



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE  
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

---

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

**Ottimizzazione di un componente automobilistico in CFRP ottenuto dal recupero di sfridi di prepreg.**

**Optimization of an automotive component in CFRP obtained by the recovery of prepreg scraps.**

Relatore: Chiar.mo

Prof. Ing. Archimede Forcellese

Candidato:

Francesco Pellegrino

Tutor aziendale:

Dott. Ing. Vincenzo Castorani (HP Composites)

Anno Accademico 2020/2021

---

UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE  
FACOLTÀ DI INGEGNERIA  
CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA MECCANICA  
Via Brezze Bianche – 60131 Ancona (AN), Italia

# Indice.

Premessa.....	1
1 Introduzione.....	3
1.1 Scopo della Tesi.....	3
1.2 I materiali compositi.....	4
1.2.1 Le matrici termoindurenti.....	9
1.2.2 Le matrici termoplastiche.....	14
1.2.3 Le fibre di rinforzo.....	15
2 Lo Stampaggio a Compressione.....	20
2.1 Lo Sheet Molding Compound.....	28
2.2 Lo studio della viscosità associato alle matrici polimeriche.....	34
2.3 Analisi del flusso mediante il modello matematico.....	36
3 Riciclo e riutilizzo della fibra di carbonio.....	40
3.1 Analisi degli scenari attuali del mercato dei materiali compositi CFRP.....	40
3.2 Il Progetto CIRCE.....	46
3.3 Strategie di riutilizzo ottimale di sfridi di preimpregnato: lo stato dell'arte...49	
4 Il Progetto: generalità e obiettivi.....	68
4.1 La Sospensione automobilistica.....	69
4.2 Il braccio di una sospensione automobilistica.....	75
4.3 Determinazione dei carichi agenti sul componente.....	76

4.3.1	Comportamento del veicolo in curva a basse velocità.....	77
4.3.2	Comportamento del veicolo ad alte velocità.....	78
4.3.3	Trasferimento di carico in direzione laterale.....	82
5	Definizione delle specifiche di progetto e generalità sull'impostazione del modello per l'analisi FEM.....	84
5.1	Definizione delle specifiche di progetto.....	84
5.2	Modello FEM per la definizione del problema di ottimizzazione.....	87
5.2.1	Pre-Processing.....	89
5.2.1.1	Preparazione della geometria.....	89
5.2.1.2	Definizione del materiale.....	90
5.2.1.3	Generazione della mesh.....	105
5.2.1.4	Condizioni al contorno.....	106
5.2.2	Processing.....	108
5.2.3	Post-processing.....	109
6	Ottimizzazione del braccio inferiore di una sospensione automobilistica.....	110
6.1	Prima fase del processo di ottimizzazione.....	115
6.1.1	Prima Iterazione.....	115
6.1.2	Seconda Iterazione.....	120
6.1.3	Terza Iterazione.....	121
6.1.4	Quarta Iterazione.....	123
6.1.5	Quinta Iterazione.....	128
6.2	Seconda fase del processo di ottimizzazione.....	133
6.2.1	Sesta Iterazione.....	134
6.2.2	Settima Iterazione.....	137

6.2.3	Ottava Iterazione.....	140
6.2.4	Riepilogo dei risultati ottenuti.....	144
6.3	Terza fase del processo di ottimizzazione.....	148
6.3.1	Decima Iterazione.....	149
6.3.2	Undicesima Iterazione.....	153
6.3.3	Dodicesima Iterazione.....	157
6.3.4	Verifica ad instabilità elastica.....	160
7	Studio di fattibilità del processo di PPMC in forme complesse.....	166
7.1	Descrizione del componente e dell'attrezzatura di stampaggio.....	168
7.2	Descrizione della Prova.....	170
7.2.1	Posizionamento della carica.....	170
7.2.2	Applicazione del vuoto.....	174
7.2.3	Stampaggio a compressione.....	174
7.3	Conclusioni dello studio di processo.....	175
8	Conclusioni e Sviluppi futuri.....	177
8.1	Prima fase del processo di ottimizzazione.....	178
8.2	Seconda fase del processo di ottimizzazione.....	179
8.3	Terza fase del processo di ottimizzazione.....	180
8.4	Studio di fattibilità del processo di PPMC in forme complesse.....	183
8.5	Sviluppi futuri.....	184
	Riferimenti Bibliografici.....	185



# Premessa

Il presente lavoro di tesi è stato svolto presso l'azienda HP Composites SpA nella sede di Ascoli Piceno, azienda all'avanguardia e leader nel settore della fabbricazione di manufatti in composito ad alte ed altissime prestazioni strutturali. In particolare, l'attività si è sviluppata presso il Reparto R&D della suddetta azienda. L'obiettivo di tale esperienza è quello di implementare e sperimentare il concetto di riuso degli scarti del processo di taglio del preimpregnato, che è differente dal processo di riciclo, cercando di infondere nuova vita ad un rifiuto che altrimenti finirebbe in discarica, comportando un impatto ambientale notevole oltre che un grave danno economico per l'azienda, che ogni anno fino ad ora, si è vista costretta a dover smaltire svariate tonnellate di sfrido di prepreg, materiale molto costoso acquistato presso aziende fornitrici. Tale spreco di materiale comporta anche un grave dispendio di energia, che è stata necessaria per realizzarlo. Lo sfrido è stato tagliato in "chips" di forma rettangolare e di differenti dimensioni, ed è stato successivamente impiegato in un procedimento di Compression Molding, che garantisce di coniugare buone proprietà meccaniche, costi produttivi contenuti e tempi di realizzazione ridotti, e quindi una discreta produttività. Questo lavoro si colloca nell'alveo del Progetto CIRCE (Circular Economy Model for Carbon Fibre Prepregs), di cui l'azienda ospitante è capofila, programma che si pone come obiettivo quello di reimmettere gli sfridi nel ciclo produttivo, realizzando un modello di economia circolare per prepreg di CFRP non curati. Questa esperienza è volta a superare il concetto di "riciclo", per focalizzare l'attenzione sul "riutilizzo" del rifiuto. Infatti, il riciclo del materiale composito è un processo altamente energivoro, che comporta il recupero della fibra, che viene separata dalla matrice mediante processi come la pirolisi. E ciò è negativo in primis per l'impatto ambientale dell'operazione, ed in secundis per il fatto che una delle due componenti costituenti il materiale composito, la matrice, va irrimediabilmente perduta, con evidente danno economico per tutti gli stakeholders. Al contrario, il processo di riuso richiede un bassissimo apporto energetico, il che ci consente di concludere che questa sia l'alternativa migliore possibile. Il presente lavoro si sviluppa sulla scia di una precedente attività aziendale, che si era posta come obiettivo di valutare la fattibilità del processo di Compression Molding nel riutilizzo di prepregs; è stata svolta un'analisi virtuale mediante software commerciali che ha consentito di giungere alla caratterizzazione meccanica di tale materiale innovativo, analisi che è stata poi validata mediante una campagna sperimentale su provini fisici.

Partendo dagli importanti risultati ottenuti, si è quindi cercata un'applicazione realmente vantaggiosa, in ambito automotive, per poter sfruttare le grandi potenzialità di questa importante e innovativa strategia produttiva. Ci si è quindi prefissati l'obiettivo di effettuare l'ottimizzazione di un braccio inferiore sistema sospensivo di un autoveicolo, da realizzare mediante compression molding di prepreg platelets. Questo componente cruciale nella dinamica di guida finora è largamente realizzato in acciaio od alluminio, con aggravio di peso abbastanza importante per la massa del veicolo, andando a incidere sulle sue performance e sulla fuel economy risultante. L'elaborato si divide in tre macro-parti: nella prima viene fornita una panoramica circa gli aspetti salienti del campo dei materiali compositi, in tema di materiali e di processo, unitamente ai fondamenti meccanici e dinamici alla base del funzionamento del componente oggetto di studio, aspetti che si sono rivelati cruciali nel processo di ottimizzazione; una seconda parte in cui sono state definite le specifiche di progetto ed effettuato il processo di ottimizzazione del componente, mediante un procedimento iterativo basato su analisi agli elementi finiti (FEM) del modello; nella terza, si è proceduto ad uno studio di fattibilità e ad uno studio del processo di stampaggio in forme complesse di un componente in materiale composito da chip di prepreg, mettendo in evidenza le criticità che si sono presentate.



# 1 Introduzione

## 1.1 Scopo della tesi

Lo scopo dell'attività di tesi è valutare la fattibilità del processo di compression molding come metodo di riutilizzo degli sfridi derivanti dal taglio di prepreg in CFRP, largamente utilizzato nell'azienda ospitante, e quindi l'individuazione di una potenziale e vantaggiosa applicazione nel settore automotive di tale materiale composito economico e sostenibile. Le crescenti problematiche ambientali hanno accelerato la richiesta di materiali innovativi da impiegare in componenti secondari e semi-strutturali, da ottenere mediante nuovi processi produttivi, per poter conciliare in modo ottimale la riduzione dei costi, buone prestazioni meccaniche, riduzione di peso, possibilità di produzione seriale e tempi di processo ragionevolmente ridotti. Lo scopo del lavoro di tesi sarà quello di svolgere un processo di ottimizzazione di un braccetto superiore del sistema sospensivo di una autovettura, che andrà realizzato utilizzando una tecnica di stampaggio a compressione di "chips" ottenute dal taglio di rotoli di preimpregnato, in luogo dell'alluminio attualmente impiegato. Il processo di ottimizzazione ha due obiettivi: realizzare un componente già esistente in un materiale differente e fa sì che esso abbia proprietà meccaniche quanto più simili a quelle del pezzo originale, ma con un peso ridotto. Per raggiungere tale obiettivo, occorre procedere per vari passaggi: in primis, la definizione delle specifiche di progetto, in seguito l'ottimizzazione del componente e lo studio della fattibilità e del processo produttivo; infine, l'analisi critica dei risultati ottenuti. Si parte quindi dallo studio del modello CAD del componente di partenza, oggetto di analisi, per poter poi effettuare una simulazione FEM agli elementi finiti di tale elemento, sottoposto a determinate condizioni al contorno. Questa esigenza nasce dallo studio di altre esperienze simili presenti in letteratura, in cui è risultato evidente che una deflessione da carico laterale, originata particolari condizioni dinamiche in marcia, può dar luogo a picchi di stress abbastanza importanti, che andranno studiati accuratamente. Un altro aspetto da analizzare con attenzione è la rigidità ottenibile. Una volta noti i carichi e le sollecitazioni in gioco, nonché i valori target di resistenza e rigidità da raggiungere, si procede alla ottimizzazione strutturale vera e propria del nuovo componente, da realizzare in materiale composito.

Date le grandi differenze morfologiche e meso-strutturali che intercorrono fra un alluminio commerciale, materiale posto come target, e un SMC-CF a fibra medio-corta, costituito da prepreg platelets, la geometria del componente dovrà, necessariamente, essere profondamente ridefinita; Ogni sostanziale intervento approntato deve essere ragionato a seguito delle simulazione FEM agli elementi finiti effettuate durante il processo iterativo, che darà come risultato lo stato di sollecitazione del componente, soggetto a complesse condizioni di carico, andando ad inserire nel software di calcolo le caratteristiche del materiale oggetto di studio. Una volta portato a termine il processo di ottimizzazione, il secondo passaggio del lavoro sarà lo studio tecnologico di fattibilità del processo di PPMC in forme complesse, mettendo in evidenza le possibili criticità che si sono presentate. In particolare si è studiato come trattare al meglio aspetti complessi quali i ridotti e variabili spessori, i fori, i raggi di raccordo più o meno spinti, al fine di mettere a punto le linee guida per una corretta processabilità in sede di stampaggio a compressione del componente, volta ad evitare quanto possibile le problematiche che si presentano in sede di estrazione, evidenziate dal modello, quali ad esempio i sottosquadri.

## 1.2 I Materiali Compositi.

I materiali compositi sono definiti come “materiali composti da almeno 2 fasi, matrice e rinforzo, che sono distinte fra loro e ben riconoscibili; e che presentano caratteristiche meccaniche, chimiche e morfologiche completamente differenti” [1]. Tali materiali sono uno strumento estremamente potente, che permette al progettista di sviluppare soluzioni innovative al fine di superare i limiti imposti dai materiali tradizionali. Essi sono infatti totalmente configurabili, specificamente progettati per essere impiegati in determinate situazioni ed applicazioni di interesse, lasciando quindi una libertà progettuale pressoché illimitata. La definizione saliente del processo di fabbricazione di manufatti in composito è “additive manufacturing”, ciò implica che si vada ad aggiungere materiale esattamente laddove esso serve, ottimizzando la deposizione e l’orientamento del materiale, così da ottenere doti elevate di resistenza e rigidità unite ad una leggerezza inarrivabile se paragonata con quella di materiali metallici di simili proprietà meccaniche.

I campi di elezione in cui i materiali compositi sono impiegati sono l'industria aeronautica ed aerospaziale, il settore automobilistico ad elevate prestazioni e delle competizioni, il settore degli equipaggiamenti sportivi e delle energie rinnovabili, ma recentemente è cresciuto l'interesse verso applicazioni in settori una volta preclusi a tali materiali, quali il settore biomedicale, delle costruzioni civili e l'industria nautica. In generale, è possibile affermare che le possibilità di impiego dei materiali compositi sono pressochè illimitate. In ambito automotive, con la crescente domanda di vetture elettrificate, si sta assistendo a un incremento notevole della massa dei veicoli, i cui accumulatori di carica sono estremamente più pesanti dei motori endotermici delle autovetture che mirano a sostituire, e si fanno via via più grandi per poter assicurare autonomie sempre maggiori. Ciò ha richiesto ai progettisti di trovare nuove soluzioni per rendere i restanti componenti strutturali, e della carrozzeria, più leggeri, e l'impiego dei compositi come "Metal Replacement" [2] ha consentito di raggiungere importanti risultati in termini di riduzione peso e conseguente incremento dell'efficienza. Un'altra vantaggiosa possibilità di impiego dei materiali compositi è rappresentata dai serbatoi di stoccaggio dell'idrogeno per veicoli cosiddetti "fuel cell"; infatti, tali dispositivi di stoccaggio dell'idrogeno, realizzati in composito mediante avanzate tecniche di "Filament winding", sono estremamente resistenti per sopportare le elevatissime pressioni in gioco ed inoltre, aspetto di importanza determinante, presentano una bassissima permeabilità all'idrogeno, aspetto che ha reso impossibile l'utilizzo di materiali metallici in tale applicazione. I Materiali compositi di maggiore uso, e più interessanti nell'ambito di questo lavoro, sono i materiali compositi in fibra di carbonio, a matrice polimerica. Ricordando la definizione data all'inizio, possiamo affermare che il ruolo predominante della fibra di rinforzo è quello di conferire al manufatto le proprietà meccaniche desiderate in termini di rigidità, modulo elastico e resistenza, mentre la matrice permette di tenere insieme il rinforzo, redistribuire i carichi tra le fibre, di proteggere le fibre dagli agenti ambientali esterni. Si può affermare che il composito ha proprietà nettamente superiori a quelle dei materiali che lo costituiscono. I rinforzi si dividono essenzialmente in due categorie: rinforzi continui e discontinui (fibre corte, particelle e whiskers). Una ulteriore classificazione dei compositi fibro-rinforzati è rappresentata dall'orientamento delle fibre, che possono essere disposte lungo direzioni predefinite, organizzate in tessuti in uno o più strati, oppure organizzate in strutture tridimensionali. Le matrici si dividono in tre categorie: matrici metalliche (MMC), matrici ceramiche (CMC), matrici polimeriche (PMC). Le polimeriche si dividono a loro volta in matrici termoplastiche e termoindurenti.

I compositi a matrice ceramiche presentano legami atomici estremamente forti, valori elevati di modulo elastico e durezza (mantenuti anche a  $T > 1000^{\circ}\text{C}$ ), elevata refrattarietà e inerzia chimica. Tali forti legami atomici sono responsabili anche della fragilità dei ceramici: non permettono lo scorrimento dei piani cristallini, e conferiscono loro un meccanismo di frattura tipico dei materiali fragili. La matrice nei CMC può essere di varia tipologia: allumina, biossido di zirconio, nitrato di silicio, di boro e di alluminio, o carburo di silicio. Per quanto riguarda i rinforzi, occorre far notare che le fibre metalliche non sono utilizzabili a causa del diverso coefficiente di dilatazione termica rispetto alla matrice; le fibre di carbonio nemmeno, per via della degradazione per ossidazione del carbonio. La soluzione preferita risiede nelle fibre di carburo di silicio. Tra materiali ceramici non ci sono grosse differenze di modulo elastico, difatti il rapporto tipico che intercorre tra modulo elastico del rinforzo e quello della matrice, pari a 4, non viene raggiunto. Per quanto riguarda i compositi a matrice metallica, la scelta della matrice viene fatta in base alle caratteristiche del materiale. Le leghe di alluminio sono maggiormente utilizzate per via della loro bassa densità, elevata duttilità, bassa temperatura di fusione, e possibilità di subire trattamenti termici, mentre l'interesse per le leghe di titanio e di magnesio è sempre crescente. Per quanto concerne il rinforzo, i tipi di rinforzo suddivisi anche in tal caso in continui e discontinui. I materiali impiegati per il rinforzo sono generalmente ceramici (allumina, carburo di silicio, boruro di titanio) per sfruttare la loro elevata resistenza e rigidità sia a temperatura ambiente che ad alte temperature. I compositi a matrice polimerica sono la tipologia più interessante. Essi infatti sono in grado di combinare i vantaggi offerti dalla matrice, ovvero resistenza chimica, durabilità, e leggerezza, con le peculiarità del rinforzo, che conferisce al prodotto rigidità, resistenza meccanica, e resistenza ad usura, aspetto in cui il materiale polimerico è decisamente carente. Inoltre sono caratterizzati da bassa dilatazione termica. Permettono di realizzare strutture con elevato rapporto resistenza/peso e rigidità/peso (con risparmi di peso superiori al 50% rispetto all'acciaio e al 25% rispetto all'alluminio), non ottenibile con materiali. Dal punto di vista ambientale, è importante evidenziare come consentano di accrescere l'efficienza energetica. Le matrici che vengono impiegate in questa tipologia di compositi sono due: matrici termoplastiche e termoindurenti. Le matrici termoplastiche sono solide a temperatura ambiente, per poi diventare liquide una volta portate a temperature sufficientemente elevate, il che consente di conferire al manufatto la forma desiderata in tempi brevissimi, forma che verrà mantenuta una volta portato a termine il raffreddamento. Ciò consente di ottenere una significativa facilità di stampaggio, oltre al fatto che tale lavorazione è reversibile e quindi il materiale è riciclabile.

Inoltre, il processo è velocissimo, consentendo ratei produttivi molto alti. Lo svantaggio principale dei compositi a matrice termoplastica è una difficile impregnazione del rinforzo, una bagnabilità critica che non consente di impregnare bene le fibre, e ciò sarà determinante nel pregiudicare le qualità meccaniche del manufatto, in quanto verrà inficiata l'efficienza del trasferimento delle forze fra le due fasi. Le matrici termoindurenti invece sono liquide a temperatura ambiente, e sono bicomponenti, ovvero realizzate per combinazione di resina ed indurente, che funge da agente reticolante. Nel corso della reazione di cura, che è esotermica e può essere velocizzata mediante aggiunta di calore, esse tendono a diventare solide, passando per uno stato viscoso. Nella pratica industriale, il materiale composito in rotoli di preimpregnato (prepreg) viene mantenuto in congelatore a temperatura controllata per evitare l'innesco prematuro della reazione di polimerizzazione. Tale reazione chimica, se portata a termine, è irreversibile; se sono diventate solide, queste matrici restano tali e non possono essere riformate. I manufatti in composito di questo genere non possono essere riciclati completamente; infatti esistono tecniche di recupero delle fibre, ma la resina va persa. Le resine termoindurenti sono caratterizzate da buone proprietà a trazione, con un Modulo di trazione di 2/4 GPa e una Resistenza di 100 MPa, e da una bassa dilatazione termica. Un parametro importante nella trattazione dei compositi a matrice polimerica, che va a definire il loro range termico di utilizzo, è rappresentato dalla Temperatura di Transizione Vetrosa, che è la temperatura alla quale la matrice plastica diventa gommosa. Ad esempio, è stato osservato che la resina epossidica sopra i 120° non possa essere utilizzata. Come precedentemente accennato, un ruolo di sostanziale importanza nei materiali compositi è rappresentato dall'interfaccia fra le due fasi, fibra e matrice, quindi dalla superficie di contatto fra loro: più essa è grande, più efficientemente redistribuisce gli sforzi, più il materiale è performante e le proprietà meccaniche migliori. Va da sé concludere che quanto più sono lunghe le fibre, maggiormente è favorito lo scambio delle forze. In generale, più rinforzo viene aggiunto e più si aumentano le proprietà meccaniche del composito. Un altro aspetto da tenere in considerazione è l'orientamento del rinforzo, che deve essere massimizzato lungo la direzione di carico per poter massimizzare le proprietà meccaniche. I rinforzi nei materiali compositi a matrice polimerica possono essere suddivisi in due grandi categorie: fibre corte (lunghezza nell'ordine del millimetro o minore), e fibre lunghe o continue (lunghezza pari alla massima dimensione del componente da produrre). Il più grande vantaggio delle fibre continue è l'ottimizzazione della struttura del composito grazie alle loro proprietà, alla frazione volumetrica introdotta nella matrice e alla possibilità di controllarne l'orientazione.

Gli esempi più significativi di fibre sono:

- fibre di vetro;
- fibre di carbonio;
- fibre aramidiche;
- fibre naturali;

Le proprietà dei compositi dipendono fortemente dal tipo, dalla forma, dalla dimensione, concentrazione, distribuzione e orientamento del rinforzo, oltre che dalle interazioni all'interfaccia matrice-rinforzo, che come è stato precedentemente discusso rivestono un ruolo fondamentale nella definizione delle proprietà meccaniche del materiale composito [1]. In teoria, le migliori proprietà meccaniche vengono ottenute con fibre continue disposte in una stessa direzione, ma nella pratica i compositi unidirezionali (UD) presentano poche possibilità applicative, poiché le proprietà sono ottimizzate in una sola direzione, lasciando "scoperte" le altre. Tale criticità è stata affrontata utilizzando laminati ottenuti sovrapponendo più strati di fibre unidirezionali, orientati ciascuno diversamente dall'altro. Una possibilità applicativa è dunque il laminato quasi-isotropo, grazie al quale in qualsiasi direzione si vada ad applicare un carico, si hanno sempre delle fibre orientate in tal senso. Le proprietà ottenibili, ovviamente, rappresentano una soluzione di compromesso. Un aspetto critico dei materiali compositi, soprattutto a fibra lunga, è il comportamento meccanico "asimmetrico" a trazione ed a compressione: infatti, essendo la fibra una struttura estremamente snella, basta un carico a compressione non troppo importante per creare problemi in termini di carico di punta, con conseguente instabilità elastica. Un aspetto cruciale dei materiali compositi è il basso il coefficiente di espansione termica di un composito PMC, mentre il coefficiente di smorzamento risulta molto elevato. Questo rende i PMC materiali adatti anche per applicazioni di isolamento termico, isolamento acustico e riduzione di vibrazioni (ad esempio, mediante strutture sandwich). Come ultima proprietà è bene ricordare che i materiali compositi a fibra polimerica esibiscono un'elevatissima resistenza alla corrosione, di conseguenza non hanno bisogno dei trattamenti anti-corrosione tipici dei materiali metallici.

## 1.2.1 Le Matrici Termoindurenti.

Tabella 1 – Le Matrici Termoindurenti.

RESINE	Resistenza a trazione (MPa)	Allungamento (%)	Modulo elastico (GPa)	Densità (kg/m <sup>3</sup> )	Temperatura max di utilizzo (°C)
Fenoliche	60	2	9	1270	150
Amminiche	67	1	11	1500	120-200
Poliestere	87	3	4	1280	150
Epossidiche	100	6	3	1250	150-250
Uretaniche	67	6	-	1300	

Le resine termoindurenti (Tabella 1) sono le più utilizzate in ambito dell'industria dei materiali compositi in quanto sono, originariamente, un liquido basso viscoso che riesce a penetrare in maniera molto efficiente in una rete di fibre, così da formare al termine della reazione di polimerizzazione un solido ben rigido, tenace e ben aderente alle fibre che sono annegate al suo interno. Ciò permette anche l'inserimento di un maggior numero di fibre nel composito, che non avranno problemi ad essere impregnate in modo ottimale. Si genera, al termine della reazione di cura, un polimero fortemente reticolato caratterizzato da un elevato numero di legami covalenti forti, rigidi, insolubili ed infusibili fra le catene polimeriche, che non si sciolgono alla fornitura di calore; ciò porta nel tempo ad un aumento della viscosità della resina, con il rapporto tra i cross-link formati in un determinato tempo ed il numero di massimo di cross-link formabili che definisce il grado di cura ( $\alpha_c$ ) della resina, ricavabile come da (1.1):

$$\alpha_c = \frac{H}{H_R} \quad (1.1)$$

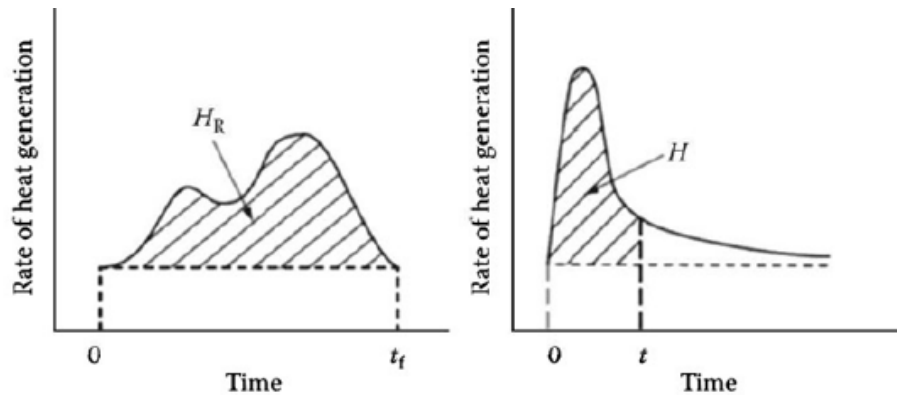


Figura 1 – Il Parametro di “Rate of heat generation” in funzione del tempo.

$$H_R = \int_0^{t_f} \left( \frac{dQ}{dt} \right) dt, \quad H = \int_0^t \left( \frac{dQ}{dt} \right) dt, \quad (1.2)$$

$$\frac{d\alpha_c}{dt} = (k_1 + k_2\alpha_c^m)(1 - \alpha_c)^n, \quad (1.3)$$

La (1.3) rappresenta il Modello di Kamal-Sourour, dove:

$d\alpha_c/dt$  = rateo di cura

$\alpha_c$  = grado di cura

$k_1$  e  $k_2$  costanti che dipendono dalla T di cura

$m$  e  $n$  costanti che non dipendono dalla T

Il parametro ricavato in (1.2) e il cui andamento è rappresentato in Figura 1 è di prima importanza ed influenza fortemente le proprietà meccaniche, termiche e fisiche del materiale, in particolare densità, Tg, Capacità termica, Conduttività termica, Modulo e Resistenza. I tre diversi stati fisici che possono verificarsi durante la polimerizzazione sono generalmente visualizzati in un diagramma di polimerizzazione con trasformazione tempo-temperatura (TTT) in scala logaritmica, riportato in Figura 2 a pagina seguente.



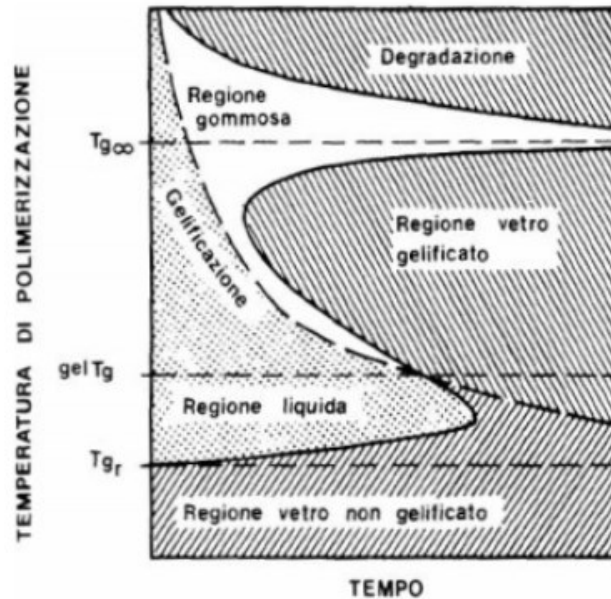


Figura 2 - Diagramma di polimerizzazione con trasformazione tempo-temperatura (TTT) in scala logaritmica.

La temperatura di transizione vetrosa (glass transition temperature), è un altro parametro molto importante in questa analisi, è una caratteristica fisica del materiale che determina anche la massima temperatura di servizio. Essa dipende dalla composizione chimica, dalla modalità di reticolazione, dai tempi e temperature di cura. Il superamento della Tg non comporta necessariamente il degrado chimico del materiale (osservabile a molto più alte di Tg), ma il polimero potrebbe svolgere in maniera non adeguata la sua funzione strutturale. Da un punto di vista tecnico, tempo di gelificazione, il tempo di lavorazione e tempo di conservazione a una particolare temperatura sono di grande importanza, indipendentemente dal fatto che la reticolazione (cross-linking) venga avviata cataliticamente, attraverso l'esposizione alla luce o l'aumento della temperatura. Al punto di gel, la viscosità aumenta notevolmente (teoricamente infinitamente) e quindi termina la possibilità di utilizzare la resina per impregnare le fibre. I principali meccanismi di attivazione del cross-link possono essere molteplici. Nei sistemi attivati dalla temperatura, le modifiche sono causate dal calore fornito durante l'operazione di formatura del pezzo; il materiale di partenza è un polimero lineare in forma granulare. Quando viene fornito calore il materiale si ammorbidisce e può essere modellato; il riscaldamento continuo provoca la reticolazione del polimero. Nei sistemi attivati da catalizzatore, il cross-linking si verifica in caso di quantità minime di un catalizzatore che vengono aggiunte al polimero, che è in forma liquida. Senza il catalizzatore, il polimero rimane stabile; mentre una volta combinato con il catalizzatore, si trasforma in un solido.

Nei sistemi attivati dalla miscelazione, come accade per le epossidiche, la miscelazione di due sostanze chimiche provoca una reazione che forma un polimero solido reticolato. Il miscelamento può essere combinato con temperature elevate per accelerare le reazioni. Una volta che tali cross-link sono portati a completa formazione, il polimero risultante mantiene la forma solida assunta, se quindi si va a fornire ulteriore calore, non si può tornare allo stadio di partenza: la reazione di cura non può essere invertita. L'unico effetto a cui si assiste è una degradazione del polimero, al di sopra della temperatura consentita per l'esercizio. La reazione di polimerizzazione, che converte una resina liquida a basso peso molecolare in una struttura solida a rete tridimensionale, è una reazione esotermica: una volta che si avvia, essa si propaga facilmente. L'influenza della temperatura sulla polimerizzazione, come è stato illustrato, fornisce un altro pratico meccanismo di controllo della produzione e rappresenta un vantaggio in termini di scalabilità della produzione. Con questo processo è possibile legare fortemente e velocemente le fibre fra loro, ottenendo ottime proprietà in termini di resistenza e rigidità.

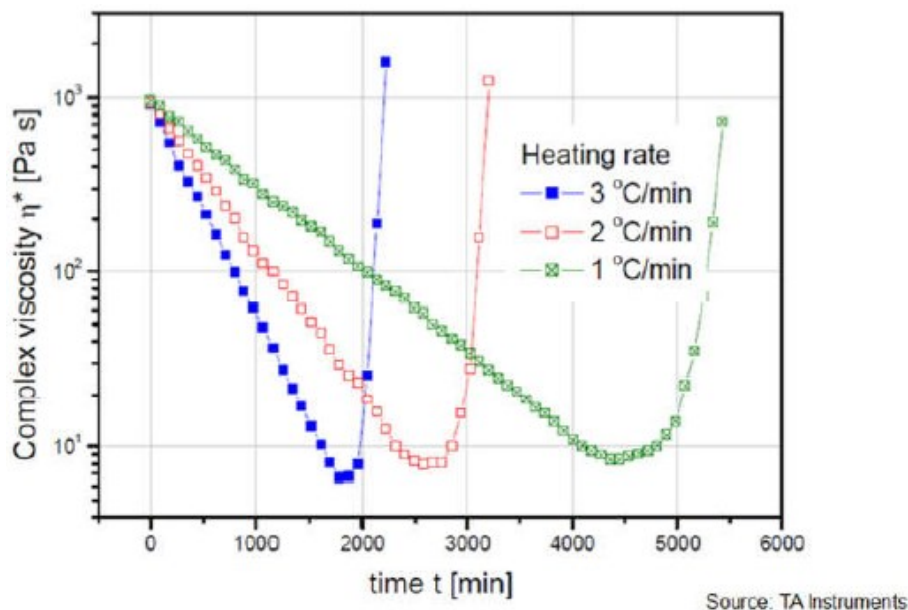


Figura 3 – Andamento della viscosità della matrice nella reazione di cura in funzione del tempo.

Durante la reazione di cura, si può notare (Figura 3) come la viscosità abbia una fase iniziale discendente dovuta alla fluidificazione che si ha in seguito all'aumento di temperatura e come, al raggiungimento della temperatura di cura, la viscosità inizi una rapida risalita dovuta alla reazione di reticolazione del polimero.

Il raggiungimento della temperatura di cura corrisponde in termini temporali al cosiddetto Gel Time, ovvero il momento in cui si forma un'unica molecola di peso molecolare uguale al peso del campione. Il gel time rappresenta un parametro molto importante dal punto di vista produttivo, infatti, in un qualsiasi processo di produzione, il flusso di resina deve completarsi prima del raggiungimento del gel time. Se ciò non dovesse accadere la resina potrebbe non riuscire a riempire lo stampo e potrebbero insorgere delle porosità dovute alla non corretta espulsione dell'aria dal flusso di resina. All'inizio della reazione di cura le resine si trovano in una condizione definita A-stage e solo pochi cross-links si sono formati, in questa condizione la reazione può essere rallentata tramite agenti esterni, ad esempio portando la resina ad una temperatura molto al di sotto della temperatura ambiente oppure aggiungendo degli inibitori di cura. A questo punto la reazione può cessare o proseguire ad una velocità molto bassa. Questa nuova condizione viene definita B-stage ed è caratterizzata da una viscosità maggiore dello stadio iniziale, la resina ha una consistenza simile al gel ed ha un elevato Tack, dove il tack è l'indice di adesività della resina. La condizione B-stage permette di mantenere la resina per diversi mesi senza che la reazione di cura avanzi troppo mantenendola in un freezer a basse temperature (-18÷-20°C). La reazione di cura potrà essere completata successivamente portando la resina ad un'appropriata temperatura di cura (C-stage). I processi produttivi che prevedono l'utilizzo di materiali compositi preimpregnati (Prepreg) come il bag-molding o il compression molding utilizzano resine B-stage mantenute a basse temperature e pronte per essere curate durante il processo stesso [2]. I compositi a matrice termoindurente possono essere distinti in base alla tipologia di matrice utilizzata: resine poliesteri insature, epossidiche e le resine fenoliche; le più utilizzate per applicazioni ad alte prestazioni sono le epossidiche, che in virtù del loro elevato grado di reticolazione assicurano elevate proprietà meccaniche, resistenza ad agenti chimici e solventi, e capacità di mantenere alte performance anche ad elevate temperature. Garantiscono inoltre eccellente adesione con qualsiasi tipo di fibra. Le caratteristiche salienti delle matrici termoindurenti sono le seguenti: una elevata reticolazione, elevata formazione in sede di cura di forti legami covalenti fra le varie catene polimeriche, la parte formata diventa così un'unica macromolecola; una resa migliore ad elevate temperature di servizio rispetto alle resine termoplastiche, che non formano legami covalenti in sede di riscaldamento fra catene polimeriche, ma legami chimici molto più deboli; una maggiore rigidità: il modulo di elasticità è da due a tre volte maggiore dei termoplastici; una certa fragilità, praticamente non presentano nessuna duttilità; una minore solubilità dei termoplastici nei comuni solventi.

In definitiva, i vantaggi delle resine termoindurenti sono i seguenti: un'elevata stabilità termica e rigidità, grazie ai forti legami covalenti, un'elevata stampabilità dimensionale, resistenza al creep e alla deformazione sotto carico, un basso peso ed elevate proprietà di isolamento elettrico e termico [2]. Come discusso in precedenza, i compositi epossidici termoindurenti sono materiali ad alte prestazioni con significative applicazioni industriali. Tuttavia, la possibilità di riciclare tali resine e i loro materiali di riempimento è un processo molto impegnativo e finora è stato precluso per motivi di non convenienza economica. In tempi più recenti, sono state condotte importanti attività di ricerca e sviluppo per porre le basi per un possibile e vantaggioso riciclaggio dei termoindurenti, consentendo in tal modo la decomposizione e la riformazione della plastica. Ci sono alcuni nuovi sviluppi in termoindurenti epossidici che possono essere riciclati in una certa misura, ma la loro importanza commerciale non è stata ancora sfruttata completamente. Inoltre, i progressi nei sistemi di resine termoindurenti a base biologica hanno attirato un'attenzione significativa visti i loro benefici ambientali. Alcuni dei termoindurenti di origine biologica che vale la pena menzionare sono: resine a base di olio naturale (soia, semi di lino, ricino), a base di isosorbide, sistemi epossidici a base di furano, epossidici fenolici e polifenolici, gomma naturale epossidata, derivati epossidici della lignina, resine a base di colofonia.

## 1.2.2 Le Matrici Termoplastiche.

Dall'esperienza è risultato evidente che le resine termoindurenti non potevano essere fuse nuovamente ma ad alte temperature vanno incontro a degrado e successiva combustione. A differenza di queste, le matrici termoplastiche possono essere riformate. Ciò consente di realizzare un minore impatto ambientale grazie all'allungamento della cosiddetta "shelf life", con la possibilità di riciclare il materiale e al contempo ottenere benefici in termini di velocità del processo produttivo, di malleabilità e quindi di economia e produttività del ciclo [2]. Le matrici termoplastiche sono solide a temperatura ambiente, se riscaldate a poche centinaia di gradi diventano dei liquidi viscosi a cui si può imporre la forma desiderata, prima di raffreddarle e portarle nuovamente allo stato solido. La struttura non reticolata dei termoplastici li rende in generale molto più tenaci dei termoindurenti e questa caratteristica si riflette sui corrispondenti compositi; questo aspetto fa sì che essi stia

riscuotendo, ultimamente, un crescente interesse da parte del mercato. I termoplastici, peraltro, non presentano solitamente problemi di emissioni nocive in corso di lavorazione, non richiedono particolari modalità o limitazioni di conservazione in magazzino e presentano assorbimento di umidità ridotto. Alcune matrici termoplastiche, soprattutto amorfe, mostrano suscettibilità a cracking per effetto di solventi organici (in particolare clorurati) che possono degradarne fortemente le caratteristiche. Le matrici semicristalline possiedono cristallinità del 25-35 % (ad es. PEEK) o superiori (ad es. PPS). Una maggiore frazione cristallina comporta superiore resistenza, resistenza a creep, modulo elastico, densità, resistenza a solventi, ma solitamente minore tenacità. In definitiva, la caratteristica peculiare delle resine termoplastiche è l'assenza di cross-link, ossia forti legami covalenti, fra catene polimeriche, ma semplici e deboli legami chimici fra queste che è possibile rompere e ri-formare con relativa facilità, questa caratteristica risulta essere la chiave della reversibilità e sostenibilità di tale materiale: il calore applicato modifica facilmente la forma delle catene polimeriche. Alla classe dei tecnopolimeri appartengono il PEEK ed il PEI, che rinforzati principalmente con fibre di carbonio, vengono applicati in campi industriali in cui resistenza ad alte temperature ( $>150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), a shock termici e ad usura rappresentano una necessità. I principali settori di applicazione sono aeronautico, meccanico, automobilistico o nel campo delle "home appliance", in quanto uniscono all'ottima resistenza agli agenti atmosferici e chimici una buona resistenza meccanica. Sono normalmente prodotti tramite la tecnologia dello stampaggio ad iniezione e possono assumere le forme più svariate anche se si cerca di evitare la presenza di sottosquadri. Per applicazioni ad alto valore aggiunto si utilizza anche il più costoso processo di lavorazione in autoclave principalmente per la trasformazione dei tecnopolimeri.

### 1.2.3 Le fibre di rinforzo.

La fibra è la fase di rinforzo presente in materiale composito PMC. Affinchè il rinforzo venga messo in condizione di gestire i carichi efficientemente il rapporto tra il modulo longitudinale della fibra e quello della matrice deve essere maggiore di 4, il che significa che il rinforzo deve avere un modulo almeno 4 volte maggiore della matrice in cui è disperso [2].

Nel campo dei compositi, sono essenzialmente quattro le tipologie di rinforzo maggiormente impiegate: fibre polimeriche, fibre di carbonio, fibre inorganiche e fibre organiche (naturali). Le fibre polimeriche permettono di realizzare compositi con oneste prestazioni meccaniche (anche se non paragonabili a quelle dei CFRP), si possono menzionare ad esempio i compositi in fibra aramidica che vengono impiegati in applicazioni di isolamento termico o di protezione balistica (ad esempio il Kevlar®). Tra i compositi a fibra aramidica quello col maggior modulo a trazione è il Kevlar 149 [3] che può arrivare fino a 180 GPa. Tra le fibre inorganiche, si possono menzionare la fibra di vetro, l'allumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), e il boro. Tra tutti i rinforzi che sono impiegati nel settore dei materiali compositi, senza dubbio le fibre che vanno per la maggiore sono quelle di vetro, il motivo di tale successo è che possono essere reperite con estrema facilità e costi ridotti, ma riescono comunque ad assicurare proprietà meccaniche comunque buone, che consentono a tale materiale di prestarsi a una variegata gamma di impieghi in tanti settori. Nel caso più standard sono contraddistinte come E-Glass, mentre nella versione più prestante come S-Glass. Esistono inoltre moltissime altre forme come il C-glass con un'elevata resistenza agli agenti chimici o l'M-glass ad elevato modulo elastico. I compositi in fibra di vetro vengono largamente utilizzati nelle costruzioni nautiche e delle energie rinnovabili, ad esempio il settore eolico. È stato riscontrato che, nell'ambito dei rinforzi, le fibre naturali stanno attirando massimamente l'attenzione degli stakeholders, per le loro natura intrinsecamente rinnovabile e sostenibile, e ciò ben si concilia con le future crescenti dinamiche di economia circolare, la cui implementazione è interesse della Comunità Europea, che si propone di imporre stringenti normative ambientali in tal senso. Le fibre naturali possono essere di origine animale, vegetale o minerale [2], in genere quelle che vengono preferite in applicazioni sui compositi sono le fibre di origine vegetale. I punti di forza di questo materiale sono il basso costo, l'elevata facilità con cui si può reperire, la densità paragonabile alla fibra di carbonio ed ovviamente la sua natura biodegradabile e riciclabile, a differenza della fibra di carbonio che è molto impattante dal punto di vista ambientale in tutte le fasi del suo ciclo di vita, dalla produzione fino al suo difficile smaltimento. Queste ragioni hanno. Per contro, i punti maggiormente a suo sfavore rispetto ad altre soluzioni sono una forte variazione delle proprietà tra le varie tipologie di fibre naturali, una spiccata idrofilia e delle proprietà meccaniche in valore assoluto più basse se raffrontate con quelle delle fibre non naturali.

Tra le fibre naturali più utilizzate si trovano il Sisal [2], derivato dalla pianta dell'Agave, con moduli che possono raggiungere circa 30GPa; la fibra di canapa, con moduli che possono arrivare intorno ai 10 GPa, che viene già impiegata nella costruzione di pannellistica interna nel settore automotive premium, e la fibra di lino che trova sovente impiego in maniera efficiente nella realizzazione di sistemi atti allo smorzamento delle vibrazioni. In generale. Come è facilmente prevedibile, oltre ai già citati benefici in termini ambientali, le fibre di origine naturale hanno un costo di gran lunga minore rispetto ad altre tipologie di fibre, ad esempio il costo del Sisal risulta essere circa un decimo delle fibre di vetro ed un millesimo delle fibre di carbonio. Tuttavia risulta molto difficile operare una generalizzazione dal momento che alcune tipologie di fibre naturali, di buon pregio e resa meccanica, possono essere una materia prima ben più onerosa di una comune fibra di carbonio. Queste ultime sono le fibre per antonomasia, quelle che più di tutte hanno trovato un vantaggioso impiego nei compositi ad alte prestazioni. Sono state utilizzate per la prima volta da Thomas Edison nel 1879 come filamento per la prima lampadina e sono state messe in commercio nel 1960 grazie al lavoro di ricerca svolto da Bacon e Singer negli Stati Uniti e Watt nel regno Unito [3]. Esse trovano largo impiego specialmente in quelle destinazioni d'uso e categorie industriali dove il problema del costo è molto più relativo che altrove, dove quindi è più importante la qualità delle materie prime che il loro costo, come il settore aerospaziale e automobilistico (specialmente nell'ambito racing e sportivo) e civile, dove ancora i componenti vengono sottoposti a condizioni di impiego estremamente gravose. Questo è dovuto alle straordinarie prestazioni meccaniche che assicurano, quali resistenza e modulo elevatissimi, basso coefficiente di dilatazione termica ed alta resistenza a fatica. Se si considera che queste spiccate performance realizzate fanno il paio con un grado di densità molto basso, è facilmente immaginabile che i compositi CFRP riescano a raggiungere un elevatissimo rapporto tra proprietà e prestazioni meccaniche e il loro peso, rendendoli fortemente appetibili per i settori precedentemente citati. Le fibre di carbonio possono essere classificate in ex-PAN (Poliacrilonitrile) o ex-Pitch (pece), la classificazione è stata impostata in tal senso in base alla natura del precursore che è stato sfruttato per poter ottenere quel prodotto finito. Le fibre ex-PAN possono essere classificate sul mercato in 4 diverse varietà [2] [3]:

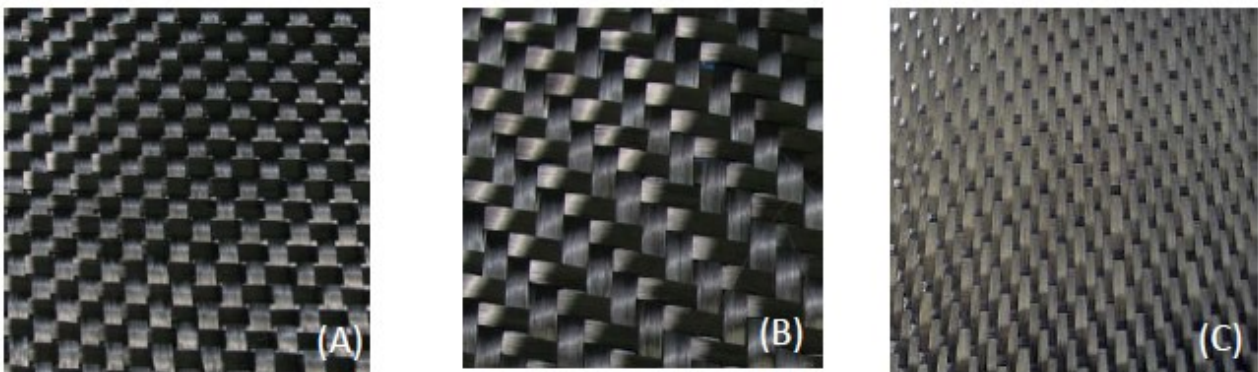
- HT (high strength): resistenza alla rottura maggiore di 3 GPa;
- HM (high modulus): modulo maggiore di 300 GPa;

- IM (intermediate modulus): modulo fino a 300 GPa;
- UHM (ultrahigh modulus): modulo maggiore di 500 GPa

È stato osservato che, complessivamente, i prodotti ex-PAN hanno un modulo minore di quelle ex-Pitch, ma evidenziano una più grande resistenza e sono quelle che vengono impiegate nel 90% dei casi. Le fibre di carbonio sono disponibili in diverse dimensioni dei tow (fascio costituito da un numero elevato di filamenti non sottoposti a torsione), andando da 1000 fino a 50000 filamenti per tow. I principali controvalori associati alle fibre di carbonio sono un'elevata fragilità delle fibre, un basso allungamento a rottura, una ridotta resistenza agli urti ed un costo molto elevato, che ha precluso il loro impiego in quei settori laddove il value-for-money è un aspetto predominante e vincolante in ambito produttivo, progettuale e per quanto riguarda la collocazione sul mercato del prodotto finito. Per una trattazione più completa dell'argomento relativo alle fibre, è necessario menzionare una ulteriore ed importante possibilità di distinzione delle fibre in lunghe e corte. Per comprendere appieno la questione, è necessario ricordare quanto appreso dallo studio del materiale composito, cioè che un fattore determinante che gioca un ruolo chiave nella buona riuscita del composito in termini prestazionali è l'efficienza della distribuzione degli sforzi fra le due fasi, più questa risulta migliore, tanto migliori saranno le proprietà meccaniche risultanti del materiale. Quindi è inevitabile che tanto più la superficie di contatto fra le fasi è estesa, tanto migliore risulta il trasferimento degli sforzi. Da questo si può intuire come i compositi con rinforzi fibrosi a fibra lunga risultino quelli più prestazionali. Per ottenere le fibre corte, si procede mediante taglio o triturazione delle fibre lunghe e la loro lunghezza può variare da qualche millimetro a centinaia di millimetri, a differenza delle fibre lunghe, la cui estensione può raggiungere la lunghezza del componente che contribuiscono a formare. Le fibre corte sono il rinforzo più impiegato nelle lavorazioni per stampaggio, come ad esempio l'injection e il compression molding. Le proprietà e le prestazioni meccaniche conseguibili mediante l'uso di composito a fibra corta risultano quasi isotrope, ovvero ortotrope se si ragiona in base al piano, per via della distribuzione randomica delle fibre che rinforzano la matrice. Le fibre lunghe invece sono quelle che vengono preferite in quei casi in cui il manufatto finale richiede maggiori prestazioni meccaniche. Sono largamente sfruttati per processi di laminazione, come il bag molding e all'interno di compositi preimpregnati, ma è possibile riscontrare un loro efficace impiego anche per quanto riguarda la produzione di fibra secca, riservata ad ulteriori trattamenti produttivi successivi.



Le fibre lunghe possono essere utilizzate per ottenere laminati unidirezionali (UD) in cui tutte le fibre sono orientate nella stessa direzione, oppure per prendere parte ad architetture 2D (woven, knitted e braided fabric) [2]. In tal modo è possibile ottenere un prodotto finito dalle migliori performance di resistenza meccanica in senso trasversale, poiché avendo fibre continue disposte secondo un certo numero di orientazioni, è possibile conseguire performance migliori se il carico che sollecita il componente arriva da una direzione differente della longitudinale, ma così si vanno a determinare, giocoforza, peggiori performance se il carico è unidirezionale. Considerando l'analisi fatta, è possibile affermare con certezza che le performance meccaniche del materiale composito a fibra lunga sono fortemente anisotrope. I tessuti 2D Woven fabric sono realizzati intrecciando i fili di trama e ordito in un telaio apposito, analogo a quello che viene impiegato nella industria tessile dell'abbigliamento. In questa realizzazione, quella che è chiamata trama è rappresentata dai fili orientati lungo la direzione della macchina mentre l'ordito è composto dai filamenti di fibra che vengono intrecciati in direzione normale a quella della macchina.



*Figura 4 - Tipologie di tessuti.*

I tipi di tessuto maggiormente utilizzati sono mostrati nella Fig. 3 e sono [2] [3]:

- Plain weave: ogni filo di ordito passa una volta sopra ed una volta sotto ai fili della trama;
- Twill weave: uno o più fili di trama si intrecciano con uno o più fili di ordito;

- Satin weave: simile al twill ma gli intrecci sono più distanziati, il numero di volte in cui l'ordito passa sopra e sotto la trama di solito è 4, 5 o 8;
- Basket weave: simile al plain ma con gruppi di due o più fili di trama e ordito che si intrecciano alternativamente;

Delle ulteriori caratteristiche che val la pena menzionare nella trattazione della manifattura dei materiali compositi sono la drappabilità (ovvero la capacità del materiale fibroso di aderire ottimamente ed efficientemente alle pareti dello stampo), la stabilità (che è un indicatore dello spostamento della fibra in sede di flusso della matrice), e la porosità del composito (indicatore del contenuto di vuoti nel materiale); tutte queste proprietà differenti sono tutte fortemente influenzate dalla tipologia di rinforzo impiegato. Da una analisi approfondita dei differenti lay-out delle fibre di rinforzo, si può notare facilmente che il tipo di tessuto denominato plain ha un numero più elevato di intrecci e che quindi sarà maggiormente stabile e consigliato per i processi a fibra secca. I satin e twill sono più flessibili, duttili e quindi sono meglio indicati per andare ad essere impiegate in sede di stampaggio quando le forme da realizzare sono molto complesse, e sono quindi maggiormente utilizzati nei processi di bag molding.

## 2 Lo Stampaggio a compressione.

Il "Compression Molding" o stampaggio a compressione rappresenta nell'ambito dell'industria dei materiali compositi uno dei processi che più vengono efficientemente sfruttati per la realizzazione di manufatti in composito. Ma soprattutto, la frequenza e l'intensità con cui si fa ricorso a tale procedura manifatturiera è cresciuto in maniera importante a partire dal momento in cui ha iniziato a prendere piede nell'ambito della realizzazione di prodotti plastici dedicati all'industria automobilistica di massa. [4]

L'aspetto di importanza determinante che ne ha consentito un utilizzo sempre più esteso è la possibilità, che assicura, di produrre parti in forma anche piuttosto complessa, impiegando un tempo di realizzazione tutto sommato modesto, se raffrontato con quello che occorre per lavorare parti metalliche in sede di stampaggio. Grazie a questo processo è possibile e facile realizzare anche delle parti stampate che presentano una distribuzione dello spessore anche non uniforme, in tal modo è permesso prevedere di includere all'interno del componente stampato delle costolature di rinforzo, flange e fori, in modo tale da riuscire a rendere non più necessari ed eliminabili tutta una serie di trattamenti secondari, come le forature e le lavorazioni a mezzo di macchine utensili; in tal modo è possibile perseguire obiettivi importanti in termini di razionalizzazione del processo costruttivo, riducendo la forza lavoro necessaria, i costi in genere, il tempo sprecato e di conseguenza il dispendio energetico, incrementando di rimando anche la produttività. In sostanza, lo stampaggio a compressione può essere ritenuto il procedimento principale dedicato alla costruzione di uno svariato numero di componenti nell'ambito del settore automobilistico e non solo, come cerchi, paraurti e parti di carrozzeria. Il processo consta di una serie di passaggi (Figura 4), il primo su tutti consiste nel procedere al posizionamento all'interno del volume di uno stampo di una determinata quantità di materiale, per poi riuscire ad ottenere la conformazione desiderata del componente stampato, che è possibile ottenere mediante l'applicazione di una certa pressione e temperatura con l'ausilio di una pressa idraulica.

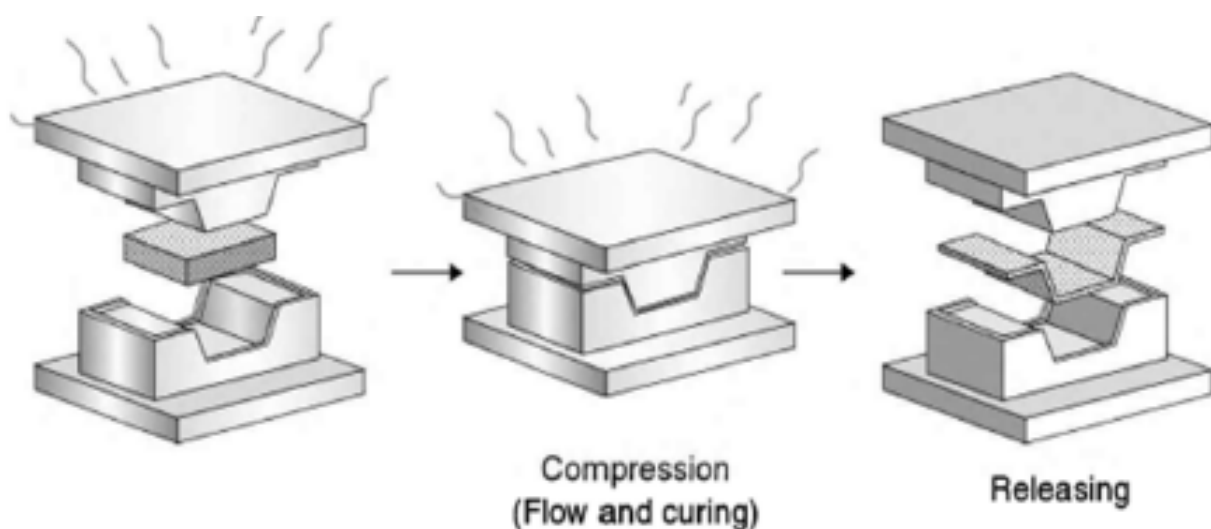


Figura 5 – Fasi del Compression Molding

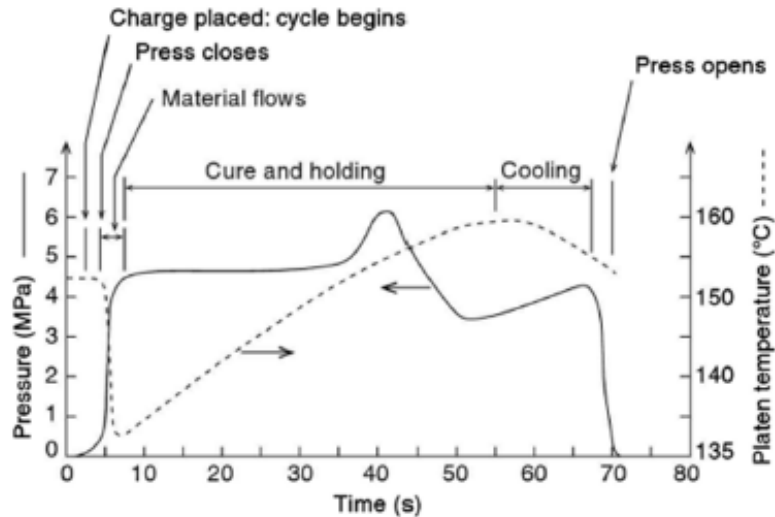


Figura 5 - Fasi del processo di "Curing"

Le fasi secondo cui si articola il procedimento sono essenzialmente quattro, come riportato in Figura 5:

1) Preparazione e piazzamento della carica: dopo aver posizionato sulla sua superficie una certa quantità di agente distaccante, nella cavità dello stampo viene posizionato il materiale da stampare nelle modalità e nelle quantità opportune; a tal punto lo stampo viene riscaldato con temperature che sono funzione della tipologia di matrice, ma generalmente si può osservare come siano variabili in un range che si articola tra i 130 e i 170°C [3]. Quello che è l'obiettivo del riscaldamento dello stampo e pertanto il driver secondo cui viene stabilita la temperatura operativa, è che il sistema di resina fluidifichi correttamente e fluisca in modo efficace nello stampo, riuscendo la sua viscosità a diminuire secondo i parametri di progetto in sede di cura, in modo tale da riuscire ad impregnare il rinforzo in maniera quanto più importante possibile. Però d'altra parte occorre porre grande attenzione, nell'eventualità in cui il processo di stampaggio a compressione venga eseguito su una resina termoindurente, affinché la temperatura operativa non risulti essere troppo importante, o si rischierebbe di far iniziare precocemente la reazione di cura, con conseguente compromissione irrimediabile dell'intero procedimento. Nello stampo, la carica viene disposta in maniera tale affinché la copertura della superficie dello stampo sia prossima al valore del 50-90%, questo range di valori dipende essenzialmente dalla tipologia di sistema di resina impiegato, e quindi dalla sua curva di viscosità in sede di cura.

Il posizionamento stesso della carica ha un ruolo di essenziale importanza nella efficace costruzione di parti in forme complesse in quanto va a determinare la direzione del flusso di resina, l'orientazione finale della fibra, la presenza di eventuali linee di saldatura (date dall'incontro di due o più fronti di avanzamento del polimero fuso) e la presenza di vuoti nel manufatto.

2) Chiusura dello stampo: Lo stampo viene chiuso, così da riuscire ad imprimere successivamente una elevata pressione e far sì che il polimero disciolto vada a ricoprire ottimamente la superficie di stampaggio. Le pressioni che vengono applicate possono variare in un range compreso fra 1.5 a 35 MPa o da 30 a 150 Bar [3] [5]. In questa fase è importante che i parametri di processo siano settati in funzione della tipologia di materiale utilizzato come carica. Durante il processo del compression molding, esistono una serie di parametri di processo sui quali è necessario agire per controllare la buona riuscita dell'operazione:

- Temperatura dello stampo
- Pressione applicata
- Velocità di pressata

Quando si lavora con resine termoindurenti, è opportuno far sì che tali parametri siano settati in maniera tale da avere la massima pressione di stampaggio nel momento in cui si ha il minimo della funzione viscosità del sistema di resina, in questo modo essa potrà fluire in modo perfetto. Inoltre, occorre mantenere un equilibrio termico molto delicato, in modo tale che la temperatura non cresca troppo, per non incorrere nel rischio di aver un inizio troppo repentino della reazione di polimerizzazione, ed inoltre la velocità con cui si va a eseguire la pressata non deve essere troppo alta perché è opportuno che la pressata non inizi ad agire quando la viscosità è ancora troppo elevata. Infatti, dall'analisi grafica della curva di viscosità, si può osservare che essa inizialmente diminuisce con l'aumentare della temperatura, fino al raggiungimento del cosiddetto gel time, corrispondente al punto di minimo della funzione viscosità, in cui può dirsi iniziata la reazione di polimerizzazione.

Pertanto è molto importante assicurare che, una volta raggiunto tale stadio, lo stampo dovrebbe essere già completamente chiuso, perché in caso contrario un aumento di viscosità troppo repentino risulterebbe indesiderato, in quanto porterebbe il materiale a non fluire in maniera corretta nello stampo, e si otterrebbero così dei prodotti finiti deficitari e da scartare, perché non completamente formati e ricchi di porosità, e quindi proprietà meccaniche compromesse del tutto. Da quanto è stato detto è possibile farsi un'idea chiara di quanto il flusso di resina sia determinante per la buona riuscita del processo e quindi fondamentale per ottenere manufatti di qualità, infatti il flusso non solo serve a riempire lo stampo ma ha anche lo scopo di espellere le bolle d'aria e le sostanze volatili. Se la velocità di pressata fosse troppo elevata il flusso di resina potrebbe non essere in grado di svolgere l'essenziale funzione di espulsione delle bolle d'aria, causando porosità e quindi basse proprietà meccaniche del manufatto. È possibile predisporre e facilitare l'espulsione di aria e sostanze volatili adottando una serie di contromisure in sede di processo, a partire dalla predisposizione e la previsione nello stampo di appositi canali di evacuazione. Da quanto detto si evince che la fase di chiusura è sicuramente la fase più delicata di tutto il procedimento di produzione.

3) Fase di curing: In questa fase lo stampo si trova ad essere completamente chiuso, mentre la cavità dello stampo è completamente riempita e la pressione con cui lo stampo viene mantenuto chiuso è costante. La durata di questa fase è funzione essenzialmente del tipo di matrice, del suo ciclo di cura e dello spessore del componente da realizzare; nel corso di questo intervallo di tempo, la resina subisce lo sviluppo dei cross-link fra le catene polimeriche che la costituiscono e la parte viene consolidata, il tempo richiesto per il completamento della reazione di cura, fino a reticolazione completa, può richiedere dai 30 minuti alle 2 ore circa a seconda della temperatura dello stampo. Se si parla di compositi termoplastici, questa operazione costituisce la fase di consolidamento del materiale dopo che esso è stato raffreddato, infatti nei termoplastici non esiste una reazione di cura e di conseguenza i tempi di ciclo sono di gran lunga più bassi, arrivando anche a soli 2-3 minuti.

4) Apertura stampo ed estrazione: In questa fase, la parte viene tolta dallo stampo facendo uso di particolari sistemi di estrazione per consentire di portare a termine l'operazione senza danneggiamenti al componente appena formato.

A tal punto, la parte viene lasciata raffreddare completamente ed è pronta ad eventuali e successivi trattamenti di finitura di vario genere a macchine utensili. Una volta concluso il procedimento, lo stampo subisce un trattamento di pulizia e se si rivela necessario è possibile andare ad applicare un nuovo strato di agente distaccante così che, nel prossimo ciclo, l'estrazione possa avvenire correttamente. Per quanto riguarda il materiale di elezione con cui realizzare lo stampo, molto dipende dalla tipologia di composito che si andrà a lavorare, dalle caratteristiche meccaniche e di finitura superficiale che si desidera perseguire, dal costo che può essere ritenuto accettabile senza inficiare la redditività, ed infine dalla scalabilità del processo. In ogni caso, i materiali prediletti sono le leghe metalliche di acciaio o alluminio. Indubbiamente gli stampi realizzati in lega di alluminio consentono di avere una maggiore leggerezza, molto utile nel processo, e di ottenere ottimi livelli di finitura, ma in quelle operazioni di stampaggio che richiedono pressioni elevate, possono riportare ammaccature e cricche superficiali, e questo è un problema poiché pregiudica la riuscita di ulteriori processi di stampaggio successivi, comportando la necessità di una sostituzione prematura dello stampo. Per tutte quelle lavorazioni che comportino pressioni in gioco abbastanza importanti oppure materiale da stampare con caratteristiche particolari, come ad esempio il PPMC oggetto del presente studio, è più opportuno affidarsi all'acciaio, una soluzione sicuramente non all'avanguardia, particolarmente sofisticata o efficiente, ma di sicura e maggiore affidabilità. Un'ulteriore materiale per gli stampi, che vale la pena menzionare anche se non coinvolto in processi di stampaggio a compressione di tal sorta, risulta essere il materiale composito in fibra di carbonio, che si utilizza per lavorazioni in cui le proprietà meccaniche del prodotto finito sono di gran lunga più importanti del suo costo: infatti, a differenza delle leghe metalliche e come affermato in precedenza nella trattazione, il materiale composito ha un coefficiente di dilatazione termica ridottissimo, e questo è molto importante nei processi ad esempio in autoclave in cui si raggiungono temperature ragguardevoli, nell'evitare l'insorgere di tensioni residue nel prodotto finito. Quindi, nel caso in cui si scelga di utilizzare una lega metallica come materiale, è opportuno riservare allo stampo trattamenti termochimici di indurimento superficiale, proprio per contribuire a prevenire quei difetti che possono manifestarsi nelle forme di cui sopra. Nella fattispecie, si fa uso di trattamenti superficiali di placcatura in nickel o platino, al fine di diminuire l'attrito con la resina e migliorare il flusso del materiale fuso [3]. Nella progettazione dello stampo devono essere inoltre predisposti in sede di progettazione dello stampo i necessari raggi di raccordo tra stampo e controstampo e degli angoli di sformo minimi di 2-3° per agevolare la corretta espulsione del componente.

È prassi comune prevedere che i bordi esterni di stampo e controstampo su cui sono impostati gli angoli di sformo siano realizzati in modo tale da lasciare un piccolissimo gap alla chiusura, tale feritoia è stata approntata con lo scopo di agevolare l'espulsione dell'aria e delle sostanze volatili, nei casi in cui non sia possibile e conveniente andare a progettare veri e propri canali di espulsione di tali sostanze. La presenza del gap fa sì che nel prodotto finito sia presente un piccolo strato di resina, il quale produce una bava sul bordo esterno del manufatto, che verrà eliminata al termine della produzione, in sede di finitura. Ora, per riuscire a portare lo stampo fino al livello termico opportuno per poter cominciare il processo è possibile percorrere due strade. La prima, la più semplice, è quella che prevede di sfruttare il semplice meccanismo di trasmissione del calore per conduzione, sfruttando piastre riscaldate che trasferiscano in tal modo il calore alla superficie dello stampo. Questo è un metodo semplice e molto economico e facile da predisporre in sede produttiva, ma è molto lento, può richiedere delle tempistiche che dipendono molto dalla superficie a cui occorre andare a trasmettere il calore, dato che l'inerzia termica caratteristica dello stampo stesso renderà molto più lunghi i tempi di riscaldamento e raffreddamento. Una seconda possibilità è quella di predisporre nello stampo opportuni canali adibiti al transito di olio diatermico o vapore ad alta temperatura. Allo stesso modo, sfruttando questo meccanismo di scambio termico, si può pensare di impostare la fase successiva di raffreddamento dello stampo, permettendo il transito in canali analoghi ad acqua od aria fresca, così da smaltire il calore in eccesso. La seconda possibilità è nettamente più onerosa necessita dell'aggiunta di ulteriori lavorazioni, necessarie per la realizzazione dello stampo e ne aumenta la complessità. Poiché l'obiettivo ultimo è quello di garantire la massima uniformità nella distribuzione del calore, è necessario che tali canali vengano spazati adeguatamente in modo tale da poter svolgere adeguatamente questa importante funzione di gestione termica. Inoltre, in presenza di stampi con diverso spessore può essere necessario riposizionare i condotti preposti allo scambio termico, andando a discostarli opportunamente dalle pareti meno spesse ed avvicinandoli a quelle più spesse. Dal momento che il processo di polimerizzazione è per definizione una reazione esotermica, è necessario porre particolare attenzione alla scelta degli spessori in sede di progettazione dello stampo.



In presenza di parti troppo spesse infatti la grande inerzia termica dello stampo, combinata con l'emissione di calore dovuta alla reazione può far sì che la temperatura raggiunga e superi anche i 200°C localmente, andando a danneggiare per combustione o degradazione la resina. Un esempio di componente realizzato in materiale composito mediante Stampaggio a Compressione è riportato in Figura 6.



*Figura 6 - Componente realizzato con la tecnica dello stampaggio a compressione.*

## 2.1 Sheet Molding Compound.

Nell'ambito della industria del PMC e CFRP, il processo produttivo dello compression molding trova largo utilizzo per varie ragioni di produttività e convenienza economica, permettendo di produrre compositi di buone proprietà meccaniche; il materiale di partenza, che rappresenta la carica, viene inserita nella cavità di stampaggio in forma di SMC (sheet molding compound) o BMC (Bulk molding compound). Il presente studio si focalizzerà maggiormente sullo SMC, quale processo molto più interessante in tale ambito. In letteratura, SMC è un termine generico che designa manufatti in composito. È industrialmente redditizio per la produzione di volumi medi. I compositi in SMC includono fibre corte, cioè discontinue, nella fattispecie fibre o fasci di fibre che vengono impregnati tra due strati di una resina. Per perseguire tale procedimento realizzativo, è industrialmente possibile servirsi di differenti tipologie di rinforzo: si può far uso di fibre di vetro, che sono le più comuni, fasci di fibre di carbonio, fibre a base vegetale o sistemi di fibre ibridi, composti da fibre di varia natura. La lunghezza tipica del rinforzo è compresa fra i circa 25 e un massimo di 50 mm. La frazione di volume del rinforzo fibroso varia tra il 10% e il 65%. La matrice impiegata nel composito consiste di una miscela di resina termoindurente (di solito poliestere anche vinilestere ed epossidica), riempitivi (carbonato di calcio, allumina ecc.), e additivi come iniziatori, inibitori, addensanti, agenti di rilascio dello stampo e additivi a basso profilo (LPA). La resina viene addensata prima dello stampaggio: la sua viscosità viene aumentata in modo che l'SMC sia un materiale "simile allo stucco". [6] Questo è un punto fondamentale per comprendere appieno il concetto di base che c'è dietro la tecnologia SMC, che permette ai fogli di essere facilmente maneggiabili e che la matrice possa scivolare le fibre, per un'ottima bagnabilità e adesione al rinforzo durante lo stampaggio a compressione. Il processo di "compounding" è un'operazione continuativa in cui si possono classicamente distinguere diverse fasi (Figura 6). I componenti della "pasta" che andranno a comporre la matrice vengono prima mescolati insieme. In seguito, le fibre discontinue vengono distribuite sullo strato di matrice. Questa operazione forma una sorta di "letto" asciutto, chiamato anche "mat", composto di fibre che viene successivamente inserito tra un'altra pellicola di supporto e uno strato di matrice. Infine, il rotolo di composito risultante è sottoposto a una fase di maturazione per un periodo di tempo che va da poche ore a diversi giorni.

Durante il compounding, la viscosità della matrice viene mantenuta bassa per facilitare l'impregnazione del letto di fibre, ma tuttavia viene mantenuta abbastanza alta da permettere al foglio di essere avvolto a formare un rotolo, facendo in modo che la resina non coli fuori dal letto di fibre durante questa fase di maturazione.

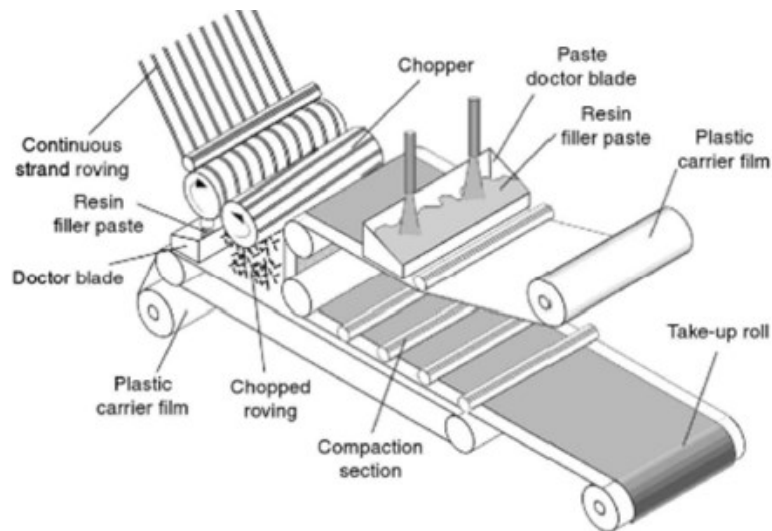


Figura 6 – Linea di produzione dello “Sheet Molding Compound”

Alla fine della maturazione, la viscosità del composito è aumentata a sufficienza in modo che esso risulti facilmente maneggiabile e ha una viscosità sufficientemente bassa per essere malleabile e facilmente modellabile. In definitiva, si possono identificare tre differenti categorie di compositi SMC, in base a come sono state orientate le fibre all'interno della matrice [3] [4], riportate in Figura 7:

- SMC-R: costituiti da fibre corte orientate in modo randomico nel piano. La lunghezza delle fibre varia dai 10 ai 50mm in base all'applicazione.
- SMC-C: in tal caso vengono impiegate fibre più o meno lunghe e sono orientate in una particolare direzione.
- SMC-CR: trovano applicazione fibre corte orientate in modo casuale, che vengono abbinate a delle fibre continue orientate in una determinata direzione al fine di incrementare le proprietà meccaniche.

- XMC: le fibre continue in questo caso sono incrociate ed accoppiate con le fibre corte con direzione random

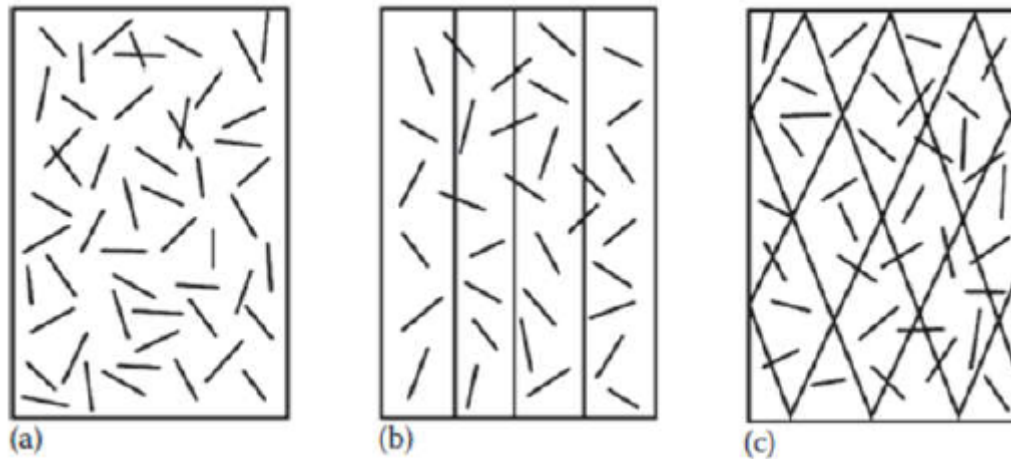


Figura 7 - Categorie di compositi SMC.

In sede di chiusura dello stampo, si possono osservare due fasi principali. In primo luogo, la fase di riempimento dello stampo induce complessi fenomeni di flusso della carica SMC in combinazione con fenomeni di trasferimento di calore. I meccanismi principali del flusso in un composito SMC sono il flusso a tappo e il flusso preferenziale, che si verifica all'interfaccia carica-stampo interfaccia della superficie dello stampo. Ciò differenzia questo processo di formatura dalle tecniche di stampaggio a iniezione, dove solitamente si osserva un flusso a fontana. Tale flusso condiziona ovviamente l'orientamento del rinforzo fibroso. Il riempimento dello stampo dura circa 1-10 s a seconda della forma della parte stampata. La solidificazione avviene a seguito della formazione di cross-link nella resina termoindurente, mantenuta sotto alta pressione. Questo è un fenomeno che spesso è attivato termicamente, è indotto dalla temperatura dello stampo, che viene innalzata mediante opportuni sistemi di scambio termico, ed una volta attivata, la reazione di indurimento è esotermica. I cicli di polimerizzazione variano da meno di 1 minuto a circa 5 minuti a seconda dal polimero termoindurente utilizzato e dallo spessore caratteristico della parte. Poi, lo stampo viene aperto ed il pezzo viene rimosso. L'operazione di finitura può quindi essere eseguita. Le prime applicazioni di SMC possono essere trovate nei mercati europei e giapponese sin dagli anni '60 [6].

Gli SMC sono stati introdotti nel mercato statunitense nel 1965. Oggi, sono utilizzati in tutto il mondo e rappresentano una parte importante dei compositi termoindurenti del mondo. A livello globale, lo stampaggio a compressione di SMC è la terza tecnica più intensamente utilizzata per la produzione di parti in composito polimerico in tutto il mondo (dietro l'iniezione di termoplastici rinforzati e le tecniche di lay-up manuale). Rappresenta circa il "15% del totale dei pezzi prodotti e del totale dei materiali usati dall'industria dei compositi" [6]. C'è una grande diversità di campi di applicazione per SMC: l'industria automobilistica e quella degli autocarri rimangono i motori della tecnologia SMC, ma gli SMC sono comunemente usati in agricolo, ferroviario e marittimo (parti interne e di carrozzeria, parti di moto d'acqua, ecc.), elettrico (sistemi energetici a bassa e media tensione) ed energia (parti per turbine eoliche e solari, ecc.), sanitari, elettrodomestici, e medico. Nell'industria automobilistica e dei camion, le parti SMC sono utilizzate in particolare nei pannelli della carrozzeria esterna e interna. I compositi in SMC sono materiali molto versatili, la loro formulazione può essere adattata e personalizzata per soddisfare i requisiti di una vasta gamma di applicazioni. Lo stampaggio a compressione di SMC permette l'elaborazione di forme complesse e grandi in un tempo di ciclo rapido. Caratteristiche come inserti, nervature, borchie e attacchi possono essere stampati. Questo processo richiede una ridotta preparazione dello stampo e genera pochi scarti, riducendo così il costo delle operazioni di rifilatura. Si possono ottenere buone finiture superficiali, contribuendo a ridurre i costi di finitura dei pezzi, inoltre questo processo può essere all'occorrenza automatizzato [6]. Per contro, i prodotti ottenuti per compression molding di SMC possono contenere una gran quantità di difetti interni e superficiali, se non si agisce adeguatamente sui parametri di processo. Nel caso di difetti superficiali il componente potrebbe essere considerato scarto per la bassa finitura superficiale e la bassa qualità estetica, mentre nel caso di difetti interni le proprietà meccaniche del componente vengono irrimediabilmente compromesse, in quanto non conformi agli standard produttivi. Il compounding è la prima fase della lavorazione SMC. Consiste nella fabbricazione di semiprodotto, cioè sottili fogli continui spessi  $\approx 1-3$  mm costituiti da matrice non polimerizzata e addensata all'interno della quale il rinforzo fibroso è disperso e impregnato. Una linea di produzione di Sheet Molding Compound è generalmente composta da tre unità: l'unità di miscelazione della matrice con le sostanze aggiunte, la macchina dove il rinforzo fibroso viene tagliato (in caso di fibre continue o fasci di fibre) e impregnato di pasta per formare i fogli, e l'unità di maturazione. Una volta che la viscosità della matrice è tale da raggiungere il plateau, l'SMC può essere modellato a compressione in uno stampo caldo.

Sono necessarie diverse operazioni successive per lo stampaggio a compressione, che rappresenta il secondo e fondamentale passaggio del processo. In primo luogo, diversi fogli o cariche sono tagliati, e il film che svolge la funzione di compattazione e protezione del materiale viene rimosso, e gli strati di carica sono poi impilate insieme. La superficie delle cariche impilate occupa di solito il 30-70% della superficie dello stampo, e occorre porre particolare attenzione nel tagliare, intrecciare e pesare i ply secondo la forma e il peso prescritti. È anche importante notare che l'impilamento dei ply può indurre intrappolamenti d'aria: se essa non viene correttamente evacuata durante lo stampaggio a compressione, l'aria intrappolata può essere una possibile fonte di porosità residua e sfavorevole nelle parti prodotte, il che rappresenta da sempre uno dei punti deboli di tale processo produttivo, anche se gli ultimi miglioramenti apportati forniscono gli strumenti per rendere sempre migliore la riuscita delle operazioni. Le cariche impilate, inizialmente e solitamente a temperatura ambiente, vengono poi posizionate sulla parte inferiore dello stampo riscaldato a compressione (130-160°C, a seconda della resina da polimerizzare). In terzo luogo, lo stampo riscaldato viene progressivamente chiuso alla tipica velocità di chiusura che di solito varia tra 1 e 10 mm/s. [6] Durante la chiusura dello stampo (durata: 1-10 s), le cariche SMC cariche sono continuamente riscaldate e costrette a fluire all'interno la cavità dello stampo. I meccanismi di flusso che si verificano durante questa fase sono strettamente legati alla reologia e alla microstruttura stocastica iniziale dell'SMC. Questi meccanismi sono molto complessi ma sono essenziali, poiché influenzano considerevolmente le microstrutture finali delle parti stampate. In quarto luogo, lo stampo viene tenuto chiuso sotto alta pressione (5-20MPa) per circa 30 s-3 min. In percentuale, la maggior progressione del processo avviene durante questa fase. Successivamente alla cura, lo stampo viene aperto ed il pezzo polimerizzato viene espulso. Viene poi spesso posizionato su una dima di raffreddamento per completare il raffreddamento mantenendo la sua geometria e dimensioni predefinite. Infine, si procede alla rifinitura del componente stampato, per poterlo preparare a successive lavorazioni estetiche, come una verniciatura. Riguardo i possibili difetti che possono formarsi, sono quelli legati all'orientazione delle fibre nel flusso di resina. Infatti, se il flusso di resina dovesse effettuare un tragitto "tortuoso" per riuscire a scorrere ottimamente e coprire tutta l'estensione dello stampo, il rinforzo discontinuo in modo particolare protenderà ad orientarsi nella direzione del flusso, andando a generare delle linee di saldatura, il che influenzerà molto le proprietà meccaniche del composito, che tenderanno a diventare localmente ortotrope, e non più quasi isotrope.

Dal momento che il componente oggetto del lavoro di tesi ha una forma particolarmente complessa che non consente di conoscere preventivamente l'orientamento che assumeranno le fibre durante la fase di stampaggio, è di importanza cruciale posizionare la carica iniziale in modo che copra il 70-90% della superficie dello stampo così da minimizzare il cammino del flusso di resina. In caso contrario, come precedentemente sostenuto, le fibre tendono ad orientarsi nella direzione delle linee di saldatura (Figura 8), e la direzione ortogonale ad una linea di saldatura rappresenta una direzione preferenziale per l'inizio della frattura nel materiale. Un tipico punto di formazione delle "knit lines" è il retro degli inserti utilizzati per la realizzazione dei fori nel manufatto, questo fa sì che se il foro si trova vicino al bordo esterno del prodotto è più conveniente realizzare tale foro in una fase successiva così da non porre in essere inserti che possano determinare un'orientazione errata delle fibre di rinforzo. Occorre, infine, porre in essere un controllo accurato dei tempi di chiusura dello stampo, che devono essere abbastanza prolungati da scongiurare l'insorgere di problematiche che si possono manifestare come tensioni residue, dovute a tempi di raffreddamento diversi in sezioni a spessore differente; infatti un componente di forma complessa prevede al suo interno una certa eterogeneità negli spessori, e questa determina che il grado di cura non risulti uniforme, col rischio che si abbiano parti in cui il processo di reticolazione della resina non è avvenuto nella sua interezza.

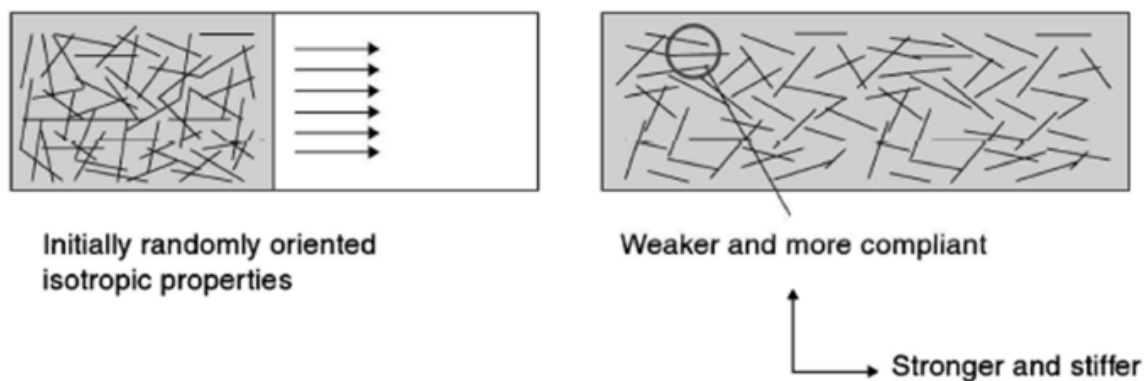


Figura 8 - Orientazione preferenziale delle fibre dovuta al flusso di resina.

## 2.2 Lo studio della viscosità associato alle matrici polimeriche.

Nello studio della dinamica dei fluidi, la viscosità del fluido è definita come la misura della resistenza che vi è al suo scorrimento. In generale, la viscosità è soggetta a una certa serie di parametri di processo che possano influenzarla, due su tutti la pressione e la temperatura, poiché può comunemente essere osservato che un fluido che vede incrementare la propria temperatura, al contempo subisce un decremento di viscosità. Possiamo distinguere i fluidi in base al loro comportamento, infatti tutti quei fluidi la cui viscosità non varia al variare dello sforzo applicato, sono definiti come fluidi newtoniani; per contro, se la viscosità aumenta all'aumentare dello sforzo applicato, il corrispondente fluido è definito fluido dilatante o “shear thickening fluid”; se inoltre la viscosità subisce un decremento all'aumentare dello sforzo impresso al fluido, esso si definisce fluido pseudoplastico o “shear thinning fluid”. Per quanto riguarda le matrici termoplastiche, tale parametro resta costante nell'ambito dei piccoli valori di shear rate, andando poi incontro ad un decremento quando lo sforzo aumenta [3] [7]. Nell'ambito di valori numericamente molto alti di shear rate, la viscosità torna ad essere costante. Il valore costante della viscosità quando lo sforzo è molto basso o nullo è indicato con  $\eta_0$  e rappresenta la viscosità in assenza di sforzo. Il modello più semplice a disposizione per rappresentare l'andamento della viscosità di un polimero termoplastico in funzione dello shear rate è di tipo power-law, come riportato nella 2.1:

$$\eta = K \dot{\gamma}^{(n-1)} \quad (2.1)$$

dove  $\eta$  è la viscosità,  $\dot{\gamma}$  è lo shear rate,  $K$  è una costante dipendente dalla temperatura e  $n$  è una costante compresa tra 0 ed 1 che risulta non dipendere dalla temperatura. L'equazione di Arrhenius, in un polimero termoplastico, è utilizzata per esprimere l'influenza della temperatura, come espresso nella 2.2:



$$\eta = \eta_0 \exp\left(\frac{E}{RT}\right) \quad (2.2)$$

dove E è l'energia di attivazione e R è la costante universale del gas. Per quanto riguarda le resine termoindurenti invece, si può osservare come invece l'andamento del parametro viscosità non sia solo dipendente dallo "shear rate" e dalla temperatura, quanto anche dal grado di cura della resina, il quale è a sua dipendente dalla temperatura e dal tempo. In base a ciò che è stato già osservato, nella fase iniziale la matrice è un fluido a ridotta viscosità, mentre con l'incremento della temperatura il valore assunto dalla viscosità diminuisce ancora progressivamente, sino all'istante in cui viene toccato il cosiddetto tempo di gelificazione (gel time) e al sopraggiungere di questo il valore della viscosità incrementa fino a tendere ad infinito nell'istante temporale in cui si realizza la condizione di polimero polimerizzato del tutto. In ogni caso, data l'evidenza sperimentale, può essere sostenuto che matrici poliestere e poliuretaniche presentano una modalità di risposta tipicamente newtoniana d'altro canto le resine epossidiche tendono a comportarsi come un fluido di specifiche caratteristiche "shear thinning". La correlazione tra la viscosità, temperatura e grado di cura è quindi della tipologia secondo cui la viscosità decrementi all'aumentare della temperatura ed incrementi all'aumentare del grado di avanzamento della reazione di polimerizzazione. L'equazione 2.3 riesce a restituire una chiara modellazione di tale tendenza:

$$\eta(T, \alpha) = \eta_0 e^{\left(\frac{c1}{c2T} + c3\alpha\right)} \quad (2.3)$$

Dove c1, c2, c3 rappresentano le costanti del materiale in questione. La notazione più largamente impiegata al fine di spiegare l'andamento della viscosità in funzione della temperatura e del grado di cura nel caso di una resina termoindurente è sicuramente la Formula 2.4 relativa al modello messo a punto da Castro-Macosko [7] [8] [9]:

$$\eta(T, \alpha) = A_\eta e^{\left(\frac{E_\eta}{RT}\right)} \left(\frac{\alpha_g}{\alpha_g - \alpha}\right)^{a+b\alpha} \quad (2.4)$$

Nella presente formula impiegata,  $E_a$  rappresenta l'energia di attivazione della reazione,  $\alpha_g$  è il grado di polimerizzazione che si riesce a raggiungere al cosiddetto gel time,  $b$  ed  $a$  sono costanti mentre  $A\eta$  è il fattore di frequenza dell'equazione di Arrhenius. Nell'ambito dei software di simulazione commerciali, tra i quali vale la pena menzionare Moldflow e Moldex3D, questa tipologia di strumento di modellazione trova esteso utilizzo. La dipendenza dallo "shear rate" può essere introdotta tramite il modello di Cross [8] [9], Formula 2.5:

$$\eta = \frac{\eta_0}{1 + \left(\eta_0 \frac{\dot{\gamma}}{\tau^*}\right)^{1-n}} \quad (2.5)$$

Dove  $\dot{\gamma}$  è lo shear rate,  $n$  è l'indice di power-law e  $\tau^*$  rappresenta il valore di minimo sforzo che viene applicato, e che fa sì che il valore della viscosità diminuisca.

## 2.3 Analisi del flusso mediante il modello matematico.

Nell'ambito del processo industriale dello stampaggio a compressione, il flusso del materiale risulta essere uno dei parametri riveste un ruolo di sostanziale importanza, tale da esercitare una notevole influenza sulla qualità del manufatto finale. È infatti stato già discusso nella precedente trattazione quanto il flusso rivesta un ruolo dominante nella definizione del grado di porosità che caratterizza il manufatto realizzato, nella determinazione della orientazione finale delle fibre e nel corretto riempimento della cavità di stampaggio. Nell'ambito dello stampaggio a compressione per la produzione di compositi in SMC, la distribuzione della pressione nella carica sottoposta a compression molding può essere modellata grazie all'impiego dell'equazione 2.6 generalizzata di Hele-Shaw [3]:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} = -12 \eta \left(\frac{s}{h^3}\right) \quad (2.6)$$

con  $p$  pressione,  $\eta$  viscosità,  $h$  quota in altezza raggiunta in dato istante di tempo dalla carica, ed  $s$  rappresenta la velocità con cui si effettua la chiusura dello stampo. Per determinare l'equazione (2.6), lo studio ha seguito come base un certo numero di ipotesi, le quali possono nel seguito essere elencate:

- Stampo chiuso in direzione  $z$  negativa, flusso del materiale che si svolge nel piano  $xy$  (con  $p$  che è una funzione di  $x$  e  $y$ );
- Si ipotizza che l'attrito tra la carica e le superfici dello stampo non sia presente;
- Si ipotizza inoltre che il materiale composito in SMC possa essere ritenuto alla stregua di un materiale isotropo incomprimibile, caratterizzato da un comportamento da fluido newtoniano;
- La variazione di pressione in direzione  $z$  può essere considerata trascurabile;
- Il flusso avviene in condizioni isoterme (non si considera il calore emesso da un eventuale reazione di cura);

Nel caso in cui si porti a risoluzione l'equazione di Hele-Shaw, è possibile ricavare come risultato la distribuzione della pressione in sede di stampaggio, da cui una volta determinata essa è possibile ricavare il campo di velocità del flusso. Con la volontà di far sì che la trattazione risulti quanto più agevole e snella possibile, è possibile considerare che la velocità nelle due direzioni  $x$ ,  $y$  venga mediata sullo spessore, secondo le 2.7 e 2.8:

$$\bar{u} = -\frac{h^2}{12\eta} \left( -\frac{\partial p}{\partial x} \right) \quad (2.7)$$

$$\bar{v} = -\frac{h^2}{12\eta} \left( -\frac{\partial p}{\partial y} \right) \quad (2.8)$$

Quindi in definitiva, è possibile arrivare alla determinazione delle coordinate della posizione assunta dal fronte del flusso una volta noto il campo di velocità. Mediante l'ausilio di un grafico, è possibile mostrare come, in caso di carica di stampaggio rettangolare e cavità dello stampo perfettamente planare, il grado di avanzamento del flusso previsto (linea tratteggiata) possa essere ritenuto sovrapponibile in maniera pressochè assoluta con quello che è l'avanzamento che era stato precedentemente misurato in via sperimentale (Linea continua in Figura 9).

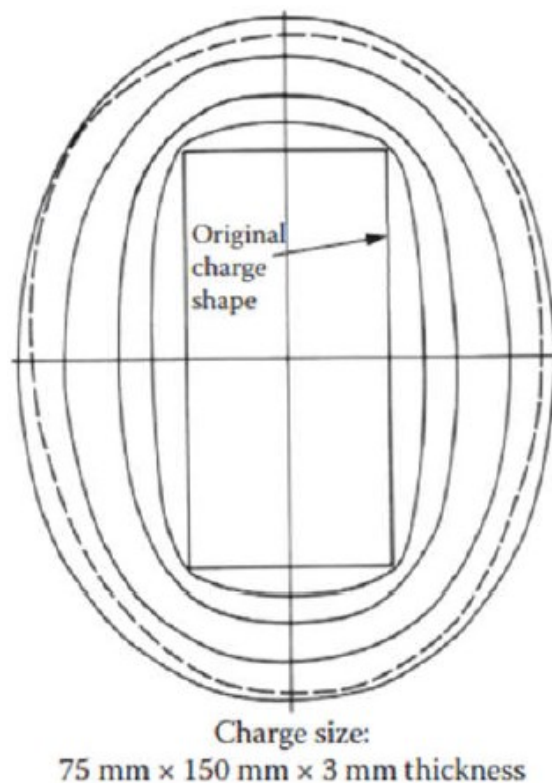


Figura 9 - Avanzamento del flusso per una carica rettangolare [3]

È possibile ritenere valide tali assunzioni solamente se si lavora nell'ambito dello stampaggio di cariche che presentano un basso spessore. D'altra parte, volendo analizzare brevemente la situazione che si verifica nel caso in cui si abbia a che fare con cariche spesse, si può osservare come sia presente un sottile strato di polimero fuso tra la superficie della cavità dello stampo e le prime cariche disperse nel materiale, e tale "layer" svolge una sostanziale funzione di lubrificazione in sede di

flusso della carica, questo è un aspetto molto, molto importante che va tenuto sotto controllo al fine di, ovviamente, ottenere i “desiderata” in termini di proprietà meccaniche e grado di finitura superficiale, quanto anche della facilità con cui poi il manufatto potrà essere estratto dallo stampo. Quindi, l’ipotesi dell’assenza di attrito non può essere più praticabile e il profilo di velocità del flusso assume una conformazione parabolica, con il valore nullo che si trova sulla superficie di contatto con lo stampo. Per tener conto di questo fenomeno la (2.6) è stata modificata da Barone e Caulk [10], fino a perseguire il seguente risultato:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} = \eta h \left( \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} + \frac{\partial^3 u}{\partial x \partial y^2} + \frac{\partial^3 v}{\partial x^2 \partial y} + \frac{\partial^3 v}{\partial y^3} \right) - 2 k_H \left( \frac{s}{h} \right) \quad (2.9)$$

In tale trattazione si è vista necessaria l’introduzione del coefficiente d’attrito idrodinamico  $k_H$ . Il primo termine a destra dell’uguaglianza rappresenta la resistenza del materiale alla deformazione, invece il secondo termine rappresenta la resistenza al flusso dovuta all’attrito.

## 3 Riciclo e riutilizzo della fibra di carbonio

### 3.1 Analisi degli scenari attuali del mercato dei materiali compositi CFRP.

Sotto la spinta delle crescenti problematiche ambientali, di sostenibilità, la ricerca di nuovi materiali compositi che consentissero di raggiungere gli obiettivi di efficienza prefissati, il mercato dei materiali compositi in fibra di carbonio risulta essere in forte ascesa, grazie al grande interesse di tutti i più importanti stakeholders. Nell'ambito attuale, questi materiali trovano largo impiego in larga parte in quelli che sono sempre stati i loro mercati di elezione, ovvero il settore aerospaziale e quello automobilistico delle competizioni o comunque ad alte prestazioni, il settore industriale ad alto valore aggiunto, l'industria marina, il settore delle energie rinnovabili, soprattutto in ambito della produzione di energia eolica. Le normative sempre più stringenti in termini di emissioni ed inquinamento, la necessità di sviluppare modelli di green economy e le sempre più alte performance richieste negli ambiti di cui sopra hanno portato il mercato dei compositi ad una crescita quasi esponenziale negli ultimi anni (Figura 10).

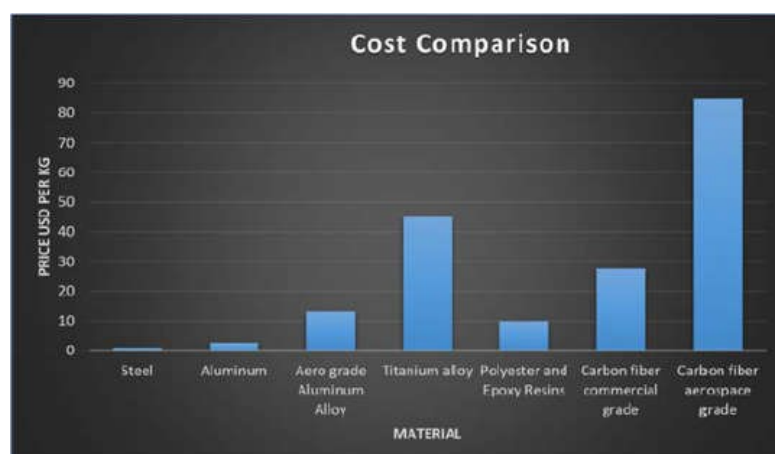


Figura 10 - Comparazione costi fra fattori produttivi

Infatti se il risparmio di peso risulta essere uno dei fattori obiettivo da raggiungere di maggior interesse, tali materiali compositi, in particolare i CFRP, consentono un'elevatissima riduzione delle masse sospese e non, ottenendo un incremento delle proprietà meccaniche, sia in termini di rigidità che di resistenza. Ciò li rende grandemente appetibili in tutti quei settori in cui il risparmio di peso risulta essere l'obiettivo di gran lunga principale per la buona riuscita dei prodotti. A parte le applicazioni più canoniche, nel mondo delle competizioni e nell'aerospaziale, da qualche anno i materiali compositi in fibre di carbonio sono impiegati anche nel settore dell'autotrazione ad alimentazione alternativa al combustibile fossile, e quindi ecosostenibile, nell'ambito della realizzazione di parti strutturali e semi strutturali. Possono essere fatti vari esempi di automobili innovative che presentano un telaio in composito, che consente l'ottenimento di prestazioni di assoluto rilievo, irraggiungibili dai competitor che sfruttano un più economico e pesante, e meno prestante, telaio in alluminio, o peggio in acciaio. I CFRP, come già anticipato, sono fortemente impiegati anche nel settore delle energie rinnovabili (I CFRP sono ormai uno dei materiali più utilizzati per la realizzazione di parti delle pale delle turbine eoliche, insieme ai compositi in fibra di vetro). Anche in questa applicazione, la chiave del successo del materiale composito, ovvero la sua grande leggerezza rispetto ai tradizionali materiali metallici, ha consentito a questo materiale di imporsi, guadagnando il favore dei maggiori produttori di sistemi di recupero dell'energia del vento già da diverso tempo. Forse il solo punto debole che si può riscontrare nel composito in fibra di carbonio, oltre al già citato problema ambientale di smaltimento una volta giunto il materiale a fine vita e la natura fossile del precursore della fibra, è il costo, i CFRP infatti hanno un costo di gran lunga maggiore rispetto ad acciaio e alluminio e nel caso di applicazioni aerospaziali il costo risulta maggiore anche delle leghe di titanio [11]. È necessario prendere a riferimento opportuni report per poter meglio comprendere lo scenario attuale del mercato dei compositi, ad esempio prendendo in esame il lavoro risalente all'anno 2013 sull'andamento del mercato nel mondo dei compositi in fibra di carbonio [12], Holmes ha studiato l'andamento delle previsioni di domanda dei materiali compositi in fibra di carbonio fino al 2020. In base a quanto si può desumere dai dati rilevati, si osserva una prospettiva di crescita annua che va dal 13 al 17%, nello scenario più roseo. È stato osservato che, in particolare dal 2012 al 2020, il compartimento che presenta il più interessante potenziale di sviluppo è, come facilmente intuibile, il settore automobilistico, con una stima di incremento su base annuale del 34% in termini di tonnellate di materiale impiegato, il che porta la domanda da un valore di 2150 tonnellate annue del 2012 a 23000 tonnellate che sono state registrate per il 2020.

Il motivo alla base di una simile prosperità, che ha consentito un simile rispetto delle previsioni, è facilmente individuabile nelle odierne innovazioni recenti riguardanti l'autotrazione ecosostenibile e impiegante fonti di energia alternative ai combustibili fossili, nella sempre più grande attenzione alla riduzione delle masse, e nella normativa vigente che va sempre più nella direzione di una riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub>, oltre allo sviluppo di nuove tecnologie che hanno consentito di implementare i volumi di produzione e la serialità della stessa, con conseguente ed immaginabile risparmio in termini di tempo di ciclo e costi. In [11], Shama rao N. sostiene che nel 2014 il mercato dei materiali compositi ammontava alla bellezza di 28 miliardi di dollari e le prospettive di crescita in termini valoriali erano del 15 e del 20% annuo. Lo studioso riesce a mettere bene in evidenza un aspetto estremamente interessante del problema, ovvero quanto l'andamento del mercato sia notevolmente dipendente dal fattore costo di produzione del manufatto finito in composito, e quanto questo costo, sfruttando i vantaggi delle molteplici novità nei sistemi produttivi, nello sviluppo delle matrici, sempre più efficienti, e nei software di supporto alla progettazione, sia in costante decremento nel tempo. Queste analisi, che sono state effettuate negli scorsi anni, sono state valutate e confermate da innumerevoli professionisti del settore, come avviene nel Composite Market Report del 2019 [13], a cura del Carbon-Composites e.V., che si è avvalso del supporto della German federation of reinforced plastics (AVK). È possibile ravvisare, dall'analisi e la rielaborazione svolta di tale pubblicazione, che la presente capacità di produzione teorica che gli stakeholders leader nel settore su scala globale possiedono, si attesta attorno alle 150.9 kt/anno (kilotonnellate/anno) con un aumento di 1.6 kt/anno, che se raffrontato coi dati a disposizione relativi all'annata 2018, si traducono in un incremento dell'1,1%. Ciò detto, è stato inoltre espresso come le industrie si stanno organizzando per mettere in campo una serie di ulteriori strategie volte a un'ulteriore espansione dei mercati che saranno operative negli anni a venire. Queste strategie, come si è soliti fare in tali ambiti, possono essere distinte in misure a breve termine, che propongono una visione fino al 2021, e misure a lungo termine, che si spingono oltre il 2022. Da quanto è possibile desumere dalle strategie di breve periodo, è supposta una crescita di 14.6 kt/anno (+9.7%), d'altra parte dall'analisi alle misure di lungo periodo è prevista una crescita di 44.1 kt/anno (+29.2%) rispetto al 2019. Viene poi messo in evidenza come partendo da una domanda di 128.5 kt/anno del 2018 si abbia avuto un incremento del 12.7% nel 2019, andando addirittura a superare le previsioni fatte negli anni precedenti, infatti nel 2019 la domanda globale di CFRP è stata pari a 141.5 kt/anno. Le previsioni di domanda per gli anni successivi al 2020 affermano che nel 2023 la domanda globale di CFRP arriverà a 197 kt/anno mentre



nel 2025 sarà 250kt/anno. In Figg. 11 e 12 vengono riportati i dati necessari per rendere più chiaro il quadro della situazione:

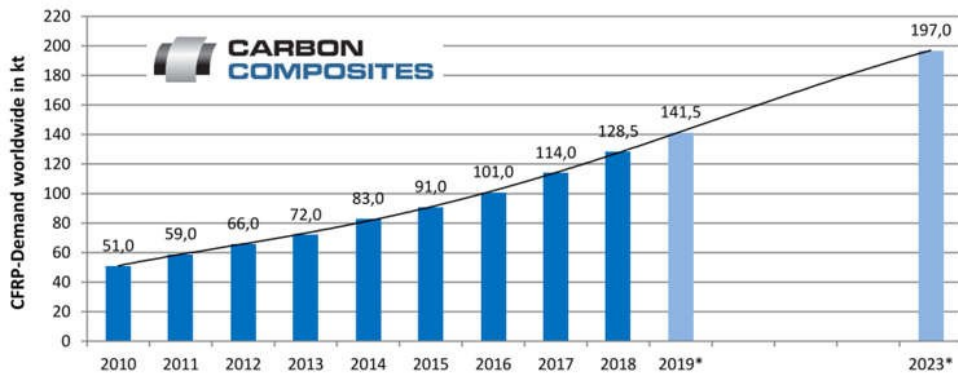


Figura 11 - Domanda globale CFRP

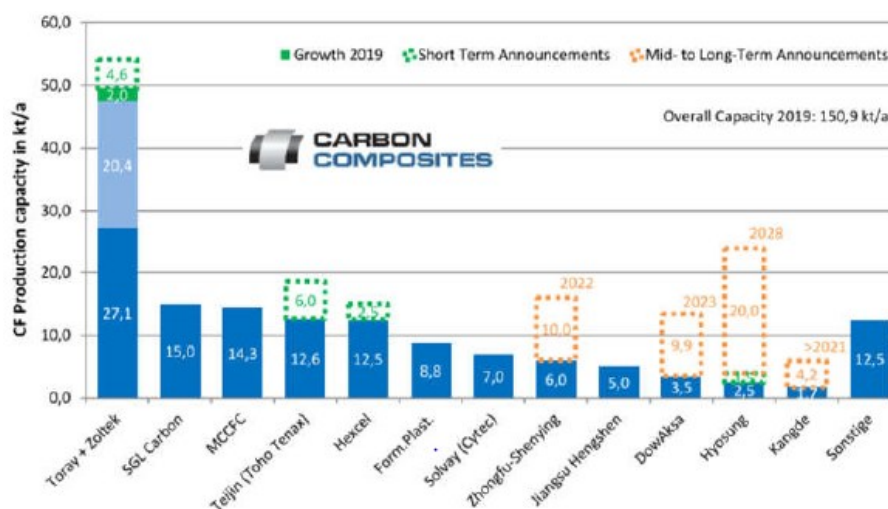


Figura 12 - Capacità produttiva annua CF

Al netto delle dinamiche di decrescita del mercato attuali, dettate dalla sfavorevole congiuntura economica, è ragionevole stimare un costante incremento di quote di mercato per il settore dei materiali compositi, nella fattispecie quello dei CFRP risulta essere un mercato in fortissima crescita che sicuramente subirà un notevole sviluppo nei prossimi anni. Bisogna però porre in grande attenzione la crescita delle quote di mercato fatta registrare dai materiali compositi a fibre naturali, di cui si è già discusso, perché sicuramente tali materiali saranno importanti in futuro in molte applicazioni in cui, oggi, si fa uso di fibra di carbonio.

In generale, nell'ambito della produzione industriale e indipendentemente da quale materia prima si sceglie di impiegare nella realizzazione del manufatto finito, occorre valutare che sarà inevitabilmente generata una certa quota di scarto, e controllare accuratamente in quale fase del processo questo scarto si genera, e in tal caso intervenire in maniera mirata per correggere e modificare i parametri di processo nella maniera più efficiente possibile. Nella fattispecie, lo scarto nella produzione di manufatti in composito può essere di varia tipologia, ma si possono sostanzialmente distinguerne due di massimo interesse ai fini del presente lavoro di tesi, ovvero lo sfrido derivante dal processo di taglio del pre impregnato, e ovviamente lo scarto di un prodotto finito, che non rispetta gli standard di progetto, e tale tipologia di scarto ovviamente è quella in assoluto più onerosa e meno preferibile. In tal senso, è possibile definire il "buy-to-fly" ratio, ovvero il rapporto tra il peso della materia prima utilizzata nella produzione di un componente e il peso del componente finito stesso. Secondo quanto espresso in [14], il "buy-to-fly" ratio di un manufatto in fibra di carbonio prodotto sfruttando un materiale composito preimpregnato può andare da 1,2:1 fino a 3.5:1, tenendo presenti tutte le possibili fonti di spreco che intercorrono dal momento dell'estrazione della materia prima fino alla realizzazione del prodotto finale. Nella fattispecie è possibile osservare, da quanto desunto da tale pubblicazione, estremamente interessante, che tra tutte le fasi del processo, quella della manifattura è responsabile del 6-19% dello spreco, la fase di taglio del prepreg ha una percentuale di scarto che va dal 25% al 50% e quella di finitura può produrre uno scarto che varia dal 2% al 40%. Secondo il "Composite handbook" redatto dal Dipartimento della Difesa degli Stati Uniti d'America, il 66% degli scarti generati è nella forma di prepreg non-curato (uncured), ossia nella fase di B-stage. Dall'analisi di queste informazioni, si può ben delineare l'effettiva gravità della questione, infatti ogni anno migliaia di tonnellate di materiale di materiale vergine vengono mandate in discarica come scarto e, ovviamente, è facilmente prevedibile che tale mole di materiale andrà a crescere in maniera proporzionale alla crescita del mercato e alla domanda di manufatti in composito. Nella maggior parte dei casi tali scarti vanno a saturare le discariche o sono mandati agli inceneritori, con ovvie conseguenze in termini di inquinamento ed emissioni in atmosfera. È inoltre bene porre attenzione al fatto che la produzione del prepreg è un processo fortemente intensivo dal punto di vista dell'energia richiesta. La produzione della fibra richiede dai 183 ai 285 MJ/kg mentre la produzione della matrice dai 76 agli 80 MJ/kg. La produzione di un prepreg combinando fibra e matrice richiede circa 40 MJ/kg [15].

Stimando che ogni kg di prepreg è tipicamente composto da circa 650g di fibra e 350g di resina ed ipotizzando che questo rapporto resti costante anche al variare del peso, la somma pesata fornisce:

- $650 [kg] * 230 \left[ \frac{MJ}{kg} \right] = 149500 MJ$  Per la produzione della fibra
- $350 [kg] * 78 \left[ \frac{MJ}{kg} \right] = 27300 MJ$  Per la produzione della matrice
- $1000 [kg] * 40 \left[ \frac{MJ}{kg} \right] = 40000 MJ$  Per la produzione del prepreg

Quindi per ogni tonnellata di prepreg tolta alle discariche si risparmiano circa 216800 MJ di energia. All'interno di HP Composites è stato stimato che durante le fasi di taglio del prepreg e successiva formatura, circa il 20% del materiale è considerato sfrido. In questa percentuale sono contenuti sia gli sfridi derivanti dalle macchine da taglio dovuti al nesting, sia gli scarti di produzione. Su base annua questo si traduce in circa 30 ton di scarti. Il riutilizzo di tale materiale porta ad un risparmio di 6.480.000 MJ annui di energia.



## 3.2 Il Progetto CIRCE.

Il progetto CIRCE – acronimo di CIRcular economy model for Carbon fibrE prepregs – è un piano di sviluppo industriale sostenibile il quale va ad innestarsi nell'alveo del programma LIFE dell'Unione Europea volto a preservare l'ecosistema ambientale e terrestre dall'inquinamento e ridurre l'impronta climatica ed ecologica dei prodotti e dei processi industriali, mettendo in campo azioni concrete per contrastare la minaccia sempre più concreta messa in campo dagli effetti del cosiddetto "climate change". Tale attività comunitaria si prefissa l'ambizioso obiettivo quello di pianificare, progettare e portare a definizione modelli di economia circolare, che siano realisticamente e vantaggiosamente approntabili, per il riutilizzo di sfridi di materiali compositi in fibra di carbonio preimpregnati e non curati, quindi stanti nella condizione di processo denominata B-Stage e pertanto si tratta di materiale ancora profittevolmente impiegabile in una svariata gamma di differenti applicazioni, il che potrebbe aprire le porte del mercato dei compositi fibro-rinforzati CFRP anche a nuovi stakeholders, a cui fino ad ora è stato precluso. Tra le realtà industriali europee che sono impegnate nel perseguire questo ambizioso e nobile obiettivo è possibile menzionare cinque importanti aziende ed istituzioni italiane, impegnate nella ricerca e nel settore industriale, tra cui l'ascolana HP Composites SpA, che si è imposta come capofila di questo progetto cruciale. Il lasso temporale in cui è previsto che questa iniziativa si articolerà è di tre anni, ovvero dal 1° settembre 2019 al 31 agosto 2022, e in tale periodo sono stati stabiliti degli obiettivi da perseguire, i quali si focalizzano principalmente sull'abbattimento dell'impatto ambientale messo in opera dai rifiuti industriali, nella fattispecie delle fibre di carbonio, che come vale sempre la pena ricordare, sono una importantissima risorsa ma si tratta pur sempre di un sottoprodotto di materie prime fossili, estremamente impattante dal punto di vista

climatico in tutto il suo ciclo di vita, dalla produzione al suo smaltimento, ma del quale è impossibile fare a meno per via delle prestazioni che assicura. In tale contesto, ciò è estremamente importante nell'ottica dell'ottimizzazione dell'uso delle risorse naturali, che va di pari passo con lo sviluppo di una mobilità maggiormente efficiente ed ecologica, meno impattante dal punto di vista climatico, il che porterà alla nascita di un paradigma virtuoso del riciclaggio dedicato al settore dei CFRP. Difatti, questo progetto non va inquadrato nell'ottica di un'iniziativa fine a sé stessa e dall'orizzonte temporale limitato, ma tutt'altro, si tratta solo dell'inizio di un paradigma industriale pionieristico che porterà prosperità e benefici per tutti, per le persone e il nostro pianeta. In particolare, al termine dei tre anni di progetto gli obiettivi che si cercherà di ottenere sono i seguenti: una riduzione di 10 tonnellate/anno di sfridi di materiali compositi preimpregnati destinati allo stoccaggio in discarica; 550 tonnellate di anidride carbonica, gas serra climalterante, in meno emesse in atmosfera per ogni tonnellata di materiale composito preimpregnato; 5000 tonnellate all'anno di CFRP preimpregnati riutilizzate proficuamente. Nella fattispecie, a proposito di riutilizzo, vale la pena soffermarsi a ricordare quanto tale piano industriale comunitario si focalizzi essenzialmente sul riutilizzo del materiale preimpregnato, e non sul suo riciclo, azione ben diversa e che, come dimostrato nella precedente trattazione, comunque caratterizzata da un certo e ben maggiore impatto climatico. Infatti, il processo di riciclo del materiale composito si compone di una serie di trattamenti termici, come ad esempio la pirolisi, che servono a recuperare la fibra del composito e portano alla distruzione fisica della matrice, il che comporta complessivamente un doppio inquinamento, ossia in primis il gas serra che è stato emesso in atmosfera per la realizzazione delle resine polimeriche, ed in secondo luogo quello che verrà liberato per la sua distruzione. Ciò quindi, oltre ad essere impattante è anche insensato dal punto di vista del processo industriale, e una simile eventualità va evitata per quanto possibile. Insomma, ciò che si desidera realizzare è che lo sfido possa essere al 100% reintrodotta nella catena del valore. Inoltre, come è stato sostenuto nella precedente trattazione portando a sostegno della tesi evidenti dati numerici, la pirolisi della matrice è un processo che prevede un forte consumo energetico e non risulta economicamente conveniente per quantità di materiali inferiori a mille ton/anno. È per tale ragione che il progetto punta a creare un modello di economia circolare per il riutilizzo degli scarti di CFRP, che è stato anche recentemente validato andando a misurare l'impatto ambientale tramite Life Cycle Assessment (LCA). Di seguito, vengono menzionati i punti cruciali del progetto ed il ruolo di HP Composites nella realizzazione degli obiettivi prefissati:

- 1) Produzione dei CFRP: I materiali compositi in fibra di carbonio sono materiali innovativi ed ultraleggeri, da sempre apprezzati in ambito automobilistico ed aerospaziale.
- 2) Generazione degli scarti: durante la produzione di componenti in materiale composito CFRP vengono generati scarti, i quali nella più rosea delle ipotesi finiscono nelle discariche o negli inceneritori.
- 3) L'idea dietro al progetto: rinnovare e riprogettare la catena del riciclo dei CFRP, superando il concetto progressivamente il concetto di riciclo per perseguire il riutilizzo dello scarto di lavorazione.
- 4) Mezzi utilizzati: Il team CIRCE ha il compito di andare a sviluppare due macchinari innovativi per la selezione, il taglio e il riprocessamento degli scarti di prepreg in modo da renderli riutilizzabili.
- 5) Riutilizzo per creare nuovi prodotti: Il materiale riprocessato verrà poi riutilizzato per la realizzazione di componenti destinati al settore automobilistico, il che nella fattispecie è l'obiettivo del presente studio, elementi per calzature antinfortunistiche ed altri componenti.

Uno dei ruoli principali di HP Composites all'interno del progetto, nonché ambito di lavoro di questa tesi, è quello di sfruttare il proprio know-how e l'esperienza maturata nel settore automobilistico ad alte prestazioni per ricercare possibili applicazioni nell'ambito della componentistica per veicoli tramite un processo di Compression Molding, e quindi riuscire a dimostrare che gli sfridi del prepreg in CFRP si prestano bene alla realizzazione di componenti di vario tipo. Tali componenti sono principalmente componenti estetici o di rinforzo a parti estetiche, ma nel presente studio si è voluto implementare quanto fatto finora, andando a studiare la possibilità di applicare questo materiale e processo innovativo anche per la realizzazione di parti semi-strutturali, ossia un componente del comparto sospensivo dell'autoveicolo, il braccetto inferiore, che a differenza delle parti realizzate finora in azienda con questo materiale di riutilizzo, dovrà sostenere carichi maggiori, sostenendo su di sé buona parte del peso dell'assale, risultando quindi una componente che sarà essenziale ai fini di una corretta dinamica del veicolo.

Il processo prevede la separazione del materiale di scarto dalla sua pellicola protettiva e il successivo taglio in forme rettangolari denominate “chips” o “prepreg platelets” di varie misure ed aspect ratio, tramite appositi macchinari, a ciò segue il riprocessamento del materiale tramite stampaggio a compressione.

### 3.3 Strategie di riutilizzo ottimale di sfridi di preimpregnato: lo Stato dell’Arte.

Lo scopo del riciclo di scarti di lavorazione del materiale composito è quello di aumentare la sostenibilità ambientale, recuperando le materie prime in maniera quanto più razionale. Quando ci si pone nella condizione di intraprendere un progetto di riuso di materiale di scarto, a prescindere dall’ovvio vantaggio in termini ambientali, occorre verificare se il materiale riciclato potrà collocarsi vantaggiosamente sul mercato e se l’operazione abbia concrete possibilità di riuscita. In caso contrario, sarebbe sconveniente perseguire quello che è un nobile obiettivo; anche se tale operazione risultasse fattibile, i vari portatori di interessi non giudicherebbero opportuno prendervi parte. Prendendo in considerazione un prodotto realizzato in CFRP e l’elevato valore intrinseco del materiale vergine, si può osservare che tali prodotti risultano essere estremamente appetibili per l’industria, grazie al loro elevato potenziale. Le possibilità che sono riservate ad un materiale scartato in PMC possono essere diverse:

- Stoccaggio in discarica: La perdita economica associata allo scarto è totale. Inoltre, i compositi PMC presentano una estrema stabilità, che determina tempi di decadimento notevolmente lunghi, il che sancisce il grave impatto ambientale dell’operazione. Questa possibilità andrebbe evitata in ogni modo.

- Incenerimento: sarebbe una possibilità maggiormente accettabile nel caso in cui venisse portata avanti presso impianti di conversione energetica, che prevedano possibilità di cogenerazione, recupero dell'energia termica e abbattimento centralizzato degli agenti inquinanti. In tal caso, dal momento che almeno in parte il rifiuto è stato riutilizzato, questa pratica può essere considerata alla stregua del riciclo. La buona riuscita di questa pratica è fortemente dipendente dal tipo di composito, alcune tipologie risultano poco efficienti sotto questo punto di vista a causa di una scarsa infiammabilità.
- Processi Chimici e Termici: una tipologia di operazioni che consistono nella depolimerizzazione della resina, così da recuperare la fibra per un eventuale ulteriore riciclo. Il processo risulta essere molto oneroso dal punto di vista economico ed ambientale e non risulta economicamente sostenibile per via dei volumi di produzione ridotti dell'industria del composito. Inoltre, la matrice andrebbe irrimediabilmente perduta, facendo registrare un controvalore economico rilevante, dal momento che nei compositi termoindurenti la polimerizzazione è una somma di reazioni irreversibili. Un tipico esempio di processi di tal sorta sono la solvolisi e la pirolisi.
- Processi Termomeccanici: riservati solamente ai compositi a matrice termoplastica, poiché tale resina può essere rimodellata a seguito del ritorno del polimero allo stato gommoso, e pertanto preclusi alle resine termoindurenti, per i motivi di cui sopra. È possibile riprocessare questi materiali compositi negli stessi siti dedicati al riciclo di materiali plastici di altra sorta.
- Processi meccanici: risultano essere l'ultima possibilità rimasta quando non ci sono altre alternative allo stoccaggio in discarica. Il materiale viene triturato senza separare fibra e matrice in modo da poter essere poi riutilizzato come riempitivo in un materiale vergine.



Si parla di riciclo di materiale composito nell'eventualità in cui questo sia nella condizione di aver già subito un, irreversibile, trattamento di polimerizzazione oppure manufatti affetti da difetti di produzione e per questo motivo scartati. Purtroppo tali materie sono ormai giunte in prossimità del loro fine-vita. Il riutilizzo dei compositi in fibra di carbonio, invece, è definito come un riprocessamento di materiale in una condizione "uncured", ossia che non è stato ancora sottoposto al processo di consolidamento che contraddistingue la produzione, dovuto alla reazione di cura, un tipico esempio possono essere i preimpregnati scaduti che hanno superato la loro shelf-life (tempo massimo in cui il prepreg può rimanere in stock prima di essere processato) o il loro out-time (tempo massimo in cui il prepreg può essere tenuto fuori dal congelatore), oppure ancora sfridi derivanti dalle macchine da taglio. Stante la direttiva europea 2008/90/EC sullo smaltimento dei rifiuti, l'approccio al trattamento dei rifiuti ha una gerarchia piramidale. La priorità viene sempre data a tutte quelle pratiche virtuose prevenzione a monte della produzione di scarto, che determinano un calo dello stoccaggio degli scarti prodotti, successivamente nella scala gerarchica si possono elencare, nell'ordine: riuso, riciclo, recupero e disposizione in discarica. Il riutilizzo del materiale è quindi sempre preferibile al suo riciclo. In letteratura è possibile trovare alcuni casi di studio d'interesse che sono stati portati avanti da istituzioni private, aziendali, universitarie o di altro genere che provvedono a fornire un'idea di quello che risulta essere un modus operandi estremamente virtuoso, che andrà implementato negli anni a venire. Un gran numero di strategie di riuso si pongono nella condizione di triturare gli scarti di prepreg in forma di "platelets", ovvero rettangoli di sfrido di una vasta gamma dimensionale, da sottoporre poi a processi di produzione in stampaggio a compressione, più vantaggioso e adatto a produzioni più scalate ed economiche rispetto, ad esempio, alla cura in autoclave. Per quanto riguarda la nomenclatura, cosa che sovente avviene nell'ambito dell'industria del composito, essa risulta molto disomogenea. Nella letteratura si fa riferimento al materiale costituito da "chips" o "strands" di preimpregnato, facendo riferimento a terminologie di varia sorta come ROS (randomly oriented strands), PPMC (prepreg platelet molding compound) o in modo più generico DFC (Discontinuous fiber composites), come riportato in Figura 13.

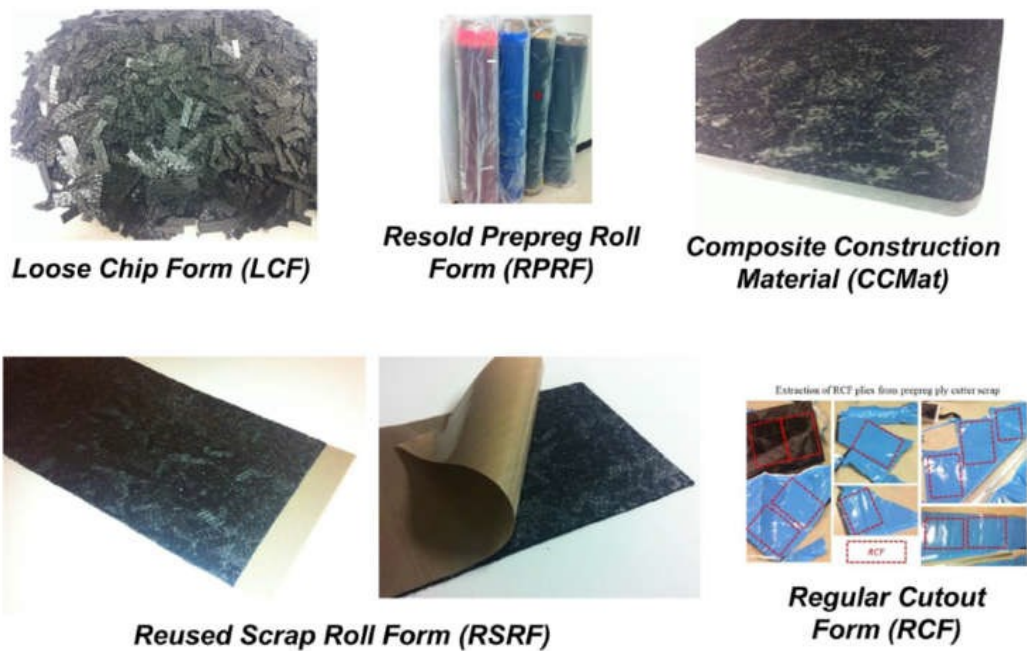


Figura 13 - Tipologie di materiale composito riciclato

In [16], C. Souza, C. Opelt, G. Candido, S. D. Brejão de Souza, E. Botelho, J. M. Marlet, e M. Rezende si pongono come obiettivo quello di studiare e testare scarti in chips dovuti al processo di taglio del prepreg destinato ad impiego nel campo aerospaziale. Quello che è stato fatto è stato utilizzarli per cercare di ricavare un materiale risultante dalle interessanti proprietà meccaniche. La caratterizzazione meccanica del materiale ha previsto prove di trazione, compressione, flessione, taglio interlaminare, che hanno messo in luce delle proprietà risultanti interessanti, paragonabili a quelle offerte da varietà commerciali di alluminio. Le tecniche di riuso messe in luce sono le seguenti: “full on”, ovvero un processo di riciclo che si articola in due step: il primo, la pirolisi, che consente di rimuovere la resina dalle fibre, riottenendo quest’ultime, cosa che però comporta una perdita di materiale, di tempo e di energia; il secondo, il riutilizzo delle fibre in nuovi processi produttivi che consentono di realizzare manufatti tramite vari processi. Ottimi risultati sono stati ottenuti tagliando gli scarti da taglio del prepreg non curato in chips, senza rimozione e quindi spreco di resina e conseguente risparmio energetico. Le possibilità di impiego che si sono aperte agli studiosi, in ambito di realizzazione di parti non strutturali, sono molteplici, così come i settori potenzialmente interessati. Le operazioni produttive si svolgono fuori dall’autoclave, i tempi di cura sono brevi con conseguenti maggiori velocità, volumi di produzione, con costi minori. È stato quindi necessario valutare le proprietà meccaniche di questo materiale composito innovativo.

Dopo aver prodotto i pannelli in PPMC li espongo a due tipologie di condizione climatica: RTA (materiale a 23° e 60% UR), ed ETW (ASTM D5229 M). Dopo questi trattamenti, i pannelli sono stati testati a trazione, compressione, flessione, ILSS. Questi test consentono di capire come ha reagito il materiale all'esposizione a condizioni ambientali gravose. Partendo da scrap frastagliato e di molteplici forme, sono state realizzate le "chips", che poi vengono posizionate in maniera randomica sulla superficie della cavità dello stampo. Ovviamente se la deposizione è ordinata e ragionata le proprietà meccaniche risultanti non possono che trarne giovamento, ma il gioco non vale la candela in termini di tempo e costi, se raffrontati col guadagno prestazionale. Dopo il posizionamento e la chiusura dello stampo è stato fatto un trattamento di cura a 120° e a una pressione di 0.7 Mpa. Dopo di che, è avvenuta un'ispezione del materiale mediante ispezione ad ultrasuoni o mediante digestione acida, per verificare l'effettivo contenuto di vuoti e quindi la porosità e la percentuale in peso delle due fasi. La caratterizzazione meccanica è stata infine eseguita nelle modalità precedentemente esposte. Si è potuto osservare che dopo i trattamenti ETW e RTA il materiale ha conseguito un guadagno di massa importante, dovuto all'assorbimento di umidità, e ciò causa un deterioramento delle proprietà meccaniche. Tali proprietà sono state paragonate a quelle di un prepreg continuo e a quelle di un laminato discontinuo. Dall'analisi del campione dopo il test a compressione possiamo notare detriti della matrice, crepe nelle fibre, deformazione plastica della matrice dovuta all'effetto plastificante dato dall'umidità assorbita. Si è rilevata anche una degradazione dell'interfaccia fra le due fasi e una rottura interlaminare, tipica del PPMC. L'orientamento delle fibre è giocoforza randomico, a seguito di una tale tipologia di laminazione e da ciò deriva una propagazione irregolare della frattura, concentrazione di fratture e diminuzione delle proprietà meccaniche: nella fattispecie, la deposizione randomica dei chips ha pregiudicato soprattutto le performance del materiale a flessione, e questa unita a una evidente tendenza alla torsione in sede di prova ha determinato la delaminazione del materiale. È emerso che il materiale esposto a condizioni RTA ha manifestato una diminuzione del 13% della resistenza a trazione e del 23% a compressione rispetto ai materiali target. Mentre in condizioni ETW la diminuzione della resistenza a trazione e compressione è stata addirittura del 39%. Le performance in termini di ILSS sono state leggermente maggiori che per il materiale in fibra continua, e questo a causa della maggior densità di reticolazione rispetto alla fibra continua.

Ma ciò che di più importante, in conclusione, che è stato osservato è che le proprietà meccaniche risultanti sono simili a quelle di un alluminio comune: con ovvi vantaggi del PPMC in termini di costo (bassissimo, è uno scarto) e di velocità di produzione.

In [17], Drew E. Sommer, Sergii G. Kravchenko, Benjamin R. Denos, Anthony J. Favaloro, R. Byron Pipes, affrontano il tema dell'analisi del PPMC a livello meso-strutturale, per sviluppare le relazioni processo-struttura-proprietà. Il "prepreg platelet" è definito come mezzo ortotropo omogeneo, e le proprietà a trazione dipendono dallo stato di orientamento delle "chips" componenti il materiale, pertanto la frazione di volume delle fibre è considerato un parametro importante per giudicare le proprietà meccaniche del materiale. Un valore che garantisce buone proprietà meccaniche è quello di 60% di percentuale in peso. La mesostruttura stocastica implica una variabilità statistica delle proprietà meccaniche e deriva dalla lavorazione, dal momento che l'orientamento e la disposizione delle piastrine derivano dalla loro deposizione incontrollata e dal flusso anisotropo del composto eterogeneo di stampaggio; le piastrine si sovrappongono, si deformano a taglio e flessione. Il loro stato di orientamento dipende dal flusso durante lo stampaggio: ad esempio, un basso flusso determina un cambiamento minimo di distribuzione e orientamento delle "chips", una copertura quasi totale della superficie dello stampo e un orientamento delle piastrine, quindi, in prevalenza lungo la direzione del flusso. E pertanto, è risultato essere particolarmente evidente un collegamento fra condizioni di lavorazione e proprietà meccaniche del PPMC, con una rottura progressiva che avveniva per delaminazione e rottura fibre. Grazie alla approssimazione della meso-struttura 3D è stato possibile analizzare il trasferimento delle sollecitazioni tra le fasi in gioco. Quindi, è stato approntato un modello computazionale per analizzare la risposta in trazione dei campioni; il modello discreto di danno ha dato un evidente cedimento interlaminare, con campioni presi parallelamente alla direzione del flusso che hanno restituito una buona rigidità, e campioni presi perpendicolarmente che invece hanno mostrato limiti in tal senso. In sostanza, con la simulazione del flusso stocastico del PPMC è possibile "costruire" una meso-struttura del materiale di studio e da questa predire la performance meccanica del materiale. Il primo passaggio, è una analisi computazionale del flusso di stampaggio, così da prevedere l'orientamento delle fibre.

In seguito, questo risultato è stato usato come input per sviluppare nel software il campione del PPMC stocastico. Si passa poi alla simulazione in ambiente Ansys di un test a trazione e si giunge, infine, alla analisi della rottura. Una volta conclusa la parte della modellazione virtuale, si è proceduto ad una campagna sperimentale di test meccanici su provini, nelle direzioni longitudinale e trasversale, ottenuti da piastre stampate a compressione (Compression Molding a 180° e 267kN). Nel corso delle prove, i tecnici si sono avvalsi di strumenti dedicati all'acquisizione e correlazione digitale delle immagini (DIC) e di una pressa idraulica per l'esecuzione. È stata dunque sfruttata la conoscenza acquisita circa la modellazione della meso-struttura del materiale per poter trattare gli aspetti fondamentali della meccanica del composito, quali la distribuzione delle sollecitazioni e i trasferimenti di carico, e ciò ha portato all'attenzione della comunità scientifica quanto sia determinante la conoscenza della distribuzione geometrica dei "platelets" e il loro orientamento, variabile, nel determinare in maniera affidabile le prestazioni meccaniche a trazione del componente che verrà realizzato con questo materiale. Il software Digimat-FE è stato necessario a generare i campioni virtuali, ossia i provini a trazione di PPMC stocastico, che costituiscono il modello computazionale. Successivamente, una volta creato il campione virtuale, esso viene importato nel software Abaqus, in cui verranno applicate le condizioni al contorno, necessarie a portare a termine la simulazione in maniera corretta. L'analisi a rottura dei provini di PPMC ha evidenziato essenzialmente tre meccanismi predominanti di rottura: rottura delle fibre, rottura della matrice, ed infine un disaccoppiamento dell'interfaccia, che ha di fatto invalidato il meccanismo di ripartizione degli sforzi tra le due fasi, determinando così il cedimento del composito. Un ulteriore modello di danno ortotropo è sicuramente la delaminazione, molto comune in casi di studio che riguardano tale materiale composito, e soprattutto presente nel caso in cui il materiale venga sollecitato nella direzione delle fibre, mentre una rottura della matrice è plausibile nei provini tagliati trasversalmente. L'evoluzione del danno è anche dipendente dal carico che si va ad applicare, ad esempio in caso di basso carico si avrà un distacco delle estremità delle piastrine, mentre in condizioni di carico si avrà un danno internamente alla piastrina e all'interfaccia fra queste. Quindi, in sostanza, a differenza di quanto osservato nei materiali compositi con architettura a fibra lunga, il connubio fra complessità della meso-struttura e natura aleatoria del materiale, data dall'orientamento casuale e della sovrapposizione dei chips in sede di flusso a stampaggio, ha determinato una sostanziale variabilità e difficile prevedibilità delle proprietà meccaniche intrinseche dei componenti realizzati con questo materiale e con questa tecnologia.

Occorre pertanto porre una certa attenzione a tale aspetto se si desidera implementare questa esperienza in una eventuale produzione industriale.

In [18], P. Feraboli, I. E. Peitso, F. Deleo E T. Cleveland, si sono occupati della quantificazione del comportamento elastico e la risposta alla rottura di laminati discontinui in fibra di carbonio a matrice epossidica, prodotti mediante stampaggio a compressione di preimpregnato con fibre orientate in modo casuale, che presentano quindi un sufficiente grado di randomizzazione. È stato osservato che intercorrono relazioni complesse tra l'aspect ratio del rinforzo, i moduli e le resistenze a trazione, compressione e flessione. Per questo particolare materiale composito, il cedimento è un evento dominato dalla matrice, con poca o nessuna rottura della fibra, e si è rilevata una variazione relativamente alta nelle proprietà misurate. Il contenuto di fibre di carbonio ad alto volume, combinato con una resina epossidica qualificata per il settore aerospaziale, apre opportunità per più parti di aerei da realizzare in materiali compositi, in particolare per i componenti critici per la rigidità dove le fibre discontinue offrono prestazioni simili al valore continuo quasi-isotropo. L'obiettivo principale di questo studio, di grande interesse per l'industria aerospaziale, è quello di ottenere un materiale che concili pienamente i benefici delle prestazioni dei materiali compositi permettendo un taglio drastico dei costi di produzione. I recenti sforzi di ricerca e sviluppo sulla tecnologia dei compositi si sono concentrati su nuove forme di materiali a basso costo e su processi automatizzati che possono aumentare notevolmente l'efficienza della produzione. Per la produzione di medi o grandi volumi, con l'uso di composti di stampaggio a fibre discontinue si possono ottenere significativi risparmi in termini di costi e di peso. Inoltre, i composti per stampaggio a foglio (SMC), strutture secondarie e terziarie della cellula per applicazioni non interne sono in servizio da diversi anni. Gli SMC sono tipicamente usati insieme al tradizionale stampaggio a compressione, che possiamo identificare come stampaggio ad alto flusso a causa della grande quantità di flusso di resina e dell'orientamento associato delle fibre. SMC è comunemente caratterizzato da 1.0 in. (25,4 mm) di rinforzi in fibra di vetro e meno del 30-50% di fibre in volume. Questo studio indaga il comportamento di un sistema ad alte prestazioni che utilizza fibra di carbonio discontinua e resina epossidica ottenuta da prepreg di alta qualità. Tali materiali compositi sono interessanti per le applicazioni strutturali primarie in quanto possono essere utilizzati in condizioni di stampaggio a basso flusso, per cui il flusso e la redistribuzione del rinforzo sono minimi al momento dello stampaggio.

Tali pannelli in fibra discontinua sono prodotti in laboratorio partendo da un prepreg unidirezionale (UD) TORAYCA T700/2510. Il sistema è un 270°F cure (132°C), designato per la polimerizzazione in forno a vuoto delle strutture primarie delle cellule dell'aviazione generale, e ha un contenuto di resina del 36%. Vengono tagliati, in seguito, dei chip delle dimensioni desiderate. Grazie all'utilizzo di varie combinazioni di larghezza e lunghezza del chip, è possibile effettuare un'indagine parametrica circa l'influenza del aspect ratio del chip sulla risposta meccanica del sistema. Dopo la rimozione del nastro di supporto, i chip sono poi messi nel congelatore per mantenere una bassa viscosità e prevenire l'indurimento prematuro. Al fine di ottenere una distribuzione casuale in piano, i chip sono sparsi in un vassoio e mischiati fino ad ottenere una certa randomizzazione. La pila casuale di trucioli viene poi pressata in uno stampo di alluminio per 1 ora a 270°F (132°C) sotto una pressione di 80 psi (0,55 MPa). Rimuovendo le porzioni periferiche della lastra in ogni direzione, possono essere estratti i campioni per effettuare la prova. Con l'uso di un software di analisi delle immagini, che isola i diversi valori della scala di grigi, si calcola che un tipico pannello presenta lo 0,48% di vuoti e il 28% di contenuto di resina, vuoti si osservano sotto forma di sacche inamidate dalla resina. Vengono eseguite prove di trazione, compressione e flessione per indagare l'influenza della lunghezza del chip. Tutti i campioni sono caricati fino al cedimento a una velocità di 0,05 pollici/min (1,3 mm/min) in una pressa idraulica capace di lavorare a trazione e compressione. Le prove di trazione vengono eseguite in conformità con lo standard ASTM D3039, le prove di flessione sono eseguite in conformità allo standard ASTM D790. Tutti i campioni sono caricati fino alla rottura a flessione su tre punti. I dati di resistenza riportati nelle sezioni seguenti si riferiscono alla resistenza ultima, calcolata come la resistenza corrispondente al carico ultimo. Per le prove di trazione e compressione, il modulo viene misurato con un estensimetro, mentre per le prove di flessione il modulo viene calcolato secondo le indicazioni ASTM, poiché non può essere facilmente misurato; i campioni sono poi ispezionati post-mortem. Da una analisi accurata, è stato osservato che i pannelli si comportano come isotropi in piano, con la rottura che avviene come "delaminazione" attraverso lo spessore, sotto forma quindi di separazione di più chip in una singola pila. È stata osservata una notevole variazione nei dati in base alle condizioni di carico e alla proprietà specifica misurata. Diversi rapporti d'aspetto dei chip sono stati studiati e mostrano una forte dipendenza della forza, più del modulo, dal rapporto d'aspetto dei chip. Il cedimento è un evento dominato dalla matrice, che si verifica per fessurazione trasversale della stessa, per scissione longitudinale, e disconnessione, con poca o nessuna rottura della fibra.

Il percorso di rottura sembra essere indipendente dalla posizione dei vuoti e delle aree ricche di resina, probabilmente a causa delle complesse interazioni bidimensionali dei chip. In generale, la resistenza finale è notevolmente inferiore alla linea di base continua quasi-isotropa, la resistenza alla trazione è la più debole, seguita dalla compressione e dalla flessione. Per tutti gli scenari di carico studiati, il sistema discontinuo mostra moduli alti quanto il riferimento continuo quasi-isotropo e per tutte le lunghezze di chip. Il suo uso per componenti strutturali caratterizzati dalla alta rigidità può produrre vantaggi di fabbricazione rispetto a geometrie equivalenti realizzate per mezzo di nastro continuo. Si può notare una forte dipendenza dallo spessore della forza e del modulo, aspetto che può limitare lo spessore minimo del prodotto che può essere implementato con successo.

In [19], S. G. Kravchenko, D. E. Sommer, B. R. Denos, A. J. Favaloro, C. M. Tow, W. B. Avery, R. B. Pipes si sono concentrati sull'analisi computazionale delle proprietà meccaniche a trazione del PPMC con meso-struttura stocastica. Per fare ciò è stato predisposto un particolare caso di studio, in cui si procede al taglio di prepeg platelets in una certa lunghezza, larghezza e spessore per poi comprimere tale carica nella pressa in un procedimento di stampaggio a compressione al fine di realizzare la geometria richiesta. Lo studio si propone di verificare quanto le caratteristiche della meso-struttura locale tra chip determinino i fattori dominanti che controllano il danneggiamento progressivo e la rottura macroscopica, il trasferimento dello stress a livello di meso-scala definisce la risposta del composito a sollecitazione e le proprietà meccaniche. È stato osservato che le proprietà a trazione dipendono fortemente dalla lunghezza dei chips, come previsto, e che il crescente spessore dei coupon incrementa le proprietà meccaniche, così che lo studio della meso-struttura stocastica del PPMC consente di sviluppare un composito con le caratteristiche funzionali desiderate e opportune per la specifica applicazione, con lo stato di orientamento dei chips che dipende fortemente dalla modalità in cui è avvenuto il flusso di stampaggio. Una volta giunti a compimento del processo di stampaggio, le proprietà effettive a trazione sono state verificate mediante appositi test e con l'ausilio di un sistema di DIC (Digital Image Correlation), così da calcolare la distribuzione degli sforzi (secondo Green-LaGrange), fino a ottenere la deformazione, da cui è possibile calcolare e ricavare la tensione, caratterizzando la risposta macroscopica dei provini e il modulo effettivo di trazione mediante analisi della curva "Stress-Strain".



Le proprietà meccaniche osservate presentano una grossa deflessione statistica, che è stata analizzata per assicurare una correlazione fra proprietà a trazione e meso-struttura. È stato importante osservare che la ridondanza interna della meso-struttura consente di redistribuire il carico dalle regioni di materiale danneggiato a quelle non compromesse, migliorando le proprietà meccaniche. La risoluzione in meso-scala dell'analisi di rottura progressiva è stata utilizzata per simulare una prova di trazione monoassiale, per cui le singole platelets che costituiscono la meso-struttura del coupon sono state esplicitamente modellate come omogenee. materiale ortotropo con proprietà meccaniche del nastro prepreg. Il materiale delle piastrine ha subito processi di danno intra- e inter-piastrina accoppiati, che sono stati trattati matematicamente dalla meccanica del danno continuo meccanica del danno. Gli studi sperimentali hanno mostrato che un miglioramento delle proprietà a trazione in un PPMC stocastico può essere raggiunto con un aumento dello spessore del composito e un migliore allineamento delle piastrine con la direzione del carico. L'analisi computazionale ha mostrato inoltre che i platelets più lunghi forniscono una maggiore variabilità delle proprietà effettive, mentre il nastro genitore più sottile ha permesso di ridurre la variabilità e di aumentare le medie delle proprietà efficaci del PPMC stocastico; l'aumento dello spessore di un PPMC stocastico migliora la rigidità e la resistenza media alla trazione.

In [20], D. LeBlanc, B. Landry, A. Levy, P. Hubert hanno studiato l'applicazione del processo dello stampaggio a compressione di parti di forme complesse utilizzando compositi termoplastici con fibre orientate in maniera randomica. Tali materiali offrono la possibilità di stampare parti complesse con un ciclo di lavorazione veloce. In questo articolo, sono stati studiati sperimentalmente gli effetti della pressione e della dimensione dei trefoli sulla qualità di una parte a forma di T. I risultati a bassa pressione hanno mostrato gli effetti delle dimensioni dei trefoli sul riempimento di una cavità con nervature di 25 mm. Sono state valutate tre pressioni di riempimento per ogni dimensione dei trefoli. I 10 bar di pressione applicata si sono rivelati sufficienti per consolidare completamente le parti con trefoli più piccoli (3,17 mm × 6,35 mm). L'analisi dei pezzi lavorati alla pressione di riempimento minima ha mostrato un contenuto di vuoti nella caratteristica della costola non superiore a 1,2%. La lavorazione ad alta pressione invece ha ridotto il contenuto di vuoti tra lo 0,22% e lo 0,44%. Sono stati successivamente approntati test meccanici secondo normativa ASTM D2344. Il lavoro ha portato ai seguenti risultati: è stato osservato che la pressione di riempimento di una cavità della costola ha mostrato una dipendenza dalle dimensioni dei fili.

I risultati principali mostrano che la lavorazione di una caratteristica complessa alla pressione minima di riempimento  $P_{fill}$  era sufficiente per raggiungere le proprietà meccaniche nominali. Questo suggerisce che la porosità si è rivelata dannosa per le prestazioni meccaniche in base ai test effettuati sul componente.

In [21], B.C. Jin, X. L. Atul Jain, C. González, J. L. S. Nutt si occupano dell'ottimizzazione della microstruttura e delle proprietà meccaniche di pannelli di materiale composito costituiti da fibre orientate, ricavate da prepreg riutilizzati. È stato osservato che le proprietà a trazione dipendono dalla modalità di cedimento, dal contenuto di vuoti del composito, dalla morfologia e dalla distribuzione dei chips, dal loro metodo di deposizione e dall'aspect ratio. In primo luogo, sono stati ricavati dei provini di geometria desiderata mediante processo di compression molding, al fine di sottoporli poi a test per valutare il comportamento elastico e la risposta del materiale al cedimento. Se si usa un metodo di lay-up dominato dall'agitazione meccanica della materia, ciò ovviamente influenza le proprietà meccaniche risultanti e la risposta a cedimento che sarà dominato dal cedimento della matrice "squeezata" fra i chips, mentre si osserva un bassissimo indice di rottura delle fibre e un alto coefficiente di variazione delle proprietà meccaniche. Quindi i parametri di processo giocano un ruolo chiave nella formazione dei difetti e nella definizione delle proprietà meccaniche. In particolare, questo lavoro ha affrontato il problema del metodo del lay-up, che è stato analizzato in due principali tipologie: l'agitazione meccanica e il "mat stacking" (che fornisce maggiori modulo e resistenza a trazione e minor coefficiente di variazione delle proprietà meccaniche). Il metodo del "mat stacking" prevede di posizionare i platelets con ottima organizzazione spaziale sulla superficie dello stampo in alluminio, mentre nel caso di agitazione meccanica essi sono sversati nella cavità dello stampo in modo randomico, provocando una disomogenea distribuzione fra le fasi. Il lavoro di analisi è stato validato con una campagna di test sperimentali, nella fattispecie delle prove di trazione. Dall'analisi geometrica degli "strands" che forniscono la base del materiale composito in questione, si osserva che un aspect ratio maggiore produce migliori proprietà meccaniche, a differenza dei chip con AR piccoli, che però offrono una maggior praticità in sede di manifattura, in quanto semplificano lo stampaggio di parti sagomate in forme complesse, grazie alla più facile drappabilità nei confronti della superficie dello stampo. Contestualmente, andando a realizzare un "blend" fra vari platelets dall'AR differente ottengo proprietà meccaniche bilanciate, di compromesso, fra i due casi estremi, e un buon compromesso nella formatura e nella drappabilità.

Il processo di polimerizzazione del materiale ha prodotto 8 pannelli, che sono stati divisi in 2 gruppi a seconda del tipo di lay-up, e per ogni gruppo ci sono 4 provini, uno per ogni aspect ratio. È stato osservato che a parità di aspect ratio del platelets, si ottiene uno spessore maggiore usando l'agitazione meccanica come tecnica di lay-up. Dai test meccanici, si evidenzia che i provini ottenuti per mat stacking presentano un'elevata porosità superficiale e un trascurabile flusso di resina sui bordi, mentre i provini ex mat stacking presentano un'ottima finitura superficiale e un "bleed" esteso, tanto più importante quanto maggiore è l'AR. In particolare, questo flusso di resina è agevolato grazie alla struttura ordinata, che determina le condizioni per la creazione di canali in cui la matrice può fluire ottimamente per ottenere quel sizing all'interfaccia fra le due fasi, che può solamente comportare un ottimo trasferimento degli sforzi fra le due fasi. Inoltre, col metodo di deposizione ordinata del materiale è possibile andare a controllare lo spessore del pannello di prova, che cresce con l'aspect ratio, mentre nel caso di deposizione per mera agitazione meccanica, lo spessore non cresce monotonamente, ma si possono notare aree ricche di resina disposte in maniera randomica. Riguardo il contenuto dei vuoti, si possono effettuare delle considerazioni generali: i pannelli da PPMC, se raffrontati con laminati quasi isotropi, presentano un contenuto di vuoti maggiore, una maggiore porosità. La distribuzione della massa è altresì meno omogenea, a causa della variabilità dei metodi di lay-up e della conseguente minore mobilità della resina. Combinando alti aspect ratio e mat-stacking, con conseguente distribuzione omogenea dei chips, è possibile ottenere basse porosità e quindi migliori caratteristiche morfologiche, dove per la deposizione per agitazione meccanica è purtroppo inevitabile ottenere un'eterogeneità notevole in tal senso. Nel contesto di una caratterizzazione meccanica del materiale, l'analisi delle curve stress-strain restituisce per quanto riguarda i provini per agitazione meccanica una repentina deviazione dalla linearità dovuta al gran numero e all'irregolarità dei difetti interni alla struttura. Quindi, a parità di AR, il metodo di laminazione per mat-stacking restituisce componenti dalle migliori proprietà meccaniche, e un minore coefficiente di variazione di queste. Infine sono state fatte tre osservazioni: il modulo elastico, la resistenza a rottura e la rigidità crescono con l'AR a parità di metodo di laminazione; nella fattispecie, il modulo elastico nei PPMC con alto aspect ratio dei platelets è simile a quello di laminati quasi isotropi. C'è dunque un grande "scatter" nelle proprietà meccaniche dei laminati ottenuti per agitazione meccanica.

In [22], P. Feraboli, F. Gasco, B. Wade, S. Maier, R. Kwan, A. Masini, L. DeOto, M. Reggiani hanno studiato un'importante applicazione del materiale composito a fibra discontinua espressa dalla tecnologia sviluppata dalla Lamborghini del Forged Composite® per i bracci della sospensione della Sesto Elemento. In particolare, i recenti sforzi di ricerca e sviluppo si sono concentrati su nuove forme di materiali fuori dall'autoclave e su processi automatizzati che possono aumentare notevolmente l'efficienza della produzione. Questo sforzo è culminato nello sviluppo della tecnologia Forged Composite®. Questa tecnica avanzata di stampaggio a compressione che utilizza composti di stampaggio di fogli di fibra di carbonio, e utilizza alte pressioni ma temperature convenzionali, è usato per produrre parti con geometrie complesse e soggette a carichi combinati, che sono state finora prodotte come forgiati in alluminio e titanio. Anche se il costo della materia prima associato a questi sistemi discontinui è tipicamente alto come il prepreg, la loro idoneità ad essere stampati in geometrie complesse con costi di lavorazione inferiori e tassi più elevati può giustificare la loro adozione per ridurre i costi complessivi di acquisizione delle parti. I sistemi discontinui in fibra di carbonio per lo stampaggio a compressione avanzato [24-28] hanno mostrato proprietà meccaniche altamente desiderabili, in particolare per quanto riguarda la rigidità, poiché il modulo medio riportato è identico a quello del laminato prepreg continuo quasi-isotropo (QI) usato come riferimento. I risultati mostrano anche che la distribuzione del rinforzo è effettivamente casuale, dando luogo a proprietà elastiche e di resistenza quasi-isotrope nel piano. Inoltre, questa forma di materiale è molto meno influenzata dalla presenza di difetti, fori, tacche e danni da impatto rispetto al laminato QI di riferimento. Ci sono degli svantaggi in queste forme di materiale, in particolare la resistenza media senza intaglio è inferiore a quella del QI, in particolare in tensione e, in misura minore, in compressione, taglio e flessione. La resistenza alla trazione è infatti inferiore alla resistenza alla compressione, a differenza dei compositi a fibra continua. La tecnologia Forged Composite®, come è stata registrata da Lamborghini in collaborazione con Callaway Golf, consente di ridurre drasticamente i cicli di produzione e di realizzare complesse geometrie tridimensionali che non sono tipicamente realizzabili con i laminati a fibra continua. Questo articolo si concentra sullo sviluppo dei bracci di sospensione Forged Composite®, la cui progettazione preliminare, la modellazione FEA e i test sono stati eseguiti presso l'ACSL/UW. La progettazione CAD dettagliata dei bracci, così come la progettazione dello stampo e la lavorazione sono state eseguite dall'ICE (Figura 14).

L'obiettivo del progetto era quello di sostituire i bracci di controllo a quadrilatero in alluminio delle sospensioni, che sono utilizzati nella Lamborghini Gallardo LP570-4 Superleggera del 2010, e di ottenere una riduzione di peso del 30%, mantenendo un costo finale di acquisizione dei pezzi uguale o migliore.



*Figura 14 - Braccetto Inferiore Lamborghini realizzato col metodo Forged Composite®*

Il braccetto anteriore inferiore, è quello che è più critico in termini di requisiti, e per questo motivo la discussione si concentrerà sullo sviluppo di questo braccetto. Il design del braccio inferiore anteriore è caratterizzato da 9 diversi casi di carico operativo. Il componente è progettato tramite FEA, e dimensionato in base alle sollecitazioni massime di Von Mises per ogni caso di carico. La sollecitazione massima viene confrontata con una resistenza ammissibile, che è circa il 30% inferiore al carico di snervamento nominale di 260 MPa per tenere conto della vita a fatica. I carichi sono introdotti attraverso “Rigid Beam Elements” in “Multi Point Constraints” nelle posizioni della boccia e del giunto sferico. Dal FEA, i casi di carico più critici per lo stress sono associati all'operazione di frenata, e portano a un picco di stress al raggio interno di 207 MPa (Figura 15). D'altra parte, il carico più critico in termini di deflessione originata è un carico laterale di 10.000 N, associato alla frenata in curva, e lo spostamento ammonta a 24 mm. Ogni altro caso di carico impartisce una deflessione che è un ordine di grandezza inferiore, compresa quella in direzione verticale. Il materiale CF-SMC (Carbon Fiber Sheet Molding Compound) è fornito da Quantum Composites. È composto da fasci di fibra di carbonio lunghi 25,4 mm, distribuiti in modo casuale in un tappeto, inseriti tra due strati di resina vinilestere. La pila viene compattata tra i rulli in forma di foglio, e poi arrotolata in rotoli come un prepreg standard, secondo quanto prevede lo stato dell'arte in [6].

Il contenuto di fibra di carbonio è del 53% in peso. Il materiale è progettato per lo stampaggio a compressione in uno stampo metallico in acciaio abbinato in una pressa riscaldata. La temperatura di polimerizzazione varia tra 270-320°F (132-160°C), la pressione applicata varia da 1000-1500 psi (69-103 bar) e il tempo di polimerizzazione varia da 3 a 5 minuti. La carica ha una copertura tipica dello stampo del 60-70%. La Tg del materiale è di 245°F (120°C). Lo spessore minimo della parte ottenibile con questo materiale è di solito 0,1 in. (2,5 mm). È stato eseguito un dettagliato ed esteso sforzo di test per caratterizzare il comportamento del materiale nei seguenti ambiti: trazione, compressione, taglio, flessione, taglio inter laminare, proprietà a foro aperto, proprietà a foro pieno, compressione dopo l'impatto e schiacciamento dinamico, al fine di costruire un database statisticamente significativo e confrontarlo con il database esistente per i materiali tradizionali a base epossidica in uso alla Lamborghini. Bisogna ricordare che per i CF-SMC discontinui, le proprietà di trazione sono le più critiche, mentre la compressione e la flessione sono, nell'ordine, significativamente superiori. la progettazione della sospensione diventa particolarmente critica in termini di rigidità, poiché la resistenza è quasi identica alla base in alluminio.

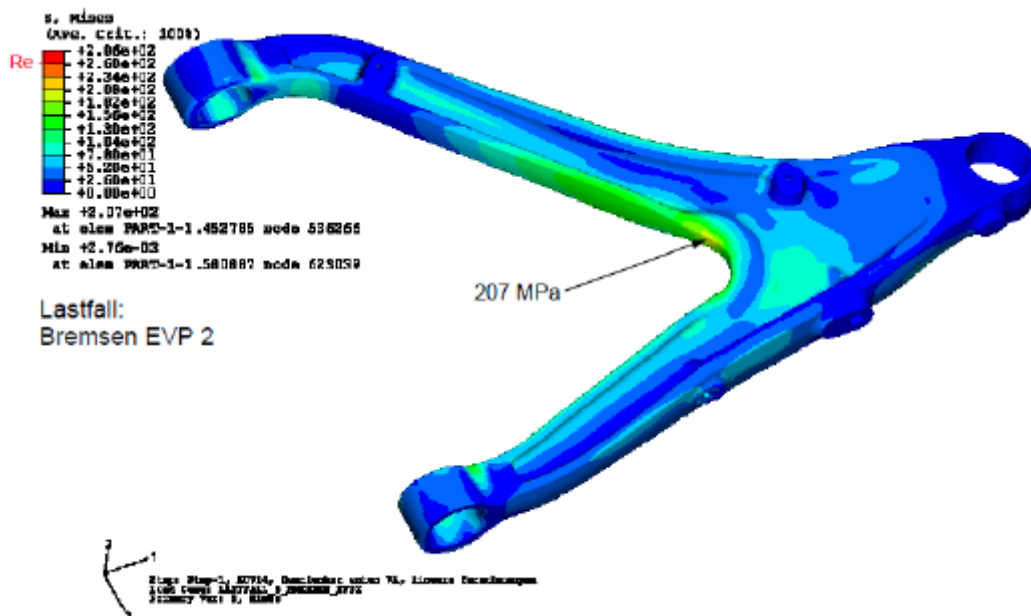


Figura 15 - Stato di sollecitazione del braccio inferiore della sospensione Lamborghini.

La sostituzione diretta del materiale Forged Composite® con la geometria esistente genera una deflessione di 60 mm in direzione laterale, quasi 2,5 volte superiore a quella dell'alluminio. Mentre molti parametri, come la posizione e il tipo di punti di attacco, le distanze e l'involucro geometrico esterno, non potevano essere modificati, è stato possibile modificare il layout interno. Il cambiamento più evidente è l'aggiunta della terza traversa, che fornisce un aumento significativo della rigidità laterale. In secondo luogo, tutte le nervature sono assottigliate. Il materiale è tagliato in modelli rettangolari per formare la carica, che è dimensionata in base al peso nominale della parte finale. La carica è composta da una carica principale e diverse cariche secondarie, che sono posizionate strategicamente. All'interno della carica vengono utilizzati rinforzi unidirezionali selettivi localizzati. Il taglio della carica con un tavolo da taglio automatizzato richiede solo pochi secondi, mentre il posizionamento della carica richiede 2-3 minuti. Una volta che la carica è pronta, lo stampo di alluminio preriscaldato viene chiuso e viene applicata la pressione. Il ciclo di polimerizzazione è inferiore a quattro minuti. La parte viene poi estratta dallo stampo con una forma quasi netta, con una piccola rifinitura richiesta. Il braccio di controllo inferiore finale pesa 1,25 kg per la sola fibra di carbonio, e 1,4 kg con l'inserito in alluminio incollato. Il costo finale del pezzo è altamente competitivo con la costruzione in alluminio forgiato, dato che il tempo totale del ciclo è poco meno di un'ora, dalla materia prima al pezzo completo con boccole e giunto sferico. In conclusione, la Tecnologia adottata da Lamborghini ha permesso la realizzazione dei primi bracci di controllo delle sospensioni in fibra di carbonio che soddisfano gli stessi requisiti statici e di durata di quelli in alluminio forgiato che sostituiscono. Il caso di carico più critico, associato alle operazioni di frenata e di curva, impone elevati carichi laterali, che hanno richiesto i maggiori sforzi nella riprogettazione del componente, affinché i bracci di controllo siano capaci di soddisfare i criteri di deflessione massima della sospensione in alluminio.

In [23], P. Anandakuma, M. Venkata Timmaraju, R. Velmurugan si sono occupati della progettazione di un braccio di controllo di una sospensione automobilistica realizzato in materiale composito termoindurente. I compositi termoindurenti sono preferiti nelle applicazioni automobilistiche e aerospaziali grazie alla loro leggerezza, tempi di ciclo più brevi, alta tenacità e riciclabilità. In particolare, i compositi rinforzati con fibre di vetro sono stati ampiamente utilizzati nell'ambito automobilistico come sostituto leggero dei metalli. La principale limitazione composito rinforzato con fibre di vetro corte è bassa resistenza e rigidità.

Questa limitazione può essere superata inserendo inserti continui rinforzati con fibre lunghe nei punti critici delle parti strutturali. Nel presente studio, le proprietà meccaniche di un componente prodotto con tale tecnologia innovativa sono state verificate sperimentalmente in condizioni di carico longitudinale, trasversale e di taglio. Questi risultati sperimentali sono stati implementati in una simulazione numerica agli elementi finiti. Il braccio di controllo superiore è uno dei componenti portanti utilizzato nel sistema sospensivo automobilistico, la sua funzione è quella di mantenere la stabilità del veicolo quando esso viene sottoposto a urti e curve. Negli ultimi anni, la domanda di materiali leggeri nell'industria automobilistica è aumentata a causa dei regolamenti ambientali e governativi. fibra di vetro corta in matrici termoplastiche è estesamente impiegata nell'industria automobilistica e aerospaziale, ma le sue destinazioni sono limitate a componenti non strutturali a causa della bassa resistenza e rigidità. Per poterli utilizzare per componenti strutturali considerando la loro facilità di stampaggio, gli inserti in fibra continua possono essere posizionati lungo la direzione di carico delle parti strutturali, come rinforzi selettivi, usando la tecnica di fabbricazione chiamata 'sovrastampaggio'. Il braccio di controllo è stato studiato mediante l'analisi agli elementi finiti. Il valore di stress più alto si è verificato in prossimità della costola più vicina alla posizione caricata ed è 48,54 MPa. Questa costola è fatta di fibre di vetro corte con percentuale in peso del 30% e matrice in polipropilene. Lo stress critico nel componente può essere ridotto utilizzando inserti di rinforzo in fibra continua unidirezionali. Dopo aver posizionato gli inserti in fibra continua nella parete inferiore del braccio di controllo. Oltre al modello in acciaio, sono stati studiati tre differenti modelli realizzati in composito. La sollecitazione più alta si è verificata nella costola più vicina alla posizione di carico è di 48,54 MPa. Quindi, lo stress critico nel componente può essere ridotto utilizzando inserti unidirezionali in fibra continua, posizionati nella parete inferiore e nella parete laterale del braccio di controllo. La deflessione trovata è stata di 3,25 mm, che è leggermente superiore a 1,86 mm ottenuta utilizzando fibre di vetro corte con polipropilene. La sollecitazione massima può essere ridotta del 26,73% se il braccio di controllo viene realizzato in fibre di vetro corte e polipropilene con inserti di nastro unidirezionale, il che implica il posizionamento del tessuto di vetro unidirezionale in fondo e sul lato, in modo da sostenere in modo efficace il carico, riuscendo peraltro a conseguire un importante risultato di riduzione del peso del braccio di controllo del 67,86%.



I presenti documenti e pubblicazioni scientifiche riportati sono stati rielaborati e sintetizzati, per una trattazione più compatta, nei loro aspetti cruciali e di maggiore interesse ai fini dello studio portato avanti nel lavoro di tesi. In conclusione, è possibile riassumere e sostenere che:

- Il metodo industriale dello stampaggio a compressione può essere impiegato in modo proficuo nella realizzazione industriale di componenti derivati da ritagli di prepreg, ricavati da sfrido del processo di taglio, riuscendo a perseguire obiettivi di buona finitura estetica e bassa porosità;
- Il modulo del materiale composito così realizzato è prevedibilmente meno rilevante di quello di un componente realizzato con materiale preimpregnato “vergine” (circa 33GPa per il materiale oggetto di studio), ma comunque è possibile ottenere proprietà meccaniche comparabili a quelle assicurate da leghe metalliche leggere, come alcune tipologie di alluminio commerciale, e laminati quasi-isotropi;
- La diminuzione del modulo a trazione è nel range del 15-30% rispetto al materiale vergine;
- Le prestazioni meccaniche del PPMC incrementano col crescere della lunghezza e dell’aspect ratio dei platelets;
- Riducendo l’aspect ratio dei chip (inteso come rapporto lunghezza su larghezza nel piano) migliorano le caratteristiche di stabilizzazione del composito e di conseguenza si può assistere a un decremento delle porosità;
- Per questa tipologia di materiale composito risultante da sfridi, si è osservato che la modalità preminente di frattura è la delaminazione tra le “piastrine”, ed è molto più frequente della rottura della fase della matrice, ma in misura ancora più marcata della rottura della fibra di rinforzo, fenomeno che si può osservare ben più raramente in letteratura.

## 4 Il Progetto – Generalità e obiettivi.

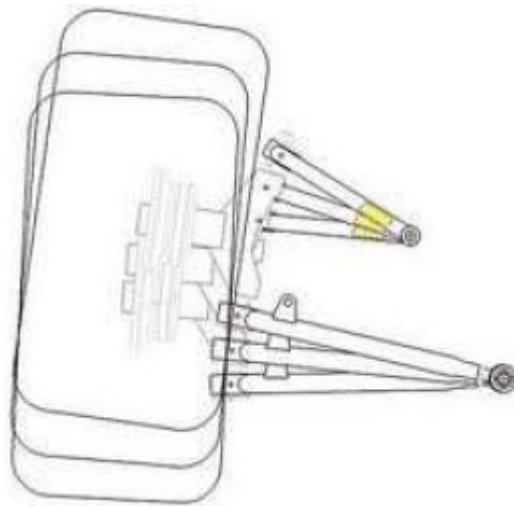
Il presente lavoro di tesi, come è stato precedentemente discusso, si sviluppa nell'ambito del progetto CIRCE, nella fattispecie, prende le fila di un precedente lavoro che si è interessato di dare una caratterizzazione meccanica molto precisa al materiale oggetto di studio, uno studio pionieristico che ha provveduto a tracciare un nuovo filone a livello dati e metodologie, finora assenti in letteratura. Quindi, al fine di implementare e portare avanti questa importante esperienza, si è cercato di trovare una destinazione d'uso, un'applicazione funzionale e vantaggiosa a questo composito derivante da sfrido. Finora, gli utilizzi più frequenti che se ne sono fatti hanno riguardato componenti estetici e pannellature da destinare a vari settori, tra cui quello d'elezione, ovvero l'automobile, elementi insomma che non erano sottoposti ad un uso gravoso, come quello strutturale a sostituzione di elementi metallici, impiego in cui i compositi derivanti da fibra vergine hanno già ampiamente dimostrato il loro grande valore. Purtroppo, questo materiale è estremamente penalizzato per via del suo modulo elastico, che governa la rigidità del corpo, molto poco competitivo (mediamente 33 GPa, meno della metà dei 70 che assicura una buona lega metallica di alluminio commerciale). Questo preclude un suo ipotetico impiego in ambito strutturale "puro", perché il tentativo, con ogni probabilità, porterebbe a un sonoro fallimento. Tuttavia, dato il grande know-how in ambito automotive e racing e la forte spinta innovatrice della azienda ospitante, si è deciso di portare avanti l'idea sostanzialmente nuova e molto "coraggiosa", con pochi precedenti in letteratura, di impiegare tale materiale composito in un ambito cruciale e semi-strutturale come quello del gruppo sospensivo dell'autoveicolo sportivo leggero. Nella fattispecie, dopo un confronto interno al reparto di Ricerca e Sviluppo della HP Composites SpA, si è deciso di portare avanti la prototipazione e l'ottimizzazione di un braccetto inferiore del gruppo sospensivo di suddetto autoveicolo. Il componente oggetto di studio è realizzato in una lega di alluminio, pertanto sarà necessario un intervento sostanziale per adeguarlo ai vincoli tecnologici dettati dal nuovo materiale composito, il quale porterà ad una ridefinizione completa della geometria. L'obiettivo che è stato posto, e che è stato raggiunto mediante una serie di iterazioni all'interno di un processo di ottimizzazione, è quello di realizzare il

modello di un componente caratterizzato dalle stesse prestazioni meccaniche del pezzo originale, ma con un nuovo e diverso materiale rispetto all'alluminio dell'originale, e mantenendo un peso nell'intorno di quello del componente di partenza nonostante le proprietà meccaniche peggiori assicurate dal nuovo materiale, se paragonate a quelle dell'alluminio di base.

## 4.1 La Sospensione automobilistica.

Al fine di fornire una adeguata contestualizzazione teorica al lavoro, nel seguito viene affrontata una trattazione generale relativa al gruppo sospensivo di un autoveicolo, toccando i temi sostanziali che interessano le varie parti che lo compongono. Le interazioni più significative che una vettura sviluppa con l'ambiente con cui essa entra in contatto, oltre ovviamente alle sollecitazioni derivanti dalle forze aerodinamiche, sono le forze che si trasmettono tra il battistrada degli pneumatici e la strada; la prestazione che la vettura è in grado di imprimere dipende da come avviene questa trasmissione, poiché da ciò dipende la capacità della vettura di scaricare al meglio la potenza erogata dal gruppo motopropulsore. Detto ciò, è evidente che la strada maestra per ottimizzare lo sfruttamento delle capacità degli pneumatici è quella di mantenere la massima estensione possibile della impronta a terra degli stessi, ovvero lungo tutta la loro larghezza. A tal proposito, la principale finalità del sistema sospensivo dell'autoveicolo è proprio quella di assicurare il miglior contatto possibile tra il battistrada e il fondo stradale, così che la trasmissione delle relative sollecitazioni possa avvenire nel modo più corretto ed esteso possibile. Dallo studio della dinamica del veicolo appare chiaro che, quando una vettura si trova in percorrenza di curva, l'accelerazione laterale da origine inevitabilmente un certo angolo di rollio; questo sarà tanto più accentuato, quanto più sarà alto il baricentro della vettura e cedevole il suo assetto. In tale contesto, si determina quindi un trasferimento di carico sulle ruote esterne del veicolo, con conseguente estensione delle sospensioni interne ed una compressione di quelle esterne. Per via di tale trasferimento di carico, accade che le ruote esterne si trovano a dover gestire e contrastare la maggior parte della forza centrifuga della vettura, ed è quindi l'impronta a terra di queste a rivestire un ruolo fondamentale. Ponendosi nel caso di dotarsi di una tipologia di gruppo sospensivo la cui configurazione sia tale che la gomma, durante la sua escursione,

si mantenga sempre parallela al piano di simmetria dell'autoveicolo, si può osservare che durante il rollio del corpo vettura, la ruota esterna si inclinerà di altrettanto verso l'esterno; se in condizioni statiche la ruota si trovava in posizione perfettamente ortogonale al piano strada, adesso appoggerà quasi esclusivamente sulla spalla esterna, con riduzione di impronta a terra e quindi di aderenza, andando di conseguenza a peggiorare il dato di motricità disponibile in percorrenza di curva. Un primo modo per porre rimedio al problema è quello di imporre un grande valore di campanatura statica alla ruota, che compensi la perdita di campanatura dovuta al rollio della vettura; lo svantaggio principale di questa soluzione è che la ruota si trova in condizioni non più ottimali in tutte le altre condizioni della marcia, quindi si può pensare che tale stratagemma non possa essere quello ideale su cui basarsi nell'individuazione della corretta configurazione del gruppo sospensione. La soluzione più frequentemente adottata nel campo dei veicoli ad alte prestazioni è quella di definire un meccanismo cinematico delle sospensioni che preveda di assicurare un certo guadagno di campanatura durante il movimento di compressione, così da consentire al progettista di selezionare angoli di campanatura statici minori (Figura 16).



*Figura 16 - Recupero campanatura in una sospensione a ruote indipendenti*

Altro parametro essenziale alla definizione della cinematica di un gruppo sospensivo è rappresentato dal posizionamento del centro di rollio del corpo vettura, come illustrato in Figura 17.

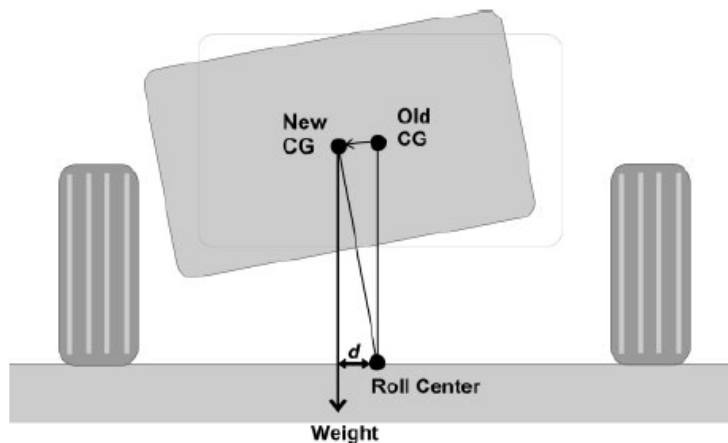


Figura 17 - Centro di rollio

Questo può essere definito come il centro di istantanea rotazione attorno al quale la massa sospesa effettua la propria rotazione. La distanza che intercorre fra di esso ed il centro di massa della vettura rappresenta il braccio della forza messa in atto dall'accelerazione laterale che dà luogo al momento di rollio del corpo vettura. Le posizioni iniziali e i relativi spostamenti dei centri di rollio anteriore e posteriore rivestono un ruolo sostanziale importanza nei riguardi del comportamento dinamico del veicolo. Il veicolo da cui proviene il componente oggetto di riprogettazione adotta un sistema a doppi triangoli sovrapposti, un lay-out sospensivo largamente impiegato nei veicoli: esso è definito come un cinematismo di tipo piano, abbastanza raffinato, che consente di perseguire ottimi risultati in termini di recupero di campanatura e consente di analizzare e mettere in campo i giusti mezzi per prevedere efficacemente le posizioni e gli spostamenti dei centri di rollio. Se idealmente si va a proiettare il cinematismo su di un piano verticale ortogonale alla direzione di marcia, esso funziona come un quadrilatero articolato in cui il portamozzo è la biella e i due triangoli rappresentano le manovelle. In linea teorica, si hanno due gradi di libertà per ognuno dei quattro punti, otto in totale; il che rappresenta una difficoltà nel trovare delle combinazioni di valori ottimali, o per lo meno efficaci, tra le infinite possibili. È possibile fornire una breve trattazione circa le masse non sospese. Le Masse non Sospese, facendo riferimento alle pubblicazioni presenti in letteratura [24], sono costituite da tutte quelle parti le quali si trovano comprese tra il gruppo sospensivo e il fondo stradale. In condizioni di normale funzionamento, queste non modificano la distanza che intercorre fra di loro e il terreno. Di converso, ciò che si trova più in là del sistema sospensivo viene denominato come "massa sospesa".

I principali componenti facenti parte delle Masse non Sospese vengono di seguito menzionati: lo pneumatico, il cerchione, il montante ruota, il mozzo, i cuscinetti ruota e l'impianto frenante. Il pneumatico è un elemento fondamentale in quanto permette di sviluppare le forze necessarie per il moto del veicolo. Il pneumatico è un componente deformabile e la sua interazione con il suolo permette di sviluppare forze longitudinali, di trazione o di frenatura, e forze laterali necessarie per impostare una curva. Le forze longitudinali che si sviluppano in seguito a uno scorrimento  $S$  del pneumatico definito dalla normativa SAE J670, come riportato dalla (4.1):

$$S = \frac{\Omega - \Omega_0}{\Omega_0} \quad (4.1)$$

Dove  $\Omega$  è la velocità angolare della ruota e  $\Omega_0$  è la velocità angolare in puro rotolamento. Le forze laterali invece si manifestano una volta che viene messa in deriva la ruota. L'angolo di deriva  $\alpha$  è l'angolo che intercorre fra il piano mediano della ruota vista dall'alto e la direzione che possiede la velocità della ruota. Insieme alla forza laterale, si può osservare sulla gomma lo sviluppo di un momento di autoallineamento originato dalla distribuzione asimmetrica delle tensioni sul pneumatico. La caratterizzazione degli pneumatici è di tipo semi-empirico e i modelli comunemente utilizzati sono quelli di Pacejka. Queste funzioni subiscono l'influenza di una serie di parametri: tra questi, colui che riveste una sostanziale importanza è il carico verticale sulla ruota, il quale nell'eventualità in cui esso aumenti, produce un incremento anche delle forze che sono generate a terra. Il carico verticale è costituito dal peso del veicolo e dal carico aerodinamico. È possibile inoltre menzionare un certo numero di parametri che influenzano le curve, essi sono le condizioni di aderenza del terreno, il camber, etc. Ponendosi di analizzare il caso più generico, ossia il caso di carico combinato, si registra una interconnessione di una sollecitazione con l'altra. Il diagramma che descrive questa dipendenza prende il nome di diagramma di aderenza. Sull'asse orizzontale è riportata l'aderenza impiegata in longitudinale  $\mu_x$  e sull'asse verticale l'aderenza impiegata in laterale  $\mu_y$ . Queste grandezze sono definite come il rapporto tra il carico verticale e il carico rispettivamente longitudinale e laterale. Le funzioni traslano superiormente e inferiormente in base all'angolo di deriva e verso destra o verso sinistra a seconda dello scorrimento. Per ciò che concerne il montante, si tratta di un elemento strutturale il quale deve assicurare una adeguata rigidità al fine di supportare il movimento della ruota.

Sono ricavati internamente a tale componente gli alloggiamenti destinati ad ospitare i cuscinetti ruota che trasmettono le forze a terra al telaio. Il montante rappresenta anche quel componente a cui sono ancorate le sospensioni e il tirante di sterzo. L'impianto frenante, invece, persegue l'obiettivo di modificare la velocità del veicolo fino all'arresto senza compromettere la traiettoria impostata. Nelle Masse non Sospese sono allocati i dischi freno, le pinze e i sensori necessari ai controlli di stabilità. In generale, nell'eventualità in cui si debba eseguire una progettazione di una Massa non Sospesa, occorre tentare in ogni modalità consentita di ridurre il peso, essenzialmente per tre motivi:

- In primis, ovviamente, diminuire il peso totale del veicolo consente di ottenere prestazioni più buone in termini di accelerazione, a parità di potenza resa disponibile alle ruote, assumendo per ipotesi che le gomme siano in grado di trasmettere la massima forza senza slittamento;
- In secondo luogo, occorre tenere presente che le masse non sospese sono delle masse rotanti a cui viene impressa una certa accelerazione dal gruppo motopropulsore, e dal loro momento di inerzia deriva un'influenza diretta sulle prestazioni messe in campo dall'automobile;
- Infine, il peso delle masse non sospese va ad incidere sulla tenuta di strada della vettura, quello che dagli addetti ai lavori è denominato "handling": da questa massa dipende il secondo picco di risonanza della macchina. Questa frequenza deve essere la più grande possibile per evitare una drammatica perdita di capacità di generare forze delle gomme, dovuto a una grande variazione di carico verticale.

Per quanto riguarda le Sospensioni, queste sono generalmente composte da una molla, uno smorzatore, una barra anti-rollio e infine un sistema di bracci. La loro funzione principale per un veicolo stradale è quella di garantire il confort a bordo veicolo disaccoppiando il moto della cassa da quello delle ruote costrette a seguire un profilo stradale fortemente irregolare. Per una vettura da competizione invece la funzione principale delle sospensioni è quella di gestire le performance del veicolo dal punto di vista dinamico, mantenendo nel modo più accurato possibile il battistrada aderente al manto stradale.

Per la dinamica del veicolo è importante sia la cinematica delle sospensioni, influenzata dalla geometria e da angoli caratteristici, sia la dinamica delle sospensioni, influenzata da caratteristiche come la rigidità delle molle e delle barre anti-rollio e dei coefficienti di smorzamento degli ammortizzatori. Quando si parla di geometria delle sospensioni si intende il modo in cui la massa non sospesa è collegata al telaio. Questa connessione non influenza solo il moto relativo tra le due parti, ma controlla anche le forze scambiate tra le due. Esistono moltissimi tipi di geometria di Sospensione e ogni particolare tipo di geometria deve essere progettato in modo da incontrare i particolari requisiti della specifica applicazione. Per brevità viene descritta solo geometria studiata in questo lavoro di tesi: SLA (Short-Long Arm). I bracci sospensione sono due triangoli, uno superiore UCA (upper control arm) e uno inferiore LCA (lower control arm). Molle e ammortizzatori lavorano in parallelo e ricevono il moto attraverso un push rod collegato direttamente ai bracci [24]. L'entità dello spostamento imposto agli elementi elastici è proporzionale al movimento della ruota in funzione del rapporto di installazione che dipende unicamente dalla geometria della sospensione. I punti caratteristici della geometria di una Sospensione prendono il nome di "Hard Points" e questi sono il centro degli snodi sferici dei bracci sospensione, del tirante di sterzo e degli ammortizzatori. Le coordinate degli Hard Points determinano angoli e punti caratteristici che influenzano le prestazioni del veicolo:

- **Altezza del centro di rollio:** il centro di rollio CG si determina geometricamente prolungando in vista frontale le linee aventi la direzione dei bracci sospensione. La loro intersezione è il centro di istantanea rotazione della massa non sospesa. Infine è necessario unire con una retta questo punto con il centro dell'orma di contatto del pneumatico. Facendo questa operazione per la ruota destra e sinistra, l'intersezione tra le due rette risultanti è il centro di rollio. Il centro di rollio è importante perché è il punto in cui vengono scambiate le forze laterali tra masse non sospese e masse sospese.
- **Angolo di Camber:** l'angolo di camber  $\phi$  è l'angolo compreso tra il piano mediano della ruota e la normale al suolo in vista frontale del veicolo. L'angolo di camber è positivo se la parte alta della ruota tende ad "uscire" dal veicolo e negativo viceversa. In generale un angolo di camber genera una forza laterale sulla gomma anche con un angolo di deriva pari a zero.



- La forza laterale di picco a parità di angolo di deriva varia in funzione dell'angolo di camber.
- **Condizione di Ackermann:** in curva, il centro di rotazione è definito come l'intersezione tra le rette normali alla ruota anteriore e alla ruota posteriore. Il centro di rotazione del veicolo è chiaramente uno solo ma le ruote sterzanti compiono un raggio diverso, il che significa che per ottenere l'intersezione delle normali alle ruote in un unico punto (condizione di Ackermann) la ruota interna alla curva dovrà sterzare di un angolo maggiore rispetto a quella esterna. La condizione di Ackerman dipende unicamente dalla geometria dei punti sospensione. Nelle vetture da competizione è preferibile una condizione di "Reverse Ackermann" perché se la ruota esterna è più sterzata svilupperà una forza laterale maggiore sia per il maggiore angolo di deriva sia perché più caricata verticalmente grazie al trasferimento di carico laterale.

## 4.2 Il Braccio di una sospensione automobilistica.

I bracci, superiore ed inferiore, della sospensione rappresentano il collegamento meccanico tra la massa sospesa e la massa non sospesa. La loro rigidità è dunque un elemento fondamentale da tenere in considerazione durante la progettazione perché andrà ad influenzare la dinamica del veicolo. Essi sono componenti estremamente sollecitati e fondamentali per il corretto funzionamento della vettura, pertanto è necessario garantirne affidabilità e sicurezza. Il braccio inferiore della sospensione dell'autoveicolo è in particolare una delle parti che supporta il carico maggiore nell'ambito del sistema sospensivo durante la dinamica di marcia, esso è posto nella parte anteriore del corpo vettura e si occupa di mettere in collegamento la massa non sospesa, e quindi il giunto sferico a cui è collegato tutto l'elemento ruota, con il telaio. A causa del suo ruolo di collegamento, esso riceve delle sollecitazioni rilevanti in seguito all'impatto delle ruote con la superficie d'appoggio.

Inoltre, il braccio inferiore dovrebbe mantenere non solo un'alta resistenza, ma anche un'elevata rigidità per garantire che l'allineamento delle ruote sia sempre mantenuto affidabile. Per le ragioni di cui sopra, il CFRP può essere un ottimo materiale alternativo, per un braccio inferiore, ad una lega di alluminio come nel presente caso di studio, per la sua resistenza specifica, la rigidità specifica e la capacità di smorzamento. Un'altra funzione di carattere generale che deve essere garantita dai bracci di controllo è quella di evitare che le ruote di un veicolo sbandino in modo incontrollato quando le condizioni della strada non sono regolari; i bracci di controllo superiori e inferiori hanno strutture diverse in base al modello e allo scopo che dovrà assolvere il veicolo. Le migliori prestazioni dinamiche sono rese possibili da sistemi di sospensioni a ruote indipendenti, che permettono alle stesse di muoversi indipendentemente l'una dall'altra. In questi sistemi la massa non sospesa del veicolo è anche diminuita, ed è permesso l'utilizzo di molle più morbide dal momento che i problemi di vibrazione della ruota anteriore sono minimizzati, ed è possibile effettuare un utile recupero di termini di angolo di camber. L'usura irregolare degli pneumatici, le vibrazioni o il disallineamento delle sospensioni, il tremolio del volante o le vibrazioni sono le cause principali del cedimento del braccio inferiore della sospensione. La maggior parte degli esempi reperibili in letteratura di cedimento di tale componente, purtroppo, hanno esito catastrofico. Quindi l'integrità strutturale del braccio di sospensione è un aspetto cruciale della progettazione sia in condizioni statiche che dinamiche. Poiché il metodo dell'analisi agli elementi finiti (FEM) offre una migliore visualizzazione del comportamento e del cedimento di questo componente cruciale, l'analisi delle distribuzioni delle sollecitazioni intorno ai tipici siti di inizio delle rotture è essenziale per portare a termine una progettazione ottimale. Pertanto, questo lavoro si propone di effettuare l'ottimizzazione strutturale del braccio inferiore della sospensione di un veicolo servendosi di software Siemens NX/Nastran/Simcenter, utilizzato largamente sia nell'ambito dell'azienda ospitante, sia del Polo Universitario di riferimento.

### 4.3 Determinazione dei carichi agenti sul componente.

Il comportamento in curva di un veicolo motorizzato costituisce un aspetto particolarmente importante ai fini della valutazione complessiva dei carichi applicati al braccio inferiore della sospensione, ed ha un'importanza determinante nella valutazione delle performance del veicolo.

Quest'ultimo ed il pilota costituiscono un sistema a "circuitto chiuso" nel senso che il guidatore osserva la posizione e la direzione del veicolo e, di conseguenza, corregge il proprio input (ad esempio l'angolo volante) in modo da ottenere la traiettoria ed il movimento desiderati. L'approccio consiste nel valutare prima il comportamento del veicolo in curva a basse velocità e successivamente nel considerare le differenze che insorgono in condizioni di alta velocità.

### 4.3.1 Comportamento del veicolo in curva a basse velocità.

Quando un veicolo si muove su di una traiettoria curva con una velocità di avanzamento molto bassa, si genera una forza centrifuga, dovuta alla curvatura della traiettoria, molto ridotta e gli pneumatici scambiano col terreno forze laterali praticamente nulle. Le velocità dei centri delle ruote risultano quindi contenute nei loro piani e gli angoli di deriva sono nulli. Tale condizione prende il nome di sterzata cinematica e definisce il moto del veicolo lungo una traiettoria curva determinato dal puro rotolamento delle ruote. Se, dunque, gli pneumatici non hanno angolo di deriva, affinché risulti verificata la condizione di sterzata cinematica, le rette ortogonali ai piani medi delle ruote devono poter passare tutte per uno stesso punto, che individua il centro di curvatura (Figura 18). Gli angoli di sterzata che permettono di rispettare la precedente condizione geometrica vengono normalmente definiti angoli di Ackermann, come espresso dalla (4.2):

$$\tan(\delta_o) = \frac{L}{R + t/2} \quad \tan(\delta_i) = \frac{L}{R - t/2} . \quad (4.2)$$

Per piccoli angoli si ottiene la (4.3):

$$\delta_o \cong \frac{L}{R + t/2} \quad \delta_i \cong \frac{L}{R - t/2} \quad (4.3)$$

Con  $\delta$  che corrisponde all'angolo medio, come riportato in Figura 18.

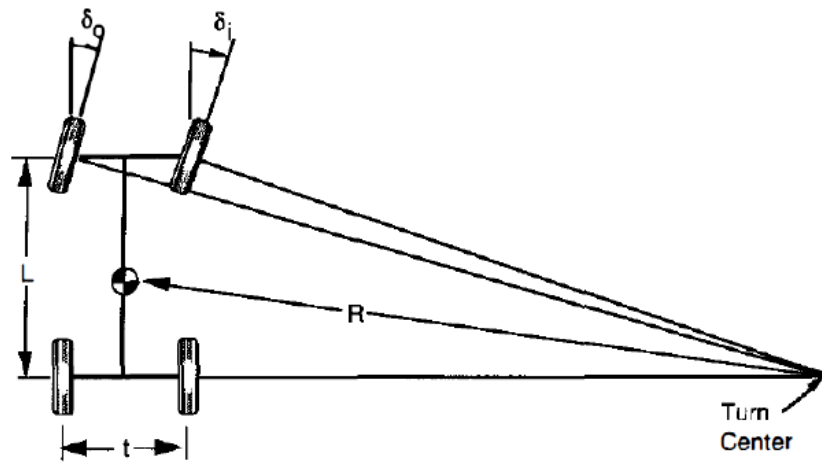


Figura 18 - Centro di curvatura veicolo

### 4.3.2 Comportamento del veicolo ad alte velocità.

Rispetto alla condizione precedente, ad alte velocità si genera un'accelerazione laterale consistente, per cui la forza centrifuga risultante deve essere controbilanciata dalle forze laterali che gli pneumatici scambiano col suolo, in corrispondenza di angoli di deriva non nulli. In tal caso si dice che il veicolo è in condizioni di sterzata dinamica. Per valutare il comportamento di un veicolo a quattro ruote, che viaggia su una traiettoria curva ad alta velocità, ci si può avvalere del semplificato modello monotraccia, in cui gli pneumatici di uno stesso assale vengono sostituiti da un unico pneumatico equivalente.

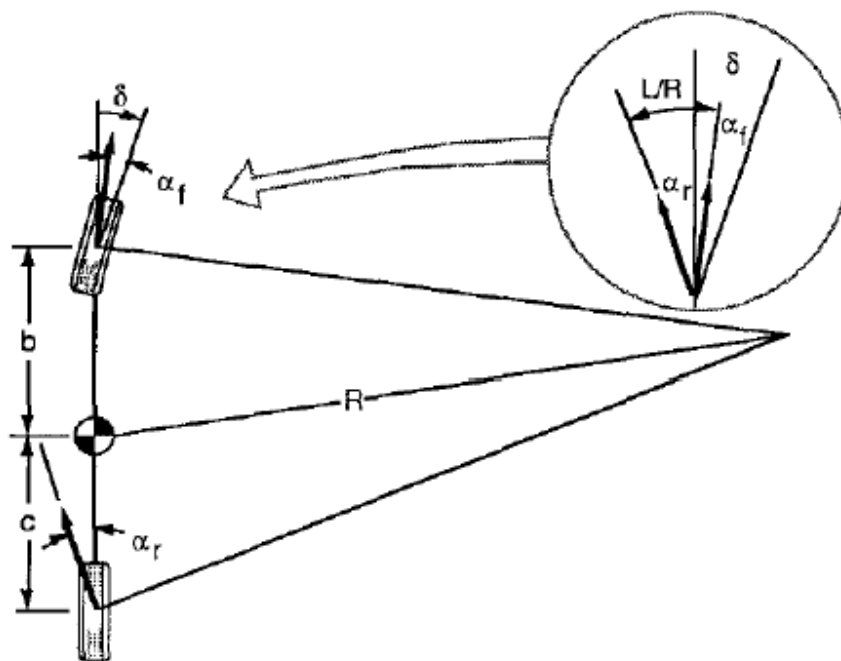


Figura 19 – Rappresentazione del Modello Monotraccia.

Ad alte velocità di avanzamento, il raggio di curvatura  $R$  risulta essere molto grande se confrontato col passo  $L$  del veicolo (Figura 19). Si può, dunque, ammettere di avere a che fare con angoli piccoli e la differenza tra gli angoli di sterzata di ruota esterna e di ruota interna risulta trascurabile. Le equazioni che governano il comportamento del veicolo in curva in condizioni stazionarie possono essere, quindi, ottenute a partire da alcune considerazioni geometriche sul modello monotraccia e applicando la seconda legge di Newton. Considerando un veicolo di massa  $m$  in moto lungo una traiettoria curva di raggio  $R$  con velocità di avanzamento  $V$ , scrivendo l'equazione di equilibrio alla traslazione laterale, si ha che la forza centrifuga, legata alla presenza dell'accelerazione laterale, viene controbilanciata dalla somma delle forze laterali che gli pneumatici ricevono dal suolo, come espresso nella (4.4):

$$\sum F_y = F_{yF} + F_{yR} = m \frac{V^2}{R} \quad (4.4)$$

dove  $F_{yF}$  e  $F_{yR}$  rappresentano le forze laterali di deriva risultanti, scambiate rispettivamente dall'assale anteriore e da quello posteriore con la strada. Applicando l'equazione di equilibrio alla rotazione rispetto al baricentro si ottiene la (4.5):

$$F_{yF} = F_{yR} \frac{c}{b} \quad (4.5)$$

Sostituendo questa relazione nella precedente equazione si ha la (4.6):

$$F_{yR} = m \frac{b V^2}{L R} \quad (4.6)$$

dove la quantità  $mbL/mR$  corrisponde alla quota parte di massa che insiste sull'assale posteriore. Analogamente è possibile esprimere con la (4.7) la forza di deriva che l'assale anteriore scambia col terreno:

$$F_{yF} = m \frac{c V^2}{L R} \quad (4.7)$$

dove  $mcL/mF$  corrisponde invece alla quota parte di massa di competenza dell'assale anteriore. Per bassi valori dell'angolo di deriva la forza laterale sviluppata dallo pneumatico può essere valutata come prodotto tra la rigidezza di deriva dello pneumatico e l'angolo di deriva stesso. In maniera del tutto analoga le forze di deriva, sviluppate complessivamente dagli assali anteriore e posteriore al contatto ruota-strada, possono essere espresse come riportato in (4.8):

$$F_{yF} = C_{\alpha F} \alpha_F \quad F_{yR} = C_{\alpha R} \alpha_R \quad (4.8)$$

dove  $C_{\alpha F}$  e  $C_{\alpha R}$  rappresentano le rigidzze di deriva degli assali anteriore e posteriore, mentre  $\alpha_F$  e  $\alpha_R$  corrispondono agli angoli di deriva che caratterizzano i due pneumatici equivalenti posizionati in corrispondenza, rispettivamente, dell'assale anteriore e di quello posteriore nel modello monotraccia. In particolare, gli angoli di deriva valgono, come riportato in (4.9):

$$\alpha_F = m_F \frac{V^2}{C_{\alpha F} R} \quad \alpha_R = m_R \frac{V^2}{C_{\alpha R} R} \quad (4.9)$$

Realizzando una serie di considerazioni geometriche sul modello monotraccia riportato in Figura 19, è possibile esprimere, in gradi, l'angolo di sterzata della ruota anteriore equivalente come espresso nella (4.10):

$$\delta = 57.3 \frac{L}{R} + \alpha_F - \alpha_R \quad (4.10)$$

Sostituendo nell'equazione precedente le espressioni degli angoli di deriva si ottiene la (4.11):

$$\delta = 57.3 \frac{L}{R} + \left( \frac{m_F g}{C_{\alpha F}} - \frac{m_R g}{C_{\alpha R}} \right) \frac{V^2}{g R} \quad (4.11)$$

Tale equazione risulta di particolare importanza nella valutazione delle proprietà di un veicolo in termini di comportamento in curva. Essa, infatti, esprime l'angolo di sterzata richiesto alla ruota anteriore del modello monotraccia qualora il veicolo viaggiasse lungo una traiettoria curva di raggio  $R$  con una velocità di avanzamento  $V$ . Il termine  $L/R$  corrisponde all'angolo di sterzata richiesto alla ruota anteriore del modello monotraccia in condizioni di sterzata cinematica. Per cui, il termine tra parentesi stabilisce di quanto l'angolo di sterzata richiesto in condizioni di sterzata dinamica differisce da quello richiesto in condizioni di sterzata cinematica.

L'equazione precedente può essere espressa in forma compatta come espresso dalla (4.12):

$$\delta = 57.3 \frac{L}{R} + K a_y \quad (4.12)$$

dove  $a_y = V^2/gR$  è l'accelerazione centripeta (espressa in "g"), mentre  $K$  corrisponde al gradiente di sottosterzo o understeer gradient (espresso in deg/g).

### 4.3.3 Trasferimento di carico in direzione laterale.

Quando la vettura è in curva con una certa velocità di avanzamento si genera una forza centrifuga alla quale gli pneumatici si oppongono sviluppando forza laterale al contatto ruota strada. Tale forza centrifuga genera un trasferimento in direzione laterale del carico verticale (Figura 20) che si muove dalle ruote interne a quelle esterne.

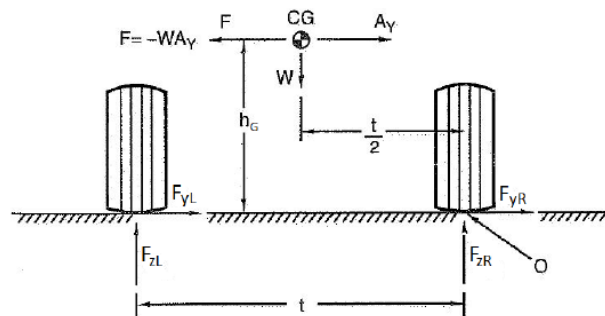


Figura 20 - Trasferimento di carico laterale (Forza centrifuga).

Supponendo di considerare il veicolo come costituito da un singolo assale equivalente e valutando il suo comportamento in curva è possibile valutare il trasferimento di carico laterale totale sulla ruota esterna equivalente:



$$\Delta F_{z,tot} = \frac{W A_y h_G}{t} \quad LLT = \frac{A_y h_G}{t} \quad (4.13)$$

dove  $W$  è il peso del veicolo espresso in [N],  $A_y$  è l'accelerazione centripeta espressa in [g] e  $h_G$  e  $t$  corrispondono rispettivamente all'altezza del baricentro e alla carreggiata del veicolo, entrambi espressi in [m]. TLLT (Total Lateral Load Transfer) definisce invece il trasferimento di carico laterale totale normalizzato rispetto al peso del veicolo. La distribuzione del trasferimento di carico laterale complessivo TLLTD (Total Lateral Load Transfer Distribution) tra avantreno e retrotreno influenza profondamente il comportamento direzionale del veicolo. La teoria riportata nel capitolo corrente è stata estrapolata dalle fonti [25], [26], [27], che sono state citate per questioni di praticità al termine della presente trattazione.

# 5 Definizione delle specifiche di progetto e generalità sull'impostazione del modello per l'analisi FEM.

## 5.1 Definizione delle specifiche del progetto.

Nel processo iterativo di ottimizzazione è necessario che vengano rispettati una serie di vincoli tecnologici, fisici e geometrici. Questi definiscono le specifiche di progetto e sono sintetizzati nei seguenti punti:

1. Il materiale da utilizzare è il composito riciclato, di cui nell'apposita sezione saranno fornite tutte le specifiche;
2. Lo spostamento massimo e lo stress a cui è sottoposta la struttura devono rientrare nell'intorno dei valori target del componente originale;
3. L'ingombro massimo del braccetto ottimizzato deve essere minore o al limite uguale all'ingombro massimo del supporto originale, per renderne possibile il montaggio;
4. la modalità di collegamento col telaio e la massa non sospesa non può essere alterata;
5. Il peso deve essere nell'intorno di quello del componente originale, possibilmente inferiore;

L'obiettivo che si pone tale studio è quello di effettuare un processo di ottimizzazione di tale componente, incentrato sul cambiamento di materiale, dall'alluminio al composito, e volto all'ottenimento delle stesse prestazioni del componente originale, sottoposto ai medesimi carichi. Il braccio inferiore oggetto di interesse è proveniente dal sistema sospensivo di un autoveicolo sportivo leggero. Esso presenta una struttura tubolare cava nelle due aste del braccio di controllo, per contenere il peso.

Queste presentano un diametro interno di 30mm ed in diametro esterno di 32mm, e questa struttura consente di ottenere un comportamento “simmetrico” nei confronti dei carichi di trazione e compressione, secondo cui un braccio della sospensione viene tipicamente sollecitato. Ma soprattutto consente di ottenere una rigidità molto simile sia nel piano x-y, che nella direzione normale ad esso. Le due travi tubolari cave vanno dunque a raccordarsi in un’unica trave parzialmente piena che prevede alla sua estremità l’alloggiamento del portamozzo sferico. Nella regione in cui le due aste si uniscono, è presente uno scatolato saldato ad esse, la cui funzione è quella di assicurare e proteggere l’integrità della struttura, facendo in modo che le aste non possano flettersi in maniera pericolosa. Il primo passo di tale esperienza è stato quello di ricercare in letteratura, studiare e mettere a punto una serie di casi di carico, che potessero essere realistici per un componente di tale genere. Il braccetto inferiore di una sospensione subisce notevoli carichi di trazione e compressione, dovuti alle operazioni di accelerazione e frenatura in percorrenza di curva, che possono portare a picchi di stress notevoli le parti più sensibili della struttura. Una volta definiti questi “carichi di progetto”, è stato necessario sottoporre il componente di partenza a tali casi di carico, in maniera tale da fornirne una adeguata caratterizzazione meccanica, e poter in tal modo avere dei riscontri sperimentali da porre come target, che dovranno essere eguagliati o migliorati dal nuovo componente, così da poter dimostrare la fattibilità dell’operazione. L’obiettivo del progetto era quello di valutare se potesse essere possibile sostituire i bracci di controllo a quadrilatero in alluminio delle sospensioni e di ottenere una riduzione di peso pari o superiore al 10%, riducendo però sia il costo della materia prima, derivante da scarti del processo di taglio, che i tempi di produzione. Ci sono 8 bracci di controllo sul veicolo, due per ogni gruppo ruota. I bracci del lato sinistro sono esattamente speculari a quelli del lato destro, riducendo così la complessità del progetto a quattro bracci, e ciò fa anche intuire le potenzialità in termini di riduzione delle masse se tutti ed otto i bracci fossero realizzati in composito, e con essi altri componenti del sistema sospensivo: questo sarà un interessante sviluppo futuro di una simile esperienza. Riguardo il materiale del componente originale, ciò che è noto è che il braccetto è stato costruito utilizzando una lega di alluminio commerciale, che presenta un carico di snervamento minimo di 260 MPa e un carico di rottura minimo di 310 MPa. Il componente ha tolleranze ben prescritte in tutte le posizioni in cui è accoppiato ad altri componenti meccanici, così come severi requisiti geometrici dovuti all’interferenza e al corretto funzionamento, che andranno rispettati in sede di ottimizzazione. Dopo la realizzazione, il braccio subisce una lavorazione secondaria per alloggiare due boccole, che sono il punto di fissaggio sul telaio.

Sul lato della ruota, il braccio deve ospitare un giunto sferico, che si muove insieme alla ruota. Le boccole sono inserite a pressione con una piccola interferenza, mentre il giunto sferico è serrato ad una quantità predefinita su una sede filettata. La sfida maggiore che verrà affrontata, in sostanza, sarà quella di ricercare una nuova geometria in grado di assicurare elevati livelli di rigidità e resistenza, ma che sia anche realisticamente processabile a livello tecnologico mediante stampaggio a compressione di prepreg platelets. Il materiale che verrà impiegato per la riprogettazione, grazie alla sua idoneità ad essere stampato in geometrie tridimensionali complesse, può comportare in prospettiva dei costi di lavorazione inferiori e tassi di produttività più elevati, così da giustificare una sua adozione per ridurre i costi e i tempi complessivi di approvvigionamento delle parti meccaniche necessarie alla realizzazione dell'autoveicolo. La distribuzione del rinforzo è effettivamente casuale, dando luogo a proprietà elastiche, di rigidità e di resistenza quasi-isotrope. Inoltre, questa forma di materiale è molto meno influenzata dalla presenza di difetti, fori, tacche e danni da impatto rispetto al laminato quasi-isotropo di riferimento. La resistenza ai fori aperti e riempiti è praticamente identica a quella senza intagli, il che lo rende molto utile per la produzione di strutture con fori di fissaggio e di alleggerimento. Il materiale è anche più impermeabile all'assorbimento dell'umidità, e quindi le sue proprietà a temperature e umidità elevate sono meno influenzate rispetto all'equivalente laminato di partenza. Ci sono degli svantaggi in queste forme di materiale, in particolare è stato osservato che la resistenza media senza intaglio è inferiore a quella di un laminato QI, in particolare in tensione e, in misura minore, in compressione, taglio e flessione. La resistenza alla trazione è infatti inferiore alla resistenza alla compressione, a differenza dei compositi a fibra continua. Inoltre, l'uso di queste nuove declinazioni in forme discontinue del materiale composito pone nuove sfide per la progettazione, l'analisi e la sperimentazione su componenti strutturali primari, che finora erano esclusivo appannaggio dei compositi in fibra continua di carbonio. Le prospettive messe in campo dal progetto CIRCE, come si può concludere facilmente, sono estremamente interessanti. Sono state identificate tre caratteristiche piuttosto uniche, che li distinguono nettamente dai tradizionali nastri e tessuti laminati [28-32]. Queste sono il comportamento insensibile all'intaglio, la variabilità del modulo apparente e la bassa sensibilità ai difetti. Per tenere conto di questi comportamenti, è stato necessario sviluppare nuovi metodi di analisi basati su approcci stocastici, per i quali si fa riferimento allo "Stato dell'arte", aprendo la strada a nuove metodologie di certificazione. I materiali compositi sono estremamente versatili, personalizzabili (rendono possibile l'aggiunta

di materiale laddove serve, con estrema libertà progettuale) e possono essere modificati chimicamente nella matrice, ad esempio con l'aggiunta di nanoparticelle, e nell'architettura delle fibre, così da ottenere proprietà meccaniche differenti caso per caso. È sfruttando questa possibilità progettuale che il focus del progetto è stato quello di garantire la leggerezza oltre che la rigidità disponendo più materiale laddove esso contribuisse maggiormente, per poter togliere massa nelle regioni meno sollecitate. A tal proposito, sin dalle prime iterazioni progettuali è stata scelta una sezione geometrica a doppia T, costituita da due "ali" esterne ed un'anima centrale che allontanasse le stesse, per poter aumentare la resistenza a flessione lungo l'asse Z delle travi costituenti i due bracci, senza aggiungere massa e volume in prossimità dell'asse neutro di flessione della trave stessa, ovvero laddove non contribuisca a migliori performance di rigidità. Infatti, ciò che si osserva dal diagramma delle sollecitazioni "a farfalla" è che caricando la struttura come è stato fatto in tale progetto, in base a quelli che sono i casi di carico ipotizzati, sul rettangolo superiore si concentrano gli sforzi crescenti di trazione, ed il rettangolo inferiore subisce una sollecitazione a compressione. L'anima della sezione ha invece il ruolo di trasmettere gli sforzi di taglio. Idealmente, se si suppone di incrementare l'altezza dell'anima centrale senza variarne lo spessore, allontanando di fatto le due ali esterne, è possibile portare a sostanziali incrementi di rigidità e resistenza, fino a sei o sette volte più grande, assicurati dalla sezione stessa senza però appesantirla, con aggravii di peso per unità di superficie modestissimi, nell'ordine del 6-7%. Un esempio di ciò può essere anche osservato nelle architetture sandwich [3] dei materiali compositi a fibra lunga.

## 5.2 Modello FEM per la definizione del problema di ottimizzazione.

L'obiettivo di questo capitolo è quello di impostare l'analisi agli elementi finiti volta verificare la resistenza del braccetto inferiore della sospensione ai carichi a cui verrà sottoposto, e replicare i risultati in termini di rigidità, resistenza e peso del componente originale. I parametri su cui è possibile agire sono diversi. Per ottenere informazioni sul comportamento del componente sotto carico si ricorre al metodo degli elementi finiti.

È una tecnica numerica atta a cercare soluzioni approssimate di problemi descritti da equazioni differenziali alle derivate parziali, riducendo queste ultime ad un sistema di equazioni algebriche. Si applica a corpi fisici suscettibili di essere suddivisi in un certo numero, anche molto grande, di elementi di forma definita e dimensioni contenute. Nel continuum, ogni singolo elemento finito viene considerato un campo di integrazione numerica di caratteristiche omogenee. La caratteristica principale del metodo degli elementi finiti è la discretizzazione attraverso la creazione di una griglia (mesh) composta da elementi di forma codificata (triangoli e quadrilateri per domini bidimensionali, esaedri e tetraedri per domini tridimensionali). Su ciascun elemento caratterizzato da questa forma elementare, la soluzione del problema è espressa dalla combinazione lineare di funzioni dette funzioni di base o funzioni di forma. Da notare che solitamente le funzioni vengono approssimate, e non necessariamente saranno i valori esatti della funzione quelli calcolati nei punti. L'esempio tipico è quello che fa riferimento a funzioni polinomiali, in cui la soluzione complessiva del problema viene approssimata con una funzione polinomiale a pezzi. Il metodo quindi ci permette di studiare vantaggiosamente in forma numerica un problema che sarebbe stato irrisolvibile con un approccio di tipo classico, ovvero analitico. Per contro la soluzione trovata non sarà esatta ma approssimata. Utilizzando programmi commerciali, il calcolo si articola sempre in tre fasi, caratterizzati da software distinti [33]:

- **Pre-processing:** è il programma che importa il componente dal CAD, realizza la mesh (tipo e forma degli elementi), definisce le proprietà del materiale e imposta le condizioni di vincolo e di carico;
- **Processing:** detto anche solutore, è il programma di analisi vero e proprio che risolve le equazioni del problema agli elementi finiti;
- **Post-processing:** è il programma che elabora e visualizza la soluzione.

Il team R&D della HP Composites S.p.A e il Dipartimento di Ingegneria Industriale e di Scienze Matematiche dell'Università Politecnica delle Marche utilizzano il pacchetto software Siemens NX, largamente impiegato anche in altre realtà del settore, che consente di svolgere la progettazione o l'ottimizzazione, come in tal caso, di un componente in tutte le sue fasi di cui sopra.

## 5.2.1 Pre-Processing.

### 5.2.1.1 Preparazione della geometria.

In questa fase viene creata la geometria che consiste nella creazione di linee, aree o volumi a seconda che la geometria del problema sia uno, due o tridimensionale. Per eseguire le simulazioni è stato fornito il modello “step” del componente originale, con il quale si è andati a creare il proprio modello sul software. La preparazione e manipolazione della geometria per il “meshing” è un aspetto importante dei processi di analisi degli elementi finiti (FEA), ma può spesso consumare una percentuale schiacciante di tempo del ciclo di analisi generale. A causa dell’elevata complessità del componente, si è effettuata una “pulizia” della geometria (definita clean-up), infatti la loro forma “irregolare” causa superfici e bordi di dimensioni molto ridotte o addirittura disconnesse, oltre a vertici intermedi che non permettono una adeguata analisi agli elementi finiti. Questi fattori infatti causano una bassa qualità della mesh che può comportare errori grossolani nel post-processing, forzare il mesher a creare un elevato numero di elementi o addirittura causare l’impossibilità a creare la mesh. [33] Gli strumenti di ricerca e riparazione globali di Siemens NX permettono di rintracciare e ripulire queste superfici. Un altro compito comune è semplificare questa geometria allo scopo di contribuire a migliorare la qualità complessiva della simulazione, infatti molte parti sono spesso trascurabili per l’analisi FEA come ad esempio numeri seriali e loghi, o piccoli raccordi e smussi di dimensioni ininfluenti per il calcolo strutturale. Questo procedimento viene chiamato “defeaturing”. Lasciare queste funzioni sul pezzo porta ad avere una mesh inutilmente complicata (elementi distorti), che può essere fonte di errore ed inoltre causare un aumento della durata delle simulazioni (ogni nodo superfluo indica equazioni in più da calcolare inutilmente) [33]. Siemens NX fornisce uno strumento molto utile che consente di creare una topologia virtuale del modello CAD lasciando inalterata la geometria. Infatti è possibile raggruppare o dividere facce, bordi o vertici per formare celle virtuali, così da creare una topologia che permette di migliorare la nostra mesh. In questi casi, la topologia virtuale aiuta a ridurre il numero di elementi nel modello semplificandolo, infatti durante la creazione della mesh il nostro software non è più vincolato a rispettare bordi e nodi originali della geometria CAD, ma solo quelli virtuali.

Le scomposizioni/unioni virtuali sono saldamente collegate alla geometria sottostante: viene mantenuta una struttura virtuale gerarchica in cui le entità virtuali vengono unite o partizionate.

### 5.2.1.2 Definizione del materiale.

Nel presente elaborato, le proprietà del materiale sono state fornite da un precedente lavoro di caratterizzazione meccanica preliminare di questo materiale innovativo costituito da chip di prepreg, con l'ausilio di software Moldex3D e Digimat, mentre per la validazione delle proprietà ottenute tramite il modello virtuale e lo studio dell'effetto di alcuni parametri di processo, come la presenza di talco, è stata predisposta una serie di test su provini fisici. I test di trazione sono stati svolti come da normativa ASTM D3039 per valutare il modulo e la resistenza del composito. Tutte le piastre da cui sono stati ricavati i provini sono state realizzate con dei chip da circa 30x30mm. In tutto sono state realizzate 5 piastre, per valutare l'influenza del talco e del metodo di posizionamento dei chips all'interno dello stampo. Inoltre, si è cercato di valutare l'effetto sulle proprietà meccaniche dell'inserimento di un altro materiale nel mix di chips. Per tutte le stampate (Figura 21) sono stati utilizzati gli stessi parametri di processo, con pressione dell'olio a 170bar, temperatura a 130°C e mantenimento in pressata per 1,5 ore.

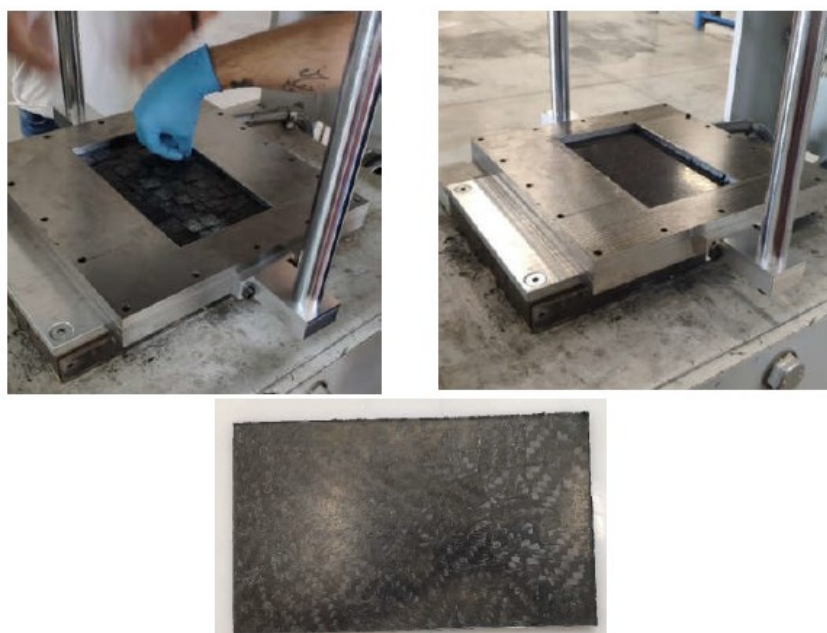


Figura 21- Deposizione chips di prepreg nella cavità dello stampo.



Piastra	Materiale	Dim. Chips	Talco	Metodo deposizione
A	GG630IMP503ZHT	30x30mm	si	Manuale ordinata
B	GG630IMP503ZHT	30x30mm	si	Manuale random
C	GG630IMP503ZHT	30x30mm	no	Manuale random
D	GG630IMP503ZHT	30x30mm	no	Manuale ordinata
E	GG630IMP503ZHT + CC630E3	30x30mm	si	Manuale random

Tabella 2 - Elenco piastre

Come riportato in Tabella 2, in totale dalle 5 piastre sono stati ottenuti 18 provini che sono stati sottoposti a un test di trazione, in base alla normativa ASTM D3039. I risultati del processo di caratterizzazione sono riportati a Figg. 22-26:

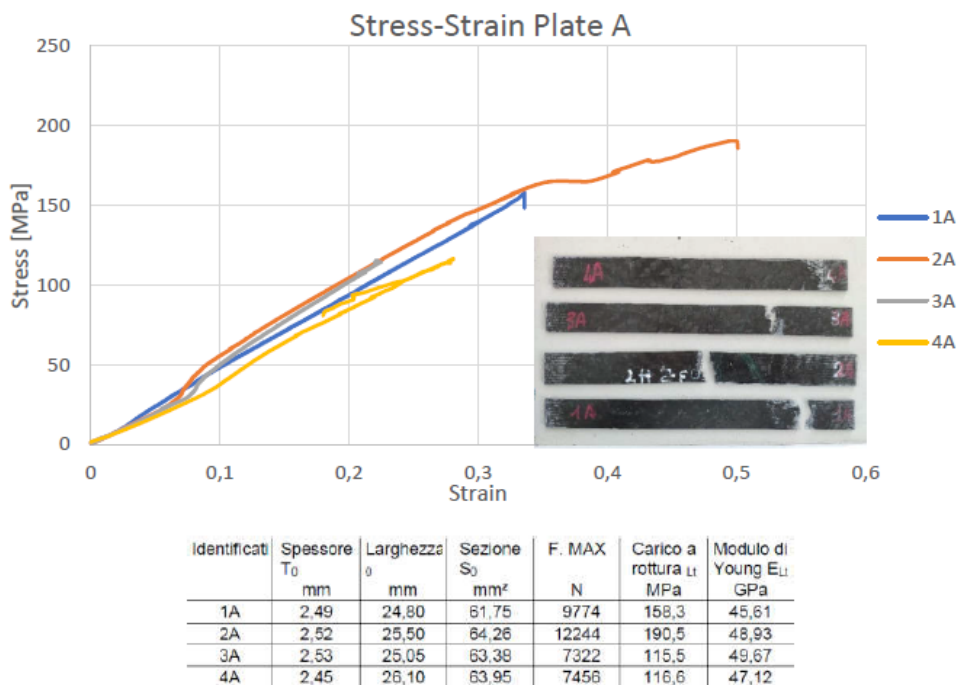
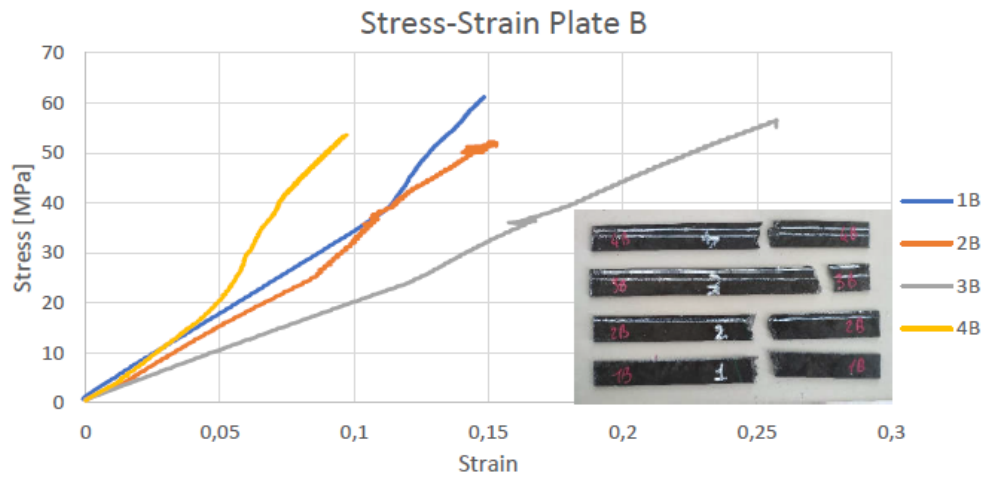
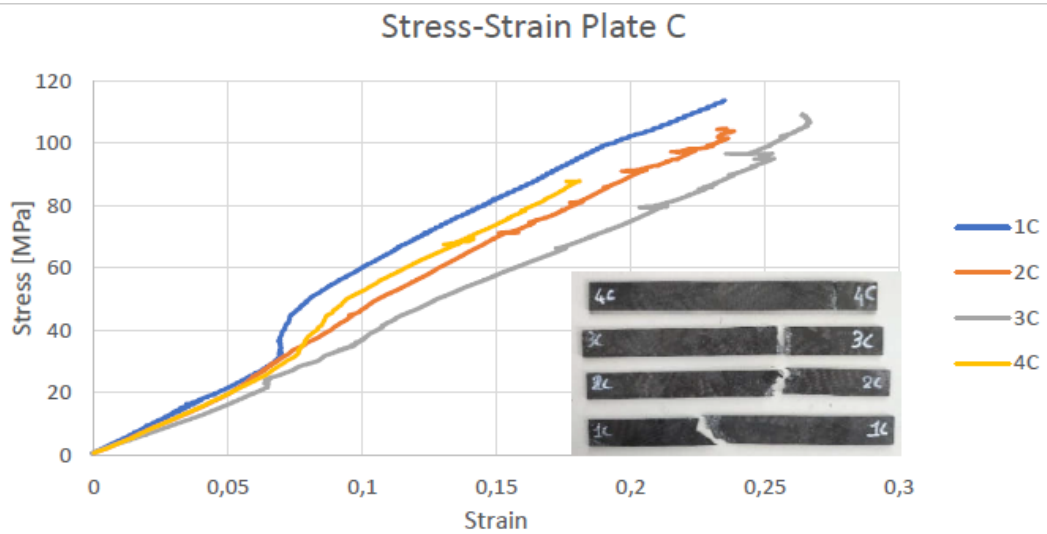


Figura 22 - Risultati, tratti dalla tesi di laurea dell'ing. Di Stanislao



Identificati	Spessore $T_0$ mm	Larghezza $b_0$ mm	Sezione $S_0$ mm <sup>2</sup>	F. MAX N	Carico a rottura $L_t$ MPa	Modulo di Young $E_{L_t}$ GPa
1B	2,51	23,10	57,98	3552	61,3	32,65
2B	2,52	24,90	62,75	3280	52,3	36,38
3B	2,52	24,80	62,50	3540	56,6	25,89
4B	2,51	24,70	62,00	3324	53,6	42,39

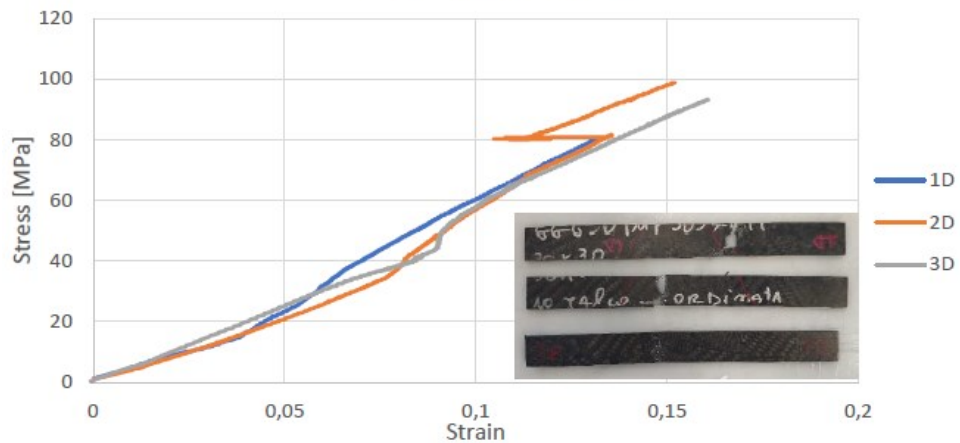
Figura 23 - Risultati, tratti dalla tesi di laurea dell'ing. Di Stanislao



Identificati	Spessore $T_0$ mm	Larghezza $b_0$ mm	Sezione $S_0$ mm <sup>2</sup>	F. MAX N	Carico a rottura $L_t$ MPa	Modulo di Young $E_{L_t}$ GPa
1C	2,51	24,70	62,00	7053	113,8	42,19
2C	2,49	24,40	60,76	6365	104,8	43,22
3C	2,49	24,80	61,75	6758	109,4	32,61
4C	2,48	25,20	62,50	5497	88,0	39,53

Figura 24 - Risultati, tratti dalla tesi di laurea dell'ing. Di Stanislao

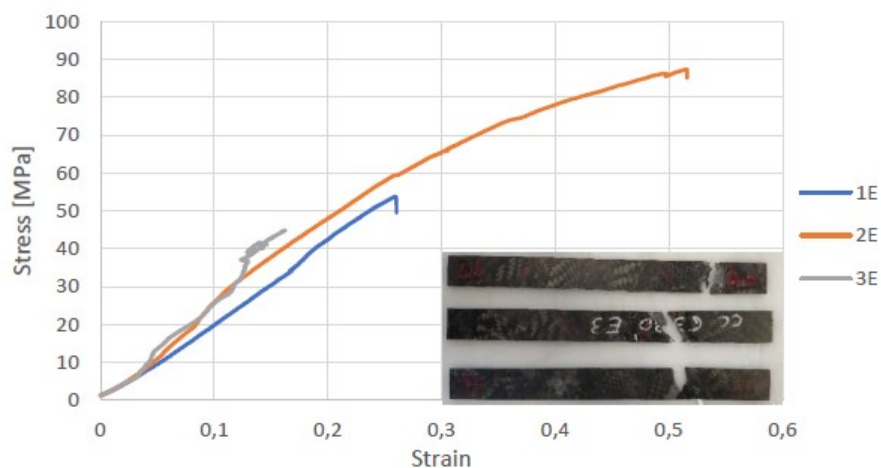
### Stress-Strain Plate D



Identificati	Spessore $T_0$ mm	Larghezza $b_0$ mm	Sezione $S_0$ mm <sup>2</sup>	F. MAX N	Carico a rottura $L_t$ MPa	Modulo di Young $E_{L,t}$ GPa
1D	2,65	25,80	68,37	5482	80,2	40,47
2D	2,66	25,80	68,63	9737	141,9	39,55
3D	2,65	24,80	65,72	6127	93,2	48,67

Figura 25 - Risultati, tratti dalla tesi di laurea dell'ing. Di Stanislao

### Stress-Strain Plate E



Identificati	Spessore $T_0$ mm	Larghezza $b_0$ mm	Sezione $S_0$ mm <sup>2</sup>	F. MAX N	Carico a rottura $L_t$ MPa	Modulo di Young $E_{L,t}$ GPa
1E	2,50	25,10	62,75	3375	53,8	18,05
2E	2,50	25,50	63,75	5566	87,3	22,13
3E	2,50	25,20	63,00	2825	44,8	30,54

Figura 26 - Risultati, tratti dalla tesi di laurea dell'ing. Di Stanislao

A giudicare dai risultati ottenuti da questa campagna di test sperimentali, le proprietà del composito ricavato da stampaggio a compressione di prepreg platelets sono di gran lunga inferiori rispetto a quelle ottenibili con un composito laminato a fibra lunga, ma è possibile paragonarle alle proprietà di un alluminio commerciale.

In questa parte del lavoro è evidente quindi un concetto più volte ribadito nel corso dell'elaborato, ovvero la capacità di tale materiale di portare buoni risultati nell'operazione di "Metal Replacement", con tutti i benefici di cui si è già parlato. Dall'analisi dei modi di rottura dei provini, è stato osservato che nella maggioranza dei casi il cedimento è stato causato dalla frattura delle fibre, e ciò pone una grande differenza con quanto espresso in letteratura, in cui il meccanismo di cedimento preponderante è la delaminazione tra i chips. Dopo i test a trazione sono state studiate le macrografie, e da ciò si è arrivati alla conclusione che questo è dovuto al fatto che la disomogeneità e la presenza di agglomerati di resina porta ad avere alcune sezioni del provino in cui può essere presente anche una sola chip a resistere al carico. Con l'eventualità che le fibre di tale chip potrebbero anche trovarsi in una condizione di non allineamento rispetto alla direzione di carico cosicché c'è la possibilità concreta di ottenere una resistenza al carico pari a quella delle fibre contenute nella singola chip e l'inizio della frattura si ha per rottura di tali fibre, che giocoforza non riescono a gestire lo sforzo. Dall'analisi dei grafici "Stress-Strain" delle prove di caratterizzazione è stato possibile giungere ad un'altra importante conclusione, che sarà utile nel processo produttivo, ovvero che le proprietà maggiori sono state ottenute con quelle piastre, la A e la D, che in cui la deposizione dei chips è stata fatta in modo ordinato, ottenendo risultati che sono migliori di quasi il doppio rispetto agli altri casi. Questo è sicuramente dovuto al fatto che, posizionando ordinatamente i chips uno per uno, si va ad evitare che quest'ultime creino agglomerati con conseguente orientazione locale delle fibre nella direzione dello spessore. È bene inoltre sottolineare che si è riscontrata una forte variabilità delle proprietà del composito in alcuni provini, sicuramente dovuta alla forte randomicità e disomogeneità nella distribuzione randomica dei chips nella piastra. Confrontando i risultati ottenuti dai test a trazione con i risultati ottenuti dal modello virtuale, si può notare che le analisi svolte in Digimat-FE mostrano ottima corrispondenza coi dati sperimentali. Il carico di rottura raggiunto nel modello virtuale è di circa 80 MPa, leggermente più basso rispetto al carico ottenuto dai test sperimentali. Nella Tabella 3 sono citati i risultati del lavoro di caratterizzazione che è stato eseguito:

Identificati	Spessore $T_0$ mm	Larghezza $b_0$ mm	Sezione $S_0$ mm <sup>2</sup>	F. MAX N	Carico a rottura $L_t$ MPa	Modulo di Young $E_{L_t}$ GPa
1C	2,51	24,70	62,00	7053	113,8	42,19
2C	2,49	24,40	60,76	6365	104,8	43,22
3C	2,49	24,80	61,75	6758	109,4	32,61
4C	2,48	25,20	62,50	5497	88,0	39,53

Risultati E1 – GG630IMP503ZHT_30x30						
<b>E1(MPa)</b>	34097	30051	31966	33583	33595	<b>Valor medio</b> 32656

Tabella 3 - Risultati della caratterizzazione meccanica, Tesi di laurea dell'Ing. Di Stanislao

Questi risultati sono stati tratti dal lavoro di tesi dell'Ing. Tiziano Di Stanislao [34], lavoro che viene citato al termine della trattazione per questioni di praticità. Tali dati sono stati importati in Siemens NX, andando a creare una apposita, nuova cartella materiale, che è stata di volta in volta nelle iterazioni selezionata all'interno del modello FEM. L'applicazione Siemens NX infatti consente di andare ad eseguire analisi non lineari, termiche, a fatica, viscoelastiche; quindi in base all'analisi che viene eseguita si andranno ad inserire nel modulo "Engineering Data" le costanti di interesse del materiale. Nel lavoro di tesi sono state eseguite analisi statiche, quindi andremo a considerare le seguenti costanti:

- Densità [kg/m<sup>3</sup>];
- Modulo di Young [MPa];
- Coefficiente di Poisson;
- Tensione di rottura [MPa];

Nel processo di ottimizzazione nel software Siemens NX, il materiale è stato trattato come isotropo, per questione di semplicità, essendo il problema molto complesso dal punto di vista computazionale e fisico. Nella fase finale del lavoro di ottimizzazione, sono stati ottenuti ulteriori dati di caratterizzazione. Quindi, il processo di ottimizzazione è stato portato a termine, tenendo in considerazione che ci fosse questa discrepanza nel modello, che fosse quindi stata fatta un'approssimazione nel comportamento del materiale. Infatti, il materiale composito derivante da chip di prepreg non si comporta in sede di stampaggio a compressione di forme complesse e volumi più rilevanti in maniera analoga a quanto osservato in studi di caratterizzazione precedenti. Dato il volume del componente, bisogna tenere conto di una certa variabilità dei parametri di processo in sede di laminazione e stampaggio dovuti alla randomicità e casualità insita nell'operazione. È stato ritenuto che il modello di comportamento del materiale nel caso di studio si ponesse nel mezzo fra un anisotropo ed uno completamente isotropo. Questo scarto, accertato, nel comportamento del materiale sarà oggetto di studi futuri interni all'azienda. Nel corso del processo di implementazione del problema di ottimizzazione mediante analisi agli elementi finiti, l'impostazione dei parametri relativi al materiale impiegato per la realizzazione del componente risulta essere uno dei passaggi determinanti ai fini del buon esito del lavoro. A tal fine, nel presente lavoro di tesi è stato svolto un nuovo studio di caratterizzazione meccanica del materiale composito che ha reso disponibili ulteriori dati, frutto di una serie di prove fisiche su provini in CFRP con struttura "chopped". Ciò ha contribuito a fornire un quadro abbastanza esaustivo circa le proprietà meccaniche di questo materiale composito. Nel presente studio, sono state realizzate cinque piastre mediante stampaggio a compressione di chip, di differente peso (P1 - P2 600g, P3 - P4 200g, P5 200g), da cui è stato possibile ricavare i provini fisici da sottoporre alle prove meccaniche sperimentali, che sono le seguenti: flessione a 3 punti e trazione. In prima analisi, sono stati sottoposti provini ricavati dalle piastre 1 e 4 a una prova di caratterizzazione meccanica di flessione a 3 punti. Queste prove sono state supportate dall'analisi ottica delle deformazioni (DIC), che consente di misurare l'intero campo delle deformazioni su un provino. I risultati delle prove di caratterizzazione meccanica mediante Flessione a tre punti sono riportati in Figura 27.

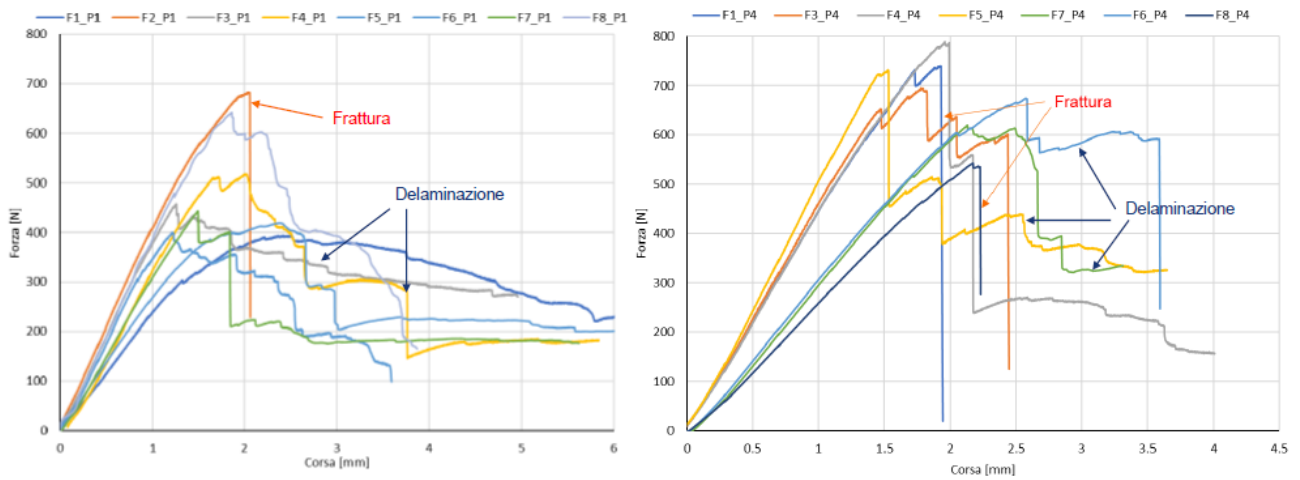


Figura 27 – Flessione a tre punti, piastre P1 (600g) - P4 (200g)

In primo luogo, dai risultati è stato possibile riscontrare carichi massimi e moduli a flessione molto dispersi. Si notano inneschi diversi di rottura e in particolare sono stati individuati principalmente 2 comportamenti di cedimento: delaminazione e propagazione, o frattura della matrice. Riguardo la propagazione della cricca lungo lo spessore, sono state osservate diverse modalità di frattura. In particolare, per il provino 8 della lastra 4 si è potuto notare che nell'ambito di una frattura d'interfaccia, la cricca non si è propagata lungo lo spessore, ma la frattura della matrice si è realizzata all'interfaccia fra i chip. Riguardo il provino 4 della lastra 4, si osserva una la frattura d'interfaccia sul bordo del provino, con rottura fibre del chip di superficie. Tuttavia la propagazione della frattura non è avvenuta lungo l'interfaccia. Riguardo il provino 3 della lastra 4, si ha che nella propagazione della delaminazione il carico rimane costante per tutta la propagazione. Questo comportamento avviene quando lungo lo spessore vi è la presenza simultanea di più interfacce. La cricca si propaga seguendo le interfacce, ma se trova un'interruzione, inizia a propagare longitudinalmente. In ogni caso, quanto si è potuto osservare è che la frattura è localizzata nella maggior parte dei casi in corrispondenza dell'interfaccia superficiale tra due chip, con la possibilità di non nucleazione della frattura e conseguente propagazione nella sezione più caricata. In Figura 28 sono riportati i risultati della prova di Flessione per provini a larghezza variabile.

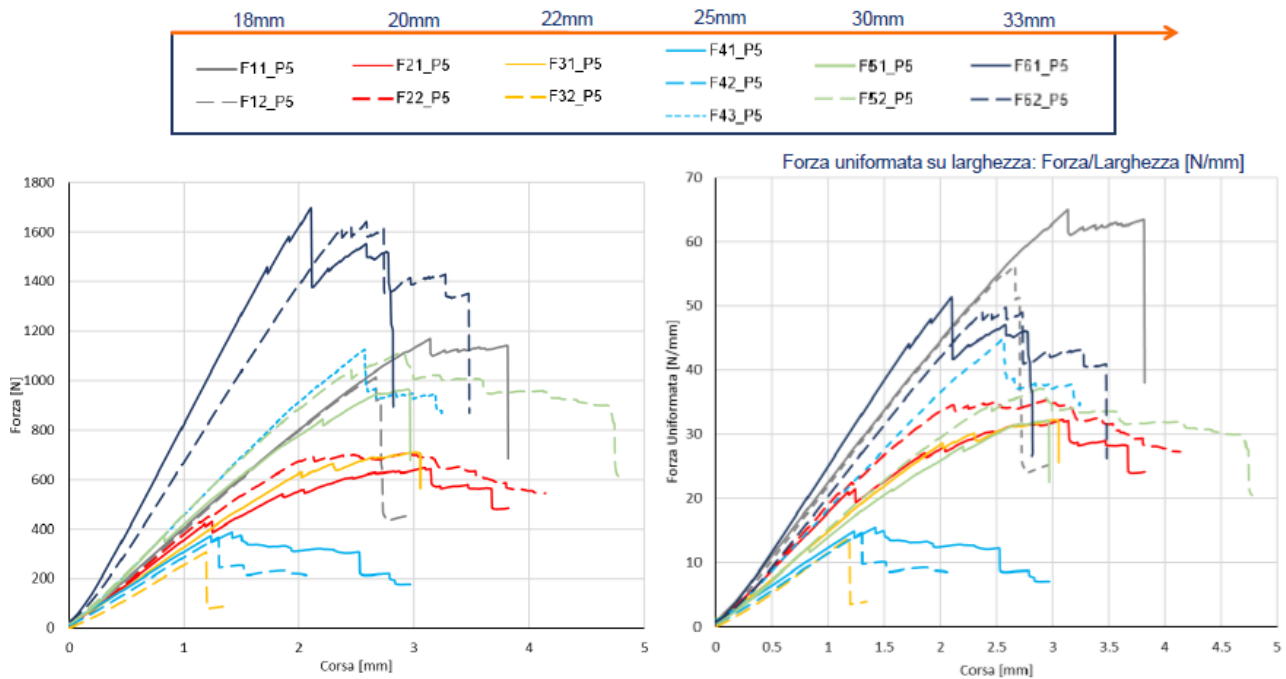


Figura 28 – Flessione: Provini a larghezza variabile.

In conclusione, è possibile affermare che il comportamento del materiale a flessione presenta molta variabilità in termini di rigidità e carico massimo, ed in particolare è stato notato che:

- La frattura avviene nella maggior parte dei casi in corrispondenza di un'interfaccia tra due chip e non necessariamente nella sezione maggiormente caricata;
- La cricca propaga in direzione trasversale, facendosi strada in zone ricche di matrice (tra cui le interfacce), finché non incontra una resistenza alla propagazione. In tal punto ha inizio la propagazione della delaminazione.
- Un numero limitato di provini ha evidenziato un cedimento per rottura delle fibre;
- Per provini dalla larghezza elevata (almeno paragonabili alla dimensione delle chop non si rileva una propagazione della cricca marcata lungo lo spessore né tendenza alla delaminazione.



- Si nota principalmente un cedimento per rottura delle fibre presenti sulla superficie inferiore del provino. La cricca propaga all'interno dei chip e non tra i chip;
- Se a livello di modulo i risultati sono abbastanza allineati, si è notato che i provini che cedono per delaminazione presentano dei carichi a rottura più bassi rispetto alle curve relative ai provini che cedono per frattura.
- I provini che cedono per delaminazione presentano degli allungamenti a rottura maggiori rispetto a quelli che cedono per frattura, ciò è dovuto al fatto che la cricca tende a propagare lungo la direzione di delaminazione, mentre il fenomeno della frattura porta il composito a rottura in maniera più repentina. In Figura 29, i principali meccanismi di frattura osservati.

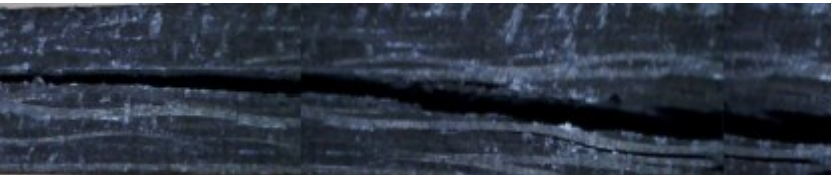


Figura 29 – In alto, frattura interfaccia sul bordo, rottura fibre del chip di superficie. In basso, Propagazione della delaminazione.

Riguardo la caratterizzazione meccanica mediante prove di trazione, sono stati ricavati provini dalle prime 4 piastre per poter essere sottoposti alle prove fisiche:

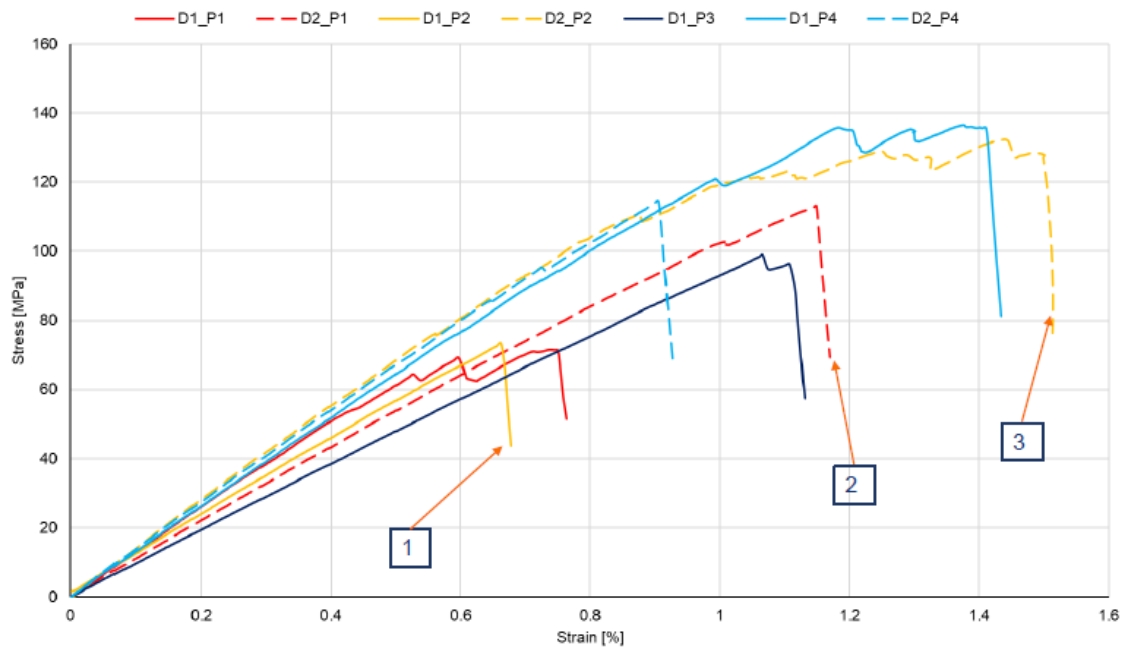


Figura 30 - Prove di trazione su provini D.

In generale, dall'analisi di questi risultati (Figura 30) è stato possibile ravvisare 3 tipi di tendenze differenti nei provini:

- 1 - Lineare fino allo stress ultimo;
- 2 - Presenza di una o più perdite di carico nella porzione lineare fino allo stress ultimo (onset di crack secondari);
- 3 - Tratto lineare seguito da un trend a «step» (propagazione cricca);

Ponendo particolare attenzione alle analisi di frattura a trazione dei provini D, ricavati dalla lastra di peso 600g:

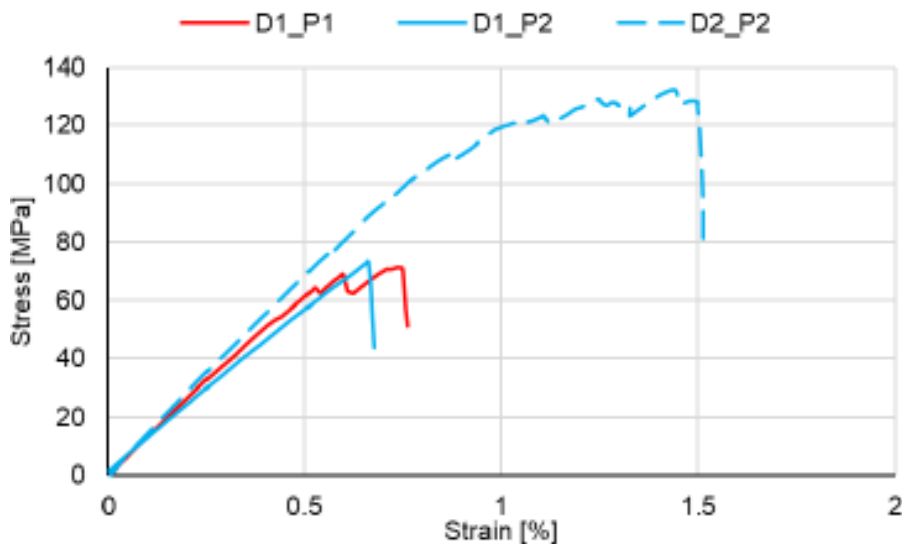


Figura 31 – Analisi di frattura su provini D (600 g)

Come si può notare in Figura 31, riguardo il provino D1\_P1, è stato possibile osservare che la propagazione della cricca avviene lungo lo spessore attraverso regioni d'interfaccia. Nel provino D1\_P2 invece si è potuto osservare un iniziale sito di frattura, che ha subito poi una nucleazione a partire da un difetto del provino. Analizzando invece il provino D2\_P2 lungo lo spessore, si può notare un punto di resistenza da cui è partita la propagazione della cricca lungo lo spessore. Inoltre, nei provini D2\_P2, D2\_P4 (Figura 32-33) è visibile una certa delaminazione denominata «stepwise», attraverso lo spessore: il crack path è più lungo di quanto osservato in casi precedenti.

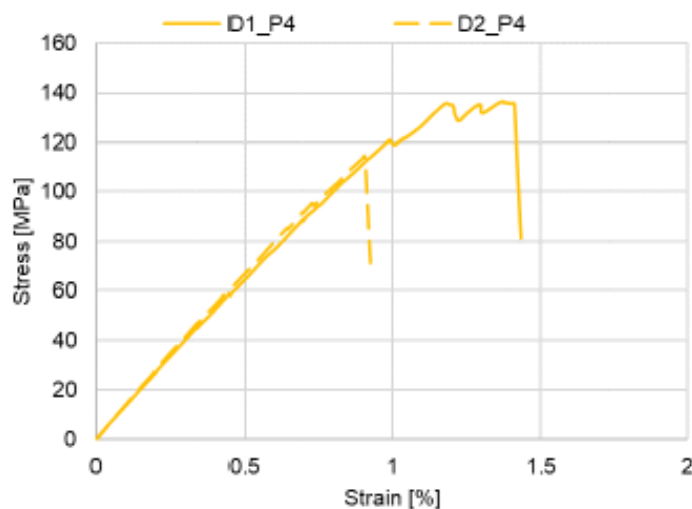


Figura 32 - Analisi di frattura su provini D (200 g)

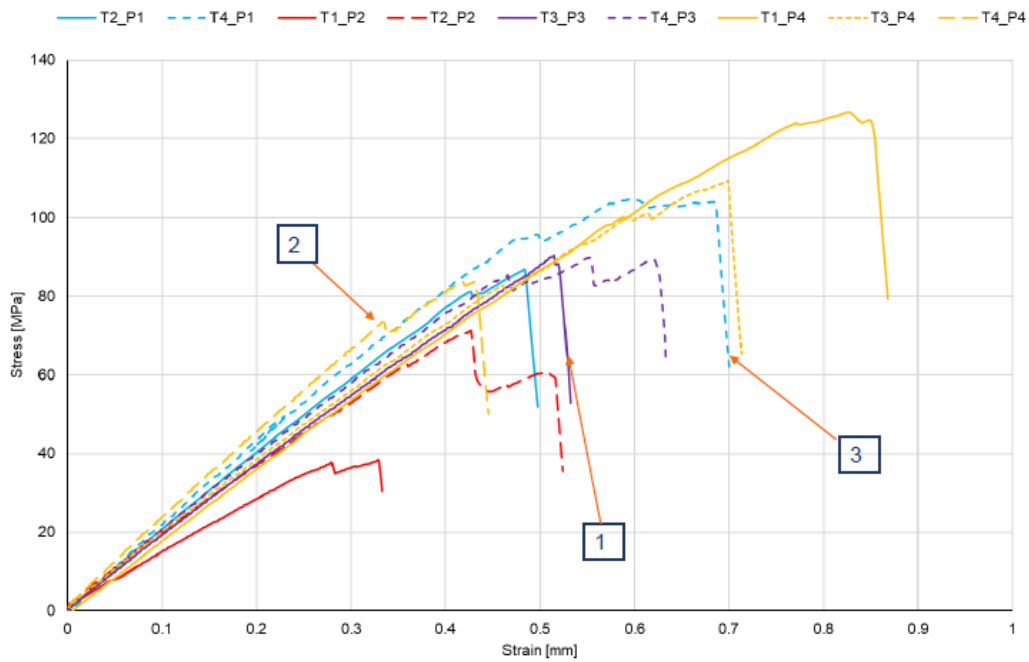


Figura 33 – Analisi di frattura su provini T (200-600g)

Confrontando i risultati in termini di modulo di Young e Stress massimo tra provini del peso di 600 gr (D e T) e provini da 200 gr (D e T) in Figura 34-35, è stato riscontrato che i provini da 200 g si confermano leggermente migliori rispetto al 600 gr in termini di rigidità e resistenza.

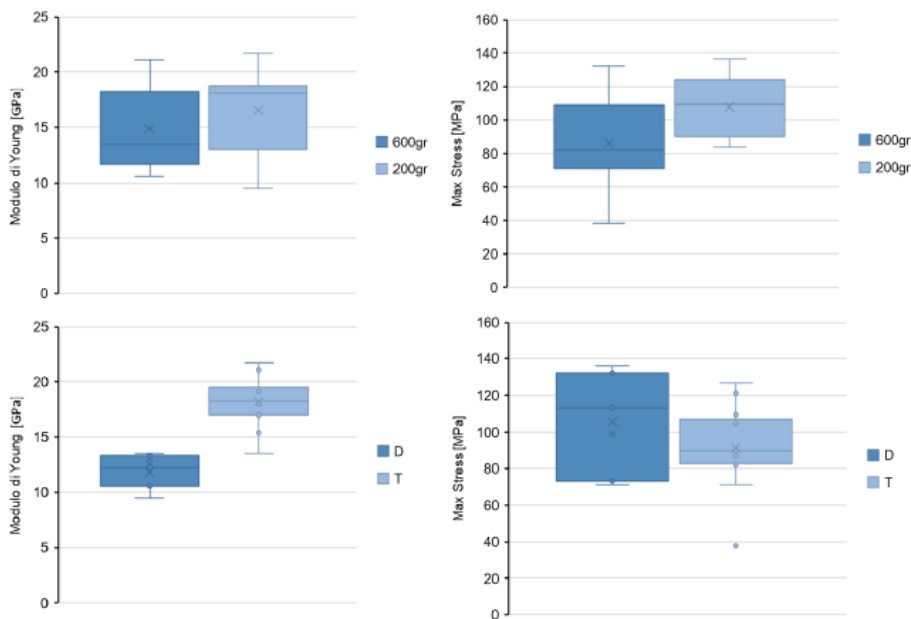


Figura 34 - Confronto del Modulo di Young e stress massimo tra provini 600 gr (D e T) e provini 200 gr (D e T).

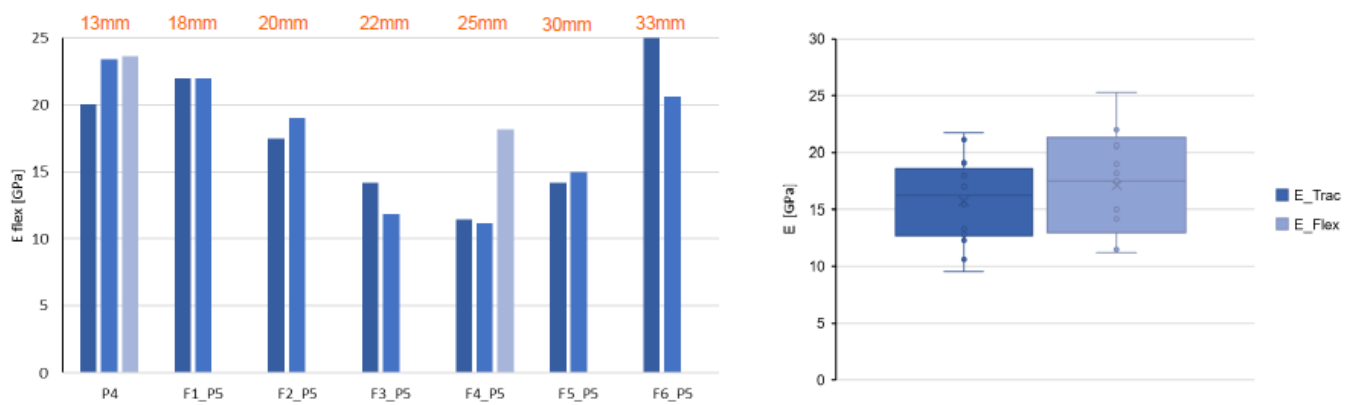


Figura 35 – Modulo dei provini di flessione a larghezza variabile (sinistra) – Confronto del Modulo di Young provini a flessione vs trazione (destra)

Dall'analisi sui provini svolta mediante DIC (Digital Image Correlation) in sede di prove di caratterizzazione meccanica, è stato osservato che nella maggior parte dei provini T, la cricca nuclea lungo un bordo in direzione perpendicolare al piano del chop. Successivamente, propaga lungo la superficie. Si nota che sul bordo la cricca non è propagata lungo lo spessore. Questo comportamento meccanico invece non si nota nei provini di tipo D, e ciò è dovuto al maggior rapporto tra larghezza provino e dimensione chip. Raramente si sono riscontrate delaminazioni stepwise con successivo debonding tra i chip. In conclusione, è possibile trarre dei risultati analitici fondamentali per il successivo passaggio del lavoro di ottimizzazione del componente oggetto di studio. Il comportamento del materiale a trazione presenta una notevole variabilità in termini di rigidità e carico massimo ottenuto e una notevole dispersione dei risultati ottenuti. In particolare, è stato osservato che:

- La risposta lineare iniziale del provino a trazione è spesso seguita da una degradazione della rigidità globale che porta ad un trend non lineare.
- In generale, dopo la frattura, tutti i provini conservano un certo grado di integrità.
- Questo tipo di struttura è capace di formare contemporaneamente diversi siti precursori di danno, sviluppando così molteplici percorsi utili per la propagazione della cricca.
- Si sono notati diversi tipi di danneggiamento delaminazione frattura fragile della matrice (nelle regioni d'interfaccia), debonding tra i chop. In generale il cedimento avviene a seguito di un'interazione dei 3 diversi tipi di danneggiamento.

La frattura fragile parte quasi sempre dalla superficie (regioni d'interfaccia), propaga lungo lo spessore, ed eventualmente si trasforma in delaminazione.

- Si è notato in diversi provini la coesistenza di siti di frattura primari e secondari.
- I siti di frattura primari nucleano in corrispondenza dei bordi poiché la dimensione dei chip è ridotta a causa del taglio del provino. Queste regioni sono quindi più deboli rispetto al centro del provino, in cui si possono trovare anche chip di dimensioni nominali.

Tuttavia, se questi importanti risultati che sono stati ottenuti rappresentano un passo in avanti nella conoscenza di un materiale innovativo tratto da elementi di scarto del processo, è necessario considerare che sono presenti ancora diversi aspetti non totalmente definiti, che quindi necessitano di ulteriori approfondimenti. In particolare:

- Diminuendo le dimensioni dei chips rispetto alle dimensioni del provino, ci si dovrebbe aspettare proprietà meccaniche inferiori ma allo stesso tempo una variabilità inferiore dei risultati: è quindi necessario studiare un parametro che metta in relazione il rapporto superficie chip /superficie del componente/provino e proprietà meccaniche, e questo ancora non è stato realizzato;
- Una «laminazione» accurata ed ordinata dei chip porterebbe le regioni d'interfaccia lungo lo spessore ad essere equidistanti con un potenziale incremento delle proprietà ed un'inferiore variabilità dei risultati;
- È evidente che l'aspect ratio (AR) dei chip influenzi le caratteristiche meccaniche del manufatto realizzato mediante questo processo produttivo e materiale composito. Occorre accertarsi pertanto mediante futuri studi facendo variare questo importante parametro di processo, valutando i cambiamenti in termini di proprietà meccaniche ottenuti;

- Un'idea innovativa ma che necessita di ulteriori studi potrebbe essere quella di incrementare le proprietà meccaniche a flessione del manufatto in composito "chopped" utilizzando una struttura sandwich.

### 5.2.1.3 Generazione della mesh.

I vertici degli elementi della mesh sono chiamati nodi, ed in corrispondenza di essi sono valutate le componenti della soluzione incognita. Se si applica una mesh di elementi molto fine, si ottengono risultati affidabili (a parte le singolarità dello stress, analizzate in seguito). Tuttavia, il tempo di calcolo aumenta rapidamente con il numero di elementi nel modello, difatti è approssimativamente proporzionale al quadrato del numero di gradi di libertà [33]. I gradi di libertà sono le possibili direzioni di movimento dei nodi, in genere ogni nodo ha 6 gradi di libertà: 3 traslazioni e 3 rotazioni. La rigidità viene applicata solo a determinati gradi di libertà, quelli senza rigidità vengono solitamente eliminati in anticipo dal risolutore, in modo che contribuiscano poco al tempo di risoluzione. Gli elementi hanno i seguenti gradi di libertà:

- elementi solidi (pentaedro, tetraedro, esaedro): 3 gradi di libertà (3 traslazioni);
- elementi shell (triangolo, quadrato): 6 gradi di libertà (3 traslazioni e 3 rotazioni);
- elementi trave: 6 gradi di libertà (3 traslazioni e 3 rotazioni);

Per realizzare la mesh si è scelto l'uso di elementi tetragonali, infatti l'elevata irregolarità delle parti del modello non privilegiano l'utilizzo di mesh ottaedrica che richiede parametri più restrittivi nella scelta di superfici e geometria. [33] Sono stati utilizzati elementi con funzioni di forma del secondo ordine, che sfruttano l'interpolazione quadratica per calcolare i valori tra i nodi, inoltre approssimano meglio una soluzione statica rispetto a quelli del primo ordine che sono lineari e tendono ad essere eccessivamente rigidi. Si utilizzerà quindi un elemento tetraedrico a 10 nodi definito "Tet10" (Figura 36 a pagina seguente).

Per il meshing si è scelto di utilizzare un algoritmo denominato “patch conforming”, una tecnica in cui tutte le facce ed i contorni (bordi e vertici) sono rispettati con tolleranze minime quando viene generata la mesh. Una mesh più fine produce una risposta più precisa, ma incrementa il tempo di calcolo e la memoria richiesta.

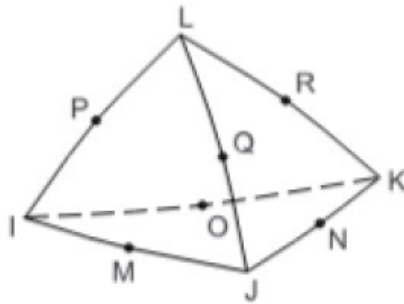


Figura 36 - Elemento "Tet10"

Molto importante in sede di pre-processing l'esecuzione dell'operazione di controllo della “Element Quality”: identificatore di qualità, permette di valutare la qualità della mesh di un modello per evitare soluzioni imprecise o incomplete, viene calcolato per ciascun elemento del modello ed è basato sul rapporto tra volume e la lunghezza del bordo (il valore 1 indica un cubo o quadrato perfetto, 0 invece elemento a volume zero o negativo).

#### 5.2.1.4 Condizioni al contorno.

Per l'applicazione dei carichi è stato utilizzato il comando “Bearing”, per creare carichi tipicamente originati da un cuscinetto, simulando quindi una situazione di sollecitazione realistica per il componente oggetto di ottimizzazione. Un carico di tale tipo è una forza distribuita che viene applicata su una faccia cilindrica o su di un bordo circolare. Un carico sul cuscinetto approssima la distribuzione della forza che si verifica quando una forza radiale viene trasmessa tra superfici cilindriche o bordi circolari che si accoppiano.



Per esempio, un carico del cuscinetto può essere usato per approssimare la distribuzione della forza che si verifica quando un albero esercita una forza radiale su un cuscinetto a strisciamento. I carichi sui cuscinetti hanno le seguenti caratteristiche:

- La distribuzione della forza agisce normalmente alla faccia cilindrica o al bordo circolare.
- L'intensità della distribuzione della forza varia in funzione della coordinata tangenziale. È possibile specificare una variazione parabolica o sinusoidale per l'intensità della distribuzione della forza. Potete anche specificare l'intervallo angolare su cui agisce la distribuzione della forza. Il software centra l'intervallo angolare intorno alla direzione specificata per la forza radiale. L'intensità della distribuzione della forza ha un picco al centro del campo angolare ed è zero alle estremità di detto campo angolare.
- La distribuzione della forza è una funzione della sola coordinata tangenziale. Quando un carico del cuscinetto è applicato su una faccia cilindrica, la distribuzione della forza non varia nella direzione assiale.
- La risultante della distribuzione delle forze è equivalente alla forza radiale che viene trasmessa tra le superfici cilindriche o i bordi circolari accoppiati.

La Figura 37 a pagina seguente mostra un carico del cuscinetto che si specifica per agire nella direzione +Y su un angolo di 180 gradi. L'intensità della distribuzione della forza ha un picco al centro dell'intervallo angolare ed è zero alle estremità dell'intervallo angolare. Per questo caso, il centro della gamma angolare corrisponde all'asse +Y e le estremità della gamma angolare sono +/-90 gradi dall'asse +Y. La risultante della distribuzione delle forze agisce nella direzione +Y ed è uguale in grandezza alla forza specificata.

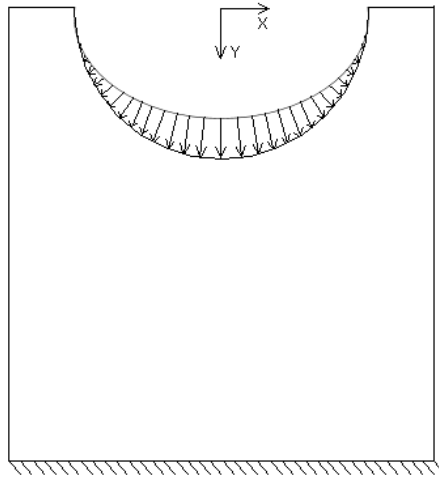


Figura 37 - Superficie di applicazione del carico di bearing.

Riguardo le condizioni di vincolo, si è applicata la condizione denominata “pinned constraints”, tale vincolo definisce un asse di rotazione. Una volta selezionata una faccia cilindrica, viene creato un sistema di coordinate cilindriche. Le direzioni R e Z sono fisse, e la direzione theta (di rotazione) è libera. Anche tutti i DOF di rotazione sono liberi.

## 5.2.2 Processing.

In questa fase vengono applicate le condizioni al contorno: carichi e vincoli, sono gli strumenti impiegati per trasporre la realtà in un modello risolvibile dal computer. Possiamo andare ad applicare le condizioni al contorno su nodi, bordi o superfici, verranno specificati in seguito in base alle prove prese in considerazione nell’analisi. Il Processing è la fase di risoluzione del modello strutturale e viene gestita dal programma in base alle istruzioni per la risoluzione numerica che vengono impostate dall’utente; il solutore verifica il collegamento tra i nodi del modello, ed effettua una verifica della correttezza del modello strutturale creato, ovvero delle caratteristiche degli elementi sia in termini di geometria interna e di materiale. [33]

### 5.2.3 Post-processing.

Il Post-processing rappresenta la fase di valutazione dei risultati e consiste nell'analisi della risposta strutturale elaborata dal risolutore numerico. È possibile andare ad analizzare risultati in termini di tensioni-deformazioni, di caratteristiche di sollecitazione, di spostamenti e di reazioni vincolari; tale valutazione può essere svolta qualitativamente per via grafica e in maniera più accurata leggendo da opportuni tabulati prodotti automaticamente dal programma di calcolo o creati dall'utente.

## 6 Ottimizzazione del braccio inferiore di una sospensione automobilistica.

È facilmente intuibile che durante la marcia della vettura le ruote subiscono forze di varie intensità, direzione e verso. Queste si traducono in forze agenti nei vari punti di attacco delle sospensioni, anch'esse variabili. In particolare, se le sospensioni sono disegnate correttamente, ciascun braccetto è caricato solo a trazione o a compressione. Questo significa che le forze di interazione tra i bracci inferiori delle sospensioni, il telaio e gli elementi delle masse non sospese sono variabili in verso e intensità, ma non in direzione. Il fatto di avere forze variabili in verso e modulo al variare delle condizioni di marcia del veicolo crea delle difficoltà: non è infatti semplice definire quale sia la condizione di carico più gravosa per il braccetto, in modo da poterne verificare la resistenza. Dopo opportune ricerche, si è ipotizzato che tale condizione si realizza mediante un'accelerazione in curva con trasferimento di carico per la ruota sinistra, ed una frenata al limite con alleggerimento per la ruota destra; queste condizioni di marcia si traducono in una sollecitazione di trazione e compressione in X e Y. Questo modello si è rivelato molto efficace per lo studio. Le forze agenti sui braccetti sono state calcolate basandosi sui dati di aderenza degli pneumatici, in base alla teoria della dinamica del veicolo riportata nella precedente sezione, sotto l'ipotesi di carichi puramente assiali, condizione accettabile vista la presenza degli snodi sferici; considerando le massime forze di interazione tra ruote ed asfalto, note le geometrie delle sospensioni, si sono potute calcolare le forze trasmesse al braccetto. Nella Tabella 4 sono stati determinati 4 casi di carico:

*Tabella 4 – Casi di carico ipotizzati.*

	<b>Caso di carico</b>	<b>Forza in modulo (N)</b>
<b>1</b>	T/C Lungo Y	5000
<b>2</b>	Torsione	15000
	T/C Normale alla Superficie del cuscinetto	
<b>3</b>	sferico	5000
<b>4</b>	T/C Lungo X	3000

Questi casi di carico sono stati ricavati considerando 2 g di accelerazione longitudinale in frenata, 1 g di accelerazione longitudinale in accelerazione, 2 g di accelerazione laterale in curva e 1,5 g di accelerazione longitudinale e trasversale durante la frenata in curva. Il sistema di riferimento delle forze è concorde con quello vettura. Dal momento che i modelli di calcolo sono stati costituiti (Cap. 5) e sono state definite le condizioni di carico (Cap. 6), abbiamo a disposizione tutti quegli strumenti che permettono di effettuare le analisi strutturali del componente della sospensione. Questo capitolo tratta dell'ottimizzazione e dell'analisi di resistenza del braccetto inferiore. Nella sua forma più nota in letteratura, il problema di ottimizzazione prevede come obiettivo quindi la minimizzazione della cedevolezza, ovvero la massimizzazione della rigidità globale della struttura. Un simile formulazione del problema di ottimizzazione è evidentemente di grande interesse pratico ed ingegneristico, poiché permette di ridurre il peso di una struttura preservandone le sue qualità in termini di rigidità. Durante il processo, il progettista è interessato a trovare il miglior posizionamento nello spazio di un dato materiale. In altre parole, egli vuole determinare quali punti del suddetto spazio devono essere occupati da pieni e quali da vuoti. Il problema di ottimizzazione topologica è risolto attraverso l'utilizzo di procedure iterative, ognuna delle quali viene validata per mezzo di un'analisi agli elementi finiti, che fornisce i risultati che saranno analizzati per poter proseguire nel processo iterativo. Dato che le forme ottenute a valle di un processo di ottimizzazione topologica sono tipicamente difficili da processare, uno dei problemi pratici del metodo sta nella difficoltà di tradurre il risultato dell'ottimizzazione in una geometria producibile secondo una determinata tecnica produttiva. Lo scopo principale del lavoro è stato dunque quello di arrivare, a partire dalle forme ottimizzate, a una geometria definitiva che potesse essere realizzata mediante stampaggio a compressione di materiale composito a fibra discontinua in chip: È possibile sintetizzare il seguente workflow, a cui si è fatto riferimento nel presente lavoro:



Il primo passaggio del processo di ottimizzazione non può che partire dal modello che di seguito verrà sempre definito “originale”, per distinguerlo dai componenti ottimizzati, Figura 38:

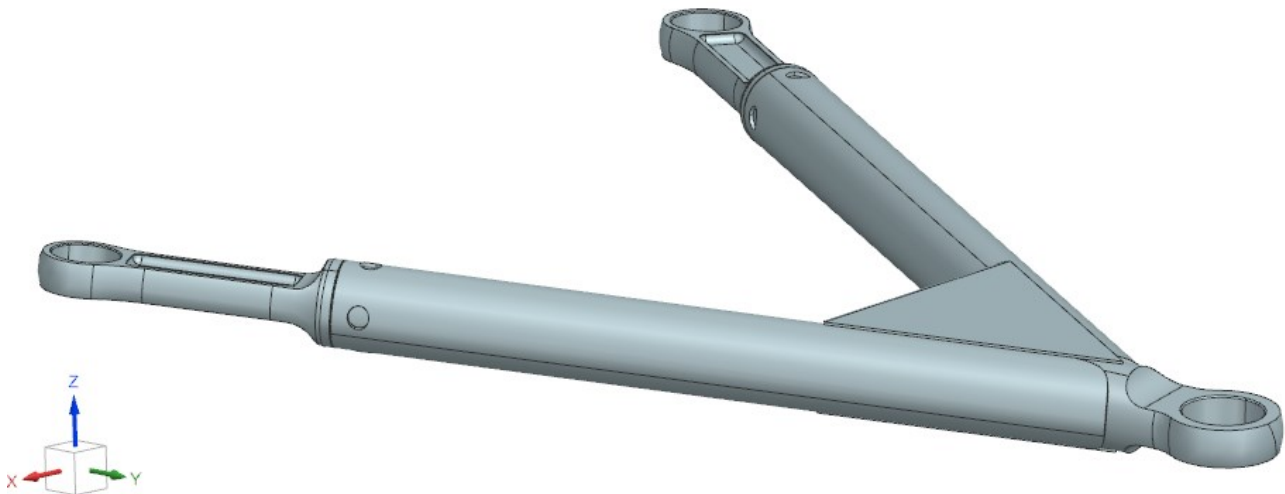


Figura 38 – Modello CAD del componente originale.

I carichi sollecitanti sono trasmessi per mezzo della superficie interna all'alloggiamento del giunto sferico. I punti di ancoraggio al telaio, che tipicamente subiscono sollecitazioni maggiori per via del maggiore braccio della forza applicata, sono realizzati mediante due travi a doppia T, che si uniscono ai due bracci tubolari. La scelta di una struttura cava per questi componenti è dettata dalle ragioni di riduzione delle masse, dal momento che come si vedrà tali punti della struttura subiscono sollecitazioni più ridotte. Ma non è solo questo il motivo, infatti una trave tubolare cava consente di ottenere una resistenza “simmetrica” a trazione e compressione, e di ottenere rigidezze nel piano e fuori dal piano paragonabili. Infine, la struttura presenta due “fazzoletti” triangolari saldati alle due travi tubolari, che conferiscono resistenza flessionale. Per completezza, sono illustrate le proprietà meccaniche del materiale che lo compone:

Tabella 5 – Specifiche dell'Alluminio 7075-T6

	<b>E [Mpa]</b>	<b>Nu</b>	<b>Densità [t/mm3]</b>	<b>Snervamento [MPa]</b>
<b>Alluminio 7075-T6</b>	75000	0.33	2.800E-09	415

A conclusione di questo paragrafo, sono infine analizzate le prestazioni meccaniche del componente originale (Tabella 6), che serviranno come target nell'operazione di benchmarking alla base del processo iterativo di ottimizzazione topologica.

Tabella 6 - Risultati dell'applicazione dei carichi al componente originale.

	CASO DI CARICO 1 T/C 5000 N Inclinata	CASO DI CARICO 2 Torsione 15000Nmm
	BRACCETTO ORIGINALE	BRACCETTO ORIGINALE
VON MISES STRESS (MPa)	183,3 (T) - 184 (C)	22,34
DISP. MAGNITUDE	7,5 mm (T) - 7,89mm (C)	0,270 mm
DISP. LUNGO X	0,7 mm (T) - 0,66 mm (C)	0,063 mm
DISP.LUNGO Y	1,1 mm (T) - 1,12 mm (C)	0,055 mm
DISP. LUNGO Z	7,38mm (T) - 7,80 mm (C)	0,26 mm
	CASO DI CARICO 3 T/C Pura 5000 N	CASO DI CARICO 4 Flessione 90° 3000 N
	BRACCETTO ORIGINALE	BRACCETTO ORIGINALE
VON MISES STRESS (MPa)	98,77 (T) - 44,6 (C)	642
DISP. MAGNITUDE	1,12 mm (T) - 1,11 mm (C)	29,9 mm
DISP. LUNGO X	0,068 mm (T) - 0,068 mm (C)	2,48 mm
DISP.LUNGO Y	0,079 mm (T) - 0,067 mm (C)	4,05 mm
DISP. LUNGO Z	1,125 mm (T) - 1,11 mm (C)	29,68 mm

Dall'analisi strutturale effettuata, è importante rilevare che le tensioni più alte sono concentrate su aree abbastanza ridotte del componente, per quanto riguarda lo spostamento del punto di ancoraggio al montante ruota, si registra un valore massimo pari a 7,47 mm nel caso di carico 1.

Questi risultati sono stati dunque imposti come “benchmark” che si vorrà ottenere sul componente ottimizzato in composito al termine del processo iterativo. (Figg. 39-40).

Subcase - Static Loads 1, Static Step 1  
Displacement - Nodal, Magnitude  
Min : 0.009, Max : 7.853, Units = mm  
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude

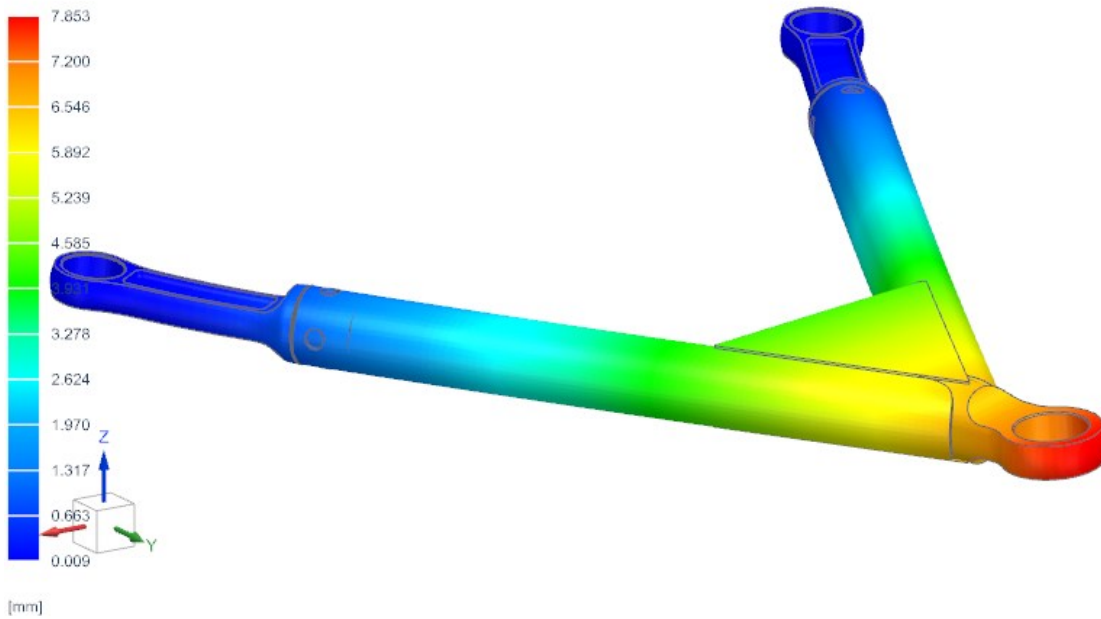


Figura 39 - Spostamento del componente originale, sottoposto al primo caso di carico.

Stress - Elemental, Von-Mises  
Min : 0.16, Max : 173.77, Units = MPa  
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude

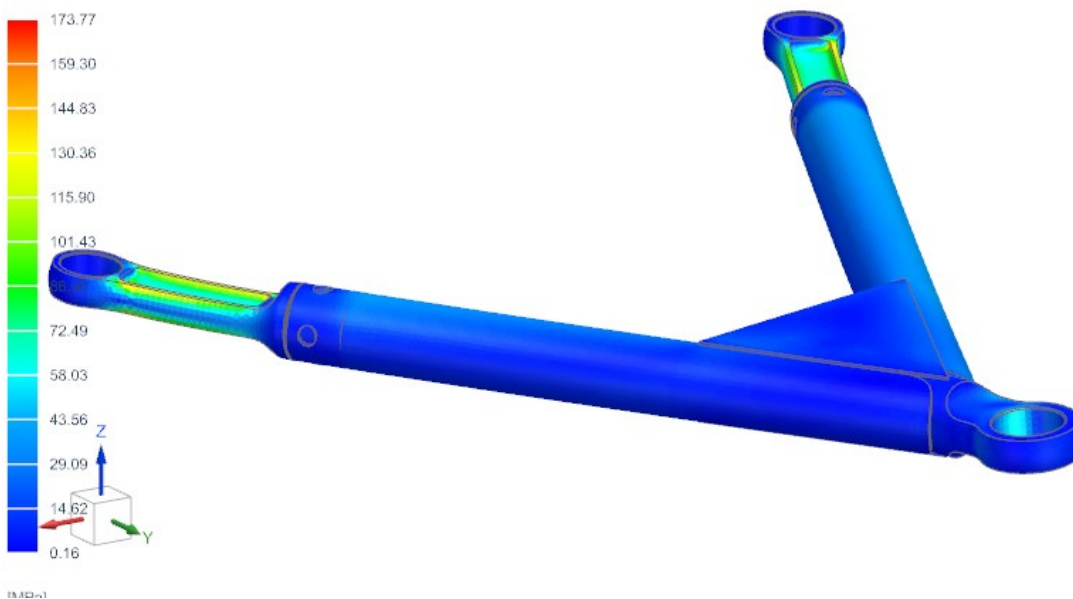


Figura 40 - Stress del componente originale sottoposto al primo caso di carico ipotizzato.



I punti fermi del progetto sono quelle regioni del modello che non devono essere alterate durante le fasi di ottimizzazione. La massa attribuita a tali punti è dunque vincolata e non può essere ridistribuita in sede di ottimizzazione. Sono tipicamente definite come tali quelle porzioni del componente che si interfacciano con altri membri o che semplicemente devono esistere per motivi funzionali, come in tal caso i tre punti di collegamento con, da un lato, il telaio del veicolo e dall'altro, la massa non sospesa facente parte del gruppo ruota. Un'ulteriore porzione di volume che deve rimanere vincolata si trova poi nell'intorno del foro attraverso cui sono trasmessi i carichi, infatti è importante che l'estensione della superficie cilindrica in cui è iterativamente applicato il carico di "bearing" a cuscinetto sia estesa parimenti nel componente originale e in quello ottimizzato, al fine di realizzare una corretta e simile applicazione dei carichi nei due casi.

## 6.1 Prima fase del processo di ottimizzazione

### 6.1.1 Prima Iterazione.

Il primo modello che si è realizzato è stato dal design molto conservativo, seppur completamente differente rispetto al modello originale. Oltre ai punti fermi di progetto, precedentemente descritti, si è cercato di dare al componente una forma tale da poter rientrare nei vincoli dimensionali, per questioni di ingombro. Inizialmente, l'attenzione è stata posta a determinare un valore numerico di sezione resistente adatta a sopportare le sollecitazioni a cui normalmente un simile componente si trova a doversi far carico. È stata scartata la possibilità di realizzare sezioni cave, per questioni di limiti tecnologici. È stata effettuata una prima fase di "testing" su componenti di sezione quadrangolare piena, che purtroppo si sono rivelati deludenti sia dal punto di vista del momento di inerzia flessionale, che governa la rigidità, che dal punto di vista del peso, troppo elevato.

Infatti, essendo il componente sollecitato a trazione o compressione, la sezione quadrangolare piena comporta troppa massa orientata in una direzione non conforme alle sollecitazioni di flessione ricevute, ed oltretutto la struttura risultava parecchio snella, con conseguenti problemi di instabilità elastica a compressione. Si è definito un volume “target” che il componente dovrà avere stante la densità del nuovo materiale  $\rho = 1500 \text{ kg/m}^3$ , molto inferiore ai 2800 dell’alluminio. Definito tale parametro, si è avuta cura di costruire una sezione ad H opportuna. In questa sezione, le flange sono sottoposte a trazione e compressione, mentre l’anima subisce i carichi di taglio. Con questa geometria si riesce ad ottenere maggiore resistenza ad alti carichi di flessione e compressione fuori dal piano in rapporto al peso, elevata rigidità flessionale, ed infine tale sezione può essere definita ‘su misura’ a seconda delle esigenze, infatti l’anima serve solo a distanziare le due flange, aumentando l’estensione di questa è possibile conseguire grandi miglioramenti in rigidità senza aggravamenti di peso sostanziali, ed inoltre produrrebbe una geometria molto ben processabile in sede di stampaggio a compressione mediante l’uso di isole modulari. La sezione ad H necessita di vincoli tecnologici quali gli spessori, che per via del processo di stampaggio a compressione devono possibilmente mantenersi maggiori dei 2.5 mm, ed inoltre la geometria va complicata tendendo ad una X, imponendo un adeguato raggio di raccordo alle due cave, così da guadagnare sia in momento di inerzia, sia in stampabilità, perché questo accorgimento permette al materiale di fluire correttamente all’aumentare della pressione di stampaggio. In Figura 45, viene riportato il modello CAD del componente realizzato:

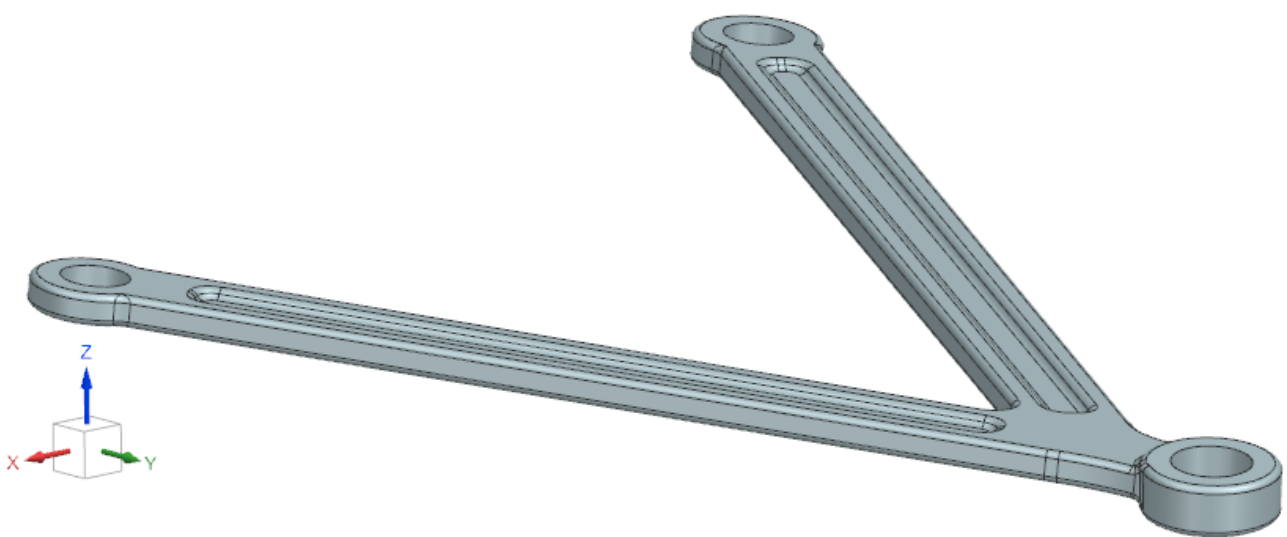


Figura 45 - Modello CAD, prima iterazione.

Come è possibile osservare, l'asse del foro di alloggiamento del portamozzo è inclinato di 5° rispetto all'asse dei due fori che alloggianno le boccole, che si trovano sullo stesso piano. Il componente presenta cave speculari profonde 3.5 mm e larghe 17 mm, e la sezione presenta un'altezza di estrusione di 12mm e una larghezza di 39 mm, si è cercato dunque di mettere in opera una sezione ad H che possa lavorare in maniera efficiente. In Figg. 46-47, vengono riportati i risultati dell'analisi FEM del componente "ridisegnato", ed in seguito le Tabelle 7a-b a pagina seguente, in cui questi risultati sono paragonati con quelli del modello originale:

Subcase - Static Loads 1, Static Step 1  
Stress - Elemental, Von-Mises  
Min : 0.01, Max : 69.97, Units = MPa  
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude

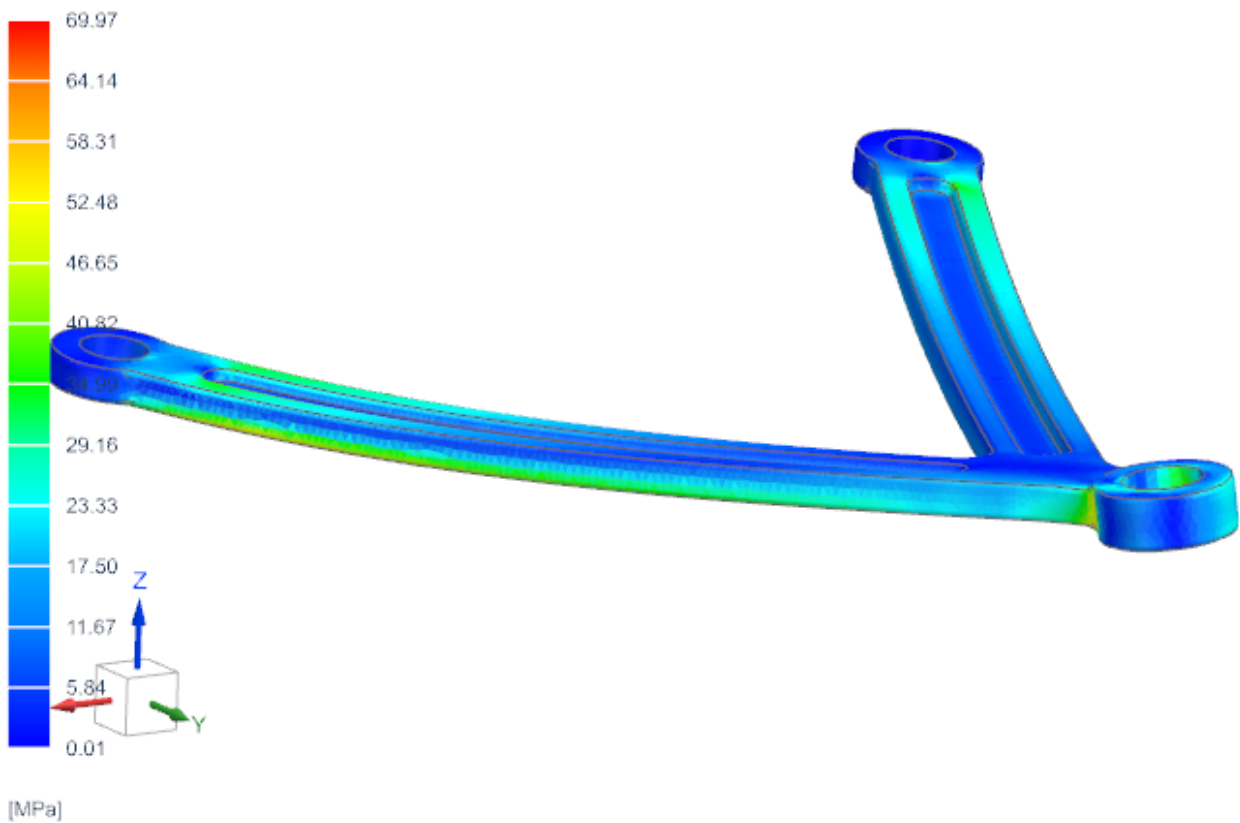


Figura 46 - Risultati della prima iterazione del processo di ottimizzazione.

Displacement - Nodal, Z  
 Min : -0.01, Max : 12.41, Units = mm  
 Deformation : Displacement - Nodal Magnitude

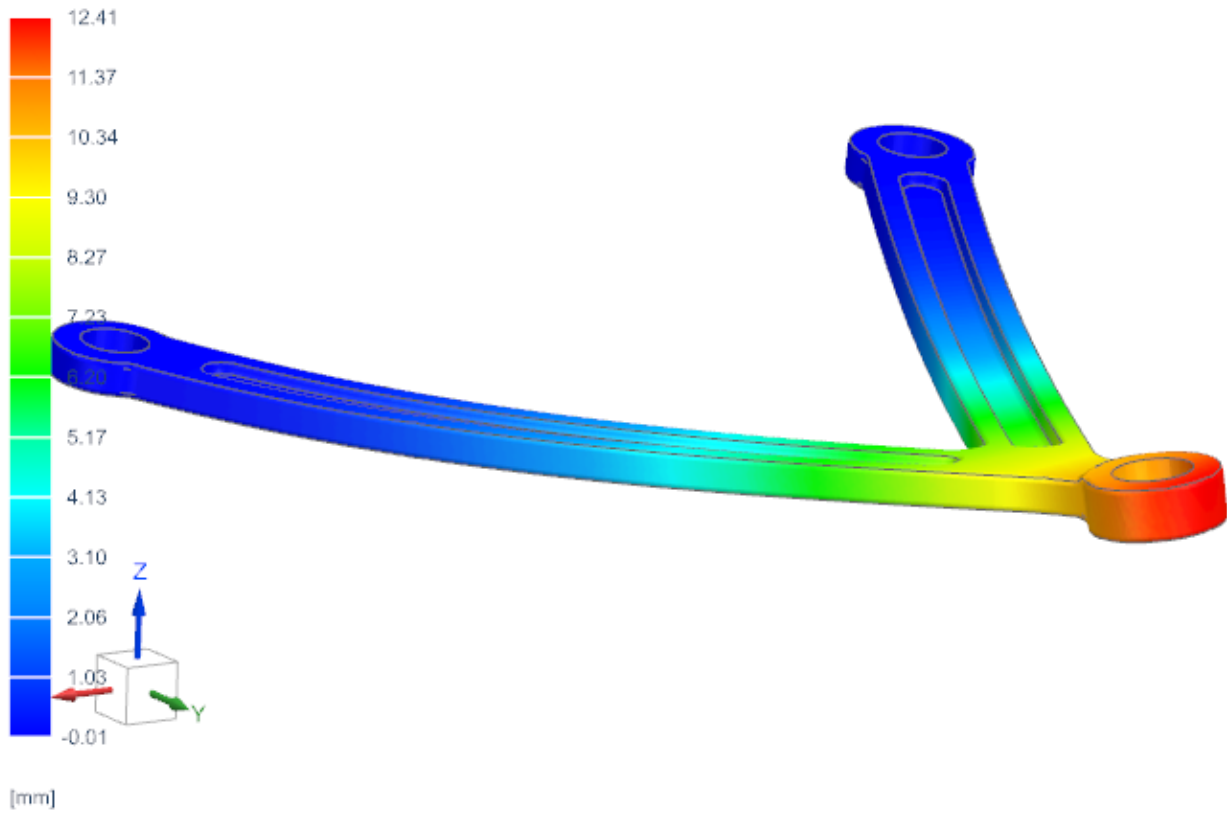


Figura 47 - Risultati dell'analisi agli elementi finiti per la prima iterazione del processo di ottimizzazione.

Tabella 7a - Risultati della prima iterazione del processo di ottimizzazione.

	CASO DI CARICO 1 T/C 5000 N Inclinata		CASO DI CARICO 2 Torsione 15000Nmm	
	BRACCETTO RIPROGETTATO 7.5.6	BRACCETTO ORIGINALE	BRACCETTO RIPROGETTATO 7.5.6	BRACCETTO ORIGINALE
VON MISES STRESS (MPa)	89 (C) - 102 (T)	183,3 (T) - 184 (C)	10,13	22,34
DISP. MAGNITUDE	23 mm (T) - 19 mm (C)	7,5 mm (T) - 7,89mm (C)	0,794 mm	0,270 mm
DISP. LUNGO X	1,4 mm (T) - 1,2 mm (C)	0,7 mm (T) - 0,66 mm (C)	0,102 mm	0,063 mm
DISP. LUNGO Y	3,46 mm (T) - 2,97 mm (C)	1,1 mm (T) - 1,12 mm (C)	0,126 mm	0,055 mm
DISP. LUNGO Z	23 mm (T) - 19,73 mm (C)	7,38mm (T) - 7,8 mm (C)	0,788 mm	0,26 mm

Tabella 7b - Risultati della prima iterazione del processo di ottimizzazione.

	CASO DI CARICO 3 T/C Pura 5000 N		CASO DI CARICO 4 Flessione 90° 3000 N	
	BRACCETTO RIPROGETTATO 7.5.6	BRACCETTO ORIGINALE	BRACCETTO RIPROGETTATO 7.5.6	BRACCETTO ORIGINALE
VON MISES STRESS (MPA)	35,87 (T) - 22,96 (C)	98,77 (T) - 44,6 (C)	146	642
DISP. MAGNITUDE	1,38 mm (T) - 1,38 mm (C)	1,12 mm (T) - 1,11 mm (C)	39	29,9
DISP. LUNGO X	0,126 mm (T) - 0,118 mm (C)	0,068 mm (T) - 0,068 mm (C)	2,42	2,48
DISP.LUNGO Y	0,345 mm (T) - 0,321 mm (C)	0,079 mm (T) - 0,067 mm (C)	5,73	4,05
DISP. LUNGO Z	1,34 mm (T) - 1,35 mm (C)	1,125 mm (T) - 1,11 mm (C)	39,04	29,68

Come è possibile osservare, la principale criticità della struttura è rappresentata dallo spostamento lungo Z, dal momento che per come è stata concepita, presenta troppo materiale in prossimità dell'asse neutro, che non fornisce contributo rilevante in termini di rigidità flessionale fuori dal piano. Per quanto riguarda la rigidità flessionale nel piano, essa risulta più soddisfacente, a parità di carichi applicati. Il componente risulta essere ottimizzato in peso, riuscendo a far segnare un 15% di riduzione della massa, dai 0,590 kg del modello originale ai 0,540 kg del modello realizzato in prima iterazione. Tuttavia, questi primi risultati ottenuti devono essere interpretati correttamente: tale geometria infatti ha dimostrato di non rispettare i vincoli di progetto, sebbene sia realizzabile con la tecnologia produttiva scelta. Nelle successive iterazioni, si è spostato materiale lontano dall'asse neutro, cercando di avvicinarsi sempre di più ad una condizione di rigidità ottimale fuori dal piano, e poi si è effettuata una verifica statica al termine di ogni fase iterativa, per verificare se si fosse centrato il target, o quanto si è lontani da esso. Nell'impostazione del processo di ottimizzazione, si è ragionato come segue: per prima cosa è stato individuato il "caso di carico" in cui il nuovo componente si discostasse maggiormente dall'originale. In secondo luogo, si è individuata tra i parametri di output la criticità che fosse in termini assoluti più rilevante, in dato caso di carico: essa è rappresentata dallo spostamento lungo Z, e quindi dalla rigidità flessionale in tale direzione.

Quindi è stata posta maggiore attenzione su questa criticità, ed è stato avviato il processo iterativo fino a che, con le dovute e sequenziali modifiche, si arrivasse a dei risultati pari o migliori di quelli del componente di partenza. Una volta giunti a convergenza per quel caso di carico, si effettua un controllo anche sugli altri casi di carico per verificare che si sia giunti a una complessiva convergenza dei parametri di output.

## 6.1.2 Seconda Iterazione.

Vista la problematica nello spostamento in direzione Z evidenziata dal primo modello, la prima modifica che è stata fatta, con conseguente aumento di peso (che ammonta ora a 0,640kg), è stata volta all'aumento della altezza di estrusione fino a 13.5 mm, così da aggiungere materiale lontano dall'asse neutro e irrigidire la sezione nella direzione Z, perpendicolare al piano x-y (dove il risultato in termini flessionali è più simile al target). Sono state mantenute le altre specifiche dimensionali, a partire dalla profondità e dalla larghezza delle cave, rispettivamente di 3.5mm e 17mm. Dai risultati, come era lecito attendersi data la modifica effettuata, è stato osservato un aumento di rigidità flessionale lungo Z, proporzionale, tramite un coefficiente che dipende dalle condizioni di vincolo, a  $EJ/L$  dove J è il momento centrale d'inerzia della sezione, migliore di circa il 42% rispetto alla prima iterazione.

Tabella 8 - Risultati della seconda iterazione del processo di ottimizzazione

	CASO DI CARICO 1	
	BRACCETTO RIPROGETTATO 7.5.7	T/C 5000 N Inclinata BRACCETTO ORIGINALE
VON MISES STRESS (MPA)	63,71 (T)	183,3 (T) - 184 (C)
DISP. MAGNITUDE	13,23 mm (T)	7,5 mm (T) - 7,89mm (C)
DISP. LUNGO X	0,95 mm (T)	0,7 mm (T) - 0,66 mm ©
DISP. LUNGO Y	2,50 mm (T)	1,1 mm (T) - 1,12 mm (C)
DISP. LUNGO Z	13,14 mm (T)	7,38mm (T) - 7,8 mm ©

## 6.1.3 Terza Iterazione.

Il risultato conseguito nella seconda iterazione, in termini di spostamento lungo Z, è stato incoraggiante, ma non ancora conforme al target. Si è proseguito l'iter modificando ancora due parametri di processo: l'altezza di estrusione e la profondità delle cave. Il primo, che governa la rigidità flessionale in Z, ed il secondo, meno influente in tal senso, che consenta di tenere il peso sotto controllo. Nella fattispecie, la profondità delle cave è stata portata a 6 mm per guadagnare in peso; l'altezza di estrusione è stata aumentata di 1.5 mm. Con questa modifica, il componente perde in rigidità nel piano, infatti in tal caso l'asse neutro di flessione è disposto verticalmente rispetto alla sezione e togliendo materiale lontano da esso, scavando maggiormente le cave, si ottiene un peggioramento in tal senso. A livello numerico, la sezione è stata variata di poco nel corso delle modifiche geometriche fatte nelle varie iterazioni, poiché occorre mantenere le tensioni entro livelli tecnologicamente accettabili per il materiale.

Tabella 9 - Risultati della terza iterazione del processo di ottimizzazione

	CASO DI CARICO 1	
	T/C 5000 N Inclinata	
	BRACCETTO RIPROGETTATO 7.5.9	BRACCETTO ORIGINALE
VON MISES STRESS (MPa)	69,41 (T)	183,3 (T) - 184 (C)
DISP. MAGNITUDE	11,3 mm (T)	7,5 mm (T) - 7,89mm (C)
DISP. LUNGO X	0,86 mm (T)	0,7 mm (T) - 0,66 mm ©
DISP.LUNGO Y	1,77 mm (T)	1,1 mm (T) - 1,12 mm (C)
DISP. LUNGO Z	11,22 mm (T)	7,38mm (T) - 7,8 mm ©

Come prevedibile, la modifica alla geometria ha fatto sì che la rigidità lungo Z fosse incrementata ancora, ma non in maniera sostanziale, tale da rientrare nei valori di output posti come target.

Displacement - Nodal, Magnitude  
Min : 0.00, Max : 12.49, Units = mm  
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude

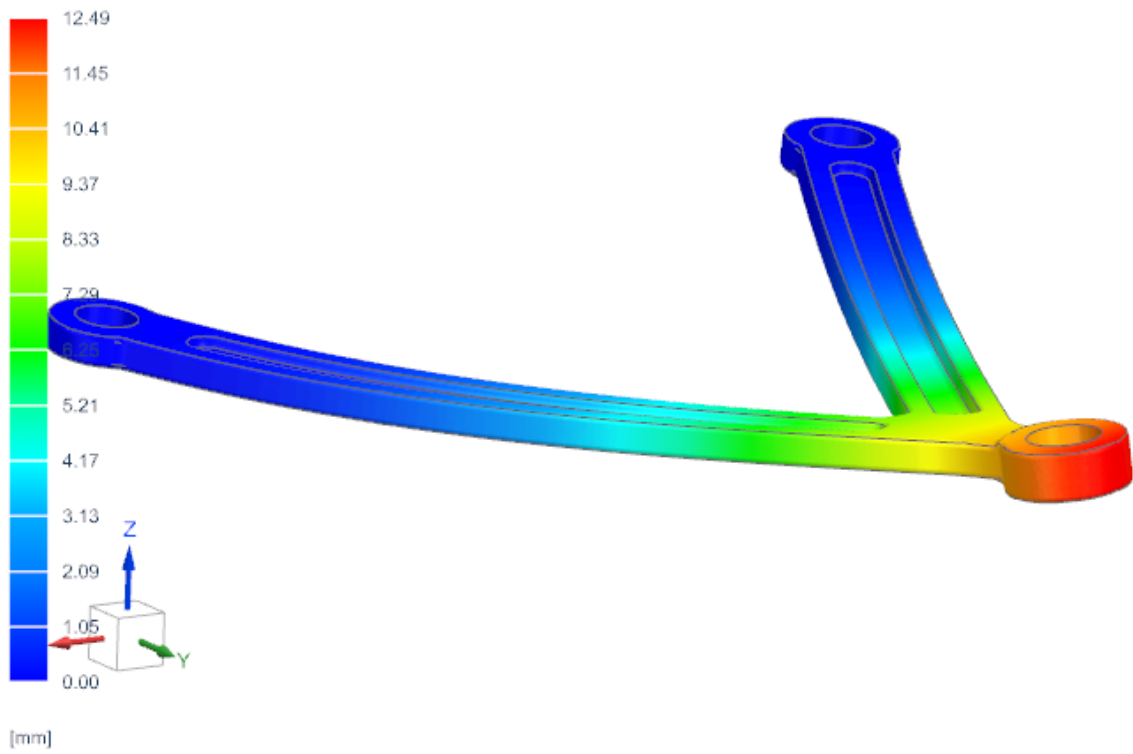


Figura 48 - Risultati dell'analisi FEM effettuata per la terza iterazione del processo di ottimizzazione.

Stress - Elemental, Von-Mises  
Min : 0.01, Max : 69.97, Units = MPa  
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude

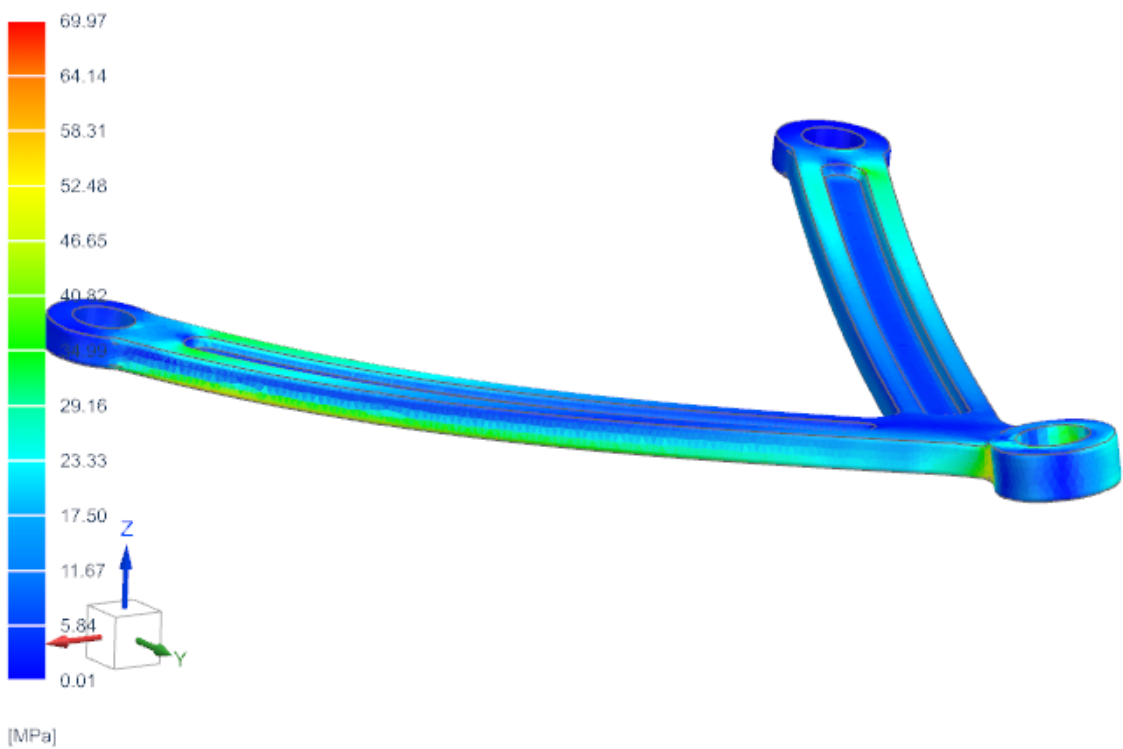


Figura 49 - Risultati dell'analisi FEM effettuata per la terza iterazione del processo di ottimizzazione.



Dall'analisi del post-processing (Figure 48-49), possiamo anche notare che:

- Tensioni abbastanza rilevanti si hanno, prevedibilmente, nel materiale che circonda l'alloggiamento del giunto a sfera, sul quale agisce il carico applicato.
- Altri incrementi di tensione significativi si possono notare in corrispondenza dei vincoli e nei punti di interfaccia tra le varie parti, quali gli attacchi a telaio, dove si registra il massimo della tensione, che sono i punti più lontani da quello di applicazione della forza. Si tratta di situazioni in cui tipicamente si ha concentrazione delle tensioni a causa di brusche discontinuità del materiale.

#### 6.1.4 Quarta Iterazione.

Nel quarto modello realizzato, si è proseguito secondo le linee guida imposte all'inizio di questa prima fase del processo: l'obiettivo è quello di modificare le specifiche dimensionali della sezione in modo tale da incrementare la rigidità flessionale lungo Z, riportando però il peso, e quindi il volume, entro i limiti imposti dal target. Infatti, la presente ottimizzazione, oltre ad agire sulle prestazioni, agisce anche sul peso, che deve essere ridotto in virtù del materiale impiegato. Perciò, l'altezza dell'estrusione è stata aumentata di 0.55 mm, e la profondità delle cave portata a 6.5mm, mentre la loro larghezza è rimasta costante. A pagina seguente, nella Tabella 10 e in Figure 50-51 sono riportati i risultati:

Tabella 10- Risultati della quarta iterazione.

	CASO DI CARICO 1	T/C 5000 N Inclinata
	BRACCETTO RIPROGETTATO 7.5.10	BRACCETTO ORIGINALE
VON MISES STRESS (MPa)	69,09 (T)	183,3 (T) - 184 (C)
DISP. MAGNITUDE	10,8 mm (T)	7,5 mm (T) - 7,89mm (C)
DISP. LUNGO X	0,84 mm (T)	0,7 mm (T) - 0,66 mm ©
DISP. LUNGO Y	1,72 mm (T)	1,1 mm (T) - 1,12 mm (C)
DISP. LUNGO Z	10,7 mm (T)	7,84mm (T) - 7,82 mm ©

Quello che è possibile notare dai risultati in Tabella 10, è che lo spostamento lungo Z della struttura sta progressivamente tendendo a quello del componente originale in seguito alle modifiche apportate, ed il miglioramento rispetto alla precedente iterazione è del 5%.

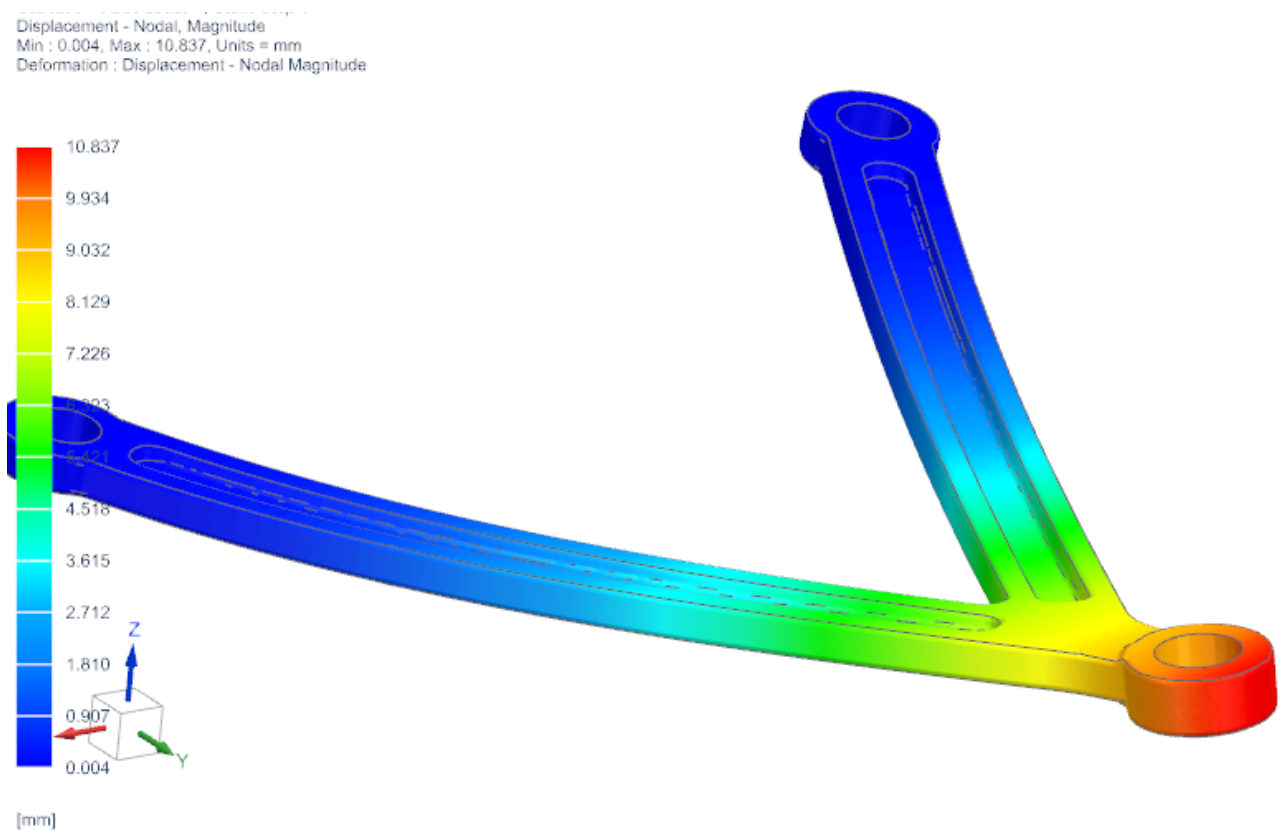


Figura 50 - Risultati dell'analisi FEM effettuata per la terza iterazione del processo di ottimizzazione (spostamento)

braccetto rimodellato doppia I (7.5.10)\_sim1 : Solution 1 Result  
Subcase - Static Loads 1, Static Step 1  
Stress - Elemental, Von-Mises  
Min : 0.01, Max : 69.09, Units = MPa  
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude

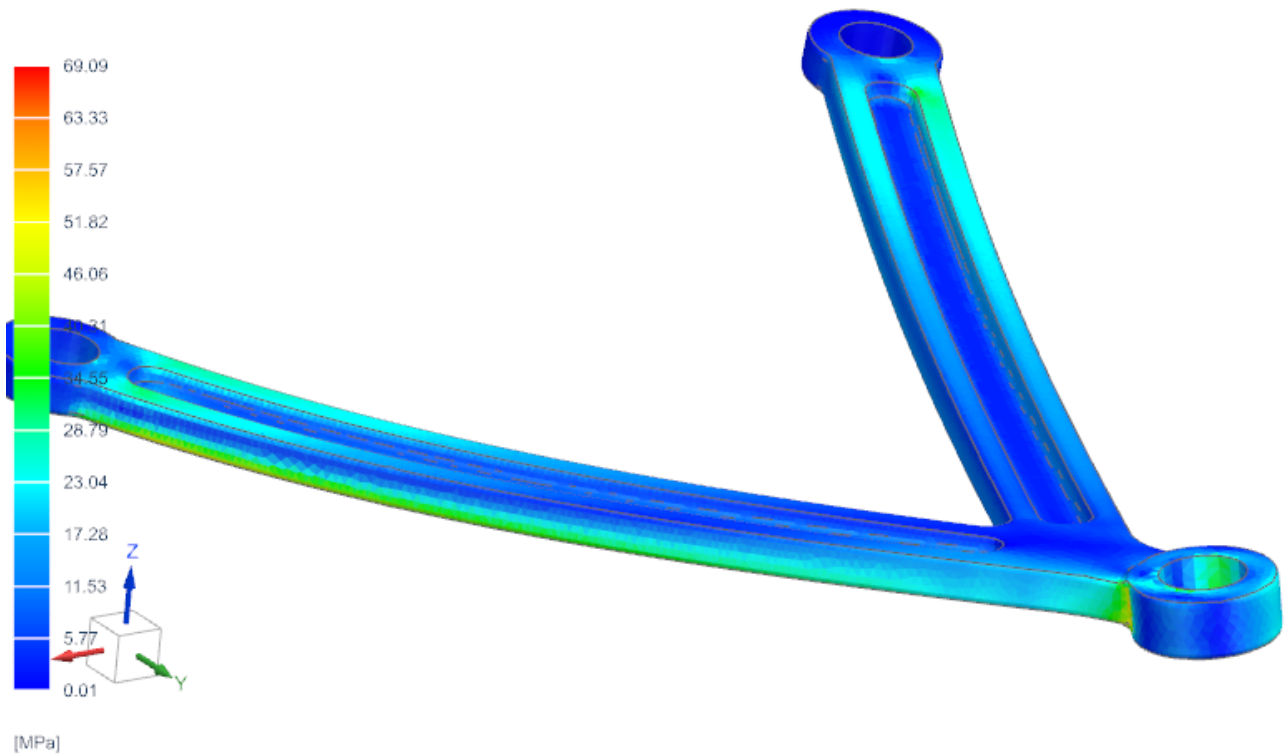


Figura 51 - Risultati dell'analisi FEM effettuata per la terza iterazione del processo di ottimizzazione (stress).

Dal punto di vista tensionale, in Figura 51 si evidenzia la nascita di stress di trazione abbastanza rilevanti nel punto in cui la trave va a congiungersi con l'alloggiamento del cuscinetto a sfera, a causa di discontinuità nel materiale e di un certo coefficiente di intaglio, ciò suggerisce che in tale regione il volume debba essere accresciuto piuttosto che ridotto. Nei compositi laminati, le concentrazioni di tensioni sono un aspetto da tenere sotto controllo: in presenza di un intaglio, di un foro, di uno spigolo vivo, di un raggio di raccordo non adeguato si può notare la comparsa di tensioni molto più importanti, in proporzione, di quelle che si osservano in altre regioni, concentrazioni di tensioni tali da dare origine a cricche, che portano il componente a rottura. In prossimità di un foro, come accade nei pressi dell'alloggiamento del giunto sferico, questo fenomeno può essere quantificato mediante un fattore  $K$  definito "Fattore di intensificazione dello sforzo" [2]. Una configurazione di questo tipo è sfortunatamente molto comune. Per cricche molto piccole ( $L \ll R$ ), si può assimilare la cricca al caso riportato in Figura 31 (cricca superficiale); il fattore intensità di sforzo sarà espresso dalla (6.1):

$$K \approx 1.12(3\sigma)\sqrt{\pi L} \quad (6.1)$$

Questa intensificazione degli sforzi, appena quantificata, può dare origine a delle cricche, che si propagano nei modi classici, portando a fenomeni di de-laminazione fra gli strati di materiale composito, pull-out delle fibre o de-bonding. Il fattore moltiplicativo 3 compare a causa del fatto che il foro è di per sé stesso un intaglio, che determina un aumento delle tensioni. Man mano che la cricca si propaga (Figura 52), essa si allontana dalla zona maggiormente sollecitata a causa dell'effetto di intaglio nei pressi del foro, e quindi K tende a diminuire. K, in queste condizioni, tende al valore limite, per  $L > R$ , quantificabile come da (6.2) [2]:

$$K \approx \sigma \sqrt{\pi \left( \frac{L + 2R}{2} \right)} \quad (6.2)$$

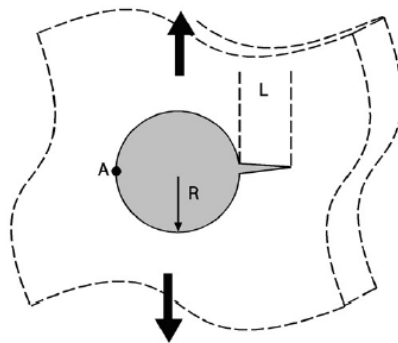


Figura 52 – Propagazione di una cricca in prossimità di un foro.

Una soluzione nell'ambito dei materiali compositi per “rinforzare” una regione prossima a un raggio di raccordo o a un foro, in virtù della estrema libertà con cui essi possono essere “configurati” dal progettista, risulta essere quella di prevedere una sorta di cucitura di fibra in direzione Z attraverso gli strati del laminato intorno al foro.

In sostanza, l'inserimento di rinforzi perpendicolarmente agli strati (ad esempio di metallo o di fibre) può rallentare il fenomeno della delaminazione [2], poiché il rinforzo inserito in tale modalità contribuisce a diminuire il fattore di intensificazione delle tensioni. In Figura 53, viene riportata la regione del componente che più presenta questa problematica:

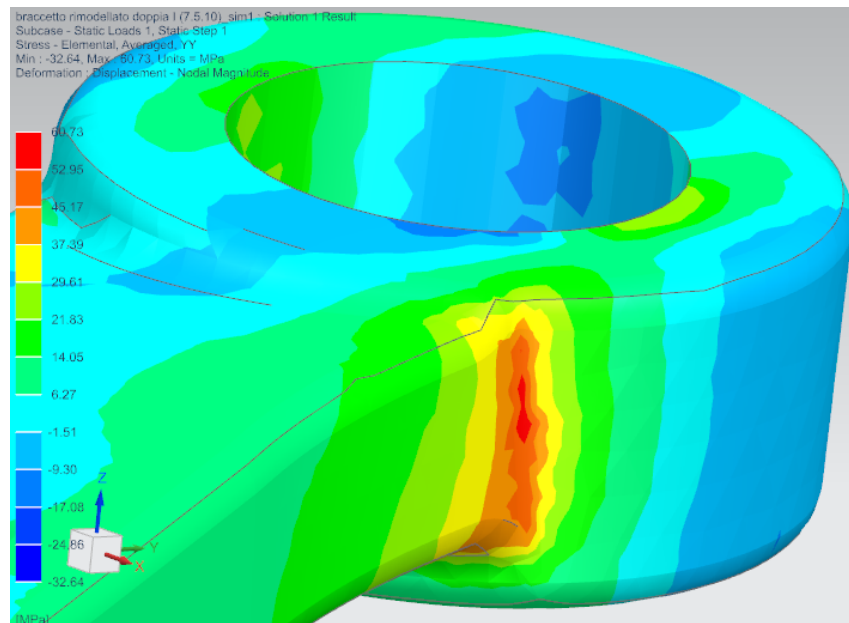


Figura 53– Zona in cui si registra un'intensificazione delle tensioni

Si può inoltre osservare in Figura 54 che le due travi sono soggette a una data flessione, ed esse subiscono di conseguenza, nella superficie superiore (andando verso valori di Z crescenti), uno sforzo di compressione e simmetricamente nella superficie inferiore uno sforzo di trazione. Complessivamente, la componente più consistente dello spostamento è in direzione Z, concentrata nella regione in cui avviene il collegamento col gruppo ruota, come è lecito attendersi.

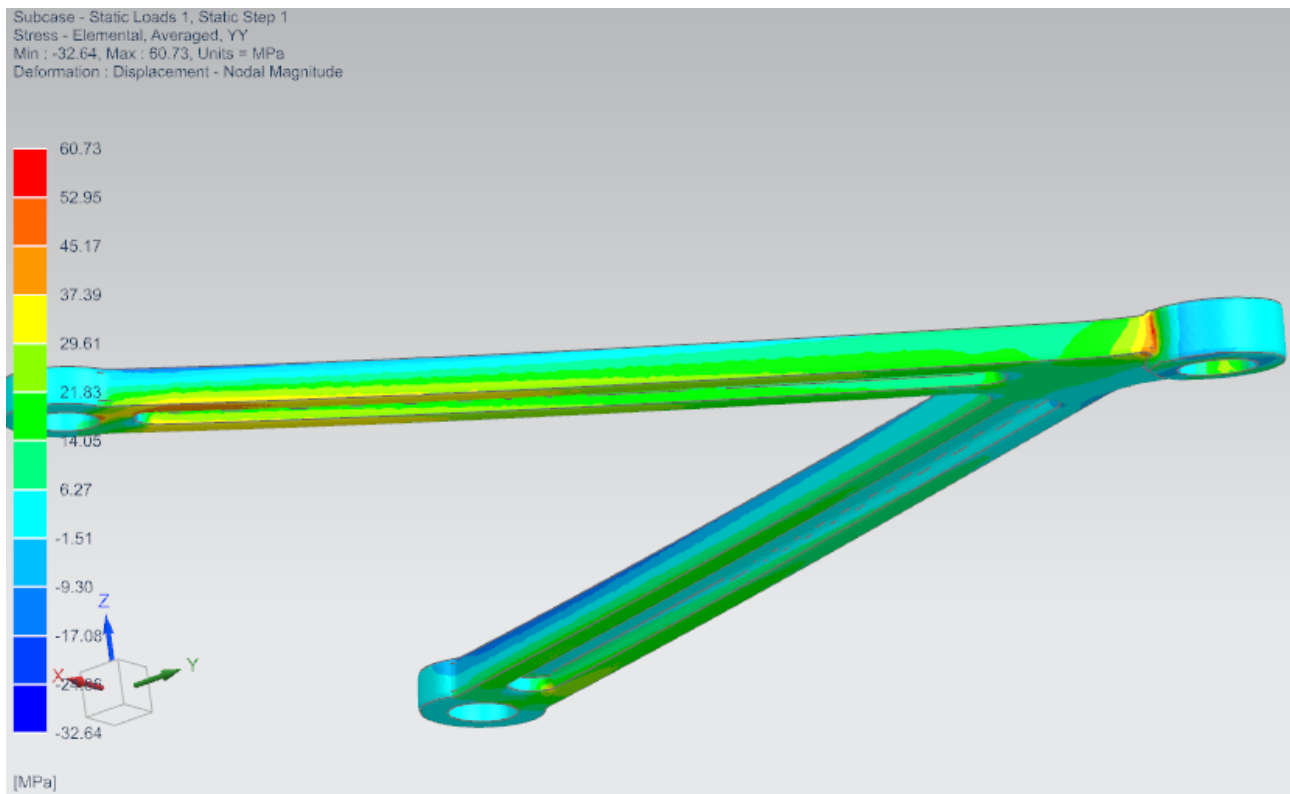


Figura 54 – Stato di sollecitazione del componente (Iter. 10), in direzione Y.

Questo processo iterativo risulta molto lungo per il bisogno di costruire un modello agli elementi finiti di validazione ad ogni iterazione, risulta però necessario. Infatti questo è l'unico modo per garantire di trovarsi nelle condizioni dei target richiesti, oppure in caso contrario fornisce valide indicazioni su quanto si è lontani dall'obiettivo e su come procedere nei successivi passaggi per apportare le dovute migliorie.

### 6.1.5 Quinta Iterazione.

Similmente a quanto fatto nelle precedenti iterazioni, si è provveduto ad irrigidire ancora la sezione lungo Z, difatti l'altezza di estrusione è stata aumentata fino a 16.1 mm, mentre le cave sono state rese profonde 6.55 mm per contenere il peso, che risulta simile a quello del componente originale.

La larghezza delle cave, per motivi tecnologici, è ancora una volta mantenuta costante. Nonostante queste modifiche, il volume di materiale vicino all'asse neutro di flessione intorno a Z è ancora troppo elevato, e ciò non contribuisce a migliorare la rigidezza flessionale in tale direzione. In secondo luogo, la struttura si mostra eccessivamente snella, e questo porterebbe ad instabilità elastica a compressione. Il carico di punta che causa questo fenomeno prevede un calcolo geometrico, come espresso dalla (6.3):

$$P_{cr} = C \frac{\pi^2 \cdot EJ}{L^2} \quad (6.3)$$

Per la determinazione del fattore C, è possibile ricondurre il caso di studio al primo esempio di Figura 31, con C=1, nel presente caso di studio. Infatti, dall'imposizione delle condizioni al contorno si ha che il punto di ancoraggio al telaio ha 3 gradi di libertà, ovvero le 3 rotazioni intorno gli assi, quindi sono da escludere le condizioni che prevedono un incastro, mentre il punto di applicazione del carico è lasciato libero. Noti i punti sospensione, la sezione delle aste e il materiale, è possibile calcolare i carichi di "buckling" da considerarsi applicati in modo da indurre compressione pura sulle travi. Applicando la notazione di cui sopra, si avrà che la struttura realizzata va in instabilità elastica sotto un carico di  $P_{crit} = 6498.8 \text{ N}$ : troppo vicino a quello applicato in fase di "testing".

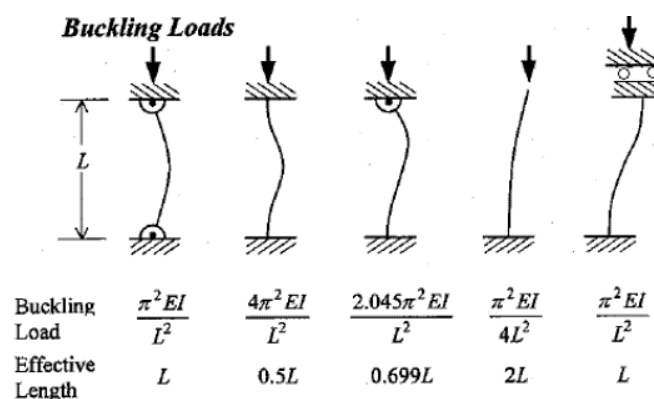


Figura 55 – Schematizzazione delle strutture soggette a instabilità elastica a carico di punta.

Nel caso del presente lavoro, è possibile menzionare l'esempio dell'instabilità elastica di una piastra laminata in materiale composito, per rendere meglio l'idea del problema. Se si sottopone una struttura laminata a un carico di compressione lungo, ad esempio, il lato vincolato, la piastra abbandona la configurazione di equilibrio stabile, per passare a una nuova condizione di equilibrio deformato, o adiacente. Quindi, se si aumenta il carico, la struttura produce un numero conseguentemente superiore di onde sinusoidali. L'instabilità elastica di strutture sottili, come lo è il braccetto oggetto di studio, è quindi un fenomeno elastico-lineare, che avviene sempre sotto carichi di compressione, e mai sotto carichi di trazione a cui è sottoposta la struttura. Se essa è snella, quindi molto sviluppata in lunghezza e con una sezione sottile, è molto probabile che vada in instabilità elastica, e il fenomeno si traduce in uno "sbandamento" nel piano x-y della trave soggetta a compressione, invece che in una variazione di sezione. Quando ciò si verifica, la deformata è rappresentata tipicamente da onde sinusoidali lungo tale piano. In Figure 56-57 sono riportati i risultati dell'analisi:

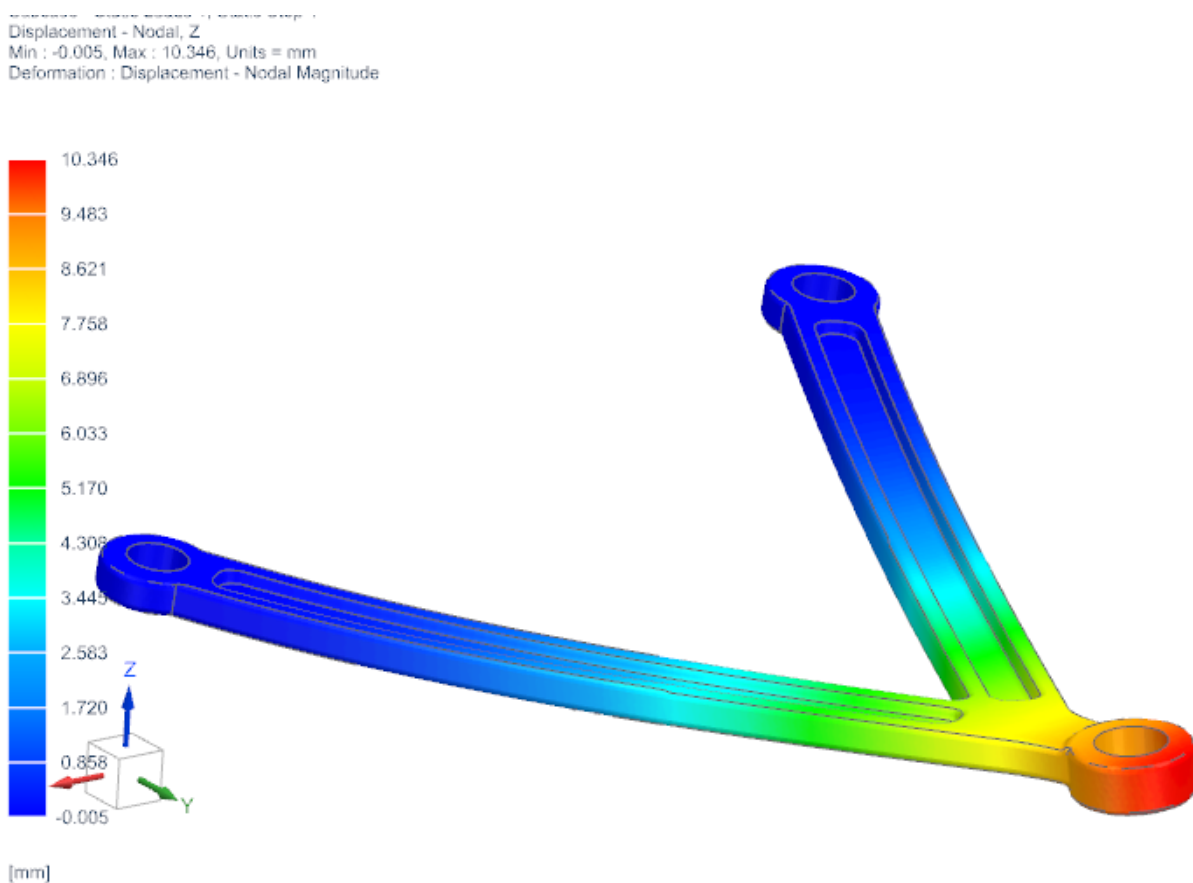


Figura 56 – Risultati dell'analisi FEM per la quinta iterazione del processo di ottimizzazione.



Subcase - Static Loads 1, Static Step 1  
Stress - Elemental, Von-Mises  
Min : 0.01, Max : 69.09, Units = MPa  
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude

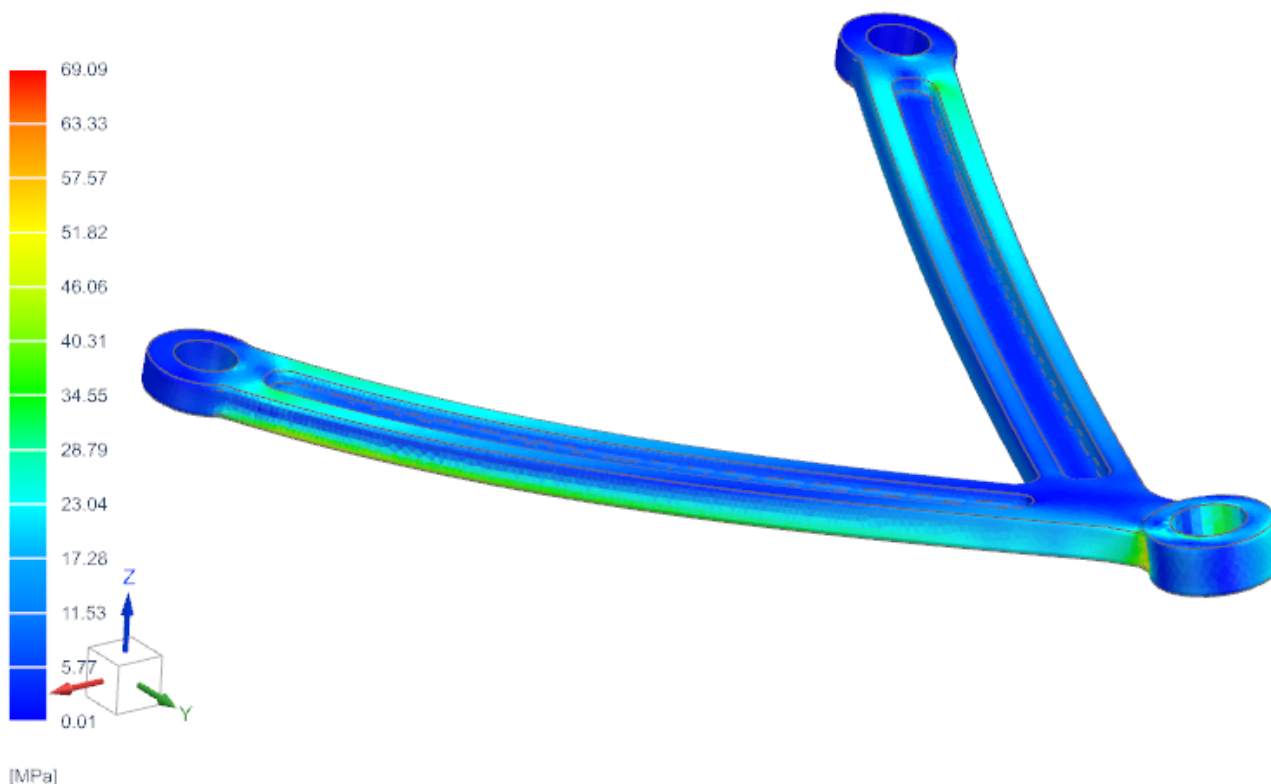


Figura 57 – Risultati dell’analisi FEM per la quinta iterazione del processo di ottimizzazione.

Dall’analisi dello stato tensionale, il modello presenta delle concentrazioni di stress abbastanza rilevanti, di circa 52 MPa, nei pressi del raccordo con regione del punto di applicazione della forza. È possibile evincere che la maggiore sollecitazione si esprima in direzione Y (Figura 58). Si osserva una flessione fuori dal piano x-y, che genera uno stato di compressione con un massimo di 30 MPa nel verso delle Z positive, ed uno stato di trazione che diventa maggiore andando verso valori di Z negativi. Questa sollecitazione di trazione risulta essere maggiore, con valori di tensione di circa 40 MPa, in prossimità dei punti di ancoraggio al telaio, supposto infinitamente rigido. Inoltre l’asse neutro di flessione in direzione Z è ben evidente ed è quella regione in cui lo spettro delle tensioni si mantiene prossimo allo zero.

Stress - Elemental, Averaged, YY  
 Min : -30.79, Max : 60.13, Units = MPa  
 Deformation : Displacement - Nodal Magnitude

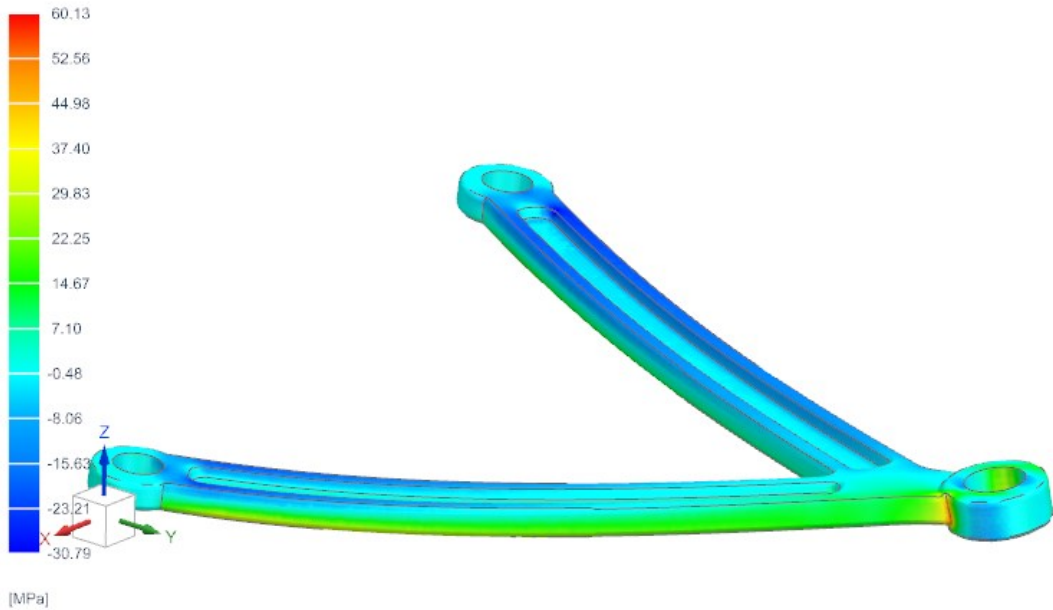


Figura 58 – Risultati dell’analisi FEM per la quinta iterazione del processo di ottimizzazione.

Inoltre, come verifica di convergenza, è stata eseguita la simulazione agli elementi finiti del terzo caso di carico, per verificare se ci si stesse complessivamente avvicinando o meno all’output imposto come target, oppure se a seguito di tutti gli interventi eseguiti sulla geometria nel corso di questa prima fase del processo di ottimizzazione si fosse ottenuto un peggioramento. (Tabelle 11-12)

Tabella 11 - Risultati della quinta iterazione del processo di ottimizzazione.

	CASO DI CARICO 1	
	T/C 5000 N Inclinata	
	BRACCETTO RIPROGETTATO 7.5.12	BRACCETTO ORIGINALE
VON MISES STRESS (MPa)	65,19 (T)	183,3 (T) - 184 (C)
DISP. MAGNITUDE	10,4 mm (T)	7,84 mm (T) - 7,89mm (C)
DISP. LUNGO X	0,80 mm (T)	0,7 mm (T) - 0,66 mm ©
DISP. LUNGO Y	1,66 mm (T)	1,1 mm (T) - 1,12 mm (C)
DISP. LUNGO Z	10,34 mm (T)	7,84mm (T) - 7,82 mm ©

Tabella 12 - Risultati della quinta iterazione del processo di ottimizzazione.

	CASO DI CARICO 3	T/C Pura 5000 N
	BRACCETTO RIPROGETTATO 7.5.12	BRACCETTO ORIGINALE
VON MISES STRESS (MPA)	33,91 (T)	98,77 (T) - 44,6 (C)
DISP. MAGNITUDE	2,98 mm (T)	1,12 mm (T) - 1,11 mm (C)
DISP. LUNGO X	0,165 mm	0,068 mm (T) - 0,068 mm ©
DISP. LUNGO Y	0,334 mm (T)	0,079 mm (T) - 0,067 mm (C)
DISP. LUNGO Z	2,98 mm (T)	1,125 mm (T) - 1,11 mm ©

Applicando il carico di trazione in direzione normale rispetto alla superficie di alloggiamento del cuscinetto sferico, il risultato in termini di rigidità flessionale restituisce un certo peggioramento rispetto ai risultati ottenuti dalla geometria della prima iterazione. Ma soprattutto, rispetto al componente originale lo spostamento è maggiore di circa 3 volte. Uno dei motivi di questo risultato, probabilmente, risiede nell'elevato sviluppo in profondità nel verso dell'estrusione delle cave, la cui altezza è stata portata a 6.55 mm per questioni di riduzione del peso. Riducendo lo spessore dell'anima centrale, diminuisce la sezione resistente, e da ciò si originano fenomeni flessionali di instabilità elastica a compressione.

## 6.2 Seconda fase del processo di ottimizzazione.

In questa nuova fase si è deciso di modificare in maniera sostanziale la geometria, nell'ottica di controllare meglio la rigidità lungo Z, aspetto più critico finora evidenziato. Infatti, la precedente sezione presentava varie problematiche. La sezione resistente è inadeguata alle sollecitazioni, inoltre risulta eccessivamente snella. È presente troppo materiale prossimo all'asse neutro, e conseguentemente una compressione diretta nel piano dove giace l'asse neutro porterebbe a fenomeni di instabilità a compressione.

## 6.2.1 Sesta Iterazione.

L'azione principale che è stata svolta è realizzare una sezione maggiormente tendente alla condizione assialsimmetrica, che risulta più prossima nel comportamento a trazione e compressione ad una sezione circolare, come quella utilizzata dal componente originale. L'obiettivo di questo intervento è realizzare una condizione di rigidità "paritaria" sia nel piano, che normalmente ad esso. Quindi, l'altezza di estrusione è stata portata a 25 mm e la base della sezione è stata ridotta di 9 mm. Dopo di che, si è deciso "ribaltare" la sezione a doppia T, incrementando l'altezza dell'anima centrale, così da ottenere una tensione flessionale lungo Z più ridotta, dal momento che essa è inversamente proporzionale al quadrato dell'altezza dell'anima. In Figura 59 è riportato il modello CAD del nuovo modello:

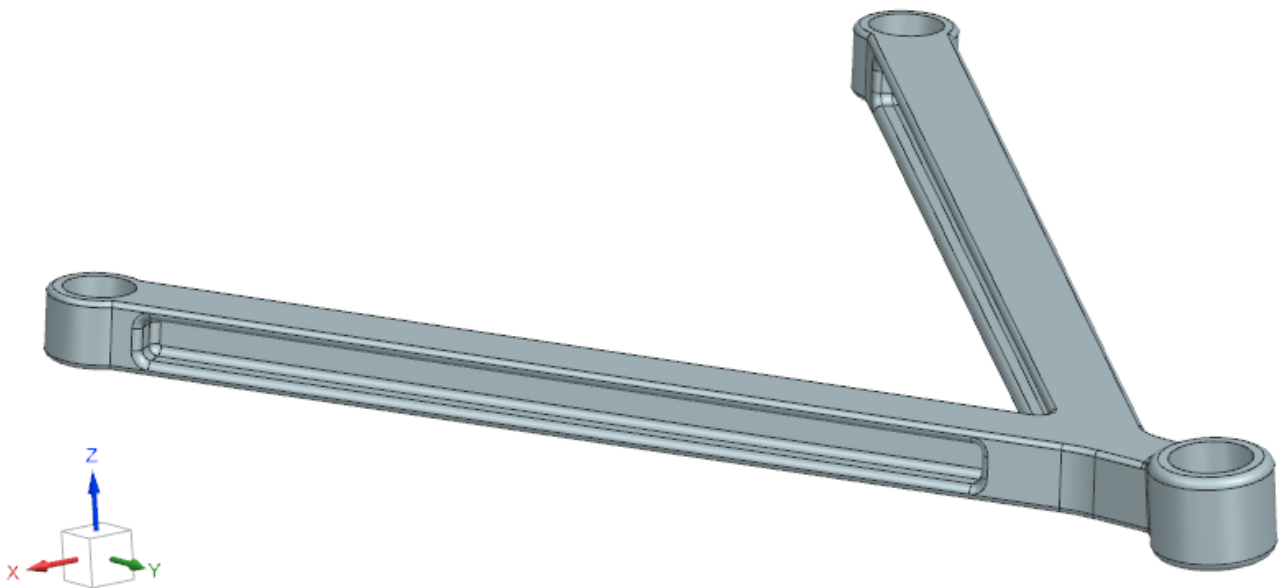


Figura 59 – Modello CAD del componente, sesta iterazione.

Con queste modifiche, il peso risulta di circa 0,080 kg maggiore del componente originale, portando il dato a 0,670 kg. Nell'ambito delle tensioni, è possibile notare che, a prescindere dal valore di picco fornito dall'analisi secondo Von Mises, lo stress maggiore è riscontrabile in direzione Y.

Come espresso dalla Figura 60, il valore massimo in termini di trazione, di 88 MPa, si registra in prossimità del punto di applicazione della sollecitazione, a causa della presenza di un raggio di raccordo e conseguentemente di un certo coefficiente di intaglio. Inoltre, è possibile notare che la linea attorno a cui si sviluppa la flessione delle travi è longitudinale rispetto alle stesse, quindi si avrà uno stato di sollecitazione a compressione che sarà maggiore andando nel verso delle X negative, con uno stress di circa 25 MPa, mentre andando nel verso delle X positive, si ha uno stato di sollecitazione a trazione della trave.

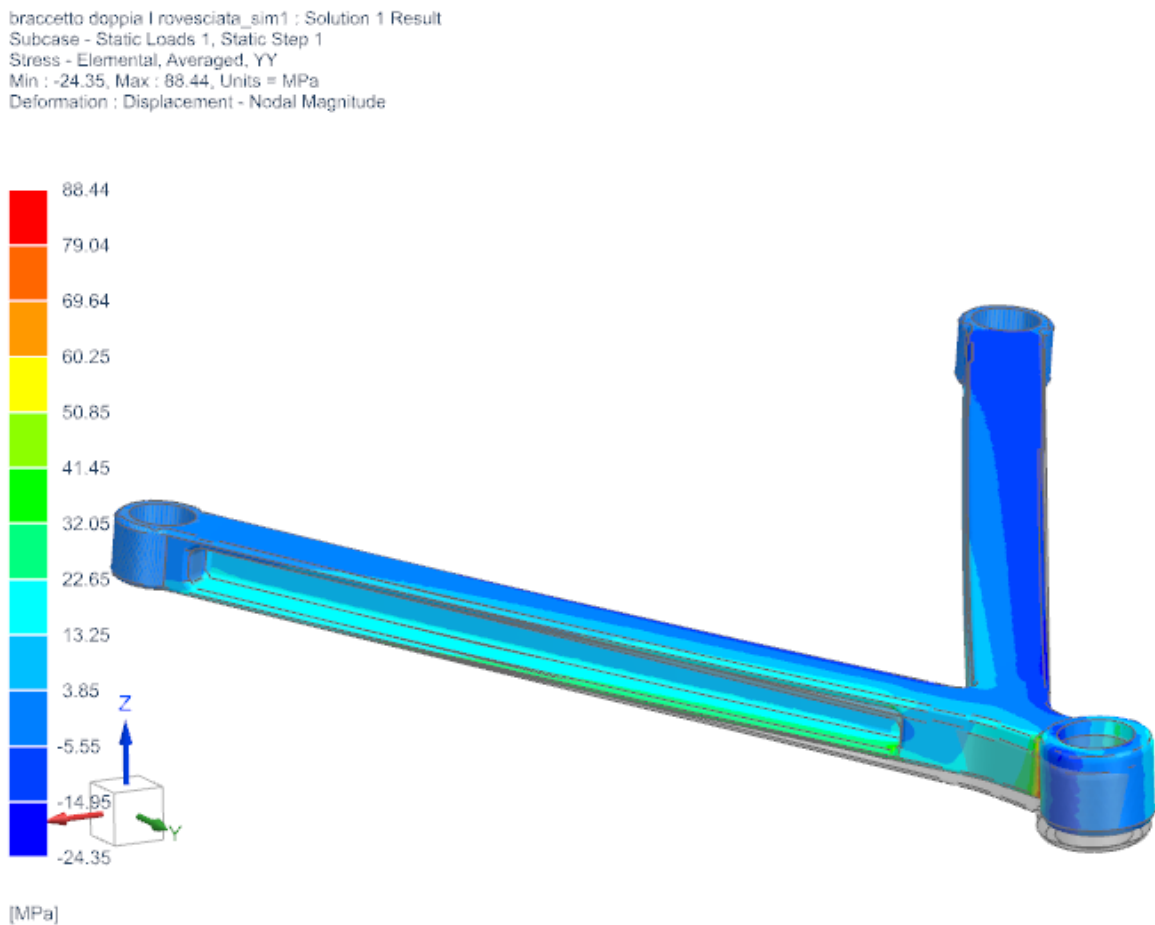


Figura 60 – Stato di sollecitazione del modello, sesta iterazione.

Di seguito, vengono riportati i risultati principali della simulazione agli elementi finiti della presente geometria, raffrontati con quelli del componente originale che, al solito, è stato sottoposto all’analogo caso di carico:

Tabella 13 - Risultati della sesta iterazione del processo di ottimizzazione.

	CASO DI CARICO 1	
	T/C 5000 N Inclinata	
	BRACCETTO H rovesciata 1	BRACCETTO ORIGINALE
VON MISES STRESS (MPA)	79,75 (T)	183,3 (T) - 184 (C)
DISP. MAGNITUDE	2,99 mm (T)	7,84 mm (T) - 7,89mm (C)
DISP. LUNGO X	0,860 mm (T)	0,7 mm (T) - 0,66 mm ©
DISP. LUNGO Y	0,62 mm (T)	1,1 mm (T) - 1,12 mm (C)
DISP. LUNGO Z	2,868 mm (T)	7,84mm (T) - 7,82 mm ©

È possibile desumere che la rigidità flessionale della struttura lungo Z sia stata molto ottimizzata, come è lecito attendersi dalla modifica alla geometria effettuata. Infatti l'anima della sezione è posizionata laddove il volume di materiale fornisce un sostanziale beneficio in termini di rigidità flessionale fuori dal piano. Il miglioramento in termini di spostamento in Z di circa il 61,8% rispetto al componente originale, e ancor di più rispetto al dato della precedente iterazione. Riguardo lo spostamento nel piano, in direzione Y il dato è diminuito di oltre un millimetro (circa 1 volta e mezzo più contenuto) rispetto al dato della precedente iterazione, mentre in direzione X il dato è peggiore di circa il 22.8%. Ciò dipende dal ridotto spessore delle due ali esterne.

braccetto doppia I rovesciata\_sim1 : Solution 1 Result  
Subcase - Static Loads 1, Static Step 1  
Displacement - Nodal, Magnitude  
Min : 0.040, Max : 2.996, Units = mm  
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude

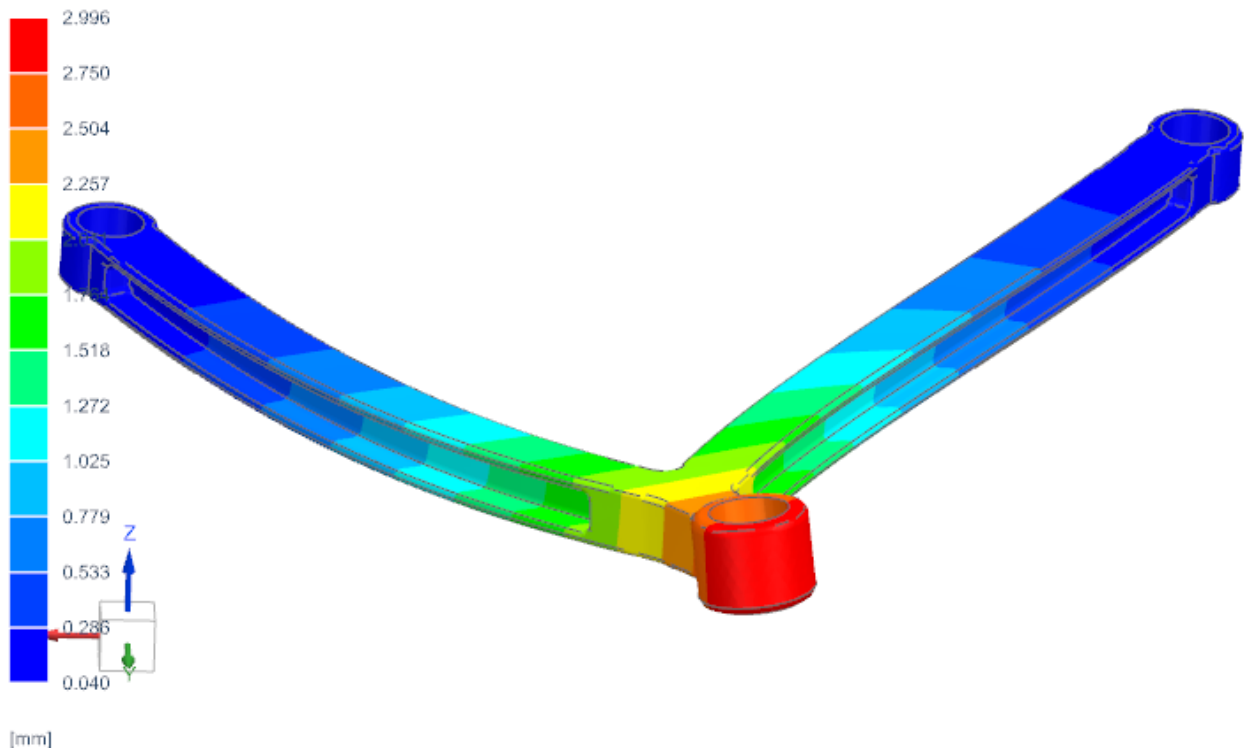


Figura 71 - Spostamento del componente (sesta iterazione)

## 6.2.2 Settima Iterazione.

In questa fase, si è provveduto a effettuare modifiche geometriche volte alla riduzione del peso. Dal momento che la rigidità lungo Z del componente è stata portata a un ottimo livello, occorre concentrarsi sulla riduzione di peso, ed occorre farlo senza andare a ledere il buon risultato raggiunto finora. Dal momento che, come si è potuto notare, il parametro maggiormente influente nel senso della miglior rigidità flessionale fuori dal piano è l'altezza dell'anima della sezione, questo parametro di processo deve rimanere quanto più costante. Per ridurre il peso, si è agito essenzialmente aumentando la profondità delle due cave, speculari e laterali, che passa da 10 a 12 mm, e ciò ha consentito un sensibile risparmio di peso.

Dopo di che, si è deciso di incidere su un secondo parametro meno influente in termini di rigidità flessionale lungo Z, ovvero l'altezza delle due "pelli" esterne, che è stata portata a 4 millimetri, rispetto ai 5 mm della precedente geometria. Riguardo il peso, il dato passa dai precedenti 0,670 kg agli attuali 0,584, ponendo di fatto il braccetto in una condizione di ottimizzazione rispetto al componente originale. Di seguito vengono riportati i risultati dell'iterazione corrente:

Tabella 14 - Risultati della settima iterazione.

	CASO DI CARICO 1	
	BRACCETTO H rovesciata 2	T/C 5000 N Inclinata
VON MISES STRESS (MPa)	74,52 (T)	183,3 (T) - 184 (C)
DISP. MAGNITUDE	3,23 mm (T)	7,84 mm (T) - 7,89mm (C)
DISP. LUNGO X	0,967 mm (T)	0,7 mm (T) - 0,66 mm ©
DISP. LUNGO Y	0,677 mm (T)	1,1 mm (T) - 1,12 mm (C)
DISP. LUNGO Z	3,083 mm (T)	7,84mm (T) - 7,82 mm ©

Come auspicabile conseguenza delle modifiche sulla geometria effettuate, si può notare un lieve peggioramento (Figura 62), di circa l'8%, rispetto al precedente modello in termini di rigidità flessionale in direzione Z, stante il minor volume di materiale lontano dall'asse neutro di flessione, ma il margine rispetto al componente originale è maggiore del doppio. La rigidità lungo X, in relazione alla diminuzione dello spessore delle pelli esterne, è peggiore di circa il 38% rispetto al componente originale, ed è diminuita del 5% rispetto al modello precedente. Lo spostamento lungo Y, infine, segue un andamento positivo paragonabile a ciò che si osserva in direzione Z. Lo stress è giocoforza più basso rispetto al componente originale, essendo la sezione resistente più alta.



braccetto H rovesciata 2\_sim1 : Solution 1 Result  
Subcase - Static Loads 1, Static Step 1  
Displacement - Nodal, Magnitude  
Min : 0.049, Max : 3.231, Units = mm  
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude

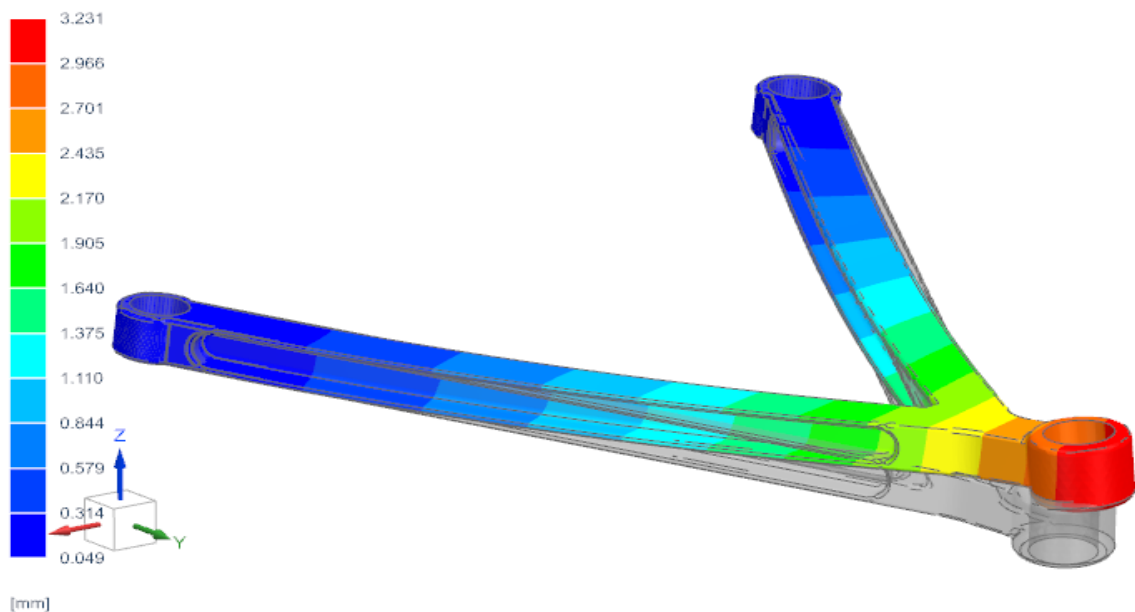


Figura 62 – Spostamento del componente (settima iterazione)

In termini tensionali, dall'analisi del risultato, è possibile osservare un livello di stress preponderante in direzione Y (Figura 63). Si osserva che la flessione della struttura dà luogo a uno stato di sollecitazione a compressione crescente andando verso valori negativi di X, fino a un massimo di 27.67 MPa. Lo stato di sollecitazione a trazione, di converso, cresce andando verso valori positivi dell'asse X, con un'evidente, maggiore sforzo di trazione per l'asta più corta. La sollecitazione a trazione cresce procedendo dai punti di ancoraggio a telaio fino alla regione prossima al punto di applicazione del carico.

braccetto H rovesciata 2\_sim1 : Solution 1 Result  
Subcase - Static Loads 1, Static Step 1  
Stress - Elemental, Averaged, YY  
Min : -27.67, Max : 89.22, Units = MPa  
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude

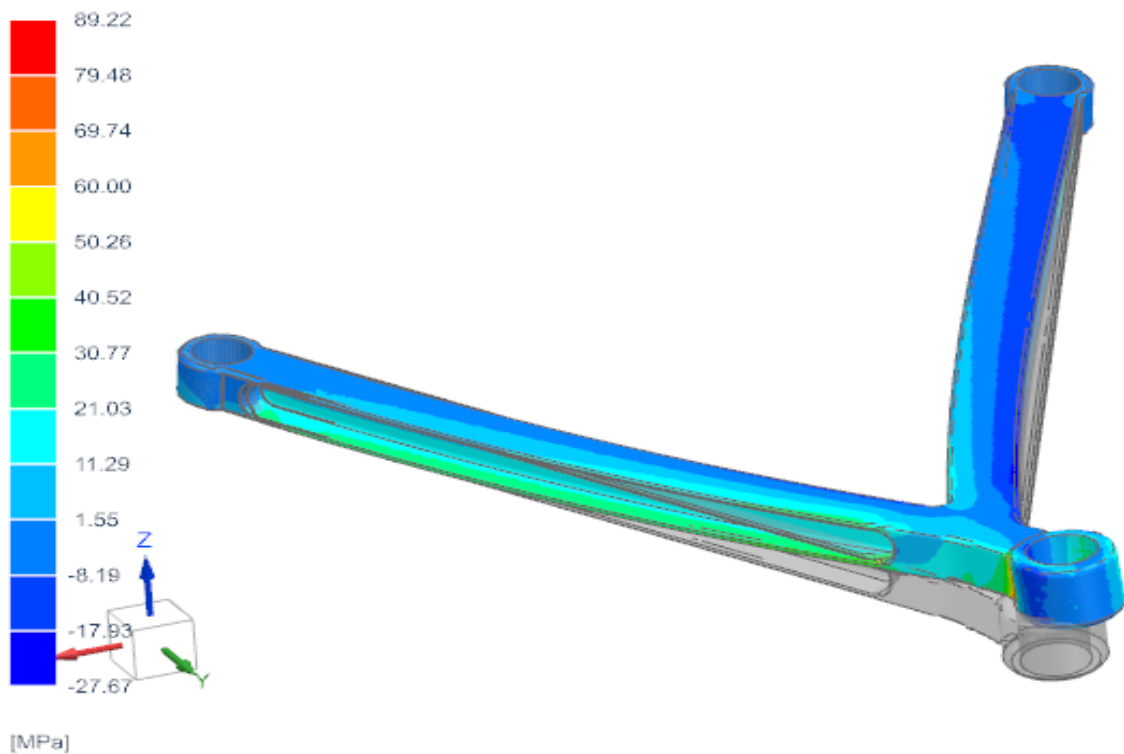


Figura 63 – Stato di sollecitazione del componente (settima iterazione)

### 6.2.3 Nona Iterazione del processo di ottimizzazione.

Anche questo, ultimo, passaggio della seconda fase del processo iterativo di ottimizzazione del componente è fondamentalmente incentrato sulla riduzione della massa, andando a limare peso laddove esso non procuri benefici in termini di rigidità flessionale lungo Z, che è l'aspetto più critico. La profondità delle cave è stata aumentata di 1 mm, le altre specifiche dimensionali sono rimaste invariate. Infatti risulta sconsigliato rendere più sottili le due pelli esterne, sia per questioni tecnologiche, che per questioni di rigidità flessionale nel piano.

Con queste modifiche alla geometria, il peso è passato dai 0,570 kg del modello precedente, ai 0,540 kg del presente.

braccetto H rovesciata 3\_sim1 : Solution 1 Result  
Subcase - Static Loads 1, Static Step 1  
Displacement - Nodal, Magnitude  
Min : 0.051, Max : 3.446, Units = mm  
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude

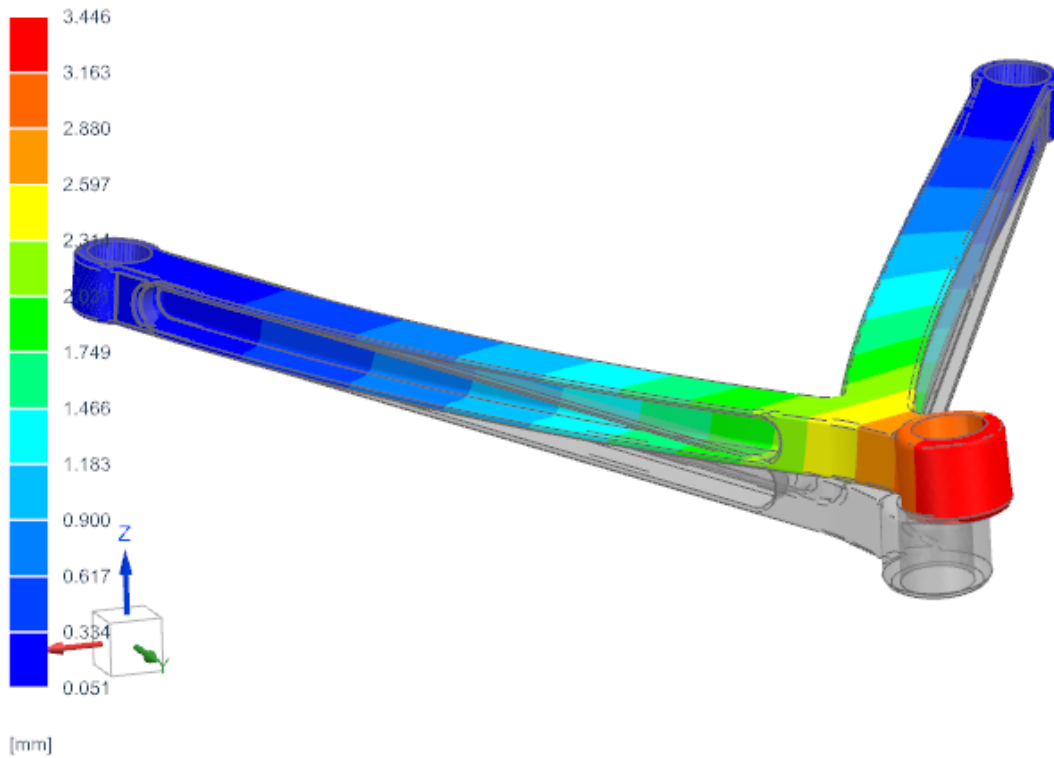


Figura 64 – Spostamento del componente (nona iterazione)

Mantenendo invariata l'altezza dell'anima, che governa la rigidezza in Z, non si sono verificati peggioramenti in tal senso. Per quanto riguarda la rigidezza nel piano x-y, dal momento che le geometrie che la governano non hanno subito modifiche di rilievo, il suo valore è rimasto pressoché invariato. Di seguito viene riportato il risultato in termini di stress, mediato nella direzione preponderante di sollecitazione, ovvero Y:

braccetto H rovesciata 3\_sim1 : Solution 1 Result  
Subcase - Static Loads 1, Static Step 1  
Stress - Elemental, Averaged, YY  
Min : -27.28, Max : 91.03, Units = MPa  
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude

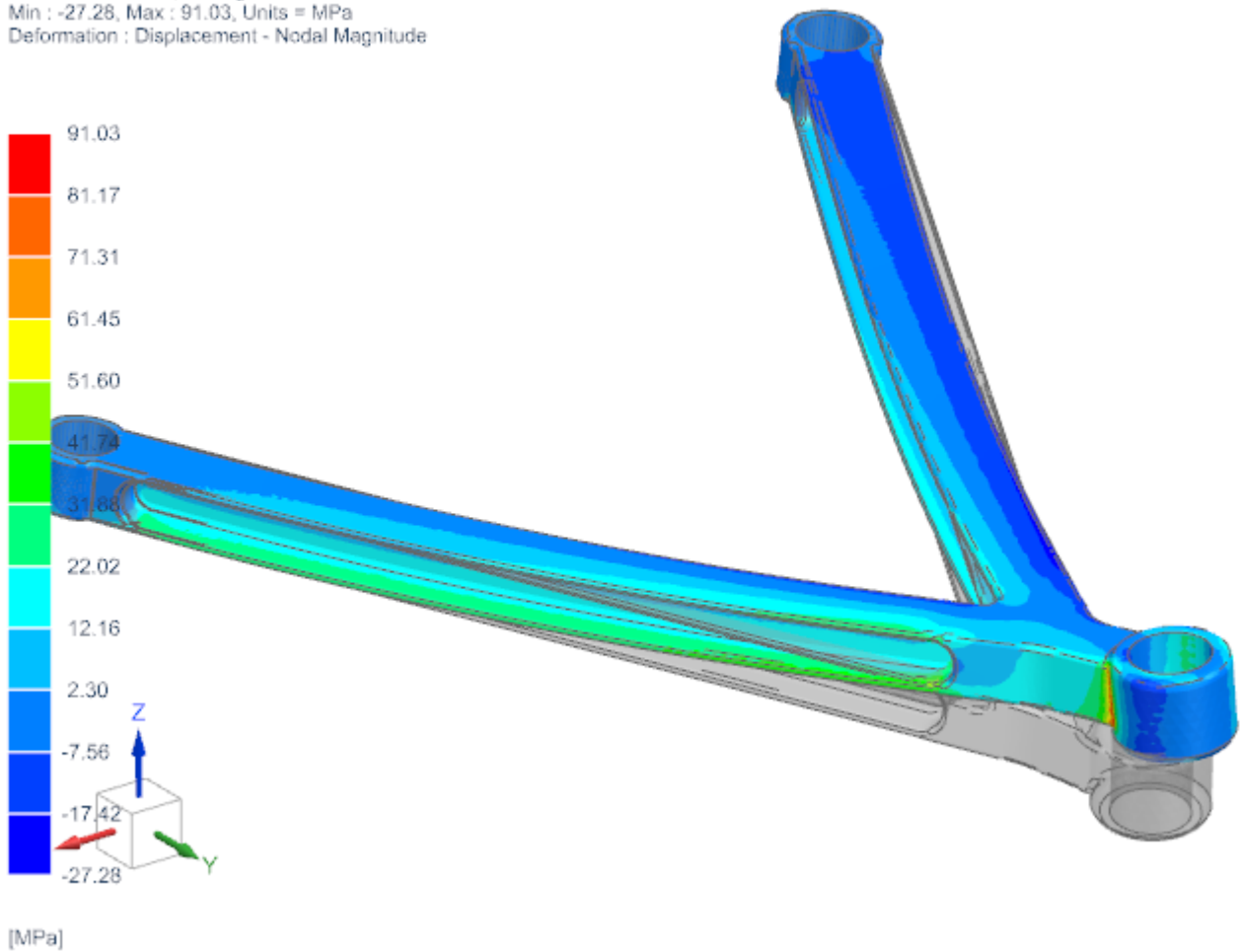


Figura 65 – Stato di sollecitazione del componente (nona iterazione)

Come mostrato in Figura 64-65, lo stato tensionale ha un andamento simile a quello della precedente iterazione. Difatti, per ognuna delle due travi si osserva uno stato di compressione di circa 27 MPa procedendo nella direzione dei valori di X negativi, mentre spostandosi a partire dall'asse neutro nel verso opposto si nota, al solito per questo tipo di sezione, un crescente stato di sollecitazione a trazione. Lo stato di sollecitazione a trazione presenta valori maggiori in modulo, nell'ordine dei 45 MPa, nella trave più corta. Giunti al termine di questa seconda fase del processo di ottimizzazione, è stata svolta un'analisi completa di tutti i casi di carico, così da controllare se si fosse ottenuta una convergenza di tutti gli output di processo. Di seguito, è riportato un riepilogo con i risultati:

Tabella 15 - Confronto fra le prestazioni del componente ridisegnato e l'originale – I caso di carico.

	CASO DI CARICO 1 T/C 5000 N Inclinata			
	Braccetto H rovesciata 3		BRACCETTO ORIGINALE	
	Trazione	Compressione	Trazione	Compressione
VON MISES STRESS (MPa)	80,71	62,9	183,3	184
DISP. MAGNITUDE (mm)	3,44	3,4	7,5	7,89
DISP. LUNGO X (mm)	1,024	0,97	0,7	0,66
DISP. LUNGO Y (mm)	0,719	0,714	1,1	1,12
DISP. LUNGO Z	3,23	3,27	7,38	7,8

Per quanto concerne il primo caso di carico, il miglioramento in termini di stress massimo, sia in caso di trazione che in compressione, è dovuto alla maggior sezione resistente del modello ottimizzato. Grazie alla migliore rigidità flessionale lungo Z, data dalla sezione assialsimmetrica e dallo sviluppo in altezza dell'anima, lo spostamento risulta minore di quello del componente originale del 56,2% e del 58%, rispettivamente in caso di trazione e di compressione. Dal momento che lo spostamento preponderante è in tale direzione, questa tendenza appena descritta è evidente anche nel dato della "Magnitude". Si osserva tuttavia che il componente originale, in termini di rigidità a flessione nel piano, risulta migliore di quello appena realizzato. Ciò è dovuto al fatto che per necessità di riduzione del peso gli spessori delle due pelli esterne, superiore ed inferiore, sono ridotti a 4 mm. In generale, si può ravvisare anche nell'analisi degli altri 3 casi di carico una minore rigidità a flessione nel piano x-y:

Tabella 16 - Confronto fra le prestazioni del componente ridisegnato e l'originale – Il caso di carico.

CASO DI CARICO 2 Torsione 15000Nmm		
Braccetto H rovesciata 3	BRACCETTO ORIGINALE	VARIAZIONE %
13,41	22,34	-0,399731423
0,183	0,27	-0,322222222
0,152	0,063	1,412698413
0,085	0,055	0,545454545
0,111	0,26	-0,573076923

Tabella 17 - Confronto fra le prestazioni del componente ridisegnato e l'originale – III caso di carico.

		CASO DI CARICO 3		T/C Pura 5000 N	
		Braccetto H rovesciata 3		BRACCETTO ORIGINALE	
		Trazione	Compressione	Trazione	Compressione
VON MISES STRESS (MPa)		48,49	24,45	98,77	44,6
DISP. MAGNITUDE		0,665	0,769	1,12	1,11
DISP. LUNGO X		0,195	0,21	0,068	0,068
DISP. LUNGO Y		0,259	0,251	0,079	0,067
DISP. LUNGO Z		0,59	0,715	1,125	1,11

Tabella 18 - Confronto fra le prestazioni del componente ridisegnato e l'originale – I caso di carico.

CASO DI CARICO 4		Flessione 90° 3000 N	
Braccetto H rovesciata 3	BRACCETTO ORIGINALE	VARIAZIONE %	
85,96	642	-0,866105919	
5,827	29,9	-0,805117057	
1,13	2,48	-0,544354839	
1,13	4,05	-0,720987654	
5,61	29,68	-0,810983827	

## 6.2.4 Riepilogo dei risultati ottenuti.

Arrivati a questo punto del processo di ottimizzazione, finalizzato al cambiamento di materiale e incentrato sul raggiungimento delle stesse prestazioni del componente originale a parità di condizioni di carico, è possibile riassumere i risultati finora raggiunti, per ogni iterazione e nei loro contributi più salienti, mediante degli opportuni grafici, così da evidenziare in modo chiaro quali siano stati i risultati positivi conseguiti, e dove vi è ancora margine di miglioramento.

Partendo dall'analisi del peso del componente (Figura 66), parametro essenziale del processo di ottimizzazione in atto, è possibile notare che, nelle varie iterazioni che si sono susseguite il dato è rimasto molto aderente al target, ciò perché il volume è stato tenuto costantemente sotto controllo, curandosi di apportare materiale, nelle varie azioni sulla geometria, solo nelle direzioni di maggior sollecitazione.

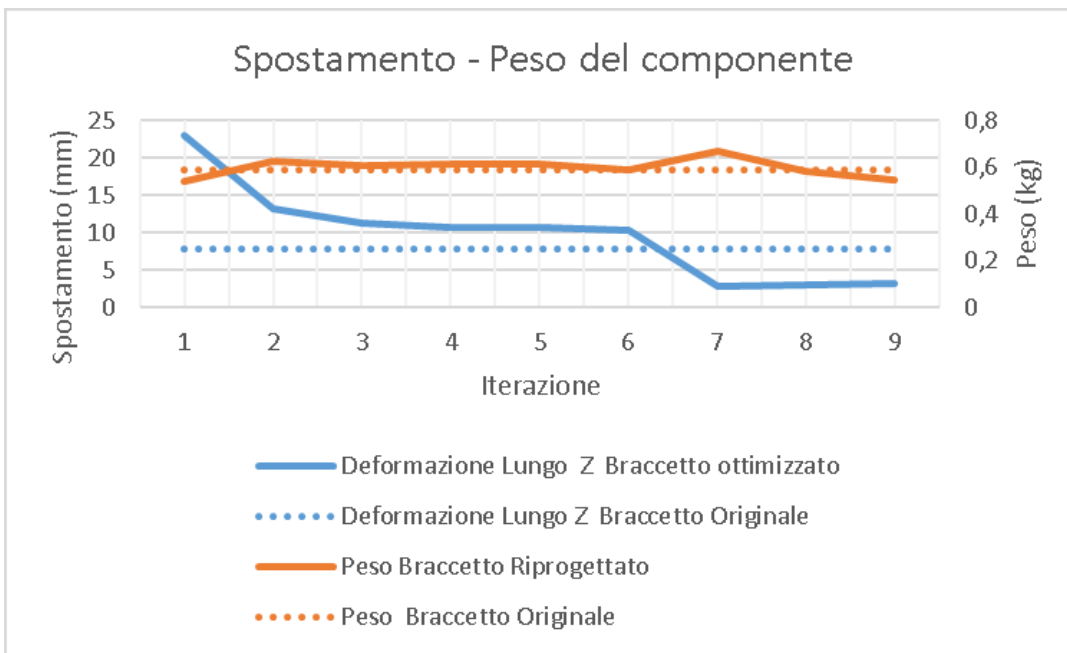


Figura 66 - Andamento del peso e dello spostamento nelle iterazioni successive, confronto br. originale. – br. ottimizzato

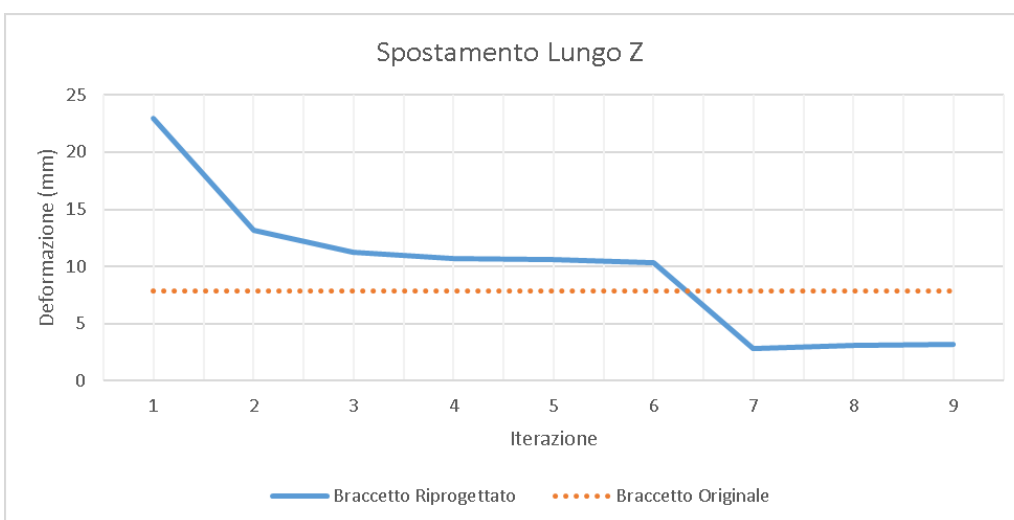


Figura 67 - Andamento dello spostamento lungo Z nelle iterazioni successive, confronto br. originale. – br. ottimizzato

Riguardo il parametro oggetto di maggior interesse, lo spostamento lungo Z, dalla Figura 67 è possibile evidenziare che le azioni intraprese nel cambiamento di sezione a partire dalla sesta iterazione, hanno permesso di raggiungere ottimi risultati in termini di rigidezza flessionale lungo Z, dando un buon margine rispetto al componente originale. In generale, dal grafico dello spostamento lungo Z è ben visibile come l'aumento progressivo dell'altezza di estrusione abbia portato sostanziali e costanti miglioramenti. Nel passaggio dalla prima alla seconda iterazione si è migliorati di circa il 50%, mentre nelle successive, ovvero dalla seconda alla sesta, l'incremento della rigidezza lungo Z è stato molto più contenuto.

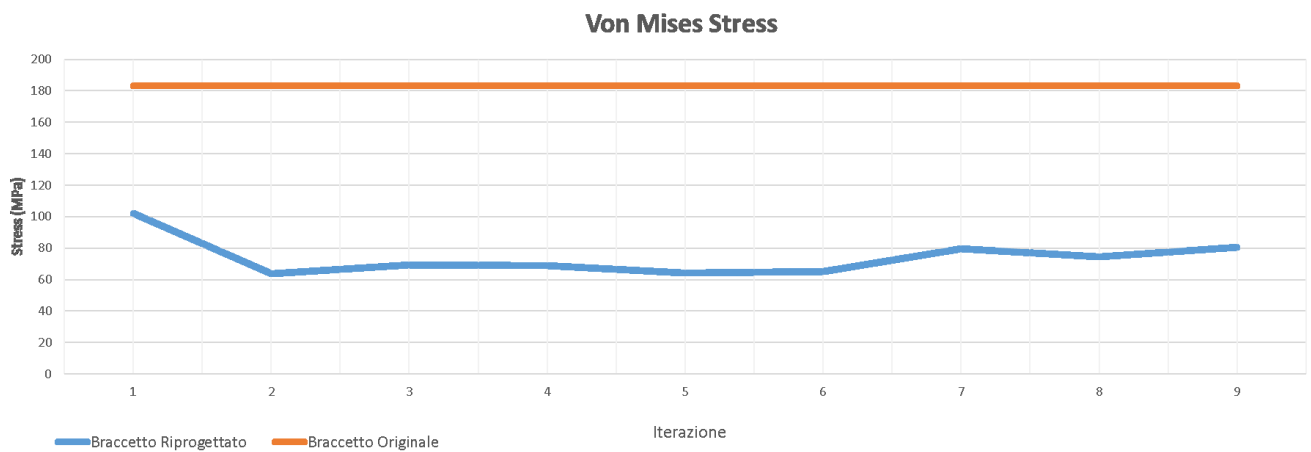


Figura 68 - Andamento dello stato tensionale nelle iterazioni successive, confronto br. originale. – br. ottimizzato

Riguardo lo stato tensionale, esso si è mantenuto sempre nell'intorno dei 90-100 MPa nei valori massimi per non superare il limite tecnologico del materiale. Questo obiettivo è stato raggiunto mantenendo quanto più costante possibile la sezione resistente.



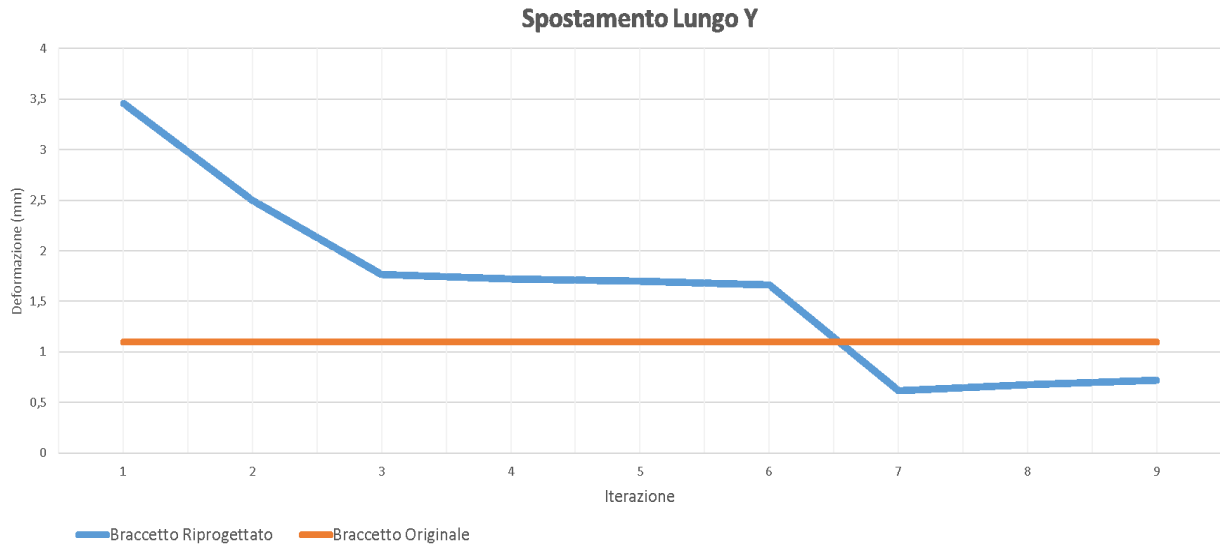


Figura 69 - Andamento dello spostamento lungo Y nelle iterazioni successive, confronto br. originale. – br. ottimizzato

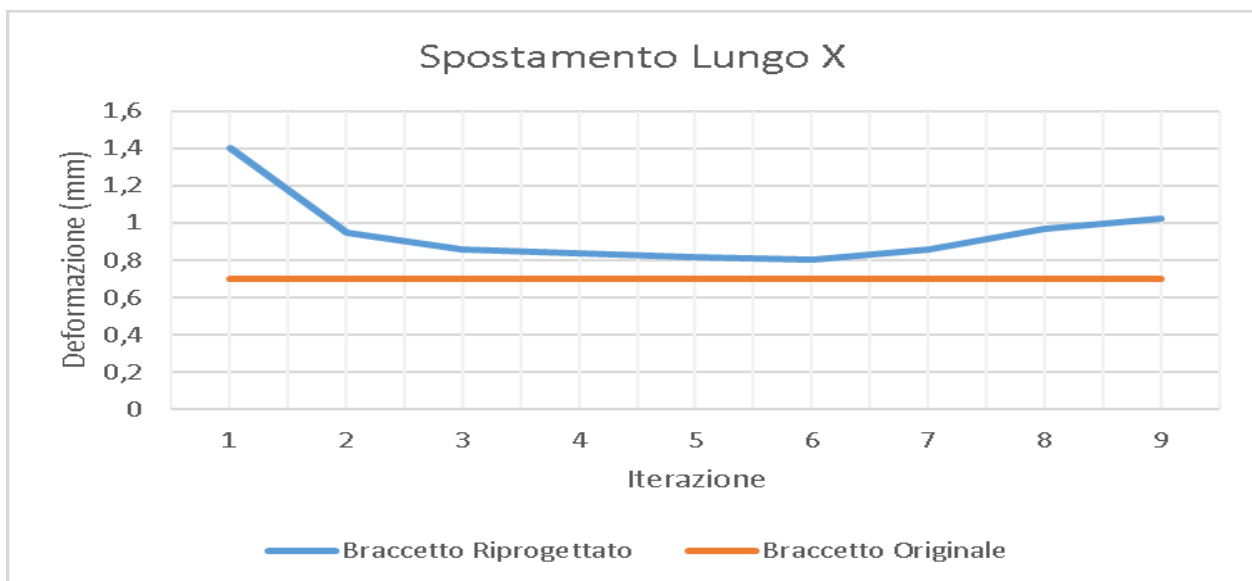


Figura 70 - Andamento dello spostamento lungo X nelle iterazioni successive, confronto br. originale. – br. ottimizzato

L'andamento delle rigidezze flessionali nel piano x-y (espresso dalle Figure 69-70) risulta simile nelle due direzioni fino alla sesta iterazione del processo, ossia finché si è mantenuta una sezione ad H sviluppata in larghezza, e snella. È possibile notare un forte decremento dello spostamento lungo X e Y del braccetto nel passaggio dalla prima alla seconda iterazione.

Questo è dovuto al fatto che, agendo solo su un parametro di processo (l'altezza di estrusione), senza variare la profondità delle cave e quindi la sezione resistente, si è conseguito un incremento di rigidità flessionale "paritario", quantomeno in termini percentuali, sia nel piano che normalmente ad esso. Sempre nel caso della rigidità nel piano x-y, è possibile notare che dopo un primo, sostanziale miglioramento, nel passaggio dalla prima alla seconda iterazione, le successive iterazioni con la prima sezione ad H adottata non abbiano portato significativi miglioramenti. Il motivo di questa tendenza è che la struttura, così realizzata, risulta eccessivamente snella, e ciò è critico in termini di instabilità a compressione. Si è quindi deciso che tale sezione non potesse essere mantenuta, ma è stata "ribaltata" nella seconda fase, per i motivi di cui si è discusso precedentemente. A partire dall'inizio della seconda fase del processo, in occasione del cambiamento forma alla sezione, si nota una divergenza tra le due rigidità flessionali nel piano, se infatti lo spostamento in Y diminuisce sensibilmente, perlomeno nel primo caso di carico, quello in X peggiora gradualmente proseguendo l'iter, e rimane costantemente fuori target. Questa tendenza negativa è stata confermata svolgendo un'analisi agli elementi finiti anche per i restanti casi di carico ipotizzati.

## 6.3 Terza Fase del Processo di ottimizzazione.

Dall'analisi del modello appena realizzato, è possibile ravvisare ed analizzare delle criticità. Dal punto di vista puramente meccanico, questa geometria risulta estremamente performante in termini di rigidità fuori dal piano, perché tutta l'ottimizzazione fatta sinora è stata volta ad ottenere un miglioramento in tal senso. Ma la rigidità nel piano è peggiorata. Questo è dovuto in parte al fatto che lo spessore delle ali è stato ridotto eccessivamente, ed in parte al fatto che in caso di flessione in x-y, si avrà molto volume prossimo al piano di flessione, che coincide con l'anima centrale. In termini pratici, si sono ravvisate nel piano le stesse criticità flessionali che la prima geometria "ad H allungata" manifestava in Z, quindi il problema della rigidità non è stato risolto, ma solamente "spostato" lungo X.

In questa regione di spazio, il materiale quando viene sollecitato in trazione o compressione, lavora in pura flessione. Inoltre, dal punto di vista del processo tecnologico, uno spessore così ridotto per le ali è difficilmente realizzabile in sede di stampaggio a compressione. E, sempre nell'ottica del processo, una struttura a sezione "IPE" come quella realizzata, con le cave rivolte lateralmente rispetto allo stampo, crea enormi problemi in sede di estrazione. Un altro aspetto critico è dato dalla presenza di sottosquadri. In definitiva, una simile geometria, che è stata ottimizzata in peso e in termini di rigidità flessionale fuori dal piano, sarebbe più adatta a una realizzazione metallica, piuttosto che a un manufatto in composito.

### 6.3.1 Decima Iterazione.

Avendo compreso, validato i risultati appena ottenuti, è stato quindi deciso di tornare ad una geometria ad H, che risulta essere meglio stampabile. Tuttavia, rispetto alla sezione ad H del primo tentativo, si è sfruttata l'esperienza pregressa e gli errori di valutazione fatti per fare in modo che fosse meno snella in direzione Z, per evitare problemi di instabilità elastica a compressione. È stata infatti mantenuta l'impostazione della sezione "assialsimmetrica" del caso precedente, in virtù della sua compattezza, ed è stata pensata un'ottimizzazione della risposta alle sollecitazioni più organica e uniforme, meno focalizzata sulla rigidità fuori dal piano. L'obiettivo è perdere qualcosa in termini di spostamento in Z, ottenendo al contempo miglioramenti in tutte le altre direzioni, così da arrivare a un ottimo compromesso che conducesse il modello a convergenza completa rispetto alle prestazioni del componente originale, imposto come target. In Figura 71 a pagina seguente è riportato il modello CAD della presente iterazione:

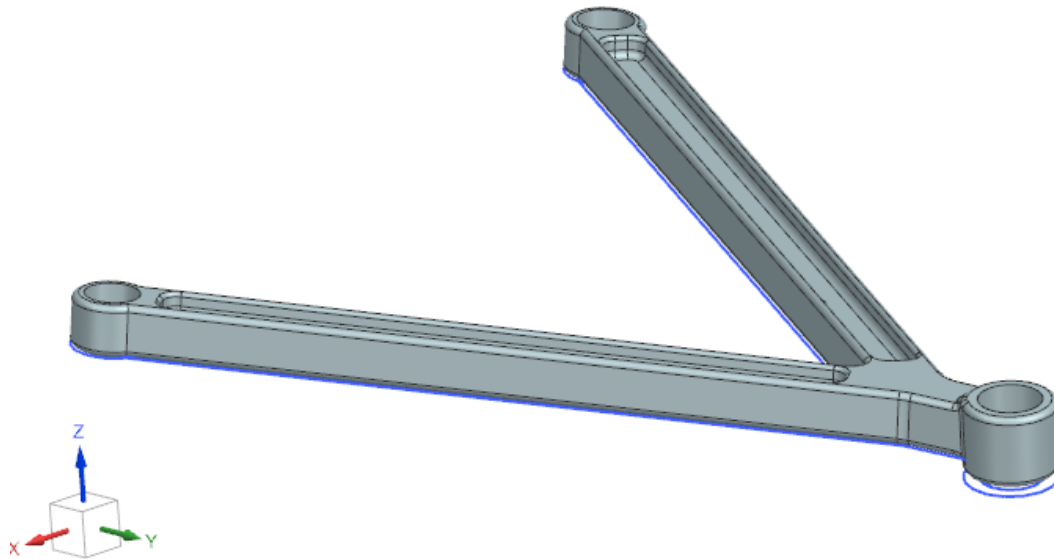


Figura 71 – Modello CAD per la decima Iterazione.

La sezione delle travi presenta una larghezza di 30 mm, e una profondità di estrusione di 25 mm. Le cave sono profonde 10mm e larghe 20 mm, le due ali esterne sono spesse 5 mm. In questo modo, il processo di stampaggio risulta facilitato. Inoltre, sarà possibile migliorare ulteriormente in tal senso modificando i raggi di raccordo, rendendo la geometria più prossima ad una X, e questo permette un miglior flusso del materiale nelle cave in sede di stampaggio a compressione. Ma una simile operazione prevede di fornire benefici anche in termini di proprietà meccaniche, visto che la sezione resistente incrementerebbe. In Tabella 21 vengono riportati i risultati, relativi allo stesso caso di carico a cui erano stati posti i modelli ottenuti nelle precedenti iterazioni:

Tabella 21 - Risultati della analisi FEM per la decima iterazione

		Compressione Y (5000 N)		
		Braccetto H 1	BRACCETTO ORIGINALE	%
VON MISES STRESS (MPa)		49,51	173,77	-71,5083
DISP. MAGNITUDE (mm)		5,499	7,853	-29,9758
DISP. LUNGO X (mm)		0,616	0,581	6,024096
DISP. LUNGO Y (mm)		0,824	0,968	-14,876
DISP. LUNGO Z (mm)		5,478	7,807	-29,8322

Come era lecito attendersi, il dato relativo alla rigidezza lungo Z è peggiorato, di circa il 59,6% rispetto al dato, eccessivamente basso, della precedente iterazione, ed è più vicino al valore del componente originale e migliore rispetto ad esso del 30%. Ciò è dovuto al fatto che rispetto a prima si ha maggior volume in prossimità dell'asse neutro di flessione lungo Z. Lo spostamento lungo Y è inferiore del 14,8% rispetto al componente originale. Mentre il miglioramento che più si attendeva, è stata l'aumento di rigidezza flessionale lungo X, che nel precedente passaggio dell'iterazione era peggiore di circa il 45% rispetto al dato del componente originale, mentre ora si è ottenuto una riduzione del gap di soli 6 punti percentuali. Segno di una miglior rigidezza flessionale lungo X ottenuta, come era lecito attendersi in virtù delle modifiche impresse, il cui obiettivo era esattamente questo. In Figura 72-73, sono riportati i risultati dell'analisi FEM sul modello realizzato, termini di stress e di spostamento:

braccetto H 1\_sim1 : Solution 1 Result  
 Subcase - Static Loads 1, Static Step 1  
 Displacement - Nodal, Magnitude  
 Min : 0.015, Max : 5.499, Units = mm  
 Deformation : Displacement - Nodal Magnitude

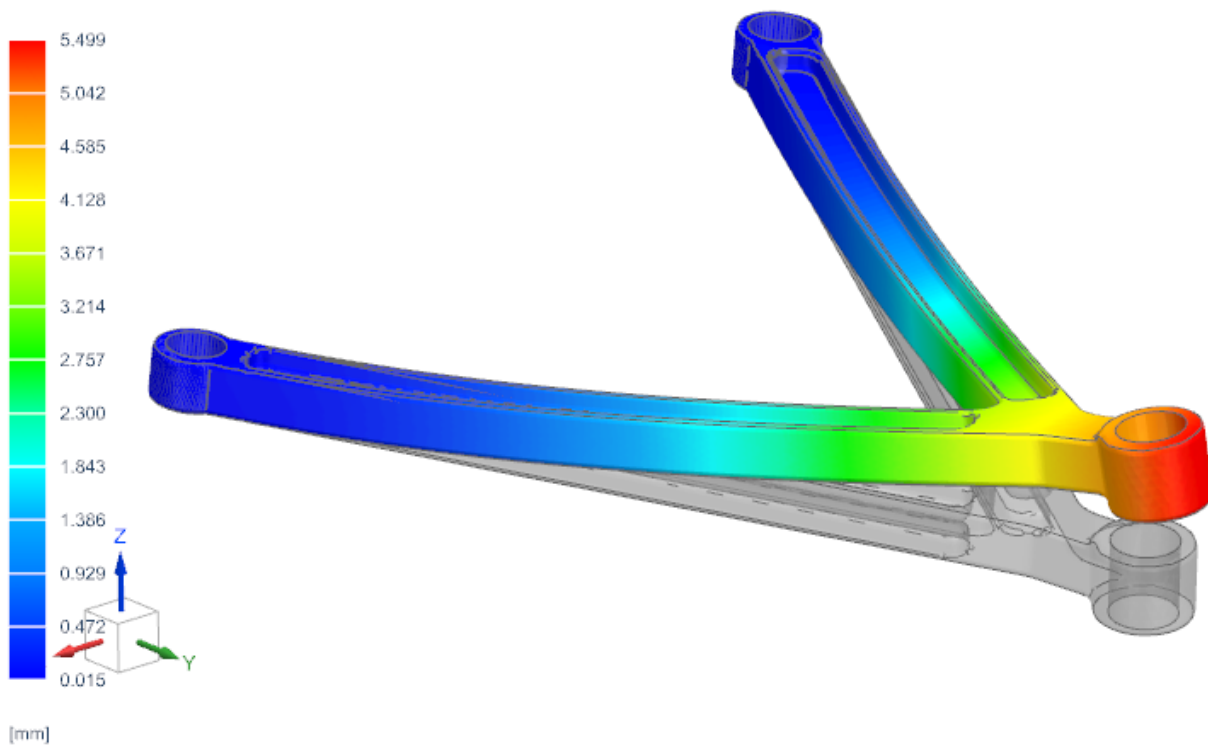


Figura 72 – Stato di sollecitazione e di spostamento del modello realizzato per la decima iterazione.

braccetto H 1\_sim1 : Solution 1 Result  
Subcase - Static Loads 1, Static Step 1  
Stress - Elemental, Von-Mises  
Min : 0.19, Max : 48.50, Units = MPa  
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude

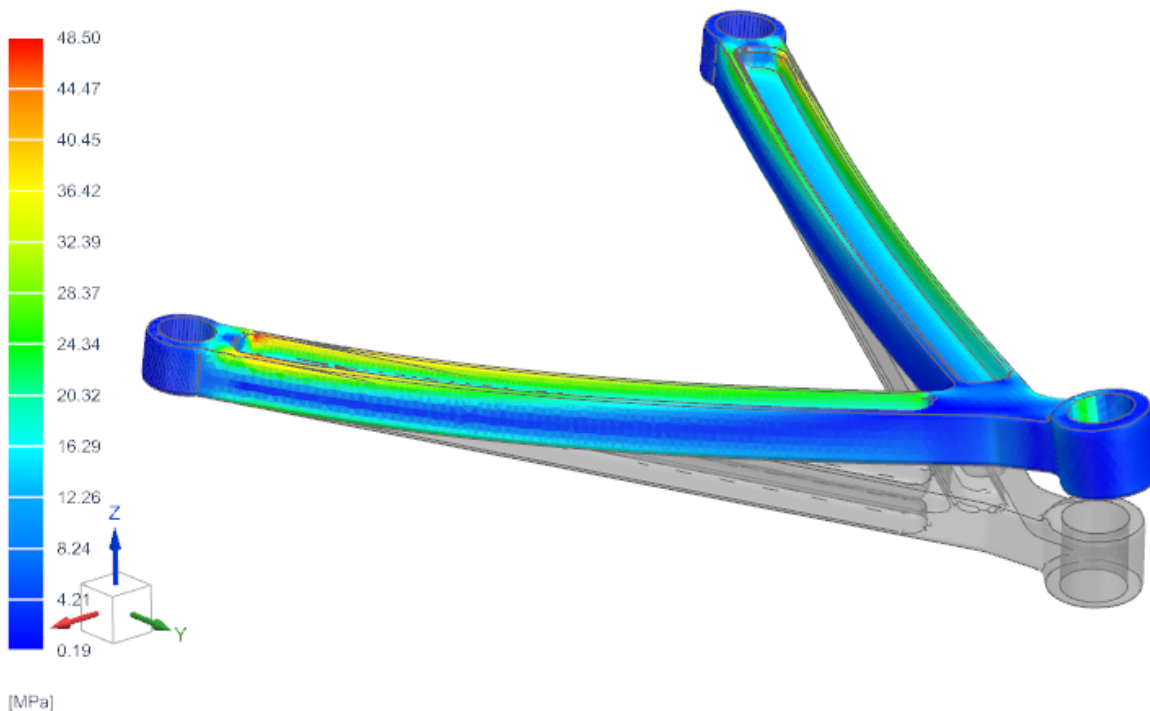


Figura 73 – Stato di sollecitazione e di spostamento del modello realizzato per la decima iterazione.

Anche in tal caso occorre sottolineare che il maggiore stato di sollecitazione si realizza in direzione Y, e dall'analisi dello stesso (Figura 74) è possibile osservare che il moto flessionale in Z origina uno stato di compressione, maggiore all'aumentare del valore di Z a partire dal piano di flessione, e ovviamente uno stato di trazione nel verso opposto. Tuttavia, i problemi che aveva manifestato la prima geometria con sezione ad H impiegata, ovvero l'instabilità elastica e la scarsa rigidità in direzione Z, in questo caso non si sono palesati, poiché con le modifiche apportate la struttura non risulta eccessivamente snella.

braccetto H 1\_sim1 : Solution 1 Result  
Subcase - Static Loads 1, Static Step 1  
Stress - Elemental, YY  
Min : -40.23, Max : 27.67, Units = MPa  
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude

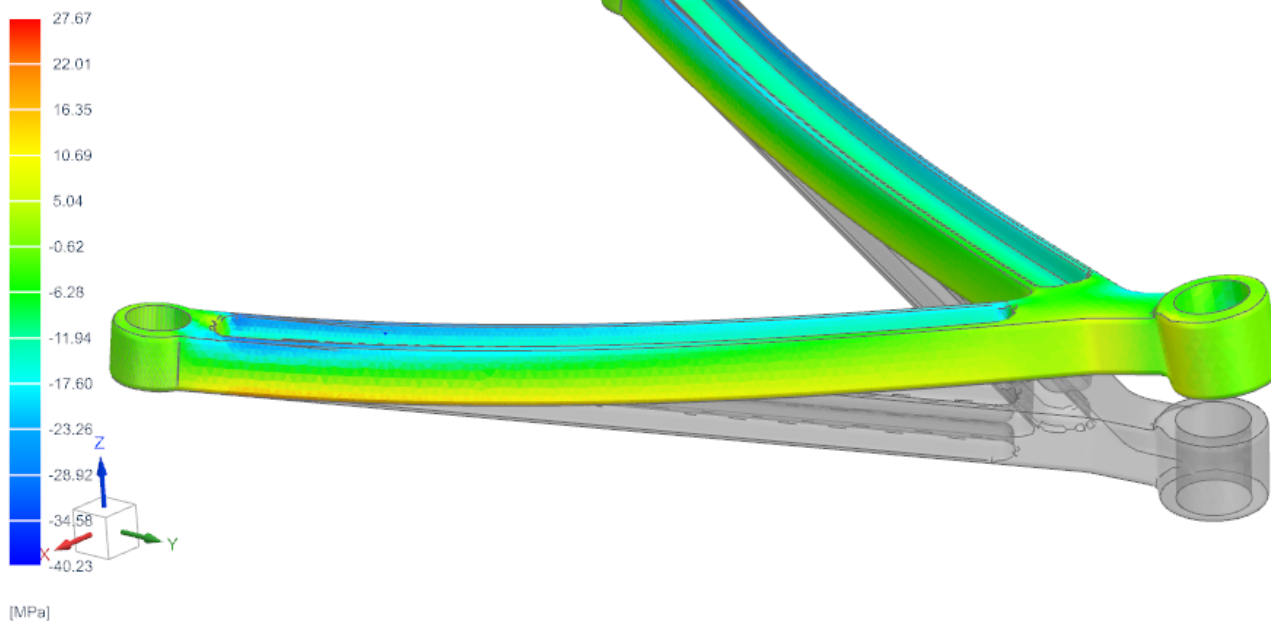


Figura 74 – Stato di sollecitazione lungo Y del modello realizzato per la decima iterazione.

## 6.3.2 Undicesima Iterazione.

Le modifiche apportate alla geometria nella precedente iterazione hanno permesso di raggiungere risultati molto importanti nell'ottica dell'ottimizzazione. Si è quindi corretta l'eccessiva rigidità fuori dal piano, ed ottenuto un compromesso ideale fra questa e la rigidità flessionale lungo X. La nuova geometria "lavora" correttamente a prescindere da quale sia la direzione di maggior sollecitazione ricevuta, come sarebbe lecito attendersi da un componente simile. Infatti, il piano di flessione della struttura varia al variare della direzione di sollecitazione, ed in questo caso c'è sufficiente volume di materiale lontano dall'asse neutro sia che la sollecitazione provenga dalla direzione X, che dalla direzione Y o da Z, riuscendo così ad ottenere una buona rigidità in ogni caso.

Ora, il passaggio iterativo presente è volto alla riduzione del peso, affinché con piccoli e mirati interventi sulla sezione resistente si possa portare a convergenza anche questo parametro di analisi, che attualmente sfiora di parecchio il dato “target”. Il tutto, ovviamente, senza peggiorare i buonissimi risultati ottenuti, ma mantenendoli al massimo entro un intorno del 20% in senso migliorativo o peggiorativo. L’unica modifica di rilievo che è stata fatta è stata quella di incrementare la profondità delle cave da 10 a 12mm, mantenendo costanti tutti gli altri parametri. In Tabella 22 sono riportati i risultati dell’analisi:

Tabella 22 - Risultati della analisi FEM per la undicesima iterazione.

		Compressione Y (5000 N)		
		Braccetto H 2	BRACCETTO ORIGINALE	%
VON MISES STRESS (MPA)		59,28	173,77	-65,8859412
DISP. MAGNITUDE (mm)		7,409	7,853	-5,65389023
DISP. LUNGO X (mm)		0,7	0,581	20,48192771
DISP. LUNGO Y (mm)		1,098	0,968	13,42975207
DISP. LUNGO Z (mm)		7,384	7,807	-5,41821442

Come prevedibile, l’intervento eseguito ha peggiorato la rigidità flessionale in tutte le direzioni. Nella fattispecie, la rigidità lungo Z, dove c’era il maggior margine, è peggiorata del 25,2% rispetto alla precedente iterazione, ma rimane comunque migliore del 5.41% rispetto al componente originale: si può dunque dire che questo parametro sia stato ottimizzato. (Figura 75)



braccetto H 2\_sim1 : Solution 1 Result  
Subcase - Static Loads 1, Static Step 1  
Displacement - Nodal, Magnitude  
Min : 0.015, Max : 7.409, Units = mm  
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude

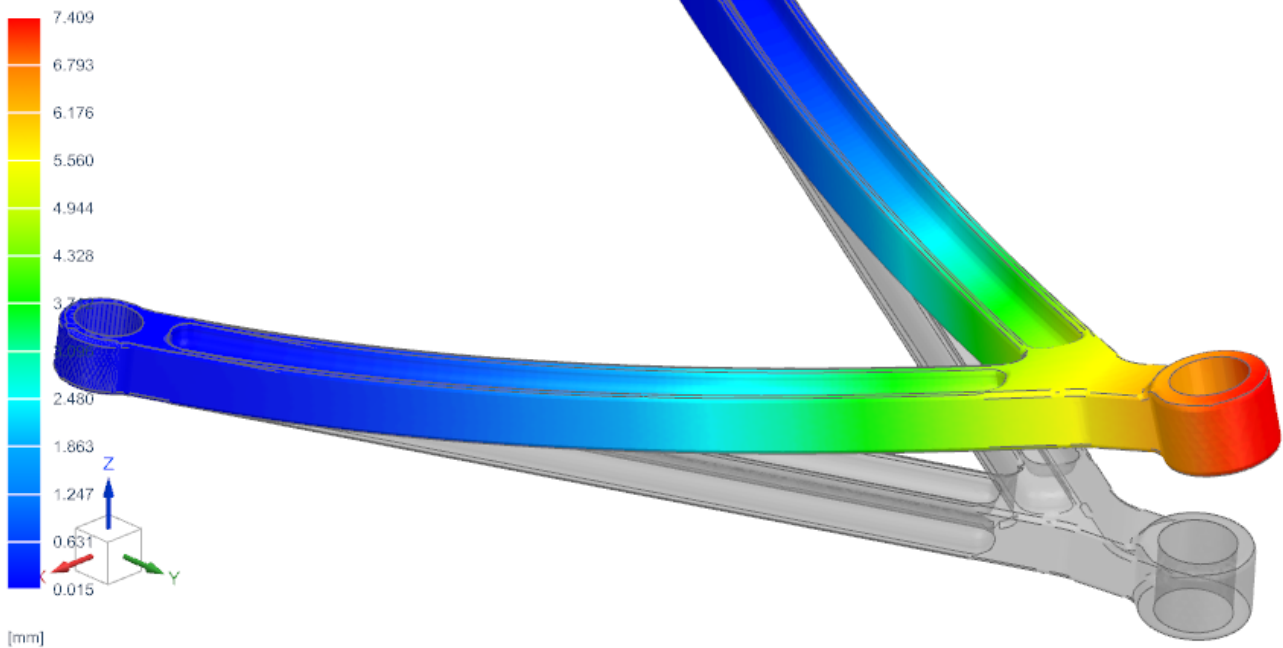


Figura 75 – Spostamento lungo Z del modello realizzato per la undicesima iterazione.

Per quanto riguarda lo spostamento lungo Y (Figura 76), esso è peggiorato del 24% rispetto al dato positivo precedente, ma comunque risulta differire dall'originale di soli 13,4 punti percentuali, ovvero si è comunque all'interno del margine che si era posto in partenza, quindi il risultato può essere considerato accettabile. Per quanto riguarda la rigidità flessionale lungo X (Figura 77), che finora è stato il parametro di analisi più difficile da ottimizzare, la modifica ha portato a un peggioramento del 12% rispetto alla precedente iterazione, che già differiva del 6% rispetto al dato del componente originale. Ma comunque il dato rientra entro del margine di progetto imposto a priori, quindi può essere ritenuto sufficiente.

braccetto H 2\_sim1 : Solution 1 Result  
Subcase - Static Loads 1, Static Step 1  
Displacement - Nodal, Y  
Min : -0.219, Max : 1.098, Units = mm  
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude

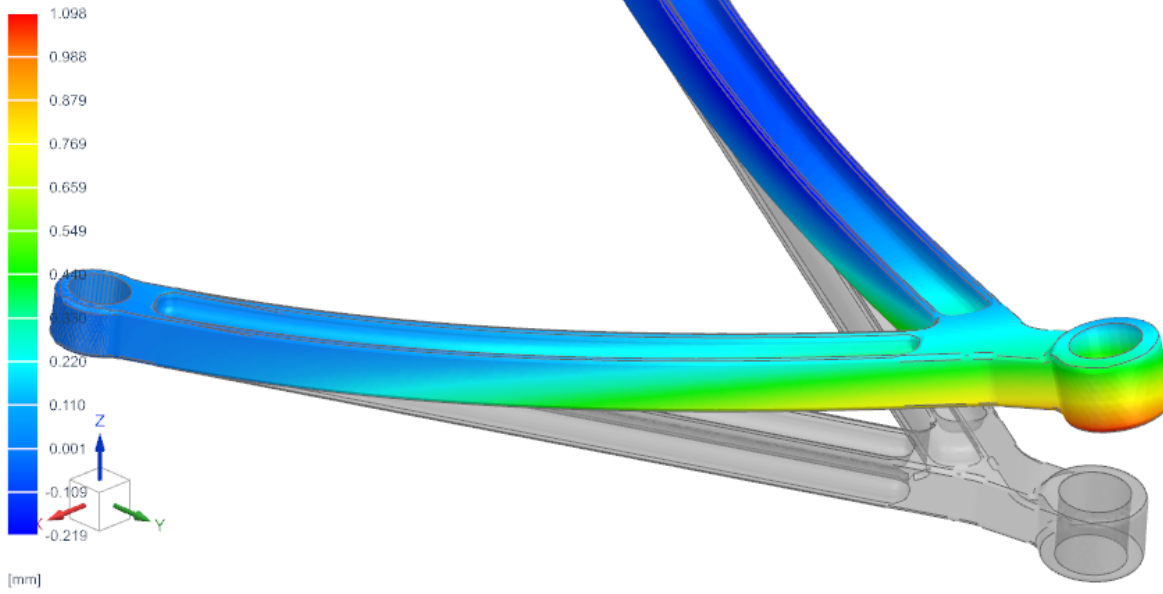


Figura 86 - Spostamento lungo Y del modello realizzato per la undicesima iterazione.

braccetto H 2\_sim1 : Solution 1 Result  
Subcase - Static Loads 1, Static Step 1  
Displacement - Nodal, X  
Min : -0.700, Max : 0.251, Units = mm  
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude

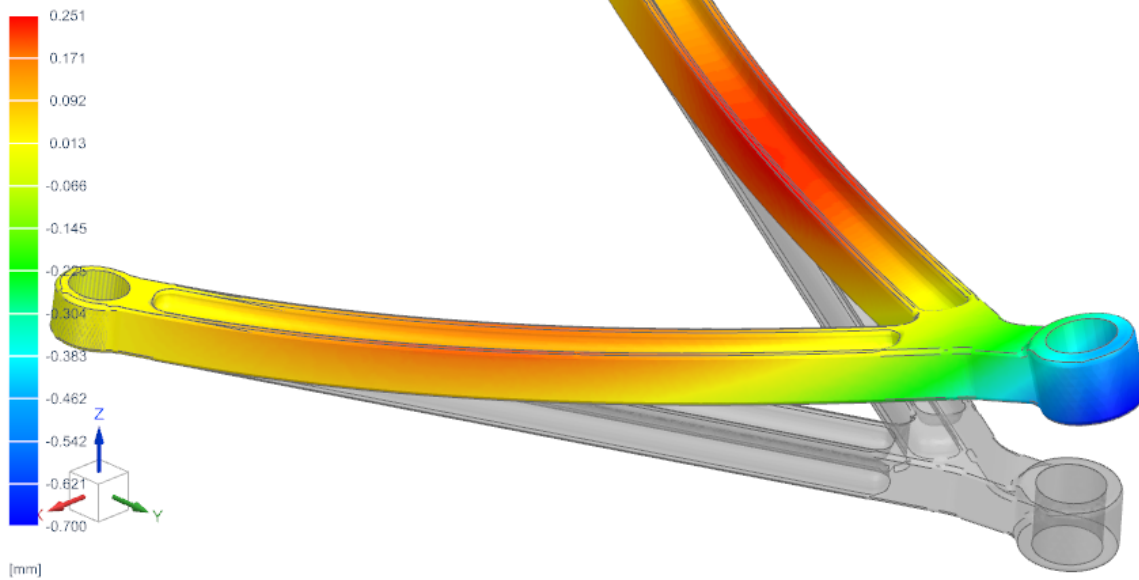


Figura 77 – Spostamento lungo X del modello realizzato per la undicesima iterazione.

### 6.3.3 Dodicesima Iterazione.

I risultati ottenuti nel precedente passaggio sono stati molto buoni, con miglioramenti sia nel peso che nella rigidità flessionale, che è stata ottimizzata o comunque rientra nei margini imposti in sede di progetto. Avendo concluso il processo di ottimizzazione del componente, la geometria risultante non sempre è adatta ad essere di semplice e agevole realizzazione con il processo produttivo scelto, ma è principalmente orientata alla prestazione. Quindi, in questo successivo passaggio si è cercato di concentrarsi sulle problematiche riguardanti il processo produttivo e quindi l'attitudine del componente ad essere stampato. Il dato positivo di partenza è che la geometria ottimizzata che è stata studiata nella precedente iterazione risulta buona in termini di stampabilità. Infatti il posizionamento in direzione verticale delle isole all'interno dello stampo volto a ricavare le cave della struttura è agevole. Un altro fattore positivo la presenza di raggi di raccordo che complicando la geometria delle suddette cave, permettono di ottenere un doppio beneficio, sia in termini prestazionali (aumento della sezione resistente), sia di processo: il materiale composito, fluidificando in sede di stampaggio a compressione, riesce a riempire ottimamente le cave. Permane tuttavia una criticità dovuta al fatto che lo stampaggio a compressione non è una tecnica indicata per la fabbricazione di parti complesse, ad esempio con angoli molto pronunciati come nel presente caso. Inoltre, esiste anche una problematica relativa all'estrazione del componente a stampaggio avvenuto, per via della presenza di sottosquadri, ossia incavi più profondi che formano un angolo acuto col piano costituito dal fondo dello stampo. Un esempio di ciò è la regione dell'alloggiamento del giunto ruota, che si trova su un piano differente rispetto a quello su cui giace il restante corpo del braccetto. Per poter unire e raccordare questi due "corpi" distinti, è stato necessario realizzare spigoli con raggi di raccordo poco spinti e geometrie abbastanza complesse, e ciò in sede di stampaggio a compressione creerebbe molti problemi, principalmente per due ragioni: si creerebbero zone di concentrazione delle tensioni sia sul pezzo sia sugli stampi, e il riempimento della cavità non sarebbe favorito. Occorre prevedere angoli di sformo e raggi di raccordo adeguati che concorrano insieme a favorire il riempimento degli stampi.

Le modifiche sulla geometria, comunque, sono state impostate con l'obiettivo di non incidere sulle prestazioni, quindi la sezione ad H è stata mantenuta identica a quella della precedente iterazione. È stato deciso tuttavia di svincolarsi maggiormente dalla forma del componente originale, identificando una linea di estrusione tale da "includere" la regione dell'alloggiamento del cuscinetto sferico, così da risolvere il problema derivante dall'aver un elemento "estraneo", difficile da raccordare al resto della struttura. In questo modo, i benefici sono due: il primo, di carattere meccanico, deriva dall'aver aggiunto massa in una regione molto sensibile e soggetta a concentrazioni tensionali molto elevate, come evidenziato più volte nel corso del processo di ottimizzazione; il secondo beneficio è relativo al processo, infatti un componente dalla forma più "organica" e compatta, risulta molto più semplice da processare e da estrarre. In Figura 78, è riportato il modello CAD del prototipo:

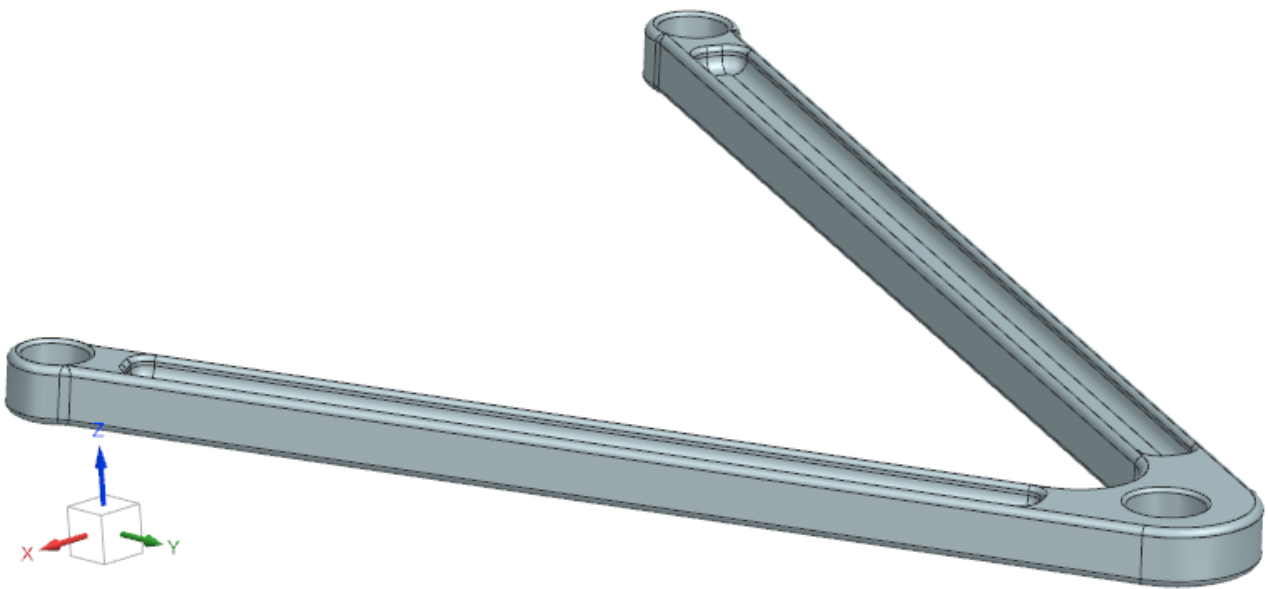


Figura 78 – Modello CAD finale.

Successivamente, per validare il modello, il componente è stato sottoposto allo stesso caso di carico impostato per le precedenti iterazioni. È necessario verificare di non aver intrapreso azioni peggiorative in termini di rigidità flessionale. Di seguito, sono riportati i risultati ottenuti.

Tabella 23 - Risultati della analisi FEM per la dodicesima iterazione.

		Compressione Y (5000 N)		
		Braccetto H 3 (sweep)	BRACCETTO ORIGINALE	%
VON MISES STRESS (MPA)		60,33	173,77	-0,652816942
DISP. MAGNITUDE (mm)		6,683	7,853	-0,148987648
DISP. LUNGO X (mm)		0,425	0,581	-0,268502582
DISP. LUNGO Y (mm)		0,904	0,968	-0,066115702
DISP. LUNGO Z (mm)		6,655	7,807	-0,147559882

Come era lecito attendersi, il buon risultato conseguito nella precedente iterazione non solo è stato confermato, ma sono state risolte le criticità in termini di rigidità flessionale nel piano che permanevano. In particolare, lo spostamento lungo X è stato ridotto del 39,3% rispetto alla precedente iterazione, e risulta più contenuto di quello del componente originale del 26,85%. Oltre a ciò, la rigidità flessionale lungo Y è stata ridotta rispetto al precedente tentativo del 18%, ed in assoluto risulta migliore del dato fatto registrare dal componente originale del 6,61%. Per quanto riguarda la rigidità flessionale lungo Z, è stato registrato un valore più basso del 14,7% rispetto a quello del componente originale. Da ciò si può desumere che il componente realizzato è finalmente ottimizzato e migliore in ogni aspetto, in base alle sollecitazioni imposte in sede di studio, rispetto al componente originale. Il peso del componente ottimizzato risulta essere minore del 10% rispetto a quello del componente originale. Per quanto riguarda il processo di stampaggio a compressione, la geometria è stata resa più adatta a una lavorazione per stampaggio a compressione, infatti i sottosquadri, gli spigoli, i raggi di raccordo piuttosto rilevanti presenti nel precedente modello sono stati eliminati. In Figura 79 vengono riportati i risultati della simulazione agli elementi finiti per l'ultimo passaggio del processo di ottimizzazione, in termini di rigidità:

braccetto H 3 sweep\_bis\_sim1 : Solution 1 Result  
Subcase - Static Loads 1, Static Step 1  
Displacement - Nodal, Z  
Min : -0.003, Max : 6.986, Units = mm  
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude

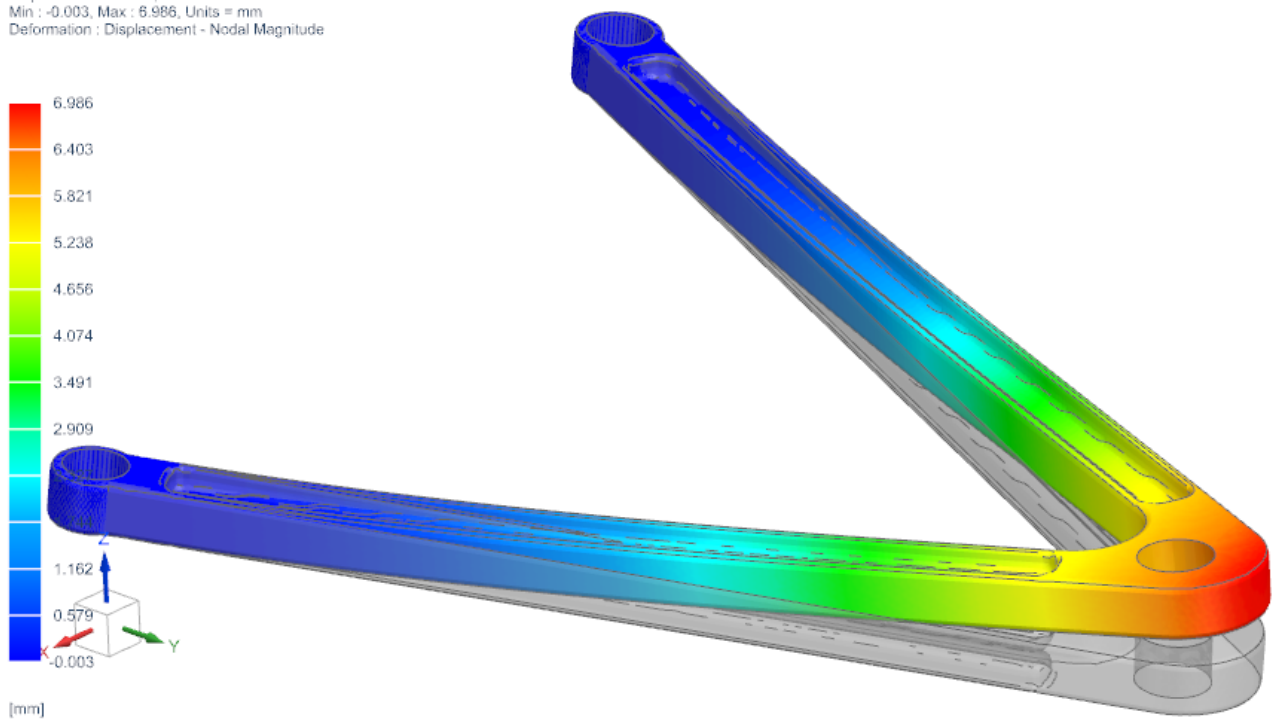


Figura 79 - Spostamento del modello finale

### 6.3.4 Verifica dell'instabilità elastica.

Nel corso del processo iterativo che ha portato al conseguimento dell'ottimizzazione del componente, si è agito nell'ottica di ridurre la snellezza della struttura, che possa determinare l'insorgere del fenomeno dell'instabilità elastica a compressione. Sarà sufficiente analizzare le due condizioni limite: massimo carico in trazione ed in compressione. Quando una struttura è soggetta ad un carico di compressione  $P$ , lungo la trave si genera un'azione normale. Tuttavia, se la geometria viene perturbata con uno spostamento verticale, si genera un'azione flettente. In tal caso, la struttura può reagire in due modi, a seconda che il carico sia inferiore o meno ad un certo valore (carico critico), che dipende dalla geometria e dal modulo elastico del materiale ( $E$ ), ma non dipende dalla resistenza del materiale:

- La trave è in condizioni di stabilità: una volta rimosso il carico che ha prodotto lo spostamento verticale, la trave assume nuovamente la configurazione originaria.
- La trave è in condizioni di instabilità: il momento flettente dovuto allo spostamento è maggiore della capacità elastica della trave di resistere. L'inflessione aumenta fino al collasso.

Considerando la struttura in figura, che rappresenta idealmente una delle due aste del braccetto, caricata da una forza orizzontale P applicata in B (Figura 80):



Figura 80 – Applicazione del carico di compressione all'asta.

Si ipotizzi che la struttura si deformi. La deformazione della struttura è descritta per mezzo degli spostamenti verticali v e dell'angolo  $\phi$ .

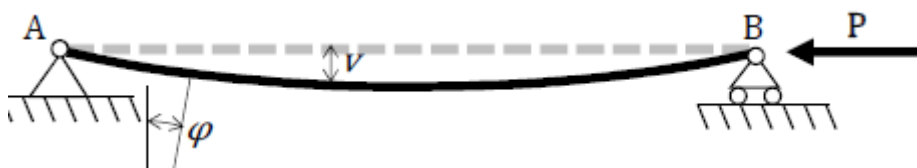


Figura 81 – Spostamento della struttura sottoposta al carico di compressione.

Come espresso in Figura 81, alla generica quota z il momento generato dall'azione della forza P sarà dato dalla (6.4):

$$M = P \cdot v \tag{6.4}$$

Valgono le relazioni (6.5):

$$\frac{dv}{dz} = \varphi \quad \frac{d\varphi}{ds} = -\frac{M}{EJ} \quad \frac{dM}{dz} - T = 0 \quad (6.5)$$

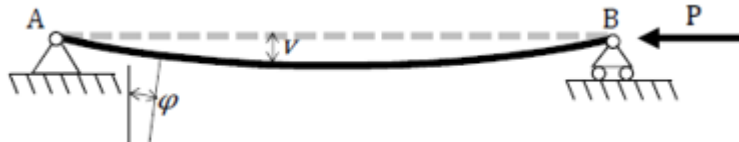


Figura 82 – Flessione della trave sottoposta a carico di “buckling”.

$$\begin{aligned} \frac{dv}{dz} = \varphi & \quad M = P \cdot v \\ \frac{d\varphi}{ds} = -\frac{M}{EJ} & \Rightarrow \frac{d}{dz} \left( \frac{dv}{dz} \right) = -\frac{(P \cdot v)}{EJ} \Rightarrow v'' + \frac{P}{EJ} v = 0 \end{aligned} \quad (6.6)$$

La (6.6) è un'equazione differenziale del secondo ordine a coefficienti costanti, della forma espressa dalla (6.7):

$$v'' + k^2 v = 0 \quad k = \sqrt{P/EJ} \quad (6.7)$$

La cui soluzione generale è del tipo espresso dalla notazione 6.8, con C1, C2 che dipendono dalle condizioni al contorno:

$$v(z) = C_1 \sin(kz) + C_2 \cos(kz) \quad (6.8)$$



$$k \cdot L = 0, \pi, 2\pi, \dots \quad k = \sqrt{P/EJ} \quad (6.9)$$

Andando a sostituire l'espressione di k (6.9) si trova il valore del carico P che conduce la struttura all'instabilità elastica, espressa dalla (6.10).

$$k \cdot L = L \cdot \sqrt{\frac{P_{cr}}{EJ}} = \pi \Rightarrow \sqrt{\frac{P_{cr}}{EJ}} = \frac{\pi}{L} \Rightarrow P_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot EJ}{L^2} \quad (6.10)$$

In questo caso entrano in gioco anche le lunghezze dei vari braccetti, quindi abbiamo preso in considerazione non soltanto il massimo carico di compressione in assoluto (agente sul braccetto posteriore del triangolo inferiore della sospensione anteriore, in caso di frenatura), ma anche il carico che agisce sul braccetto anteriore del triangolo inferiore della sospensione posteriore in caso di accelerazione, dato che quest'ultimo è più lungo del precedente, e a loro volta una delle due aste del braccetto inferiore è più lunga dell'altra. Il carico critico  $P_{cr}$  è stato ricavato mediante la formula di Eulero, e dipende da: lunghezza dell'asta, modulo elastico E del materiale e dal momento di inerzia della sezione. Inoltre, vale la 6.11:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot A \cdot \rho^2}{L^2} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot A}{\left(\frac{L}{\rho}\right)^2} \quad \frac{L}{\rho} = \textit{snellezza} \quad (6.11)$$

Ciò implica che il carico critico della struttura sia inversamente proporzionale alla sua snellezza, più questo valore è grande, minore sarà il carico di compressione che essa riuscirà a sopportare prima di andare in instabilità. Inoltre, il carico critico secondo il Problema di Eulero dipende dalle condizioni al contorno, riportate in Figura 83:

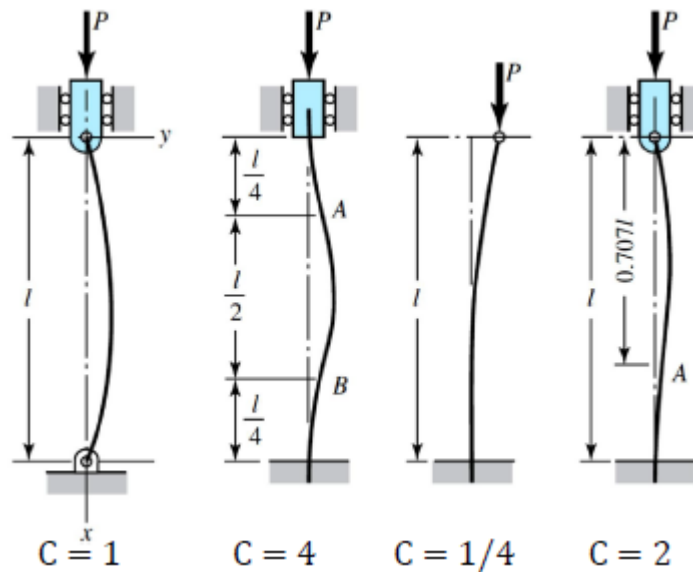


Figura 83 – Condizioni al contorno.

$$P_{cr} = C \frac{\pi^2 \cdot EJ}{L^2}$$

Quindi, si può scrivere la (6.12):

(6.12)

Ed in questo caso, C vale 1, essendo le condizioni al contorno poste nella presente analisi quelle del primo caso in figura. Una volta fornito il supporto teorico, è stato implementato un calcolo relativamente al caso di studio. Dal momento che la sezione delle due aste è costante in ogni punto, il caso peggiore a livello di instabilità è presentato dall'asta più lunga, dal momento che essa per questioni geometriche è più snella.

Tabella 24 – Carico di buckling per le due aste del braccio inferiore della sospensione.

	Elemento	Carico	Lunghezza	Pcrit
a	1/asta	5000	365	12889
b	2/asta	5000	440	9000

Dato il risultato ottenuto in questa verifica, si evince che il carico critico relativo a ciascuna “asta” del braccetto è superiore a quello a cui è tipicamente soggetto il braccetto di una autovettura sportiva leggera, che è stato oggetto del presente iter di ottimizzazione. Infatti solitamente esso è soggetto a carichi di compressione in modulo prossimi ai 4000 N. Riguardo un altro parametro di essenziale importanza, ovvero il peso, questo componente frutto del processo di ottimizzazione risulta più leggero del componente originale. Gli spessori delle anime, delle ali e dei punti in prossimità dei fori risultano essere conformi ai limiti tecnologici imposti, ciò è stato determinato a seguito dello studio di fattibilità del processo di stampaggio a compressione di chip di preimpregnato. In conclusione, si può affermare di aver posto rimedio a tutte le criticità che si erano via via manifestate nel corso delle iterazioni del processo di ottimizzazione.

## 7 Studio di fattibilità del processo di PPMC in forme complesse.

Al termine del processo iterativo di ottimizzazione del componente, si è ottenuta la geometria definitiva che andrà poi ad essere processata in sede di stampaggio a compressione. Il protocollo prevede che venga svolta la progettazione dello stampo per mezzo del quale andrà realizzato il prototipo per le prove fisiche di caratterizzazione meccanica, tuttavia per ragioni di sopraggiunti limiti temporali dell'attività di tesi, questo lavoro è rimandato a futuri sviluppi. Tuttavia, per poter comunque effettuare uno studio di processo e quindi uno studio della fattibilità dell'operazione, è stata condotta una campagna di prove sperimentali, che ha previsto la realizzazione di provini (Figura 84), stampati mediante un'attrezzatura di stampaggio che è stata scelta in virtù del fatto che presentava tutte quelle problematiche in termini di processabilità venute fuori dal processo di ottimizzazione appena terminato, e geometrie tutto sommato simili. L'attrezzatura in questione è uno stampo utilizzato per la realizzazione di un componente in laminato a fibra lunga mediante processo di Compression Molding. I parametri di processo su cui si è posta l'attenzione sono:

- Spessori sottili;
- Raggi di Raccordo;
- Fori;



*Figura 84- Componente realizzato mediante processo di PPMC*

L'obiettivo di questo studio non è valutare le proprietà meccaniche del componente risultante ma è quello di studiare il processo e valutare la fattibilità dello stampaggio a compressione in prepreg platelets di un componente di geometria complessa e peculiarità simili a quelle del componente oggetto di ottimizzazione, in maniera tale da capire quali sono le maggiori problematiche in sede di stampaggio con il materiale composito riciclato oggetto di studio e il modo ottimale di disporre la carica nello stampo. Una volta definiti in maniera puntuale i parametri di processo, ossia quanta carica disporre, che dimensioni di chip impiegare, come disporre la carica, e quindi standardizzato questa fase che è strettamente legata al processo di CIRCE, si potrà agire sulla rampa termica da imporre allo strumento in funzione della  $T_g$  che si vuole sviluppare, ai fini di far esprimere al sistema di resina le migliori proprietà meccaniche ottenibili.

## 7.1 Descrizione del componente e dell'attrezzatura di stampaggio.

Il componente che si andrà a realizzare in “prepreg platelets” in questa prova sperimentale è un oggetto molto sensibile, ed è realizzato normalmente mediante materiale composito a fibra lunga. Si tratta di un supporto che deve sostenere carichi abbastanza rilevanti in relazione alla sua struttura cava, nell'ordine dei 1000N lungo la direzione verticale rispetto al suo piano di simmetria. E deve poter assicurare la totale staticità dell'attrezzatura che vi è montata, perché da ciò dipende il buon esito dell'operazione per il cui svolgimento è stato progettato. Si tratta di un componente cavo, realizzato in due parti speculari che andranno poi ad essere incollate mediante adesivo a matrice epossidica a formare l'assieme finale. La sua forma è sostanzialmente caratterizzata da due fori, le cui regioni presentano spessori molto sottili e variabili e raggi di raccordo abbastanza spinti. I due fori sono stati ricavati in sede di stampaggio a compressione e non successivamente, mediante lavorazioni a macchine utensili. Inoltre sono presenti delle “bugne”, la cui buona realizzazione è un parametro di interesse, perché permette di capire meglio se il nuovo materiale riesce a seguire ottimamente queste complesse geometrie. L'attrezzo utilizzato per lo stampaggio del componente è in acciaio, ed è riportato in Figura 85.



*Figura 85 – Stampo in acciaio per la realizzazione del componente oggetto di studio di processo*

Infatti, un requisito per lo stampaggio di prepreg platelets è che venga impiegato uno stampo di acciaio, poiché questo materiale composito riciclato tende a danneggiare le superfici delle cavità, creando “bozze” che pregiudicano la qualità dei componenti prodotti nelle successive operazioni di stampaggio, quindi non è previsto l’uso di alluminio per lo stampaggio nell’ambito di studio, e pertanto non vi sono casi in letteratura che ne prevedono l’impiego in stampi per PPMC. I fori sono ricavati inserendo nella cavità dello stampo delle boccole in materiale polimerica, che permettono alla carica di fluire correttamente intorno ad essi, laddove si desidera realizzare un foro con uno spessore ridotto. Questo sistema di stampaggio, nella fattispecie, è del tutto analogo a quanto previsto dalle linee guida per la realizzazione di componenti con fori in composito. Un’altra modalità potrebbe essere quella di prevedere dei perni in materiale plastico da inserire nello stampo, aventi un certo angolo di sforno, così che le fibre possano allungarsi correttamente in senso verticale intorno al foro il più possibile. Questa è la soluzione migliore al fine di evitare la foratura e la successiva asportazione del composito. Infatti, nel caso in cui si va ad eseguire un foro a macchine utensili, laddove le fibre sono tutte disposte longitudinalmente, si vanno a tagliare le fibre nel verso della loro lunghezza, lasciando in tal modo solo pochi mm di fibra in una zona molto sensibile e soggetta a fattori di intensificazione delle tensioni  $K$  molto elevati, dovuti al coefficiente di intaglio e alla discontinuità del materiale. Ciò porterebbe alla nascita di cricche, fino a rottura a stati di sollecitazione molto più bassi del normale. Oltre a ciò, il perno deve essere inserito all’interno di una boccola in materiale polimerico, da installare “ad interferenza”, così da evitare possibili abrasioni che ledano la fibra nel mentre essa fluisce a contatto della superficie stessa in sede di stampaggio. Anche questa eventualità, come quella precedentemente descritta, potrebbe ad un indebolimento delle fibre e quindi del materiale composito in prossimità di una regione già di per sé estremamente sensibile. Una volta che il componente è stato stampato, si provvederà ad una sua rifinitura a macchine utensili, per rimuovere imperfezioni, “bave” ed eccessi di resina che possano inficiare dal punto di vista estetico.

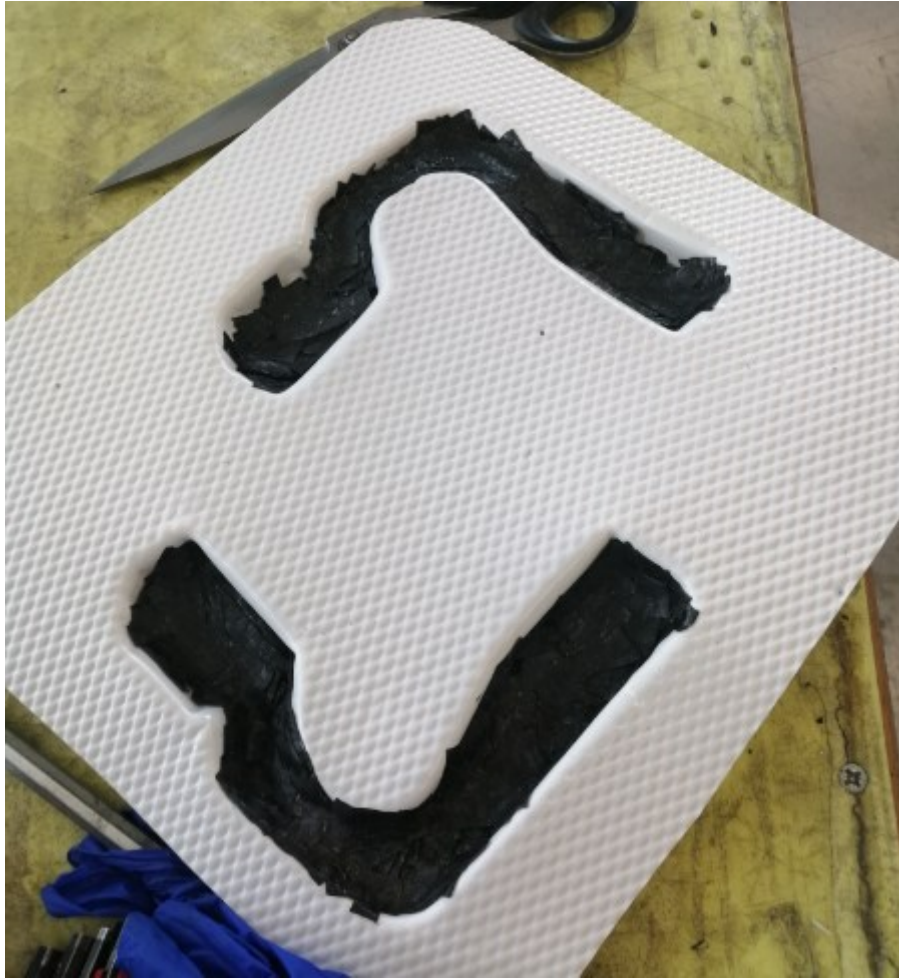
## 7.2 Descrizione della prova.

Il primo passaggio della prova è la preparazione del materiale composito per la laminazione. Sono stati impiegati chip da prepreg derivanti da scarti della lavorazione di taglio, di differenti grammature (380, che deriva da un tow da 12K e 200, da tow 3k), aspect ratio (20x20,10x40). Oltre a prepreg caratterizzati da tessitura, è stato impiegato nell'ambito della prova anche l'SMC, da cui sono stati ricavati dei chip. Questo è stato fatto allo scopo di realizzare più provini di stampaggio, facendo variare di volta in volta i parametri di processo più rilevanti, ovvero la tipologia di materiale composito impiegato e il metodo di deposizione della carica, per poter valutare le differenze maggiori e riuscire ad esprimere delle linee guida di pratica ottimale da implementare in una successiva esperienza produttiva seriale.

### 7.2.1 Posizionamento della carica.

In primo luogo, l'attrezzo viene disposto nella pressa idraulica e lo stampo riscaldato per mezzo di una rampa termica da 105°C a 140°C. Le caratteristiche del ciclo termico che viene impiegato dipendono essenzialmente dalle caratteristiche dello stampo e dalle specifiche reologiche della resina, dalla sua cinetica e dai tempi di reazione della stessa. Queste caratteristiche sono fornite dal produttore. Il ciclo termico deve consentire una reticolazione completa della matrice (che è governata dal parametro Tg), così da fare esprimere al composito le sue prestazioni meccaniche migliori. Parallelamente, il materiale composito viene pesato e preparato per la deposizione. Dopo attente valutazioni in sede di processo, si è deciso di adottare una attrezzatura ad hoc, in cui vengono depositi i chip, al fine della creazione di una preforma che facilitasse la fase di inserimento della carica nella cavità dello stampo, considerando le complessità mostrate dalla geometria presa in considerazione che rendevano difficile la deposizione manuale dei chips direttamente in cavità.





*Figura 86 – Attrezzatura prevista per la creazione delle preforme di prepreg platelets.*

Una volta preparata l'attrezzatura, si è passati nel locale adibito alla laminazione, che è mantenuto in condizioni climatiche controllate (temperatura di 20°C e 50% di U.R.) per evitare che la variabilità dei parametri termo igrometrici possa alterare la riuscita della deposizione. Le modalità di deposizione nell'ambito del PPMC sono generalmente due:

- Deposizione Randomica: i chips vengono depositi nelle apposite porzioni della preforma in maniera casuale, mediante il metodo di agitazione meccanica.

Questo metodo di lay-up consente di ridurre il tempo necessario alla laminazione e i costi associati al processo, ma al contempo determina una maggiore porosità a cui è associato un alto contenuto di vuoti, un'interfaccia fra le fasi peggiore, quindi manufatti con proprietà meccaniche di resistenza e rigidità più basse e difficilmente prevedibili, finitura superficiale peggiore.

- Deposizione ordinata: i chip sono disposti sulla superficie della preforma in maniera ordinata e ragionata, avendo cura di arrivare a coprire ogni porzione della stessa così da originare un migliore riempimento, un minor contenuto di vuoto, una miglior adesione fra le fasi e da ciò si determinano migliori e meno aleatorie prestazioni meccaniche e minor variabilità delle stesse. Gli svantaggi di questo metodo sono: tempi di processo molto più lunghi, costi associati più alti, il che rende questo metodo di laminazione inadatto a volumi di produzione più elevati.

Dopo aver eseguito una prima fase di ricerca del modus operandi ottimale mediante varie prove, nel presente lavoro di tesi è stato messo a punto un approccio alternativo ad entrambi, ma che risulta essere un compromesso fra i due metodi. In sede di deposizione, il quantitativo totale dei chips è stato suddiviso in 3 porzioni, di egual peso, ognuna delle quali viene deposta in una porzione dell'attrezzo per la creazione della preforma (Figura 86). La superficie dell'attrezzo è stata suddivisa in 3 aree distinte, così che la preforma risultante riesca a riempire e coprire adeguatamente la cavità di stampaggio. Le tre distinte aree sono: le regioni in cui verranno alloggiati le boccole in materiale polimerico e la regione che funge da raccordo fra le prime due. Sono stati calcolati i pesi delle tre porzioni di chip da porre nelle singole zone ed i loro volumi, poi di conseguenza la carica è stata posizionata maggiormente laddove lo spessore del pezzo fosse maggiore, ed in misura minore al centro laddove lo spessore del componente fosse minore. L'obiettivo di questa operazione è quello di facilitare la disposizione della carica all'interno dello stampo. Dal momento che la geometria prescelta aveva una certa variabilità negli spessori e complessità geometrica, non era praticabile l'operazione di deporre tutta la carica al centro della cavità, perché bisogna far sì che essa si adatti in modo ottimale alla forma della stessa.

Inoltre, la deposizione non poteva essere fatta ponendo direttamente i chip nello stampo portato a temperatura, poiché la resina dei chip depositi per primi avrebbe fluidificato per prima rispetto a quella dei chip depositi in un secondo momento, rendendo l'operazione disomogenea, ma soprattutto perché tale resina che fluidifica per prima, diventando appiccicosa, avrebbe complicato ed allungato le operazioni di deposizione della restante parte del materiale. Quindi è stato deciso di realizzare dei "gusci" preformati fuori dallo stampo (Figura 87), così da eliminare tutti i problemi appena evidenziati e facilitare quindi l'inserimento della carica nello stampo, consentendo anche l'applicazione di una pressione di stampaggio più contenuta.



*Figura 87 – Deposizione dei gusci preformati all'interno delle cavità dello stampo.*

## 7.2.2 Applicazione del vuoto.

Una volta che la deposizione della carica nell'attrezzo, eseguita nei modi precedentemente descritti, è stata portata a termine, si inserisce l'attrezzatura in un apposito sacco da vuoto. Esso è costituito da materiale polimerico fissato a tenuta stagna [1], che normalmente permette di evacuare al di fuori di esso l'aria e le sostanze volatili intrappolati fra gli strati di materiale composito, e tutto ciò che può dar origine a vuoti, ma soprattutto migliora le caratteristiche di adesione fra chip, con la creazione di legami interlaminari. Il sacco è costituito da più strati di materiale di consumo, ciascuno che presenta il proprio compito [1]: bleeder, breather, distaccante microforato, sacco da vuoto. Nel presente caso di studio però l'utilizzo del sacco da vuoto, più che per le motivazioni di cui sopra, viene utilizzato per effettuare una prima operazione di compattazione degli strati di chip fino ad arrivare ad una preforma, da inserire poi nella cavità dello stampo. Infatti, nel mentre i componenti preformati vengono estratti dal sacco e posizionati nella cavità di stampaggio, sono soggetti ad esposizione ad aria libera. In alternativa, si era inizialmente pensato di realizzare uno stampo di preformatura in cui disporre rapidamente e senza particolari accortezze la carica, per poi compattare "a freddo" il materiale. Tuttavia dopo attente valutazioni l'idea è stata scartata, è risultato infatti essere più semplice, rapido ed economico utilizzare per la preformatura un sacco da vuoto. Infatti, il metodo appena descritto avrebbe reso necessaria la realizzazione di un secondo stampo per la preformatura, e ciò avrebbe richiesto sicuramente un maggior dispendio di risorse economiche rispetto all'uso del sacco da vuoto

## 7.2.3 Stampaggio a compressione.

Una volta portata a termine l'operazione di preformatura, il materiale viene adagiato nella cavità dello stampo, che è stata portata mediante rampa termica alla temperatura di processo desiderata. Conclusa l'operazione di deposizione, inizia il processo di avvicinamento a step del controstampo fino a chiusura completa dello stampo.

L'operazione dura in totale 2 minuti, ed ogni 30 secondi il controstampo viene spostato verso lo stampo di 2 centimetri. Una volta chiuso lo stampo, viene applicata una pressione di 40 tonnellate per un tempo di 90 minuti, fino a formatura completa. Le tempistiche, al solito, dipendono dal sistema di resina impiegato. Successivamente alla conclusione dell'operazione di stampaggio, il componente è pronto per essere estratto.

### 7.3 Conclusioni dello studio di processo.

L'obiettivo del presente studio di processo è quello di cercare di capire se fosse fattibile l'operazione di stampabilità in forme complesse del materiale composito di scarto, sul cui recupero si basa il progetto CIRCE. Il componente prescelto per lo studio è ben rappresentativo di tutte le criticità che si possono avere nei componenti, come i raggi di raccordo stretti, la variabilità degli spessori, curvature più o meno accentuate, e permette di capire se un pezzo come quello realizzato al termine del processo di ottimizzazione del braccio inferiore della sospensione possa essere stampato con buona riuscita. È stato verificato che il materiale oggetto del progetto CIRCE può essere impiegato con successo nella realizzazione di componenti di forme complesse (Figura 88), e disponendo la carica secondo quella che potrebbe essere la geometria finale del componente si facilita la buona riuscita del processo. Infatti, in questo modo è necessario applicare meno pressione in sede di stampaggio per compattare il materiale. Si è gestita la preformatura del componente nel modo precedentemente descritto per ottenere questo obiettivo.



*Figura 88 – Viste dei provini realizzati in PPMC*

## 8 Conclusioni e Sviluppi futuri.

Il presente lavoro si sviluppa nell'ambito del progetto CIRCE, di cui l'azienda ospitante HP Composites di Ascoli Piceno è capofila, che si occupa di implementare il concetto di riuso degli scarti del processo di taglio dei preimpregnati non curati, al fine di sviluppare un nuovo modello di economia circolare, producendo sia benefici per l'ambiente che risparmi economici per gli enti aziendali, che potrebbero essere interessati a dare nuova vita a questo materiale, individuando campi di utilizzo e applicazioni nuovi e finora preclusi, per motivi economici, ai materiali compositi. L'attività di tesi ha avuto come obiettivo quello di portare avanti l'ottimizzazione topologica di un braccetto inferiore di una sospensione automobilistica, valutando la fattibilità di una sua realizzazione mediante stampaggio a compressione di sfridi del processo di taglio di preimpregnato non curato. L'ottimizzazione in questione aveva due obiettivi principali:

- Il cambiamento di materiale, con il passaggio da una lega di alluminio commerciale tipica in applicazioni automobilistiche al materiale composito;
- L'ottenimento di prestazioni meccaniche pari (entro una tolleranza del 10% imposta in sede di studio) o superiori a quelle del componente originale;

In primo luogo sono stati ipotizzati i casi di carico dimensionanti da implementare in sede di simulazione agli elementi finiti, che sono quelli a cui tipicamente è soggetta una vettura in situazioni di marcia, e sono stati ricavati mediante lo studio della dinamica del veicolo:

- Trazione/Compressione lungo Y: originata in situazioni di accelerazione in curva con trasferimento di carico per la ruota sinistra, ed una frenata con alleggerimento per la ruota destra;

- Trazione/Compressione “pura” in direzione normale alla superficie di alloggiamento del giunto sferico;
- Compressione lungo X: carico che si origina in condizione di frenatura al limite;
- Torsione lungo Y: difficilmente il componente lavorerà in tale condizione critica, ma è stato deciso di studiare anche questa eventualità, per completezza d’analisi;

## 8.1 Prima fase del processo di ottimizzazione.

Una volta individuati i casi di carico dimensionanti, si è sottoposto il componente originale a dette sollecitazioni con lo scopo di ottenere un output da imporre come target da eguagliare o, possibilmente, migliorare. Una volta ottenuti questi risultati, è iniziata la fase di “testing”, volta alla ricerca di una geometria che assicurasse gli stessi valori di resistenza e rigidezza del componente originale in alluminio, con un peso pari o inferiore. È stata individuata come possibile soluzione una sezione ad H, abbastanza allungata in direzione Y, con l’obiettivo di ridurre il volume di composito prossimo al piano di flessione, con l’obiettivo di incrementare la rigidezza della struttura, rispetto ad una con sezione rettangolare. Dopo aver sottoposto il componente della prima iterazione ai casi di carico ipotizzati, si è fatto il confronto con l’output imposto come target e si è ravvisata una forte discrepanza in senso negativo. Nel seguito del lavoro, si è studiato il caso di carico in cui i dati divergono in maniera più marcata, e in seconda battuta è stato individuato il parametro di output più critico: lo spostamento lungo Z, e quindi la rigidezza della sezione fuori dal piano. Quindi, si è lavorato su questa geometria di base al fine di tentare di migliorarne le prestazioni in termini di rigidezza lungo Z. Dopo aver osservato che una sezione ad H molto sviluppata in larghezza, ma snella in altezza, comporta una buona rigidezza flessionale nel piano, ma la sua snellezza in direzione normale ad esso fa sì che, in caso di carichi di compressione più rilevanti, si abbia instabilità elastica (infatti, sfruttando il modello di Eulero si ha avuto come risultato un carico critico di poco più di 5000 N, molto basso), e che la sezione resistente è insufficiente per sopportare le sollecitazioni imposte, si è deciso di cambiare strategia, con l’obiettivo primario di migliorare la rigidezza fuori dal piano x-y.



## 8.2 Seconda fase del processo di ottimizzazione.

Nell'ottica di ottimizzare la rigidità della struttura, è stato deciso di rivoluzionarla in maniera radicale. Infatti, la precedente struttura era studiata ed ottimizzata per dare buoni risultati di resistenza e rigidità nel piano, ma troppo snella, e quindi problematica per i motivi di cui sopra, e le modifiche iterative svolte senza stravolgerne la geometria di base non hanno sortito gli effetti sperati. La nuova geometria è stata studiata adottando per le aste una sezione a doppio T disposta verticalmente e assialsimmetrica. Essendo il piano di flessione in direzione Z disposto perpendicolarmente all'anima centrale, si è disposto il materiale nella direzione in cui esso fornisce un apporto consistente alla rigidità flessionale della struttura. Infatti, date tali modifiche, sono stati ottenuti importanti miglioramenti nell'ottica di una miglior rigidità flessionale fuori dal piano, con tale, seconda geometria che risulta due volte più rigida della precedente, e presenta uno spostamento lungo Z fino al 55% più ridotto del componente originale. Tuttavia sono state ravvisate una serie di criticità:

- Rigidità flessionale nel piano: in questa fase il processo di ottimizzazione l'attenzione si è focalizzata eccessivamente sul ridurre e far rientrare nei target prestabiliti lo spostamento fuori dal piano x-y, che effettivamente è molto contenuto. Ma la rigidità in direzione X e Y è stata peggiorata. Infatti, in caso di flessione nel piano x-y, il piano di inerzia giace nei pressi dell'anima centrale, ponendo quindi una consistente parte del volume del componente a non dare sostanziali contributi in termini di resistenza a trazione e compressione in quella direzione. In sostanza, la problematica che era stata rilevata nella prima fase del processo di ottimizzazione si era ripresentata.
- Problematica tecnologica: spessori. Le due ali superiore ed inferiore della sezione sono eccessivamente sottili e ciò, oltre a determinare le cattive prestazioni di cui sopra, comporta seri problemi in fase di laminazione e di successivo stampaggio a compressione.

- Problematica tecnologica: posizionamento isole nello stampo. Una geometria così configurata risulta infatti irrealizzabile. Disporre le isole lateralmente rispetto alle pareti dello stampo infatti pone delle sfide molto ardue da risolvere, a causa della presenza di sottosquadri che ne renderebbero estremamente complessa l'estrazione dallo stampo. Questa geometria, sostanzialmente, è molto più adatta ad essere realizzata in metallo piuttosto che in composito.

### 8.3 Terza fase del processo di ottimizzazione.

Avendo ottenuto e compreso i risultati di cui sopra, in seguito a opportune valutazioni si è quindi deciso di cambiare nuovamente strategia, con due obiettivi principali: migliorare la rigidità flessionale nel piano x-y e al contempo correggere la geometria per renderla più adatta al processo produttivo prescelto per una sua eventuale e futura implementazione produttiva. Quindi, si è tornati ad una sezione ad H, più facilmente realizzabile per stampaggio a compressione. Ma al contempo si è imparato dagli errori compiuti nelle prime iterazioni del processo di ottimizzazione, e si è resa la sezione meno snella, più compatta, assialsimmetrica, allo scopo di renderla più simile alla geometria circolare del componente originale, che assicura un comportamento "simmetrico" se sottoposto a sollecitazioni di trazione o compressione. Il margine in termini di rigidità flessionale è consistente, quello che è stato fatto è studiare una soluzione che fosse il miglior compromesso fra quanto realizzato nelle due precedenti fasi, avendo cura di non eccedere né in un senso, né nell'altro. Infatti, nella prima fase del processo iterativo il problema dell'instabilità elastica e della scarsa rigidità a compressione derivavano proprio dalla snellezza della struttura. Di seguito sono riportati i risultati ottenuti:

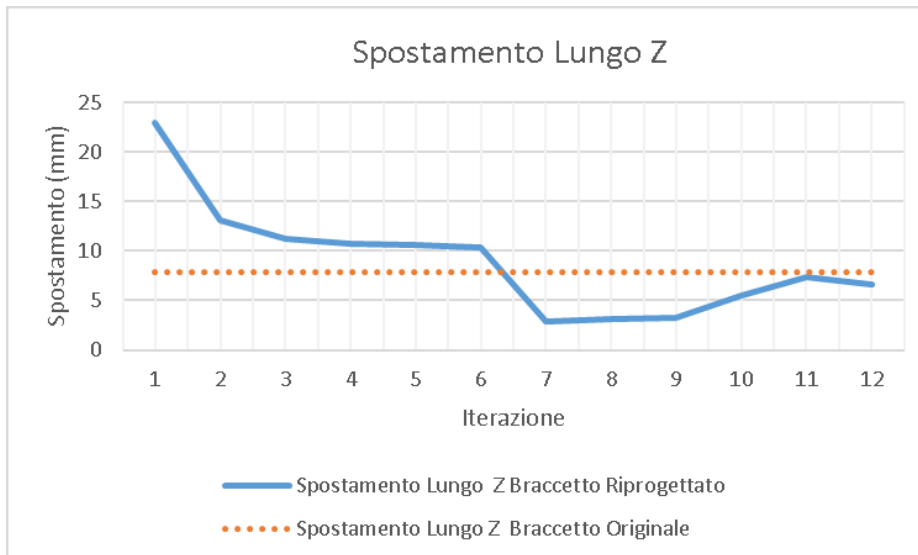


Figura 88 - Spostamento lungo Z

Come mostrato dalla Figura 88, il risultato iterativo del processo di ottimizzazione restituisce un risultato migliore restituisce un miglioramento rispetto al componente di partenza, realizzato in alluminio, in termini di rigidità fuori dal piano x-y. Per quanto riguarda la rigidità flessionale nella direzione X (Figura 89), che è stato il parametro di processo più complesso da trattare e ottimizzare:

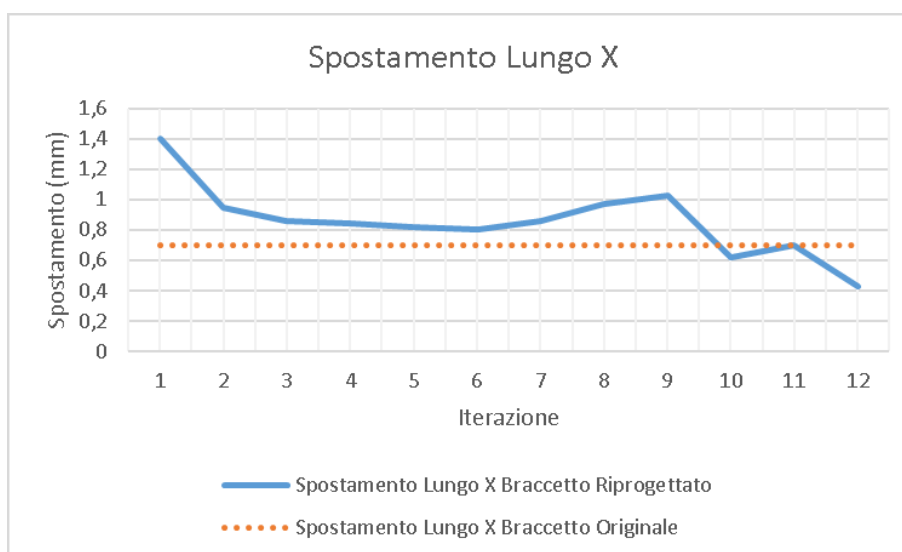


Figura 89 - Spostamento lungo X

Come era più che lecito attendersi, i miglioramenti apportati alla geometria hanno procurato benefici sostanziali, infatti essa risulta più rigida in tale direzione del 20% rispetto al componente originale. Riguardo lo spostamento lungo Y (Figura 90):

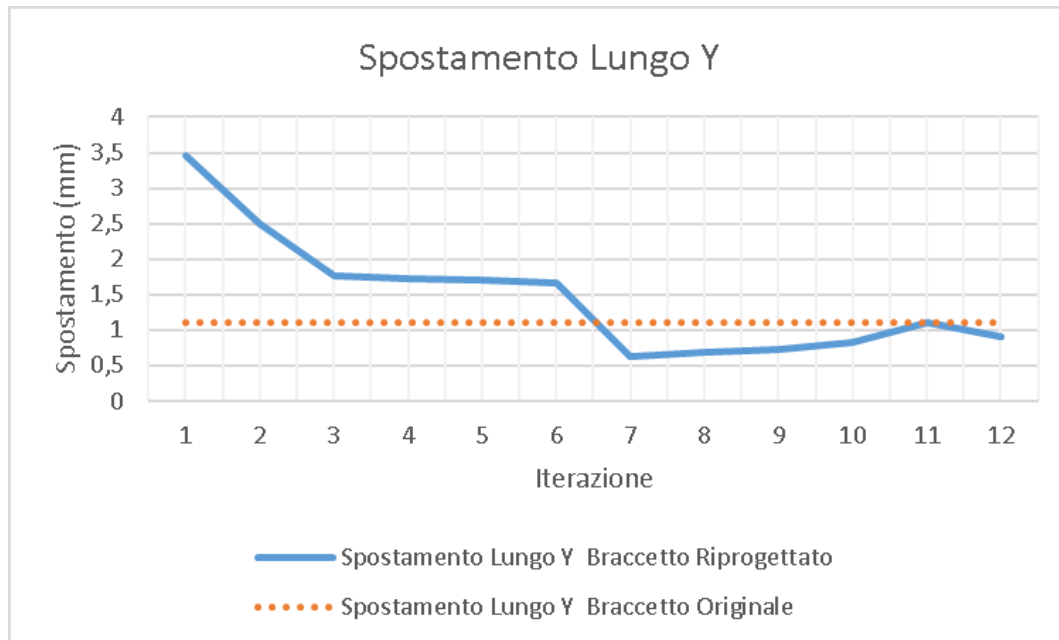


Figura 90 - Spostamento lungo Y

Anche questo parametro, come era prevedibile, è stato ottimizzato. Venendo infine all'andamento del peso nel corso del processo, riportato in Figura 91:

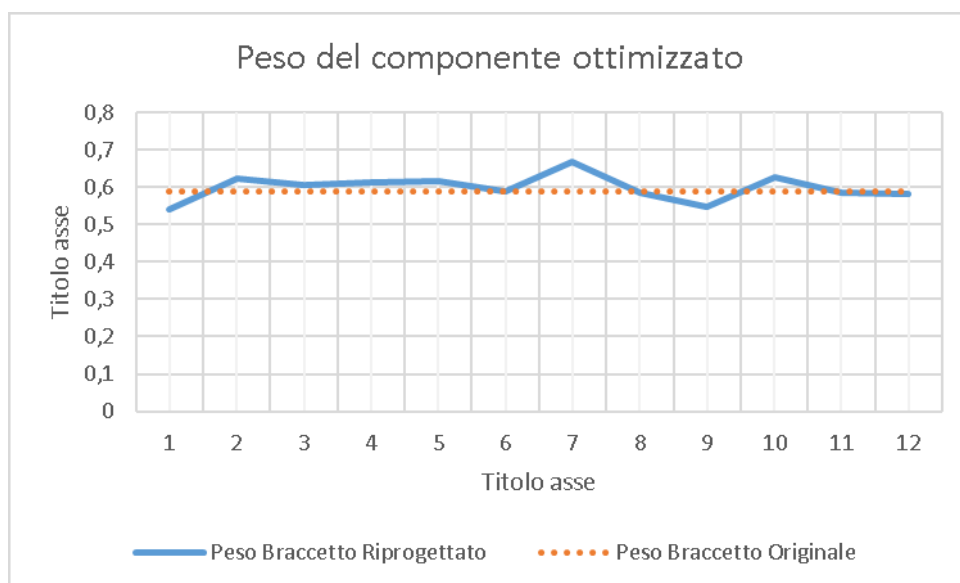


Figura 91 - Andamento del peso del componente ottimizzato

La sfida maggiore del processo di ottimizzazione appena concluso, come precedentemente riportato, è stata quella di realizzare un componente già esistente in un materiale diverso, e meno performante, ottenendo un peso simile e una migliore risposta meccanica ai carichi imposti. È stato appena illustrato che il componente ottimizzato risulta essere migliore dell'originale, in ogni suo aspetto prestazionale. Tuttavia, come può essere desunto dal grafico sopra riportato, al termine del processo di ottimizzazione si è raggiunto anche l'obiettivo ambizioso di, non solo, far convergere anche il dato del peso, ma renderlo del 2% inferiore a quello del componente in alluminio.

## 8.4 Studio di fattibilità del processo di PPMC in forme complesse.

Al termine del processo di ottimizzazione del componente oggetto di studio, il modello risultante dell'ultima iterazione presenta una serie di problematiche a livello di stampabilità, che è stato necessario approfondire mediante un apposito studio di processo. Infatti, come accade normalmente in sede di ottimizzazione, la geometria risultante è frutto di una ricerca delle migliori prestazioni meccaniche, ma non tiene pienamente conto delle esigenze dello stampaggio. È stata dunque individuata una geometria, il cui stampo fosse già nelle disponibilità dell'azienda ospitante, che fosse rappresentativa di tutta una serie di complessità presentate dal componente oggetto di studio. Queste sono, nella fattispecie, bugne, spessori sottili, raggi di raccordo stretti, pareti a spessori variabili, fori e curvature più o meno accentuate. Questo studio ha permesso di comprendere ed accertare la stampabilità di componenti in forme complesse mediante PPMC e quindi la buona riuscita del processo stesso. Con la realizzazione di provini mediante questa attrezzatura di stampaggio, si è riusciti a verificare che il materiale oggetto del progetto CIRCE è utilizzabile per tale scopo. In particolare, mediante vari tentativi, si è messo a punto un metodo di deposizione della carica che prevede che la stessa venga disposta secondo quella che potrebbe essere la geometria finale del manufatto facilita la riuscita del processo, e quindi si è gestito in tale ottica il processo di preformatura della carica.

In questo modo è anche possibile applicare una pressione minore in sede di stampaggio per compattare il materiale. Queste prove di stampaggio a compressione in forme complesse sono quindi state fatte al fine di verificare che con questo processo di stampaggio fosse possibile realizzare un componente che avesse certe caratteristiche.

## 8.5 Sviluppi futuri.

Il presente lavoro di tesi ha prodotto come risultato quello di accertare la fattibilità dell'applicazione del materiale composito riciclato per la realizzazione di un componente complesso. Purtroppo, per ragioni di tempo, non si è riusciti ad arrivare a realizzazione del progetto dello stampo per la produzione di un prototipo del componente in scala per i test meccanici, attività che sono lasciate a future implementazioni interne all'azienda ospitante. Tuttavia, questo lavoro risulta essere solo l'inizio di un processo che potenzialmente potrebbe portare a ulteriori e nuovi campi di impiego per il materiale oggetto del progetto CIRCE. Infatti, si può pensare di reingegnerizzare e costruire ulteriori componenti del comparto sospensivo con questo materiale innovativo, come ad esempio i braccetti superiori, sottoposti peraltro a stress più contenuti, o le rocker del sistema push-rod. In questo modo sarebbe possibile risparmiare ulteriore peso in punti sensibili e al contempo abbassare costi e tempi di produzione. Il presente materiale è disponibile in gran quantità come scarto di lavorazione presso le aziende produttrici, come quella ospitante, e da scarto diventerà un fattore produttivo sempre più importante. La questione dei costi e del risparmio del peso abbraccia ogni ambito della componentistica dell'automobile sportiva, non solo il comparto sospensivo. Un altro impiego che potrebbe essere ipotizzato abbraccia la componentistica interna alla postazione di guida del pilota, come i pedali, che sono un componente estremamente sensibile e subiscono carichi tutto sommato molto ben gestibili per il materiale composito in questione, di circa 100 kg. Oppure altre tipologie di leveraggi interni all'abitacolo, come ad esempio il selettore del cambio di velocità, piuttosto che elementi dei pannelli interni, che risultano essere stampabili facilmente.

# Riferimenti Bibliografici.

- [1] A. D. Forcellese, «Slide del corso di Tecnologie e Sistemi di Lavorazione dei Manufatti in Composito,» UNIVPM, 2020-2021.
- [2] A. Vita e A. D. Forcellese, «Slide del corso di perfezionamento in Ingegneria dei Materiali Compositi,» UNIVPM, 2020-2021.
- [3] P. K. Mallick, Composites engineering handbook, CRC Press, 1997.
- [4] C. Park, «Compression molding in polymer matrix composites,» Woodhead Publishing, 2012, pp. 47 - 93.
- [5] P. Mallick, Fiber reinforced composite materials, Manufacturing and Design, 3rd edition, CRC Press, 2007.
- [6] “Sheet Molding Compound”, Laurent Orgeas, Pierre J. J. Dumont, CNRS, Grenoble Institute of Technology, Grenoble, France.
- [7] G. A. Suresh e E. Murat, “Process modelling in composite manufacturing”, CRC Press, 2012.
- [8] «Moldex3D User Manual,» CoreTech System, Hsinchu, Taiwan, 2019.
- [9] P. J. Halley e M. E. Mackay, «Chemorheology of thermosets—an overview,» Polymer Engineering & Science 36.5, pp. 593-609., 1996.
- [10] M. Barone e D. Caulk, «A model for the flow of a chopped fiber reinforced polymer compound in compression molding,» Journal of Applied Mechanics, vol. 53, pp. 367-371, 1986.
- [11] N. e. a. Shama Rao, «Carbon composites are becoming competitive and cost effective,» 2015.
- [12] M. Holmes, «Carbon fibre reinforced plastics market continues growth path,» Reinforced plastics, pp. 24-29, 2013.
- [13] M. Sauer, «Composite market report 2019 - Global CF and CC market,» Carbon composites (CCeV), 2019.

- [14] N. Guarav e S. Nutt, «Reuse and upcycling of thermoset prepreg scrap: case study with out-of-autoclave carbon fiber/epoxy prepreg,» *Journal of composite materials*, pp. 341-360, 2018.
- [15] S. Young S., J. R. Youn e T. G. Gutows, «Life cycle energy analysis of fiberreinforced composites,» *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, pp. 1257-1265, 2009.
- [16] Reuse of uncured carbon fibre/epoxy resin prepreg scraps: mechanical behavior & environmental response, Christiane Souza, Carlos Opelt, Geraldo Candido, Samia Danuta Brejão de Souza, Edson Botelho, José Maria Marlet, and Mirabel Rezende, 2018
- [17] Sommer, D.E., Kravchenko, S.G., Denos, B.R., Favaloro, A.J., Byron Pipes, R., Integrative Analysis for Prediction of Process-Induced, Orientation-Dependent Tensile Properties in a Stochastic Prepreg Platelet Molded Composite, *Composites: Part A*, (2019).
- [18] Characterization of Prepreg-Based Discontinuous Carbon Fiber/Epoxy Systems, PAOLO FERABOLI, ELOF PEITSO, FRANCESCO DELEO AND TYLER CLEVELAND Aeronautics and Astronautics, University of Washington Box 352400, Seattle, WA 98195-2400, USA.
- [19] Kravchenko, S.G., Sommer, D.E., Denos, B.R., Favaloro, A.J., Tow, C.M., Avery, W.B., Byron Pipes, R., Tensile Properties of a Stochastic Prepreg Platelet Molded Composite, *Composites: Part A* (2019)
- [20] COMPRESSION MOULDING OF COMPLEX PARTS USING RANDOMLY-ORIENTED STRANDS THERMOPLASTIC COMPOSITES, Dominic LeBlanc<sup>1</sup>, Benoit Landry<sup>1</sup>, Arthur Levy<sup>1</sup>, Pascal Hubert<sup>1</sup>, Steven Roy<sup>2</sup>, Ali Yousefpour<sup>2</sup> <sup>1</sup>McGill University, Department of Mechanical Engineeringn 817 Sherbrooke street West Montreal, QC H3A 0C3.
- [21] “Optimization of microstructures and mechanical properties of composite oriented strand board from reused prepreg”, Bo Cheng Jin, Xiaochen Li, Atul Jain, Carlos González, Javier LLorca, Steven Nutt, 2017.
- [22] LAMBORGHINI “FORGED COMPOSITE®” TECHNOLOGY FOR THE SUSPENSION ARMS OF THE SESTO ELEMENTO, Paolo Feraboli<sup>1</sup>, Federico Gasco, Bonnie Wade, Steve Maier, Roger Kwan, Attilio Masini, Luciano DeOto, Maurizio Reggiani.



- [23] “Development of efficient short/continuous fiber thermoplastic composite automobile suspension upper control arm, P. Anandakumarm, Mallina Venkata Timmaraju, R. Velmurugan.
- [24] W. Milliken, D. Milliken, “Race Car Vehicle Dynamics”, 1995.
- [25] Thomas D.Gillespie, Fundamentals of Vehicle Dynamics, SAE International, 1992.
- [26] Giancarlo Genta, Lorenzo Morello, L’AUTOTELAIO VOL. 2, PROGETTO DEI SISTEMI, Levrotto & Bella, 2007.
- [27] William F. Milliken, Douglas L. Milliken, Race Car Vehicle Dynamics, SAE International, 1995.
- [28] P. Feraboli, T. Cleveland, M. Ciccu, P. Stickler, L. DeOto, “Defect and damage analysis of advanced discontinuous carbon/epoxy composite materials”, Composites (Part A), 41/7, 2010, pp. 888-901.
- [29] P. Feraboli, T. Cleveland, P. Stickler, J. Halpin, “Stochastic laminate analogy for simulating the variability in Modulus of discontinuous composite materials”, Composites (Part A), 41/4, 2010, pp. 557-570.
- [30] P. Feraboli, E. Peitso, T. Cleveland, P. Stickler, “Modulus measurement of prepreg-based discontinuous carbon fiber/ epoxy systems”, Journal of Composite Materials, 43/19, 2009, pp. 1947-1965.
- [31] P. Feraboli, E. Peitso, T. Cleveland, P. Stickler, J. Halpin, “Notched behavior of prepreg-based discontinuous carbon fiber/ epoxy systems, Composites (Part A), 40/3, 2009, pp. 289-299.
- [32] P. Feraboli, E. Peitso, F. Deleo, T. Cleveland, P. Stickler, “Characterization of prepreg-based discontinuous carbon fiber/ epoxy systems”, Journal of Reinforced Plastics and Composites, 28/10, 2009, pp. 1191-1214.
- [33] Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica “Analisi agli elementi finiti del ponte anteriore di un mezzo telescopico”, Mattia Tortone, 2019.
- [34] “Studio del processo di compression molding applicato alla produzione di componenti in fibra di carbonio riciclata”, Tesi di Laurea Magistrale in ingegneria meccanica, Università Politecnica delle Marche, Ing. Tiziano Di Stanislao, 2020.