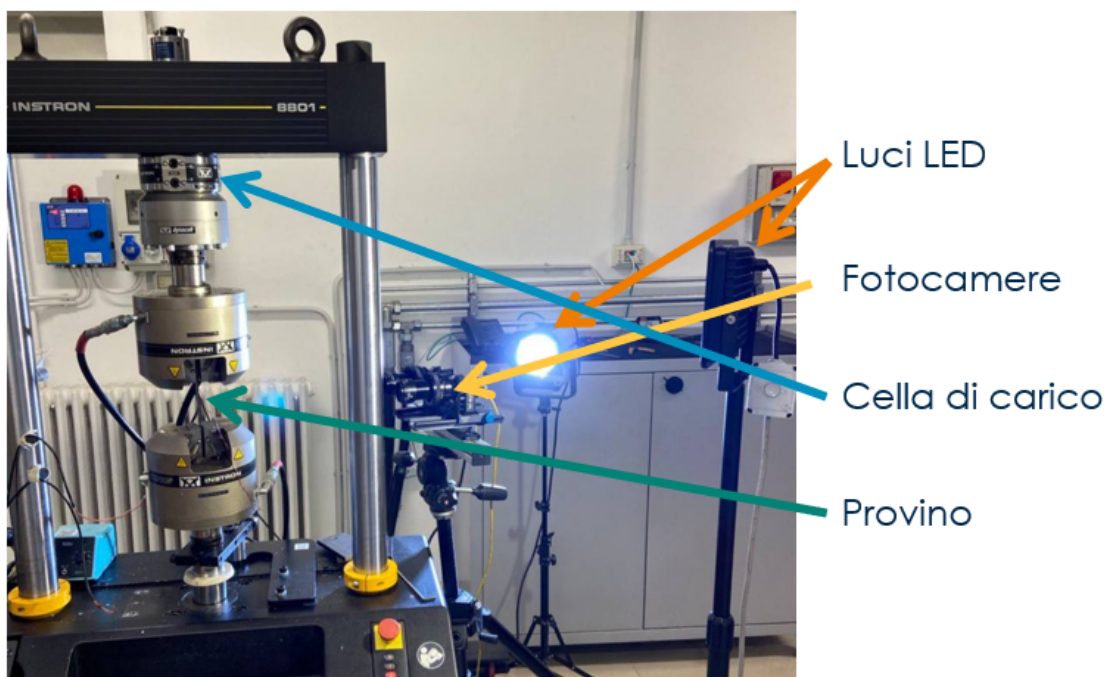


Figura 3.11: Set-Up della prova di trazione

dell'esecuzione della prova di trazione, la superficie del provino viene preparata per l'acquisizione della deformazione tramite tecnica DIC. A tal fine viene inizialmente applicato, con vernice spray, un fondo bianco uniforme, seguito dalla realizzazione di un pattern puntinato mediante spruzzatura di vernice nera.

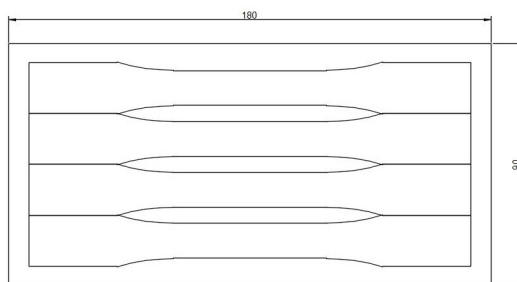


Figura 3.12: Disposizione dei provini ricavati da ogni piastra

Per distinguere i provini ricavati dalle due piastre ho adottato una nomenclatura a due cifre, la prima cifra indica la piastra da cui è stata ricavato il provino 1 o 2, mentre la seconda cifra il numero di provino ricavato da quella piastra. In tabella 3.1 vengono riportate le misure, queste sono state prese nella parte centrale dove lo



Figura 3.13: Provini dopo il taglio ad acqua

stress è maggiore, vengono riportati più punti di misura e viene fatta la media.

Provino	11	12	13	14	21	22	23	24
Misurazione 1	2.71	2.76	2.75	2.84	2.73	2.83	2.83	2.81
Misurazione 2	2.81	2.83	2.87	2.9	2.79	2.76	2.86	2.83
Misurazione 3	3	2.7	2.69	2.88	2.74	2.62	2.8	2.81
Spessore medio [mm]	2.84	2.76	2.77	2.88	2.74	2.75	2.79	2.82
Misurazione 1	13.42	13.2	13.25	13.29	13.35	13.25	13.1	13.35
Misurazione 2	13.3	13.19	13.15	13.31	13.33	13.18	13.15	13.33
Misurazione 3	13.25	13.17	13.2	13.13	13.31	13.41	13.23	13.3
Larghezza media [mm]	13.36	13.17	13.20	13.25	13.33	13.31	13.23	13.31

Tabella 3.1: Misure di spessore e larghezza nella parte centrale dei provini

3.3.3 Curve tensione-deformazione medie

Tutti provini hanno riportato una superficie di frattura all'interno della sezione ristretta del provino, quindi sono considerati validi. Il provino 11 non è stato utilizzato per rilevare le caratteristiche meccaniche, poichè presentava dei difetti dovuti ad un mal posizionamento durante il taglio ad acqua, è stato utilizzato per calibrare la macchina di trazione. Il provino 24 invece presenta una pittura non uniforme del layer bianco, risulta quindi impossibile ricavare le deformazioni tramite DIC, non viene preso in considerazione. In totale i provini validi sono

6. Nella figura 3.14 sono riportate le deformazioni lungo la direzione di carico della prova ricavate dalle analisi DIC per ogni provino, vengono riportati 4 frame durante la prova, il primo è lo stato di partenza, il quarto è il frame precedente alla rottura, i frame al centro sono gli stati intermezzi. Si può notare come nei provini ci sono delle grandi variazioni di deformazione, in particolare il Provino 13, nell'ultimo frame ha nella zona più sollecitata deformazioni di 1.2% e in quella meno sollecitata 0.08%, delle deformazioni 15 volte inferiori. Nelle zone in cui le deformazioni sono più alte sono quelle in cui nucleano cricche che portano alla rottura del provino. Per ricavare delle curve di tensione deformazione, si è deciso di utilizzare la deformazione media, questa viene calcolata prendendo la deformazione nella direzione del carico per ogni pixel della DIC, escludendo chiaramente i punti in cui c'è deformazione nulla. Per quanto riguarda la tensione si è preso il carico applicato sul provino e utilizzando l'area della sezione media del provino si ricava lo stress. Come si può vedere dalla figura 3.15 in cui vengono riportate tutte le curve di tensione-deformazione media dei provini, i moduli elastici sono comparabili. Il modulo elastico medio ottenuto è di 22.84 GPa , il minimo è di 17.21 GPa e il massimo di 29.09 GPa , anche questi sono riportati in figura. La variabilità è quindi pari a $22.84 \pm 6.25 \text{ GPa}$, che per un materiale così disomogeneo non è così ampia. Nella tabella 3.2 vengono riportati i risultati ottenuti dalle prove di trazione, questi verranno usati per la realizzazione di un primo prototipo di bielletta.

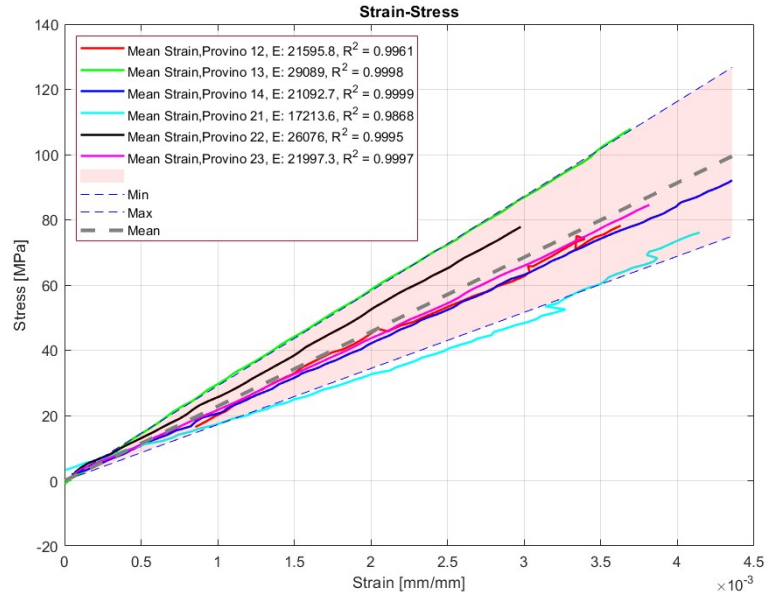


Figura 3.15: Grafici tensione-deformazione dei provini

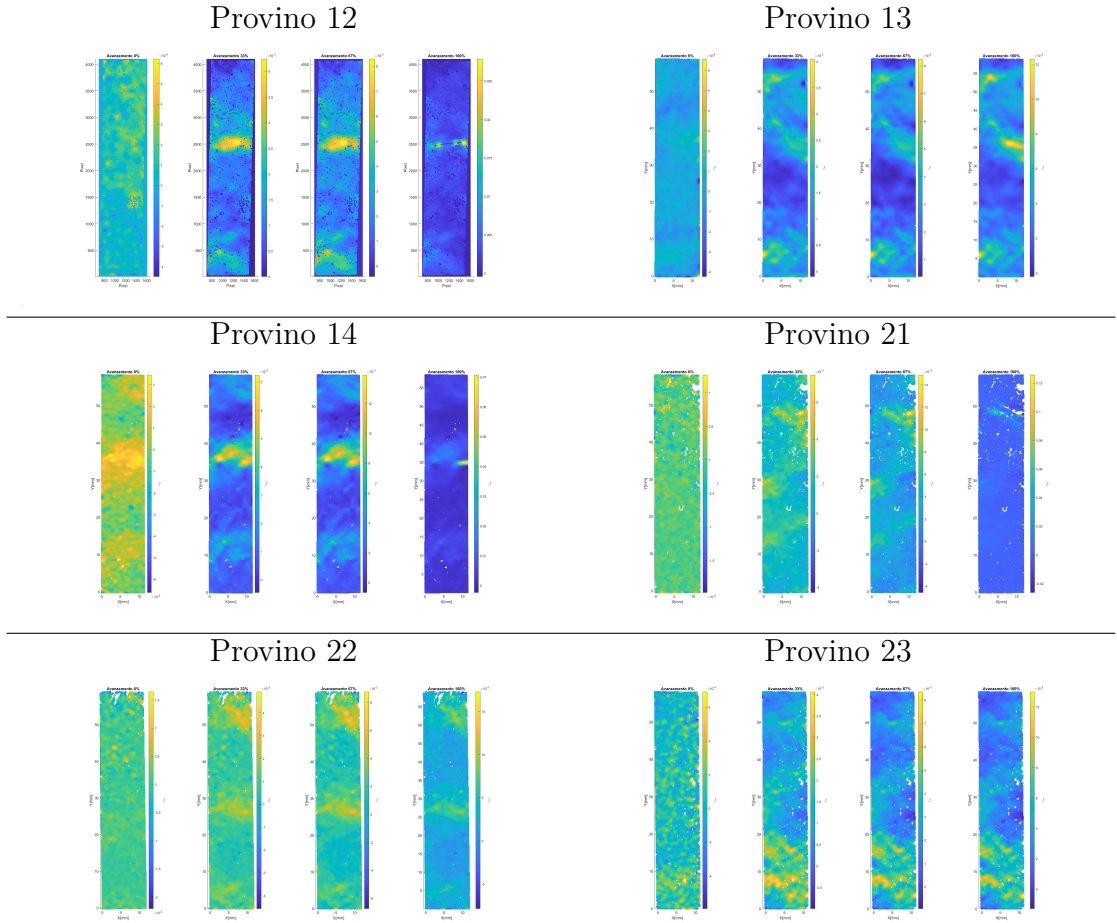


Figura 3.14: Deformazioni ricavate dalle analisi DIC per ogni provino, vengono riportati 4 frame, il primo è la situazione iniziale, l'ultimo è il frame prima della rottura

3.3.4 Curve tensione-deformazione locali

Come visto nella figura 3.14 la deformazione non è costante lungo tutta la superficie del provino, ma varia anche in modo molto repentino e con differenze importanti. I punti in cui vanno a concentrare gli stress sono molto importanti poichè è lì che iniziano a nucleare le cricche. Nei precedenti capitoli abbiamo visto come questa variazione di rigidità del materiale è portata principalmente da un'orientamento delle fibre non favorevole rispetto alla direzione di carico, oppure da una minore percentuale di fibre o da vuoti dovuti al processo di produzione dei provini. Tramite le analisi della deformazione mediante DIC è possibile risalire alla posizione in cui

Provini	E [GPa]	R^2	σ_R [MPa]	ε_R [mm/mm %]	Carico a Rottura [kN]
12	21.60	0.9961	78.20	0.36%	2.85
13	29.09	0.9998	107.91	0.37%	3.94
14	21.09	0.9999	92.15	0.44%	4.65
21	17.21	0.9868	76.11	0.41%	2.78
22	26.08	0.9995	77.84	0.30%	2.87
23	22.00	0.9997	84.56	0.38%	3.12
Medio	22.84		86.13	0.38%	3.18
Minimo	17.21		76.11	0.30%	2.78

Tabella 3.2: Risultati dei test di trazione

si presentano questi incrementi di deformazione e andare a monitorare come varia la tensione in quei punti.

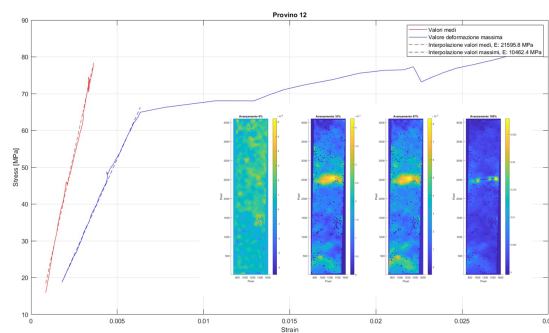


Figura 3.16: Curve Deformazione media-Stress medio e Deformazione massima-Stress medio Provino 12

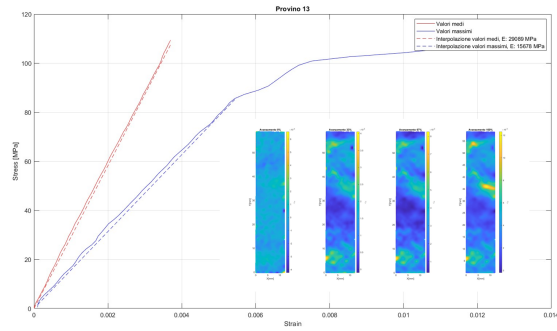


Figura 3.17: Curve Deformazione media-Stress medio e Deformazione massima-Stress medio Provino 13

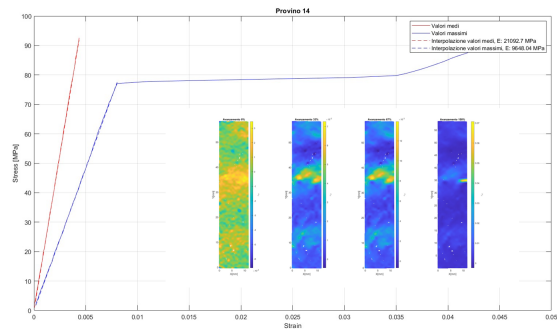


Figura 3.18: Curve Deformazione media-Stress medio e Deformazione massima-Stress medio Provino 14

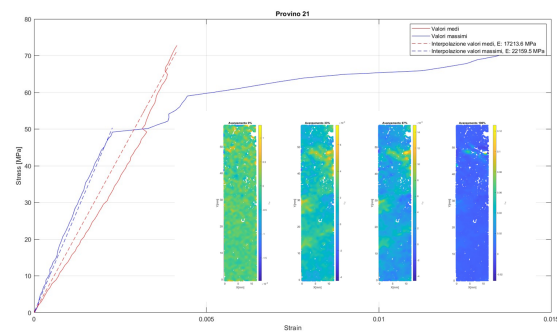


Figura 3.19: Curve Deformazione media-Stress medio e Deformazione massima-Stress medio Provino 21

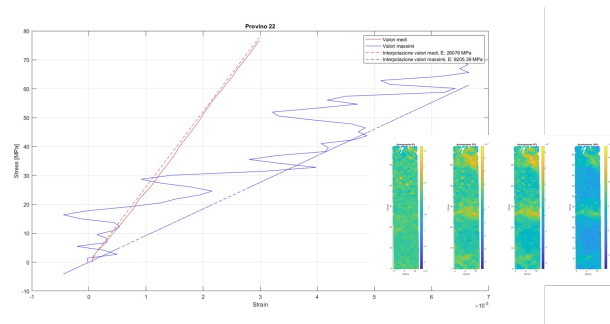


Figura 3.20: Curve Deformazione media-Stress medio e Deformazione massima-Stress medio Provino 22

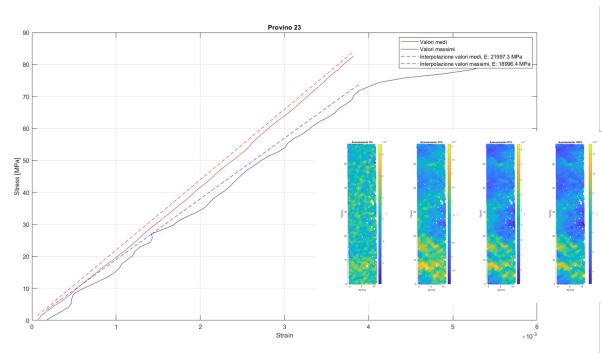


Figura 3.21: Curve Deformazione media-Stress medio e Deformazione massima-Stress medio Provino 23

Nelle figure 3.16, 3.17, 3.18, 3.19, 3.20, 3.21 vengono riportate le curve di Deformazione media- Stress medio e Deformazione massima- Stress medio, la seconda viene ottenuta andando a prendere il punto che raggiunge la massima deformazione durante la prova di trazione successivamente viene salvata la deformazione media nell'intorno di quel punto per tutta la prova. Viene riportato anche il modulo elastico medio e il modulo elastico massimo ottenuto nella parte lineare della della curva, nella tabella 3.3 ci sono i moduli elastici medi e quelli ottenuti nel punto con maggior deformazione, il provino 21 viene considerato nullo, questo perchè l'analisi DIC non fornisce dei risultati puntuali molto accurati, infatti il modulo elastico massimo che si ottiene è maggiore del modulo elastico medio. Risulta fondamentale comprendere le cause delle variazioni locali del modulo elastico. L'incrocio dei dati sperimentali con le analisi tomografiche dei provini permette infatti di identificarne le motivazioni. In figura 3.22 sono riportate tre immagini: a sinistra la distribuzione della deformazione lungo l'asse di carico y per ogni punto del provino,

al centro l'andamento del modulo elastico medio in differenti sezioni dell'asse y , e a destra la tomografia della superficie del provino. Si osserva che nelle zone in cui la deformazione è minore, e quindi il modulo elastico risulta maggiore, le fibre presentano un orientamento favorevole alla direzione di carico. Al contrario, nella sezione in cui si verifica la rottura, caratterizzata da deformazioni più elevate, le fibre mostrano un orientamento sfavorevole, in alcuni casi persino perpendicolare alla direzione di applicazione del carico. In tali condizioni il contributo resistente è fornito principalmente dalla matrice, il che comporta un valore inferiore del modulo elastico. Inoltre, l'elevata deformazione locale favorisce fenomeni di decohesione fibra-matrice, con conseguente nucleazione di microcricche che tendono a propagarsi e coalescere, fino a determinare la rottura del provino.

Provini	E_{max} [GPa]	E_{mean} [GPa]	ΔE [GPa]
12	10.5	21.6	-11.1
13	15.7	29.1	-13.4
14	9.6	21.1	-11.5
21	22.2	17.2	<i>null</i>
22	9.2	26.1	-16.9
23	19.0	22.0	-3

Tabella 3.3: Differenza tra modulo elastico medio e modulo elastico nel punto di deformazione massima

In figura 3.24 viene riportato lo stesso schema visto in precedenza ma per il provino 14, qui il problema è differente rispetto a prima, infatti il calo di modulo elastico non è dovuto ad un orientamento sfavorevole delle fibre ma ad una percentuale di fibre locali inferiore. Inoltre il problema viene accentuato dall'elevato numero di vuoti presenti sulla superficie, queste sono zone in cui le tensioni si concentrano, facendo avanzare più rapidamente le cricche.

Il capitolo 3 ha analizzato il Carbon Forged, materiale composito a fibre corte simile all'SMC ma più semplice da produrre e caratterizzare. Sono stati descritti il processo di fabbricazione e la microstruttura, evidenziando come l'orientamento e la distribuzione delle fibre influenzino le proprietà meccaniche. Le prove di trazione e le analisi DIC hanno mostrato un comportamento anisotropo e una buona correlazione tra microstruttura e rigidità locale. Queste basi sperimentali permettono ora di estendere lo studio al comportamento piezoresistivo della fibra di carbonio, approfondendo la relazione tra deformazione meccanica e variazione della resistenza elettrica.

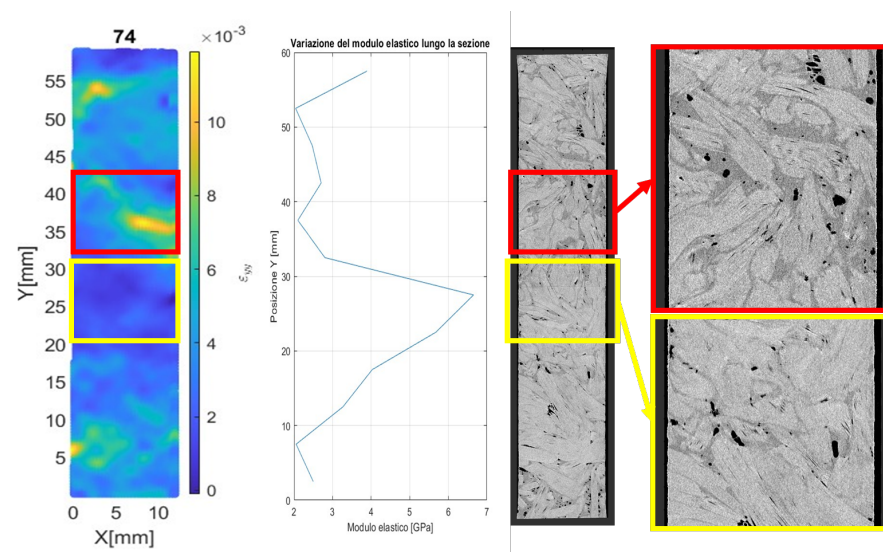


Figura 3.22: Variazione della deformazione puntuale nel provino 13, sulla sinistra c'è la deformazione lungo l'asse di carico, successivamente viene riportato il modulo elastico medio sezionale, questo è stato calcolato andando a prendere delle porzioni di 5 mm lungo l'asse di carico, sulla destra c'è la scansione ricavata dalla tomografia del provino, in particolare nel punto in cui si concentra la deformazione

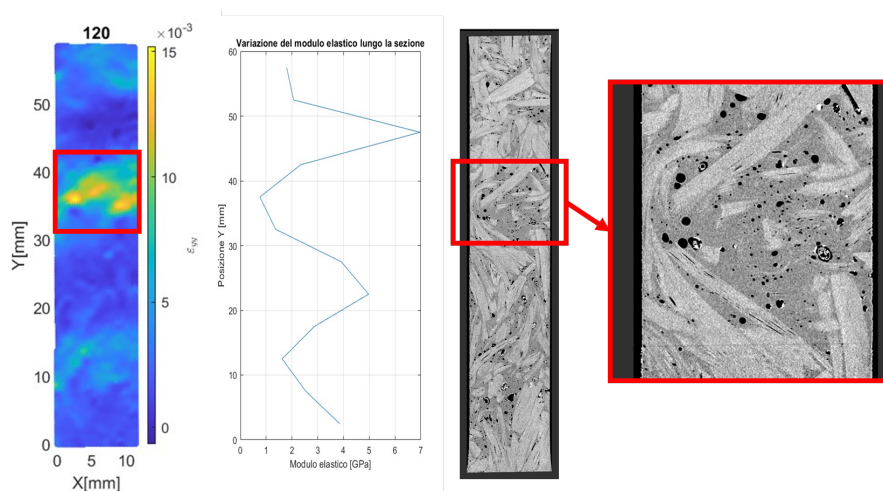


Figura 3.23: Variazione della deformazione puntuale nel provino 14, sulla sinistra c'è la deformazione lungo l'asse di carico, successivamente viene riportato il modulo elastico medio sezionale, questo è stato calcolato andando a prendere delle porzioni di 5 mm lungo l'asse di carico, sulla destra c'è la scansione ricavata dalla tomografia del provino, in particolare nel punto in cui si concentra la deformazione

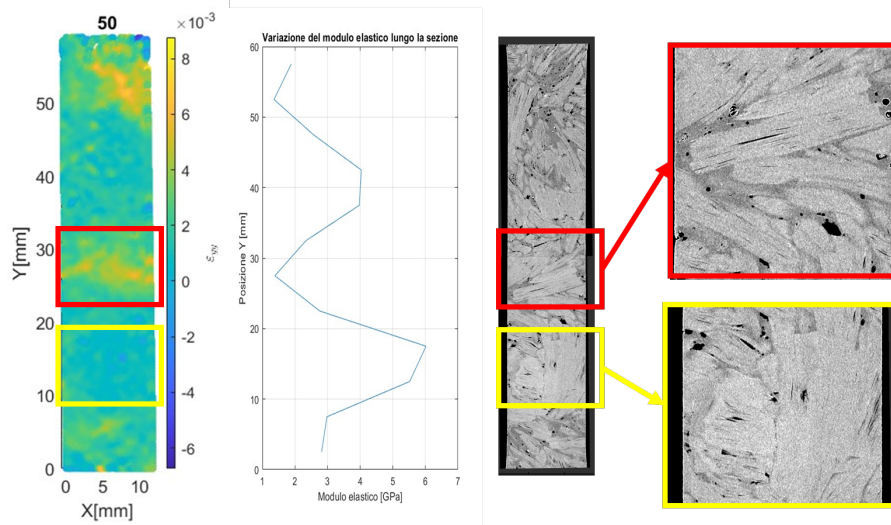


Figura 3.24: Variazione della deformazione puntuale nel provino 22, sulla sinistra c'è la deformazione lungo l'asse di carico, successivamente viene riportato il modulo elastico medio sezionale, questo è stato calcolato andando a prendere delle porzioni di 5 mm lungo l'asse di carico, sulla destra c'è la scansione ricavata dalla tomografia del provino, in particolare nel punto in cui si concentra la deformazione

Capitolo 4

Capacità piezoresistive della fibra di carbonio

Negli ultimi anni il monitoraggio della salute strutturale (Structural Health Monitoring, SHM) dei materiali compositi ha assunto un ruolo sempre più centrale, soprattutto in settori come l'aerospazio e l'automotive, dove sicurezza e affidabilità sono requisiti fondamentali. Le tecniche tradizionali di controllo non distruttivo (NDT), quali ispezione visiva, liquidi penetranti, correnti indotte, ultrasuoni e radiografie, hanno dimostrato efficacia nel rilevare difetti macroscopici, come cricche superficiali o delaminazioni estese. Tuttavia, la loro sensibilità cala drasticamente nel caso di danni microscopici o iniziali, che risultano spesso non individuabili fino a quando non evolvono in forme critiche. Ciò rende necessario sviluppare metodi alternativi, capaci di monitorare il materiale in modo diffuso e continuo durante il suo ciclo di vita. Una delle soluzioni più promettenti sfrutta le proprietà intrinseche delle fibre di carbonio, che oltre a conferire rigidezza e resistenza meccanica al composito, possiedono anche conducibilità elettrica. Questo le differenzia sia dalla matrice polimerica, che è isolante, sia da altri rinforzi come la fibra di vetro, anch'essa non conduttiva. Nei laminati in fibra di carbonio la corrente si propaga principalmente lungo le fibre, ma anche in direzione trasversale e nello spessore del materiale può fluire grazie ai contatti tra fibre adiacenti. La presenza di microcricche o fenomeni di delaminazione riduce progressivamente questi contatti, causando variazioni misurabili della resistenza elettrica e rendendo possibile l'individuazione del danno. Oltre all'individuazione del danno nel laminato è possibile anche capire lo stato di deformazione, infatti dal punto di vista fisico la resistenza di un materiale omogeneo segue l'equazione di Poulliet:

$$R = \frac{\rho L}{A}$$

Dove ρ è la resistività specifica del materiale, L è la lunghezza del percorso della corrente e A la sezione del conduttore. Durante una prova di trazione, l'aumento della lunghezza del provino e la riduzione della sezione portano a un incremento progressivo della resistenza. Questo comportamento regolare consente, con opportune curve di calibrazione, di correlare la resistenza con lo stato di deformazione del materiale. Quando però si verificano fratture nelle fibre, la resistività cresce in modo discontinui e marcato, diventando un indicatore sensibile della presenza di danno interno che non sarebbe rilevabile con le sole curve sforzo-deformazione. Sebbene la maggior parte degli studi sia stata condotta su laminati unidirezionali tradizionali, resta aperta la questione di come queste proprietà si manifestino in materiali discontinui come lo SMC (Sheet Molding Compound) o il forged carbon. In questi compositi le fibre non sono continue, ma distribuite in maniera casuale sotto forma di fiocchi o spezzoni. Ciò potrebbe influenzare non solo la conducibilità elettrica complessiva, ma anche la sensibilità della resistenza ai fenomeni di danneggiamento. Comprendere il comportamento elettrico di tali materiali rappresenta quindi un passo fondamentale per estendere le potenzialità dello SHM anche a compositi più complessi e diffusi in applicazioni industriali avanzate.

4.1 Correlazione tra la variazione di resistenza e deformazione

La presenza di fibre di carbonio all'interno di un materiale composito conferisce al sistema una significativa conducibilità elettrica, consentendo di sfruttare le variazioni di resistenza come parametro per monitorare lo stato di deformazione del componente. Tuttavia, il percorso seguito dalla corrente elettrica all'interno di un laminato non è affatto banale: il materiale può essere schematizzato come una rete complessa di resistenze e capacità disposte in serie e in parallelo. A causa della sua natura anisotropa, la distribuzione della corrente varia in funzione della direzione delle fibre rispetto al laminato. Nel caso più semplice, in cui la corrente fluisce parallelamente alle fibre, il contributo principale alla conduzione è fornito proprio da queste ultime. Di conseguenza, se il carico viene applicato lungo la direzione delle fibre, la variazione della resistenza elettrica può essere ricondotta

prevalentemente alla loro deformazione. Riprendendo l'equazione della resistenza $R = \frac{\rho L}{A}$, vado a scrivere la variazione della resistenza come:

$$\Delta R = \frac{\partial R}{\partial \rho} \Delta \rho + \frac{\partial R}{\partial l} \Delta l - \frac{\partial R}{\partial A} \Delta A = \frac{l}{A} \Delta \rho + \frac{\rho}{A} \Delta l - \frac{\rho l}{A^2} \Delta A$$

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\frac{l}{A} \Delta \rho}{\frac{\rho l}{A}} + \frac{\frac{\rho}{A} \Delta l}{\frac{\rho l}{A}} - \frac{\frac{\rho l}{A^2} \Delta A}{\frac{\rho l}{A}}$$

Che posso riscrivere come:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta A}{A} \quad (4.1)$$

Dove $\frac{\Delta L}{L} = \varepsilon$ è la deformazione assiale della fibra, $\frac{\Delta \rho}{\rho}$ è la variazione di resistività, e $\frac{\Delta A}{A}$ nel caso di sezione circolare, come per la fibra di carbonio può essere riscritto come:

$$\begin{cases} \Delta A = \frac{\partial A}{\partial r} \Delta r = 2\pi r \Delta r \\ \varepsilon_t = -\nu \varepsilon_a \rightarrow \frac{\delta D}{D} = -\nu \frac{\delta L}{L} \\ \frac{\Delta A}{A} = \frac{2\pi r \Delta r}{\pi r^2} = 2 \frac{\Delta r}{r} = -2\nu \frac{\Delta L}{L} = -2\nu \varepsilon \end{cases}$$

Quindi l'equazione diventa:

$$\frac{\Delta R}{R} = \varepsilon(1 + 2\nu) + \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (4.2)$$

Quindi c'è una relazione lineare tra la deformazione della fibra e la variazione di resistenza, viene definito **gage factor** il termine:

$$K = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\varepsilon} \approx (1 + 2\nu) + \frac{\frac{\Delta \rho}{\rho}}{\varepsilon} \quad (4.3)$$

In figura 4.1 viene riportato un grafico preso dall'articolo [16], in cui viene raffigurata la variazione di resistenza $\frac{\Delta R}{R_0}$ con la deformazione lungo l'asse delle fibre. In questo caso il provino è realizzato mediante 6 ply di fibra di carbonio unidirezionale, disposti in maniera $[0]_6$, la resistenza è stata misurata lungo la direzione di carico che corrisponde alla direzione 0° del laminato.

Nel caso in cui la resistenza venga misurata non lungo la direzione delle fibre, ma in direzione trasversale il modo in cui scorre la corrente all'interno del composito cambia, ci sono due casi possibili: conduzione attraverso il contatto fibra-fibra vedi la figura b) dell'immagine 4.2, o attraverso la matrice polimerica vedi immagine

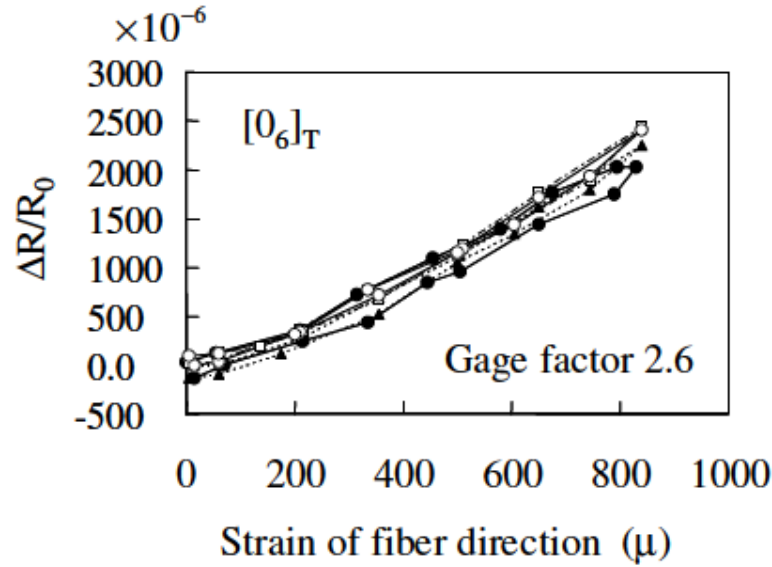


Figura 4.1: Variazione della resistenza in un provino realizzato con 6 ply di fibra di carbonio monodirezionale, in disposizione $[0]_6$, la resistenza è stata misurata lungo la direzione di carico che corrisponde alla direzione 0° del laminato.[16]

a). Questi sono fenomeni non lineari con la deformazione, inoltre aumentano la resistenza misurata. Nel mio caso di applicazione, cioè un composito a fibre corte, in cui non ci sono delle direzioni principali delle fibre, ma la disposizione è casuale questi fenomeni sono molto importanti, inoltre la corrente seguirà difficilmente una direzione principale ma salterà tra una fibra e l'altra come in figura 4.3.

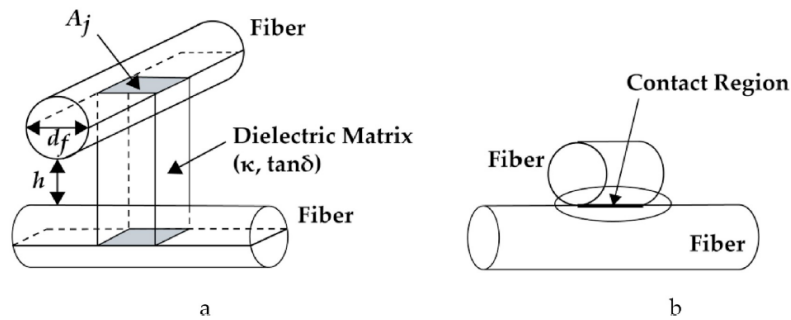


Figura 4.2: Modi di scorrere della corrente non nella direzione principale delle fibre, a) conduzione attraverso la matrice epossidica con un comportamento dielettrico, b) conduzione attraverso il contatto fibra fibra. [17]

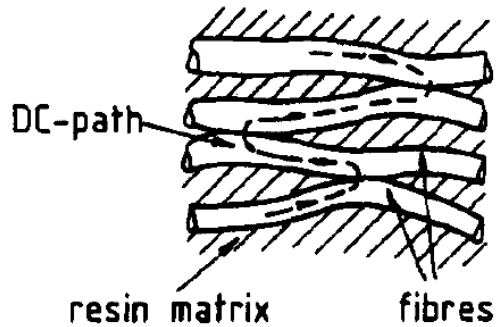


Figura 4.3: Dipendenza della conduttività trasversale di un laminato dalla frazione in volume di fibra di carbonio.[18]

In figura 4.4 viene riportato l'andamento della resistenza di una prova di trazione, effettuata su un provino realizzato con 6 ply di fibra di carbonio mono direzionale, con disposizione $[0]_6$, la resistenza viene misurata in direzione 0° , ed è anche la stessa direzione in cui viene applicato il carico. Si può notare come la resistenza abbia un andamento lineare nel primo tratto, per poi verso lo 0.7% avere uno scostamento dalla linearità. Questo comportamento viene ricondotto ad una rottura nelle fibre del provino, aumenta quindi la variazione di resistenza del provino, che si riscontra in un aumento della pendenza della curva. Al di sopra del 1.2% di deformazione il provino ci si avvicina alla rottura definitiva, e si riscontra nella resistenza dei repentini aumenti, anche questi sono ricondotti alla rottura di fibre e alla nucleazione di cricche che comportano un aumento della resistenza.

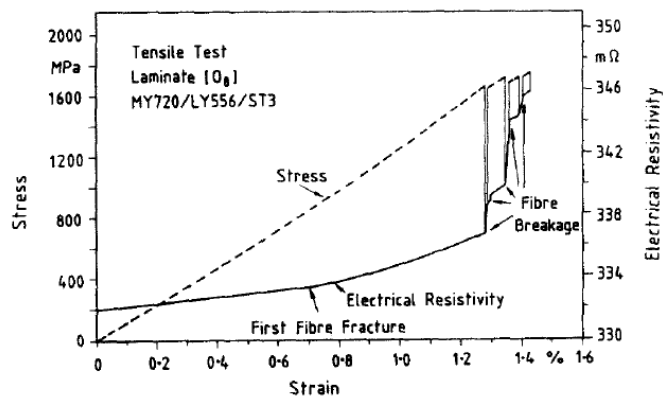


Figura 4.4: Test di trazione su un provino unidirezionale composto da 6 ply di fibra di carbonio, viene riportata sia la curva Stress-Strain che la variazione di resistenza.[18]

Oltre a queste non linearità, ci sono fenomeni più complessi in gioco, infatti nello studio fatto da Wang X. e Chung D. 4.5 su piastre non più monodirezionali ma con un orientamento differenziato, viene portato alla luce un comportamento non lineare nei primi momenti di applicazione del carico. In figura 4.5 ci sono le misurazione della variazione di resistenza e deformazione di una prova di trazione fatta su un laminato in carbonio composto da 12 ply mono direzionali pre preg, disposti $[0/90]_{3s}$. Il carico viene imposto lungo la direzione 0° e lo stress viene misurato nella stessa direzione, nella figura a) viene riportata la variazione di resistenza misurata lungo la direzione 0° , mentre nella figura b) la variazione di resistenza è misurata lungo la direzione 90° . Si può notare come nel primo caso la resistenza nel primo tratto abbia un andamento decrescente, in contrasto con l'equazione 4.3 scritta in precedenza. Infatti nel caso in cui non ci sono variazione di resistività (ipotizzando quindi una temperatura costante), un aumento della deformazione ε porta ad un aumento della variazione di resistenza $\frac{\Delta R}{R_0}$, questo però non accade poichè ci sono fenomeni più complessi in gioco. Questo comportamento viene spiegato da una sorta di riallineamento delle fibre lungo la direzione di carico, questo crea di fatto una riduzione del percorso della corrente, inoltre questo riallineamento porta alla formazione di nuovi contatti che accorciano ulteriormente il percorso fatto dalla corrente. Bisogna anche considerare che vengono recuperati anche stress residui di compressione dovuti al processo di produzione, queste piastre infatti sono realizzate mediante compression mold con layer di carbonio unidirezionale pre impregnato. Al di sopra di deformazioni del 0.85%, la variazione di resistenza torna a salire, ma si trova a stress molto elevati, quindi iniziano da subito i balzi di resistenza dovuti a rottura di fibre. Nella figura b) in cui viene letta la resistenza lungo la direzione trasversale al carico, questi sbalzi di resistenza non sono presenti, infatti i stress sono inferiori e non si incorre in rotture di fibre.

4.1.1 Andamento della resistenza sotto carichi ciclici

Importante è anche il comportamento della resistenza durante i carichi ciclici. Wang X. e Chung D. [10] e [20], oltre a studiare il comportamento sotto carichi statici, hanno analizzato il comportamento sotto carichi ciclici e a fatica. In figura 4.6 sono riportati l'andamento della variazione di resistenza $\frac{\Delta R}{R_0}$, della deformazione e della tensione di alcune piastre, variando la direzione dei carichi e delle misure. Nella prima figura (a) sono riportate le misurazioni di una prova ciclica eseguita su un provino con 12 ply di carbonio unidirezionale disposti con $[0/90]_{3s}$, quindi un laminato cross-ply, in cui il carico è applicato nella direzione $[0^\circ]$, mentre deformazione e variazione di resistenza sono misurate nella stessa direzione. Le

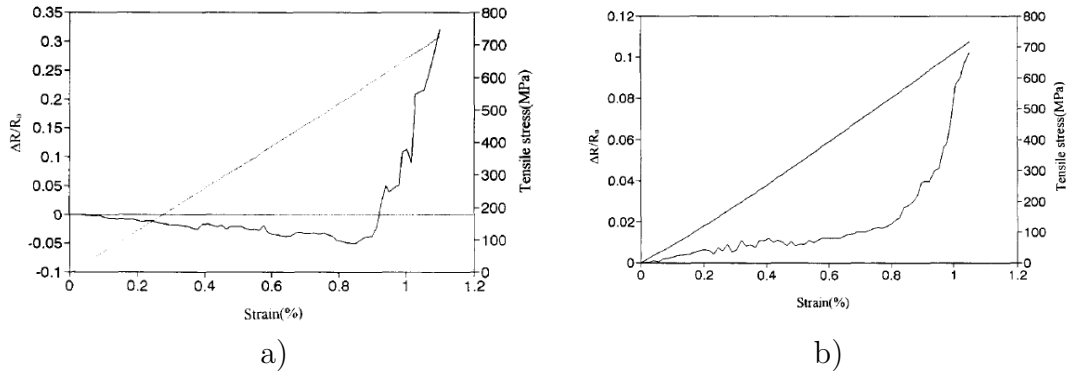


Figura 4.5: Misurazioni della resistenza su un provino realizzato con 12 ply prepreg di carbonio unidirezionale, con posizionamento $[0/90]_{3s}$, quindi un laminato con orientazione non mono direzionale. Nella figura a) La resistenza viene misurata nella direzione 0° cioè la stessa della direzione di applicazione del carico. Nella figura b) la resistenza viene misurata nella direzione 90° , la tensione e la deformazione viene misurata lungo 0° . [19]

condizioni di prova sono le medesime del provino della prova statica in figura 4.5 (a). Il ciclo di carico è imposto in controllo di carico, in modo da riportare il provino a carico nullo e raggiungere circa lo 0.35% di deformazione nei picchi. Si tratta quindi di una deformazione contenuta, al di sotto della soglia in cui, nella prova statica, la resistenza inizia a crescere. Si osserva che, all'aumentare della tensione, la variazione di resistenza diminuisce, in accordo con le prove statiche, mentre al rilascio del carico la resistenza torna a crescere. Anche in questo caso, il comportamento è in contrasto con l'equazione 4.3, secondo cui a deformazioni crescenti dovrebbe corrispondere un aumento della resistenza. La spiegazione risiede nel riordinamento delle fibre nel materiale, che riduce la resistenza in misura maggiore rispetto all'effetto della diminuzione della sezione delle fibre e dell'aumento di lunghezza dovuto al carico applicato. È comunque possibile definire un **gage factor** (o **strain sensitivity**) che lega la deformazione alla variazione di resistenza. In questo caso il valore risulta negativo, $K = -7.1$, ma consente comunque di associare le due grandezze mediante un'equazione lineare (vedi tabella in figura 4.7). Nella figura (b) di 4.6 è riportata la misura della resistenza nella direzione trasversale al carico, ossia 90° . Le condizioni di misura della deformazione e di applicazione del carico sono identiche a quelle della figura (a). In questo caso, la variazione di resistenza risulta sincronizzata con il carico applicato lungo 0° . Ciò si spiega perché nella direzione 90° la deformazione è dovuta all'effetto del modulo di Poisson: quando si ha un allungamento longitudinale nella direzione 0° , nella

direzione 90° si osserva una contrazione trasversale. Questi comportamenti vengono riscontrati anche su laminati monodirezionali, in un precedente studio sempre da parte di Wang X. e Chung D [20]. Nella figura c) di 4.6 cambia il laminato, in questo caso la piastra è monodirezionale, è composta da 32 ply con disposizione $[90]_{32}$. La variazione di resistenza $\frac{\Delta R}{R_0}$ e la deformazione vengono misurati lungo la direzione 0° , il carico viene applicato lungo la stessa direzione. Le proprietà meccaniche misurate sono soprattutto quelle della resina, infatti i picchi di carico imposti sono più bassi, la variazione di resistenza in questo caso è sincronizzata con il carico imposto. Le variazioni reversibili di resistenza in trazione e compressione sono dovute alla piezoresistività, ovvero il fenomeno per cui la resistività di un composito con riempitivo conduttivo aumenta quando, in trazione, cresce la distanza tra le unità conduttive e diminuisce quando, in compressione, tale distanza si riduce.

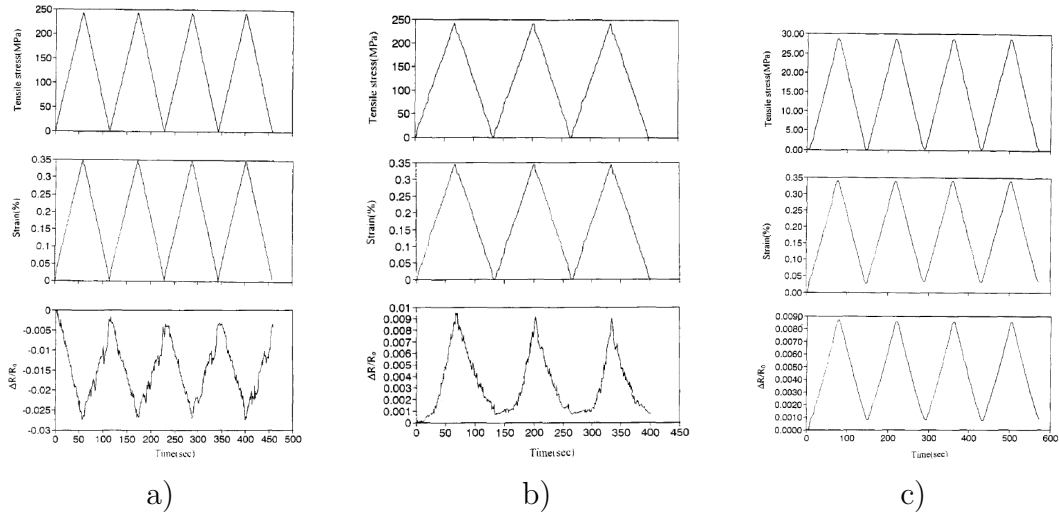


Figura 4.6: a) Piastra crossply realizzata con ply pre-preg di carbonio unidirezionale, con disposizione $[0/90]_{3s}$, $\frac{\Delta R}{R_0}$, deformazione e carico misurati lungo la direzione 0° , carico ciclico con che va da stress nullo fino ad uno stress pari al 0.35%. b) Piastra crossply realizzata con ply pre-preg di carbonio unidirezionale, con disposizione $[0/90]_{3s}$, $\frac{\Delta R}{R_0}$ letto in direzione 90° , mentre carico e deformazione applicati nella direzione 0° , carico ciclico con che va da stress nullo fino ad uno stress pari al 0.35%. c) Piastra monodirezionale realizzata con ply pre-preg di carbonio unidirezionale, con disposizione $[90]_{32}$, $\frac{\Delta R}{R_0}$, deformazione e carico misurati lungo la direzione 0° . [19]

La correlazione tra variazione di resistenza e deformazione quindi dipende molto dal caso di carico, dalla direzione in cui viene misurata la resistenza, dal tipo di

Table 3 Strain sensitivity (or gage factor) in the 0° direction

Composite type	Maximum stress/ Fracture stress	Strain sensitivity
0° unidirectional	32%	- 35.7 ^a
	36%	- 37.6 ^a
Crossply	19.4%	- 5.7 ^a
	35%	- 7.1 ^a
90° unidirectional	/	2.2 ^a
	/	- 2.1 ^b

^aTension

^bCompression

Figura 4.7: Gage factor/Strain sensivity trovati durante le analisi su carichi ciclici da Wang X. e Chung D [19]

materiale utilizzato e da come è disposta la fibra al suo interno. Il gage factor deve essere tarato mediante delle prove meccaniche, difficilmente questo può essere previsto.

4.2 Set-up per la misurazione della resistenza dei provini

Per misurare la resistenza del provino bisogna creare dei contatti elettrici sulla superficie del provino, ci sono diversi metodi quello più utilizzato sfrutta una resina bicomponente termoindurente contenente argento, con un'elevata conduttività elettrica. Nel mio caso ho utilizzato la pasta adesiva prodotta dalla MgChemicals 8330S [21], questa ha un lungo periodo di lavorabilità circa 4h, e ha bisogno di 2h a 65°C per essere curata. Durante il corso di questa tesi le misurazioni sono state fatte con il metodo a 2 elettrodi, cioè viene applicata una tensione attraverso i due contatti con il provino e ne viene misurata la corrente, se ne ricava quindi la resistenza. Gli articoli consigliano di utilizzare il metodo a 4 elettrodi, vengono utilizzati due elettrodi per misurare il passaggio della corrente, e due elettrodi per applicare la tensione, come presentato in figura 4.8. Quest'ultimo metodo dipende meno dalla qualità del contatto tra cavo e provino ed è quindi più accurato, risulta però più complesso da realizzare, poichè bisogna creare il doppio dei contatti. Per semplicità viene utilizzato il metodo a 2 elettrodi.



Figura 4.8: Metodo di misura a 4 elettrodi, 2 vengono usati per misurare la corrente, e 2 per applicare la tensione. [22]

Un altro problema da affrontare è l'isolamento tra la macchina di prova e il provino, essendo interamente in acciaio potrebbe interferire con le misurazioni. Per ovviare a questo problemi sono stati realizzati dei tabs in fibra di vetro, questa non è un buon conduttore e quindi permette di isolare bene il provino, sono stati realizzati usando la normativa D3039/D3039M - 08 [15]. La realizzazione è semplice vengono sovrapposte 3 strisce di pelle in fibra di vetro pre preg woven, ognuno avente una larghezza differente per simulare l'inclinazione minima di 5° richiesta dalla normativa, successivamente queste lunghe strisce vengono tagliate con una larghezza pari alla parte superiore del provino $19mm$. La preparazione del provino per la prova di trazione attraversa i seguenti step:

1. Il primo step è quello della creazione dei contatti elettrici:
 - (a) Identificazione dei punti in cui vengono inseriti i contatti, voglio che la resistenza tenga conto di tutto il tratto sottile del provino, quindi li posiziono ad una distanza di $60mm$ tra di loro simmetrici rispetto al centro del provino.
 - (b) Viene carteggiato con una carta vetrata a grana 1000 nei punti in cui vengono inseriti i contatti, per migliorare l'adesione tra pasta termoindurente e provino. Successivamente le zone sono pulite con acetone.
 - (c) Viene creata una maschera con del nastro carta, in modo da formare una forma rettangolare nella zona in cui viene applicata la pasta, questo serve ad evitare di avere zone di contatto deformi.
 - (d) Successivamente vengono applicati i cavi di rame e posizionata la pasta termoindurente al di sopra, il tutto viene ricoperto con un foglio in nylon e pressato con un peso, questo rimane al di sopra del provino fino a cura completa della pasta.
 - (e) i provini vengono posizionati all'interno del forno ad una temperatura di $65^\circ C$ per 2h. Passato il tempo necessario vengono fatti raffreddare lentamente, in modo da evitare sbalzi termici eccessivi che possono portare ad un distacco tra i contatti e il provino.
 - (f) Vengono successivamente rimossi i pesi e i fogli in nylon.
2. Successivamente si passa all'applicazione dei tabs:
 - (a) Il primo passaggio come prima è quello della carta vetrata, viene usata la stessa rugosità usata per gli elettrodi e successivamente viene pulita l'area con acetone.

- (b) Vengono rifiniti i tabs andando a carteggiare eventuali difetti di taglio in modo da renderli più regolati possibile.
- (c) Successivamente viene applicata la colla cianoacrilica, questa ha un tempo di lavorazione molto basso quindi bisogna applicare subito il tab. Viene messo subito un peso al di sopra e viene fatta curare a temperatura ambiente per qualche minuto, questo viene ripetuto per 4 volte in ogni provino.

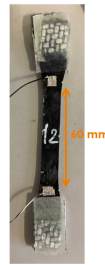


Figura 4.9: Immagine del provino con elettrodi e tabs

La resistenza durante la prova di trazione viene misurata mediante un'impedenziometro, questo non è sincronizzato con la deformazione ottenuta tramite metodo DIC, verrà poi applicata una regressione lineare sulla curva tempo-deformazione per correlare la resistenza alla deformazione.

4.3 Risultati sperimentali

Tutti i provini sono stati deformati con una velocità di spostamento della traversa pari a 2 mm/min. Le deformazioni sono state calcolate tramite analisi DIC, in modo coerente con quelle ottenute dalle prove di trazione. Poiché le telecamere DIC e la scheda di acquisizione dell'impedenziometro non erano sincronizzate, è stata effettuata un'interpolazione tra deformazione e tempo, così da riportare i valori di strain agli stessi istanti temporali delle misure di resistenza. La sincronizzazione tra i due sistemi di acquisizione è stata eseguita utilizzando il carico, parametro registrato sia dal sistema DIC che dall'impedenziometro. Nell'immagine in figura 4.10 sono riportate tutte le misurazioni della variazione di resistenza per ogni provino sullo strain medio, si può notare che il comportamento è molto diverso tra un provino e l'altro. Per quanto riguarda il provino 12 la misurazione ha dei sali e scendi importanti, questi possono essere ricondotti molto probabilmente alla qualità del contatto elettrico con il provino, perciò non viene preso in considerazione. I

provino 13, 22 e 23 hanno un comportamento molto simile, infatti la resistenza inizia a crescere fino a raggiungere il picco intorno allo 0.1% di deformazione media del provino per poi iniziare a scendere all'aumentare della deformazione. Questo comportamento è molto simile a quello visto da Chung e Wang nei loro esperimenti su piastre monodirezionali e crossply in cui deformazione e resistenza viene letta nella stessa direzione del carico [19],[20], il comportamento è associato ad un riallineamento delle fibre all'interno del materiale man mano che il provino si deforma, inoltre si creano nuovi ponti di corrente tra le fibre che vanno a diminuire la resistenza.

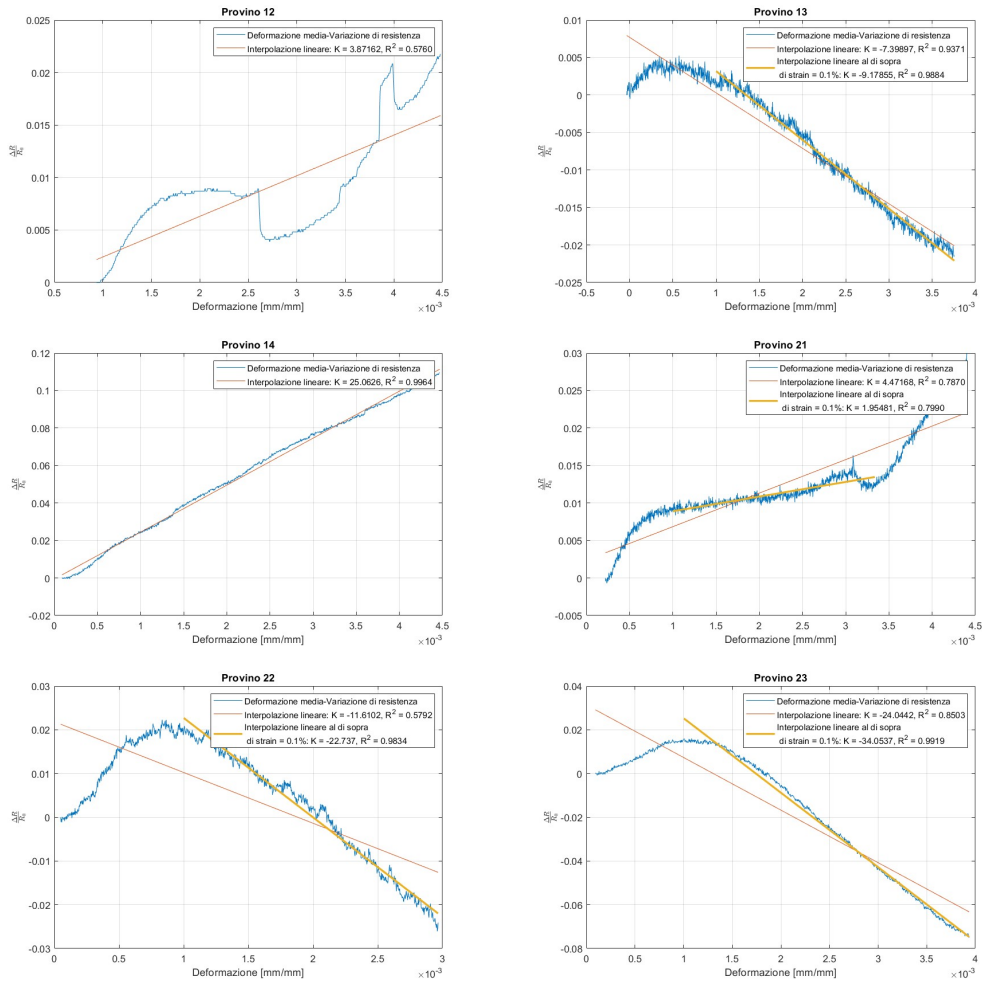


Figura 4.10: Variazione della resistenza sulla deformazione media dei provini

Nel provino 14 e 21 il comportamento è differente, infatti qui la resistenza

è crescente, coerentemente con l'equazione 4.3. C'è da sottolineare però, che nel provino 14, quello con una correlazione lineare migliore tra tutti i provini, è stato fatto prima della prova di trazione una pre tensionamento del provino con carico ciclico, raggiungendo una deformazione massima di quasi $\varepsilon = 0.1\%$. Questo ciclo iniziale ha diminuito la resistenza nominale del provino, infatti si passa da un $R_0 = 10.88 \text{ Ohm}$ ad una resistenza di $R_0 = 9.67 \text{ Ohm}$. Una volta messo in trazione la resistenza iniziale è pari all'ultima misurata, ma all'aumentare del carico questa è aumentata. Per trovare il gain factor è stata effettuata un'interpolazione lineare sulla variazione di resistenza con lo strain, nei grafici viene raffigurata sia l'interpolazione fatta utilizzando tutti gli istanti temporali disponibili, sia una andando a prendere il tratto più lineare della curva, cioè quello al di sopra di deformazioni medie $\varepsilon > 0.1\%$.

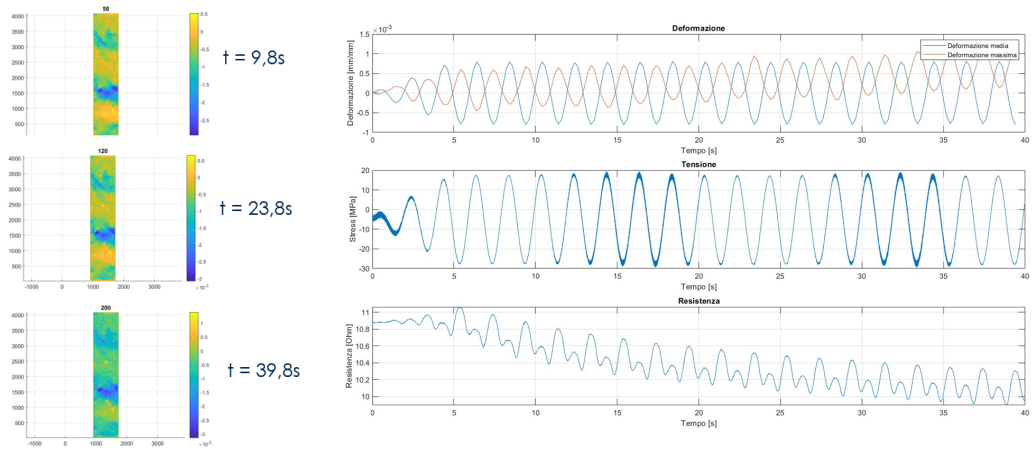


Figura 4.11: Deformazione, tensione e variazione di resistenza nel tempo del provino 14, durante il pre-tensionamento con carico ciclico. Sulla sinistra vengono riportati le deformazioni lungo l'asse di carico in 3 istanti ottenuti dalle analisi DIC

In tabella 4.1 vengono riportati tutti i gain factor ottenuti con la rispettiva deviazione standard.

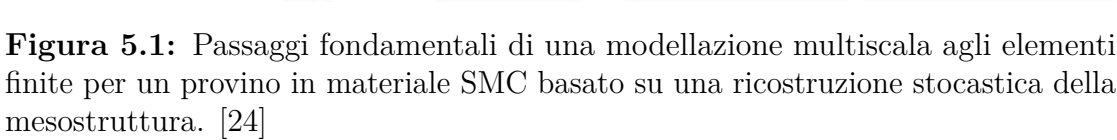
Provini	Gain Factor	R^2	Gain Factor con strain>0.1%	R^2
12	3.87	0.5760		
13	-7.40	0.9371	-9.18	0.9884
14	25.06	0.9964		
21	4.47	0.7870	1.95	0.7990
22	-11.61	0.5792	-22.74	0.9834
23	-24.04	0.8503	-34.05	0.9919

Tabella 4.1: Tabella riassuntiva dei gain factor ottenuti dalle prove sperimentali

Capitolo 5

Simulazione FEM di un provino SMC/Carbon Forged

La simulazione numerica del comportamento meccanico dei compositi SMC presenta sfide significative a causa della forte eterogeneità microstrutturale e dell'anisotropia locale introdotta dall'orientamento casuale dei fasci di fibre. Le proprietà meccaniche non dipendono esclusivamente dalla frazione volumica e dall'orientamento medio dei fasci, ma anche dalle variazioni mesoscopiche generate durante il processo di stampaggio a compressione, che determinano una notevole dispersione nei risultati sperimentali e rendono difficoltosa la predizione accurata della risposta strutturale [23],[24]. Tra i diversi approcci numerici sviluppati, i modelli basati su Representative Volume Elements (RVE) [24],[25], [26] hanno dimostrato una buona capacità di predire la rigidezza macroscopica del materiale, un esempio è il lavoro fatto da Zhangxing Chen, Tianyu Huang [24] che viene schematizzato in figura 5.1. In pratica il metodo prevede la ricostruzione, mediante elementi finiti, di un Volume Rappresentativo Elementare (RVE) del materiale composito. All'interno di questo volume, i fasci di fibre vengono generati con un orientamento medio predefinito, ma introducendo una variabilità stocastica nella loro direzione. Questo approccio consente di ottenere una rappresentazione della mesostruttura più realistica e statisticamente rappresentativa del processo produttivo. L'RVE così generato viene infine sottoposto ad analisi di omogeneizzazione per determinare le componenti della matrice di rigidezza efficace del materiale, corrispondente all'orientamento medio impostato, il risultato è la correlazione dei grafici 5.2.



63

locale in quel punto. Questo approccio consente di sviluppare un modello FEM estremamente efficiente ("snello") e al contempo accurato nella predizione del comportamento elastico del componente, vedi i risultati in figura 5.3.

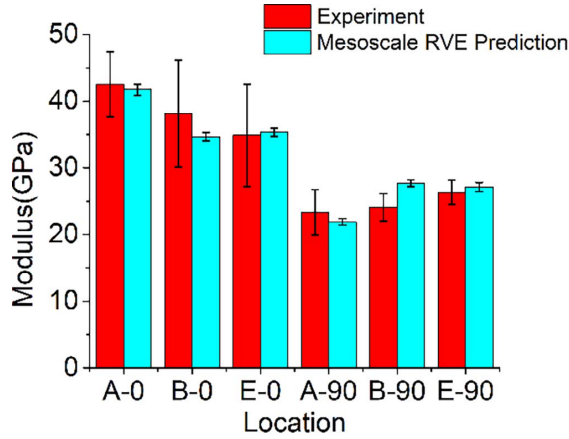


Figura 5.3: Comparazione tra il modulo elastico ottenuto e le prove meccaniche sperimentali per diversi provini ricavati in posizioni diverse: A,B,E e con orientamenti diversi 0, 90. [24]

Tuttavia, questi metodi si rivelano generalmente insufficienti per determinare in modo affidabile il punto di rottura del composito, poiché non catturano in maniera esaustiva i fenomeni locali di danneggiamento e interazione fibra-matrice. Per questo motivo, modelli avanzati come le Cohesive Zone Models (CZM) [27] sono spesso necessari per prevedere non solo la rigidità, ma anche il comportamento a rottura. Un elemento chiave di tutti questi approcci è la dipendenza da una simulazione di processo. Il flusso dei fasci di fibre e della resina durante lo stampaggio viene convertito in un tensore di orientamento delle fibre, che costituisce l'input principale per i modelli FEM. Questo passaggio permette di collegare direttamente le condizioni di processo alla risposta macroscopica del materiale, migliorando l'affidabilità delle previsioni e fornendo informazioni critiche per la valutazione della rigidità e dei punti critici di danneggiamento. Nel presente lavoro si è adottato il solutore LS-Dyna, utilizzando la formulazione Constrained Beam in Solid (CBIS) [28],[29],[30],[31], [32]. Questo approccio consente di modellare i fasci di fibre come elementi beam vincolati all'interno di una matrice solida, rappresentando in modo realistico l'interazione fibra-matrice e seguendo l'evoluzione del danno fino alla rottura locale dei fasci. Rispetto a una modellazione esplicita a livello di singola fibra, il metodo CBIS offre un compromesso efficace tra accuratezza e costo computazionale, permettendo di simulare sia la rigidità che il comportamento a rottura del provino. La

combinazione tra simulazione di processo, tensore di orientamento delle fibre e modellazione CBIS costituisce quindi un quadro completo per la previsione del comportamento meccanico dei materiali SMC. Nei paragrafi successivi verranno approfonditi gli aspetti legati alla simulazione di processo, alla generazione del tensore di orientamento e alla modellazione FEM, mostrando come questi strumenti consentano di ottenere previsioni affidabili sia della risposta elastica che della rottura dei provini.

5.1 Modello FEM su LsDyna con il constrain CONSTRAINED BEAM IN SOLID

Il modello che utilizza il constrain `CONSTRAINED_BEAM_IN_SOLID` consente di modellare i fasci di fibre come dei semplici BEAM, quindi elementi a 2 nodi con 6 gradi di libertà per nodo. Ogni nodo dei beam viene vincolato in maniera rigida agli spostamenti di una mesh solida. Fibra di carbonio e resina epossidica vengono modellati rispettivamente come elementi beam e solidi, dove gli elementi beam sono sommersi all'interno della mesh solida, vedi figura 5.4.

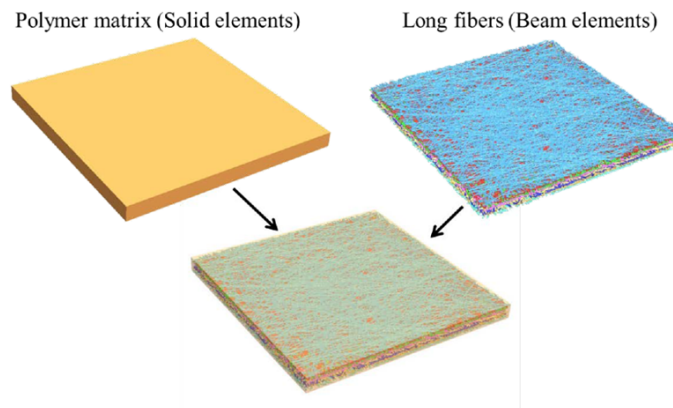


Figura 5.4: Esempio di modello che sfrutta una matrice solida per ricreare la resina e un insieme di elementi beam per ricreare le fibre. [31]

Applicando il constrain CBIS i nodi slave dei beam, vengono vincolati in velocità e accelerazione con i nodi master della mesh solida. Esistono diverse configurazioni di questo comando, in questa tesi per le simulazioni statiche dei provini verrà usata l'opzione $CDIR = 0$, cioè i nodi slave e i nodi master vengono accoppiati in tutte le direzioni. Ci sono delle opzioni come $CDIR = 1$ che permettono di accoppiare velocità e accelerazione unicamente nella direzione normale al beam,

oppure accoppiare la forza nella direzione assiale del beam con una funzione legata allo slittamento tra i nodi dei beam e i nodi master della mesh solida, simulando quindi uno scorrimento viscoso. Questa speciale opzione verrà approfondita nel prossimo paragrafo riguardo la simulazione di processo.

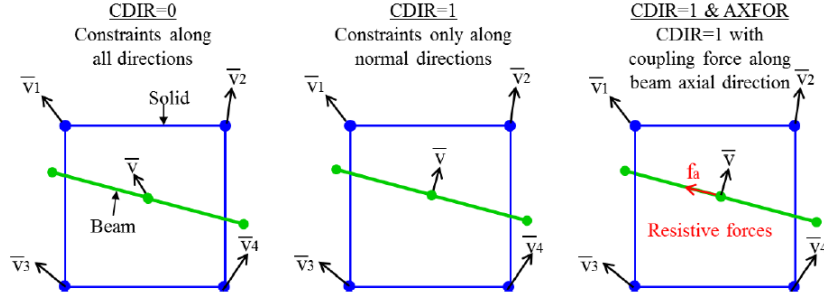


Figura 5.5: Opzioni di accoppiamento del modello CBIS, a sinistra quello più semplice in cui vengono accoppiati in modo rigido spostamenti, velocità e accelerazione dei nodi beam con i nodi della mesh solida. [31]

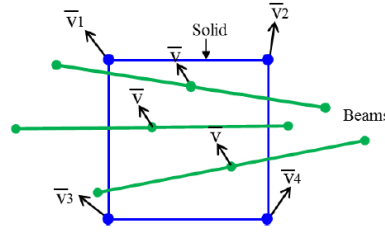


Figura 5.6: All'interno di un elemento solido possono essere inseriti anche più beam con orientamenti diversi

Il grande vantaggio di questo tipo di simulazione è quello di andare a simulare sia lo stress a cui viene sottoposta la matrice di resina epossidica, che lo stress dei beam, inserendo poi alla simulazione degli opportuni modelli di danneggiamento è possibile capire il punto esatto in cui avviene la rottura e il modo in cui avviene. In figura 5.7 vengono riportati i risultati ottenuti da [28], con dei test di compressione fatti su un componente realizzato in materiale SMC. Le simulazioni sono state fatte utilizzando il constrain CBIS, i beam che rappresentano le fibre in questo caso sono stati inseriti come fasci di fibre, cioè più beam messi in una stessa direzione ricavata dalle simulazioni di processo. In alto a destra vi sono in grigio le curve di compressione Forza-Spostamento di diversi provini testati, in rosso vi è la curva simulata, si può notare come questa sia aderente con i risultati sperimentali. In

basso ci sono gli strain ricavati dalla simulazione per la resina epossidica (sulla sinistra), mentre a destra la forza assiale applicata sui beam.

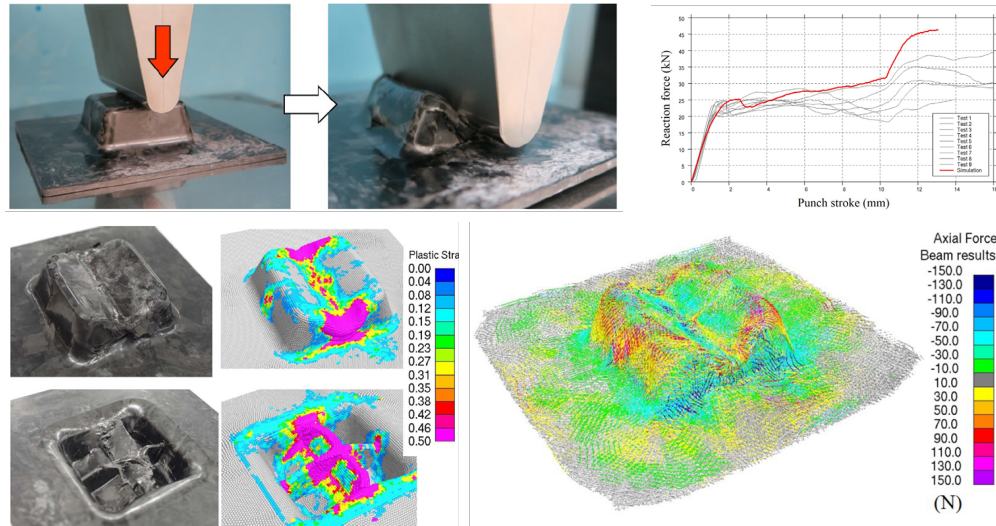


Figura 5.7: Test di compressione statica su un componente realizzato in SMC, nelle figura in basso vengono riportate i risultati delle simulazioni con la deformazione plastica calcolata sulla mesh solida, quindi la resina e la forza assiale a cui sono sottoposti i beam. In questo caso sono stati simulati non semplici fibre, ma vengono posizionate all'interno del componente fasci di fibre. [28]

5.2 Tensore di orientamento e simulazione di processo

Per riuscire a catturare in modo preciso il comportamento meccanico dell'SMC bisogna prevedere la microstruttura finale del componente che dipende dal processo di stampaggio a compressione. La Simulazione di Processo si inserisce in questo contesto come strumento fondamentale dell'approccio ICME (Integrated Computational Materials Engineering), il cui obiettivo è ridurre il numero di costosi esperimenti empirici ("trial-and-error") e accorciare il ciclo di sviluppo. Una simulazione affidabile deve essere in grado di prevedere la cinematica di flusso, la forza di stampaggio e, soprattutto, la distribuzione finale dell'orientamento delle fibre nel componente. Dalla letteratura emergono due filosofie di modellazione distinte per affrontare il problema della simulazione. Il primo approccio, di tipo continuo o macroscopico, è quello più consolidato e implementato in software

commerciali come Autodesk Moldflow e Moldex3D. In questo metodo, il materiale SMC è modellato come un fluido non Newtoniano omogeneo, la cui reologia è descritta da modelli che considerano il flusso predominante come estensionale, noto anche come "plug flow". L'approccio numerico utilizzato è tipicamente il Metodo dei Volumi Finiti (FVM), particolarmente ideale per la risoluzione di problemi fluidodinamici (CFD) come il riempimento di uno stampo, in quanto discretizza il dominio in volumetti su cui risolve le equazioni di conservazione. Il principale vantaggio di questo approccio risiede nella sua efficienza computazionale, che lo rende adatto all'analisi di componenti di grandi dimensioni e geometrie complesse in tempi ragionevoli. La sfida principale, tuttavia, consiste nel fatto che la descrizione dell'orientamento delle fibre non è diretta ma deve essere ricavata come informazione aggiuntiva, risolvendo un'equazione di evoluzione accoppiata al campo di flusso. Il secondo approccio, di tipo discreto o mesoscopico, rappresenta invece una metodologia innovativa implementata in codici come LS-DYNA. Questo modello mira a rappresentare la fisica del processo in modo più diretto modellando esplicitamente le lunghe fibre tramite elementi trave (beam) e la matrice polimerica con elementi solidi tetraedrici. L'interazione fibra-matrice è governata da un accoppiamento `CONSTRAINED_BEAM_IN_SOLID`, mentre l'approccio numerico si basa sul Metodo agli Elementi Finiti (FEM) unito a tecniche avanzate di rimeshing adattativo (EFG) per gestire le grandi deformazioni. Il vantaggio principale di questa tecnica è la sua potenziale maggiore accuratezza, poiché fornisce direttamente la posizione e l'orientamento di ogni fibra, risultando ideale per studi dettagliati dei fenomeni fisici. La sfida, d'altro canto, è il suo elevatissimo costo computazionale, che attualmente lo limita all'analisi di componenti di piccole dimensioni o a studi di dettaglio su zone specifiche. La fattibilità della simulazione dipende quindi in larga misura dall'obiettivo progettuale. L'approccio continuo (FVM) si conferma fattibile e praticabile per l'analisi di interi componenti in fase di progetto industriale, mentre quello discreto (FEM) rimane uno strumento prezioso per la ricerca e la validazione dei modelli continui su scale più ridotte.

Problema: Ricavare il Tensore di Orientamento. Nell'approccio continuo, l'orientamento delle fibre deve essere ricavato attraverso un descrittore matematico noto come **tenore di orientamento** di secondo ordine. Questo tensore, una matrice 3×3 simmetrica e a traccia unitaria, rappresenta statisticamente la distribuzione media degli orientamenti all'interno di un volume elementare, i cui autovalori e autovettori indicano la direzione preferenziale di allineamento delle fibre e il grado di questo allineamento. La difficoltà fondamentale non risiede nella sua definizione, bensì nel prevedere la sua evoluzione temporale durante il flusso.

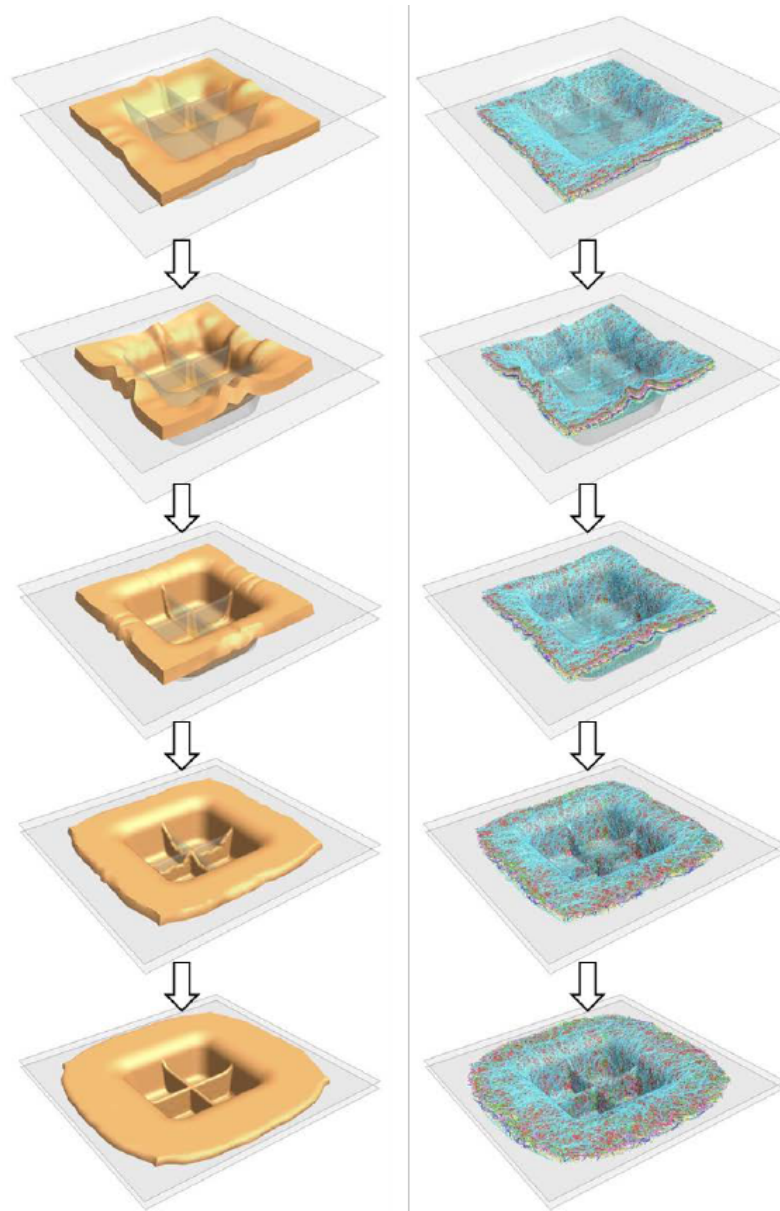


Figura 5.8: Simulazione di processo per un componente realizzato in SMC, andamento della deformazione della mesh solida sulla sinistra e della deformazione dei beam sulla destra

Tale evoluzione è governata da un'equazione differenziale (l'equazione di Folgar-Tucker) la cui soluzione richiede la conoscenza del campo di velocità del fluido, fornito dal solutore FVM, e l'introduzione di un'approssimazione per modellare il contributo delle interazioni fibra-fibra. Questa approssimazione, nota come "Closure

Approximation", costituisce una delle principali fonti di errore nella predizione finale, in quanto introduce una semplificazione necessaria per rendere il problema matematicamente trattabile. Al contrario, nell'approccio discreto di LS-DYNA, questo problema viene elegantemente bypassato. Il tensore di orientamento $\mathbf{A}_2$ non deve essere ricavato risolvendo un'equazione di evoluzione approssimata, ma può essere calcolato ex-post, ovvero una volta completata la simulazione. Questo calcolo avviene attraverso un'operazione statistica sulle direzioni degli elementi trave presenti in un certo intorno. In questo caso, il software non predice un orientamento statistico basato su modelli, ma misura direttamente l'orientamento risultante dalla simulazione fisica delle singole fibre, offrendo una descrizione potenzialmente più accurata e priva delle approssimazioni insite nei modelli di chiusura.

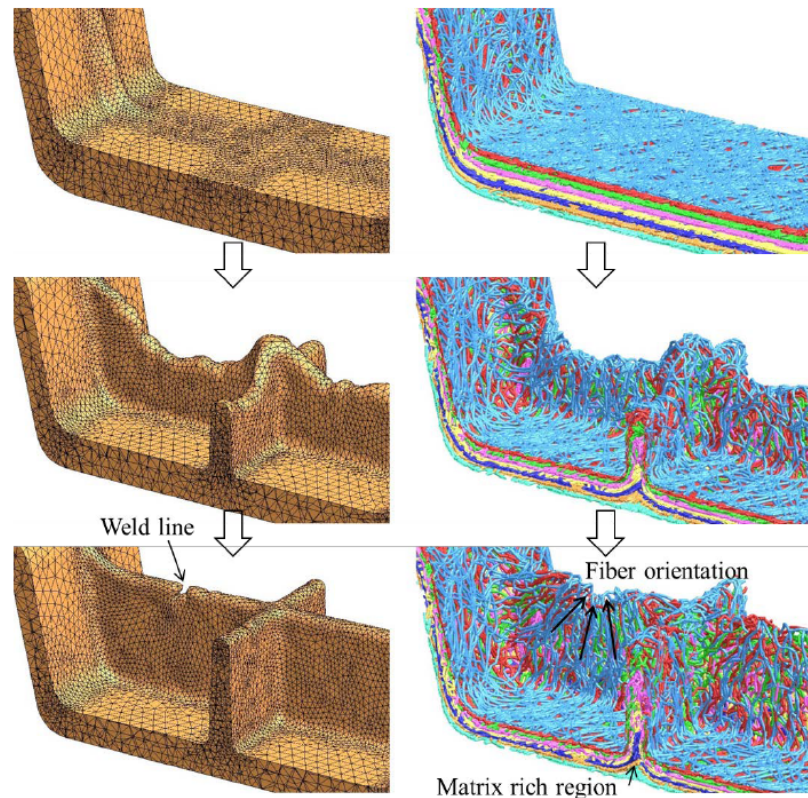


Figura 5.9: Comportamento della funzione di rimeshing adattivo sulla mesh solida

La simulazione di processo per lo stampaggio SMC si conferma non solo fattibile ma sempre più indispensabile nell'industria moderna. Software commerciali come Autodesk Moldflow e Moldex3D, basati sul Metodo dei Volumi Finiti, offrono un

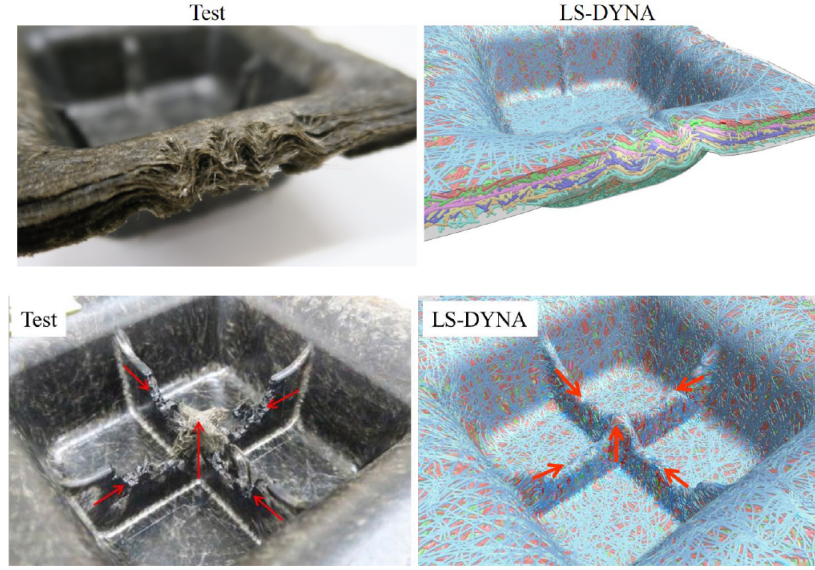


Figura 5.10: Comparazione tra i risultati di un componente stampato in SMC e una simulazione di processo realizzata mediante LsDyna. [31], [28]

approccio robusto ed efficiente per la progettazione, nonostante la sfida intrinseca della modellazione dell'orientamento attraverso necessarie approssimazioni matematiche. Parallelamente, le nuove metodologie ibride (FEM) come quelle implementate in LS-DYNA promettono di superare queste limitazioni modellando la fisica del processo in modo più diretto e potenzialmente più accurato, sebbene il loro costo computazionale le renda oggi proibitive per analisi complete di componenti full-scale. La scelta tra i due approcci si basa dunque su un attento compromesso tra le fasi di sviluppo del prodotto, il livello di accuratezza e dettaglio richiesto e le risorse computazionali disponibili.

5.2.1 Tensore di orientamento

Il tensore di orientamento è uno strumento matematico che ci permette di descrivere statisticamente come sono orientate le fibre in una determinata zona del provino. La direzione di una singola fibra è facile da descrivere: si usa un vettore unitario p (con componenti p_1, p_2, p_3)

$$p = \begin{Bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{Bmatrix}$$

che punta lungo il suo asse. Il Problema: In un composito ci sono migliaia di fibre per centimetro cubo. Elencare i vettori di tutte è impraticabile. La Soluzione Ingenua: Si potrebbe usare una funzione di distribuzione di probabilità $\Psi(p)$ che dice qual è la probabilità che una fibra punti in una certa direzione. Questa funzione è matematicamente corretta ma è complicata da visualizzare e, soprattutto, è terribilmente scomoda da usare nei calcoli delle simulazioni.

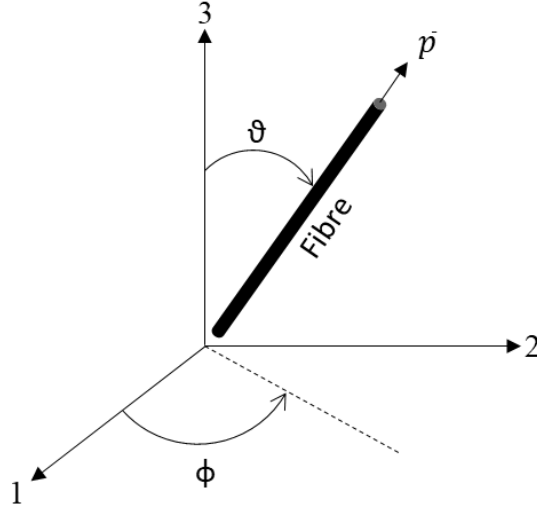


Figura 5.11: Rappresentazione di una fibre nello spazio tridimensionale. Il vettore p indica la direzione della fibra [33]

Advani e Tucker [34] hanno proposto una soluzione: invece di lavorare con la funzione di probabilità $\Psi(p)$ tutta intera, si lavorano con le sue medie. Il tensore di orientamento a_{ij} è proprio questo: una media. Il tensore di orientamento di secondo ordine è una matrice 3×3 definita come:

$$a_{ij} = \langle p_i \otimes p_j \rangle = \int \Psi(p) p_i p_j dp \quad (5.1)$$

Dove p_i e p_j sono le componenti (x, y, z) del vettore direzione della singola fibra. $\langle p_i \otimes p_j \rangle$ significa "media di". Quindi stiamo facendo la media di tutti i possibili prodotti tra le componenti dei vettori. $\Psi(p)$ è la funzione di distribuzione di probabilità di cui parlavamo prima. Il risultato è una matrice simmetrica (perchè $a_{ij} = a_{ji}$) i cui elementi contengono informazioni preziose sull'allineamento medio. Prendendo un sistema di coordinate composto dagli assi 1,2,3

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}$$

Dove i termini:

- a_{11} (in alto a sinistra) mi dice quanto le fibre sono allineate con la direzione 1. Più è vicino a 1, più le fibre sono allineate in quella direzione.
- a_{22} (al centro) mi dice quanto sono allineate con la direzione 2.
- a_{33} (in basso a destra) mi dice quanto sono allineate con lo spessore (3).
- a_{ij} con $i \neq j$ sono le "componenti miste". Indicano se c'è un allineamento preferenziale in direzioni oblique rispetto agli assi principali. Se sono zero, significa che l'allineamento è perfettamente allineato con gli assi del sistema di riferimento.

Una proprietà fondamentale è che la somma degli elementi sulla diagonale (la "traccia" della matrice) è sempre uguale a 1: $a_{11} + a_{22} + a_{33} = 1$. Questo è logico perché è come dire che la probabilità totale che una fibra esista in una delle tre direzioni è del 100%. La vera potenza del tensore si vede quando si calcolano i suoi autovalori e autovettori. Gli **autovettori** ti dicono le direzioni principali dell'allineamento delle fibre. Il primo autovettore punta nella direzione in cui le fibre sono più allineate. Gli **autovalori** (che chiamiamo $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$) ti dicono quanto sono allineate in quelle direzioni. Per la proprietà della traccia, la loro somma fa sempre 1. Un solo oggetto matematico (una matrice 3x3) contiene tutta l'informazione statistica sull'orientamento in un punto. È computazionalmente efficiente.

5.2.2 Tomografia per l'acquisizione del tensore di orientamento nel Carbon Forged

In questa tesi non sono state fatte prove sul materiale SMC, ma è stato utilizzato il Carbon Forged. Questo ha un processo differente e non è possibile risalire all'orientamento delle fibre tramite simulazioni di processo. Per ovviare a questo problema è stata impiegata la tomografia computerizzata, che consente di ottenere un'immagine 3D dettagliata dei provini. Gli scan dei provini vengono poi inseriti in un software di rielaborazione dati, in grado di restituire il tensore di orientamento

delle fibre in un materiale composito. In questo caso è stato utilizzato il programma VG STUDIO della Hexagon [35].

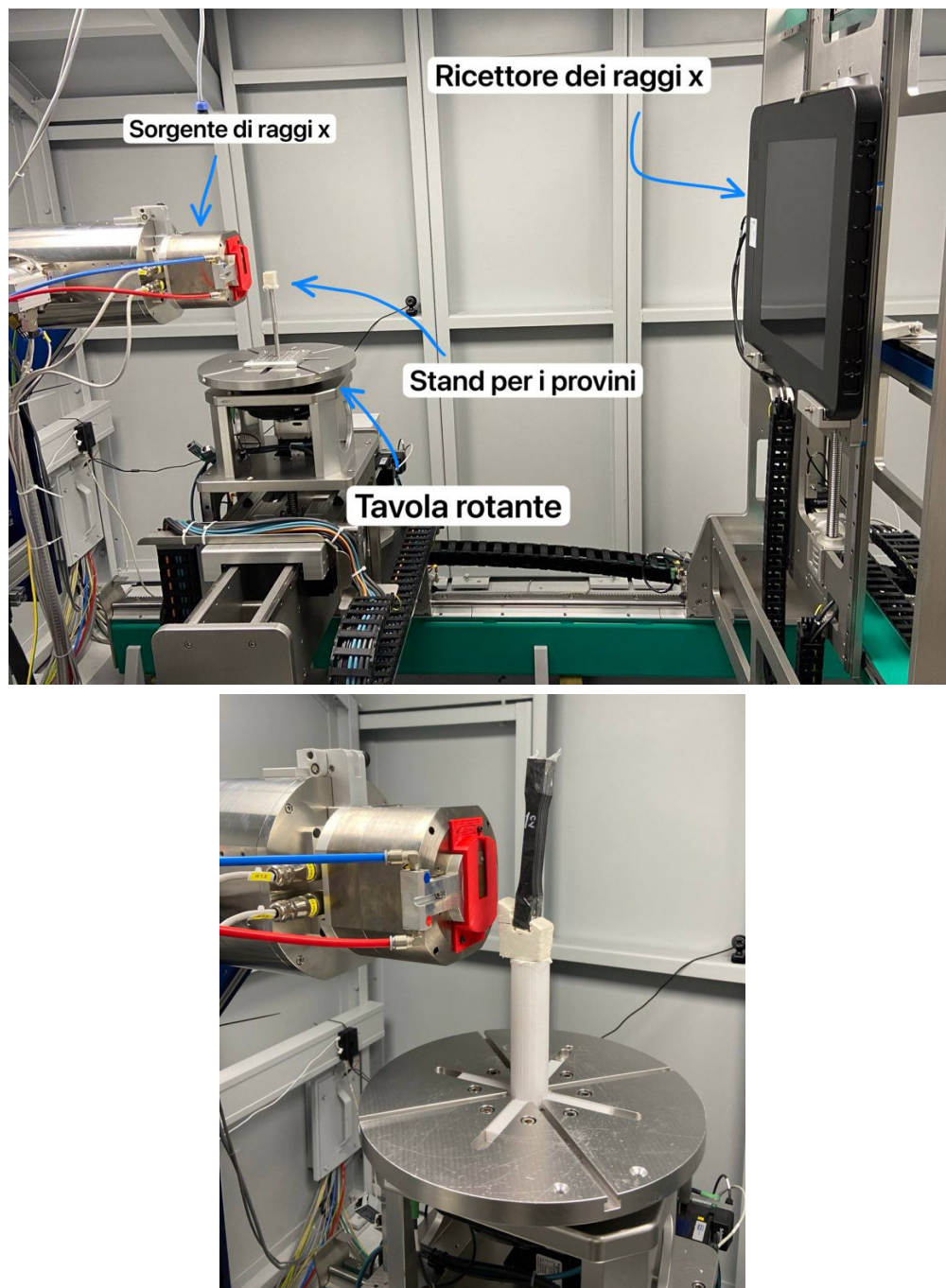


Figura 5.12: Set-up per l'acquisizione della tomografia computerizzata

La tomografia computerizzata è una tecnica di acquisizione che ricostruisce un volume tridimensionale a partire da molteplici proiezioni radiografiche attorno al campione. I provini vengono posizionati su una tavola rotante, irradiati con raggi X e l'intensità trasmessa viene acquisita da un rivelatore. Al termine di ogni acquisizione la tavola ruota di un certo angolo e la misura viene ripetuta (vedi immagine 5.12). Una volta completate tutte le acquisizioni, i dati vengono elaborati nel software VG STUDIO, che ricostruisce il volume discretizzandolo in voxel (volume elements), analoghi tridimensionali dei pixel. Ogni voxel contiene un valore di attenuazione ai raggi X che riflette le proprietà del materiale locale: più un materiale è denso, maggiore è l'assorbimento dei raggi X. In figura 5.13 è riportata la tomografia del provino 24, in particolare la superficie posteriore. L'immagine è in scala di grigi e l'intensità varia in base alla quantità di raggi X registrata dal rivelatore.

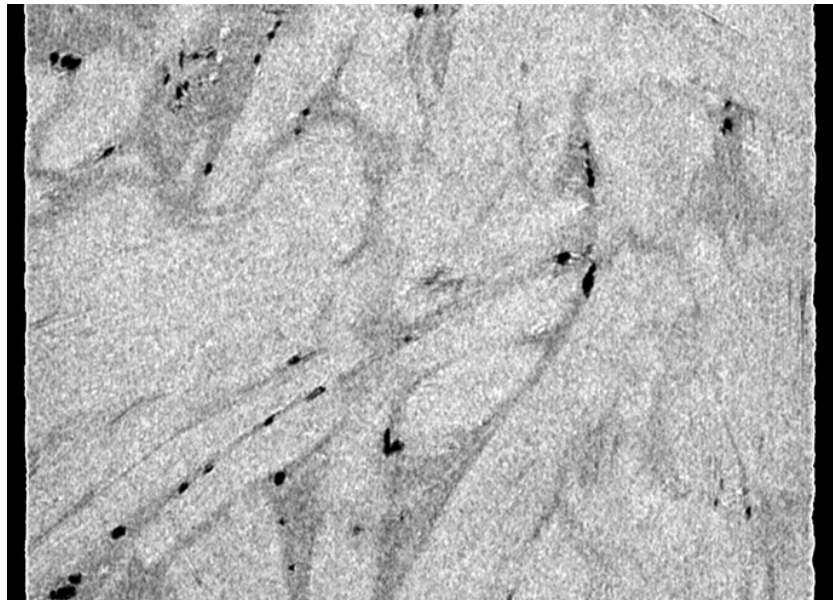


Figura 5.13: Tomografia del provino 24, in particolare è riportata la superficie posteriore. In nero i vuoti presenti (più evidenti in superficie), in bianco le fibre di carbonio (a densità maggiore) e in grigio la resina che ricopre le fibre.

Si notano subito i puntini neri, corrispondenti ai vuoti, caratterizzati da densità molto bassa; anche la parte esterna al provino appare nera poiché è presente solo aria. In bianco è visibile la fibra di carbonio, che risulta tale perché è il materiale a maggiore densità (dopo opportuna taratura preliminare della scala di grigi). In grigio è rappresentata la resina che avvolge le fibre, con densità intermedia tra

il carbonio e il vuoto. Il software, attraverso algoritmi che analizzano i valori di intensità contenuti nei voxel, è in grado di stimare la percentuale di porosità e la posizione dei pori nel provino. Inoltre, vengono eseguite analisi di orientamento delle fibre: queste, visibili come regioni anisotrope con contrasto rispetto alla matrice, vengono segmentate e ricostruite. L'analisi della geometria locale dei voxel consente di stimare la direzione principale di ciascun elemento fibroso. Aggregando i dati voxel per voxel si costruisce il tensore di orientamento, che sintetizza le direzioni preferenziali delle fibre nel volume analizzato. L'analisi di orientamento delle fibre permette anche di ottenere la volume fraction, cioè la percentuale di fibre locali nel provino, questa sarà utile per la ricostruzione del provino per la simulazione FEM. Infine, mediante una mesh detta **donor mesh** di parallelepipedi rettangoli creata sul provino, i valori medi ottenuti dalle analisi vengono assegnati ed esportati per l'elaborazione in MATLAB.

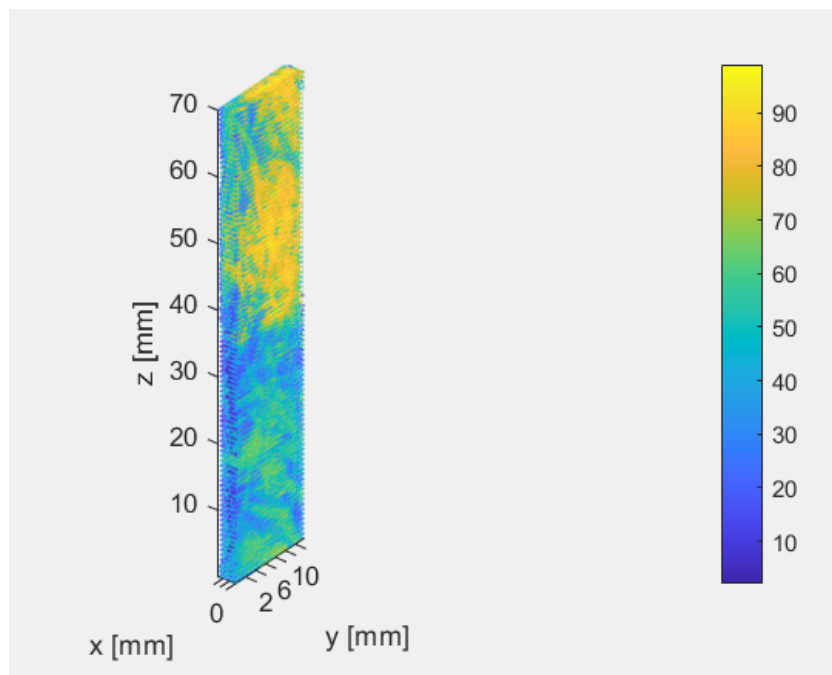


Figura 5.14: Percentuale di fibra in volume locale ricavata dalle analisi della tomografia

Per quanto riguarda la creazione del modello il procedimento è il medesimo se si usa la tomografia o una simulazione di processo.

5.3 Creazione del modello utilizzando MATLAB

Come discusso nei paragrafi precedenti, l'approccio adottato per le simulazioni è quello del `COSTRAINED_BEAM_IN_SOLID`, che richiede la generazione delle fibre una per una nel modello. Per la costruzione delle geometrie viene solitamente utilizzato il software LS PrePost di LS-DYNA [36]; tuttavia, nel mio caso non sono disponibili tool in grado di generare migliaia di beam all'interno di una geometria con orientazione stocastica rispetto a un tensore di orientamento iniziale. Si è quindi reso necessario l'impiego di MATLAB, sviluppando un algoritmo capace di produrre un file compatibile con LS PrePost, utile a completare la creazione del modello.

5.3.1 Funzionamento dei file .k

LS Dyna è in grado di leggere file con estensione ".k", questi hanno la stessa decodifica dei file di testo ".txt" infatti possono essere letti mediante blocco note, al suo interno LS PrePost durante la costruzione del modello inserisce i punti chiave come NODI e la loro posizione, Elementi specificando il tipo e i nodi a cui sono attaccati, forze e quanto altro. L'impostazione del foglio è la medesima per ogni progetto, quello che interessa è come vengono salvati gli elementi BEAM all'interno del file. Nel codice 5.1 viene riportato il file sorgente per la creazione di un elemento BEAM, questo è composto da 3 sezioni:

- La sezione dedicata ai nodi `*NODE`, qui vengono dichiarati tutti i nodi del modello, ogni nodo ha un nid che corrisponde al numero identificativo del nodo e poi segue la posizione nello spazio. nel mio esempio ho dichiarato due nodi uno con posizione (0,0,0) e uno con posizione (1,1,2).
- La sezione dedicata agli elementi beam `*ELEMENT_BEAM`, qui vengono dichiarati i beam ognuno di essi ha un eid cioè l'ELEMENT ID che serve ad identificare il beam, poi seguono il pid cioè PART ID che corrisponde al gruppo di elementi che si vuole usare e poi n1, n2 che corrispondono ai nodi estremi del beam. C'è anche un'opzione che permette di aumentare i nodi del beam, quindi migliorando l'approssimazione del continuo che si fa, ma in questo caso non verrà usata.
- Successivamente c'è la sezione dedicata al `*PART`, questo indica un gruppo di elementi al quale si vogliono associare le stesse proprietà, in questo caso tutti i beam verranno uniti in un solo part. Qui bisogna inserire il PART

ID che corrisponde al numero identificativo di questo gruppo di elementi e successivamente le caratteristiche che si vogliono associare a questo, quindi SECID id della sezione del beam, MID id del materiale che si vuole usare e così via. Questa parte non verrà compilata direttamente dal matlab ma verrà fatto successivamente nel programma LS PrePost.

```

1  ## LS-DYNA Keyword file created by LS-PrePost(R) 2025 R1 (v4
   .12.0) - 01Oct2024
2  ## Created on Mar-23-2025 (11:54:59)
3  *KEYWORD
4  *NODE
5  ##      nid      x      y      z      tc      rc
6      1      0      0      0      0      0
7      2      1      1      2      0      0
8  *ELEMENT_BEAM
9  ##      eid      pid      n1      n2      n3      rt1      rr1
   rt2      rr2      local
10     2      1      1      2      0      0      0
   0      0      0
11  *PART
12  ##
   title
13
14  ##      pid      secid      mid      eosid      hgid      grav
   adpopt      tmid
15     1      0      0      0      0      0
   0      0
16  *END

```

Codice 5.1: File di input LsDyna per la generazione di un beam, con nodi 1 e 2

Aprendo il codice 5.1 con LS PrePost ci si ritrova dinanzi a questa schermata 5.15, in cui è stato generato correttamente il beam, e in basso a destra ho riportato le coordinate dei due nodi del beam che corrispondono a quelle inserite nel file.

5.3.2 Idea alla base dell'algoritmo

L'algoritmo per la creazione del modello ha il compito di:

- **Input:**
 - Dimensioni del provino: H_s = altezza provino, L_s = lunghezza provino e W_s = larghezza provino

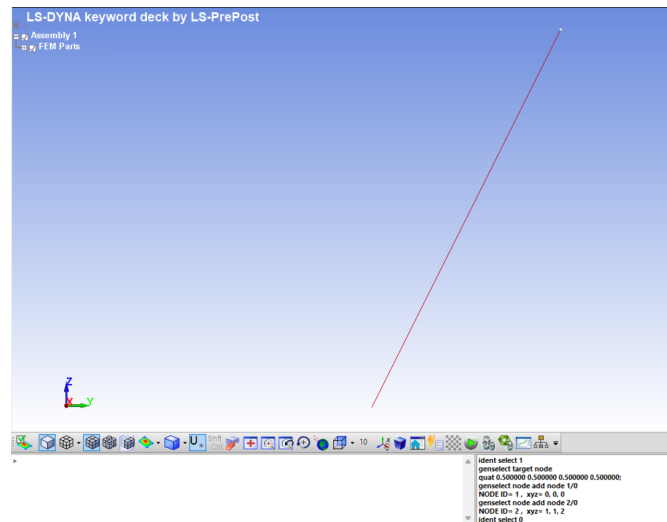


Figura 5.15: Beam generata aprendo il file con il codice 5.1

- Numero di beam richieste all'interno di tutto il provino N_b e lunghezza dei beam richiesti L_b
- Dati ottenuti dalle CT, quindi viene caricata la doner mesh tridimensionale ad ogni punto di questa mesh è assegnato una matrice 3×3 che indica il tensore di orientamento, viene anche riportata la frazione in volume della quantità di fibre.

- **Output:**

- File .k contenente tutti i nodi con le posizioni e gli elementi beam con i nodi ai quali sono attaccati i beam

L'idea alla base di questo algoritmo è quella di appoggiarsi alla doner mesh di parallelepipedi generata durante l'analisi CT per l'estrazione dei dati, ogni cella ha come informazione le sue dimensioni e la sua posizione, la frazione in volume di fibre media al suo interno e il tensore di orientamento medio. Attraverso un ciclo for vengono lette una per una le informazioni contenute in ogni volume andando a generare al loro interno un numero di beam che rispetta la volume fraction e il tensore di orientamento. Alla fine di questo ciclo for avrò tutti i beam del provino che poi andrò a trascrivere nel file da utilizzare in LS PrePost. Sorge però un problema, la doner mesh generata dalle analisi CT è composta da 20000 volumi, questo significa che per avere almeno 1 elemento beam in ogni volume bisogna generare almeno 20000 beam, quindi 40000 nodi in cui vengono calcolati gli

spostamenti, considerando che per ogni nodo di un elemento beam ci sono 6 gradi di libertà, quindi avremmo matrici di rigidezza con dimensioni di 240000×240000 , senza contare la mesh solida della resina. Una mole di dati che per delle analisi esplicite richiedono tempi di calcolo importanti. Si è deciso quindi di creare una mesh di appoggio preliminare realizzata in Ls PrePost avente le dimensioni del provino, con una dimensione della mesh maggiore e quindi un minor numero di volumi, in cui vengono mediati i dati provenienti dalle analisi CT. Ottenendo una minor risoluzione del problema, ma in compenso un minor numero di beam da generare e quindi una capacità velocità di calcolo maggiore.

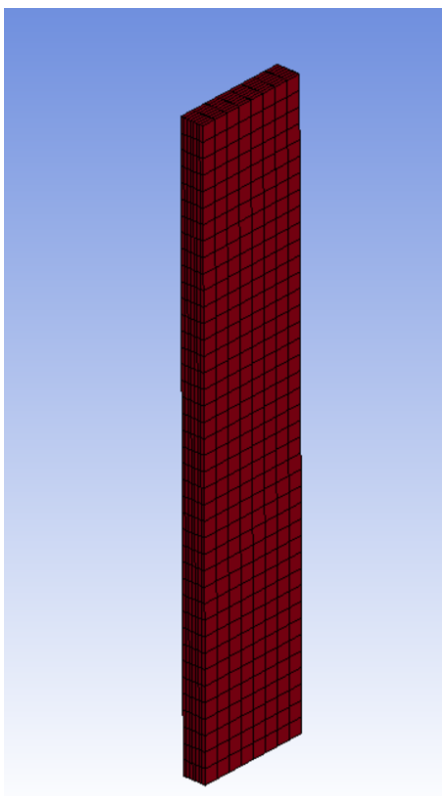


Figura 5.16: Mesh di appoggio generata in LS PrePost avente le stesse dimensioni del provino

In figura 5.16 viene riportata la mesh di appoggio utilizzata, lungo lo spessore la risoluzione della mesh è maggiore, questo perché i fasci di fibre se ce li immaginiamo come dei piani hanno tutti direzione normale con direzione dello spessore, essendo poi molto sottili, quando si fa la media con poca risoluzione risulta un tensore di orientamento che poco descrive il reale orientamento locale delle fibre. In

totale vengono utilizzati circa 2200 elementi per provino. Questa mesh viene poi importata su MATLAB utilizzando la sezione *NODE del file .k e la sezione *ELEMENT_SOLID (vedi codice 5.2).

```

1  $$ LS-DYNA Keyword file created by LS-PrePost(R) 2025 R1 (v4
   .12.0) - 01Oct2024
2  $$ Created on Jun-23-2025 (18:10:55)
3  *KEYWORD
4  *NODE
5  $$      nid          x          y          z          tc          rc
6          1          0.0          0.0          0.0          0          0
7          2      0.3942857          0.0          0.0          0          0
8          3      0.7885714          0.0          0.0          0          0
9          4      1.182857          0.0          0.0          0          0
10         5      1.577143          0.0          0.0          0          0
11  ...
12  *ELEMENT_SOLID
13  $$      eid      pid      n1      n2      n3      n4      n5      n6      n7
   n8
14         1          1          1          2      10          9      73      74      82
   81
15         2          1          2          3      11      10      74      75      83
   82
16         3          1          3          4      12      11      75      76      84
   83
17         4          1          4          5      13      12      76      77      85
   84
18         5          1          5          6      14      13      77      78      86
   85
19  ...
20  *PART
21  $$
   title
22  boxsolid
23  $$      pid      secid      mid      eosid      hgid      grav      adpopt
   tmid
24         1          0          0          0          0          0          0
   0
25  *END

```

Codice 5.2: File di input della mesh di appoggio, non sono riportati tutti i nodi ed elementi

5.3.3 Funzionamento dell'algoritmo

L'algoritmo è diviso in varie sezioni, la prima parte è quella di inizializzazione dei parametri, quindi inserisco le dimensioni del provino, il numero di beam richiesti, la loro lunghezza, importo la mesh di appoggio e la doner mesh dalla CT.

```

1  clc
2  close all
3  clear all
4
5  Ls = 69; % Lunghezza mesh resina (asse y)
6  Ws = 13.17; % Larghezza mesh resina (asse x)
7  Hs = 2.76; % Altezza mesh resina (asse z)
8  Msize = 1.5; % Grandezza lato triangoli
9
10 Nb = 6000; % Numero di fibre nella resina
11 Lb = 10; % Lunghezza beam
12 Div = 4; % Numero di divisioni beam DEVE ESSERE PARI!!!!
13 BeamTotali = Nb*Div;
14 NodiBeamTotali = Nb*(Div+1);
15
16 sigma = 0.1; % Deviazione standard distribuzione normale
17
18 % Importo nodi ed elementi
19
20 data = readmatrix('MeshPartenza2/Nodi.txt');
21 Nodi = data(:,2:4);
22 data = readmatrix('MeshPartenza2/Elementi.txt');
23 Elementi = data(:,3:10);
24 NEl = length(Elementi(:,1));
25
26 % Carico risultati CT
27 load('mesh3D.mat');
28 load('mesh3D_ori.mat');
29
30 [X,Y,Z] = meshgrid(uy,ux,uz);

```

Codice 5.3: Codice Matlab della prima parte del programma, dedicata all'importazione dei dati

Le fibre nei provini in carbon forged hanno una lunghezza di 10 mm, creare dei beam unici per tutta la lunghezza risulterebbe un'approssimazione troppo forte, vengono divisi in più sezioni, in questo caso ogni beam è composto da 4 beam,

l'algoritmo è pensato per il suo funzionamento per lavorare solo con divisioni pari dei beam. Durante la spiegazione di questo codice per semplicità per beam si intende il gruppo di elementi beam, chiaramente questi poi verranno trascritti all'interno del file finale elemento per elemento. Viene anche specificata la deviazione standard che verrà data ai provini in modo da creare una certa variabilità nella creazione.

Sezione di associazione della volume fraction alla mesh Successivamente si passa alla parte in cui viene mediata la volume fraction ricavata dalla CT nella mesh di appoggio, l'algoritmo è molto semplice la CT riporta nel punto centrale di ogni volume la corrispondente volume fraction. Quindi trovo tutti i punti della CT all'interno di ogni volume della mesh di appoggio e ne faccio la media. Inoltre mi calcolo il numero di beam che devono essere generati all'interno di ogni cella, questo viene fatto andando a fare una media pesata sulla VolumeFraction e poi moltiplicando per il numero di beam totali da generare.

```

1 %% Associo la volume fraction alla mesh
2
3 VolumeFraction = zeros(NEl,1);
4 [Ux,Uy,Uz] = ndgrid(1:length(ux), 1:length(uy), 1:length(uz)
5 );
6
7 for i = 1:NEl
8     mask = Ux >= Nodi(Elementi(i,1),1) & Ux >= Nodi(Elementi
9         (i,2),1) & ...
10         Uy >= Nodi(Elementi(i,1),2) & Uy >= Nodi(Elementi
11         (i,4),2) & ...
12         Uz >= Nodi(Elementi(i,1),3) & Uz >= Nodi(Elementi
13         (i,5),3);
14     % mesh3D_vf(mask)
15     VolumeFraction(i) = mean(mesh3D_vf(mask));
16 end
17
18 BeamCella = round(VolumeFraction/sum(VolumeFraction)*Nb); %
19     beam cella

```

Codice 5.4: Seconda parte del codice

Sezione di creazione dei beam Dopo questa parte inizia la sezione più importante quella legata alla generazione dei beam, qui c'è in primo luogo una prima parte di creazione di matrici per contenere le informazioni sui beam, poi avviene

anche un calcolo sulle dimensioni e punti centrali di ogni elemento della mesh di appoggio.

```

1 %% Creo i beam
2 Nb = sum(BeamCella);
3
4 % Mi genero il vettore dei beam contenente i 2 nodi per ogni
   beam
5 Beam = zeros(Nb,2+((Div+1)-2)*2);
6 base = 1;
7 for i = 1:Div-1
8     base = [base, (i+1)*ones(1,2)];
9 end
10 base = [base, Div+1];
11 Beam(1,:) = base;
12 for i = 2:Nb
13     Beam(i,:) = (i-1)*5 + base;
14 end
15
16 Beam = reshape(Beam',[],1);
17 Beam = reshape(Beam',2,Nb*Div)'; % vettore dei beam contente
   i nodi dei beam
18
19 NodiBeam = zeros(Nb*(Div+1),3); % Matrice contenente le
   coordinate dei nodibeam
20 VersoreBeam = zeros(Nb,3);
21
22 PO = [Nodi(Elementi(:,1),1),...
23       Nodi(Elementi(:,1),2),...
24       Nodi(Elementi(:,1),3)]; % Punti centrale degli
   elementi mesh
25 Dimensioni = [Nodi(Elementi(:,2),1)-Nodi(Elementi(:,1),1)
26               ,...
27               Nodi(Elementi(:,4),2)-Nodi(Elementi(:,1),2)
28               ,...
29               Nodi(Elementi(:,5),3)-Nodi(Elementi(:,1),3)];
   % Dimensioni elementi

```

Codice 5.5: Terza parte del codice

L'algoritmo è pensato per generare il beam a partire dal nodo centrale, evitando quindi di posizionarlo per la maggior parte della sua lunghezza lontano dal volume

iniziale. Una volta trovato il nodo centrale, bisogna trovare il resto dei nodi, nel nostro caso avendo per ogni beam 4 sezioni in totale abbiamo 5 nodi, bisogna trovare i 4 nodi restanti. Questo viene fatto in primo luogo assegnando ad ogni beam un orientamento, quindi il codice cerca qual'è il punto all'interno della mesh della CT più vicino al punto iniziale generato, in modo tale da assegnare al beam il tensore di orientamento che gli corrisponde. Una volta trovato il tensore di orientamento si trovano gli autovettori e autovalori, che ricordando i precedenti capitoli indicano rispettivamente le direzioni principali dell'allineamento delle fibre e quanto le fibre sono allineate verso quelle direzioni. Per generare una fibra però ho bisogno di una direzione, quindi devo ricavare una direzione media dal tensore di orientamento a cui ci aggiungo una dispersione casuale secondo la deviazione standard decisa nei dati iniziali. Nodo centrale e orientamento viene assegnato ad ogni beam attraverso due cicli for in serie.

```

1 % Mi genero i nodi di mezzeria, e associo ad ogni beam il
   versore
2 % dell'elemento ct più vicino
3 contatore = 0;
4 for i = 1:NEl
5     for l = 1:BeamCella(i)
6         NodiBeam(((contatore)*(Div+1))+Div/2+1,:) = ...
7             [rand(1,1)*Dimensioni(i,1)+P0(i,1) ,...
8              rand(1,1)*Dimensioni(i,2)+P0(i,2) ,...
9              rand(1,1)*Dimensioni(i,3)+P0(i,3)];
10        PosizioneCT = ...
11        [interp1(ux, 1:length(ux), NodiBeam(((contatore)*Div
+1)+Div/2+1,1), 'nearest'),...
12         interp1(uy, 1:length(uy), NodiBeam(((contatore)*Div
+1)+Div/2+1,2), 'nearest'),...
13         interp1(uz, 1:length(uz), NodiBeam(((contatore)*Div
+1)+Div/2+1,3), 'nearest')];
14        OR = ...
15        [mesh3D_orxx(PosizioneCT(1),PosizioneCT(2),
PosizioneCT(3)), mesh3D_orxy(PosizioneCT(1),PosizioneCT
(2),PosizioneCT(3)), mesh3D_orxz(PosizioneCT(1),
PosizioneCT(2),PosizioneCT(3));...
16        mesh3D_orxy(PosizioneCT(1),PosizioneCT(2),
PosizioneCT(3)), mesh3D_oryy(PosizioneCT(1),PosizioneCT
(2),PosizioneCT(3)), mesh3D_oryz(PosizioneCT(1),
PosizioneCT(2),PosizioneCT(3));...

```

```

17     mesh3D_orxz(PosizioneCT(1),PosizioneCT(2),
    PosizioneCT(3)), mesh3D_oryz(PosizioneCT(1),PosizioneCT
    (2),PosizioneCT(3)), mesh3D_orzz(PosizioneCT(1),
    PosizioneCT(2),PosizioneCT(3))];
18     [V, lambda] = eig(OR);
19
20     % Generazione vettorizzata
21     rand_vecs = sigma * randn(1, 3) * sqrt(lambda); %
    Moltiplica per sqrt(autovalori)
22     p = rand_vecs * V'; % Ruota nello spazio originale
23     VersoreBeam(contatore+1,:) = p ./ vecnorm(p, 2, 2);
24     contatore = contatore + 1;
25 end
26 end

```

Codice 5.6: Terza parte del codice

Successivamente vengono generati il resto dei nodi di ogni beam, dato il versore e la lunghezza di ogni sezione è facile risalire alle coordinate di ogni punto.

```

1 % Genero le coordinate degli altri nodi
2 h = -Div/2:1:Div/2;
3
4 for i = 1:Nb
5     for l = 1:Div+1
6         Nodo = (i-1)*(Div+1)+Div/2+1+h(l);
7         NodiBeam(Nodo,:) = [NodiBeam((i-1)*(Div+1)+Div
    /2+1,1)+Lb/Div*h(l)*VersoreBeam(i,1), ...
8                             NodiBeam((i-1)*(Div+1)+Div
    /2+1,2)+Lb/Div*h(l)*VersoreBeam(i,2), ...
9                             NodiBeam((i-1)*(Div+1)+Div
    /2+1,3)+Lb/Div*h(l)*VersoreBeam(i,3)];
10     end
11 end

```

Codice 5.7: Terza parte del codice

Sezione di controllo dei beam Un'altra sezione molto importante è quella del controllo dei beam, infatti durante la generazione dei nodi, non viene controllato che questi cadano all'interno del volume del provino. Dato che nella realtà i provini vengono tagliati mediante una tagliatrice ad acqua, le fibre risultano tagliate lungo

i bordi, quindi con una lunghezza minore. Quello che si è pensato è di andare a valutare ogni nodo se ricade all'interno delle dimensioni dei provini, nel caso in cui questo sia esterno viene etichettato come esterno. Successivamente si passa al controllo di ogni sezione dei beam, se una sezione di un beam ha uno dei due nodi all'esterno del provino non questo viene etichettato e successivamente saltato durante la trascrizione nel file, in modo tale da eliminare la parte esterna al provino.

```

1 %% Controllo eventuali beam esterni
2
3 ControlloNodiBeam = ...
4 (NodiBeam(:,1) < 0 | NodiBeam(:,1) > Hs) | ...
5 (NodiBeam(:,2) < 0 | NodiBeam(:,2) > Ws) | ...
6 (NodiBeam(:,3) < 0 | NodiBeam(:,3) > Ls);
7
8 ControlloBeam = ControlloNodiBeam(Beam(:,1)) == 1 |
   ControlloNodiBeam(Beam(:,2)) == 1;

```

Codice 5.8: Quarta parte del codice legata al controllo dei beam

Sezione di trascrizione del file L'ultima sezione è quella di trascrizione del file .k, questa parte è molto semplice, viene trascritto il file in modo tale da poterlo aprire mediante LS PrePost, viene utilizzata la stessa impostazione del file vista negli esempi 5.1 e 5.2.

```

1 %% Creo il file .k
2
3 file = 'GenerazioneFibre.k';
4 fileID = fopen(file, 'w');
5
6 fprintf(fileID,['$# LS-DYNA Keyword file created by LS-
   PrePost(R) 2025 R1 (v4.12.0) - 01Oct2024\n' ...
7     '$# Created on Mar-23-2025 (11:54:59)\n' ...
8     '*KEYWORD\n' ...
9     '*NODE\n' ...
10    '$#      nid              x              y
   z      tc      rc\n']);
11
12 % Genero i nodi
13 for i = 1:length(NodiBeam(:,1))
14     if ControlloNodiBeam(i) == 0

```

```

15         fprintf(fileID, '%7d %15.5f %15.5f %15.7f 0 0\n', i ,
    NodiBeam(i,1), NodiBeam(i,2), NodiBeam(i,3));
16     end
17 end
18
19 fprintf(fileID, ['*ELEMENT_BEAM\n' ...
20     '$#     eid     pid     n1     n2     n3     rt1
    rr1     rt2     rr2     local\n']);
21
22 for i = 1:length(Beam)
23     if ControllloBeam(i) == 0
24         fprintf(fileID, '%7d %7d %7d %7d 0 0 0 0 0 0\n', i,1,
    Beam(i,1), Beam(i,2));
25     end
26 end
27
28 fprintf(fileID, ['*PART\n' ...
29     '$#                                     title\n' ...
30     '\n' ...
31     '$# pid  secid  mid  eosid  hgid  grav  adpopt  tmid
    \n' ...
32     '      1      0      0      0      0      0      0
    0\n' ...
33     '*END\n']);
34
35 fclose(fileID);

```

Codice 5.9: Quinta parte del codice in cui viene trascritto il file .k da utilizzare con LS PrePost

Creazione di un file .txt con info e codice di creazione della mesh solida

Oltre al file .k viene generato un file .txt dal codice, in questo sono contenuti delle info sul numero di Beam generati, numero di beam eliminati e viene fatto un calcolo sul diametro ottimale da inserire all'interno della simulazione per avere una percentuale di fibre in massa del 50% nel provino, questo aspetto verrà approfondito successivamente. Inoltre viene creato un codice da inserire all'interno del prompt comandi di Ls PrePost che genera la mesh solida del provino usando degli elementi solidi tetragonali, le misure del provino vengono prese direttamente dai dati iniziali.

5.3.4 Risultati del file .k

In figura 5.17 vi è un esempio di provino generato dal codice, i dati iniziali sono quelli del provino 14. I beam in ingresso sono 6000, che con 4 divisioni in totale ho 24000 elementi, dal file di output (vedi 5.10) so che gli elementi beam eliminati sono 13497, più della metà, quelli generati 12847. Questo è dovuto principalmente al fatto che la lunghezza delle fibre utilizzate è relativamente elevata, $L_{beam} = 10\text{mm}$, quindi basta una piccola inclinazione rispetto al piano YZ (vedi la figura 5.17) per far sì che questi elementi escano dal provino e vengano eliminati dal codice durante la trascrizione.

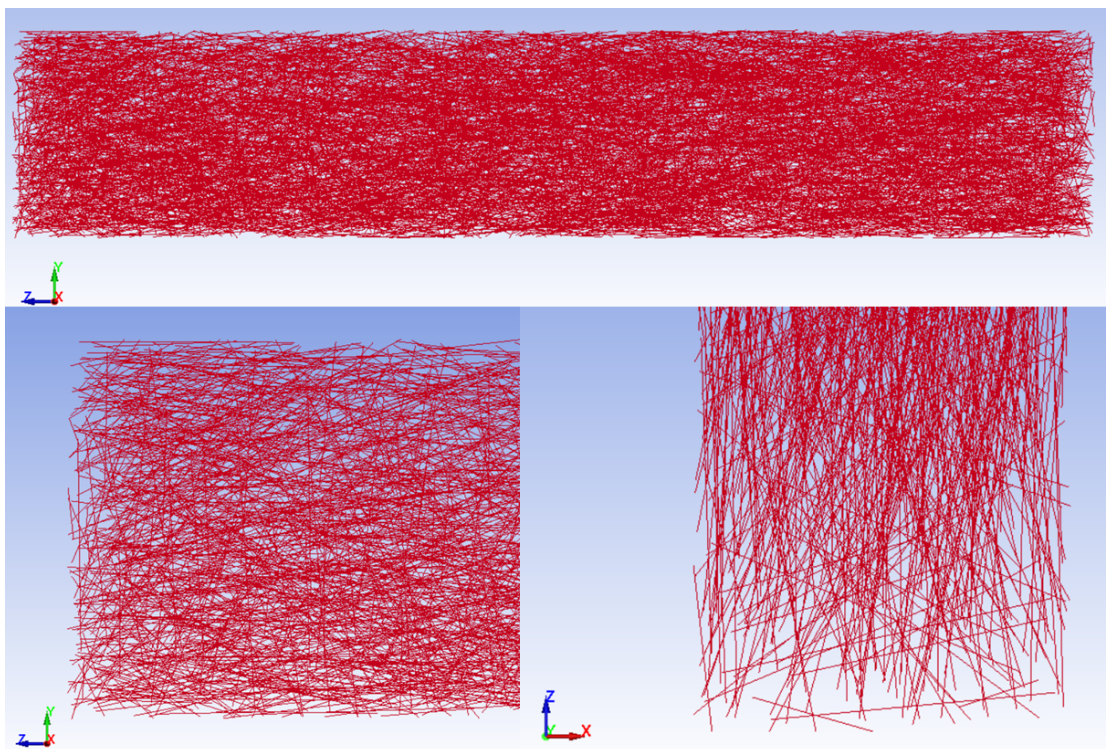


Figura 5.17: Elementi Beam creati dal file .k generato con il codice MATLAB con il provino 14.

Il file di output inoltre produce il codice da inserire nel prompt comandi di LS PrePost per generare la mesh solida del provino, la dimensione della mesh è stata impostata nei parametri iniziali del codice ed è settata ad 1 mm. Nella seconda parte del codice 5.10 viene riportata la sezione da copiare ed incollare.

```
1 Il numero di beam eliminati è pari a: 13497
2 I beam totali generati sono: 12847
```



```
3 Il diametro ottimale dei beam è di: 0.100739 mm
4
5
6
7 genselect target geomobject
8 occfilter clear
9 occfilter add Vertex Edge Face RefPlane RefTrihedron
10 undogeom enter
11 box 0 0 0.0 2.800000e+00 0.0 1.325000e+01 0.0 69
12 undogeom leave
13 genselect target geomobject
14 occfilter clear
15 occfilter add Face Shell Solid
16 genselect whole
17 tetmesh triamesh 1.500 0 0 0 0.001
18 tetmesh mesh 0
19 tetmesh accept 2 0
20 Build Rendering data
21 Build Rendering data
22 partdata modifyaccept 1 "Fibre" 0 0 0 0 0 0 0
23 partdata modifyaccept 2 "Resina" 0 0 0 0 0 0 0
```

Codice 5.10: File di output generato dal codice

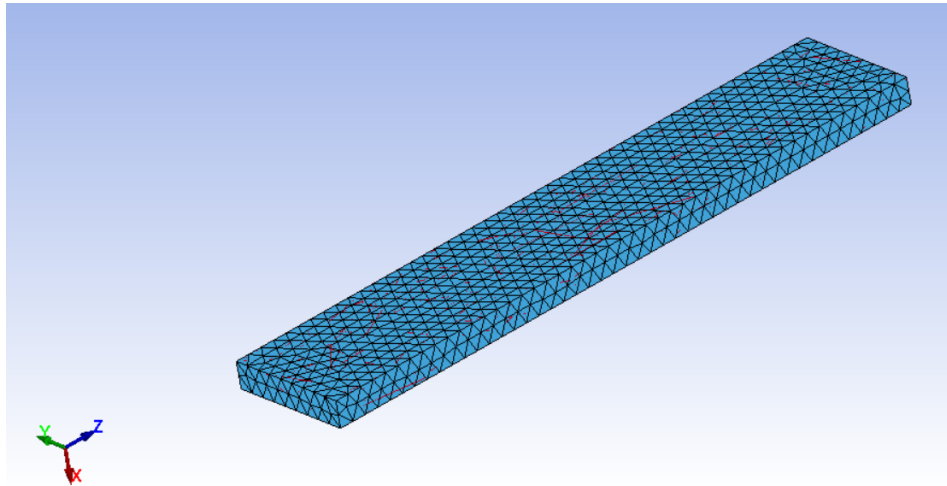


Figura 5.18: Mesh solida con al suo interno i beam visti in figura 5.17

5.4 Impostazione del modello FEM

Il modello è stato sviluppato in modo da riprodurre l'orientamento delle fibre ottenuto dall'analisi tomografica all'interno di LS PrePost, ora bisogna costruire il resto del modello, quindi assegnare tutte le proprietà dei materiali, sezioni e applicare vincoli e carichi. Ls Dyna al suo interno ha centinaia di modelli diversi ognuno con una sua funzione e ottimizzazione verso un tipo di simulazione. La scelta del modello inficia molto poi sulla velocità di calcolo e sulla qualità dei risultati, nel nostro caso avendo molti nodi e quindi matrici di rigidezza molto grandi è ancora più importante scegliere bene la il modello giusto per ottimizzare poi la velocità di calcolo. Le unità di grandezza utilizzate sono il g per la massa, mm per la lunghezza, ms per il tempo, N per la forza e MPa per la tensione.

Carta materiale utilizzata Essendo ancora in una fase iniziale di questo tipo di simulazione si è deciso di utilizzare material card molto semplici, nello specifico *MAT_ELASTIC [37] sia per la fibra di carbonio che per la resina epossidica. Per quanto riguarda la fibra di carbonio la scelta è abbastanza corretta poichè questa si comporta proprio come un materiale elastico in cui ad un certo carico di rottura questa ha una rottura fragile. Per quanto riguarda la resina la scelta è un pò forzata, infatti la caratteristica meccanica della resina è tutt'altro che elastica ma è più vicina a quella di un materiale duttile, vedi figura 5.19.

In prima approssimazione viene considerata anche la matrice come un materiale perfettamente elastico, in futuro verrà fatta una caratterizzazione della resina epossidica e aggiunta alla carta materiali. Per la densità e modulo elastico vengono presi dei valori da catalogo, nel codice 5.11 vengono riportati i valori associati ad ogni sezione della material card.

```

1 *MAT_ELASTIC_TITLE
2 Carbonio
3 $#      mid      ro      e      pr      da      db      not      used
4          1      0.0018  230000.0    0.3      0.0      0.0          0.0
5 *MAT_ELASTIC_TITLE
6 ResinaEpossidica
7 $#      mid      ro      e      pr      da      db      not      used
8          2      0.0012   3400.0    0.3      0.0      0.0          0.0

```

Codice 5.11: Material card utilizzate con i rispettivi valori associati

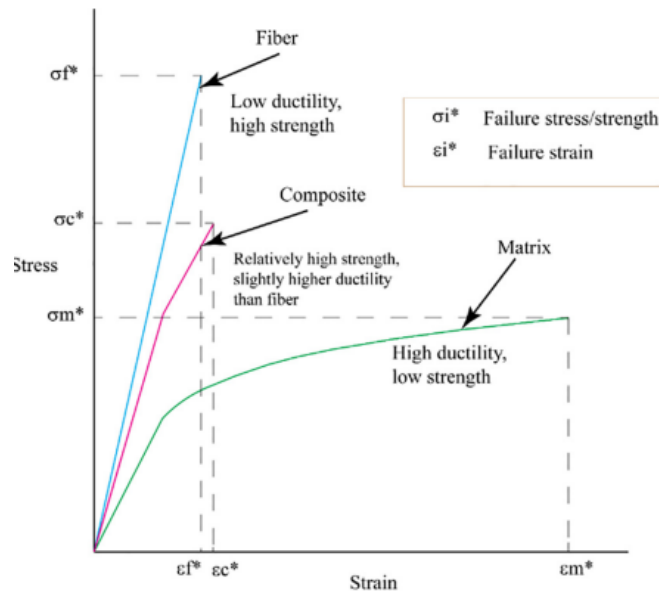


Figura 5.19: Diagramma schematico della curva sforzo-deformazione di un composito a fibre continue allineate sottoposto a carico longitudinale. Sono mostrate anche le curve sforzo-deformazione di una fibra di carbonio con comportamento fragile e di una matrice epossidica con comportamento duttile. [38]

Modelli matematici per gli elementi Per quanto riguarda i modelli degli elementi definiti nel programma section, anche in questo caso sono stati adottati i più semplici disponibili. Per gli elementi beam, la card da personalizzare è quella di *SECTION_BEAM (vedi codice 5.12). All'interno di questa card è necessario specificare innanzitutto il modello matematico da utilizzare; in questo caso, è stato scelto il modello di Hughes-Liu [39], che rappresenta l'opzione più semplice e veloce disponibile in LS-DYNA. Oltre alla scelta della formulazione, occorre indicare il tipo di sezione (cst): *cst* = 0 per sezione rettangolare, *cst* = 1 per sezione circolare. Nel mio caso, la sezione è circolare, pertanto sono stati inseriti il diametro iniziale e finale del beam (*ts1* e *ts2*).

```

1 *SECTION_BEAM_TITLE
2 Fibre
3 $# secid elform shrf qr/irid cst scoor nsm naupd
4      1      1  1.0      2      1  0.0  0.0      0
5 $#      ts1      ts2      tt1      tt2      nsloc      ntloc
6      0.1285  0.1285  0.0      0.0      0.0      0.0
7 *SECTION_SOLID_TITLE

```

```

8 Resina
9 $# secid elform aet unused unused unused cohoff unused
10      2      -1    0                      0

```

Codice 5.12: SECTION utilizzati, la prima è quella dedicata al beam, mentre la seconda è la section dedicata agli elementi tetra della matrice

Per gli elementi *SECTION_SOLID ho scelto il modello con `elform = -1`, che utilizza la formulazione 1-point tetrahedron, la più semplice e veloce disponibile. Questa scelta comporta tuttavia alcune limitazioni: la formulazione consente al massimo un campo di deformazione e, di conseguenza, di tensione costante. Ne risente quindi l'accuratezza del risultato finale, ma si tratta di un compromesso necessario per ottenere simulazioni più rapide. In futuro, verrà valutata l'adozione di una formulazione più accurata per la matrice.

5.5 Coerenza del modello

Per valutare se il modello è coerente con la fisica del problema sono state fatte diverse prove, queste hanno lo scopo di valutare la variazione della rigidezza del provino al variare di alcuni dati in input. Infatti immaginando il provino come una scatola nera, in cui variando alcune proprietà inserite nel file di preparazione, come risultato avrò una variazione della rigidezza del provino. I parametri utilizzati per testare il modello sono:

- **Orientamento delle fibre:** l'orientamento delle fibre influisce sulla rigidezza del provino, infatti creando un modello con un orientamento sfavorevole si dovrebbe notare un calo importante della rigidezza. Per variare l'orientamento delle fibre, al posto di seguire l'orientamento delle fibre dato dalla CT si è utilizzato un vettore di orientamento pre stabilito in partenza, a questo è stata aggiunta una dispersione casuale.
- **Numero di beam presenti all'interno del provino:** aumentando il numero di beam inseriti all'interno del provino la rigidezza scende. Questo parametro è possibile modificarlo nel codice MATLAB.
- **Variazione del diametro dei beam:** aumentando il diametro dei beam del provino la rigidezza dovrebbe aumentare. Questo parametro è possibile modificarlo nei parametri inseriti all'interno del programma LS PrePost nella sezione *SECTION_BEAM durante la creazione del modello.

Il diametro dei beam e il numero di beam generati sono parametri legati tra di loro dalla frazione in massa di fibre all'interno del provino. Data la densità del grafene e della resina epossidica, è possibile risalire alla densità del composito creato, sapendo il volume del provino è possibile risalire anche alla massa del provino finale. Impostando una data frazione in massa di fibre, so il peso delle fibre inserite al suo interno, quindi posso calcolare il volume totale di fibre inserite nel provino. Una volta che so il volume posso calcolare facilmente, sapendo il numero di beam generati e la loro lunghezza, il diametro ideale che devono avere le fibre nel modello, per avere quella data frazione in massa di fibre.

5.5.1 Carichi e vincoli applicati

Per queste prove si è pensato di simulare una prova di trazione sul provino, questo ha dimensioni di 150x25x3 mm. Da un lato vengono vincolati tutti i nodi legati alla mesh solida, limitando la traslazione lungo ogni asse X,Y,Z, le rotazioni non vengono bloccate onde evitare di iper-vincolare l'assieme. Nella faccia opposta invece viene applicato il carico, non come una forza, ma come una curva di spostamento, proprio come avviene in una prova di trazione.

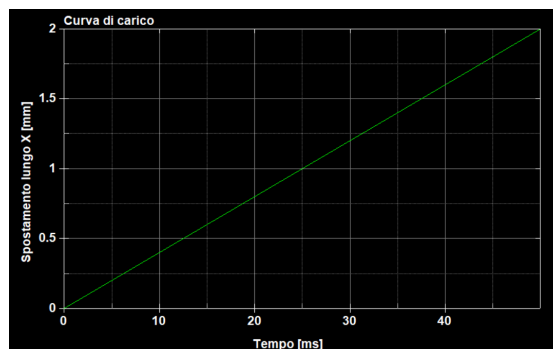


Figura 5.20: Curva di carico per le prove di trazione

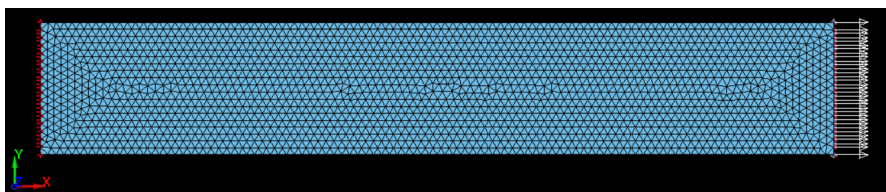


Figura 5.21: Vincoli applicati sul provino

Lo spostamento è applicato lungo l'asse X 5.20, cioè quello principale del provino. Nei nodi in cui viene applicato il carico è stato limitato lo spostamento lungo Y e Z, questo perchè a causa dell'anisotropia del materiale si generano anche spostamento lungo questi assi che in una prova di trazione non ci sono a causa del vincolo dovuto alla macchina di prova. Una cosa importante da specificare è che questi provini sono stati generati mediante una versione più acerba del codice di creazione dei beam, in quella versione i beam che fuoriuscivano dal provino venivano eliminati e ri generati fino a quando non capitavano al suo interno. Questo implica che per orientamenti come [110] quindi con i beam che formano un angolo di 45° con l'asse X, ci sono delle zone vicino gli angoli del provino con pochi beam. Questo non va però ad influire sullo studio di coerenza del modello.

5.5.2 Variazione di orientamento dei beam

Il primo parametro con cui si è giocato è l'orientamento dei beam,

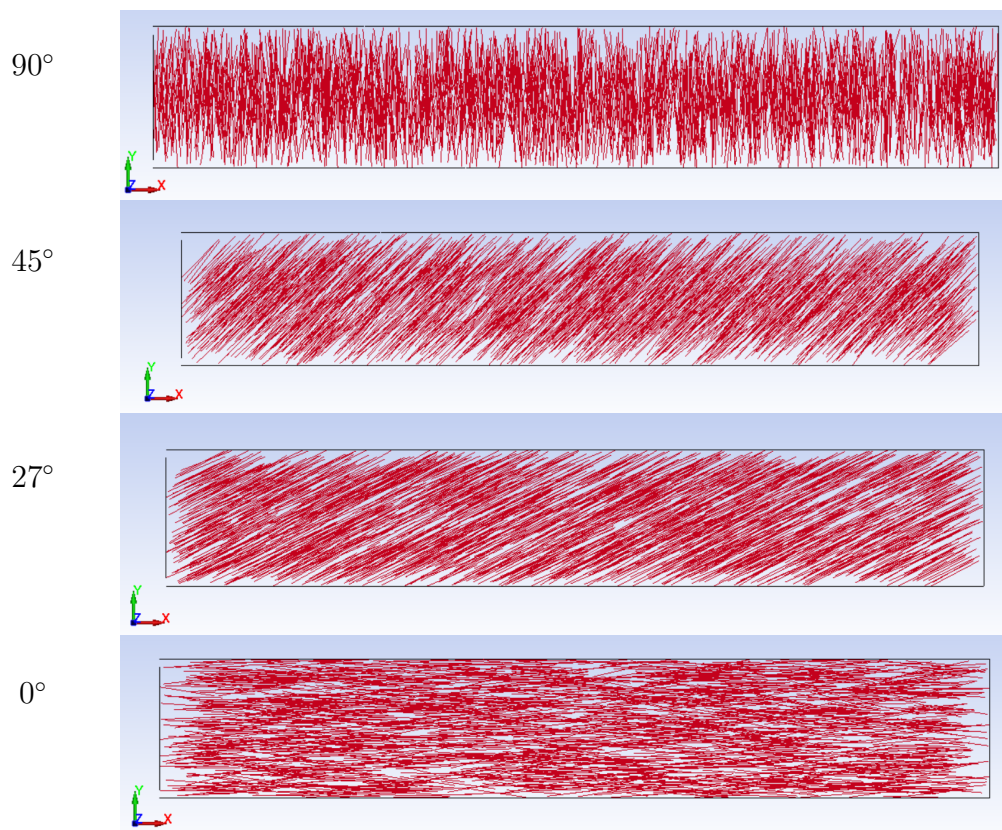


Figura 5.22: Modelli con variazione di orientamento dei beam

questo viene modificato nel file di generazione dei beam, impostando come orientamento di base quello voluto per esempio [110] per avere dei beam orientati con un angolo di 45° rispetto all'asse di carico X, oppure [100] per avere dei beam orientati nella stessa direzione dell'asse di carico. Ad ogni beam poi è stata aggiunta una dispersione casuale. Gli altri parametri non vengono alterati, vengono generati 2000 beam per provino con un diametro di $d = 0.27\text{mm}$. In figura 5.23 vengono riportati i risultati, la forza è stata calcolata utilizzando la forza applicata a tutti i nodi vincolati alla base del provino lungo l'asse X. Lo spostamento invece è quello di un nodo a cui è stata applicata la curva di spostamento, quindi è uno spostamento lineare. Sulla sinistra della figura 5.23 vengono riportate le curve carico spostamento, mentre sulla destra c'è la rigidezza del provino in N/mm al variare dell'angolo delle fibre rispetto all'asse di carico. Viene subito all'occhio, come ci si poteva immaginare, che più le fibre sono allineate verso l'asse di carico più queste irrigidiscono il materiale. Nel grafico di destra si vede come più le fibre sono disallineate con l'asse di carico più queste tendono verso un plateau, cioè verso le caratteristiche meccaniche della resina. Questo comportamento è coerente con quello che ci si poteva aspettare da questo materiale, il modello è quindi suscettibile alle variazioni di orientamento delle fibre.

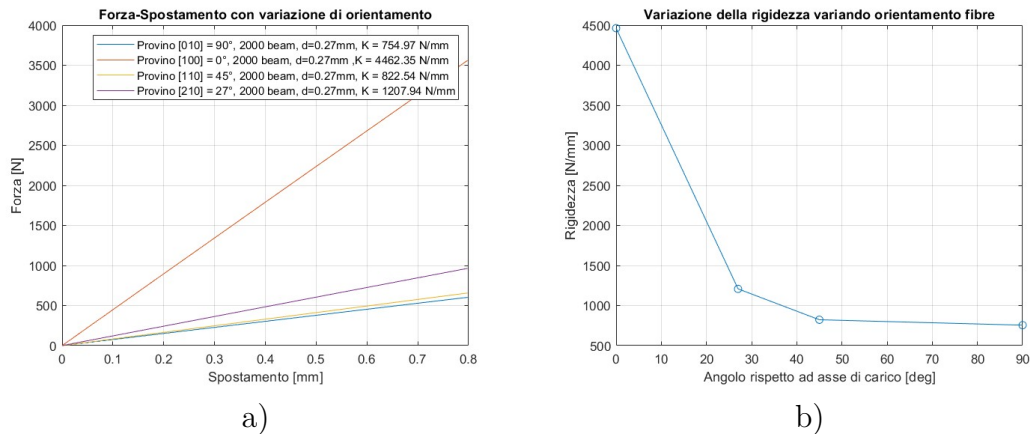


Figura 5.23: Variazione della rigidezza del provino al variare dell'orientamento delle fibre al suo interno. a) viene riportato il grafico forza-spostamento, b) c'è l'andamento della rigidezza al variare dell'angolo delle fibre con l'asse di carico.

5.5.3 Variazione del numero di beam inseriti

Il secondo parametro che viene usato per testare la coerenza del modello è il numero di beam inseriti, qui viene tenuto costante l'orientamento dei beam generati 45° rispetto l'asse di carico, con versore generatore $[110]$, viene tenuta costante anche la mass fraction delle fibre nel provino. Quindi per ogni modello viene ricalcolato il diametro ideale delle fibre per avere una mass fraction costante.

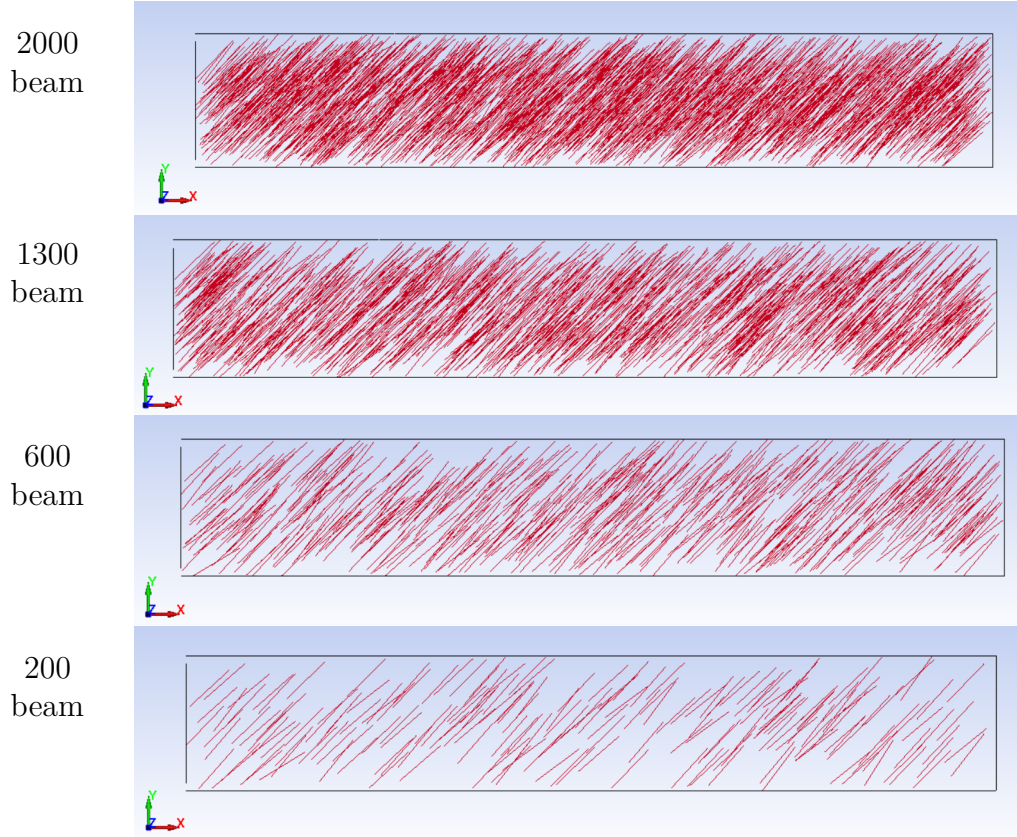


Figura 5.24: Modelli con variazione di orientamento dei beam

Il risultato delle simulazione è quello che si può vedere in figura 5.25, quello che si poteva aspettare è che la rigidezza rimanga più o meno costante nei provini. Le simulazioni infatti confermano questo comportamento, infatti la rigidezza è nell'intorno di $766.86 \pm 55 \frac{N}{mm}$, quindi il modello è in grado di replicare il comportamento della rigidezza alla variazione della mass fraction di fibre e del numero di beam. La variabilità che otteniamo è dovuta al fatto che le fibre essendo in minor numero all'interno del provino aumenta la dis-omogeneità delle proprietà meccaniche portando ad una diminuzione della rigidezza.

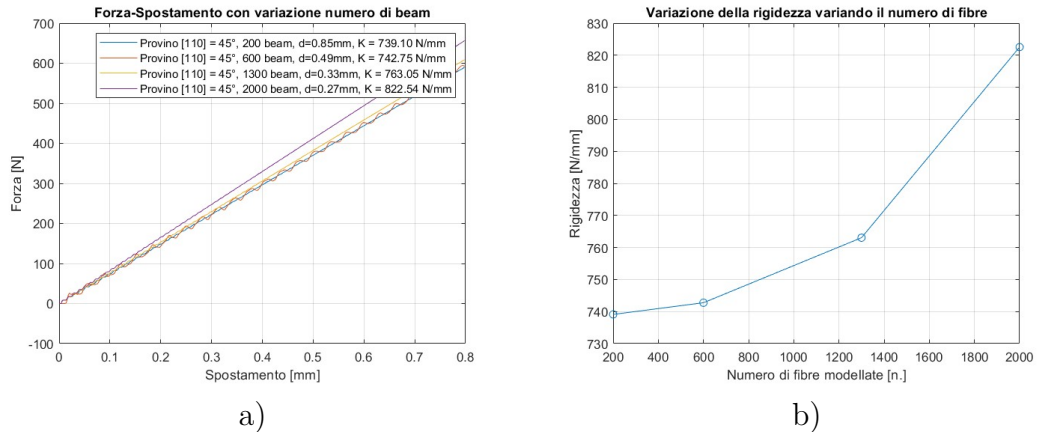


Figura 5.25: Variazione della rigidezza del provino al variare del numero di elementi beam al suo interno. a) viene riportato il grafico forza-spostamento, b) c'è l'andamento della rigidezza al variare del numero di elementi beam generati.

5.5.4 Variazione del diametro dei beam

Come ultimo test c'è la variazione del diametro dei beam, in questo caso l'orientamento dei beam è fissato 45° rispetto l'asse di carico, con versore generatore [110], il numero di beam è anche fissato ed è pari a 2000. Ci si aspetta un aumento della rigidezza con l'aumento del diametro dei beam, che viene confermato dai risultati in figura 5.26.

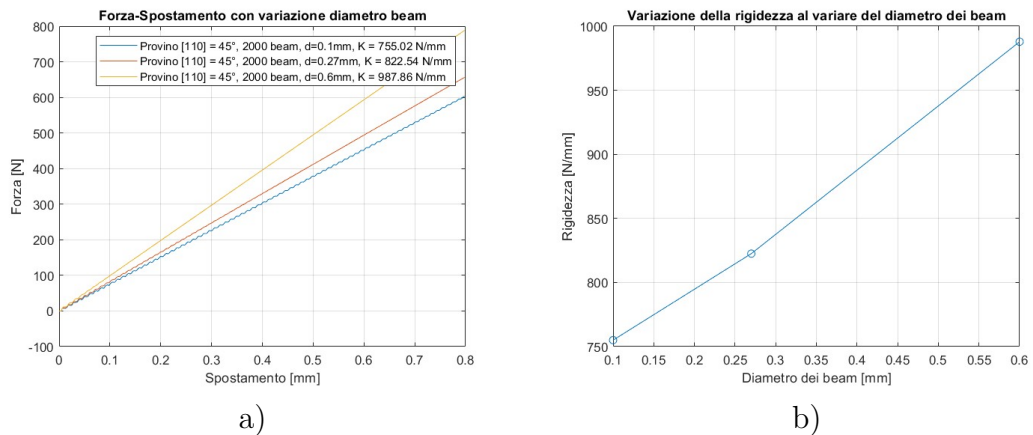


Figura 5.26: Variazione della rigidezza del provino al variare del diametro degli elementi beam. a) viene riportato il grafico forza-spostamento, b) c'è l'andamento della rigidezza al variare del diametro impostato in *mm*.

L'aumento di rigidità è quasi lineare con il diametro come ci si potrebbe aspettare, non è perfettamente lineare poiché in beam non sono orientato perfettamente con la direzione di carico, ci sono quindi effetti di flessione e taglio che non sono lineari con il diametro della sezione. Il modello anche in questo caso è coerente con la fisica del problema. In questo capitolo è stato sviluppato il modello FEM multiscala basato sull'approccio Constrained Beam in Solid, descrivendone la costruzione, i parametri principali e la procedura di implementazione. Sono state analizzate le modalità di accoppiamento tra fibre e matrice, la generazione del tensore di orientamento e le ipotesi alla base dell'algoritmo sviluppato. Questo lavoro ha posto le basi per la validazione del modello, oggetto del capitolo successivo, attraverso il confronto con i dati sperimentali ottenuti sui provini in Carbon Forged.

Capitolo 6

Validazione del modello FEM

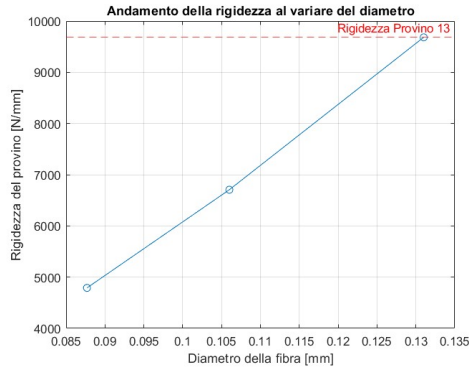
Validata la coerenza del modello, si passa ora alla fase di simulazione dei provini. I provini sono quelli visti nel capitolo 3.3, viene modellata solo la parte ristretta, essendo la zona più sollecitata del provino. Vengono ripresi quindi i risultati delle tomografie CT per ricreare i provini, in ogni provino il numero di beam da generare idealmente è di $N_b = 6000$, la lunghezza delle fibre è pari a $L_b = 10\text{mm}$, il numero di divisioni per beam $Div = 4$. Per la creazione della mesh solida sono stati utilizzati i valori misurati durante le prove sperimentali 3.1, la grandezza della mesh è impostata $Msize = 1.5\text{mm}$.

Provini	Rigidità [N/mm]	Rigidità FEM [N/mm]	Diametro degli elementi beam [mm]
13	9329.54	9681.47	0.131
14	7709.02	7528.16	0.129
21	5389.39	5435.19	0.170
22	7554.90	7408.84	0.148
Medio			0.14
Deviazione			0.0251

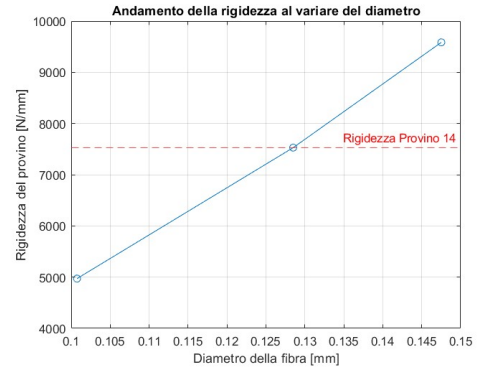
Tabella 6.1: Tabella riassuntiva delle rigidezze N/mm ricavati dalle analisi DIC e dai modelli FEM dei provini, con i rispettivi diametri dei beam utilizzati

La deviazione standard per gli orientamenti dei beam è $\sigma = 0.1$. Le condizioni di carico sono le medesime dei provini usati per testare la validità della simulazione. Un parametro incognita delle simulazioni è il diametro dei beam,

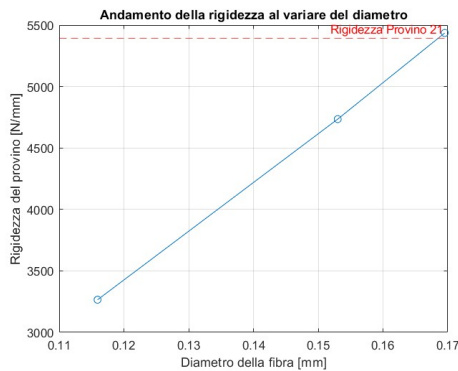
questo viene ricercato andando a fare delle iterazioni sulla rigidezza del provino N/mm . Come diametro iniziale viene utilizzato quello ideale ricavato utilizzando la percentuale in massa del carbonio, questo porta ad una rigidezza spesso inferiore, quindi il diametro viene man mano aumentato fino a raggiungere la rigidezza delle prove di trazione. In figura 6.1 vengono riportate tutte le prove utilizzate per raggiungere il diametro ideale per ogni provino.



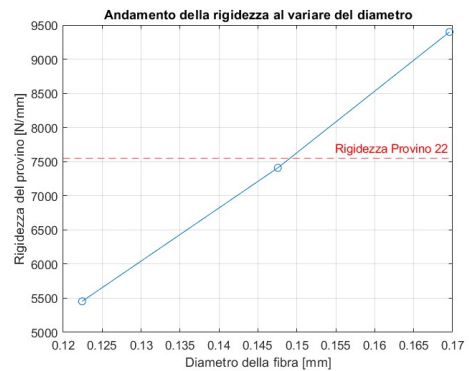
Provino 13



Provino 14



Provino 21



Provino 22

Figura 6.1: Andamento della rigidezza assiale dei provini, al variare del diametro dei beam

6.1 Confronto con la deformazione lungo l'asse del provino

Per valutare la capacità della FEM di cogliere le proprietà meccaniche locali del provino, si valuta la differenza tra la DIC e la FEM nella deformazione in ogni

sezione del provino. Creo delle sezioni di provino lungo l'asse di carico lunghe 5 mm , e ne medio le deformazioni ottenute al loro interno. Nella FEM per ottenere le deformazioni, utilizzo lo strumento "hystory" di Ls PrePost, che mi permette di valutare la deformazione ottenuta all'interno di ogni elemento selezionato. Data la formulazione 1-node tetrahedron degli elementi utilizzati il campo di deformazione al loro interno è al massimo costante, quindi non ho bisogno di mediare o prendere valori massimi/minimi. Vado a selezionare tutti gli elementi all'interno di una fascia di 5 mm , che sono distanti al massimo 1.4 mm dalla superficie che corrisponde a quelle dove si misurano le deformazioni con le analisi DIC, vedi figura 6.2.

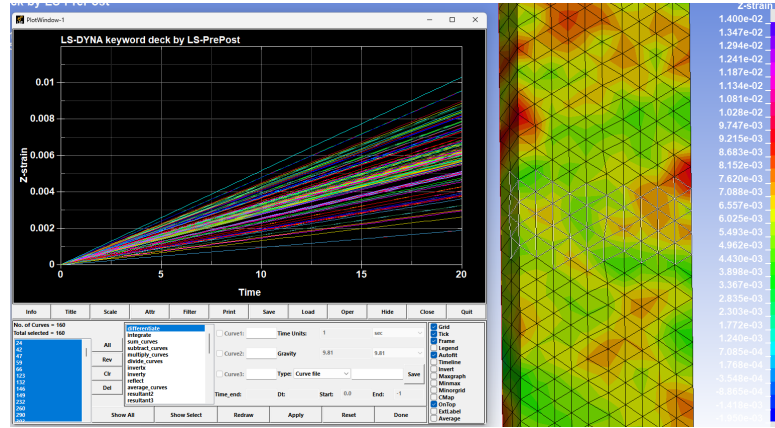


Figura 6.2: Plot della deformazione ε_{yy} lungo l'asse di carico nel tempo per ogni elemento superficiale di una sezione.

Come si può vedere nei grafici seguenti 6.3, 6.4, 6.5 e 6.6, le deformazioni in termini assoluti non corrispondono, ci sono delle differenze sia tra i picchi che nei valori medi. Questo comportamento è da associare a più fattori:

1. Le deformazioni ricavate dalla FEM, sono state ricavate utilizzando il comando "hystory" dagli elementi solidi, il valore non viene mediato tra con gli elementi beam. Al contrario i valori ricavati dalla DIC analizzano tutta la superficie del provino, comprendendo quindi sia fibre che resina.
2. La formulazione degli elementi utilizzati, permette un campo delle deformazioni al massimo costante, quindi la deformazione ricavata è mediata all'interno dell'elemento. E' difficile quindi riuscire a imitare quei picchi che si ottengono nei risultati della DIC.

E' però interessante notare che l'andamento viene imitato bene dal modello FEM, infatti nel provino 21, per esempio 6.5, nella sezione con punto medio $Y = 46.5\text{ mm}$,

sia nelle analisi dic, che nelle analisi FEM, vi è un picco di deformazione. Ci sono altri due picchi di deformazione $Y = 26.5 \text{ mm}$ e $Y = 36.5 \text{ mm}$, che vengono replicati dal modello FEM. Non solo nel provino 21, anche nel provino 6.6, i picchi ad $Y = 52 \text{ mm}$ e $Y = 27 \text{ mm}$ vengono replicati dal modello FEM.

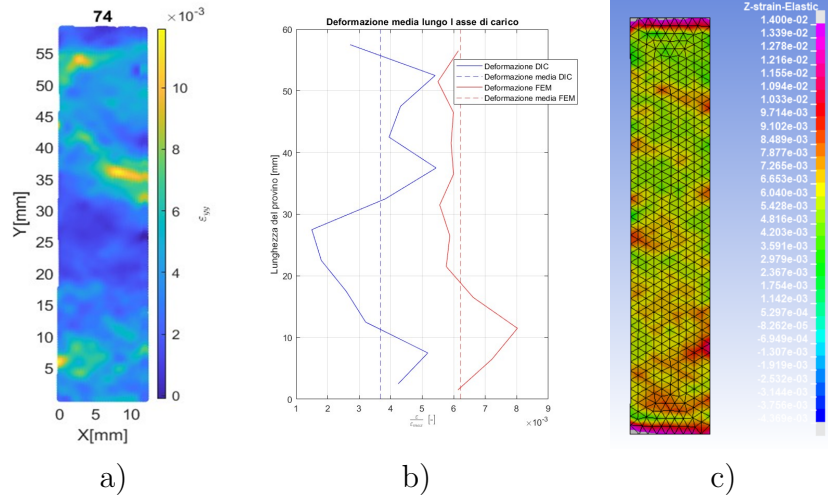


Figura 6.3: Provino 13. a) Deformazione ε_{yy} ottenuta dalla scansione DIC, b) Variazione della rigidezza lungo l'asse y ricavata dalla DIC, c) Deformazione ε_{yy} ottenuta dalla FEM

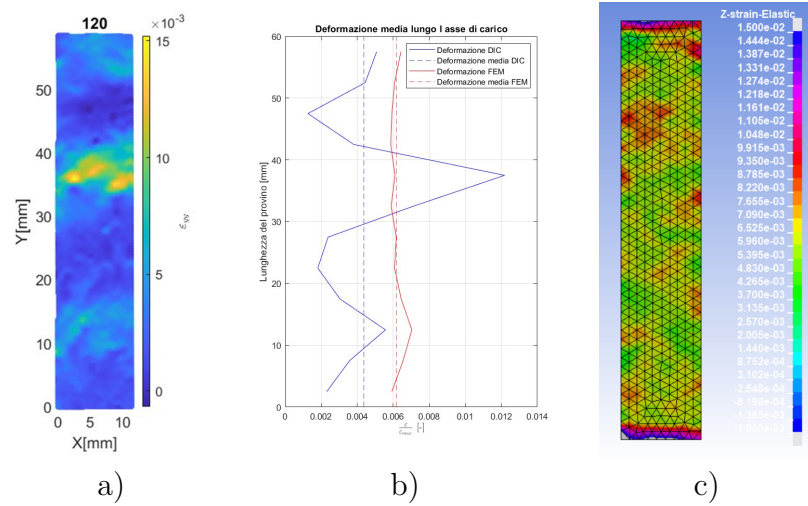


Figura 6.4: Provino 14. a) Deformazione ε_{yy} ottenuta dalla scansione DIC, b) Variazione della rigidezza lungo l'asse y ricavata dalla DIC, c) Deformazione ε_{yy} ottenuta dalla FEM

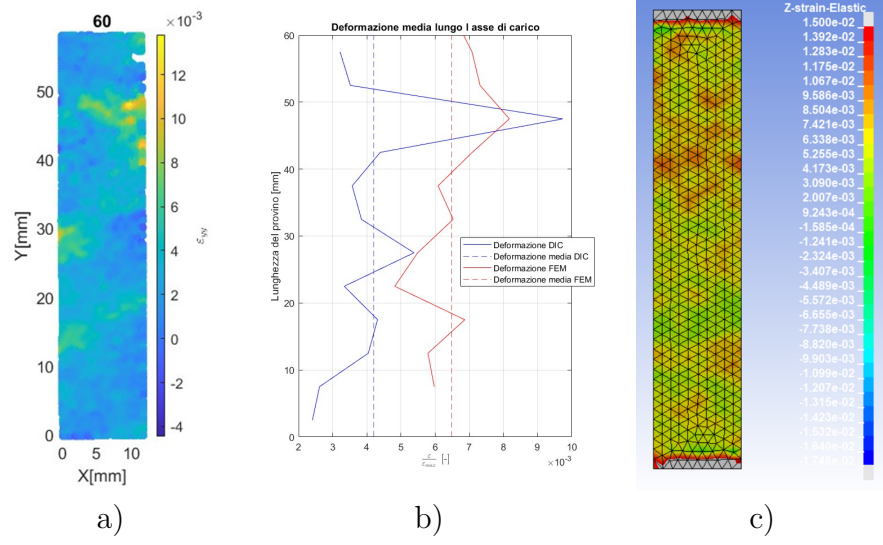


Figura 6.5: Provino 21. a) Deformazione ε_{yy} ottenuta dalla scansione DIC, b) Variazione della rigidità lungo l'asse y ricavata dalla DIC, c) Deformazione ε_{yy} ottenuta dalla FEM

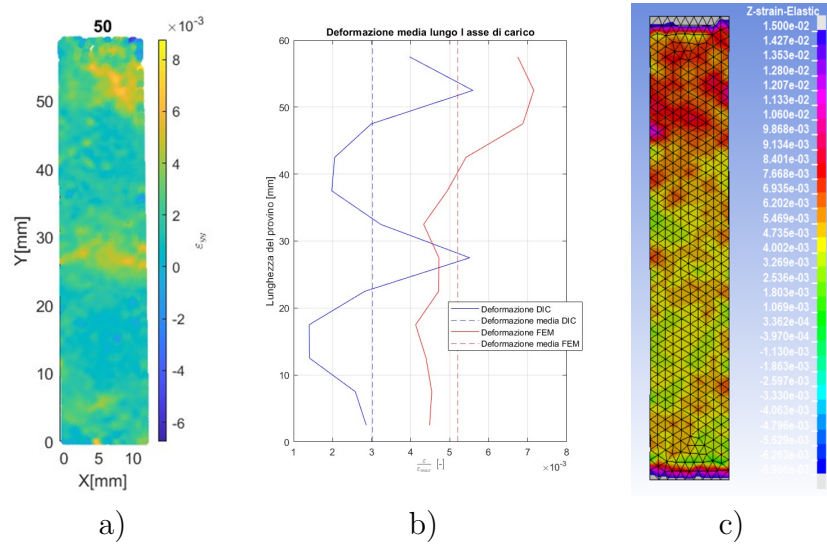


Figura 6.6: Provino 22. a) Deformazione ε_{yy} ottenuta dalla scansione DIC, b) Variazione della rigidità lungo l'asse y ricavata dalla DIC, c) Deformazione ε_{yy} ottenuta dalla FEM

6.2 Tensioni assiali all'interno dei beam

Uno dei principali motivi per cui è stato adottato il metodo FEM basato sul comando *CONSTRAINED_BEAM_IN_SOLID è la possibilità non solo di prevedere la rigidità di un componente realizzato in SMC/Carbon Forged, ma anche di identificare il punto di rottura. La localizzazione della rottura dipende infatti dal punto in cui le fibre iniziano a spezzarsi, fenomeno che causa un brusco aumento delle tensioni e una rapida propagazione delle cricche. Per questo motivo si analizzano le tensioni assiali nei beam, considerando che il carico di rottura del grafene è pari a $R_m = 2067, \text{MPa}$ 6.7.

Typical Properties of Fibers (SI System of Units)		
Property	Units	Graphite
Axial modulus	GPa	230
Transverse modulus	GPa	22
Axial Poisson's ratio	—	0.30
Transverse Poisson's ratio	—	0.35
Axial shear modulus	GPa	22
Axial coefficient of thermal expansion	$\mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$	-1.3
Transverse coefficient of thermal expansion	$\mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$	7.0
Axial tensile strength	MPa	2067
Axial compressive strength	MPa	1999
Transverse tensile strength	MPa	77
Transverse compressive strength	MPa	42
Shear strength	MPa	36
Specific gravity	—	1.8

Figura 6.7: Proprietà meccaniche della grafite.[2]

L'analisi viene quindi condotta confrontando le tensioni assiali nei beam del modello con le zone di effettiva rottura osservate nei provini. Se in alcune fibre lo stress supera il valore di rottura del grafene, il modello è in grado di prevedere la posizione del cedimento. Le figure 6.8, 6.9, 6.10 e 6.11 mostrano le tensioni assiali dei beam nelle regioni maggiormente sollecitate. In ciascuna figura, il riquadro a) riporta il frame acquisito con DIC subito dopo il cedimento del provino, dove è chiaramente visibile la linea di frattura. Nel provino 14 (figura 6.9), la zona di frattura coincide con l'area di massimo stress. Il grafico in figura c), ottenuto dagli stress assiali dei beam nella corrispondente zona del modello FEM, mostra che un elemento supera la tensione di $R_m = 2000, \text{MPa}$. In presenza di un modello di danneggiamento, tale beam verrebbe eliminato, causando una riduzione locale di rigidità e l'innescio di una rapida sequenza di cedimenti nei beam circostanti, fino al collasso finale del provino. Nel provino 13 (figura 6.11), invece, la frattura sperimentale non coincide con la zona più sollecitata del modello. Questo comportamento può essere spiegato dalla presenza di difetti localizzati che accelerano la propagazione delle cricche. Le tomografie 3.7 mostrano infatti che

il materiale carbon forged prodotto contiene porosità interne anche di dimensioni significative. Questi difetti generano concentrazioni di tensione in condizioni di forte stato triassiale, favorendo la nucleazione e la crescita di cricche. Tali aspetti non sono attualmente inclusi nel modello FEM: nella regione dove si osserva la frattura reale i beam non raggiungono lo stress di rottura, che viene invece superato nella zona più sollecitata del modello. Nel provino 13 (figura 6.8), infine, i beam nella zona di frattura sperimentale raggiungono effettivamente lo stress assiale di rottura del grafene, ma nel modello FEM lo stesso limite viene superato in un'area più sollecitata già in fase precedente.

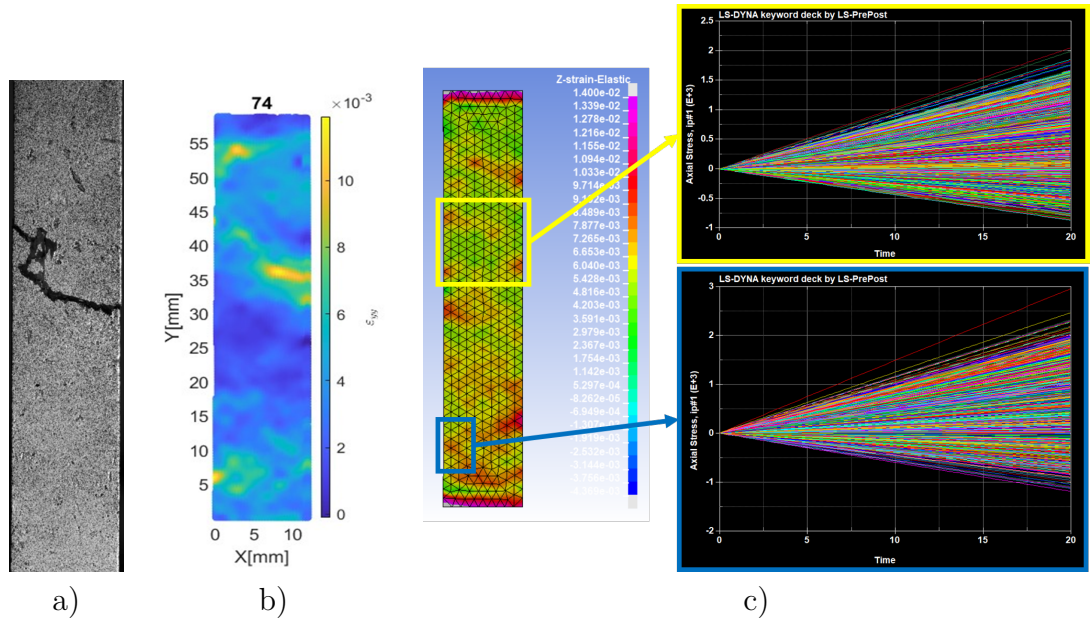


Figura 6.8: Provino 13: a) Frame acquisito dal sistema DIC della rottura del provino, b) Deformazioni lungo l'asse di carico ricavate dalle analisi DIC ϵ_{yy} , c) Stress assiali dei beam all'interno delle zone più sollecitate del modello FEM.

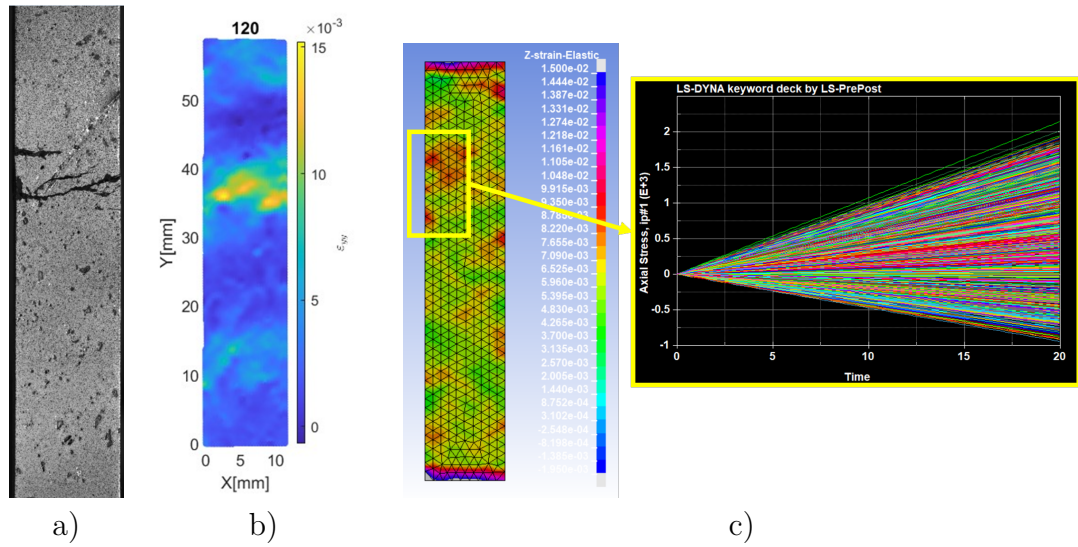


Figura 6.9: Provino 14: a) Frame acquisito dal sistema DIC della rottura del provino, b) Deformazioni lungo l'asse di carico ricavate dalle analisi DIC ε_{yy} , c) Stress assiali dei beam all'interno delle zone più sollecitate del modello FEM.

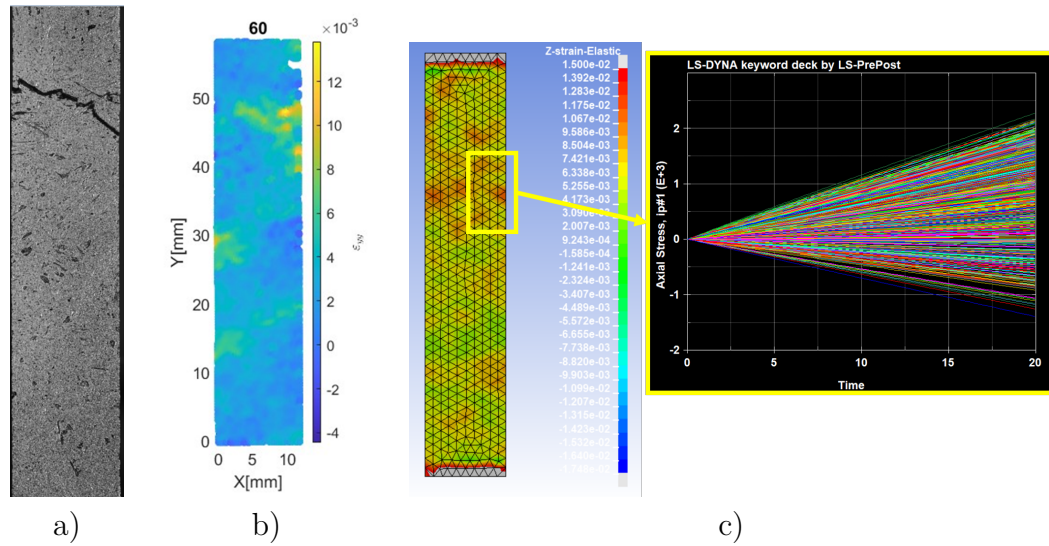


Figura 6.10: Provino 21: a) Frame acquisito dal sistema DIC della rottura del provino, b) Deformazioni lungo l'asse di carico ricavate dalle analisi DIC ε_{yy} , c) Stress assiali dei beam all'interno delle zone più sollecitate del modello FEM.

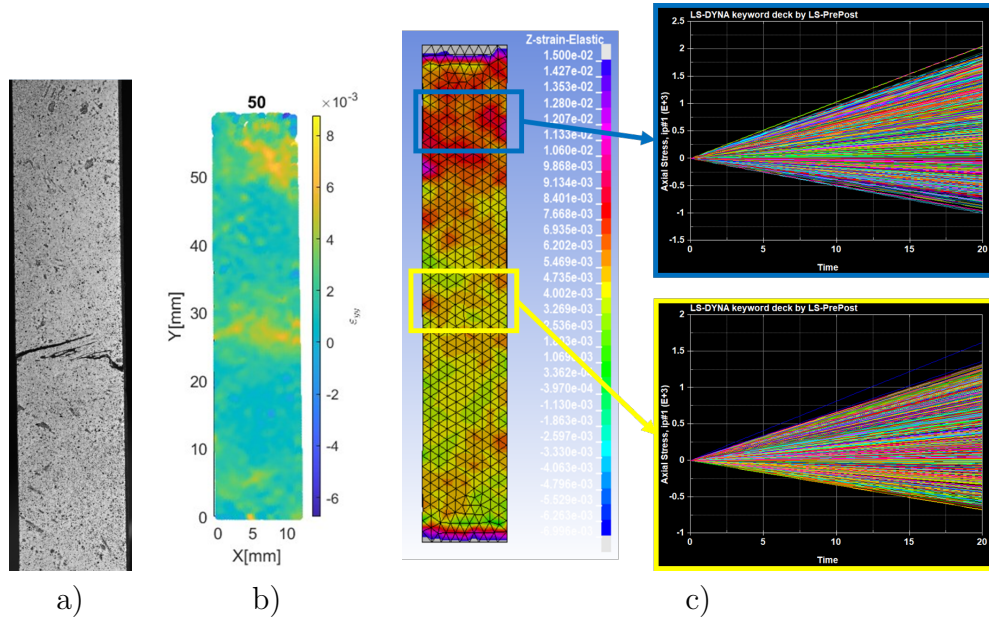


Figura 6.11: Provino 22: a) Frame acquisito dal sistema DIC della rottura del provino, b) Deformazioni lungo l’asse di carico ricavate dalle analisi DIC ε_{yy} , c) Stress assiali dei beam all’interno delle zone più sollecitate del modello FEM.

6.3 Eventuali migliorie al modello

Il modello analizzato è in grado di riprodurre con buona accuratezza il comportamento meccanico del provino. Dal punto di vista della rigidità globale, i risultati coincidono con l’andamento sperimentale e il modello riesce a cogliere anche le variazioni locali di rigidità. Inoltre, come mostrato nel paragrafo precedente, esso consente di localizzare il punto di rottura attraverso lo stress assiale all’interno dei beam. Sono tuttavia presenti alcune limitazioni. Nella fase attuale, il modello per gli elementi solidi non garantisce elevata precisione nella previsione dei picchi di deformazione. Questo aspetto potrebbe essere mitigato con una mesh più fitta: assumendo un campo di deformazione costante in ogni elemento, l’aumento del numero di elementi permetterebbe di riprodurre variazioni locali di deformazione più marcate. Un ulteriore miglioramento potrebbe essere ottenuto introducendo un modello di danneggiamento, inizialmente applicato ai beam. Nei materiali compositi, infatti, la rottura inizia tipicamente nelle fibre. In questo modo, quando lo stress assiale raggiunge il carico di rottura del grafene ($R_m = 2067, \text{MPa}$), l’elemento beam viene rimosso, consentendo di ottenere un modello in grado di predire anche le variazioni di rigidità durante una prova di trazione.

Capitolo 7

Progettazione della bielletta in Carbon Forged

Il fine di questa tesi è la progettazione e produzione di una bielletta in materiale SMC, destinata ad essere integrata nell'assieme di un gruppo sospensivo. La bielletta ha la funzione di collegare l'active damper allo smorzatore del sistema mediante un cinematisma biella-manovella. In figura 7.1 è riportato l'assieme sospensivo di un'Alfa Romeo Stelvio; in blu sono evidenziate le parti relative all'active damper. Questo è costituito da un motore brushless, il cui numero di giri viene ridotto in modo significativo attraverso un sistema di due ruote dentate epicicloidali disposte in serie, con rapporto di riduzione complessivo pari a 74.3. L'integrazione del cinematisma all'interno dello schema sospensivo risulta particolarmente complessa a causa degli spazi ridotti disponibili, motivo per cui si è optato per la configurazione riportata in figura 7.2, in cui la lunghezza della biella risulta pari a 255.3 mm. Dal punto di vista cinematico, considerando una coppia massima erogata dal motore di 6.8 Nm, una manovella di 143 mm e un angolo tra il piano della manovella e la bielletta di 6.36° , si ottiene una forza statica massima di circa 3.6 kN lungo l'asse della bielletta. Questo valore è stato confermato anche tramite simulazioni condotte con il software Adams sul gruppo sospensivo. Tuttavia, ai fini della verifica strutturale, la bielletta verrà dimensionata assumendo un carico assiale massimo di progetto pari a $F_{a,max} = 8$ kN, in modo da garantire un adeguato margine di sicurezza.

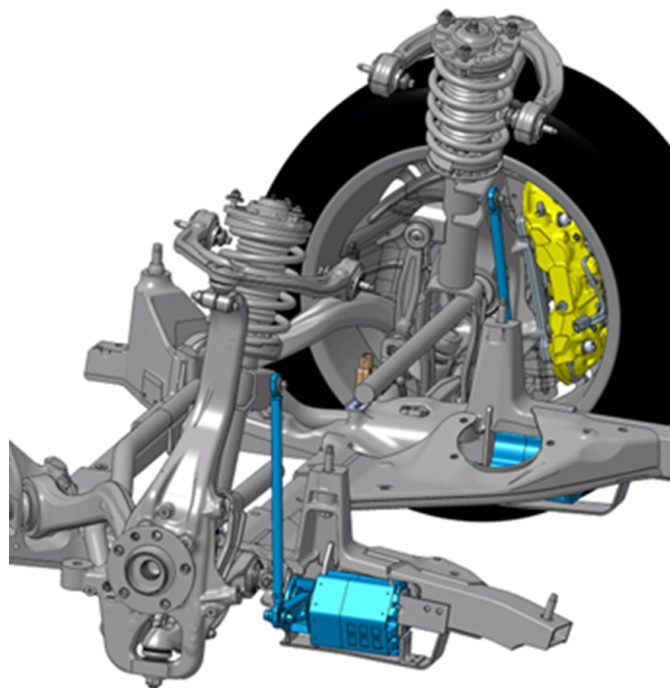


Figura 7.1: Assieme del gruppo sospensivo di una Alfa Romeo Stelvio, in blu c'è l'assieme dell'active dumper, questo è collegato attraverso una manovella ed una biella allo smorzatore.

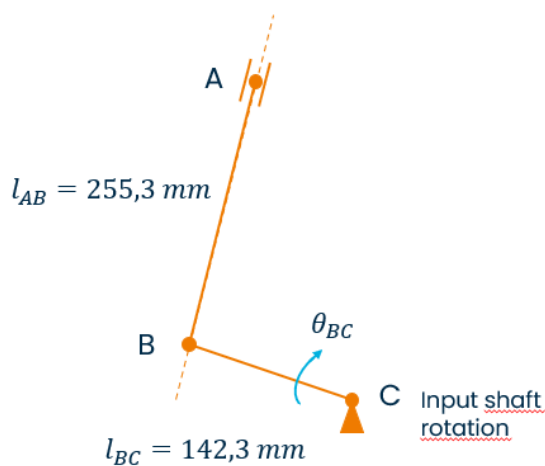


Figura 7.2: Modello cinematico del meccasmo biella manovella

7.1 Inserti per l'accoppiamento con il gruppo sospensivo

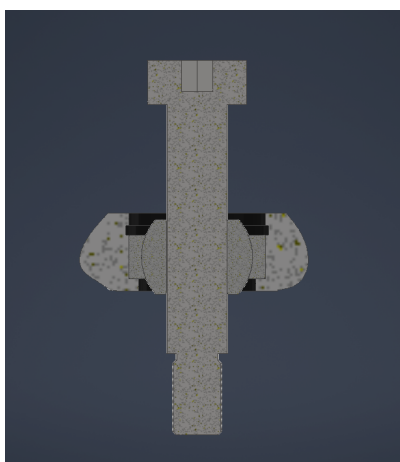
Gli accoppiamenti tra la manovella e lo smorzatore richiedono l'utilizzo di giunti sferici per permettere il corretto movimento del cinematismo. Sul mercato ci sono diverse soluzioni per realizzare questo tipo di accoppiamenti, le più comuni in automotive sono i giunti a sfera come quelli in figura 7.3. Questi sono molto affidabili, ed offrono una buona copertura dagli agenti esterni grazie alla cuffia in silicone posta sulla sfera. Queste però sono pesanti e poco personalizzabili per quanto riguarda la geometria. Per l'accoppiamento con il resto della bielletta viene richiesto un collegamento filettato, sull'asse principale della biella. Il collegamento filettato deve essere fatto utilizzando un inserto in materiale metallico e poi inserito nello stampo durante il processo, in modo da bloccarlo all'interno della geometria. Questo però fa sì che la maggior parte della bielletta sia prodotta in materiale metallico, con conseguente aumento di peso.



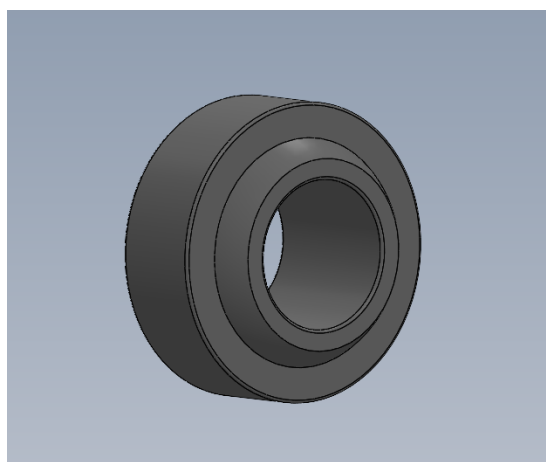
Figura 7.3: Giunto sferico

Al posto di questi snodi a sfera, viene valutata una configurazione meno usuale, cioè l'utilizzo di un giunto composto da uno snodo sferico radiale prodotta dalla SKF, al cui va inserita al suo interno una vite calibrata per l'accoppiamento con i due estremi, quindi manovella e attacco smorzatore. In figura 7.4 vi è un esempio di assieme di montaggio dello giunto, lo snodo sferico viene inserito all'interno di una sede appositamente preparata secondo tolleranze consigliate dal produttore, da un

lato viene bloccata da uno spallamento, mentre dall'altro con un Seeger. Per questo tipo di accoppiamento vengono richiesti dei Seeger particolari chiamati, Seeger JV, questi hanno una dimensione ridotta e permettono la completa oscillazione della sfera interno dello snodo. All'interno della sfera viene inserita una calibrata della dimensione del foro, questa si trova sul mercato in varie misure e lunghezze e possono essere realizzate anche personalizzate in base alle esigenze. Questo giunto permette grandi oscillazioni tra le due parti, si arriva a 16° , in più permette una forte personalizzazione e un design molto compatto e leggero.



Assieme del giunto sferico



Snodo sferico radiale



Seeger JV



Vite calibrata

Figura 7.4: Assieme del giunto sferico con i vari componenti utilizzati.

Per l'accoppiamento tra lo snodo sferico radiale e la bielletta in SMC, verranno utilizzati degli inserti, questi vengono prima lavorati in modo tale da rispettare le

dimensioni e le tolleranze richieste da SKF per l'alloggio dello snodo. Successivamente gli inserti verranno inseriti all'interno dello stampo e co-laminati insieme al componente finale. Per la geometria mi sono ispirato all'inserto realizzato da Martulli L., Creemers T. per un componente realizzato in SMC in figura 7.5, [7].

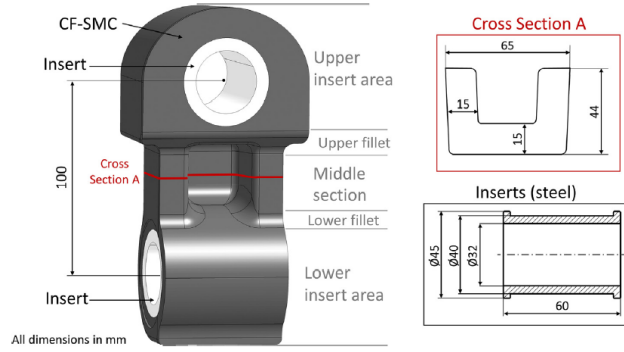


Figura 7.5: Inserto realizzato per un componente in SMC da Martulli L., Creemers T.. [40]

Questo è dotato di due flange esterne in modo tale da assicurare meglio l'inserto in materiale metallico alla parte in SMC.

7.1.1 Dimensionamento dello snodo sferico radiale

Per quanto riguarda il dimensionamento dei componenti, l'elemento più critico è lo snodo sferico. Esso viene verificato in condizioni statiche assumendo un carico radiale massimo pari a $F_r = 8$ kN. A fini cautelativi si considera anche un carico assiale pari al 25% del carico radiale, ovvero $F_a = 2$ kN. La procedura di dimensionamento adottata è quella indicata nel catalogo SKF [41]. Stabiliti i carichi applicati, si calcola il carico dinamico equivalente secondo la relazione:

$$P = yF_r$$

dove P rappresenta il carico dinamico equivalente e y è un fattore che dipende dal tipo di snodo e dal rapporto F_a/F_r . Affinché la verifica sia soddisfatta, il valore di P deve risultare inferiore al carico dinamico massimo riportato dal produttore. A seguito di diverse iterazioni è stato selezionato lo snodo sferico GEH 15 C. Questo modello presenta un foro interno di 15 mm, un diametro esterno dell'anello pari a 30 mm e una massa di 47.8 g. È inoltre classificato come “esente da manutenzione”, definizione che indica l'assenza della necessità di lubrificazione periodica, pur non escludendo interventi di manutenzione regolare.



Figura 7.6: Snodo GEH 15 C

Per la verifica statica è necessario determinare il fattore di carico y . Con un rapporto $F_a/F_r = 0.25$, dal grafico in figura 7.7 si ricava, lungo la curva rossa, un valore di $y = 2.41$. Ne consegue che il carico dinamico equivalente risulta pari a:

$$P = 2.41 \times 8 \text{ kN} = 19.3 \text{ kN}$$

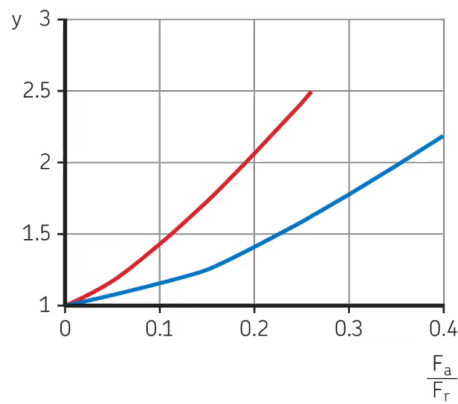


Figura 7.7: Fattore y per snodi sferici radiali esenti da manutenzione, la curva rossa è quella che fa riferimento al cuscinetto scelto. [41]

Il carico dinamico limite per lo snodo GEH 15 C è $C = 22.4 \text{ kN}$. Il coefficiente di sicurezza risulta quindi:

$$CS = \frac{C}{P} = \frac{22.4 \text{ kN}}{19.3 \text{ kN}} = 1.16$$

Sebbene il valore possa apparire ridotto, occorre osservare che il carico radiale considerato è superiore di oltre due volte rispetto a quello effettivamente applicato dall'active damper e che è stato assunto un carico assiale di entità significativa. Ne consegue che il margine di sicurezza adottato può essere considerato adeguato e conservativo.

7.1.2 Progettazione dell'inserto

Una volta selezionato lo snodo sferico radiale, si procede con la progettazione dell'inserto. Quest'ultimo deve rispettare le dimensioni fornite dal produttore SKF. In figura 7.8 sono riportate le principali quote relative allo spallamento, il cui diametro deve rientrare nell'intervallo $D_a = 23.7\text{--}28.5\text{ mm}$.

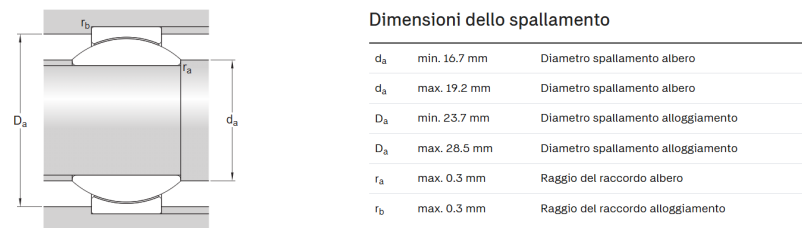


Figura 7.8: Dimensioni dello spallamento per uno snodo sferico radiale GEH 15 C. [42]

Sul lato opposto dello snodo è invece presente la cava per il seeger JV, anch'essa soggetta a standard dimensionali. In figura 7.9 sono riportate le misure relative a un foro di 30 mm.

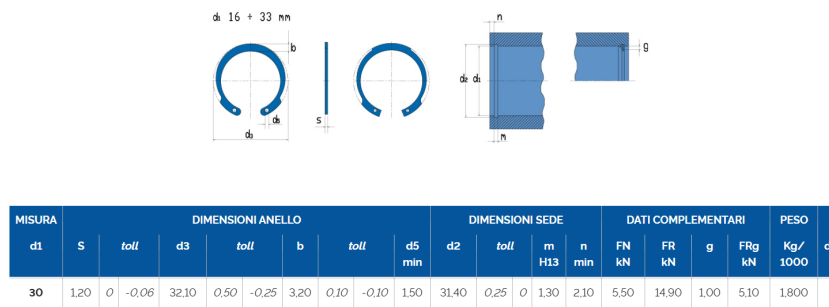


Figura 7.9: Dimensioni Cava Seeger JV, per un foro da 30mm. [43]

La tavola dell'inserto è mostrata in figura 7.10. Per la sua realizzazione è stato scelto l'acciaio, principalmente per motivi legati all'usura. Gli snodi sferici, infatti, devono essere sostituiti periodicamente e operano con tolleranze ristrette; un inserto in alluminio perderebbe rapidamente le caratteristiche necessarie per l'accoppiamento. Inoltre, considerato il ridotto volume del componente, il risparmio di peso tra acciaio e alluminio risulterebbe trascurabile. La lega selezionata è il C45: trattandosi di una fase sperimentale, non si è ritenuto necessario ricorrere a materiali più pregiati.

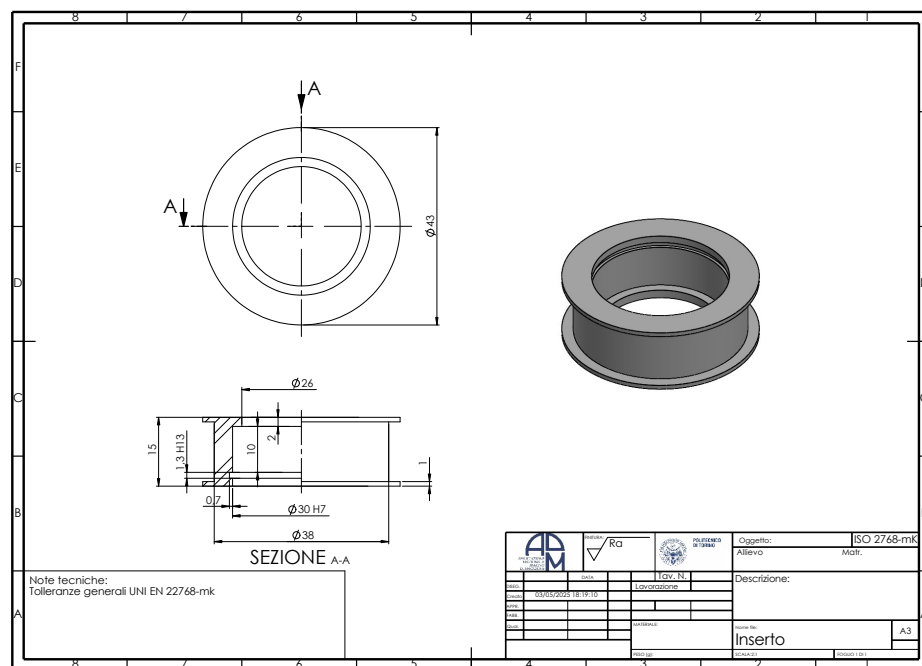


Figura 7.10: Tavola inserto per l'alloggio dello snodo sferico radiale.

7.2 Realizzazione di un prototipo di bielletta

Al fine di testare le proprietà meccaniche e l'andamento della resistenza di un componente finale, è stato realizzato un prototipo di bielletta in scala ridotta. La geometria del prototipo rappresenta anche un test di fattibilità: nel caso del carbon forged a fibre lunghe, infatti, in zone con spazi ristretti o con forti variazioni di

sezione, il rinforzo potrebbe non seguire le curvature, lasciando aree ricche di sola resina. Sulla base dei risultati delle prove meccaniche 3.2, la tensione di rottura media minima dei provini è pari a 76.11 MPa. Considerando il carico assiale massimo a cui è sottoposta la biella, $F_a = 8$ kN, la sezione minima resistente necessaria risulta pari a $105.11, mm^2$. Questa è stata adottata come sezione minima nella zona ristretta della bielletta. Poiché la lunghezza del componente è significativa (255 mm) e il carico è prevalentemente assiale, è stato necessario considerare anche il rischio di instabilità per carico di punta. Per questo motivo, nella parte lunga della bielletta è stato adottato un profilo a H, in grado di massimizzare l'inerzia flessionale e, al contempo, ridurre il peso finale. In figura 7.11 è riportato il disegno del prototipo; la lunghezza dal centro di rotazione dello snodo al fondo della biella è pari a 140 mm.

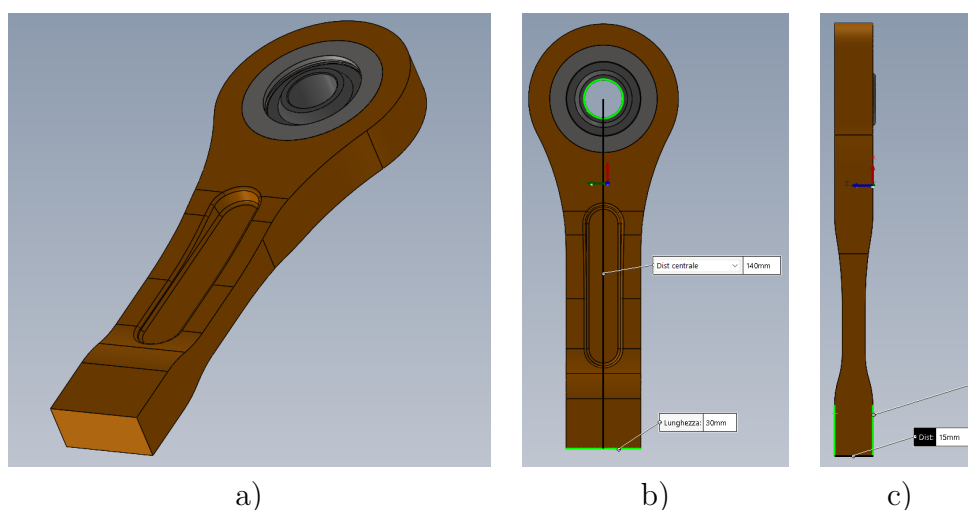


Figura 7.11: Prototipo di bielletta: a) vista isometrica, b) vista frontale, c) vista laterale

La sezione ridotta è stata dimensionata considerando un coefficiente di sicurezza sul carico massimo applicato alla biella pari a $CS = 2$. L'area resistente adottata è quindi pari a $215.64, mm^2$, poco più del doppio dell'area minima necessaria. Questa sezione si estende per $20, mm$ e ci si attende che la rottura del provino avvenga proprio in tale zona.

Per gli afferraggi durante la prova di trazione è previsto l'utilizzo dei morsetti standard della macchina di prova. Nella zona inferiore il campione presenta dimensioni pari a $15, mm \times 30, mm$. Nella parte superiore, invece, il prototipo è stato adattato per accogliere un sistema di afferraggio costituito da un cilindro

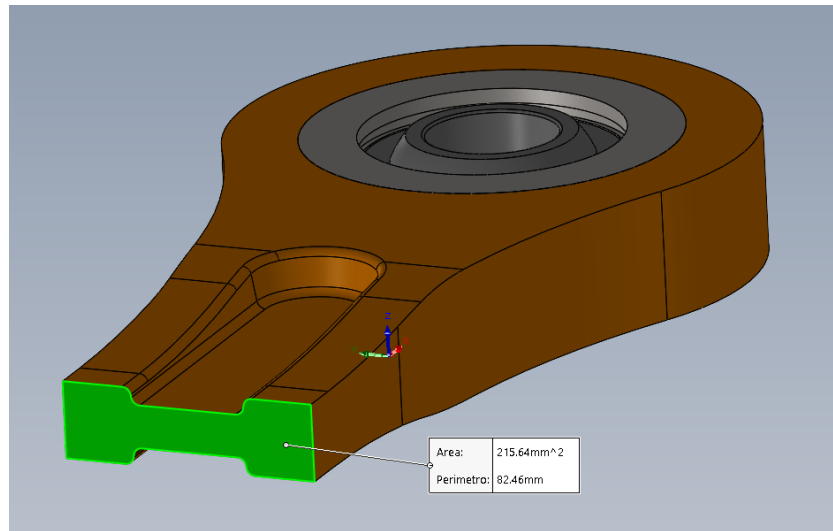


Figura 7.12: Sezione ridotta del prototipo di bielletta

inserito in un supporto, successivamente montato sulla macchina. Il cilindro ha diametro 20, *mm*, pertanto il disegno del prototipo è stato modificato per integrare questo meccanismo.

7.2.1 Progettazione dello stampo

Questo stampo è stato realizzato in modo da poter modificare, tra la realizzazione di un componente e l'altro il diametro del foro in cui viene inserito l'inserto. Questo è stato fatto per permettere la realizzazione di biellettes compatibili sia con il sistema di ancoraggio della macchina di trazione, quindi con un foro di 20 *mm*, e sia di produrre biellettes con l'inserto in acciaio 7.10, senza andare a creare un nuovo stampo. Sono stati creati anche qui i meccanismi di estrazioni visti nel primo stampo realizzato, che sfruttano un sistema vite e bullone per spingere un tappo e quindi estrarre il componente.

In figura 7.14 viene riportato l'assieme dello stampo per la bielletta, nello stampo inferiore si possono notare due tappi per il meccanismo di estrazione. E la forma utilizzata per la realizzazione del foro da 20 *mm*. Questa viene ancorata allo stampo mediante un bullone che passa al centro del cilindro. Tra lo stampo e la forma viene inserita la cera per sigillatura, in modo tale da evitare che la resina trafile nelle fughe create da questo accoppiamento. Lo stampo viene poi realizzato mediante una stampante BambuLab X1, utilizzando come materiale un PETG-CF,



Figura 7.13: Afferraggio previsto per la parte superiore

per CF si intende rinforzato con fibra di carbonio, questo garantisce delle prestazioni meccaniche del materiale maggiori, rispetto ad un tradizionale PETG.

7.2.2 Realizzazione del prototipo

La realizzazione del prototipo ha evidenziato diverse problematiche, principalmente legate al processo produttivo del *carbon forged*. Come discusso nel paragrafo 3.2, all'aumentare delle dimensioni del componente gli effetti della reazione esotermica di polimerizzazione della resina diventano sempre più significativi. In particolare, la resina tende ad espandersi e a fluire attraverso le fughe dello stampo, con conseguente formazione di zone povere di resina e ricche di vuoti.

Come mostrato in figura 7.16, nella parte superiore del primo prototipo (figura a) sono presenti zone non completamente impregnate di resina. Questo primo tentativo è stato realizzato utilizzando gli stessi valori di densità già impiegati per le piastre. Nelle versioni successive è stato invece aumentato il quantitativo di materiale composito (resina epossidica e fibra di carbonio), mantenendo costante il rapporto in massa tra fibra e resina $m_f = 50\%$. L'aumento della quantità

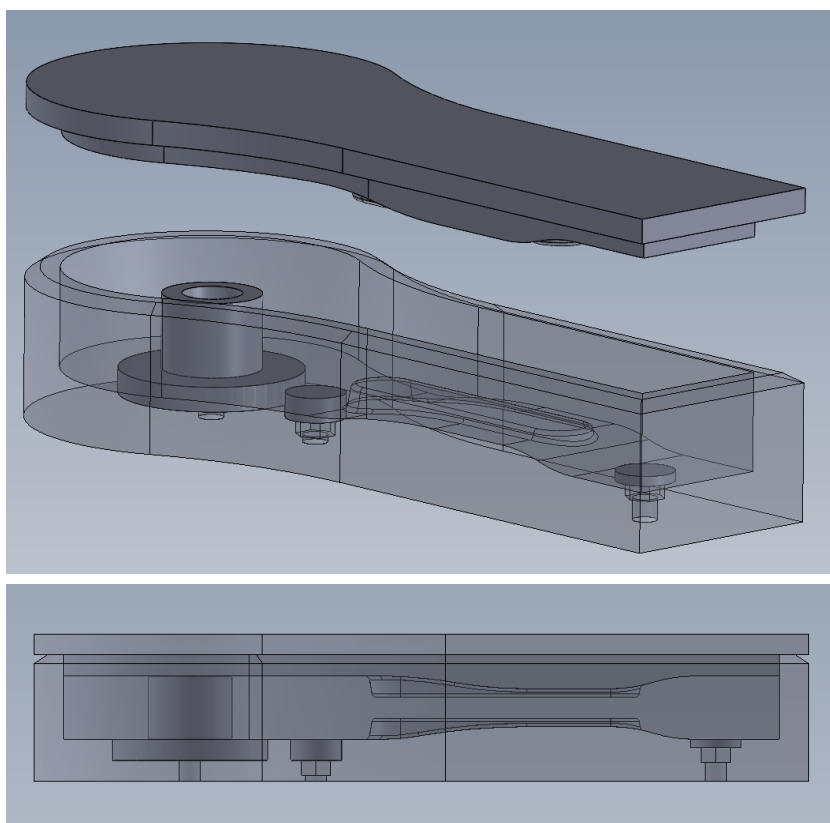


Figura 7.14: Assieme dello stampo del prototipo di bielletta, all'interno della parte inferiore ci sono i tappi per il meccanismo di estrazione (quelli di dimensione inferiore), e la forma che permette di realizzare un foro di 20 *mm* nello stampo.

complessiva di materiale ha ridotto parzialmente la formazione di vuoti, pur senza eliminarla del tutto. Tuttavia, l'espulsione di resina in eccesso attraverso le fughe dello stampo ha modificato l'effettiva composizione del pezzo finale: poiché la resina fuoriesce in quantità maggiore, la frazione volumica di fibra nel manufatto cresce oltre il valore nominale impostato. In questo modo il rapporto fibra/resina nel componente finale risulta più elevato rispetto a quello inizialmente previsto. La differenza è ben evidenziata dal confronto dei pesi: la bielletta iniziale, prodotta con le stesse proporzioni adottate per le piastre, pesa 92.06 *g*, mentre la bielletta finale raggiunge i 113 *g*. Si osserva quindi un incremento di circa 21 *g*.



Figura 7.15: Parte superiore ed inferiore dello stampo



a)

b)

Figura 7.17: Bielletta finale: a) ¹²⁴faccia superiore del componente a contatto con lo stampo superiore; b) faccia inferiore.



Figura 7.16: Primo prototipo di bielletta: a) faccia superiore del componente, in contatto con lo stampo superiore; b) faccia inferiore in contatto con lo stampo inferiore.

7.3 Implementazione della FEM sul prototipo

Il modello FEM descritto nel capitolo precedente risulta di semplice implementazione su provini rettangolari, nei quali il controllo dei beam al di fuori del provino è agevole e la loro posizione può essere definita con facilità. Per geometrie più complesse, invece, l'applicazione del modello diventa più articolata, rendendo necessario lo sviluppo di una nuova metodologia di creazione del modello in *MATLAB*. Anche in questo caso si è scelto di utilizzare una mesh generata precedentemente in *LS-PrePost*. A differenza del modello precedente, la mesh non è costituita da elementi parallelepipedi, ma da elementi tetraedrici a 4 nodi. Questa scelta semplifica notevolmente la generazione della mesh su geometrie complesse. L'algoritmo implementato in *MATLAB* ha lo scopo di:

1. Leggere le coordinate dei quattro nodi di ciascun elemento.

2. Calcolare il punto medio dell'elemento.
3. Determinare il raggio della sfera centrata in tale punto medio e tangente al nodo più vicino.

```

1 %% Creo i nodi centrali dei beam
2
3 NodiBeam = zeros(NodiBeamTotali,4);
4 NodiBeam(:,1) = (Nodi(end,1):Nodi(end,1)+NodiBeamTotali-1)';
5 g = NodiBeam(:,1);
6 g = reshape(g,Div+1,Nb)';
7 g = g(:,Div/2+1);
8 NodiBeamCentrali = zeros(Nb,4);
9 NodiBeamCentrali(:,1) = g;
10
11 % Generazione punto casuale uniforme nella sfera
12 u = rand(BeamTotali,1);           % per il raggio
13 theta = 2*pi*rand(BeamTotali,1); % angolo azimutale
14 phi = acos(2*rand(BeamTotali,1)-1); % angolo polare
15 r = zeros(BeamTotali,1);
16 r = DistanzaMinima(:,2)'.*u.^(1/3); % distribuzione
    uniforme nel volume
17
18 i = 1;
19 for e = 1:Nel
20     if BeamCella(e,2) == 0
21         else
22             for l = 1:BeamCella(e,2)
23                 NodiBeam(NodiBeamCentrali(i) == NodiBeam(:,1),2)
24                 = NodiCentrali(e,2)+r(i)*sin(phi(i))*cos(theta(i));
25                 NodiBeam(NodiBeamCentrali(i) == NodiBeam(:,1),3)
26                 = NodiCentrali(e,3)+r(i)*sin(phi(i))*sin(theta(i));
27                 NodiBeam(NodiBeamCentrali(i) == NodiBeam(:,1),4)
28                 = NodiCentrali(e,4)+r(i)*cos(phi(i));
29                 i = i+1;
30             end
31         end
32     end
33 end

```

Codice 7.1: Generazione del nodo centrale dei beam

In questo modo si definisce un volume entro il quale è possibile generare casualmente il nodo centrale dei beam. Associando poi la *volume fraction* ricavata dalla tomografia all'elemento tetraedrico, è possibile generare un numero di beam proporzionale a tale valore.

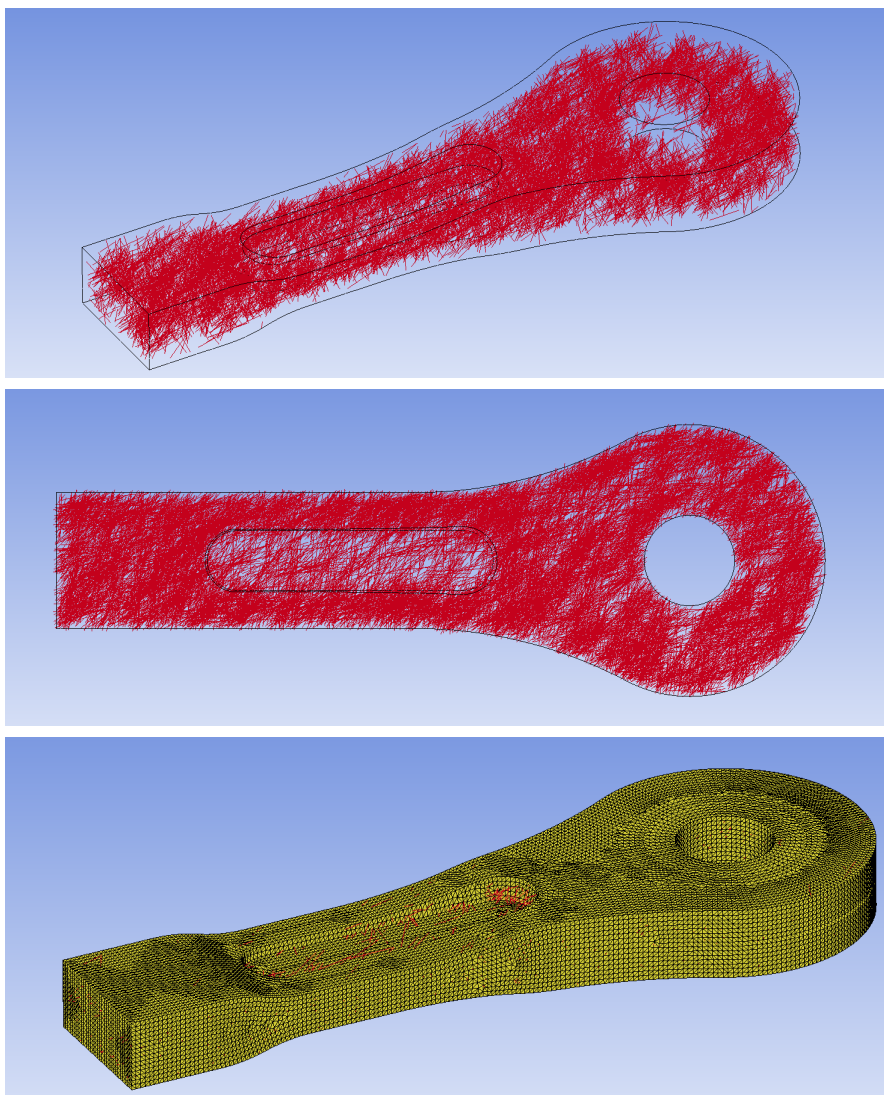


Figura 7.18: Risultati del codice MATLAB per la creazione del prototipo di bielletta, dopo la pulizia dei beam esterni alla regione del provino

Il controllo dei beam resta tuttavia complesso: non è possibile eliminare automaticamente quelli che ricadono al di fuori del modello. Questi elementi non influenzano comunque le proprietà meccaniche, poiché non sono collegati ad alcun

vincolo o carico. È comunque possibile effettuare una pulizia manuale dei beam esterni alla mesh solida utilizzando i comandi di *LS-PrePost*, selezionandoli individualmente. Per il prototipo non sono state eseguite tomografie; in questa sezione si intende unicamente mostrare le potenzialità del modello sviluppato. Il prototipo di bielletta è stato quindi generato assegnando orientamenti delle fibre e *volume fraction* casuali. La mesh solida utilizzata ha una dimensione target pari a 1 mm . La simulazione è stata configurata applicando una curva di spostamento lineare ai nodi situati alla base della bielletta, mentre i nodi posti su metà sezione del foro per l'inserto sono stati vincolati lungo l'asse di carico (figura 7.19). Il diametro dei beam è stato impostato arbitrariamente a $d_{beam} = 0.6458\text{ mm}$.

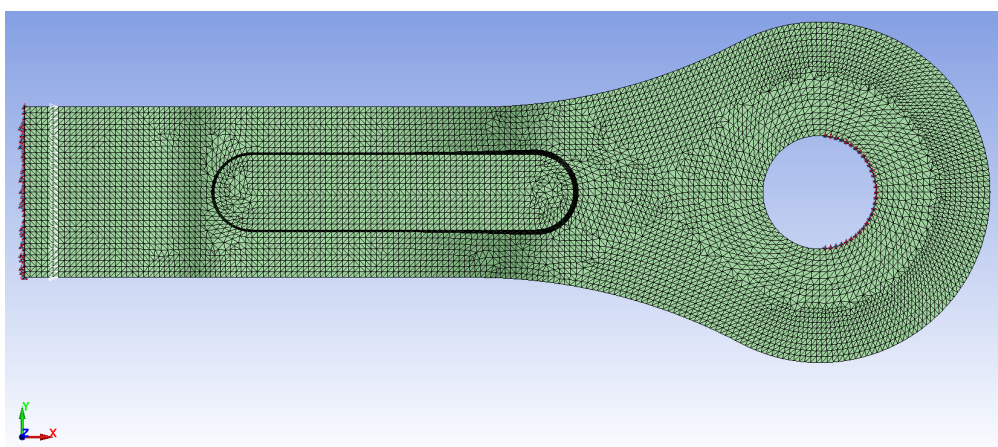


Figura 7.19: Vincoli applicati sul prototipo di bielletta

I risultati di simulazione sono riportati nelle figure 7.21 e 7.20.

La simulazione ha richiesto un tempo totale di 32 ore, dovuto principalmente alla dimensione elevata della mesh solida. Il modello comprende 309,944 elementi solidi e 37,308 beam, per un totale di 347,252 elementi. Riducendo la dimensione target della mesh a 2 mm , il numero di elementi solidi scende a 60,744, mentre i beam restano invariati, per un totale di 98,052 elementi. In questo caso il tempo di calcolo si riduce a 3 ore e 26 minuti. Si osserva quindi una riduzione significativa del tempo di calcolo, a scapito tuttavia della qualità dei risultati. Vengono riportati gli strain sull'asse di carico della mesh solida e gli stress assiali dei beam per il modello con dimensioni target 2 mm in figura 7.22. Si può notare come in generale le deformazioni puntuali sono lievemente differenti tra il modello con mesh 1 mm e modello con mesh 2 mm , la deformazione media è abbastanza simile tra i due modelli, infatti nel grafico in figura 7.21 le rigidezze dei due provini sono praticamente identiche. Un'ottimizzazione locale della mesh, concentrando gli

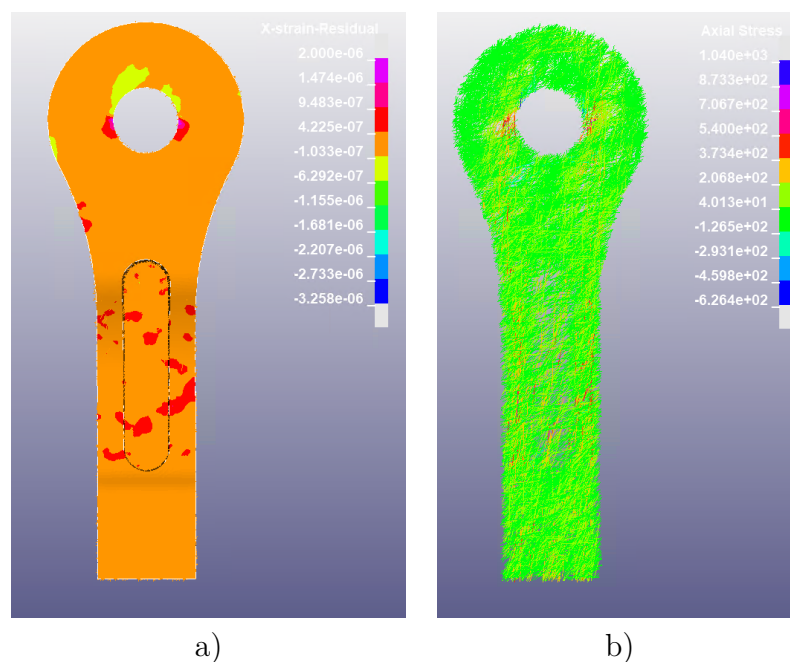


Figura 7.20: Risultati di simulazione con una mesh solida di dimensione target 1mm: a) deformazione della mesh solida lungo l'asse di carico; b) tensione assiale nei beam

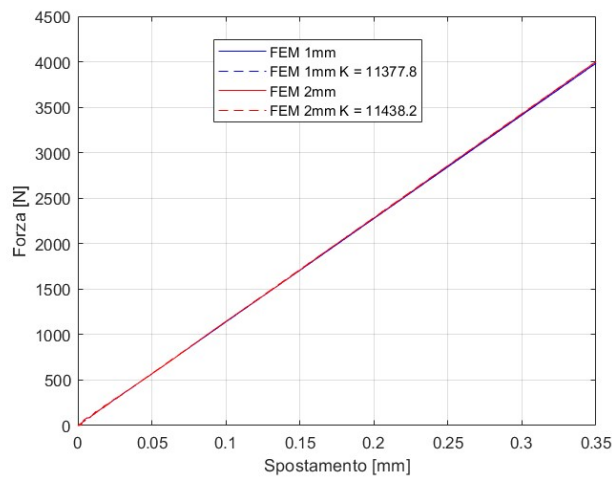


Figura 7.21: Curva forza-spostamento ottenuta dalla simulazione FEM del prototipo di bielletta

elementi nelle zone a maggiore concentrazione di tensione, potrebbe costituire un buon compromesso tra accuratezza e costo computazionale.

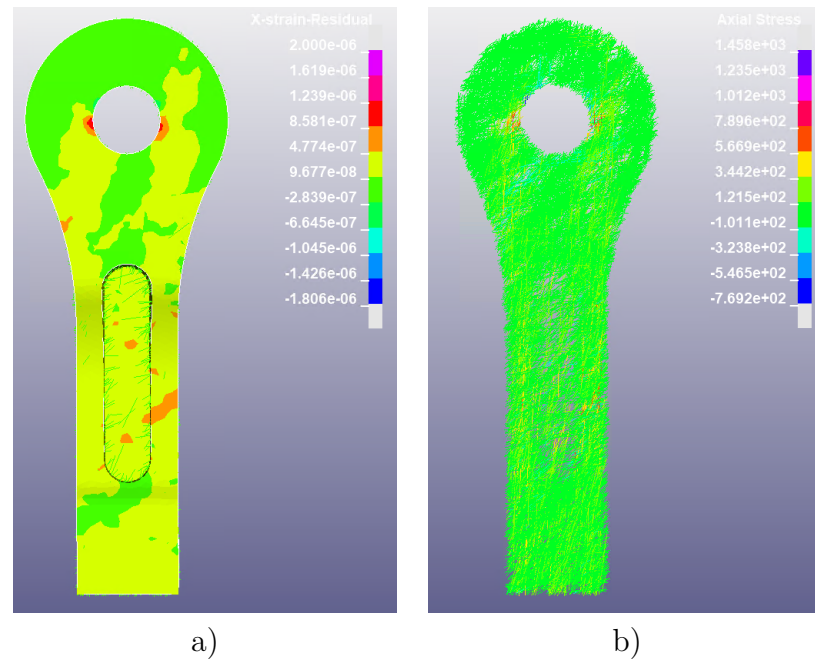


Figura 7.22: Risultati di simulazione con una mesh solida di dimensione target 2mm: a) deformazione della mesh solida lungo l'asse di carico; b) tensione assiale nei beam

7.3.1 Prova FEM con modello di danneggiamento

Sul prototipo di bielletta è stata eseguita una prova FEM inserendo un modello di danneggiamento. È stata utilizzata la carta materiale *MAT_ADD_EROSION, che consente di eliminare un elemento quando viene raggiunta una determinata soglia di danneggiamento. È possibile impostare diversi criteri di eliminazione, come un limite di deformazione o il superamento di una specifica tensione. Il danneggiamento è stato applicato esclusivamente alla mesh solida, impostando come soglia la tensione a rottura del materiale, pari a $\sigma_r = 72$ MPa.

```

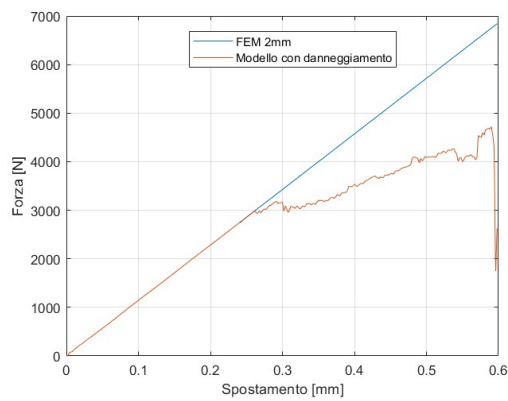
1 *MAT_ADD_EROSION_TITLE
2 ErosioResina
3 $#      mid      excl  mxpres   mneps   effeps   voleps   numfip
      ncs
4          2      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      1.0
      1.0
5 $# mnpres  sigp1    sigvm   mxeps   epssh   sigth  impulse
      failtm

```

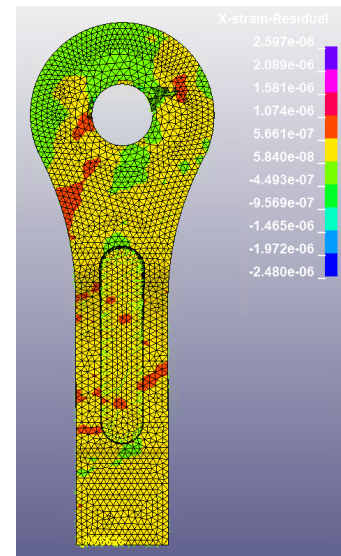
6		0.0	0.0	72.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.0							
7	\$#	idam	-	-	-	-	-	-
		lcregd						
8		0						
		0						
9	\$#	lcfld	nsff	epsthin	engcrt	radcrt	lceps12	lceps13
		lcepsmx						
10		0	10	0.0	0.0	0.0	0	0
		0						
11	\$#	dteflt	unused	mxtmp	dtmin			
12		0.0		0.0	0.0			

Codice 7.2: Carta materiale per il danneggiamento della resina

La simulazione è stata eseguita sul modello con mesh di 2 mm, con una durata totale di 5 ore, superiore di circa 2 ore rispetto al modello senza danneggiamento. L'algoritmo inizia a eliminare elementi al tempo $t = 7.4$ s, quando lo sforzo di Von Mises supera i 72 MPa nei pressi del foro per l'inserto (figura 7.24).



a)



b)

Figura 7.23: a) Curva forza-spostamento: confronto tra modello con e senza danneggiamento; b) deformazione della mesh solida lungo l'asse di carico.

Dopo l'eliminazione dei primi elementi, lo sforzo si concentra nell'intorno dell'area danneggiata, causando un'evoluzione progressiva della frattura. Si osserva infatti la

propagazione della cricca fino a raggiungere lo stato al tempo $t = 14.8$ s (figura 7.24). Il modello prevede la rottura nella zona dell'inserto.

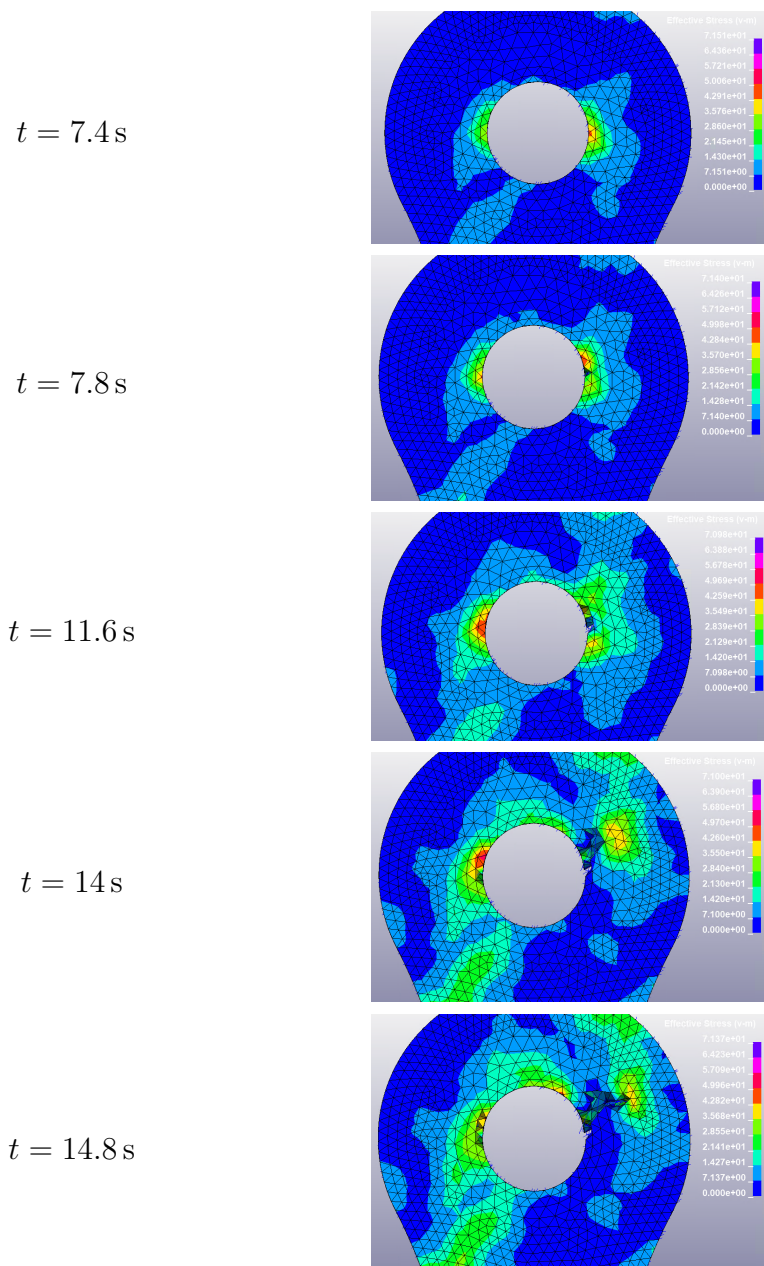


Figura 7.24: Evoluzione del danneggiamento nel modello.

Poiché in questa simulazione l'orientamento dei *beam* è stato definito in modo casuale, non è possibile fare un confronto diretto con le prove sperimentali. Le

comparazioni con casi reali verranno svolte in futuro e non rientrano nell'ambito di questa tesi.

7.4 Prove meccaniche sul prototipo di bielletta

Le prove meccaniche sulla bielletta sono state progettate per validare la geometria della sezione ristretta e verificare che il prototipo sia in grado di resistere a un carico di trazione di $8, \text{ kN}$. Inoltre, è necessario valutare dove e come inserire gli elettrodi per la misura della resistenza elettrica della bielletta. Il prototipo è stato preparato con diverse posizioni degli elettrodi: una nell'asola della sezione ristretta della biella e una nella parte sottostante al foro per l'inserto. Sono stati inizialmente eseguiti cicli di carico a controllo di spostamento per stabilizzare la lettura della resistenza e valutare la correlazione tra resistenza e deformazione. Successivamente, il prototipo è stato sottoposto a trazione fino a cedimento.

7.4.1 Carico ciclico

Per la prima parte di prova a carico ciclico sulla bielletta sono state eseguite più prove, con ampiezza di spostamento e offset crescenti.

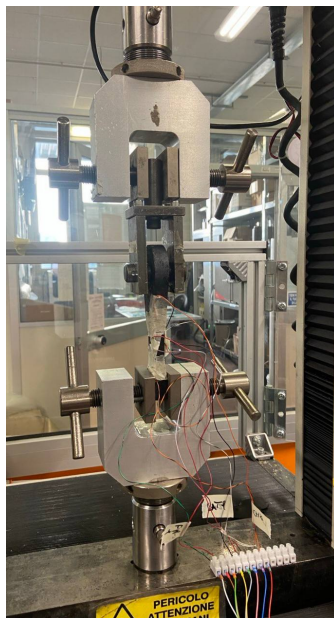


Figura 7.25: Set-up della prova di carico ciclico

La cella di carico installata sulla macchina per prove cicliche consente di raggiungere 10 kN , valore inferiore al carico di rottura di progetto (16 kN , con coefficiente di sicurezza $CS = 2$). In compressione è possibile applicare fino a -5 kN , pertanto viene utilizzato un offset per spostare il carico medio verso la trazione. Il ciclo di carico ha andamento sinusoidale. In figura 7.25 è riportato il set-up della prova di carico ciclico. Gli afferraggi a morsa, posti in alto e in basso, sono tipici di questo tipo di prova: quello superiore sostiene il sistema di fissaggio della bielletta, mentre quello inferiore è ancorato alla zona piatta.

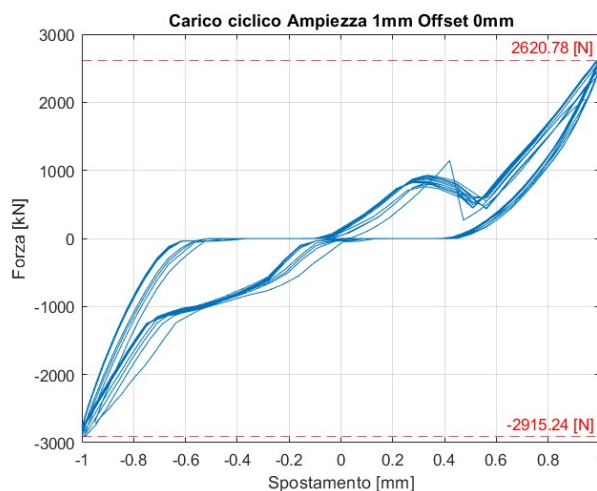


Figura 7.26: Forza-spostamento con carico ciclico ad ampiezza 1 mm e offset nullo

La prima prova è stata condotta con ampiezza di spostamento pari a 1 mm e offset nullo. Sono stati raggiunti carichi di 2620.78 N in trazione e -2915.24 N in compressione (figura 7.26). Nella parte centrale del grafico si osserva un aumento dello spostamento a carico pressoché costante, dovuto al recupero dei giochi del sistema di ancoraggio. Tale fenomeno non è significativo ai fini dell'analisi. Risulta comunque difficile ricavare la rigidezza del componente da queste prove cicliche. Aumentando ampiezza e offset a $A = 1.5\text{ mm}$ e $Offset = 1\text{ mm}$, si è ottenuto un carico massimo di 7442.62 N in trazione e -4227.3 N in compressione (figura 7.27). Il carico massimo risulta vicino alle condizioni di esercizio della bielletta. Sono stati eseguiti 12 cicli di trazione e compressione senza evidenti cali di rigidezza, indicando assenza di danneggiamento. Infine è stata effettuata una prova con $A = 1.5\text{ mm}$ e $Offset = 1.25\text{ mm}$, superando il carico massimo di esercizio della bielletta (8 kN). In figura 7.28 si nota come i picchi risultino meno netti, con evidente slittamento

dovuto alla perdita di presa delle morse sotto carichi elevati. La prova non è considerata valida.

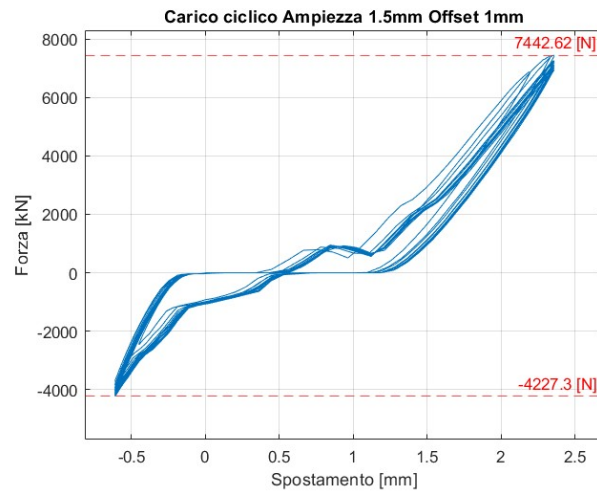


Figura 7.27: Forza-spostamento con carico ciclico ad ampiezza 1.5 mm e offset 1 mm

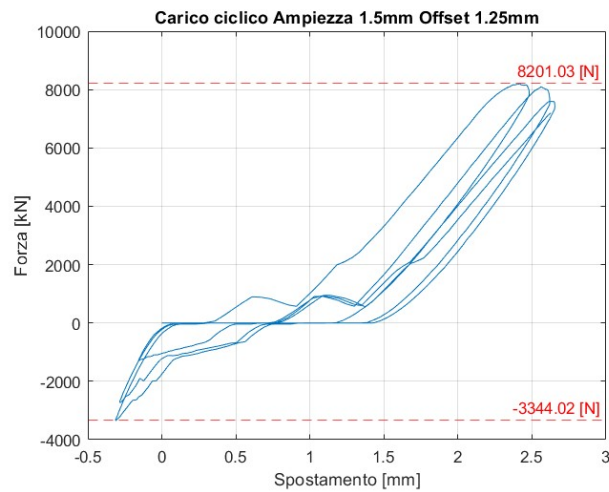
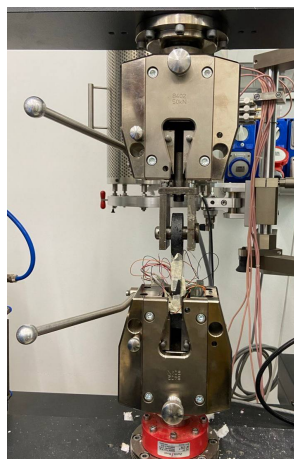


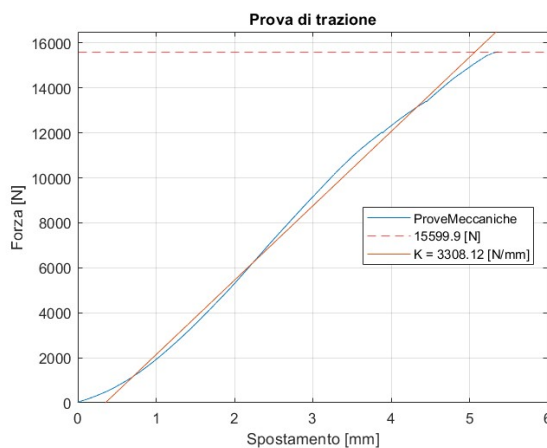
Figura 7.28: Forza-spostamento con carico ciclico ad ampiezza 1.5 mm e offset 1.25 mm

7.4.2 Prova di trazione

Dopo le prove cicliche è stata condotta una prova di trazione statica. La bielletta è stata montata in un'altra macchina di prova, dotata di cella di carico con portata massima di 50 kN .



a)



b)

Tabella 7.1: a) Set-up della prova di trazione sul prototipo di bielletta; b) curva forza-spostamento della prova di trazione

Il provino ha raggiunto un carico massimo di 15599.9 N , inferiore al valore di progetto (16 kN). Tuttavia, la rottura è avvenuta nella parte inferiore dell'afferraggio, provocando perdita di presa e conseguente interruzione automatica della prova. Il provino non presenta cricche. Non è stato possibile ripetere la prova poiché l'afferraggio inferiore risulta danneggiato e non garantisce più una presa adeguata. La rigidità del provino risulta pari a $K = 33308.12\text{ N/mm}$.

7.4.3 Variazione della resistenza del prototipo di bielletta

Le prove cicliche avevano lo scopo di superare il livello di stress necessario al ri-orientamento delle fibre nel composito, con conseguente diminuzione della resistenza elettrica a carico crescente. Gli elettrodi sono stati installati in quattro punti: due sui lati della bielletta, distanziati di 40 mm , e due al centro della cava nella sezione ristretta, distanziati di 30 mm , dove si concentrano gli stress (figura 7.29). Nella prima prova ciclica (ampiezza 1 mm , offset nullo), la resistenza in tutti e quattro i canali è diminuita in valore assoluto in corrispondenza del carico nullo, a causa del

riassestamento interno delle fibre. In figura 7.30 è mostrato l'andamento di $\frac{\Delta R}{R_0}$ nel tempo, con la forza applicata al provino nel grafico superiore.

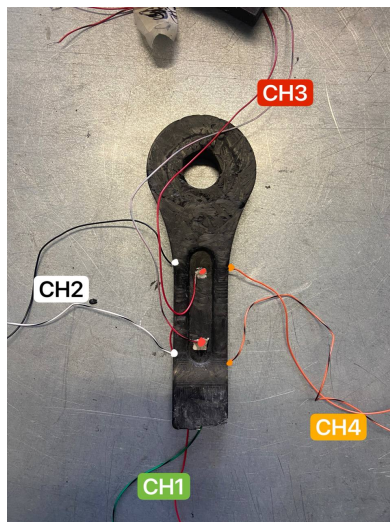


Figura 7.29: Posizione degli elettrodi sul prototipo di bielletta: CH1 e CH3 nella cava della sezione ristretta; CH2 e CH4 sui lati della stessa zona

I picchi di trazione coincidono con quelli di variazione di resistenza. Nella seconda prova ($A = 1.5 \text{ mm}$, $Offset = 1 \text{ mm}$, $F_{max} = 7442.62 \text{ N}$), la diminuzione della resistenza è meno marcata, indicando il completamento dell'assestamento delle fibre.

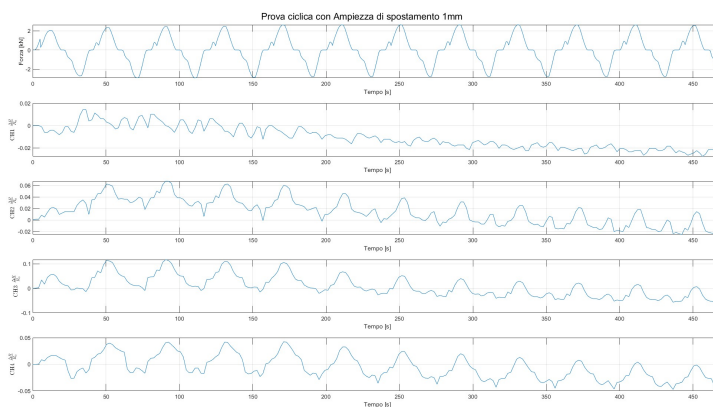


Figura 7.30: Andamento della resistenza in ogni canale per la prova ciclica con ampiezza 1 mm e offset nullo

Considerando una sezione minima di $A_r = 215.64 \text{ mm}^2$, lo stress nella zona critica è pari a 34.51 MPa . Con modulo elastico $E = 22.84 \text{ GPa}$, la deformazione stimata è 1.5×10^{-3} , valore corrispondente al punto di variazione dell'andamento della resistenza osservato nelle prove di trazione (figura 4.10). In questa prova, la variazione di resistenza segue fedelmente l'andamento del carico: i picchi di trazione corrispondono ai picchi di variazione di resistenza. Durante la compressione del provino, la resistenza aumenta, generando solo picchi positivi nella misura di $\Delta R/R_0$.

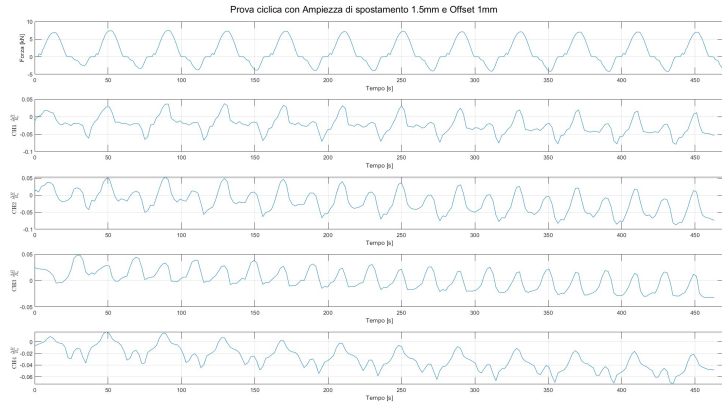


Figura 7.31: Andamento della resistenza in ogni canale per la prova ciclica con ampiezza 1.5 mm e offset 1 mm

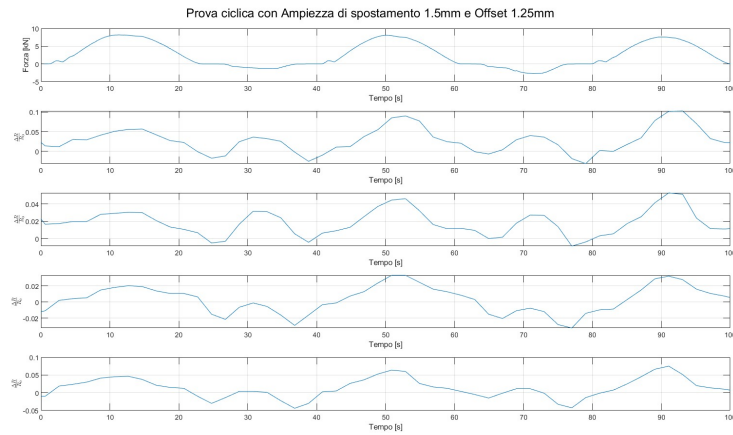


Figura 7.32: Andamento della resistenza in ogni canale per la prova ciclica con ampiezza 1.5 mm e offset 1.25 mm

Nell'ultima prova ($A = 1.5 \text{ mm}$, $Offset = 1.25 \text{ mm}$), come già osservato, gli afferraggi non garantivano una presa adeguata, causando slittamento nella curva forza-spostamento (figura 7.28). Nonostante ciò, la misura della resistenza resta valida: anche in questo caso l'andamento della variazione segue accuratamente il carico imposto. Si può notare come la resistenza in tutte le prove cali in valore assoluto, questo è dovuto ad un assestamento della struttura interna delle fibre. E' interessante inoltre notare come per la prova a carico ciclico con ampiezza $A = 1 \text{ mm}$ e offset nullo il calo della resistenza è visibile, mentre per la prova con ampiezza $A = 1.5 \text{ mm}$ e $Offset = 1 \text{ mm}$, il calo è meno drastico. Questo conferma la teoria per cui superata una deformazione di $\varepsilon = 1 \times 10^{-3}$ il valore della resistenza si stabilizza e gli effetti di ri-allineamento delle fibre vengono meno. Da queste prove non è stato possibile stabilire un gain factor, poichè i giochi degli afferraggi non permettono di ottenere delle misurazioni accurate.

7.5 Geometria finale della bielletta

Sulla base dei risultati delle prove di trazione è possibile validare la geometria del prototipo. La bielletta finale mantiene le stesse sezioni ma presenta una distanza tra i fori pari a 255.3 mm .

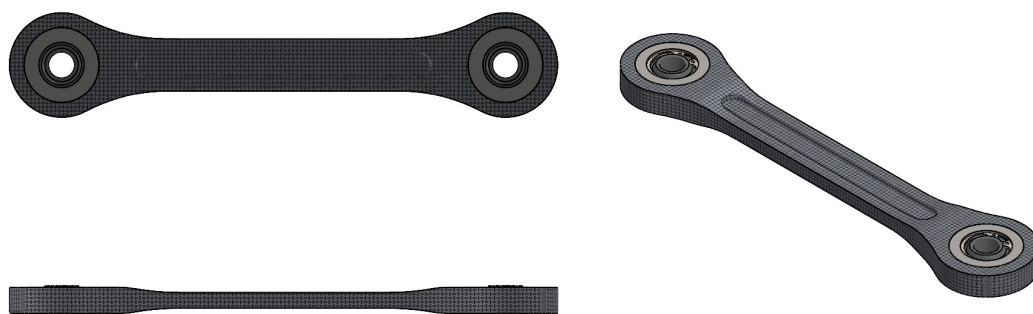


Figura 7.33: Assieme della biella finale

Capitolo 8

Conclusioni

Il presente lavoro di tesi ha avuto come obiettivo la progettazione, modellazione e realizzazione di una bielletta automobilistica in materiale composito SMC piezoresistivo, in grado di coniugare leggerezza, resistenza meccanica e capacità di monitoraggio dei carichi applicati. L'attività è stata concepita nell'ottica di contribuire all'evoluzione dei componenti strutturali del settore automotive verso soluzioni multifunzionali e digitalmente integrabili, in linea con le tendenze più recenti della progettazione meccanica avanzata. Per perseguire questo obiettivo è stato adottato un approccio multidisciplinare che ha combinato attività sperimentali, di simulazione numerica e di progettazione. In una prima fase, l'attenzione si è concentrata sulla caratterizzazione del materiale Carbon Forged, scelto come materiale di riferimento per la sua somiglianza microstrutturale con l'SMC, ma al contempo più facilmente lavorabile in laboratorio. Le prove di trazione e le analisi DIC (Digital Image Correlation) hanno consentito di evidenziare il comportamento anisotropo e disomogeneo del materiale, mostrando come l'orientamento locale delle fibre influisca in maniera determinante sulle proprietà meccaniche. I risultati ottenuti hanno confermato quanto già riportato in letteratura, ovvero che nei compositi a fibre corte l'eterogeneità microstrutturale porta a una distribuzione non uniforme delle deformazioni e a fenomeni di concentrazione degli sforzi, che diventano le sedi privilegiate di innesco della rottura. Parallelamente alla fase sperimentale, è stato sviluppato un modello numerico agli elementi finiti basato su un approccio multiscala, nel quale la matrice è stata rappresentata come un continuo solido e le fibre come elementi trave immersi al suo interno, accoppiati cinematicamente tramite il vincolo Constrained Beam in Solid. Tale modello ha consentito di descrivere con maggiore accuratezza l'anisotropia locale e di simulare il trasferimento degli sforzi tra matrice e rinforzo, senza dover risolvere una mesh

tridimensionale estremamente fitta. Il modello, costruito e parametrizzato mediante script MATLAB e validato in ambiente LS-Dyna, ha mostrato un buon accordo con i risultati sperimentali sia in termini di rigidità globale sia nella distribuzione delle deformazioni, dimostrando l'affidabilità dell'approccio proposto. L'integrazione di dati sperimentali e simulativi, unita all'analisi tomografica della microstruttura, ha permesso di affinare la ricostruzione del tensore di orientamento delle fibre, migliorando la rappresentazione della reale mesostruttura del materiale. Questo aspetto risulta di particolare rilievo, poiché consente di estendere il modello a componenti di geometria più complessa, come la bielletta finale. Un ulteriore contributo del lavoro è stato lo studio del comportamento piezoresistivo del materiale, ovvero la variazione della resistenza elettrica in funzione della deformazione meccanica. I test condotti su provini in Carbon Forged hanno mostrato una correlazione quasi lineare tra deformazione e variazione di resistenza, con buona ripetibilità del segnale anche sotto carichi ciclici. Ciò conferma la possibilità di utilizzare il materiale stesso come sensore integrato, senza necessità di elementi esterni di misura, aprendo la strada alla realizzazione di componenti intelligenti capaci di autodiagnosticare il proprio stato strutturale. Sulla base delle conoscenze acquisite, è stato progettato e realizzato un prototipo di bielletta in materiale composito, integrando all'interno della struttura gli elettrodi necessari per il monitoraggio piezoresistivo. La progettazione è stata condotta considerando i vincoli geometrici imposti dal gruppo sospensivo di riferimento e le condizioni di carico tipiche di esercizio. Le prove meccaniche e piezoresistive effettuate sul prototipo hanno confermato la solidità dell'approccio: la bielletta ha mostrato un comportamento meccanico coerente con le simulazioni e una risposta elettrica sensibile alle deformazioni applicate, dimostrando l'efficacia della funzionalizzazione strutturale proposta. In conclusione, il lavoro ha raggiunto i seguenti risultati principali:

- **Sviluppo e validazione di un modello FEM multiscala per materiali compositi SMC/Carbon Forged**, capace di riprodurre con accuratezza le proprietà meccaniche e l'anisotropia locale.
- **Caratterizzazione meccanica e piezoresistiva del materiale Carbon Forged**, con identificazione di un comportamento elettrico ripetibile e proporzionale alla deformazione.
- **Progettazione e realizzazione di un prototipo funzionale di bielletta**, in grado di combinare leggerezza strutturale e capacità di sensing integrato.

I risultati ottenuti dimostrano la validità dell'approccio adottato e confermano il potenziale dei materiali compositi piezoresistivi per applicazioni strutturali intelligenti nel settore automotive. In prospettiva, futuri sviluppi potrebbero riguardare l'ottimizzazione del modello FEM attraverso la simulazione di processo dello stampaggio, l'integrazione di algoritmi di apprendimento automatico per la calibrazione automatica delle proprietà locali e lo studio della risposta piezoresistiva in condizioni di esercizio reali. In un contesto industriale orientato alla digitalizzazione e alla sostenibilità, il lavoro rappresenta un passo concreto verso la realizzazione di componenti multifunzionali capaci di unire le tradizionali prestazioni meccaniche a nuove funzionalità sensoriali, contribuendo alla nascita di una nuova generazione di strutture intelligenti e connesse.

Bibliografia

- [1] Paolo Feraboli, Federico Gasco, Bonnie Wade, Steve Maier, Roger Kwan, Attilio Masini, Luciano DeOto e Maurizio Reggiani. «Lamborghini "Forged Composite" Technology for the Suspension Arms of the Sesto Elemento». In: *Automobili Lamborghini Advanced Composite Structures Laboratory* (N.D.) (cit. a p. 2).
- [2] D. Paolino. *Design of Lightweight & Composite Structures*. Lecture slides, Politecnico di Torino, Department of Mechanical and Aerospace Engineering. DLCS course, Master of Science in Mechanical Engineering. 2024 (cit. alle pp. 9–11, 107).
- [3] Haksung Lee, Mongyoung Huh, Jaeyoung Yoon, Dasom Lee, Seonyul Kim e Shinjae Kang. «Fabrication of carbon fiber SMC composites with vinyl ester resin and effect of carbon fiber content on mechanical properties». In: *Carbon letters* 22 (gen. 2017), pp. 101–104. DOI: 10.5714/CL.2017.22.101 (cit. a p. 12).
- [4] Carlo Sismonda. «Modellazione multi-scala di un componente in materiale composito CF-SMC: creazione carta materiale, modellazione FEM e Digital Twin. = Multi-scale modelling of a carbon fiber composite material CF-SMC: creation of virtual material card, FEM Analysis and Digital Twin». Relatore: Davide Salvatore Paolino. Tesi di laurea magistrale. Corso di laurea magistrale in Ingegneria Meccanica: Politecnico di Torino, 2022 (cit. a p. 13).
- [5] Sarah Boylan e Jose Castro. «Effect of reinforcement type and length on physical properties, surface quality, and cycle time for sheet molding compound (SMC) compression molded parts». In: *Journal of Applied Polymer Science* 90 (nov. 2003), pp. 2557–2571. DOI: 10.1002/app.12726 (cit. a p. 13).
- [6] CoreTech System Co., Ltd. *Moldex3D*. Version R20, <https://www.moldex3d.com/>. 2022 (cit. alle pp. 14, 15).

- [7] Luca Martulli, Leen Muysshondt, Martin Kerschbaum, Soraia Pimenta, Stepan Lomov e Yentl Swolfs. «Carbon fibre sheet moulding compounds with high in-mould flow: Linking morphology to tensile and compressive properties». In: *Composites Part A Applied Science and Manufacturing* (ago. 2019), p. 105600. DOI: 10.1016/j.compositesa.2019.105600 (cit. alle pp. 14–16, 116).
- [8] Josh Kelly, Edward Cyr e Mohsen Mohammadi. «Finite Element Analysis and Experimental Characterisation of SMC Composite Car Hood Specimens under Complex Loadings». In: *Journal of Composites Science* 2 (set. 2018), p. 53. DOI: 10.3390/jcs2030053 (cit. alle pp. 14, 16, 18).
- [9] Mohammadali Shirinbayan, Hassan Beigi Rizi, Navideh Abbasnezhad, Abbas Tcharkhtchi e Joseph Fitoussi. «Tension, compression, and shear behavior of advanced sheet molding compound (A-SMC): Multi-scale damage analysis and strain rate effect». In: *Composites Part B: Engineering* 225 (set. 2021), p. 109287. DOI: 10.1016/j.compositesb.2021.109287 (cit. alle pp. 15, 17, 18).
- [10] Martin Tiefenthaler, Philipp Stelzer, Chi Chung, Volker Reisecker e Zoltan Major. «CHARACTERIZATION OF THE FRACTURE MECHANICAL BEHAVIOR OF C-SMC MATERIALS». In: *Acta Polytechnica CTU Proceedings* 18 (ott. 2018), p. 1. DOI: 10.14311/APP.2018.18.0001 (cit. alle pp. 18, 19, 51).
- [11] Haibin Tang, Zhangxing Chen, Guowei Zhou, Yang Li, Katherine Avery, Haidong Guo, Hongtae Kang, Danielle Zeng e Xuming Su. «Correlation between failure and local material property in chopped carbon fiber chip-reinforced sheet molding compound composites under tensile load». In: *Polymer Composites* 40 (feb. 2018), E962–E974. DOI: 10.1002/pc.24767 (cit. alle pp. 19–21).
- [12] Easy Composites Ltd. *What is Prepreg? How To Use Prepreg Carbon Fibre*. <https://www.youtube.com/watch?v=25PmqM24HEk>. Accessed: 2025-08-05. 2021 (cit. a p. 25).
- [13] Easy Composites Ltd. *Forged Carbon Fibre Development Kit*. <https://www.easycomposites.co.uk/forged-carbon-fibre-kit>. Consultato il 11 agosto 2025. 2025 (cit. a p. 26).
- [14] *ASTM D638-21, Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics* (cit. a p. 33).

- [15] ASTM International. *ASTM D3039/D3039M-08: Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*. ASTM International, West Conshohocken, PA. DOI: 10.1520/D3039_D3039M-08. 2008 (cit. alle pp. 33, 55).
- [16] Akira Todoroki. «Electric Resistance Change Method for Cure/Strain/Damage Monitoring of CFRP Laminates». In: *Key Engineering Materials* 270-273 (ago. 2004), pp. 1812–1820. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.270-273.1812 (cit. alle pp. 48, 49).
- [17] Norbert Forintos e Tibor Czigány. «Multifunctional application of carbon fiber reinforced polymer composites: Electrical properties of the reinforcing carbon fibers – A short review». In: *Composites Part B: Engineering* 162 (ott. 2018). DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.10.098 (cit. a p. 49).
- [18] Schulte Karl e Ch Baron. «Load and Failure Analyses of CFRP Laminates by Means of Electrical Resistivity Measurement». In: *Composites Science and Technology* 36 (dic. 1989), pp. 63–76. DOI: 10.1016/0266-3538(89)90016-X (cit. a p. 50).
- [19] Xiaojun Wang e Deborah Chung. «Self-monitoring of Fatigue Damage and Dynamic Strain in Carbon Fiber Polymer-Matrix Composite». In: *Composites Part B: Engineering* 29 (dic. 1998), pp. 63–73. DOI: 10.1016/S1359-8368(97)00014-0 (cit. alle pp. 52–54, 57).
- [20] Xiaojun Wang e D D L Chung. «Continuous carbon fibre epoxy-matrix composite as a sensor of its own strain». In: *Smart Materials and Structures* 5.6 (dic. 1996), p. 796. DOI: 10.1088/0964-1726/5/6/009. URL: <https://dx.doi.org/10.1088/0964-1726/5/6/009> (cit. alle pp. 51, 53, 57).
- [21] MG CHEMICALS. *8330S – Adesivo elettricamente conduttivo*. URL: <https://mgchemicals.com/products/adhesives/electrically-conductive-adhesives/silver-glue/> (cit. a p. 54).
- [22] Deborah Chung e Shoukai Wang. «Self-sensing of Damage and Strain in Carbon Fiber Polymer-Matrix Structural Composites by Electrical Resistance Measurement». In: *Polymers and Polymer Composites* 11 (ott. 2003), pp. 515–525. DOI: 10.1177/096739110301100701 (cit. a p. 54).
- [23] V. Romanenko, Miro Duhovic, D. Schommer, Joachim Hausmann e J. Eschl. «Advanced process simulation of compression molded carbon fiber sheet molding compound (C-SMC) parts in automotive series applications». In:

- Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 157 (mar. 2022), p. 106924. DOI: 10.1016/j.compositesa.2022.106924 (cit. a p. 62).
- [24] Zhangxing Chen, Tianyu Huang, Yimin Shao, Yang Li, Hongyi Xu, Katherine Avery, Danielle Zeng, Wei Chen e Xuming Su. «Multiscale Finite Element Modeling of Sheet Molding Compound (SMC) Composite Structure based on Stochastic Mesostructure Reconstruction». In: *Composite Structures* 188 (dic. 2017). DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.12.039 (cit. alle pp. 62–64).
- [25] Carlo Sismonda. «Modellazione multi-scala di un componente in materiale composito CF-SMC: Creazione carta materiale, analisi FEM e Digital Twin». Relatore: Prof. Davide Paolino; Tutor aziendale: Ing. Salvatore Sottile. Tesi di Laurea Magistrale. Torino, Italia: Politecnico di Torino, 2022 (cit. a p. 62).
- [26] Hongyi Xu e Zhangxing Chen. «Modeling and Simulation of Compression Molding Process for Sheet Molding Compound (SMC) of Chopped Carbon Fiber Composites». In: *SAE International Journal of Materials and Manufacturing* 10 (mar. 2017). DOI: 10.4271/2017-01-0228 (cit. a p. 62).
- [27] JXU. «Mechanical Characterization and Modeling of CF-SMC Materials». Master’s Program Polymer Technologies and Science. Master’s thesis. Johannes Kepler Universitat Linz, 2024 (cit. a p. 64).
- [28] Shinya Hayashi, C. T. Wu, Wei Hu, Youcai Wu, Xiaofei Pan e Hao Chen. «New Methods for Compression Molding Simulation and Component Strength Validation for Long Carbon Fiber Reinforced Thermoplastics». In: *12th European LS-DYNA Conference*. JSOL Corporation, Japan; Livermore Software Technology Corporation, USA. Koblenz, Germany, 2019 (cit. alle pp. 64, 66, 67, 71).
- [29] Hao Chen. *An Introduction to CONSTRAINED BEAM IN SOLID*. Livermore Software Technology Corp. n.d. (Cit. a p. 64).
- [30] Dominic Schommer, Miro Duhovic, Heiko Andrae, Konrad Steiner, Matti Schneider e Joachim Hausmann. «Development of a User-Defined Material Model for Sheet Molding Compounds». In: *12th European LS-DYNA Conference*. Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, Fraunhofer-Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik ITWM, Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Koblenz, Germany, 2019 (cit. a p. 64).

- [31] Shinya Hayashi, Hao Chen e Wei Hu. «Development of New Simulation Technology for Compression Molding of Long Fiber Reinforced Plastics using LS-DYNA». In: *15th International LS-DYNA Users Conference*. Composites track. JSOL Corporation e Livermore Software Technology Corporation. Nagoya, Japan / Livermore, USA, 2023 (cit. alle pp. 64–66, 71).
- [32] LS-DYNA Development Team. *LS-DYNA® Keyword User's Manual, Volume I*. Version master@8c4334f67 (06/08/25). ANSYS. 2025 (cit. a p. 64).
- [33] Dario Fiumarella. «Re-Use of the carbon fiber woven prepreg cut-outs: a multidisciplinary study. Process analysis, mechanical characterization, and numerical simulation of the chopped randomly oriented structure». Doctoral Program in Mechanical Engineering (35th Cycle). Supervisors: Prof. G. Belingardi, Prof. A. Scattina. Doctoral Examination Committee: Prof. Andrea Bernasconi, Politecnico di Milano; Guan Gong, PhD, Research Institutes of Sweden (RISE). Dottoral Dissertation. Politecnico di Torino, 2023 (cit. a p. 72).
- [34] Suresh Advani. «The Use Tensors to Describe and Predict Fiber Orientation in Short Fiber Composites». In: *Journal of Rheology - J RHEOL* 31 (nov. 1987). DOI: 10.1122/1.549945 (cit. a p. 72).
- [35] Hexagon AB / Volume Graphics. *VG STUDIO*. Software per ricostruzione e visualizzazione dati CT 3D :contentReference[oaicite:0]index=0. Hexagon Manufacturing Intelligence, 2025. URL: <https://volumegraphics.hexagon.com/en/products/vgstudio.html> (cit. a p. 74).
- [36] Livermore Software Technology Corporation. *LS-PrePost*. Pre- e post-processore gratuito per LS-DYNA :contentReference[oaicite:0]index=0. Ansys Inc. (precedentemente LSTC), 2004. URL: <https://lsdyna.ansys.com/pre-postprocessing/ls-prepost> (cit. a p. 77).
- [37] LS-DYNA Development Team. *LS-DYNA® Keyword User's Manual, Volume II: Material Models*. Version master@4169ecc3a (07/08/25). ANSYS. 2025 (cit. a p. 91).
- [38] Munonyedi Kelvin Egbo. «A fundamental review on composite materials and some of their applications in biomedical engineering». In: *Journal of King Saud University - Engineering Sciences* 33.8 (2021), pp. 557–568. ISSN: 1018-3639. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2020.07.007>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1018363920302713> (cit. a p. 92).

- [39] LS-DYNA Development Team. *LS-DYNA® Theory Manual*. Version master@e24ec890e (03/08/25). ANSYS. 2025 (cit. a p. 92).
- [40] Luca Martulli, Thomas Creemers, Erich Schöberl, Nicholas Hale, Martin Kerschbaum, Stepan Lomov e Yentl Swolfs. «A thick-walled sheet moulding compound automotive component: Manufacturing and performance». In: *Composites Part A Applied Science and Manufacturing* (nov. 2019), p. 105688. DOI: 10.1016/j.compositesa.2019.105688 (cit. a p. 116).
- [41] SKF. *SKF spherical plain bearings and rod ends*. Catalog. SKF. Sverige, Sweden, 2023. URL: https://www.skf.com/binaries/pub12/Images/0901d196806507c5-Spherical-plain-bearings-and-rod-ends---11000-EN_tcm_12-121486.pdf (cit. alle pp. 116, 117).
- [42] SKF. *GEH 15 C — Spherical Plain Bearing (Radial), Rod Ends, Plain Bearings*. <https://www.skf.com/it/products/plain-bearings/spherical-plain-bearings-rod-ends/radial/productid-GEH%2015%20C>. Accessed: 2025-09-12. 2025 (cit. a p. 118).
- [43] Beneri S.p.A. *JV — Anelli elastici per fori*. <https://www.beneri.com/prodotto/jv>. Accessed: 2025-09-12. 2025 (cit. a p. 118).