

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITA' DI BOLOGNA
SECONDA FACOLTA' 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 (C.I.)

**Progettazione di un'attrezzatura per l'esecuzione di prove
di taglio in piano e caratterizzazione di provini in GFRP**

CANDIDATO
CEFALONI ANDREA

RELATORE
Prof. Ing. LORENZO DONATI

Anno Accademico 2011/2012

Sessione II

INDICE

INTRODUZIONE	pag. 5
1. I MATERIALI COMPOSITI	8
<u>1.1 I MATERIALI COMPOSITI</u>	8
<u>1.2 LA MATRICE</u>	8
1.2.1 PROPRIETA' DELLE RESINE E TIPI DI RESINE	10
<u>1.3 IL RINFORZO</u>	14
1.3.1 COMPOSITI CON FASE DISPERSA PARTICELLARE	15
1.3.2 COMPOSITI CON FASE DISPERSA FIBROSA	15
<u>1.4 LE FIBRE</u>	16
1.4.1 CLASSIFICAZIONE DELLE FIBRE	16
1.4.2 FIBRE DI VETRO	17
<u>1.5 CONFRONTO FIBRE</u>	21
2. PROVE DI CARATTERIZZAZIONE E COMPORTAMENTO MECCANICO	23
<u>2.1 LE PROVE DI CARATTERIZZAZIONE DEI MATERIALI</u>	23
<u>2.2 LA PROVA DI TRAZIONE</u>	24
2.2.1 PROVINI UNIFICATI	25
<u>2.3 PROVA DI TAGLIO</u>	28
<u>2.4 COMPORTAMENTO MECCANICO MATERIALI COMPOSITI</u>	29
<u>2.5 MECCANISMI DI CRISI NEGLI FRP</u>	31
2.5.1 TRAZIONE PARALLELA ALLE FIBRE	31
2.5.2 TAGLIO IN PIANO	33
2.5.3 TRAZIONE NON PARALLELA ALLE FIBRE	34
2.5.4 COMPRESSIONE	35
3. STUDIO NORMATIVE, PRESENTAZIONE PROVINI E ATTREZZATURA	38
<u>3.1 NORMATIVE DI RIFERIMENTO PER TAGLIO IN PIANO</u>	38
<u>3.2 PRESENTAZIONE PROVINI</u>	40

3.2.1 METODO DI STRATIFICA MANUALE	40
3.2.2 METODO AD INFUSIONE	41
3.2.3 LAMINAZIONE DEI PROVINI	43
<u>3.3 METODI PER LA PROVA DI TAGLIO IN PIANO</u>	44
3.3.1 $\pm 45^\circ$ TENSILE SHEAR TEST METHOD	45
3.3.2 RAILS SHEAR TEST METHOD	45
3.3.3 IOSIPESCU SHEAR TEST METHOD	47
3.3.4 V-NOTCHED RAILS SHEAR TEST METHOD	48
<u>3.4 GEOMETRIA DEI PROVINI</u>	49
<u>3.5 LE ATTREZZATURE</u>	52
4. PROGETTAZIONE ED ANALISI DELL' ASSIEME	54
<u>4.1 STUDIO DEI DISEGNI</u>	54
<u>4.2 RAPPRESENTAZIONE PEZZI COSTITUENTI L' ASSIEME</u>	56
<u>4.3 ANALISI STRUTTURALE</u>	58
<u>4.4 DIMENSIONAMENTO PERNO</u>	62
<u>4.5 OTTIMIZZAZIONE DIMENSIONI</u>	64
<u>4.6 DISEGNO ASSIEME DEFINITIVO</u>	66
<u>4.7 TRATTAMENTI TERMICI SU PERNI DI COLLEGAMENTO</u>	72
4.7.1 TEMPRA	72
4.7.2 RINVENIMENTO	74
<u>4.8 PROBLEMATICHE PRESENTI</u>	76
5. SPERIMENTAZIONE SUI PROVINI	78
<u>5.1 ESECUZIONE PROVE STATICHE MEDIANTE PRESSA</u>	78
<u>5.2 ESECUZIONE PROVE E RISULTATI OTTENUTI</u>	80
CONCLUSIONI	83
BIBLIOGRAFIA	85
RINGRAZIAMENTI	86

INTRODUZIONE:

Negli ultimi decenni i materiali compositi si sono diffusi in maniera spropositata passando dall'essere quasi una semplice curiosità ingegneristica ad essere ampiamente utilizzati in applicazioni che vanno dal settore aerospaziale e navale, all'industria automobilistica, alle costruzioni civili, fino a coprire molti altri aspetti della vita quotidiana. Considerando inoltre che il loro costo di produzione è diminuito e la loro importanza economica è aumentata, la loro rilevanza risulta ancora più netta.

In particolare, nel settore dell'industria navale e automobilistica, vi è un interesse crescente per quanto riguarda l'uso di materiali compositi rinforzati da fibre. L'applicazione dei materiali compositi a matrice polimerica rinforzati con fibre può seguire due strade:

- La creazione di nuovi componenti o la sostituzione diretta di quelli esistenti.
- L'integrazione di una molteplicità di parti in metallo in un'unica struttura in composito.

La possibilità di ottenere materiali leggeri che permettessero un risparmio di carburante, è stata, ed è tutt'ora, uno dei punti di forza per lo sviluppo dei compositi, sia nelle competizioni che nella produzione di serie. Nell'industria automobilistica ad esempio, la sostituzione di componenti con altri realizzati in composito e quindi più leggeri, non solo contribuisce al risparmio energetico, ma si ripercuote anche nelle dimensioni del motore, del sistema frenante e dei serbatoi che potranno così subire sensibili riduzioni. Un peso ridotto migliora anche le prestazioni dinamiche del veicolo rendendolo più maneggevole e reattivo. Per quanto riguarda invece applicazioni inerenti al settore navale, i materiali compositi vengono utilizzati in larga scala per la produzione di scafi di imbarcazioni solo per fare qualche esempio, senza parlare delle numerose applicazioni all'interno del settore aerospaziale che ancora una volta vedono i materiali compositi come grandi protagonisti.

Vista la loro grande diffusione all'interno del settore meccanico globale risulta fondamentale studiarne le diverse caratteristiche rispetto ai possibili tipi di sollecitazione che nelle applicazioni future dovranno sopportare.

Scopo di questo lavoro di Tesi è quello di studiare le proprietà di alcuni provini in GFRP al taglio in piano.

I provini da testare, sono caratterizzati da 6 diversi tipi di resina e sono stati realizzati con due diversi processi produttivi (stratifica manuale ed infusione).

La prima parte della Tesi verterà sulla presentazione dei materiali compositi, che cosa sono e perché sono sempre più utilizzati al giorno di oggi. Attraverso una breve descrizione dei tipi di fibre più comuni adibiti al compito di rinforzo della matrice e dei tipi di resina più utilizzati per la produzione dei provini, saranno delineate le principali proprietà che presentano i materiali in GFRP e i vantaggi che comporta il loro utilizzo.

L'obiettivo è quello di caratterizzare questi provini in modo da ricavarne informazioni legate alla tensione di taglio necessaria per portarli a rottura ed il loro modulo di elasticità trasversale.

Le prove di caratterizzazione dei materiali vengono da sempre utilizzate nel settore meccanico per determinare proprietà fondamentali quali il carico di snervamento, il carico di rottura, il modulo di elasticità, solo per citarne alcune. Tra le più diffuse prove di caratterizzazione vi sono la prova di trazione, che analizza il comportamento sforzo-deformazione di un materiale consentendoci di studiarne le caratteristiche meccaniche, la prova di compressione che permette di studiare la resistenza di un materiale allo schiacciamento delle sue superfici, le prove di fatica, di durezza e tante altre.

Proprio per questo motivo nel secondo capitolo verranno presentate le tipologie più frequenti di prove di caratterizzazione dei materiali, concentrandosi soprattutto sulla prova di trazione e quella di taglio in piano, direttamente collegate al lavoro di Tesi svolto. Sarà esaminato quindi il comportamento meccanico dei materiali compositi ai vari tipi di prove (trazione, taglio, compressione) e come si manifestano i principali meccanismi di crisi.

Nel terzo capitolo si tratteranno, descritti in maniera generale, i diversi metodi prestabiliti dalla normativa ASTM che si possono utilizzare per la realizzazione di differenti tipologie di attrezzature adibite al taglio in piano. Inoltre verranno descritti i provini realizzati all'interno del laboratorio MasterLab da testare.

Per potere calcolare la resistenza allo scorrimento dovuta al taglio in piano dei provini in analisi è stato necessario progettare e realizzare una nuova fixture da installare sulla pressa oleodinamica Italsigma Fpf. Nel quarto e quinto capitolo, inerenti alla parte sperimentale, verrà spiegato a fondo il processo di realizzazione di questa nuova struttura e saranno affrontate le problematiche connesse a tale procedimento. Il dimensionamento dei pezzi e l'analisi strutturale dell'assieme finale sono alcuni dei punti principali che si tratteranno. Infine si porrà attenzione sui test effettuati sui provini e si analizzeranno i risultati ottenuti.

CAPITOLO 1:

I MATERIALI COMPOSITI:

1.1 I MATERIALI COMPOSITI:

I materiali compositi sono costituiti da più materiali diversi tra loro, ciascuno dotato di proprietà chimico-fisiche differenti a livello macroscopico e strutturale. I singoli materiali che formano i compositi sono chiamati costituenti e a seconda della loro funzione prendono il nome di matrice e rinforzo. L'insieme di queste due parti costituisce un prodotto in grado di garantire proprietà meccaniche elevatissime (a questo scopo fondamentale è la cura dell'adesione interfacciale tra fibre e matrice) e massa volumica decisamente bassa: per questo motivo i compositi sono largamente usati nelle applicazioni dove la leggerezza è cruciale, aeronautica in primis.

1.2 LA MATRICE:

Nella realizzazione di rinforzo fibroso, la matrice, riveste quattro ruoli fondamentali:

- 1) E' il legante che assicura il mantenimento della forma del rinforzo;
- 2) E' il collante che preserva la corretta adesione tra elemento rinforzato e rinforzo;
- 3) E' la protezione delle fibre da attacchi fisico-meccanici;
- 4) E' l'elemento che trasferisce le forze dall'elemento strutturale rinforzato al rinforzo e le ripartisce fra le fibre.

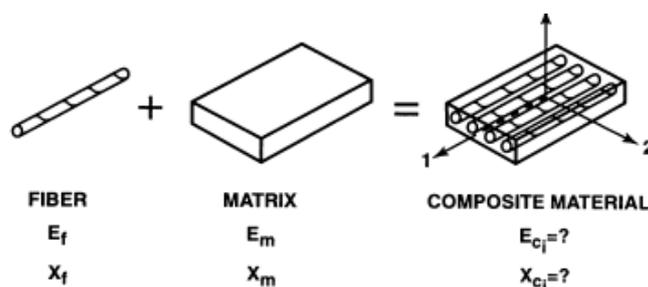


Figura 1.1: rappresentazione della struttura di un materiale composito

Le caratteristiche meccaniche della matrice sono decisamente inferiori a quelle delle fibre ma la loro unione realizza un perfetto connubio di resistenza e durabilità nel tempo, oltre a garantire la funzione per la quale il rinforzo è stato concepito [1].

A seconda della natura della matrice, i materiali compositi si suddividono in varie categorie, tra cui:

- **PMC** (*Polymer-Matrix Composite*): compositi a matrice polimerica, ad esempio termoplastici (come il Nylon e l' ABS) o termoindurenti (come le resine epossidiche);
- **MMC** (*Metallic-Matrix Composite*): compositi a matrice metallica, generalmente alluminio, o titanio e loro leghe, più raramente magnesio;
- **CMC** (*Ceramic-Matrix Composite*): compositi a matrice ceramica, generalmente carburo di silicio o allumina;
- **COMPOSITI CARBONIO-CARBONIO**: sia la matrice che il rinforzo sono costituiti da carbonio;
- **COMPOSITI IBRIDI**: contengono due o più tipologie di fibre.

Nella maggioranza dei casi le matrici sono polimeriche perché garantiscono bassa densità (e quindi leggerezza del materiale finale). Hanno però il difetto di calare drasticamente le performance al salire della temperatura. Nei materiali compositi a matrice polimerica si possono utilizzare come matrice ad esempio le resine epossidiche, polimeri termoindurenti contenenti, nel precursore liquido, l' anello epossidico a tre atomi. Vengono spesso usate in alcuni adesivi.

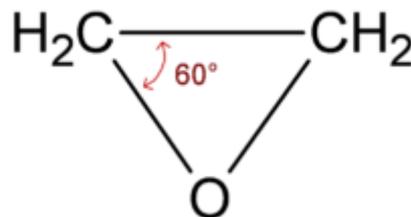


Figura 1.2: Anello epossidico a tre atomi delle resine

1.2.1 PROPRIETA' DELLE RESINE E TIPI DI RESINE:

Le principali proprietà delle resine sono [2]:

- **Resistenza all' ambiente esterno**, all' umidità e a sostanze disgreganti come l' acqua.
- **Tenacità**, indica la duttilità del materiale, ovvero la sua resistenza alla propagazione della frattura. Per risalire alla tenacità di un materiale ci si riferisce alla sua curva tensione/deformazione, prendendo in considerazione che, tanto più la resina si deforma prima di arrivare a rottura, tanto più il materiale sarà tenace.
- **Capacità di sopportare cicli di fatica costanti.**

Queste proprietà sono fondamentali per qualsiasi tipo di resina, tenendo conto soprattutto che l' utilizzo principale dei materiali compositi viene fatto in ambito nautico ed aeronautico e quindi in casi in cui i laminati rischiano di dover permanere a lungo in ambienti corrosivi.

I principali tipi di resine utilizzati nei materiali compositi sono:

- **Resine poliestere,**
- **Resine vinilestere,**
- **Resine epossidiche.**

Le resine poliestere possono presentarsi sotto forma di liquido viscoso o solidi fragili. Hanno un basso grado di polimerizzazione e un peso molecolare di 1200 g/mol. La resina poliestere insatura (UP) ha doppi legami C=C che possono essere reticolati per formare materiali termoindurenti. Possono essere reticolati in presenza di fibre di vetro per dare materiali compositi ad alta resistenza chimica.

Sono liquidi a bassa densità che possono essere miscelati a notevoli quantità di cariche e rinforzi (fibre tessili o di vetro). Ci sono due tipi principali di resine poliestere utilizzate nell'industria dei materiali compositi: la resina 'poliestere Ortoftalica', la più comune, e la resina 'poliestere Isoftalica' che sta diventando sempre più utilizzata grazie alla sua resistenza all'acqua. Le resine rinforzate con fibre di vetro hanno notevole resistenza meccanica e buona resistenza agli urti e agli agenti chimici. L'aggiunta di stirene in quantità fino al 50% rende la resina più facile da maneggiare riducendone la viscosità. Lo stirene inoltre rende possibile il trattamento da liquido a solido attraverso la reticolazione di catene molecolari del poliestere senza la formazione di alcun sottoprodotto.

Queste resine possono perciò essere plasmate senza l'uso della pressione e per questo sono chiamate resine a bassa pressione o 'contact'. Uno dei difetti delle resine poliestere è legato al fatto che hanno un limitato periodo di vita poiché tendono a gelificare in seguito a determinati periodi di stoccaggio. Durante la produzione delle resine vengono spesso aggiunte per questo, piccole quantità di inibitori in modo da rallentare tale azione gelificante. Sono utilizzate per creare pannelli per l'edilizia e componenti per bagni (vasche, docce...), tubazioni, serbatoi e condotti in cui è richiesta la resistenza chimica o ancora, nell'industria navale, per gommoni yacht e vari altri tipi di imbarcazioni.

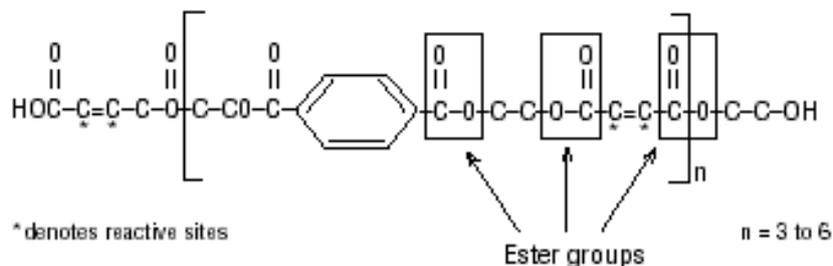


Fig 1.3 : Struttura molecolare tipica di un poliestere

Le resine vinilestere sono delle resine prodotte per esterificazione di un prepolimero epossido con un acido carbossilico insaturo come l'acido acrilico o l'acido metacrilico. Il prodotto di reazione è un prepolimero telecheroico che contiene un doppio legame nella catena chimica. Questo prepolimero viene in seguito disciolto in un solvente vinilico come lo stirene a una concentrazione compresa tra il 35 e il 45 per cento in massa. La reazione avviene per polimerizzazione nel corso della quale i doppi legami degli stireni reagiscono tra loro e con i doppi legami di ogni prepolimero. Le resine vinilestere hanno una struttura simile alla poliestere ma differiscono principalmente nella posizione del punto reattivo. Questo è posizionato nella parte finale della catena molecolare.

I carichi d'urto vengono assorbiti per tutta la lunghezza della catena molecolare. Questo rende le resine vinilestere più elastiche e resistenti delle poliestere. La molecola del vinilestere presenta inoltre alcuni esteri che sono predisposti alla degradazione dell'acqua per effetto di idrolisi. Questo significa che rispetto ai poliestere hanno maggior resistenza all'acqua e ad altri prodotti chimici. Infatti sono spesso presenti in oleodotti ed in serbatoi d'immagazzinamento di prodotti chimici. Le resine vinilestere sono frequentemente utilizzate come matrice per materiale compositi che hanno generalmente per rinforzo fibre di vetro. Sono utilizzati inoltre nelle costruzioni amatoriali di aeroplani e nel settore nautico grazie alla loro buona resistenza alla corrosione e all'assorbimento d'acqua. I vinilestere sono talvolta considerati una buona alternativa agli adesivi poliestere insaturi e ai poliepoassidi. I prezzi e le prestazioni dei vinilestere si collocano a metà strada tra quelli di questi due tipi di resine. La loro viscosità è inferiore a quella dei poliestere insaturi e dei poliepoassidi. È una resina capace di assorbire shock dovuti a impatto e questo rende la resina più tenace e resiliente rispetto a quella poliestere.

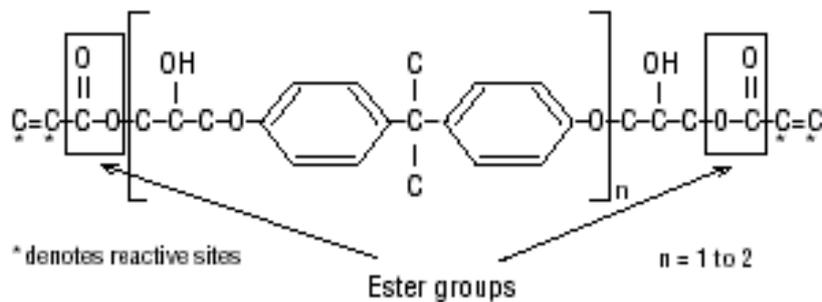


Figura 1.4: Struttura molecolare di resina vinilestere

Le resine epossidiche infine, sono prepolimeri di basso peso molecolare molto versatili. La grande famiglia delle resine epossidiche è quella che oggi giorno fornisce le migliori prestazioni. La resina epossidica è nettamente migliore delle altre resine per le sue caratteristiche meccaniche e la resistenza al degrado da agenti esterni. Non a caso l'industria aerospaziale ne fa un utilizzo quasi esclusivo. Come resina da laminazione, le forti proprietà adesive e la resistenza al degrado nell'acqua rendono ideale l'uso di queste resine nella cantieristica navale. In questo caso gli epossidici sono utilizzati come materiale principale nella costruzione di imbarcazioni di alta qualità e come materiale secondario per rivestire gli scafi o sostituire le resine poliestere e gel coats degradabili in acqua. Identificabili per la tipica colorazione ambra o marrone, le resine epossidiche possiedono molteplici proprietà.

Sia la resina liquida che l'agente indurente formano sistemi a bassa viscosità di semplice processo. La resina epossidica è facile e veloce da catalizzare a temperature che vanno dai 5°C ai 150°C, a seconda dell'agente indurente scelto. Una delle proprietà più vantaggiose è il basso ritiro durante la catalisi che minimizza la marcatura del tessuto e le sollecitazioni interne. L'alta forza di adesione e le ottime caratteristiche meccaniche della resina epossidica vengono ulteriormente incrementate grazie all'alta resistenza chimica e isolamento elettrico. Gli epossidici trovano uso come adesivi, composti per calafataggio, composti da fusione, vernici e pitture, resine da laminazione e uso industriale. Le resine epossidiche sono vetrose a temperatura ambiente e vengono quindi miscelate con diluenti per abbassare la viscosità a livelli adeguati per l'impregnazione delle fibre. I diluenti sono stirene monomero e stirene ossido. La viscosità di una resina epossidica senza diluente può variare moltissimo, da liquido a solida, di solito queste resine si presentano sotto forma di di-eossido, si tratta di una catena lineare di molecole alla cui estremità trovano posto i gruppi epossidici (CH₂-O-CH) con i quali reagiscono gli agenti leganti durante la polimerizzazione. I gruppi ad anello contribuiscono ad aumentare la rigidità e la resistenza al calore delle resine. Il processo di polimerizzazione è notevolmente diverso da quello di altre resine, infatti vengono usati induritori. Le resine epossidiche sono dotate di caratteristiche fisiche superiori e tempi di reazione più brevi rispetto alle poliesteri e alle vinilesteri ma il loro prezzo è più elevato.

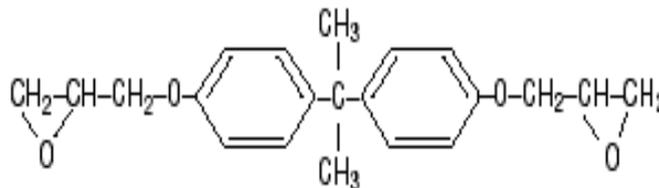


Figura 1.5: Struttura molecolare resina epossidica

Sintesi:

La resina epossidica, la poliesteri e la vinilesteri discusse rappresentano probabilmente il 90% delle resine termoindurenti utilizzate nei materiali compositi.

I vantaggi e gli svantaggi sono rappresentati nella seguente tabella [3].

Poliestere	Vantaggi <ul style="list-style-type: none"> • Facile utilizzo • Basso costo 	Svantaggi <ul style="list-style-type: none"> • Tempo di lavorazione poco variabile • Moderate proprietà meccaniche • Forte emissione di stirene in stampi aperti • Forte ritiro nella catalisi
Vinilestere	Vantaggi <ul style="list-style-type: none"> • Resistenza ad agenti chimici elevata • Proprietà meccaniche superiori alla poliestere 	Svantaggi <ul style="list-style-type: none"> • Necessita di post-cura per alte proprietà • Alto contenuto di stirene • Costo maggiore della poliestere • Forte ritiro nella catalisi
Epossidica	Vantaggi <ul style="list-style-type: none"> • Alte proprietà meccaniche e termiche • Alta resistenza all'acqua • La resistenza alla temperatura può arrivare fino a 140°C wet / 220°C dry • Basso ritiro nella catalisi 	Svantaggi <ul style="list-style-type: none"> • Più cara della vinilestere • Miscelazione critica • Corrosiva

Tabella 1.1

1.3 IL RINFORZO:

Il rinforzo è rappresentato da una fase di dispersione in varie modalità all'interno della matrice e ha il compito di assicurare rigidità e resistenza meccanica, assumendo su di sé la maggior parte del carico esterno.

A seconda del tipo di rinforzo, i materiali compositi si suddividono in:

- compositi particellari;
- compositi rinforzati con fibre;
- compositi strutturati (ad esempio pannelli a sandwich, materiali compositi laminati e pannello composito in alluminio).

1.3.1 COMPOSITI CON FASE DISPERSA PARTICELLARE:

Nei compositi particellari il rinforzo è costituito da "particelle", le quali (a differenza delle fibre) possono assumersi equiassiche, ovvero il rapporto tra diametro e lunghezza di ogni particella è circa unitario (mentre le fibre sono più sviluppate in lunghezza).

Le proprietà chimico-fisiche dei materiali compositi particellari dipendono dalla geometria del sistema particellare, ovvero:

- dimensioni e forma delle particelle;
- concentrazione, distribuzione e orientamento delle particelle all'interno della fase dispersa.

1.3.2 COMPOSITI CON FASE DISPERSA FIBROSA:

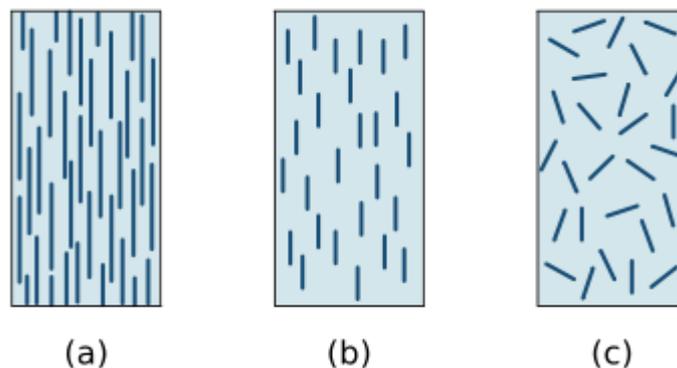


Figura1.6: Compositi con fibre; continue(a), discontinue allineate(b), discontinue casuali(c)

I compositi rinforzati con fibre possono essere a loro volta classificati in:

- compositi a fibre continue (o lunghe);
- compositi a fibre discontinue (o corte) allineate tra loro;
- compositi a fibre discontinue (o corte) disposte in maniera casuale.

I materiali compositi con fase dispersa fibrosa presentano una spiccata anisotropia. Questa anisotropia non si riscontra (o per lo meno è molto minore) nei compositi particellari, nella misura in cui dette particelle sono equiassiche [4].

L'anisotropia, se controllata, può costituire un vantaggio: il materiale viene rinforzato in quelle direzioni dove si sa verrà caricato e dunque le prestazioni vengono ottimizzate (come nel caso dei compositi a fibre continue). Se, invece, è dovuta a fenomeni più difficilmente controllabili (ad esempio flusso plastico del materiale in uno stampo, come nel caso dei compositi a fibre corte) diviene problematica perché l'orientazione delle direzioni di massimo rinforzo difficilmente coincide con quella desiderata.

Nel caso di compositi rinforzati con fibre, il rinforzo può essere ad esempio costituito da:

- fibre di carbonio (costituite da carbonio grafitico e carbonio amorfo)
- fibre ceramiche (ad esempio carburo di silicio o allumina)
- fibre aramidiche (come il Kevlar)
- fibre di basalto
- fibre di vetro.

1.4 LE FIBRE:

La fibra è la parte costituente il rinforzo che ha il compito di esercitare la funzione resistente vera e propria.

Nella realizzazione dei compositi le fibre possono essere continue o discontinue, nel primo caso la loro disposizione è allineata a formare dei nastri, dei tessuti o delle lamine anche di grandi dimensioni, mentre nel secondo caso le fibre sono corte e la loro disposizione è usualmente casuale.

Le fibre maggiormente diffuse sono quelle di carbonio, vetro e aramide, la loro geometria filiforme, con le quali si trovano in commercio, garantisce una grande versatilità nelle applicazioni e vi conferisce spiccate caratteristiche di rigidità e resistenza rispetto al loro uso tridimensionale, questo grazie alla diminuzione dei difetti che spesso sono causa di innesco di crisi locali.

1.4.1 CLASSIFICAZIONE DELLE FIBRE:

Le fibre sono costituite da filamenti continui molto sottili e quindi difficili da manipolare singolarmente, proprio per tale motivo le fibre sono disponibili sul mercato in varie forme.

Nella tabella seguente saranno messe in luce le principali forme in cui possiamo trovarle.

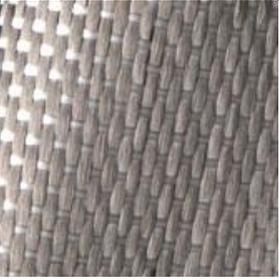
FORMA	DESCRIZIONE	
FILAMENTO	Elemento base di diametro circa 10 μm	
CAVO DI FILATURA	Fascio di gran numero di filamenti (migliaia), senza torsione. Usato per esser filato e strappato.	
FILO O FILATO	Filo formato da fibre tenute insieme da torsione	
FILO ASSEMBLATO	Fascio costituito da filati, assemblati parallelamente e senza torsione intenzionale	
TAPE	Formato da centinaia di filati	
TESSUTI	Le fibre sono disposte in modo da garantire una quasi isotropia nel piano	

Tabella 1.2: Classificazione delle fibre

1.4.2 FIBRE DI VETRO:

L'esperienza comune insegna che il vetro è un materiale fragile. Se esso viene invece filato a diametri d'ordine inferiore al decimo di millimetro perde la sua caratteristica fragilità per divenire un materiale ad elevata resistenza meccanica e resilienza.

La fragilità del vetro comune è dovuta al gran numero di difetti della cristallizzazione che agiscono come microfratture e zone di concentrazione degli sforzi.

Al contrario la fibra di vetro non presenta tutti questi difetti, per cui raggiunge resistenze meccaniche prossime alla resistenza teorica del legame covalente. Questa proprietà rende i materiali compositi realizzati con fibre di vetro, una valida alternativa ai più costosi materiali realizzati con fibre aramidiche e al carbonio. Non a caso le fibre di vetro sono largamente utilizzate in diversi settori a partire dalla produzione di compositi strutturali in campo aerospaziale, nautico, automobilistico, associate a matrici diverse ad esempio poliammidiche o epossidiche. Non vengono solitamente impiegate nella realizzazione di compositi con matrici metalliche o ceramiche per le quali, al di là del problema tecnologico dovuto all'alta temperatura in produzione, si preferisce l'impiego di fibre con prestazioni migliori, ad esempio le fibre di carbonio, in relazione all'alto costo di produzione. I compositi a fibre di vetro risultano economici, tecnologicamente semplici da produrre e hanno ottime caratteristiche meccaniche a basse temperature d'esercizio. Nel campo dell'ingegneria civile le fibre di vetro sono impiegate nella realizzazione di manufatti in fibrocemento.

I metodi di produzione delle fibre di vetro sono:

- **a marmo fuso:** in disuso, consisteva nel far passare attraverso ugelli di trafilatura il fuso;
- **trafilatura di bacchette:** in disuso, consisteva nel tirare bacchette di vetro per formare le fibre;
- **a fusione diretta:** metodo attualmente più utilizzato, il fuso, leggermente raffreddato ma ancora plastico, viene fatto passare arrotolato mediante filiere, le fibre vengono rivestite di polimeri per evitare che si fondano tra loro e sistemate in fasci.

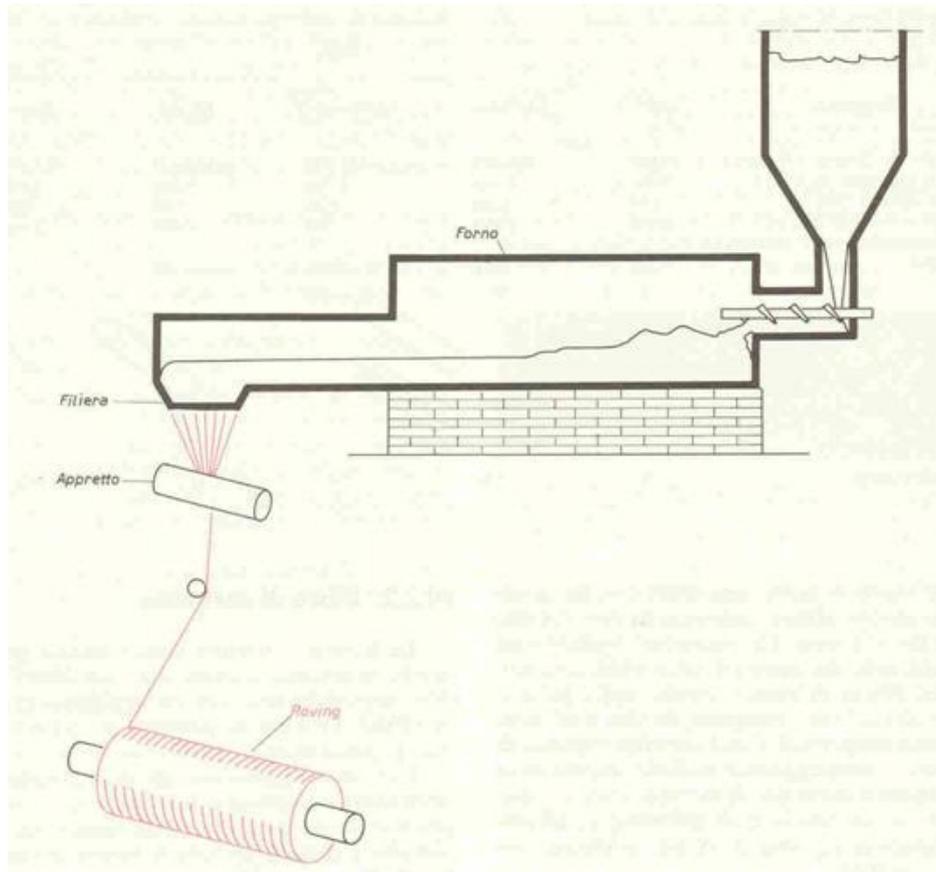


Figura 1.7: Trasformazione del vetro fuso in fili sottili mediante filiera e appretto

Le fibre di vetro si ottengono con un processo industriale di fusione di vari ossidi quali ad esempio SiO_2 , BaO_2 , TiO_2 , CaO , MgO solo per dirne alcuni.

Tramite il metodo di fusione diretta, gli ossidi di calcio, silicio, magnesio, alluminio e boro uniti a formare il tank vengono fusi a 1500°C vengono quindi miscelati e raffreddati bruscamente fino a 1200°C .

Il vetro fuso viene fatto passare per gravità attraverso appositi fori praticati sul fondo di filiere di platino. I filamenti sono quindi raggruppati a formare una treccia o fibra (trand) tipicamente costituita da 204 filamenti i quali presentano un diametro medio di circa $10\ \mu\text{m}$ e sono ricoperti da un legante (binder).

Le fibre di vetro sono anche disponibili in forma di fogli sottili denominati mat che possono essere costituiti sia da fibre lunghe continue che da fibre corte (tra 25 e 50 mm) disposte casualmente nel piano e tenute assieme da un legante chimico. Al variare delle proporzioni delle materie prime impiegate si ottengono prodotti con caratteristiche e prestazioni meccaniche diverse tra loro.



Figura 1.8: due immagini raffiguranti la struttura di fibre di vetro

Sul mercato è possibile reperire 7 diversi tipi di fibre di vetro:

IMPIEGO DELLE FIBRE	TIPO DI VETRO
Alta resistenza meccanica ed alla corrosione di acidi	R,S
Resistenti alla corrosione di acidi	A,C,R
Multiscopo	E
Alte caratteristiche dielettriche	D

Tabella 1.3: Tipi di fibre e loro impiego

I tipi più diffusi sono quello “E” ed “S”; il tipo E è meno pregiato ed ha caratteristiche meccaniche modeste rispetto al tipo S.

Proprietà tipiche delle fibre di vetro S (ad alta resistenza):

- Densità: 2,48 g/cm³
- Modulo elastico: 90 GPa
- Resistenza meccanica a trazione (e fibra nuova): 4500 MPa
- Allungamento percentuale a rottura: 5%

Nella seguente tabella si confrontano le proprietà meccaniche di resistenza a trazione, modulo elastico, deformazione a rottura, densità e resistenza specifica delle Fibre di vetro di tipo E, Fibre di vetro di tipo S e l' Acciaio Feb44K.

MATERIALE	DENSITA'	MODULO ELASTICO	RESISTENZA A TRAZIONE	DEFORMAZIONE A ROTTURA (%)	RESISTENZA SPECIFICA
Fibre di vetro tipo E	2550	70	3500	3,8	1,37
Fibre di vetro tipo S	2500	90	4700	5,5	1,88
Acciaio Feb44K	7850	210	540	20	0,07

Tabella 1.4: Analisi proprietà fibre di vetro

Le fibre di vetro hanno un modulo di Young (E) inferiore a quello delle fibre di carbonio e di aramide, offrono una resistenza all'abrasione relativamente modesta, che richiede una certa cura nella manipolazione durante la messa in opera; questo tipo di fibra ha una pronunciata attitudine allo scorrimento viscoso ed una modesta resistenza a fatica.

Le fibre di vetro, se non preventivamente trattate, sono vulnerabili all'azione degli alcali presenti nel calcestruzzo (K^+ ed Na^+). Tali ioni, infatti, possono reagire con la silice amorfa (SiO_2 , principale costituente del vetro) generando una forma gelatinosa di silicati alcalini idrati, con conseguente degrado delle fibre di vetro e relativa riduzione delle prestazioni meccaniche.

Per ovviare a questo inconveniente e per promuovere l'adesione tra fibre e matrice durante la messa in opera, le fibre sono sottoposte a trattamenti di ensimaggio (sizing) con sostanze aventi funzione di compatibilizzante. Tali trattamenti sono molto utili anche ai fini della durabilità e della resistenza a fatica.

1.5 CONFRONTO FIBRE:

Nelle seguenti tabelle e nei seguenti grafici vengono comparate le tre tipologie di fibre più diffuse sul mercato (carbonio, vetro, aramidiche). Viene posta attenzione anche alle destinazioni d'uso più indicate per ogni tipologia evidenziando le principali caratteristiche fisico-meccaniche [4].

FIBRE	RIGIDEZZA	RESISTENZA	COSTO
VETRO	Scarsa	Buona	Molto basso
ARAMIDICHE	Media	Buona	Elevato
CARBONIO	Buona	Buona	Elevato

Tabella 1.5: Confronto fibre di carbonio, vetro e aramide

MATERIALE	DENSITA'	MODULO ELASTICO	RESISTENZA A TRAZIONE	DEFORMAZIONE A ROTTURA	ASSORBIMENTO UMIDITA'
VETRO E	2,58	73	2000	3,5	0,5
VETRO S	2,58	86	3500	4,0	0,3
CARBONIO	1,78	240	3400	1,4	0,1
CARBONIO H-M	1,83	640	1900	0,5	0,1
ARAMIDE	1,44	80	2800	3,3	4,5
ARAMIDE H-M	1,45	125	2800	2,0	2,5
ACCIAIO C40	7,85	200	300-600	25	-

Tabella 1.6: Confronto proprietà fibre di carbonio, vetro aramide e acciaio C40

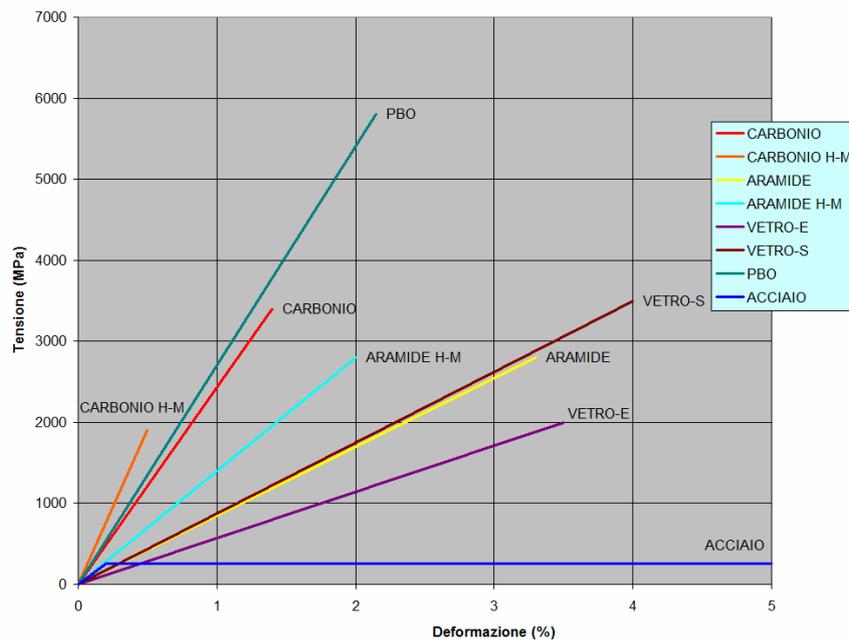


Figura 1.9: Grafico per il confronto delle diverse proprietà dei diversi rinforzi

FIBRA	UTILIZZO
VETRO	- Campo nautico - Realizzazione di laminati di considerevole spessore - Realizzazione di tubazioni sottomarine
ARAMIDICHE	- Campo aeronautico militare (giubbotti antiproiettili, auto blindate, elmetti etc)
CARBONIO	- Strutture aeronautiche - Meccanica - Attrezzature per lo sport

Tabella 1.7: Diversi campi di utilizzo delle fibre di vetro, aramide e carbonio

CAPITOLO 2:

PROVE DI CARATTERIZZAZIONE E COMPORTAMENTO MECCANICO MATERIALI COMPOSITI:

2.1 LE PROVE DI CARATTERIZZAZIONE DEI MATERIALI:

Da sempre nell' industria meccanica, vengono utilizzati numerosi tipi di prove di caratterizzazione dei materiali, per analizzarne le caratteristiche meccaniche. Queste prove vengono effettuate su provini unificati secondo le varie normative. Alcune prove forniscono proprietà del materiale che sono direttamente impiegabili nei calcoli tecnici.

Le principali prove di caratterizzazione dei materiali sono:

1) Prova di trazione statica:

fornisce il valore della resistenza a trazione e dello snervamento, della rigidità elastica e dà indicazioni sul comportamento duttile o fragile del materiale;

2) Prova di compressione statica:

ci consente di studiare il comportamento dei materiali sotto carichi di schiacciamento;

3) Prova di fatica:

necessaria per conoscere la risposta dei materiali nei confronti di carichi oscillanti nel tempo;

4) Prova di taglio:

Nel caso di taglio in piano il provino viene sollecitato da forze agenti parallele lungo le sue superfici, che generano una deformazione di scorrimento all' interno del materiale. Quando si parla di taglio interlaminare invece la sollecitazione ha una direzione ortogonale rispetto all' asse dell' oggetto.

Altre prove producono informazioni non direttamente utilizzate nella progettazione, ma in grado di classificare i materiali, cioè paragonarne le caratteristiche meccaniche.

Tra queste si possono ricordare:

1) Prove di durezza:

forniscono informazioni sulla durezza dei materiali ed inoltre dati sulla corretta esecuzione dei trattamenti termici negli acciai;

2) Prove di resilienza:

forniscono dati sulla resistenza all'urto, e danno anche indicazioni sul comportamento più o meno duttile del materiale (es. prova del pendolo di Charpy a diverse temperature per valutare la temperatura di transizione fragile/duttile tipica di molti materiali).

Le prove si dividono in prove distruttive e prove non distruttive.

Le prove distruttive, compromettono l'integrità del materiale, non vengono eseguiti su pezzi finiti, ma su campioni di materiale (provini) di forma e dimensioni unificate.

Le prove non distruttive ,si possono eseguire su qualsiasi pezzo meccanico, perché non alterano alcun parametro e non lasciano segni evidenti.

Di tutte queste prove nelle successive pagine verranno messe in luce solo la prova di trazione e quella di taglio che presentano un' attinenza particolare con il lavoro di Tesi.

2.2 PROVA DI TRAZIONE:

La prova di trazione consiste nel sottoporre alcuni provini del materiale in esame ad un carico monoassiale gradatamente crescente fino a provocarne la rottura. La prova di resistenza a trazione è la più importante prova meccanica per i materiali metallici.

I diversi valori di resistenza che si determinano sono gli elementi più validi e quindi più utilizzati per esprimere le caratteristiche di un materiale e individuarne la possibilità di impiego. Sotto lo sforzo di trazione, applicato in modo graduale e continuo, da zero fino ad un suo valore massimo, il provino subisce un certo allungamento che verrà misurato attraverso gli appositi sensori che controllano la prova.

2.2.1 PROVINI UNIFICATI:

I provini su cui si esegue la prova sono ricavati dal materiale da testare. Per rendere attendibile la prova è necessario utilizzare provini unificati aventi precise caratteristiche dimensionali e di forma. I provini sono solitamente costituiti da una parte cilindrica o prismatica (detta tratto utile), sulla quale deve essere misurato l'allungamento, raccordata alle estremità da due teste di forma opportuna che vengono afferrate dagli organi di presa della macchina.

I provini che vengono utilizzati in questa prova devono rispettare le norme UNI le quali prescrivono:

- il modo di prelevamento,
- la forma,
- le dimensioni,
- la preparazione.

Per le prove di trazione effettuate nel laboratorio MasterLab situato all' interno dell' hangar dell' aeroporto di Forlì, si sono utilizzati dei provini rettangolari in materiale composito.

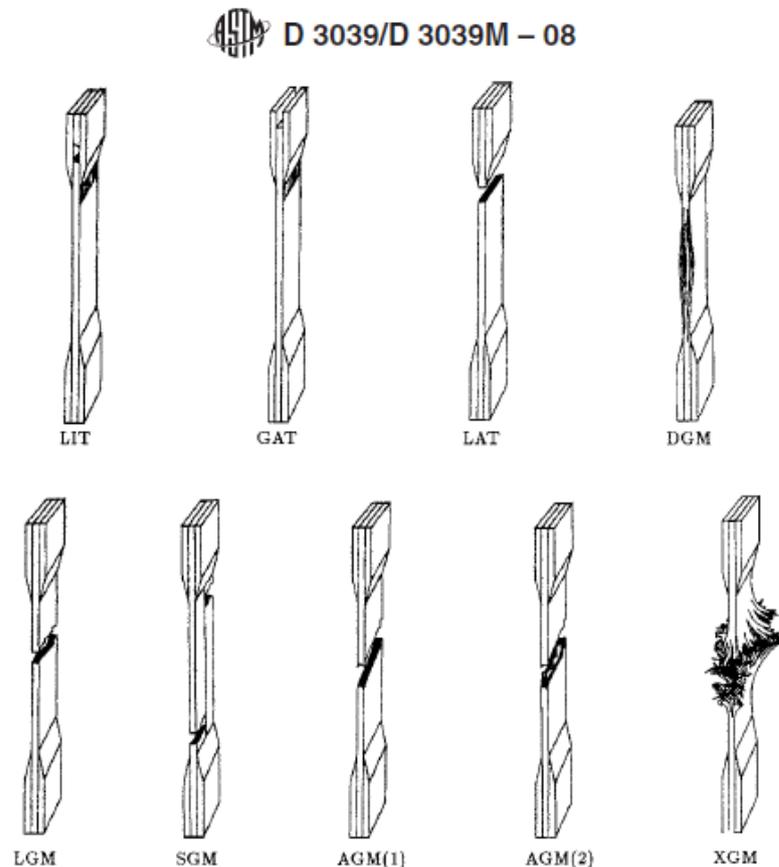


Figura 2.1: Geometria provino utilizzato per prova di trazione e diversi tipi di rottura che possono verificarsi

Durante una prova di trazione possiamo registrare il diagramma cartesiano che riporta in ascissa gli allungamenti del provino e sulle ordinate il carico di trazione ad esso applicato.

Questo diagramma prende il nome di **Diagramma Carichi-Allungamenti**.

Per un materiale come l'acciaio, il diagramma si presenta come quello mostrato nella figura sottostante ed è caratterizzato da cinque fasi differenti di allungamento:

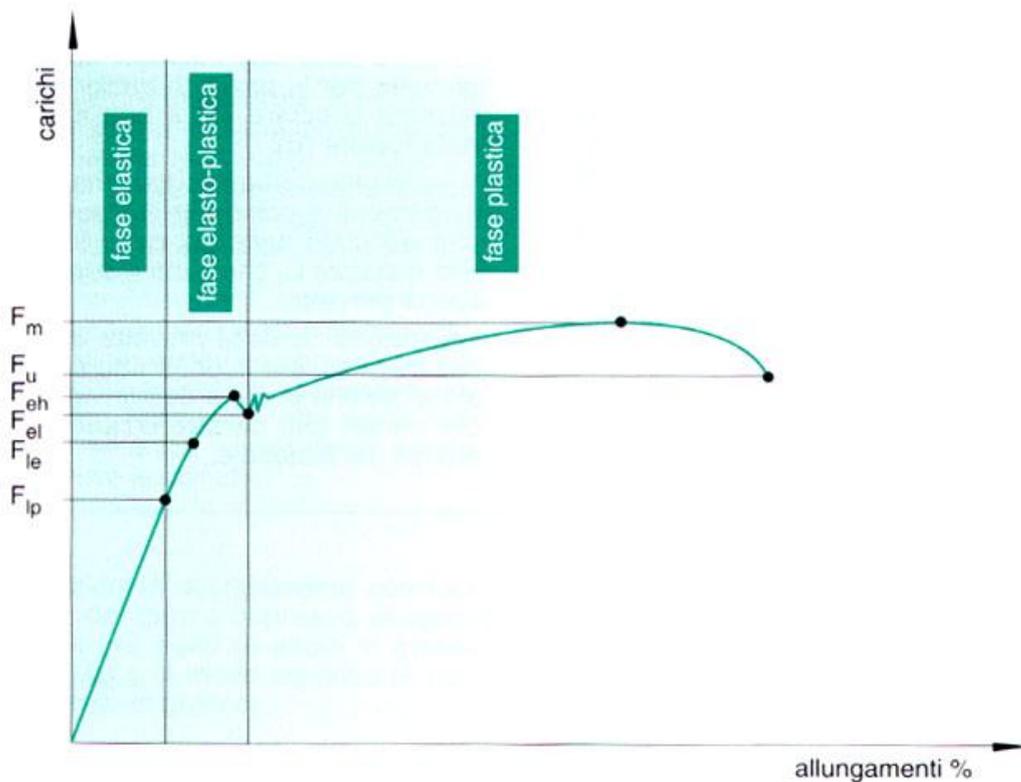


Figura 2.2: Diagramma carichi-allungamenti

fase di elasticità e proporzionalità:

in una prima fase, quando il materiale è sottoposto ai primi carichi, l'allungamento cresce in proporzione al carico impresso. Al cessare del carico la provetta riacquista le dimensioni iniziali.

fase di sola elasticità :

in una seconda fase, aumentando il carico, il materiale è ancora elastico, cioè le deformazioni permanenti sono trascurabili rispetto a quelle elastiche.

fase di elasticità e plasticità :

oltre questo carico, la provetta comincia a subire delle deformazioni che permangono, in parte, anche dopo aver eliminato il carico. Se togliamo il carico l'allungamento si riduce, ma il provino non riassume le dimensioni iniziali.

fase di snervamento:

si ha lo snervamento quando la deformazione della provetta aumenta per la prima volta senza che il carico aumenti, oppure quando il carico diminuisce. Il carico di snervamento caratterizza l'inizio della fase plastica che precede la rottura della provetta.

fase di rottura:

dopo lo snervamento se aumentiamo ancora il carico, la provetta continua a deformarsi plasticamente fino all'improvvisa rottura. In questa fase, nella zona di rottura della provetta, la sezione si restringe visibilmente e presenta il cosiddetto fenomeno della strizione.

Dalla prova di trazione si ricavano alcuni parametri caratteristici del materiale di cui è fatto il provino. Sui manuali tecnici sono riportati per ogni materiale metallico i parametri che si ricavano da una prova di trazione.



Figura 2.3: Macchina per prova di trazione-compressione

2.3 PROVA DI TAGLIO:

Lo sforzo di taglio è uno degli sforzi elementari a cui può esser soggetto un corpo. Viene anche definito sforzo tangenziale, in quanto si genera quando una forza è applicata tangenzialmente ad una superficie del corpo.

L'effetto di questo tipo di sforzo è chiamata **deformazione di scorrimento**.

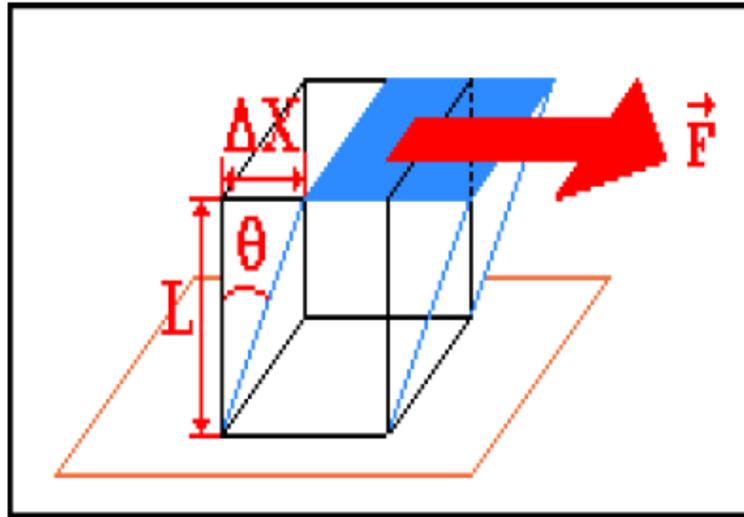


Figura 2.4: Rappresentazione grafica della deformazione di scorrimento

$$\text{Deformazione di scorrimento } \gamma = \frac{\Delta x}{L} = \tan\theta$$

Quando si ha una deformazione di scorrimento dovuta ad una forza solidale alla superficie su cui agisce, si parla di **taglio in piano**. In questo caso la forza agisce parallelamente all'asse dell'oggetto in analisi. Prove di caratterizzazione a taglio in piano, delineate dalla normativa ASTM D4255, sono utilizzate per determinare la resistenza allo scorrimento dei materiali in analisi.

Quando lo Sforzo di Taglio genera momento flettente, ed il carico è quindi ortogonale all'asse dell'oggetto che si sta testando si parla di **taglio interlaminare**. I materiali compositi sono spesso soggetti a prove di caratterizzazione a taglio interlaminare. Con il test di taglio interlaminare ASTM D2344 si può infatti determinare la tendenza della resina a staccarsi dalla fibra (effetto di micro-cracking o delaminazione).

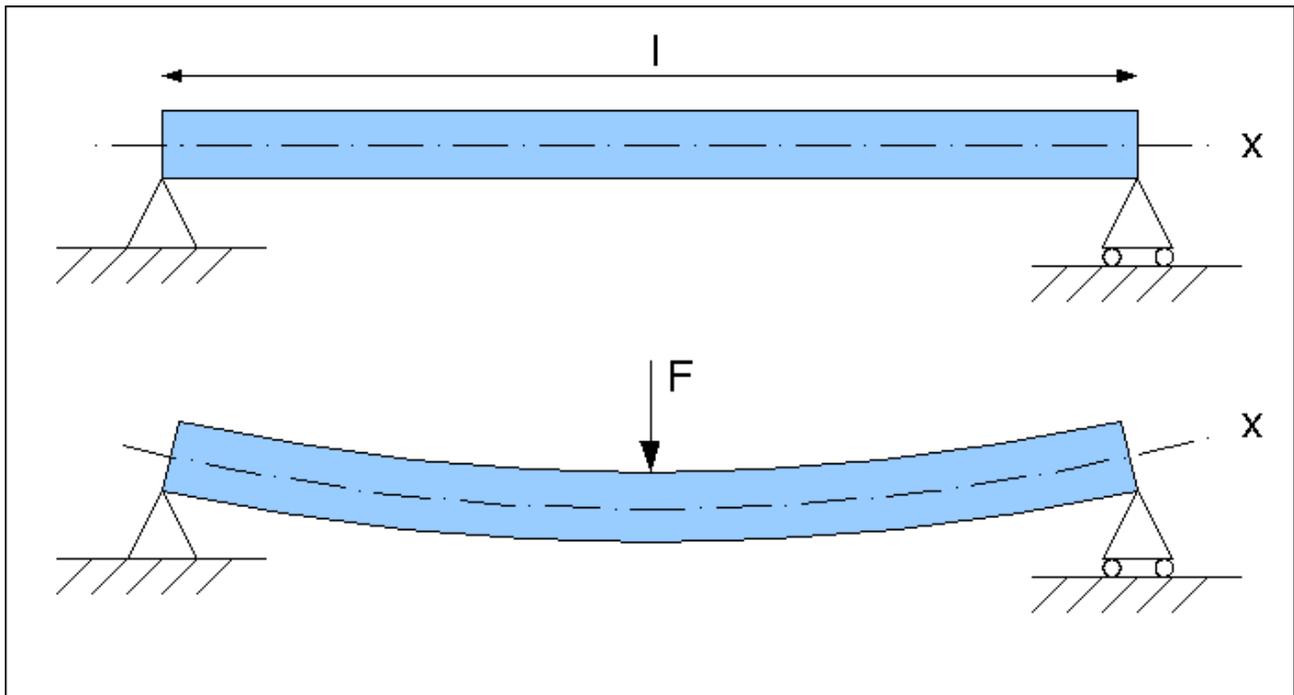


Figura 2.5: Momento flettente generato da una forza di taglio F

Nel caso preso in considerazione durante il lavoro di tesi, lo scopo è stato quello di analizzare provini in fibra di vetro mediante delle prove di taglio in piano. I laminati in analisi vengono sottoposti a forze tangenziali alla loro superficie. La rottura si verifica una volta raggiunta la forza tangenziale massima sopportabile dal materiale. L'obiettivo è quello di generare sforzi tensionali sufficientemente elevati per portare a rottura il provino, facendo bene attenzione che la rottura avvenga uniformemente lungo l'asse del provino e non distribuita casualmente in altre zone.

2.4 COMPORTAMENTO MECCANICO MATERIALI COMPOSITI:

Il comportamento meccanico dei materiali compositi è molto complesso, a causa della disomogeneità e dell'anisotropia del materiale.

Anche i meccanismi di crisi sono molto più complessi rispetto a quelli dei materiali omogenei ed isotropi, e questo rende difficile sia la previsione delle tensioni di crisi, sia l'interpretazione dei risultati sperimentali.

Già all'inizio della vita del composito sono normalmente presenti interruzioni di alcune fibre. Nel corso poi della vita del componente, altre fibre si possono rompere a causa di tensioni localizzate. Generalmente è presente anche una mancanza di allineamento delle fibre, causata da una scarsa accuratezza nella lavorazione o da stati tensionali anomali.

Una volta sottoposte a carico le fibre tendono a riallinearsi inducendo nella matrice stati di compressione e di trazione che possono provocare il distacco tra fibra e matrice, con conseguente riduzione della resistenza del composito [5].

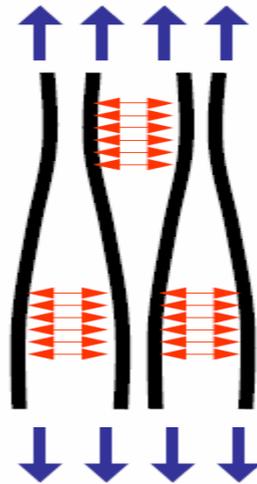


Figura 2.6: Disallineamento tra le fibre che genera sollecitazioni tra fibre e matrice

Le fibre possono essere inoltre distribuite in modo non uniforme provocando, quando il composito viene sollecitato, l'insorgere di tensioni tangenziali tra fibre e matrice. Questa sollecitazione è nota come tensione di taglio.

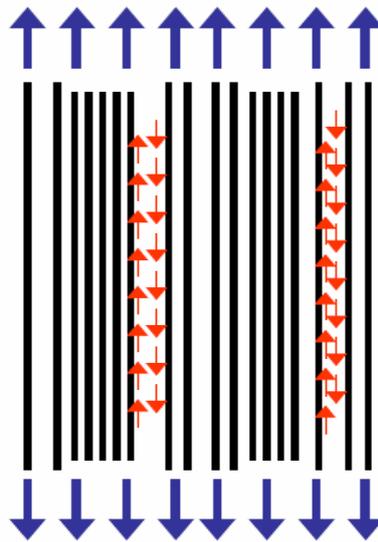


Figura 2.7: Fenomeno del Taglio

Nel caso di matrici a base polimerica può essere presente porosità dovuta sia alle bolle d'aria rimaste nel corso dell'impregnazione, sia ai gas che si sviluppano durante la polimerizzazione della resina.

Si trovano anche fratture nella resina indotte sia dal ritiro che si verifica nel corso della polimerizzazione, sia da tensioni di origine termica.

Un impregnazione non accurata e l'impiego di prodotti non compatibili, possono causare scarsa adesione tra il rinforzo e la matrice.

2.5 MECCANISMI DI CRISI NEGLI FRP (FIBER REINFORCED POLYMER):

- Trazione parallela alle fibre;
- Taglio nel piano;
- Trazione non parallela alle fibre;
- Compressione.

2.5.1 TRAZIONE PARALLELA ALLE FIBRE:

Quando un composito unidirezionale è sollecitato a trazione fino a rottura, la crisi è generalmente causata da una combinazione di cause, tra cui il raggiungimento della deformazione ultima dei singoli componenti.

La crisi può avere inizio con la rottura di singole fibre nella loro sezione più debole. Ciò può avvenire anche a partire da tensioni molto inferiori a quelle di crisi, per la presenza di difetti di forma.

Il fenomeno inizialmente riguarda una piccola percentuale di fibre, ma la resina, lavorando a taglio, trasmette lo sforzo alle fibre adiacenti e in questo modo, anche le fibre rotte possono rimanere attive per quasi tutta la loro lunghezza, consentendo al composito di mantenere praticamente invariate le sue proprietà.

La crisi si verifica quando il fenomeno si propaga in maniera instabile.

Ciò può verificarsi in due modi:

a) Propagazione in direzione trasversale:

l'aderenza tra le estremità della fibra rotta e la resina impedisce il distacco all'interfaccia; la resina subisce una crisi localizzata e la frattura giunge alle fibre adiacenti, provocando in esse un incremento localizzato di tensione, che ne può provocare la rottura; l'innesco alla crisi può essere anche una microfessurazione della resina, qualora questa abbia una deformazione ultima inferiore a quella della fibra. Una crisi di questo tipo si verifica in genere con piccole frazioni volumetriche di fibra.

b) Propagazione in direzione longitudinale:

è caratterizzata da una crisi provocata dalle tensioni tangenziali, che può interessare l'interfaccia tra fibra e resina (taglio interlaminare), oppure soltanto la resina; la crisi si propaga, a partire dalla sezione di rottura della fibra, lungo la fibra stessa. Questo tipo di crisi si verifica frequentemente in caso di elevate frazioni volumetriche di fibra.

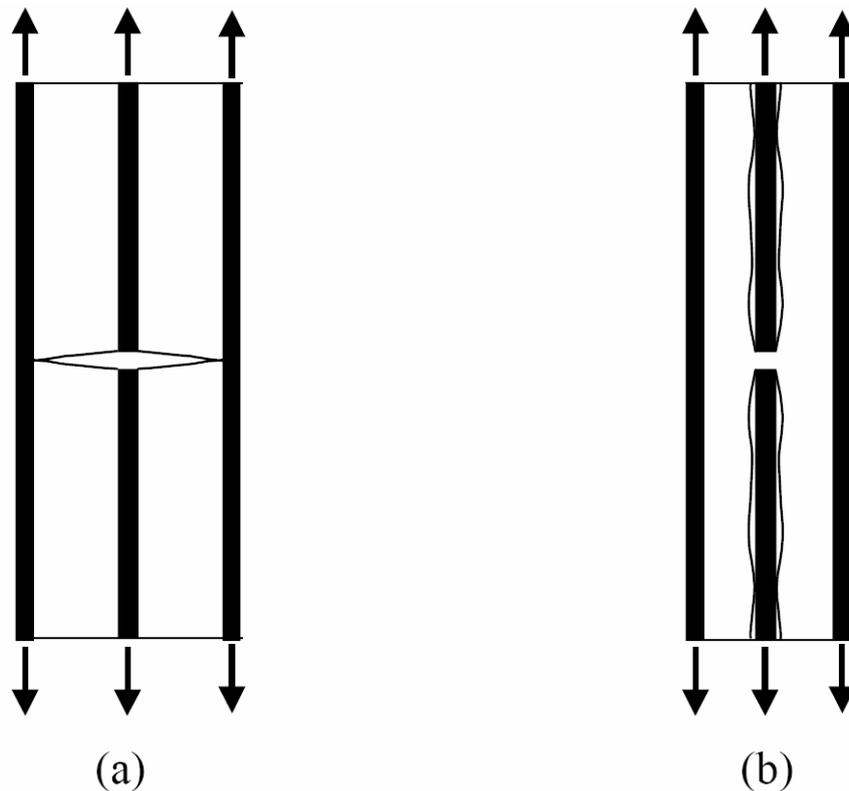


Figura 2.8 a) propagazione trasversale b) propagazione longitudinale

Le due modalità possono anche coesistere, o verificarsi in successione. Spesso si verificano dapprima fratture normali alle fibre, che interessano soprattutto la matrice, successivamente si verifica la frattura interlaminare, inizialmente in zone limitate e in seguito in modo più diffuso, fino a quando il fenomeno diviene instabile e sfocia nel collasso della lamina.

Le fasi precedenti il collasso non danno luogo a un sensibile scostamento dalla linearità del legame tensione-deformazione, e la crisi si manifesta in maniera improvvisa.

Se il composito è sollecitato a trazione nella direzione ortogonale alle fibre, la crisi avviene per il raggiungimento della tensione ultima di trazione della matrice.

2.5.2 TAGLIO IN PIANO:

Se il composito è sollecitato a taglio nel piano, la crisi avviene per il raggiungimento della tensione tangenziale ultima della matrice.

Il carico fa sì che gli strati di fibra adiacenti scivolino l'uno sull'altro. Le resine giocano il ruolo maggiore trasferendo lo stress su tutto il materiale composito. In questo caso le resine danno le migliori prestazioni quando hanno buone proprietà meccaniche ed un'alta capacità di adesione alle fibre di rinforzo.

La rottura si propaga in direzione concorde all'asse di carico. Uno degli obiettivi principali per una buona prova è proprio quello di riuscire a caricare il provino in modo uniforme, portando alla formazione di cricche lungo l'asse longitudinale del provino.

La tensione di taglio agente istantaneamente sul provino la si può comodamente calcolare come:

$$\tau = \frac{F_i}{A}$$

Dove F_i rappresenta la forza di carico sollecitante il provino istante per istante, mentre A è l'area longitudinale del provino da testare.

La tensione massima di rottura è pari a:

$$\tau_{max} = \frac{F_{max}}{A}$$

Dove F_{max} è il carico massimo mediante il quale avviene la rottura del provino.

Il fenomeno del taglio in piano genera una deformazione di scorrimento tra le diverse lamine che costituiscono il provino. Questa deformazione di scorrimento viene indicata con γ . La prova di taglio in piano, consente di calcolare il modulo di elasticità trasversale G del materiale come:

$$G = \frac{\Delta\tau}{\Delta\gamma}$$

Dove $\Delta\tau$ è la variazione di tensione di taglio da un punto di misurazione ad un altro e $\Delta\gamma$ è la variazione della deformazione di scorrimento sopra definita, tra gli stessi due punti di misurazione.

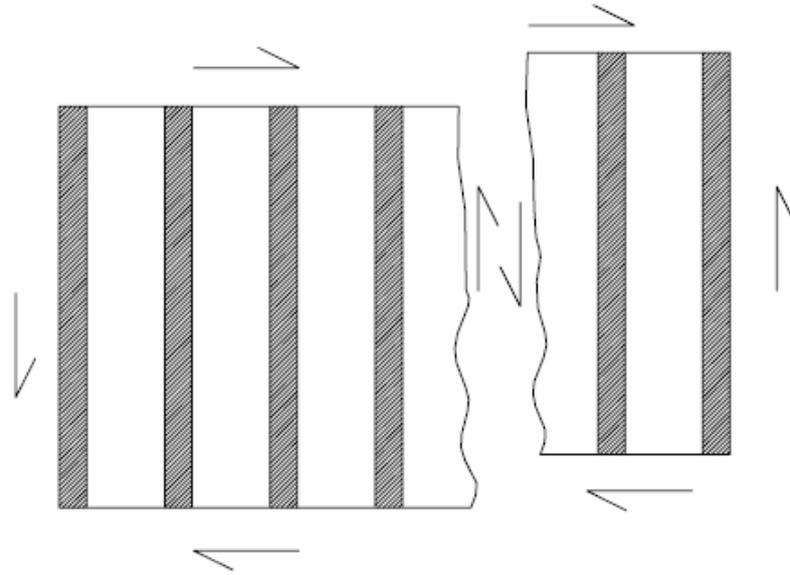


Figura 2.9: Sollecitazioni di taglio in piano

2.5.3 TRAZIONE NON PARALLELA ALLE FIBRE:

Se si considera il comportamento a trazione di una lamina unidirezionale sollecitata secondo una direzione θ rispetto alla direzione delle fibre, si possono distinguere angoli di carico per i quali sono più evidenti alcuni tipi di rottura rispetto ad altri.

Angolo θ	Tipo di rottura
tra 0° e 5°	Rottura trasversale per cedimento delle fibre
tra 5° e $20^\circ \div 25^\circ$	Rottura per taglio piano intralaminare
tra $20^\circ \div 25^\circ$ e 45°	Rottura per taglio piano intralaminare + Rottura matrice per trazione
tra 45° e 90°	Rottura matrice per trazione

Tabella 2.1: Valori degli angoli di carico e relativo tipo di rottura del provino

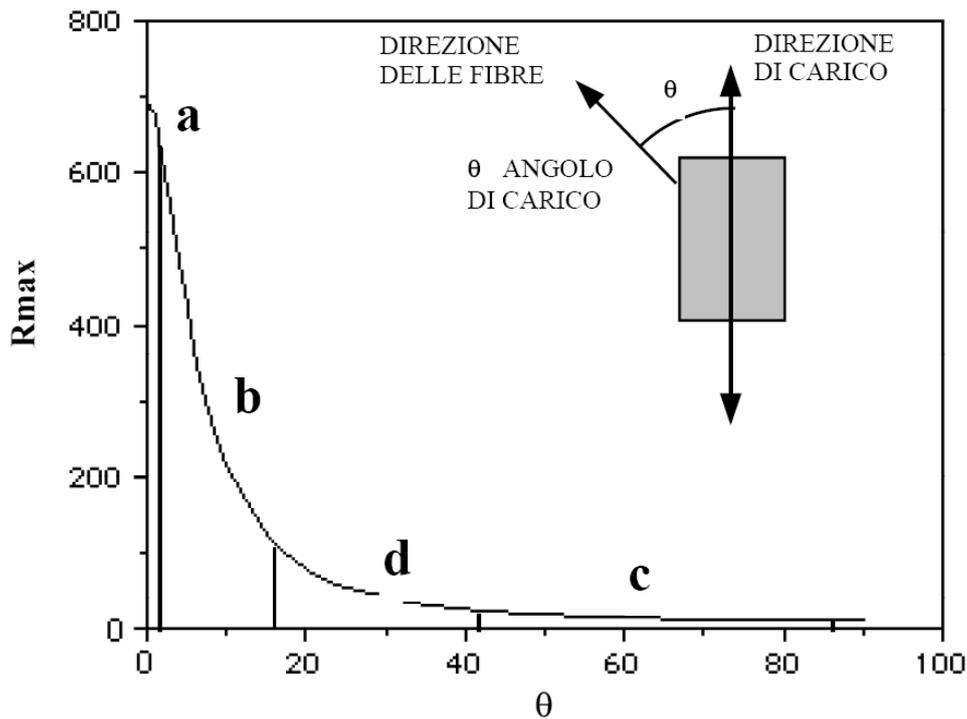


Figura 2.10: Variazione della resistenza a trazione di un composito al variare dell'angolo tra la direzione della sollecitazione e quella delle fibre

2.5.4 COMPRESSIONE:

Nei compositi unidirezionali sollecitati a compressione nella direzione delle fibre, la crisi del composito può avvenire per:

- Compressione longitudinale con distacchi tra fibre e matrice
- Instabilità delle fibre a causa della loro grandissima snellezza, che solo in parte la matrice può contrastare

In ogni caso la resistenza a compressione è molto inferiore rispetto a quella a trazione. In generale inoltre, tutti i materiali compositi presentano un comportamento elasto-fragile alla compressione, ad eccezione dei compositi rinforzati con fibre in aramide.

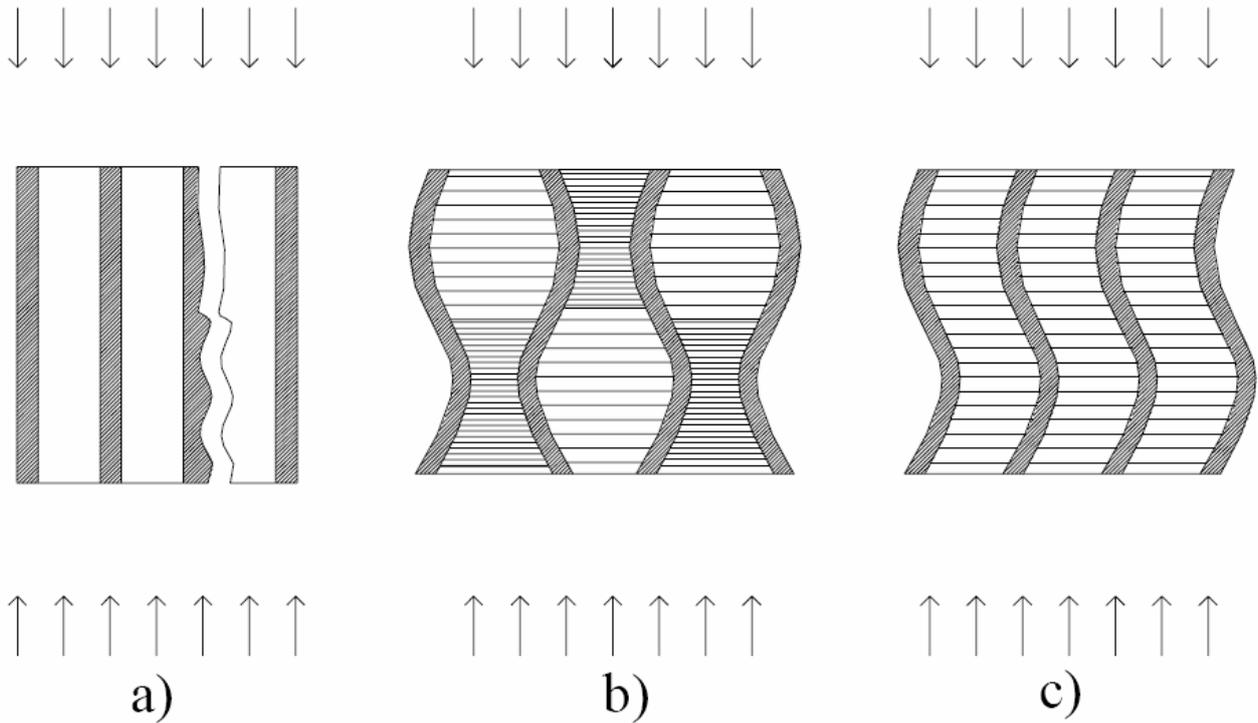
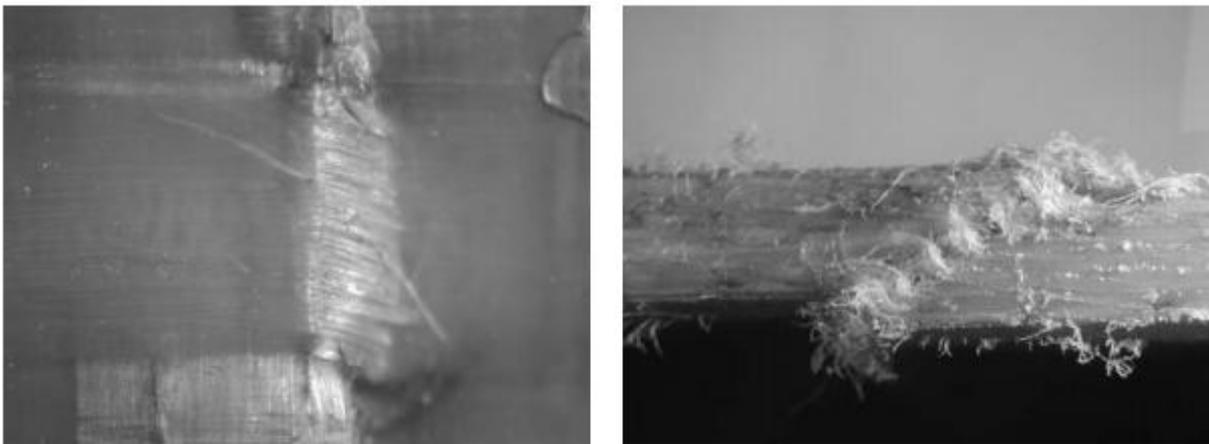


Figura 2.11: Andamento delle fibre sollecitate a compressione

Nella direzione ortogonale alle fibre la crisi avviene per compressione della matrice e spesso si creano superfici di scorrimento. La rottura finale è caratterizzata dallo sbandamento fuori dal piano del filato delle fibre l'una sull'altra e dalla loro sovrapposizione disordinata (fenomeno del microbuckling).



Kevlar 49

Figura 2.12: Comportamento delle fibre in seguito alla compressione in un provino di Kevlar 49

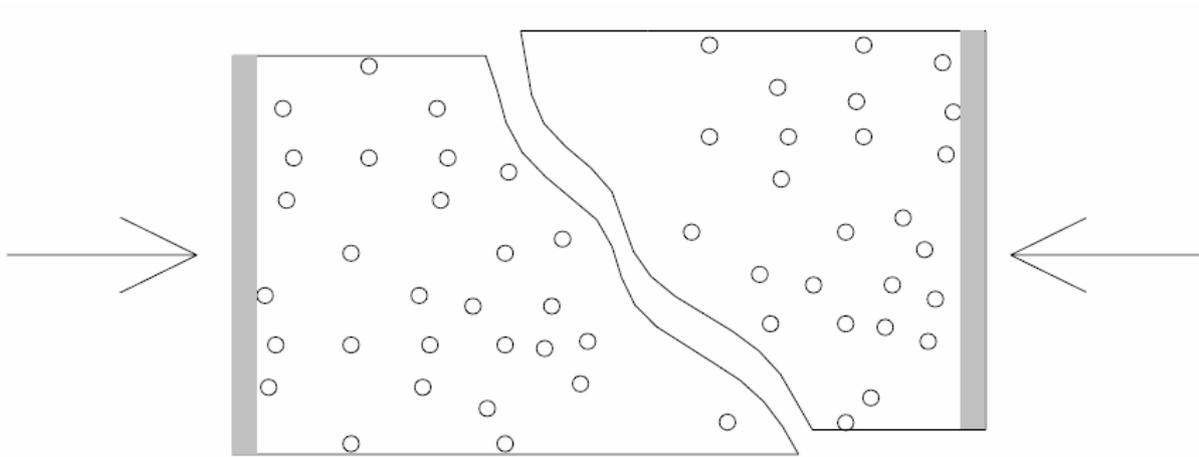


Figura 2.13: Rottura di un provino di materiale composito soggetto a compressione

In una lamina bidirezionale, e soprattutto in un laminato composto da più lamine, tutte queste tipologie di rottura interagiscono tra loro e la crisi si manifesta in maniera più complessa.

CAPITOLO 3:**STUDIO NORMATIVE, PRESENTAZIONE PROVINI E ATTREZZATURE
PER LO SVOLGIMENTO PROVE:**

Strumenti fondamentali per l' esecuzione dello studio in questione, sono state le normative, vere e proprie linee guida per il progetto.

Molteplici sono le normative disponibili in base alla varietà di casi possibili per il taglio piano. Tra quelle che verranno presentate ne è stata individuata una particolarmente adatta a questo caso specifico [6].

3.1 NORMATIVE DI RIFERIMENTO PER TAGLIO PIANO:

D883 ---> Per materiali plastici

D3039/3039M ---> Per matrici polimeriche di materiali compositi

D3878 ---> Taglio piano per materiali compositi

D5229/5229M ---> Usata in determinati casi specifici sempre per matrici polimeriche di materiali compositi

E6 ---> Relativa ai metodi per test meccanici

E456 ---> Normativa relativa a qualità e statistiche

E1309 ---> Guida per l' identificazione di materiali compositi rinforzati con fibre all' interno dei Database

D3846 ---> Taglio piano per plastiche rinforzate

D3518 ---> Materiali compositi, alto valore di fibre

D4255 ---> Materiali compositi

D5379 ---> Per metodo Iosipescu, taglio piano, laminati compositi

Dopo un' attenta analisi delle varie normative a nostra disposizione, si è giunti alla conclusione che la normativa più adatta per il lavoro specifico da svolgere fosse la ASTM D3518, normativa per matrici polimeriche di materiali compositi ad elevato valore di fibre.

Le normative "guida" per la 3518 sono [7]:

D3878 ---> Utilizzata in generale per materiali fibrosi e compositi

D883 ---> Definisce linee guida per materiali plastici

E6 ---> Definisce linee guida per i test meccanici

E456-E177 ---> Definisce linee guida in materia di statistiche

Tutte queste normative sono correlate alla D3518, che rappresenta una sorta di loro "fusione" per il caso specifico di materiali compositi con fibre orientate a $\pm 45^\circ$ o di un generico angolo θ .

Utilizzo specifico normativa D3518:

La ASTM D3518 si usa nei casi specifici per:

- laminati con fibre a 45° ,
- laminati con strati orientati di un generico angolo θ ,
- singolo strato sottile e uniforme alla base del laminato.

Questo metodo di test è designato per effettuare taglio piano nel caso di materiali specificati. Fattori che influenzano la prova e che quindi devono essere tenuti sotto controllo sono:

- Materiale,
- Metodi di preparazione del materiale,
- Sequenza dei campioni, il loro spessore e la loro preparazione,
- La velocità di testing,
- La temperatura.

Cause di interferenza o di disturbo per la prova possono essere:

- Impurità della zona di sforzo: il materiale nella sezione di calibro del provino non è sottoposto a un puro sforzo di taglio piano.
- Cattivo allineamento guide provino, con successiva generazione di cricche.
- Generazione di sforzi lungo i bordi del provino che possono portare a una cattiva esecuzione della prova.

A tutti questi elementi si dovrà fare attenzione nella fase successiva di dimensionamento pezzi, per una adeguata progettazione della fixture.

Per una corretta esecuzione della prova è fondamentale fare in modo che vi sia un perfetto allineamento tra il provino e le guide, e che l'asse di carico sia simmetrico lungo tutta la struttura. Le cause di interferenza sopra citate dovranno quindi essere evitate categoricamente se si vogliono evitare disturbi o risultati indesiderati durante i test.

3.2 PRESENTAZIONE DEI PROVINI:

Per le prove di taglio in piano eseguite nel laboratorio Masterlab, sono stati utilizzati dei provini in GFRP ovvero in fibra di vetro con matrici polimeriche rinforzate. Come già visto nel capitolo 1, questo tipo di materiale composito è dotato di una buona resistenza oltre che di un basso costo, proprietà che lo rendono un materiale molto appetibile per l' esecuzione di prove e test distruttivi.

I laminati sono stati realizzati in passato all' interno dello stesso hangar. Cinque sistemi di resina (epossidico, vinilestere, poliestere, poliestere ortoftalico e poliestere isoneopentilico) sono stati utilizzati per produrre i laminati desiderati mediante due diversi metodi: il metodo di infusione ed il metodo di stratificazione manuale.

3.2.1 METODO DI STRATIFICA MANUALE:

Il metodo di stratificazione manuale, con cui è stato realizzato un particolare laminato in resina poliestere ortoftalica, consiste nella realizzazione di componenti attraverso una molteplice deposizione in uno stampo di fibra di rinforzo di resina allo stato liquido, impregnata manualmente mediante l' utilizzo di rulli fino ad arrivare allo spessore di progetto. Quando si effettua un trattamento del genere, le superfici interne dello stampo devono essere perfettamente pulite poiché la finitura superficiale dello stampo condiziona enormemente l' aspetto futuro del pezzo. Per questo lo stampo viene comunemente ricoperto da un agente distaccante, il gel coat, che costituirà la superficie finale esterna del pezzo e che sarà in seguito ricoperto dal bagno di resina. Una volta distribuita manualmente la resina su tutta la superficie disponibile, il tutto è seguito dalla polimerizzazione a temperatura ambiente.

Come risulta evidente, quella della stratifica manuale è un' operazione fortemente influenzata dall' abilità manuale dell' operaio nello stendere in maniera uniforme la resina evitando così la formazione di bolle indesiderate. I laminati ottenuti presentano inoltre elevato spessore e mediocre finitura superficiale.

Ulteriori limiti di questo processo sono legati inoltre alle caratteristiche meccaniche e geometriche spesso diverse e non di qualità dei laminati finali ed alla tossicità dei vapori dannosi rilasciati durante la polimerizzazione.

I principali difetti di questo trattamento possono quindi essere sintetizzati come:

- Bassa resistenza meccanica
- Maggiore probabilità di osmosi
- Elevato peso
- Finitura superficiale grezza
- Elevato spessore
- Tossicità del procedimento

3.2.2 METODO AD INFUSIONE:

Il Vacuum Assisted Resin Transfer Molding (VARTM), è un particolare processo di infusione della resina all' interno dello stampo. È costituito fondamentalmente da tre fasi principali che sono:

- Preparazione di uno stampo di rinforzo,
- Impregnazione dello stampo con la resina prestabilita,
- Cura dello stampo impregnato.

Solitamente lo stampo di rinforzo è in tessuto di fibre di vetro o di carbonio. Il processo consiste nell' iniezione della resina attraverso più porte di iniezione e nell' aspirazione dei gas tossici derivanti dal processo di polimerizzazione della resina, tramite una pompa esterna. Ulteriore funzione della pompa è quella di creare, una pressione globale sul laminato, compattando così lo stampo e consentendo di ottenere manufatti con un basso numero percentuale di cavità. A diversi valori di depressione generata all' interno del sacco, corrispondono diverse proprietà dei laminati finali. Anche in questo caso le fibre di rinforzo secche posizionate sullo stampo, vengono ricoperte da uno strato di resina. La resina viene così distribuita in maniera omogenea consentendo la produzione di laminati dalle caratteristiche meccaniche uniformi tra loro a differenza del metodo di stratificazione manuale. I parametri su cui agire per ottimizzare il più possibile il processo sono:

- La velocità del flusso, legata alla viscosità della resina e alla permeabilità del rinforzo,
- Il contenuto massimo di fibre,
- Le relazioni tra la velocità del flusso e il livello del vuoto,
- Le combinazioni resina/rinforzo,
- I punti di aspirazione ed iniezione.

Per comodità si sono riassunti i principali vantaggi e svantaggi di questo processo nella seguente tabella:

VANTAGGI	SVANTAGGI
Buona finitura della faccia relativa allo stampo rigido.	Processo complesso da realizzare.
Basso costo di investimento legato all' utilizzo di un solo stampo rigido e possibilità di utilizzare stampi rigidi già adoperati per altri processi.	Utilizzo di resine a bassa viscosità alla temperatura di processo, con rischio di limitare le proprietà meccaniche del pezzo finale.
Possibilità di realizzare pezzi di notevoli dimensioni.	Possibilità di formazione di zone secche o mal impregnate.
Possibilità di ottenere stratifiche complesse e precise.	
Eliminazione dei problemi di tossicità legati alla Stratifica Manuale.	
Ottimi risultati sull' orientamento delle fibre.	

Tabella 3.1

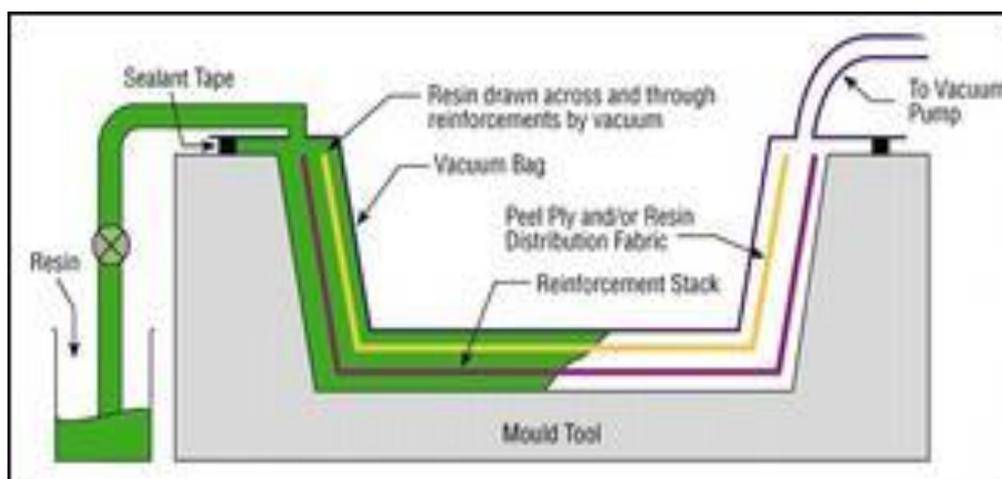


Figura 3.1 : rappresentazione del processo VARTM

Per la realizzazione dei laminati da caratterizzare, il processo ad infusione prevede l' iniezione della resina al centro della lastra. La pompa volumetrica genera una depressione di 0,5 bar che consente la diffusione della resina all' interno dello stampo. Per il provino in resina poliestere si è voluto verificare l' effetto di un grado di vuoto superiore, facendo diffondere la resina tramite l' utilizzo di una pompa a pistoncini generante una depressione di 0,1 bar. L' utilizzo di una tecnologia del genere richiede una attenta ottimizzazione dei parametri di processo tra i quali la scelta della resina più adatta.

3.2.3 LAMINAZIONE PROVINI:

All' interno del laboratorio MasterLab è stato effettuato il processo di laminazione e di cura delle lastre piane dal quale sono stati ricavati i provini da caratterizzare. Il laminato è costituito da fibra di vetro intrecciata (mat) e tessuto in fibra di vetro (accoppiato).

La successione di strati sovrapposti è:

- MAT 300
- MAT300
- ACCOPPIATO 1050
- MAT 450
- ACCOPPIATO 1050
- MAT 450

Le condizioni dell' ambiente esterno durante il processo produttivo erano quelle standard di temperatura dell' aria a 15° e umidità dell' aria 60-65%.

I laminati presenti all' interno del laboratorio Masterlab realizzati con questo processo sono sette categorie diverse di provini, diversificati da diversi metodi di produzione (stratifica manuale o infusione diretta), da diverse condizioni di produzione (infusione a 0,5 bar e a 0,1 bar) e dall' utilizzo di cinque diversi tipi di resina, in particolare; resina epossidica, poliestere, poliestere ortoftalica, poliestere isoneopentilica e vinilestere.

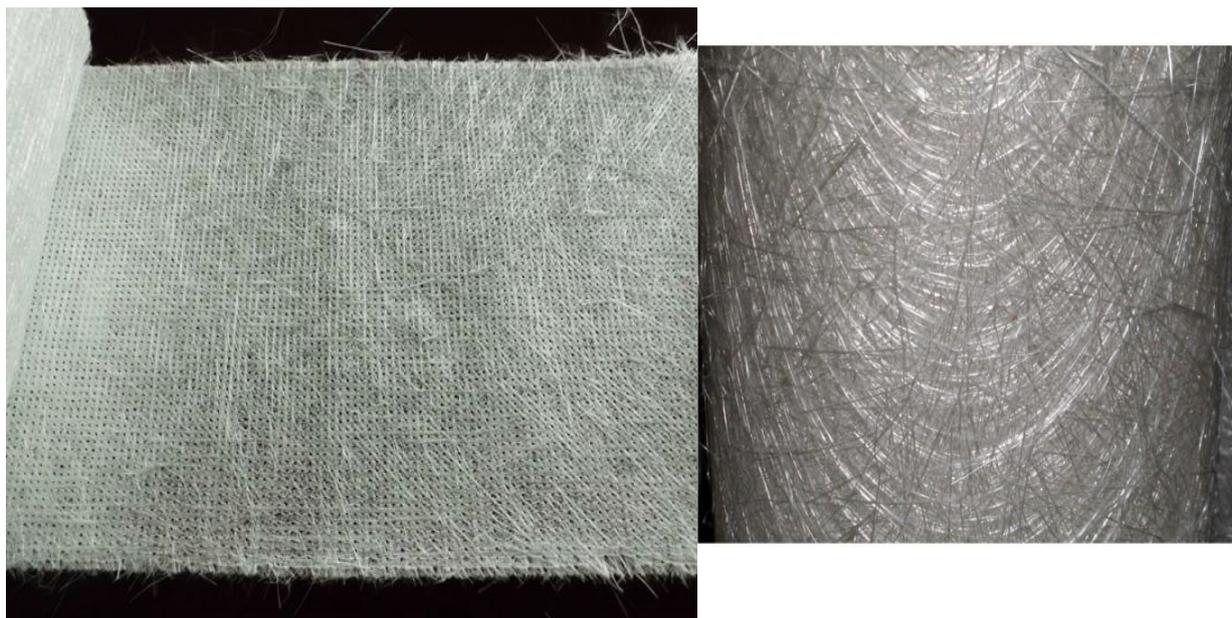


Figura 3.2 a) accoppiato 1050 b) mat 300

3.3 METODI PER LA PROVA DI TAGLIO IN PIANO DI MATERIALI COMPOSITI:

Lo studio delle proprietà di taglio in piano è molto importante nella progettazione strutturale di laminati di materiale composito.

Quattro sono i metodi di prova comunemente utilizzati per questo fine. Due sono le principali normative che si interessano di questo problema. La **ASTM D3518**, per il taglio in piano di materiali compositi con fibre orientate di angolo θ e la **ASTM D7078** che delinea i procedimenti per la prova di taglio "V-notched".

I materiali compositi sono ampiamente utilizzati in strutture militari e di ingegneria civile. Pertanto, la accurata valutazione sperimentale delle proprietà meccaniche di questi materiali da utilizzare nella progettazione è diventata sempre più importante. La determinazione delle proprietà di taglio dei materiali compositi è uno dei compiti più difficili, a causa dell'anisotropia che presentano questi materiali e a causa della loro risposta non lineare al taglio. Una prova di taglio ideale dovrebbe generare una regione di taglio puro e uniforme, essere riproducibile senza il bisogno di speciali apparecchiature e dare la corretta risposta sforzo-deformazione alla rottura del provino.

Sebbene in questi anni siano stati sviluppati molti metodi di prova di taglio per materiali compositi, nessuno di loro soddisfa completamente tutti questi criteri. Pertanto, vi è una confusione considerevole su quale metodo di prova scegliere.

Quattro sono i metodi più comunemente usati per le prove di taglio in piano di materiali compositi [8]. Questi metodi sono:

- “ $\pm 45^\circ$ tensile shear”;
- “two or three rails test method” (metodo delle due o tre guide);
- “Iosipescu shear test method”;
- “V-notched rail shear test method”.

3.3.1 $\pm 45^\circ$ TENSILE SHEAR TEST METHOD:

In questo metodo di prova, il materiale laminato è soggetto ad una tensione assiale che consente di determinarne le proprietà a taglio in piano. Questo metodo viene spesso utilizzato perché i provini sono facili da fabbricare e non è richiesta una fixture particolare per eseguire la prova. Si tratta di un metodo di prova semplice per prevedere la resistenza a taglio del materiale con una precisione accettabile. Tuttavia, il laminato, sollecitato a trazione con un angolo di carico di $\pm 45^\circ$, non è in uno stato di puro sforzo di taglio. I valori di sforzo-deformazione calcolati alla rottura del provino utilizzando questa prova devono essere utilizzati con cautela, tenendo conto degli accorgimenti e delle linee guida che vengono illustrate dalla normativa interessata a questo processo (ASTM D3518). Il “ $\pm 45^\circ$ Tensile Shear Test Method” consente di ricavare la resistenza a taglio del materiale ma non in maniera precisa il modulo di elasticità trasversale (G), in quanto il provino risulta sollecitato a taglio puro solo nelle zone vicine ai bordi e non al centro. Per questo è un metodo in disuso, in quanto non consente di calcolare tutte le proprietà desiderate del materiale in analisi e presenta una discreta imprecisione sui risultati in uscita.

3.3.2 RAILS SHEAR TEST METHOD:

Il metodo di prova di taglio piano delle due o tre guide (two or three rails shear test) viene utilizzato per determinare le proprietà di taglio in piano del materiale in analisi, attraverso due o tre coppie di guide di carico, utilizzate per bloccare il provino e trasmettere su di esso il carico a cui deve essere sottoposto. Il provino è caricato direttamente sulle sue superfici esterne, eliminando il problema della concentrazione delle tensioni ai bordi incontrato nel “ $\pm 45^\circ$ Shear Test Method” e presenta inoltre un’ ampia regione di controllo riservata a sensori di misurazione.

Sono tre i limiti principali di questo metodo:

- **Scivolamento del provino sulle guide;**
una scarsa aderenza tra provino e guide per i laminati con resistenza a taglio elevata potrebbe comportare cedimenti prematuri, soprattutto ai bordi dei fori dove il provino è collegato mediante bulloni alle guide, vanificando così la prova.
- **La presenza di numerosi fori sul provino** (necessari per il collegamento provino-guide), potrebbe causare problemi di interlaminazione sul provino.
- In terzo luogo non è facile concentrare lo sforzo di taglio in una unica regione uniforme, e spesso questa difficoltà comporta la **generazione di cricche e rotture nelle zone di contatto guide-provino (fori)**.

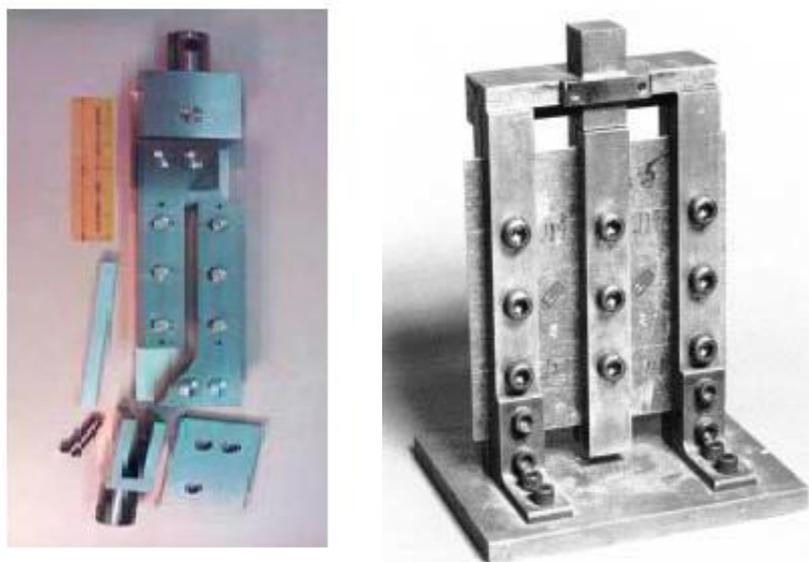


Figura 3.3: a) metodo two rails b) metodo con three rails)

Come si può intravedere dalla figura, le differenze tra il metodo delle due e delle tre guide sono notevoli. Infatti grazie alla geometria della fixture, con il metodo delle tre guide si riesce in modo più sicuro a controllare che la rottura del provino avvenga lungo l'asse desiderato. Per il metodo delle due guide invece, bisogna fare attenzione all'angolo di carico con cui lavora il sistema guide-provino e soprattutto alla perfetta adesione tra provino e guide onde evitare la formazione di cricche nelle zone adiacenti ai fori per le viti.

Mediante questo metodo però è possibile calcolare il modulo di elasticità trasversale risultante dalle prove, con la formula già vista nel capitolo 2.

E' inoltre uno dei metodi più semplici per quanto riguarda la progettazione completa e la realizzazione dell' attrezzatura per l' esecuzione della prova.

3.3.3 IOSIPESCU SHEAR TEST METHOD:

Il metodo di prova Iosipescu è stato originariamente sviluppato per i materiali isotropi da N. Iosipescu. Il provino intagliato a V è caricato da una fixture di prova speciale per ottenere puro stato di taglio. Attraverso lo speciale sistema di afferraggi infatti, il provino intagliato a V risulta in uno stato di sollecitazione di taglio relativamente uniforme [9].



Figura 3.4: Metodo di prova Iosipescu

In generale la prova di taglio Iosipescu consente di ottenere risultati soddisfacenti, infatti è stato il metodo più comunemente usato nel passato. Tuttavia, la relativamente piccola sezione di controllo, non è adatto per alcuni compositi con fibra grossolana. Il posizionamento di sensori per il controllo dei test sull' apposito provino, non è affatto facilitato dalla geometria dell' attrezzatura. Un altro limite di questo metodo è che il provino è caricato con forze concentrate sui suoi bordi. In alcuni casi questo può portare alla rottura dei bordi prima ancora della rottura dovuta allo sforzo di taglio.

Queste forze concentrate possono inoltre creare problemi allo stato di tensione uniforme all'interno della sezione di controllo. Questo metodo di prova è stato adottato dalla normativa ASTM D5379.

3.3.4 V-NOTCHED RAIL SHEAR TEST METHOD:

Il “V-notched rail shear test” è sostanzialmente una combinazione del metodo di prova Iosipescu e del metodo di prova delle due guide, eliminando alcuni limiti di entrambi. E' considerato il metodo di taglio più promettente e attendibile. Le estremità del provino a V intagliato sono bloccate da due coppie di guide di carico che introducono forze di taglio all' interno del provino durante l' esecuzione della prova [10].



Figura 3.5: Guide e provino per il metodo di prova V-notched

Rispetto al metodo Iosipescu, in questo caso viene utilizzato un provino con una sezione di controllo più grande, mentre il carico applicato alla faccia del provino, consente di raggiungere forze di taglio più elevate. Inoltre, questo metodo elimina il problema della frantumazione dei bordi già visto in precedenza. In contrasto con il metodo delle due guide (two-rails shear test), questo metodo provvede al bloccaggio del provino senza aver bisogno di fori ed eliminando quindi la causa di potenziali cricche premature. Il “ V-notched Rail Shear Test” inoltre, consente di ottenere uno stato di sollecitazione di taglio più uniforme all'interno della sezione di controllo del provino, rispetto ai metodi visti in precedenza. La ASTM D7078 è l' unica normativa che ci presenta dettagliatamente questo tipo di test.

Considerazioni sulla scelta del metodo utilizzato:

Attraverso lo studio dei tipi di normative inerenti alle prove per il taglio in piano analizzate nelle pagine precedenti, si è dovuta fare una scelta su quale dei possibili metodi fosse il più adeguato da riprodurre.

Escludendo per l' imprecisione dei risultati il “ $\pm 45^\circ$ Tensile Shear Test” e lo “Iosipescu” per la scarsa sezione di controllo dei provini, si è optato per il metodo delle due guide, il “Two Rails Shear Test Method”.

Il metodo delle due guide infatti presenta una struttura molto più semplice rispetto al V-notched, sicuramente più preciso sotto certi aspetti ma più costoso e difficile da realizzare. Inoltre il metodo delle due guide risulta più comodo anche per la più semplice geometria dei provini (laminati con due colonne di fori) rispetto alla più articolata struttura dei provini previsti dalla normativa ASTM D7078 del V-notched.

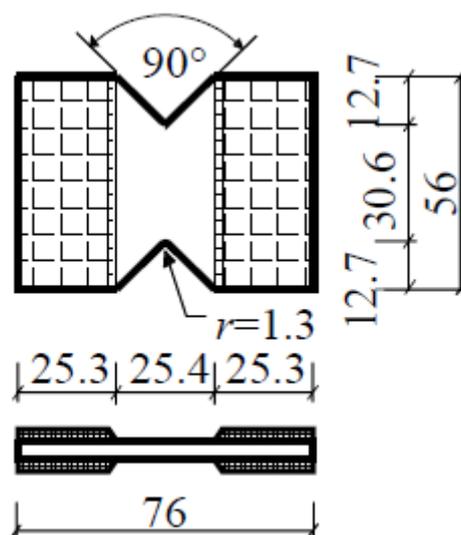


Figura 3.6: Dimensioni previste dalla normativa ASTM D7078 per i provini del metodo V-notched

Si è così deciso di realizzare l'attrezzatura secondo le istruzioni della normativa del metodo delle due guide, la ASTM D4255, pensando agli eventuali miglioramenti da fare per ottenere una tensione di taglio uniforme lungo l'asse del provino e una corretta aderenza tra provino e guide onde evitare l'insorgere di cricche attorno ai fori per i bulloni. I rimedi a tali problematiche saranno trattati nel prossimo capitolo.

3.4 GEOMETRIA PROVINI:

Come detto nelle pagine precedenti, i provini sono stati realizzati mediante le dimensioni previste dalla normativa ASTM D4255. Tale normativa si occupa delle caratteristiche che devono avere il provino e la fixture per operare con il metodo delle due o tre guide (rail shear test method) [11].

La struttura e la forma dei provini si rivelano standardizzate. Presenti su ogni provino, vi sono colonne di tre fori ciascuna per il bloccaggio mediante viti delle guide.

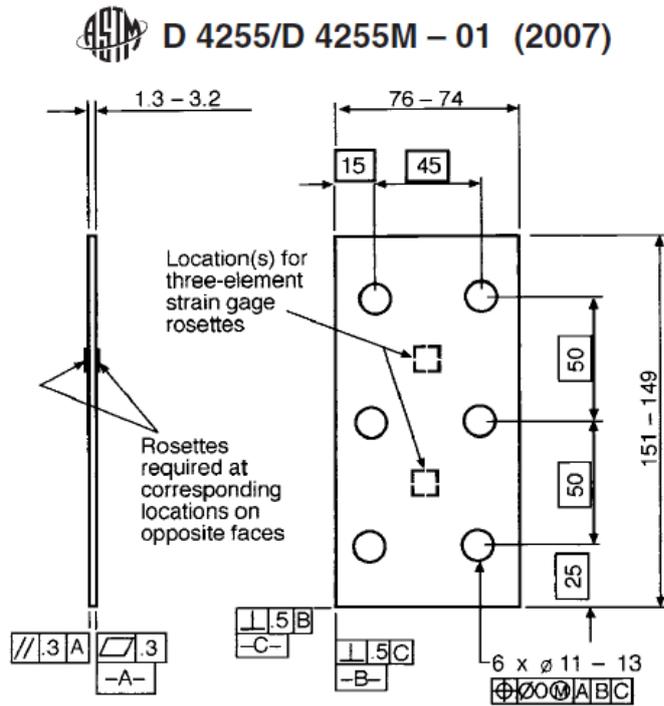


FIG. 6 Procedure A, Two-Rail Shear Specimen, SI Units

Figura 3.7: Dimensioni standard provino per metodo delle due guide, normativa D4255

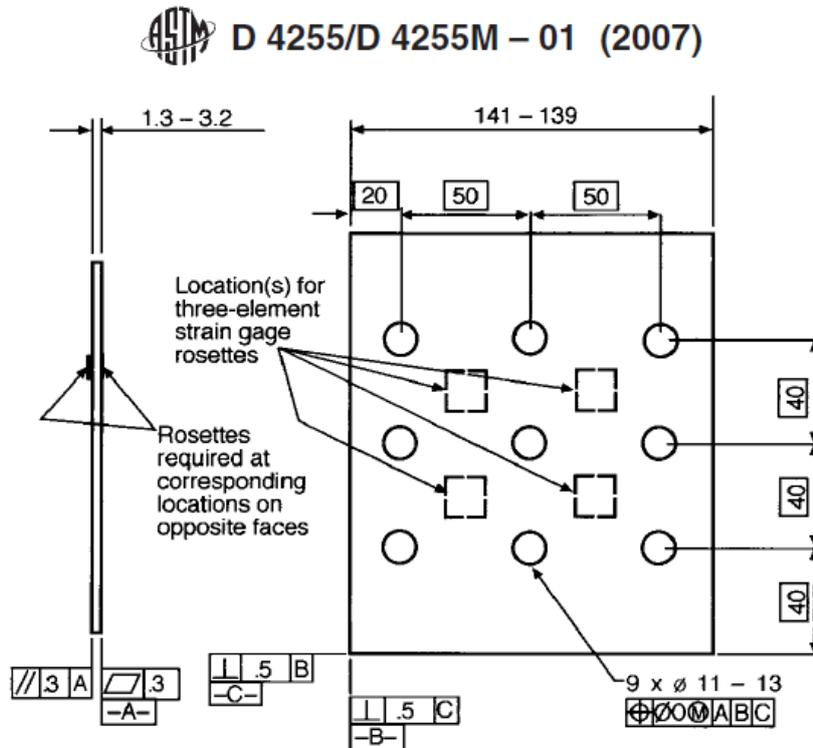


FIG. 8 Procedure B, Three-Rail Shear Specimen, SI Units

Figura 3.8: Dimensioni standard provino per metodo delle tre guide, normativa D4255

L'obiettivo di questo lavoro di tesi è stato quello di progettare e costruire una fixture che riuscisse ad adattarsi alle dimensioni standardizzate dei provini in fibra di vetro realizzati nel laboratorio MasterLab, in modo da studiare le proprietà meccaniche di questi, soggetti a sforzi di taglio in piano. I provini hanno la forma descritta in figura 3.7; le dimensioni sono di 152x75x2,5 mm e sono caratterizzati da due colonne di fori necessarie per il bloccaggio delle due coppie di guide a L da una parte e dall'altra.

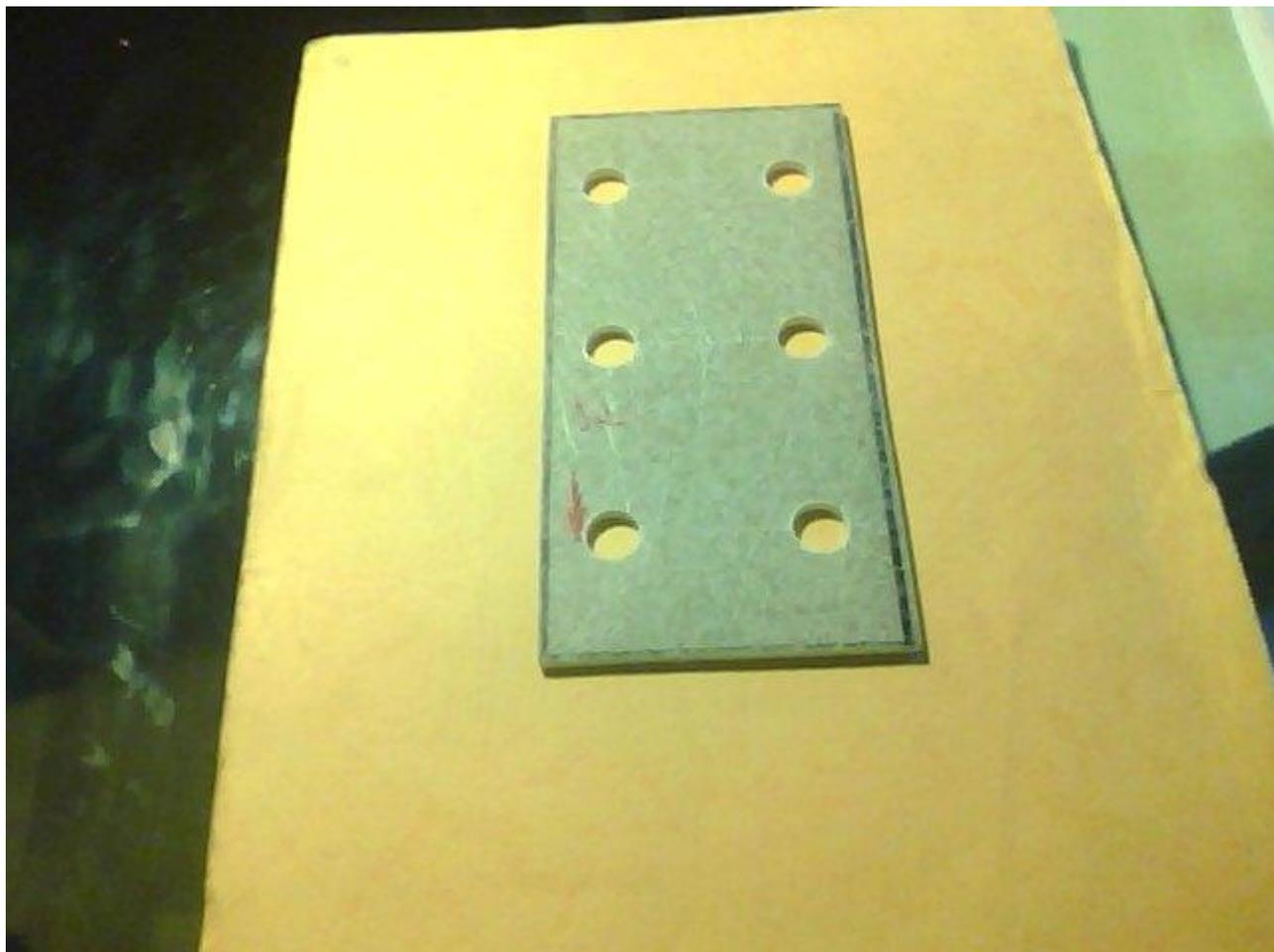


Figura 3.9: Foto raffigurante i provini per le prove di taglio utilizzati in hangar

Come già ripetuto in precedenza, uno dei problemi legato alla progettazione di questo particolare tipo di attrezzatura è che, nel caso la struttura non presenti una buona adesione tra provino e guide, si possano generare cricche in zone indesiderate, soprattutto attorno ai fori. Per questo motivo si è deciso di fare all'interno del provino dei fori con diametro più grande (D12) rispetto al diametro dei fori realizzati sulle guide in acciaio utilizzati per il bloccaggio provino guida (D10), in modo da favorire l'aderenza tra i corpi guide e provino e non solo il bloccaggio mediante i bulloni.

In questo modo durante l' applicazione del carico, questo non si scarica sui bordi dei fori di collegamento provino-guide, ma si scarica direttamente sulla struttura e quindi sul provino in maniera globale.

3.5 LE ATTREZZATURE:

Per la realizzazione delle prove di taglio in piano si è utilizzata la pressa idraulica Italsigma FPF situata nel laboratorio Masterlab. La macchina è controllata mediante software MTS main implementato con LabView e consente di raggiungere durante il funzionamento un carico massimo di 100kN. Attraverso diversi sensori quali cella di carico estensimetrica e trasduttori di spostamento LVDT, la macchina può controllare in maniera accurata le variazioni di carico applicate ai provini che si vanno testando e la loro deformazione (allungamento o compressione). L' estensometro riesce a rilevare deformazioni fino a $\pm 2,5$ mm, con una sensibilità di 2,5 mV/V. Essendo inoltre la tensione di eccitazione che alimenta l' estensometro pari a 5 V e venendo tale segnale amplificato 496 volte, si ottiene una tensione in uscita di 6,2 V. La tensione relativa a ogni millimetro di allungamento, la si può quindi calcolare dividendo molto banalmente il valore massimo in uscita appena calcolato per la deformazione massima misurabile dal sensore.

$$6,2 \text{ V} / 2,5 \text{ mm} = 2,48 \text{ V/mm}$$

Ovvero la tensione rilevata per ogni millimetro di allungamento.

La pressa è dotata di un pistone idraulico movente, quello inferiore, che ha una corsa totale di 100 mm, 50 mm in positivo e 50 mm in negativo.

Per caratterizzare i provini in materiale composito a taglio piano, sarà necessario effettuare delle prove statiche, impostando la modalità di controllo sul carico. Mediante il software di controllo di LabView è inoltre possibile utilizzare la macchina oltre che per prove statiche anche per prove di fatica.

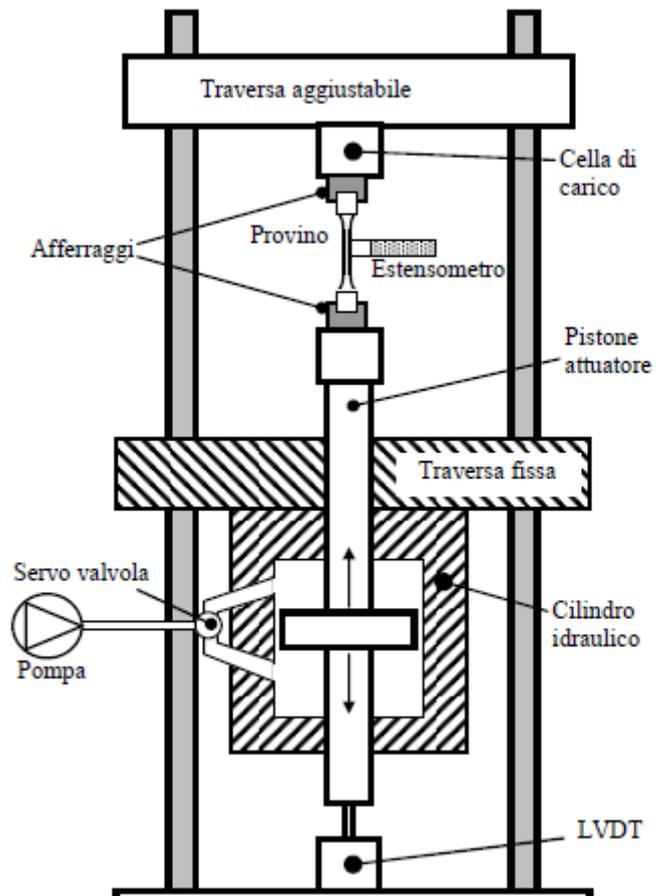


Figura 3.10 : Schema tipico di una pressa oleodinamica sui generis della pressa Italsigma FPF

CAPITOLO 4:

PROGETTAZIONE ED ANALISI DELL' ASSIEME

In questo capitolo vengono illustrate le dinamiche che hanno portato al disegno, all' analisi ed alla progettazione completa della fixture per l' esecuzione di prove di taglio in piano, da montare sulla macchina per la caratterizzazione dei materiali Italsigma Fpf situata nel laboratorio Masterlab. Per prima cosa si sono studiati i disegni del complessivo e le geometrie delle parti che avrebbero in futuro costituito la fixture completa. Oltre alle geometrie si è pure fatta una scelta dei materiali per la realizzazione di questa struttura sulla base di fattori quali l' economicità e la facile reperibilità. Assimilate queste informazioni di base si è ricostruito l' assieme mediante Solid Works e se ne è fatta l' analisi strutturale per diverse sollecitazioni, utilizzando il programma Ansys 13.0. Si è quindi concentrata l' attenzione sulla fase di dimensionamento dei pezzi con lo scopo di arrivare alla realizzazione finale di un assieme che potesse risultare stabile e sicuro rispetto alle sollecitazioni a cui sarebbe stato soggetto durante l' esecuzione delle prove. Nessuno dei pezzi costituenti l' assieme dunque, sarebbe dovuto essere sollecitato da una tensione pari o comunque superiore alla sua tensione di snervamento per essere sicuri di restare all' interno del campo elastico del materiale e non causare deformazioni permanenti all' interno dei pezzi. Decise dopo diverse analisi le dimensioni più adeguate dei pezzi e acquistati i materiali, si è realizzato il tutto alle macchine utensili. Inoltre nella parte terminale della progettazione, si sono escogitati dei metodi per evitare possibili cause di interferenza durante l' esecuzione della prova, quali la generazione di cricche in prossimità dei bordi dei fori.

4.1 STUDIO DEI DISEGNI:

La normativa ASTM D4255 è la normativa che si occupa delle prove di taglio in piano e dei diversi metodi per effettuare questa prova. Come già detto nel capitolo precedente, per questioni pratiche legate alla semplicità di realizzazione dell' attrezzatura e dei provini, si è deciso di utilizzare il metodo di prova delle due guide, con le relative geometrie dei pezzi designate dalla normativa [10].

I provini utilizzati risulteranno dunque conformi alle dimensioni già illustrate nel capitolo 3, e per la precisione 152x75x2,5 mm di spessore.

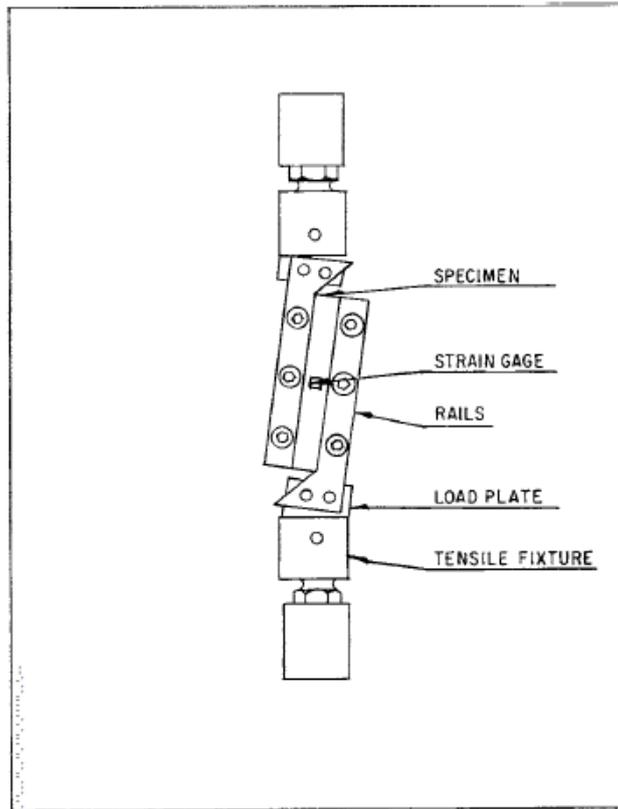


FIG. 1 Procedure A Assembly Rail Shear Apparatus

Figura 4.1: Assemblaggio completo dell' assieme e sua angolazione durante l' esecuzione della prova di taglio

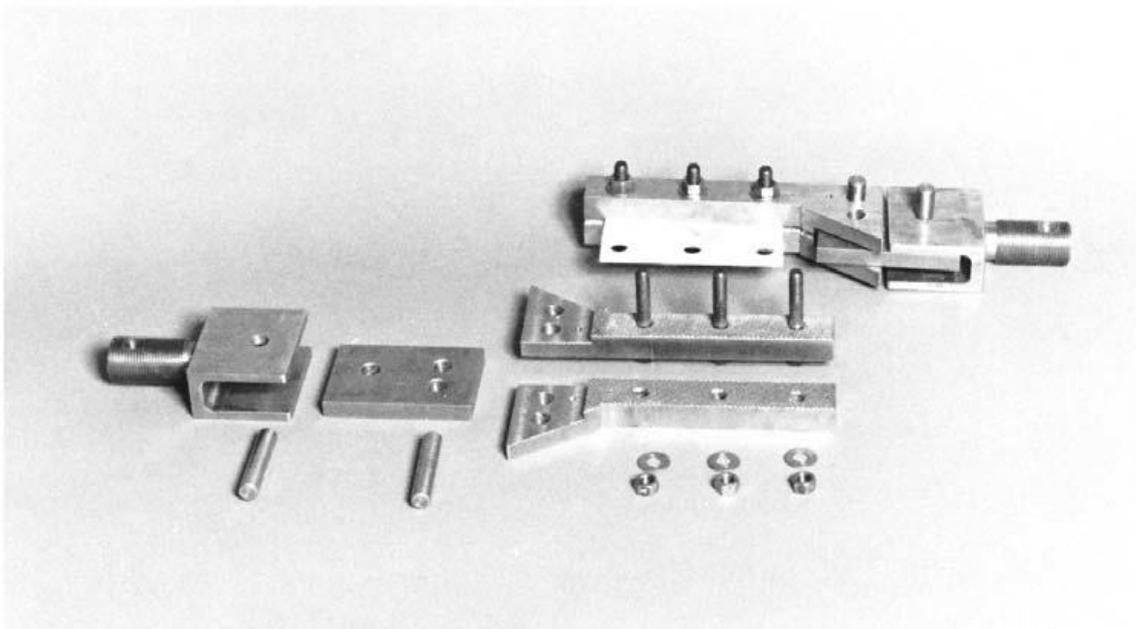


Figura 4.2: Pezzi costituenti l' assieme realizzato con le dimensioni previste dalla normativa ASTM D4255

I pezzi costituenti l' assieme presentato dalla normativa ASTM D4255 sono quelli che si possono vedere nella soprastante figura 4.2. L' assieme consiste in un aggancio superiore collegato mediante un perno ad una piastra che tramite due ulteriori perni si collega alle due guide a L. All' interno delle L viene racchiuso il provino, fissato grazie a collegamenti bullonati. Il fenomeno del taglio lungo il provino, si genera alle sue estremità, nei punti di fissaggio con le guide.

È importante per sollecitare il provino a taglio piano e non solo a trazione, che il cilindro idraulico durante l' abbassamento inclini uniformemente l' intera struttura di un angolo consono alla generazione di taglio all' interno delle fibre del provino. L' angolo di carico prefissato dalla normativa per questa specifica prova è di $\approx 7^\circ$ (vedi Tabella 2.1).

Per i motivi sopracitati è stato estremamente rilevante nella fase di progettazione, fare attenzione che l' angolo di inclinazione delle guide ad L rispetto all' orizzontale, potesse raggiungere questi valori stabiliti. Per consentire in parte la rotazione della struttura guide - provino -piastra, si è dovuto tenere conto in maniera particolare che la faccia superiore della piastra fosse a una distanza adeguata dalla superficie interna dell' aggancio per non ostacolare la rotazione (vedi Figura 4.4).

4.2 RAPPRESENTAZIONE PEZZI COSTITUENTI L' ASSIEME :

Nelle seguenti figure si possono osservare le foto dei pezzi costituenti il primo assieme realizzato con Solid Works seguendo le misure della normativa. Essendo simmetrico l' assieme completo, si è lavorato per semplicità considerandone solo la metà. La struttura completa dell' assieme è relativamente semplice: la forcina superiore è il pezzo che sorregge tutta la attrezzatura e che deve essere bloccato mediante collegamento filettato agli afferraggi della macchina oleodinamica. La piastra consente di trasmettere il carico dalle due guide di acciaio ad L sino alla forcina che scarica tutte le tensioni sul telaio portante della macchina. Infine le due guide in acciaio sono fondamentali per il bloccaggio del provino attraverso viti passanti. A prima vista l' assieme realizzato secondo le dimensioni iniziali previste dalla normativa presenta dimensioni notevolmente esigue ed inadeguate per sopportare un carico massimo di 100 kN come quello che può erogare la pressa ItalSigma Fpf. In seguito saranno eseguite precise analisi su tutta la struttura che confermeranno queste prime ipotesi.

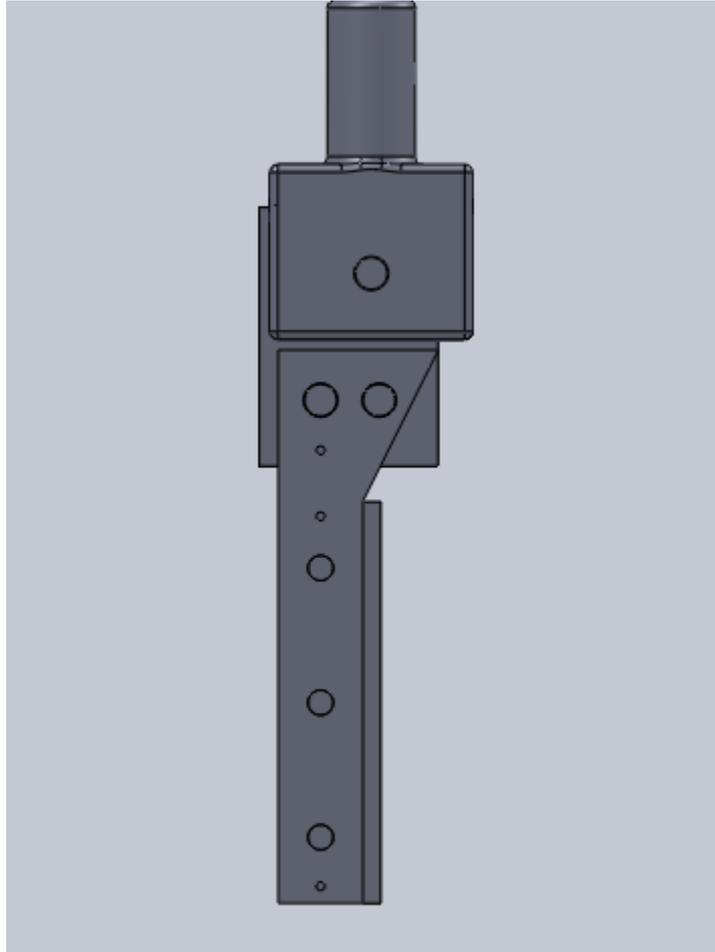


Figura 4.3: Metà assieme visto da sinistra, con provino all' interno delle due L.

Seguendo le indicazioni dei disegni cartacei, si è provveduto a realizzare il l' attrezzatura mediante Solid Works per avere un' idea delle dimensioni finali e del suo ingombro. Per rendere l' analisi attendibile, l' assieme è stato disegnato in maniera completa prendendo in considerazione anche la presenza del provino, bloccato tra le due guide ad L (come si vede in Figura 4.3). L' obiettivo primario da conseguire era quello di riuscire in maniera il più economico possibile a realizzare la struttura necessaria per le prove di taglio in piano dei provini in materiale composito GFRP illustrati nel capitolo 3. Per questo si è subito pensato di realizzare il tutto con acciaio C40 o C45, acciai comuni poco costosi e ideali per esser sottoposti eventualmente a trattamenti di bonifica (tempra più rinvenimento) con lo scopo di incrementarne le caratteristiche meccaniche.

Terminata la fase di disegno al CAD dell' assieme completo, si è passati a farne l' analisi strutturale mediante il programma Ansys 13.0.

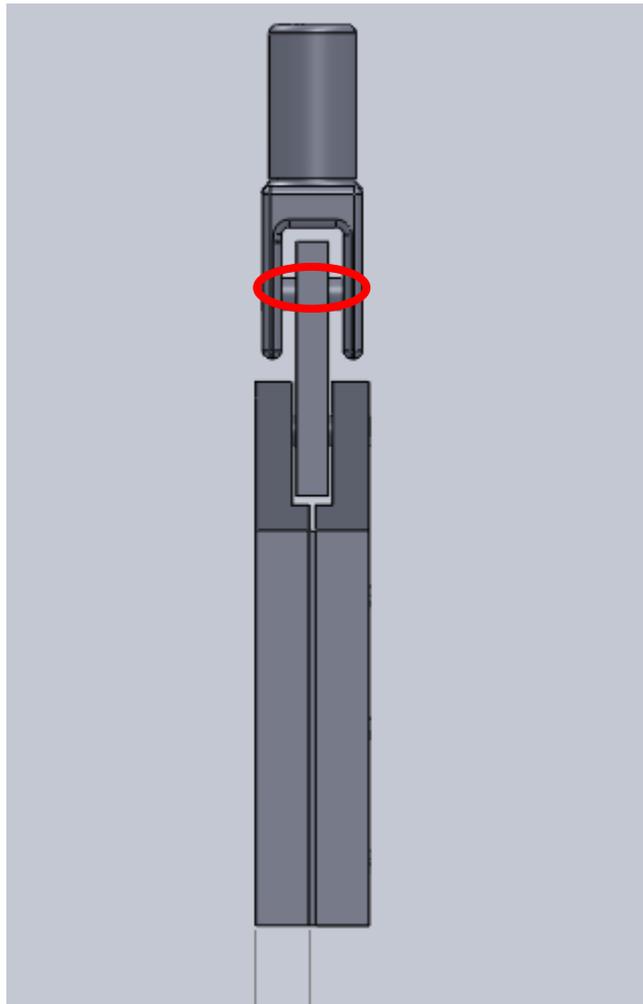


Figura 4.4: Vista frontale del mezzo assieme assemblato, in rosso, distanza tra piastra e superficie interna necessaria per la rotazione.

4.3 ANALISI STRUTTURALE:

Ansys è il programma agli elementi finiti che è stato utilizzato per l' analisi statica della struttura completa. Diverse sono le modalità di utilizzo di cui Ansys dispone; può infatti esser utilizzato sia nell' analisi di strutture statiche (proprio come nel caso in questione), ma anche dinamiche, può esser utilizzato per studiare il moto di fluidi, o campi elettrostatici ed elettromagnetici. Utilizzando questo programma, è stato possibile simulare l' entità delle sollecitazioni che si sarebbero generate sull' assieme, durante un' ipotetica prova di taglio in piano. Grazie a questa prima analisi si è subito potuto constatare che l' assieme realizzato secondo le dimensioni della normativa, sarebbe stato fortemente inappropriato a sostenere il carico massimo erogabile dalla macchina (100 kN).

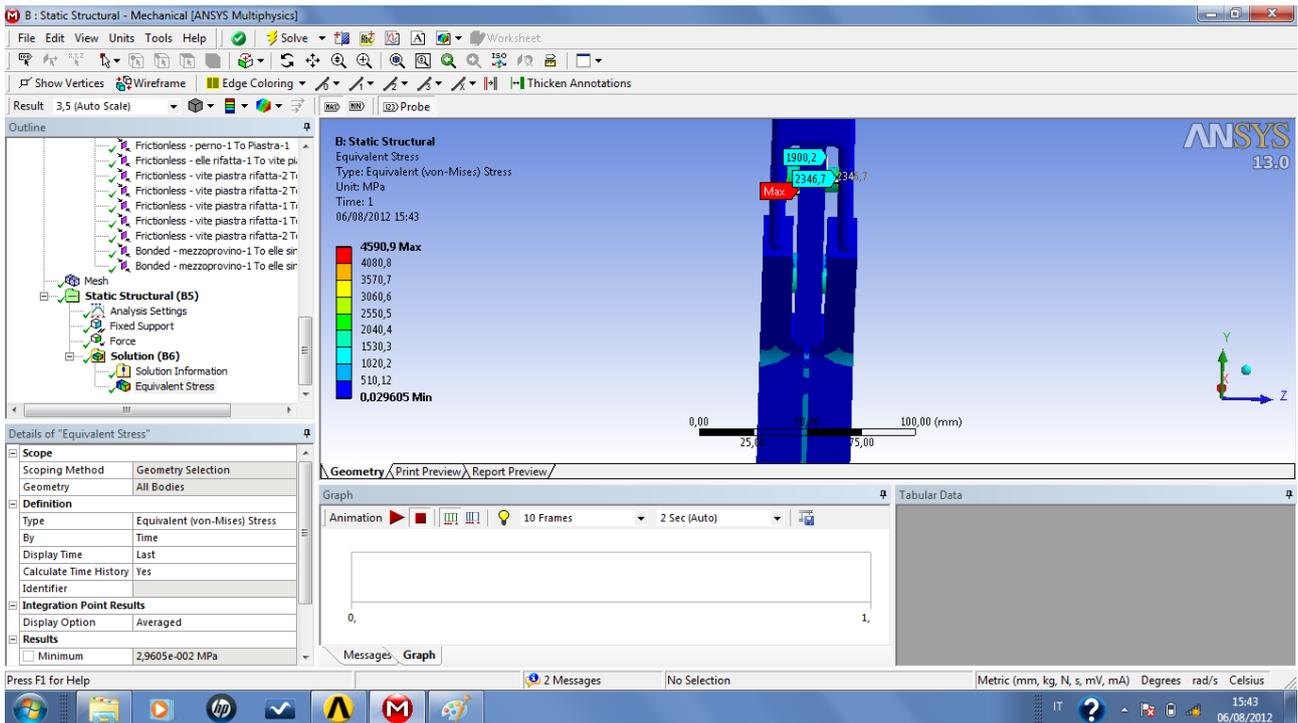


Figura 4.5: Tensione media dislocata sul perno pari a ≈ 2500 Mpa

A conferma di quanto detto sopra, dalla Figura 4.5 si può capire che i risultati ottenuti da questa prima analisi, siano stati tutt' altro che confortanti. Il perno risulta sollecitato localmente con delle tensioni massime maggiori persino di 3000 Mpa. Il carico di snervamento dell' acciaio C 40 con cui si voleva inizialmente realizzare il perno, bonificato (tempra + rinvenimento), è pari a $\sigma_s \Rightarrow 400$ Mpa. E' quindi evidente che la fixture realizzata con queste geometrie non è adatta per resistere al carico massimo che riesce ad erogare la macchina. L' assieme risulterebbe dunque fortemente instabile e il rischio di rottura dei pezzi e di malfunzionamento sarebbe molto alto.

Si è quindi pensato di operare in maniera diversa, discostandosi dalle dimensioni previste dalla normativa ampliando i pezzi, con lo scopo di rendere tutta la struttura più stabile. Per dimensionare in maniera adeguata la struttura si è partito con l' individuare il pezzo più sollecitato per passare poi al suo dimensionamento. Come ci si poteva aspettare, il pezzo più sollecitato di tutta la struttura è risultato essere il perno di collegamento tra la forcilla superiore e la piastra. Nel disegno iniziale della normativa il diametro del perno era di 13 mm. Era chiaramente doveroso aumentarne decisamente le dimensioni. Si sono quindi realizzate più tipologie di assieme in base al diametro dei perni di collegamento, a partire dal diametro di 15, poi 20 e 25. Ovviamente per ogni assieme oltre alle dimensioni dei diametri dei perni è stata buona norma anche far variare le dimensioni dei pezzi come ad esempio la larghezza delle braccia della forcilla superiore e lo spessore delle guide ad L.

Le analisi successive eseguite su questa varietà di assiemi aventi differenti dimensioni dei pezzi, hanno dato soluzioni sempre più vicine a quelle richieste. I risultati infatti con l' aumentare delle dimensioni dei pezzi, si sono fatti sempre più accettabili, come ci si aspettava. Le sollecitazioni globali che la struttura una volta costruita dovrebbe riuscire a sopportare, sono state calcolate rispetto al carico massimo erogabile dalla macchina (100 kN), per avere la certezza assoluta della stabilità della fixture una volta progettata e realizzata.

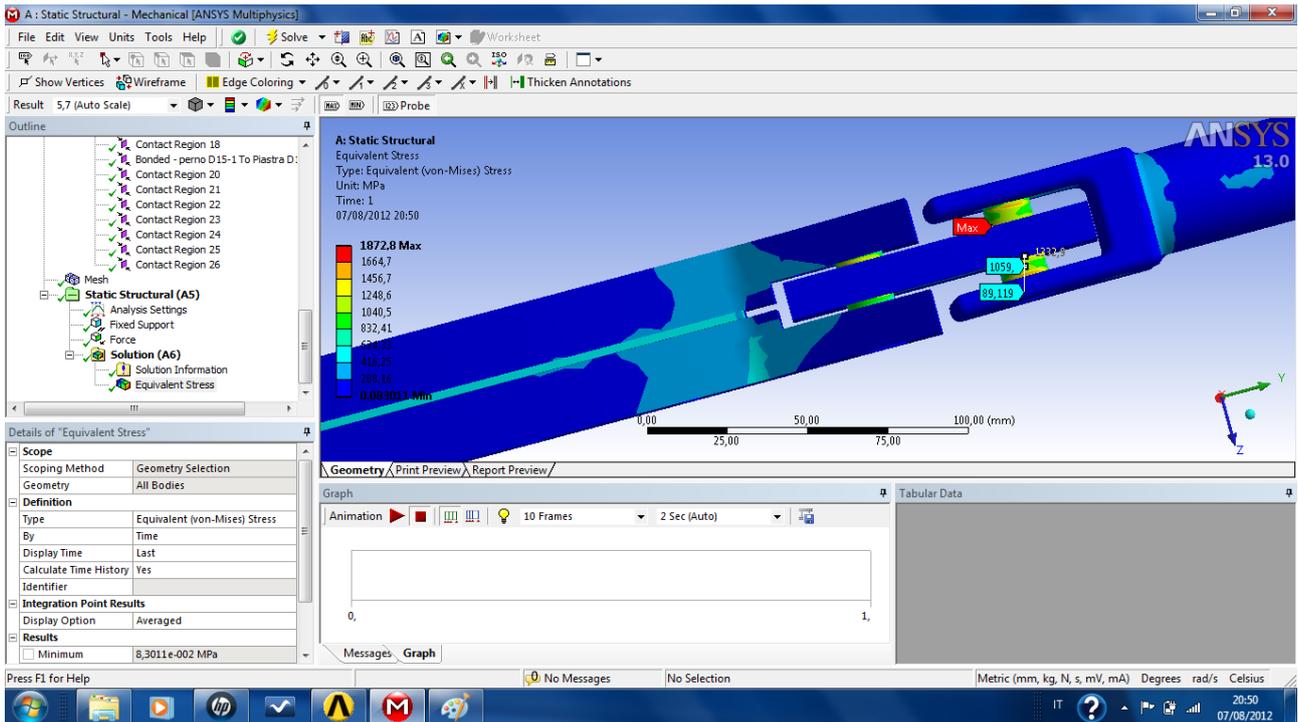


Figura 4.6: Analisi per perni diametro 15, sollecitazione max 1878 Mpa

Aumentando le dimensioni del diametro del perno di soli 2 mm (passando da 13mm a 15mm) si nota un abbassamento di tensione di 500 Mpa, una riduzione affatto trascurabile. Nonostante ciò però le tensioni sono ancora estremamente elevate per potere realizzare il perno con tranquillità. Nelle seguenti immagini relative a diametri del perno principale di 20mm e 25mm si avrà un netto miglioramento per quanto riguarda la distribuzione globale delle tensioni.

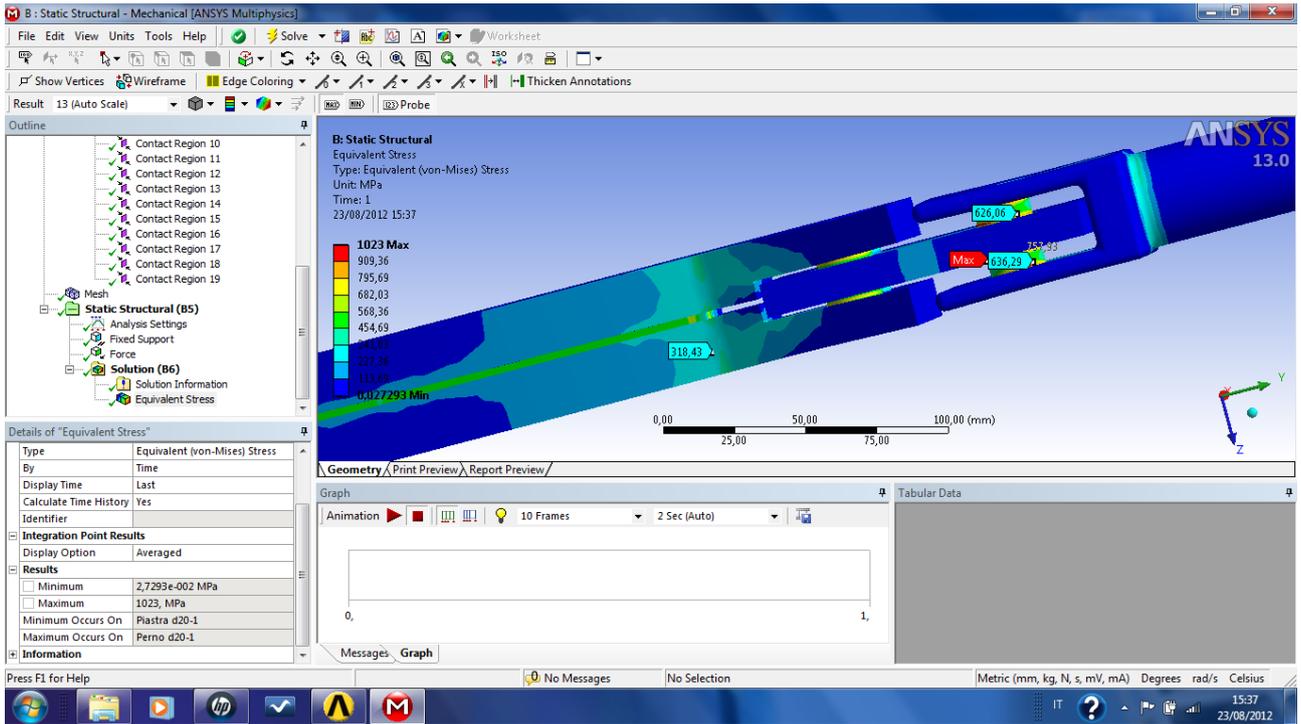


Figura 4.7: Analisi con perni diametro 20, sollecitazione max 1000 Mpa

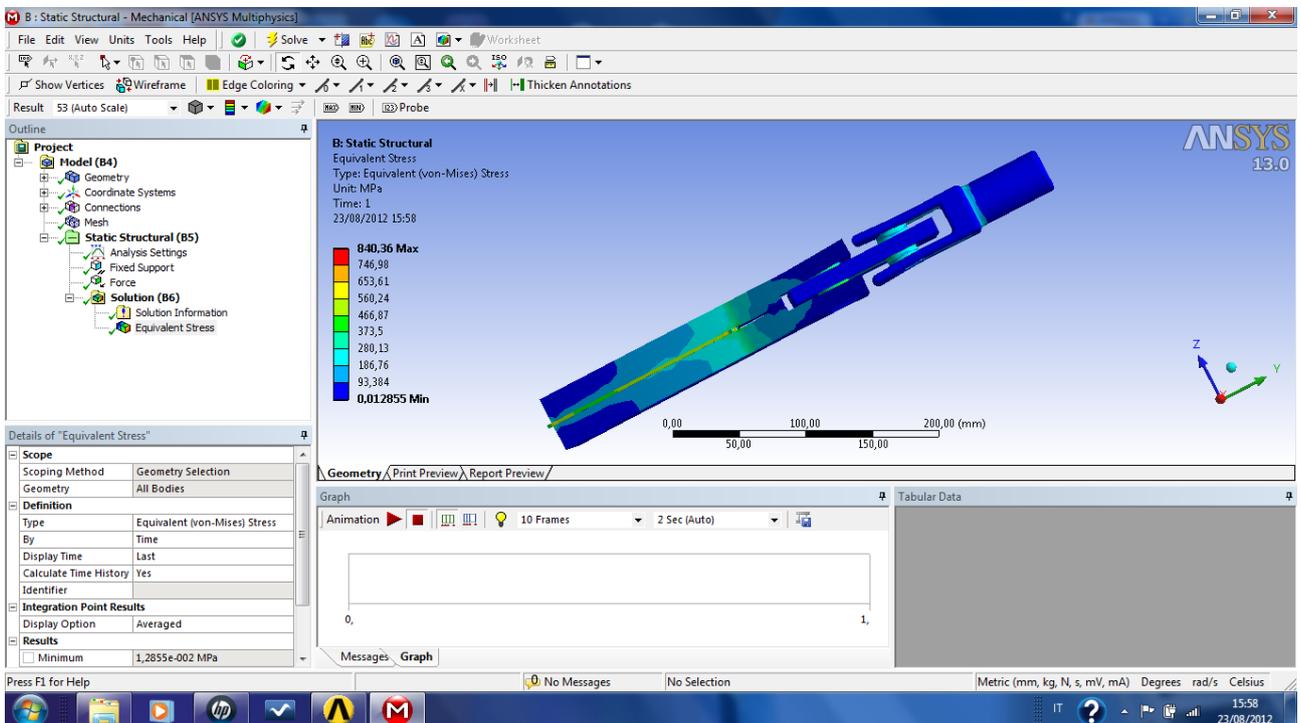


Figura 4.8: Analisi con perni diametro 25, sollecitazione max sul perno pari a 350 Mpa

Facendo l' analisi con i perni dimensionati a 25 mm, si nota che la sollecitazione massima si sposta dal perno al provino. Infatti il perno diventando sempre più grande viene sollecitato sempre meno rispetto ai casi precedenti, mentre il provino presentando sempre in ogni caso la stessa struttura molto esile (spessore di 2,5 mm) risulta esser sollecitato costantemente a circa 800 Mpa. Nei casi precedenti gli 800 Mpa a cui si vede soggetto il provino, non rappresentavano la sollecitazione massima cui era sottoposto l' assieme e per questo l' organo più sollecitato risultava sempre e comunque essere il perno (1800 Mpa per il perno con $\varnothing 15$ mm, 1020 Mpa per $\varnothing 20$ mm). In questo caso invece le tensioni agenti sul perno calano drasticamente (dai 1020 Mpa del caso precedente a 400-350 Mpa). Dai risultati ottenuti da questa analisi si può già avere un' idea di quale potrebbe essere il diametro ideale per la corretta esecuzione della prova.

4.4 DIMENSIONAMENTO DEL PERNO:

Per avere un' ulteriore conferma del fatto che il diametro adeguato del perno fosse proprio attorno ai 25 mm si è calcolato il diametro ideale necessario per un materiale con σ_s di 400 MPa per poter sostenere un carico di 100 kN nelle nostre condizioni di vincoli. Attraverso le informazioni ricavate da alcuni libri di costruzioni di macchine [11], è stato possibile ricavare il diametro necessario al perno per riuscire a sopportare il carico massimo erogabile dalla pressa.

In questo caso specifico lo sforzo massimo di flessione si verifica nel centro del perno. Le zone interessate ad una distribuzione di carico uniforme, sono la zona centrale del perno dove viene collegata la piastra (c) e le due zone laterali di bloccaggio con la forcella (b). La deformata fa capire come l' inflessione dovuta al momento flettente sia massima al centro del perno come ci si aspettava.

Per calcolare il diametro adeguato, bisogna tenere conto che:

$$M = \frac{fc}{2} \left(\frac{b}{3} + g + \frac{c}{4} \right)$$

Dove M è il momento flettente massimo e "f,c,b,g" rappresentano le diverse distanze che si possono calcolare dalla figura 4.9.

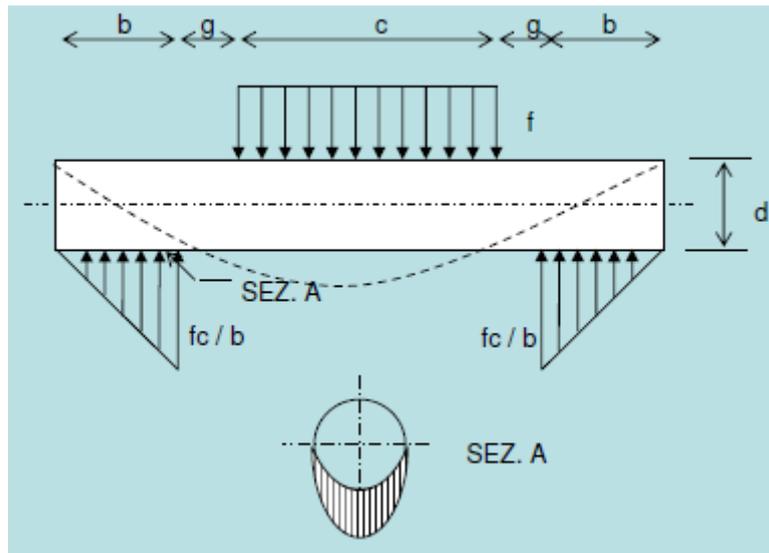


Figura 4.9: Analisi delle sollecitazioni che subisce un perno incastrato tra due braccia laterali, con al centro la zona dove viene applicato il carico

S
i può quindi calcolare lo sforzo massimo:

$$\sigma_{max} = \frac{16fc}{\pi d^3} \left(\frac{b}{3} + g + \frac{c}{4} \right)$$

Dalla soprastante formula, rigirandola e prendendo come tensione massima ammissibile 400 MPa (pari al carico di snervamento del materiale) si ottiene l'espressione del diametro come:

$$d = \sqrt[3]{\frac{16fc}{\pi \sigma_{max}} \left(\frac{b}{3} + g + \frac{c}{4} \right)}$$

Si ottiene:

$$d = \sqrt[3]{\frac{16 \cdot 100000}{\pi \cdot 400} \left(\frac{10}{3} + 6 + 3 \right)}$$

$$d=24,986 \text{ mm}$$

Il diametro ottimale secondo questa analisi risulta quindi essere attorno ai 25 mm che conferma i risultati dell' analisi già effettuata in precedenza con Ansys. Per questo motivo, 25 mm è stato il valore di riferimento con cui si è inizialmente progettato l' assieme a grandi linee. Dimensionato il perno, si è dovuto pensare a come modificare gli spessori dei pezzi per rendere il tutto il più stabile e sicuro possibile evitando di entrare in campo plastico (restando dunque in campo elastico, con tensioni inferiori a quella di snervamento del materiale).

4.5 OTTIMIZZAZIONE DIMENSIONI:

La prima scelta sul dimensionamento è stata legata alle tensioni generantisi nella superficie interna dei fori dell' aggancio, ovvero le due zone di collegamento del perno con l' aggancio.

Per calcolare la pressione su quella superficie bisogna considerare che:

$$P = \frac{F}{A}$$

La pressione è uguale alla forza diviso l' area su cui agisce. Essendo il carico massimo di 100 kN ripartito su due aree di fissaggio del perno, come forza si considera:

$$F = \frac{F_{max}}{2}$$

con $F=50 \text{ kN}$.

Per calcolare l' area su cui si scarica la forza, basta considerare la superficie laterale del cilindretto divisa per due.

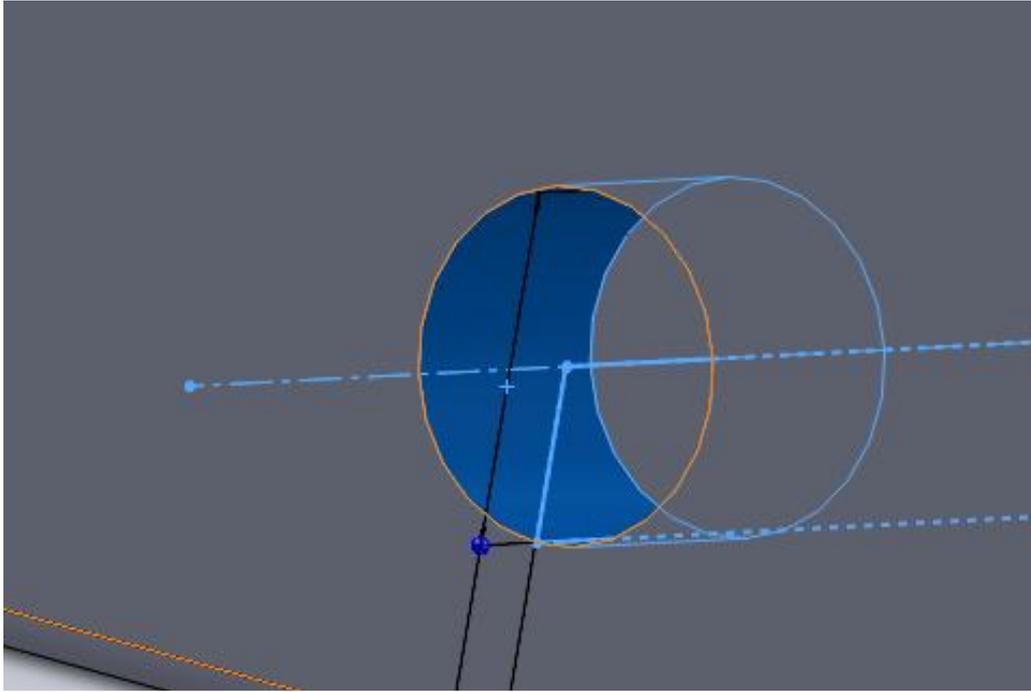


Figura 4.10: Superficie interna del foro sul quale si vuole calcolare la pressione

Utilizzando le dimensioni iniziale dell' aggancio il risultato è:

$$A = \pi r \cdot s$$

Dove s è lo spessore iniziale del braccio dell' aggancio ed è pari a 10 mm. Dall' equazione precedente, risulta una pressione:

$$P = 137 \text{ Mpa}$$

La pressione risulta essere decisamente alta prendendo in considerazione il fatto che il carico di snervamento di un acciaio C40 grezzo e quindi non trattato termicamente è di appena 200-250 Mpa. Inoltre se si lavora con degli acciai da bonifica è buona norma avere nelle zone attorno ai fori per il bloccaggio di perni o rivetti o altri pezzi meccanici, una pressione inferiore a 100 Mpa per lavorare a vantaggio di sicurezza. Solitamente, per essere il più cautelativi possibile, si tende ad utilizzare uno spessore delle pareti pari al diametro del foro che devono contenere.

Si è quindi riprogettato l' aggancio, allargando lo spessore delle due braccia laterali rendendolo pari al diametro stesso del foro contenente il perno e quindi 25 mm.

La pressione sulla superficie interna del foro che ne risulta è pari a:

$$P = \frac{50000}{\pi \cdot 12,5 \cdot 25} = 51 \text{ Mpa}$$

Il risultato è accettabile.

Dopo aver allargato e reso più stabile l' aggancio superiore, si è pensato di estendere lo stesso ragionamento alle altre componenti costituenti l' assieme. La piastra è stata allargata, passando da un iniziale spessore di 12 mm a un più cautelativo spessore di 16 mm. Pure le guide ad L hanno ricevuto lo stesso trattamento. Lo spessore iniziale delle L, previsto dalla normativa era infatti di 20 mm. Tramite l' analisi con Ansys si è notato uno sforzo abbastanza elevato generantisi nella zona dello spigolo vivo delle guide. Per raggiungere tensioni accettabili (valore massimo ≈ 250 Mpa) si è dovuto allargare la L fino a 25 mm. Inoltre è stato fondamentale raccordare gli spigoli per addolcire in generale la geometria del pezzo (raggio di raccordo 5mm).

4.6 DISEGNO ASSIEME DEFINITIVO:

Aumentate le dimensioni dei pezzi, ampliati i fori e dimensionato il perno principale, si è pensato a come realizzare l' intera struttura finale da montare sulla macchina. Il grosso cambiamento da apportare è stato quello fatto nei confronti dell' aggancio per due motivi. Per prima cosa, l' aggancio previsto dalla normativa era dotato di una parte filettata che ne consentiva il collegamento con la macchina. Nella pressa Italsigma Fpf invece, l' aggancio deve essere munito di un foro filettato M39x2, per avvitarsi con la parte filettata già presente sulla macchina. È stato necessario per questo motivo modificare il pezzo.

Un altro aspetto di cui si è dovuto tenere conto è legato al come produrre i pezzi. La geometria dell' aggancio prevista dalla normativa prevedeva una sezione rettangolare di questo pezzo. Tale geometria sarebbe risultata molto scomoda per poter realizzare al tornio il pezzo munito di foro filettato.

Si è pensato dunque di ricavare interamente il pezzo da una barra cilindrica di diametro pari alla diagonale della sezione rettangolare di base del predente aggancio.

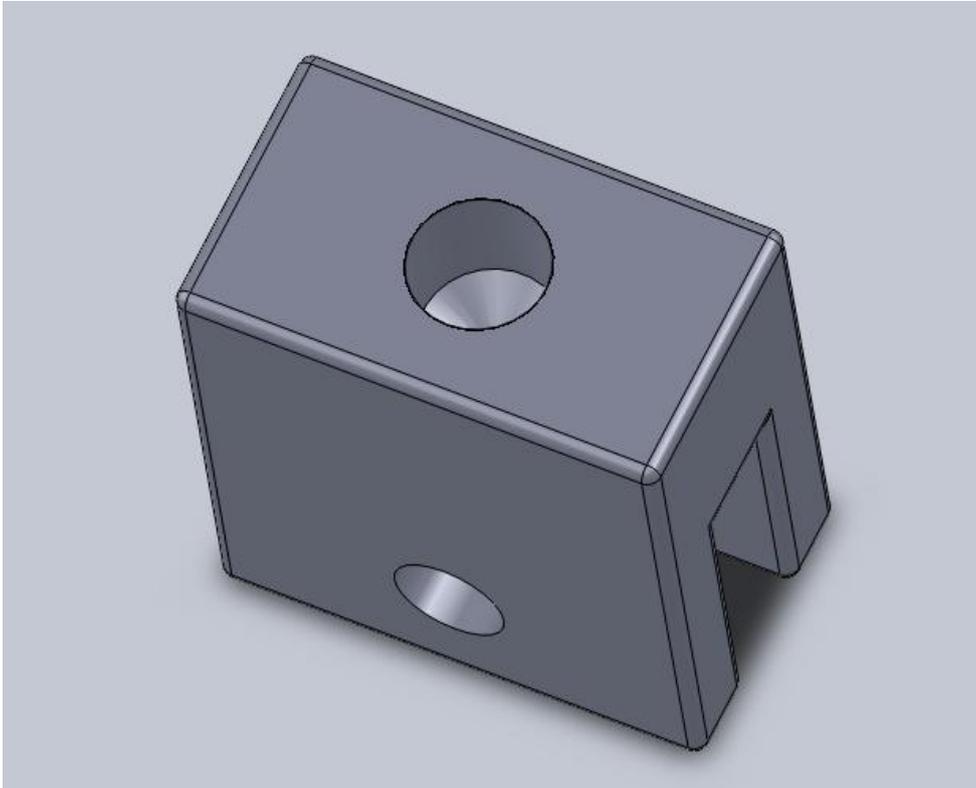


Figura 4.11: Aggancio per perno di diametro 25 mm, con madre vite

Dalla figura 4.11 si possono notare rilevanti differenze tra il pezzo raffigurato e quello previsto dalla normativa che si può intravedere in figura 4.3. Una struttura molto più compatta ed imponente (pareti di 25 mm invece di 10mm), oltre che la presenza del foro filettato. Le dimensioni della sezione rettangolare del pezzo in Figura 4.11 sono 110x64 mm.

$$D = \sqrt{110^2 \cdot 64^2} = 127,6 \text{ mm}$$

ne risulta una diagonale di 127,6 mm.

Arrotondando per eccesso, il diametro della barra cilindrica da utilizzare per ottenere la forcilla cilindrica finale, deve essere pari a 130 mm.

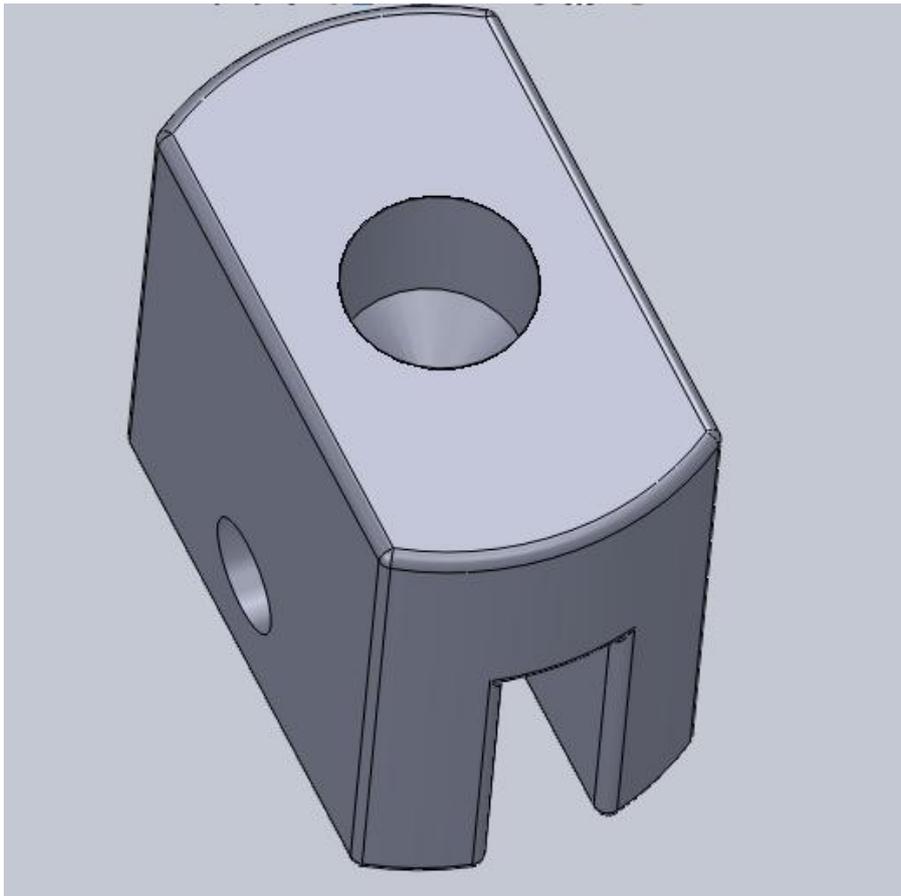


Figura 4.12: Aggancio per perno con diametro 25mm con foro filettato M39x2 ottenuto da barra cilindrica di diametro 130 mm.

Si può osservare l' assieme finale che risulta da queste considerazioni nelle due prossime immagini. Si nota chiaramente che le parti costituenti l' assieme sono state decisamente ampliate, a partire dal perno di collegamento principale dimensionato con un diametro di 25 mm, lo spessore delle braccia della forcella cilindrica ampliati da 10 mm iniziali a 25 mm finali, lo spessore delle guide a L di 25 mm e lo spessore della piastra di 16 mm contro i 12 iniziali. Infine, si sono ampliati pure i diametri dei fori di collegamento tra le guide ad L e la piastra che sono passati da un valore del diametro di 12 mm a un valore di 20mm.

Le tensioni che si generano su tutto il complessivo sono molto più basse e accettabili.

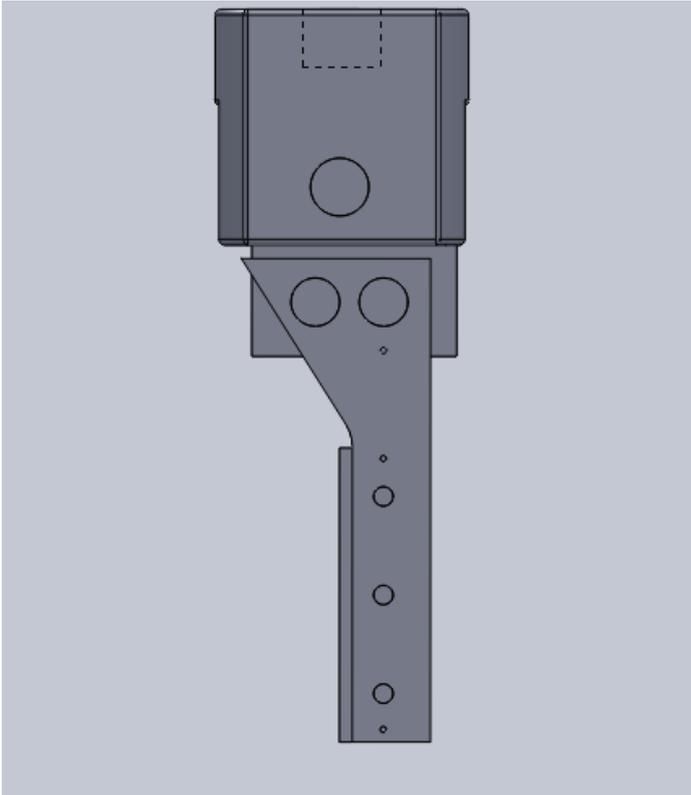
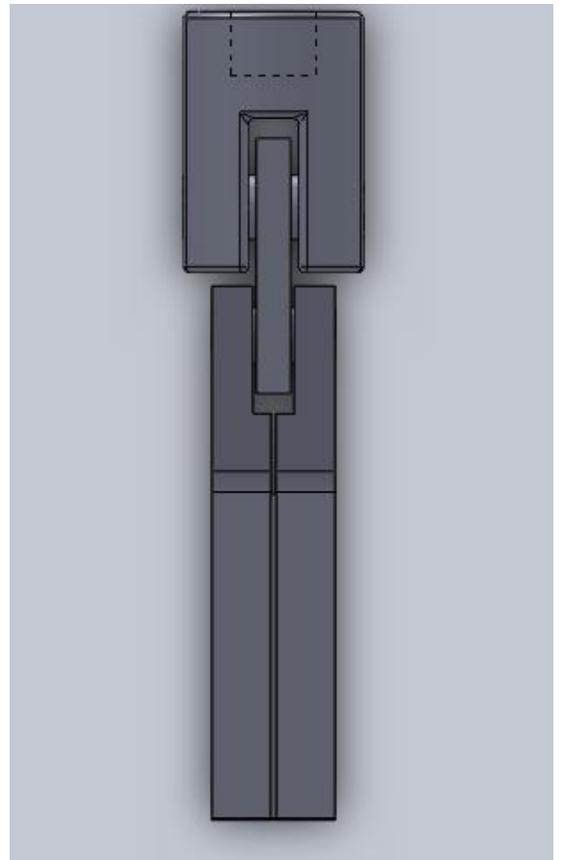


Figura 4.13:

Assieme ridimensionato con diametro perno principale $\varnothing 25$ mm, diametro perni di collegamento guide a L e piastra $\varnothing 20$ mm.

Figura 4.14:

Assieme ridimensionato con spessore piastra 16 mm, spessore guide a L 25 mm, diametro barra cilindrica costituente la forcella $\varnothing 130$ mm.



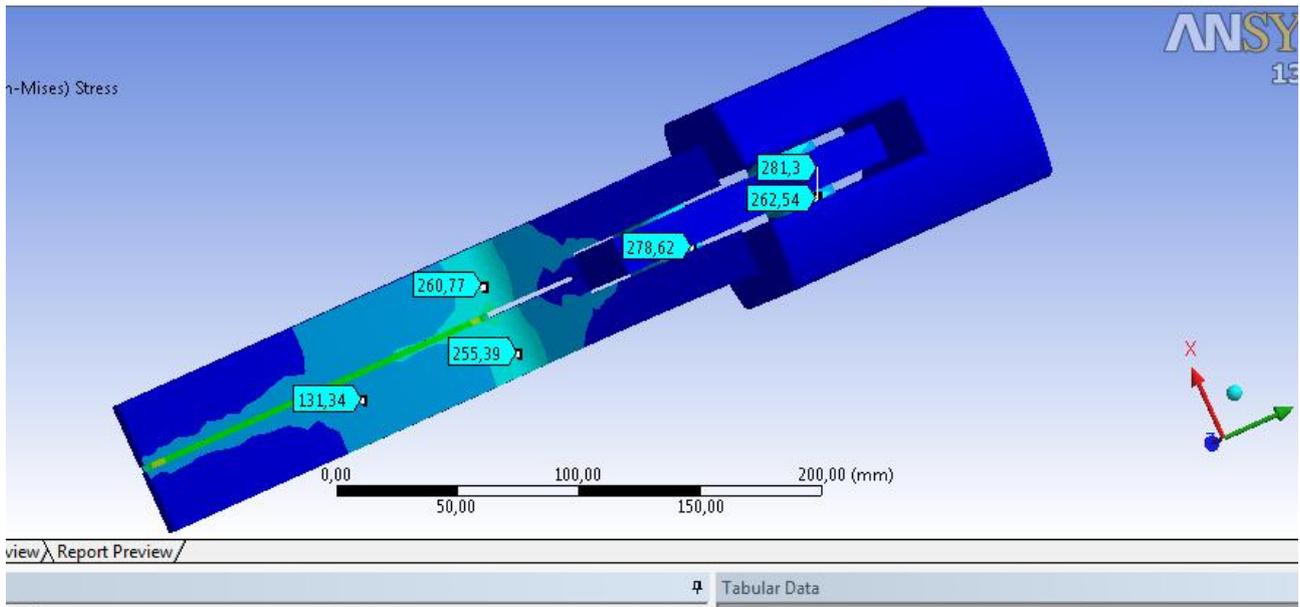


Figura 4.15: Analisi con Ansys dell' assieme definitivo. I segnalini in azzurro indicano le tensioni concentrate in quelle zone specifiche.

Dall' analisi con Ansys si possono avere delle ulteriori conferme sulla stabilità dell' assieme progettato. I pezzi risultano sollecitati al massimo con tensioni di 250-300 Mpa. Il carico di snervamento dell' acciaio C45 bonificato con cui si vuole realizzare il complessivo è di 400 Mpa. L' assieme è in grado di sopportare le tensioni a cui verrà sottoposto, rimanendo all' interno del campo elastico. Le deformazioni così subite dai pezzi durante l' esecuzione delle prove, sono deformazioni elastiche che non modificano in maniera permanente la geometria del pezzo.

Ultime modifiche e produzione dei pezzi:

Stabilite le dimensioni dei pezzi costituenti l' assieme, si è deciso di apportare qualche ultima modifica alle geometrie finali prima della loro definitiva produzione. Per evitare l' insorgere di eccessive tensioni locali, gli spigoli vivi presenti nelle guide ad L sono stati tutti sostituiti da dei raccordi di raggio 5 mm. Lo stesso trattamento è stato riservato per la piastra e la forcella, in modo da avere una struttura complessivamente più "leggera". Essendo infine cambiate le dimensioni dei pezzi rispetto a quelle iniziali previste dalla normativa, si è prestata particolare attenzione al fatto che in ogni caso la struttura complessiva risultasse simmetrica rispetto all' asse del provino.



Figura 4.16: Pezzi definitivi raccordati che andranno a formare l' assieme

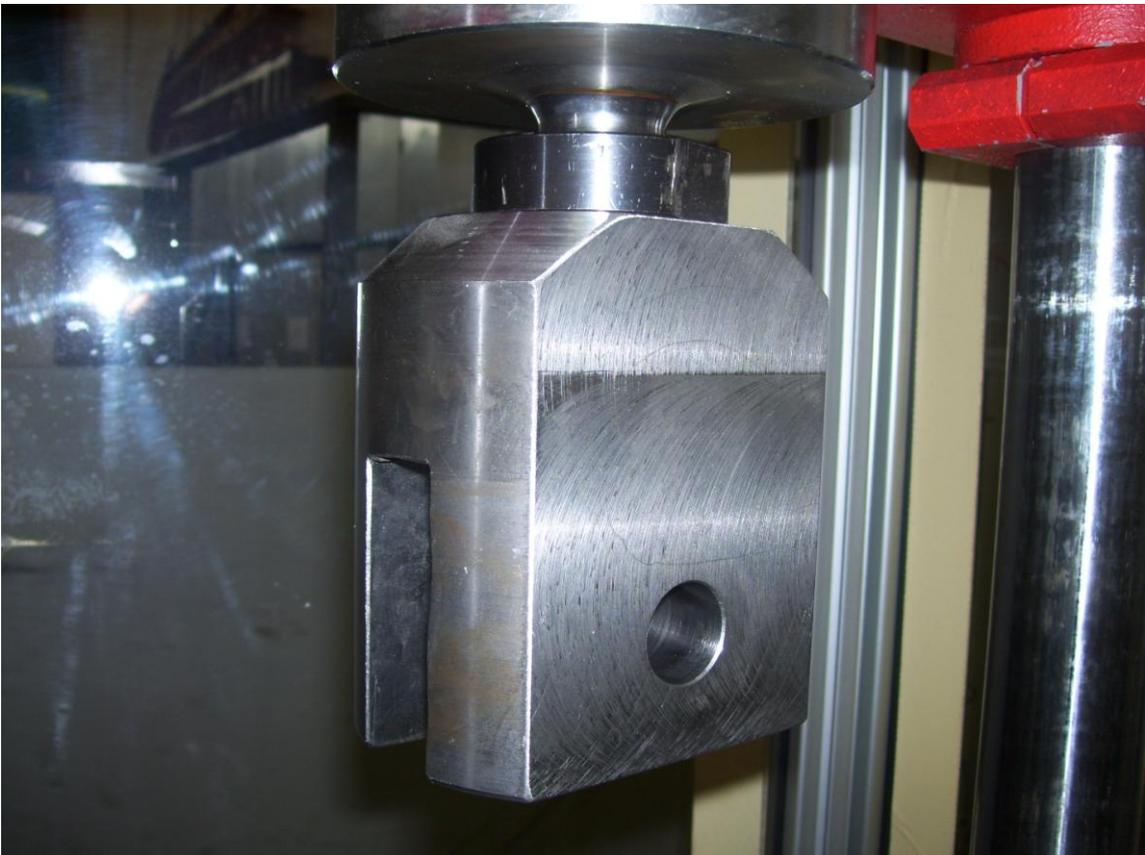


Figura 4.17: Pezzi definitivi raccordati che andranno a formare l' assieme



Figura 4.18: Vista dell' assieme finale montato

I pezzi sono stati realizzati nell' hangar della II Facoltà di Ingegneria meccanica di Forlì mediante macchina a controllo numerico, eccezion fatta per la forcella in acciaio, lavorata al tornio con le macchine utensili del polo di Bologna. I fori sono in seguito stati ulteriormente lavorati mediante alesatrice, mentre la filettatura M39x2 è stata realizzata anch' essa al tornio.

4.7 TRATTAMENTI TERMICI SUI PERNI DI COLLEGAMENTO:

Per migliorare le caratteristiche meccaniche dei pezzi utilizzati per la realizzazione dell' assieme finale, è stato necessario sottoporli a un trattamento termico di bonifica. Per rendere la struttura ancora più sicura, si è pensato di realizzare i perni di collegamento tra i vari pezzi (aggancio - piastra, piastra - guide ad L) con un acciaio dalle proprietà meccaniche molto migliori del C45, il 39NiCrMo3.

Bonificare un pezzo significa temprarlo nel mezzo più adatto alle sue caratteristiche e poi rinvenirlo per un certo arco di tempo. All' interno della bonifica sono quindi presenti due trattamenti termici: la tempra e il rinvenimento.

4.7.1 TEMPRA:

La tempra costituisce il trattamento più importante che può essere fatto sugli acciai in quanto realizza condizioni di durezza e resistenza meccanica elevate ma induce anche notevole fragilità.

La tempra si dice **diretta** quando dopo aver riscaldato l'acciaio sopra A_{c3} (temperatura a cui termina la formazione di austenite per ipoeutetoidi) se ipoeutettoide ($C < 0.86\%$) o sopra A_{c1} (temperatura a cui inizia la formazione di austenite) se ipereutettoide ($C > 0.86\%$), lo si raffredda con velocità superiore a quella critica evitando di intersecare le curve presenti nel diagramma TTT relativo al materiale che si sta temprando.

Lo scopo del trattamento termico di tempra è quello di portare il pezzo a temperature molto elevate (per molti acciai sopra gli 840° ad esempio) per poi raffreddarlo in maniera velocissima nel mezzo più adatto.

Gli acciai con percentuale di carbonio inferiore allo $0,5\%$ vengono solitamente temprati in acqua, gli acciai legati invece vengono temprati in olio.

Questo trattamento consente di ottenere una struttura completamente **martensitica** all' interno del pezzo che presenta quindi elevata durezza, resistenza ma anche una fragilità non trascurabile.

Diagramma T.T.T.
T.T.T. diagram

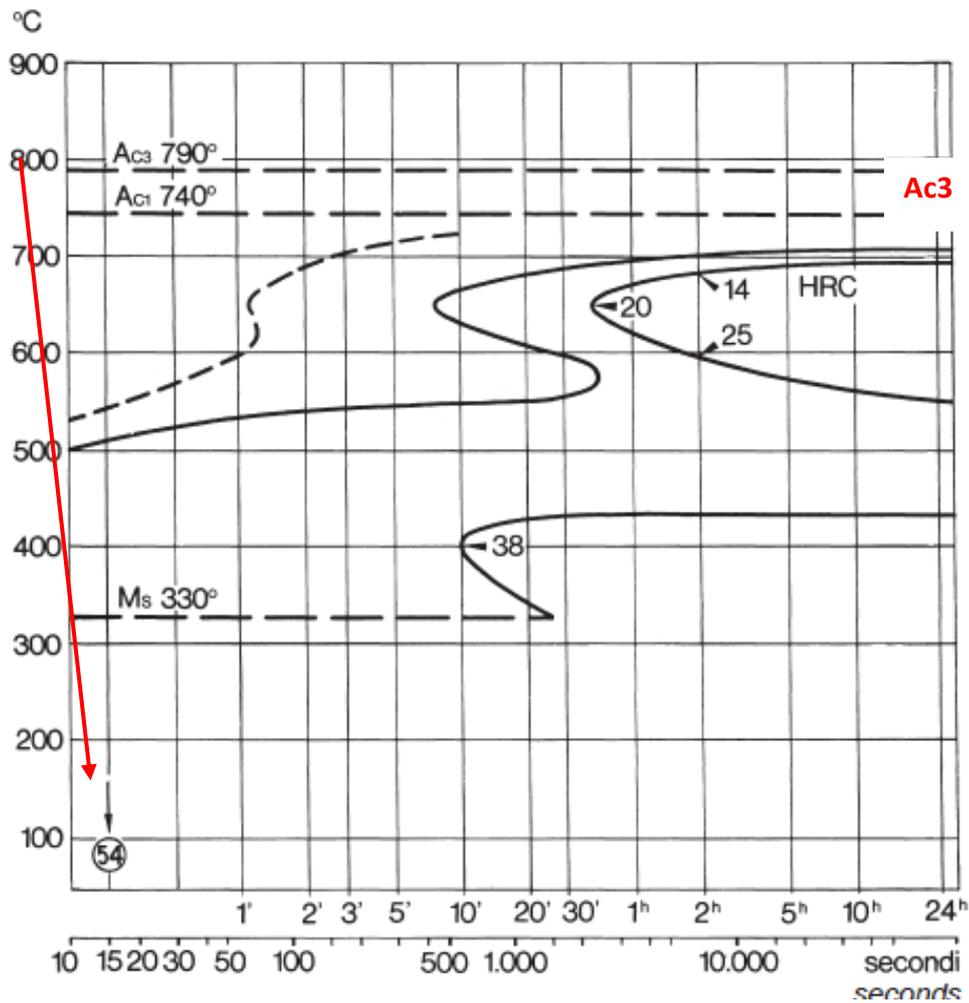


Figura 4.19 : Diagramma TTT dell' acciaio 39NiCrMo3. La freccia in rosso rappresenta l' andamento di un tipico trattamento di tempra diretta eseguibile su questo Acciaio.

I diagrammi TTT (Time Temperature Transformation) sono utilizzati per misurare il tempo di durata di un trattamento ad una precisa temperatura. Presentano sull' asse delle ascisse il tempo, sull' asse delle ordinate la temperatura.

4.7.2 RINVENIMENTO:

Il rinvenimento si effettua sempre solo dopo avere già eseguito un' operazione di tempra sull' acciaio in questione. Il rinvenimento è un trattamento termico necessario per la distensione delle tensioni creatisi sul pezzo in seguito al trattamento di tempra. Consente di aumentare la tenacità di un pezzo,

rendendolo quindi meno fragile e duro. La struttura finale di un pezzo rinvenuto, non è più martensite ma **sorbite**. Un' operazione di rinvenimento consiste nel riscaldare l' acciaio già temprato ad una temperatura inferiore ad Ac1 (tra i 200° e i 650°), mantenerlo per un tempo adeguato a tale temperatura (solitamente due ore) per poi raffreddarlo molto più lentamente rispetto alla velocità di raffreddamento vista nel processo di tempra. Il diagramma di rinvenimento presenta sull' asse delle ascisse la temperatura al quale si vuole effettuare il trattamento e sull' asse delle ordinate le tensioni.

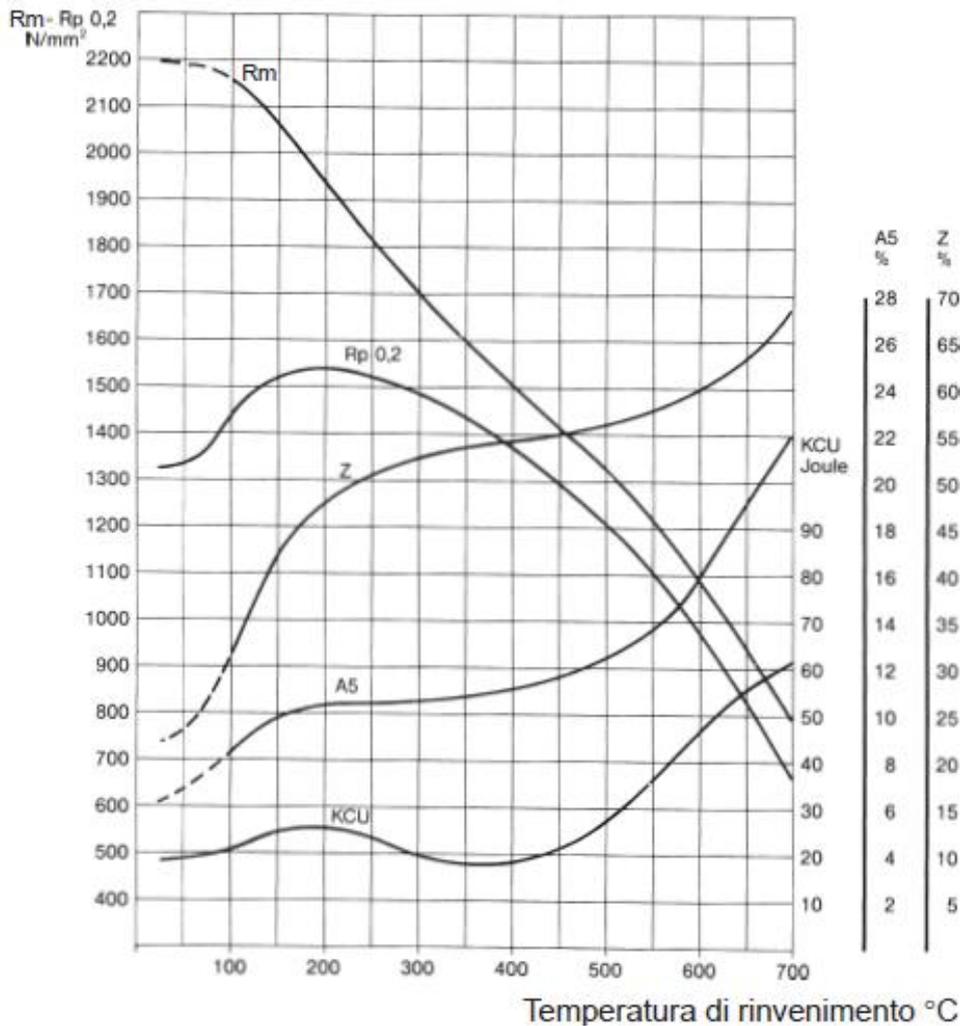


Figura 4.20: Diagramma di rinvenimento dell' acciaio 39NiCrMo3

In base al punto di intersezione tra la temperatura e la curva apposta, dal diagramma di rinvenimento si possono conoscere proprietà dell' acciaio quali:

KCU: resilienza rilevata mediante il pendolo di Charpy su provino apposito, espressa in Joule.

A%: allungamento percentuale a rottura.

Z: strizione percentuale a rottura.

R_p: carico di snervamento del materiale.

R_m: carico di rottura del materiale.

Il 39NiCrMo3 bonificato, consente di ottenere un carico di snervamento del materiale pari a ≈ 750 Mpa per barre cilindriche di diametri compresi tra i 16 e i 40 mm. Onde evitare spiacevoli sorprese, si è quindi pensato di realizzare gli organi più sollecitati di tutta la struttura e cioè i perni, con questo acciaio più performante.

4.8 PROBLEMATICHE PRESENTI:

Come già detto in precedenza, la costruzione dell' attrezzatura necessaria per testare i provini al taglio in piano, presenta diverse problematiche:

- Il dimensionamento adeguato dei pezzi per resistere alle tensioni a cui saranno sollecitati.
- Il perfetto allineamento del sistema guide provino e forcilla per una corretta avvenuta della prova.
- La necessità di avere elevato frizionamento nella zona di contatto tra provino e guide in acciaio.

Alle prime due problematiche si è cercato di porre rimedio nella fase di progettazione analizzata nelle precedenti pagine. Per quanto riguarda invece la terza problematica, si è pensato di ricoprire con uno strato di materiale super abrasivo la zona di contatto del provino con le guide, ed ottenere in questo modo un elevato coefficiente di attrito sull' interfaccia.

Si è pensato quindi di contattare la Serma SRL, una azienda specializzata nel ricoprimento con diamante sintetico di utensili e materiali in acciaio. Il tipo di ricoprimento scelto è stato quello del diamante sintetico D64, cioè con granuli dal diametro di $64\mu\text{m}$.

Le caratteristiche che presenta questo tipo di ricoprimento sono fondamentalmente:

- Elevata durezza, simile a quella del diamante naturale (7000-12000 HV),
- Coefficiente di attrito su vetro pari a 0,2,
- Elevatissima conduttività termica,
- Stabilità termica in atmosfera inerte molto alta, superiore ai 1200°.

In questo modo il sistema provino-guide presenta buone condizioni di aderenza, evitando il problema dello slittamento l' uno rispetto all' altro durante la prova, messo in luce dalla normativa.

La zona adibita al ricoprimento risulta essere una superficie di dimensioni 31x152 mm, nella sezione interna di ogni guida ad L. Ne risulta un ricoprimento di 47 cm² su ogni guida e quindi 188 cm² in totale da ricoprire.



Figura 4.20: Rappresentazione della zona di contatto tra provino e guida, ricoperta con superabrasivo.

CAPITOLO 5

RISULTATI OTTENUTI SUI PROVINI SOGGETTI A TAGLIO IN PIANO:

Terminata la fase di progettazione dei pezzi, realizzata ed assemblata l'attrezzatura, è iniziata la fase di test sui particolari provini presenti all'interno della struttura del Laboratorio Masterlab. Come già accennato nei capitoli precedenti, i provini sono stati realizzati in passato, alcuni mediante processo di stratifica manuale, altri per infusione. I provini sono stati rinforzati con fibre di vetro e realizzati tramite l'utilizzo di diverse resine. L'obiettivo primario è stato quello di analizzare il comportamento di differenti tipi di resine al taglio piano, per risalire alla resina ideale per resistere a questo particolare tipo di sollecitazione. I sistemi di resina utilizzati per creare i provini sono cinque: resina epossidica, vinilestere, poliestere, poliestere ortoftalica e poliestere isoneopentilica.

I test sono stati effettuati sulla pressa oleodinamica Italsigma Fpf.

5.1 ESECUZIONE PROVE STATICHE MEDIANTE PRESSA ITALSIGMA FPF:

La prova si controlla dal computer collegato alla macchina mediante il software Mts Main, implementato con LabView.

Nel caso in analisi, si è concentrata l'attenzione sul processo di esecuzione delle **prove statiche**. Come per tutti i tipi di prova, anche per la realizzazione di prove statiche è importante decidere quale sarà la modalità di controllo della prova; carico, spostamento o deformazione. Poiché la normativa impone la velocità di spostamento dell'afferraggio è buona norma operare in modalità di controllo di spostamento, selezionando **LVDT** nel comando inerente alla modalità di prova. In seguito, posizionato il provino, impostato il livello della pressione e accesa la macchina mediante il comando **LOCK PID** (riquadro A fig 5.1), si attiva la schermata contenente i parametri di configurazione della prova.

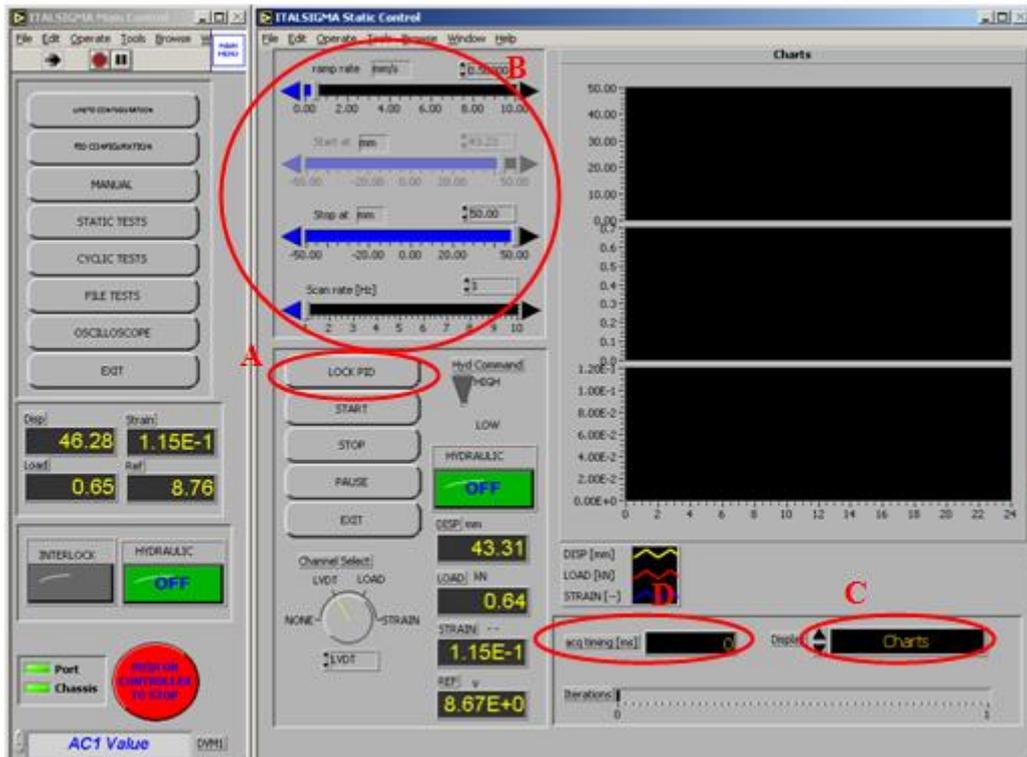


Figura 5.1

I parametri di controllo della prova sono:

- Il parametro Rampa, relativo alla velocità di spostamento del pistone (prima voce riquadro B).
- Posizione di partenza del pistone (seconda voce riquadro B).
- Posizione di arrivo del pistone (punto estremo -50 mm per avere rottura certa, terza voce riquadro B).
- Scan rate, frequenza di acquisizione dei dati (quarta voce riquadro B).

I valori relativi alla velocità di spostamento del pistone ed alla frequenza, ci vengono forniti dalla normativa e più precisamente sono **0,025 mm/s** come **velocità di rampa** e **2 Hz** come **frequenza di acquisizione dei dati** da parte dei vari sensori. Nel riquadro D si trova il periodo di acquisizione dati (inverso della frequenza).

Impostati i parametri di controllo, si può dare inizio alla prova mediante il comando **START**. Attraverso i grafici presenti nella stessa schermata, si può controllare l'andamento della prova in carico/spostamento o carico/deformazione (riquadro C).

5.2 ESECUZIONE DELLE PROVE E RISULTATI OTTENUTI:

Si pensava di realizzare le prove su diversi tipi di laminati, con la struttura caratterizzata da diversi tipi di resine, realizzati sia con processo produttivo di stratificazione manuale che metodo di infusione. L'informazione base che si desidera ottenere è la tensione di taglio massima, necessaria per la rottura di ogni provino. La tensione di taglio la si può comodamente calcolare come:

$$\tau = \frac{F}{A}$$

Dove F è il valore del carico massimo applicato sul provino prima della sua rottura, mentre A rappresenta l'area della sezione trasversale del provino, la sua altezza per il suo spessore.

La prova di taglio piano genera all'interno del laminato in analisi delle deformazioni di scorrimento. Per risalire al modulo di elasticità trasversale del materiale, è sufficiente calcolare la differenza delle τ tra due punti e la differenza della deformazione di scorrimento γ .

$$G = \frac{\Delta\tau}{\Delta\gamma}$$

Nonostante l'aumento del coefficiente di attrito dovuto al ricoprimento in diamante sintetico effettuato sulle sezioni interne delle guide in acciaio, non si è riusciti ad evitare il fenomeno dello scivolamento del provino sulle guide, con conseguente formazioni di cricche attorno ai fori di collegamento tramite bulloni del sistema provino-guide. Le prove non sono quindi risultate attendibili ed i risultati ottenuti non sono potuti essere presi in considerazione. I provini analizzati sono stati laminati realizzati con Resina Ortoftalica secondo il processo di stratifica manuale. Su tutti quanti i provini caratterizzati, l'aumento del carico tende a raggiungere la stabilità attorno ai 40 kN. Raggiunto tale valore, si iniziano a intravedere i primi segni della rottura che sta interessando il provino. La frattura non avviene mai però in maniera uniforme lungo l'asse del provino come desiderato, ma si dirama sempre da un foro ad un altro, portando a rottura il provino in maniera anomala ed indesiderata. Nelle seguenti figure possiamo avere un'idea di come si è propagata la rottura in diversi provini.

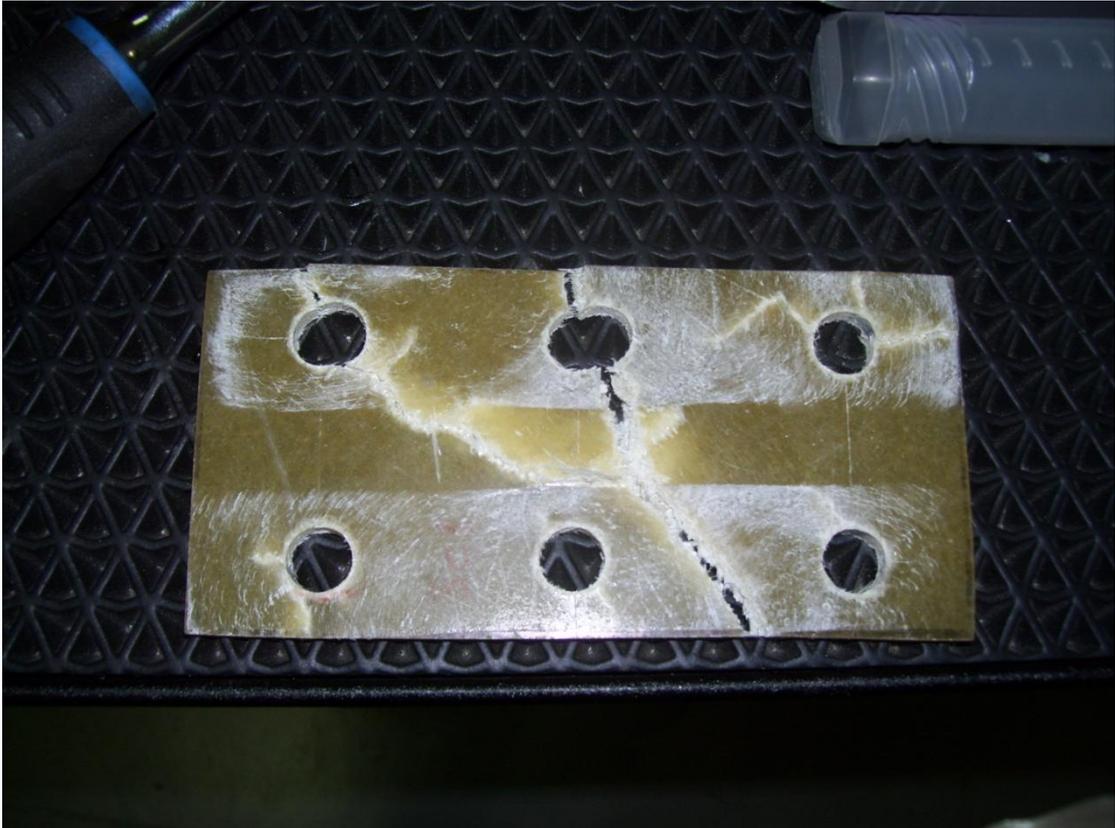


Figura 5.2



Figura 5.3

Per evitare tali rotture si è pensato in futuro di ricoprire i provini con degli strati di alluminio per migliorarne la presa con le guide in acciaio: i tabs. Tale opzione però non viene contemplata in questo lavoro di Tesi, non essendoci stato il tempo necessario per potere approfondire l' argomento. Quello che è certo, è che l' attrezzatura realizzata per le specifiche prove di taglio in piano, è risultata stabile per resistere al carico erogabile dalla pressa. I problemi riscontrati durante l' esecuzione delle prove invece sono persistiti nonostante il ricoprimento con strato di materiale superabrasivo.

CONCLUSIONI:

Il lavoro di Tesi analizzato nelle pagine precedenti, ha portato alla realizzazione di una attrezzatura specifica per eseguire prove di taglio in piano su provini in materiale composito. Nonostante le dimensioni iniziali del complessivo previste dalla normativa non fossero adatte per resistere al carico massimo erogabile dalla pressa oleodinamica utilizzata, l' assieme è stato completamente ridimensionato nel tentativo di evitare lo snervamento dei singoli pezzi negli utilizzi futuri. Inoltre, si è cercato di porre rimedio al principale limite presente nel metodo di prova di taglio "Two rails shear test method" dello scivolamento del provino sulle guide in acciaio durante la prova, ricoprendo con uno strato di materiale super abrasivo (diamante sintetico D64) la zona di contatto interna tra guide e provino. Sfortunatamente, nella successiva fase di caratterizzazione dei provini, tale problema si è ripresentato nonostante le lavorazioni fatte. A causa dei lunghi tempi di lavorazione dei pezzi, non si è riusciti nell' arco di tempo previsto quindi a caratterizzare i provini come desiderato. Nonostante questo però, si è creato un modello di attrezzatura di prova che potesse migliorare le debolezze presenti nella struttura prevista dalla normativa ASTM D4255. Si è inoltre pensato di ricoprire con dei Tab in alluminio le pareti dei provini a contatto con le guide in acciaio. Si può quindi affermare che la Tesi, nella sua generalità, potrebbe rappresentare un valido punto di partenza sul quale basare studi e ricerche future.

BIBLIOGRAFIA:

- [1] Daniel Gay, Suong V. Hoa e Stephen W. Tsai: Composite Materials Design and Applications, CRC Press LLC;
- [2] Robert M. Jones: Mechanics of Composite Materials, Second Edition, Taylor & Francis;
- [3] Badini C, (2003), "Materiali composti per l'ingegneria", ed. Celid, Italia;
- [4] B. Tuberosa: "Proprietà meccaniche a trazione di compositi polimerici rinforzati con fibre lunghe di carbonio di interesse per il settore auto motive", Tesi di Laurea 2011-2012.
- [5] Björn Banholzer – Tanja Brockmann – Wolfgang Brameshuber. "Material and bonding characteristics for dimensioning and modeling of textile reinforced concrete (TRC) elements";
- [6] ASTM D 3039/D 3039M – 08: Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials;
- [7] ASTM D 3518/D 3518M – 94 (Reapproved 2007): Standard Test Method for In-Plane Shear Response of Polymer Matrix Composite Materials by Tensile Test of a $\pm 45^\circ$ Laminate;
- [8] S. Lee and M. Munro: Evaluation of in-plane shear test methods for advanced composite materials by the decision analysis technique;
- [9] J.C. Xaviera, N.M. Garrido, M. Oliveira, J.L. Moraisa*, P.P. Camanhoc, F. Pierron: A comparison between the Iosipescu and off-axis shear test methods for the characterization of Pinus Pinaster Ait;
- [10] W. Yan-lei, H. Qing-duo, O. Jin-ping: Evaluation of in-plane shear test methods for composite material laminates;
- [11] ASTM D 4255/D 4255M – 01 (Reapproved 2007): Standard Test Method for In-Plane Shear Properties of Polymer Matrix Composite Materials by the Rail Shear Method;
- [12] G. Niemann, H. Winter: "Elementi di macchine".

RINGRAZIAMENTI:

Veramente tante sono le persone che vorrei ringraziare, raggiunto questo ambito traguardo che sancisce un risultato molto importante all' interno della mia carriera universitaria ma soprattutto personale. In primo luogo sono grato al prof. Lorenzo Donati che ha accolto la mia richiesta di tesi e mi ha permesso di conoscere più a fondo attraverso questo lavoro un mondo nuovo continuamente in espansione e rinnovamento come quello dei materiali compositi. Un ringraziamento obbligatorio va al tecnico del laboratorio MasterLab Paolo Proli e alla sua disponibilità nel seguirmi lungo il lavoro svolto, nel rispondere alle mie domande e nell' avermi fatto vedere come affrontare e risolvere i problemi. Un grazie a dir poco obbligato è indirizzato alla mia famiglia che mi ha sempre supportato e sopportato in questi mesi di lavoro e anche a tutti i miei amici che mi sono sempre stati vicino soprattutto nei momenti di sconforto e di nervosismo. Per ultimo, un particolare ringraziamento va ad una persona speciale, della quale non serve fare il nome, che ha sempre creduto in me e, nonostante le numerose difficoltà, mi ha sempre confortato e mi ha aiutato, di giorno in giorno, a concludere questo lavoro.