

ALMA MATER STUDIORUM • UNIVERSITÀ DI BOLOGNA
SECONDA FACOLTÀ DI INGEGNERIA
CON SEDE A CESENA

CORSO DI LAUREA
IN INGEGNERIA MECCANICA

Classe: L 9

Sede di Forlì

ELABORATO FINALE DI LAUREA
In TECNOLOGIA MECCANICA

**Caratterizzazione del bilanciere per il leveraggio della sospensione
posteriore di una motocicletta sportiva, realizzato in materiale
composito con tecnologia Sheet Moulding Compound**

CANDIDATO

Alessandro Pelloni

RELATORE

Ing. Lorenzo Donati

CORRELATORE

Ing. Enrico Dolcini

Anno Accademico 2011/2012

Sessione III

Introduzione	9
1 Materiali di produzione ingegneristica	11
1.1 Materiali compositi	14
1.2 Brevi cenni di calcolo per materiali compositi	18
1.2.1 Relazioni fondamentali	21
1.2.2 Confronto metalli/materiali compositi	24
1.2.3 Vantaggi e svantaggi di compositi e metalli	26
1.3 Sheet moulding compound	31
1.3.1 Descrizione	31
1.3.1.1 Caratteristiche HexMC®	46
1.3.2 Metodi di produzione SMC	49
1.4 Metodi di produzione di materiali compositi	51
1.4.1 Laminazione con preimpregnati e cura in autoclave	51
1.4.2 Compression moulding	54
1.4.2.1 Descrizione metodo	54
1.4.2.2 Pressa	55
1.4.2.2.1 Caratteristiche degli stampi	57
1.4.2.2.2 Controllo temperatura	60
1.4.2.2.3 Controllo della discesa dello stampo	61
1.4.2.3 Tempo di ciclo	61
1.4.2.4 Rinforzo della matrice	62
1.4.2.5 Metodi di processo per BMC, SMC, GMT e LFT	65
1.4.2.6 Comparazione con Transfer e Injection Moulding	68
1.4.2.7 Polimerizzazione della resina	69
2 Prove di pressoformatura a caldo	71
2.1 Componente da testare	71
2.1.1 Materiali di produzione	71
2.1.2 Componente	75
2.2 Macchina	77

2.3 Processo	78
3 Analisi agli elementi finiti.....	82
3.1 Introduzione.....	82
3.2 Simulazioni.....	83
3.2.1 Report prova FEM bilanciata SMC	84
3.3 Risultati	87
3.4 Commenti	92
4 Prove di caratterizzazione componente	94
4.1 Attrezzatura	94
4.1.1 Disegni 3D e costruttivi	97
4.1.2 Verifica perni	104
4.1.2.1 Verifica perno di spinta	104
4.1.2.2 Verifica perno diametro 8mm	106
4.2 Prove sul componente.....	108
4.2.1 Macchina di prova.....	108
4.2.2 Prove.....	110
4.2.2.1 Primo blocco di prove	111
4.2.2.2 Secondo blocco di prove	120
5 Discussione	127
6 Conclusioni	130
Bibliografia	131
Sitografia	132

Introduzione

L'idea dello sviluppo di questo argomento di tesi è scaturita dopo aver affrontato un periodo di tirocinio presso l'azienda Riba Composites S.r.l. di Faenza.

L'azienda lavora, come si evince dal nome, nel campo dei materiali compositi, in questo periodo in forte crescita e espansione.

Dopo aver lavorato per alcuni mesi all'interno dell'azienda, ho potuto comprendere le potenzialità di crescita di questo settore produttivo e ho potuto vedere dall'interno la maggior parte delle fasi che portano alla commercializzazione di componentistica ad elevato contenuto tecnologico. L'azienda punta molto sulla ricerca e sviluppo, perciò ha all'attivo collaborazioni con l'Università di Bologna.

Grazie a questa collaborazione sono stato inserito in un progetto per me molto stimolante e importante. Si trattava dello sviluppo di un componente per il leveraggio della sospensione posteriore di una motocicletta supersportiva prodotto con un materiale composito avanzato, il SMC Carbonio. Il materiale è in piena fase di sviluppo in quanto relativamente nuovo e sempre più utilizzato, soprattutto nel campo automotive. Per questo si è deciso di svolgere delle prove di caratterizzazione direttamente sul componente prodotto come quello che potrà poi essere utilizzato sul veicolo.

Il lavoro svolto si prefissava di studiare le caratteristiche note del materiale e cercare di rilevarne altre direttamente sui componenti prodotti dall'azienda.

Il materiale SMC conosciuto e studiato è costituito da resina con parte di rinforzo composta da fibra di vetro. Piuttosto recente è invece l'utilizzo del SMC carbonio, cioè un materiale prodotto con la tecnologia Sheet Moulding Compound, rinforzato con fibra di carbonio.

Durante il lavoro svolto si sono affrontati problemi di progettazione, produzione e caratterizzazione. È stata progettata l'attrezzatura per le prove di caratterizzazione e si è studiato il metodo di produzione come svolto in azienda. Sono poi state svolte le prove di

compressione sui componenti e lo studio dei risultati da esse ricavati, per poi individuare i punti di progetto su cui poter lavorare per migliorare le caratteristiche meccaniche del componente.

Sui Sheet Moulding Compound sono noti studi che riguardano la resistenza alle principali tensioni e l'elasticità. Non sono ancora state particolarmente studiate le caratteristiche riguardanti la resistenza a fatica e l'isotropia.

Lo scopo dello studio era dunque quello di studiare principalmente le caratteristiche di resistenza e elasticità direttamente su componenti di produzione, senza l'utilizzo di provini standardizzati, per poter aver un confronto diretto con gli stessi componenti prodotti in alluminio e valutare l'effettivo vantaggio nell'utilizzo del SMC carbonio.

Nel primo capitolo è presentata una parte introduttiva sui materiali compositi in genere, per poi passare a uno studio più approfondito sul materiale in questione. È presentata poi una descrizione piuttosto dettagliata del processo produttivo di pressoformatura a caldo.

Nel secondo capitolo viene presentata la geometria e le caratteristiche del componente su cui si andranno a svolgere le prove di caratterizzazione. In seguito sarà presentato il processo produttivo utilizzato per produrre lo specifico particolare.

Nel terzo capitolo è presentato lo studio agli elementi finiti, effettuato sul componente, per poter intuire le tensioni che si instaureranno sui componenti in fase di prova.

Il quarto capitolo riguarda le prove di compressione. Viene inizialmente presentata l'attrezzatura progettata per permettere lo svolgimento delle prove per poi passare alla presentazione dei dati ottenuti dalle prove.

Segue la discussione relativa ai risultati ottenuti dall'analisi agli elementi finiti e alle prove fisiche, per poi trarre le conclusioni riguardanti la caratterizzazione del componente.

1 Materiali di produzione ingegneristica

Nel corso di studi di Ingegneria Meccanica, in particolare nel corso di Tecnologia Meccanica, si studiano i materiali di uso più comune nel campo della produzione industriale. Questi sono i materiali che, dalla rivoluzione industriale, hanno dominato la produzione in serie, e non solo, di componenti meccanici e industriali in genere fino ad oggi.

Sono i materiali, racchiusi in grandi macrocategorie, come metalli e plastiche.

Nella prima grande categoria possiamo trovare in primo luogo gli acciai, da sempre i materiali più usati nella produzione, ci sono poi le leghe di alluminio, leghe di ottone, di rame, di titanio e altre leghe sempre più leggere e "performanti".

Questi materiali erano, e sono tuttora, usati nella grande maggioranza delle applicazioni per la loro facilità di lavorazione e reperimento e anche perché, essendo stati ampiamente studiati, se ne conoscono le caratteristiche. Quando si ha necessità di produrre un particolare componente utilizzando questi materiali si ha quindi una certa "sicurezza" su quello a cui si andrà incontro riguardo, ad esempio, le caratteristiche di resistenza e la durata.

Prendendo ad esempio i materiali metallici ed in particolare gli acciai le caratteristiche fondamentali che li rendono così largamente utilizzati sono il comportamento rispetto alle tensioni, l'elasticità e

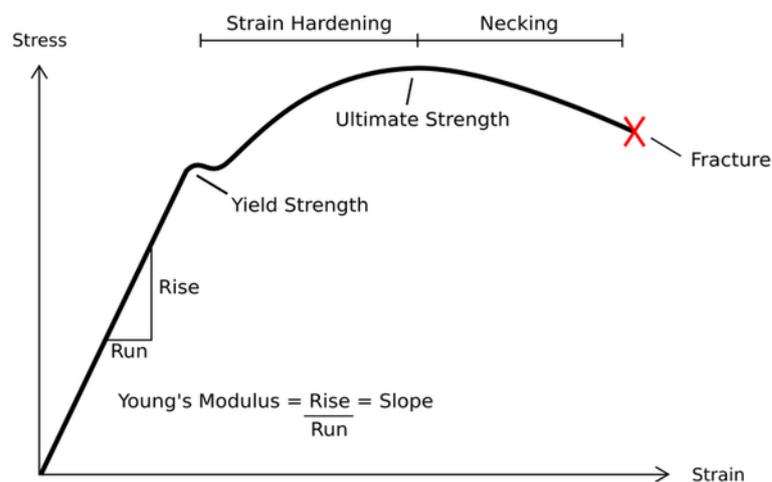


Figura 1.1-Grafico Stress-Strain (valido principalmente per la parte elastica)

l'isotropia.

Per quanto riguarda il primo aspetto, ogni acciaio ha caratteristiche di resistenza alle tensioni diverse ma che si possono ricondurre al diagramma σ - ϵ ovvero al diagramma Carico-Allungamento. Facendo riferimento a questo diagramma per valutare le caratteristiche meccaniche di un materiale si possono ricondurre gli acciai ad un tipico andamento che ne denota il comportamento elastico-plastico dei metalli sottoposti a un carico (Figura 1.1).

Come noto, si deduce che gli acciai presentano un comportamento "comodo" per la costruzione di componenti meccanici cioè, sottoposti a sforzo, reagiscono con un comportamento elastico piuttosto pronunciato. Il che implica che se un componente è sottoposto a uno sforzo elevato l'acciaio non cede subito ma risponde elasticamente, si deforma ma, una volta tolto il carico, ritorna nelle condizioni iniziali. Questo finché lo sforzo applicato non supera il carico di snervamento. In questa situazione un acciaio comune non cede comunque istantaneamente ma presenta una deformazione plastica prima di arrivare alla rottura.

Come detto, quindi, aspetto fondamentale è l'elasticità dei materiali. L'elasticità viene definita con la legge di Hooke per le tensioni normali [1].

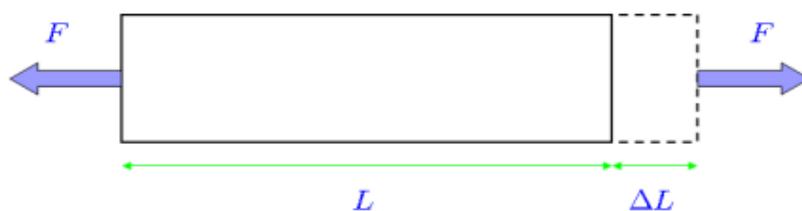


Figura 1.2-Schema deformazione normale

Come si evince dallo schema di figura 1.2, la deformazione secondo una direzione è definita come il rapporto tra l'allungamento elastico del materiale in quella direzione e la lunghezza iniziale nella stessa direzione. La deformazione quindi è anche definita come il rapporto tra il carico e un coefficiente, detto modulo di Young o di elasticità, che varia per ogni materiale e definisce in pratica l'inclinazione della retta della parte elastica nel grafico di figura 1.1.

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta L}{L} = \frac{\sigma_x}{E}$$

Il modulo di elasticità è un parametro fondamentale per la caratterizzazione dei materiali e indica il comportamento più o meno elastico che il materiale può avere.

L'elasticità porta a considerare la seconda caratteristica fondamentale dei materiali, l'isotropia.

L'isotropia è definita come la proprietà di indipendenza dalla direzione di una grandezza definita nello spazio. Cioè, considerando una grandezza riguardante un materiale, questa non cambia a seconda della direzione che si sta considerando.

Per gli acciai il modulo di elasticità non cambia considerando come direzione i tre assi tridimensionali. Questo implica che l'acciaio è un materiale isotropo.

Ciò porta ad un notevole vantaggio e semplificazione nella progettazione e nell'utilizzo degli acciai, perché non cambiano il loro comportamento elastico a seconda di dove vi sia applicato un carico.

1.1 Materiali compositi

Per materiale composito si intende un materiale non omogeneo ma composto da più elementi, tipicamente una parte di rinforzo in fase discontinua e una matrice in fase continua [2].

Un esempio molto semplice di materiale composito è il calcestruzzo, si usano sassi e ghiaia come parte di rinforzo e il cemento come matrice per legare l'assieme.

Quando si parla di materiali compositi comunemente come "carbonio" si intende un materiale composto da fibre di carbonio legate tramite una matrice resinosa.

Il "carbonio" e anche l'SMC carbonio fanno parte dei materiali compositi detti bicomponenti. Sono costituiti da una parte di rinforzo e dalla matrice. La parte di rinforzo è presente in fase continua (laminati) o discontinua (ad esempio SMC), come fibre o particelle, ed è appunto l'elemento più resistente all'interno del composito. La matrice, invece, è presente nel materiale in fase continua ed è la parte meno resistente ma svolge l'importante ruolo di legante.

Il materiale composito finito, preso quindi considerando matrice e rinforzo assieme, possiede caratteristiche decisamente differenti dagli stessi rinforzo e matrice considerati singolarmente.

Le proprietà meccaniche dei compositi dipendono principalmente da:

- Proprietà proprie della matrice e del rinforzo
- Concentrazione di rinforzo e matrice
- Forma della parte di rinforzo (fibre, particelle)
- Dimensione e distribuzione delle parti di rinforzo
- Nel caso di un rinforzo a fibre, orientamento delle fibre
- Interazioni tra matrice e parte di rinforzo

Considerando i materiali compositi con parte di rinforzo composta da fibre, si distinguono in materiali a fibre lunghe o continue e materiali a fibre corte o discontinue.

Nei primi la lunghezza della fibra è confrontabile con quella del pezzo stesso e si possono avere lamine direzionali e multilayer o tessuti [2].

Nei secondi la lunghezza delle fibre presenti come rinforzo può stare indicativamente tra i 10mm e gli 80mm.

Le fibre corte possono essere annegate nella matrice secondo un orientamento preferenziale oppure con orientamento casuale. Quest'ultimo è il caso dell'SMC carbonio (chopped). In figura 1.1.1 sono presentati degli schemi riassuntivi sulla disposizione delle fibre di rinforzo secondo la continuità o discontinuità e la distribuzione.

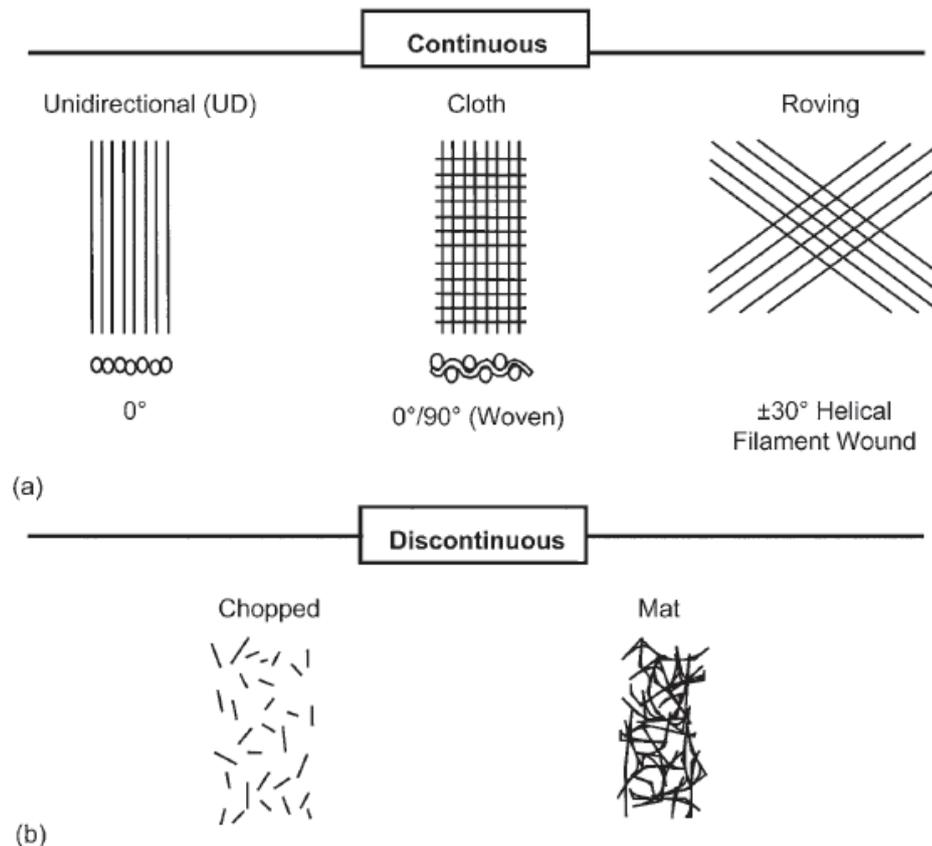


Figura 1.1.1-Schematizzazione disposizione fibre di rinforzo

Le fibre sono quindi il componente di questi materiali a cui è richiesto il compito di resistenza alle sollecitazioni meccaniche.

Le proprietà richieste sono:

- Elevato rapporto di rigidità/peso
- Elevato rapporto di carico di rottura/peso

Ci sono vari tipi di fibre in commercio che possono essere utilizzate come rinforzo, ad esempio le fibre di vetro, le fibre aramidiche e le fibre di carbonio.

Le fibre di carbonio (utilizzate anche all'interno dell'SMC carbonio)

possiedono le seguenti caratteristiche fisico-meccaniche [2]:

- Carico di rottura tra 2100 e 2500 MPa
- Modulo di Young tra 240000 e 390000 MPa
- Elevata conducibilità termica ed elettrica
- Densità di circa $1,8\text{g/cm}^3$
- Ottima resistenza alla corrosione
- Facile infiammabilità
- Elevato potenziale elettrolitico

La matrice invece ha diverse funzioni quali:

- Tenere unite le fibre
- Trasmettere il carico
- Proteggere le fibre da azioni di taglio
- Proteggere le fibre da agenti atmosferici e corrosivi

Sono quindi richieste alla matrice buone proprietà meccaniche, ottima resistenza alla corrosione, agli agenti atmosferici, allo scorrimento fibra-matrice e elevata tenacità.

La matrice può essere metallica (MMC), ceramica (CMC) o polimerica (PMC).

Le matrici polimeriche possono essere termoplastiche o termoindurenti.

Le matrici termoplastiche sono costituite da macromolecole lineari o ramificate. Fondono con l'apporto di calore e possono essere rifuse e ristampate [2].

Sono caratterizzate da una elevata resistenza all'urto, buona resistenza all'umidità e alle basse temperature. Presentano anche una elevata viscosità che implica la difficoltà a impregnare le fibre del rinforzo.

Le matrici termoindurenti sono formate da macromolecole reticolate e, al contrario delle termoplastiche, non possono essere rifuse e ristampate. Sono caratterizzate dalla facilità di formazione di complesse catene polimeriche spaziali e da una bassa viscosità che implica una buona impregnazione delle fibre [2].

Sono termoindurenti, ad esempio:

- Le resine epossidiche
- Le resine poliestere
- Le resine fenoliche

Le resine epossidiche permettono un buon legame tra fibra di rinforzo e matrice, sono caratterizzate da basso ritiro, da una buona resistenza a frattura, alla corrosione e all'umidità.

Le resine poliestere sono le più economiche mentre le fenoliche hanno la miglior resistenza alle alte temperature.

La matrice in forma resinosa per arrivare al suo stato ottimale per quanto riguarda la resistenza alle sollecitazioni e agli agenti esterni deve "indurire", deve perciò essere sottoposta ad un processo di polimerizzazione.

Il processo di polimerizzazione della matrice può essere svolto come evidenziato nel grafico di figura 1.1.2. [2]

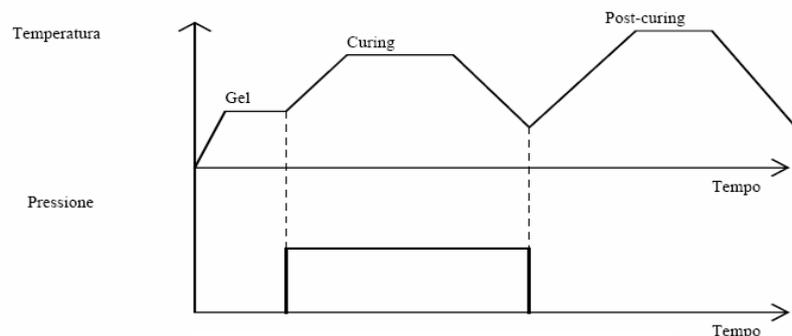


Figura 1.1.2-Grafico ciclo di cura

Viene diviso in tre fasi principali:

Gelificazione: si ha la temperatura più bassa dell'intero ciclo e si ha la polimerizzazione di circa il 70% della matrice.

Cura: è l'unica fase in cui viene sottoposto il manufatto a una pressione in modo tale da avere un incremento della compattezza e del legame fibra-matrice. Si ha nel contempo la riduzione delle tensioni dovute al ritiro differente tra fibra e matrice.

Post-cura: ultima fase del ciclo, nuovamente senza sovrappressioni, in cui si ha un ulteriore indurimento della matrice e una riduzione delle tensioni residue. Si ha inoltre l'aumento della temperatura di transizione vetrosa ($T_{critica}$).

Questo processo vale prevalentemente per metodi di produzione dove sia prevista una cura in autoclave per polimerizzare la matrice. In altri metodi di produzione può non essere previsto il ciclo di cura in autoclave.

1.2 Brevi cenni di calcolo per materiali compositi

Come abbiamo visto i materiali, a seconda della loro composizione e natura, possono avere un comportamento isotropo, anisotropo o ortotropo.

Un materiale isotropo presenta le stesse caratteristiche meccaniche lungo tutte le direzioni, carichi normali producono soltanto deformazioni nella stessa direzione. Un materiale anisotropo invece presenta caratteristiche meccaniche diverse in ogni direzione. Non esistono piani di simmetria nel materiale e un carico normale produce sia una deformazione normale che una di taglio [3].

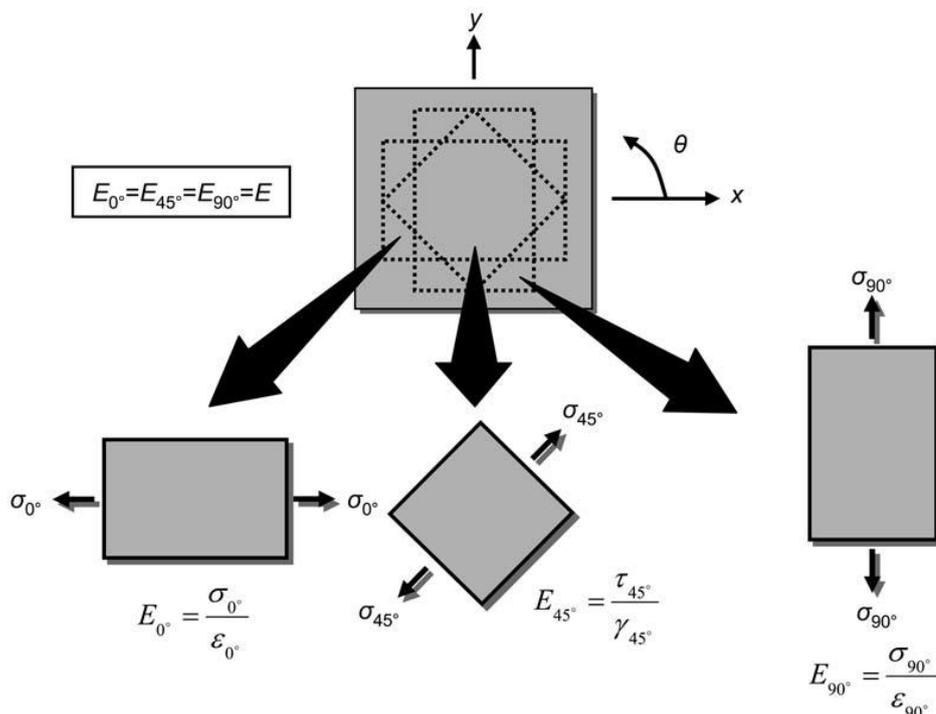


Figura 1.2.1-Schema materiale isotropo

Un materiale è quindi isotropo se le sue caratteristiche sono indipendenti dal posizionamento del materiale stesso rispetto ai carichi. In figura 1.2.1 è mostrato che, caricando un materiale isotropo secondo diverse direzioni, il modulo di elasticità non cambia

in valore ($E_{0^\circ}=E_{45^\circ}=E_{90^\circ}$).

In figura 1.2.2 invece è mostrato lo schema di un materiale anisotropo, si nota che le proprietà variano a seconda della direzione del componente e dei carichi applicati. Si hanno perciò moduli di elasticità diversi secondo ogni direzione ($E_{0^\circ}\neq E_{45^\circ}\neq E_{90^\circ}$). La stessa dipendenza dalla direzione del modulo di elasticità può esistere anche per altre proprietà come il carico di rottura, il modulo di Poisson e il coefficiente di espansione termica [3].

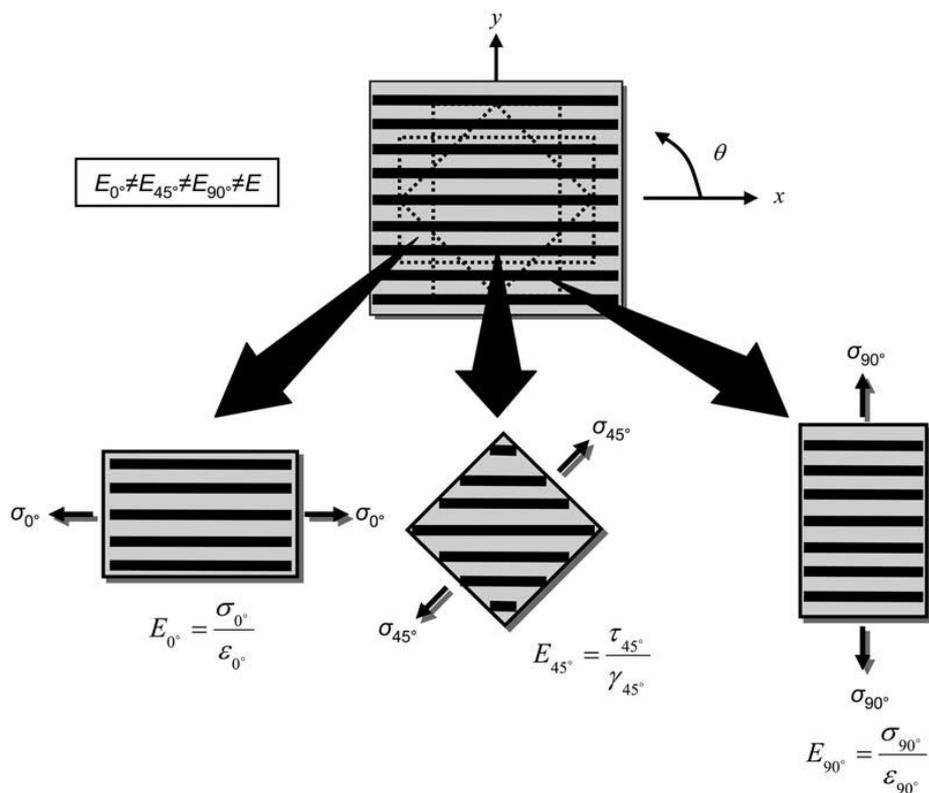


Figura 1.2.2-Schema materiale anisotropo

I metalli sono normalmente considerati isotropi mentre i compositi sono solitamente trattati come materiali anisotropi. Si possono però avere alcuni casi, ad esempio un componente in metallo lavorato fortemente per deformazione plastica a freddo per allineare i grani, in cui i metalli mostrano un comportamento anisotropo oppure un composito a fibre chopped che può mostrare un comportamento isotropo.

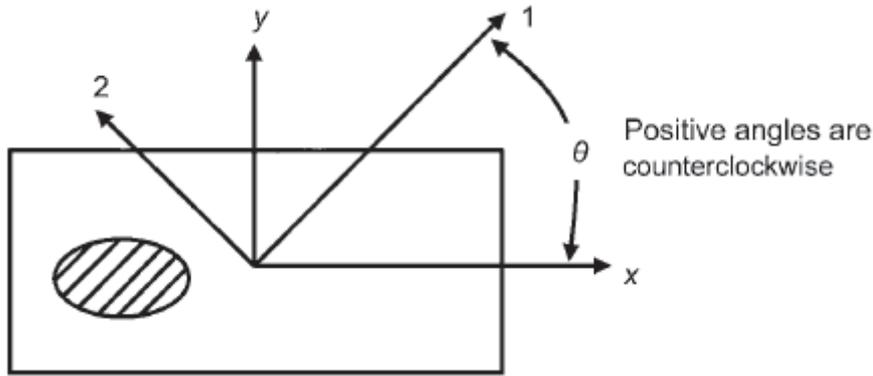


Figura 1.2.3-Sistema di coordinate su un laminato anisotropo

Considerando una lamina come in figura 1.2.3, il sistema di coordinate utilizzato per descrivere la lamina stessa è il sistema di assi 1-2-3. In questo caso sono definiti: l'asse 1 parallelo alle fibre, l'asse 2 perpendicolare alle fibre e l'asse 3 normale al piano della lamina. Se il materiale viene caricato lungo l'asse 1 il modulo di elasticità lungo questa direzione (E_{11}) tende ad assumere il valore di quello delle fibre. Se invece il carico è applicato lungo l'asse 2, il modulo E_{22} risulta molto inferiore di E_{11} dato che tende al valore di elasticità della matrice. Perciò, date le variazioni delle caratteristiche secondo le direzioni e, dato che $E_{11} \gg E_{22}$, si conclude che il materiale è chiaramente anisotropo [3].

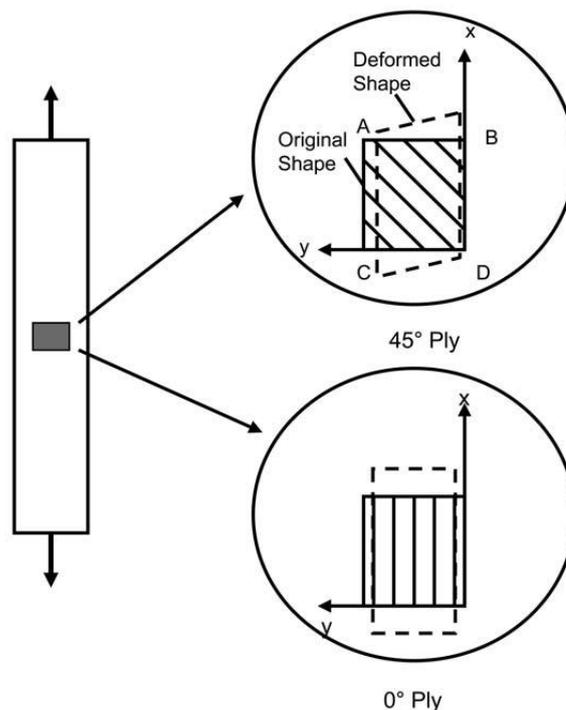


Figura 1.2.4-Sforzo normale su laminato anisotropo

I materiali compositi fanno parte di una sottoclasse dei materiali anisotropi, detti ortotropi [3]. I materiali ortotropi hanno proprietà differenti lungo tre direzioni perpendicolari, hanno quindi tre assi di simmetria e un carico applicato lungo una di queste direzioni produce solo deformazioni normali.

Dall'esempio di laminato di figura 1.2.4 si evince che un elemento di questo componente è più rigido lungo il segmento AD, direzione seconda la quale sono orientate le fibre. Questo implica che, imponendo un carico normale al componente, il segmento AD si allunga meno del segmento BC per la maggior rigidità lungo quella direzione. L'elemento considerato si deforma quindi in un parallelogramma introducendo una deformazione γ_{xy} , risultante dall'interazione delle deformazioni assiali ϵ_{xx} e ϵ_{yy} [3].

Se le fibre del laminato non sono disposte a 45° rispetto al componente, come nel caso precedente, ma a 0° le deformazioni assiali non concorrono. Si ha quindi un allungamento lungo l'asse x e una contrazione lungo l'asse y.

1.2.1 Relazioni fondamentali

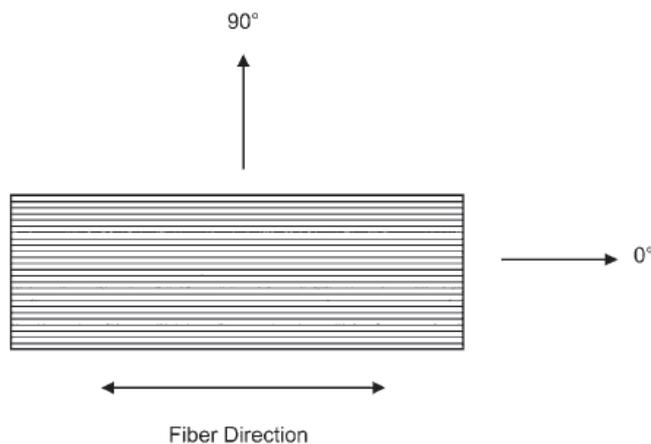


Figura 1.2.1.1-Schema lamina unidirezionale

Quando una lamina unidirezionale è caricata secondo la direzione 11 (0°) (Figura 1.2.1.1), il modulo di elasticità E_{11} può essere stimato considerando le proprietà dei componenti del composito utilizzando la *regola della miscela* [3]:

$$E_{11} = E_f V_f + E_m V_m$$

Con: E_f e E_m moduli di elasticità di fibra e matrice rispettivamente, V_f e V_m volumi in percentuale di fibra e matrice rispettivamente.

Il carico di trazione longitudinale può anch'esso essere stimato utilizzando la *regola della miscela*:

$$\sigma_{11} = \sigma_f V_f + \sigma_m V_m$$

Dove: σ_f e σ_m sono i carichi di rottura di fibra e matrice rispettivamente.

Siccome in quasi ogni caso le proprietà meccaniche delle fibre di rinforzo dominano su quelle della matrice, per qualsiasi valore di volume occupato, si possono omettere i valori riguardanti la matrice. Quindi:

$$E_{11} = E_f V_f$$

$$\sigma_{11} = \sigma_f V_f$$

In figura 1.2.1.2 è mostrata la dipendenza del carico di rottura e del modulo di elasticità dal valore dell'angolo di orientazione delle fibre. Si denota il ruolo dominante delle caratteristiche del rinforzo rispetto a quello della matrice.

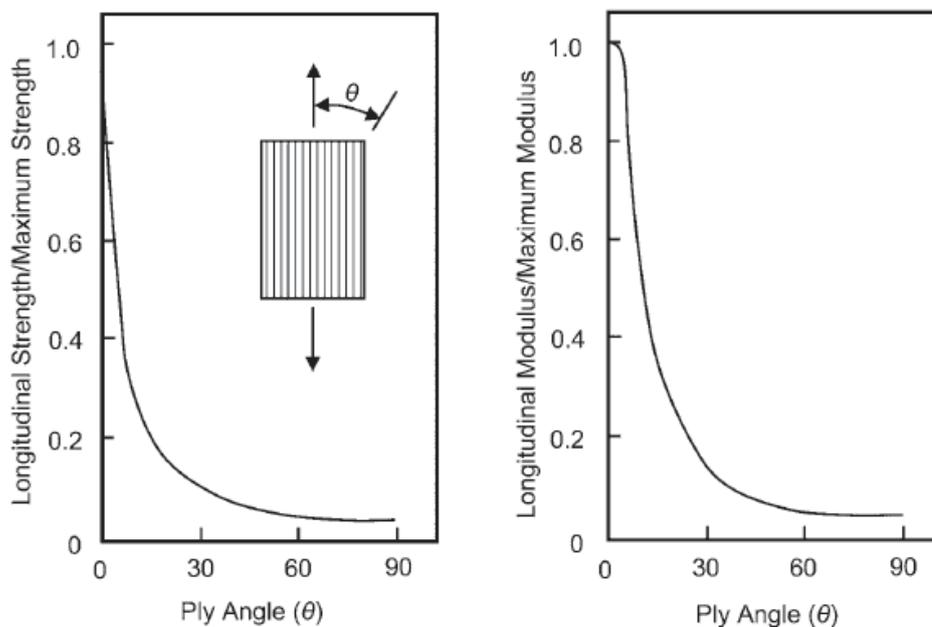


Figura 1.2.1.2-Grafici resistenza-angolo orientazione fibre e modulo di elasticità-angolo orientazione fibre

Nel caso la lamina unidirezionale sia caricata trasversalmente (lungo la direzione 22) la fibra e la matrice lavorano in serie. Si ha quindi:

$$\frac{1}{E_{22}} = \frac{V_f}{E_f} + \frac{V_m}{E_m}$$

Nel grafico di figura 1.2.1.3 è messo in evidenza l'andamento del modulo di elasticità di una lamina unidirezionale di composito in funzione del volume percentuale di fibra [3].

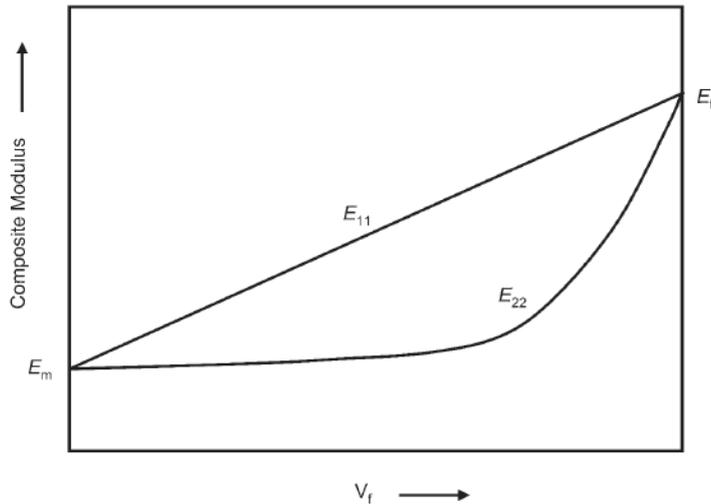


Figura 1.2.1.3-Grafico modulo di elasticità-volume fibre

Quando il volume occupato dalla fibra è nullo il modulo è quello della resina di cui è composta la matrice. Aumentando il volume occupato dal rinforzo il modulo trasversale rimane sempre minore di quello longitudinale poiché poco influenzato dalle fibre.

Esistono altre relazioni che correlano i volumi di matrice e rinforzo con il modulo di Poisson, il modulo di elasticità trasversale e la densità [3]:

$$\nu_{12} = \nu_f V_f + \nu_m V_m$$

$$\frac{1}{G_{12}} = \frac{V_f}{G_f} + \frac{V_m}{G_m}$$

$$\rho_{12} = \rho_f V_f + \rho_m V_m$$

Queste sono equazioni che riguardano la micromeccanica della lamina e non possono essere utilizzate per la progettazione, per la quale è necessario riferirsi a valori derivanti da sperimentazioni pratiche.

1.2.2 Confronto metalli/materiali compositi

Nella tabella 1.2.2.1 sono confrontate alcune proprietà dei materiali compositi rispetto alle stesse nei metalli.

Condition	Comparative behavior relative to metals
Load-strain relationship	More linear strain to failure
Notch sensitivity	
Static	Greater sensitivity
Fatigue	Less sensitivity
Transverse properties	Weaker
Mechanical property variability	Higher
Fatigue strength	Higher
Sensitivity to hydrothermal environment	Greater
Sensitivity to corrosion	Much less
Damage growth mechanism	In-plane delamination instead of through thickness cracks

Source: Ref 2

Tabella 1.2.2.1-Proprietà compositi-metalli

I metalli hanno tipicamente una buona duttilità, quando raggiungono un certo carico continuano a deformarsi senza prendere altro carico e rompersi immediatamente. Questo comportamento duttile dei metalli comporta due principali benefici: il materiale riesce a ridistribuire il carico in eccesso nel materiale circostante e permette una grande capacità di assorbire il carico (indicata dall'area sottesa dalla curva carico-allungamento). Il risultato è che un metallo sottoposto ad un impatto si deforma e non arriva subito alla rottura.

I compositi invece, sono relativamente fragili. Nel grafico di figura 1.2.2.1 è mostrato il confronto tra la curva carico-allungamento di un composito e una lega di alluminio. La fragilità dei materiali compositi li rende poco adatti alle sollecitazioni concentrate, come si nota dal grafico di figura 1.2.2.2. La principale conseguenza è l'incapacità dei compositi di resistere a urti senza accusare fratture nella matrice.

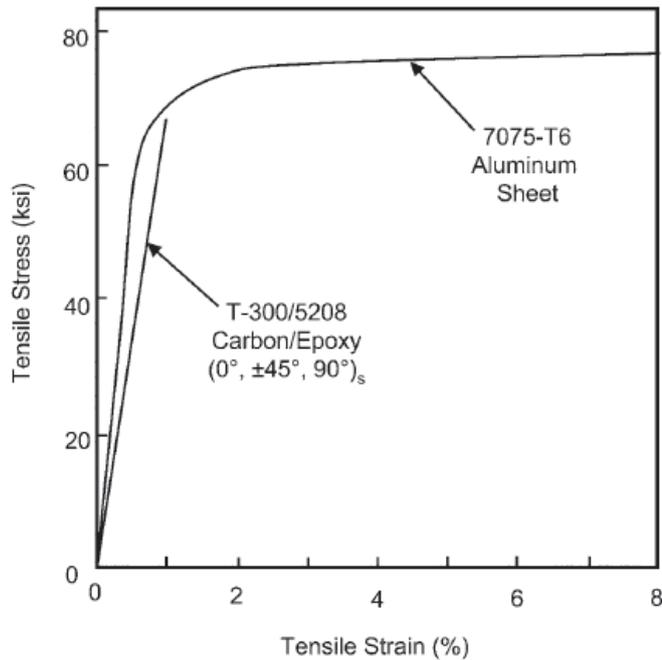


Figura 1.2.2.1-Confronto composito-lega di alluminio

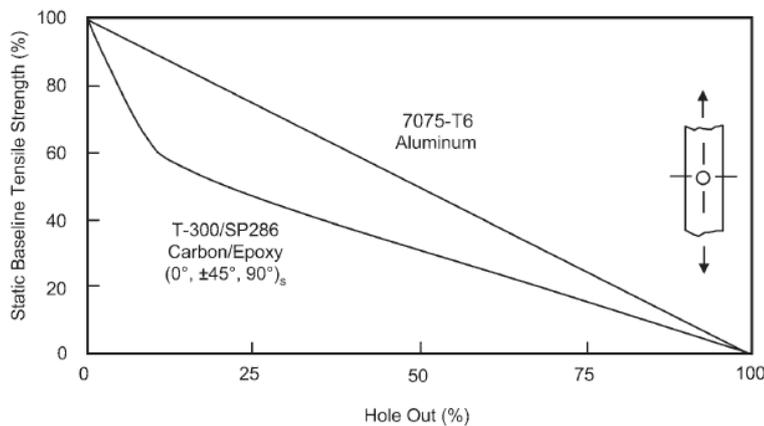


Figura 1.2.2.2-Grafico confronto fragilità compositi-lega Al

Altro comportamento piuttosto diverso tra metalli e materiali compositi è la resistenza a fatica. La resistenza a carichi ciclici è migliore nei compositi, in contrasto a quanto visto per la resistenza a rottura [3].

Nel grafico di figura 1.2.2.3 è mostrata la comparazione tra il comportamento a fatica di una lega di alluminio 7075-T6 e un laminato in composito con matrice epossidica e rinforzo in fibra di carbonio.

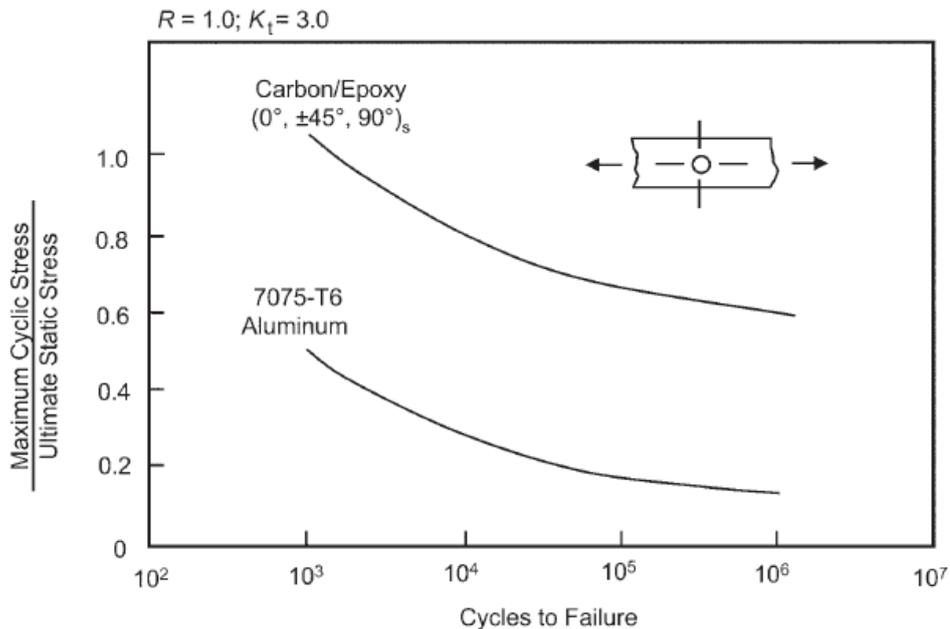


Figura 1.2.2.3-Confronto resistenza a fatica compositi-lega di Al

La resistenza a fatica di un composito è molto maggiore relativamente alla sua stessa resistenza a un carico statico.

Solitamente è richiesta una maggiore resistenza al carico statico che non a fatica. Per questo spesso per i compositi la resistenza a fatica non è un fattore critico di progetto come lo è per i metalli.

1.2.3 Vantaggi e svantaggi di compositi e metalli

I vantaggi dei materiali compositi sono molti, ad esempio, il peso ridotto, la possibilità di adattare la disposizione delle fibre per aumentare la resistenza e la rigidità, la lunga vita a fatica e la resistenza a corrosione. La resistenza specifica (resistenza/densità) dei materiali compositi ad alta resistenza è maggiore rispetto ad altre leghe metalliche impiegate ad esempio nel campo aerospaziale (Figura 1.2.3.1) [3].

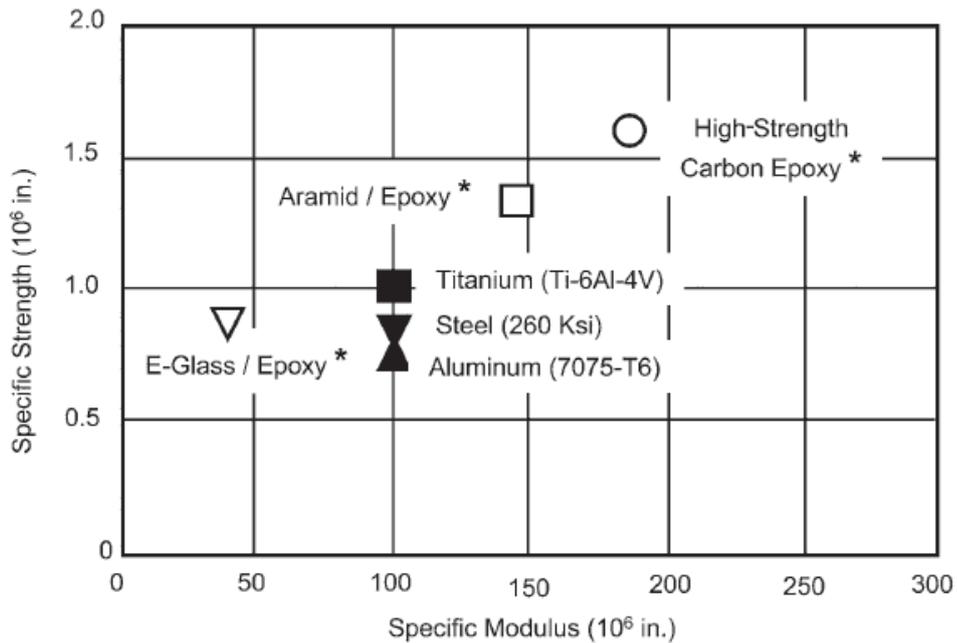


Figura 1.2.3.1-Confronto resistenza specifica

Questo si traduce in un grande vantaggio in termini di peso rispetto agli altri materiali e, di conseguenza, in minori consumi e possibilità di carico maggiori se utilizzati in campo automotive o aeronautico. In figura 1.2.3.2 è riportata una comparazione tra l'efficienza strutturale di una lega di titanio, una lega di alluminio e un composito.

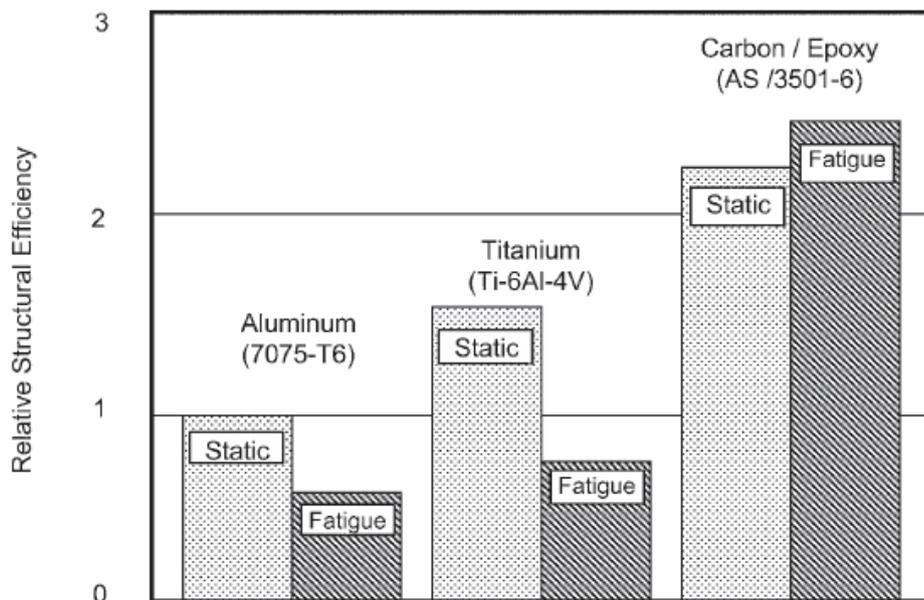


Figura 1.2.3.2-Confronto efficienza strutturale

Un aspetto negativo per quanto riguarda le leghe di alluminio è la

corrosione, che comporta costi elevati per la continua manutenzione di cui necessitano i componenti costruiti con tali leghe.

La resistenza alla corrosione dei compositi può rivelarsi un'ottima caratteristica per arrivare al contenimento dei costi di manutenzione, nonostante i costi più alti del materiale stesso.

I compositi in fibra di carbonio possono causare la corrosione dell'alluminio se le fibre sono poste a contatto con la superficie del metallo. Il problema può essere risolto ponendo degli strati isolanti tra i materiali.

La resistenza a fatica, come visto in precedenza, e come evidenzia il grafico di figura 1.2.3.3, non è un punto critico nella progettazione dei compositi rimanendo in un campo di valori ragionevole per le deformazioni.

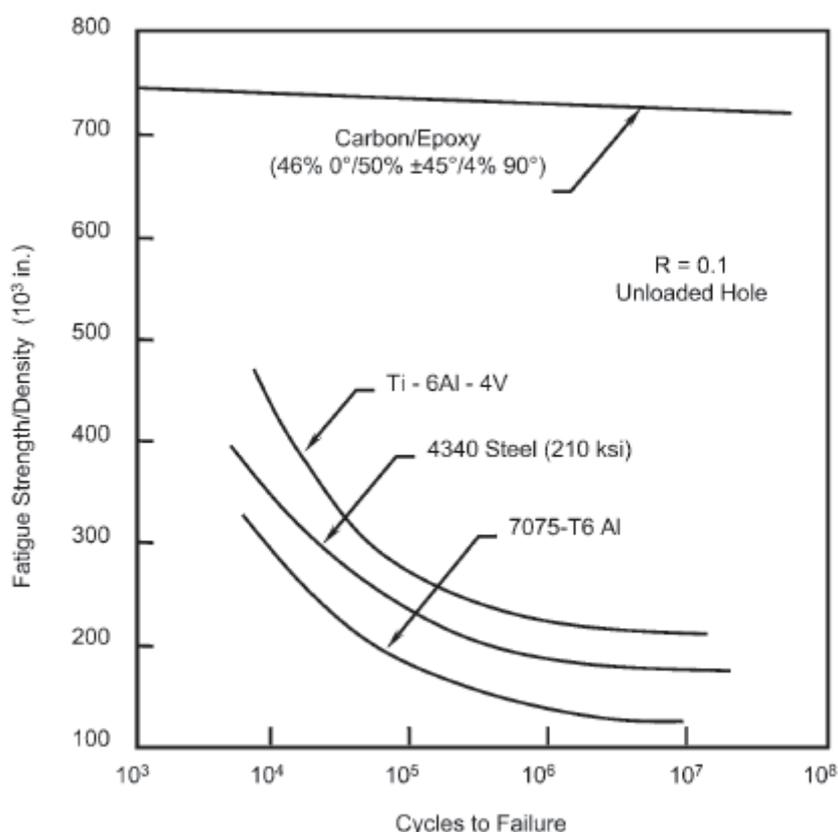


Figura 1.2.3.3-Grafico resistenza a fatica/densità-numero di cicli

Gli svantaggi dei materiali compositi comprendono l'alto costo delle materie prime e di produzione, effetti negativi derivanti da temperatura e umidità, scarsa resistenza in direzione trasversale alle fibre, fragilità e difficoltà nella riparazione rispetto ai metalli.

La temperatura è una componente critica per i compositi, tipicamente all'aumentare di questa si ha un calo delle proprietà fisico-meccaniche della matrice. Le fibre al contrario risentono delle basse temperature ma in maniera minore di quanto non faccia la matrice alle alte [3].

Un parametro fondamentale riguardante la temperatura e i compositi è la temperatura di transizione vetrosa. Questa è identificata come il punto di transizione tra un materiale solido e rigido e un materiale "morbido" e semi-flessibile. Al raggiungimento di questa temperatura la struttura polimerica è ancora intatta ma i legami formatisi nel ciclo di cura non sono più bloccati in posizione.

Perciò la temperatura di transizione vetrosa rappresenta la temperatura limite per l'utilizzo di un composito, al di là del quale le caratteristiche decadono rapidamente [3]. Siccome molte resine termoindurenti assorbono umidità e questa comporta un significativo abbassamento della temperatura di transizione vetrosa, la massima temperatura d'uso è bene considerarla 30°C inferiore alla nominale.

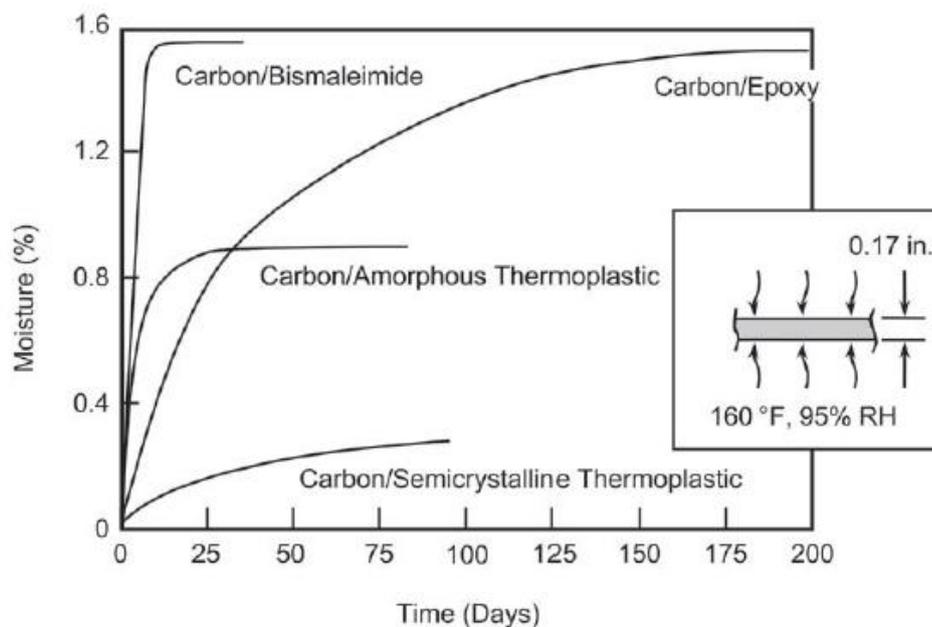


Figura 1.2.3.4-Assorbimento umidità in funzione del tempo dei compositi

L'assorbimento di umidità da parte dei compositi dipende, come si vede dal grafico di figura 1.2.3.4, dalla resina utilizzata nella matrice

e dall'umidità relativa.

Temperature elevate aumentano l'assorbimento di umidità. L'umidità assorbita provoca un veloce decadimento della proprietà meccaniche della matrice. Inoltre, l'umidità intrappolata all'interno della matrice, nel caso di temperature molto basse, può congelare e, aumentando di volume, creare delle cricche interne al materiale.

Riassumendo:

Materiale	Vantaggi	Svantaggi
Metalli	Duttilità elevata Isotropia Costo contenuto Facilità di riparazione Facilità di lavorazione Reperibilità	Peso elevato Ossidazione Manutenzione Scarsa resistenza a fatica
Compositi	Peso contenuto Look Ottima resist. a fatica Ottimo rapporto peso/resistenza Resistenza corrosione	Anisotropia Alto costo Scarsa duttilità Difficoltà riparazione Lavorazione complessa Fragilità

Si è quindi mostrato che i materiali compositi hanno alcuni punti deboli che ne limitano l'uso nelle applicazioni più generiche. Sono però quasi indispensabili in campi particolari dove è richiesta una grande resistenza unita ad un peso contenuto. Sono infatti largamente impiegati nel campo automotive, nell'industria aerospaziale e in quei settori dove è possibile affrontare investimenti più elevati per raggiungere le massime prestazioni.

1.3 Sheet moulding compound

1.3.1 Descrizione

Sheet Moulding Compound (SMC), letteralmente stampaggio di fogli di composito, sta a indicare quei materiali in fogli utilizzati per produrre componenti con tecnologia di pressoformatura.

I SMC sono molto conosciuti e molto utilizzati nel campo delle plastiche, solitamente rinforzati con fibra di vetro, mentre sono ancora tutto sommato poco utilizzati rinforzati da fibra di carbonio.

Quando sono rinforzati con fibre di carbonio vengono definiti CF-SMC, Carbon Fiber Sheet Moulding Compound.

Il SMC rinforzato è composto dalla resina e dalle fibre corte (chopped). Viene fornito in rotoli ed è protetto da due film che compattano sopra e sotto i fogli di materiale.

Una volta formato l'SMC è quindi un composito a fibre corte disposte casualmente.

I componenti in materiale composito che devono avere ottime caratteristiche strutturali vengono solitamente prodotti con rinforzo a fibre continue. I sheet moulding compound sono dei compositi a fibre corte solitamente considerati meno costosi e con performance minori rispetto ai laminati [6]. Possono però essere usati per formare componenti con forme complesse con la pressoformatura a caldo. Per ovviare al problema delle scarse caratteristiche sono stati studiati nuovi compositi, come ad esempio l'HexMC[®] dell'Hexcel Composites, facili da lavorare come i SMC ma con caratteristiche meccaniche più simili ai laminati quasi-isotropi [6]. I compositi laminati sono usati per piccoli volumi di produzione e per applicazioni che richiedono ottime caratteristiche meccaniche. I laminati presentano ottime caratteristiche meccaniche direzionali ma non risultano adatti a produrre forme tridimensionali troppo complesse. I preimpregnati non sono particolarmente adatti ad alti ratei produttivi, il processo infatti può essere difficilmente automatizzato [6].

I SMC invece permettono una produzione più semplice, veloce e, di

conseguenza, sono adatti ad alti ratei produttivi che portano a costi minori. Solitamente però, essendo rinforzati con fibra di vetro, non permettono grandi caratteristiche meccaniche.

Con l'inserzione di fibra di carbonio come rinforzo si è cercato di unire le ottime caratteristiche meccaniche dei prepregs con il basso costo di produzione e la possibilità di creare geometrie tridimensionali complesse dei SMC [6].

Questi SMC rinforzati con fibra di carbonio sono utilizzati tipicamente per parti che richiedono un alto rapporto resistenza/peso. Solitamente quindi si comparano le grandezze relative a questi materiali rendendole specifiche, cioè dividendole per la densità del materiale considerato.

Le proprietà dei SMC rinforzati con fibra di carbonio sono migliori rispetto ai SMC che utilizzano fibra di vetro per via delle caratteristiche meccaniche migliori delle fibre e perché, essendo le fibre di carbonio più rigide, quando vengono tagliate e poste all'interno del materiale rimangono lineari [6]. Nel caso delle fibre di vetro invece, essendo meno rigide, tendono ad arricciarsi rendendo le caratteristiche meccaniche meno omogenee nel pezzo.

È stato dimostrato [6] che le fibre con alto numero di filamenti nei SMC classici non portano a buone caratteristiche meccaniche. Infatti le fibre una volta tagliate non riescono a disperdersi efficacemente all'interno del foglio, il che comporta la scarsa impregnazione di resina delle fibre stesse. Si è però visto che in materiali con fibre più rigide, ad esempio l'Hexcel HexMC[®], si possono utilizzare fibre con maggior numero di filamenti (fino a 60K).

Sono stati svolti studi per misurare la resistenza e l'elasticità dei Sheet Moulding Compound. In fase di studio è invece il comportamento del materiale a seconda della direzione considerata, cioè studi sull'isotropia o anisotropia dei SMC. Abbiamo visto che la maggior parte dei materiali compositi, sicuramente quelli a fibre lunghe, sono considerati anisotropi. Infatti, a seconda che si considerino le caratteristiche lungo la direzione delle fibre o perpendicolarmente ad esse, le proprietà cambiano sensibilmente. Per i compositi a fibre corte invece è più complesso stabilire se il

comportamento sia isotropo o meno. Il materiale non è omogeneo e ciò porterebbe a pensare il materiale come anisotropo, però intuitivamente, pensando che le fibre corte si vanno a distribuire in direzioni casuali all'interno del componente in SMC e, considerando il pezzo nel suo insieme, il materiale potrebbe mostrare un comportamento isotropo.

Il modulo di elasticità di componenti in composito formati da resina epossidica e fibra di carbonio prodotti con pressofusione a caldo di preimpregnati triturati (chopped) può essere misurato in diversi modi. Si è provato [4] che il modulo di questi materiali è alto tanto quanto quello dei materiali quasi-isotropi a fibra continua. Però, per via della natura non omogenea dei materiali a fibra discontinua, si possono avere variazioni riguardanti il modulo che possono arrivare anche al 19% nella misura tramite estensimetri. Questo fenomeno parrebbe essere legato principalmente alla variabilità del processo di produzione ma, la variazione dei valori di resistenza a rottura non arriva a tali valori ma si attesta attorno al 9%. Per valutare se questa variazione è dovuta alla tecnica di misura e non ad una vera disomogeneità delle caratteristiche del materiale, sono stati svolti studi e prove di trazione cambiando sistematicamente la lunghezza e la posizione degli estensimetri di misura [4]. Le misure sono poi comparate tra loro, con quelle rilevate da estensimetri multipli posti lungo la lunghezza e sulle facce opposte dei provini. Da queste prove si è evidenziato che il modulo di elasticità medio dei provini testati è stato di 42,0GPa, con un range che andava da 31,7GPa a 51,8MPa [4].

I risultati delle sperimentazioni mostrano che il materiale subisce forti variazioni di deformazione superficiale, sia longitudinalmente che trasversalmente su una tipica piastra da prova di trazione. Queste deformazioni non sembrano essere collegate direttamente all'orientazione dei chips di composito in superficie, ma sono il risultato delle proprietà eterogenee del "laminato" su tutto il suo spessore. Da questi test è anche stato mostrato [4] che le ampie variazioni nei risultati riguardanti il modulo di elasticità non sono attribuibili completamente al processo di produzione dei componenti e, di conseguenza, alle caratteristiche diverse da campione a

campione o da lotto di produzione a lotto. Le variazioni sono infatti dovute alla variabilità delle caratteristiche all'interno di uno stesso provino dovute alla natura della sottostruttura del materiale [4].

Si sa quindi che i SMC con rinforzo in carbonio possono vantare proprietà meccaniche molto simili ai laminati da prepregs unite al vantaggio della facilità di produzione per pressoformatura. Mostrano però un comportamento piuttosto disomogeneo da pezzo a pezzo dovuto alle caratteristiche interne del materiale stesso.

In letteratura sono inoltre presenti studi sulla dipendenza delle caratteristiche di resistenza meccanica e rigidità dei SMC rinforzati con fibra di carbonio dalla lunghezza delle fibre utilizzata [5].

Sono state studiate le caratteristiche meccaniche dei SMC con fibra di carbonio per quanto riguarda la resistenza alla trazione, alla compressione, alle flessione e per quanto riguarda il modulo elastico.

I risultati sono utilizzabili per confrontarli con quelli derivanti dalle prove sul materiale utilizzato nello studio. Infatti il materiale HexMC[®] è un SMC con parte di rinforzo in fibra di carbonio, la lunghezza delle fibre è di circa 50mm.

Trazione

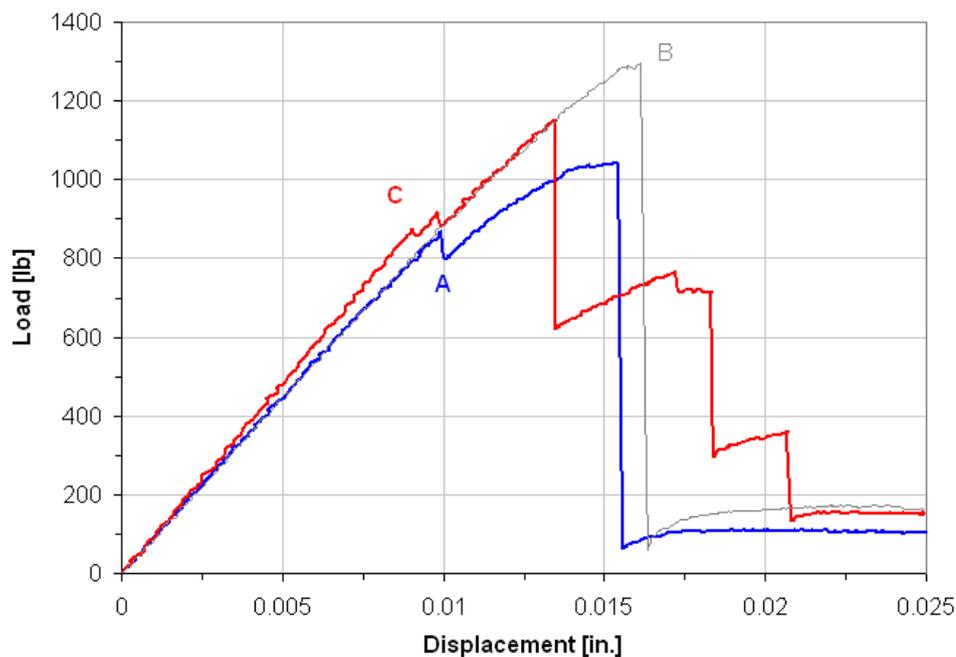


Figura 1.3.1.1-Andamenti a trazione provini SMC

In figura 1.3.1.1 sono mostrati tre tipici comportamenti a trazione di provini in SMC rinforzato con fibra di carbonio.

Il comportamento di tipo A presenta un piccolo scalino nella curva, quindi un piccolo cedimento, per poi arrivare alla rottura finale netta del provino. Non è ancora chiaro a cosa sia dovuto e come avvenga il primo piccolo cedimento evidenziato dalla curva.

Il comportamento di tipo B non presenta il primo cedimento, il provino arriva linearmente alla rottura finale.

Il comportamento di tipo C mostra un cedimento nel tratto lineare poco accentuato e una rampa di decrescita del carico dopo la rottura finale a gradini.

Solitamente tutti i provini esibiscono una evidente delaminazione lungo tutto lo spessore con la separazione dei vari chips di composito [5].

Per quanto riguarda la rottura, ogni provino mostra un comportamento diverso a seconda della lunghezza delle fibre nei chips.

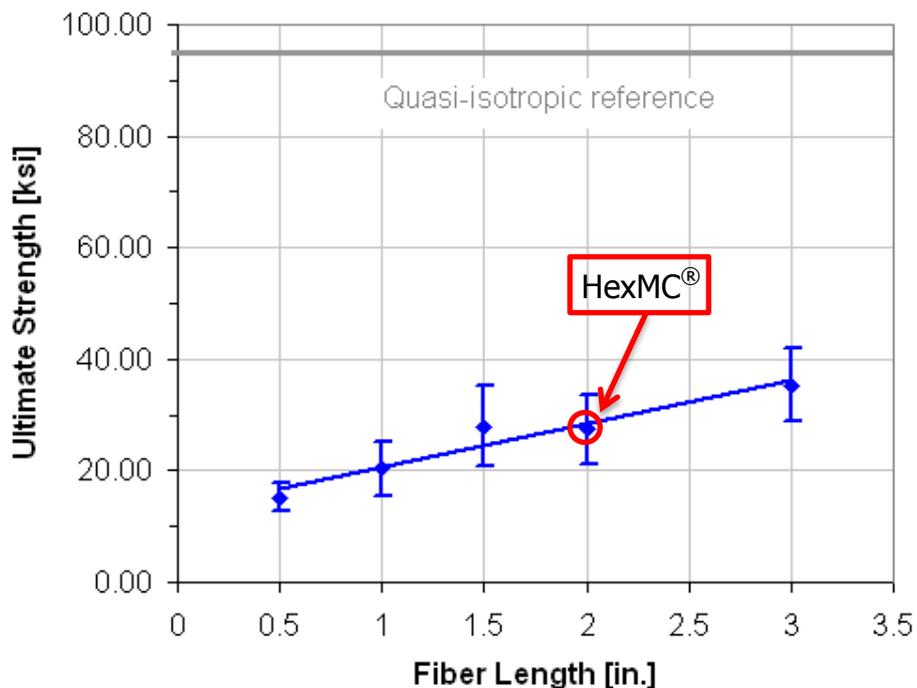


Figura 1.3.1.2-Grafico carico di rottura-lunghezza fibre

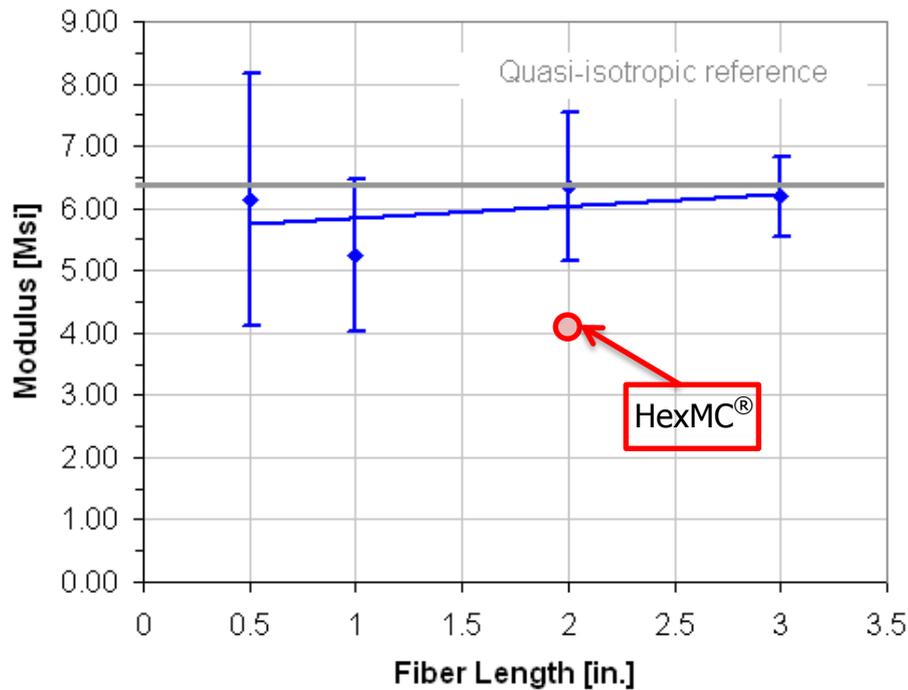


Figura 1.3.1.3-Grafico modulo di elasticità-lunghezza fibre

Nei grafici di figura 1.3.1.2 e 1.3.1.3 sono mostrati rispettivamente il carico di rottura e il modulo di elasticità misurati in funzione della lunghezza delle fibre di rinforzo utilizzate nel chopped.

Il carico di rottura cresce linearmente con la lunghezza delle fibre ma rimane sensibilmente minore di quello di un laminato quasi-isotropo di riferimento.

Il modulo di elasticità mostra un aumento minore con l'aumento della lunghezza delle fibre, ma si attesta sempre su valori paragonabili a quelli di un laminato quasi-isotropo di riferimento.

Sui grafici sono evidenziati anche i punti corrispondenti ai valori del materiale utilizzato per i componenti in studio (HexMC®), il materiale infatti è rinforzato con fibre lunghe 50mm, corrispondenti a circa 2 pollici. L' HexMC® ha un valore di carico di rottura fornito pari a circa 200MPa (corrispondenti a circa 30ksi), si nota perciò che i dati confermano i valori di resistenza. Il valore di modulo di elasticità dell' HexMC® invece risulta minore da quello registrato in questo studio, questo può probabilmente essere dovuto alla differente resina utilizzata nella matrice del materiale testato.

Compressione

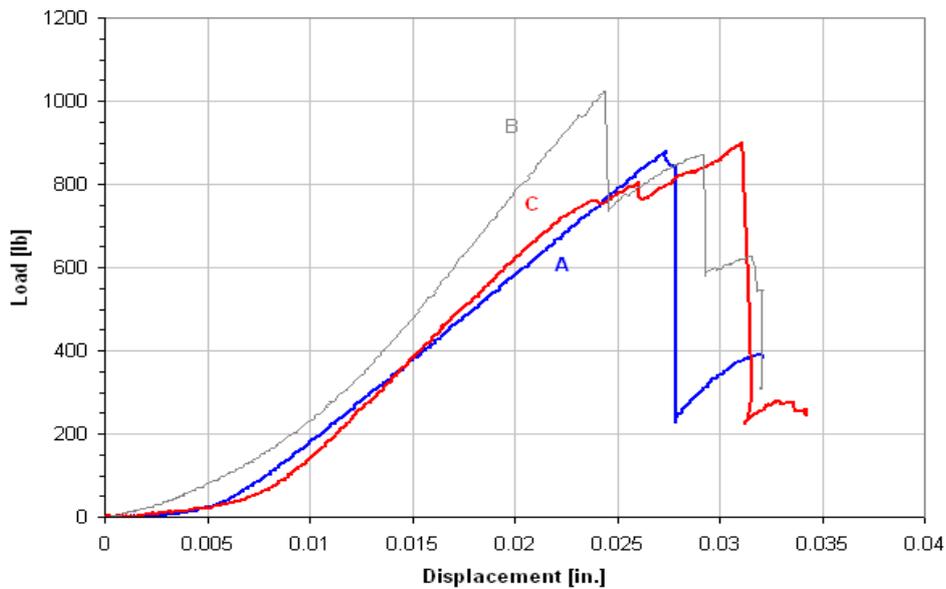


Figura 1.4.1.4-Andamenti a compressione provini in SMC

Nel grafico di figura 1.4.1.4 sono mostrati tre tipici comportamenti di provini in SMC sottoposti a compressione. Si nota che i comportamenti sono simili a quelli evidenziati nella prova di trazione. Si ha il comportamento con un primo piccolo cedimento e in seguito la rottura finale (C), il comportamento lineare fino alla rottura finale (A) e il comportamento con scarico a gradini (B).

Tutti i provini mostrano una rottura per delaminazione e rottura delle fibre [5].

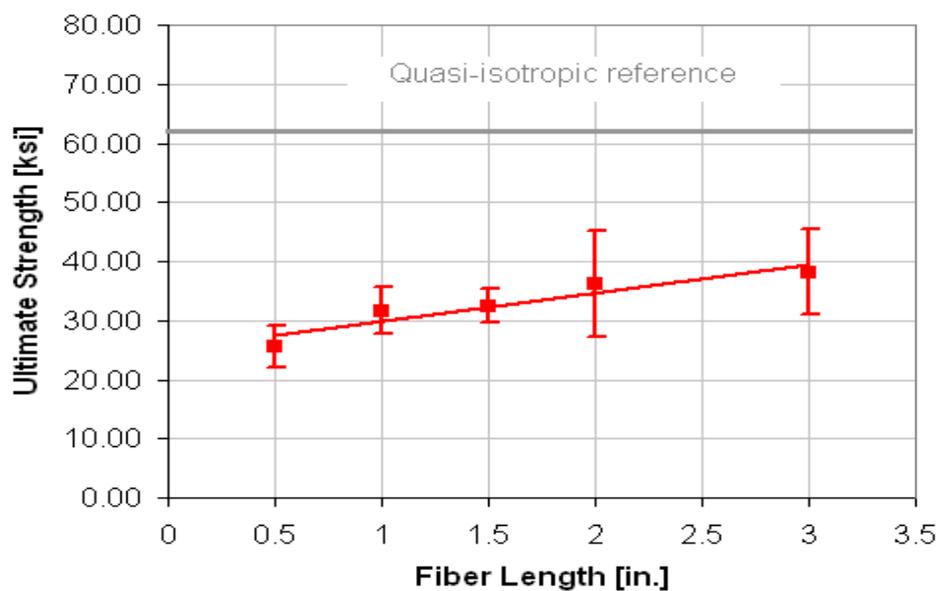


Figura 1.4.1.5-Carico di rottura a compressione-lunghezza fibre

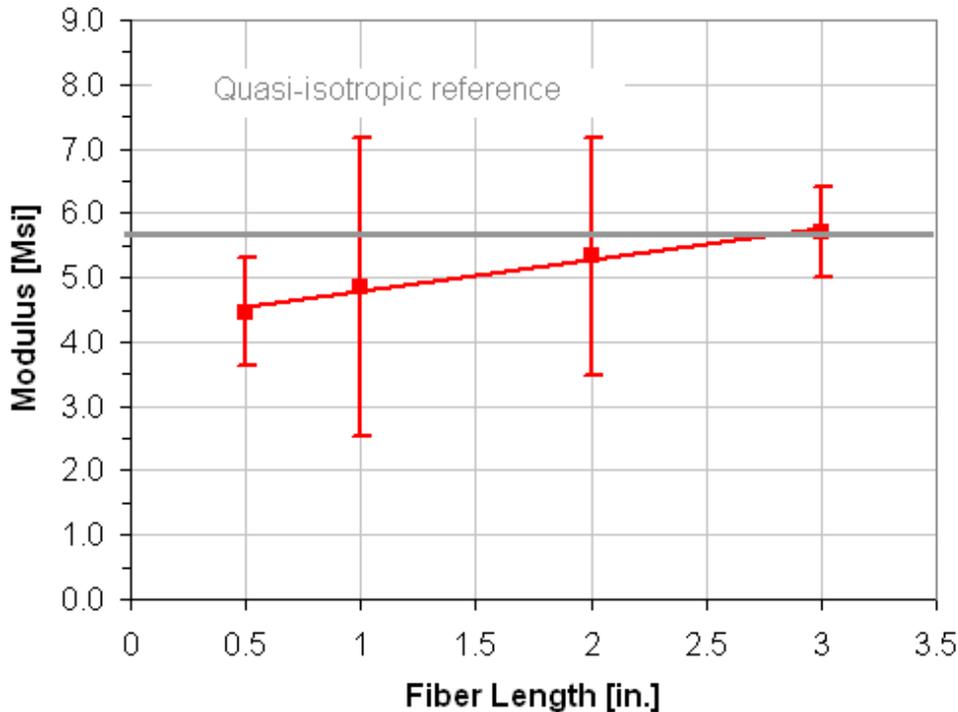


Figura 1.4.1.6-Modulo di elasticità a compressione-lunghezza fibre

Nei grafici di figura 1.4.1.5 e figura 1.4.1.6 sono mostrati gli andamenti dei valori di carico di rottura a compressione e modulo di elasticità in funzione della lunghezza delle fibre.

Gli andamenti sono simili al caso della trazione, si nota che i valori di carico di rottura sono maggiori che nel caso della trazione e la crescita dei valori di modulo di elasticità è più marcata.

Si nota perciò che, in caso di compressione e trazione, i moduli di elasticità sono molto simili a un laminato quasi-isotropo mentre i valori di carico di rottura rimangono abbastanza al di sotto di quelli di riferimento del laminato [5].

Possiamo notare da questi grafici che, considerando ad esempio una lunghezza delle fibre pari a quelle del materiale in studio (50mm=2inch), la resistenza a compressione risulta maggiore di quella a trazione. Dall'analisi FEM descritta in seguito e dalle prove di compressione eseguite sui componenti in HexMC® si registrerà questo comportamento. Gli studi in letteratura confermano perciò il comportamento che verrà registrato da questo studio. Al contrario dei tipici laminati a fibre continue i SMC presentano la resistenza a compressione maggiore di quella a trazione.

Flessione

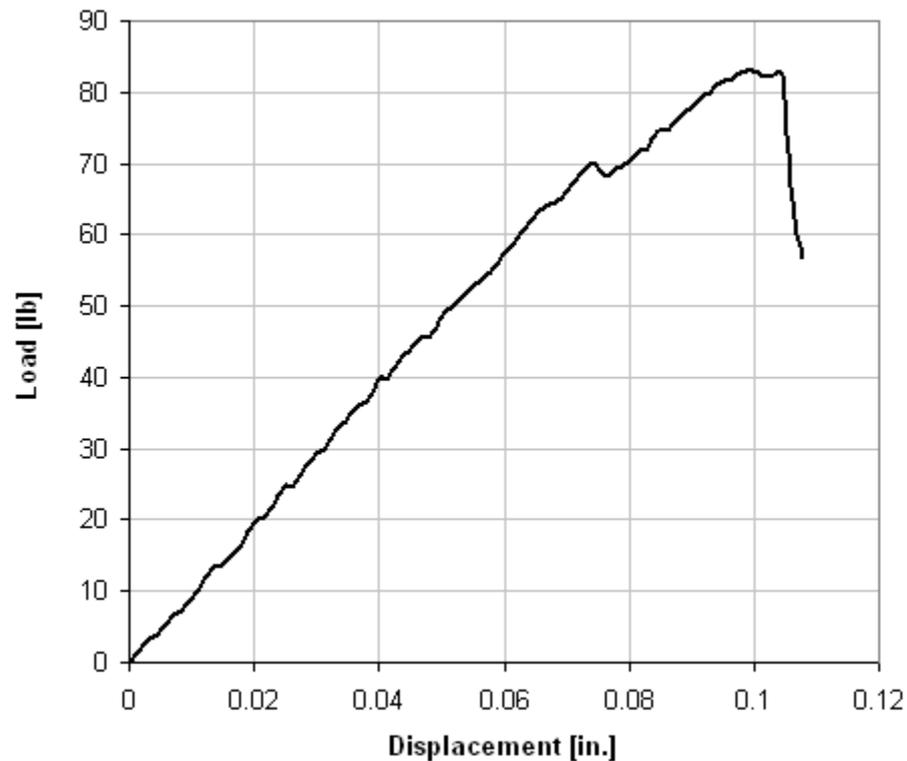


Figura 1.4.1.7-Andamento a flessione provino in SMC

In figura 1.4.1.7 è mostrato un tipico comportamento a flessione di un SMC. Per i compositi rinforzati con fibre più corte la curva tende a mostrare un comportamento meno lineare rispetto a compositi rinforzati con fibre lunghe [5]. I provini arrivano a rottura sulla superficie opposta all'applicazione del carico. In qualche caso la rottura non avviene esattamente sotto al punto di applicazione del carico ma in un punto leggermente spostato rispetto all'asse verticale di carico. Questo fenomeno, non presente nei laminati a fibra continua, può essere spiegato considerando la natura eterogenea del materiale [5].

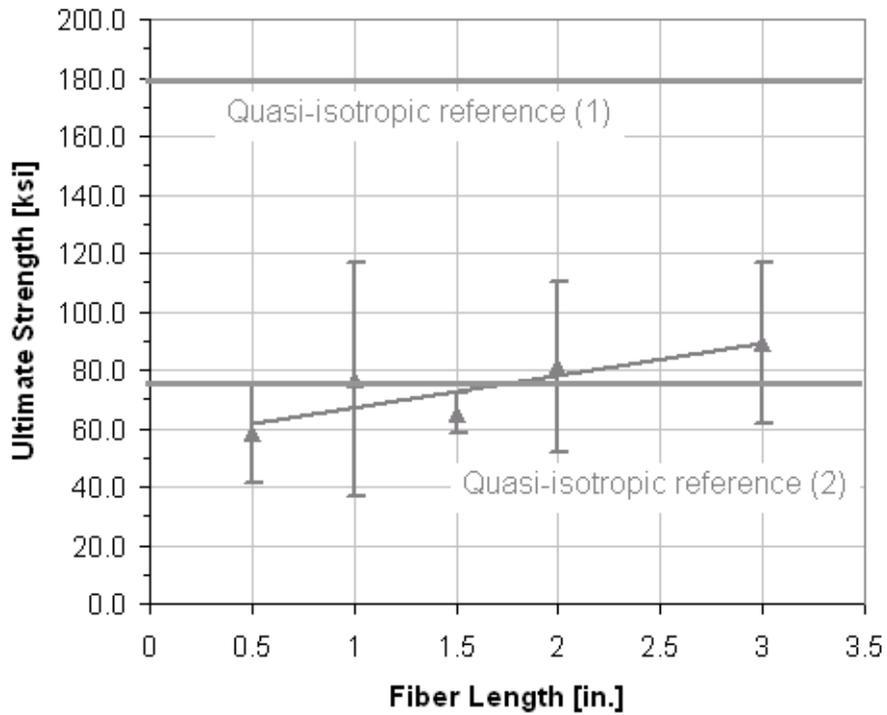


Figura 1.4.1.8-Carico di rottura a flessione-lunghezza fibre

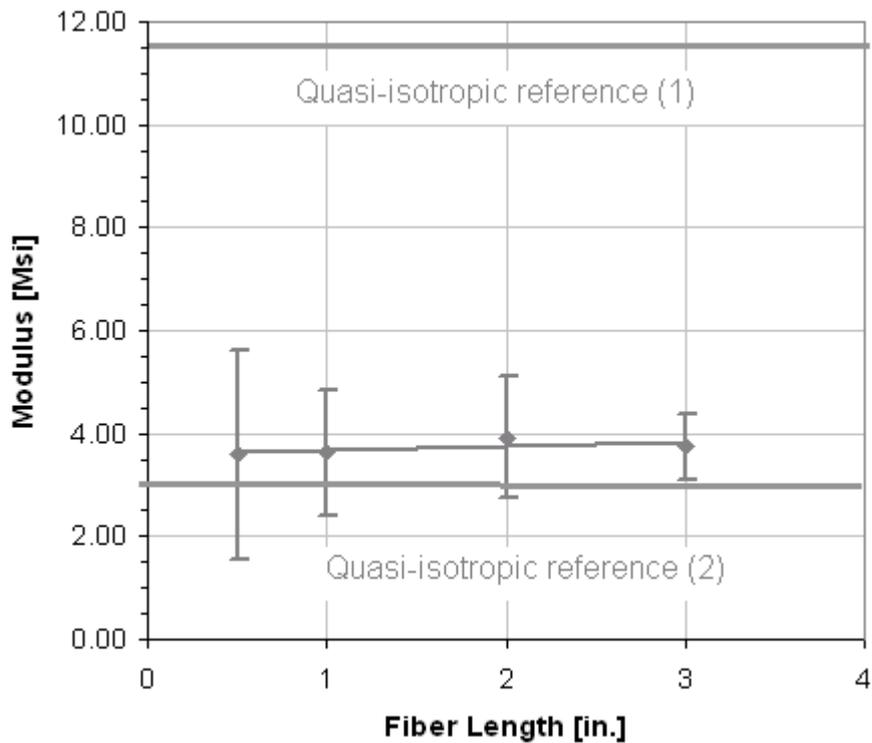


Figura 1.4.1.9-Modulo di elasticità a flessione-lunghezza fibre

Nei grafici di figura 1.4.1.8 e 1.4.1.9 sono mostrati i valori di carico di rottura a flessione e modulo di elasticità in funzione della

lunghezza delle fibre, derivanti dalle prove di flessione.

In questo caso la lunghezza delle fibre influenza fortemente i valori di carico di rottura, mentre i valori di modulo di elasticità sembrano essere meno influenzati.

Sono stati svolti studi anche sulla caratterizzazione della distribuzione casuale dei chips di composito nei SMC [5].

Possono essere utilizzati molti metodi, distruttivi o meno, per determinare la direzione dei chips e l'effettiva natura casuale di questi compositi.

Un metodo, distruttivo, può essere l'analisi visiva di un singolo chip nello spessore del pezzo. Si richiede perciò l'analisi della sezione del componente. L'orientamento del chip è stimato basandosi sulla forma di ogni singola fibra: fibre allineate in direzione 0° mostrano una sezione pseudo-circolare, mentre fibre disposte a 90° mostrano una sezione a ellissoide. Esempio in figura 1.4.1.10.

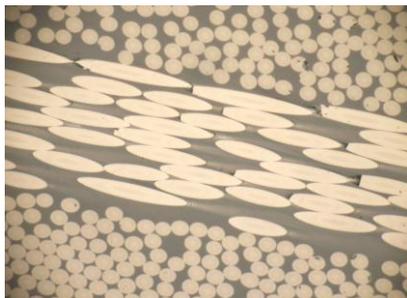


Figura 1.4.1.10-Esempio vista in sezione per caratterizzazione della direzione delle fibre

Il grado di deviazione di forma da circolare a ellittica è un buon indicatore dell'orientazione delle fibre. Comunque questo non risulta sufficiente a determinare la direzione dell'orientazione, infatti fibre disposte ad angoli come, ad esempio, -45° e 45° , mostrano in entrambi i casi una forma ellittica. Una soluzione può essere l'osservazione dei riflessi delle fibre immerse nella resina, questo metodo non permette però di determinare l'orientazione delle fibre disposte con angoli inferiori a 30° . Oltre a questo le fibre disposte con angoli al di sotto di 20° viste in sezione mostrano la stessa geometria quasi-circolare delle fibre disposte trasversalmente [5].

Un altro metodo che può essere utilizzato per determinare

l'orientazione delle fibre è l'analisi visiva delle superfici esterne di pannelli o provini di trazione. Questo metodo è non distruttivo ma, ovviamente, permette di definire l'orientazione soltanto dei chips esterni. Si assume, perciò, la distribuzione esterna come rappresentativa di quella interna.

Si scattano perciò delle immagini del pezzo da quattro diverse angolazioni che poi vengono processate con un filtro di campo. Si determina quindi l'orientazione delle fibre sfruttando le proprietà che rendono le fibre riflettenti e la matrice opaca (Figura 1.4.1.11).

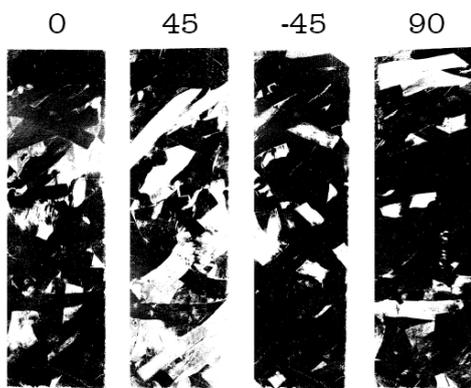


Figura 1.4.1.11-Esempio di immagini di provini processate

Si può aumentare l'accuratezza del metodo scattando più immagini con angolazioni intermedie. Utilizzando un software che analizzi le aree scure e chiare delle immagini si possono ricavare grafici come quello di figura 1.4.1.12, dove si stima la percentuale di fibre orientate secondo uno specifico angolo [5].

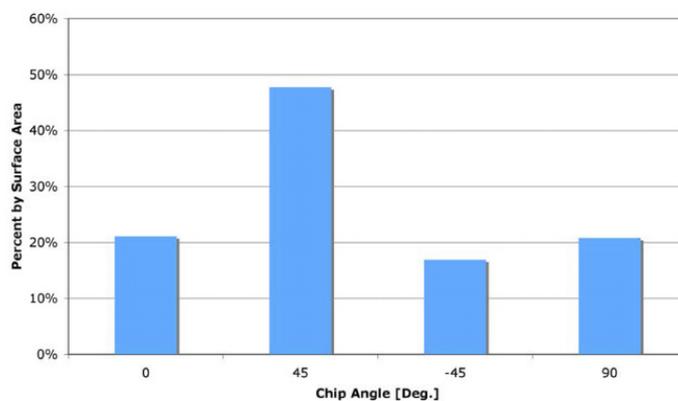


Figura 1.4.1.12-Percentuale di fibre orientate

Un metodo per verificare l'eventuale natura quasi-isotropa di questi

materiali può essere quello di prelevare dei campioni di materiale da un pannello secondo tre diverse direzioni, come mostrato in figura 1.4.1.13.

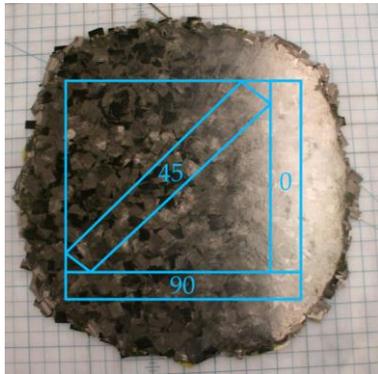


Figura 1.4.1.13-Direzioni di prelevamento campioni

In questo modo, svolgendo le prove su ogni campione, si possono considerare le differenze nei risultati ottenuti sui campioni prelevati in direzioni diverse. Sono state svolte varie prove in questo modo e paiono presentare una discreta ripetibilità, il che porta a pensare che un pannello in SMC possa mostrare un comportamento pseudo-isotropo [5]. Non sono però purtroppo presenti dati nella letteratura selezionata.

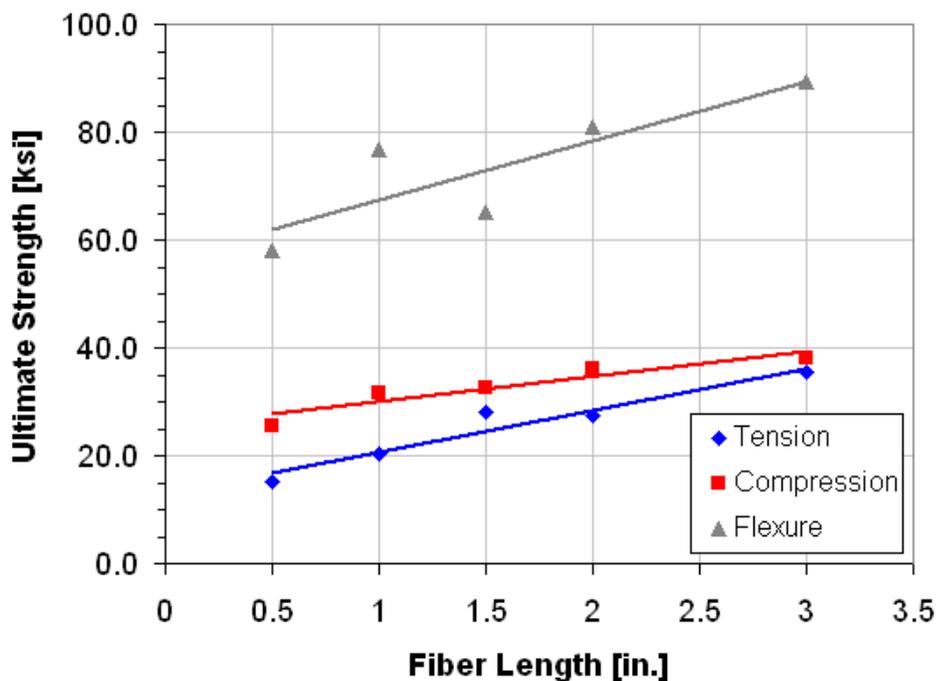


Figura 1.4.1.14-Andamenti carichi rottura-lunghezza fibre

In figura 1.4.1.14 sono riassunti gli andamenti dei carichi di rottura

a trazione, compressione e flessione in funzione della lunghezza delle fibre.

È evidente che la resistenza media cresce linearmente con la lunghezza dei chips. I chip più lunghi mostrano una resistenza da 1,4 a 2 volte maggiore rispetto a quelli di lunghezza minima. Dal grafico è anche chiaro che la resistenza a flessione beneficia maggiormente della lunghezza delle fibre [5].

Si nota anche che la resistenza a flessione è decisamente maggiore delle altre, seguita dalla resistenza a compressione e, per ultima, dalla resistenza a trazione. Questo comportamento differisce da quello dei laminati a fibre continue, come ad esempio da quello del laminato quasi-isotropo di riferimento, che mostra una resistenza a compressione bassa e la resistenza a trazione e flessione comparabili.

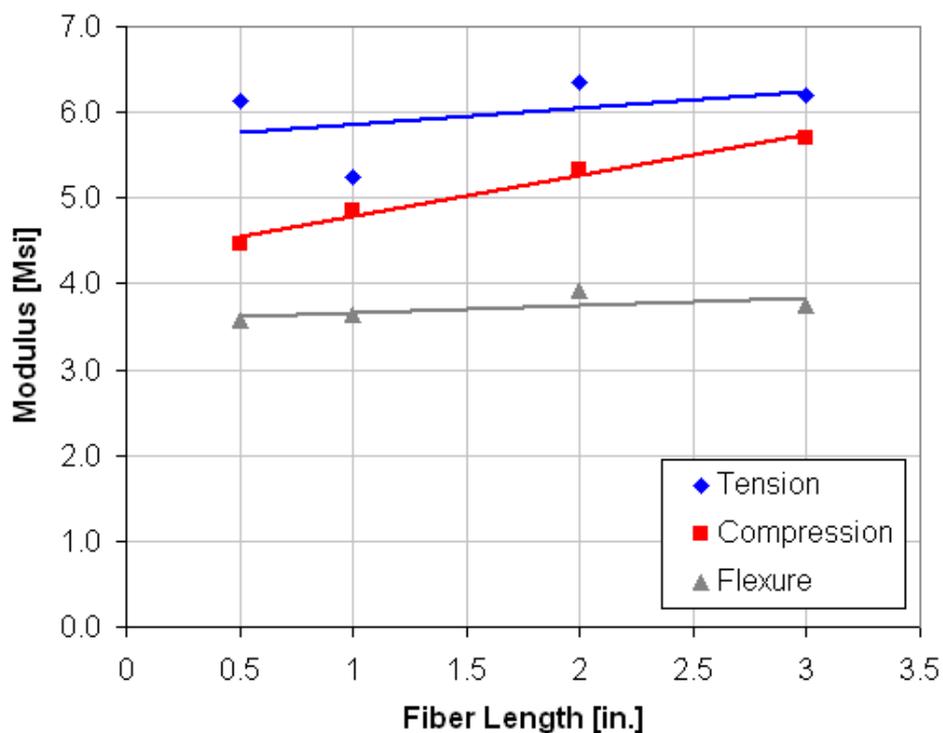


Figura 1.4.1.15-Andamenti modulo di elasticità-lunghezza fibre

In figura 1.4.1.15 sono riassunti gli andamenti dei moduli di elasticità in funzione della lunghezza delle fibre. Anche in questo caso i moduli crescono linearmente con la lunghezza delle fibre e hanno valori meno distanziati tra le varie prove rispetto ai carichi di

rottura. Il valore maggiore del modulo, con la lunghezza massima delle fibre, risulta maggiore da 1 a 1,2 volte rispetto a quello con la lunghezza minima.

La lunghezza delle fibre e dei chopped ha quindi una grande influenza per quanto riguarda la resistenza a trazione, flessione e compressione. Influenza in modo minore invece i valori di modulo di elasticità. In generale il carico di rottura è abbastanza minore di quello di un laminato quasi-isotropo.

Dallo studio [5] si può dedurre che sia conveniente utilizzare lunghezze delle fibre piuttosto marcate, tuttavia, utilizzando fibre lunghe, possono insorgere problemi per quanto riguarda la distribuzione e la distorsione delle stesse durante il processo produttivo.

Pannelli prodotti con fibre discontinue mostrano in piano un comportamento quasi-isotropo, anche se in certe direzioni può mostrare risultati con scarsa ripetibilità.

Con l'automatizzazione dei processi di produzione si possono avere miglioramenti delle caratteristiche data la possibilità di una distribuzione più omogenea dei chips nello stampo e la possibilità di introdurre meno impurità nello stesso.

Utilizzando resine specifiche e appositi cicli di cura si può avere un riempimento ottimale dello stampo evitando la presenza di vuoti.

1.3.1.1 Caratteristiche HexMC®

L'HexMC® è un materiale composito ad alte prestazioni per stampaggio che può essere assimilato a un SMC. È ideale per alti volumi di produzione di particolari con forme complesse ed è specificamente progettato per la pressoformatura a caldo. Ha la particolarità di essere composto da circa il 60% in volume di fibre di carbonio lunghe 50mm circa, il che comporta una notevole resistenza meccanica [i]. La resina è epossidica e richiede un tempo di ciclo di cura piuttosto contenuto, tipicamente 15 minuti a 120°C, in funzione dello spessore del pezzo. Come detto si possono produrre forme complesse e, se il componente da produrre prevede l'applicazione di inserti, questi possono essere integrati durante il processo di pressoformatura inserendoli all'interno dello stampo. L'HexMC® è particolarmente adatto per la produzione di componenti



che debbano essere leggeri, avere buone caratteristiche meccaniche e qualora sia necessaria la facilità di produzione. Sono quindi adatti a componenti da utilizzare in ambito sportivo, per l'automotive così come per altri ambiti industriali.

L'HexMC® rende possibile la produzione di componenti in composito dove [i]:

- Sia richiesta una forma tridimensionale complessa che potrebbe essere raggiunta difficilmente con dei laminati.
- Precedentemente fosse possibile produrre componenti solamente in metallo.
- Siano richiesti grandi cambiamenti di spessore.
- Sia richiesto l'inserimento di componenti in altro materiale direttamente all'interno del pezzo.
- Sia richiesta l'automatizzazione del processo (più semplice con la pressoformatura a caldo rispetto alla laminazione).
- Sia richiesto non avere scarti di materiale.

Di seguito si riporta un grafico (Figura 1.3.1.1.1) riportante un confronto dei valori di densità di HexMC® e altri materiali [ii].

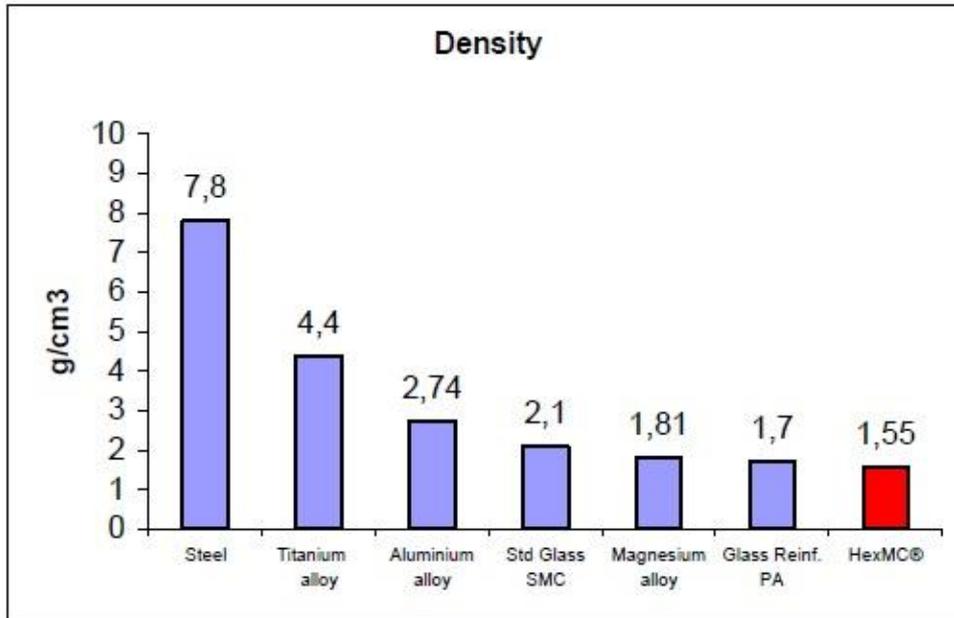


Figura 1.3.1.1.1-Comparativa valori di densità

Si nota che la densità del composito risulta circa il 20% di quella di un acciaio, circa il 50% di quella di una lega di alluminio e di circa un 8% inferiore a quella di un SMC rinforzato con fibra di vetro.

Nel grafico di figura 1.3.1.1.2 invece sono confrontati i valori di modulo di elasticità specifico e resistenza specifica [ii].

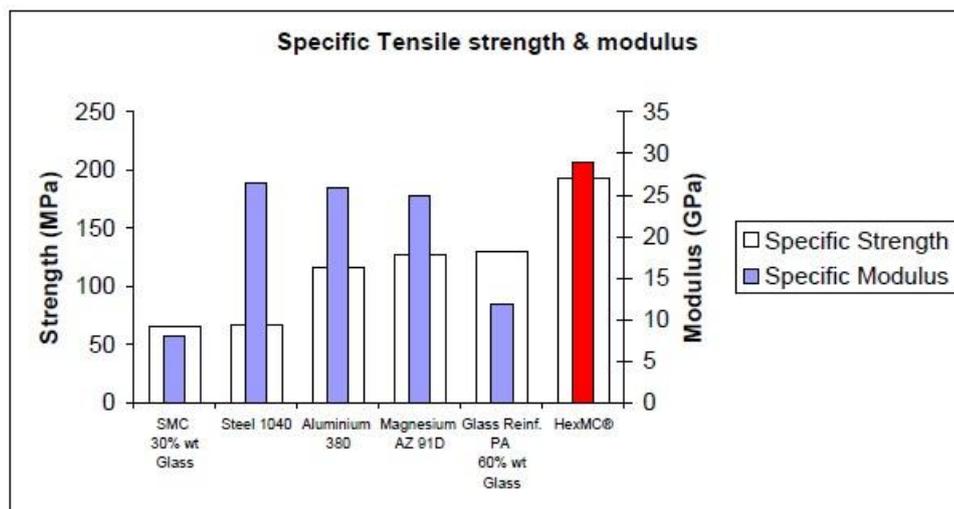


Figura 1.3.1.1.2-Comparativa resistenza a trazione e modulo di elasticità

Si denota l'elevato valore del modulo di elasticità specifico dell'HexMC® che risulta confrontabile con quello di un acciaio, di circa un 40% maggiore di quello di una lega di alluminio e circa 1,5 volte maggiore di quello di un SMC rinforzato con fibre di vetro.

Per quanto riguarda la resistenza specifica si può notare come sia decisamente elevata rispetto a tutti gli altri materiali.

Nel grafico di figura 1.3.1.1.3 viene invece riportato un confronto tra l' HexMC[®] e altri materiali ad alte prestazioni, solitamente utilizzati in campo aeronautico [ii].

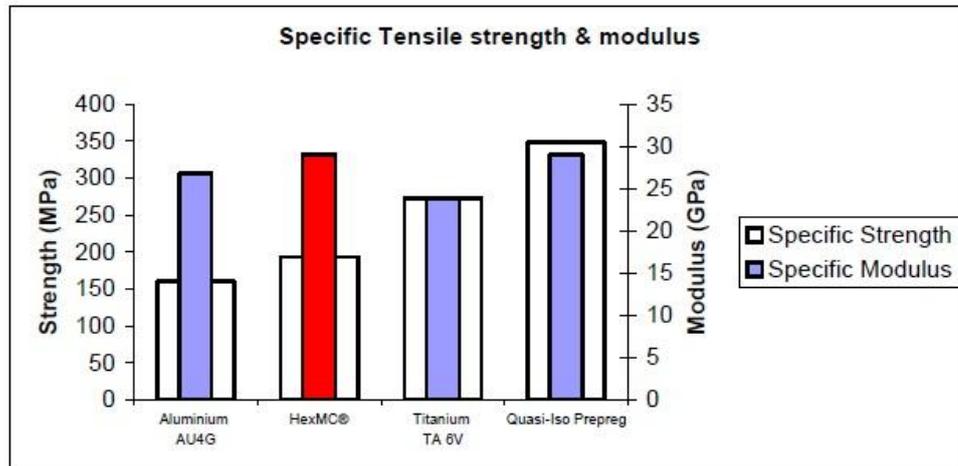


Figura 1.3.1.1.3-Comparativa con materiali ad alte prestazioni

Si nota come il modulo di elasticità specifico sia confrontabile con quello di un preimpregnato con comportamento quasi-isotropo, risulta invece maggiore della lega di titanio TA-6V e della lega di alluminio AU4G.

La resistenza specifica invece si attesta ad un valore maggiore della lega di alluminio, minore della lega di titanio e del laminato quasi-isotropo.

Da questi dati, forniti dall'azienda produttrice (Hexcel), si deduce che il grande vantaggio di questo materiale è l'ottimo rapporto caratteristiche meccaniche/peso. Oltre a queste anche la facilità di lavorazione e automatizzazione del processo unita alla possibilità di creare componenti con forme complesse.

1.3.2 Metodi di produzione SMC

I materiali detti Sheet Moulding Compound sono lavorati nella grande maggioranza dei casi con tecnologia di pressofusione a caldo.

Il materiale in sé, fornito in rotoli, viene prodotto come da schema di figura 1.3.2.1.

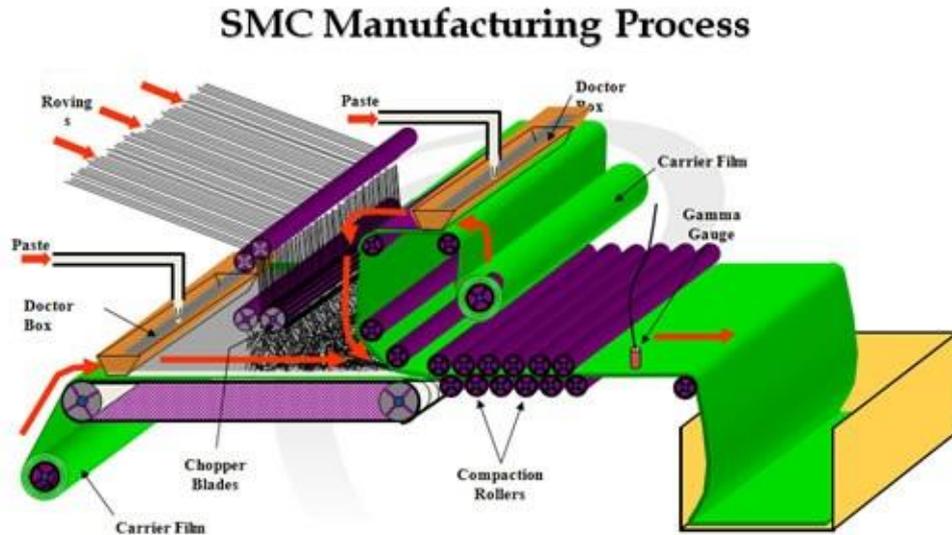


Figura 1.3.2.1-Schema produzione fogli di SMC

Come si nota dallo schema, ci sono due supporti per i rotoli di film protettivo. Sui film, che vengono srotolati, viene posta la resina con un collante. Tra i due film vengono interposte le fibre, queste vengono tagliate (chopped) subito prima di entrare a far parte del composito. In seguito l'insieme dei due film, della resina e delle fibre viene sottoposto a una compattazione passando attraverso una serie di rulli. Si avranno quindi i rotoli di SMC finito. Per mantenere le caratteristiche della resina i rotoli devono essere mantenuti a temperatura piuttosto bassa (circa -20°C) come avviene per i preimpregnati.

Per quanto riguarda l'utilizzo di questi materiali si indica di seguito un metodo di processo consigliato utilizzando la pressofusione a caldo [ii].

	<p>Si tagliano delle parti di fogli di composito dai rotoli di SMC. La quantità e la forma dei tagli varia a seconda delle dimensioni e dello spessore del componente da produrre.</p>
	<p>Si prepara quindi la carica di composito per lo stampo utilizzando i pezzi tagliati.</p>
	<p>Si pone la carica all'interno dello stampo, il quantitativo varia in base al componente da produrre, allo spessore e alla forma che dovrà raggiungere. Gli stampi sono solitamente in acciaio e hanno ricevuto un trattamento superficiale (cromatura) per migliorare la qualità superficiale dei pezzi.</p>
	<p>Viene poi chiuso lo stampo fino alla pressione richiesta, che può essere solitamente tra i 50 e 150 bar. Si lascia lo stampo chiuso per il tempo necessario al completamento del ciclo di cura alla temperatura prefissata (tra i 110°C e i 150°C). Il tempo di cura varia in funzione della temperatura utilizzata e dello spessore del pezzo.</p>
	<p>Al termine del ciclo di cura si apre lo stampo e si può estrarre il pezzo formato manualmente o con l'ausilio di eiettori previsti all'interno dello stampo.</p>

1.4 Metodi di produzione di materiali compositi

Il metodo di produzione che porta solitamente ad avere le caratteristiche meccaniche migliori è la laminazione con la successiva cura in autoclave. Il metodo utilizzato per la produzione dei componenti oggetto di questo elaborato è invece la pressoformatura a caldo (Compression Moulding). Nel seguito si troverà una breve descrizione del primo metodo e una descrizione più approfondita e particolareggiata del metodo Compression Moulding.

1.4.1 Laminazione con preimpregnati e cura in autoclave

Un metodo che permette di realizzare componenti con una forma relativamente complessa e di avere caratteristiche meccaniche eccellenti è la laminazione con prepregs (preimpregnati) con successiva cura in autoclave [2].

Questo metodo permette di avere un buon controllo del rapporto fibra matrice, la distribuzione omogenea della resina all'interno del laminato, bassa percentuale di vuoti (<0,5%) e, appunto, la possibilità di realizzare forme molto complesse [2].

L'investimento maggiore per poter utilizzare questo metodo di produzione è l'autoclave.

L'autoclave (figura 1.4.1.1) è un'apparecchiatura tenuta in pressione in cui è possibile



Figura 1.4.1.1-Autoclave

controllare istante per istante temperatura e, appunto, la pressione. In essa viene attuato il processo di cura visto in precedenza per la polimerizzazione della matrice resinosa.

Parte fondamentale di questo metodo sono i preimpregnati o prepregs.

I preimpregnati sono lamine di spessore dell'ordine di qualche

decimo di mm, costituite da fibre impregnate di resina con rinforzo unidirezionale o sotto forma di tessuto [2].

Sono quindi lamine di materiale composito vero proprio, in quanto sono già tessuti formati dalle fibre di rinforzo annegati nella matrice. Vengono solitamente forniti in rotoli e, per mantenere le caratteristiche ottimali della resina, devono essere conservati sotto condizioni precise e restrittive di umidità e temperatura.

Il processo di produzione si svolge come segue [2]:

1. Estrazione dalla cella frigorifera di stoccaggio dei rotoli di preimpregnati necessari e permanenza negli imballaggi per 24h per raggiungere la temperatura ambiente.
2. Taglio dei fogli di preimpregnati con la forma adatta ad essere laminati negli stampi con cui si produrranno i componenti. Il taglio può avvenire manualmente o con macchine di taglio automatiche.
3. Laminazione. Consiste nella stratificazione dei fogli precedentemente tagliati negli stampi secondo ordine numero e direzione imposti per la produzione dello specifico pezzo.
4. Applicazione del sacco a vuoto (Vacuum bag). Utile per un primo compattamento degli strati di preimpregnato tramite l'eliminazione dell'aria presente.
5. Ciclo di cura in autoclave per la polimerizzazione della resina della matrice.

I componenti in materiale composito con questo metodo di produzione vengono quindi prodotti utilizzando degli stampi, che possono essere in metallo o materiale composito a seconda del lotto di produzione, su cui vengono poste le pelli (laminati già tagliati) secondo uno schema preciso (ply book) messo a disposizione dal progettista.

Ovviamente, per ogni stampo bisogna produrre precedentemente un modello che rispecchi le caratteristiche del componente finito, generalmente prodotto in resina, su cui si potrà poi costruire lo stampo stesso.

Per la laminazione dei componenti sul quale sono richieste ottime

caratteristiche estetiche e meccaniche è richiesta la lavorazione in sale (Clean Room) con umidità, temperatura e polveri nell'aria controllate per evitare il più possibile lo scadere delle caratteristiche stesse dei preimpregnati e la presenza di elementi indesiderati tra le lamine che comprometterebbero la resistenza alle sollecitazioni dei pezzi stessi.

Una volta che il ciclo di cura in autoclave è terminato si possono avere le seguenti operazioni:

6. Rimozione del pezzo dallo stampo.
7. Operazioni di rifilatura dei pezzi manuale o, per un lotto maggiore, tramite macchine CNC.
8. Eventuali operazioni di incollaggio di perni, staffe o inserti e eventuali creazioni di fori, scarichi o asole tramite macchine utensili.

I punti di forza di questo metodo sono la possibilità di creare pezzi con forme relativamente complesse, con un'adeguata autoclave, di qualsiasi dimensione e i bassi costi di investimento.

Punti a sfavore sono la produzione poco automatizzata che porta a costi elevati per la necessità di manodopera, i bassi ratei produttivi e la difficoltà nell'assicurare la distribuzione omogenea della resina soprattutto nei componenti aventi forme complesse (ad esempio in spigoli o curvature).

1.4.2 Compression moulding

1.4.2.1 Descrizione metodo

Compression Moulding è uno dei metodi di produzione più antichi conosciuti [7].

In particolare, per le plastiche è stato sicuramente uno dei primi metodi di produzione, è conosciuto anche come Matched Die Moulding.

Il processo base consiste nello scaldare una resina termoindurente mantenendola sotto pressione all'interno di uno stampo, imponendogli il ciclo di cura in modo che possa polimerizzare. Sotto pressione la resina diventa fluida e si distribuisce nello stampo prendendone la forma e, grazie al riscaldamento dello stampo stesso, indurisce prendendo quindi la forma del componente da produrre. Una volta che la resina è sufficientemente indurita viene rimosso il manufatto dallo stampo e il ciclo di cura si completa a temperatura ambiente al di fuori dello stampo.

Questo processo è estremamente utilizzato per la produzione di componenti rinforzati con fibre.

In questo caso all'interno dello stampo non viene posta solamente la resina ma direttamente la resina rinforzata con fibre corte. Il processo rimane uguale a quello che utilizza solo resina ed è perciò chiaro che le fibre verranno distribuite in modo casuale all'interno del pezzo da produrre. Questo comporta delle caratteristiche meccaniche e fisiche leggermente differenti da pezzo a pezzo.

Infatti, oltre alla differente distribuzione delle fibre a seconda del flusso che prenderà la resina, è chiaro che ci sono difficoltà per le fibre anche a fluire in punti complessi dello stampo ad esempio spigoli, cave o curvature accentuate.

1.4.2.2 Pressa

Per il metodo Compression Moulding viene utilizzata una pressa riscaldata, uno schema del sistema è mostrato in figura 1.4.2.2.1.

Lo schema è quello classico di una pressa a portale con un piano inferiore su cui viene posta una parte dello stampo e un piatto superiore, mosso tramite un pistone idraulico lungo delle guide di supporto.

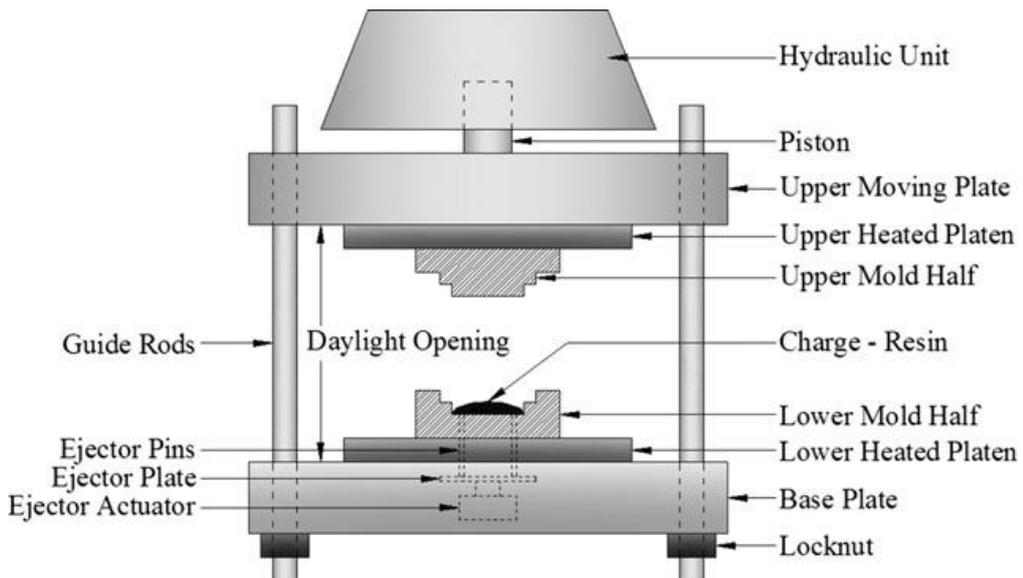


Figura 1.4.2.2.1-Schema di una pressa per compression moulding

Sul piatto superiore è fissata l'altra parte dello stampo.

Nel piano inferiore è previsto un sistema per l'espulsione del pezzo dallo stampo stesso una volta finito l'indurimento.

Il piatto inferiore è, solitamente, quello che prevede il riscaldamento dello stampo.

Il riscaldamento può essere effettuato in diversi modi; i più classici sono tramite resistenze elettriche, con olio riscaldato o con vapore.

Il riscaldamento elettrico è molto controllabile e viene solitamente utilizzato per temperature tra 150-200°C. Il riscaldamento tramite olio è preferito quando sono necessarie temperature più elevate [7].

Il piatto inferiore riscalda quindi direttamente la parte di stampo con cui è posto a contatto, per conduzione viene riscaldata anche la parte di stampo superiore.

Nello schema lo stampo è a contatto con le piastre della pressa con una sola superficie, per migliorare il trasferimento del calore si può installare lo stampo "incassato" nella piastra. Questo, oltre comportare una migliore distribuzione del calore, fornisce un supporto più stabile per lo stampo stesso.

Una volta terminato il ciclo di cura e finito il tempo durante il quale deve essere applicata la pressione, si può estrarre il componente dallo stampo. Per piccoli stampi e forme relativamente semplici prima di poter manipolare il componente lo si raffredda con aria o un getto d'acqua. Per stampi e componenti più complessi vengono creati dei canali di raffreddamento, dove scorre acqua, direttamente all'interno dello stampo [7].

Le presse sono classificate secondo la loro capacità o forza massima. La forza massima applicabile si calcola secondo la pressione idraulica del fluido impiegato nel pistone di spinta e l'area (ram area) di quest'ultimo [7]:

$$\text{Press capacity (kN)} = \frac{\text{ram area(cm}^2\text{)} \cdot \text{hydraulic pressure(MPa)}}{10}$$

Ovviamente per scegliere la macchina adatta alla produzione di un componente bisogna considerare la forza necessaria per stampare il pezzo (F). Questa dipende da numerosi fattori come il tipo e la forma della resina utilizzata, la presenza e il tipo di rinforzo, la dimensione e la complessità del pezzo, la temperatura che si dovrà raggiungere durante il processo e la durezza del componente. Si aggiunga poi questa forza di un 25% come coefficiente di sicurezza.

$$\text{Press capacity} = 1,25 \cdot F$$

Alcune volte non si hanno indicazioni direttamente sulla forza necessaria ma sulla pressione, cioè la forza necessaria allo stampaggio rispetto alla superficie del componente da produrre. Quando il pezzo ha una forma semplice e piana il calcolo è più accurato, quando invece il pezzo è più complesso si fa una stima dell'area sovrastimandola aumentando ancora la sicurezza. La forza necessaria allo stampaggio deriva quindi da:

$$F(kN) = \frac{P(MPa) \cdot A(cm^2)}{10}$$

La forza di stampaggio è anche direttamente correlata alla pressione idraulica necessaria secondo la relazione [7]:

$$\text{Hydraulic pressure}(MPa) = \frac{P(MPa) \cdot A(cm^2)}{\text{ram area}(cm^2)}$$

Valori tipici per la pressione di stampaggio stanno nell'intervallo 14-69MPa [7].



Figura 1.4.2.2.2-Pressa per metodo Compression Moulding con carico massimo applicabile di 270kN

1.4.2.2.1 Caratteristiche degli stampi

I materiali più utilizzati per gli stampi sono l'acciaio inossidabile e l'acciaio per utensili.

Gli stampi in acciaio possono essere cromati e induriti superficialmente per allungarne la vita. Un acciaio X35CrMoV511 con lo 0,35% di carbonio, il 5% di cromo, l'1,5% di molibdeno e l'1% di vanadio è un ottimo acciaio per utensili che mantiene elevata durezza alle alte temperature, durezza superficiale e resistenza all'impatto. Tutte caratteristiche utili per il processo di Compression Moulding.

Per migliorare l'aspetto dei componenti da produrre è bene rendere più uniforme possibile la superficie interna dello stampo, anche con una rettifica o cromatura. Infatti, data la grande pressione che graverà sulla resina, ogni imperfezione dello stampo verrà comunque specchiata nel pezzo finito.

Altri materiali che possono essere utilizzati per la produzione degli stampi possono essere le leghe di alluminio 6071 e 7075 [7].

Un punto critico degli stampi è il bordo dove vanno ad accoppiarsi le due metà, superiore e inferiore, dello stampo stesso. Solitamente sono realizzati secondo tre diversi tipi di chiusura [7]:

- Flash
- Semipositivo
- Positivo

Il tipo flash è la soluzione più semplice e meno costosa, adatta per parti relativamente piccole e poco spesse. La cavità dello stampo è riempita con materiale leggermente in eccesso e durante l'applicazione della pressione questo fluisce al di fuori del bordo di chiusura dello stampo. Il materiale in eccesso dovrà poi essere asportato dal pezzo in una lavorazione successiva. Questo metodo consente un risparmio nella produzione dello stampo che non necessita di riferimenti particolari ma richiede una lavorazione aggiuntiva dopo lo stampaggio.

Il tipo semipositivo produce un eccesso di materiale, minore rispetto al tipo flash, che può essere facilmente eliminato contemporaneamente all'estrazione del pezzo dallo stampo.

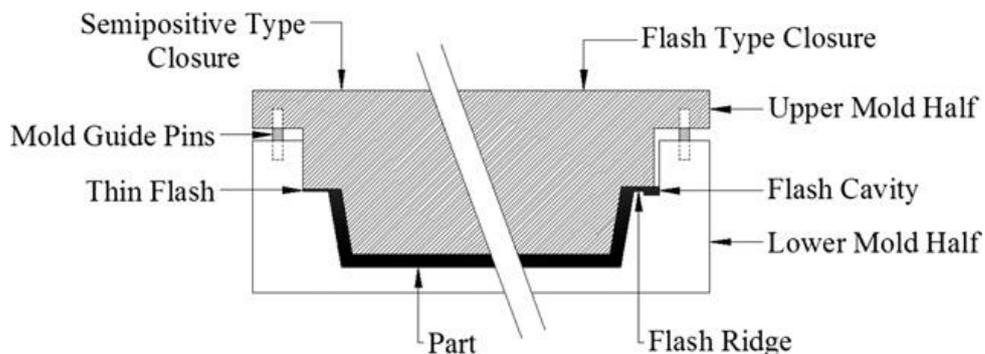


Figura 1.4.2.2.1.1-Schema chiusure degli stampi

Nella figura 1.4.2.2.1.1 è mostrata la differenza tra la chiusura flash (a destra) e la semipositiva (a sinistra). Si può facilmente notare che la semipositiva necessita di tolleranze più spinte nella produzione dello stampo stesso.



Figura 1.4.2.2.1.2-Componenti ottenuti con chiusura flash e semipositiva

In figura 1.4.2.2.1.2 si possono notare i diversi eccessi di materiale dovuti a chiusura semipositiva, a sinistra, e flash, a destra.

Per il tipo di chiusura detto positivo invece si utilizza il giusto quantitativo di materiale e le due metà dello stampo sono lavorate in modo da creare una chiusura perfetta delle parti, senza avere fuoriuscita di materiale.

Dato il crearsi di questo bordo sigillato il quantitativo di resina deve essere esattamente quello richiesto per la produzione del pezzo per non avere poi dimensioni del pezzo stesso inesatte. Questo tipo di stampo è utilizzato particolarmente per compositi rinforzati con fibra.



Figura 1.4.2.2.1.3-Esempio stampo a chiusura positiva

Questo è, ovviamente, il tipo che porta i più alti costi di produzione

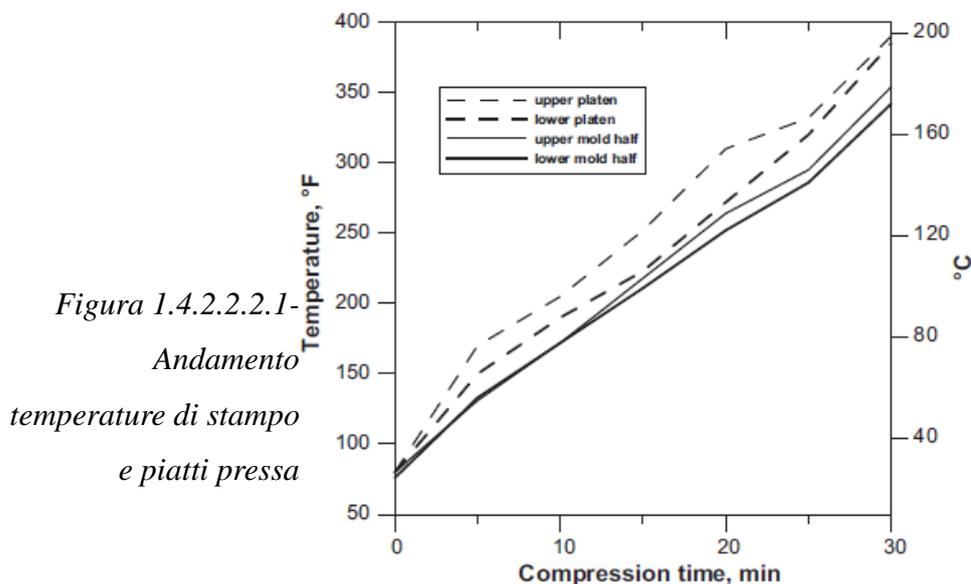
degli stampi ma non necessita di una successiva lavorazione per rimuovere eccessi di materiale dal pezzo.

In qualsiasi caso nello stampo deve essere previsto un sistema che permetta la facile estrazione del pezzo dopo il ciclo di cura. Infatti, anche per piccoli pezzi, utilizzando appositi distaccanti tra resina e stampo e, nonostante il raffreddamento, risulta sempre complessa l'estrazione dallo stampo. Per questo nelle presse sono presenti sistemi di estrazione che devono essere considerati durante la progettazione dello stampo per l'integrazione con la pressa.

1.4.2.2.2 Controllo temperatura

In un processo di stampaggio è molto importante la temperatura che viene applicata alla resina termoindurente. Infatti, se la temperatura fosse più bassa di quella necessaria, la resina avrebbe un aumento di viscosità e non riuscirebbe a fluire in ogni punto dello stampo. D'altra parte, se la temperatura fosse troppo elevata, porterebbe ad una resina troppo liquida e a un decadimento delle qualità meccaniche, fragilità e difetti superficiali [7].

La temperatura ideale da controllare durante il processo di Compression Moulding sarebbe quindi quella dello stampo che trasmette il calore direttamente alla resina termoindurente. Spesso però le presse sono dotate di controllo di temperatura sulle piastre. Perciò è importante minimizzare la differenza di temperatura tra le piastre e lo stampo. Il ΔT tra questi esiste per due fattori: in primo



luogo, per la capacità termica dei materiali a contatto, si ha un lasso di tempo prima che la temperatura dello stampo coincida con quella delle piastre.

In secondo luogo, anche se lo stampo può essere isolato, cederà comunque calore all'ambiente circostante e non soltanto alla resina all'interno.

Nel grafico di figura 1.4.2.2.1 è riportato a titolo di esempio un andamento delle temperature di piastre e stampo in funzione del tempo.

Nel caso si voglia controllare direttamente la temperatura dello stampo è comunque relativamente semplice dotarlo di termocoppie in fase di progetto.

1.4.2.2.3 Controllo della discesa dello stampo

Come gran parte dei fluidi non-Newtoniani, i materiali polimerici sono sensibili al taglio e alla temperatura. Perciò l'applicazione della pressione di stampaggio deve essere lineare e relativamente lenta. Se l'applicazione è troppo veloce, la resina tende a sfaldarsi riscaldandosi e interrompendo le catene molecolari che dovranno poi polimerizzare. D'altra parte, se l'applicazione della pressione è troppo lenta, la resina tende a polimerizzare e indurirsi prima che lo stampo abbia raggiunto la sua posizione finale, non arrivando alla compattazione necessaria per la cura [7].

Una caratteristica utile delle presse per stampaggio è lo spostamento a due stadi. Cioè, la parte dello stampo mobile viene fatta scendere velocemente fino al punto in cui la resina inizia a compattarsi, poi lo spostamento avviene in modo controllato e lineare fino alla compressione richiesta.

1.4.2.3 Tempo di ciclo

Per avere efficienza economica il tempo di ciclo del processo deve ovviamente essere minimizzato. Il tempo di stampaggio è solamente una parte dell'intero ciclo che comprende anche il tempo di applicazione del carico, di discesa dello stampo, di raffreddamento e di estrazione del pezzo.

Il tempo di compressione deve essere abbastanza lungo da

permettere la completa cura del pezzo, tuttavia mantenere la resina ad elevate pressioni e temperature troppo a lungo porta a un degrado del materiale [7].

Chiaramente un fattore predominante nella scelta del tempo di compressione e della temperatura è lo spessore del pezzo. Fattore che diventa critico quando il componente da produrre presenta differenze di spessore piuttosto accentuate.

Valori di tempo di cura raccomandati, soprattutto per plastiche, restano indicativamente tra 0,5 e 5 minuti. A titolo di esempio spesso vengono utilizzati valori di tempo di 1,5 minuti con temperatura di circa 170°C [7].

1.4.2.4 Rinforzo della matrice

Per migliorare le caratteristiche fisico-meccaniche dei componenti prodotti tramite Compression Moulding si possono aggiungere alla matrice resinosa delle fibre di rinforzo.

La parte di rinforzo è quindi annegata nella resina per migliorare la resistenza a trazione, la rigidità, la resistenza a compressione e agli urti. Nei principali componenti prodotti con questa tecnica la parte di rinforzo è composta da fibre di vetro, ultimamente però sono sempre più utilizzate fibre di carbonio, per arrivare a un deciso abbattimento del peso e ad aver un ottimo rapporto peso/resistenza.

Con il metodo Compression Moulding e l'aggiunta di queste fibre di rinforzo si possono produrre parti utilizzando materiali definiti [7]:

- BMC (Bulk Moulding Compounds)
- GMT (Glass Mat Thermoplastic)
- LFT (Long Fiber Thermoplastic)
- SMC (Sheet Moulding Compound)

Questi materiali possono essere lavorati tramite Compression Moulding, data però la presenza della parte fibrosa di rinforzo necessitano di speciali accorgimenti nel processo di produzione.

Il bulk moulding compound (BMC), detto anche dough moulding compound o premiscelato, è composto dalla matrice in resina, un riempitivo, il rinforzo e un catalizzatore. Tutti i componenti sono semplicemente mischiati in una pasta viscosa.



Figura 1.4.2.4.1-Bulk moulding compound

Nella figura 1.4.2.4.1 sono mostrati dei bulk moulding compound, cioè delle "masse di compound". Questi possono essere tagliati e posti all'interno dello stampo per imporgli la deformazione sotto pressione, oppure possono essere preformati secondo la forma che dovranno raggiungere dopo il processo.

Le lunghezze delle fibre utilizzate all'interno di questi materiali rimane solitamente tra i 3 e i 13mm e può arrivare in alcuni casi a 25mm [7].

Dato il fatto che il materiale è già parzialmente polimerizzato, la resina presente una consistenza pastosa e appiccicosa. Durante il processo di compressione questo fa sì che la resina tenda ad opporsi allo scorrimento e a rimanere nella parte di stampo inferiore su cui è posta potendo causare una separazione dei componenti della miscela. Per questo si possono avere caratteristiche meccaniche piuttosto differenziate da punto a punto di uno stesso componente. Questo è il maggior limite dei bulk moulding compound.

Una possibile soluzione a questo problema è portata dal SMC, ovvero sheet moulding compound. In questo materiale le fibre sono spezzettate, orientate casualmente e solitamente di dimensione compresa tra 19-51mm [7]. Le fibre sono poste tra film di polietilene e annegate nella resina (poliestere, vinilica o epossidica)



Figura 1.4.2.4.2-Particolare SMC

e in un riempitivo. In questo caso i componenti del materiale non sono semplicemente mischiati una volta posti a contatto ma le fibre sono invece inserite con una operazione automatizzata e protette con uno strato di resina.

Nella figura 1.4.2.4.2 si possono notare le fibre orientate casualmente, sono esse che permettono la resistenza meccanica

del componente stesso.

Come il BMC anche il SMC ha una consistenza pastosa e appiccicosa e perciò ogni foglio di resina è separato da uno strato di polietilene. I SMC, come si evince dal nome, sono fogli forniti in rotoli. Da questi vengono poi tagliati i singoli fogli con dimensione simile al componente da produrre.

Ultimamente si sta ponendo l'attenzione sulla riduzione di peso di questi materiali.

Solitamente il riempitivo utilizzato per gli SMC è il carbonato di calcio. Sostituendo il riempitivo con degli speciali materiali nanocompositi e il rinforzo con la fibra di carbonio si può arrivare ad avere un significativo vantaggio in fatto di riduzione del peso [7].

I materiali identificati come GMT (glass mat thermoplastic) sono fogli composti di polipropilene termoplastico rinforzato con fibra di vetro con lunghezza delle fibre da 25mm a crescere [7].

Le fibre possono essere presenti in diverse forme: direzionali, orientate casualmente, corte, lunghe o tessute. Se nel materiale è utilizzata come rinforzo una fibra naturale esso prende il nome di natural fiber mat-reinforced thermoplastic (NMT).

Poiché la polimerizzazione della termoplastica è completa i GMT devono essere preriscaldati prima di applicargli la forza di compressione. Anche se non sono meccanicamente resistenti, rigidi e resistenti al calore come gli SMC, un pannello in GMT è generalmente più duro e più leggero.

I long fiber thermoplastic (LFT) sono rinforzati con fibre di lunghezza superiore ai 10mm. La resina polipropilenica è combinata con le fibre, solitamente fibre di vetro, ma possono essere fibre aramidiche, di carbonio o di acciaio inossidabile [7].

Il contenuto di fibre in peso può variare tra il 20% e il 60%.

Ci sono due metodi per caricare la resina nella pressa. Il primo prevede la fusione di pellets precomposti che contengono già la fibra, per poi porre la pasta all'interno dello stampo. Il secondo metodo prevede invece la fusione e l'estrusione della resina in loco con l'inserimento della fibra all'ultimo per ridurre al minimo i

possibili danni su essa.

Dato il processo di produzione più semplice dei LFT rispetto ai GMT, i primi risultano più economici mantenendo comunque una buona resistenza e un peso contenuto.

1.4.2.5 Metodi di processo per BMC, SMC, GMT e LFT

Per i BMC una massa di resina è posta al centro della metà inferiore dello stampo, quando si applicherà la pressione la resina fluirà in tutte le zone dello stampo. Il flusso seguirà una direzione predominante piana e radiale dal centro della carica verso l'esterno dello stampo.

Per gli SMC il materiale può essere posto centralmente oppure distribuito per tutto lo stampo. A seconda della zona dello stampo e dello spessore finale che dovrà avere il pezzo, verranno posti più o meno fogli di composito. Data la maggior distribuzione sulla superficie dello stampo degli SMC, è garantita una maggior integrità della fibra di rinforzo rispetto al processo che utilizza BMC.

Generalmente per gli SMC si utilizzano da 1 a 4 fogli di composito, ognuno di spessore di circa 3mm, occupando circa una metà della superficie dello stampo. Possono ovviamente essere aggiunti altri fogli qualora siano richieste migliori caratteristiche meccaniche [7].

Il processo di compressione crea il flusso della resina che orienta le fibre. Gli strati a contatto con lo stampo riscaldato fluiranno e induriranno prima degli strati di composito centrali.

Le caratteristiche fisico-meccaniche potranno dipendere dalla direzione che si considererà sul pezzo finito. Infatti, a seconda di come si direzionano le fibre all'interno del flusso della resina, si possono avere valori di resistenza diversi a seconda della direzione considerata sul componente stesso [7].

L'esperienza afferma che bisogna sempre considerare l'orientazione delle fibre quando si posizionano i fogli di composito e che un'area adeguata di copertura può essere circa il 60-80% di quella totale dello stampo [7]. Utilizzando fibre corte, circa 10mm, si è notato sperimentalmente che il comportamento del composito può risultare quasi isotropo. Infatti quando le fibre si dispongono durante il

processo non seguono tutte la stessa direzione ma ne seguono una casuale. Considerando quindi il componente globalmente le caratteristiche possono risultare piuttosto simili in ogni direzione [7].

Anche se non così differente dal processo che utilizza resina in polvere o granuli, le condizioni di pressoformatura a caldo per i materiali BMC e SMC possono variare notevolmente in fatto di pressione. Sono necessarie queste variazioni di valori per tener conto della forma del pezzo, della dimensione e della formulazione del composito.

Le forze applicate tendono a essere inferiori mentre la temperatura e il tempo di cura variano a secondo dei catalizzatori, dello spessore del pezzo e della velocità di chiusura dello stampo. La reazione di polimerizzazione che avviene durante la cura è fortemente dipendente dalla temperatura e, approssimativamente, ogni calo di temperatura di 10°C comporta un incremento del tempo di cura dell'ordine del 50% per i componenti prodotto in SMC con spessore minore di 6mm [7].

Nella tabella 1.4.2.5.1 sono riportati alcuni valori indicativi per pressione, temperatura e tempo di ciclo in funzione del tipo di materiale [7].

Composito	Pressione (MPa)	Temperatura (°C)	Tempo di ciclo
BMC	2,4-17	120-180	da 30s a più minuti
SMC	3,4-17	120-180	da 30s a più minuti
GMT	10-14	25-70	30-60s

Tabella 1.4.2.5.1-Valori di processo per BMC, SMC e GMT

Si noti che la tabella riporta i valori di tempo di ciclo senza considerare l'eventuale preriscaldamento del materiale, include però il tempo di spostamento dei piatti della pressa, il tempo di carico-scarico e il tempo di cura. Per un SMC il tempo di cura può essere circa il 50% dell'intero tempo di ciclo.

Bisogna comunque prestare attenzione a vari fattori quando si cerca di accorciare il tempo di ciclo, specialmente alla velocità di chiusura dello stampo. Infatti attuando l'abbassamento troppo velocemente l'aria, i gas e il vapore che si formano con il riscaldamento non hanno il tempo di uscire dallo stampo e rimangono intrappolati nella matrice. Questo porta a inclusioni di aria e gas con un peggioramento delle caratteristiche di resistenza e superficiali.

Ovviamente, se la velocità di chiusura è troppo lenta, le resine termoindurenti possono polimerizzare prima della chiusura totale dello stampo non completando il flusso utile al riempimento dello stesso. In ogni caso, in particolare per la produzione di componenti in SMC, è importante che la temperatura della cavità dello stampo sia più uniforme possibile. È stato infatti dimostrato che, per grandi pezzi stampanti in SMC, esiste una variazione di temperatura della superficie dello stampo di circa 25°C [7]. Si è mostrato altresì che questa differenza di temperatura è proporzionale a $\frac{(lunghezza\ componente)^2}{spessore \cdot tempo\ ciclo}$ [7].

Questo problema porta ad avere un'insufficiente qualità superficiale dei pezzi e alla presenza di bolle interne, si può comunque risolvere progettando in modo migliore lo stampo per cercare di avere una conduzione del calore migliore su tutta la dimensione dello stampo stesso.

Quando si pressoformano SMC la pressione richiesta nella tabella di figura 1.4.2.5.1 è anche funzione della viscosità, del preriscaldamento e della composizione del materiale. Se, ad esempio, il riempitivo è più denso e le fibre di rinforzo lunghe serve una pressione maggiore per la formatura. Valori indicativi di velocità di chiusura degli stampi per i BMC e SMC sono dell'ordine dei 30-35mm/s [7].

Generalmente, per le resine termoplastiche, le velocità di chiusura e compressione sono molto maggiori rispetto a quelle necessarie per le resine termoindurenti.

Per i GMT il materiale deve essere trasferito nel più breve tempo possibile dal preriscaldamento allo stampo e processato. Le velocità di chiusura e compressione per questi materiali sono di circa

425mm/s e 10-30mm/s rispettivamente. Generalmente i componenti in GMT e LFT sono pannelli piuttosto sottili e raffreddano quindi rapidamente, si possono quindi aumentare le velocità di chiusura fino a 900mm/s e di compressione fino a 30-70mm/s [7].

La pressione di stampaggio dipende anche da altre condizioni come il preriscaldamento, la temperatura di stampaggio e dal carico di fibra di rinforzo. Per esempio, una temperatura di processo alta riduce la pressione richiesta, richiederà però un tempo di raffreddamento più lungo.

Al composito possono essere aggiunti additivi per il controllo della viscosità. Infatti, se la viscosità della resina è troppo bassa, sotto pressione e ad alta temperatura fluirà facilmente in ogni punto dello stampo, le fibre invece fluiscono ovviamente in modo peggiore. Si avrà perciò un componente con zone più resistenti con forte presenza di fibra di rinforzo e zone deboli composte prevalentemente dalla resina. Si aggiungono perciò sostanze in grado di rafforzare il legame tra matrice e fibre per evitarne il distacco e per avere un flusso omogeneo del composito.

1.4.2.6 Comparazione con Transfer e Injection Moulding

La scelta del processo di produzione è basata su molti fattori ingegneristici e economici. Una comparazione ragionevole deve essere fatta considerando processi perlomeno simili, perciò considerando la pressofusione a caldo bisogna considerare metodi che utilizzino uno stampo e l'applicazione di una pressione combinata col calore, per la formatura di componenti plastici o compositi.

Due metodi che corrispondono a queste caratteristiche sono il Transfer Moulding e l'Injection Moulding. Questi metodi sono solitamente utilizzati con resine termoindurenti.

Nel metodo Injection Moulding la resina viene iniettata all'interno dello stampo, bisogna quindi porre particolare attenzione alla polimerizzazione. Se questa avviene troppo rapidamente c'è la possibilità che la resina non entri nello stampo. D'altra parte però rispetto al metodo di pressoformatura permette il raggiungimento di forme più complesse.

L'Injection Moulding può essere considerato una "via di mezzo" tra i due metodi precedentemente citati e permette anch'esso il raggiungimento di forme discretamente complesse.

Come contro i metodi Transfer e Injection Moulding hanno costi proibitivi per la produzione di componenti con dimensioni elevate. Il metodo Compression Moulding da questo punto di vista ha un notevole vantaggio data l'operazione piuttosto semplice che deve svolgere e il costo relativamente basso degli stampi necessari [7].

A vantaggio degli altri metodi va il tempo di ciclo relativamente minore rispetto alla pressoformatura a caldo.

Nel metodo Compression Moulding la resina liquefatta percorre una distanza relativamente breve non lasciando il tempo alle molecole di orientarsi, dopo il raffreddamento si hanno quindi caratteristiche lungo le diverse direzioni piuttosto simili, seppure il materiale può risultare anisotropo. Negli altri metodi invece le molecole riescono a riorientarsi, dato che la resina viene iniettata nello stampo già liquida, e ciò porta ad un incremento della resistenza lungo una direzione preferenziale [7].

Nel metodo Compression Moulding il ritiro è decisamente inferiore agli altri metodi e più uniforme.

Un vantaggio considerevole della pressoformatura a caldo è il fatto che, nel caso dell'utilizzo delle fibre di rinforzo, dato il flusso piuttosto breve che compie la resina, queste sono sottoposte a poche deformazioni e riescono a mantenere un'ottima integrità.

L'Injection e il Transfer Moulding, invece, sono limitati all'utilizzo di fibre corte.

Altro vantaggio della pressoformatura a caldo è la possibilità di dare un certo orientamento alle fibre di rinforzo col posizionamento del composito o dei fogli di composito all'interno dello stampo.

1.4.2.7 Polimerizzazione della resina

La maggior parte delle resine termoindurenti sono attivate dal calore e la reazione di polimerizzazione lega le catene molecolari. Ogni polimerizzazione con reazione di condensazione produce delle piccole quantità di gas o vapore che devono necessariamente essere

espulse dalla cavità dello stampo. Per questo si possono prevedere dei fori di ventilazione nello stesso stampo o questo può essere mantenuto leggermente aperto durante il processo per permettere quello che viene chiamato degassaggio. Un'apertura minima di 1,5mm circa per pochi secondi è sufficiente per permettere l'uscita di questi gas [7]. La reazione di polimerizzazione è solitamente esotermica, si aggiunge perciò calore all'interno dello stampo oltre a quello proveniente dalle superfici. Dato il fatto che la resina è un isolante termico il calore in eccesso prodotto dalla reazione può rimanere intrappolato nelle parti più spesse del componente. Questo calore a volte può essere talmente elevato da portare alla conclusione della polimerizzazione prima nelle parti spesse che in quelle sottili che ricevono calore solamente dalle pareti dello stampo. In casi estremi questo calore eccessivo nelle parti spesse può portare ad un degrado della stessa polimerizzazione e quindi delle caratteristiche del componente finito.

2 Prove di pressoformatura a caldo

2.1 Componente da testare

2.1.1 Materiali di produzione

I componenti prodotti per effettuare le prove sono stati costruiti utilizzando il materiale HexMC[®] della azienda Hexcel e il materiale AMC[®]8593 della Quantum composites.

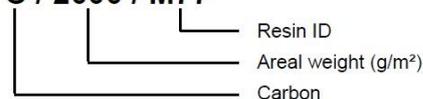
L'HexMC[®] è un materiale composito per stampaggio ad alte prestazioni, progettato specificamente per essere lavorato con tecnologia di pressoformatura a caldo. La matrice epossidica e l'alto contenuto di fibra di carbonio in volume lo rende un materiale adatto allo stampaggio per numerosi scopi.

Le principali proprietà sono [ii]:

- Alternativa alle leghe leggere (Al, Mg, Ti)
- Progettato per pressofusione a caldo
- Richiede un tempo di ciclo di processo breve
- Può essere utilizzato per raggiungere forme complesse
- Rende possibile lo stampaggio comprendendo all'interno dei componenti che saranno nel pezzo finito (es. boccole)
- Permette di non sprecare materiale

Il materiale utilizzato è denominato HexMC[®]/C/2000/M77 [iii].

HexMC[®] / C / 2000 / M77



Form: Roll
Roll width: 460mm
Shelf life at -18°C: 18 months
Shelf life at RT 23°C: 6 weeks
Material density: 1.55 g/cm³
Typical Cure temperature: 150°C

Areal weight: 2000 g/m²
Fibre length: 50 mm
Fibre: HS Carbon
Nominal fibre volume: 57%
Typical Cure time: 3 minutes

Le caratteristiche meccaniche fornite dall'azienda produttrice sono le seguenti [iii]:

	Tensile	Flexural	ILSS	Compression
Strength (MPa)	300	500	70	290
Modulus (GPa)	38	30	na	38
Standards	ASTM D3039*	ASTM D790	EN 2563	EN 6036*

* With specimen width of 32mm

Sempre dall'azienda produttrice viene suggerita la procedura di lavorazione del materiale [ii]:

- Si estrae il materiale dalla cella frigorifera e lo si lascia adattare alla temperatura ambiente per migliorarne la maneggiabilità.
- Si pulisce lo stampo con un apposito solvente per rimuovere tutte le impurità.
- Si applica sullo stampo un agente distaccante.
- Si scalda lo stampo fino a 150°C. Il tempo di cura varierà poi in funzione dello spessore del pezzo da produrre.
- Si setta la pressione a 80 bar. Si può poi diminuire o aumentare il valore in funzione della complessità del pezzo.
- Si rimuove il film protettivo dal materiale.
- Si taglia il materiale a seconda delle dimensioni del pezzo.
- Si carica lo stampo con il materiale tagliato, è raccomandabile che almeno l'80% dell'area dello stampo sia coperta da materiale.
- Si chiude lo stampo applicando la pressione prevista.
- Si mantengono temperatura e pressione per il tempo di cura previsto.
- Dopo la cura si apre lo stampo e il pezzo viene estratto.



Figura 2.1.1.1-Rotolo di HexMC[®]

La maggior parte dei provini testati sono stati prodotti utilizzando il materiale Quantum Composites AMC[®]8593 [iv]. Materiale molto simile all'HexMC[®]. A parte i dati specifici, la descrizione degli SMC vale per entrambi i materiali.

L'AMC[®]8593 fa parte della famiglia di materiali definiti dalla Quantum Composites AMC, cioè Advanced Molding Compounds, progettati per unire buone prestazioni meccaniche e peso ridotto.

Sono materiali adatti alla lavorazione con pressoformatura a caldo per produrre pezzi con forme tridimensionali complesse qualora i preimpregnati tradizionali non diano elevati vantaggi in termini di peso e costo.

L'AMC[®]8593 è un composito a base di resina vinil-estere adatto specificamente a applicazioni che prevedano l'uso di SMC. L'utilizzo di questa resina permette di ridurre i tempi di cura pur mantenendo valori di resistenza e durezza simili a quelli delle resine epossidiche. Le fibre utilizzate sono chopped e possono essere composte da 3, 6 o 12 fili (3K, 6K, 12K).



Figura 2.1.1.2-Rotolo di AMC8593

Si riportano di seguito alcune caratteristiche dell'AMC[®]8593 derivanti dai data sheet del materiale reperibili sul sito internet

dell'azienda produttrice [v] (il valore di carico di rottura per il tipo utilizzato, con la specifica resina, è stato fornito ed è pari a 200MPa):

TYPICAL PROPERTIES | UNCURED

Form and Color	Rolled Sheet, Black or Natural	Fiber Length	Nominal 1.0-inch
Carbon Fiber Content	Nominal-50% w/w	Shelf Life: @ 75°F	2 months
Resin Content	Nominal-50% w/w		

TYPICAL PROPERTIES | CURED | "Net Shape" Specimen

<u>Test</u>	<u>Procedure</u>	<u>Value</u>
Specific Gravity, g/cc	ASTM D-792	1.47
Molding Shrinkage, inch/inch (mm/mm)	ASTM D-955	<0.000 (<0.000)
Flexural Strength, psi (MPa) ¹	ASTM D-790	115,000 (792)
Flexural Modulus, psi (GPa) ¹	ASTM D-790	6.5 x10 ⁵ (44.8)
Tensile Strength, psi (MPa) ¹	ASTM D-638	61,000 (421)
Tensile Modulus, psi (GPa) ¹	ASTM D-638	9.5 x10 ⁵ (65.5)
Izod Impact (notched) ft. lb./in. (J/M)	ASTM D-256	20 (1068)

¹ Tensile and Flexural Properties are determined using net shape molded specimens.

TYPICAL PROPERTIES | CURED | "Machined" Specimen

<u>Test</u>	<u>Procedure</u>	<u>Value</u>
Flexural Strength, psi (MPa) ²	ASTM D-790	73,000 (503)
Flexural Modulus, psi (GPa) ²	ASTM D-790	4.5 x10 ⁵ (31.0)
Tensile Strength, psi (MPa) ²	ASTM D-3039	41,500 (286)
Tensile Modulus, psi (GPa) ²	ASTM D-3039	5.2 x10 ⁵ (35.8)
Short Beam Shear, psi (MPa) ²	ASTM D-2344	8,394 (57.87)
Glass Transition Temp. °F (°C) TanDelta	ASTM D-7028	288 (142)

² Machined Properties are determined using specimen machined from molded 12"x12" panels with 80% mold coverage.

Molding Suggestions – AMC® 8593 can be molded at temperatures in the range of 260-310°F, with 280°F suggested as a starting point. Cure times will be dependent on molding temperature and part thickness and will typically be 5-10 minutes. Detailed molding suggestions are available on request. Cool molded parts at ambient temperature. A cooling fixture may be needed depending on part thickness and geometry.

Dalle prove di formatura effettuate dall'azienda si vedrà che la differenza tra i due materiali si rivela durante lo stampaggio, pare che il Quantum AMC®8593 scorra meglio nello stampo rispetto all'Hexcel HexMC.

Inoltre, notando dai rispettivi dati, l'HexMC dovrebbe mostrare caratteristiche meccaniche leggermente inferiori.

Sono state effettuate poi prove utilizzando 6K o 12K per valutare effettive differenze nello scorrimento dei materiali durante lo stampaggio e, in seguito, durante le prove di compressione sui componenti finiti.

2.1.2 Componente

Il componente è il bilanciere per il leveraggio della sospensione posteriore di una motocicletta supersportiva.

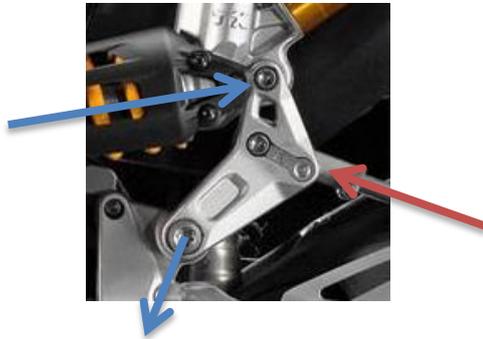


Figura 2.1.2.1-Bilanciere in alluminio

Il bilanciere, nella motocicletta in questione, come si evince dalla figura 2.1.2.1 ha la funzione di collegare il forcellone posteriore, il telaio e l'ammortizzatore. (Ne sono presenti due posti simmetricamente rispetto all'ammortizzatore). Il componente fa quindi parte di una sorta di leveraggio utile a rendere il lavoro dell'ammortizzatore più progressivo. In figura si nota che il componente per le moto di serie è fabbricato in alluminio.

Sotto si riportano alcune immagini relative ai disegni 3D del componente per la realizzazione in SMC. Si nota infatti l'inserzione delle boccole di accoppiamento.



Figura 2.1.2.2-Vista posteriore bilanciere destro

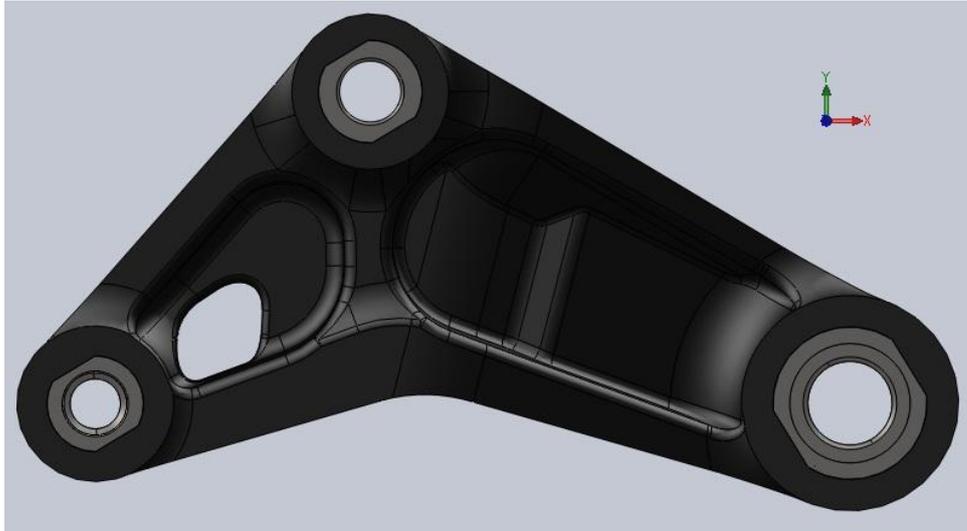


Figura 2.1.2.3-Vista anteriore bilanciere destro

In figura 2.1.2.3 disegno 3D della parte posteriore del bilanciere. Si nota sulla sinistra l'asola che porterà a una concentrazione delle tensioni in ambito di prova. Le boccole, durante il processo di produzione, sono poste all'interno dello stampo e vengono annegate nel materiale durante la compressione e il riscaldamento.

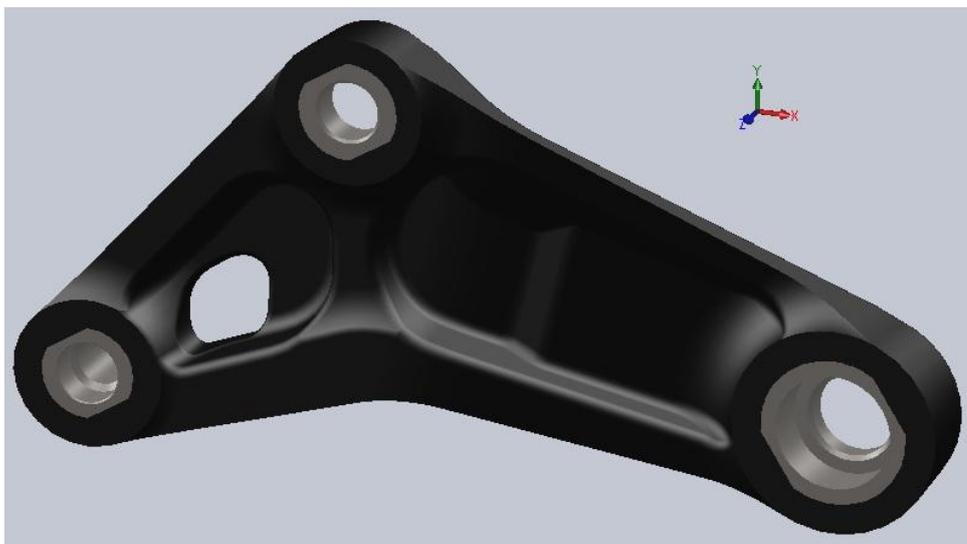
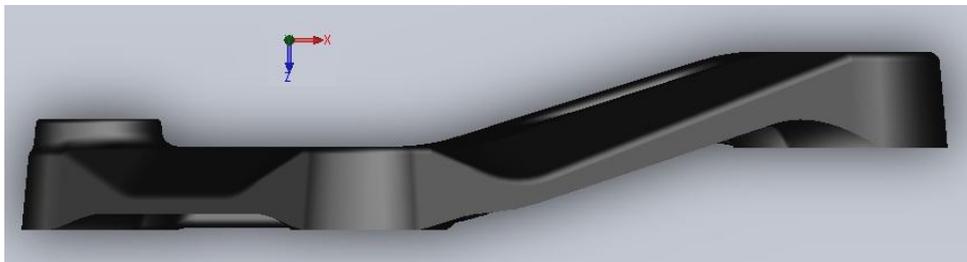


Figura 2.1.2.4-Viste superiore e dimetrica del bilanciere destro

2.2 Macchina

I componenti da testare sono quindi stati prodotti seguendo il metodo di pressoformatura a caldo.

Per attuare il processo di formatura è stata utilizzata una pressa per Compression Moulding (figura 2.2.1).

La macchina può arrivare ad esercitare una pressione di 200bar, i piatti della pressa possono essere riscaldati per trasferire calore allo stampo.



Figura 2.2.1-Pressa utilizzata per il processo di pressoformatura

Lo stampo (figura 2.2.2) è stato progettato esclusivamente per i componenti in questione, è stato realizzato in acciaio per utensili, è a chiusura positiva e le superfici interne hanno subito un trattamento di cromatura per ridurre al minimo i difetti superficiali, poter rispondere alle caratteristiche estetiche richieste e mantenere una buona durata nel tempo.

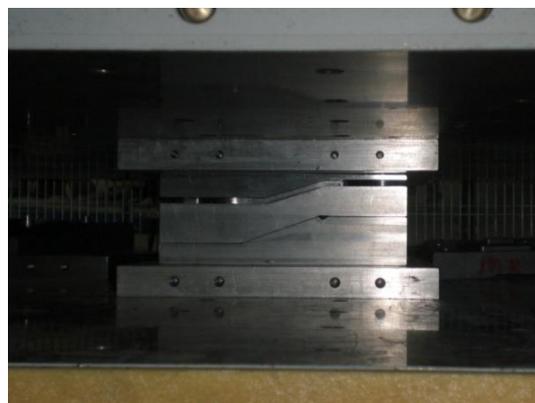


Figura 2.2.2-Stampo in chiusura

2.3 Processo

Come detto, i componenti sono stati prodotti secondo pressoformatura a caldo utilizzando la macchina sopradescritta.

Il processo generale prevede dunque:

- Il taglio del materiale dai fogli di SMC.
- Il riempimento dello stampo precedentemente montato sulla macchina.
- L'applicazione della pressione e del calore previsti per lo specifico materiale.
- Il mantenimento di pressione e temperatura per il tempo di ciclo necessario.
- Al termine del ciclo di cura l'apertura dello stampo e l'estrazione del componente.

I dati relativi al tempo di ciclo di cura, pressione di stampaggio e temperatura di mantenimento derivano dai data-sheet dei materiali utilizzati. Possono comunque essere leggermente variati effettuando delle prove di stampaggio per raggiungere i risultati desiderati.

Parte fondamentale di tutto il processo risulta la stesura del materiale all'interno dello stampo. Il componente in questione infatti necessita dell'inserzione delle boccole "annegate" nel composito.

Il differente posizionamento del materiale prima della formatura attorno ad esse modifica consistentemente la qualità del pezzo finale.

L'azienda ha perciò svolto, e svolgerà, numerose prove per arrivare ad un risultato soddisfacente in termini meccanici e estetici.

Altro aspetto fondamentale del processo riguardante il materiale è la scelta della quantità di materiale da utilizzare per ogni pezzo.

Utilizzare una quantità elevata di materiale e una pressione adeguata assicura che non vi siano vuoti o porosità nel pezzo finale, ma può portare ad avere delle quote non corrispondenti alle richieste. Altro problema che si può presentare in questo caso è la copertura delle boccole in alluminio con il materiale in eccesso.

Al contrario, utilizzare una quantità inferiore di materiale in fase di

preparazione, porta al rispetto delle quote di progetto, alla completa pulizia degli inserti ma può risultare in problemi meccanici dovuti a vuoti e mancanze di materiale. In figura 2.3.1, ad esempio, è chiaramente visibile un vuoto attorno alla boccola a destra.



Figura 2.3.1-Prova con materiale scarso

In figura 2.3.2 è mostrato un esempio di come può essere disposto il materiale da lavorare all'interno dello stampo. Si nota che del materiale viene avvolto attorno alle boccole di collegamento, delle parti di materiale vengono poi poste nelle altre zone dello stampo, con quantità variabili, in funzione dello spessore del pezzo in quel punto.



Figura 2.3.2-Esempio stesura materiale per lo stampaggio

Dopo le numerose prove effettuate si è arrivati a definire le giuste quantità di materiale da stendere nello stampo, la disposizione di ogni massa di SMC e i dati di ciclo di cura. Cioè di tempo di

mantenimento, di temperatura di riscaldamento e di pressione.

Questi sono infatti tutti parametri che influiscono grandemente sulle qualità del pezzo finito.

Una pressione non adeguata può, se troppo bassa, non permettere la distribuzione completa del materiale nello stampo o al contrario, se troppo elevata, può portare alla fuoriuscita del materiale dallo stampo con conseguenti inesattezze in fatto di quote.

La temperatura e il tempo di mantenimento influiscono invece principalmente sulla cura della resina termoindurente. Una temperatura troppo elevata può portare al decadimento delle qualità della resina stessa, così come se si mantiene il componente esposto al calore per un tempo troppo elevato.

Come detto quindi, basandosi sui dati forniti dai produttori dei materiali, si devono scegliere i parametri di progetto ideali effettuando delle prove sui componenti da produrre.

Sono presentate ora due tabelle riassuntive riguardo i dati di processo utilizzati per produrre i bilancieri testati nel primo e nel secondo blocco di prove (paragrafo 4.2.2.2). Con queste si potranno poi correlare i risultati delle prove con i parametri di produzione e del materiale.

Provino	Materiale	Tempo di cura	Temperatura di cura	Pressione di cura
DX	Quantum 12K	12 min	140°C	50 bar
DX_pre_1	Quantum 3K	12 min	140°C	60 bar
DX_pre_2	Quantum 6K	13 min	140°C	80 bar
DX_pre_3	HexMC	13 min	140°C	80 bar
DX_pre_4	HexMC	13 min	140°C	80 bar
SX	Quantum 12K	13 min	140°C	80 bar

Tabella 2.3.1-Parametri di processo provini primo blocco

Provino	Materiale	Tempo di cura	Temperatura di cura	Pressione di cura
1N_DX	Quantum 12K	14 min	130°C	80 bar
1N_SX	Quantum 12K	14 min	130°C	80 bar
2N_DX	Quantum 12K	14 min	130°C	80 bar
2N_SX	Quantum 12K	14 min	130°C	80 bar
3N_DX	Quantum 12K	14 min	140°C	80 bar
3N_SX	Quantum 12K	14 min	130°C	80 bar
4N_DX_6K	Quantum 6K	14 min	135°C	80 bar
4N_SX_6K	Quantum 6K	14 min	140°C	80 bar

Tabella 2.3.2-Parametri di processo provini secondo blocco

Dalle prove effettuate dall'azienda sulla produzione dei componenti si è rilevato che il materiale Quantum ha una maggior scorrevolezza all'interno dello stampo rispetto all'HexMC.

Grazie a questo si riescono a produrre componenti con caratteristiche migliori in fatto di assenza di vuoti e/o bolle interne.

Altro vantaggio derivante dalla miglior scorrevolezza riguarda la pulizia dei pezzi usciti dallo stampo, infatti si è notato che con l'HexMC l'asola che deve risultare senza materiale non viene perfettamente pulita. Al contrario, con il Quantum, senza che sia necessario utilizzare additivi, si riesce a lasciare i componenti più puliti e con meno difetti superficiali o interni.

3 Analisi agli elementi finiti

3.1 Introduzione

Per valutare il possibile comportamento del bilanciare alle prove di compressione che si andranno a svolgere, sono state preventivamente svolte delle analisi agli elementi finiti.

Si è cercato di simulare il più fedelmente possibile le condizioni che si avranno poi nelle prove di compressione fisiche.

Si è lavorato per cercare di discretizzare al meglio il componente diminuendo la dimensione degli elementi della mesh nei punti considerati più critici.

Per l'analisi si è utilizzato il disegno tridimensionale del pezzo in CF-SMC con annessi gli inserti in alluminio. Sono quindi stati utilizzati i dati di resistenza dei materiali forniti.

Verrà di seguito descritta la prova, con i dati relativi alla mesh, alla disposizione di carico, ai supporti, alle condizioni al contorno e i risultati derivanti dall'analisi.

Verranno quindi presentati i grafici risultanti dall'analisi e commentata la stessa.

3.2 Simulazioni

Sono state quindi svolte delle simulazioni FEM sulla base del disegno 3D del bilanciante sinistro.

Si sono cercate di simulare il più realisticamente possibile le caratteristiche e le condizioni di prova di compressione sui campioni. Si è quindi schematizzato il sistema ponendo un supporto cilindrico, libero tangenzialmente, nella parte di bilanciante fissa sull'attrezzatura (capitolo 4) e un supporto "carrello" nella parte non vincolata. Nella boccia superiore è stato applicato il carico di compressione.

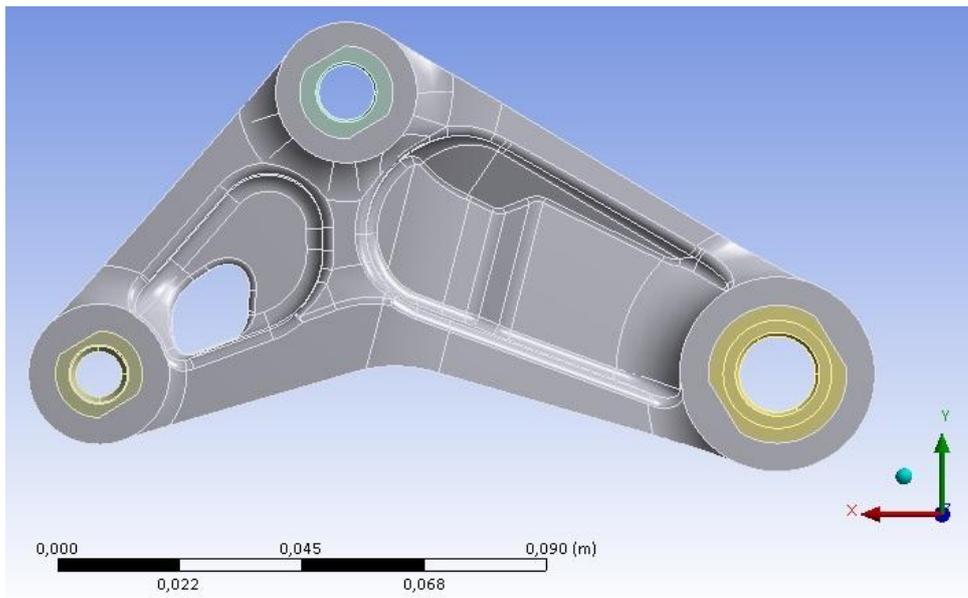
Per poter avere un raffronto con le prove fisiche svolte sui componenti, si è deciso di analizzare il sistema utilizzando un valore di carico simile a quello che avrebbe probabilmente portato a rottura i provini nelle prove fisiche.

Utilizzando lo stesso valore di carico si dovrebbero quindi notare le stesse sollecitazioni nelle prove fisiche e l'eventuale cedimento nei punti dove si supera il carico di rottura.

Per quanto riguarda i materiali sono stati usati i dati della lega di alluminio 6082 per le boccole e del composito SMC per il bilanciante forniti, per il materiale composito si è utilizzato, per le prove FEM, un valore di carico di rottura pari a 200MPa.

Il comportamento del SMC è stato considerato isotropo per semplicità di calcolo. Infatti come detto in precedenza, per un materiale composito a fibre corte disposte casualmente, il comportamento può essere assimilato a quello di un materiale isotropo. Si vedrà in seguito che la semplificazione non è errata e porta ad un risultato realistico.

3.2.1 Report prova FEM bilanciere SMC



Sistema misura: metrico

Materiali: Bilanciere CF-SMC, boccole 6082

Caratteristiche materiali:

TABLE 16

6082 > Constants

Density	2690, kg m ⁻³
---------	--------------------------

TABLE 17

6082 > Isotropic Elasticity

Temperature C	Young's Modulus Pa	Poisson's Ratio	Bulk Modulus Pa	Shear Modulus Pa
	6,9e+010	0,3	5,75e+010	2,6538e+010

TABLE 18

6082 > Tensile Yield Strength

Tensile Yield Strength Pa	3,1e+008
---------------------------	----------

TABLE 19

CF-SMC > Constants

Density	1550, kg m ⁻³
---------	--------------------------

TABLE 20

CF-SMC > Isotropic Elasticity

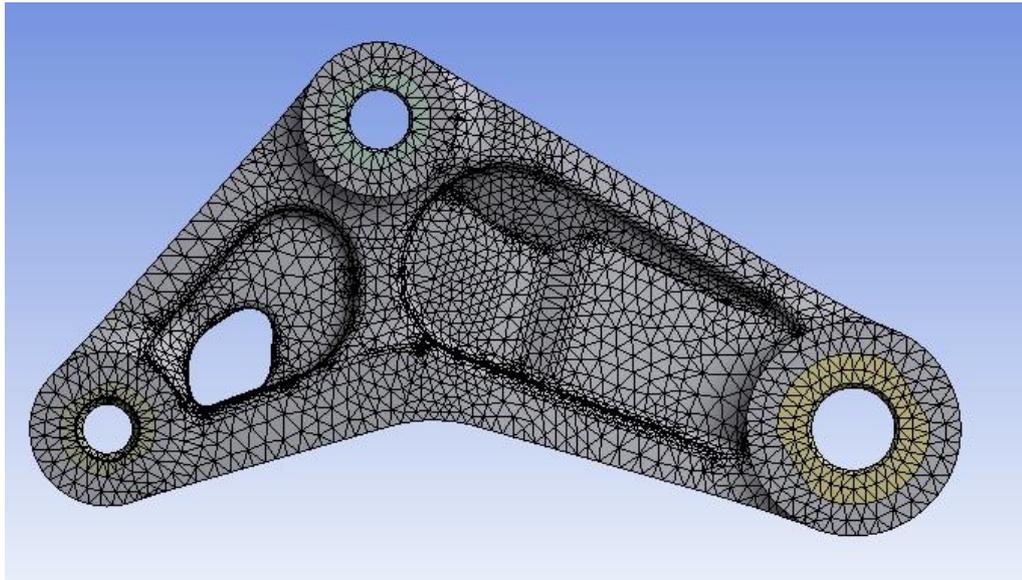
Temperature C	Young's Modulus Pa	Poisson's Ratio	Bulk Modulus Pa	Shear Modulus Pa
	3,8e+010	0,29	3,0159e+010	1,4729e+010

TABLE 21

CF-SMC > Tensile Ultimate Strength

Tensile Ultimate Strength Pa	2,e+008
------------------------------	---------

Mesh

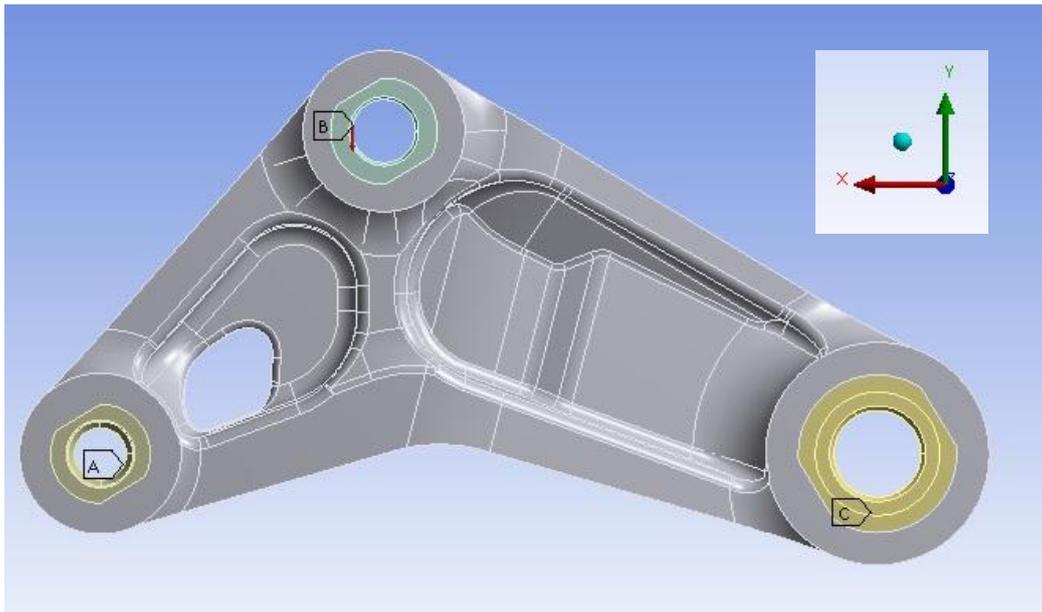


Dati mesh

Object Name	<i>Mesh</i>
State	Solved
Defaults	
Physics Preference	Mechanical
Relevance	100
Sizing	
Use Advanced Size Function	Off
Relevance Center	Fine
Element Size	2,e-003 m
Initial Size Seed	Full Assembly
Smoothing	High
Transition	Fast
Span Angle Center	Medium
Minimum Edge Length	6,9463e-006 m

Statistics	
Nodes	170118
Elements	106228
Mesh Metric	Element Quality
Min	2,69957443440364E-02
Max	0,999979620946478
Average	0,712197179164873
Standard Deviation	0,170345799235257

Disposizione carico e supporti



A: Supporto cilindrico

Bloccato assialmente e radialmente

Libero tangenzialmente

B: Applicazione carico (10000N)

In direzione -y

C: Carrello

Libero in direzione x

Per l'analisi FEM si sono considerate le tensioni massima principale e minima principale derivanti dall'analisi stessa.

Costruendo quindi i cerchi di Mohr relativi alle tensioni principali si potrà analizzare qualitativamente lo stato di tensione nel punto considerato.

Si vedrà dall'analisi che il componente presenterà due punti critici.

Per confermare lo stato di tensione verrà presentata anche l'analisi effettuata dal calcolatore sulle direzioni dei vettori delle tensioni principali.

3.3 Risultati

Maximum principal stress

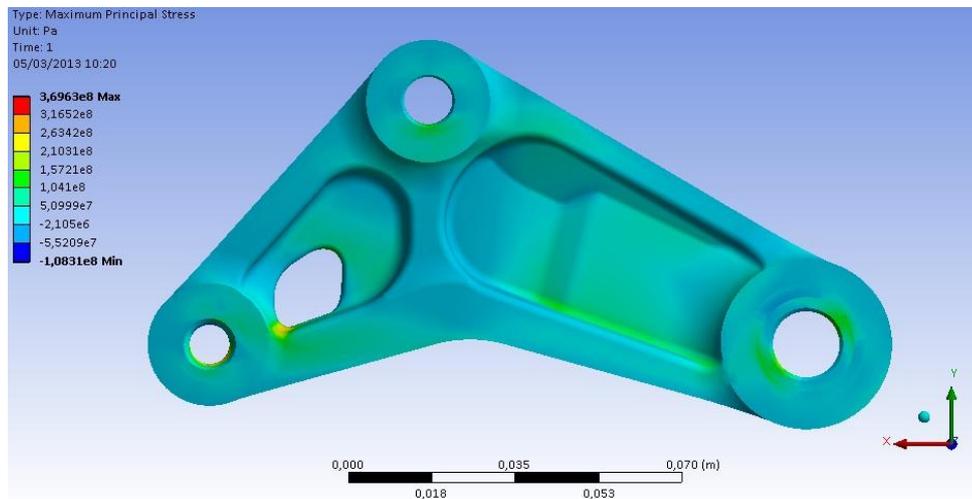


Figura 3.3.1-Grafico maximum principal stress

In figura 3.3.1 è presentato il plot del grafico derivato dall'analisi FEM relativo alla massima tensione principale. Si nota che il punto più sollecitato si trova nel punto di probabile concentrazione delle tensioni, in un raccordo dell'asola.

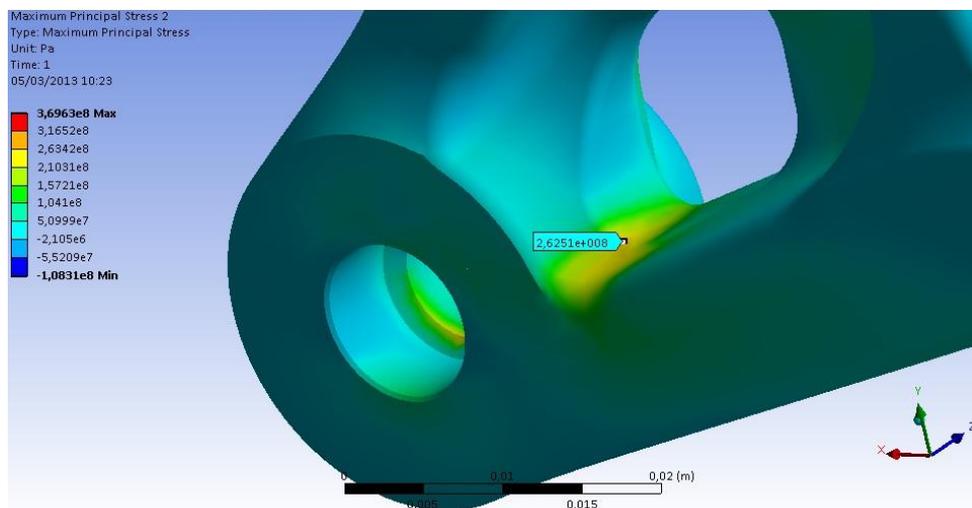


Figura 3.3.2-Punto più sollecitato a trazione

In figura 3.3.2 è evidenziato il punto dove la tensione massima principale risulta massima. Si ha un valore pari a circa 260MPa, superiore al valore del carico di rottura a trazione del materiale (circa 200MPa).

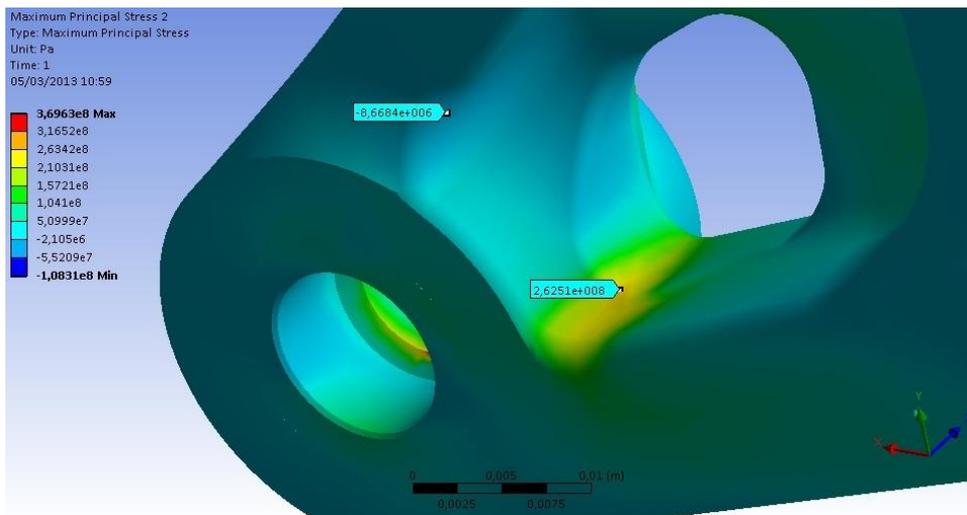


Figura 3.3.3-Punti più sollecitati

In figura 3.3.3 oltre al punto più sollecitato per quanto riguarda la tensione massima principale è indicato il valore della tensione massima principale nel punto che risulta, dall'analisi della tensione minima principale, più sollecitato a compressione.

Minimum principal stress

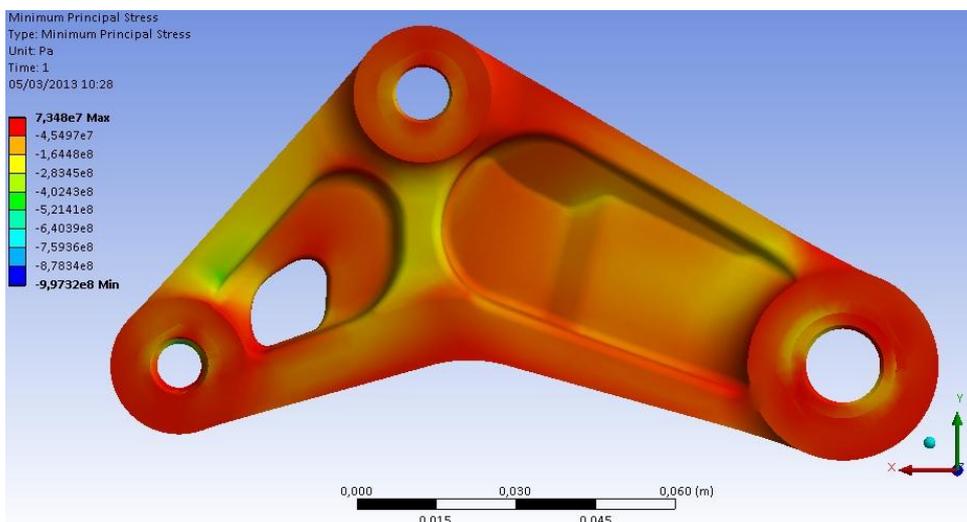


Figura 3.3.4-Grafico minimum principal stress

In figura 3.3.4 è presentato il grafico derivante dall'analisi FEM della tensione minima principale. Si nota che viene confermato il punto critico evidenziato dalla tensione massima principale, nel raccordo dell'asola. Si ha però un alto punto critico poco sopra (colore verde) che risulterà caricato a compressione che, come visto nel paragrafo 1.3.1, potrà resistere a sollecitazioni maggiori che a trazione.

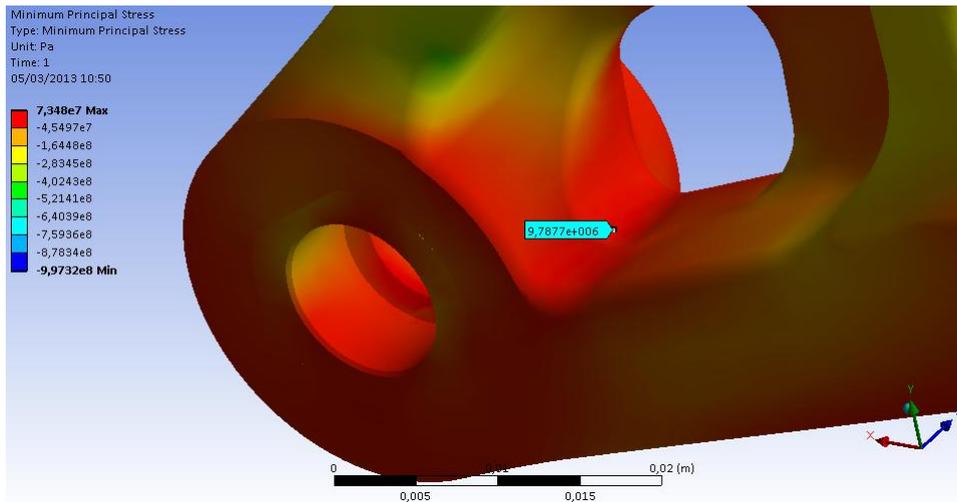


Figura 3.3.5-Punto critico a trazione

In figura 3.3.5 è evidenziato il valore della tensione minima principale nel punto critico analizzato in precedenza. Si ha un valore di circa 10MPa.

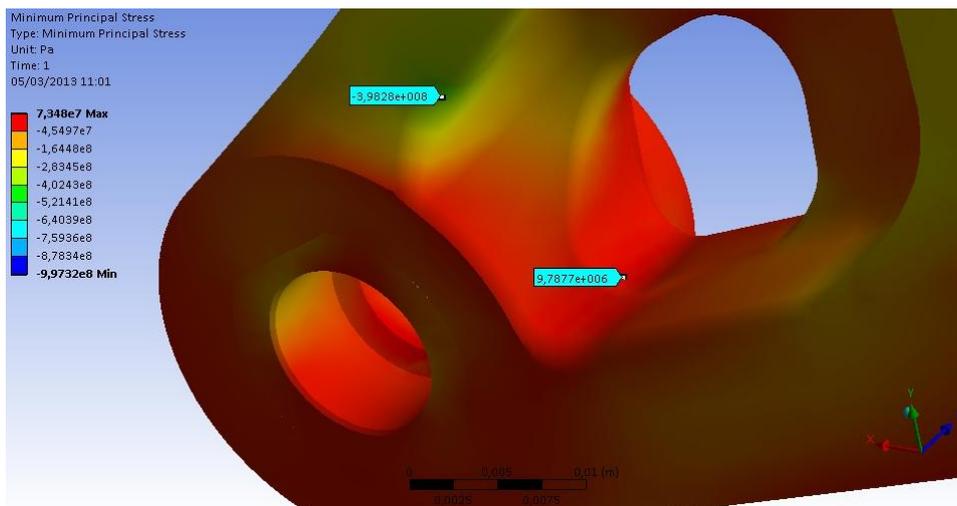


Figura 3.3.6-Punti più sollecitati

In figura 3.3.6 è evidenziato il valore della tensione minima principale nel punto più sollecitato a compressione. In questo caso si raggiunge un valore di tensione di circa 400MPa (negativo-compressione), molto superiore al valore di carico di rottura a trazione del materiale.

Si presentano ora alcune immagini con l'analisi dei vettori delle tensioni principali che confermeranno gli stati di tensione.

Vector principal stress

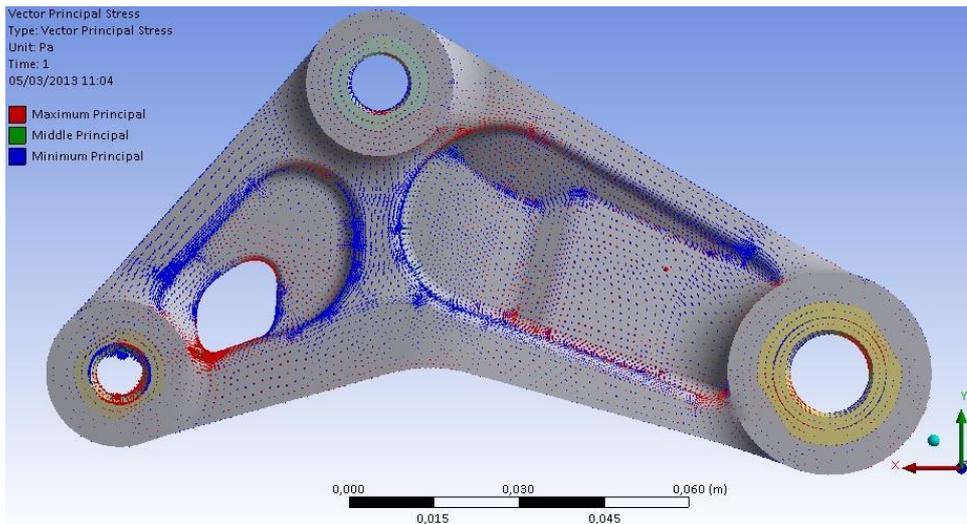


Figura 3.3.7-Grafico vettori delle tensioni principali

In figura 3.3.7 è presentato il grafico relativo alle direzioni dei vettori delle tensioni principali. Si nota l'intensificazione dei vettori nei punti critici prima considerati. In figura 3.3.8 è evidenziato il particolare dell'intensificazione dei vettori nei due punti sopraccitati.

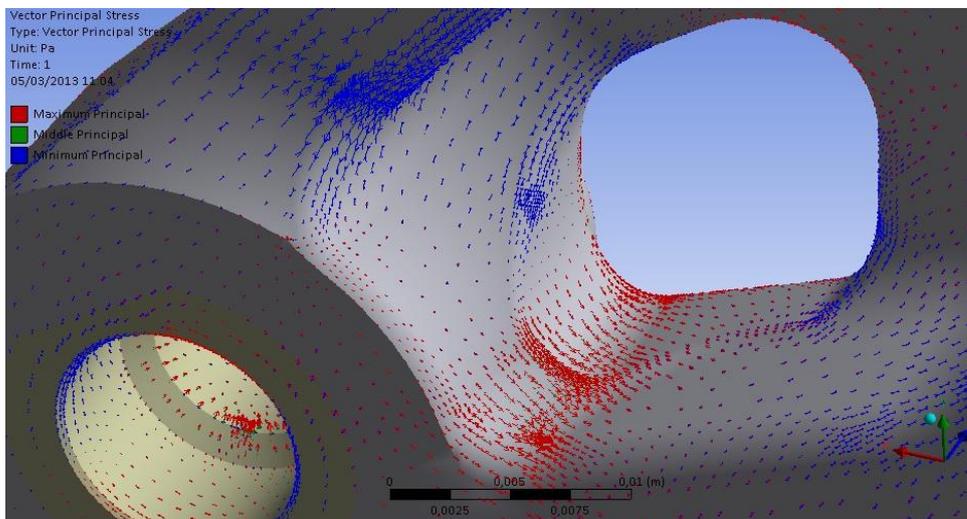


Figura 3.3.8-Vettori nei punti critici

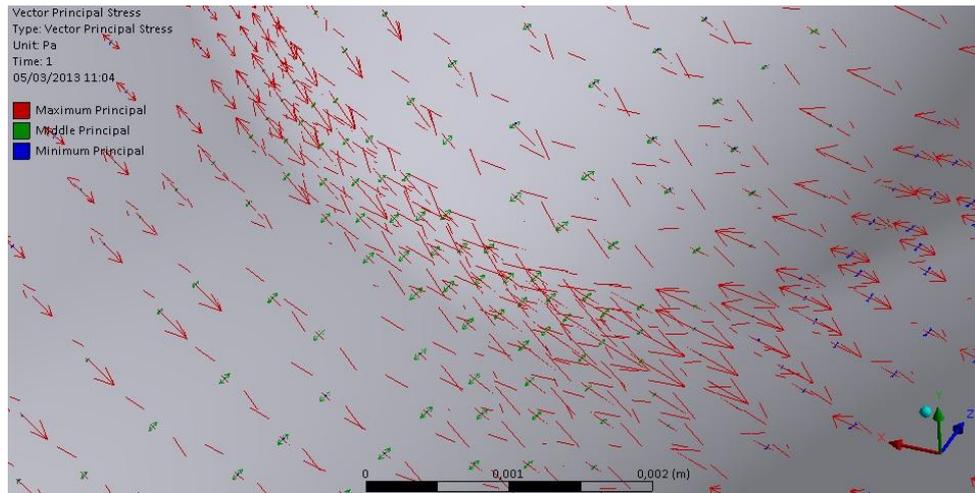


Figura 3.3.9-Direzione vettori punto più sollecitato a trazione

In figura 3.3.9 è mostrato un dettaglio della zona di massima sollecitazione a trazione. Si notano infatti i vettori delle tensioni massime principali (frecce rosse) prevalere su quelli delle tensioni medie principali (frecce verdi, perpendicolari a quelli delle tensioni massime). Le direzioni e i versi confermano che il punto è sollecitato a trazione.

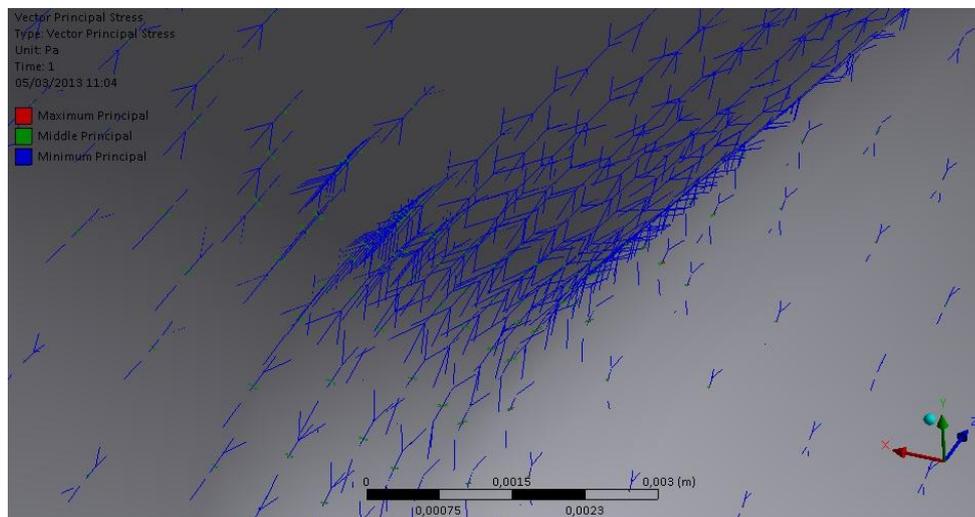


Figura 3.3.10-Direzione vettori punto più sollecitato a compressione

In figura 3.3.10 si nota la concentrazione dei vettori di tensione minima principale (frecce blu) nel punto più sollecitato a compressione. La direzione e il verso dei vettori stessi confermano la presenza di una sollecitazione a compressione in quella zona.

3.4 Commenti

Considerando le prove FEM e le prove fisiche effettuate e descritte in seguito si denota una buona corrispondenza tra i punti critici evidenziati.

Simulando nelle prove FEM un carico di prova a compressione di 10kN si riscontra il superamento del carico di rottura a trazione del materiale nel punto di massima sollecitazione a trazione evidenziato in precedenza.

Dalla simulazione risultano quindi due punti critici, uno sollecitato quasi esclusivamente a trazione e uno sollecitato quasi esclusivamente a compressione.

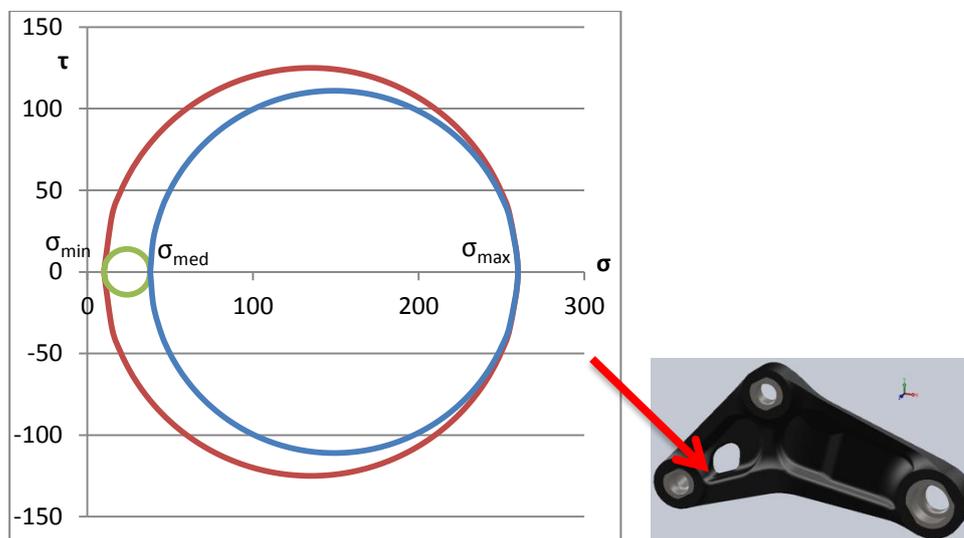


Figura 3.4.1-Cerchio di Mohr punto più sollecitato a trazione

In figura 3.4.1 è mostrato il cerchio di Mohr relativo al punto più sollecitato nell'asola (stato di tensione triassiale). Come visto in precedenza, in quel punto, dal grafico delle tensioni massime principali si era ricavato un valore di circa 260MPa di tensione massima principale. Dal grafico delle tensioni minime principali si era ricavato un valore di circa 10MPa di tensione minima principale. Dall'analisi FEM sono stati anche rilevati i valori di tensione media principale (circa 38MPa) e confermano lo stato di tensione.

Si può quindi notare che in questo punto la sollecitazione è quasi esclusivamente di trazione e si ha il superamento del valore del carico di rottura a trazione del materiale fornito di circa il 30%.

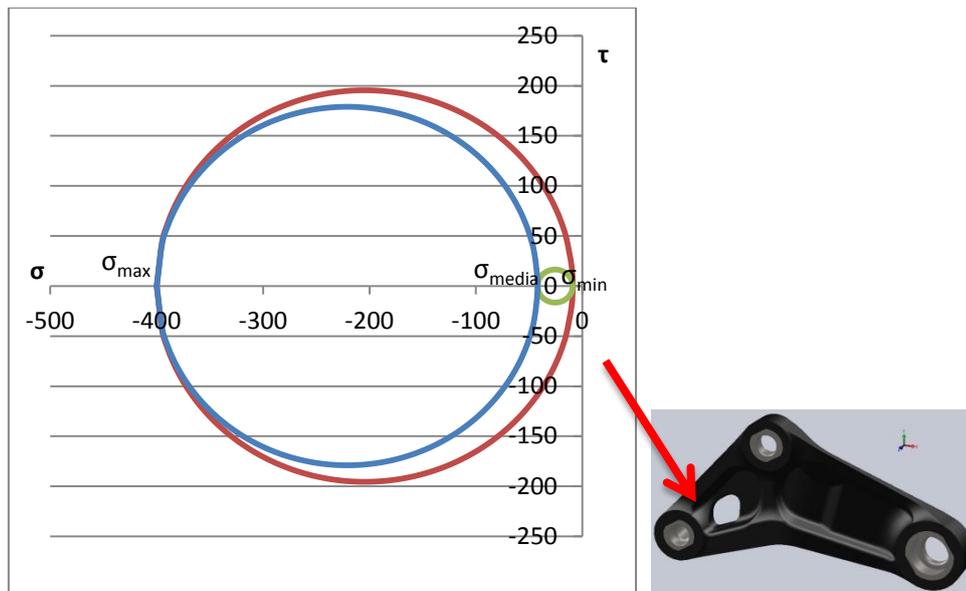


Figura 3.4.2-Cerchio di Mohr punto più sollecitato a compressione

In figura 3.4.2 è mostrato il cerchio di Mohr relativo allo stato di tensione nel punto più sollecitato a compressione. In questo caso dal grafico relativo alla tensione massima principale si era registrato un valore di tensione massima di circa -10MPa. Dal grafico relativo alla tensione minima principale nello stesso punto invece si era ricavato un valore di tensione minima di circa -400MPa. Dall'analisi della tensione media principale invece si era registrato un valore nel punto di circa -42MPa.

È perciò piuttosto evidente che in questa zona, secondo la simulazione, lo stato di tensione risulta quasi esclusivamente di compressione. Sempre secondo la simulazione, in questa zona si supera abbondantemente il carico di rottura equivalente del materiale. Essendo però, come visto nel paragrafo 1.3.1, lo stato di tensione a compressione meno gravoso è lecito immaginare che il componente possa resistere in questo punto.

È infatti giusto aspettarsi, e lo si verificherà nelle prove fisiche, che il punto più critico risulti quello dove effettivamente viene superato il carico di rottura a trazione dallo stato di tensione a trazione.

4 Prove di caratterizzazione componente

4.1 Attrezzatura

Per il corretto svolgimento della prova era necessaria un'attrezzatura di montaggio dei componenti.

L'attrezzatura deve essere posta sul piano della macchina di prova, sostenere il provino e prevedere un collegamento tra la parte mobile della macchina e il punto di applicazione del carico sul componente.

Lo studio è stato fatto considerando dapprima le quote dei componenti da testare e tenendo conto della possibilità di regolazione dell'insieme.

L'attrezzatura si sviluppa partendo da un piano in alluminio che dovrà essere posto sulla base della macchina di prova e su cui verranno fissati i supporti dei provini.

Il piano è progettato in modo che due dei supporti dei provini possano scorrere per realizzare una classica struttura cerniera e carrello.

I supporti sono stati progettati considerando le quote esistenti dei provini, della macchine e dei perni che dovranno contrastare il carico.

Per realizzare la condizione di prova con carrello-cerniera si è deciso di bloccare una parte del componente sulla base serrando i blocchetti di fissaggio con una vite M8 e posizionandoli con una spina. Dalla parte opposta per realizzare il carrello sono previste due sedi di scorrimento con delle bronzine per ridurre l'attrito.

Nella parte di applicazione del carico si è studiato un blocchetto apposito creando una forcella nella parte che si accoppia con il pezzo in prova e con un foro filettato superiormente per l'accoppiamento con la macchina di prova.

Dato che la prova svolta è di sola compressione non si è ritenuto necessario un ancoraggio della piastra alla base della macchina in quanto avrebbe comportato una complicazione non necessaria dell'attrezzatura. Inoltre avrebbe impedito lo spostamento libero del

componente stesso imprimendo ulteriori sforzi non voluti ai provini.

Per accoppiare i provini all'attrezzatura si sono poi sviluppati dei perni considerando il carico da applicare e le quote delle boccole presenti nei pezzi.

Per quanto riguarda il perno superiore, su cui verrà applicato il carico di compressione, è stato progettato principalmente considerando la quota del diametro e lasciato libero per non introdurre nel pezzo altri sforzi oltre alla compressione.

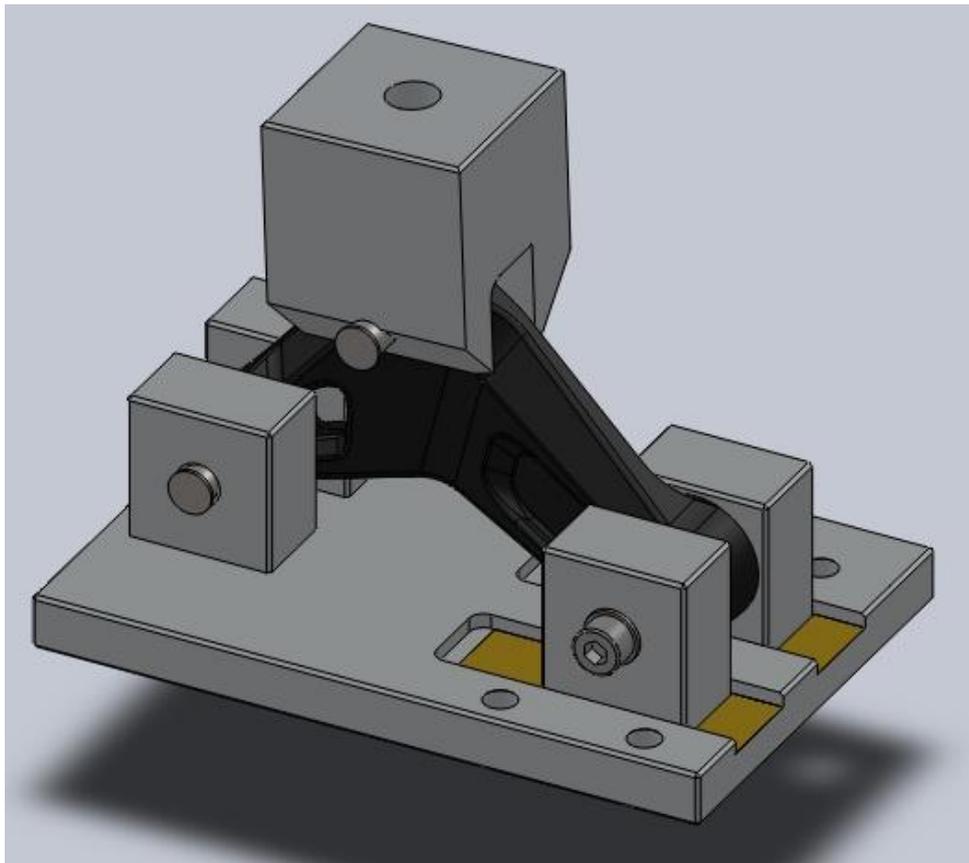


Figura 4.1.1-Attrezzatura in posizione di prova con bilanciere montato

Avendo utilizzato elementi intercambiabili per l'attrezzatura è possibile cambiare l'inclinazione del pezzo, quindi l'angolo di incidenza su di esso del carico, semplicemente interponendo degli spessori tra la base e i blocchetti di sostegno o tutt'al più inserendo altri blocchetti con quote differenti.

Dopo aver preso visione e avuto le quote della macchina di prova si è arrivati alla conclusione che risulta impossibile avere un'attrezzatura che possa ospitare entrambi i bilancieri (destro e

sinistro) contemporaneamente. Si è quindi optato per due attrezzature per ospitare i bilancieri separatamente.

In questo modo si hanno due piastre di base che possono essere posizionate tranquillamente sulla macchina di prova, le attrezzature risultano più semplici da costruire e, per fare le prove, non sono necessari smontaggi dell'attrezzatura stessa costituendo perciò un discreto vantaggio.

Per quanto riguarda l'accoppiamento tra i perni dell'attrezzatura e i componenti da testare si è deciso di adottare tolleranze piuttosto larghe. Si è fatta questa scelta innanzitutto per semplicità di montaggio e smontaggio dei provini e in secondo luogo per lasciare libero il componente in modo da non provocare altre tensioni su di esso.

Per poter misurare la rigidità dei componenti bisogna avere il componente completamente bloccato. Per questo nelle due attrezzature è stato previsto un componente smontabile che blocca in posizione la parte di supporto che funge da carrello.

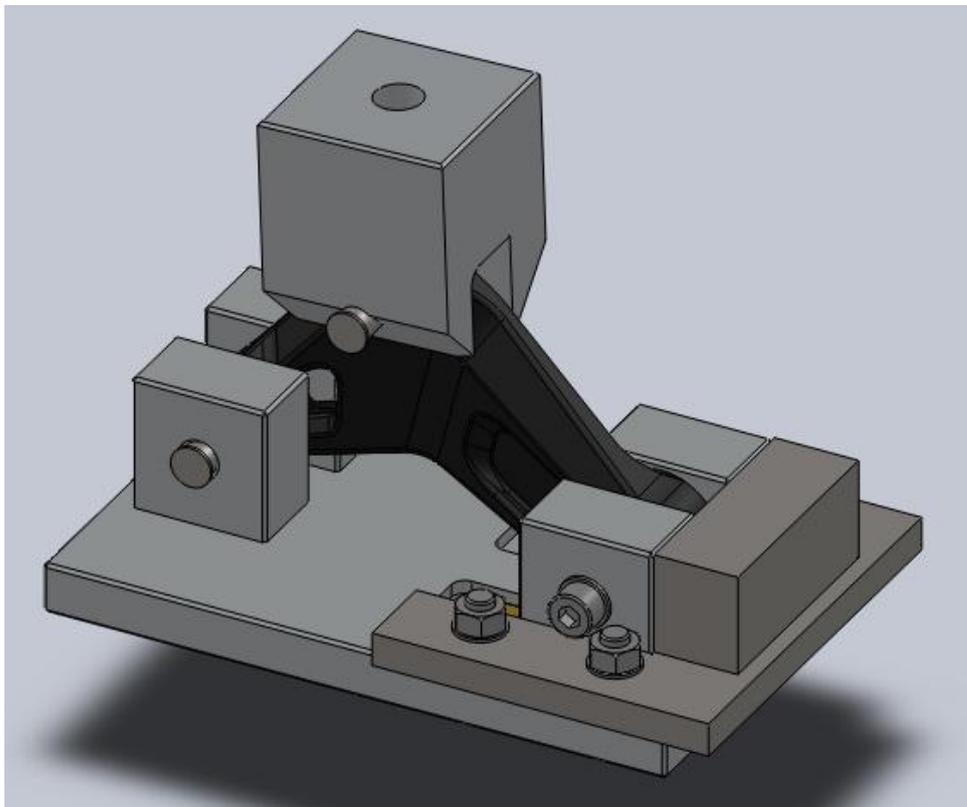


Figura 4.1.2-Attrezzatura con montato il blocco per stimare la rigidità

L'attrezzatura, nel complesso piuttosto semplice, è stata prodotta nell'officina interna Riba con materiali presenti in magazzino. Si è scelto l'alluminio per la piastra di base e per i supporti. Essendo il materiale semplice da lavorare e poco costoso si sono sovradimensionati i componenti per andare a vantaggio di sicurezza. Per quanto riguarda i perni di accoppiamento avendo misure obbligate date dai provini si è scelto un acciaio temprato da circa 1500MPa di carico di rottura.

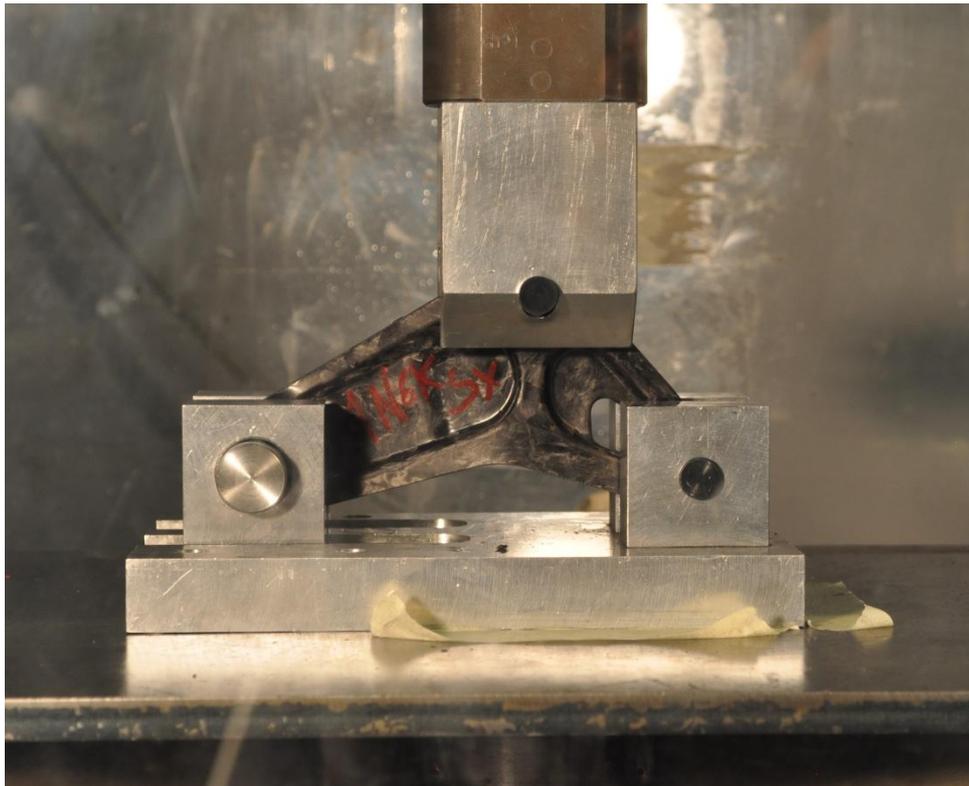
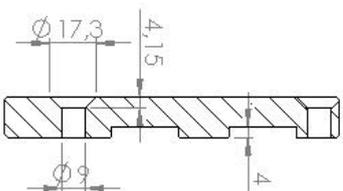
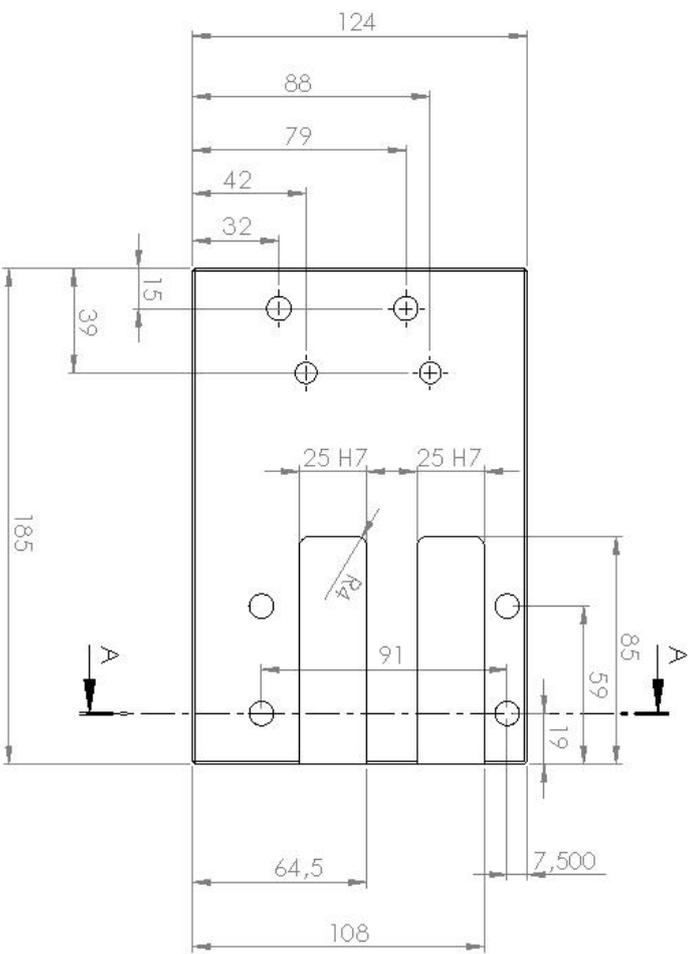
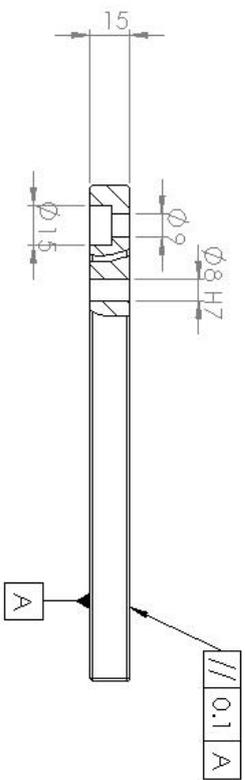


Figura 4.1.3-Attrezzatura montata sulla macchina di prova

L'attrezzatura è stata progettata con un software di disegno tridimensionale per valutarne al meglio gli ingombri. In seguito sono stati preparati i disegni esecutivi 2D per la realizzazione dei vari componenti.

4.1.1 Disegni 3D e costruttivi

Verranno ora presentati alcuni disegni costruttivi di componenti dell'attrezzatura di prova per il bilanciere sinistro. In particolare il disegno della base in alluminio, di un perno, di un blocchetto di supporto e del blocchetto superiore di spinta.



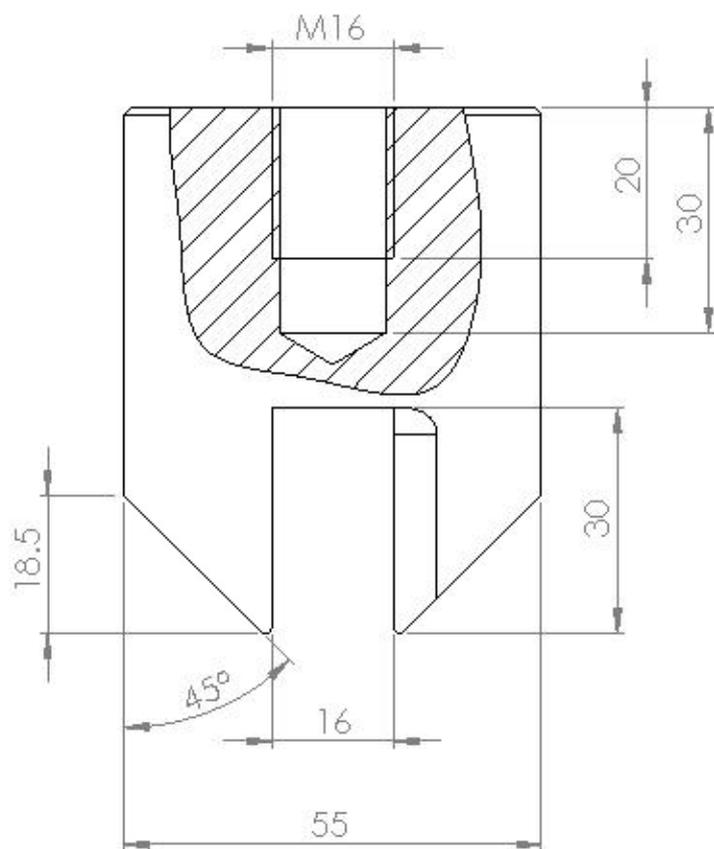
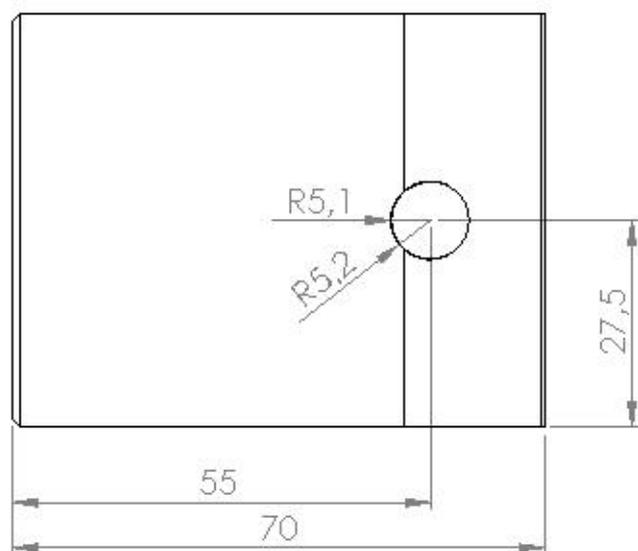
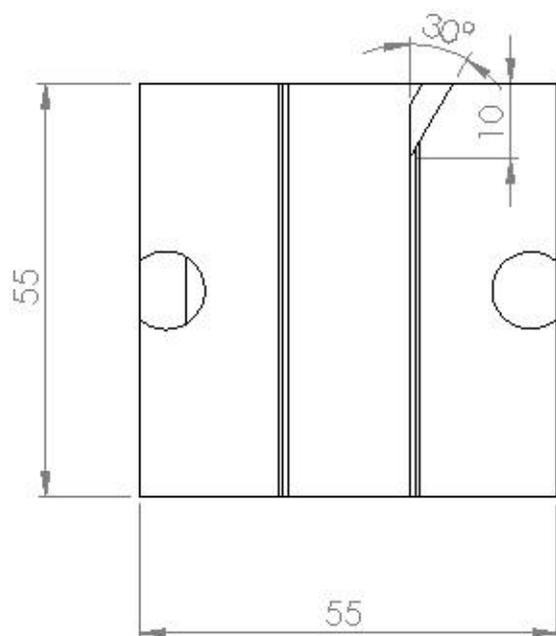
SEZIONE A-A

SE NON SPECIFICATO: QUOTI IN MILLIMETRI FINITURA SUPERFICIE: TOLLERANZE: UNIFORMI ANCHE SU ANGOLI		RINUNTA:		3.2 / 0.8		RAVVIATURA E MISURAZIONE DEI SCORRI/INCHI		NON SCALARE IL DISCHIO		REVISIONE	
DISSEGNIATO	VERIFICATO	APPROVATO	FATTO	QUALITÀ	MATERIALE:	Alluminio		AL DISCHIO		Disegno 11	
Nome	Area	Data									A3
Base bilanciata dx											
Scaletti 2											
Posso 1 da 1											

Base bilanciata dx

Disegno 11

A3



SE NON SPECIFICATO:
 QUOTE IN MILIMETRI
 FINITURA SUPERFICIE:
 TOLLERANZE:
 LINEARE:
 ANGOLARE:

FINITURA:

3.2

SBAVATURA E
 INTERRUZIONE DI
 BORDI NETTI

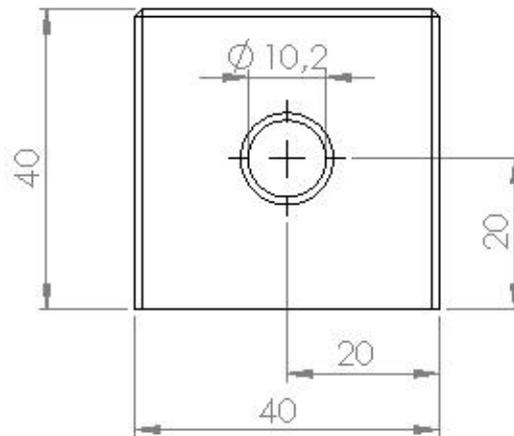
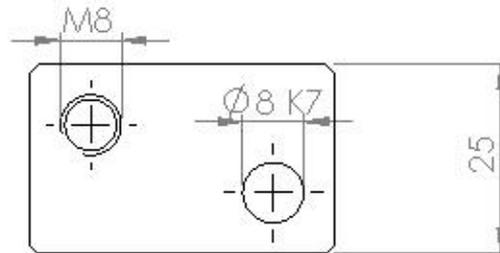
NON SCALARE IL DISEGNO

REVISIONE

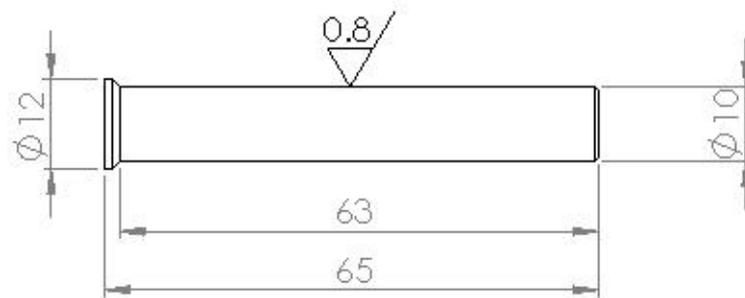
Smussi non quotati $1 \times 45^\circ$
 Raccordi non quotati R1
 Tolleranze generali UNI ISO 2768-m

	NOME	FIRMA	DATA		
DISEGNATO					
VERIFICATO					
APPROVATO					
FATTO					
QUANTITÀ				MATERIALE:	
				Alluminio	
				PESO:	

TITOLO:	<h1>Blocchetto spinta dx</h1>	
N. DISEGNO		
SCALA: 1:1	FOGLIO 1 DI 1	A4



SE NON SPECIFICATO: QUOTE IN MILIMETRI FINITURA SUPERFICIE: TOLLERANZE: LINEARE: ANGOLARE:		FINITURA: 3.2/ ▽		SBAVATURA E INTERRUZIONE DEI BORDI NETTI		NON SCALARE IL DISEGNO		REVISIONE	
						Smussi non quotati 1x45° Raccordi non quotati R1 Tolleranze generali UNI ISO 2768-m			
						TITOLO: Supporto fisso			
						N. DISEGNO		Disegno 4	
				MATERIALE: Alluminio		SCALA: 1:1		FOGLIO 1 DI 1	
				PESO:				A4	



SE NON SPECIFICATO: QUOTE IN MILIMETRI FINITURA SUPERFICIE: TOLLERANZE: LINEARE: ANGOLARE:		FINITURA: 3.2 / 0.8		SBAVATURA E INTERRUZIONE DEI BORDI NETTI		NON SCALARE IL DISEGNO		REVISIONE	
						Smussi non quotati $1 \times 45^\circ$ Tolleranze generali UNI ISO 2768-m			
	NOME	FIRMA	DATA			TITOLO:			
DISEGNATO						<h1>Perno spinta</h1>			
VERIFICATO									
APPROVATO									
FATTO									
QUANTITÀ				MATERIALE:	N. DISEGNO		<h1>Disegno 12</h1>		A4
				Acciaio					
				PESO:	SCALA: 1:1		FOGLIO 1 DI 1		

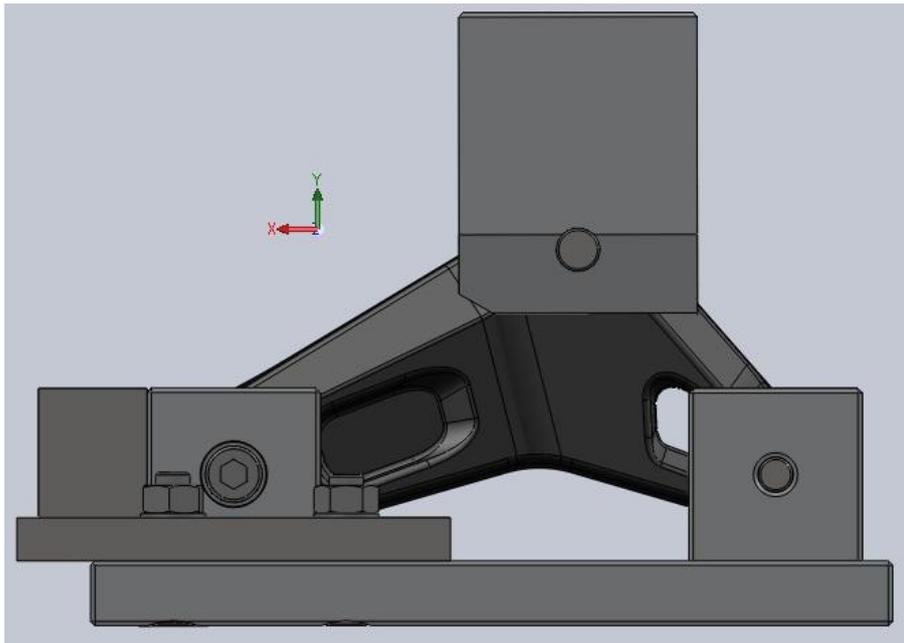


Figura 4.1.1.1-Vista posteriore assieme attrezzatura

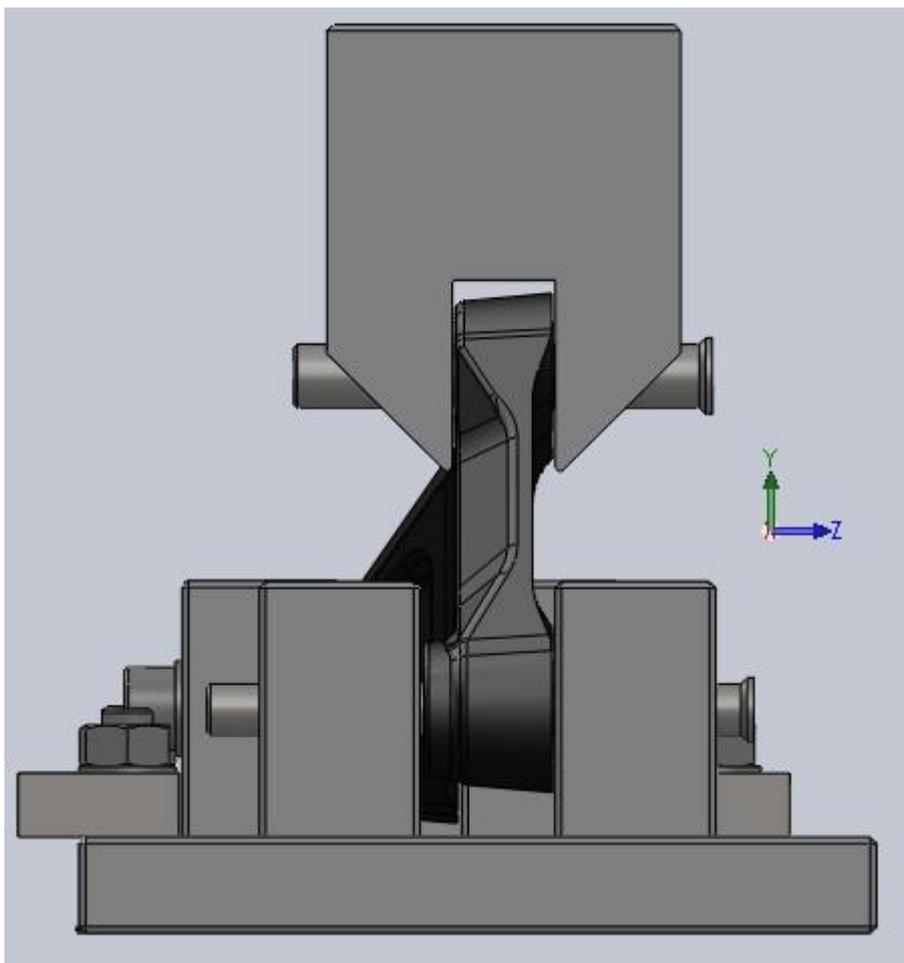


Figura 4.1.1.2-Vista sinistra assieme attrezzatura

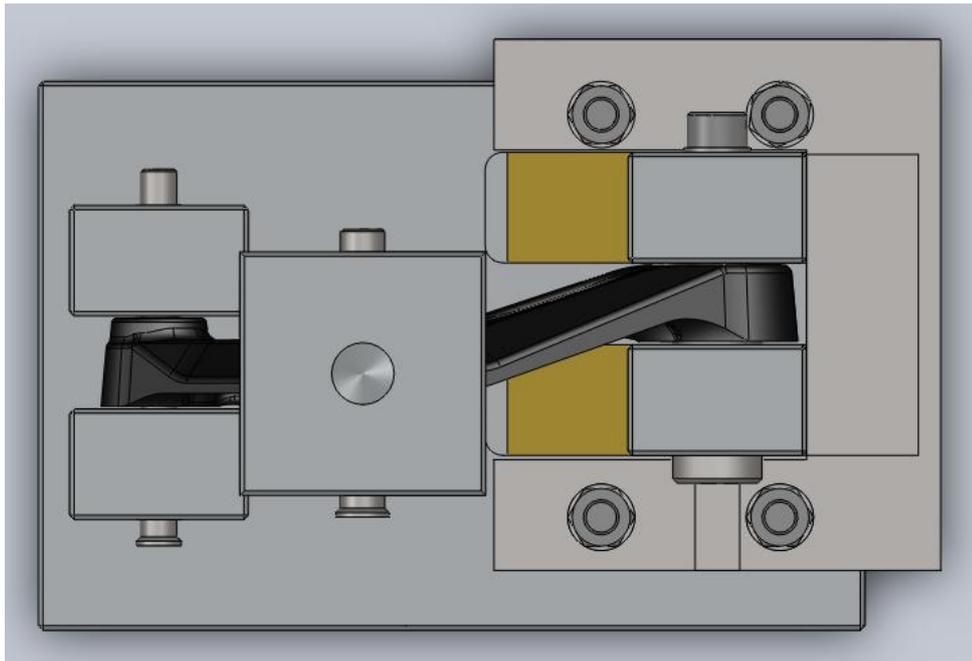


Figura 4.1.1.3-Vista superiore assieme attrezzatura con blocco

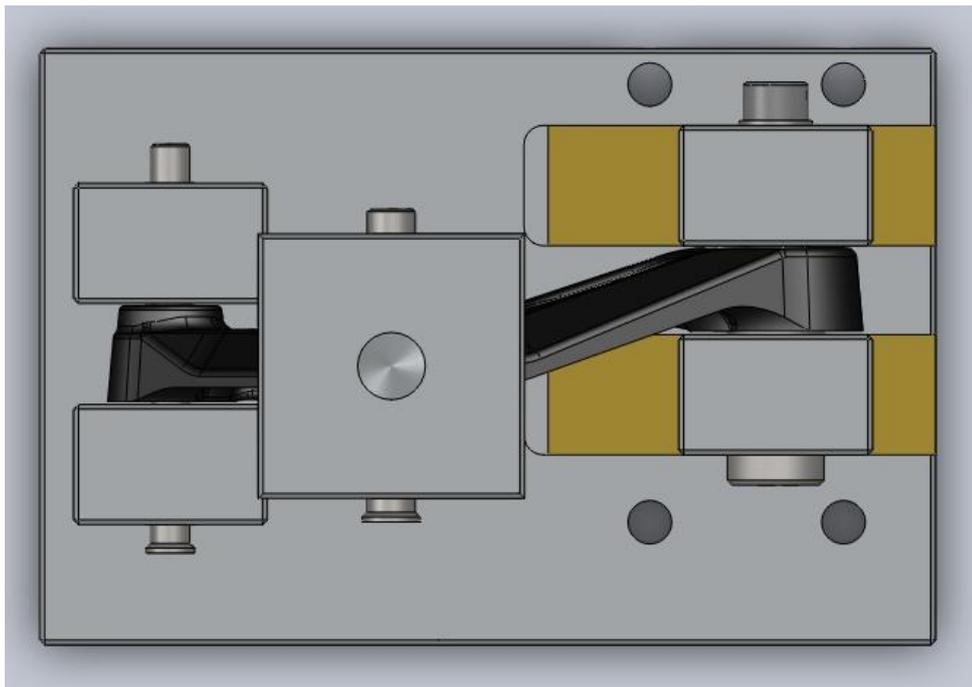


Figura 4.1.1.4-Vista superiore assieme attrezzatura senza blocco

In figura 4.1.1.1-2-3-4 sono mostrate delle viste 3D del disegno progettuale dell'attrezzatura. Si possono notare l'inserimento delle bronzine di scorrimento, del blocco per la stima della rigidità e il leggero gioco lasciato tra bilanciere, perni e attrezzatura stessa per non imporre altre tensioni non volute ai provini.

4.1.2 Verifica perni

L'intera attrezzatura è stata progettata considerando principalmente gli ingombri della macchina di prova, dei componenti da testare e delle quote di collegamento di provini e macchina.

Per quanto riguarda i complementi di sostegno in alluminio sono stati costruiti sovradimensionandoli dato il basso costo del materiale utilizzato e la facilità di lavorazione.

Mentre per i perni di accoppiamento è stata effettuata una verifica di resistenza a flessione, taglio e rifollamento.

Le quote dimensionali del diametro dei perni erano obbligate, dovevano infatti corrispondere con le quote dei fori delle boccole del bilanciere. L'unica dimensione da poter variare era quindi quella della lunghezza dei perni stessi, che però non inficia sulla resistenza a taglio che, nel caso della prova di compressione in oggetto, risulta la sollecitazione maggiore.

Sono quindi state svolte le verifiche alle sollecitazioni sopra citate per i perni presenti nell'attrezzatura.

4.1.2.1 Verifica perno di spinta

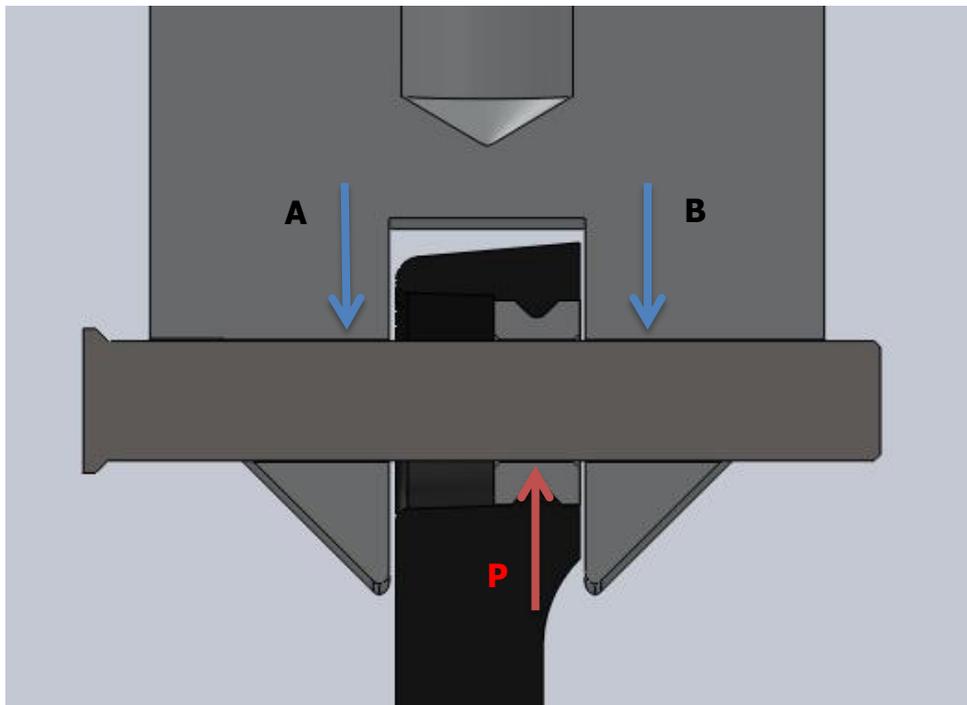


Figura 4.1.2.1.1-Sezione del perno di spinta

Si è schematizzato lo schema come una trave su carrello e appoggio. La pressa utilizzata può esercitare un massimo di 100kN di forza, per la verifica del perno si è ipotizzato di arrivare a 50kN, valore comunque molto alto per il SMC.

In A e B sono posti gli appoggi mentre il carico viene scaricato sulla boccia attorno al perno considerando il carico distribuito lungo la lunghezza della boccia. Calcolando le reazioni vincolari A e B si ottiene A=12,5kN e B=37,5kN.

Di conseguenza considerando il taglio in una sezione circolare si ha [1]:

$$\tau = \frac{4T}{3A} = 636MPa$$

Con T=B=37,5kN e A sezione del perno con diametro 10mm.

Per il calcolo della flessione si calcola il momento flettente massimo secondo [9]:

$$M_{max} = \frac{q}{2L^2} \left[a \left(b + \frac{a}{2} \right) \right] = 106812N \cdot mm$$

Dove q è il carico distribuito (P=qa=50kN), a=7mm è la lunghezza di appoggio della boccia, b=9mm la lunghezza della trave libera e L=16mm la lunghezza della trave tra gli appoggi. Da cui [8]:

$$\sigma = \frac{M_{max}}{0,0982 \cdot d^3} = 1087MPa$$

Con d diametro del perno e M_{max} momento flettente massimo.

Considerando il calcolo delle tensioni equivalenti secondo Von Mises si ricava:

$$\sigma_{id} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} = 1548MPa$$

Per quanto riguarda la resistenza al rifollamento deve verificarsi:

$$p = \frac{P}{d \cdot t} = 256MPa < 2\sigma_{amm}$$

Con p pressione di contatto, P il carico applicato e σ_{amm} la tensione ammissibile del blocchetto in alluminio.

L'acciaio utilizzato per produrre i perni una tensione massima di rottura di circa 1500MPa quindi, come si vedrà in seguito nelle prove,

al raggiungimento di circa 50kN di carico il perno presenta una rottura fragile. Per il rifollamento invece, considerando un alluminio con carico di rottura di 250MPa, non ci sono problemi di cedimento. Con carichi fino ai 50kN il perno non presenta problemi di resistenza.

4.1.2.2 Verifica perno diametro 8mm

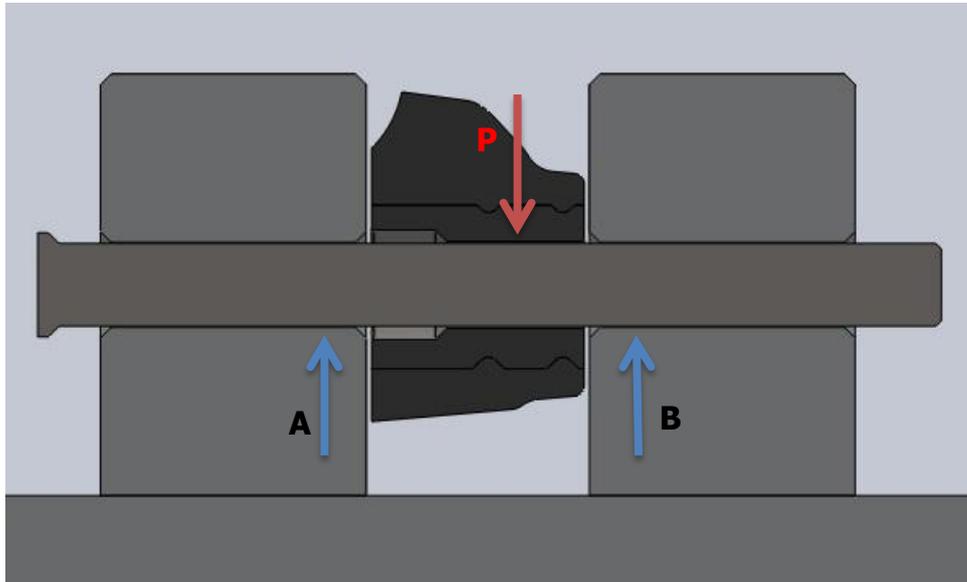


Figura 4.1.2.2.1-Sezione del perno diametro 8mm

Si considera una schematizzazione simile alla precedente con due appoggi e un carico distribuito lungo la lunghezza della boccia. In questo caso, dato il perno di diametro obbligato di 8mm e, considerando che il carico iniziale si divide su due supporti, ipotizziamo che il carico P valga 25kN.

Per le reazioni vincolari si ha: $A=9,52\text{kN}$ e $B=15,48\text{kN}$. Da cui:

$$\tau = \frac{4T}{3A} = 410\text{MPa}$$

Con $T=B=15480\text{N}$ e A sezione del perno con diametro 8mm.

Per il momento flettente si ha:

$$M_{max} = \frac{q}{2L^2} \left[a \left(b + \frac{a}{2} \right) \right] = 77475\text{N} \cdot \text{mm}$$

Con $P=qa=25\text{kN}$, $a=13\text{mm}$ lunghezza di appoggio della boccia (del carico distribuito), $b=8\text{mm}$ lunghezza della parte di perno libero e $L=21\text{mm}$ lunghezza del perno tra gli appoggi.

$$\sigma = \frac{M_{max}}{0,0982 \cdot d^3} = 1540MPa$$

Si ha quindi:

$$\sigma_{id} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} = 1695MPa$$

Che supera il carico di rottura dell'acciaio considerato.

Ipotizziamo perciò che il carico applicato sul perno sia di 20kN.

Quindi: A=12620N B=12380N. (T=A)

$$\tau = \frac{4T}{3A} = 335MPa$$

$$M_{max} = \frac{q}{2L^2} \left[a \left(b + \frac{a}{2} \right) \right] = 61980N \cdot mm$$

$$\sigma = \frac{M_{max}}{0,0982 \cdot d^3} = 1233MPa$$

Di conseguenza:

$$\sigma_{id} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} = 1358MPa$$

Che risulta minore del carico di rottura dell'acciaio considerato.

Per quanto riguarda il rifollamento:

$$p = \frac{P}{d \cdot t} = 100MPa < 2\sigma_{amm}$$

Per cui si deduce che non rappresenta un problema per la resistenza.

Dalle verifiche si deduce che l'attrezzatura può presentare dei problemi quando il carico applicato dalla macchina si avvicina a 50kN. Con il materiale di prova però è probabile che si rimanga a valori decisamente più bassi.

Come si vedrà dalle prove effettuate il perno di 8mm non presenterà nessun problema o cedimento, al contrario il perno di spinta durante la prova sul componente in alluminio arriverà a rottura attorno a un valore di carico di 50kN come calcolato.

4.2 Prove sul componente

4.2.1 Macchina di prova

Per la caratterizzazione del componente si è deciso di effettuare quindi prove di compressione. La macchina utilizzata è una pressa oleodinamica, in grado di una spinta massima di 100kN, in possesso all'Università di Bologna nel laboratorio della Facoltà di Forlì.



Figura 4.2.1.1-Macchina di prova

La macchina è prodotta da Italsigma e, come si evince da figura 4.2.1.1, è una pressa con configurazione a portale. La trave superiore può scorrere lungo due guide laterali per adeguarsi alla dimensione dell'oggetto da testare. Questo elemento richiede ovviamente una grande rigidità per non falsare le misure. Una volta fissata la trave superiore il carico di spinta viene impresso dal pistone idraulico, dal basso verso l'alto, che si trova all'interno della parte inferiore della macchina. Il pistone idraulico è collegato a una

centralina idraulica separata dotata di motore asincrono trifase e delle sicurezze (Figura 4.2.1.2).



Figura 4.2.1.2-Banco di controllo della pressa di prova e centralina

Fissata sulla trave superiore si trova la cella di carico che misura istante per istante la forza esercitata.

Sia la cella di carico che la parte idraulica sono collegate ad un sistema di controllo computerizzato che registra tutti i dati di prova istante per istante (Figura 4.2.1.2).

Il sistema di controllo al termine di ogni prova permette di avere la matrice dei dati registrati di tempo, spostamento e carico.

In tempo reale invece permette di visualizzare il carico, lo spostamento del pistone idraulico e il relativo grafico.

4.2.2 Prove

Le prove sono quindi state svolte con la macchina precedentemente descritta utilizzando l'attrezzatura progettata.

I test sono stati svolti in due blocchi con diversi lotti di produzione dei componenti. Ogni prova prevedeva il montaggio del provino, l'applicazione del carico, lo stop della macchina dopo la rottura dello stesso e lo smontaggio del provino.

Per avere dati di confronto a quelli raccolti per i provini in CF-SMC sono state effettuate prove anche su due componenti in alluminio.

Le prove sono state effettuate in due blocchi con diversi lotti di produzione del componente per valutarne le differenze.

Le prove si sono svolte tutte secondo le stesse condizioni e con l'attrezzatura opportunamente lubrificata per evitare attriti elevati e fenomeni di impuntamento che avrebbero portato all'azione di altri carichi indesiderati e all'eventuale falsamento delle prove.

Nei grafici seguenti vengono riportati gli andamenti delle curve carico-spostamento derivanti dai dati raccolti dal sistema di controllo della macchina di prova.

Il carico è quello misurato istante per istante dalla cella di carico della macchina. Per poter confrontare i grafici di ogni prova e per motivi di privacy aziendale, i valori del carico sono stati parametrizzati.

Lo spostamento è quello misurato sul pistone idraulico di spinta della macchina stessa. Per questo motivo in alcuni grafici si noterà che il carico comincerà ad aumentare solamente dopo un certo spostamento, dovuto all'avvicinamento della parte di spinta all'attrezzatura. La parte importante da prelevare dal grafico è comunque il carico di rottura massimo rilevato e la pendenza della curva nella parte elastica.

Oltre alle prove sui componenti in SMC sono state effettuate prove sui componenti in alluminio in produzione per poter fare un confronto fra i materiali. Non è però possibile rendere pubblici questi dati.

4.2.2.1 Primo blocco di prove

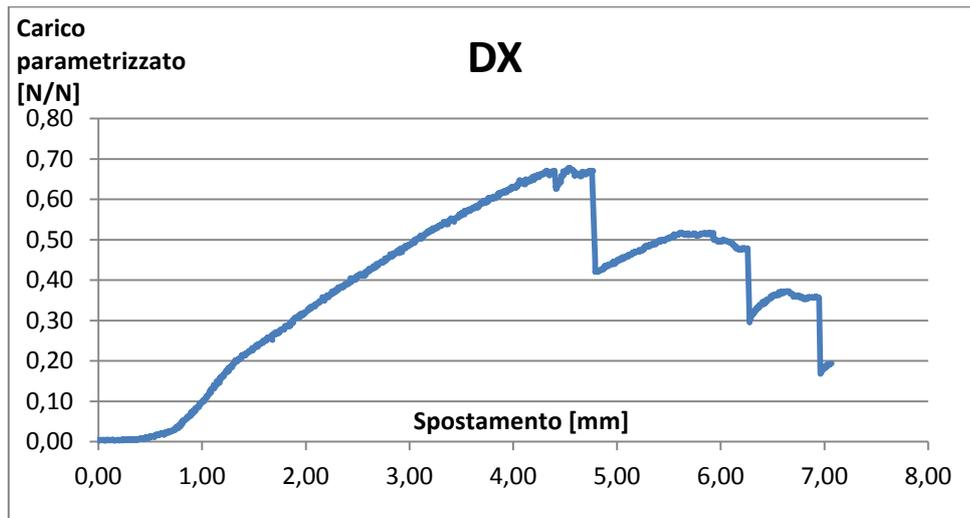


Figura 4.2.2.1.1-Andamento carico-spostamento provino DX

Il grafico mostra l'andamento del primo provino in Quantum 12K (bilanciere destro). Si nota un andamento piuttosto tipico dei SMC (tipo B figura 1.4.1.4). La prima parte è elastica (dall'inclinazione della curva si ricaveranno i valori del modulo di elasticità). Dopo la prima parte di curva elastica si arriva a rottura del provino senza che esso mostri un comportamento plastico. Questo lascia intendere la fragilità del materiale.



Figura 4.2.2.1.2-Provino DX dopo la prova (rottura partita dal punto di massimo sforzo a trazione)

La rottura, come si può intuire dall'immagine, è partita dal punto più sollecitato dove è presente l'asola. La parte più danneggiata risulta quella dove lo spessore del componente è minore, quindi dove è presente l'apertura e dove è stato applicato il carico.



Figura 4.2.2.1.3-Rottura provino DX

In figura 4.2.2.1.3 e in figura 4.2.2.1.4 si possono notare le fibre del componente nel punto di rottura. Queste non sembrano strappate, è stata quindi probabilmente la matrice a cedere.



Figura 4.2.2.1.4-Ingrandimento della zona di rottura

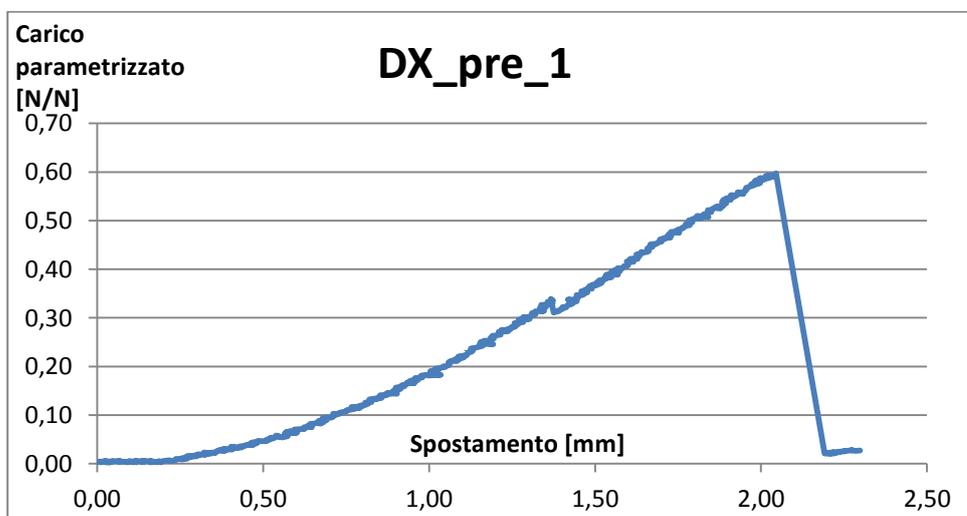


Figura 4.2.2.1.5-Andamento carico-spostamento provino DX_pre_1

Provino in Quantum 3K di preproduzione (DX_pre_1, Figura 4.2.2.1.5). In questo caso si denota una carico di rottura minore rispetto alla prima prova. Anche l'allungamento a rottura risulta più contenuto rispetto al provino DX.

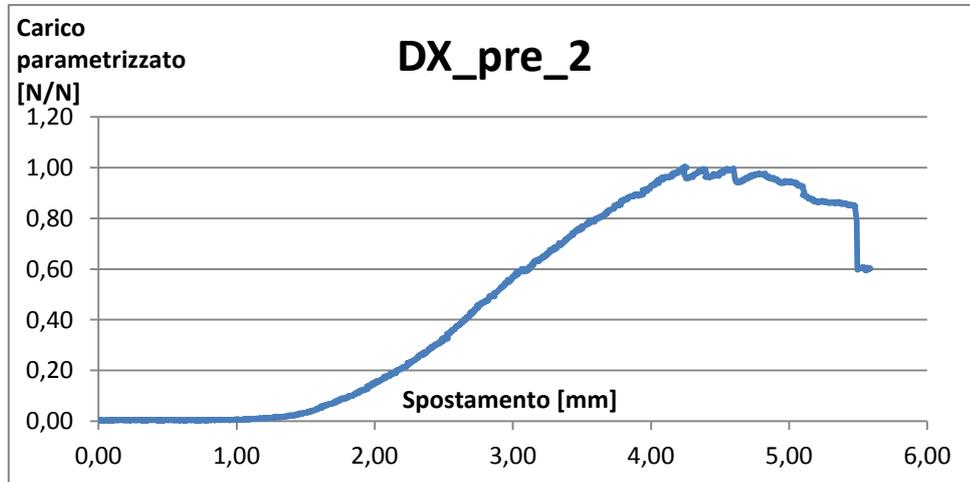


Figura 4.2.2.1.6-Andamento carico-spostamento provino DX_pre_2

Provino in Quantum 6K di preproduzione (DX_pre_2, Figura 4.2.2.1.6). Si nota un carico di rottura leggermente più elevato rispetto alle precedenti prove e un allungamento simile alla prima prova.

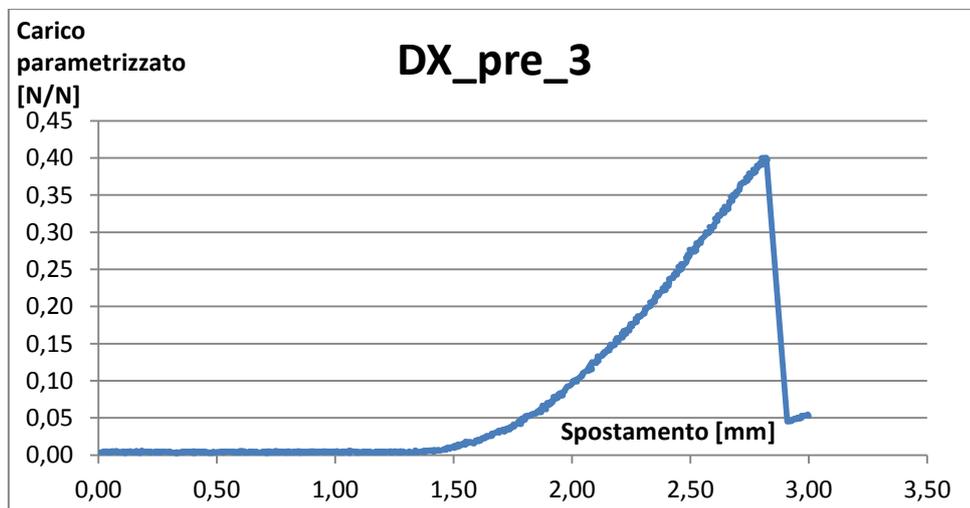


Figura 4.2.2.1.7-Andamento carico-spostamento provino DX_pre_3

Terzo provino in HexMC (Figura 4.2.2.1.7), rottura a un carico decisamente basso con allungamento altrettanto contenuto.

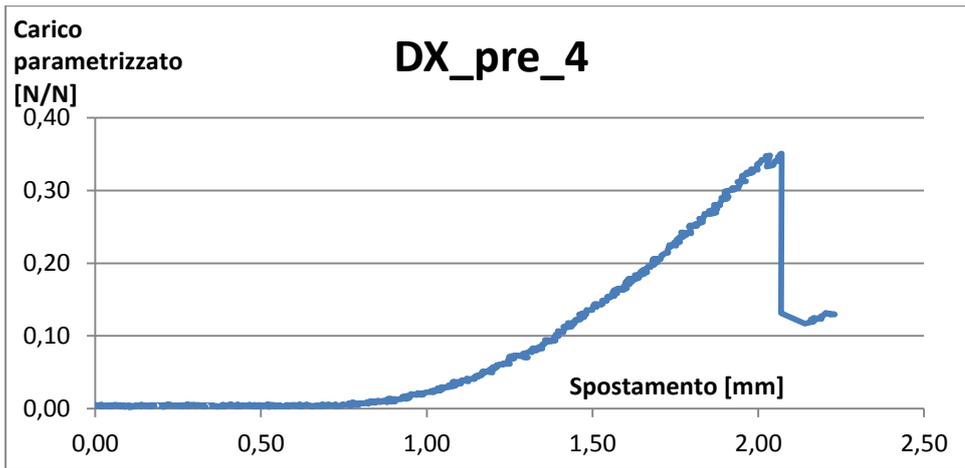


Figura 4.2.2.1.8-Andamento carico-spostamento provino DX_pre_4

Quarto provino di riproduzione in HexMC (Figura 4.2.2.1.8). Comportamento simile al provino precedente. Valore di carico di rottura basso e allungamento contenuto.

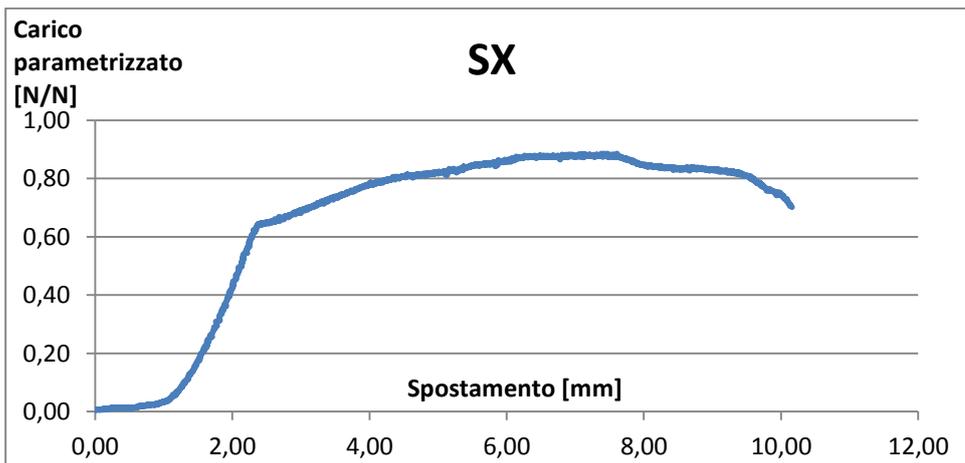


Figura 4.2.2.1.8-Andamento carico-spostamento provino SX

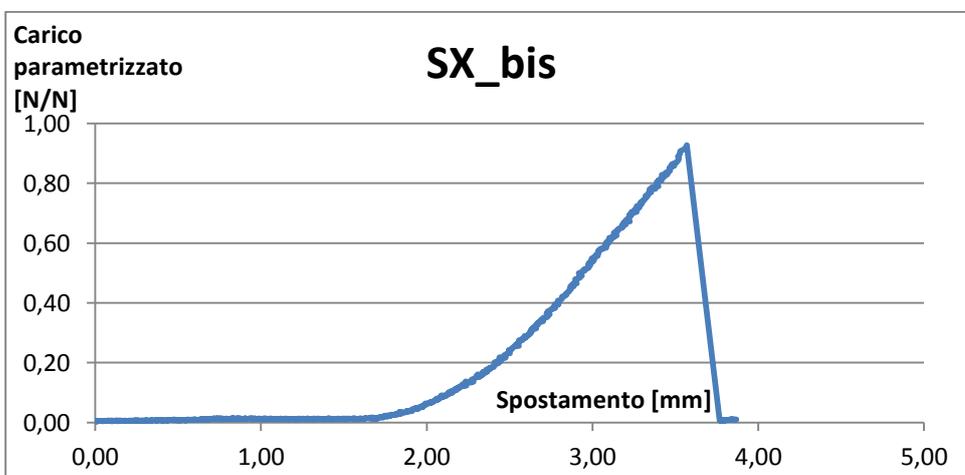


Figura 4.2.2.1.9-Andamento carico-spostamento provino SX (prova 2)

Nei grafici di figura 4.2.2.1.8 e figura 4.2.2.1.9 sono riportate le curve relative alle prove sul provino in Quantum 12K sinistro. La prova è stata ripetuta in quanto la prima ha riportato un andamento piuttosto diverso dagli altri campioni mostrando un comportamento stranamente plastico. Probabilmente in questo caso qualche "impuntamento" dell'attrezzatura aveva portato a registrare valori errati del carico. Nella seconda prova infatti si è registrato un comportamento simile alle prove precedenti.

In seguito a queste prove per i componenti in SMC sono state svolte due prove su due componenti in alluminio di produzione. Non si è arrivati a rottura del componente ma si sono notate due particolarità. Il foro del componente dove è stata applicata la forza denota un deciso rifollamento (Figura 4.2.2.1.10).



Figura 4.2.2.1.10-Rifollamento foro provino in alluminio

Per verificare la resistenza del materiale si dovrebbe avere:

$$p = \frac{P}{t \cdot d} < 2\sigma_{amm}$$

Dove p è la pressione di contatto, P il carico applicato, t lo spessore del pezzo dove è applicata la pressione, d il diametro del perno e σ_{amm} il carico ammissibile del materiale.

Si è registrato un carico applicato superiore ai 50kN, perciò considerando i dati del componente si ha $p \approx 1000N$ che risulta chiaramente maggiore di $2\sigma_{amm}$ per una classica lega di alluminio.

Inoltre si è arrivati alla rottura del perno di spinta dell'attrezzatura. La rottura è risultata quasi perfettamente fragile (Figura 4.2.2.1.11).



Figura 4.2.2.1.11-Rottura del perno di spinta

Considerando il carico subito dal perno come esclusivamente di taglio e considerando che il carico è arrivato a circa 55kN si ha:

$$\tau = \frac{4P}{3A}$$

Con τ tensione di taglio, P carico applicato e A sezione del perno (diametro perno=10mm).

Si ha quindi $\tau = 930MPa$.

Sapendo che $\sigma_{id} = \tau\sqrt{3}$ si ha $\sigma_{id} = 1600MPa$.

Si è poi svolta una prova di durezza sul perno, in acciaio bonificato. Esiste una correlazione tra durezza Brinell e carico di rottura degli acciai trattati. Perciò correlando in primo luogo la durezza Rockwell con la durezza Brinell e quest'ultima con il carico di rottura a trazione si arriva ad avere un valore di quest'ultimo di circa 1500MPa. Considerando anche la parte di sforzo dovuta alla leggera flessione è lecito concludere che il perno è arrivato a rottura per superamento del carico di rottura mostrando una rottura quasi perfettamente fragile.

Concluso il primo blocco di prove sono state calcolate le rigidzze considerando i tratti approssimativamente lineari dei grafici derivanti dai valori sperimentali. Anche in questo caso si sono considerati i valori parametrizzati dei carichi. Non saranno quindi i valori assoluti di carichi e rigidzze ma daranno comunque un'idea dell'andamento di questi nelle prove svolte.

Provino	Rigidezza K parametrizzata	%	Carico max parametrizzato	%
DX	0,292	0%	0,68	0%
DX_pre1	0,394	-35%	0,60	12%
DX_pre2	0,448	-53%	1,00	-48%
DX_pre3	0,371	-27%	0,40	41%
DX_pre4	0,333	-14%	0,35	48%
SX	0,481	-65%	0,89	-31%
SX_bis	0,635	-117%	0,93	-37%

Tabella 4.2.2.1.1-Rigidezze e carichi massimi registrati nelle prove

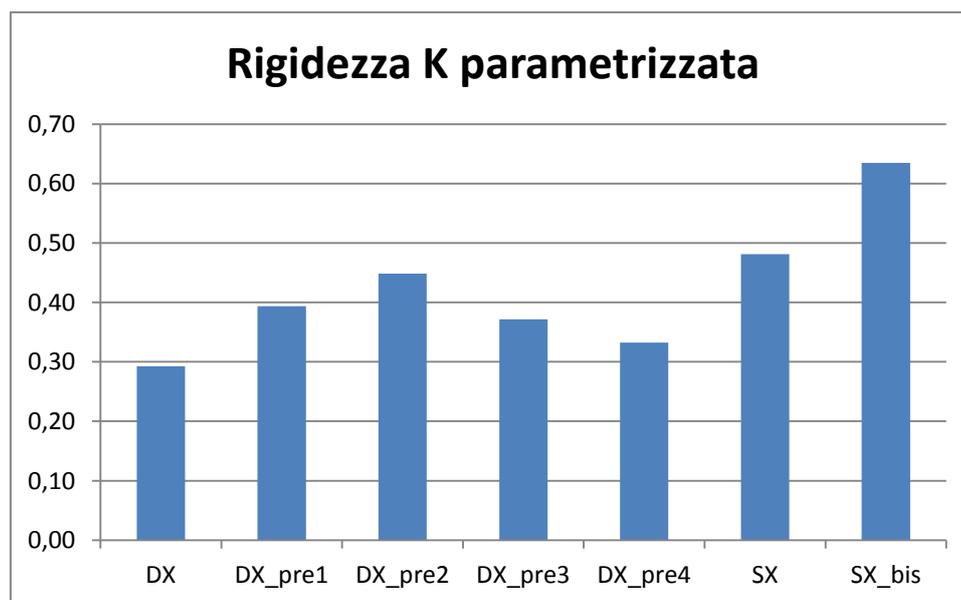


Figura 4.2.2.1.12-Rigidezze registrate nel primo blocco di prove

Nei grafici di figura 4.2.2.1.12 e figura 4.2.2.1.13 sono riassunti rispettivamente la rigidzza e il carico di rottura parametrizzati per ogni prova svolta.

Si nota una discreta ripetibilità tra le prove. I carichi e le rigidzze non sono troppo diverse tra i vari provini, escludendo casi particolari in cui le differenze possono essere dovute anche a fattori esterni.

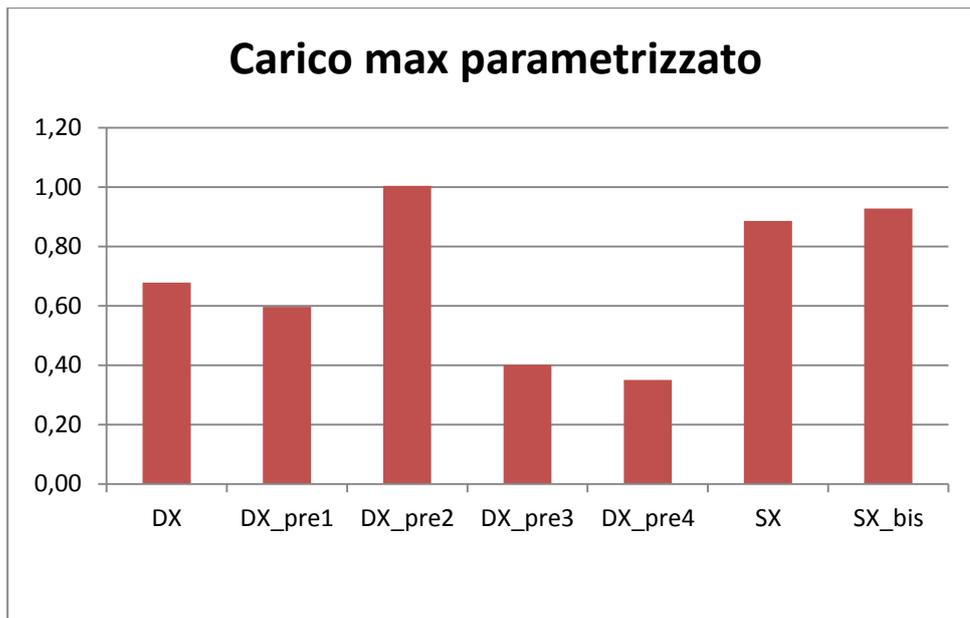


Figura 4.2.2.1.13-Carichi di rottura registrati nelle prove del primo blocco

Per calcolare le rigidzze, valutando ogni singolo grafico, si è scelto un intervallo di allungamento in cui la curva sia piuttosto rettilinea, si sono quindi individuati gli estremi di questo intervallo nei valori di allungamento e si sono poi selezionati i corrispondenti valori di carico.

Si è quindi calcolata la rigidzza K secondo la formula:

$$K \text{ (kN/mm)} = \frac{\text{carico punto 2} - \text{carico punto 1}}{\text{allungamento punto 2} - \text{allungamento punto 1}}$$

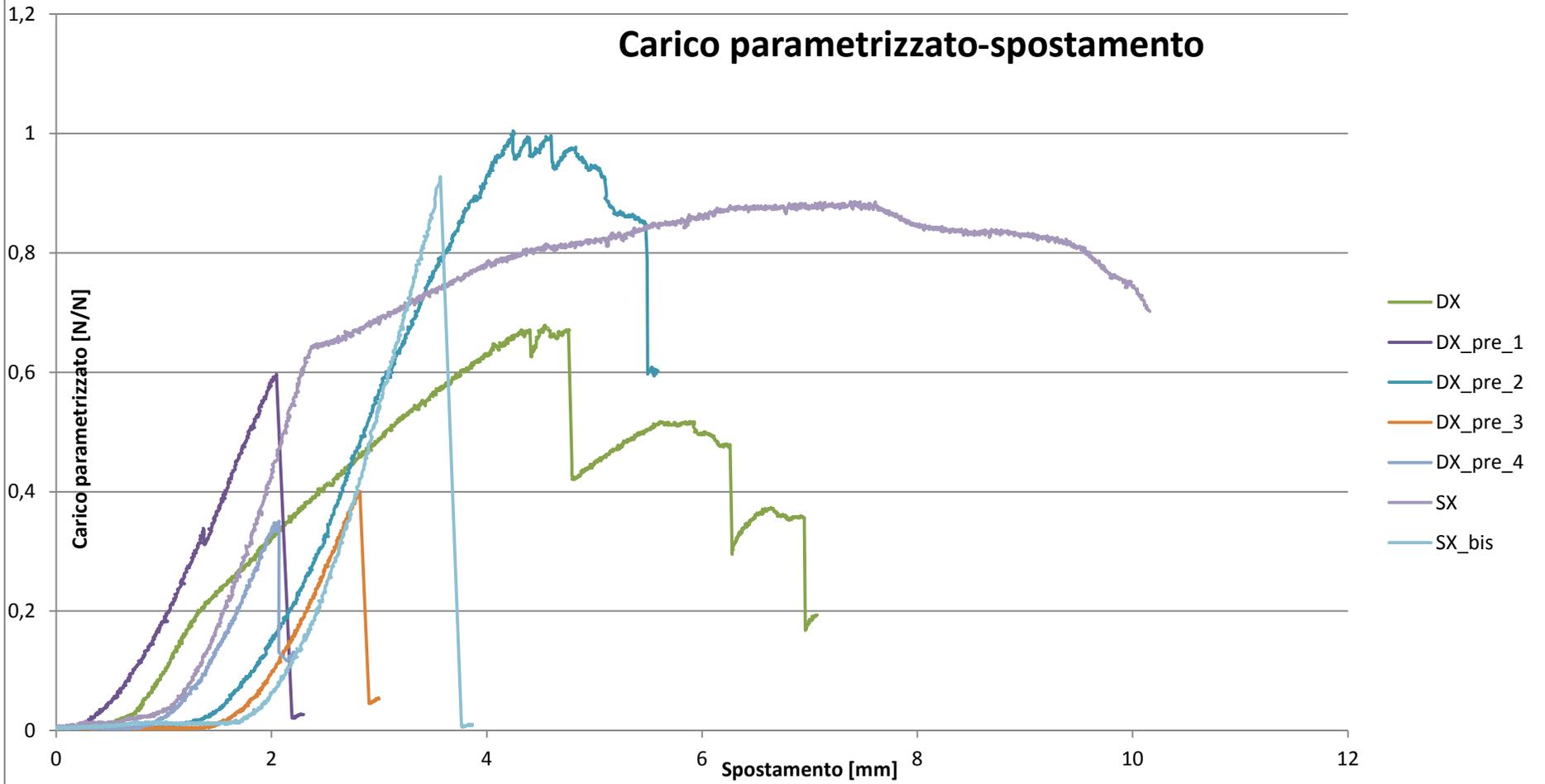
Nella tabella 4.2.2.1.1 sono anche riportati i valori di variazione percentuale rispetto alla prima prova per rendere un'idea della ripetibilità della prova.

Il calcolo comunque non risulta di precisione assoluta dato che ogni volta si considerano intervalli non esattamente uguali.

Nel secondo blocco di prove si utilizzerà il blocco dell'attrezzatura per cercare di far rendere al meglio il calcolo delle rigidzze.

Nella pagina successiva è inserito il grafico riassuntivo di questo gruppo di prove per poter confrontare direttamente i diversi comportamenti.

Carico parametrizzato-spostamento



4.2.2.2 Secondo blocco di prove

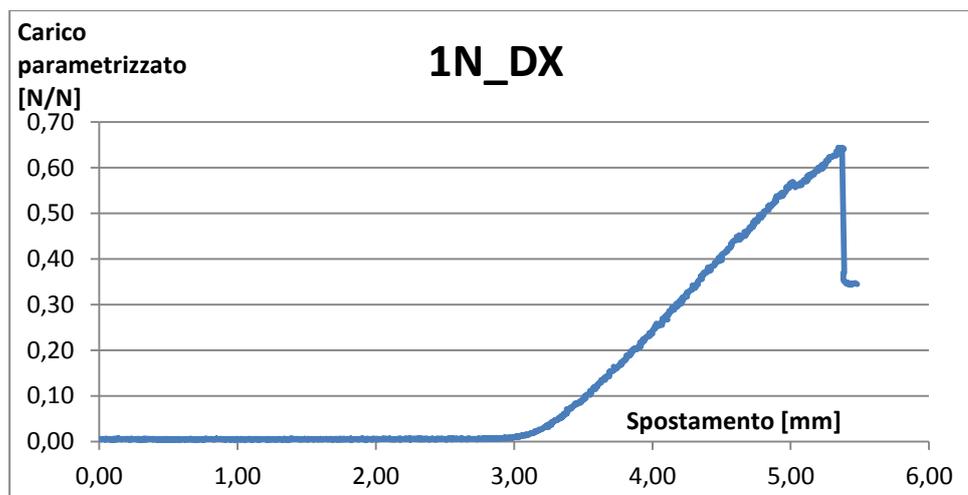


Figura 4.2.2.2.1-Andamento carico-spostamento provino 1N_DX

Grafico della prima prova su un provino della nuova produzione destro in Quantum 12K (1N_DX, Figura 4.2.2.2.1). Si può notare la rottura netta ad un valore del carico poco al di sotto di quelli registrati nelle prove del primo blocco.

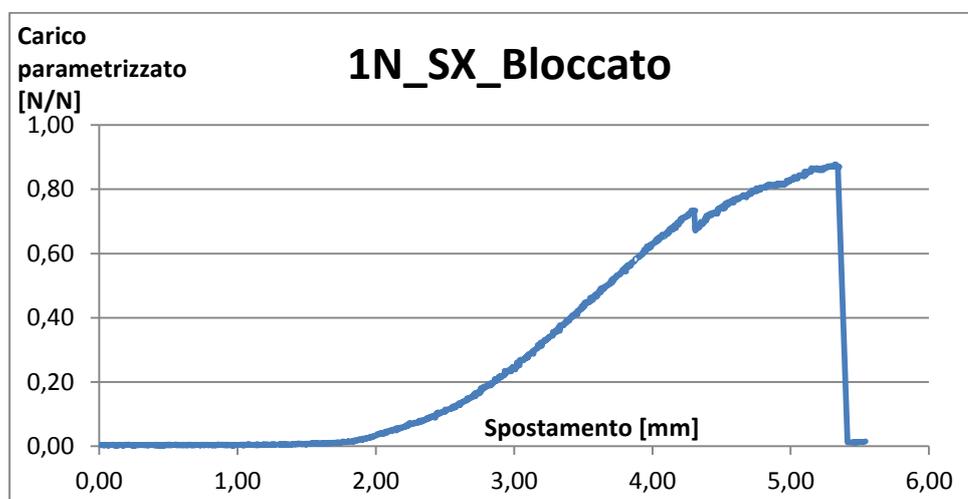


Figura 4.2.2.2.2-Andamento carico-spostamento 1N_SX_Bloccato

Grafico relativo alla prova di un provino sinistro in Quantum 12K con inserito il blocco nell'attrezzatura per valutare la rigidezza (Figura 4.2.2.2.2). La rottura è avvenuta ad un valore del carico leggermente superiore alla precedente prova.

Nella figura 4.2.2.2.3 è rappresentato il provino durante la prova. Si nota la parte di blocco montata sull'attrezzatura.

Si può già notare una certa ripetibilità dei risultati rispetto al primo blocco di prove precedentemente descritte.

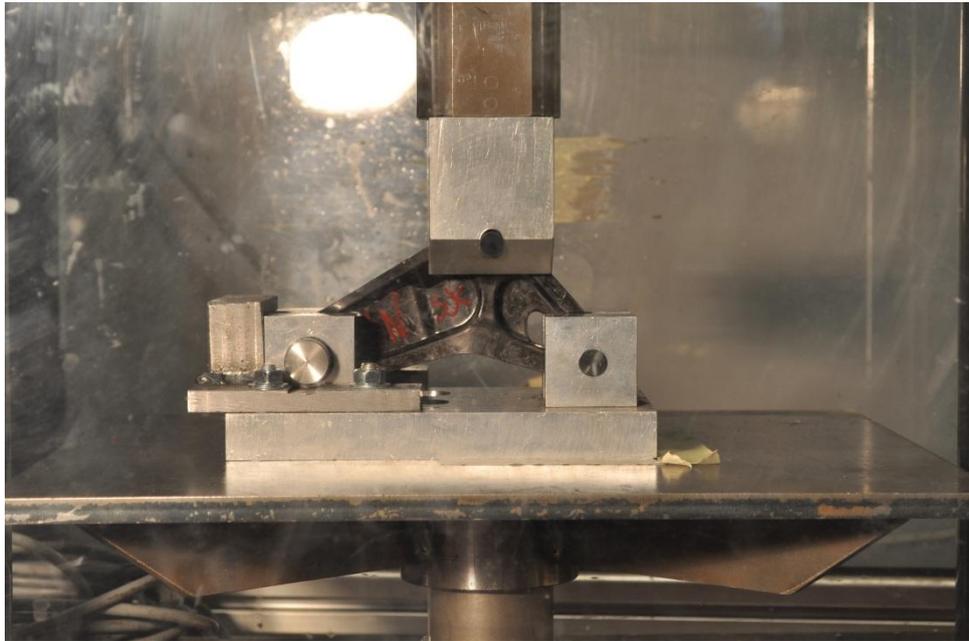


Figura 4.2.2.2.3-Provino nuova laminazione durante la prova

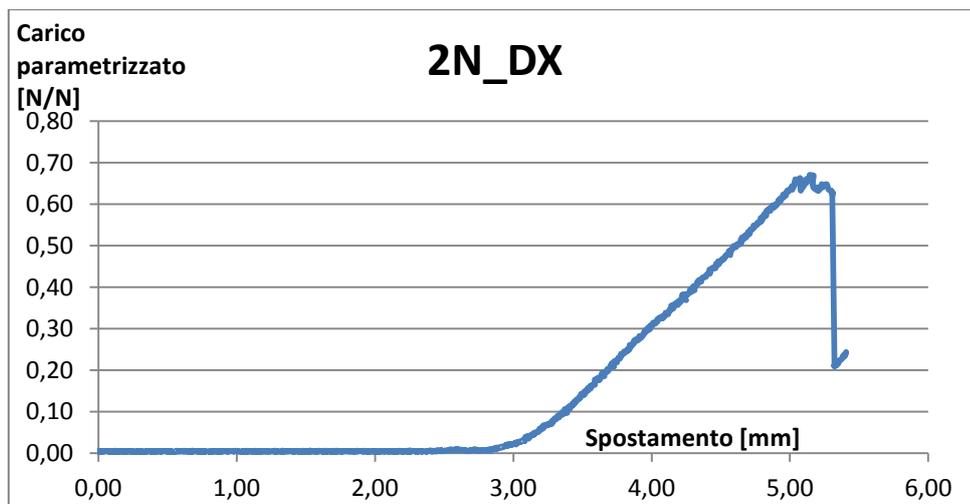


Figura 4.2.2.2.4-Andamento carico-spostamento provino 2N_DX

Grafico relativo al secondo provino in Quantum 12K (Figura 4.2.2.2.4), si nota una curva con andamento molto simile alla prima prova di questo blocco.

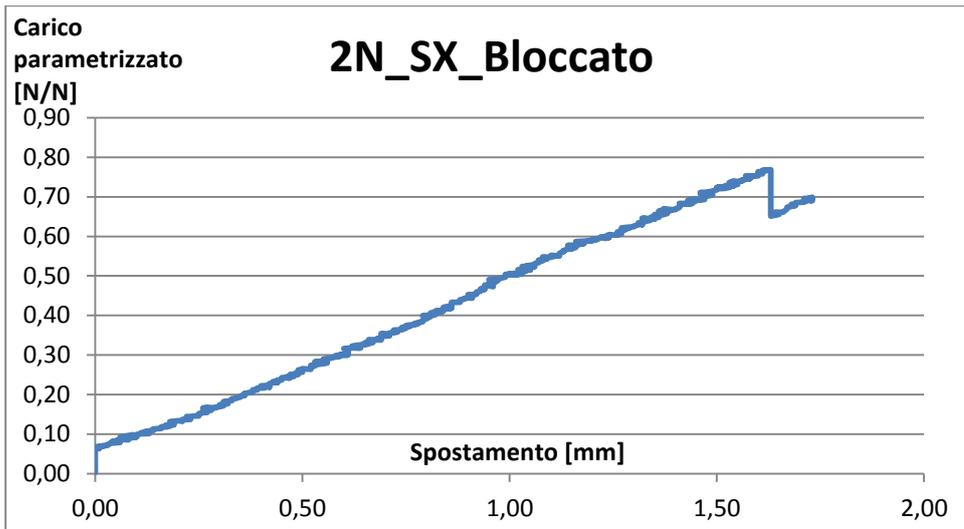


Figura 4.2.2.2.5-Andamento carico-spostamento provino 2N_SX_Bloccato

Grafico (Figura 4.2.2.2.5) relativo al secondo provino in Quantum 12K sinistro, in questo caso la prova è stata svolta con il blocco sull'attrezzatura per stimare la rigidità del pezzo. Si nota che si è verificato un problema di lettura dei dati o un problema sull'attrezzatura, la cella di carico già all'inizio della prova misurava un carico imprevisto. La rigidità risulta comunque simile a quella degli altri provini, la prova non sembra essere stata falsata.

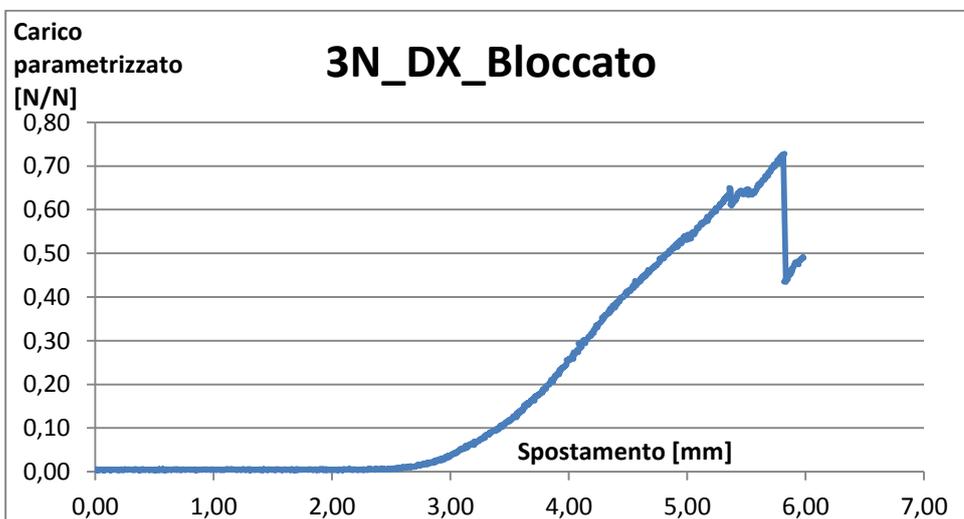


Figura 4.2.2.2.6-Andamento carico-spostamento provino 3N_DX_Bloccato

Grafico di prova per la misura della rigidità, questa volta relativo ad un provino destro (Figura 4.2.2.2.6).

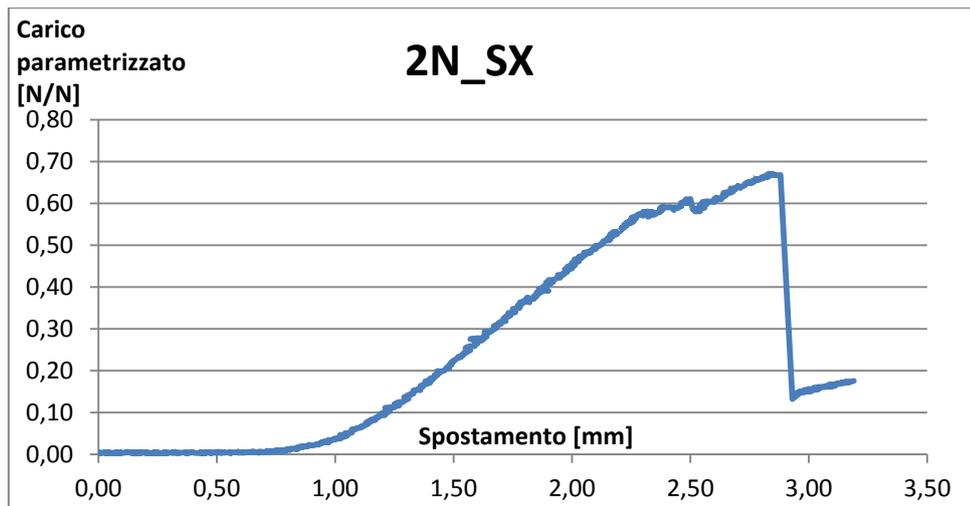


Figura 4.2.2.2.7-Andamento carico-spostamento provino 2N_SX

Grafico riguardante il terzo provino in Quantum 12K della serie nuova, senza bloccaggio dell'attrezzatura (Figura 4.2.2.2.7).

In questo blocco di prove sono state svolte anche due prove su provini costruiti con un materiale diverso nel numero di fibre presenti nel rinforzo (Quantum 6K). In via teorica avrebbero dovuto presentare una rigidità leggermente maggiore rispetto ai provini testati prima. (Grafici di figura 4.2.2.2.8 e di figura 4.2.2.2.9).

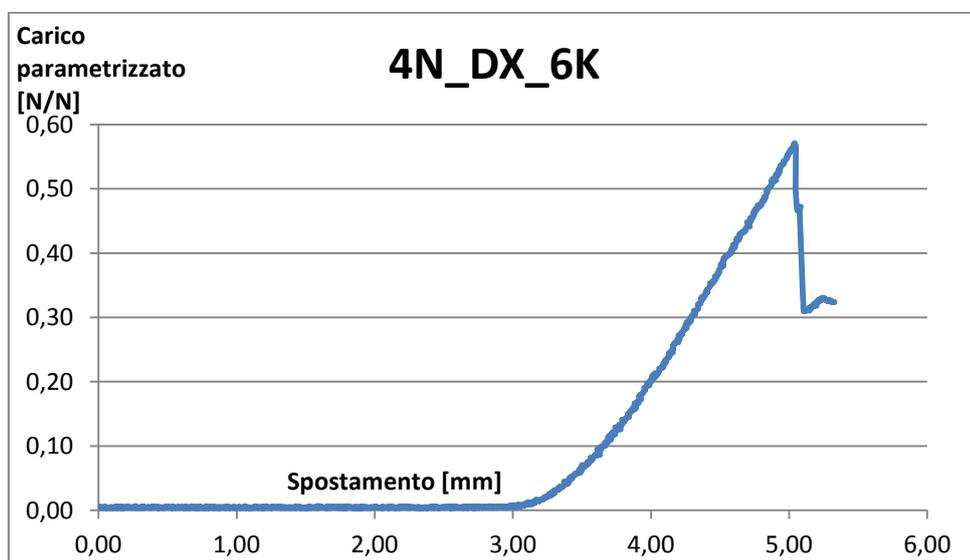


Figura 4.2.2.2.8-Andamento carico-spostamento provino 4N_DX_6K

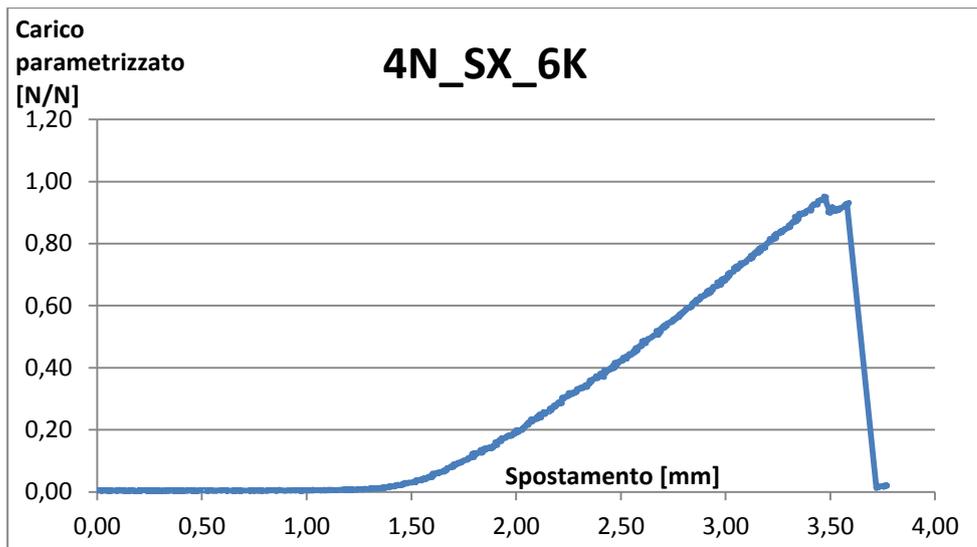


Figura 4.2.2.2.9-Andamento carico-spostamento provino 4N_SX_6K

Si nota in questo caso in comportamento piuttosto diverso tra i due provini in fatto di carico a rottura, mentre risulta piuttosto simile in fatto di pendenza della curva.

Per misurare le rigidezze dei provini in alluminio in questo blocco di prove si è utilizzata l'attrezzatura completa con il bloccaggio.

Dato che nel primo blocco di prove, durante i test sui componenti in alluminio, si è arrivati a rottura dei perni dell'attrezzatura si è deciso di non arrivare a rottura ma interrompere il carico una volta registrata una quantità sufficiente di dati per poter avere un tratto di curva utile per il calcolo dell'elasticità.

Come per il primo blocco di prove, con lo stesso metodo, è stata calcolata la rigidezza in ogni provino (Tabella 4.2.2.2.1).

Provino	Rigidezza K parametrizzata	%	Carico max parametrizzato	%
1N_DX	0,316	0%	0,64	0%
1N_SX_Bloccato	0,345	-9%	0,88	-36%
2N_DX	0,322	-2%	0,67	-4%
2N_SX_Bloccato	0,455	-44%	0,77	-19%
3N_DX_Bloccato	0,284	10%	0,73	-13%
3N_SX	0,461	-46%	0,67	-4%
4N_DX_6K	0,301	5%	0,57	11%
4N_SX_6K	0,495	-56%	0,95	-48%

Tabella 4.2.2.2.1-Rigidezze e carichi di rottura registrati nelle prove

Nei grafici di figura 4.2.2.2.10 e di figura 4.2.2.2.11 sono riassunti rispettivamente le rigidezze e i carichi di rottura registrati in questo blocco di prove.

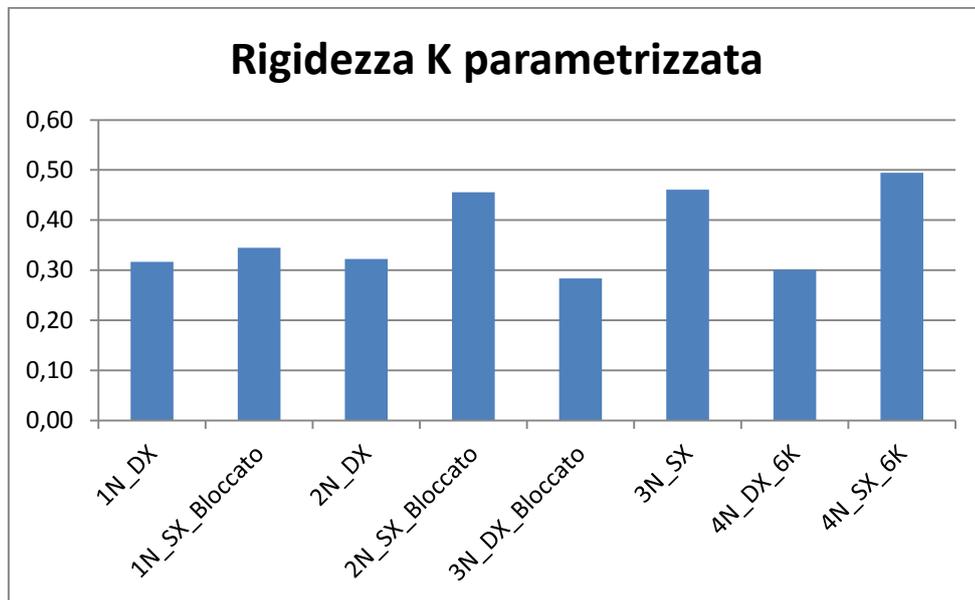


Figura 4.2.2.2.10-Rigidezze calcolate dalle prove

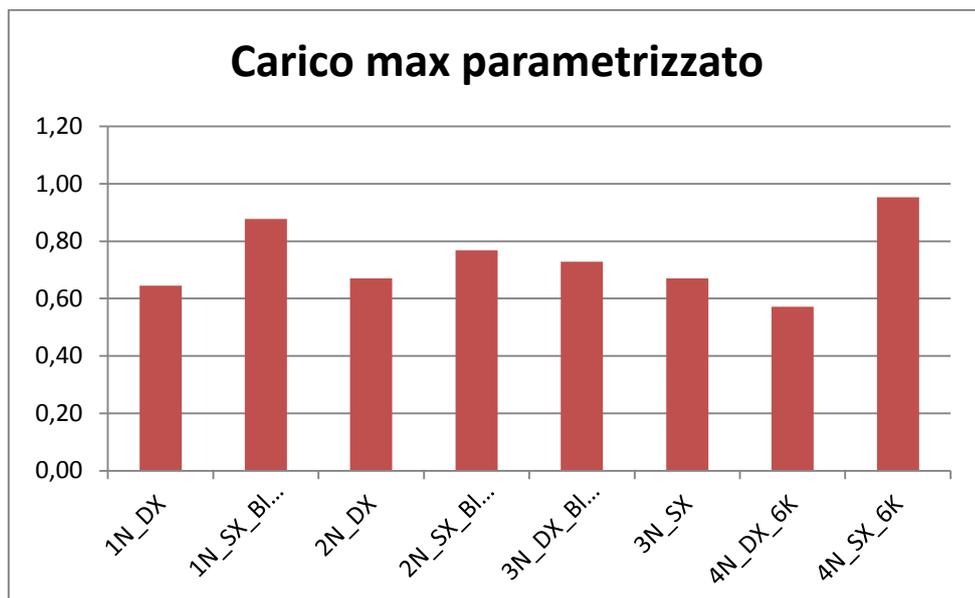


Figura 4.2.2.2.11-Carichi di rottura registrati dalle prove

Nella pagina successiva è presentato un grafico riassuntivo di tutti gli andamenti delle curve carico-spostamento di questo blocco di prove.

5 Discussione

Dall'analisi FEM effettuata si erano evidenziati due possibili punti critici nel componente. Si era rilevato che nel punto corrispondente al raccordo dell'asola si arrivava a superare il carico di rottura a trazione del materiale.

Dalle prove di compressione effettuate sui provini fisici si è evidenziato che la rottura è, quasi in tutti i casi, partita da questo punto. Le prove fisiche confermano quindi quanto ipotizzato dall'analisi FEM, cioè il superamento del carico di rottura a trazione in quel punto porta effettivamente a rottura i componenti.

L'altro punto critico evidenziato dall'analisi FEM era soggetto, sempre secondo l'analisi, a uno sforzo prevalentemente di compressione. Durante le prove fisiche in questa zona non si sono registrate rotture o deformazioni importanti. Ciò porta immediatamente a pensare che il materiale abbia un comportamento decisamente non simmetrico. Infatti, secondo l'analisi in questo punto si sarebbe superato abbondantemente il carico di rottura a trazione, essendo però effettivamente caricato a compressione il componente non cede e non mostra problemi legati a questo sforzo.

Tutte le prove fisiche effettuate sui componenti in SMC hanno fatto registrare un carico di rottura decisamente più basso di quello dell'alluminio. Considerando però solo le prove sui componenti in SMC i valori di carico di rottura, a parte qualche caso, sono simili, così come i valori di rigidità stimati. Nonostante i carichi di rottura risultino più bassi dell'alluminio si attestano comunque su valori ragguardevoli per il tipo di materiale considerato.

Aspetto importante rilevato dalle prove di compressione è la ripetitività delle stesse, come detto il carico ultimo è simile tra le varie prove e il punto di rottura dei provini risulta essere sempre nella stessa zona.

Il punto di rottura risulta critico anche per quanto riguarda la produzione, è infatti il punto dove probabilmente si congiungono i

flussi di materiale durante lo stampaggio. Questo può essere un motivo di debolezza del materiale in quel punto e quindi potrebbe spiegare la rottura nella zona.

Per cercare di ovviare al problema saranno effettuate altre prove di laminazione del componente, cercando di ottimizzare la stesura del materiale nello stampo, per cercare di avere una distribuzione delle fibre più omogenea possibile.

L'immagine di figura 4.2.2.1.4 presenta la sezione di rottura nel punto critico, da un'analisi visiva pare che le fibre non risultino danneggiate. Ciò può confermare che il punto in questione sia il congiungimento dei flussi del materiale e che le fibre non riescano a disporsi nel migliore dei modi.

Altro aspetto da considerare è la concentrazione delle tensioni. Il punto di rottura è infatti a ridosso dell'asola del componente e, come si è notato anche dalle prove agli elementi finiti, le tensioni in quella zona sono particolarmente gravose.

Questo porta a pensare come possibile soluzione il riempimento dell'asola con altro materiale, modificando il disegno iniziale, portando probabilmente a un miglioramento delle caratteristiche di resistenza e rigidità.

Da alcuni grafici risultanti dalle prove si riconoscono comportamenti simili a quelli descritti in letteratura. Ad esempio nel grafico di figura 4.2.2.2.2 è evidente la somiglianza dell'andamento della curva con il tipo C descritto nella figura 1.4.1.4, il provino presenta un primo piccolo cedimento per poi arrivare alla rottura drastica raggiunto il carico di rottura.

Il grafico di figura 4.2.2.2.8 mostra invece un comportamento del tutto paragonabile a quello del tipo A descritto nel grafico di figura 1.4.1.4. Il provino arriva a rottura drastica linearmente senza mostrare cedimenti prima del raggiungimento del carico di rottura.

Tutte le prove di compressione hanno inoltre confermato il comportamento asimmetrico rispetto alle tensioni degli SMC descritto nel paragrafo 1.3.1. Infatti, le rotture sono avvenute per tutti i provini nel punto di massima sollecitazione a trazione. Il punto

sollecitato a compressione, seppur arrivando anch'esso a valori di tensione superiori a quella di rottura equivalente, non ha invece mostrato cedimenti.

È stato quindi confermato che, al contrario dei laminati a fibre continue, i SMC a fibre discontinue permettono una resistenza a compressione leggermente maggiore di quella a trazione.

Per quanto riguarda i materiali di produzione dei provini, si è notato che è conveniente la produzione utilizzando Quantum AMC[®] rispetto all'utilizzo dell'HexMC[®].

Il Quantum, infatti, permette una pulizia maggiore dei pezzi appena estratti dallo stampo per la sua capacità di scorrere meglio all'interno di esso.

Inoltre, vantaggio maggiore, permette, scorrendo meglio, di evitare vuoti e bolle interni al pezzo che porterebbero ad un decadimento delle proprietà meccaniche.

Dalle prove di compressione si è notato che i provini prodotti in HexMC[®] hanno mostrato una resistenza minore rispetto a quelli prodotti utilizzando il Quantum.

Considerando i valori parametrizzati, si nota che i provini in HexMC[®] sono arrivati a valori massimi pari a 0,4. I provini in Quantum sono invece quelli che hanno dato risultati migliori, andando da valori pari a 0,6 fino al carico di rottura massimo registrato.

La resistenza minore dell'HexMC[®] può essere dovuta, oltre alle caratteristiche delle fibre e della resina utilizzate nel composito, anche alla difficoltà di scorrimento del materiale durante la produzione.

Abbiamo infatti visto che nel punto critico di rottura è probabile vi sia il ricongiungimento dei flussi di materiale liquefatto, essendo la scorrevolezza minore è lecito pensare che il ricongiungimento non avvenga in modo perfetto, portando a indebolire il punto.

6 Conclusioni

Lo studio pare ben posto in quanto analisi agli elementi finiti e prove fisiche concorrono sui risultati.

Si è perciò constatato che i risultati derivati dall'analisi agli elementi finiti e quelli derivanti dalle prove di compressione fisiche portano a considerare il punto di rottura come punto critico.

Il punto risulta critico sia per quanto riguarda la produzione del componente che per la concentrazione delle tensioni.

La rottura nella maggior parte dei casi testati avviene nel punto specificato per sforzo di trazione e superamento del carico di rottura a trazione.

Per migliorare l'accuratezza dei dati registrati si potrebbero svolgere ulteriori prove di compressione attrezzando i provini con degli estensimetri nei punti critici. Sia per valutare l'entità del carico effettivo sia per valutare che gli sforzi siano effettivamente di trazione nel punto di rottura e di compressione nell'altro punto critico.

Dallo studio si conclude che il componente in SMC ha caratteristiche peggiori di quello prodotto in alluminio, rimanendo tuttavia su valori ragguardevoli considerando lo scopo del componente in questione.

Per cercare di migliorare la resistenza si potrebbe agire su due aspetti:

- Cercare di migliorare ulteriormente la stesura del materiale in fase di produzione del componente.
- Modificare il disegno del componente prevedendo il riempimento con altro materiale dell'asola presente nel componente attuale.

Si potrebbero quindi svolgere altre analisi FEM sul componente ridisegnato e, in seguito, prove fisiche per stabilire l'influenza dell'aggiornamento e definire lo spessore del materiale da aggiungere nella zona critica.

Bibliografia

- [1] Dario Croccolo, Nicolò Vincenzi; Lezioni di Fondamenti e Tecnica della Progettazione Meccanica; Progetto Leonardo, Esculapio Editore, Bologna
- [2] Enrico Dolcini; Introduzione ai materiali compositi
- [3] F.C. Campbell; Introduction to Composite Materials, ASM International
- [4] Paolo Feraboli, Elob Peitso, Tyler Cleveland, Patrick B. Stickler; Modulus measurement for Prepreg-based Discontinuous Carbon Fiber/Epoxy Systems; Journal of Composite Materials 2009
- [5] P. Feraboli, E. Peitso, F. Deleo, T. Cleveland, M. Graves, P. Stickler; Characterization of Discontinuous Carbon Fiber/Epoxy Systems for Aerospace Applications: Part I
- [6] Jérôme Aubry; HexMC bridging the gap between prepreg and SMC; Reinforced Plastics, June 2001
- [7] Robert A. Tatara; Compression Molding; Applied Plastics Engineering Handbook, Department of Technology, Northern Illinois University
- [8] Luigi Baldassini; Vademecum per Disegnatori e Tecnici; Hoepli Editore, Milano
- [9] Vincenzo Dal Re; Lezioni del Corso di Comportamento Meccanico dei Materiali L

Sitografia

- [i] www.hexcel.com/Products/Industries/IHexMC-Materials
- [ii] www.hexcel.com/Resources/UserGuides/HexMC_UserGuide.pdf
- [iii] www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Molding-Data-Sheets/EUVersion.pdf
- [iv] www.quantumcomposites.com/products/amc/
- [v] www.quantumcomposites.com/pdf/datasheets/amc/Quantum-AMC-8593%20126-76-118%2011-30-2012.pdf

Ringraziamenti

Desidero innanzitutto ringraziare Lorenzo Donati, nel ruolo di relatore, per l'assoluta disponibilità, professionalità e cordialità dimostrate nell'aiutarmi nello svolgimento di questa tesi. Ringrazio inoltre Paolo Proli per le sue competenze e la sua disponibilità.

Un doveroso ringraziamento va all'azienda RiBa Composites s.r.l. per avermi permesso di affrontare questo lavoro all'interno di un ambiente stimolante e innovativo. In particolare un ringraziamento a Enrico Dolcini per il fondamentale aiuto riguardo ogni aspetto del lavoro svolto e la disponibilità dimostrata.

Ringrazio poi la mia famiglia per la sponsorizzazione e i vari "Hai studiato?" senza i quali non sarebbe stato possibile arrivare al traguardo.

Ringrazio infine tutti gli amici, fuori e dentro l'Università, per avermi sostenuto nelle scelte fatte, ognuno a modo suo.