

ALMA MATER STUDIORUM  
UNIVERSITA' DI BOLOGNA

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA  
Sede di Forlì

Corso di Laurea in  
INGEGNERIA MECCANICA  
Classe LM-33

TESI DI LAUREA  
in Progetto e costruzione di macchine

Analisi del comportamento a fatica di un  
laminato al variare della sequenza di  
impilamento e delle dimensioni

CANDIDATO  
Danilo Baraccani

RELATORE  
Giangiacomo Minak

CORRELATORE  
Enrico Dolcini

Anno Accademico 2014/2015  
Sessione II



## **Sommario**

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Sommario</b>   | <b>3</b>  |
| <b>Indice delle figure</b>  | <b>5</b>  |
| <b>Indice delle tabelle</b>   | <b>9</b>  |
| <b>Introduzione</b>   | <b>11</b> |
| <b>Capitolo 1 - Materiali compositi a matrice polimerica</b>            | <b>13</b> |
| 1.1 - Rinforzo  | 13        |
| 1.2 - Matrice   | 15        |
| 1.3 - CFRP  | 16        |
| 1.4 - Laminati  | 17        |
| 1.5 - Comportamento a fatica nei compositi                              | 19        |
| <b>Capitolo 2 - Pianificazione delle prove sperimentali</b>             | <b>21</b> |
| 2.1 - Introduzione  | 21        |
| 2.2 - Normativa di riferimento  | 21        |
| 2.3 - Progettazione dei test  | 23        |
| <b>Capitolo 3 - Realizzazione e caratterizzazione dei campioni</b>      | <b>29</b> |
| 3.1 - Realizzazione dei campioni  | 29        |
| 3.2 - Caratterizzazione dei campioni                                    | 37        |
| <b>Capitolo 4 - Strumenti e procedura dei test</b>                      | <b>49</b> |
| 4.1 - Attrezzatura sperimentale   | 49        |
| 4.2 - Procedura dei test  | 52        |
| <b>Capitolo 5 - Risultati e analisi dei dati</b>                        | <b>55</b> |
| 5.1 - Prove di flessione statica  | 55        |
| 5.2 - Prove di flessione a fatica                                       | 72        |
| <b>Capitolo 6 - Test su provini con diversa sequenza di impilamento</b> | <b>89</b> |
| 6.1 - Caratterizzazione dei campioni serie-13A                          | 90        |
| 6.2 - Risultati e analisi dati per le prove di flessione statica        | 92        |
| 6.3 - Risultati e analisi dati per le prove di flessione a fatica       | 97        |

|  |            |
|--|------------|
| <b>Capitolo 7 - Conclusioni</b>                | <b>101</b> |
| 7.1 - Considerazioni sui risultati ottenuti    | 101        |
| 7.2 - Limiti dello studio e prospettive future | 105        |
| <b>Bibliografia</b>                            | <b>107</b> |
| <b>Appendici</b>                               | <b>109</b> |

## Indice delle figure

|   |    |
|---|----|
| Fig. 1 - Schema generale Materiali Compositi  | 13 |
| Fig. 2 - Filamento di carbonio a confronto con capello umano  | 14 |
| Fig. 3 - Tipologie di fibre   | 14 |
| Fig. 4 (a, b, c) - Tessuto Plane, Tessuto Twill, Tessuto Satin  | 14 |
| Fig. 5 - Schema generale Laminato   | 17 |
| Fig. 6 - Modalità di propagazione delle fratture interlaminari  | 19 |
| Fig. 7 - Specifiche del provino ad asse rettilineo come da Normativa di riferimento   | 22 |
| Fig. 8 - Specifiche delle attrezzature di prova per il provino ad asse rettilineo come da Normativa di riferimento                | 22 |
| Fig. 9 - Provino in posizione di prova  | 23 |
| Fig. 10 - Schema delle proporzioni nel test di flessione  | 24 |
| Fig. 11 - Schema del carico nel test di flessione   | 25 |
| Fig. 12 - Tipiche modalità di rottura nella prova per analisi dell'ILSS   | 25 |
| Fig. 13 - Successione delle fasi di lavoro  | 27 |
| Fig. 14 (a, b) - Rotoli di materiale pre-impregnato conservati in cella frigorifera (a), singolo rotolo pronto per il taglio (b)  | 29 |
| Fig. 15 (a, b, c) - Taglio manuale delle sagome   | 30 |
| Fig. 16 - Stampo e Controstampo in acciaio inox dopo l'applicazione del distaccante   | 30 |
| Fig. 17 (a, b, c, d) - Laminazione manuale  | 31 |
| Fig. 18 - Peel-ply  | 32 |
| Fig. 19 - Tessuto assorbitore-aeratore  | 32 |
| Fig. 20 (a, b, c) - Valvola a baionetta   | 32 |
| Fig. 21 (a, b, c,) - Schema di realizzazione del sacco (a), immagini del sacco a vuoto prima (b) e dopo (c) l'aspirazione di aria | 33 |
| Fig. 22 - Autoclave: immagine e schema di funzionamento   | 34 |
| Fig. 23 - Schema ciclo in autoclave a titolo di esempio   | 34 |
| Fig. 24 - Laminato dopo la fase di estrazione   | 34 |
| Fig. 25 - Utensile per la rifilatura della lastra   | 34 |
| Fig. 26 - Immagini della sega circolare utilizzata per il taglio e di alcuni provini  | 35 |
| Fig. 27 - Schemi di taglio piastra in config. 1 e config. 2   | 35 |
| Fig. 28 - Provini ricavati dalle lastre laminate  | 36 |
| Fig. 29 - Provini 8_26 e 14_13 etichettati  | 36 |
| Fig. 30 - Sezioni di misura spessore e larghezza  | 37 |
| Fig. 31 - Calibro digitale e bilancia digitale utilizzati per le misurazioni dimensionali   | 37 |
| Fig. 32 - Levigatrice orbitale (disco con carta abrasiva)   | 45 |
| Fig. 33 - Levigatrice orbitale (disco con panno per lucidatura)   | 45 |
| Fig. 34 - Camera digitale - Moticom 3   | 46 |
| Fig. 35 - Microscopio ottico  | 46 |
| Fig. 36 - Dispositivo di illuminazione utilizzato per la messa a fuoco  | 46 |

|   |    |
|---|----|
| Fig. 37 - Messa a fuoco provini intatti prima delle prove                     | 46 |
| Fig. 38 - Provino 8_05  | 47 |
| Fig. 39 - Provino 9_47  | 47 |
| Fig. 40 - Particolare al microscopio, INGRANDIMENTO 5x, Provino intatto 9_05  | 47 |
| Fig. 41 - Particolare al microscopio, INGRANDIMENTO 5x, Provino intatto 8_09  | 47 |
| Fig. 42 - Provino13_18  | 48 |
| Fig. 43 - Provino 14_23   | 48 |
| Fig. 44 - Particolare al microscopio, INGRANDIMENTO 5x, Provino intatto 13_18 | 48 |
| Fig. 45 - Particolare al microscopio, INGRANDIMENTO 5x, Provino intatto 14_06 | 48 |
| Fig. 46 - Pressa Idraulica: immagine e principali caratteristiche             | 49 |
| Fig. 47 - Centralina acquisizione dati  | 49 |
| Fig. 48 - Attrezzaggio completo per i test statici e a fatica                 | 50 |
| Fig. 49 - Schema e foto posizionamento provino sugli appoggi                  | 51 |
| Fig. 50 - Orientamento del provino  | 51 |
| Fig. 51 - Termometro per controllo della $T$ dell'olio                        | 51 |
| Fig. 52 - Diagramma delle tensioni per la sezione                             | 55 |
| Fig. 53 - Provino 13_02: Tensione-Spostamento, Tensione-Tempo                 | 56 |
| Fig. 54 - Provino 13_16: Tensione-Spostamento, Tensione-Tempo                 | 56 |
| Fig. 55 - Provino 13_28: Tensione-Spostamento, Tensione-Tempo                 | 57 |
| Fig. 56 - Provino 13_34: Tensione-Spostamento, Tensione-Tempo                 | 57 |
| Fig. 57 - Provino 13_40: Tensione-Spostamento, Tensione-Tempo                 | 58 |
| Fig. 58 - Provino 14_02: Tensione-Spostamento, Tensione-Tempo                 | 58 |
| Fig. 59 - Provino 14_14: Tensione-Spostamento, Tensione-Tempo                 | 59 |
| Fig. 60 - Provino 14_32: Tensione-Spostamento, Tensione-Tempo                 | 59 |
| Fig. 61 - Provino 14_38: Tensione-Spostamento, Tensione-Tempo                 | 60 |
| Fig. 62 - Provino 14_50: Tensione-Spostamento, Tensione-Tempo                 | 60 |
| Fig. 63 - Provino 8_01: Tensione-Spostamento, Tensione-Tempo                  | 61 |
| Fig. 64 - Provino 8_33: Tensione-Spostamento, Tensione-Tempo                  | 61 |
| Fig. 65 - Provino 8_55: Tensione-Spostamento, Tensione-Tempo                  | 62 |
| Fig. 66 - Provino 8_78: Tensione-Spostamento, Tensione-Tempo                  | 62 |
| Fig. 67 - Provino 8_98: Tensione-Spostamento, Tensione-Tempo                  | 63 |
| Fig. 68 - Provino 9_09: Tensione-Spostamento, Tensione-Tempo                  | 63 |
| Fig. 69 - Provino 9_10: Tensione-Spostamento, Tensione-Tempo                  | 64 |
| Fig. 70 - Provino 9_11: Tensione-Spostamento, Tensione-Tempo                  | 64 |
| Fig. 71 - Provino 9_12: Tensione-Spostamento, Tensione-Tempo                  | 65 |
| Fig. 72 - Distribuzione delle tensioni di rottura per la serie_13             | 66 |
| Fig. 73 - Serie_13: confronto grafici Tensione-Spostamento                    | 66 |
| Fig. 74 - Distribuzione delle tensioni di rottura per la serie_14             | 67 |
| Fig. 75 - Serie_14: confronto grafici Tensione-Spostamento                    | 67 |
| Fig. 76 - Distribuzione delle tensioni di rottura per la serie_8              | 68 |
| Fig. 77 - Serie_8: confronto grafici Tensione-Spostamento                     | 68 |

|  |    |
|--|----|
| Fig. 78 - Distribuzione delle tensioni di rottura per la serie_9   | 69 |
| Fig. 79 - Serie_9: confronto grafici Tensione-Spostamento  | 69 |
| Fig. 80 - Istogramma riassuntivo dei valori di tensione di rottura per le prove statiche   | 70 |
| Fig. 81 - Distribuzione delle tensioni di rottura per tutti i provini testati, a confronto con la curva teorica di distribuzione normale | 71 |
| Fig. 82 - Istogrammi cicli a rottura, riduzione di carico del 20%  | 79 |
| Fig. 83 - Istogramma confronto <i>media serie</i> n° cicli a rottura, carico ridotto del 20%   | 79 |
| Fig. 84 - Istogrammi cicli a rottura, riduzione di carico del 30%  | 80 |
| Fig. 85 - Istogramma confronto <i>media serie</i> n° cicli a rottura, carico ridotto del 30%   | 80 |
| Fig. 86 - Istogrammi cicli a rottura, riduzione di carico del 40%  | 81 |
| Fig. 87 - Istogramma confronto <i>media serie</i> n° cicli a rottura, carico ridotto del 40%   | 81 |
| Fig. 88 - Diagramma di Wöhler per provini serie_13 (a); Diagramma con ascisse in scala logaritmica (b)                                   | 82 |
| Fig. 89 - Diagramma di Wöhler per CC802-serie_13 (ascisse in scala logaritmica)  | 82 |
| Fig. 90 - Diagramma di Wöhler per provini serie_14 (a); Diagramma con ascisse in scala logaritmica (b)                                   | 83 |
| Fig. 91 - Diagramma di Wöhler per CC802-serie_14 (ascisse in scala logaritmica)  | 83 |
| Fig. 92 - Diagramma di Wöhler per provini serie_8 (a); Diagramma con ascisse in scala logaritmica (b)                                    | 84 |
| Fig. 93 - Diagramma di Wöhler per CC802-serie_8 (ascisse in scala logaritmica)   | 84 |
| Fig. 94 - Diagramma di Wöhler per provini serie_9 (a); Diagramma con ascisse in scala logaritmica (b)                                    | 85 |
| Fig. 95 - Diagramma di Wöhler per CC802-serie_9 (ascisse in scala logaritmica)   | 85 |
| Fig. 96 - Confronto tra diagrammi di Wöhler per serie_13 e serie_14 (configurazione 1)   | 86 |
| Fig. 97 - Confronto tra diagrammi di Wöhler per serie_8 e serie_9 (configurazione 2)   | 86 |
| Fig. 98 - Confronto tra diagrammi di Wöhler per serie_8 e serie_14 (n° di ply PARI)  | 87 |
| Fig. 99 - Confronto tra diagrammi di Wöhler per serie_9 e serie_13 (n° di ply DISPARI)   | 87 |
| Fig. 100 - Provino 13A_28  | 91 |
| Fig. 101 - Provino 13A_03: Tensione-Spostamento, Tensione-Tempo  | 92 |
| Fig. 102 - Provino 13A_12: Tensione-Spostamento, Tensione-Tempo  | 92 |
| Fig. 103 - Provino 13A_23: Tensione-Spostamento, Tensione-Tempo  | 93 |
| Fig. 104 - Provino 13A_27: Tensione-Spostamento, Tensione-Tempo  | 93 |
| Fig. 105 - Provino 13A_32: Tensione-Spostamento, Tensione-Tempo  | 94 |

|   |     |
|---|-----|
| Fig. 106 - Distribuzione delle tensioni di rottura per la serie_13A   | 95  |
| Fig. 107 - Serie_13A: confronto grafici Tensione-Spostamento  | 95  |
| Fig. 108 - Istogramma riassuntivo dei valori di tensione di rottura per le prove statiche   | 96  |
| Fig. 109 - Valori di tensione di rottura per serie 13 e 13A   | 96  |
| Fig. 110 (a, b) - Istogramma cicli a rottura con riduzione carico 20%: singolo provino serie_13A (a) e confronto dei risultati con serie_13 (b) | 98  |
| Fig. 111 - Istogramma cicli a rottura con riduzione carico 30%: singolo provino serie_13A (a) e confronto dei risultati con serie_13 (b)        | 98  |
| Fig. 112 - Istogramma cicli a rottura con riduzione carico 40%: singolo provino serie_13A (a) e confronto dei risultati con serie_13 (b)        | 98  |
| Fig. 113 - Diagramma di Wöhler per provini serie_13A (a); Diagramma con ascisse in scala logaritmica (b)  | 99  |
| Fig. 114 - Confronto tra diagrammi di Wöhler serie_13A/serie_13   | 99  |
| Fig. 115 - Distribuzione degli sforzi di compressione e trazione in un laminato con numero di ply PARI e DISPARI                                | 102 |
| Fig. 116 - Diagramma di Wöhler serie_9 (ipotesi)  | 104 |
| Fig. 117 - Rottura statica del provino 13A_03   | 117 |
| Fig. 118 - Modalità di propagazione di una cricca nella rottura statica del provino 13A_03 (ingrandimento 5x)                                   | 117 |
| Fig. 119 - Rottura del provino 13A_07, sottoposto a prove di fatica con carico massimo ridotto del 20%  | 117 |
| Fig. 120 - Particolare ingrandito del principio della cricca a contatto con la traversa del provino 13_07 (ingrandimento 5x)                    | 117 |
| Fig. 121 - Rottura del provino 13A_18, sottoposto a prove di fatica con carico massimo ridotto del 40%  | 117 |
| Fig. 122 - Particolare ingrandito della propagazione di rotture multiple del provino 13_18 (ingrandimento 5x)                                   | 117 |



## Indice delle tabelle

|   |    |
|---|----|
| Tab. 1 - Proprietà Fibra di Carbonio e Resina Epossidica  | 16 |
| Tab. 2 - Esempio Notazione di un laminato simmetrico con numero dispari di lamine e di un laminato non simmetrico con numero pari di lamine | 18 |
| Tab. 3 - Caratteristiche del pre-impregnato   | 23 |
| Tab. 4 - Proprietà meccaniche del pre-impregnato  | 24 |
| Tab. 5 - Dimensioni e configurazione dei provini testati  | 26 |
| Tab. 6 - Caratterizzazione dimensionale serie_13  | 39 |
| Tab. 7 - Caratterizzazione dimensionale serie_14  | 39 |
| Tab. 8 - Caratterizzazione dimensionale serie_8   | 40 |
| Tab. 9 - Caratterizzazione dimensionale serie_9   | 40 |
| Tab. 10 - Volume, densità e sezione resistente serie_13   | 41 |
| Tab. 11 - Volume, densità e sezione resistente serie_14   | 42 |
| Tab. 12 - Volume, densità e sezione resistente serie_8  | 42 |
| Tab. 13 - Volume, densità e sezione resistente serie_9  | 43 |
| Tab. 14 - Valori densità misurata e teorica a confronto   | 44 |
| Tab. 15 - Legenda: calcolo sezione resistente nominale per le diverse configurazioni  | 65 |
| Tab. 16 - Risultati prova statica per provini della serie_13  | 66 |
| Tab. 17 - Risultati prova statica per provini della serie_14  | 67 |
| Tab. 18 - Risultati prova statica per provini della serie_8   | 68 |
| Tab. 19 - Risultati prova statica per provini della serie_9   | 69 |
| Tab. 20 - Risultati prove di fatica su provini della serie_13   | 73 |
| Tab. 21 - Risultati prove di fatica su provini della serie_14   | 74 |
| Tab. 22 - Risultati prove di fatica su provini della serie_8  | 75 |
| Tab. 23 - Risultati prove di fatica su provini della serie_9  | 76 |
| Tab. 24 - Calcoli per lo svolgimento del Q-test di Dixon  | 78 |
| Tab. 25 - Calcoli per il Q-test per il provino 9_22   | 78 |
| Tab. 26 - Dimensioni e configurazione della serie_13A   | 89 |
| Tab. 27 - Caratterizzazione dimensionale serie_13A  | 90 |
| Tab. 28 - Volume, densità e sezione resistente serie_13A  | 91 |
| Tab. 29 - Risultati prova statica per provini della serie_13A   | 95 |
| Tab. 30 - Risultati prove di fatica su provini della serie_13A  | 97 |



## **Introduzione**

I materiali compositi, grazie alla combinazione delle proprietà dei singoli componenti di cui sono costituiti, in particolare la coesistenza di elevate caratteristiche meccaniche e pesi ridotti, rivestono da tempo un ruolo fondamentale nell'industria aeronautica e nel settore delle competizioni automobilistiche e motociclistiche. La possibilità di progettare i materiali in funzione della loro applicazione, unita alla riduzione dei costi di produzione, permette una crescente diffusione del loro utilizzo, e l'ampliamento delle applicazioni a moltissimi altri settori, sia per componenti di tipo strutturale, sia di tipo estetico.

La crescente diffusione dei materiali compositi ha reso necessario lo studio, sempre più approfondito, del comportamento e delle proprietà di tali materiali.

Nonostante la quantità di studi in merito, nell'ambito del comportamento a fatica dei compositi, non sono ancora presenti risultati attendibili per la previsione della resistenza e della vita a fatica in relazione ad un determinato tipo di sollecitazione; non almeno a livello dei materiali tradizionali.

L'obiettivo di questa tesi è indagare eventuali variazioni del comportamento a fatica di un laminato in CFRP in relazione al variare di parametri quali dimensioni e sequenza di impilamento delle ply.

Per tale scopo sono state realizzate delle prove per il calcolo del comportamento a fatica, in particolare prove di flessione in 3 punti, e si sono poi confrontati tra loro i risultati sperimentali e correlati al variare dei parametri di interesse.

L'attività è stata svolta in collaborazione con RI-BA Composites S.r.l. di Faenza, e con i laboratori dell'Università di Bologna, nella sede di Forlì.



# Capitolo 1 - Materiali compositi a matrice polimerica

I materiali compositi sono materiali costituiti dalla combinazione tridimensionale di almeno due componenti, tra loro differenti per forma, stato, composizione chimica e struttura.

Più precisamente sono materiali polifasici le cui fasi non possono essere trasformate le une nelle altre per mezzo di trattamenti termici.

La combinazione così ottenuta può vantare proprietà chimico-fisiche non riscontrabili nelle singole fasi che la compongono.

La maggior parte dei materiali compositi è formata da due componenti: un rinforzo, che ne determina le proprietà meccaniche, e una matrice, che ne determina le caratteristiche di applicazione.

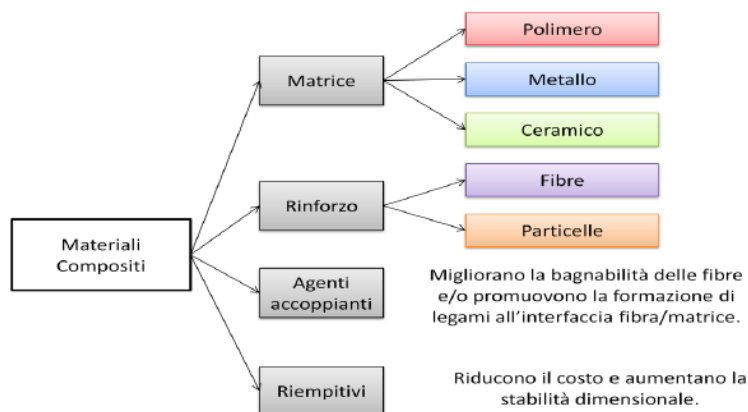


Figura 1 - Schema generale Materiali Compositi

## 1.1 - Rinforzo

Il rinforzo può essere utilizzato sotto forma di particelle o fibre, che a loro volta possono essere lunghe, unidirezionali o tessute, oppure corte, con orientamento casuale.

Ha la funzione principale di sostenere il carico, fornendo adeguata resistenza e rigidità.

Le fibre possono essere costituite da diversi materiali, quali vetro, carbonio, aramide, boro, ecc, e la scelta dipende dalla particolare applicazione oltre che dal tipo di interazione con la matrice.

In particolare le fibre di carbonio sono ottenute tramite pirolisi a partire principalmente da poliacrilonitrile (PAN), che dopo alcuni passaggi consente di ottenere puri filamenti di carbonio con diametro dell'ordine di grandezza della decina di micron. Questi vengono intrecciati a formare yarn, o raggruppati in fasci a formare tow, usati a loro volta per ottenere unidirezionali e tessuti.



Figura 3 - Tipologie di fibre

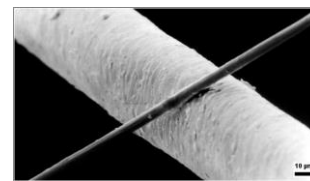


Figura 2 - Filamento di carbonio a confronto con capello umano

Riportati a titolo di esempio 3 diversi tessuti, i quali si differenziano per la percentuale trama-ordito (n° di fibre 90° rispetto a quelle a 0°), che determina se il tessuto sia bilanciato o sbilanciato, e per lo stile (percorso dei “fili” di ordito rispetto a quelli di trama):

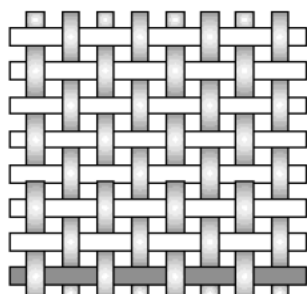


Figura 4a – Tessuto Plane

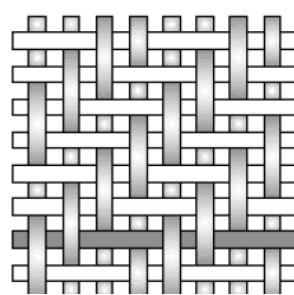


Figura 4b – Tessuto Twill

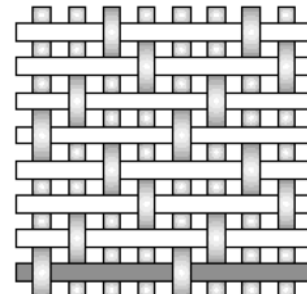


Figura 4c – Tessuto Satin



Ogni tipologia di tessuto presenta differenti caratteristiche, in base alle quali viene scelta per differenti componenti: stabilità, drappabilità, simmetria, bilanciamento e non ultime finitura superficiale ed estetica.

Le elevate caratteristiche meccaniche delle fibre di carbonio, in particolare il modulo e la resistenza, dipendono in parte dal precursore (PAN, pece, rayon) ed in parte dalle temperature differenti durante i processi di produzione dei filamenti (carbonizzazione, grafitizzazione, ...). Si distinguono infatti:

- HTS (High Tensile Strength): resistenza superiore a 4.000 MPa, modulo E fino a 250 GPa e allungamento a rottura attorno a 1,5-1,9%;
- HM (High Modulus): modulo tra 350 e 500 GPa, resistenza attorno a 2.000 Mpa, e allungamento di 0,5%;
- IM (Intermediate Modulus): resistenza simile alle HTS, modulo tra 250 e 350 GPa, e allungamento attorno a 1,5%.

## 1.2 - Matrice

La matrice viene utilizzata allo scopo di tenere legate le fibre, di distribuire il carico sul rinforzo, e dare inoltre una forma definita al composito.

Anche la matrice può avere diversa natura: metallica, ceramica o polimerica.

In particolare i materiali polimerici, con riferimento alle proprietà derivanti dalla conformazione strutturale delle molecole, e alla loro variazione di viscosità con la temperatura, si distinguono in:

- Termoplastici: dopo la polimerizzazione, l'aumento di T comporta una diminuzione della viscosità permettendo la reversibilità del processo di indurimento (possono tornare allo stato fluido);
- Termoindurenti: materiali plastici che si presentano sotto forma di resine prima di essere polimerizzati; durante il processo di reticolazione, per effetto dell'aumento di temperatura, la viscosità dapprima cala, per poi crescere rapidamente. Una volta raggiunto il punto di gelificazione, si sono creati legami all'interno delle catene polimeriche tali da rendere il processo irreversibile (l'aumento della T porta a rammollimento e al degrado del materiale);
- Elastomeri: possono essere sia termoindurenti che termoplastici, e la caratteristica principale è proprio quella di poter subire elevate deformazioni elastiche, tornando nella situazione iniziale a riposo.

### 1.3 – CFRP

I CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) sono materiali compositi costituiti da una matrice polimerica e da un rinforzo in fibra di carbonio.

L'utilizzo di questa tipologia di materiale è in aumento, in moltissime applicazioni, grazie alla caratteristica di abbinare elevate prestazioni e basse densità, ottenendo proprietà e caratteristiche meccaniche specifiche migliori rispetto ai materiali convenzionali.

Tra le resine termoindurenti, le più utilizzate come matrici di materiali compositi per impieghi strutturali in abbinamento alle fibre di carbonio, sono quelle epossidiche, grazie alle migliori proprietà meccaniche, alla buona adesione con le fibre e alla bassa contrazione durante il processo di reticolazione.

A titolo di esempio viene riportata una tabella che riassume le proprietà dei due componenti:

|   |            | Fibra di carbonio  | Resina epossidica                                     |
|---|------------|--|---|
| Densità [g/cm <sup>3</sup> ]                                | $\rho$     | 1,7 ÷ 2,1  | 1,2   |
| Tensione di rottura [MPa]                                   | $\sigma_r$ | 1500 ÷ 3500  | 85  |
| Modulo Elastico [GPa]                                       | $E_{xx}$   | 230 ÷ 520  | 4,9   |
| Tabella 1 – Proprietà Fibra di Carbonio e Resina Epossidica |            | Risultano poco resistenti a taglio e a T superiori a 500°C in presenza di ossigeno | Temperature di esercizio non superiori a 100° ÷ 200°C |

Le caratteristiche dei prodotti dipendono dalle proprietà dei singoli componenti (rinforzo e matrice), e dalla loro interazione: variano quindi in base alla quantità di fibra e matrice in esso contenute (percentuali in peso e in volume di rinforzo rispetto al totale del composito,  $M_f$  e  $V_f$ ).

Un altro importante fattore che determina proprietà e caratteristiche del prodotto è la tecnologia di produzione, scelta di volta in volta tenendo presente forma, dimensioni e prestazioni richieste dal componente finale.



Una delle tecnologie di produzione di CFRP consiste nella sovrapposizione a freddo di preimpregnati, ovvero semi-lavorati costituiti da strati di fibre unidirezionali o tessuti, impregnati di resina ad uno stadio intermedio di polimerizzazione: la stratificazione (lay-up) viene seguita da una fase di formatura in stampo e infine da una reticolazione controllata in autoclave. Il ciclo di cura viene eseguito a combinazioni di temperatura e pressione ottimali, differenti per ogni tipo di materiale, dopo aver eseguito un processo detto “sacco a vuoto”. Questa tecnologia permette di ottenere forme complesse, a fronte però di un basso livello di produttività.

Altre tecniche di produzione, in generale con produttività più alta ma utilizzabili solo per forme più semplici, sono ad esempio la pultrusione e il filament winding. La tecnologia del resin transfer moulding permette invece livelli di produttività elevati pure per forme complesse.

## 1.4 – Laminati

Si definisce laminato un materiale costituito da più strati, o lamine (layer) di materiale composito.

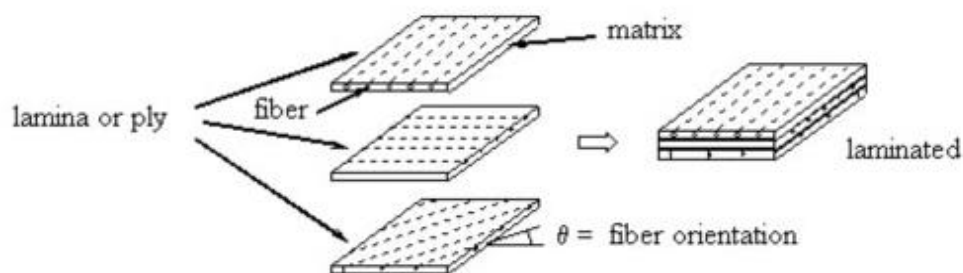


Figura 5 – Schema generale Laminato

I laminati vengono utilizzati, come materiali strutturali, laddove vi sia da un lato la necessità di elevate prestazioni meccaniche in termini di rigidità, resistenza, e dall'altro l'esigenza di limitare il peso.

L'orientamento delle fibre permette l'ottimizzazione del comportamento meccanico lungo una o più direzioni specifiche, motivo per cui, in fase di progettazione, si va ad individuare, in relazione alle caratteristiche ricercate nel componente finale, la sequenza di impilamento più adatta per ogni situazione.

La sequenza di laminazione viene identificata a partire dalla lamina inferiore: per ogni ply si indica l'orientamento, separato dal successivo mediante una barra obliqua; si utilizzano pedici per indicare il numero di lamine consecutive con identico orientamento. Allo scopo di limitare la distorsione dei pannelli, dovuta sia alla contrazione termica a seguito del ciclo di consolidamento, che all'applicazione di carichi esterni, è frequente il ricorso a sequenze di laminazione simmetriche rispetto al piano di mezzeria del laminato: in questo caso è necessario specificare soltanto la prima metà della sequenza di stratificazione; i laminati simmetrici sono identificati dal pedice "s" applicato alla parentesi quadra.

| n° lamina | orientamento | NOTAZIONE                            |
|-----------|--------------|--------------------------------------|
| 1         | 90°          | [90/45 <sub>2</sub> /0] <sub>s</sub> |
| 2         | 45°          |                                      |
| 3         | 45°          |                                      |
| 4         | 0°           |                                      |
| 5         | 45°          |                                      |
| 6         | 45°          |                                      |
| 7         | 90°          |                                      |

| n° lamina | orientamento | NOTAZIONE        |
|-----------|--------------|------------------|
| 1         | 90°          | [90/45/0/-45/90] |
| 2         | +45°         |                  |
| 3         | 0°           |                  |
| 4         | 0°           |                  |
| 5         | -45°         |                  |
| 6         | 90°          |                  |

Tabella 2 – Esempio Notazione di un laminato simmetrico con numero dispari di lamine (sopra) e di un laminato non simmetrico con numero pari di lamine (sotto)

## 1.5 – Comportamento a fatica nei compositi

A differenza dei materiali metallici, i materiali compositi sono materiali non omogenei e anisotropi anche a una scala di osservazione molto più grande di quella tipica della microstruttura dei materiali policristallini.

Una delle differenze fondamentali, rispetto ai materiali metallici, è la tendenza ad accumulare danno in modo diffuso e progressivo, piuttosto che a localizzarlo in una singola macro-frattura.

I meccanismi di danno, inoltre, sono molteplici: si può affermare che esistano 4 tipologie di danneggiamento ben riconoscibili e distinguibili nei materiali compositi:

- danneggiamento progressivo della matrice;
- danneggiamento dell'interfaccia fibra-matrice;
- rottura delle fibre a trazione e a compressione;
- fenomeni di delaminazione.

I primi tre meccanismi di danno sono di tipo intralaminare, ovvero avvengono all'interno dello spessore di una lamina, mentre l'ultimo è di tipo interlaminare ed è originato dalle componenti di sforzo agenti al di fuori del piano del laminato, ovvero gli sforzi interlaminari.

In dipendenza dalla sequenza di laminazione, dalla natura del materiale e dal tipo di processo produttivo, oltre che dalle condizioni ambientali e dal tipo di sollecitazione, i meccanismi di danno possono evolversi in maniera indipendente oppure simultanea, con eventuali interazioni reciproche, portando alla predominanza dell'uno rispetto all'altro.

In particolare le fratture per delaminazione possono avvenire secondo tre modalità di base, o secondo una combinazione delle stesse:

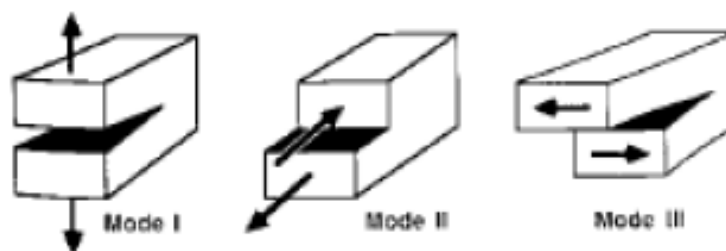


Figura 6 – Modalità di propagazione delle fratture interlaminari

Le delaminazioni di modo II e III sono promosse dagli sforzi di taglio interlaminare, mentre le delaminazioni in modo I sono innescate da sforzi normali interlaminari.

L'esecuzione di prove a fatica su provini in materiale composito provoca l'accumulo di danno, che evolve quindi secondo molteplici meccanismi: nelle sollecitazioni cicliche, la disomogeneità dello stato di sforzo e delle proprietà meccaniche a livello micro-strutturale, può nucleare le diverse tipologie di danneggiamento anche per livelli di sforzo inferiori a quelli corrispondenti all'attivazione dei meccanismi di danno in condizioni quasi-statiche.

Tale accumulo di danno porta ad una riduzione della resistenza e della rigidità residue, riscontrabile eventualmente interrompendo il test a fatica ed eseguendo una prova statica a rottura.

Oltre un certo livello di accumulo nella prova a fatica si ha il cedimento finale del campione, che generalmente avviene di schianto.

Analogamente a quanto avviene nei materiali metallici, è possibile costruire un diagramma di Wöhler, noti il numero di cicli a cui è stato sottoposto il campione e l'ampiezza dell'oscillazione di carico.

Questo tipo di analisi permette di individuare alcune tendenze nella caratterizzazione del comportamento a fatica dei compositi, che rimane tuttavia un fenomeno complesso.

Motivo per il quale è spesso richiesta una caratterizzazione differente per ogni sequenza di laminazione.

## **Capitolo 2 – Pianificazione delle prove sperimentali**

### **2.1 – Introduzione**

Come anticipato, lo scopo di questo lavoro di tesi, e di conseguenza della campagna di prove sperimentali, è la caratterizzazione del comportamento a fatica di laminati simmetrici realizzati in CFRP, tutti con identico materiale, ma differenti tra loro per dimensioni e sequenza di laminazione.

### **2.2 - Normativa di riferimento**

Al fine di realizzare uno studio che sia più aderente possibile a schemi e metodi di prova standardizzati, è stata effettuata una ricerca bibliografica all'interno delle normative di riferimento nel campo dei materiali compositi, ed in particolare riguardo standard e metodi inerenti prove di sforzo e sollecitazione sui laminati in CFRP.

Dalla ricerca è emersa l'assenza di una normativa unica di riferimento riguardante i test a fatica, in particolar modo test di flessione a fatica su campioni della tipologia trattata.

Tuttavia è sembrato corretto cercare un'impostazione di lavoro che si fondasse su indicazioni utili per realizzare prove confrontabili e ripetibili.

Questo riferimento è stato individuato nella normativa:

*ASTM - D2344/D2344M – 13*

*“Standard Test Method for Short-Beam Strength of Polymer Matrix Composite Materials and Their Laminates”*

Tale normativa rappresenta uno standard per i test di flessione a 3 punti statici, ma è stata applicata come riferimento:

- per la realizzazione dei campioni, in merito a geometria, dimensioni e sequenze di laminazione:

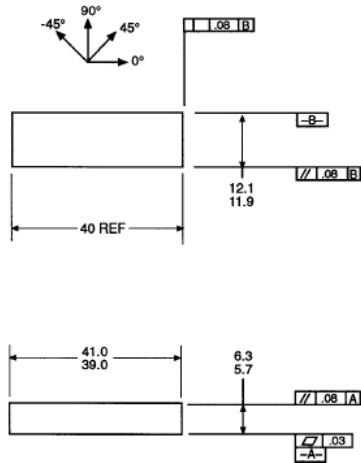


Figura 7 – specifiche del provino ad asse rettilineo come da Normativa di riferimento

La normativa stabilisce che i provini realizzati con dei tessuti devono seguire uno schema di laminazione in cui almeno il 10% delle fibre a 0° siano orientate nella direzione della lunghezza del provino.

Inoltre stabilisce anche che il laminato deve essere sia bilanciato che simmetrico.

Per tale motivo i provini sono stati realizzati seguendo uno schema di laminazione in cui tutte le ply hanno orientamento 0°/90°.

- per le attrezzature di prova utilizzate;
- per la predisposizione dei test, in particolare riguardo distanza e diametro dei cilindri di supporto e condizioni ambientali;

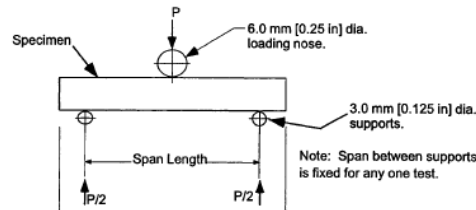


Figura 8 – specifiche delle attrezzature di prova per il provino ad asse rettilineo come da Normativa di riferimento

- per i parametri applicati, come velocità di avanzamento e condizioni di arresto della prova;

L'applicazione del carico è stata interrotta, come da normativa, se:

- si è riscontrata una caduta del 30% del carico applicato
- il campione si è spezzato in due parti
- la corsa della testa ha superato lo spessore nominale del campione.

La prova quasi-statica è condotta in controllo di deformazione, con una velocità di discesa dello spintore suggerita di 1 mm/min.

Il calcolo dell'*ILSS* viene fatto con la seguente formula, corrispondente allo sforzo di taglio massimo sulla sezione:

$$ILSS = 0,75 F/A$$

- per una parte del calcolo statistico.

## 2.3 - Progettazione dei test

Per la valutazione del comportamento a fatica, è stato scelto il test di Interlaminar Shear Strength (ILSS): questo tipo di prova consiste nel vincolare i provini con due appoggi nella parte inferiore, caricati in mezzeria con un cuneo solidale alla traversa mobile della macchina.

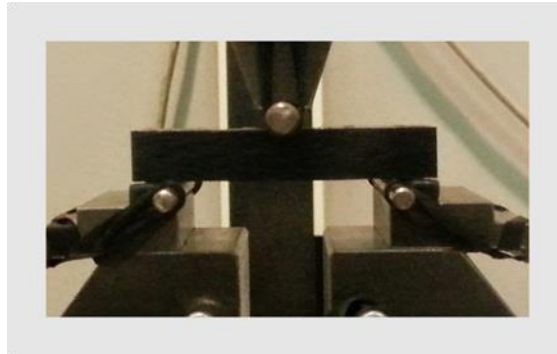


Figura 9 – Provino in posizione di prova

Eseguita in condizioni quasi-statiche, questa prova consente di ottenere la tensione di rottura (a flessione); dato a partire dal quale è possibile calcolare i parametri necessari per lo svolgimento dello stesso tipo di prova in condizioni dinamiche, ovvero con provini sottoposti a cicli di carico sinusoidali, con determinato rapporto di carico, carico massimo e frequenza. Test quest'ultimo che permette di ricavare il numero di cicli a rottura del campione.

### Materialie

La caratterizzazione è stata effettuata per campioni realizzati con:

- tessuto pre-impregnato SAATI CC802 ET445S 35%

| CARATTERISTICHE                                     | SAATI CC802 ET445S 35% |
|---|------------------------|
| Produttore  | SAATI Composites       |
| Sistema di impregnazione                            | ET445S                 |
| Tessuto   | 24K T700               |
| Tessitura   | Twill 2x2              |
| Contenuto in resina [%]                             | 35                     |
| Densità teorica [g/cm <sup>3</sup> ] <sup>[1]</sup> | 1,47                   |
| Grammatura [g/m <sup>2</sup> ]                      | 802                    |

Tabella 3 – Caratteristiche del pre-impregnato

$$[1]: \quad \rho_{th} = \frac{1}{\frac{\%_{rc}}{\rho_r} + \frac{\%_{fc}}{\rho_f}}$$

$\rho_{th}$  = densità teorica del laminato  
 $\%_{rc}$  = percentuale contenuto in resina  
 $\%_{fc}$  = percentuale contenuto in fibra  
 $\rho_r$  = densità della resina, tipicamente  $1,1 \frac{g}{cm^3}$   
 $\rho_f$  = densità della fibra, tipicamente  $1,8 \frac{g}{cm^3}$

**MECHANICAL PROPERTIES OF CC802 ET445S 35%  
24K T700 FIBRE, 2X2 TWILL FABRIC**

| Cured Material<br>Property     | Unit | Actual Values | Normalized |
|--------------------------------|------|---------------|------------|
|                                |      | Vf: 55.3%     | Vf: 60.0%  |
| Tensile Modulus 0°             | GPa  | 62.8          | 68.1       |
| Tensile Strength 0°            | MPa  | 1051          | 1140       |
| Poisson's ratio 0°             | -    | 0.08          | -          |
| Compressive Modulus 0°         | GPa  | 57.7          | 62.6       |
| Compressive Strength 0°        | MPa  | 546           | 593        |
| In plane shear Modulus         | GPa  | 4.38          | -          |
| In plane shear Strength*       | MPa  | 73.1          | -          |
| Interlaminar Shear<br>Strength | MPa  | 61.8          | -          |

(\*): at 5% calculated shear strain

Tabella 4 – Proprietà meccaniche del pre-impregnato

Provini

Per semplicità si è scelto di realizzare campioni ad asse rettilineo e piano, seguendo uno schema di laminazione in cui tutte le ply hanno orientamento 0°/90°.

Per quanto riguarda il dimensionamento, si è tenuto conto dei seguenti fattori:

- referimento alle proporzioni da Normativa ASTM - D2344:

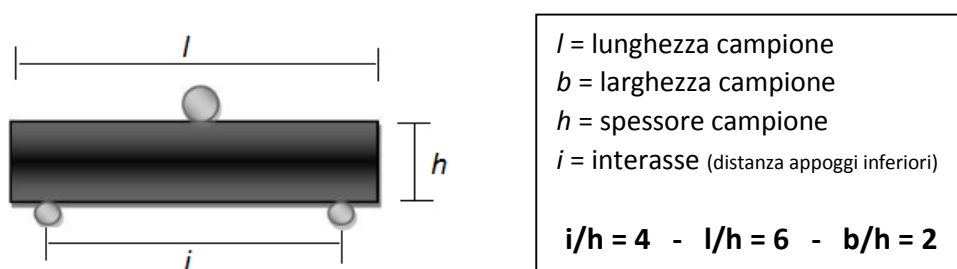


Figura 10 – Schema delle proporzioni nel test di flessione

- carico massimo applicabile dalla macchina disponibile per i test: ricerca di dimensioni tali che il campione possa rompersi a fatica statica (1 ciclo) a circa il 10% del carico massimo che può esercitare la macchina utilizzata, con conseguente vincolo sul valore del carico (P): 10 kN



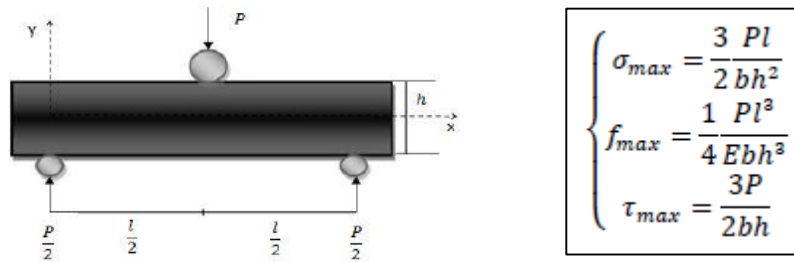


Figura 11 – Schema del carico nel test di flessione

- tensione di rottura: **1051 MPa** (scheda tecnica)
- la deformazione che il provino subisce durante la prova non deve essere eccessiva, in dipendenza dall'attrezzaggio utilizzato, con conseguente vincolo sulla freccia massima dei campioni sottoposti a flessione:  **$f_{max} = 10\% i$**
- modulo di young (E): **62.5 GPa** (scheda tecnica)
- interlaminar shear strength: **61.8 MPa** (scheda tecnica)
- necessità di diverse configurazioni: allo scopo di indagare differenze nel comportamento in relazione a diversi spessori e differenti sequenze di impilamento (in relazione al numero, non all'orientamento)

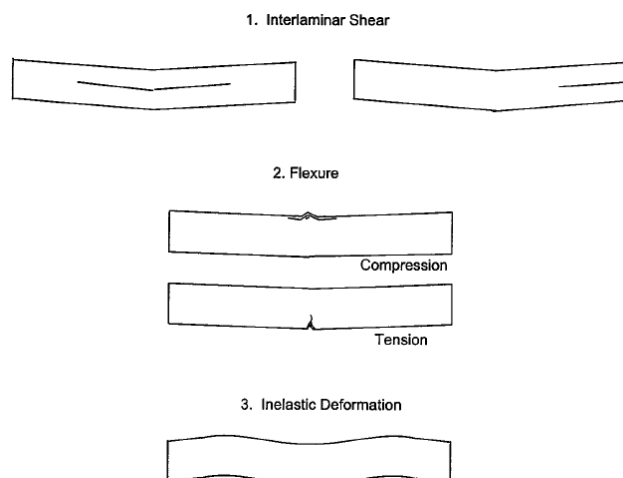


Figura 12 - Tipiche modalità di rottura nella prova per analisi dell'ILSS

Definendo:

- $\underline{h}$  → spessore del campione
- $h_\sigma$  → altezza dimensionata rispetto alla tensione di rottura
- $h_f$  → altezza dimensionata rispetto alla freccia massima che il provino raggiungerà durante la flessione
- $h_\tau$  → altezza dimensionata rispetto allo sforzo di taglio

$$\left\{ \begin{array}{l} h_\sigma = \sqrt{\frac{3 Pl}{2 b \sigma_{max}}} \\ h_f = \sqrt[3]{\frac{1 Pl^3}{4 E b f_{max}}} \\ h_\tau = \frac{3P}{2 b \tau_{max}} \end{array} \right.$$

affinché il provino non raggiunga il valore di freccia massima e non si verifichi frattura per trazione delle fibre, ma invece una rottura a taglio, dovrà risultare:

$$h_f < h_\sigma < \underline{h} < h_\tau$$

Ne consegue, noto il valore sperimentale del C.P.T. del materiale, pari a 0.77 mm, la seguente scelta delle configurazioni dei provini da testare:

|                                  | configurazione 1 |              | configurazione 2 |             |
|----------------------------------|------------------|--------------|------------------|-------------|
| lunghezza nominale<br>$l_0$ [mm] | 60               | 60           | 40               | 40          |
| larghezza nominale<br>$b_0$ [mm] | 20               | 20           | 13               | 13          |
| spessore nominale<br>$h_0$ [mm]  | 10,78            | 10,01        | 6,93             | 6,16        |
| n° ply                           | 14               | 13           | 9                | 8           |
| interasse $i$ [mm]               | 42               |              | 27               |             |
|                                  | serie 14-ply     | serie 13-ply | serie 9-ply      | serie 8-ply |

Tabella 5 – Dimensioni e configurazione dei provini testati

Per ogni tipologia di campione, ovvero per ognuna delle 4 differenti serie, la procedura di lavoro è la stessa, schematizzata in figura:

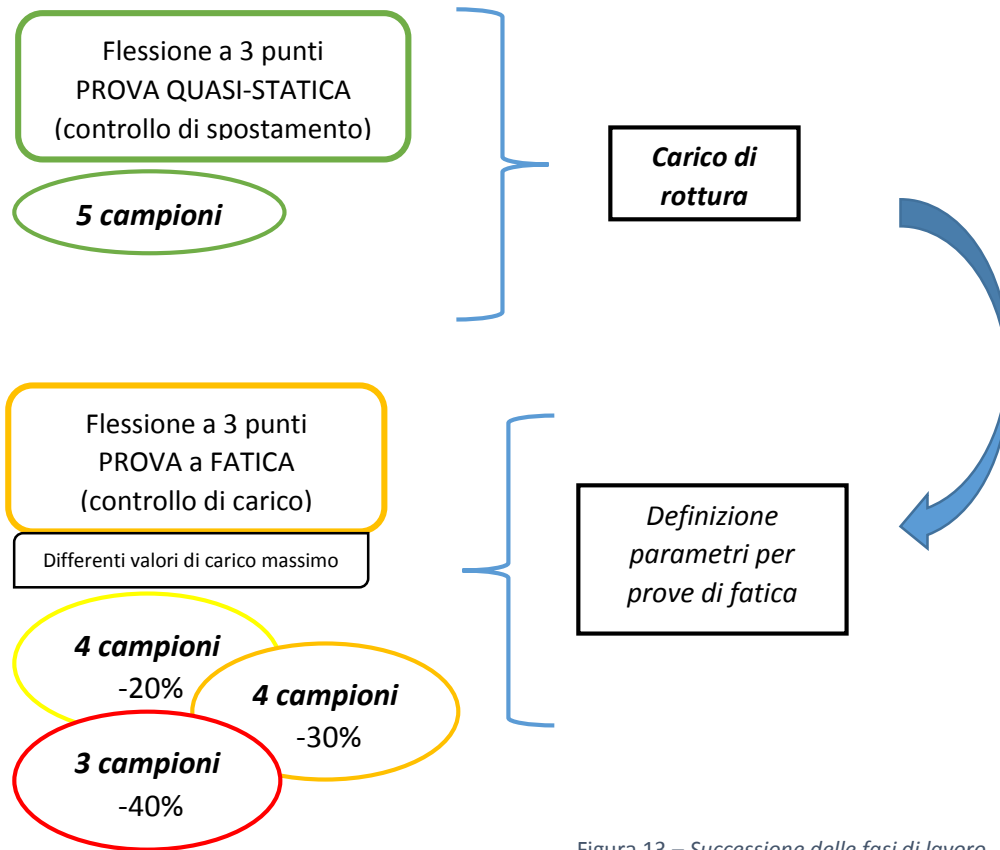


Figura 13 – Successione delle fasi di lavoro

Le prove sperimentali effettuate sono dunque su 4 tipologie di provini (diverso n° di ply), differenziati in 2 configurazioni (dimensioni).

Per ogni serie sono stati testati 16 campioni, per un totale di 64 test.



## Capitolo 3 - Realizzazione e caratterizzazione dei campioni

Come visto nel capitolo precedente, si è deciso di utilizzare per le prove sperimentali dei campioni ad asse piano e rettilineo, realizzati con materiale SAATI CC802 ET445S 35%.

Data l'impossibilità di realizzare direttamente i provini per motivi tecnologici, sono state create delle lastre dalle quali sono stati successivamente tagliati i provini.

Di seguito è riportato l'intero processo di realizzazione delle lastre, a partire dalla tecnica di laminazione manuale di pre-impregnati, fino alla successiva polimerizzazione in autoclave.

### 3.1 - Realizzazione dei campioni

#### Preparazione dei materiali e laminazione

I pre-impregnati vengono conservati in rotoli, all'interno di celle frigorifere alla temperatura di  $-18^{\circ}\text{C}$ , che permette di mantenere inalterate le caratteristiche meccaniche e di lavorabilità per un periodo che arriva anche a dodici mesi dalla produzione (conservati a temperatura ambiente il materiale sarebbe già alterato dopo 4 settimane).



Figura 14 (a, b) – Rotoli di materiale pre-impregnato conservati in cella frigorifera (a), singolo rotolo pronto per il taglio (b)

Una volta prelevato il rotolo dalla cella è opportuno attendere che il materiale torni gradualmente a temperatura ambiente, dopodiché si passa al taglio delle sagome: un processo in genere automatizzato (plotter utilizzati insieme a software per la digitalizzazione delle sagome e ottimizzazione delle composizioni), ma nel caso in

esame, per la realizzazione di una piastra piana, svolto manualmente.



Figura 15 (a, b, c) – Taglio manuale delle sagome

Prima di procedere con la vera e propria sovrapposizione degli strati, è necessario preparare gli stampi: per facilitare l'operazione di estrazione del laminato dopo il ciclo di cura in autoclave, si è applicato sulle superfici di stampo e controstampo un distaccante a rapida polimerizzazione.

Le superfici delle piastre in acciaio che saranno a contatto con le lamine vengono pulite e attraverso un panno, si va ad applicare il primo strato di agente distaccante; in pochi minuti il film di distaccante inizia ad evaporare, momento in cui si procede con la seconda applicazione.



Figura 16 – Stampo e Controstampo in acciaio inox dopo l'applicazione del distaccante

Dopo l'ultima (nel nostro caso 4-5 applicazioni), si attende almeno una trentina di minuti prima di utilizzare lo stampo.

L'utilizzo di un controstampo permetterà di ottenere una migliore compattazione delle ply, con conseguente maggiore uniformità di spessori, oltre che di avere una buona finitura su entrambe le superfici.

Una volta ultimata la preparazione degli stampi e delle sagome, si passa alla fase di laminazione vera e propria: si sovrappongono le sagome, in numero e orientamento stabiliti. Nel nostro caso, tutte le ply hanno orientamento  $0^{\circ}/90^{\circ}$ , e come visto si sono ottenute 4 differenti lastre con rispettivamente sovrapposizione di 8, 9, 13 e 14 strati.

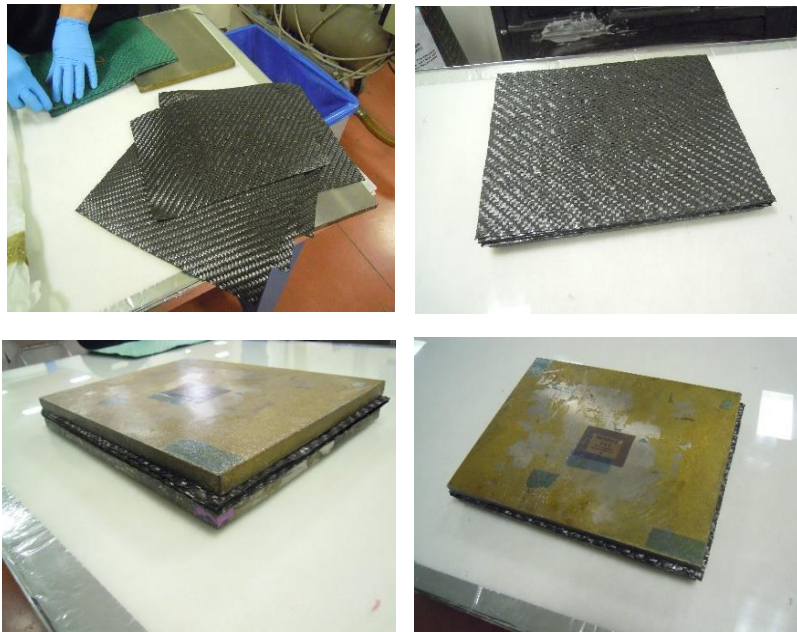


Figura 17 (a, b, c, d) – Laminazione manuale

L'applicazione di ogni singolo strato è stata effettuata manualmente, con l'utilizzo di una spatola in teflon per la stesura della ply, in modo da evitare grinze e stenderla in modo uniforme; le operazioni descritte sono state svolte in clean room, ovvero in ambiente con controllo di temperatura, umidità e particelle per  $m^3$ .

Una volta terminata la fase di laminazione, si è passati alla preparazione del “sacco a vuoto”, cioè l'insieme del sistema stampo-laminato-controstampo, e materiali ausiliari indispensabili per ottenere una buona compattazione in autoclave:

- *peel-ply*, pellicole di materiale distaccante



Figura 18 – *Peel-ply*

- *tessuto assorbitore-aeratore*, che facilita il processo di estrazione di aria dall'interno del sacco



Figura 19 – *Tessuto assorbitore-aeratore*

- *una valvola a baionetta*, che permette il collegamento alla linea del vuoto e l'estrazione dell'aria



Figura 20 (a, b, c) – *Valvola a baionetta*



- *il sacco*, in materiale ad alta deformabilità
- *l'elastomero*, per sigillare il sacco (nel nostro caso butilene)

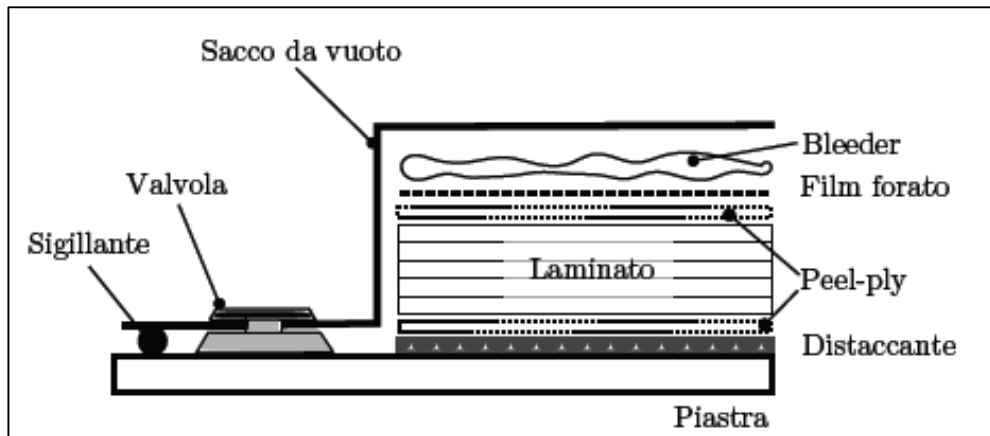


Figura 21 (a, b, c) – Schema di realizzazione del sacco (a), immagini del sacco a vuoto prima (b) e dopo (c) l'aspirazione di aria

L'aspirazione è fondamentale per ridurre la quantità d'aria intrappolata tra i diversi strati di materiale, oltre che per richiamare la resina a riempire meglio gli spazi tra le fibre; questo processo migliora le caratteristiche meccaniche del materiale e fornisce un ulteriore contributo alla compattazione del pezzo.

Il sacco deve essere perfettamente sigillato affinché il materiale venga sottoposto ad un ciclo di pressione e temperatura efficace; senza il sacco infatti, il pezzo non potrebbe subire alcuna compattazione perché non sarebbe soggetto a differenza di pressione.

## Ciclo di cura ed estrazione

A questo punto si passa alla fase di polimerizzazione: il sacco viene sottoposto a un ciclo in autoclave, che consiste in aumento di pressione e temperatura, opportunamente progettato in dipendenza dal materiale.

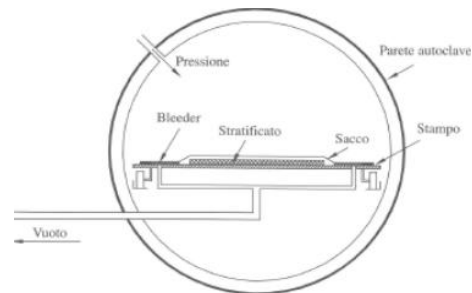


Figura 22 – Autoclave: immagine e schema di funzionamento

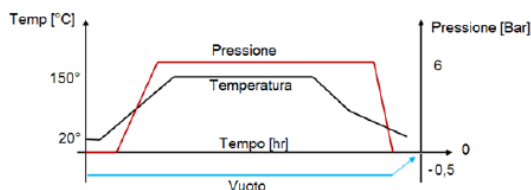


Figura 23 – Schema ciclo in autoclave a titolo di esempio

Terminato il ciclo in autoclave, che prende il nome di “cura” (dall’inglese *curing*), si passa alla fase di estrazione: si rimuove il sacco insieme a tutti i materiali ausiliari e con l’aiuto di un martello di gomma si separano stampo e controstampo dal laminato; infine si rimuovono eventuali bave di resina trafilate durante la polimerizzazione.



Figura 25 – Utensile per la rifilatura della lastra



Figura 24 – Laminato dopo la fase di estrazione

Avendo a disposizione solamente uno stampo e un controstampo con caratteristiche idonee al nostro scopo, si è ripetuto tutto il processo per ognuna delle quattro tipologie di provini soggetti alle prove sperimentali, ottenendo quindi quattro piastre.

## Taglio

Il taglio delle lastre è stato effettuato con attrezzature da officina, in particolare mediante sega circolare, con larghezza di taglio 3mm.



Figura 26 - Immagini della sega circolare utilizzata per il taglio (destra), e di alcuni provini (sinistra)

Per motivi economici non è stato utilizzato il taglio ad acqua, in considerazione anche del fatto che per spessori dell'ordine dei 10 mm è possibile ottenere comunque tagli puliti, senza delaminazioni lungo la linea di taglio.

Nonostante le attrezzature utilizzate non consentano precisioni molto elevate su dimensioni così ridotte, si sono ottenuti risultati piuttosto buoni.

Sono riportati gli schemi di taglio delle lastre, per ricavare campioni in configurazione 1 e in configurazione 2:

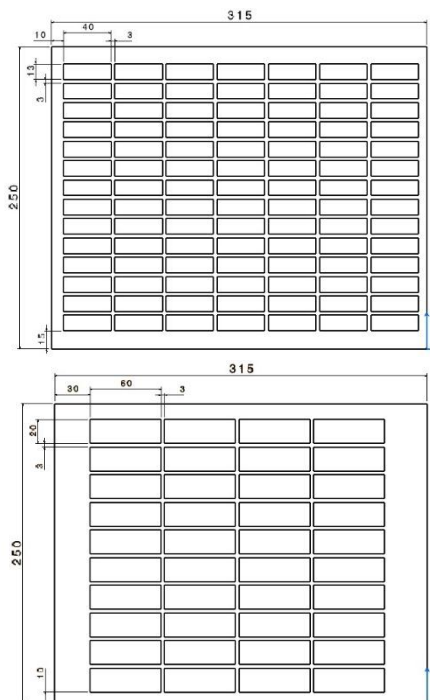


Figura 27 - Schemi di taglio piastra in config. 1 (inferiore) e config. 2 (superiore)

In fase di laminazione le ply sono state sovrapposte manualmente, quindi con una certa tolleranza di posizione, inoltre in fase di polimerizzazione il laminato può assestarsi e muoversi leggermente: il numero di campioni ottenuti non è per questo lo stesso previsto da disegno.

Serie 8 → 98 campioni  
Serie 9 → 91 campioni  
Serie 13 → 40 campioni  
Serie 14 → 50 campioni

Per il riconoscimento dei provini sono state utilizzate etichette riportanti il codice identificativo:

$xx - NN$

dove:

- $xx \rightarrow$   $n^\circ$  della serie - corrispondente al  $n^\circ$  di strati [8, 9, 13, 14]
- $NN \rightarrow$   $n^\circ$  progressivo a due cifre

Sono riportati alcune immagini dei provini realizzati:

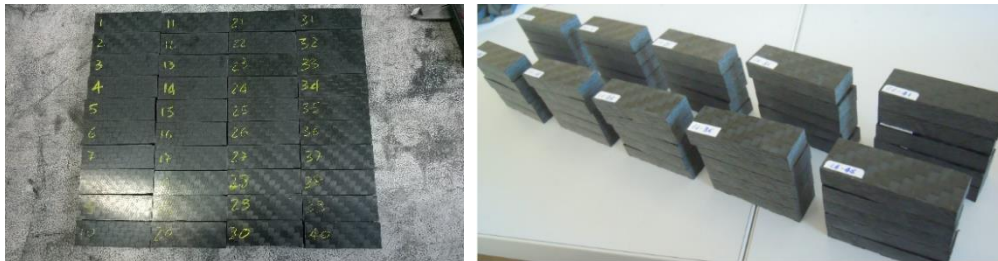


Figura 28 – Provini ricavati dalle lastre laminare



Figura 29 (a, b, c) – Provini 8\_26 e 14\_13 etichettati

Dopo aver ricavato tutti i campioni, si è proceduto alla loro caratterizzazione dimensionale, che ha permesso di selezionare quelli ottenuti con maggior precisione.

### 3.2 - Caratterizzazione dei campioni

#### Dimensioni e massa

La larghezza e lo spessore del campione sono state valutate prendendo tre sezioni differenti, in mezzeria e nelle vicinanze delle due estremità (vedi figura 30), mentre per la lunghezza si è presa un'unica misura.

Nelle tabelle seguenti viene riportato un solo valore anche per spessore e larghezza: questo corrisponde al valor medio delle misure sulle tre diverse sezioni del campione (le caratteristiche dimensionali sezione per sezione dei campioni utilizzati per le prove si possono trovare in Appendice A).

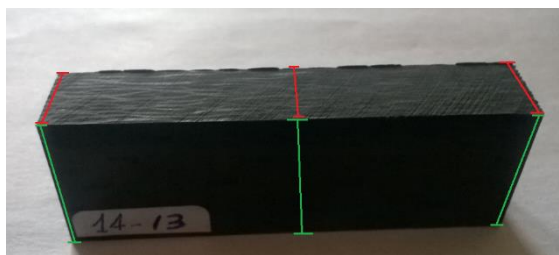


Figura 30 – Sezioni di misura spessore (Rosso) e larghezza (Verde)

Le misurazioni dimensionali sono state effettuate mediante *calibro digitale*, la massa è invece stata valutata tramite una *bilancia digitale* con sensibilità al millesimo di grammo:



Figura 31 – Calibro digitale (sinistra) e bilancia digitale (destra) utilizzati per le misurazioni dimensionali

Nelle tabelle seguenti (6, 7, 8, 9) vengono riportate le caratteristiche dimensionali e la massa di ogni campione utilizzato per le prove sperimentali, divise per sequenza di laminazione.

Si può notare che, nonostante il taglio sia di tipo manuale, è possibile raggiungere un buon livello di precisione e di ripetibilità.

Il massimo scostamento rispetto al valor medio, che troviamo sulla larghezza provino, non supera i tre punti percentuali; grazie all'utilizzo di stampo e controstampo invece, la variazione sullo spessore non supera su tutta la piastra, nel peggiore dei casi, gli 0.3 mm (in percentuale meno del 2%).

Le variazioni, misurate come errori percentuali, ottenute all'interno delle differenti serie sono inoltre paragonabili tra loro, e come mostrato da buoni valori della deviazione standard, la dispersione di dati attorno al valor medio è ridotta.

Equazione 1 –  
VALOR MEDIO

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)$$

Equazione 2 –  
DEVIAZIONE  
STANDARD

$$S_{n-1} = \sqrt{\frac{(\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2)}{(n - 1)}}$$

Equazione 3 –  
COEFFICIENTE di  
VARIAZIONE PERCENTUALE

$$CV = 100 \frac{S_{n-1}}{\bar{x}}$$

$\bar{x} \rightarrow$  *valor medio*

$S_{n-1} \rightarrow$  *deviazione standard*

$CV \rightarrow$  *coefficiente di variazione*

$n \rightarrow$  *numero di campioni per sequenza di laminazione*

$x_i \rightarrow$  *parametro misurato*

## CONFIGURAZIONE 1:

### Serie-13

| n° provino                  | lunghezza $l$ [mm] | larghezza <sup>1</sup> $b$ [mm] | spessore <sup>1</sup> $h$ [mm] | massa $m$ [g]  |
|-----------------------------|--------------------|---------------------------------|--------------------------------|----------------|
| 13ply-02                    | 60,14              | 20,08                           | 10,34                          | 19,139         |
| 13ply-03                    | 60,15              | 20,04                           | 10,32                          | 19,206         |
| 13ply-08                    | 60,19              | 20,11                           | 10,31                          | 19,180         |
| 13ply-10                    | 60,19              | 20,05                           | 10,30                          | 19,126         |
| 13ply-12                    | 60,04              | 20,08                           | 10,31                          | 19,141         |
| 13ply-14                    | 60,17              | 20,06                           | 10,32                          | 19,227         |
| 13ply-16                    | 60,14              | 20,06                           | 10,30                          | 19,167         |
| 13ply-26                    | 60,18              | 20,04                           | 10,30                          | 19,062         |
| 13ply-27                    | 60,11              | 20,13                           | 10,30                          | 19,112         |
| 13ply-28                    | 60,10              | 20,15                           | 10,30                          | 19,113         |
| 13ply-29                    | 60,11              | 20,00                           | 10,27                          | 19,015         |
| 13ply-34                    | 59,14              | 20,43                           | 10,29                          | 19,216         |
| 13ply-35                    | 59,22              | 20,41                           | 10,32                          | 19,170         |
| 13ply-37                    | 59,45              | 20,40                           | 10,29                          | 19,191         |
| 13ply-39                    | 59,63              | 20,43                           | 10,27                          | 19,299         |
| 13ply-40                    | 59,64              | 20,31                           | 10,29                          | 19,231         |
| <b>MIN</b>                  | 59,14              | 20,00                           | 10,27                          | 19,02          |
| <b>MAX</b>                  | 60,19              | 20,43                           | 10,34                          | 19,30          |
| <b>errore min %</b>         | -1,29%             | -0,84%                          | -0,34%                         | -0,77%         |
| <b>errore max %</b>         | 0,46%              | 1,26%                           | 0,34%                          | 0,71%          |
| <b>mean value</b>           | <b>59,91</b>       | <b>20,17</b>                    | <b>10,30</b>                   | <b>19,16</b>   |
| <b><math>s_{n-1}</math></b> | <b>0,36747</b>     | <b>0,16000</b>                  | <b>0,01805</b>                 | <b>0,06959</b> |
| <b>CV %</b>                 | <b>0,613%</b>      | <b>0,793%</b>                   | <b>0,175%</b>                  | <b>0,363%</b>  |

Tabella 6 – Caratterizzazione dimensionale serie\_13

## CONFIGURAZIONE 1:

### Serie-14

| n° provino                  | lunghezza $l$ [mm] | larghezza <sup>1</sup> $b$ [mm] | spessore <sup>1</sup> $h$ [mm] | massa $m$ [g]  |
|-----------------------------|--------------------|---------------------------------|--------------------------------|----------------|
| 14ply-02                    | 60,19              | 20,25                           | 11,01                          | 20,612         |
| 14ply-14                    | 59,76              | 20,11                           | 11,03                          | 20,473         |
| 14ply-32                    | 60,25              | 20,18                           | 11,06                          | 20,786         |
| 14ply-38                    | 59,77              | 20,25                           | 11,07                          | 20,674         |
| 14ply-50                    | 60,23              | 20,13                           | 11,05                          | 20,619         |
| 14ply-04                    | 60,05              | 20,12                           | 11,02                          | 20,482         |
| 14ply-18                    | 60,04              | 20,18                           | 11,28                          | 20,653         |
| 14ply-33                    | 60,23              | 20,06                           | 11,05                          | 20,680         |
| 14ply-48                    | 59,79              | 20,21                           | 11,06                          | 20,607         |
| 14ply-10                    | 59,80              | 20,14                           | 11,05                          | 20,420         |
| 14ply-11                    | 59,99              | 20,09                           | 11,04                          | 20,518         |
| 14ply-25                    | 60,20              | 20,15                           | 11,06                          | 20,649         |
| 14ply-46                    | 59,66              | 20,07                           | 11,06                          | 20,424         |
| 14ply-20                    | 60,08              | 20,14                           | 11,06                          | 20,618         |
| 14ply-24                    | 60,38              | 20,16                           | 11,06                          | 20,652         |
| 14ply-44                    | 59,19              | 19,99                           | 11,08                          | 20,250         |
| <b>MIN</b>                  | 59,19              | 19,99                           | 11,01                          | 20,25          |
| <b>MAX</b>                  | 60,38              | 20,25                           | 11,28                          | 20,79          |
| <b>errore min %</b>         | -1,31%             | -0,76%                          | -0,47%                         | -1,55%         |
| <b>errore max %</b>         | 0,67%              | 0,55%                           | 1,91%                          | 1,05%          |
| <b>mean value</b>           | <b>59,98</b>       | <b>20,14</b>                    | <b>11,07</b>                   | <b>20,57</b>   |
| <b><math>s_{n-1}</math></b> | <b>0,30069</b>     | <b>0,06817</b>                  | <b>0,05902</b>                 | <b>0,13250</b> |
| <b>CV %</b>                 | <b>0,501%</b>      | <b>0,338%</b>                   | <b>0,533%</b>                  | <b>0,644%</b>  |

Tabella 7 – Caratterizzazione dimensionale serie\_14

## CONFIGURAZIONE 2:

### Serie-8

| n° provino                  | lunghezza $l$ [mm] | larghezza <sup>1</sup> $b$ [mm] | spessore <sup>1</sup> $h$ [mm] | massa $m$ [g]  |
|-----------------------------|--------------------|---------------------------------|--------------------------------|----------------|
| 8ply-01                     | 40,23              | 13,40                           | 6,46                           | 5,269          |
| 8ply-33                     | 40,47              | 13,52                           | 6,42                           | 5,393          |
| 8ply-55                     | 40,13              | 13,51                           | 6,35                           | 5,332          |
| 8ply-78                     | 40,39              | 13,34                           | 6,38                           | 5,306          |
| 8ply-98                     | 39,98              | 13,44                           | 6,33                           | 5,248          |
| 8ply-03                     | 40,10              | 13,43                           | 6,40                           | 5,258          |
| 8ply-25                     | 40,29              | 13,26                           | 6,41                           | 5,243          |
| 8ply-51                     | 40,51              | 13,57                           | 6,39                           | 5,421          |
| 8ply-75                     | 40,28              | 13,46                           | 6,42                           | 5,298          |
| 8ply-15                     | 40,08              | 13,13                           | 6,40                           | 5,123          |
| 8ply-66                     | 40,51              | 13,42                           | 6,37                           | 5,318          |
| 8ply-91                     | 40,43              | 13,44                           | 6,38                           | 5,329          |
| 8ply-22                     | 40,49              | 13,33                           | 6,38                           | 5,402          |
| 8ply-12                     | 40,11              | 13,42                           | 6,38                           | 5,285          |
| 8ply-54                     | 40,45              | 13,53                           | 6,40                           | 5,377          |
| 8ply-77                     | 40,38              | 13,36                           | 6,42                           | 5,307          |
| <b>MIN</b>                  | <b>39,98</b>       | <b>13,13</b>                    | <b>6,33</b>                    | <b>5,12</b>    |
| <b>MAX</b>                  | <b>40,51</b>       | <b>13,57</b>                    | <b>6,46</b>                    | <b>5,42</b>    |
| <b>errore min %</b>         | <b>-0,80%</b>      | <b>-2,09%</b>                   | <b>-0,94%</b>                  | <b>-3,46%</b>  |
| <b>errore max %</b>         | <b>0,52%</b>       | <b>1,20%</b>                    | <b>0,99%</b>                   | <b>2,15%</b>   |
| <b>mean value</b>           | <b>40,30</b>       | <b>13,41</b>                    | <b>6,39</b>                    | <b>5,31</b>    |
| <b><math>s_{n-1}</math></b> | <b>0,17668</b>     | <b>0,11065</b>                  | <b>0,02893</b>                 | <b>0,07366</b> |
| <b>CV %</b>                 | <b>0,438%</b>      | <b>0,825%</b>                   | <b>0,453%</b>                  | <b>1,388%</b>  |

Tabella 8 – Caratterizzazione dimensionale serie\_8

## CONFIGURAZIONE 2:

### Serie-9

| n° provino                  | lunghezza $l$ [mm] | larghezza <sup>1</sup> $b$ [mm] | spessore <sup>1</sup> $h$ [mm] | massa $m$ [g]  |
|-----------------------------|--------------------|---------------------------------|--------------------------------|----------------|
| 9ply-09                     | 39,98              | 13,16                           | 7,23                           | 5,782          |
| 9ply-10                     | 40,08              | 13,12                           | 7,21                           | 5,735          |
| 9ply-11                     | 40,18              | 13,19                           | 7,21                           | 5,770          |
| 9ply-12                     | 40,07              | 13,12                           | 7,20                           | 5,800          |
| 9ply-13                     | 40,16              | 13,09                           | 7,21                           | 5,743          |
| 9ply-14                     | 40,09              | 13,19                           | 7,15                           | 5,770          |
| 9ply-16                     | 40,19              | 13,49                           | 7,16                           | 5,972          |
| 9ply-24                     | 40,56              | 12,97                           | 7,09                           | 5,79           |
| 9ply-17                     | 40,91              | 13,04                           | 7,17                           | 5,831          |
| 9ply-18                     | 40,17              | 13,11                           | 7,16                           | 5,792          |
| 9ply-19                     | 40,13              | 12,95                           | 7,15                           | 5,689          |
| 9ply-23                     | 40,15              | 13,11                           | 7,14                           | 5,788          |
| 9ply-20                     | 40,20              | 13,43                           | 7,19                           | 5,899          |
| 9ply-21                     | 40,11              | 13,29                           | 7,16                           | 5,881          |
| 9ply-22                     | 40,15              | 12,91                           | 7,16                           | 5,699          |
| <b>MIN</b>                  | <b>39,98</b>       | <b>12,91</b>                    | <b>7,09</b>                    | <b>5,69</b>    |
| <b>MAX</b>                  | <b>40,91</b>       | <b>13,49</b>                    | <b>7,23</b>                    | <b>5,97</b>    |
| <b>errore min %</b>         | <b>-0,57%</b>      | <b>-1,79%</b>                   | <b>-1,15%</b>                  | <b>-1,85%</b>  |
| <b>errore max %</b>         | <b>1,74%</b>       | <b>2,63%</b>                    | <b>0,80%</b>                   | <b>3,04%</b>   |
| <b>mean value</b>           | <b>40,21</b>       | <b>13,14</b>                    | <b>7,17</b>                    | <b>5,80</b>    |
| <b><math>s_{n-1}</math></b> | <b>0,23074</b>     | <b>0,16195</b>                  | <b>0,03595</b>                 | <b>0,07517</b> |
| <b>CV %</b>                 | <b>0,574%</b>      | <b>1,232%</b>                   | <b>0,501%</b>                  | <b>1,297%</b>  |

Tabella 9 – Caratterizzazione dimensionale seri\_9



## Volume e densità

A partire dalle misure dimensionali e dalla massa si ricavano per ogni provino i valori reali di volume e densità; nelle tabelle seguenti (10, 11, 12, 13) sono riportati pure i valori della sezione resistente, che risulteranno utili in seguito per il calcolo delle tensioni.

### **CONFIGURAZIONE 1:**

#### **Serie-13**

| n° provino                  | volume V [cm <sup>3</sup> ] | densità $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ] | sezione resistente A [mm <sup>2</sup> ] |
|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|---|
| 13ply-02                    | 12,5                        | 1,5332                              | 207,56                                  |
| 13ply-03                    | 12,4                        | 1,5437                              | 206,85                                  |
| 13ply-08                    | 12,5                        | 1,5367                              | 207,37                                  |
| 13ply-10                    | 12,4                        | 1,5384                              | 206,55                                  |
| 13ply-12                    | 12,4                        | 1,5402                              | 206,99                                  |
| 13ply-14                    | 12,5                        | 1,5440                              | 206,95                                  |
| 13ply-16                    | 12,4                        | 1,5427                              | 206,59                                  |
| 13ply-26                    | 12,4                        | 1,5353                              | 206,31                                  |
| 13ply-27                    | 12,5                        | 1,5332                              | 207,37                                  |
| 13ply-28                    | 12,5                        | 1,5325                              | 207,51                                  |
| 13ply-29                    | 12,3                        | 1,5398                              | 205,43                                  |
| 13ply-34                    | 12,4                        | 1,5454                              | 210,26                                  |
| 13ply-35                    | 12,5                        | 1,5376                              | 210,53                                  |
| 13ply-37                    | 12,5                        | 1,5380                              | 209,88                                  |
| 13ply-39                    | 12,5                        | 1,5433                              | 209,71                                  |
| 13ply-40                    | 12,5                        | 1,5427                              | 209,02                                  |
| <b>MIN</b>                  | <b>12,35</b>                | <b>1,53</b>                         | <b>205,43</b>                           |
| <b>MAX</b>                  | <b>12,51</b>                | <b>1,55</b>                         | <b>210,53</b>                           |
| <b>errore min %</b>         | <b>-0,81%</b>               | <b>-0,43%</b>                       | <b>-1,14%</b>                           |
| <b>errore max %</b>         | <b>0,45%</b>                | <b>0,40%</b>                        | <b>1,31%</b>                            |
| <b>mean value</b>           | <b>12,45</b>                | <b>1,54</b>                         | <b>207,81</b>                           |
| <b><math>s_{n-1}</math></b> | <b>0,03684</b>              | <b>0,00420</b>                      | <b>1,56283</b>                          |
| <b>CV %</b>                 | <b>0,296%</b>               | <b>0,273%</b>                       | <b>0,752%</b>                           |

Tabella 10 – Volume, densità e sezione resistente per provini della serie\_13

## CONFIGURAZIONE 1:

### Serie-14

| n° provino             | volume V [cm3] | densità ρ [g/cm3] | sezione resistente A [mm2] |
|------------------------|----------------|-------------------|----------------------------|
| 14ply-02               | 13,4           | 1,5355            | 223,02                     |
| 14ply-14               | 13,3           | 1,5438            | 221,92                     |
| 14ply-32               | 13,4           | 1,5465            | 223,09                     |
| 14ply-38               | 13,4           | 1,5437            | 224,06                     |
| 14ply-50               | 13,4           | 1,5383            | 222,54                     |
| 14ply-04               | 13,3           | 1,5391            | 221,62                     |
| 14ply-18               | 13,7           | 1,5114            | 227,60                     |
| 14ply-33               | 13,4           | 1,5487            | 221,70                     |
| 14ply-48               | 13,4           | 1,5419            | 223,52                     |
| 14ply-10               | 13,3           | 1,5339            | 222,61                     |
| 14ply-11               | 13,3           | 1,5421            | 221,79                     |
| 14ply-25               | 13,4           | 1,5384            | 222,96                     |
| 14ply-46               | 13,2           | 1,5415            | 222,08                     |
| 14ply-20               | 13,4           | 1,5399            | 222,85                     |
| 14ply-24               | 13,5           | 1,5338            | 223,00                     |
| 14ply-44               | 13,1           | 1,5449            | 221,45                     |
| <b>MIN</b>             | <b>13,11</b>   | <b>1,51</b>       | <b>221,45</b>              |
| <b>MAX</b>             | <b>13,67</b>   | <b>1,55</b>       | <b>227,60</b>              |
| <b>errore min %</b>    | <b>-1,94%</b>  | <b>-1,79%</b>     | <b>-0,63%</b>              |
| <b>errore max %</b>    | <b>2,23%</b>   | <b>0,63%</b>      | <b>2,13%</b>               |
| <b>mean value</b>      | <b>13,37</b>   | <b>1,54</b>       | <b>222,86</b>              |
| <b>s<sub>n-1</sub></b> | <b>0,11979</b> | <b>0,00850</b>    | <b>1,46372</b>             |
| <b>CV %</b>            | <b>0,896%</b>  | <b>0,553%</b>     | <b>0,657%</b>              |

Tabella 11 – Volume, densità e sezione resistente per provini della serie\_14

## CONFIGURAZIONE 2:

### Serie-8

| n° provino          | volume V [cm3] | densità ρ [g/cm3] | sezione resistente A [mm2] |
|---------------------|----------------|-------------------|----------------------------|
| 8ply-01             | 3,5            | 1,5142            | 86,50                      |
| 8ply-33             | 3,5            | 1,5361            | 86,75                      |
| 8ply-55             | 3,4            | 1,5476            | 85,85                      |
| 8ply-78             | 3,4            | 1,5431            | 85,13                      |
| 8ply-98             | 3,4            | 1,5417            | 85,14                      |
| 8ply-03             | 3,4            | 1,5255            | 85,95                      |
| 8ply-25             | 3,4            | 1,5318            | 84,95                      |
| 8ply-51             | 3,5            | 1,5441            | 86,67                      |
| 8ply-75             | 3,5            | 1,5217            | 86,43                      |
| 8ply-15             | 3,4            | 1,5219            | 83,99                      |
| 8ply-66             | 3,5            | 1,5352            | 85,51                      |
| 8ply-91             | 3,5            | 1,5380            | 85,70                      |
| 8ply-22             | 3,4            | 1,5683            | 85,07                      |
| 8ply-12             | 3,4            | 1,5385            | 85,64                      |
| 8ply-54             | 3,5            | 1,5343            | 86,64                      |
| 8ply-77             | 3,5            | 1,5323            | 85,77                      |
| <b>MIN</b>          | <b>3,37</b>    | <b>1,51</b>       | <b>83,99</b>               |
| <b>MAX</b>          | <b>3,51</b>    | <b>1,57</b>       | <b>86,75</b>               |
| <b>errore min %</b> | <b>-2,57%</b>  | <b>-1,41%</b>     | <b>-2,03%</b>              |
| <b>errore max %</b> | <b>1,61%</b>   | <b>2,11%</b>      | <b>1,19%</b>               |
| <b>mean value</b>   | <b>3,46</b>    | <b>1,54</b>       | <b>85,73</b>               |
| <b>sn-1</b>         | <b>0,03893</b> | <b>0,01255</b>    | <b>0,76326</b>             |
| <b>CV %</b>         | <b>1,127%</b>  | <b>0,817%</b>     | <b>0,890%</b>              |

Tabella 12 – Volume, densità e sezione resistente per provini della serie\_8

## CONFIGURAZIONE 2:

### Serie-9

| n° provino             | volume V [cm3] | densità ρ [g/cm3] | sezione resistente A [mm2] |
|------------------------|----------------|-------------------|----------------------------|
| 9ply-09                | 3,8            | 1,5200            | 95,15                      |
| 9ply-10                | 3,8            | 1,5126            | 94,60                      |
| 9ply-11                | 3,8            | 1,5100            | 95,10                      |
| 9ply-12                | 3,8            | 1,5323            | 94,46                      |
| 9ply-13                | 3,8            | 1,5152            | 94,38                      |
| 9ply-14                | 3,8            | 1,5261            | 94,31                      |
| 9ply-16                | 3,9            | 1,5384            | 96,59                      |
| 9ply-24                | 3,7            | 1,5524            | 91,96                      |
| 9ply-17                | 3,8            | 1,5245            | 93,50                      |
| 9ply-18                | 3,8            | 1,5361            | 93,87                      |
| 9ply-19                | 3,7            | 1,5311            | 92,59                      |
| 9ply-23                | 3,8            | 1,5401            | 93,61                      |
| 9ply-20                | 3,9            | 1,5197            | 96,56                      |
| 9ply-21                | 3,8            | 1,5409            | 95,16                      |
| 9ply-22                | 3,7            | 1,5356            | 92,44                      |
| <b>MIN</b>             | <b>3,71</b>    | <b>1,51</b>       | <b>91,96</b>               |
| <b>MAX</b>             | <b>3,88</b>    | <b>1,55</b>       | <b>96,59</b>               |
| <b>errore min %</b>    | <b>-2,10%</b>  | <b>-1,24%</b>     | <b>-2,47%</b>              |
| <b>errore max %</b>    | <b>2,40%</b>   | <b>1,53%</b>      | <b>2,44%</b>               |
| <b>mean value</b>      | <b>3,79</b>    | <b>1,53</b>       | <b>94,28</b>               |
| <b>s<sub>n-1</sub></b> | <b>0,05126</b> | <b>0,01202</b>    | <b>1,35628</b>             |
| <b>CV %</b>            | <b>1,352%</b>  | <b>0,786%</b>     | <b>1,439%</b>              |

Tabella 13 – Volume, densità e sezione resistente per provini della serie\_9

E' possibile confrontare i valori della densità ottenuti tramite le misure, con il valore teorico ottenuto utilizzando dati ricavati dalla scheda tecnica e la formula seguente:

Equazione 3 – CALCOLO  
DELLA DENSITA' TEORICA

$$\rho_{th} = \frac{1}{\frac{\%_{rc}}{\rho_r} + \frac{\%_{fc}}{\rho_f}}$$

$\rho_{th}$  = densità teorica del laminato

$\%_{rc}$  → percentuale contenuto in resina → 35%

$\%_{fc}$  → percentuale contenuto in fibra → 65%

$\rho_r$  → densità della resina → 1,1 g/cm<sup>3</sup>

$\rho_f$  → densità della fibra → 1,8 g/cm<sup>3</sup>

Si ottengono i due valori seguenti:

| <i>densità <math>\rho</math> [g/cm<sup>3</sup>]</i> |              | <i>densità teorica <math>\rho_{th}</math> [g/cm<sup>3</sup>]</i> |              |
|---|--------------|--|--------------|
| MIN   | 1,510        |  |              |
| MAX   | 1,568        |  |              |
| errore min %  | -1,71%       |  |              |
| errore max %  | 2,08%        |  |              |
| <i>mean value</i>                                   | <b>1,536</b> |  | <b>1,472</b> |
| <i>s<sub>n-1</sub></i>                              | 0,00998      |  |              |
| CV %  | 0,650%       |  |              |

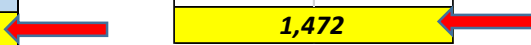


Tabella 14 – Valori densità misurata e teorica a confronto

Si può ipotizzare che la differenza tra i due valori (intorno al 4%), possa essere imputabile al fatto che la densità di ciascun provino è stata calcolata in modo indiretto come rapporto tra massa e volume del singolo esemplare, considerandone le dimensioni medie.

In essa sono perciò contenuti gli errori dovuti alle imprecisioni nel taglio e agli strumenti di misura, oltre allo squeezing non uniforme. Inoltre i valori utilizzati per il calcolo teorico non possono che essere approssimati.

## Caratterizzazione tramite camera digitale e microscopio ottico

Allo scopo di verificare il corretto posizionamento delle ply, e di ottenere immagini di provini intatti con le quali poter effettuare confronti una volta effettuati i test, si è deciso di utilizzare una camera digitale e microscopio ottico, a disposizione nel laboratorio hangar dell'università.

Per ottenere immagini nitide, è stato necessario lucidare la superficie dei provini scelti per la caratterizzazione al microscopio.

L'operazione di lucidatura è stata effettuata in due passaggi, tramite una *levigatrice orbitale*:



Figura 32 – Levigatrice orbitale  
(disco con carta abrasiva)

1. Lavorazione tramite dischi abrasivi a differenti granulometrie, in modo da ridurre progressivamente i difetti introdotti durante il taglio con sega circolare:

Disco con carta abrasiva grana grossa P80

Disco con carta abrasiva grana grossa P180

Disco con carta abrasiva grana media P320

Disco con carta abrasiva grana media P600

Disco con carta abrasiva grana fine P1200



2. Lavorazione tramite panno per lucidatura imbevuto di allumina, in modo da rendere omogenea e quindi meglio osservabile la superficie del provino

Disco con panno per lucidatura imbevuto di ossido di allumina  $3\pm 1 \mu\text{m}$



Disco con panno per lucidatura imbevuto di ossido di allumina  $0.05 \mu\text{m}$



Figura 33 – Levigatrice orbitale  
(disco con panno per lucidatura)

Il liquido lubrificante e refrigerante è in entrambi i casi acqua.

Una volta effettuata l'operazione di lucidatura, si è passati all'osservazione e all'importazione delle immagini tramite la camera digitale *Moticam 3*, in grado di catturare immagini a diversi ingrandimenti, con e senza l'ausilio di un microscopio ottico:



Figura 35 – *Microscopio ottico*



Figura 34 – *Camera digitale – Moticam 3*



Figura 36 – *Dispositivo di illuminazione utilizzato per la messa a fuoco*

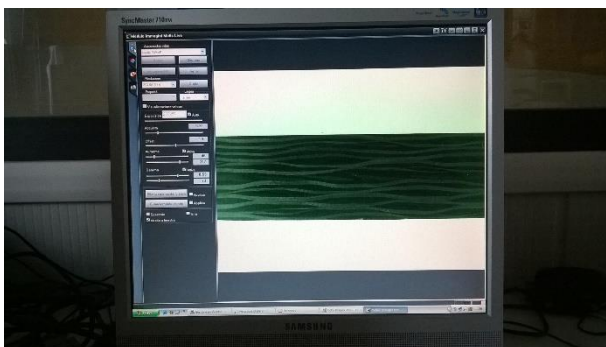


Figura 37 – *Messa a fuoco provini intatti prima delle prove*

Tramite lucidatura e lavoro di messa a fuoco è stato possibile evidenziare il contrasto tra fibra e matrice, osservare quindi la disposizione dei layer e l'assenza di difetti dovuti alle lavorazioni.

Riportate di seguito le immagini ottenute per alcuni provini appartenenti a ciascuna configurazione:

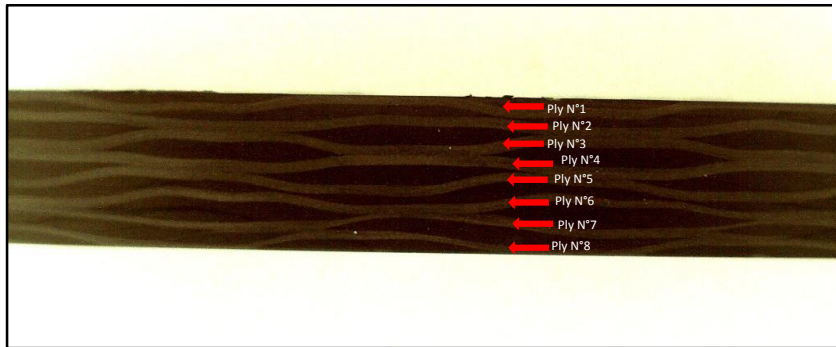


Figura 38 -  
Provino 8 05

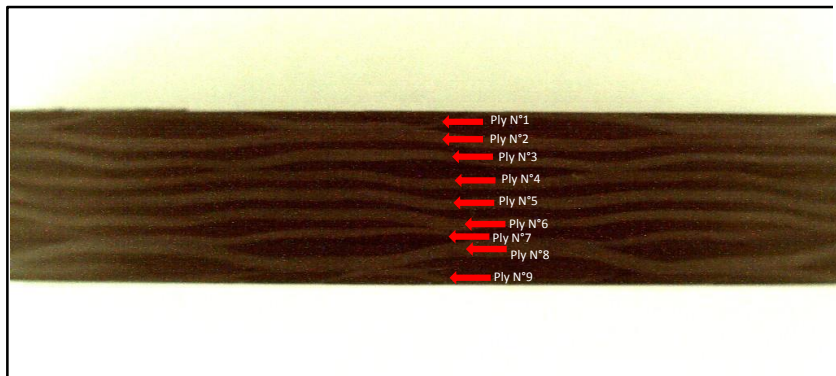


Figura 39 -  
Provino 9 47

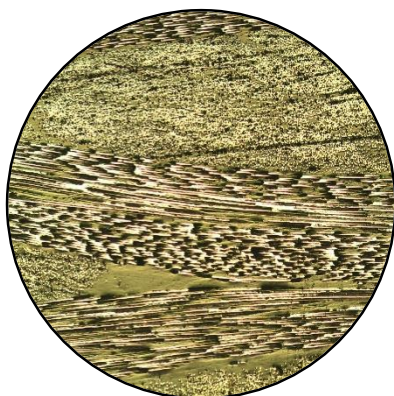


Figura 41 – Particolare al  
microscopio, INGRANDIMENTO  
5x\_Provino intatto 8\_09

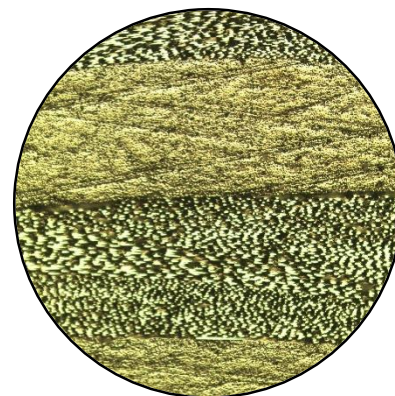


Figura 40 – Particolare al  
microscopio, INGRANDIMENTO  
5x Provino intatto 9 05

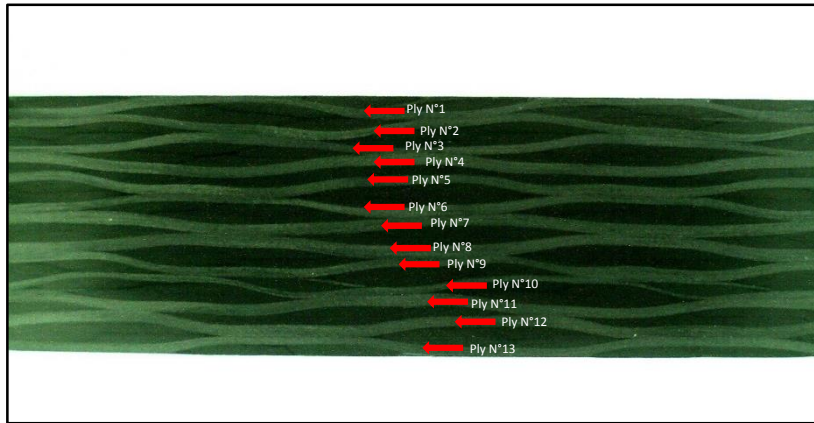


Figura 42 -  
Provino 13 18

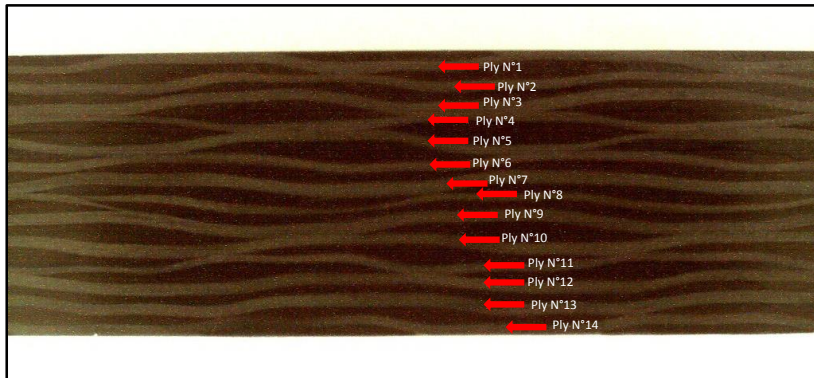


Figura 43 -  
Provino 14 23

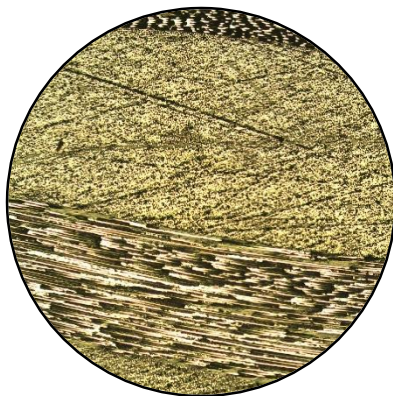


Figura 44 – Particolare al  
microscopio, INGRANDIMENTO  
5x Provino intatto 13 18

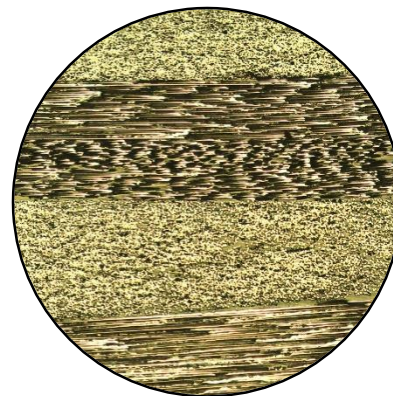


Figura 45 – Particolare al  
microscopio, INGRANDIMENTO  
5x Provino intatto 14 06



## Capitolo 4 - Strumenti e procedura dei test

Tutte le prove sono state condotte a temperatura e umidità ambiente, presso i laboratori dell'Università di Bologna, sede di Forlì.

### 4.1 - Attrezzatura sperimentale

La macchina utilizzata per le prove sperimentali è la *pressa idraulica Italsigma FPF* (figura 46), di cui sono sotto riportate le specifiche principali:



Figura 46 – Pressa idraulica: immagine e principali caratteristiche

|  |          |
|--|----------|
| Forza massima                              | 100 [kN] |
| Corsa cilindro                             | 100 [mm] |
| Pressione di esercizio                     | 21 [MPa] |
| Pressione massima cilindro di sollevamento | 7 [MPa]  |

La macchina è controllata mediante software *MTS-main* implementato con *LabView* e attraverso l'uso di differenti attrezzaggi può essere utilizzata sia per le prove di trazione-compressione, sia per le prove di flessione statica e ciclica. Consente di effettuare prove sia in controllo di carico, sia in controllo di spostamento, entrambi utili per ottenere i dati ricercati in questa campagna di prove.



Figura 47 – Centralina acquisizione dati

In figura 48 è riportato l'attrezzaggio utilizzato sia per i test statici che per le prove di fatica:

- ✓ il *blocco inferiore* è costituito da una parte fissa collegata al cilindro della pressa, all'interno della quale scorrono due parti mobili di cui è possibile stabilire la distanza (in modo da poter variare l'interasse in base alle dimensioni del provino); il provino è a contatto con due cilindri metallici vincolati alle due parti mobili tramite due blocchetti di metallo sagomati;
- ✓ il *blocco superiore* è costituito da un cuneo metallico vincolato alla cella di carico, il quale funge da supporto per il cilindro che effettuerà la compressione sul provino.

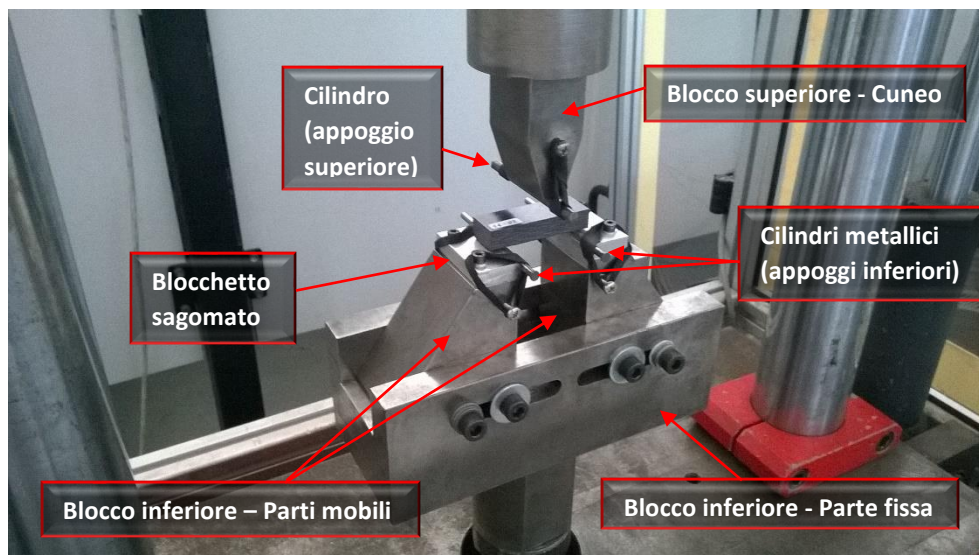


Figura 48 – Attrezzaggio completo per i test statici e a fatica

La normativa presa come riferimento (ASTM D2344/D2344M), suggerisce di utilizzare per il cilindro superiore un diametro di 6 mm mentre per gli appoggi inferiori un diametro di 3 mm; per ragioni pratiche, in considerazione della minima variazione e della scarsa rilevanza della modifica sulla dinamica dei test, sono stati utilizzati cilindri inferiori di diametro leggermente maggiore, pari a 4 mm.

Dovendo testare serie di provini con due diverse configurazioni, l'interasse (distanza tra gli assi dei due appoggi inferiori) risulta di 42 mm per la configurazione 1, e di 27 mm per la configurazione 2.

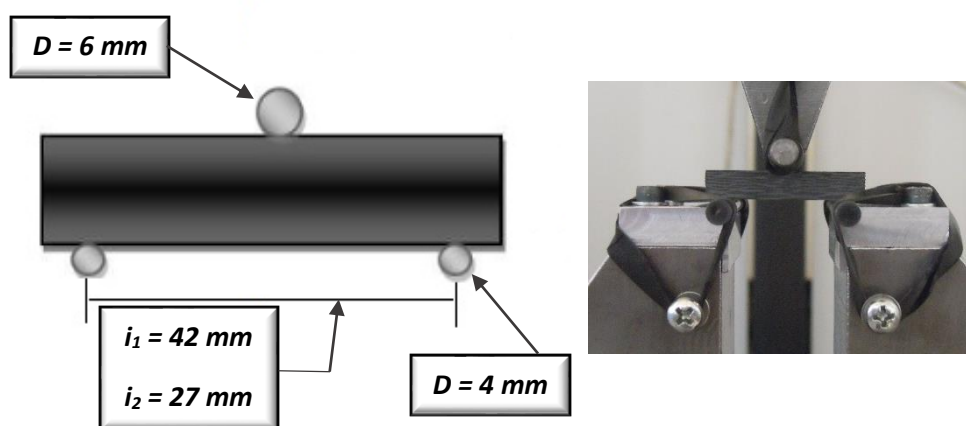


Figura 49 – Schema e foto posizionamento provino sugli appoggi

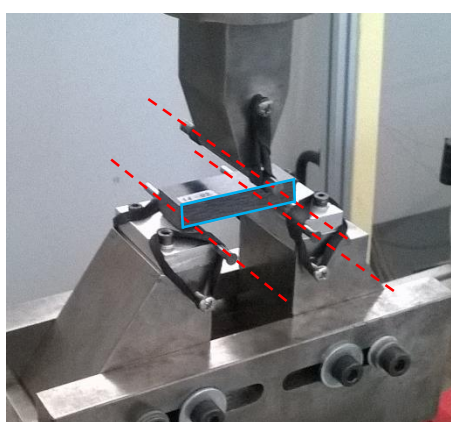


Figura 50 – Orientamento del provino

Il posizionamento del provino sull'attrezzaggio è identico per i test statici e per le prove di fatica: il singolo esemplare viene adagiato sugli appoggi inferiori in modo da essere centrato rispetto al cilindro superiore, ed in modo che l'asse dei cilindretti metallici sia perpendicolare alla superficie laterale del provino.

Per evitare problemi legati all'innalzamento della temperatura dell'olio durante l'esecuzione dei test di fatica, che hanno richiesto spesso ore di esercizio continuativo della macchina durante i mesi estivi, è stato necessario mettere in funzione l'impianto di raffreddamento collegato alla pressa.

Cambiamenti importanti di temperatura all'interno del circuito oleodinamico durante le prove, oltre a non poter superare un certo limite superiore per ragioni di sicurezza, portano a variazioni della viscosità che hanno come conseguenza una diminuzione della precisione nell'applicazione dei carichi da parte della pressa, evidentemente a discapito delle prove sperimentali.



Figura 51 – Termometro per controllo della  $T$  dell'olio

## 4.2 - Procedura dei test

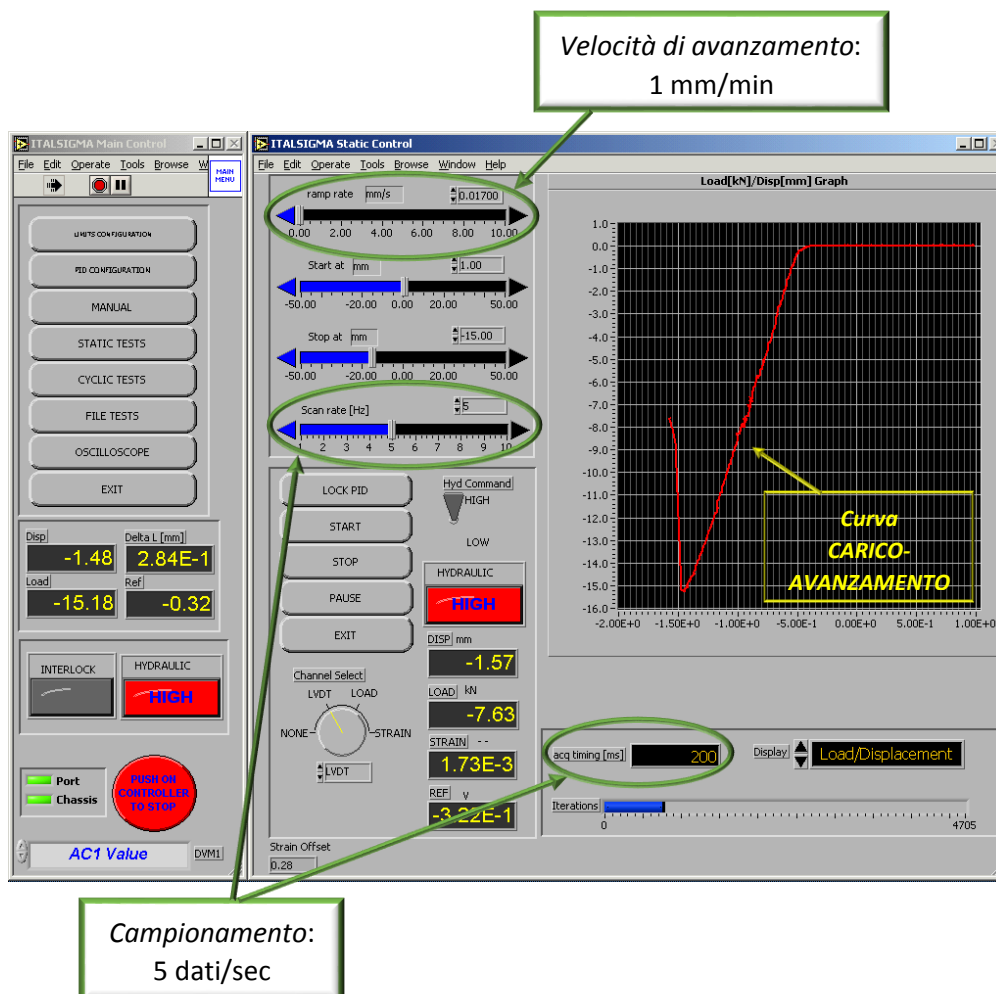
In questa sezione vengono riportate le procedure utilizzate durante la campagna di prove sperimentali, in particolare per i test di flessione statici e per le prove a fatica.

### Test di flessione statico

La prova consiste nell'applicazione di un carico crescente fino al raggiungimento della rottura del provino.

In accordo con la normativa presa come riferimento, la prova si svolge in *controllo di spostamento*, imponendo al punzone (cilindro superiore) una velocità di spostamento pari a  $1 \text{ mm/min}$ .

Una volta posizionato correttamente il provino sull'afferraggio, si impostano i limiti di sicurezza della macchina di prova, e i parametri richiesti per lo svolgimento del test e per l'acquisizione di dati:



L'applicazione del carico, in accordo con la normativa, va sospesa al raggiungimento di uno dei seguenti eventi:

- caduta del 30% del carico applicato
- provino si spezza in due parti
- corsa della testa supera lo spessore nominale del provino

Durante i test la sospensione del carico è sempre stata effettuata a seguito della caduta del carico applicato.

Le prove statiche così effettuate permettono di acquisire dati, che elaborati portano a diagrammi tensione-tempo e tensione-spostamento (riportati nel capitolo 5), consentendo un primo confronto tra i comportamenti delle diverse configurazioni.

### Test di flessione a fatica

A partire dai dati ottenuti con i test statici, in particolare noto il carico di rottura per ogni differente serie di provini (calcolato come media della tensioni di rottura di 5 campioni su cui è stata effettuata la prova statica), si procede al calcolo dei parametri macchina necessari per effettuare le prove di fatica.

In questo caso si impone un carico con andamento sinusoidale (siamo quindi in *controllo di carico*), che viene ripetuto sino alla rottura del provino, determinando così il numero di cicli a cui esso ha resistito prima del cedimento.

Si è deciso di imporre un rapporto di carico  $R = 0.1$  e di effettuare le prove ad una frequenza di 5 Hz, in modo da evitare sui campioni zone di surriscaldamento che, al di sopra di alcuni valori critici, potrebbero portare al degrado di porzioni della matrice, influenzando sul comportamento a fatica.

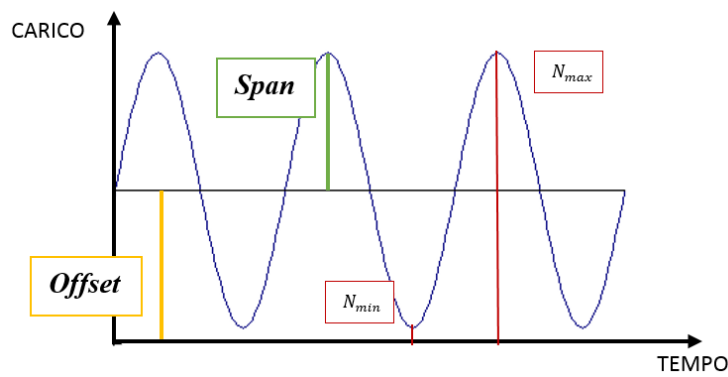
$$R \rightarrow N_{min} = 0.1 N_{max}$$

$$frequenza \rightarrow 5 \text{ Hz}$$

I parametri macchina da calcolare per imporre il carico sinusoidale sono:

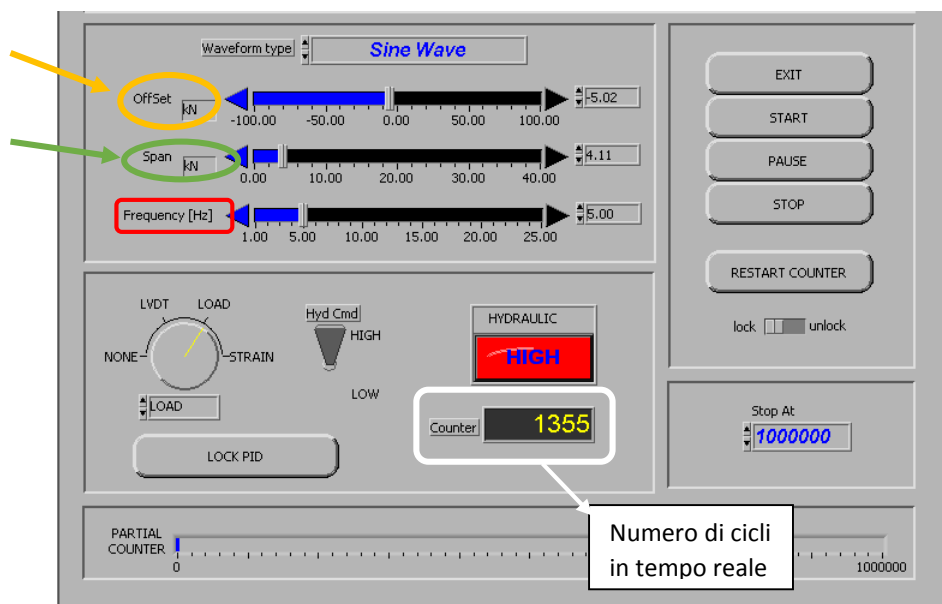
$$\text{Offset} \rightarrow \frac{N_{max} + N_{min}}{2} = \frac{1.1 N_{max}}{2} \rightarrow \text{VALORE MEDIO dello spettro di carico}$$

$$\text{Span} \rightarrow \frac{N_{max} - N_{min}}{2} = \frac{0.9 N_{max}}{2} \rightarrow \text{AMPIEZZA dello spettro di carico}$$



Nel capitolo seguente vengono riportate le tabelle con i valori calcolati e i parametri imposti.

La figura sottostante rappresenta parte dell'interfaccia video durante lo svolgimento dei test:



## Capitolo 5 - Risultati e analisi dei dati

In questa sezione vengono riportati i dati ottenuti ed elaborati a partire dalle prove effettuate sui campioni, allo scopo di descrivere il comportamento del materiale testato, e capire le differenze tra le diverse configurazioni adottate.

### 5.1 - Prove di flessione statica

Per ogni provino testato a flessione statica, i dati che otteniamo sono riassunti in un file di testo e suddivisi in quattro colonne: TEMPO (ms), CARICO (kN), LVDT (mm), DELTA L (mm).

Ricordando che la frequenza di campionamento è 5 Hz, e conoscendo la sezione resistente di ciascun provino (tabelle 10, 11, 12, 13), i dati sono stati elaborati tramite excel:

- escludendo i valori del carico al di sotto di 1 kN in quanto affetti in gran parte da rumore;
- calcolando le tensioni (*ILSS*) in accordo con la Normativa di riferimento (ASTM - D2344/D2344M – 13):

$$F^{sbs} = 0.75 \times \frac{P_m}{b \times h}$$

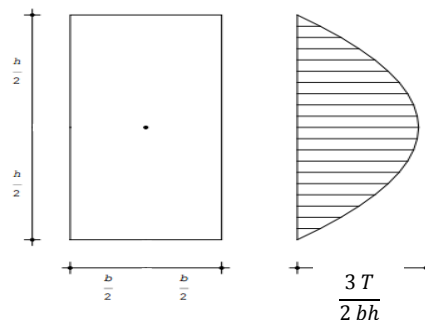


Figura 52 – Diagramma delle tensioni per la sezione

dove:

- $F^{sbs}$  → short-beam strength, [MPa]
- $P_m$  → carico massimo osservato durante il test, [N]
- $b$  → base del provino, [mm]
- $h$  → spessore del provino, [mm]

Per ogni test sono stati ricavati e vengono riportati di seguito:

- Grafico *TENSIONE – TEMPO*
- Grafico *TENSIONE – SPOSTAMENTO*

## CONFIGURAZIONE 1: *Serie\_13*

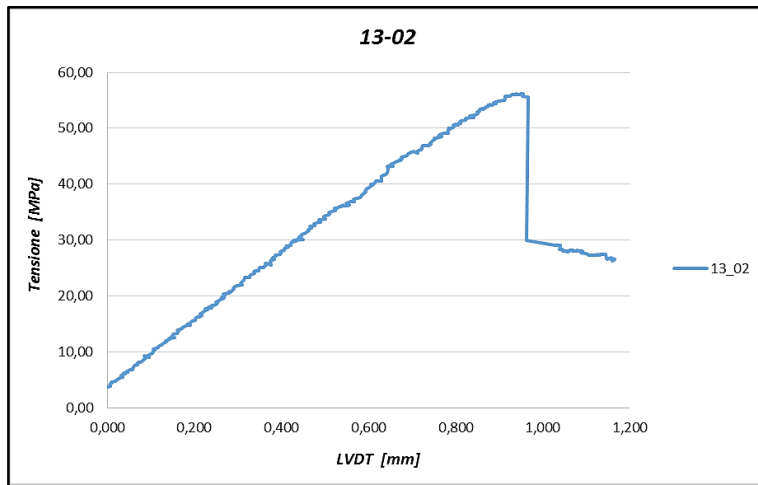


Figura 53 – *Provino 13\_02:*

*Tensione – Spostamento*

*Tensione - Tempo*

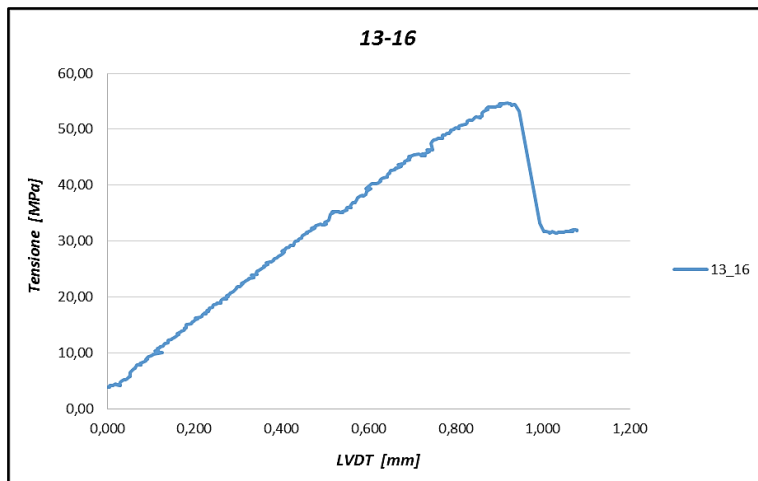
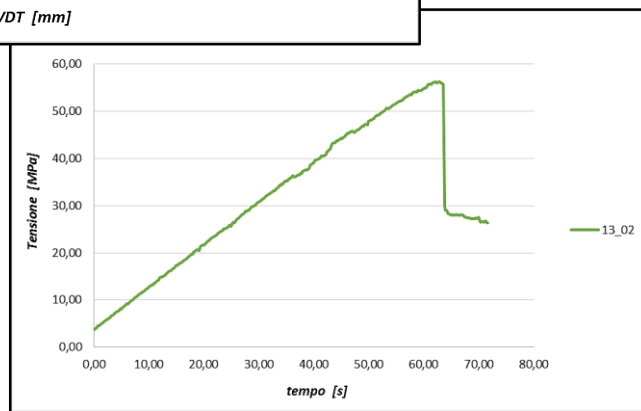
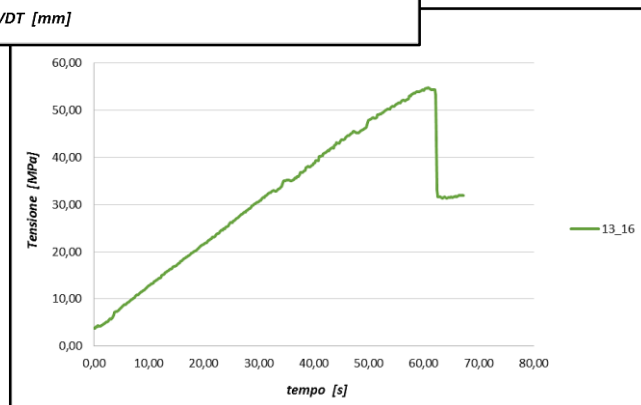


Figura 54 - *Provino 13\_16:*

*Tensione – Spostamento*

*Tensione - Tempo*





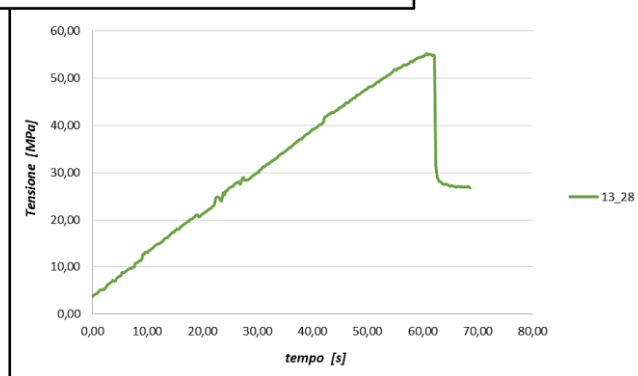
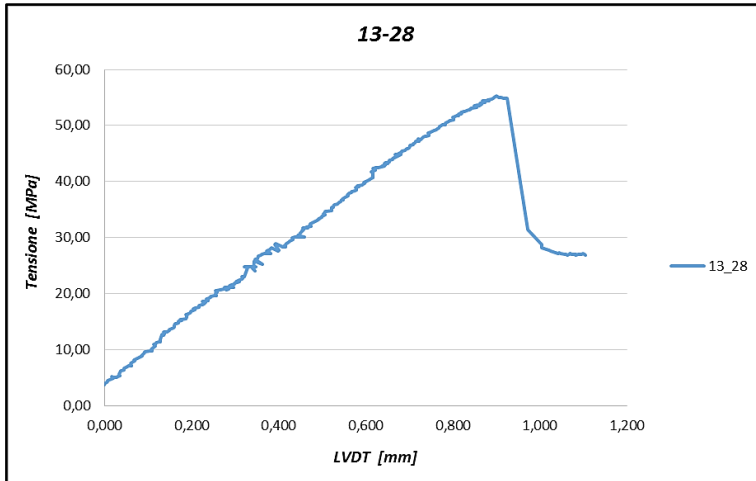


Figura 55 - *Provino 13\_28:*

*Tensione – Spostamento*

*Tensione - Tempo*

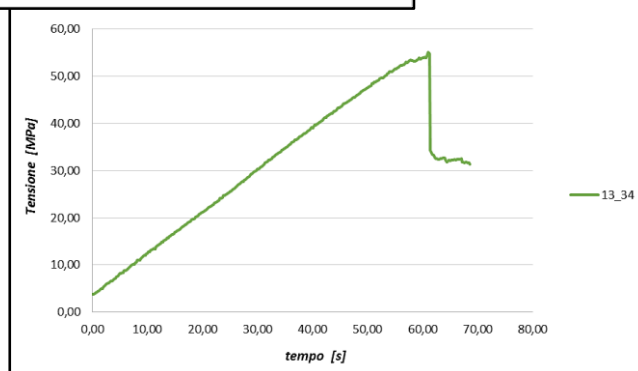
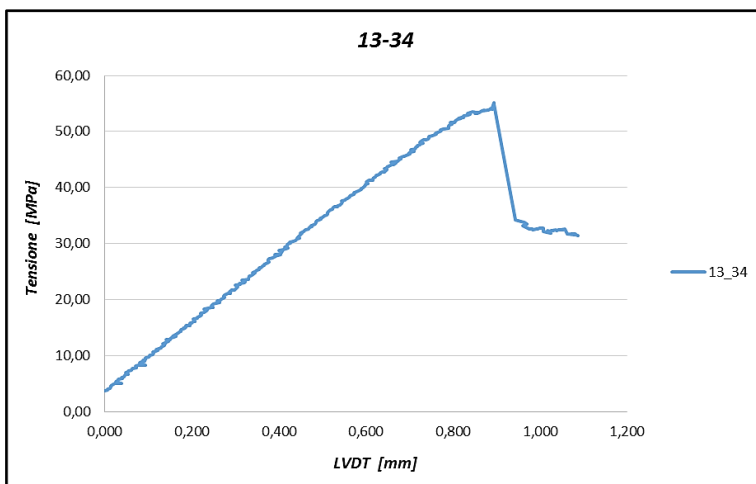


Figura 56 - *Provino 13\_34:*

*Tensione – Spostamento*

*Tensione - Tempo*

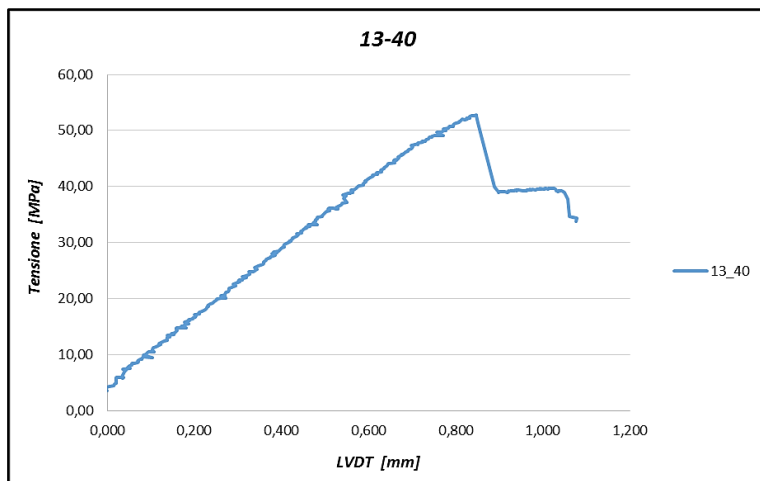
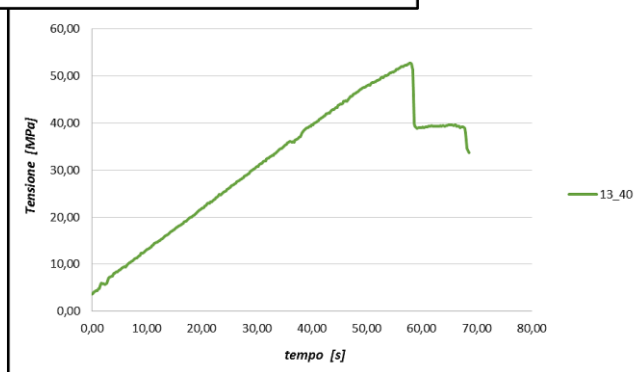


Figura 57 - Provino 13\_40:  
*Tensione – Spostamento*  
*Tensione - Tempo*



**CONFIGURAZIONE 1: Serie\_14**

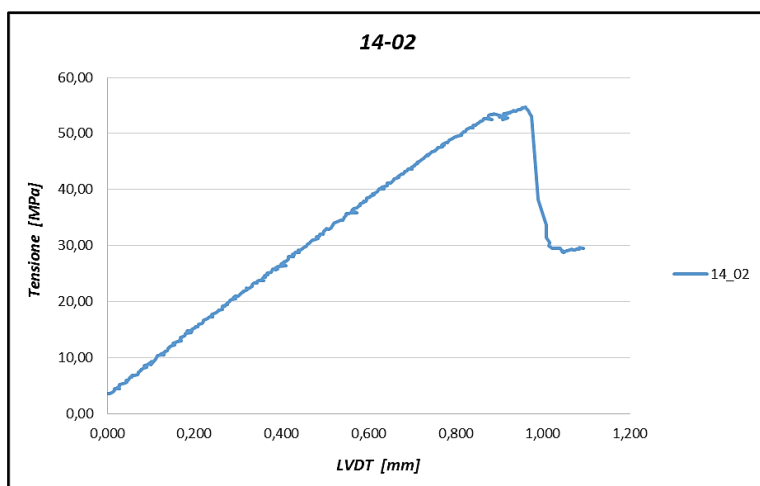
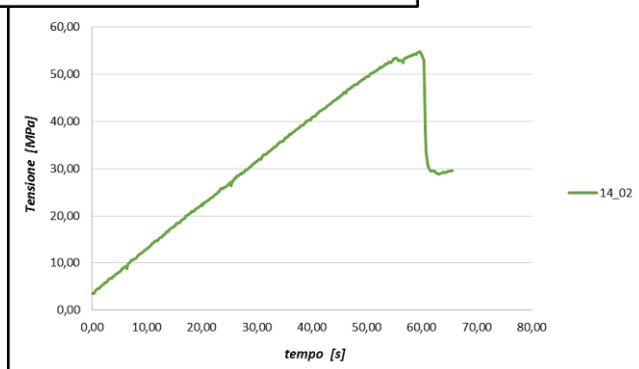


Figura 58 - Provino 14\_02:  
*Tensione – Spostamento*  
*Tensione - Tempo*



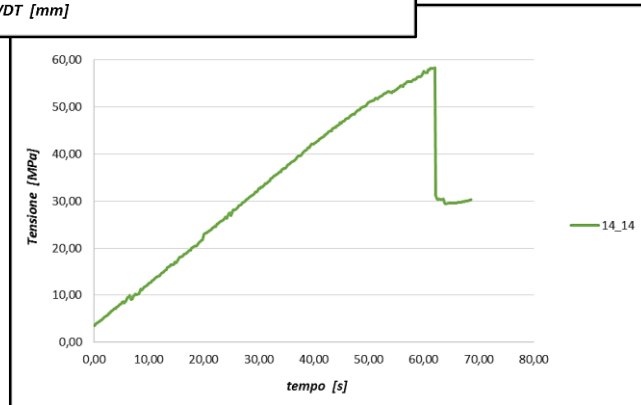
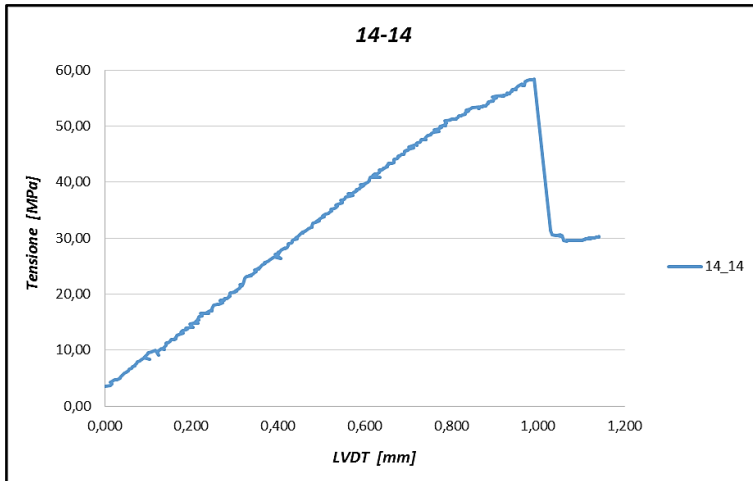


Figura 59 - *Provino 14\_14:*  
*Tensione – Spostamento*  
*Tensione - Tempo*

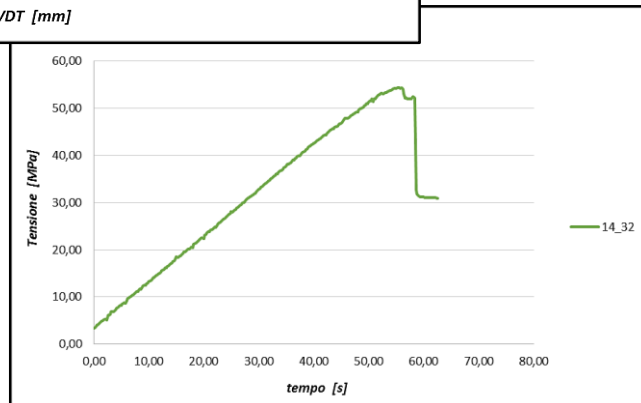
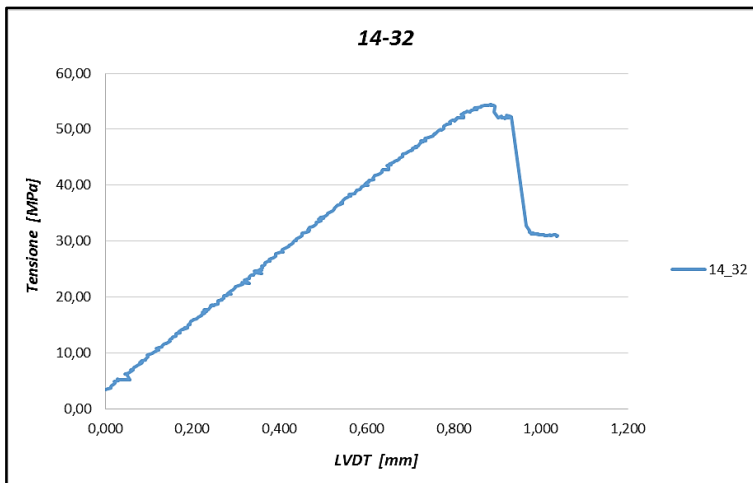


Figura 60 - *Provino 14\_32:*  
*Tensione – Spostamento*  
*Tensione - Tempo*

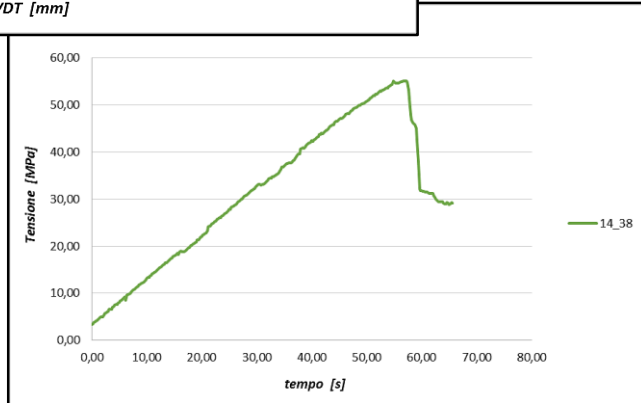
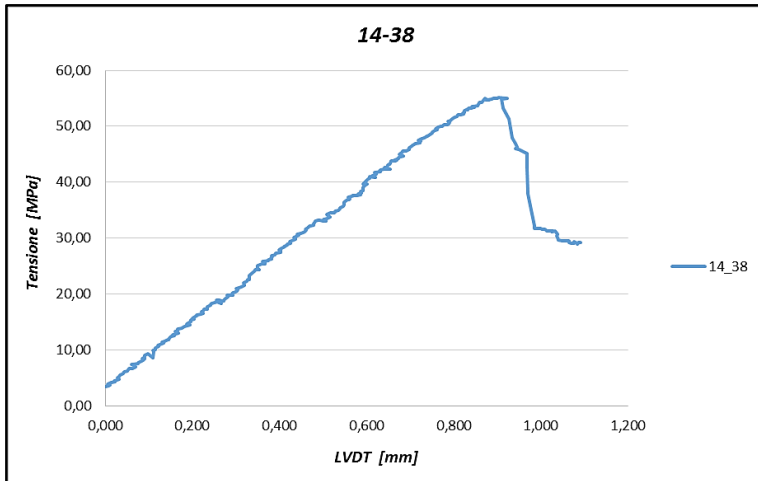


Figura 61 - Provino 14\_38:  
Tensione – Spostamento  
Tensione - Tempo

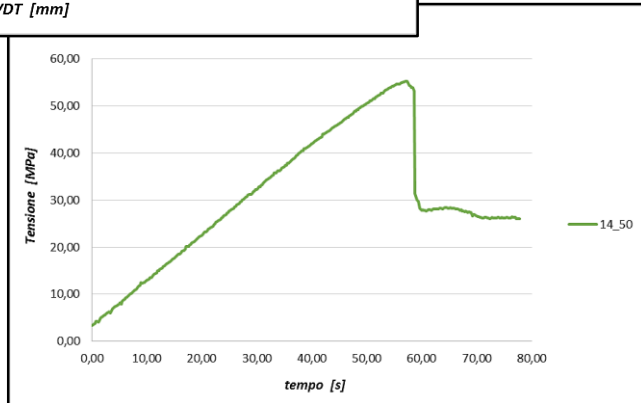
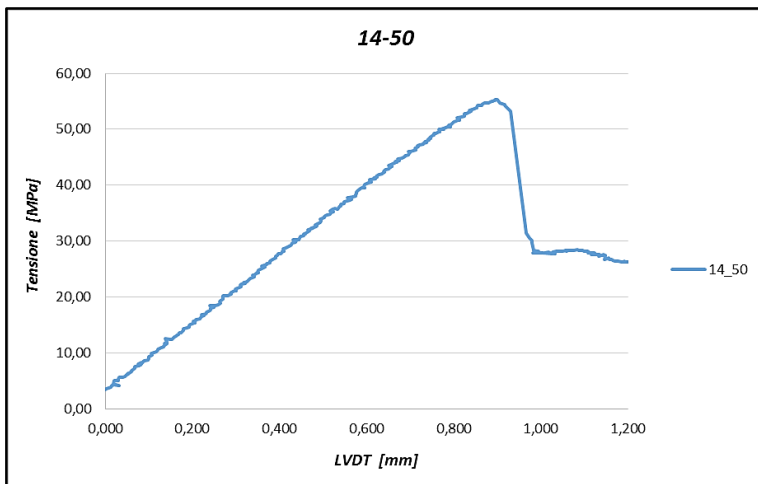


Figura 62 - Provino 14\_50:  
Tensione – Spostamento  
Tensione - Tempo

## CONFIGURAZIONE 2: Serie\_8

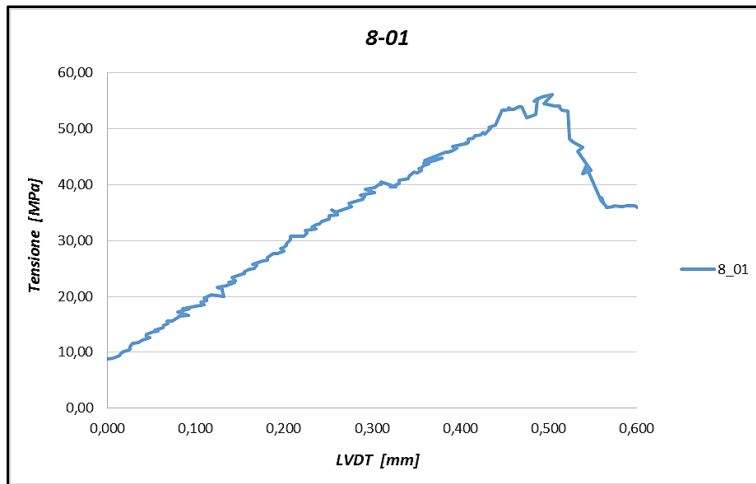


Figura 63 - Provino 8\_01:  
Tensione – Spostamento  
Tensione - Tempo

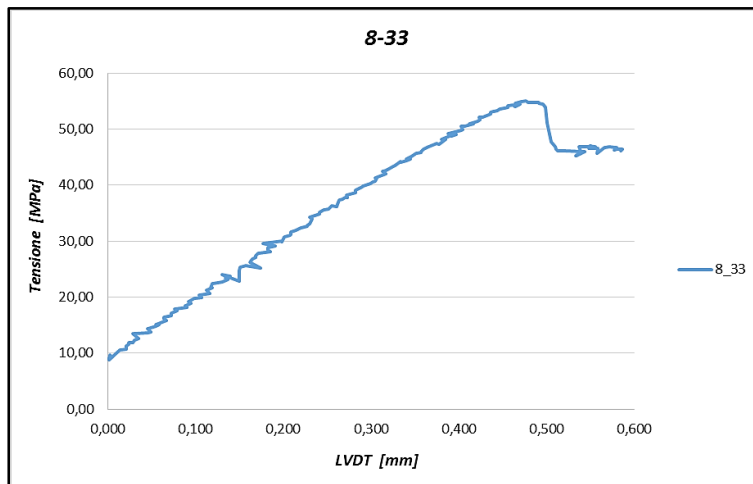
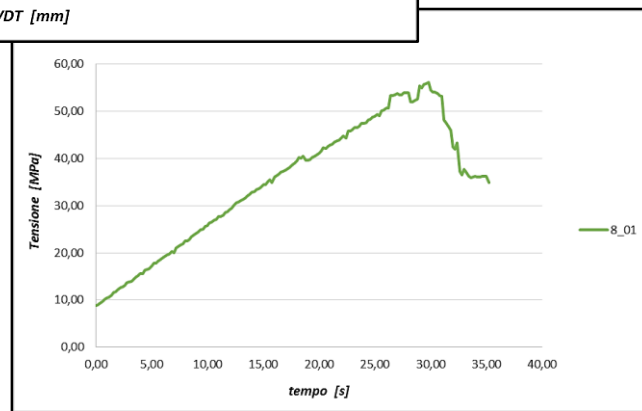
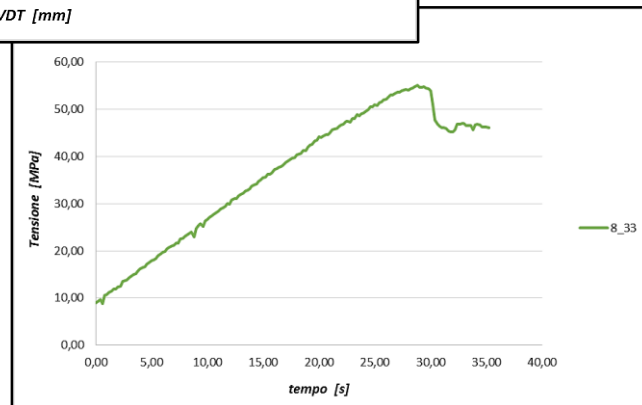


Figura 64 - Provino 8\_33:  
Tensione – Spostamento  
Tensione - Tempo



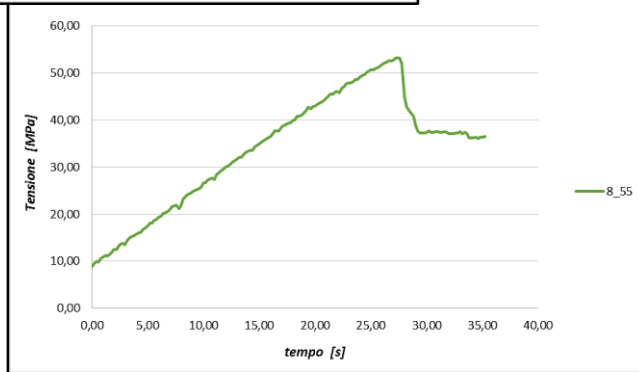
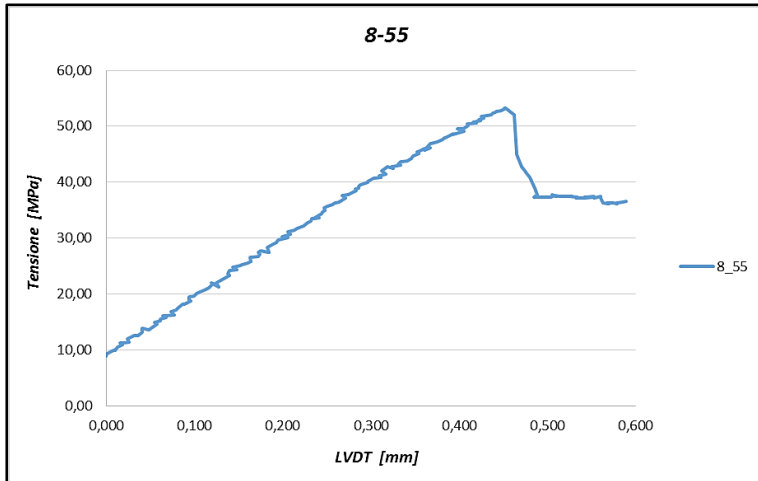


Figura 65 - *Provino 8\_55:*  
*Tensione – Spostamento*  
*Tensione - Tempo*

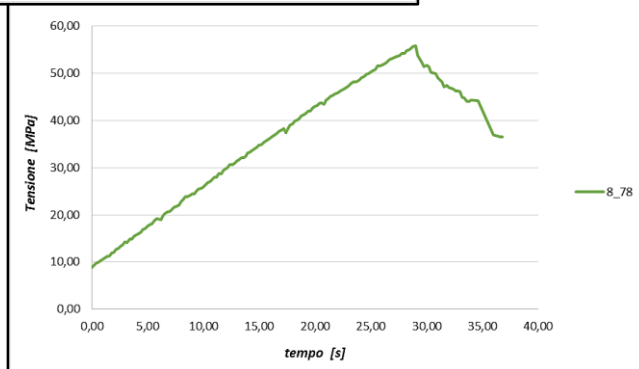
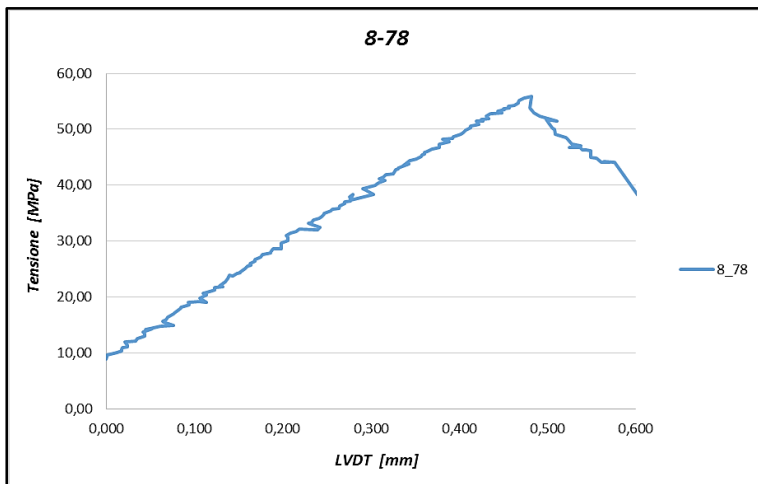


Figura 66 - *Provino 8\_78:*  
*Tensione – Spostamento*  
*Tensione - Tempo*

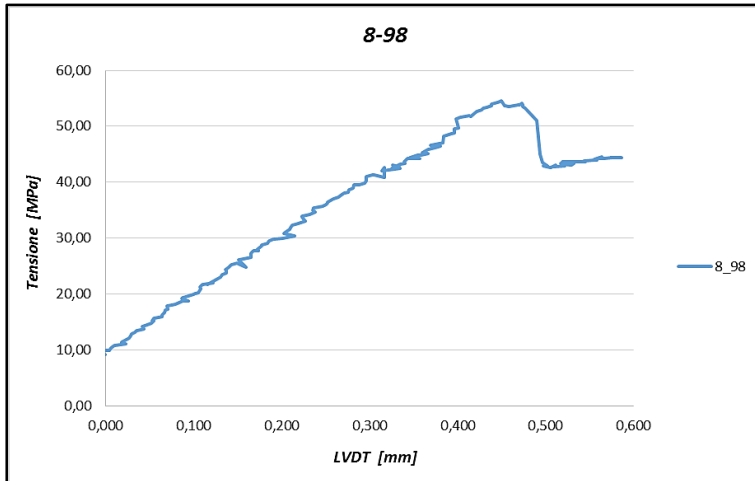
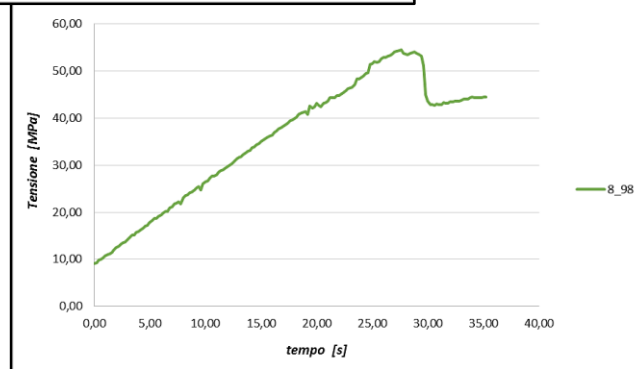


Figura 67 - *Provino 8\_98:*  
*Tensione – Spostamento*  
*Tensione - Tempo*



## CONFIGURAZIONE 2: *Serie\_9*

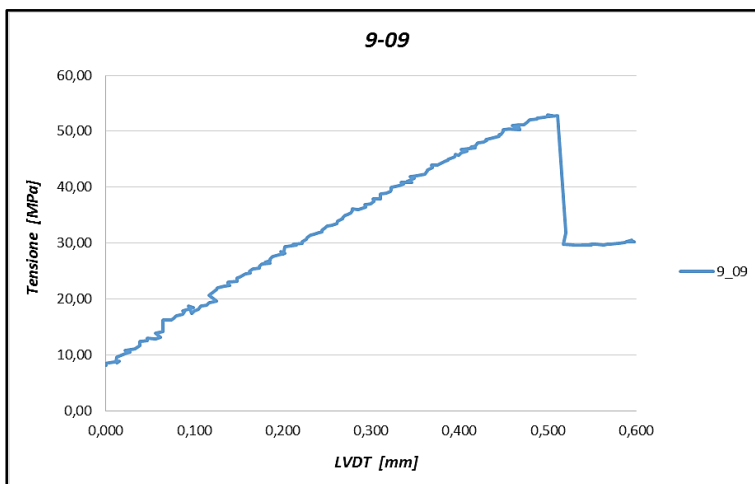
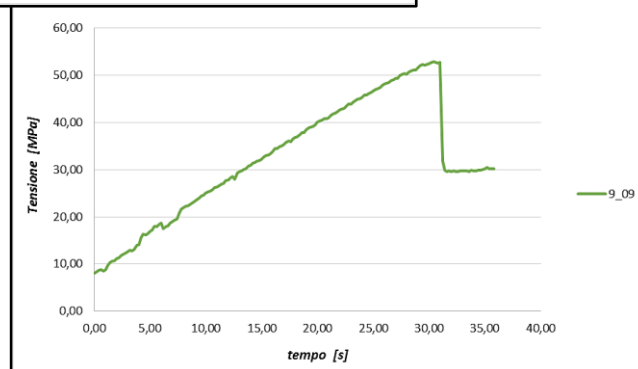


Figura 68 - *Provino 9\_09:*  
*Tensione – Spostamento*  
*Tensione - Tempo*



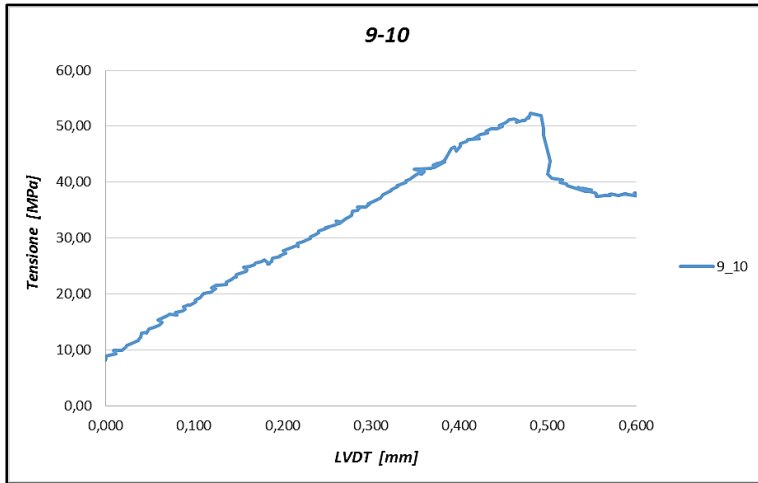


Figura 69 - *Provino 9\_10:*  
*Tensione – Spostamento*  
*Tensione - Tempo*

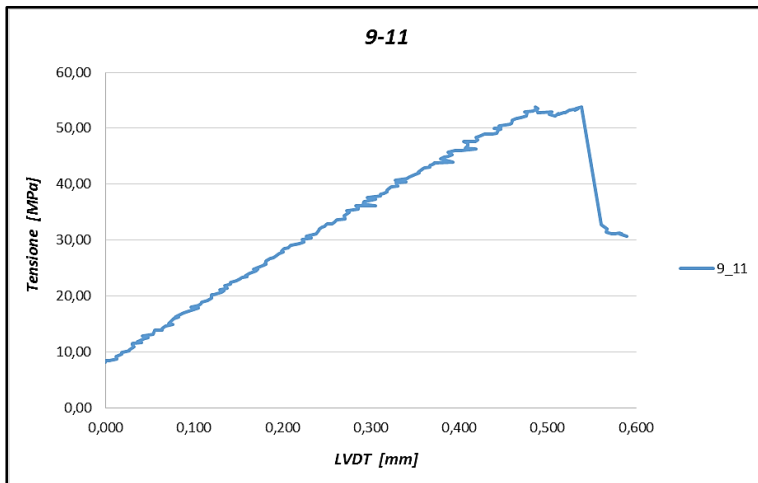
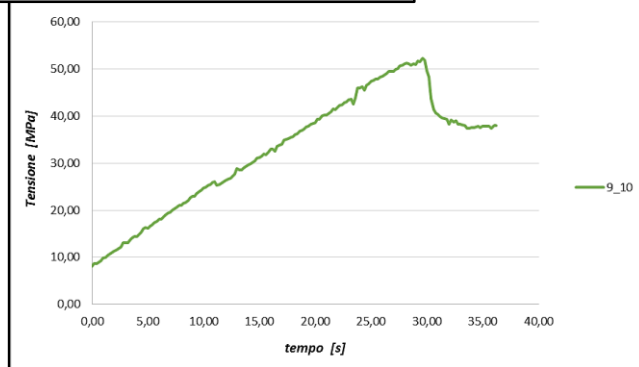
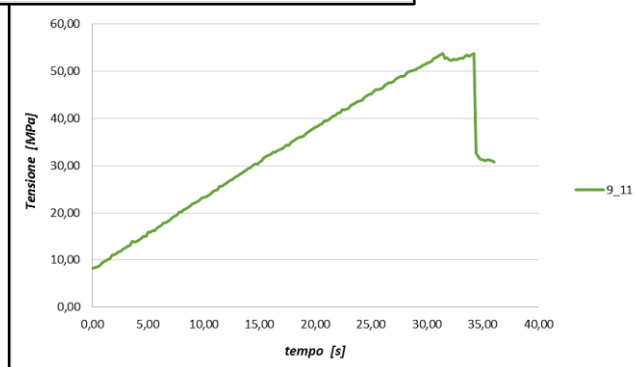
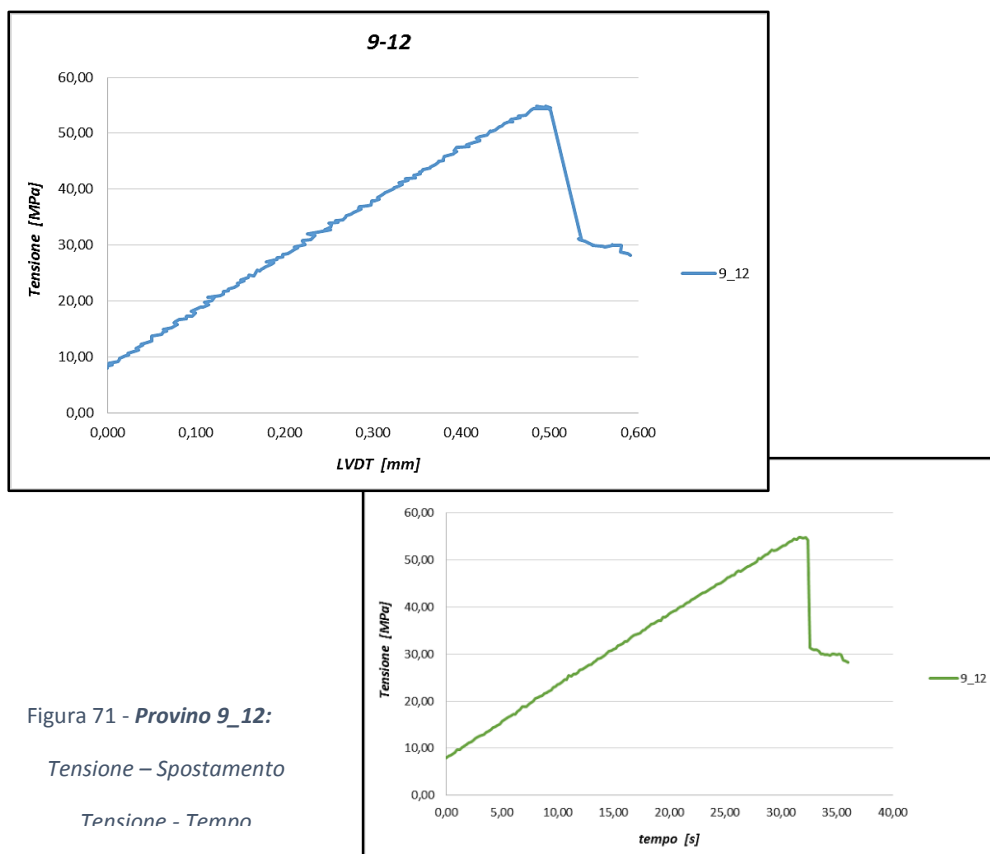


Figura 70 - *Provino 9\_11:*  
*Tensione – Spostamento*  
*Tensione - Tempo*







### Analisi e confronto

Sono stati messi a confronto i dati emersi dai precedenti grafici, allo scopo di verificare la ripetibilità del test di flessione statica e l'attendibilità dei risultati all'interno delle diversi campioni. Attraverso il calcolo di parametri come valor medio, deviazione standard e conseguente coefficiente di variazione (equazioni 1, 2, 3), nonché la sovrapposizione delle curve tensione-tempo e tensione-spostamento, si è giunti ai seguenti risultati.

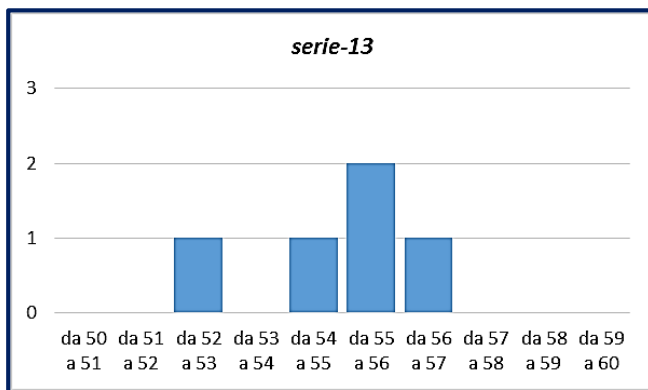
| sezione resistente nominale*                        |              |              |              |              |
|---|--------------|--------------|--------------|--------------|
| valore sperimentale del C.P.T. [mm]                 | 0,77         | 0,77         | 0,77         | 0,77         |
| n° ply  | 8            | 9            | 13           | 14           |
| spessore nominale [mm]                              | 6,16         | 6,93         | 10,01        | 10,78        |
| larghezza nominale [mm]                             | 13           | 13           | 20           | 20           |
| <i>sezione resistente nominale [mm<sup>2</sup>]</i> | <i>80,08</i> | <i>90,09</i> | <i>200,2</i> | <i>215,6</i> |

Tabella 15 – Legenda: calcolo della sezione resistente nominale per le diverse configurazioni

*Serie\_13:*

| n° provino        | carico di rottura [kN] | sezione resistente nominale* [mm <sup>2</sup> ] | tensione max nominale [Mpa] | sezione resistente reale [mm <sup>2</sup> ] | tensione max reale [Mpa] |
|-------------------|------------------------|---|-----------------------------|---|--------------------------|
| 13_02             | 15,56                  | 200,2   | 58,292                      | 207,56                                      | 56,22                    |
| 13_16             | 15,08                  | 200,2   | 56,494                      | 206,59                                      | 54,75                    |
| 13_28             | 15,28                  | 200,2   | 57,243                      | 207,51                                      | 55,23                    |
| 13_34             | 15,44                  | 200,2   | 57,842                      | 210,26                                      | 55,08                    |
| 13_40             | 14,69                  | 200,2   | 55,032                      | 209,02                                      | 52,71                    |
| <b>mean value</b> |                        |   |                             |   | <b>54,80</b>             |
| <b>sn-1</b>       |                        |   |                             |   | <b>1,290</b>             |
| <b>CV %</b>       |                        |   |                             |   | <b>2,35%</b>             |

Tabella 16 – Risultati prova statica per provini della serie\_13



Ascisse: intervalli in MPa  
Ordinate: numero di provini con rottura all'interno dei rispettivi intervalli

Figura 72 – Distribuzione delle tensioni di rottura ottenute per la serie 13

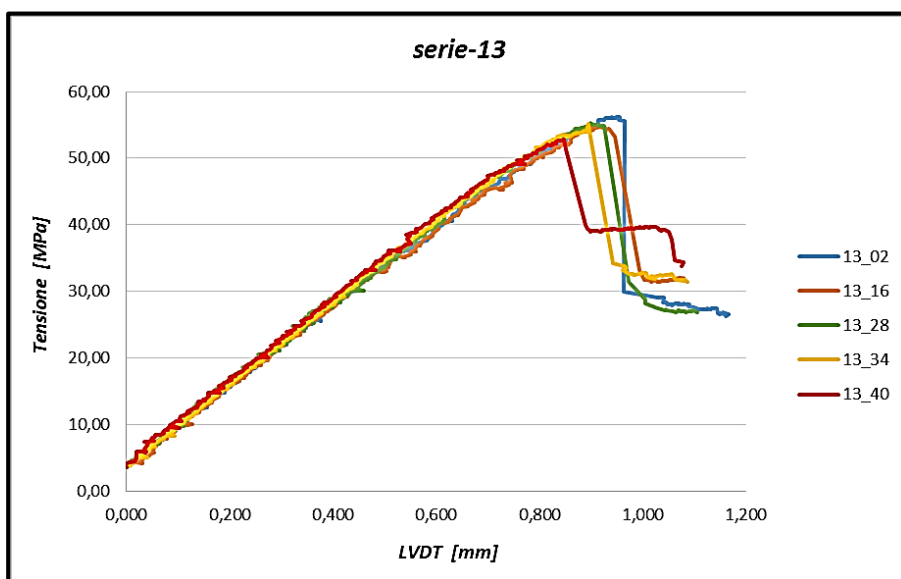
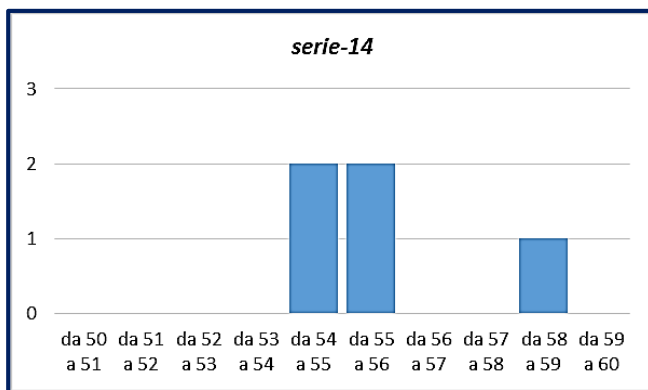


Figura 73 – Serie\_13: confronto grafici Tensione - Spostamento

*Serie\_14:*

| n° provino        | carico di rottura [kN] | sezione resistente nominale* [mm <sup>2</sup> ] | tensione max nominale [Mpa] | sezione resistente reale [mm <sup>2</sup> ] | tensione max reale [Mpa] |
|-------------------|------------------------|---|-----------------------------|---|--------------------------|
| 14_02             | 16,28                  | 215,6   | 56,633                      | 223,02                                      | 54,75                    |
| 14_14             | 17,28                  | 215,6   | 60,111                      | 221,92                                      | 58,40                    |
| 14_32             | 16,19                  | 215,6   | 56,320                      | 223,09                                      | 54,43                    |
| 14_38             | 16,47                  | 215,6   | 57,294                      | 224,06                                      | 55,13                    |
| 14_50             | 16,40                  | 215,6   | 57,050                      | 222,54                                      | 55,27                    |
| <b>mean value</b> |                        |   |                             |   | <b>55,60</b>             |
| <b>sn-1</b>       |                        |   |                             |   | <b>1,602</b>             |
| <b>CV %</b>       |                        |   |                             |   | <b>2,88%</b>             |

Tabella 17 – Risultati prova statica per provini della serie\_14



Ascisse: intervalli in MPa  
Ordinate: numero di provini con rottura all'interno dei rispettivi intervalli

Figura 74 – Distribuzione delle tensioni di rottura ottenute per la serie 14

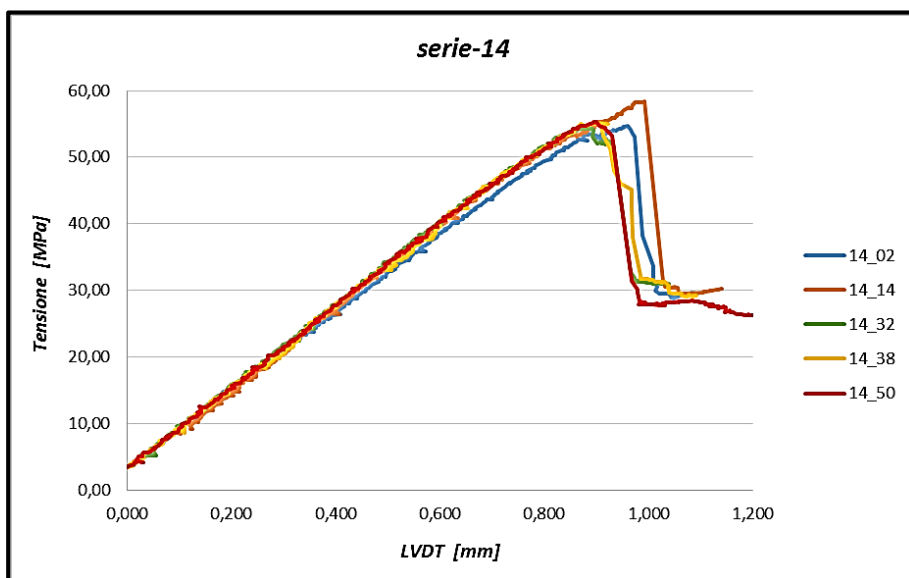


Figura 75 – Serie\_14: confronto grafici Tensione - Spostamento

## Serie\_8:

| n° provino        | carico di rottura [kN] | sezione resistente nominale* [mm <sup>2</sup> ] | tensione max nominale [Mpa] | sezione resistente reale [mm <sup>2</sup> ] | tensione max reale [Mpa] |
|-------------------|------------------------|---|-----------------------------|---|--------------------------|
| 8_01              | 6,47                   | 80,08   | 60,568                      | 86,50                                       | 56,07                    |
| 8_33              | 6,37                   | 80,08   | 59,678                      | 86,75                                       | 55,09                    |
| 8_55              | 6,09                   | 80,08   | 57,046                      | 85,85                                       | 53,21                    |
| 8_78              | 6,34                   | 80,08   | 59,369                      | 85,13                                       | 55,85                    |
| 8_98              | 6,19                   | 80,08   | 57,964                      | 85,14                                       | 54,52                    |
| <b>mean value</b> |                        |   |                             |   | <b>54,95</b>             |
| <b>sn-1</b>       |                        |   |                             |   | <b>1,151</b>             |
| <b>CV %</b>       |                        |   |                             |   | <b>2,09%</b>             |

Tabella 18 – Risultati prova statica per provini della serie\_8

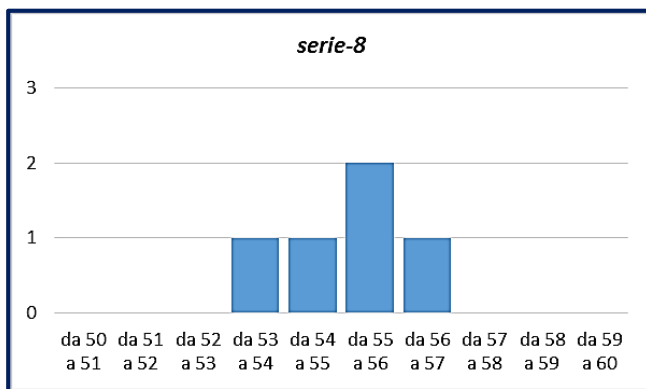


Figura 76 – Distribuzione delle tensioni di rottura ottenute per la serie\_8

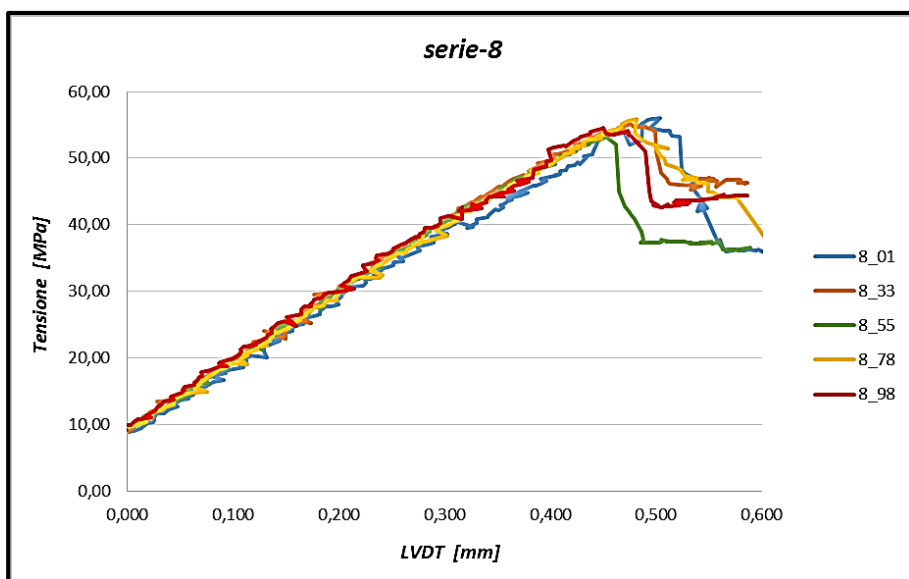
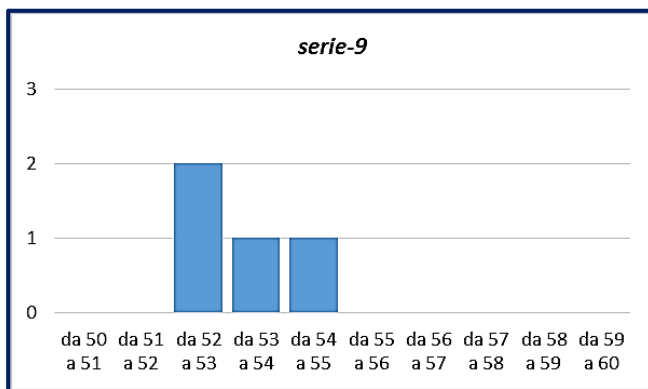


Figura 77 – Serie\_8: confronto grafici Tensione - Spostamento

## Serie\_9:

| n° provino        | carico di rottura [kN] | sezione resistente nominale* [mm <sup>2</sup> ] | tensione max nominale [Mpa] | sezione resistente reale [mm <sup>2</sup> ] | tensione max reale [Mpa] |
|-------------------|------------------------|---|-----------------------------|---|--------------------------|
| 9_09              | 6,71                   | 90,09   | 55,894                      | 95,15                                       | 52,92                    |
| 9_10              | 6,60                   | 90,09   | 54,928                      | 94,60                                       | 52,31                    |
| 9_11              | 6,82                   | 90,09   | 56,735                      | 95,10                                       | 53,75                    |
| 9_12              | 6,91                   | 90,09   | 57,542                      | 94,46                                       | 54,88                    |
| <b>mean value</b> |                        |   |                             |   | <b>53,47</b>             |
| <b>sn-1</b>       |                        |   |                             |   | <b>1,110</b>             |
| <b>CV %</b>       |                        |   |                             |   | <b>2,08%</b>             |

Tabella 19 – Risultati prova statica per provini della serie\_9



Ascisse: intervalli in MPa  
Ordinate: numero di provini con rottura all'interno dei rispettivi intervalli

Figura 78 – Distribuzione delle tensioni di rottura ottenute per la serie 9

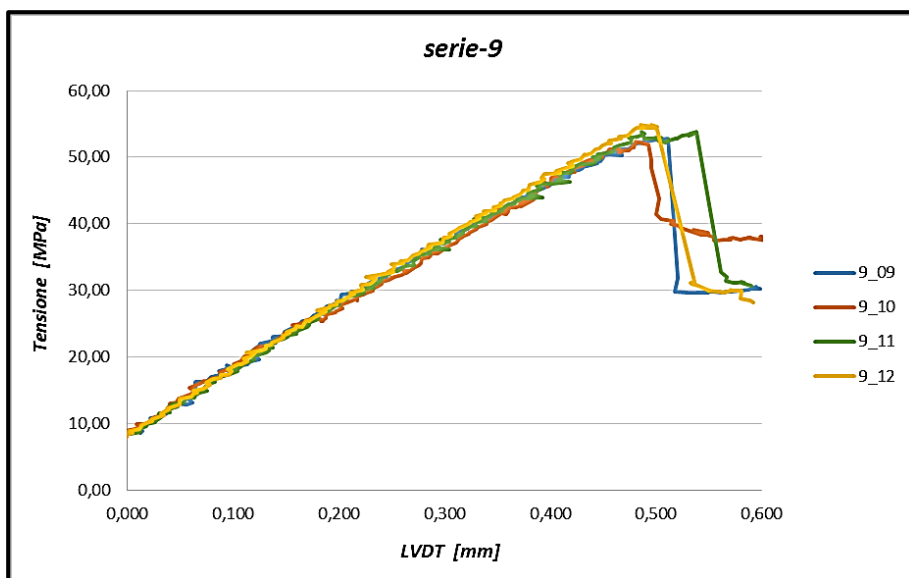


Figura 79 – Serie\_9: confronto grafici Tensione - Spostamento

L'andamento della tensione rispetto al tempo e allo spostamento del punzone (cilindretto superiore) risulta essere dello stesso tipo per le quattro tipologie di provini, confermando l'affidabilità della prova.

Dall'analisi dei dati, come ci si aspettava, emergono differenze poco significative in termini di *tensione di rottura statica (ILSS)*, proprio perché, pur variando le configurazioni, trattasi di prove sullo stesso tipo di materiale.

Come mostrato nei grafici seguenti, i valori medi di rottura per le singole serie si aggirano tutti nell'intorno del *valor medio 54,77 MPa*.

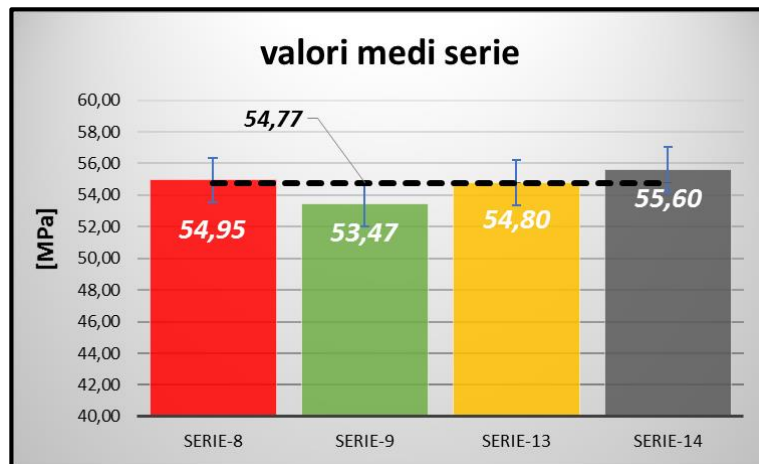
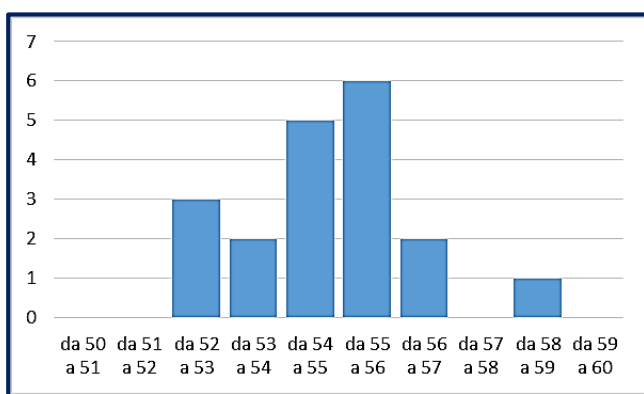


Figura 80 – Istogramma riassuntivo dei valori di tensione di rottura ottenuti per le prove statiche

Inoltre per tutte le serie emergono bassi valori di deviazione standard e conseguentemente piccoli *coefficienti di variazione*, compresi tra il 2,08% della serie\_9 e il 2,88% della serie\_14.

Al fine di confermare la bontà dei dati ottenuti, che saranno la base di partenza per le successive prove di fatica, è stata effettuata inoltre un'analisi statistica, in particolare si è cercato di valutare la ripetibilità delle prove tramite il *test di Fisher* (vedi appendice C), applicato a ciascuna coppia di campioni (serie 8 – serie 9; serie 8 – serie 13; serie 8 – serie 14; serie 9 – serie 13; serie 9 – serie 14; serie 13 – serie 14).

La figura sottostante mostra la distribuzione dei valori ottenuti con le prove sperimentali a confronto con una curva gaussiana, mettendo in luce una buona sovrapposibilità: se ne deduce che a livello statistico, gli errori risultano di tipo casuale, perciò non legato a difetti della procedura di prova.



Ascisse: intervalli in MPa  
Ordinate: numero di provini con rottura all'interno dei rispettivi intervalli

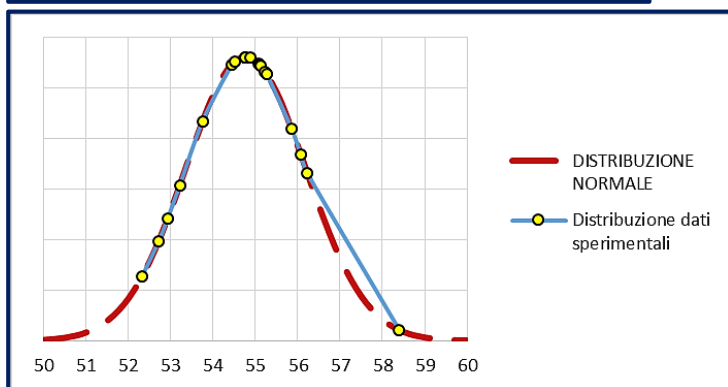


Figura 81 -  
*Distribuzione delle tensioni di rottura ottenute per tutti i provini testati, a confronto con la curva teorica di distribuzione normale*

Questo tipo di risultati mostra la ripetibilità e la validità delle procedure di prova, e consente di passare alle prove di fatica.

## 5.2 - Prove di flessione a fatica

Per ogni tipologia di provini, i test sono stati effettuati imponendo un carico sinusoidale (con rapporto di carico  $R = 0.1$ ), tale che il valore di carico massimo  $N_{max}$  fosse ridotto in percentuale del 20%, 30%, e 40% rispetto al carico di rottura (kN) medio della rispettiva serie campione.

Tutte le prove sono state effettuate con una frequenza di 5 Hz.

Di seguito sono riportate le tabelle con i risultati ottenuti in termini di:

- % di riduzione del carico massimo;
- carico massimo (di rottura statica) e parametri macchina di offset e span conseguenti;
- *n° di cicli a rottura* per ciascun provino e valore medio per ciascuna serie;
- *tensioni max ILSS* di ciascun provino e valore medio per ciascuna serie

|                              |   |
|------------------------------|---|
| <b>* carico massimo [kN]</b> | valor medio dei carichi di rottura statici diminuito rispettivamente del 20-30-40 % |
|                              |   |

|                             |  |
|-----------------------------|--|
| <b>* tensione max [MPa]</b> | calcolata in accordo con la normativa ASTM D 2344/D 2344M (equazione xx) |
|                             |  |



| % carico              | n° provino | * carico massimo [kN] | sezione resistente [mm <sup>2</sup> ] | * tensione max [MPa] | n° cicli a rottura |       |
|-----------------------|------------|-----------------------|---------------------------------------|----------------------|--------------------|-------|
| <b>Prove STATICHE</b> |            | 15,210                |                                       | 54,80                | <b>1</b>           |       |
| <b>-20%</b>           | 13_08      | 12,168                | 207,4                                 | 44,01                | <b>1818</b>        |       |
|                       | 13_14      |                       | 207,0                                 | 44,10                | <b>3139</b>        |       |
|                       | 13_29      |                       | 205,4                                 | 44,42                | <b>2384</b>        |       |
|                       | 13_37      |                       | 209,9                                 | 43,48                | <b>1858</b>        |       |
|                       |            | <b>Offset 6,70</b>    |                                       |                      |                    |       |
|                       |            | <b>Span 5,48</b>      |                                       |                      |                    |       |
|                       |            | Media                 |                                       |                      | 44,00              | 2300  |
|                       | st.dev     |                       |                                       | 0,390                | 616                |       |
|                       | CoV        |                       |                                       | 0,89%                | 26,79%             |       |
| <b>-30%</b>           | 13_10      | 10,647                | 206,5                                 | 38,66                | <b>13481</b>       |       |
|                       | 13_12      |                       | 207,0                                 | 38,58                | <b>16746</b>       |       |
|                       | 13_27      |                       | 207,4                                 | 38,51                | <b>10712</b>       |       |
|                       | 13_35      |                       | 210,5                                 | 37,93                | <b>9505</b>        |       |
|                       |            | <b>Offset 5,86</b>    |                                       |                      |                    |       |
|                       |            | <b>Span 4,79</b>      |                                       |                      |                    |       |
|                       |            | Media                 |                                       |                      | 38,42              | 12611 |
|                       | st.dev     |                       |                                       | 0,332                | 3220               |       |
|                       | CoV        |                       |                                       | 0,86%                | 25,53%             |       |
| <b>-40%</b>           | 13_03      | 9,126                 | 206,8                                 | 33,09                | <b>24288</b>       |       |
|                       | 13_26      |                       | 206,3                                 | 33,18                | <b>31790</b>       |       |
|                       | 13_39      |                       | 209,7                                 | 32,64                | <b>45257</b>       |       |
|                       |            | <b>Offset 5,02</b>    |                                       |                      |                    |       |
|                       |            | <b>Span 4,11</b>      |                                       |                      |                    |       |
|                       |            | Media                 |                                       |                      | 32,97              | 33778 |
|                       |            | st.dev                |                                       |                      | 0,289              | 10625 |
|                       | CoV        |                       |                                       | 0,88%                | 31,45%             |       |

Tabella 20 – Risultati prova di fatica su provini della serie\_13

| % carico              | n° provino | * carico massimo [kN] | sezione resistente [mm <sup>2</sup> ] | * tensione max [MPa] | n° cicli a rottura |
|-----------------------|------------|-----------------------|---------------------------------------|----------------------|--------------------|
| <b>Prove STATICHE</b> |            | 16,524                |                                       | 55,60                | <b>1</b>           |
| <b>-20%</b>           | 14_04      | 13,219                | 221,6                                 | 44,74                | <b>832</b>         |
|                       | 14_18      |                       | 227,6                                 | 43,56                | <b>1005</b>        |
|                       | 14_33      |                       | 221,7                                 | 44,72                | <b>2183</b>        |
|                       | 14_48      |                       | 223,5                                 | 44,36                | <b>1373</b>        |
|                       |            | <b>Offset 7,27</b>    |                                       |                      |                    |
|                       |            | <b>Span 5,95</b>      |                                       |                      |                    |
|                       | Media      |                       |                                       | 44,34                | 1348               |
| st.dev                |            |                       | 0,551                                 | 600                  |                    |
| CoV                   |            |                       | 1,24%                                 | 44,54%               |                    |
| <b>-30%</b>           | 14_10      | 11,567                | 222,6                                 | 38,97                | <b>14242</b>       |
|                       | 14_11      |                       | 221,8                                 | 39,11                | <b>4219</b>        |
|                       | 14_25      |                       | 223,0                                 | 38,91                | <b>12532</b>       |
|                       | 14_46      |                       | 222,1                                 | 39,06                | <b>6739</b>        |
|                       |            | <b>Offset 6,36</b>    |                                       |                      |                    |
|                       |            | <b>Span 5,21</b>      |                                       |                      |                    |
|                       | Media      |                       |                                       | 39,01                | 9433               |
| st.dev                |            |                       | 0,092                                 | 4732                 |                    |
| CoV                   |            |                       | 0,24%                                 | 50,16%               |                    |
| <b>-40%</b>           | 14_20      | 9,914                 | 222,9                                 | 33,37                | <b>40132</b>       |
|                       | 14_24      |                       | 223,0                                 | 33,34                | <b>46538</b>       |
|                       | 14_44      |                       | 221,5                                 | 33,58                | <b>45535</b>       |
|                       |            | <b>Offset 5,45</b>    |                                       |                      |                    |
|                       |            | <b>Span 4,46</b>      |                                       |                      |                    |
|                       | Media      |                       |                                       | 33,43                | 44068              |
|                       | st.dev     |                       |                                       | 0,129                | 3446               |
| CoV                   |            |                       | 0,38%                                 | 7,82%                |                    |

Tabella 21 – Risultati prova di fatica su provini della serie\_14

| % carico              | n° provino | * carico massimo [kN] | sezione resistente [mm <sup>2</sup> ] | * tensione max [MPa] | n° cicli a rottura |
|-----------------------|------------|-----------------------|---------------------------------------|----------------------|--------------------|
| <b>Prove STATICHE</b> |            | 6,292                 |                                       | 54,95                | <b>1</b>           |
| <b>-20%</b>           | 8_03       | 5,033                 | 86,0                                  | 43,92                | <b>1445</b>        |
|                       | 8_25       |                       | 85,0                                  | 44,44                | <b>857</b>         |
|                       | 8_51       |                       | 86,7                                  | 43,56                | <b>1638</b>        |
|                       | 8_75       |                       | 86,4                                  | 43,67                | <b>4567</b>        |
|                       |            | <b>Offset</b>         | <b>2,77</b>                           |                      |                    |
|                       |            | <b>Span</b>           | <b>2,27</b>                           |                      |                    |
|                       |            | Media                 |                                       | 43,90                | 2127               |
|                       | sn-1       |                       | 0,390                                 | 1660                 |                    |
|                       | CV%        |                       | 0,89%                                 | 78,07%               |                    |
| <b>-30%</b>           | 8_15       | 4,404                 | 84,0                                  | 39,33                | <b>12166</b>       |
|                       | 8_66       |                       | 85,5                                  | 38,63                | <b>3793</b>        |
|                       | 8_91       |                       | 85,7                                  | 38,54                | <b>8986</b>        |
|                       | 8_22       |                       | 85,1                                  | 38,83                | <b>11560</b>       |
|                       |            | <b>Offset</b>         | <b>2,42</b>                           |                      |                    |
|                       |            | <b>Span</b>           | <b>1,98</b>                           |                      |                    |
|                       |            | Media                 |                                       | 38,83                | 9126               |
|                       | sn-1       |                       | 0,352                                 | 3813                 |                    |
|                       | CV%        |                       | 0,91%                                 | 41,79%               |                    |
| <b>-40%</b>           | 8_12       | 3,775                 | 85,6                                  | 33,06                | <b>220722</b>      |
|                       | 8_54       |                       | 86,6                                  | 32,68                | <b>64293</b>       |
|                       | 8_77       |                       | 85,8                                  | 33,01                | <b>54967</b>       |
|                       |            | <b>Offset</b>         | <b>2,08</b>                           |                      |                    |
|                       |            | <b>Span</b>           | <b>1,70</b>                           |                      |                    |
|                       |            | Media                 |                                       | 32,92                | 113327             |
|                       |            | sn-1                  |                                       | 0,206                | 93123              |
|                       | CV%        |                       | 0,63%                                 | 82,17%               |                    |

Tabella 22 – Risultati prova di fatica su provini della serie\_8

| % carico              | n° provino | * carico massimo [kN] | sezione resistente [mm <sup>2</sup> ] | * tensione max [MPa] | n° cicli a rottura |        |
|-----------------------|------------|-----------------------|---------------------------------------|----------------------|--------------------|--------|
| <b>Prove STATICHE</b> |            | 6,760                 |                                       | 53,47                | <b>1</b>           |        |
| <b>-20%</b>           | 9_13       | 5,408                 | 94,4                                  | 42,97                | <b>6344</b>        |        |
|                       | 9_14       |                       | 94,3                                  | 43,01                | <b>3954</b>        |        |
|                       | 9_16       |                       | 96,6                                  | 41,99                | <b>1247</b>        |        |
|                       | 9_24       |                       | 92,0                                  | 44,11                | <b>2358</b>        |        |
|                       |            | <b>Offset</b>         | <b>2,97</b>                           |                      |                    |        |
|                       |            | <b>Span</b>           | <b>2,43</b>                           |                      |                    |        |
|                       |            | Media                 |                                       |                      | 43,02              | 3476   |
|                       | st.dev     |                       |                                       | 0,864                | 2212               |        |
|                       | CoV        |                       |                                       | 2,01%                | 63,63%             |        |
| <b>-30%</b>           | 9_17       | 4,732                 | 93,5                                  | 37,96                | <b>9654</b>        |        |
|                       | 9_18       |                       | 93,9                                  | 37,81                | <b>12293</b>       |        |
|                       | 9_19       |                       | 92,6                                  | 38,33                | <b>6950</b>        |        |
|                       | 9_23       |                       | 93,6                                  | 37,91                | <b>14282</b>       |        |
|                       |            | <b>Offset</b>         | <b>2,60</b>                           |                      |                    |        |
|                       |            | <b>Span</b>           | <b>2,13</b>                           |                      |                    |        |
|                       |            | Media                 |                                       |                      | 38,00              | 10795  |
|                       | st.dev     |                       |                                       | 0,227                | 3188               |        |
|                       | CoV        |                       |                                       | 0,60%                | 29,53%             |        |
| <b>-40%</b>           | 9_20       | 4,056                 | 96,6                                  | 31,50                | <b>105452</b>      |        |
|                       | 9_21       |                       | 95,2                                  | 31,97                | <b>104108</b>      |        |
|                       | 9_22       |                       | 92,4                                  | 32,91                | <b>500000</b>      |        |
|                       |            | <b>Offset</b>         | <b>2,23</b>                           |                      |                    |        |
|                       |            | <b>Span</b>           | <b>1,70</b>                           |                      |                    |        |
|                       |            | Media                 |                                       |                      | 32,13              | 236520 |
|                       |            | st.dev                |                                       |                      | 0,716              | 228181 |
|                       | CoV        |                       |                                       | 2,23%                | 96,47%             |        |

Tabella 23 – Risultati prova di fatica su provini della serie\_9

### Analisi e confronto

Dalle tabelle riportanti i risultati, concentrandosi sulla colonna che evidenzia i diversi n° di cicli a rottura, risulta subito evidente che per alcune serie risultano alti valori di deviazione standard e coefficiente di variazione. Per tale motivo sono stati isolati i dati “sospetti”, ovvero distanti dalla media in modo più marcato rispetto agli altri, e si è verificata la loro attendibilità, *dal punto di vista statistico*, tramite un semplice test statistico, il Q - test di Dixon.

Per effettuare il Q - test al fine di individuare i dati errati, si devono disporre i dati in ordine di valore crescente, e quindi per ognuno calcolare il coefficiente  $Q_{calc}$ , definito come rapporto tra DIVARIO (differenza tra il valore del dato anomalo e il valore del dato ad esso più vicino) e DISPERSIONE (ampiezza dell’intervallo di valori).

I valori ottenuti, che ovviamente dipendono dalla dimensione del set di dati, vengono poi confrontati con tabelle che riportano i valori critici di  $Q_{tab}$  per l’intervallo di confidenza desiderato:

se  $Q_{calc} > Q_{tab}$  → il dato “anomalo” va eliminato, con affidabilità pari alla percentuale riportata (nel nostro caso 90%)

|                    |       |       |       |       |       |       |       |       |
|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Numero di dati:    | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    |
| Q <sub>90%</sub> : | 0.941 | 0.765 | 0.642 | 0.560 | 0.507 | 0.468 | 0.437 | 0.412 |

I risultati “sospetti” che sono stati analizzati riguardano il numero di cicli a rottura delle seguenti prove:

- test con carico ridotto del 20% per la serie\_8:  
provino 8\_25 → n° cicli a rottura 875  
provino 8\_75 → n° cicli a rottura 4567
- test con carico ridotto del 30% per la serie\_8:  
provino 8\_66 → n° cicli a rottura 3793
- test con carico ridotto del 40% per la serie\_8:  
provino 8\_12 → n° cicli a rottura 220722

| set di dati in ordine crescente | DIVARIO | DISPERSIONE | $Q_{calc}$ | $Q_{tab}$ | Risultato del Q-test |
|---------------------------------|---------|-------------|------------|-----------|----------------------|
| 857                             | 588     | 3710        | 0,158      | 0,765     | ATTENDIBILE          |
| 1445                            |         |             |            |           |                      |
| 1638                            |         |             |            |           |                      |
| 4567                            | 2929    | 3710        | 0,789      | 0,765     | NON ATTENDIBILE      |
| 3793                            | 5193    | 8373        | 0,620      | 0,765     | ATTENDIBILE          |
| 8986                            |         |             |            |           |                      |
| 11560                           |         |             |            |           |                      |
| 12166                           |         |             |            |           |                      |
| 54967                           |         |             |            |           |                      |
| 64293                           |         |             |            |           |                      |
| 220722                          | 156429  | 165755      | 0,944      | 0,941     | NON ATTENDIBILE      |

Tabella 24 – Calcoli per lo svolgimento del Q-test di Dixon

Sono quindi da scartare i dati riguardanti i provini 8\_75 e 8\_12.

Dalla tabella 23, che riporta i risultati della serie\_9, emerge inoltre un ulteriore dato anomalo, ovvero il numero di cicli a rottura del provino 9\_22: durante la campagna di prove in realtà non è stato raggiunto il limite di rottura. Per motivi legati alle tempistiche, e all'utilizzo della macchina di prova, si è deciso di fissare a 500.000 cicli il valore massimo per il test, assumendo tale limite come soglia della vita a fatica infinita.

| set di dati in ordine crescente | DIVARIO | DISPERSIONE | $Q_{calc}$ | $Q_{tab}$ | Risultato del Q-test |
|---------------------------------|---------|-------------|------------|-----------|----------------------|
| 104108                          |         |             |            |           |                      |
| 105452                          |         |             |            |           |                      |
| 500000                          | 394548  | 395892      | 0,997      | 0,941     | NON ATTENDIBILE      |

Tabella 25 – Calcoli per il Q-test di Dixon per il provino 9\_22

Pertanto anche questo dato va eliminato ai fini del calcolo statistico, ma tenuto bene in considerazione in fase di analisi del comportamento a fatica dei laminati in tessuto pre-impregnato SAATI CC802 ET445S 35%.

Al fine di mettere a confronto i dati, ed avere una visione d'insieme che permetta di valutarli ed analizzarli, sono di seguito riportati gli istogrammi con i valori ottenuti dalle prove di fatica:



Figura 82 – Istogrammi Cicli a Rottura con riduzione di carico del 20%

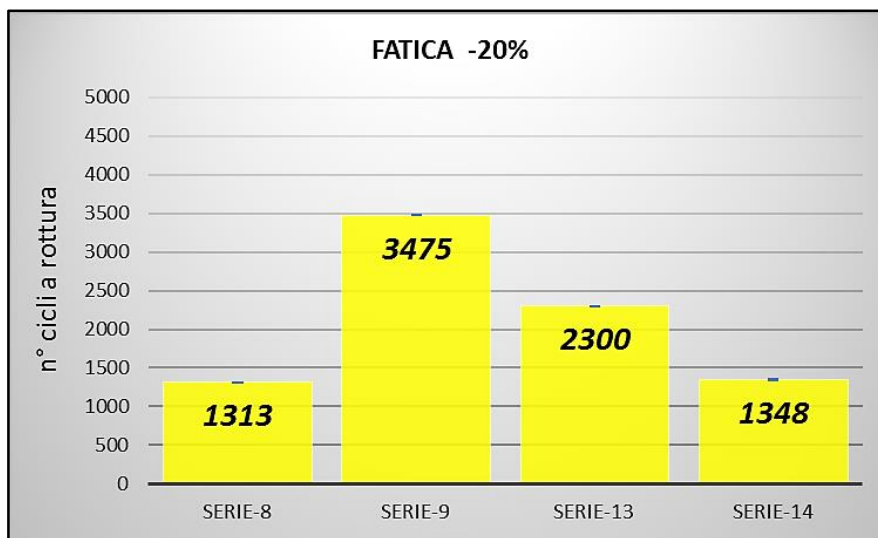


Figura 83 – Istogramma confronto MEDIA SERIE n° cicli a rottura per carico ridotto del 20%



Figura 84 – Istogrammi Cicli a Rottura con riduzione di carico del 30%

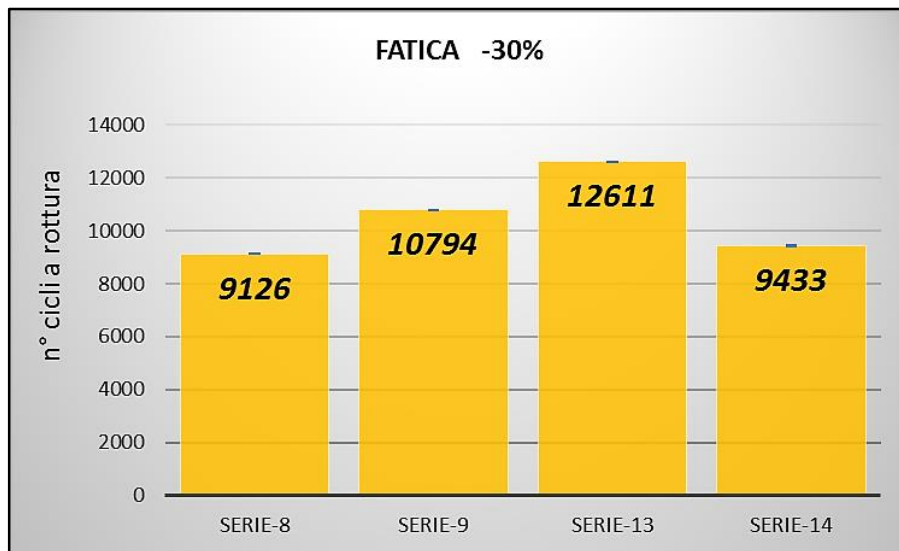


Figura 85 – Istogramma confronto MEDIA SERIE n° cicli a rottura per carico ridotto del 30%





Figura 86 – Istogrammi Cicli a Rottura con riduzione di carico del 40%

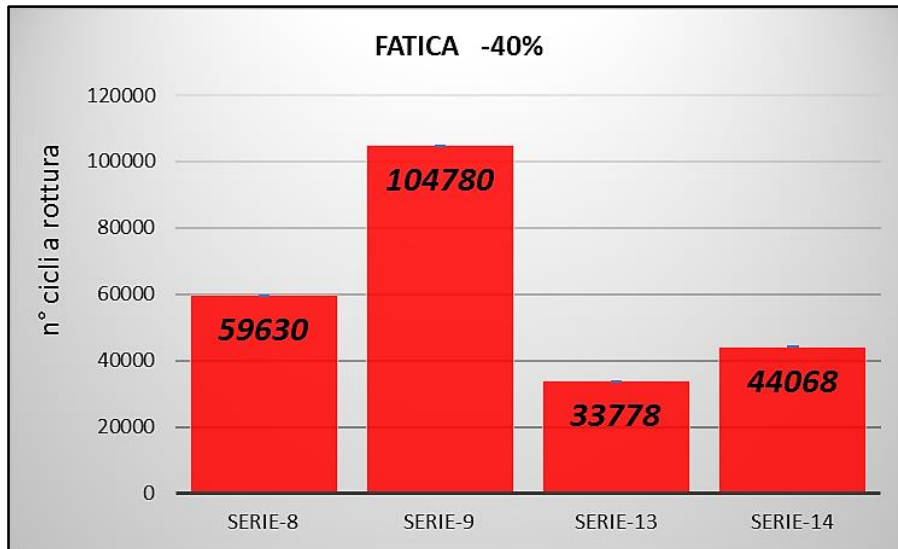


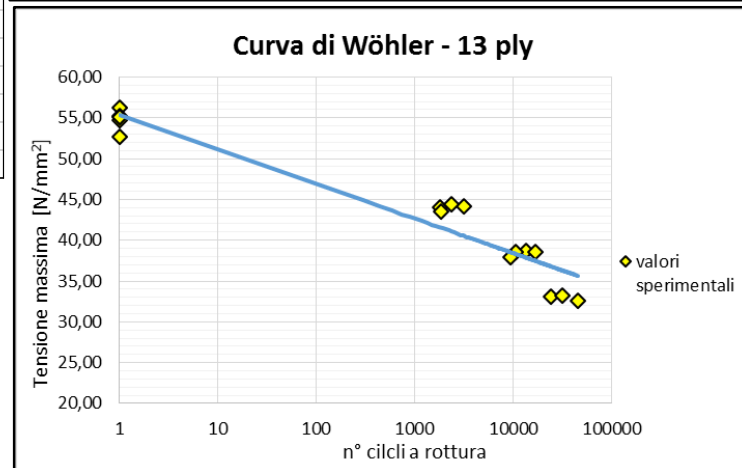
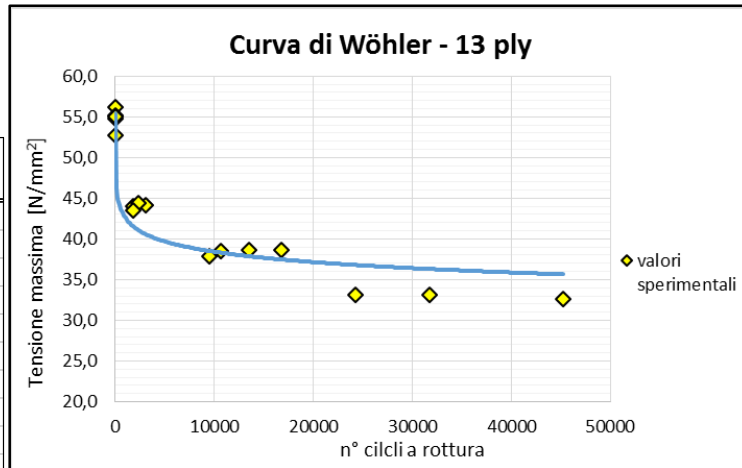
Figura 87 – Istogramma confronto MEDIA SERIE n° cicli a rottura per carico ridotto del 40%

Successivamente si è passati alla costruzione dei *diagrammi di Wöhler*, che permettono di comprendere meglio il comportamento a fatica delle differenti serie di provini testati.

Nelle pagine a seguire sono riportati diagrammi delle singole serie, seguiti da sovrapposizioni utili al confronto.

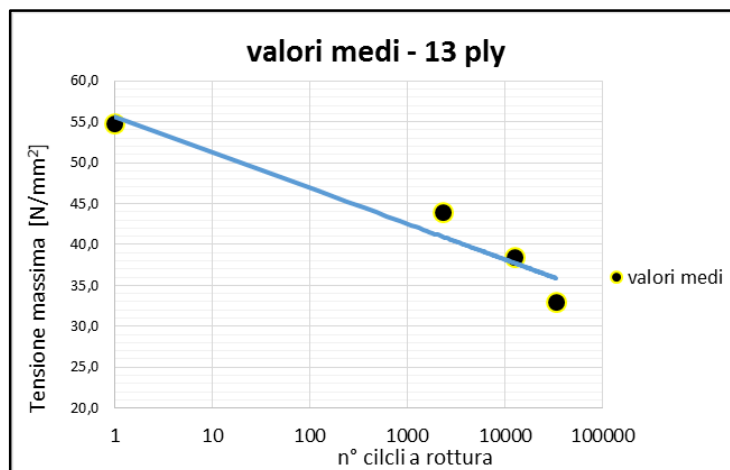
| PROVINO | $\sigma_{max}$ [Mpa] | N     |
|---------|----------------------|-------|
| 13_02   | 56,22                | 1     |
| 13_16   | 54,75                | 1     |
| 13_28   | 55,23                | 1     |
| 13_34   | 55,08                | 1     |
| 13_40   | 52,71                | 1     |
| 13_08   | 44,01                | 1818  |
| 13_14   | 44,10                | 3139  |
| 13_29   | 44,42                | 2384  |
| 13_37   | 43,48                | 1858  |
| 13_10   | 38,66                | 13481 |
| 13_12   | 38,58                | 16746 |
| 13_27   | 38,51                | 10712 |
| 13_35   | 37,93                | 9505  |
| 13_03   | 33,09                | 24288 |
| 13_26   | 33,18                | 31790 |
| 13_39   | 32,64                | 45257 |

Figura 88 –  
Diagramma di Wöhler per provini serie\_13 (a);  
Diagramma con ascisse in scala logaritmica (b)



| serie 13 |                                   |                |
|----------|-----------------------------------|----------------|
| TEST     | media valori $\sigma_{max}$ [Mpa] | media valori N |
| statico  | 54,797                            | 1              |
| -20%     | 44,003                            | 2300           |
| -30%     | 38,419                            | 12611          |
| -40%     | 32,968                            | 33778          |

Figura 89 –  
Diagramma di Wöhler per CC802-serie\_13 (ascisse in scala logaritmica)



| PROVINO | $\sigma_{max}$ [Mpa] | N     |
|---------|----------------------|-------|
| 14_02   | 54,75                | 1     |
| 14_14   | 58,40                | 1     |
| 14_32   | 54,43                | 1     |
| 14_38   | 55,13                | 1     |
| 14_50   | 55,27                | 1     |
| 14_04   | 44,74                | 832   |
| 14_18   | 43,56                | 1005  |
| 14_33   | 44,72                | 2183  |
| 14_48   | 44,36                | 1373  |
| 14_11   | 38,97                | 14242 |
| 14_25   | 38,91                | 12532 |
| 14_46   | 39,06                | 6739  |
| 14_20   | 33,37                | 40132 |
| 14_24   | 33,34                | 46538 |
| 14_44   | 33,58                | 45535 |

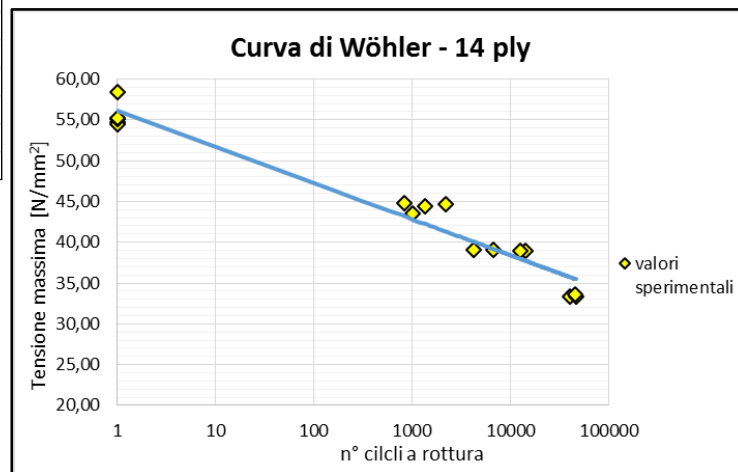
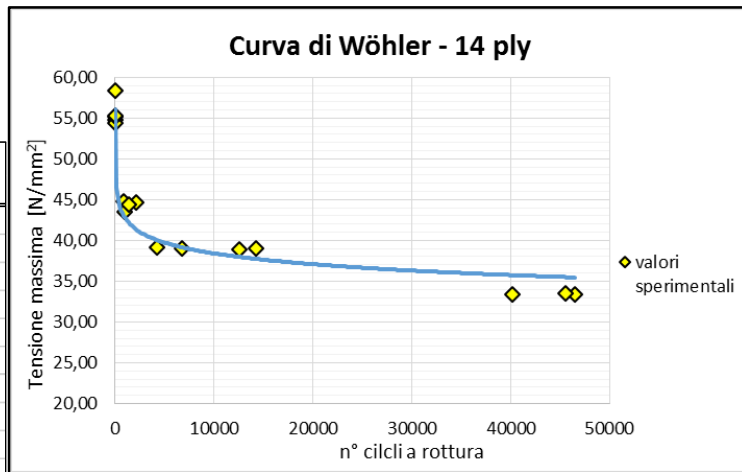


Figura 90 –  
 Diagramma di Wöhler per provini serie\_14 (a);  
 Diagramma con ascisse in scala logaritmica (b)

| serie 14 |                                   |                |
|----------|-----------------------------------|----------------|
| TEST     | media valori $\sigma_{max}$ [Mpa] | media valori N |
| statica  | 55,596                            | 1              |
| -20%     | 44,343                            | 1348           |
| -30%     | 39,014                            | 9433           |
| -40%     | 33,429                            | 44068          |

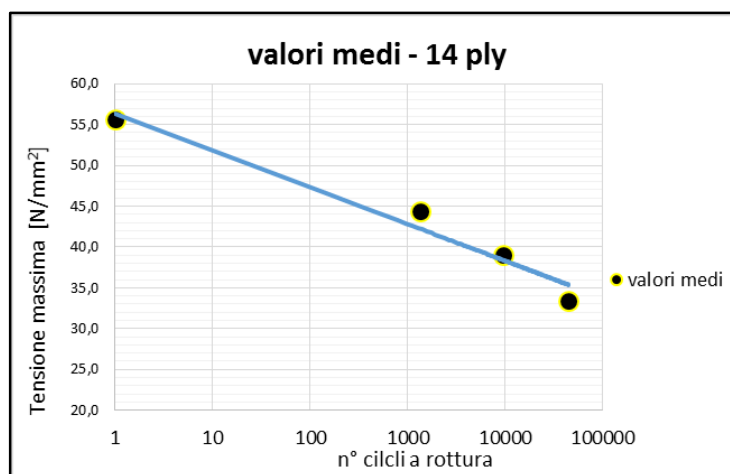
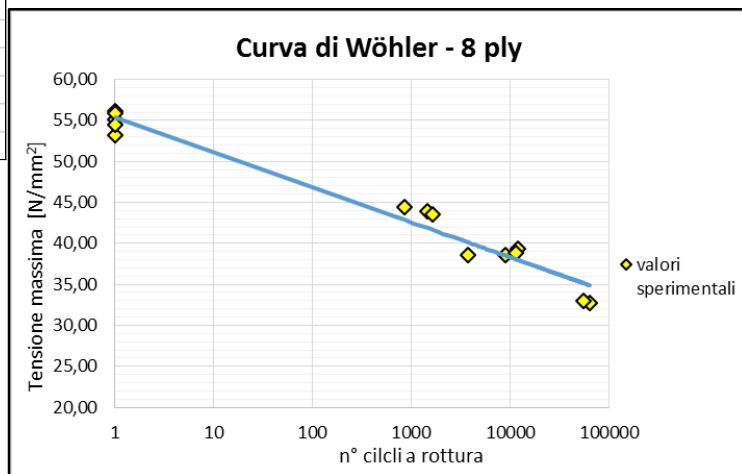
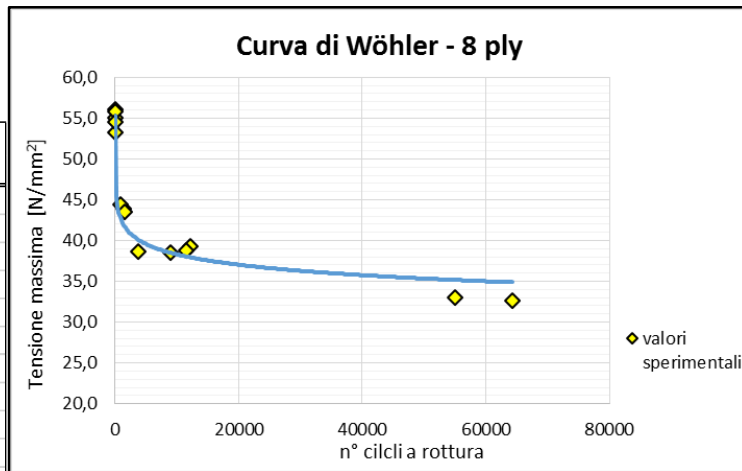


Figura 91 –  
 Diagramma di Wöhler per CC802-serie\_14 (ascisse in scala logaritmica)

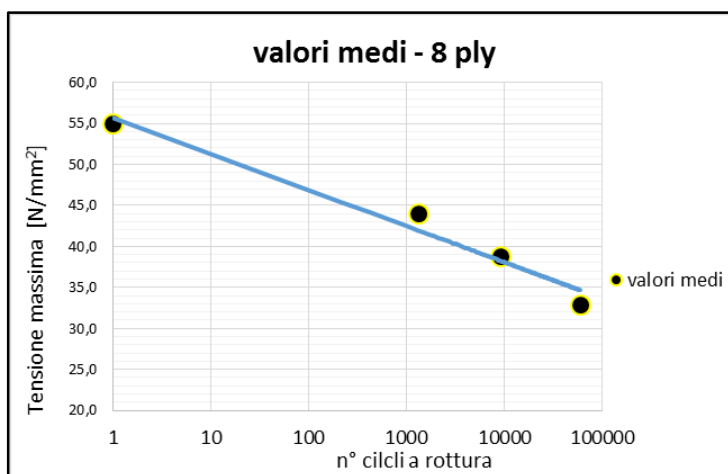
| PROVINO | $\sigma_{max}$ [Mpa] | N      |
|---------|----------------------|--------|
| 8_01    | 56,07                | 1      |
| 8_33    | 55,09                | 1      |
| 8_55    | 53,21                | 1      |
| 8_78    | 55,85                | 1      |
| 8_98    | 54,52                | 1      |
| 8_03    | 43,92                | 1445   |
| 8_25    | 44,44                | 857    |
| 8_51    | 43,56                | 1638   |
| 8_75    | 43,67                | 4567   |
| 8_15    | 39,33                | 12166  |
| 8_66    | 38,63                | 3793   |
| 8_91    | 38,54                | 8986   |
| 8_22    | 38,83                | 11560  |
| 8_12    | 33,06                | 220722 |
| 8_54    | 32,68                | 64293  |
| 8_77    | 33,01                | 54967  |

Figura 92 –  
 Diagramma di  
 Wöhler per provini  
 serie\_8 (a);  
 Diagramma con  
 ascisse in scala  
 logaritmica (b)



| serie 8 |                                   |                |
|---------|-----------------------------------|----------------|
| TEST    | media valori $\sigma_{max}$ [Mpa] | media valori N |
| statica | 54,947                            | 1              |
| -20%    | 43,971                            | 1313           |
| -30%    | 38,832                            | 9126           |
| -40%    | 32,869                            | 59630          |

Figura 93 –  
 Diagramma di Wöhler  
 per CC802-serie\_8  
 (ascisse in scala  
 logaritmica)



| PROVINO | $\sigma_{max}$ [Mpa] | N      |
|---------|----------------------|--------|
| 9_09    | 52,92                | 1      |
| 9_10    | 52,31                | 1      |
| 9_11    | 53,75                | 1      |
| 9_12    | 54,88                | 1      |
| 9_13    | 42,97                | 6344   |
| 9_14    | 43,01                | 3954   |
| 9_16    | 41,99                | 1247   |
| 9_24    | 44,11                | 2358   |
| 9_17    | 37,96                | 9654   |
| 9_18    | 37,81                | 12293  |
| 9_19    | 38,33                | 6950   |
| 9_23    | 37,91                | 14282  |
| 9_20    | 31,50                | 105452 |
| 9_21    | 31,97                | 104108 |
| 9_22    | 32,91                | 500000 |

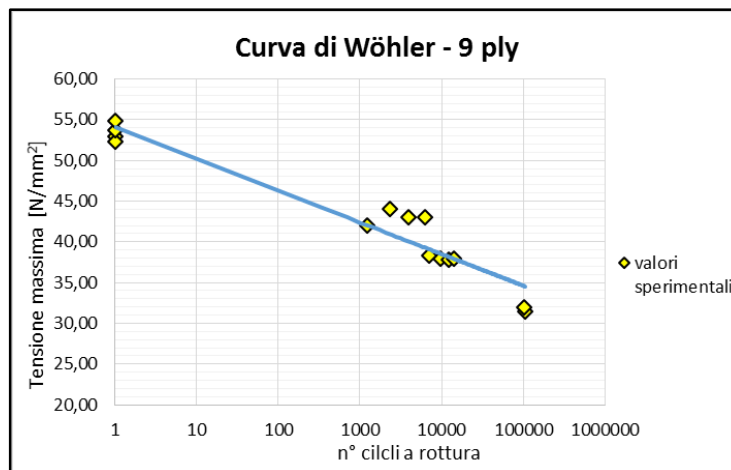
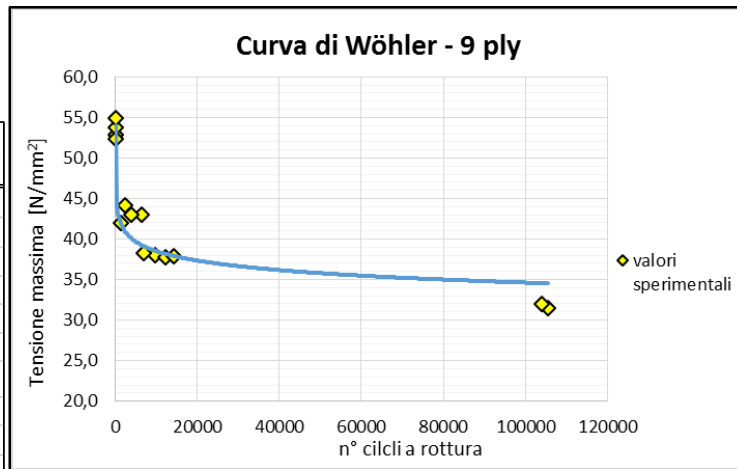


Figura 94 –  
 Diagramma di Wöhler per provini serie\_9 (a);  
 Diagramma con ascisse in scala logaritmica (b)

| serie 9 |                                   |                |
|---------|-----------------------------------|----------------|
| TEST    | media valori $\sigma_{max}$ [Mpa] | media valori N |
| statica | 53,465                            | 1              |
| -20%    | 43,019                            | 3476           |
| -30%    | 38,001                            | 10795          |
| -40%    | 31,735                            | 104780         |

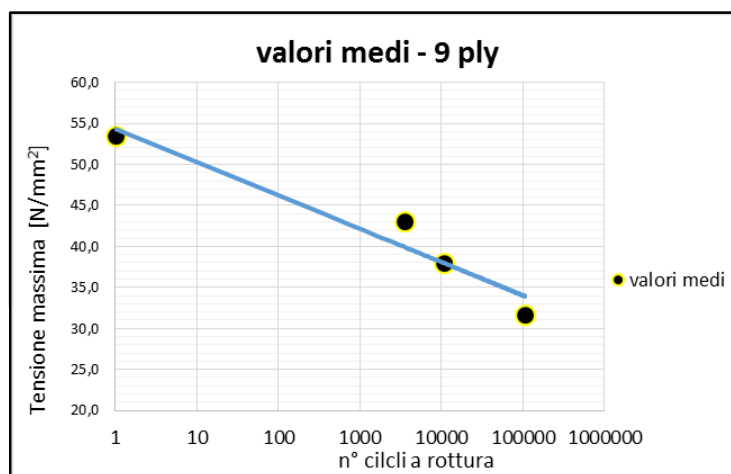


Figura 95 -  
 Diagramma di Wöhler per CC802-serie\_9 (ascisse in scala logaritmica)

Sovrapposizione dei *diagrammi di Wöhler* per le due configurazioni:

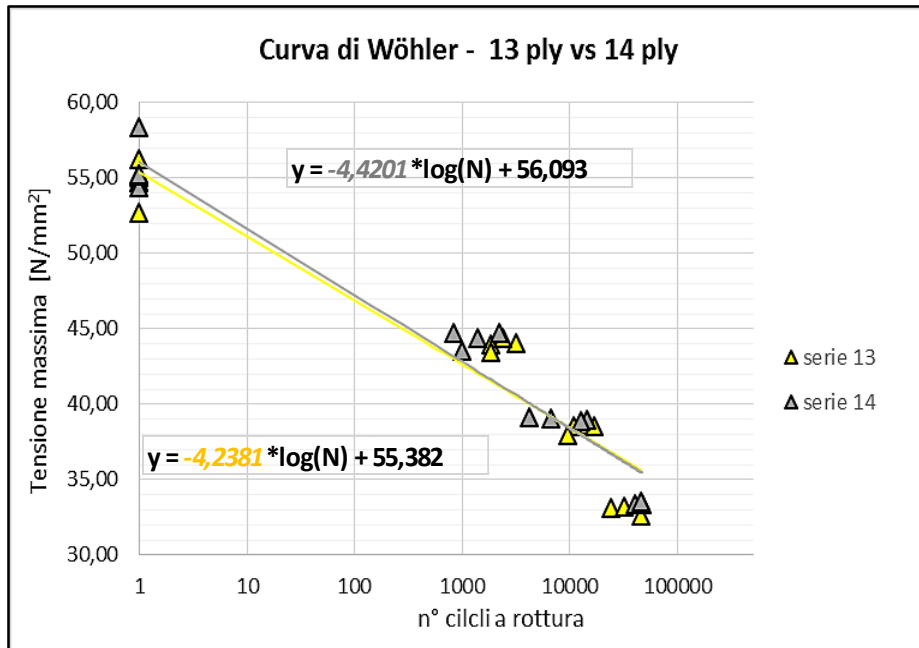


Figura 96 - Confronto tra diagrammi di Wöhler per *serie\_13* e *serie\_14* (configurazione 1)

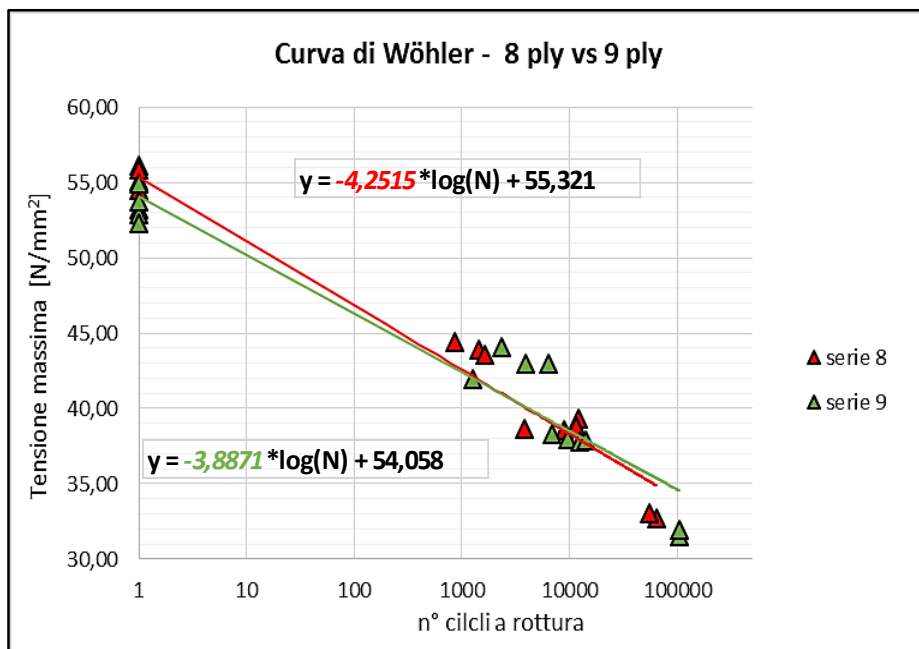


Figura 97 - Confronto tra diagrammi di Wöhler per *serie\_8* e *serie\_9* (configurazione 2)

Sovrapposizione dei *diagrammi di Wöhler* per n° pari o dispari di ply:

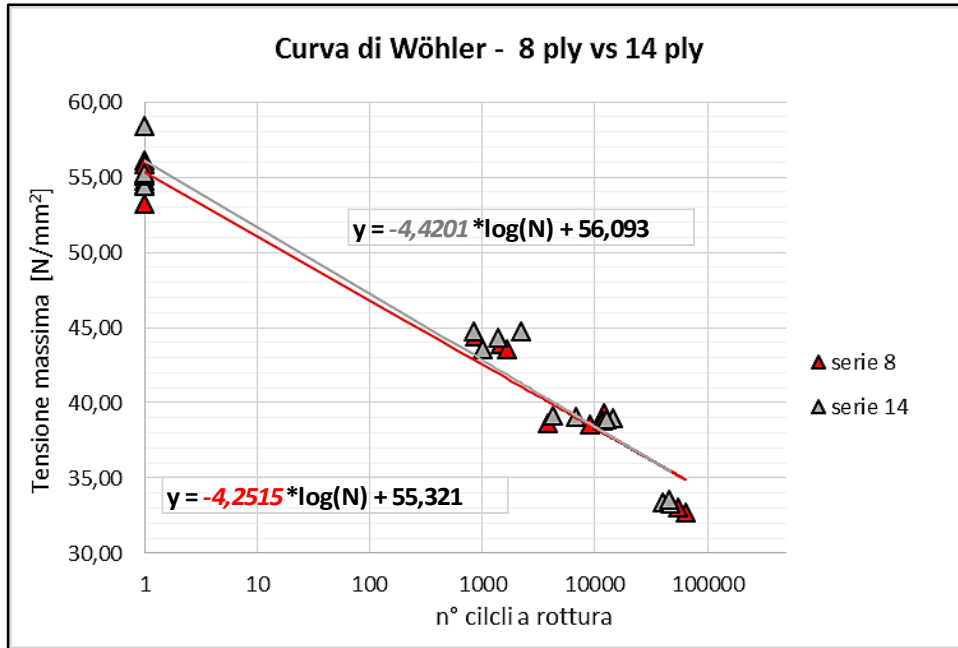


Figura 98 - Confronto tra diagrammi di Wöhler per *serie\_8* e *serie\_14* (n° di ply PARI)

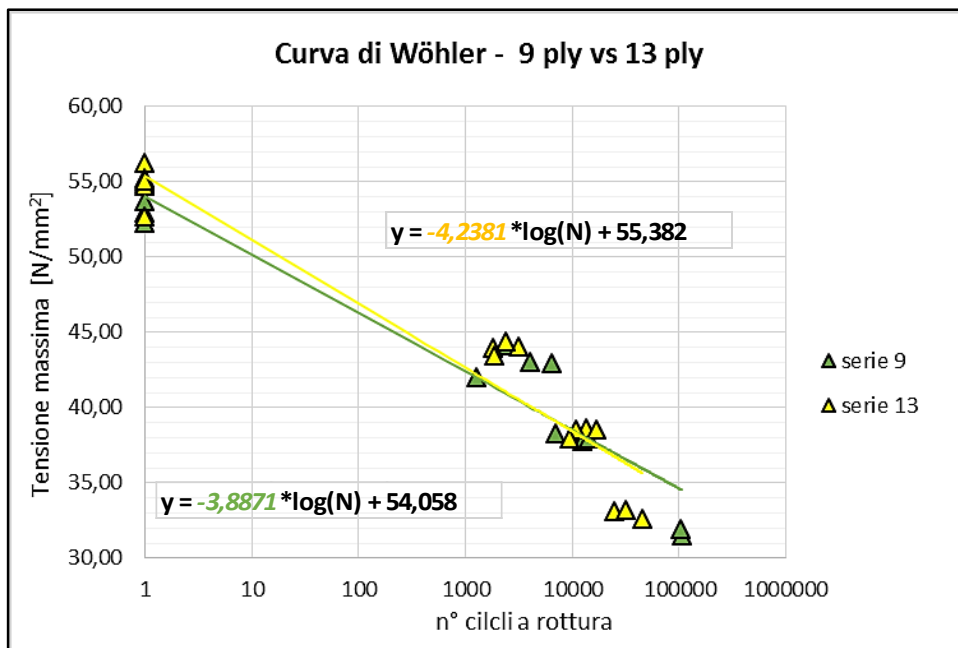


Figura 99 - Confronto tra diagrammi di Wöhler per *serie\_9* e *serie\_13* (n° di ply DISPARI)





## Capitolo 6 - Test su provini con diversa sequenza di impilamento

A valle dei test effettuati per le diverse serie di campioni, si è deciso di ripetere lo stesso tipo di prove su un'altra tipologia di provini: è stata introdotta un'ulteriore variabile.

Le precedenti prove erano state effettuate allo scopo di indagare il comportamento del materiale CC802 in relazione a diversi spessori e a sequenze di impilamento differenti in quanto a numero di strati.

La campagna di prove di cui sono presentati i risultati in questa sezione, prende in considerazione l'orientamento delle ply: i test statici e a fatica sono stati effettuati su campioni del tutto analoghi a quelli della serie-13, variando l'orientamento della ply centrale, disposta a 45°.

Il dimensionamento, i riferimenti alla normativa, le procedure, la successione delle fasi di lavoro e i calcoli statistici sono tutti effettuati in modo analogo alle prove presentate nei capitoli precedenti:

|                                  |                            |
|----------------------------------|----------------------------|
| MATERIALE                        | analogo ai test precedenti |
| lunghezza nominale<br>$l_0$ [mm] | 60                         |
| larghezza nominale<br>$b_0$ [mm] | 20                         |
| spessore nominale<br>$h_0$ [mm]  | 10,01                      |
| n° ply                           | 13                         |
| <u>Sequenza di laminazione</u>   | $[0_6/\overline{45}]_s$    |
| interasse $i$ [mm]               | 42                         |
|                                  | <b>serie 13A</b>           |

Tabella 26 – Dimensioni e configurazione della serie 13A

## 6.1 - Caratterizzazione dei campioni serie-13A

### Dimensioni e massa

| n° provino                    | lunghezza <i>l</i> [mm] | larghezza <sup>1</sup> <i>b</i> [mm] | spessore <sup>1</sup> <i>h</i> [mm] | massa <i>m</i> [g] |
|-------------------------------|-------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|--------------------|
| 13A_03                        | 59,99                   | 19,99                                | 10,15                               | 18,577             |
| 13A_12                        | 59,95                   | 20,03                                | 10,17                               | 18,564             |
| 13A_23                        | 59,98                   | 20,02                                | 10,13                               | 18,605             |
| 13A_27                        | 59,96                   | 20,06                                | 10,16                               | 18,674             |
| 13A_32                        | 59,92                   | 20,05                                | 10,12                               | 18,555             |
| 13A_04                        | 60,04                   | 20,00                                | 10,17                               | 18,615             |
| 13A_07                        | 59,97                   | 20,08                                | 10,16                               | 18,645             |
| 13A_13                        | 59,93                   | 20,02                                | 10,15                               | 18,597             |
| 13A_25                        | 59,94                   | 20,03                                | 10,20                               | 18,464             |
| 13A_05                        | 60,01                   | 20,04                                | 10,17                               | 18,629             |
| 13A_14                        | 59,92                   | 20,05                                | 10,14                               | 18,567             |
| 13A_22                        | 59,93                   | 20,00                                | 10,14                               | 18,575             |
| 13A_28                        | 59,97                   | 20,07                                | 10,17                               | 18,666             |
| 13A_06                        | 59,96                   | 20,01                                | 10,16                               | 18,644             |
| 13A_18                        | 59,99                   | 20,12                                | 10,16                               | 18,699             |
| 13A_26                        | 59,98                   | 19,99                                | 10,17                               | 18,643             |
| <b>MIN</b>                    | 59,92                   | 19,99                                | 10,12                               | 18,46              |
| <b>MAX</b>                    | 60,04                   | 20,12                                | 10,20                               | 18,70              |
| <b>errore min %</b>           | -0,08%                  | -0,21%                               | -0,39%                              | -0,77%             |
| <b>errore max %</b>           | 0,13%                   | 0,41%                                | 0,43%                               | 0,49%              |
| <b>mean value</b>             | <b>59,97</b>            | <b>20,04</b>                         | <b>10,16</b>                        | <b>18,61</b>       |
| <b><i>s</i><sub>n-1</sub></b> | <b>0,03347</b>          | <b>0,03483</b>                       | <b>0,01878</b>                      | <b>0,05757</b>     |
| <b>CV %</b>                   | <b>0,056%</b>           | <b>0,174%</b>                        | <b>0,185%</b>                       | <b>0,309%</b>      |

Tabella 27 – Caratterizzazione dimensionale serie\_13A

Come per le altre configurazioni, pure nel caso dei provini della serie 13A, gli errori dimensionali dovuti all'imprecisione del taglio manuale sono piuttosto ridotti, e non superano il punto percentuale.

Anche il valore della densità è in linea con quello ottenuto per le altre serie di provini (tabella 28): il valore medio delle altre serie differisce dai 1,52 g/cm<sup>3</sup> della serie 13A di solo l'1,04%.

## Volume e densità

| n° provino                  | volume $V$ [cm <sup>3</sup> ] | densità $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ] | sezione resistente $A$ [mm <sup>2</sup> ] |
|-----------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|---|
| 13A_03                      | 12,2                          | 1,5260                              | 202,93                                    |
| 13A_12                      | 12,2                          | 1,5204                              | 203,67                                    |
| 13A_23                      | 12,2                          | 1,5287                              | 202,90                                    |
| 13A_27                      | 12,2                          | 1,5283                              | 203,78                                    |
| 13A_32                      | 12,2                          | 1,5264                              | 202,87                                    |
| 13A_04                      | 12,2                          | 1,5248                              | 203,33                                    |
| 13A_07                      | 12,2                          | 1,5237                              | 204,05                                    |
| 13A_13                      | 12,2                          | 1,5276                              | 203,14                                    |
| 13A_25                      | 12,2                          | 1,5077                              | 204,31                                    |
| 13A_05                      | 12,2                          | 1,5237                              | 203,74                                    |
| 13A_14                      | 12,2                          | 1,5236                              | 203,37                                    |
| 13A_22                      | 12,2                          | 1,5283                              | 202,80                                    |
| 13A_28                      | 12,2                          | 1,5254                              | 204,05                                    |
| 13A_06                      | 12,2                          | 1,5292                              | 203,33                                    |
| 13A_18                      | 12,3                          | 1,5256                              | 204,32                                    |
| 13A_26                      | 12,2                          | 1,5291                              | 203,27                                    |
| <b>MIN</b>                  | <b>12,15</b>                  | <b>1,51</b>                         | <b>202,80</b>                             |
| <b>MAX</b>                  | <b>12,26</b>                  | <b>1,53</b>                         | <b>204,32</b>                             |
| <b>errore min %</b>         | <b>-0,40%</b>                 | <b>-1,13%</b>                       | <b>-0,34%</b>                             |
| <b>errore max %</b>         | <b>0,45%</b>                  | <b>0,28%</b>                        | <b>0,41%</b>                              |
| <b>mean value</b>           | <b>12,20</b>                  | <b>1,52</b>                         | <b>203,49</b>                             |
| <b><math>s_{n-1}</math></b> | <b>0,03247</b>                | <b>0,00520</b>                      | <b>0,50967</b>                            |
| <b>CV %</b>                 | <b>0,266%</b>                 | <b>0,341%</b>                       | <b>0,250%</b>                             |

Tabella 28 – Volume, densità e sezione resistente per provini della serie\_13A

## Caratterizzazione tramite camera digitale e microscopio ottico

Tramite lucidatura e lavoro di messa a fuoco è stato possibile mettere in evidenza la struttura del laminato: nell'immagine seguente si può facilmente notare la sovrapposizione dei 13 strati, con il differente orientamento della ply centrale.

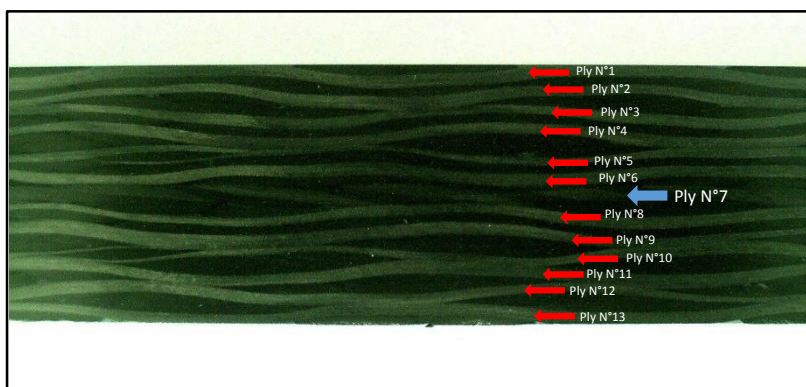


Figura 100 -  
Provino 13A\_28

## 6.2 - Risultati e analisi dati per le prove di flessione statica

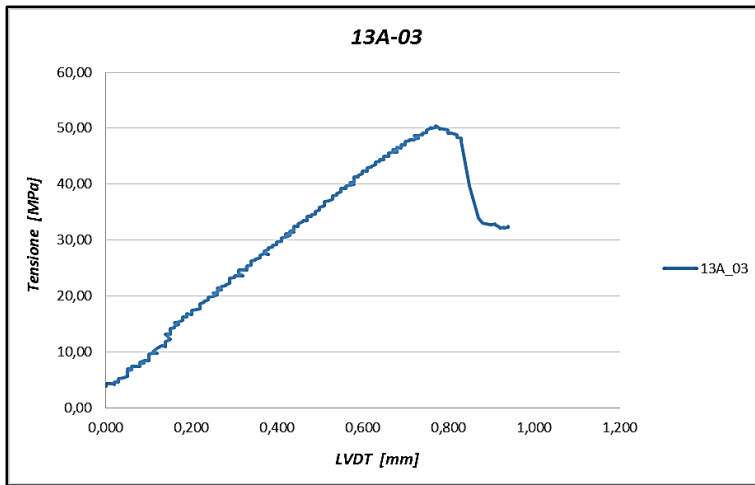


Figura 101 - *Provino 13A\_03:*

*Tensione – Spostamento*

*Tensione - Tempo*

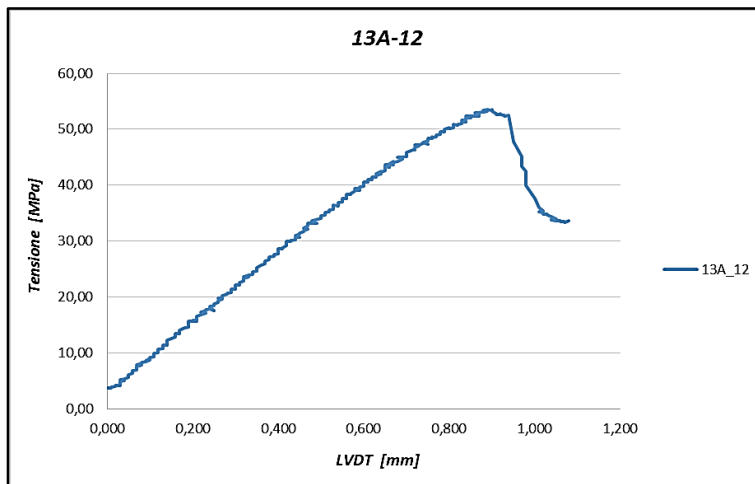
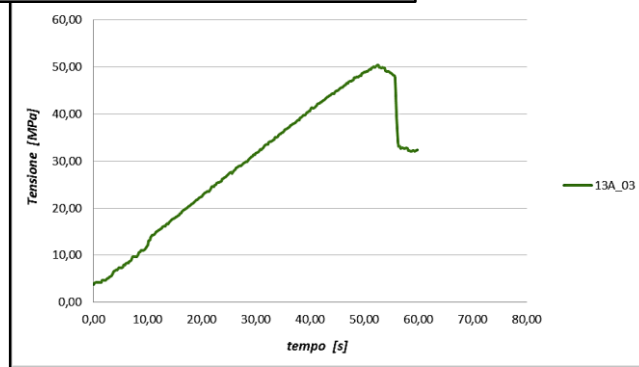
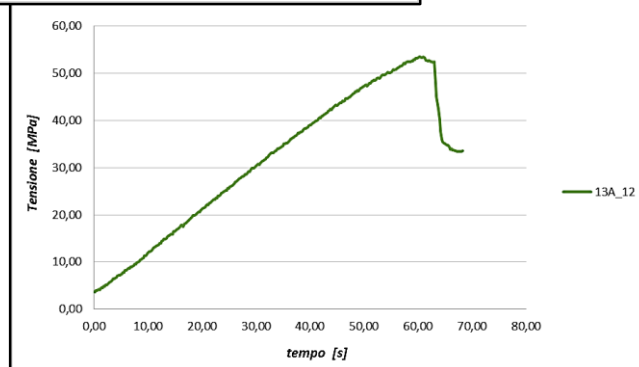


Figura 102 - *Provino 13A\_12:*

*Tensione – Spostamento*

*Tensione - Tempo*



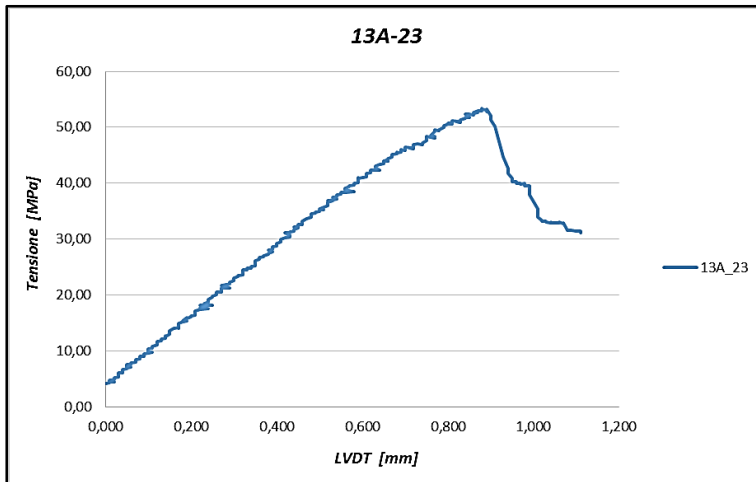


Figura 103 - **Provino 13A\_23:**

*Tensione – Spostamento*

*Tensione - Tempo*

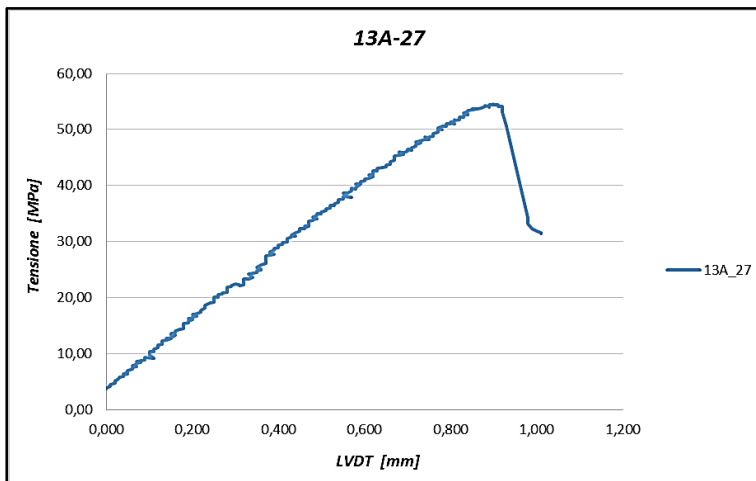
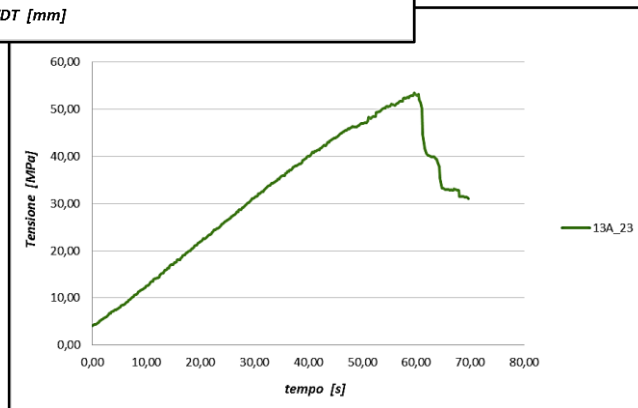
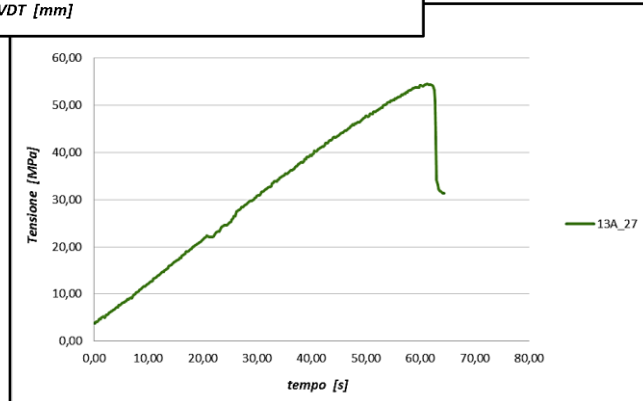


Figura 104 - **Provino 13A\_27:**

*Tensione – Spostamento*

*Tensione - Tempo*



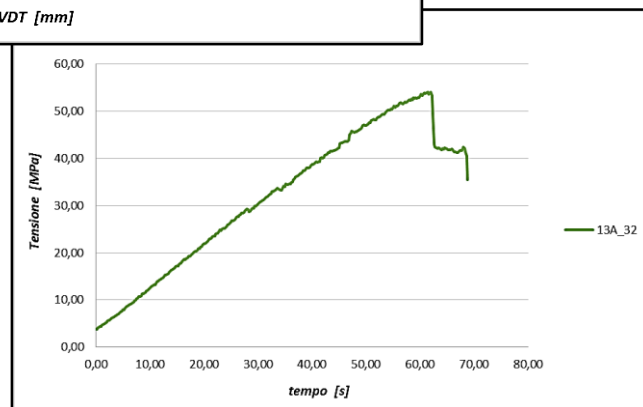
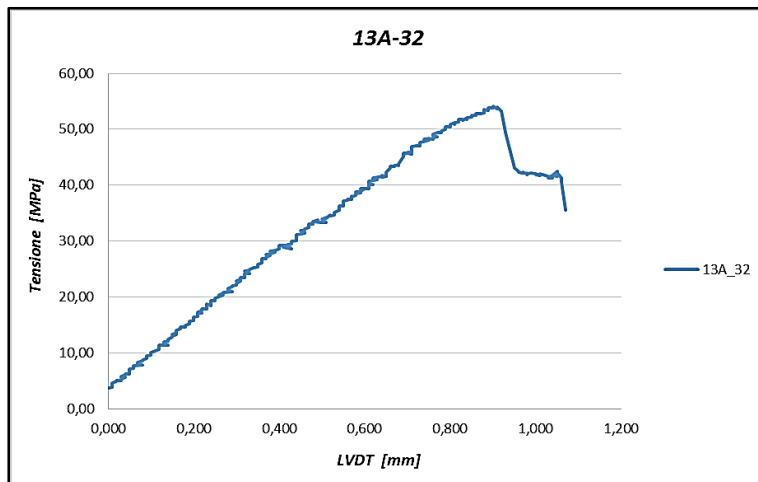


Figura 105 - *Provino 13A\_32:*

*Tensione – Spostamento*

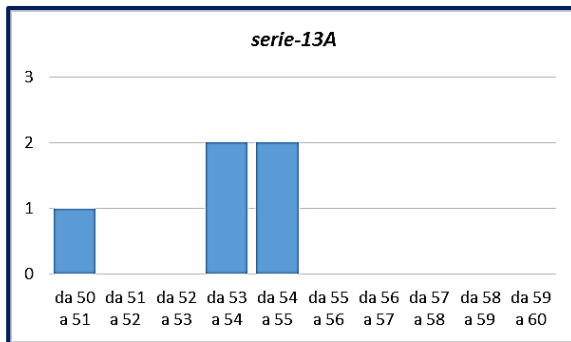
*Tensione - Tempo*

I grafici precedenti sono stati ottenuti in modo analogo a quelli del capitolo 5, elaborando i dati in output dalla macchina, e calcolando le tensioni attraverso l'equazione vista a pagina 55.

I risultati principali sono messi in evidenza nella tabella e nei grafici seguenti:

| n° provino        | carico di rottura [kN] | sezione resistente nominale* [mm <sup>2</sup> ] | tensione max nominale [Mpa] | sezione resistente reale [mm <sup>2</sup> ] | tensione max reale [Mpa] |
|-------------------|------------------------|---|-----------------------------|---|--------------------------|
| 13A_03            | 13,63                  | 200,2   | 51,061                      | 202,93                                      | 50,37                    |
| 13A_12            | 14,54                  | 200,2   | 54,471                      | 203,67                                      | 53,54                    |
| 13A_23            | 14,45                  | 200,2   | 54,133                      | 202,90                                      | 53,41                    |
| 13A_27            | 14,83                  | 200,2   | 55,557                      | 203,78                                      | 54,58                    |
| 13A_32            | 14,63                  | 200,2   | 54,808                      | 202,87                                      | 54,09                    |
| <b>mean value</b> | 14,416                 |   |                             |   | <b>53,20</b>             |
| <b>sn-1</b>       | 0,461                  |   |                             |   | <b>1,646</b>             |
| <b>CV %</b>       | 3,20%                  |   |                             |   | <b>3,09%</b>             |

Tabella 29 – Risultati prova statica per provini della serie\_13A



Ascisse: intervalli in MPa  
Ordinate: numero di provini con rottura all'interno dei rispettivi intervalli

Figura 106 - Distribuzione delle tensioni di rottura ottenute per la serie\_13A

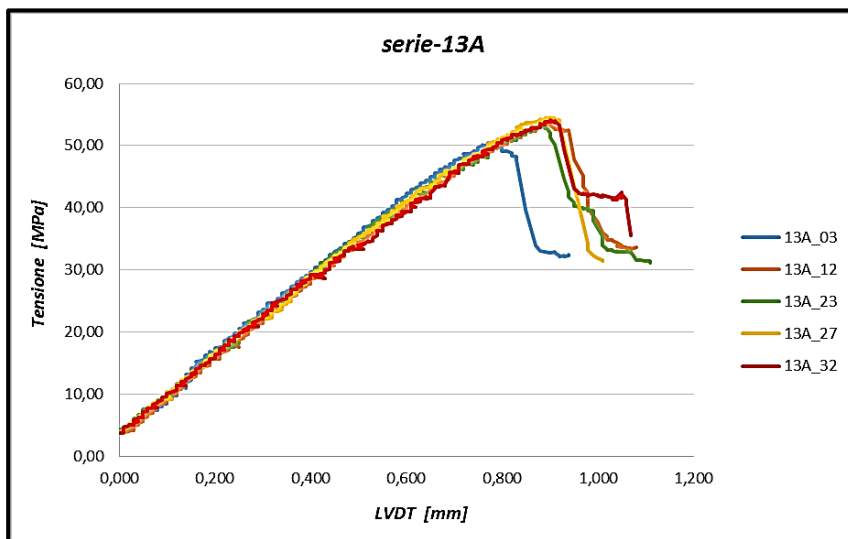


Figura 107 - Serie\_13A: confronto grafici Tensione - Spostamento

Il dato sulla *tensione di rottura statica (ILSS)* risulta il più basso tra le diverse configurazioni testate, ed in particolare è interessante notare la discrepanza con il valore della serie\_13, che differisce dalla 13A solamente per l'orientamento della ply centrale.

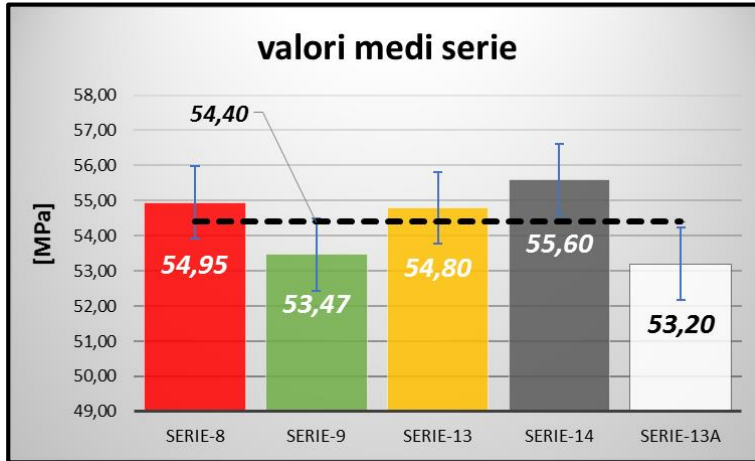


Figura 108 - Istogramma riassuntivo dei valori di tensione di rottura ottenuti per le prove statiche

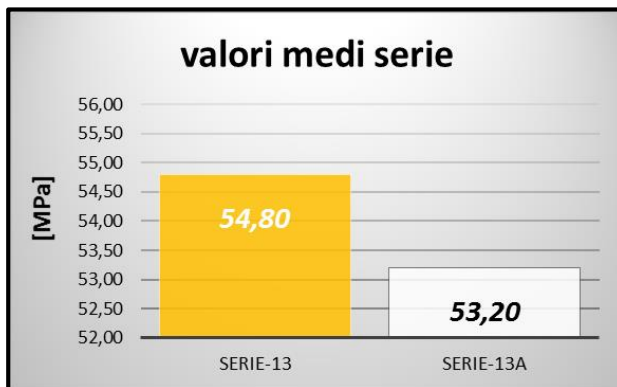


Figura 109 - Valori di tensione di rottura ottenuti per serie 13 e 13A



### 6.3 - Risultati e analisi dati per le prove di flessione a fatica

Si riportano in tabella e in forma grafica i risultati delle prove di fatica sui provini della serie 13A; in particolare, per motivi analoghi alle prove statiche, si evidenzia il confronto con la serie 13.

| % carico              | n° provino | * carico massimo [kN] | sezione resistente [mm <sup>2</sup> ] | * tensione max [MPa] | n° cicli a rottura |       |
|-----------------------|------------|-----------------------|---------------------------------------|----------------------|--------------------|-------|
| <b>Prove STATICHE</b> |            | 14,416                |                                       | 53,20                | <b>1</b>           |       |
| <b>-20%</b>           | 13A_04     | 11,533                | 203,3                                 | 42,54                | <b>743</b>         |       |
|                       | 13A_07     |                       | 204,0                                 | 42,39                | <b>949</b>         |       |
|                       | 13A_13     |                       | 203,1                                 | 42,58                | <b>1598</b>        |       |
|                       | 13A_25     |                       | 204,3                                 | 42,34                | <b>1498</b>        |       |
|                       |            | <b>Offset</b>         | <b>6,34</b>                           |                      |                    |       |
|                       |            | <b>Span</b>           | <b>5,19</b>                           |                      |                    |       |
|                       |            | Media                 |                                       |                      | 42,46              | 1197  |
|                       | st.dev     |                       |                                       | 0,117                | 416                |       |
|                       | CoV        |                       |                                       | 0,27%                | 34,75%             |       |
| <b>-30%</b>           | 13A_05     | 10,091                | 203,7                                 | 37,15                | <b>6946</b>        |       |
|                       | 13A_14     |                       | 203,4                                 | 37,21                | <b>5395</b>        |       |
|                       | 13A_22     |                       | 202,8                                 | 37,32                | <b>10201</b>       |       |
|                       | 13A_28     |                       | 204,0                                 | 37,09                | <b>5938</b>        |       |
|                       |            | <b>Offset</b>         | <b>5,55</b>                           |                      |                    |       |
|                       |            | <b>Span</b>           | <b>4,54</b>                           |                      |                    |       |
|                       |            | Media                 |                                       |                      | 37,19              | 7120  |
|                       | st.dev     |                       |                                       | 0,098                | 2152               |       |
|                       | CoV        |                       |                                       | 0,26%                | 30,23%             |       |
| <b>-40%</b>           | 13A_06     | 8,650                 | 203,3                                 | 31,90                | <b>58773</b>       |       |
|                       | 13A_18     |                       | 204,3                                 | 31,75                | <b>100973</b>      |       |
|                       | 13A_26     |                       | 203,3                                 | 31,91                | <b>109747</b>      |       |
|                       |            | <b>Offset</b>         | <b>4,76</b>                           |                      |                    |       |
|                       |            | <b>Span</b>           | <b>3,89</b>                           |                      |                    |       |
|                       |            | Media                 |                                       |                      | 31,86              | 89831 |
|                       |            | st.dev                |                                       |                      | 0,092              | 27252 |
|                       | CoV        |                       |                                       | 0,29%                | 30,34%             |       |

Tabella 30 – Risultati prove di fatica su provini della serie\_13A

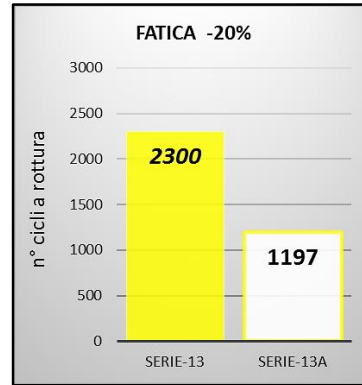
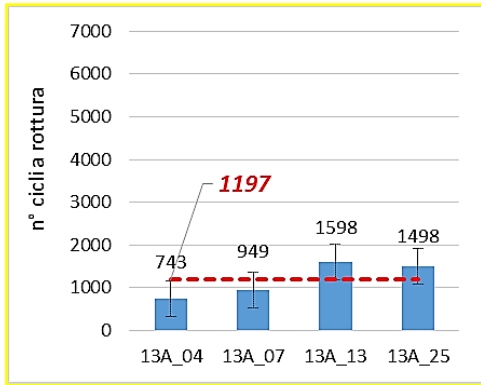


Figura 110 (a, b) - Istogramma CICLI a ROTTURA con riduzione di carico del 20%:  
per singolo provino serie\_13A (a) e confronto dei risultati con la serie\_13 (b)

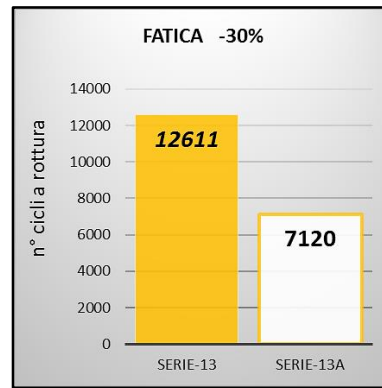
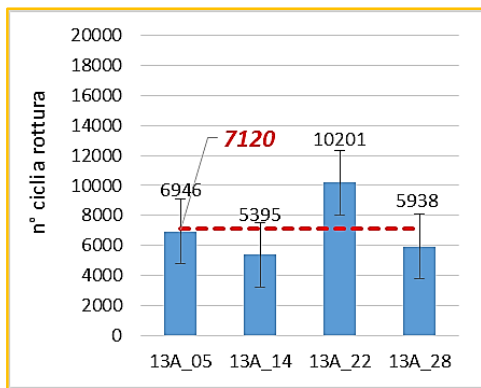


Figura 111 (a, b) - Istogramma CICLI a ROTTURA con riduzione di carico del 30%:  
per singolo provino serie\_13A (a) e confronto dei risultati con la serie\_13 (b)

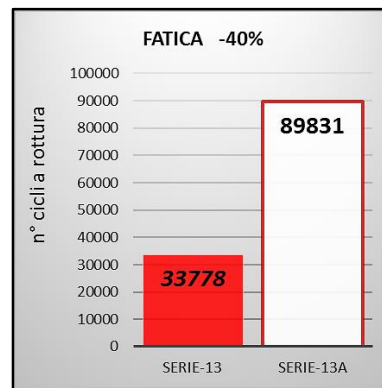
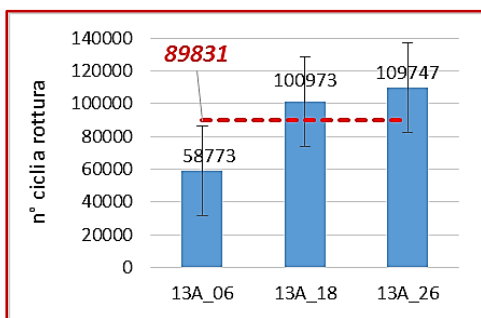


Figura 112 (a, b) - Istogramma CICLI a ROTTURA con riduzione di carico del 40%:  
per singolo provino serie\_13A (a) e confronto dei risultati con la serie\_13 (b)

Si riportano ora i *diagrammi di Wöhler* per la serie\_13A, e la sovrapposizione con il diagramma ottenuto per la serie\_13.

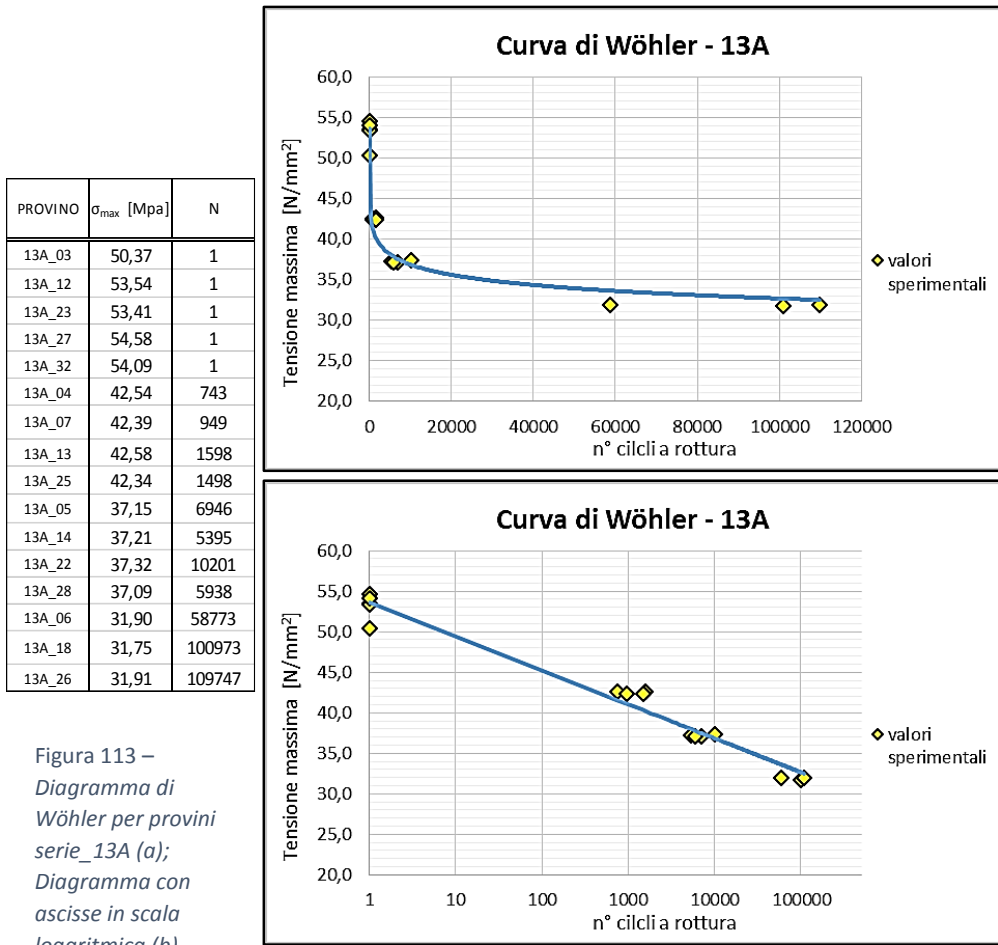


Figura 113 –  
 Diagramma di  
 Wöhler per provini  
 serie\_13A (a);  
 Diagramma con  
 ascisse in scala  
 logaritmica (b)

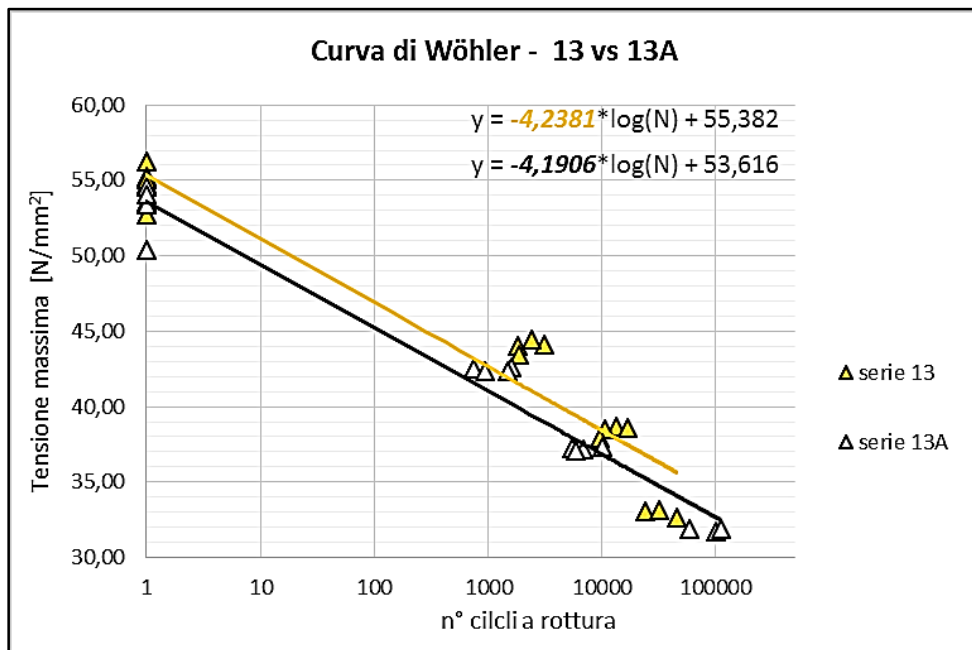


Figura 114 – Confronto tra diagrammi di Wöhler per serie\_13A e serie\_13



## Capitolo 7 - Conclusioni

### 7.1 - Considerazioni sui risultati ottenuti

A valle dello svolgimento della campagna di prove sperimentali, e dell'elaborazione dei dati ottenuti, è possibile fare alcune considerazioni.

I) le *prove statiche* mostrano valori di tensioni di rottura (ILSS) simili per tutte le serie di provini testati; l'unico campione che si differenzia in modo leggermente più significativo è quello costituito da provini con orientamento della ply centrale a 45°.

Il valore ottenuto per la *serie 13A* è infatti pari a 53,2 MPa, che è inferiore a quello di tutte le altre serie, ed in particolare è più basso del 3% rispetto al valore 54,8 MPa della *serie 13*.

II) le prove di fatica mostrano differenze più marcate nel comportamento tra le diverse configurazioni rispetto alle statiche. Evidenziano che, pur eseguendo le prove su campioni costituiti dello stesso materiale (tessuto pre-impregnato SAATI CC802 ET445S 35%), per comprendere le dinamiche del comportamento a fatica, sono da tenere in considerazione anche altre variabili: non ultime le dimensioni del laminato (in termine di n° di ply) e la sequenza di impilamento.

N° di ply di cui è costituito il laminato:

I risultati mostrano che ad un maggior numero di lamine, non necessariamente corrisponde un comportamento a fatica migliore. In particolare diminuendo il carico del 40%, i provini delle *serie 13 e 14* hanno raggiunto il limite di rottura a n° di cicli decisamente inferiore rispetto a quelli delle *serie 8 e 9* (rispettivamente 34.000 e 44.000, rispetto a 60.000 e 105.000 cicli).

Analizzando i *diagrammi di Wöhler* inoltre, si nota come le *pendenze delle rette* che rappresentano le *serie 13 e 14* siano molto simili alla pendenza della retta della *serie 8*; sono tuttavia maggiori di quella della *serie 9*, ad indicare un comportamento a fatica peggiore.

La spiegazione di questo comportamento potrebbe essere ricercata indagando sulle modalità di propagazione delle cricche, e più nello

specifico sulle modalità di trasferimento del carico durante il test di fatica. Sembra infatti esserci contraddizione con una teoria ricorrente in letteratura e riguardante rotture a fatica per carichi di trazione: si afferma che le fratture della matrice, all'interfaccia con gli strati di fibra, tendono a rallentare il loro avanzamento. Si può ipotizzare che nel caso di prove di flessione in 3 punti, variando la tipologia di sollecitazione (e conseguentemente il tipo di sforzo e di trasferimento del carico), le dinamiche di interazione tra fibra e matrice siano differenti, e portino a comportamenti a fatica meno legati al n° di lamine.

A monte delle prove sperimentali era stato ipotizzato, analizzando un lavoro di tesi che tratta temi simili a quelli del presente elaborato, che il comportamento a fatica potesse essere condizionato dal numero di ply dispari o pari di cui è costituito il laminato: in un laminato composto da un numero dispari di layer, uno di questi si trova a cavallo della mezzzeria e viene quindi sottoposto a sforzi alternati di compressione e trazione; in un laminato con numero pari di layer invece questo non accade.

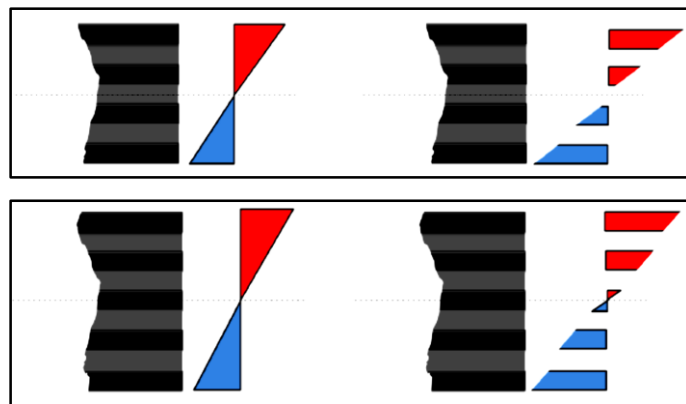


Figura 115 – Distribuzione degli sforzi di compressione e trazione in un laminato con numero di ply PARI (sora) e DISPARI (sotto)

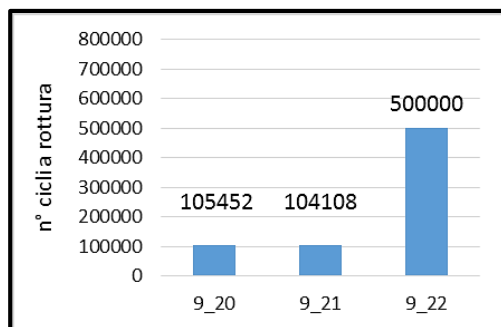
Questo può far pensare che il numero dispari di strati porti a peggiori performance durante il test di flessione a fatica. Tuttavia i dati ottenuti in questo studio portano a rigettare un'ipotesi di questo tipo, in quanto per riduzioni di carico del 20% e 30% sono stati riscontrati comportamenti a fatica migliori proprio per le serie con 9 e 13 ply, rispetto a quelle con 8 e 14.

Sequenza di impilamento (orientamento della ply centrale, nel confronto serie 13-serie 13A):

Dalle prove risulta un miglior comportamento a fatica con carichi ridotti del 20% e 30% per la *serie 13*, con tutte le *ply* a  $0/90^\circ$ ; mentre la rottura sopraggiunge più tardi (90.000 cicli rispetto a 34.000) per carico ridotto del 40% nella *serie 13A*, con *ply centrale orientata a  $45^\circ$* . Ne risultano diagrammi di Wöhler con coefficienti angolari delle rette analoghi, ma con la retta della serie 13A traslata verso il basso (di una quota pari al valore di tensione a rottura statica).

Il differente orientamento della *ply* centrale ha quindi un effetto negativo sulla tensione di rottura statica, e conseguentemente sul comportamento a fatica del materiale CC-802.

III) si riportano i dati ottenuti per le prove a fatica con carico massimo ridotto del 40% su tutti provini della *serie 9*:



come anticipato nel capitolo 5, per motivi di tempo e disponibilità della pressa idraulica, il *provino 9\_22* non è stato portato a rottura, ma si è assunto come limite del presente studio il valore di *500.000 cicli*.

I risultati ottenuti portano alla formulazione di un'interessante ipotesi riguardo il comportamento del *provino 9\_22*, così differente da quello degli altri: potrebbe essere spiegato assumendo che, per la configurazione 1, la riduzione del carico del 40% si trova nell'intorno di un "ginocchio" nella curva di Wöhler (vedi figura seguente).

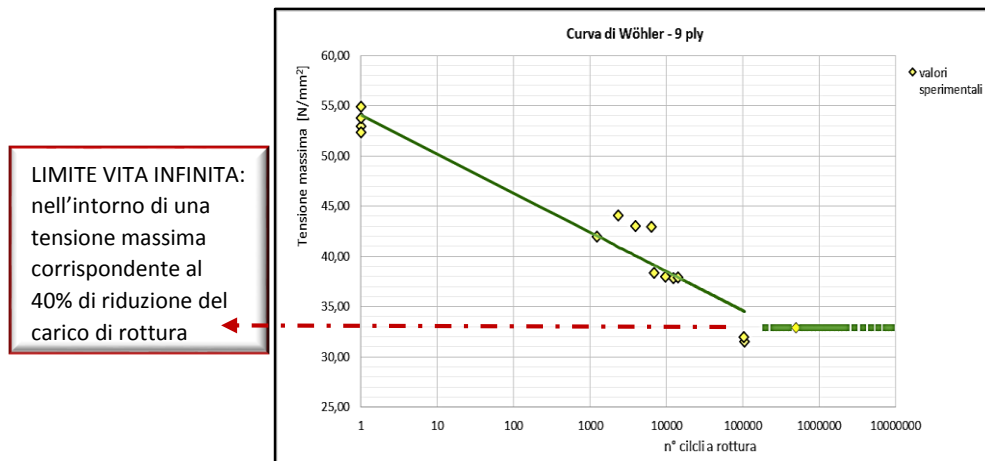
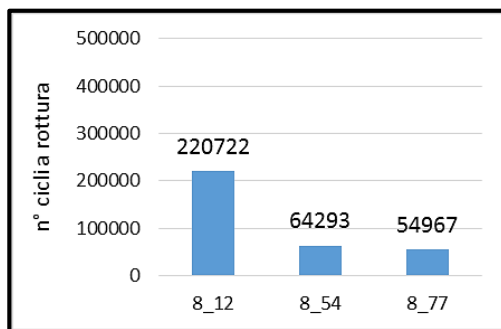


Figura 116 – Diaaramma di Wöhler serie 9 (inotesi)

Il dato “anomalo” sarebbe quindi dovuto al fatto che, lavorando nelle vicinanze di carichi corrispondenti al limite di vita infinita, una pur piccola differenza di tensione (dovuta ai pur ridotti errori di taglio provini e alle variabilità durante i test, o anche a microscopici difetti del laminato), può significare a livello di n° di cicli a rottura una differenza macroscopica.

Questa ipotesi trova conferma pure applicata all'altro campione in configurazione 1, ovvero la *serie 8*, di cui si riportano i dati:





## **7.2 - Limiti dello studio e prospettive future**

L'analisi del comportamento a fatica nei materiali compositi presenta un grande numero di variabili, che risulta difficile correlare tra loro, in parte per la scarsa bibliografia reperibile sull'argomento, e in parte per motivi legati alle tempistiche e agli strumenti utilizzati per una campagna di prove svolta durante un lavoro di tesi. Questi i motivi principali per i quali questo elaborato è da intendersi come un punto di partenza, come spunto di riflessione per sviluppare ipotesi di lavoro future.

Il limite principale del presente studio è rappresentato dal numero di cicli ridotto a cui è stato possibile testare i campioni: per un'analisi del comportamento a fatica sarebbe opportuno indagare la vita dei provini anche nell'ordine di grandezza dei  $10^6$  cicli.

È utile mettere in luce inoltre, che per ottenere una validità maggiore a livello di dati, sarebbe opportuno effettuare campagne di prove sperimentali con campioni statistici di dimensioni decisamente più elevate: questo permetterebbe di correlare con maggior sicurezza i risultati ottenuti per i provini al comportamento che effettivamente può avere un laminato, con vantaggi a livello progettuale.

Un'altra problematica che non è stato possibile superare, è legata alla precisione del circuito in retroazione del controllo di carico (controllo PID) durante le prove di fatica.

Per le motivazioni sopra elencate, questo elaborato potrebbe avere la funzione di aprire nuove prospettive di studio, volte alla verifica delle interpretazioni che sono state date ai valori ottenuti, alla conferma di un comportamento dello stesso tipo in CFRP con differenti caratteristiche, piuttosto che all'approfondimento dei temi trattati in riferimento anche ad altri materiali compositi.



## **Bibliografia**

- [1] ASTM International, «ASTM - D2344/D2344M - Standard Test Method for Short-Beam Strength of Polymer Matrix Composite Materials and Their Laminates», 2013.
- [2] SAATI Composites, «Composites Technical Data - MECHANICAL PROPERTIES OF CC802 ET445S».
- [3] J. A. Bailie, R. P. Ley, A. Pasricha, «A SUMMARY AND REVIEW OF COMPOSITE LAMINATE DESIGN GUIDELINES, SECTION 9 - STACKING SEQUENCE AND INTERLAMINAR FREE EDGE STRESSES», 1997.
- [4] Andrew Makeev, «Interlaminar shear fatigue behavior of glass/epoxy and carbon/epoxy composites», 2013.
- [5] G. Sala, L. Di Landro, A. Airoidi, P. Bettini, «Tecnologie e materiali aerospaziali, Cap.46 - Effetto della fatica e dell'ambiente sui compositi».
- [6] A. Leva, «INTRODUZIONE AL PID INDUSTRIALE», Aprile 2000.
- [7] B. Zuccarello, «Progettazione meccanica con materiali non convenzionali, Cap.9 - La fatica nei compositi», 2008.
- [8] Daniel Gay, Suong V. Hoa, Stephen W. Tsai, «Composite Materials Design and Applications», CRC Press LLC.
- [9] S. Naldi, «Analisi di sensibilità della grammatura sulla vita a fatica di un laminato in CFRP», Tesi di laurea, a.a. 2013/2014.
- [10] F. Scotti, «Il test di Student», 25 febbraio 2006.



## **Appendici**

*A - Tabelle caratterizzazione dimensionale*

*B - Caratterizzazione Rotture microscopio ottico*

*C - F-TEST*

*D - T-TEST*



## A - Tabelle caratterizzazione dimensionale

| n° provino | n° misura  | spessore z [mm] | larghezza x [mm] | lunghezza y [mm] | massa m [g] |
|------------|------------|-----------------|------------------|------------------|-------------|
| 13ply-02   | 1          | 10,33           | 20,06            |                  |             |
|            | 2          | 10,33           | 20,04            |                  |             |
|            | 3          | 10,35           | 20,14            |                  |             |
|            | mean value | 10,34           | 20,08            | 60,14            | 19,139      |
| 13ply-03   | 1          | 10,31           | 20,06            |                  |             |
|            | 2          | 10,35           | 20,04            |                  |             |
|            | 3          | 10,31           | 20,01            |                  |             |
|            | mean value | 10,32           | 20,04            | 60,15            | 19,206      |
| 13ply-08   | 1          | 10,31           | 20,18            |                  |             |
|            | 2          | 10,32           | 20,09            |                  |             |
|            | 3          | 10,3            | 20,07            |                  |             |
|            | mean value | 10,31           | 20,11            | 60,19            | 19,18       |
| 13ply-10   | 1          | 10,29           | 20               |                  |             |
|            | 2          | 10,32           | 20,1             |                  |             |
|            | 3          | 10,3            | 20,04            |                  |             |
|            | mean value | 10,30           | 20,05            | 60,19            | 19,126      |
| 13ply-12   | 1          | 10,33           | 20,12            |                  |             |
|            | 2          | 10,29           | 20,05            |                  |             |
|            | 3          | 10,3            | 20,08            |                  |             |
|            | mean value | 10,31           | 20,08            | 60,04            | 19,141      |
| 13ply-14   | 1          | 10,33           | 20,07            |                  |             |
|            | 2          | 10,3            | 20,06            |                  |             |
|            | 3          | 10,32           | 20,05            |                  |             |
|            | mean value | 10,32           | 20,06            | 60,17            | 19,227      |
| 13ply-16   | 1          | 10,33           | 20,18            |                  |             |
|            | 2          | 10,28           | 19,99            |                  |             |
|            | 3          | 10,28           | 20,02            |                  |             |
|            | mean value | 10,30           | 20,06            | 60,14            | 19,167      |
| 13ply-26   | 4          | 10,31           | 19,92            |                  |             |
|            | 5          | 10,29           | 20,08            |                  |             |
|            | 6          | 10,29           | 20,11            |                  |             |
|            | mean value | 10,30           | 20,04            | 60,18            | 19,062      |
| 13ply-27   | 7          | 10,29           | 20,19            |                  |             |
|            | 8          | 10,31           | 20,16            |                  |             |
|            | 9          | 10,31           | 20,03            |                  |             |
|            | mean value | 10,30           | 20,13            | 60,11            | 19,112      |
| 13ply-28   | 1          | 10,31           | 20,21            |                  |             |
|            | 2          | 10,28           | 20,09            |                  |             |
|            | 3          | 10,31           | 20,14            |                  |             |
|            | mean value | 10,30           | 20,15            | 60,10            | 19,113      |
| 13ply-29   | 1          | 10,27           | 20,04            |                  |             |
|            | 2          | 10,27           | 19,97            |                  |             |
|            | 3          | 10,27           | 20               |                  |             |
|            | mean value | 10,27           | 20,00            | 60,11            | 19,015      |
| 13ply-34   | 1          | 10,31           | 20,35            |                  |             |
|            | 2          | 10,3            | 20,43            |                  |             |
|            | 3          | 10,27           | 20,5             |                  |             |
|            | mean value | 10,29           | 20,43            | 59,14            | 19,216      |
| 13ply-35   | 1          | 10,31           | 20,4             |                  |             |
|            | 2          | 10,33           | 20,44            |                  |             |
|            | 3          | 10,31           | 20,38            |                  |             |
|            | mean value | 10,32           | 20,41            | 59,22            | 19,17       |
| 13ply-37   | 1          | 10,3            | 20,43            |                  |             |
|            | 2          | 10,27           | 20,42            |                  |             |
|            | 3          | 10,29           | 20,36            |                  |             |
|            | mean value | 10,29           | 20,40            | 59,45            | 19,191      |
| 13ply-39   | 1          | 10,26           | 20,42            |                  |             |
|            | 2          | 10,28           | 20,43            |                  |             |
|            | 3          | 10,26           | 20,43            |                  |             |
|            | mean value | 10,27           | 20,43            | 59,63            | 19,299      |
| 13ply-40   | 1          | 10,29           | 20,27            |                  |             |
|            | 2          | 10,29           | 20,3             |                  |             |
|            | 3          | 10,3            | 20,35            |                  |             |
|            | mean value | 10,29           | 20,31            | 59,64            | 19,231      |

| n° provino | n° misura  | spessore z [mm] | larghezza x [mm] | lunghezza y [mm] | massa m [g] |
|------------|------------|-----------------|------------------|------------------|-------------|
| 14ply - 02 | 1          | 10,99           | 20,32            |                  |             |
|            | 2          | 11,01           | 20,18            |                  |             |
|            | 3          | 11,04           | 20,25            |                  |             |
|            | mean value | 11,01           | 20,25            | 60,19            | 20,612      |
| 14ply - 04 | 1          | 11,05           | 20,25            |                  |             |
|            | 2          | 11              | 20,22            |                  |             |
|            | 3          | 11              | 19,88            |                  |             |
|            | mean value | 11,02           | 20,12            | 60,05            | 20,482      |
| 14ply - 10 | 1          | 11,09           | 20,07            |                  |             |
|            | 2          | 11,02           | 20,17            |                  |             |
|            | 3          | 11,05           | 20,18            |                  |             |
|            | mean value | 11,05           | 20,14            | 59,80            | 20,42       |
| 14ply - 11 | 1          | 11,01           | 20,1             |                  |             |
|            | 2          | 11,05           | 20,09            |                  |             |
|            | 3          | 11,06           | 20,08            |                  |             |
|            | mean value | 11,04           | 20,09            | 59,99            | 20,518      |
| 14ply - 14 | 1          | 11,06           | 20,11            |                  |             |
|            | 2          | 11,04           | 20,12            |                  |             |
|            | 3          | 11              | 20,11            |                  |             |
|            | mean value | 11,03           | 20,11            | 59,76            | 20,473      |
| 14ply - 18 | 1          | 11,08           | 20,2             |                  |             |
|            | 2          | 11,05           | 20,13            |                  |             |
|            | 3          | 11,07           | 20,22            |                  |             |
|            | mean value | 11,07           | 20,18            | 60,04            | 20,653      |
| 14ply - 20 | 1          | 11,07           | 20,09            |                  |             |
|            | 2          | 11,03           | 20,17            |                  |             |
|            | 3          | 11,09           | 20,17            |                  |             |
|            | mean value | 11,06           | 20,14            | 60,08            | 20,618      |
| 14ply - 24 | 1          | 11,05           | 20,1             |                  |             |
|            | 2          | 11,08           | 20,3             |                  |             |
|            | 3          | 11,06           | 20,07            |                  |             |
|            | mean value | 11,06           | 20,16            | 60,38            | 20,652      |
| 14ply - 25 | 1          | 11,06           | 20,31            |                  |             |
|            | 2          | 11,06           | 20,1             |                  |             |
|            | 3          | 11,07           | 20,05            |                  |             |
|            | mean value | 11,06           | 20,15            | 60,20            | 20,649      |
| 14ply - 32 | 7          | 11,05           | 20,19            |                  |             |
|            | 8          | 11,07           | 20,21            |                  |             |
|            | 9          | 11,05           | 20,13            |                  |             |
|            | mean value | 11,06           | 20,18            | 60,25            | 20,786      |
| 14ply - 33 | 1          | 11,05           | 20,01            |                  |             |
|            | 2          | 11,05           | 20,12            |                  |             |
|            | 3          | 11,05           | 20,06            |                  |             |
|            | mean value | 11,05           | 20,06            | 60,23            | 20,68       |
| 14ply - 38 | 1          | 11,06           | 20,2             |                  |             |
|            | 2          | 11,05           | 20,24            |                  |             |
|            | 3          | 11,09           | 20,3             |                  |             |
|            | mean value | 11,07           | 20,25            | 59,77            | 20,674      |
| 14ply - 44 | 1          | 11,07           | 20,21            |                  |             |
|            | 2          | 11,07           | 20,07            |                  |             |
|            | 3          | 11,1            | 19,68            |                  |             |
|            | mean value | 11,08           | 19,99            | 59,19            | 20,25       |
| 14ply - 46 | 1          | 11,06           | 20,17            |                  |             |
|            | 2          | 11,06           | 20               |                  |             |
|            | 3          | 11,07           | 20,05            |                  |             |
|            | mean value | 11,06           | 20,07            | 59,66            | 20,424      |
| 14ply - 48 | 1          | 11,05           | 20,27            |                  |             |
|            | 2          | 11,07           | 20,28            |                  |             |
|            | 3          | 11,06           | 20,08            |                  |             |
|            | mean value | 11,06           | 20,21            | 59,79            | 20,607      |
| 14ply - 50 | 1          | 11,03           | 20,17            |                  |             |
|            | 2          | 11,04           | 20,16            |                  |             |
|            | 3          | 11,09           | 20,07            |                  |             |
|            | mean value | 11,05           | 20,13            | 60,23            | 20,619      |



| n° provino | n° misura  | spessore z [mm] | larghezza x [mm] | lunghezza y [mm] | massa m [g] |
|------------|------------|-----------------|------------------|------------------|-------------|
| 8ply-01    | 1          | 6,46            | 13,64            |                  |             |
|            | 2          | 6,46            | 13,17            |                  |             |
|            | 3          | 6,45            | 13,38            |                  |             |
|            | mean value | 6,46            | 13,40            | 40,23            | 5,269       |
| 8ply-03    | 1          | 6,41            | 13,59            |                  |             |
|            | 2          | 6,4             | 13,35            |                  |             |
|            | 3          | 6,39            | 13,35            |                  |             |
|            | mean value | 6,40            | 13,43            | 40,10            | 5,258       |
| 8ply-12    | 1          | 6,39            | 13,5             |                  |             |
|            | 2          | 6,37            | 13,48            |                  |             |
|            | 3          | 6,39            | 13,27            |                  |             |
|            | mean value | 6,38            | 13,42            | 40,11            | 5,285       |
| 8ply-15    | 1          | 6,41            | 13,15            |                  |             |
|            | 2          | 6,39            | 13,19            |                  |             |
|            | 3          | 6,39            | 13,05            |                  |             |
|            | mean value | 6,40            | 13,13            | 40,08            | 5,123       |
| 8ply-22    | 1          | 6,45            | 13,48            |                  |             |
|            | 2          | 6,44            | 13,45            |                  |             |
|            | 3          | 6,46            | 13,47            |                  |             |
|            | mean value | 6,45            | 13,47            | 40,49            | 5,402       |
| 8ply-25    | 1          | 6,4             | 13,55            |                  |             |
|            | 2          | 6,4             | 13,26            |                  |             |
|            | 3          | 6,42            | 12,97            |                  |             |
|            | mean value | 6,41            | 13,26            | 40,29            | 5,243       |
| 8ply-33    | 1          | 6,44            | 13,52            |                  |             |
|            | 2          | 6,42            | 13,54            |                  |             |
|            | 3          | 6,39            | 13,5             |                  |             |
|            | mean value | 6,42            | 13,52            | 40,47            | 5,393       |
| 8ply-51    | 1          | 6,38            | 13,59            |                  |             |
|            | 2          | 6,4             | 13,56            |                  |             |
|            | 3          | 6,38            | 13,56            |                  |             |
|            | mean value | 6,39            | 13,57            | 40,51            | 5,421       |
| 8ply-54    | 1          | 6,39            | 13,53            |                  |             |
|            | 2          | 6,4             | 13,52            |                  |             |
|            | 3          | 6,42            | 13,54            |                  |             |
|            | mean value | 6,40            | 13,53            | 40,45            | 5,377       |
| 8ply-55    | 1          | 6,34            | 13,48            |                  |             |
|            | 2          | 6,35            | 13,52            |                  |             |
|            | 3          | 6,37            | 13,54            |                  |             |
|            | mean value | 6,35            | 13,51            | 40,13            | 5,332       |
| 8ply-66    | 1          | 6,37            | 13,46            |                  |             |
|            | 2          | 6,39            | 13,42            |                  |             |
|            | 3          | 6,36            | 13,37            |                  |             |
|            | mean value | 6,37            | 13,42            | 40,51            | 5,318       |
| 8ply-75    | 1          | 6,41            | 13,5             |                  |             |
|            | 2          | 6,42            | 13,43            |                  |             |
|            | 3          | 6,43            | 13,46            |                  |             |
|            | mean value | 6,42            | 13,46            | 40,28            | 5,298       |
| 8ply-77    | 1          | 6,43            | 13,37            |                  |             |
|            | 2          | 6,42            | 13,33            |                  |             |
|            | 3          | 6,41            | 13,38            |                  |             |
|            | mean value | 6,42            | 13,36            | 40,38            | 5,307       |
| 8ply-78    | 1          | 6,37            | 13,24            |                  |             |
|            | 2          | 6,4             | 13,35            |                  |             |
|            | 3          | 6,38            | 13,42            |                  |             |
|            | mean value | 6,38            | 13,34            | 40,39            | 5,306       |
| 8ply-91    | 1          | 6,37            | 13,41            |                  |             |
|            | 2          | 6,38            | 13,45            |                  |             |
|            | 3          | 6,38            | 13,46            |                  |             |
|            | mean value | 6,38            | 13,44            | 40,43            | 5,329       |
| 8ply-98    | 1          | 6,34            | 13,44            |                  |             |
|            | 2          | 6,32            | 13,43            |                  |             |
|            | 3          | 6,34            | 13,46            |                  |             |
|            | mean value | 6,33            | 13,44            | 39,98            | 5,248       |

| n° provino | n° misura  | spessore z [mm] | larghezza x [mm] | lunghezza y [mm] | massa m [g] |
|------------|------------|-----------------|------------------|------------------|-------------|
| 9ply - 09  | 1          | 7,25            | 13,16            |                  |             |
|            | 2          | 7,22            | 13,15            |                  |             |
|            | 3          | 7,22            | 13,16            |                  |             |
|            | mean value | 7,23            | 13,16            | 39,98            | 5,782       |
| 9ply - 10  | 1          | 7,22            | 13,14            |                  |             |
|            | 2          | 7,2             | 13,08            |                  |             |
|            | 3          | 7,2             | 13,13            |                  |             |
|            | mean value | 7,21            | 13,12            | 40,08            | 5,735       |
| 9ply - 11  | 1          | 7,2             | 13,17            |                  |             |
|            | 2          | 7,21            | 13,2             |                  |             |
|            | 3          | 7,21            | 13,19            |                  |             |
|            | mean value | 7,21            | 13,19            | 40,18            | 5,77        |
| 9ply - 12  | 1          | 7,23            | 13,11            |                  |             |
|            | 2          | 7,2             | 13,11            |                  |             |
|            | 3          | 7,18            | 13,14            |                  |             |
|            | mean value | 7,20            | 13,12            | 40,07            | 5,8         |
| 9ply - 13  | 1          | 7,22            | 13,01            |                  |             |
|            | 2          | 7,2             | 13,07            |                  |             |
|            | 3          | 7,2             | 13,18            |                  |             |
|            | mean value | 7,21            | 13,09            | 40,16            | 5,743       |
| 9ply - 14  | 1          | 7,14            | 13,12            |                  |             |
|            | 2          | 7,16            | 13,15            |                  |             |
|            | 3          | 7,16            | 13,3             |                  |             |
|            | mean value | 7,15            | 13,19            | 40,09            | 5,77        |
| 9ply - 16  | 1          | 7,18            | 13,46            |                  |             |
|            | 2          | 7,14            | 13,43            |                  |             |
|            | 3          | 7,17            | 13,57            |                  |             |
|            | mean value | 7,16            | 13,49            | 40,19            | 5,972       |
| 9ply - 17  | 1          | 7,16            | 12,99            |                  |             |
|            | 2          | 7,15            | 13,08            |                  |             |
|            | 3          | 7,2             | 13,06            |                  |             |
|            | mean value | 7,17            | 13,04            | 40,91            | 5,831       |
| 9ply - 18  | 1          | 7,15            | 13,07            |                  |             |
|            | 2          | 7,16            | 13,1             |                  |             |
|            | 3          | 7,16            | 13,16            |                  |             |
|            | mean value | 7,16            | 13,11            | 40,17            | 5,792       |
| 9ply - 19  | 1          | 7,16            | 12,93            |                  |             |
|            | 2          | 7,15            | 12,93            |                  |             |
|            | 3          | 7,15            | 13               |                  |             |
|            | mean value | 7,15            | 12,95            | 40,13            | 5,689       |
| 9ply - 20  | 1          | 7,19            | 13,47            |                  |             |
|            | 2          | 7,18            | 13,36            |                  |             |
|            | 3          | 7,2             | 13,45            |                  |             |
|            | mean value | 7,19            | 13,43            | 40,20            | 5,899       |
| 9ply - 21  | 1          | 7,14            | 13,35            |                  |             |
|            | 2          | 7,16            | 13,33            |                  |             |
|            | 3          | 7,19            | 13,2             |                  |             |
|            | mean value | 7,16            | 13,29            | 40,11            | 5,881       |
| 9ply - 22  | 1          | 7,15            | 12,91            |                  |             |
|            | 2          | 7,16            | 12,91            |                  |             |
|            | 3          | 7,17            | 12,92            |                  |             |
|            | mean value | 7,16            | 12,91            | 40,15            | 5,699       |
| 9ply - 23  | 1          | 7,14            | 13,1             |                  |             |
|            | 2          | 7,14            | 13,13            |                  |             |
|            | 3          | 7,13            | 13,09            |                  |             |
|            | mean value | 7,14            | 13,11            | 40,15            | 5,788       |
| 9ply - 24  | 1          | 7,09            | 12,92            |                  |             |
|            | 2          | 7,1             | 12,95            |                  |             |
|            | 3          | 7,09            | 13,03            |                  |             |
|            | mean value | 7,09            | 12,97            | 40,56            | 5,79        |

| n° provino | n° misura  | spessore z [mm] | larghezza x [mm] | lunghezza y [mm] | massa m [g] |
|------------|------------|-----------------|------------------|------------------|-------------|
| 13A_03     | 1          | 10,14           | 19,99            |                  |             |
|            | 2          | 10,16           | 19,97            |                  |             |
|            | 3          | 10,15           | 20,02            |                  |             |
|            | mean value | 10,15           | 19,99            | 59,99            | 18,577      |
| 13A_04     | 1          | 10,17           | 19,97            |                  |             |
|            | 2          | 10,17           | 20,00            |                  |             |
|            | 3          | 10,16           | 20,03            |                  |             |
|            | mean value | 10,17           | 20,00            | 60,04            | 18,615      |
| 13A_05     | 1          | 10,16           | 20,05            |                  |             |
|            | 2          | 10,16           | 20,02            |                  |             |
|            | 3          | 10,18           | 20,05            |                  |             |
|            | mean value | 10,17           | 20,04            | 60,01            | 18,629      |
| 13A_06     | 1          | 10,17           | 19,98            |                  |             |
|            | 2          | 10,16           | 20,02            |                  |             |
|            | 3          | 10,16           | 20,02            |                  |             |
|            | mean value | 10,16           | 20,01            | 59,96            | 18,644      |
| 13A_07     | 1          | 10,17           | 20,12            |                  |             |
|            | 2          | 10,17           | 20,07            |                  |             |
|            | 3          | 10,15           | 20,04            |                  |             |
|            | mean value | 10,16           | 20,08            | 59,97            | 18,645      |
| 13A_12     | 1          | 10,17           | 20,01            |                  |             |
|            | 2          | 10,15           | 20,06            |                  |             |
|            | 3          | 10,19           | 20,01            |                  |             |
|            | mean value | 10,17           | 20,03            | 59,95            | 18,564      |
| 13A_13     | 1          | 10,15           | 20,00            |                  |             |
|            | 2          | 10,15           | 20,04            |                  |             |
|            | 3          | 10,14           | 20,02            |                  |             |
|            | mean value | 10,15           | 20,02            | 59,93            | 18,597      |
| 13A_14     | 1          | 10,15           | 20,04            |                  |             |
|            | 2          | 10,14           | 20,04            |                  |             |
|            | 3          | 10,14           | 20,07            |                  |             |
|            | mean value | 10,14           | 20,05            | 59,92            | 18,567      |
| 13A_18     | 1          | 10,14           | 20,14            |                  |             |
|            | 2          | 10,16           | 20,08            |                  |             |
|            | 3          | 10,17           | 20,13            |                  |             |
|            | mean value | 10,16           | 20,12            | 59,99            | 18,699      |
| 13A_22     | 1          | 10,15           | 20,02            |                  |             |
|            | 2          | 10,15           | 20,01            |                  |             |
|            | 3          | 10,12           | 19,97            |                  |             |
|            | mean value | 10,14           | 20,00            | 59,93            | 18,575      |
| 13A_23     | 1          | 10,15           | 20,02            |                  |             |
|            | 2          | 10,12           | 20,01            |                  |             |
|            | 3          | 10,13           | 20,04            |                  |             |
|            | mean value | 10,13           | 20,02            | 59,98            | 18,605      |
| 13A_25     | 1          | 10,19           | 20,01            |                  |             |
|            | 2          | 10,22           | 20,01            |                  |             |
|            | 3          | 10,19           | 20,07            |                  |             |
|            | mean value | 10,20           | 20,03            | 59,94            | 18,464      |
| 13A_26     | 4          | 10,17           | 19,94            |                  |             |
|            | 5          | 10,13           | 20,03            |                  |             |
|            | 6          | 10,20           | 20,01            |                  |             |
|            | mean value | 10,17           | 19,99            | 59,98            | 18,643      |
| 13A_27     | 7          | 10,16           | 20,06            |                  |             |
|            | 8          | 10,18           | 20,08            |                  |             |
|            | 9          | 10,13           | 20,05            |                  |             |
|            | mean value | 10,16           | 20,06            | 59,96            | 18,674      |
| 13A_28     | 1          | 10,17           | 20,03            |                  |             |
|            | 2          | 10,15           | 20,13            |                  |             |
|            | 3          | 10,18           | 20,05            |                  |             |
|            | mean value | 10,17           | 20,07            | 59,97            | 18,666      |
| 13A_32     | 1          | 10,14           | 20,04            |                  |             |
|            | 2          | 10,11           | 20,08            |                  |             |
|            | 3          | 10,10           | 20,04            |                  |             |
|            | mean value | 10,12           | 20,05            | 59,92            | 18,555      |



***B - Caratterizzazione delle rotture statiche e del danneggiamento a fatica tramite camera digitale e microscopio ottico***



Figura 117 – Rottura statica del provino 13A\_03

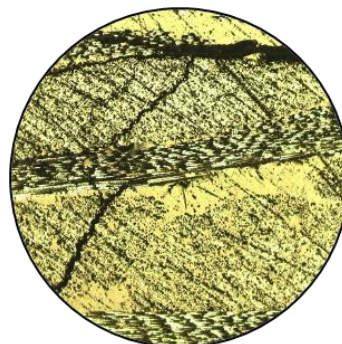


Figura 118 – Modalità di propagazione di una cricca nella rottura statica del provino 13A\_03 (ingrandimento 5x)



Figura 119 – Rottura del provino 13A\_07, sottoposto a prove di fatica con carico massimo ridotto del 20%

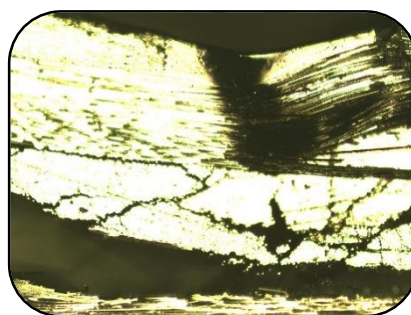


Figura 120 – Particolare ingrandito del principio della cricca a contatto con la traversa del provino 13\_07 (ingrandimento 5x)



Figura 121 – Rottura del provino 13A\_18, sottoposto a prove di fatica con carico massimo ridotto del 40%

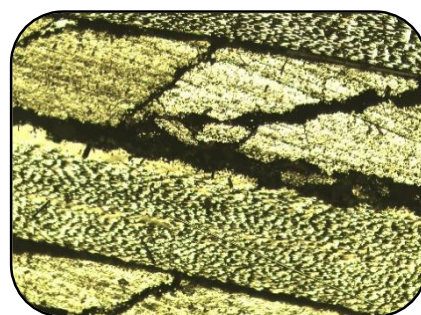
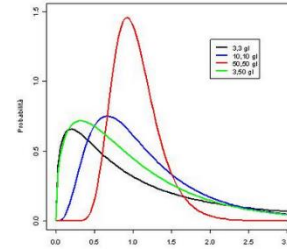


Figura 122 – Particolare ingrandito della propagazione di rotture multiple del provino 13\_18 (ingrandimento 5x)



### C - Test di precisione: TEST F

Il test F per il confronto di due varianze è un test di ipotesi basato sulla distribuzione F di Fisher-Snedecor e volto a verificare l'ipotesi che due popolazioni che seguono entrambe distribuzioni normali abbiano la stessa varianza.



È stato effettuato per i campioni testati staticamente, in modo da avere una conferma della ripetibilità della prova.

Il test considera il rapporto di due varianze  $s^2$  (relative ai campioni):

$$F_0 = \frac{s_x^2}{s_y^2}, \text{ dove } x \text{ e } y \text{ sono di volta in volta il numero corrispondente alle serie a confronto}$$

Il valore ottenuto, che è maggiore di uno (la varianza superiore va posta al numeratore), va confrontato con un valore tabulato, in modo da “accettare” o “rigettare” l'ipotesi nulla  $H_0$ :

$H_0$ : le popolazioni da cui sono stati estratti campioni sono normali e le varianze delle popolazioni sono identiche.

Se  $F_{\text{calc}} > F_{\text{crit}}$ ,  $H_0$  è rigettata

| /                  | df <sub>1</sub> =1 | 2        | 3        | 4        | 5        | 6        | 7        | 8        |
|--------------------|--------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| df <sub>2</sub> =1 | 161.4476           | 199.5000 | 215.7073 | 224.5832 | 230.1619 | 233.9860 | 236.7684 | 238.8827 |
| 2                  | 18.5128            | 19.0000  | 19.1643  | 19.2468  | 19.2964  | 19.3295  | 19.3532  | 19.3710  |
| 3                  | 10.1280            | 9.5521   | 9.2766   | 9.1172   | 9.0135   | 8.9406   | 8.8867   | 8.8452   |
| 4                  | 7.7086             | 6.9443   | 6.5914   | 6.3882   | 6.2561   | 6.1631   | 6.0942   | 6.0410   |
| 5                  | 6.6079             | 5.7861   | 5.4095   | 5.1922   | 5.0503   | 4.9503   | 4.8759   | 4.8183   |

F Table for  $\alpha = 0.05$

|                        |                     |             |       |                |                |       |  |                 |                 |
|------------------------|---------------------|-------------|-------|----------------|----------------|-------|--|-----------------|-----------------|
| <b>ROTTURA STATICA</b> | serie-8 / serie-9   | $s_8^2$     | 1,325 |                | n-1            | 4     |  |                 |                 |
|                        |                     | $s_9^2$     | 1,233 |                | n-1            | 3     |  |                 |                 |
|                        |                     | $F_0$       | 1,075 | <              | $F_{0,05;4;3}$ | 9,117 |  |                 | $H_0$ ACCETTATA |
|                        | serie-8 / serie-13  | $s_{13}^2$  | 1,665 |                | n-1            | 4     |  |                 |                 |
|                        |                     | $s_8^2$     | 1,325 |                | n-1            | 4     |  |                 |                 |
|                        |                     | $F_0$       | 1,257 | <              | $F_{0,05;4;4}$ | 6,388 |  |                 | $H_0$ ACCETTATA |
|                        | serie-8 / serie-14  | $s_{14}^2$  | 2,566 |                | n-1            | 4     |  |                 |                 |
|                        |                     | $s_8^2$     | 1,325 |                | n-1            | 4     |  |                 |                 |
|                        |                     | $F_0$       | 1,937 | <              | $F_{0,05;4;4}$ | 6,388 |  |                 | $H_0$ ACCETTATA |
|                        | serie-9 / serie-13  | $s_{13}^2$  | 1,665 |                | n-1            | 4     |  |                 |                 |
|                        |                     | $s_9^2$     | 1,233 |                | n-1            | 3     |  |                 |                 |
|                        |                     | $F_0$       | 1,351 | <              | $F_{0,05;4;3}$ | 9,117 |  |                 | $H_0$ ACCETTATA |
|                        | serie-9 / serie-14  | $s_{14}^2$  | 2,566 |                | n-1            | 4     |  |                 |                 |
|                        |                     | $s_9^2$     | 1,233 |                | n-1            | 3     |  |                 |                 |
|                        |                     | $F_0$       | 2,082 | <              | $F_{0,05;4;3}$ | 9,117 |  |                 | $H_0$ ACCETTATA |
|                        | serie-13 / serie-14 | $s_{14}^2$  | 2,566 |                | n-1            | 4     |  |                 |                 |
|                        |                     | $s_{13}^2$  | 1,665 |                | n-1            | 4     |  |                 |                 |
|                        |                     | $F_0$       | 1,541 | <              | $F_{0,05;4;4}$ | 6,388 |  |                 | $H_0$ ACCETTATA |
|                        | serie-13A / serie-8 | $s_{13A}^2$ | 2,711 |                | n-1            | 4     |  |                 |                 |
|                        |                     | $s_8^2$     | 1,325 |                | n-1            | 4     |  |                 |                 |
|                        | $F_0$               | 2,046       | <     | $F_{0,05;4;4}$ | 6,388          |       |  | $H_0$ ACCETTATA |                 |
| serie-13A / serie-9    | $s_{13A}^2$         | 2,711       |       | n-1            | 4              |       |  |                 |                 |
|                        | $s_9^2$             | 1,233       |       | n-1            | 3              |       |  |                 |                 |
|                        | $F_0$               | 2,199       | <     | $F_{0,05;4;4}$ | 9,117          |       |  | $H_0$ ACCETTATA |                 |
| serie-13A / serie-13   | $s_{13A}^2$         | 2,711       |       | n-1            | 4              |       |  |                 |                 |
|                        | $s_{13}^2$          | 1,665       |       | n-1            | 4              |       |  |                 |                 |
|                        | $F_0$               | 1,628       | <     | $F_{0,05;4;4}$ | 6,388          |       |  | $H_0$ ACCETTATA |                 |
| serie-13A / serie-14   | $s_{13A}^2$         | 2,711       |       | n-1            | 4              |       |  |                 |                 |
|                        | $s_{14}^2$          | 2,566       |       | n-1            | 4              |       |  |                 |                 |
|                        | $F_0$               | 1,056       | <     | $F_{0,05;4;4}$ | 6,388          |       |  | $H_0$ ACCETTATA |                 |

- ✓ Non ci sono evidenze per rigettare l'ipotesi nulla;
- ✓ Le varianze calcolate dai campioni sono compatibili con l'ipotesi nulla che i campioni provengano da popolazioni con varianze uguali;
- ✓ Non ci sono evidenze di errori sistematici nello svolgimento delle prove;
- ✓ Per un confronto sulle medie campionarie, il test T è appropriato.



### ***D - Test di accuratezza: TEST T***

Si vanno a considerare le medie dei campioni (presi a due a due) per valutare se la differenza è significativa; si impiega il test di Student per il confronto tra medie.

L'*ipotesi nulla* presuppone che le due medie a confronto siano estratte dalla stessa popolazione, imputando le differenze riscontrate nelle medie campionarie a variazioni casuali ( $\mu_1 = \mu_2$ ).

Usando il test di Student possiamo calcolare la probabilità che l'*ipotesi nulla* non sia vera (cioè che le medie  $\mu_1$  e  $\mu_2$  in realtà sono diverse e quindi le medie campionarie sono diverse non solo per fattori casuali dovuti alla estrazione del campione).

Il test si considera significativo se la probabilità è minore del 5%, ovvero quando si ottiene  $P(T \leq t) < 0.05$ .

Partendo dai dati è possibile effettuare il test di Student usando delle tabelle (concetto analogo al test F, confronto tra un valore calcolato e uno tabulato), oppure utilizzando uno strumento informatico: si riportano i risultati ottenuti utilizzando Excel.

Come si vede di seguito, a causa della dimensione campionaria ridotta, in pochi casi il test risulta significativo, motivo per cui sarebbe opportuno approfondire i temi trattati in questo elaborato aumentando la dimensione dei campioni statistici.

- Confronto tra medie campionarie: prova di flessione a fatica con carico massimo ridotto del 20%

|                                    | serie-8      | serie-13    |
|------------------------------------|--------------|-------------|
| Media                              | 1313,333333  | 2299,75     |
| Varianza                           | 165492,3333  | 379554,9167 |
| Osservazioni                       | 3            | 4           |
| Varianza complessiva               | 293929,8833  |             |
| Differenza ipotizzata per le medie | 0            |             |
| gdl                                | 5            |             |
| Stat t                             | -2,382210494 |             |
| P(T<=t) una coda                   | 0,031496124  |             |
| t critico una coda                 | 2,015048373  |             |
| P(T<=t) due code                   | 0,062992247  |             |
| t critico due code                 | 2,570581836  |             |

|                                    | serie-8      | serie-9     |
|------------------------------------|--------------|-------------|
| Media                              | 1313,333333  | 3475,75     |
| Varianza                           | 165492,3333  | 4890757,583 |
| Osservazioni                       | 3            | 4           |
| Varianza complessiva               | 3000651,483  |             |
| Differenza ipotizzata per le medie | 0            |             |
| gdl                                | 5            |             |
| Stat t                             | -1,634455891 |             |
| P(T<=t) una coda                   | 0,081545464  |             |
| t critico una coda                 | 2,015048373  |             |
| P(T<=t) due code                   | 0,163090927  |             |
| t critico due code                 | 2,570581836  |             |

|                                    | serie-8      | serie-14    |
|------------------------------------|--------------|-------------|
| Media                              | 1313,333333  | 1348,25     |
| Varianza                           | 165492,3333  | 360584,9167 |
| Osservazioni                       | 3            | 4           |
| Varianza complessiva               | 282547,8833  |             |
| Differenza ipotizzata per le medie | 0            |             |
| gdl                                | 5            |             |
| Stat t                             | -0,086005921 |             |
| P(T<=t) una coda                   | 0,467399792  |             |
| t critico una coda                 | 2,015048373  |             |
| P(T<=t) due code                   | 0,934799583  |             |
| t critico due code                 | 2,570581836  |             |

|                                    | serie-9     | serie-13    |
|------------------------------------|-------------|-------------|
| Media                              | 3475,75     | 2299,75     |
| Varianza                           | 4890757,583 | 379554,9167 |
| Osservazioni                       | 4           | 4           |
| Varianza complessiva               | 2635156,25  |             |
| Differenza ipotizzata per le medie | 0           |             |
| gdl                                | 6           |             |
| Stat t                             | 1,024516917 |             |
| P(T<=t) una coda                   | 0,172554981 |             |
| t critico una coda                 | 1,943180281 |             |
| P(T<=t) due code                   | 0,345109963 |             |
| t critico due code                 | 2,446911851 |             |

|                                    | serie-9     | serie-14    |
|------------------------------------|-------------|-------------|
| Media                              | 3475,75     | 1348,25     |
| Varianza                           | 4890757,583 | 360584,9167 |
| Osservazioni                       | 4           | 4           |
| Varianza complessiva               | 2625671,25  |             |
| Differenza ipotizzata per le medie | 0           |             |
| gdl                                | 6           |             |
| Stat t                             | 1,856796856 |             |
| P(T<=t) una coda                   | 0,056361574 |             |
| t critico una coda                 | 1,943180281 |             |
| P(T<=t) due code                   | 0,112723147 |             |
| t critico due code                 | 2,446911851 |             |

|                                    | serie-13    | serie-14    |
|------------------------------------|-------------|-------------|
| Media                              | 2299,75     | 1348,25     |
| Varianza                           | 379554,9167 | 360584,9167 |
| Osservazioni                       | 4           | 4           |
| Varianza complessiva               | 370069,9167 |             |
| Differenza ipotizzata per le medie | 0           |             |
| gdl                                | 6           |             |
| Stat t                             | 2,211983583 |             |
| P(T<=t) una coda                   | 0,034477351 |             |
| t critico una coda                 | 1,943180281 |             |
| P(T<=t) due code                   | 0,068954702 |             |
| t critico due code                 | 2,446911851 |             |

- *Confronto tra medie campionarie: prova di flessione a fatica con carico massimo ridotto del 30%*

|                                    | serie-8      | serie-13    |
|------------------------------------|--------------|-------------|
| Media                              | 9126,25      | 12611       |
| Varianza                           | 14542148,25  | 10369520,67 |
| Osservazioni                       | 4            | 4           |
| Varianza complessiva               | 12455834,46  |             |
| Differenza ipotizzata per le medie | 0            |             |
| gdl                                | 6            |             |
| Stat t                             | -1,396369039 |             |
| P(T<=t) una coda                   | 0,106038575  |             |
| t critico una coda                 | 1,943180281  |             |
| P(T<=t) due code                   | 0,212077149  |             |
| t critico due code                 | 2,446911851  |             |

|                                    | serie-8      | serie-9     |
|------------------------------------|--------------|-------------|
| Media                              | 9126,25      | 10794,75    |
| Varianza                           | 14542148,25  | 10163026,25 |
| Osservazioni                       | 4            | 4           |
| Varianza complessiva               | 12352587,25  |             |
| Differenza ipotizzata per le medie | 0            |             |
| gdl                                | 6            |             |
| Stat t                             | -0,671370483 |             |
| P(T<=t) una coda                   | 0,263486222  |             |
| t critico una coda                 | 1,943180281  |             |
| P(T<=t) due code                   | 0,526972443  |             |
| t critico due code                 | 2,446911851  |             |

|                                    | serie-8      | serie-14 |
|------------------------------------|--------------|----------|
| Media                              | 9126,25      | 9433     |
| Varianza                           | 14542148,25  | 22391238 |
| Osservazioni                       | 4            | 4        |
| Varianza complessiva               | 18466693,13  |          |
| Differenza ipotizzata per le medie | 0            |          |
| gdl                                | 6            |          |
| Stat t                             | -0,100949693 |          |
| P(T<=t) una coda                   | 0,46143963   |          |
| t critico una coda                 | 1,943180281  |          |
| P(T<=t) due code                   | 0,922879259  |          |
| t critico due code                 | 2,446911851  |          |

|                                    | serie-9      | serie-13    |
|------------------------------------|--------------|-------------|
| Media                              | 10794,75     | 12611       |
| Varianza                           | 10163026,25  | 10369520,67 |
| Osservazioni                       | 4            | 4           |
| Varianza complessiva               | 10266273,46  |             |
| Differenza ipotizzata per le medie | 0            |             |
| gdl                                | 6            |             |
| Stat t                             | -0,801648919 |             |
| P(T<=t) una coda                   | 0,226662865  |             |
| t critico una coda                 | 1,943180281  |             |
| P(T<=t) due code                   | 0,45332573   |             |
| t critico due code                 | 2,446911851  |             |

|                                    | serie-9     | serie-14 |
|------------------------------------|-------------|----------|
| Media                              | 10794,75    | 9433     |
| Varianza                           | 10163026,25 | 22391238 |
| Osservazioni                       | 4           | 4        |
| Varianza complessiva               | 16277132,13 |          |
| Differenza ipotizzata per le medie | 0           |          |
| gdl                                | 6           |          |
| Stat t                             | 0,477335173 |          |
| P(T<=t) una coda                   | 0,325006897 |          |
| t critico una coda                 | 1,943180281 |          |
| P(T<=t) due code                   | 0,650013795 |          |
| t critico due code                 | 2,446911851 |          |

|                                    | serie-13    | serie-14 |
|------------------------------------|-------------|----------|
| Media                              | 12611       | 9433     |
| Varianza                           | 10369520,67 | 22391238 |
| Osservazioni                       | 4           | 4        |
| Varianza complessiva               | 16380379,33 |          |
| Differenza ipotizzata per le medie | 0           |          |
| gdl                                | 6           |          |
| Stat t                             | 1,110470212 |          |
| P(T<=t) una coda                   | 0,154653113 |          |
| t critico una coda                 | 1,943180281 |          |
| P(T<=t) due code                   | 0,309306225 |          |
| t critico due code                 | 2,446911851 |          |

- Confronto tra medie campionarie: prova di flessione a fatica con carico massimo ridotto del 40%

|                                    | serie-8     | serie-13    |
|------------------------------------|-------------|-------------|
| Media                              | 59630       | 33778,33333 |
| Varianza                           | 43487138    | 112889842,3 |
| Osservazioni                       | 2           | 3           |
| Varianza complessiva               | 89755607,56 |             |
| Differenza ipotizzata per le medie | 0           |             |
| gdl                                | 3           |             |
| Stat t                             | 2,989154583 |             |
| P(T<=t) una coda                   | 0,029084941 |             |
| t critico una coda                 | 2,353363435 |             |
| P(T<=t) due code                   | 0,058169882 |             |
| t critico due code                 | 3,182446305 |             |

|                                    | serie-8      | serie-9 |
|------------------------------------|--------------|---------|
| Media                              | 59630        | 104780  |
| Varianza                           | 43487138     | 903168  |
| Osservazioni                       | 2            | 2       |
| Varianza complessiva               | 22195153     |         |
| Differenza ipotizzata per le medie | 0            |         |
| gdl                                | 2            |         |
| Stat t                             | -9,583600093 |         |
| P(T<=t) una coda                   | 0,005356605  |         |
| t critico una coda                 | 2,91998558   |         |
| P(T<=t) due code                   | 0,010713211  |         |
| t critico due code                 | 4,30265273   |         |

$|t_{\text{calc}}| > t_{\text{crit}}$  ipotesi nulla RIGETTATA

|                                    | serie-8     | serie-14    |
|------------------------------------|-------------|-------------|
| Media                              | 59630       | 44068,33333 |
| Varianza                           | 43487138    | 11872542,33 |
| Osservazioni                       | 2           | 3           |
| Varianza complessiva               | 22410740,89 |             |
| Differenza ipotizzata per le medie | 0           |             |
| gdl                                | 3           |             |
| Stat t                             | 3,600962712 |             |
| P(T<=t) una coda                   | 0,018368607 |             |
| t critico una coda                 | 2,353363435 |             |
| P(T<=t) due code                   | 0,036737214 |             |
| t critico due code                 | 3,182446305 |             |

$|t_{\text{calc}}| > t_{\text{crit}}$  ipotesi nulla RIGETTATA

|                                    | serie-9     | serie-13    |
|------------------------------------|-------------|-------------|
| Media                              | 104780      | 33778,33333 |
| Varianza                           | 903168      | 112889842,3 |
| Osservazioni                       | 2           | 3           |
| Varianza complessiva               | 75560950,89 |             |
| Differenza ipotizzata per le medie | 0           |             |
| gdl                                | 3           |             |
| Stat t                             | 8,947680313 |             |
| P(T<=t) una coda                   | 0,001472712 |             |
| t critico una coda                 | 2,353363435 |             |
| P(T<=t) due code                   | 0,002945424 |             |
| t critico due code                 | 3,182446305 |             |

$|t_{\text{calc}}| > t_{\text{crit}}$  ipotesi nulla RIGETTATA

|                                    | serie-9     | serie-14    |
|------------------------------------|-------------|-------------|
| Media                              | 104780      | 44068,33333 |
| Varianza                           | 903168      | 11872542,33 |
| Osservazioni                       | 2           | 3           |
| Varianza complessiva               | 8216084,222 |             |
| Differenza ipotizzata per le medie | 0           |             |
| gdl                                | 3           |             |
| Stat t                             | 23,20226257 |             |
| P(T<=t) una coda                   | 8,76906E-05 |             |
| t critico una coda                 | 2,353363435 |             |
| P(T<=t) due code                   | 0,000175381 |             |
| t critico due code                 | 3,182446305 |             |

|                                       |                                    |
|---------------------------------------|------------------------------------|
| $ t_{\text{calc}}  > t_{\text{crit}}$ | <b>ipotesi nulla<br/>RIGETTATA</b> |
|---------------------------------------|------------------------------------|



|                                    | serie-13     | serie-14    |
|------------------------------------|--------------|-------------|
| Media                              | 33778,33333  | 44068,33333 |
| Varianza                           | 112889842,3  | 11872542,33 |
| Osservazioni                       | 3            | 3           |
| Varianza complessiva               | 62381192,33  |             |
| Differenza ipotizzata per le medie | 0            |             |
| gdl                                | 4            |             |
| Stat t                             | -1,595637258 |             |
| P(T<=t) una coda                   | 0,092900825  |             |
| t critico una coda                 | 2,131846786  |             |
| P(T<=t) due code                   | 0,185801649  |             |
| t critico due code                 | 2,776445105  |             |

- Confronto tra medie campionarie: prova di flessione a fatica per la serie-13 a confronto con la serie-13° (ply centrale a 45°)

|                                    | serie-13    | serie-13A   |
|------------------------------------|-------------|-------------|
| Media                              | 2299,75     | 1197        |
| Varianza                           | 379554,9167 | 173007,3333 |
| Osservazioni                       | 4           | 4           |
| Varianza complessiva               | 276281,125  |             |
| Differenza ipotizzata per le medie | 0           |             |
| gdl                                | 6           |             |
| Stat t                             | 2,966992554 |             |
| P(T<=t) una coda                   | 0,012527455 |             |
| t critico una coda                 | 1,943180281 |             |
| P(T<=t) due code                   | 0,025054911 |             |
| t critico due code                 | 2,446911851 |             |

|                                       |                                    |
|---------------------------------------|------------------------------------|
| $ t_{\text{calc}}  > t_{\text{crit}}$ | <b>ipotesi nulla<br/>RIGETTATA</b> |
|---------------------------------------|------------------------------------|

|                                    | serie-13    | serie-13A |
|------------------------------------|-------------|-----------|
| Media                              | 12611       | 7120      |
| Varianza                           | 10369520,67 | 4631862   |
| Osservazioni                       | 4           | 4         |
| Varianza complessiva               | 7500691,333 |           |
| Differenza ipotizzata per le medie | 0           |           |
| gdl                                | 6           |           |
| Stat t                             | 2,835409529 |           |
| P(T<=t) una coda                   | 0,014872835 |           |
| t critico una coda                 | 1,943180281 |           |
| P(T<=t) due code                   | 0,02974567  |           |
| t critico due code                 | 2,446911851 |           |

|                                       |                                    |
|---------------------------------------|------------------------------------|
| $ t_{\text{calc}}  > t_{\text{crit}}$ | <b>ipotesi nulla<br/>RIGETTATA</b> |
|---------------------------------------|------------------------------------|

|                                    | serie-13     | serie-13A |
|------------------------------------|--------------|-----------|
| Media                              | 33778,33333  | 89831     |
| Varianza                           | 112889842,3  | 742695292 |
| Osservazioni                       | 3            | 3         |
| Varianza complessiva               | 427792567,2  |           |
| Differenza ipotizzata per le medie | 0            |           |
| gdl                                | 4            |           |
| Stat t                             | -3,319137859 |           |
| P(T<=t) una coda                   | 0,0147011    |           |
| t critico una coda                 | 2,131846786  |           |
| P(T<=t) due code                   | 0,029402199  |           |
| t critico due code                 | 2,776445105  |           |

|                                       |                                    |
|---------------------------------------|------------------------------------|
| $ t_{\text{calc}}  > t_{\text{crit}}$ | <b>ipotesi nulla<br/>RIGETTATA</b> |
|---------------------------------------|------------------------------------|