



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Edile

Tecnologia delle strutture edili

**ANALISI DELLA RISPOSTA DI ELEMENTI IN GFRP
SOTTO CARICHI CICLICI RIPETUTI**

**ANALYSIS OF THE RESPONSE OF GFRP ELEMENTS
UNDER REPEATED CYCLIC LOADS**

Relatore: Chiar.mo

Prof. Ing. Roberto Capozucca

Laureando:

Daniele Trisolino

A.A. 2020 / 2021

INDICE

INTRODUZIONE	5
1 MATERIALI COMPOSITI.....	6
1.1 Cenni storici	6
1.1.1 Evoluzione dei compositi	6
1.2 Materiali innovativi.....	8
1.3 Materiali compositi fibrorinforzati	10
1.4 Classificazione dei compositi	11
1.4.1 Classificazione in base al meccanismo di “resistenza”	11
1.4.1.1 Tipologia di fibre	13
1.4.1.2 Fibre di vetro	16
1.4.1.3 Fibre di basalto	19
1.4.1.4 Fibre di carbonio.....	22
1.4.1.5 Fibre di aramide.....	25
1.4.1.6 Fibre di acciaio	28
1.4.1.7 Fibre naturali	30
1.4.1.8 Confronto tra le varie fibre.....	32
1.4.2 Classificazione in base al meccanismo di “resilienza”	33
1.4.2.1 Tipologie di matrici	33
1.4.2.2 Matrice metallica.....	33
1.4.2.3 Matrice ceramica	34
1.4.2.4 Matrice polimerica	37
1.4.2.5 Matrice cementizia	39
1.4.3 Classificazione in base agli “elementi costituenti”	40
1.4.3.1 FRP - Fiber Reinforced Polymers	41
1.4.3.2 SRP - Steel Reinforced Polymers	41
1.4.3.3 FRG - Fiber Reinforced Grout	41
1.4.3.4 SRG - Steel Reinforced Grout.....	42
2 RISPOSTA DEI MATERIALI COMPOSITI SOTTO SOLLECITAZIONI.....	43
2.1 Binomio fibra-matrice.....	43
2.1.1 Eterogeneità	44
2.1.2 Anisotropia	45
2.2 Caratteristiche fisiche dei compositi	46
2.2.1 Densità delle fibre	46
2.2.2 Peso del tessuto per unità di area.....	47

2.2.3	Densità della resina	47
2.2.4	Area e spessore equivalente	47
2.2.5	Frazione in peso ed in volume delle fibre	49
2.2.6	Percentuale di vuoti	49
2.3	Caratteristiche meccaniche dei compositi	50
2.3.1	Valori di progetto e verifica di accettazione	52
2.4	La fatica nei compositi	53
2.4.1	Meccanismi di propagazione dei difetti	54
2.4.2	Determinazione del danneggiamento a fatica	56
2.4.3	Parametri che influenzano la resistenza a fatica	58
2.4.3.1	Orientamento delle fibre	60
2.4.3.2	Percentuale di fibre	60
2.4.3.3	Adesione fibra-matrice	60
2.4.3.4	Tipo di sollecitazione	61
2.4.3.5	Tensione media	62
2.4.3.6	Frequenza di applicazione del carico	63
2.4.3.7	Condizioni ambientali	63
2.4.3.8	Concentrazione delle tensioni	63
2.4.4	Stima della vita a fatica	64
2.4.5	Compositi ad elevato modulo	65
3	PROVE SPERIMENTALI	67
3.1	Materiale di prova e sperimentazione preliminare	67
3.2	Set up e prove sperimentali unidirezionali	79
3.3	Prove sperimentali cicliche a fatica	86
4	ELABORAZIONE DATI	123
5	CONCLUSIONI	160
	BIBLIOGRAFIA	173

INTRODUZIONE

*“ I limiti dell’immaginazione dell’uomo
sono dati dai materiali di cui dispone ”*

Leonardo da Vinci

Lo sviluppo tecnologico ha tra le sue principali finalità quella della ricerca di nuovi materiali, in grado di adempiere alle richieste dei professionisti di ogni settore, tra cui quello ingegneristico ed edilizio, in termini di caratteristiche meccaniche sempre più elevate nonché di tenuta nel tempo in condizioni sempre più gravose.

Negli ultimi anni, un posto di rilievo nello sviluppo di nuovi materiali sempre più avanzati, è stato occupato dai compositi in funzione delle loro peculiarità legate alle caratteristiche innovative e alla possibilità di progettarli in base ai requisiti richiesti per le diverse applicazioni.

Si può quindi affermare che i compositi rappresentano l’evoluzione scientifica e tecnologica dei materiali, inglobando al loro interno le migliori caratteristiche di vari componenti, ottenuti con tecnologie innovative che ne esaltano le proprietà fisiche e meccaniche.

La seguente trattazione mira alla valutazione della risposta di tre tipologie diverse di elementi compositi in GFRP sottoposti a carichi ciclici ripetuti, valutandone modulo elastico e deformazione in termini di spostamento.

La metodologia proposta nel lavoro oggetto di tesi vanta delle prove cicliche a fatica ripetute per un determinato numero di volte con un valore di carico pari al 25%, 50% e 75% del carico di rottura ottenuto tramite delle prove preliminari unidirezionali a rottura.

Si constaterà poi che la chiave di lettura dei risultati raggiunti, per le valutazioni finali sul comportamento dei differenti elementi compositi saggianti, sarà proprio l’analisi dei confronti tra i vari cicli al 25%, 50% e 75% del carico di rottura.

1 MATERIALI COMPOSITI

1.1 Cenni storici

L'utilizzo di materiali compositi risale all'epoca degli egizi (4.000 a.C. circa) i quali avevano già intuito che, mescolando l'argilla con la paglia, avrebbero ottenuto un impasto più performante per creare blocchi da costruzione, rispetto al solo fango usato fino ad allora.



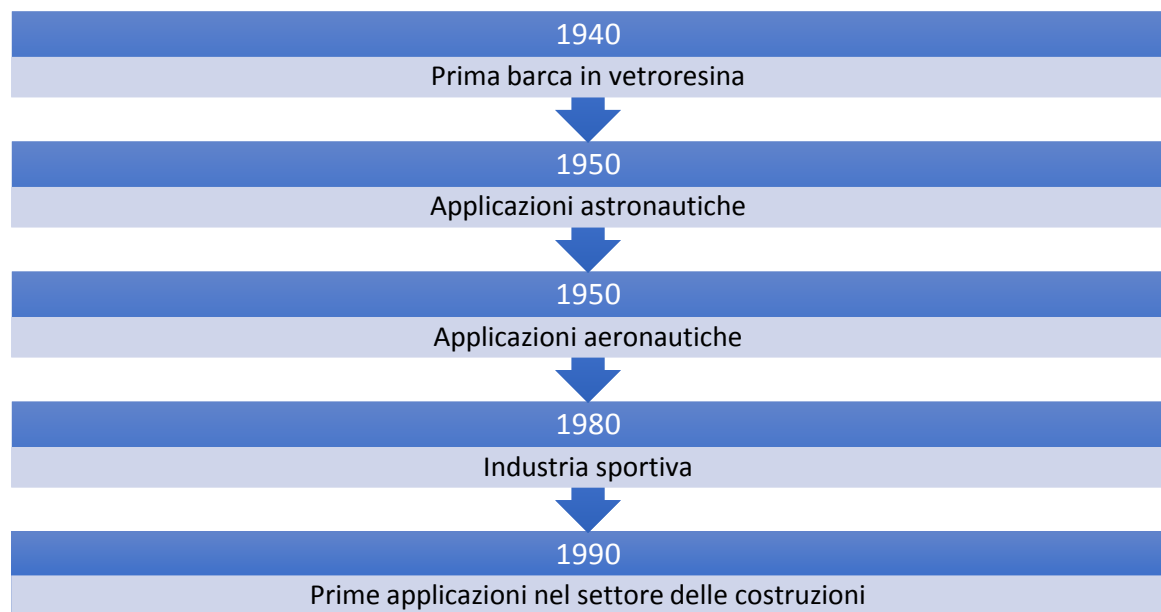
Figura 1.1 - Blocchi di argilla e paglia

L'inserimento di fibre di paglia nell'impasto di argilla permetteva, seppur in maniera limitata, di prevenire la fessurazione quando l'argilla veniva rapidamente essiccata al sole.

Tecniche simili sono state adottate anche da altri popoli come i Maya e i Mongoli, a conferma della diffusione dell'idea di fondo che coincide con quella attuale, cioè di ottenere un prodotto finale, composto da una matrice con basse qualità meccaniche (argilla) in grado di sfruttare la resistenza a tensione delle fibre (paglia).

1.1.1 Evoluzione dei compositi

Anche se nel corso degli anni i materiali compositi sono stati largamente utilizzati nel settore strutturale, partendo dal rinforzare i blocchi di argilla con la paglia fino ad arrivare alle moderne resine rinforzate del XX secolo, lo sviluppo di tali materiali è associato alle industrie spaziali e navali, che li hanno saputi sfruttare per le loro elevate capacità meccaniche e che, allo stesso tempo, avevano le possibilità economiche per soddisfare gli elevati costi di produzione.



Col passare degli anni, grazie anche all'ulteriore sviluppo della produzione industriale, questa classe di materiali è diventata accessibile anche ad altri settori come quello automobilistico fino ad arrivare a quello edilizio dove, nel 1992 in Scozia, viene realizzato "Aberfeldy Bridge"¹, il primo ponte pedonale realizzato interamente in composito.



Figura 1.2 - Ponte di Aberfeldy, Scozia

¹ Fonte:

- "The condition of the Aberfeldy footbridge after 20 years of service" – Dr Tim Stratford
- "I nuovi materiali nell'ingegneria civile: i compositi FRP" – D. Abruzzese e L. Miccoli

Il ponte² ha una luce complessiva di 114 m con una campata centrale di 63 m ed è sostenuto da dei tiranti in fibre di Kevlar collegati a due torri, anch'esse in composito, alte 17,5 m.

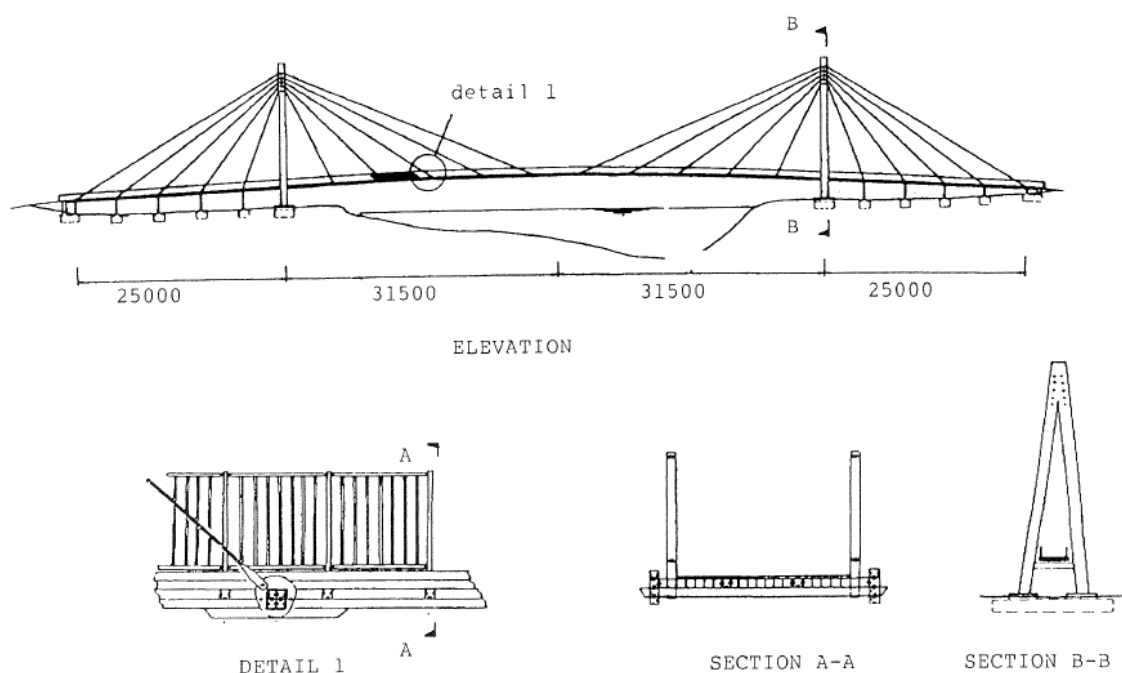


Figura 1.3 - Dettagli costruttivi del ponte di Aberfeldy

1.2 Materiali innovativi

Per materiali innovativi o avanzati s'intende una classe di materiali diversa da quelli tradizionali non perché realizzati in tempi più recenti, ma perché presentano un alto grado di funzionalizzazione, ovvero sono progettabili intervenendo sulla loro struttura fisico-chimica per variare il loro contenuto informativo ed elevarne i livelli prestazionali venendo utilizzati in applicazioni di alta tecnologia.

L'identità materica dell'oggetto viene sostituita da quella prestazionale facendo apparire la famiglia dei nuovi materiali estremamente eterogenea e difficilmente classificabile secondo i tradizionali criteri poiché il principale elemento che la distingue non risulta derivare dalle proprietà fondamentali del materiale stesso definite a priori dal suo contenuto materico, quanto piuttosto dalla possibilità di attribuirvi proprietà estranee ed

² Fonte: "Aberfeldy Bridge – an advanced textile reinforced footbridge" – C.J. Burgoyne and P.R. Head

originali che aumentino il suo contenuto informativo intervenendo su diverse scale dimensionali.

Nell'ambito edile, i materiali avanzati che hanno trovato largo uso possono essere suddivisi in due macrogruppi: materiali High-Performance e materiali Smart.

Nella categoria dei *materiali High-Performance* rientrano quei materiali con proprietà finali prestabilite da specifiche conformazioni chimico-fisiche e/o processi di sintesi. Rientrano in tale categoria:

- *materiali strutturali avanzati*: materiali impiegati quando si ha la necessità di incrementare le proprietà meccaniche. Tra essi rientrano i calcestruzzi ad alte prestazioni, vetri-strutturati, materiali compositi fibrorinforzati, schiume metalliche e polimeriche;
- *materiali termostrutturati*: materiali ad elevate proprietà termo-meccaniche. Ne fanno parte le resine termo-indurenti, fibre ignifughe, schiume ceramiche, ceramiche leggeri e trasparenti;
- *materiali a proprietà d'interfaccia*: materiali adatti a conferire un'elevata protezione dagli agenti atmosferici e dai fattori ambientali. Rientrano in tale categoria i rivestimenti nanostrutturati anticorrosione e antiusura, vetri autopulenti, selettivi e basso emissivi;

Nella categoria dei *materiali Smart* rientrano quei materiali che hanno la peculiarità di poter modificare le loro proprietà al variare degli stimoli provenienti dall'esterno. Rientrano in tale categoria:

- *materiali property changing*: materiali con la caratteristica di poter cambiare di fase, o a memoria di forma ovvero in grado di cambiare automaticamente le loro proprietà in risposta a eventuali cambiamenti climatici, senza l'ausilio di interventi esterni o sistemi di controllo. Ne fanno parte i materiali magneto-elettroreologici, foto-termo-elettrotropici, foto-termo-elettrocromici;
- *materiali energy exchanging*: materiali che trovano applicazione negli edifici come dispositivi per la produzione di energia o sistemi di controllo. Tra essi rientrano i materiali foto-elettro-chimicoluminescenti, sensori piezometrici e materiali organici per la conversione fotovoltaica.

1.3 Materiali compositi fibrorinforzati

Con il termine di materiale composito si definisce un sistema costituito da due o più fasi che, pur conservando ciascuno la propria identità chimica, contribuiscono mutuamente a fornire proprietà meccaniche e fisiche complessivamente molto superiori a quelle dei singoli elementi come entità separate³.

In percentuale variabile in base al tipo di composito, si possono identificare al loro interno le seguenti categorie di componenti chiamate fasi:

1. *Matrice*: fase continua che generalmente definisce forma e volume del componente, con il compito di proteggere e legare le fibre trasferendogli i carichi;
2. *Interfase*: fase aggiuntiva che si instaura a causa di interazioni chimiche tra matrice e rinforzo;
3. *Rinforzo*: fase discontinua rappresentata dall'insieme diffuso di fibre nella matrice che garantisce resistenza e rigidità al composito.

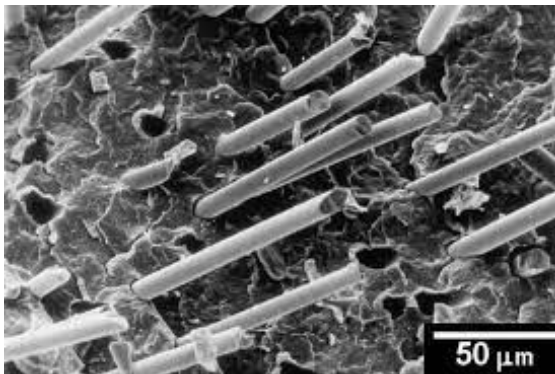


Figura 1.4 - Composito al microscopio

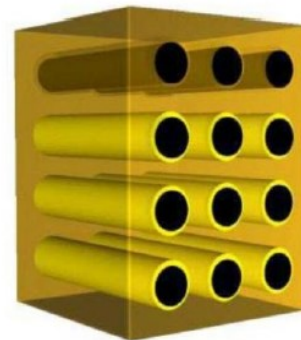


Figura 1.5 - Interfaccia fibra-matrice

Di norma il termine composito è ristretto ad una categoria di materiali, non naturali, che soddisfa tre requisiti:

1. consistono di due o più materiali fisicamente distinti;
2. i materiali costituenti sono dispersi l'uno nell'altro in modo controllato;
3. il materiale risultante presenta una combinazione di proprietà superiore a quella della somma dei singoli materiali compositi

³ Fonte: "Introduzione ai materiali compositi" – R. Sola

Le proprietà degli elementi che formano un composito determinano l'uso applicativo del materiale finale, mentre la tipologia degli elementi di rinforzo e la distribuzione delle fasi definiscono la resistenza in termini strutturali del composito, considerando anche la geometria e l'orientamento del rinforzo ne determinano l'anisotropia⁴.

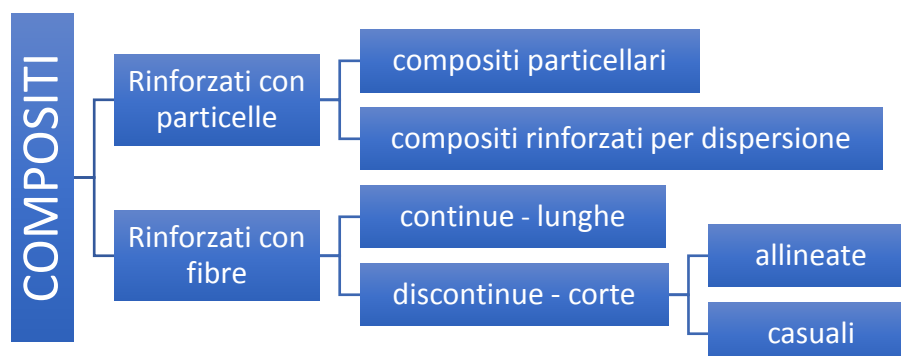
1.4 Classificazione dei compositi

La classificazione dei materiali compositi è distinta in funzione del tipo di meccanismo che presentano:

- Meccanismo di *resistenza*: strettamente legato alla natura del rinforzo dove in base a forma, tipologia ed orientamento si distingueranno i compositi rinforzati con fibra dai compositi rinforzati con particelle;
- Meccanismo di *resilienza*: strettamente legato alla natura della matrice dove rientrano i compositi plastici, metallici o ceramici in funzione della struttura chimico-fisica del materiale facente funzione di matrice, indipendentemente dalla tipologia di fibre impiegate come rinforzo.

1.4.1 Classificazione in base al meccanismo di “resistenza”

Tale classificazione può essere fatta in termini di tipologia degli elementi di rinforzo impiegati:



⁴ Fonte: “Consiglio Nazionale delle Ricerche – Istruzioni per la progettazione, l’esecuzione ed il controllo di interventi di consolidamento statico mediante l’uso di compositi fibrorinforzati” – CNR – DT 200 R1/2013

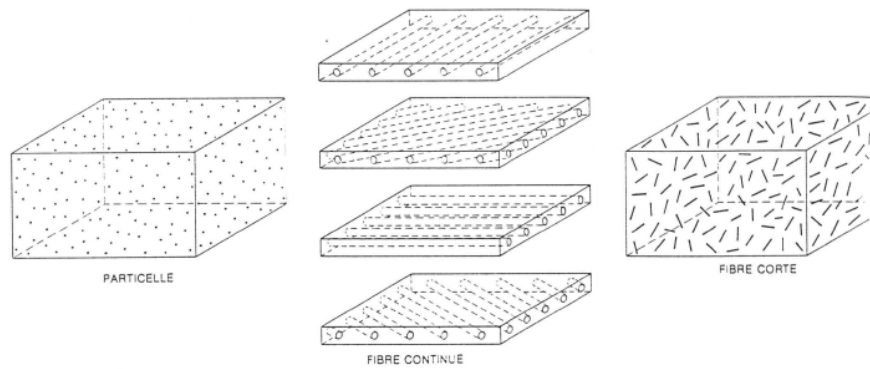


Figura 1.6 - Schematizzazione rinforzo per compositi

Nel settore edilizio, per soddisfare le alte prestazioni strutturali richieste, i compositi che vengono utilizzati frequentemente presentano un rinforzo costituito prevalentemente da fibra continua-lunga, in grado di conferire adeguata rigidezza e resistenza al materiale nella direzione della stessa.

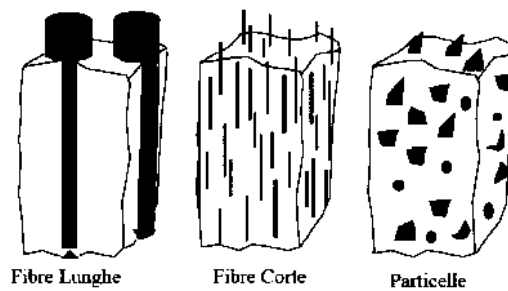


Figura 1.7 - Tipologie di fibre per compositi

L'efficacia dei compositi rinforzati con particelle dipende dalle proprietà e dalle percentuali dei suoi componenti, e nello specifico, con una matrice fragile vengono utilizzate particelle duttili per acquisire un'elevata resistenza e un'adeguata deformabilità, mentre con una matrice duttile si preferiscono rinforzi di tipo fragile per aumentare la tenuta conservando la tenacità.

Nei compositi rinforzati con fibre, le tipologie di fibre si distinguono in:

- *Fibre lunghe*: dove allineandosi tra loro generano compositi anisotropi ed ortotropi con diametro $\phi > 1 \div 10 \mu\text{m}$ ed una lunghezza $L > 10 \div 100 \mu\text{m}$.
- *Fibre corte*: dove disponendole casualmente si generano compositi isotropi, mentre orientandole anisotropi ed ortotropi con diametro $\phi = 1 \div 10 \mu\text{m}$ ed una lunghezza $L = 10 \div 100 \mu\text{m}$.

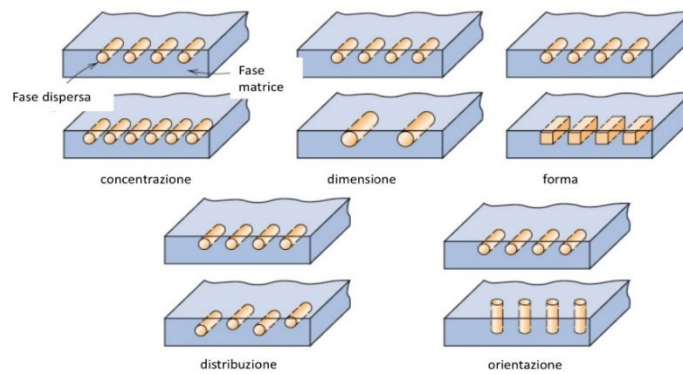
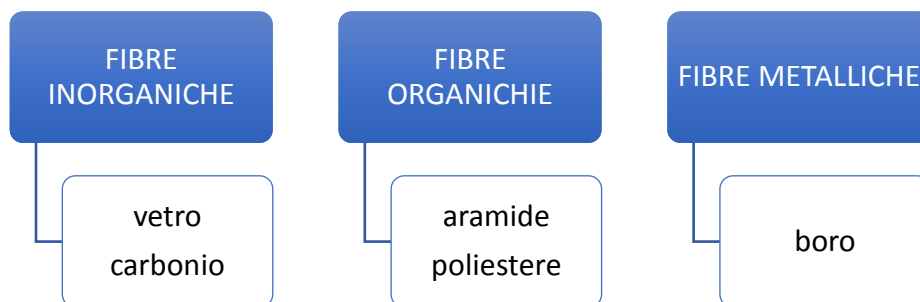


Figura 1.8 - Schemi di distribuzione e orientamento di fibre

1.4.1.1 Tipologia di fibre

Le fibre presentano generalmente un diametro di circa 0,1 mm con sezione di vario genere, da quella circolare a quella triangolare e possono essere di varia natura:



Le fibre si presentano come filamenti continui molto sottili di materiale, al punto da poter essere considerati monodimensionali e si possono presentare come:

- *filo di base* (monofilament): semplici filamenti continui;
- *filamenti tagliati* (chopped strand): fibre corte discontinue;
- *fili a trefolo* (roving o yarns): insiemi di fili uniti in fascio o avvolti a trefolo;
- *stuoia* (mat): insieme di fili di base continui o discontinui uniti da legante solubile o insolubile;
- *tessuto* (woven fabric): insieme di fili di base o roving incrociati ortogonalmente secondo una trama e un ordito;
- *pre-impregnati* (pre-pregnant): nastri o fogli costituiti da filamenti continui inglobati in una resina non polimerizzata con indurente;



Figura 1.9 - Monofilament, woven fabric, mat

Attraverso la tranciatura dei fili di base continui si ottengono le *fibre corte* che vengono immerse in modo del tutto casuale e disordinato all'interno della matrice, ottenendo un prodotto finale pseudo-isotropo.

I *roving*, cioè l'insieme di fili di base, sono invece costituiti da rotoli dai cui è possibile ottenere fibre corte per realizzare i tessuti.

I *mats*, che sono un insieme di fili uniti da appositi leganti, sono generalmente costituiti da fibre continue e discontinue, e vengono prodotti in nastri di lunghezza e larghezza diverse in funzione delle varie necessità e applicazioni, ma generalmente la larghezza non eccede i 50mm.

I *tessuti* vengono prodotti secondo diverse configurazioni per avere caratteristiche differenti a seconda di come vengono intrecciate le fibre in trame e orditi ed in relazione alla loro composizione. Notevole è anche la produzione di tessuti con fibre intrecciate di diversa natura per ottenere *tessuti ibridi*.

I *pre-preg*, sono dei componenti tessili pre-impregnati, che si presentano generalmente sotto forma di nastri con lunghezza compresa tra 10÷80 mm o fogli con lati fino 2 m in cui, grazie all'utilizzo di resine non polimerizzate con indurente, si riesce a garantire l'insieme delle fibre.

Le fibre, sottoforma di filamenti elementari continui, vengono anche utilizzate per la realizzazione di elementi compositi a *fibre lunghe* attraverso processi di avvolgimento filamentare o pultrusione, oppure, possono anche essere impiegate come componenti

basici per ottenere prodotti più complessi e articolati affini ai tessuti come *rovings*, *yarns*, *woven fabrics* o *mats*.

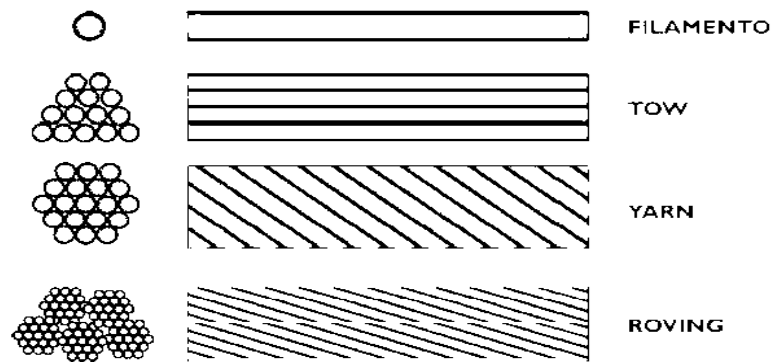


Figura 1.10 - Tipologie di fibre

Nel settore edilizio le fibre più comuni e diffuse che troviamo per la realizzazione di compositi sono:

-  Fibre di vetro
-  Fibre di basalto
-  Fibre di carbonio
-  Fibre di aramide
-  Fibre di acciaio
-  Fibre naturali

1.4.1.2 Fibre di vetro

Lo sviluppo delle fibre di vetro si ebbe agli albori del 1930 quando, attraverso la produzione industriale, si iniziarono a realizzare isolanti elettrici mescolando e fondendo tra loro diversi ossidi, tra cui quello di calcio, di silicio, di magnesio, di alluminio e di boro.

I compositi ottenuti con fibre di vetro hanno prestazioni medio-alte e si caratterizzano per la loro elevata resistenza.

Il vetro quindi ottenuto è composto principalmente da silice (SiO_2) in struttura tetraedrica (SiO_4) alle quale sono aggiunti in proporzioni diverse ossidi di alluminio ed altri ioni metallici per facilitare le operazioni di lavorazione o per modificare alcune proprietà, come ad esempio le fibre di vetro S rispetto alle E esibiscono una resistenza a trazione più elevata.

ELEMENTI	VETRO E	VETRO S
Ossido di silicio	54,3	64,20
Ossido di alluminio	15,2	24,80
Ossido di ferro	-	0,21
Ossido di calcio	17,2	0,01
Ossido di magnesio	4,7	10,27
Ossido di sodio	0,6	0,27
Ossido di boro	8,0	0,01
Ossido di bario	-	0,20
Varie	-	0,03

Tabella 1.1 - Confronto tra caratteristiche E-Glass e S-Glass

Nelle sue linee essenziali la tecnologia di produzione delle fibre di vetro è basata sulla filatura di una miscela costituita principalmente da sabbia, allumina e calcare. I componenti sono miscelati a secco e portati a fusione intorno ai 1260 °C circa, in una fornace a refrattari dove il vetro fuso viene alimentato direttamente su filiere di platino e fatto passare per gravità attraverso appositi fori praticati sul fondo.

I filamenti, prodotti per filatura da fuso, sono quindi raggruppati, con l'imposizione eventuale di una leggera torsione, a formare una treccia o fibra detta *strand*, tipicamente costituita da 204 filamenti dove i singoli filamenti presentano un diametro medio dell'ordine dei 10 μm e sono ricoperti da un legante o bozzima chiamato *size*.

I filati sono raccolti senza ritorcitura in roving i cui valori tipici della massa lineare, per applicazioni nel settore civile, sono superiori a 2000 Tex.

Le fibre di vetro sono anche disponibili in forma di fogli sottili, denominati mat costituiti sia da fibre lunghe continue che da fibre corte, cioè fibre discontinue di lunghezza tipica compresa tra 25 e 50 mm, disposte casualmente nel piano e tenute assieme da un legante chimico. La larghezza dei mat è variabile tra 5 cm e 2 m e la loro densità di massa è dell'ordine di 0.5 kg/m^2 .

Le fibre di vetro esibiscono un modulo di elasticità normale inferiore a quello delle fibre di carbonio o a quello delle fibre aramidiche che si aggira intorno ai 70 GPa circa per le fibre di vetro E ed offrono una resistenza all'abrasione relativamente modesta, che richiede una certa cautela nelle operazioni di manipolazione prima dell'impregnazione. Inoltre, esse presentano una pronunciata attitudine allo scorrimento viscoso ed una modesta resistenza a fatica.

Per promuovere l'adesione tra fibre e matrice e per proteggere le fibre dall'azione degli agenti alcalini e dall'umidità, le fibre sono sottoposte a trattamenti di ensimaggio chiamato *sizing* con sostanze aventi funzione di compatibilizzante. Tali trattamenti sono molto utili ai fini della durabilità e della resistenza a fatica sia statica che dinamica del materiale composito.

Sul mercato è possibile trovare vari tipi di vetro in filamenti continui secondo le possibilità di trafilatura con caratteristiche e proprietà differenti, in termini di resistenza meccanica, comportamento elettrico ed altre, che vengono contraddistinte da una lettera.

Nello specifico possiamo trovare sette tipologie differenti:

A - Glass	<ul style="list-style-type: none">• Elevata resistenza agli acidi ma notevole sensibilità all'umidità
C - Glass	<ul style="list-style-type: none">• Elevata resistenza agli agenti chimici
D - Glass	<ul style="list-style-type: none">• Modeste proprietà elettriche, permeabilità alle onde elettromagnetiche, bassa densità
E - Glass	<ul style="list-style-type: none">• Buone proprietà fisico-chimiche, costo contenuto, densità elevata
L - Glass	<ul style="list-style-type: none">• Buone capacità di impermeabilità alle radiazioni infrarosse dovuto al piombo contenuto
R - Glass	<ul style="list-style-type: none">• Elevata resistenza meccanica e a fatica. discreta resistenza alle alte temperature
S - Glass	<ul style="list-style-type: none">• Fibre di tipo R ma con elevata resistenza a trazione, modulo elastico e costo contenuto. Ottime caratteristiche termiche

Indipendentemente dalla tipologia di vetro è possibile riconoscere alcune caratteristiche peculiari comuni a tutti i tipi:

- buona resistenza meccanica;
- buona resistenza a fatica;
- basso modulo elastico;
- buona stabilità dimensionale;
- discreta resistenza al calore;
- elevata resistenza alla corrosione;
- buone proprietà di isolamento termico;
- ottime proprietà di isolamento elettrico;
- limitata resistenza all'umidità.

Gli FRP a base di fibre di vetro si denotano usualmente con l'acronimo GFRP e le forme più comuni in cui si possono trovare sono i rovings e gli yarns.

Inoltre, le fibre di vetro rappresentano la tipologia di rinforzo più noto ed utilizzato nei materiali compositi a matrice polimerica in quanto presentano diversi vantaggi come:

- il rapporto prestazione-costi;
- semplicità di produzione delle fibre;
- compatibilità con molteplici tipi di matrici.

1.4.1.3 Fibre di basalto

La produzione di fibre di basalto risale agli inizi del 1920, negli Stati Uniti d'America e si dovette aspettare il secondo dopoguerra affinché lo sviluppo e la ricerca delle fibre di basalto arrivò in Europa e in Unione Sovietica, con scopo prettamente militare ed aerospaziale.

Per l'applicazione delle fibre di basalto nel settore civile si è dovuto aspettare fino alla metà degli anni '90 partendo da Russia, Cina e Stati Uniti d'America, che si riveleranno poi i maggiori produttori.

Negli ultimi anni la ricerca di nuove tipologie di fibre da adottare nel settore dell'edilizia civile si è indirizzata verso lo studio delle fibre di basalto, che sono fibre molto sottili, generalmente con un diametro compreso tra 9÷13 μm , formate da roccia di tipo vulcanica composta da:

- plagioclasti;
- pirosseni;
- olivine.

Grazie alle loro caratteristiche rappresentano un valido sostituto alle fibre di amianto in quanto presentano un diametro molto superiore al limite di respirabilità che è pari a circa 5 μm . Tali fibre appartengono inoltre, alla categoria delle fibre minerali assieme alle fibre di carbonio e alle fibre di vetro ma, rispetto a queste ultime, hanno migliori proprietà meccanico-fisiche e un costo inferiore rispetto alle prime.

Il basalto è quindi un miscuglio di ossidi tra cui quello di silicio, di alluminio, di calcio, di magnesio, di ferro e anche di altri elementi, seppur in percentuale minore.

La corretta composizione chimica delle fibre di basalto dipende dal produttore e dalle percentuali in peso in cui le diverse rocce basaltiche sono sciolte in un unico fuso, genericamente:

ELEMENTI	BASALTO
Diossido di silicio (SiO ₂)	51,67 – 57,50
Ossido di alluminio (Al ₂ O ₃)	16,90 – 18,20
Ossido ferrico (Fe ₂ O ₃)	4,00 – 9,50
Ossido di calcio (CaO)	5,20 – 7,80
Ossido di magnesio (MgO)	1,30 – 3,70
Ossido di sodio (Na ₂ O)	2,50 – 6,40
Biossido di titanio (TiO ₂)	1,10
Ossido di potassio (K ₂ O)	0,80 – 4,50
Varie	8,00 – 10,00

Tabella 1.2 - Composizione chimica delle fibre di basalto

Tra le caratteristiche principali delle fibre di basalto si hanno:

- elevate proprietà meccaniche;
- ottima resistenza a trazione e compressione;
- ottima resistenza alle vibrazioni;
- ottime proprietà isolanti elettriche, termiche ed acustiche;
- coefficiente di dilatazione termica lineare nullo;
- impermeabilità all'acqua.

Per quanto riguarda la produzione delle fibre di basalto, le tecniche utilizzate sono simili alle tradizionali tecnologie per la produzione delle fibre di vetro, con la differenza che il basalto si presenta costituito dalla fusione di unica materia prima.

Per produrre la fibra di basalto è necessario portare la roccia oltre la sua temperatura di fusione che è di circa 1'400 °C, in maniera tale da garantire una viscosità adeguata per la filatura e, per effettuare tale operazione, si utilizza una fornace di materiale refrattario.

Il fuso viene estruso attraverso una matrice contenente più boccole in platino e rodio, chiamato *bushing*, per produrre fili continui di basalto che vengono poi avvolti su una bobina, processo che comprende anche la stiratura delle fibre in modo da ridurre il diametro facendogli acquisire maggiori proprietà meccaniche.

Nonostante le varie similitudini tra le fibre di vetro e le fibre di basalto, le seconde si presentano con proprietà meccaniche superiori ma con una richiesta di temperatura più elevata per essere filate, rendendo il processo produttivo più dispendioso in termini energetici.

Il vetro, grazie alla sua trasparenza, garantisce un'uniformità di temperatura in tutto il bagno con il semplice utilizzo di bruciatori a gas che forniscono il calore dall'alto, mentre il basalto invece, essendo scuro, assorbe energia infrarossa riscaldandosi solo superficialmente.

Ciò definisce una disomogeneità di temperatura nel bagno ed implica la necessità di scaldare tale bagno per molte ore per raggiungere una condizione di equilibrio termico. Attualmente si è cercato di ovviare a questo problema utilizzando degli elettrodi immersi nel bagno di basalto fuso, impiegando dei forni ad arco.

Grazie alle loro proprietà, le fibre di basalto si prestano perfettamente alla produzione di compositi utili in vari ambiti dell'ingegneria strutturale e non solo, tra cui:

- Rinforzo di ponti e gallerie
- Produzione di pannelli sandwich con fibra di basalto
- Materiali per isolamento acustico
- Materiali per isolamento termico interno ed esterno
- Calcestruzzo rinforzato direzionale/dispersivo
- Risanamento crepe, danni locali
- Casseforme riutilizzabili
- Costruzioni idrauliche
- Guarnizioni e rivestimenti

1.4.1.4 Fibre di carbonio

La scoperta delle fibre di carbonio si deve ad Edison nel 1878 mentre stava cercando di realizzare la prima lampada ad incandescenza, negli anni a venire sono state trascurate per poi essere prodotte commercialmente solo in un secondo momento intorno agli anni '60 in ambito aeronautico nel Regno Unito.

Le fibre di carbonio sono state impiegate come materiali compositi nel settore militare e aeronautico e, solo in seguito, anche nell'industria automobilistica ed edilizia.

Esse rappresentano il punto di separazione tra le fibre organiche e le fibre inorganiche in quanto generate dalla degradazione controllata di fibre organiche o da peci organiche con trattamento termico denominato *pirolisi controllata*.

La generazione di queste fibre avviene all'interno di una camera di *pirolisi*, cioè un ambiente in cui le condizioni di temperatura e pressione sono controllate ed in cui le fibre sono costantemente mantenute in tensione adeguata permettendo alle molecole di assumere una configurazione spaziale opportuna.

Dopo tale processo le fibre organiche presentano, rispetto al loro stato originario, una densità sensibilmente ridotta ed acquistano una eccellente resistenza a trazione generalmente superiore a quella delle fibre di vetro, ed inoltre anche un elevato modulo elastico.

I primi componenti sottoposti a pirolisi furono il Rayon e il Nylon ma il precursore maggiormente utilizzato nel corso tecnologico di queste fibre è il poliacrilonitrile *PAN*, una particolare fibra acrilica che permette di ottenere filamenti ad elevatissime prestazioni. Negli ultimi anni sono state introdotte fibre di carbonio e di grafite ottenute da residui della distillazione del petrolio o del catrame *PITCH*.

Grazie alla struttura rigida delle molecole ad anelli ciclici a nastro o a scala a pioli, delle fibre di carbonio, è stato possibile costruire molecole organiche aromatiche per ottenere fibre ad elevate prestazioni indipendentemente dal precursore di origine.

La terminologia fibre di carbonio si alterna, nella pratica comune, a quella di fibre di grafite, ma il primo termine dovrebbe essere applicato a fibre trattate fino a circa 2000 °C,

riservando il termine grafite a quelle trattate ad almeno 2500 °C, anche se la struttura di queste ultime non corrisponde alla tipica struttura cristallina tridimensionale della grafite.

Le elevate proprietà meccaniche delle fibre di carbonio derivano dalla particolare struttura cristallina della grafite: durante il processo produttivo, più si riesce ad ottenere una valida struttura cristallina, attraverso il processo di carbonizzazione, e più si ottiene un materiale con caratteristiche notevoli.

Analizzando un cristallo di grafite, si evince che la struttura è composta da strati sovrapposti di piani costituiti da atomi di carbonio. I legami fra atomi dello stesso piano sono forti, cioè legami covalenti, mentre quelli fra atomi di piani differenti sono relativamente deboli, cioè legami di Van der Waals. Si denota inoltre che i cristalli siano strutture fortemente anisotrope e, attraverso il processo di fabbricazione, è possibile disporre la struttura cristallina nella direzione voluta.

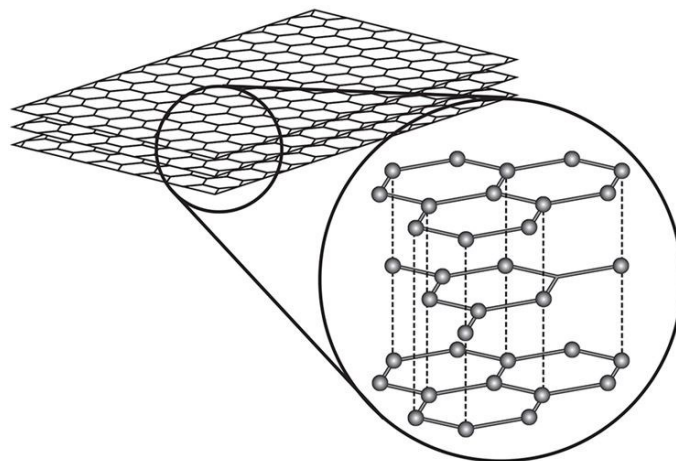


Figura 1.11 - Strati fibra di carbonio

In sostanza il processo è tutt'altro che semplice e non si riesce mai ad ottenere dei cristalli perfetti e con precisione di orientamento per cui le caratteristiche meccaniche risultanti saranno più basse di quelle teoriche.

Il processo di produzione e conversione definito il precursore, la scelta dell'uno o dell'altro è in funzione del costo di produzione, della complessità del processo, della rapidità di lavorazione e comincia con la trafilatura, cioè la sua riduzione in fibre, a cui segue poi uno stiramento alla temperatura di 200°C.

La *carbonizzazione* è la fase che ordina gli assi principali di ogni molecola ed avviene ad una temperatura compresa tra 1100 ÷ 1500°C. Aumentando poi la temperatura fino a 2000°C

ed oltre, il processo prende il nome di *grafitizzazione* e, grazie ad essa, si ottengono le fibre di grafite, il cui modulo elastico, conseguentemente ad un ulteriore riordino della struttura delle fibre superiore a quello raggiunto alla temperatura di carbonizzazione, è superiore a quello delle fibre di carbonio a scapito della resistenza a trazione che è inferiore di circa il 20%.

Le caratteristiche principale delle fibre di carbonio sono:

- elevate proprietà meccaniche
- ottima resistenza a trazione e compressione
- elevato modulo elastico
- bassa densità
- elevata resistenza alle alte temperature
- coefficiente di dilatazione termica nullo
- buona conducibilità termica ed elettrica

Nel processo di messa a punto dei materiali compositi con rinforzo in fibre di carbonio, è stata riscontrata una certa difficoltà nell'impregnazione ed adesione delle suddette fibre alle matrici, e, per la suddetta motivazione, sono stati pensati e realizzati diversi procedimenti produttivi:

1. *Processo di whiskerizzazione*: la cui finalità è quella di generare formazioni cristalline, chiamate *whisker*, in grado di ridurre lo scorrimento tra matrice e fibra ed i rischi di sfogliazione e delaminazione del composito.
2. *Processo di ossidazione superficiale delle fibre*: la cui finalità è il corrugamento delle fibre stesse tali da renderle più adatte all'adesione alla matrice.
3. *Applicazione di film epossidico*: la cui finalità mira all'aumento della capacità di adesione con la matrice, alla lavorabilità del materiale e alla diminuzione del danneggiamento per abrasione nella fase di posa.

Gli FRP a base di fibre di carbonio si denotano usualmente con l'acronimo CFRP.

1.4.1.5 Fibre di aramide

Tra le principali fibre organiche troviamo quelle aramidiche, sviluppatasi agli inizi degli anni 50', attraverso la lavorazione delle poliammidi aromatiche.

Le poliammidi sono macromolecole caratterizzate dal legame ammidico CO-NH, derivanti dalla condensazione di due composti da cui dipendono molte proprietà di questo tipo di molecole: acido carbossilico e ammina.

Tali macromolecole possono presentare una struttura lineare o contenere dei gruppi aromatici e la loro compagine dipende dal processo produttivo.

Si hanno poliammidi a catena lineare quando i legami tra gli atomi di carbonio e i vari gruppi funzionali si sviluppano lungo una linea.

La presenza di anelli aromatici nella molecola di una poliammide comporta un incremento delle prestazioni meccaniche rispetto a quelle delle poliammidi lineari, in particolare, del modulo di elasticità. Se il contenuto di anelli aromatici risulta maggiore dell'85% si parla di poliammidi aromatiche e, più propriamente, di aramidi.

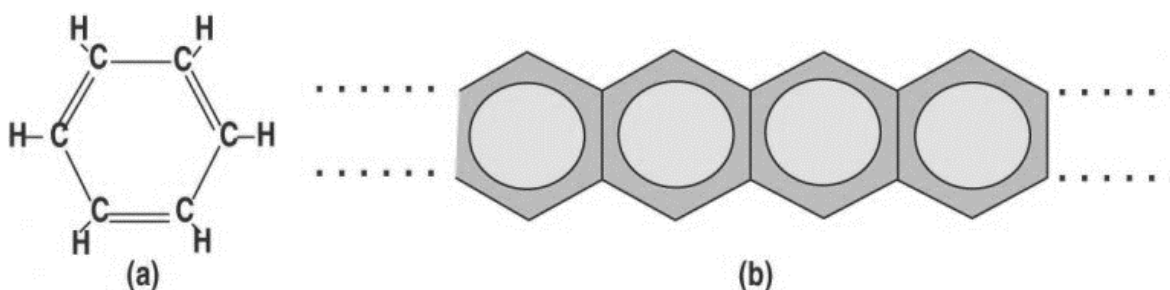


Figura 1.12 - Anelli aromatici di una molecola di poliammide

La fibra aramidica è costituita da catene poliammidiche sintetiche, nelle quali il 25% dei legami ammidici è attaccato a due cicli aromatici.

Il polimero di base si realizza partendo da una soluzione amminica mantenuta tra $5^{\circ} \div 10^{\circ}\text{C}$ con aggiunta di acido cloridrico seguito da un rinvenimento delle catene polimeriche. Aggiungendo acido solforico si procede, infine, alla trafilatura attraverso una filiera tenuta ad alta temperatura.

I fili appena trafilati vengono investiti da getti d'aria e, successivamente immersi in un bagno raffreddante in liquido coagulante tra $0^{\circ} \div 4^{\circ}\text{C}$.

Attraverso l'ottima combinazione tra peso specifico ed elevate resistenza a trazione, le fibre aramidiche presentano:

- La più alta capacità di resistenza all'impatto
- La più alta capacità di resistenza specifica

Le prime fibre aramidiche sono state prodotte negli anni '60 e sono quelle commercializzate dalla ditta DuPont con il nome di *Nomex* e presentano una eccezionale resistenza al calore e alla fiamma, ed eccellenti proprietà di isolamento elettrico.

La disponibilità del prodotto sul mercato in diverse forme come fiocco, filati, strutture laminari e cartoni con eccellenti qualità di resistenza al calore e alla fiamma e di isolamento elettrico, rendono questo materiale ideale per una vasta gamma di applicazioni.

Con il tempo sono state messe a punto e sviluppate nuove tipologie di fibre Nomex caratterizzate da proprietà antistatiche e da una maggiore resistenza all'usura e alla lacerazione rispetto alle precedenti.

Successivamente nel 1972, la stessa azienda DuPont, ha commercializzato quella che diventerà la fibra aramidica più diffusa e adottata nei vari contesti applicativi: il *Kevlar*.

In commercio è possibile trovarne vari tipi che si diversificano fra di loro per la struttura chimica e per le prestazioni meccaniche.

MATERIALE		KEVLAR 29	KEVLAR 39	KEVLAR 149
Densità	[Kg/m ³]	1440	1450	1470
Modulo elastico	[GPa]	70	140	160
Rest. Mecc. a trazione	[MPa]	3600	3600	3200
Deform. a rottura	[%]	3,6	1,9	1,5
Resistenza specifica	[Mpa/Kg]	2,50	2,48	2,18

Tabella 1.3 - Confronto tra varie tipologie di KEVLAR

Il kevlar ha ottime doti di leggerezza in quanto il suo peso specifico è circa la metà di quello del vetro ed inoltre possiede un'elevata resistenza a trazione unita a un contenuto allungamento a rottura. Il processo produttivo di tali fibre è abbastanza laborioso in quanto prevede l'estrusione in acqua di una pasta contenente il 20% di polimero in acido solforico, neutralizzazione della fibra mediante NaOH, trattamenti termici e stiro.

Una caratteristica tipica del Kevlar è la modalità di frattura, che avviene per sfibratura *splitting* in microfibrille, quando viene sottoposto a trazione, e con la formazione di zone di schiacciamento *buckling* e di attorcigliamento *kinking*, quando è sottoposto a compressione.

La bassa resistenza agli sforzi di compressione è il motivo per cui il suo uso per la realizzazione di compositi è sconsigliato nel caso di strutture soggette a carichi di compressione.

La tipologia di frattura del Kevlar, con la formazione di fibrille, consente invece la dissipazione di elevate energie di frattura, impartendo al composito un'elevata resistenza all'impatto.

Con il trascorrere degli anni, questo tipo di fibra sintetica ha ricevuto miglioramenti notevoli in termini di resistenza meccanica.

In linea generale essa si dimostrò promettente rispetto all'acciaio sin dall'inizio, con il raddoppio della resistenza meccanica a parità di massa. Con il tempo si è arrivati a mettere a punto prodotti ancora più resistenti, con un rapporto di 5 a 1 sull'acciaio sempre in termini di resistenza meccanica, ma non quella al logorio né tanto meno quella al calore.

Sottoportandola a flessione, si denota che l'aramide ha un comportamento caratterizzato da una plasticità pressoché infinita nella zona compressa che consente all'asse neutro di spostarsi verso il basso impedendo il raggiungimento del punto di rottura a trazione della zona tesa anche per deformazioni flessionali molto elevate.

Nell'ambito delle costruzioni civili, l'aramide non trova grande impiego nel campo della ristrutturazione delle strutture in cemento armato dove le fibre in carbonio possiedono, a parità di costi, un più alto modulo elastico e quindi una maggiore capacità di assumere carichi e parità di deformazioni imposte alla struttura rinforzata.

L'impiego delle fibre in aramide, invece, è generalmente indicato nel rinforzo delle strutture in muratura dove non è richiesto un elevato modulo elastico.

1.4.1.6 Fibre di acciaio

Le fibre di acciaio, insieme a quelle di basalto, rappresentano una tipologia di fibra che viene utilizzata solo recentemente per la realizzazione dei materiali compositi.

L'acciaio è una lega composta principalmente da ferro e carbonio in percentuale non superiore al 2,11%, in quanto, superato tale valore, le proprietà del materiale cambiano e la lega che otteniamo non è più acciaio ma ghisa.

Il carbonio si presenta esclusivamente sotto forma di cementite o carburo di ferro, le particelle di cementite presenti nella microstruttura dell'acciaio bloccano gli scorrimenti delle dislocazioni, conferendo all'acciaio caratteristiche meccaniche migliori di quelle del ferro puro.

In funzione al tenore di carbonio, è possibile stilare una classificazione dell'acciaio:

extra - dolci	• Carbonio compreso tra lo 0,05% e lo 0,15%
dolci	• Carbonio compreso tra lo 0,15% e lo 0,25%
semidolci	• Carbonio compreso tra lo 0,25% e lo 0,40%
semiduri	• Carbonio compreso tra lo 0,40% e lo 0,60%
duri	• Carbonio compreso tra lo 0,60% e lo 0,70%
durissimi	• Carbonio compreso tra lo 0,70% e lo 0,80%
extra - duri	• Carbonio compreso tra lo 0,80% e lo 0,85%

La categoria degli acciai dolci risulta essere la più comune ma meno pregiata.

L'acciaio che viene utilizzato come elemento di produzione per le fibre di acciaio nel settore edile deriva dall'evoluzione di un acciaio con un contenuto di carbonio tra lo 0,80% e lo 0,96%, che viene sottoposto ad un particolare processo:



La scelta della tipologia d'acciaio di partenza è responsabilità del progettista in funzione delle specifiche esigenze progettuali sapendo che durante il processo di trafilatura a diametri ridotti si osservano dei mutamenti della microstruttura dell'acciaio da cui è possibile ottenere dei dati sulle proprietà meccaniche. Inoltre, bisogna avere nozioni sulla tipologia di trefolo che dipende dalla necessità di garantire una corretta aderenza meccanica tra matrice ed elemento fibra di rinforzo; infatti, è uso comune realizzare un composito dove la rottura del rinforzo precede quella della matrice.

Una volta che sono state definite le caratteristiche meccaniche della fibra, è opportuno valutare il disegno della geometria del rinforzo, in quanto l'utilizzo di singoli fili di diametro ridotto porterebbe ad avere un'insufficiente resistenza nell'interfaccia matrice-fibra. Si ricorre quindi all'utilizzo di trefoli ottenuti dall'intreccio di più fili in strutture simili a corde, la cui geometria presenta una superficie corrugata in grado di garantire un'adeguata aderenza.

Le caratteristiche principale delle fibre di acciaio sono:

- Elevata resistenza meccanica
- Elevata duttilità
- Leggerezza dovuta ad uno spessore ridotto
- Facilità di applicazione
- Ottima resistenza al calore, alle alte temperature e alla corrosione
- Durabilità

Gli impieghi nel settore ingegneristico ed edilizio, per questa tipologia di rinforzo, sono molteplici.

Nello specifico, le fibre in acciaio vengono utilizzate per:

- Rinforzo di elementi in cls, c.a. e c.a.p. quali travi, pilastri, solai, ecc...
- Incremento di resistenza di pannelli murari, pilastri, archi, volte, ecc...
- Rinforzo a pressoflessione e taglio di pannelli murari
- Confinamento di elementi strutturali
- Realizzazione di cordoli in muratura armata
- Collegamenti di elementi collaboranti

Le fibre in acciaio vengono prodotte e commercializzate in vari formati al fine di ottenere materiali compositi che siano utili nelle più diverse strutture. Sul mercato troviamo:

- Filamenti da trafilatura del filo d'acciaio pronti per essere dispersi in malte e calcestruzzi ad alta resistenza e a basso spessore

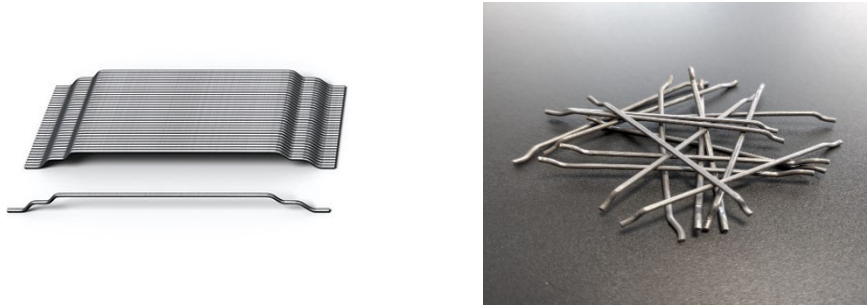


Figura 1.13 - Filamenti di fibre di acciaio

- Tessuti e/o reti che vengono generalmente impiegate in combinazione con matrici cementizie e per realizzare sistemi di rinforzo strutturali compositi FRG e SRG.



Figura 1.14 - Tessuti e reti in fibra di acciaio

I singoli fili sono prodotti in diametri da 0,20 ÷ 0,48 mm, dove in genere un trefolo, singolo o composto da un insieme di filamenti attorcigliati, ha dimensioni variabili tra 0,89 ÷ 1,02 mm.

1.4.1.7 Fibre naturali

Negli ultimi anni, l'attenzione verso l'ambiente e le specifiche normative riguardo alla salvaguardia dell'ambiente e il riciclo dei materiali, hanno fatto in modo che i ricercatori riversassero i propri studi verso la ricerca e lo sviluppo di materiali provenienti da fonti rinnovabili, facilmente recuperabili e degradabili alla fine della propria vita utile.

Questo approccio ha cercato di sostituire i compositi di difficile smaltimento e di più largo uso, come le resine epossidiche, fibre di vetro, carbonio e kevlar, con rinforzi meno invasivi e nocivi per l'ambiente.

Le fibre naturali sono una rielaborazione in chiave bio-edile delle altre tipologie di fibre usate più comunemente e possono anche essere considerate una rivisitazione delle fibre usate nell'antichità, ottenute prettamente da materiali comuni adattati all'utilizzo nei conglomerati cementizi e nelle malte.

Quelle che utilizziamo oggi, sono ovviamente ottenute attraverso un processo produttivo industriale, che si basa su l'utilizzo di materie prime vegetali e rigorosamente senza l'utilizzo di additivi o solventi chimici.

Come tipologia di rinforzo, tra le fibre che vengo utilizzate, evidenziamo:



Questa tipologia di fibre presenta degli aspetti vantaggiosi e svantaggiosi:

VANTAGGI	SVANTAGGI
<ul style="list-style-type: none">• reperibilità• non inquinante• non tossiche• leggerezza• elevate capacità meccaniche• proprietà isolanti• biodegradabilità• costi contenuti	<ul style="list-style-type: none">• capacità meccaniche variabili in funzione del tipo di pianta da cui proviene la fibra• proprietà idrofile (variazioni di volume)• limitata compatibilità chimica con la matrice• bassa resistenza a fatica e creep• morfologia poco controllabile• sensibili a batteri (microbi e funghi)

Una delle caratteristiche chiave di questa tipologia di rinforzo è proprio la biodegradabilità che, oltre ad essere un vantaggio, può tramutarsi in svantaggio quando le fibre utilizzate si trovano in condizioni ambientali poco controllate.

Grazie alle numerose ricerche e sperimentazioni, si può comunque riscontrare che le fibre naturali rappresentano una valida alternativa alle fibre che già conosciamo, sia in termini ingegneristici e sia in termini economici, con un occhio di riguardo verso l'ambiente.

1.4.1.8 Confronto tra le varie fibre

Graficando unitamente i tipici grafici Load-Deformation delle varie tipologie di fibre viste, è possibile fare delle valutazioni.

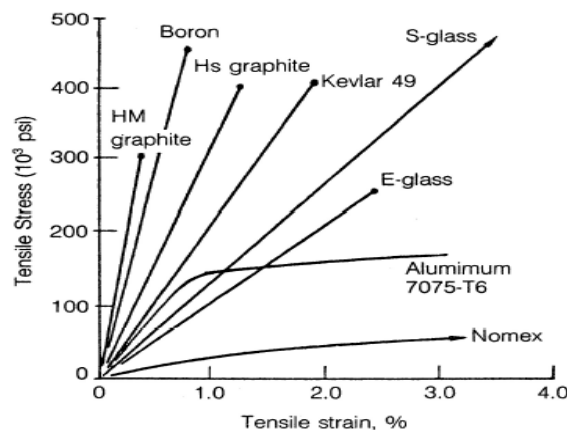


Figura 1.15 - Grafico Load-Deformation

Si nota come le fibre di carbonio abbiano una bassa densità con un'attitudine a fornire elevate prestazioni meccaniche ed una buona rigidità ma presentando una scarsa capacità di allungamento.

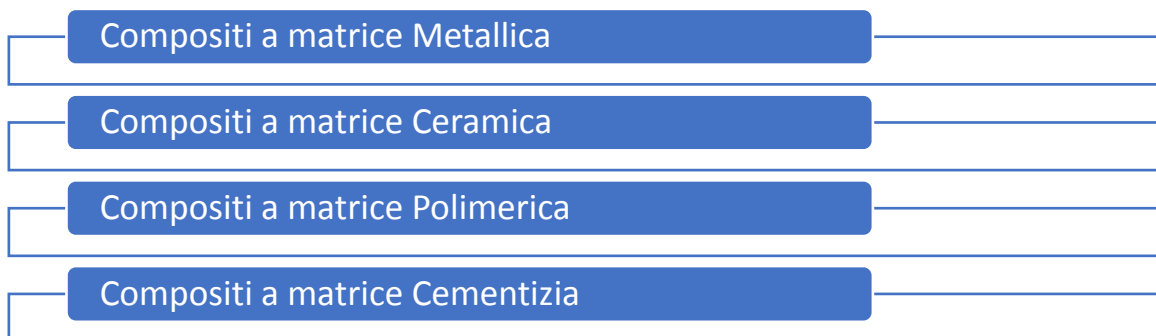
Anche le fibre aramidiche in Kevlar 49 presentano una bassa densità con un'ottima resistenza a trazione, modulo elastico ed allungamento elevati.

Le fibre di vetro presentano invece valori di densità più alti ma con parametri di resistenza a trazione e modulo elastico più bassi rispetto alle altre fibre. Rappresentano però la tipologia di fibre più diffusa in commercio in quanto sono molto più economiche delle altre.

1.4.2 Classificazione in base al meccanismo di “resilienza”

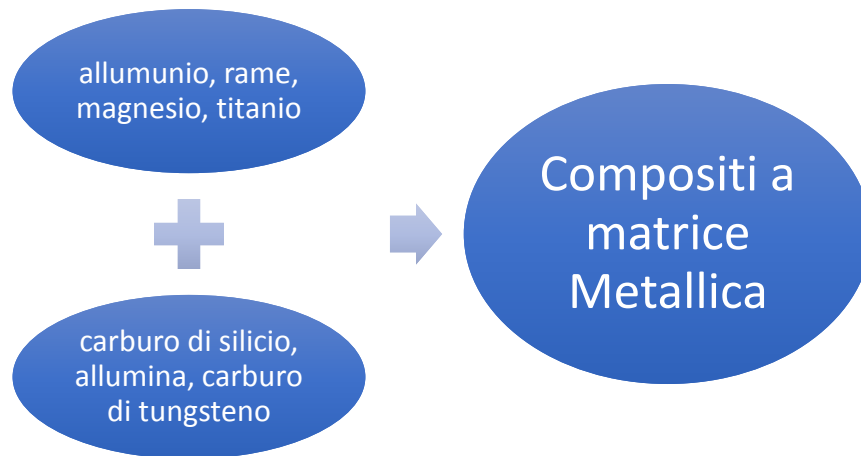
1.4.2.1 Tipologie di matrici

Secondo una classificazione in base al tipo di matrice si possono delineare le seguenti categorie:



1.4.2.2 Matrice metallica

I materiali compositi a matrice metallica, noti come MMC Metal Matrix Composites, sono ottenuti combinando una matrice metallica a base di diverse leghe piuttosto deformabile con un tipo di rinforzo molto rigido.



I rinforzi utilizzati risultano essere di tipo particellare e non fibroso, e quindi questa tipologia trova una maggiore applicazione nell'industria aerospaziale, veicolare ed elettronica e meno in quella edilizia.

Il suo scarso utilizzo è legato a motivi che riguardano l'introduzione delle fibre nella matrice, che generalmente, deve essere allo stato liquido e ad una temperatura tale da non danneggiare le fibre stesse. Un ulteriore problematica è quella di ottenere una distribuzione uniforme e perfettamente allineata delle fibre nella matrice.

Uno dei requisiti di più difficile soddisfacimento è la bagnatura, in quanto molto spesso la matrice metallica non riesce a bagnare completamente le fibre non ottenendo così il prodotto composito finale. Per migliorare tale caratteristica, bisogna controllare che i materiali metallici utilizzati come matrice siano predisposti alla formazione di carburi, che, grazie ad essi, riescono a migliorare la bagnatura ma possono comunque danneggiare la superficie della fibra in maniera non trascurabile.

Da tenere in considerazione c'è anche la temperatura con cui la matrice arriva a bagnare le fibre dove, essendo molto elevata, può portare alla formazione di depositi intermedi che possano danneggiare le fibre stesse.

1.4.2.3 Matrice ceramica

I materiali compositi a matrice ceramica, noti come CMC Ceramic Matrix Composites, sono impiegati quando il composito è soggetto a temperature di esercizio molto elevate o in condizioni di attrito e usura molto severe.

Nei ceramici, i legami costitutivi che legano gli atomi sono estremamente forti, di tipo covalente o ionico, e riescono a conferire una certa refrattarietà ed inerzia chimica, nonché un alto modulo elastico ed una notevole durezza. Di contro, tali caratteristiche conferiscono ai ceramici anche una nota fragilità. Essi non permettono ai piani cristallini di scorrere gli uni rispetto agli altri e dunque non permettono al materiale di potersi deformare plasticamente e per questo i ceramici si rompono improvvisamente, senza alcun preavviso, con la frattura che si propaga ad alta velocità nel prodotto.

Alla luce di ciò, per rendere un materiale ceramico affidabile bisogna incrementare il valore del suo fattore critico di intensificazione dello sforzo oppure bisogna agire riducendo le dimensioni dei difetti presenti in esso.

Lo scopo principale del rinforzo in questi materiali è quello di aumentare la tenacità e la resistenza tipicamente ridotte della matrice ceramica.

La tipologia di rinforzo può essere sotto forma di fibre continue, fibre discontinue o particellare. In tutti i casi l'incremento di resistenza avviene grazie all'effetto di interruzione della propagazione delle cricche, arrivando a raddoppiare la resistenza del materiale a trazione.

L'incremento di resistenza si ottiene interrompendo la propagazione delle cricche, arrivando ad ottenere una resistenza a trazione del materiale raddoppiata.

L'incremento della resistenza induce anche un miglioramento della tenacità poiché viene annullato o ritardato il cedimento prematuro di tipo fragile. Inoltre, anche se in maniera ridotta rispetto ai compositi a matrice polimerica e metallica, con l'aggiunta di fibre o particelle si ottiene anche un incremento del modulo elastico.

Il materiale cede quindi alle sollecitazioni critiche in modo brusco causando lo staccamento delle fibre dalla matrice e generando una rapida frattura.

Costruire un composito con difetti di piccole dimensioni non è semplice.

Per i compositi a matrice polimerica e metallica la matrice può essere portata allo stato liquido o fluido dove durante la reticolazione o il raffreddamento la quantità e le dimensioni dei vuoti sono piuttosto piccole, mentre per i compositi ceramici la matrice non può essere

portata allo stato fuso perché potrebbe decomporsi oppure le sue temperature di fusione sono talmente elevate da farla reagire con la fase tenacizzante.

Per densificare la matrice si utilizza il processo di sinterizzazione, partendo da polveri alle quali va aggiunta una seconda fase costituita da particelle con dimensioni di diversi micron e con forme allungate.

Affinchè il processo di sinterizzazione possa partire è necessario raggiungere elevate temperature in cui la presenza di particelle di una fase estranea con dimensioni discrete circondata da particelle più piccole della matrice che devono densificare, dà luogo ad un sistema difficilmente sinterizzabile.

Le particelle più grandi si oppongono al processo e, dopo la cottura, si ottiene un materiale a bassa densità, con elevata percentuale di pori che ne definiscono le scarse proprietà meccaniche.

Per ottenere un adeguato trasferimento degli sforzi dalla matrice al rinforzo, il rapporto tra il modulo elastico di quest'ultimo e quello della matrice deve essere superiore a quattro, ma non essendoci grandi differenze di modulo elastico nei materiali ceramici, questo rapporto non viene quasi mai raggiunto.

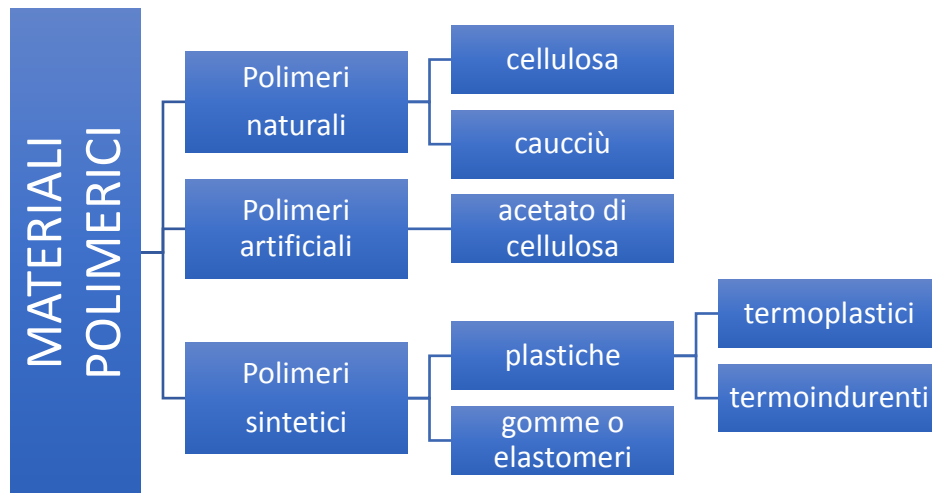
Seppur non avendo lo stesso successo e diffusione dei compositi a matrice polimerica, quelli ceramici sono stati in grado di ritagliarsi comunque alcune importanti nicchie di mercato nell'industria edilizia.

Le principali caratteristiche dei compositi in matrice ceramica sono:

- Resistenza alle elevate temperature
- Resistenza all'usura
- Resistenza a sollecitazione meccaniche
- Resistenza agli sbalzi termici
- Resistenza alla corrosione

1.4.2.4 Matrice polimerica

I compositi a matrice polimerica, noti come PMC, Polymers Matrix Composites, sono quelli in cui la matrice è costituita da una matrice polimerica plastica.



Un polimero è una macromolecola, cioè una molecola con elevato peso molecolare, costituita da più gruppi molecolari uguali o diversi, uniti mediante la ripetizione dello stesso tipo di legame covalente.

I polimeri si presentano sottoforma di una lunga catena a cui possono legarsi delle ramificazioni in base alle quali segue un'ulteriore classificazione:

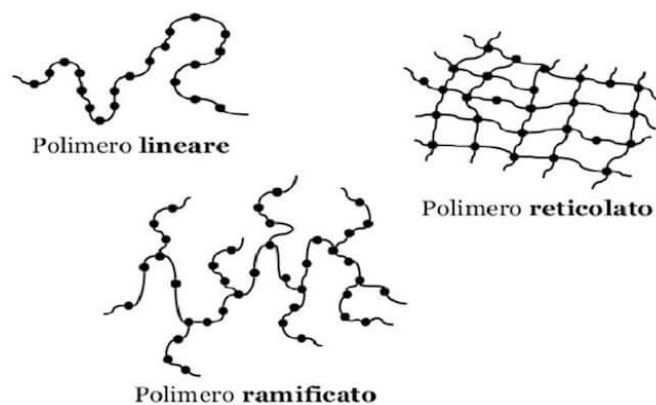


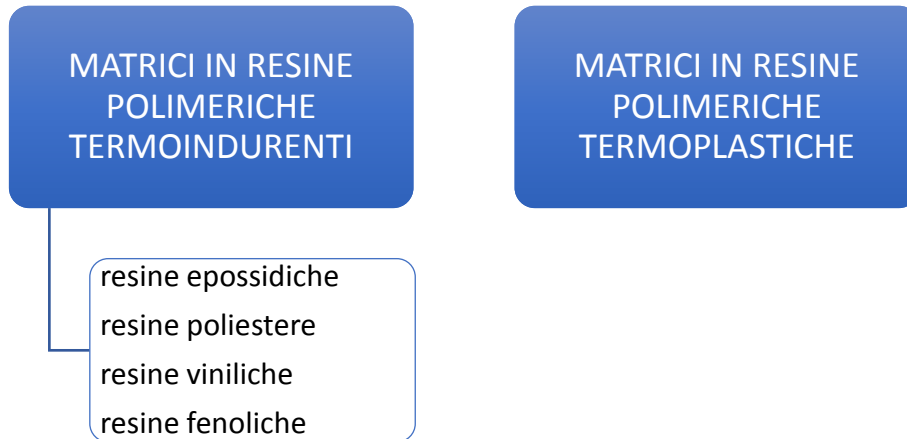
Figura 1.16 – Sottoclassificazione dei polimeri

La classificazione delle matrici polimeriche riguarda anche altri criteri come:

- Natura delle materie prime, se sintetiche o naturali e peso molecolare
- Meccanismo di polimerizzazione
- Tipologia strutturale interna (amorfa, cristallina, semicristallina)

- Risposta alla deformazione
- Comportamento al calore (termoplastici e termoindurenti)

Proprio in ragione della loro risposta al calore, si classificano altre due tipologie di matrici:



Sotto la terminologia di *termoindurenti*, si possono trovare una vasta gamma di materiali plastici che, portati a fusione e poi raffreddati, hanno in comune la capacità di essere infusibili ed insolubili. Suddetta capacità deriva dalla formazione a livello molecolare, dopo la prima fusione, di un reticolo tridimensionale tenuto insieme da forti legami covalenti i quali rendono irreversibile il processo.

Tali tipologie di resine possono essere suddivise in funzione delle temperature di esercizio:

- Temperature inferiori ai 250°C
 - *Resine epossidiche*: presentano proprietà meccaniche migliori di altri polimeri, buona resistenza chimica, basso ritiro, ottima adesione alle fibre e un'ottima stabilità termica.
 - *Resine poliesteri*: risultano adeguate in unione alle fibre di vetro, creando una vetroresina. Presentano anch'esse buone caratteristiche meccaniche.
 - *Resine fenoliche*: presentano le stesse proprietà delle resine epossidiche anche ad elevate temperature. Di contro presentano una percentuale elevata di vuoti che gli conferisce una certa resistenza al fuoco.
- Temperature superiori ai 250°C
 - *Resine viniliche*: presentano proprietà simili alle resine poliesteri ma con un più forte legame fibra-matrice. Presentano ottime proprietà meccaniche anche ad alte temperature di esercizio.

La temperatura è un parametro chiave, in quanto in funzione di essa, le matrici in resine polimeriche termoindurenti subiscono ripetute trasformazioni effettuando vari passaggi di stato, partendo da quello fluido e arrivando a quello vetroso, attraverso un processo di indurimento chiamato *curing* in cui le singole catene polimeriche reagiscono tra loro formando un unico reticolo tridimensionale.

Invece, sotto la terminologia di *termoplastiche*, si possono trovare resine che presentano una struttura molecolare lineare che durante lo stampaggio a caldo non subiscono alterazioni chimiche.

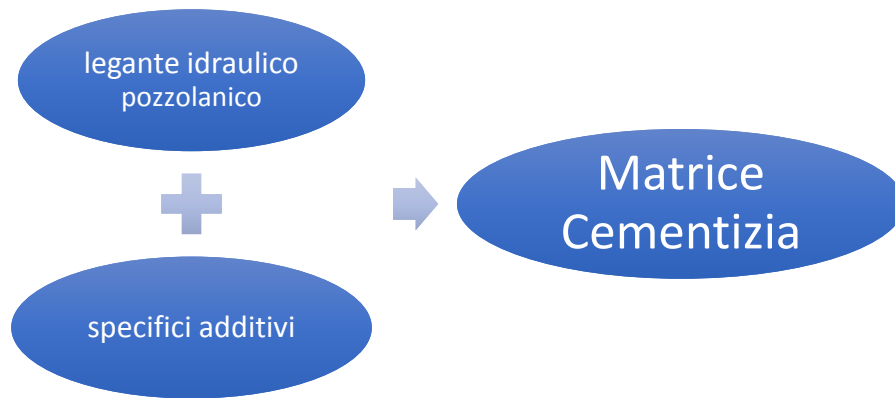
Anche per loro, la temperatura è un parametro essenziale in quanto il calore provoca la fusione con successiva solidificazione per raffreddamento suddividendo i polimeri in:

- *Amorfi*: polimeri che non presentano una definita temperatura di fusione, e passano in maniera graduale dallo stato solido allo stato fluido, attraverso quello viscoso dove vengono lavorati e formati.
- *Semicristallini*: polimeri che presentano una certa temperatura di fusione che definisce il range entro la quale possono essere lavorati e formati.

Per incrementare le prestazioni dei materiali si ricorre all'utilizzo di determinate sostanze chiamate additivi che agiscono su una specifica proprietà modificandola secondo le prestazioni desiderate. In genere si utilizzano anche più additivi contemporaneamente ma che siano compatibili tra loro e soprattutto con i giusti dosaggi, in quanto, un sotto-dosaggio o sovra-dosaggio potrebbe indurre ad un effetto contrario di riduzione delle prestazioni. L'uso di tali sostanze nelle resine conferisce miglioramenti alle proprietà meccaniche e fisiche.

1.4.2.5 Matrice cementizia

I materiali compositi con matrici inorganiche cementizie, noti come GMC Grout Matrix Composites, sono un prodotto introdotto recentemente nel settore dei compositi con fibre, provenienti dalla ricerca tecnologica in ambito edilizio volta a ridurre le limitazioni caratteristiche dei compositi a matrice polimerica. Sono generalmente costituiti da un legante idraulico pozzolanico mescolato con specifici additivi.



La necessità di sviluppare tali prodotti nasce per minimizzare alcuni aspetti caratteristici come l’impatto ambientale pre e post-produzione, la non traspirabilità tra composito e supporto o la vulnerabilità ai fattori ambientali.

In ragione del prodotto finale, vengono utilizzati vari tipi di legante con differenti caratteristiche chimico-fisiche, quali:

- Malte cementizie
- Malte premiscelate con resine sintetiche e/o epossidiche
- Leganti idraulici
- Cementi

1.4.3 Classificazione in base agli “elementi costituenti”

I materiali compositi possono essere classificati anche in base agli elementi che li costituiscono e vengono impiegati secondo le loro caratteristiche.

Nel settore strutturale i più impiegati sono:

FRP Fiber Reinforced Polymers	<ul style="list-style-type: none"> matrice polimerica Fibre di rinforzo in base alle necessità richieste
SRP Steel Reinforced Polymers	<ul style="list-style-type: none"> Matrice polimerica Fibre di rinforzo in acciaio-carbonio
FRG Fiber Reinforced Grout	<ul style="list-style-type: none"> Matrice cementizia Fibre di rinforzo in base alle necessità richieste
SRG Steel Reinforced Grout	<ul style="list-style-type: none"> Matrice cementizia Fibre di rinforzo in acciaio

1.4.3.1 FRP - Fiber Reinforced Polymers

Gli FRP sono dei materiali compositi ad elevate prestazioni meccaniche, costituiti generalmente da una matrice polimerica e da rinforzi in fibre di vario genere ottenuti mediante pultrusione, cioè un processo di impregnazione continua delle fibre con la matrice polimerica.

1.4.3.2 SRP - Steel Reinforced Polymers

Gli SRP sono dei materiali compositi costituiti generalmente da una matrice polimerica e da rinforzi in fibre di acciaio, anch'essi presentano elevate prestazioni meccaniche.

Tenacia ed elevata resistenza al taglio delle fibre in acciaio sono due peculiarità che incidono sui loro impieghi in determinati usi.

1.4.3.3 FRG - Fiber Reinforced Grout

Gli FRG sono dei materiali compositi in cui viene impiegata una malta generalmente cementizia e la fase fibrosa è costituita da fibre di carbonio, vetro o altre al fine di garantirne la piena compatibilità con le strutture da rinforzare.

Le malte possono essere miscelate con resine epossidiche o sintetiche a seconda delle necessità per garantire il mantenimento della traspirabilità del supporto oppure le alte prestazioni meccaniche e di adesione al medesimo supporto.

Negli FRG solitamente la fase fibrosa è costituita da reti bilanciate termosaldate con filamenti di poliestere aventi una maglia minima di 8 mm per garantire il passaggio della malta di impregnazione da una parte all'altra del tessuto.

Nei tessuti FRG invece si hanno fibre inglobate nella matrice che comportano una minore distribuzione di carico rispetto agli FRP e richiede quindi un passo della maglia non troppo ridotto per evitare fenomeni di distacco dal supporto per delaminazione.

I principali vantaggi dell'utilizzo degli FRG sono la maggiore resistenza alle alte temperature e la maggiore traspirabilità del supporto.

1.4.3.4 SRG - Steel Reinforced Grout

Prendendo gli FRG e utilizzando la specifica tipologia di rinforzo in fibre di acciaio, si ottengono materiali compositi denominati SRG.

Tale categoria garantisce un'alta traspirabilità del supporto ed un'elevata resistenza alle alte temperature, e di conseguenza un'elevata resistenza al fuoco ma con uno svantaggio legato alle prestazioni meccaniche, alla distribuzione di carico tra le fibre ed alle prestazioni di adesione al supporto che risultano inferiori di quelle dei compositi a matrice polimerica.

Grazie all'elevata traspirabilità, uno dei punti di forza degli SRG è la permeabilità, caratteristica che garantisce la compatibilità soprattutto per le strutture murarie.

2 RISPOSTA DEI MATERIALI COMPOSITI SOTTO SOLLECITAZIONI

2.1 Binomio fibra-matrice

Le caratteristiche dei compositi sono definite dalle proprietà dei singoli materiali che li costituiscono, nonché dalla loro forma, dimensione, distribuzione ed orientamento.

Generalmente il materiale di rinforzo definisce resistenza e rigidità del composito in funzione dell'orientamento delle fibre corte o lunghe rispetto ai carichi applicati.

Da sottolineare che il comportamento meccanico è in funzione anche dal connubio rinforzo-matrice. Infatti, preso un fascio di fibre senza matrice sottoposto a sollecitazione, è possibile riscontrare che la rottura di una fibra comporta il trasferimento dello sforzo a quelle rimanenti comportando una riduzione della resistenza generale del fascio di fibre.

In fibre annegate in una matrice, invece, la rottura di una fibra non si ripercuote sulla resistenza meccanica in quanto il trasferimento dello sforzo è garantito dall'interfaccia rinforzo-matrice che grazie alla deformazione elastica esercitano sforzi di taglio in grado di ripartire le sollecitazioni sulla fibra danneggiata.

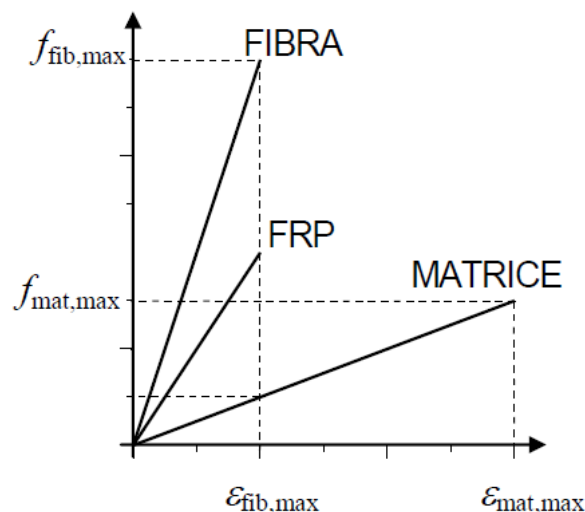


Grafico 2.1 - Grafico sforzo-deformazione

A differenza dei materiali classici impiegati nell'edilizia, i materiali compositi si presentano come un composto continuo non omogeneo ed anisotropo e richiedono un'attenta analisi delle relazioni tra le proprietà meccaniche dei costituenti e quelle del prodotto finale.

2.1.1 Eterogeneità

L'eterogeneità comprende lo studio del comportamento del materiale dal punto di vista microscopico per la determinazione dei moduli elastici finali partendo da quelli dei singoli elementi costituenti e della valutazione della capacità di resistenza in termini di sollecitazione a rottura.

Attraverso lo studio della geometria del composito e della conoscenza delle proprietà dei singoli componenti, si cercano delle leggi di omogeneizzazione che descrivano il comportamento in modo omogeneo. Generalmente viene considerato un volume elementare di composito e, ipotizzando un comportamento isotropo lineare dei due componenti, vengono ricavate leggi di omogeneizzazione sotto l'ipotesi di perfetta aderenza tra fibra e matrice.

Attraverso l'analisi micromeccanica si valuta l'interazione fra le fasi costituenti del composito per determinarne i loro effetti sulle proprietà complessive. Tale analisi presenta delle limitazioni in quanto considera che ci sia perfetta unione tra la fibra e la matrice, ma nel caso non ci fosse, si dovrà tenere conto di uno "sconto" delle proprietà del composito rispetto a quelle teorizzate in partenza.

Si evidenzia inoltre che sollecitando a fatica i compositi, si presentano vari danneggiamenti quali:

- rottura delle fibre
- cricche nella matrice
- cricche nell'interfaccia matrice-fibre

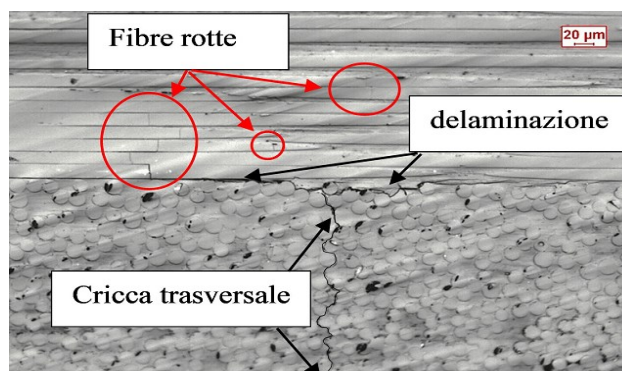


Figura 2.1 - Danneggiamenti interni nei compositi

2.1.2 Anisotropia

Considerando un composito con fibre unidirezionali disposte parallelamente nella matrice, si evidenzia che le capacità resistenziali saranno maggiori nella direzione delle fibre (direzione 1) rispetto alle altre (direzione 2 e 3). Questa è la considerazione che classifica le proprietà meccaniche del materiale composito come anisotrope.

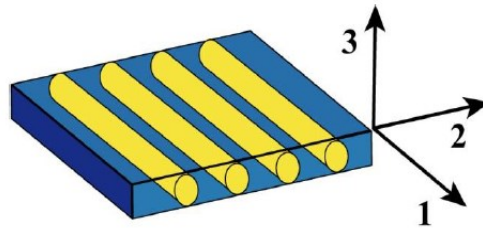


Figura 2.2 - Composito con fibre unidirezionali

Supponendo una omogeneizzazione del materiale e trascurando l'eterogeneità, si analizza il materiale composito come un continuo anisotropo dove gli effetti delle fasi costituenti si riflettono quindi sulle proprietà del composito in base alla direzionalità delle fibre.

Determinate tali condizioni al contorno, si procede con prove di caratterizzazione meccanica nelle diverse direzioni per definire resistenza e modulo elastico, quali:

- Tensile test
- Bending test
- Shear test
- Torsion test
- Biaxial tensile tests
- Fatigue test

2.2 Caratteristiche fisiche dei compositi⁵

Per comprendere le proprietà fisiche di un composito è necessario conoscere alcuni parametri fondamentali che lo descrivono, quali:

Densità delle fibre	
Peso del tessuto per unità di area	
Densità della resina	
Area equivalente e spessore equivalente	
Frazione in peso ed in volume delle fibre	
Percentuale di vuoti	

2.2.1 Densità delle fibre

La densità delle fibre più comuni utilizzate nelle applicazioni strutturali è solitamente compresa negli intervalli riportati di seguito.

TIPO DI FIBRA	DENSITÀ [g/cm ³]
Carbonio	1,76 – 1,90
Vetro E	2,54 – 2,59
Vetro S	2,46 – 2,49
Arammidica (Kevlar)	1,44 – 1,47

Tabella 2.1 - Confronto delle densità tra le fibre

Generalmente i valori delle densità delle fibre sono riportati sulle schede tecniche e qualora fosse necessario determinarli e/o verificarli è possibile fare riferimento alle norme ASTM D 792 e ISO 1183-1.

⁵ Fonte: "Il controllo di accettazione di materiali fibrorinforzati per il rinforzo strutturale" - G. Fava, C. Poggi

2.2.2 Peso del tessuto per unità di area

Per qualsiasi tipologia di tessuto è possibile verificare il peso per unità di area attraverso la pesata diretta di un campione, a patto che quest'ultimo abbia dimensioni circa regolari per poterne determinare l'area.

Quindi, per ottenere il peso per unità di superficie, bisogna dividere la massa del campione di tessuto per la rispettiva superficie misurata.

Nei tessuti unidirezionali, il peso del tessuto p_x [g/m²] può essere determinato come:

$$p_x = \frac{p_t}{A_t} \cdot 10^6$$

dove p_t [g] rappresenta il valore della massa del concio di tessuto e A_t [mm²] rappresenta l'area del concio di tessuto pesato.

Nei tessuti in trama e ordito la valutazione è analoga a quella dei tessuti unidirezionali, ma va ripetuta in funzione della direzionalità considerata.

2.2.3 Densità della resina

La misura della densità della resina viene effettuata su campioni di sola resina a patto che siano privi di bolle e abbiano fatto presa in condizioni di temperatura, pressione e per un tempo simile a quelle adottati per la preparazione del composito.

I valori di densità devono essere ottenuti su base statistica da una serie di lotti di produzione e devono essere rappresentativi del processo di produzione.

2.2.4 Area e spessore equivalente

L'area resistente del tessuto A_{rt} riferita alle direzioni principali è espressa per unità di larghezza del tessuto [mm²/m]:

$$A_{rt} = \frac{T_x \cdot N_f}{10 \cdot \rho_{fib}}$$

dove T_x è il titolo del filato riferito alla direzione presa in considerazione, espresso in Tex [g/km], N_f il numero di filati per unità di larghezza riferiti alla direzione considerata [n°/cm], ρ_{fib} la densità delle fibre [g/cm³].

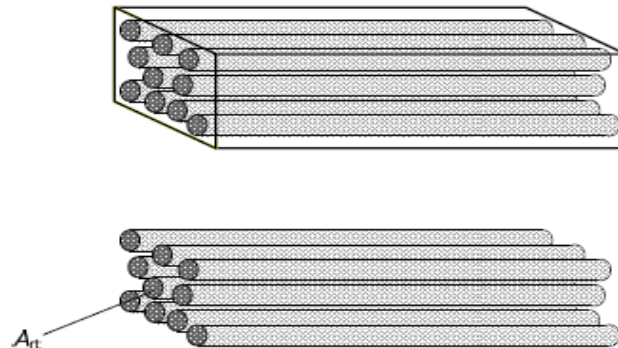


Figura 2.3 - Area resistente in un tessuto unidirezionale

Per tessuti unidirezionali l'area resistente A_{rt} vale:

$$A_{rt} = \frac{p_t}{\rho_{fib}}$$

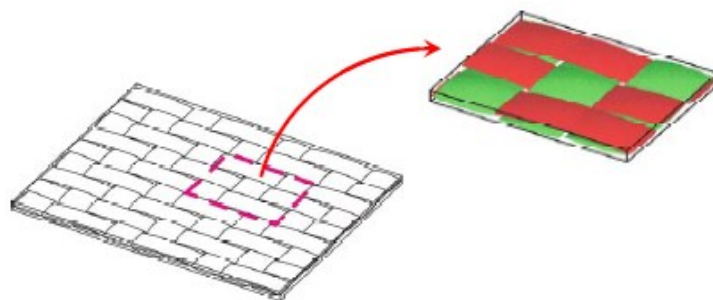


Figura 2.4 - Determinazione dell'area resistente in un tessuto

Per tessuti biassiali costruiti con lo stesso tipo di fibre e che presentano lo stesso numero di filati nelle direzioni di trama ed ordito, dove p_t [g/m²] è la massa del tessuto per unità di area, è possibile ricavare l'area resistente come:

$$A_{rt} = \frac{p_t}{2 \cdot \rho_{fib}}$$

In alternativa è possibile riferire l'area resistente del tessuto allo spessore di una lastra equivalente costituita dalle sole fibre.

Lo spessore equivalente, t_{eq} [mm], è calcolato come:

$$t_{eq} = \frac{A_{rt}}{1000}$$

2.2.5 Frazione in peso ed in volume delle fibre

Le proprietà meccaniche dei materiali compositi sono notevolmente influenzate dal valore della frazione in peso o in volume delle fibre.

La frazione volumetrica delle fibre V_{fib} è pari al rapporto tra il volume delle fibre ed il volume totale del composito. Allo stesso modo, la frazione ponderale delle fibre P_{fib} è data dal rapporto tra il peso delle fibre ed il peso totale del composito.

Note le frazioni in peso di fibra e matrice, P_{fib} e P_m , assegnate le densità della fibra e della matrice, ρ_{fib} e ρ_m , risulta:

$$V_{fib} = \frac{P_{fib}/\rho_{fib}}{P_{fib}/\rho_{fib} + P_m/\rho_m}$$
$$P_{fib} + P_m = 1$$

Nel caso in cui sia nota la frazione volumetrica delle fibre e si voglia ricavare la percentuale in peso è possibile applicare la seguente espressione ricavata nell'ipotesi di un materiale senza presenza di vuoti, si ha:

$$P_{fib} = \frac{\rho_{fib}V_{fib}}{\rho_m + (\rho_{fib} - \rho_m)V_{fib}}$$

2.2.6 Percentuale di vuoti

La percentuale di vuoti, in termini di porosità e/o bolle d'aria in un laminato composito, influisce fortemente sulle caratteristiche meccaniche del prodotto, dove valori elevati di vuoti possono indurre ad avere una bassa resistenza a fatica, penetrazione di acqua, umidità e agenti atmosferici. Il contenuto di vuoti in un laminato rispecchia la qualità del processo di fabbricazione ed è funzione della tecnologia di produzione utilizzata.

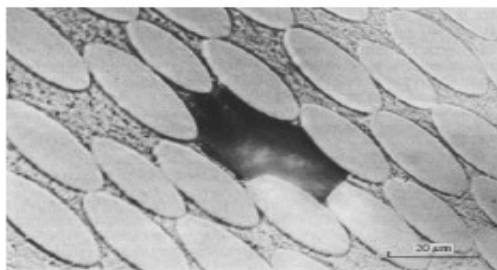


Figura 2.5 - Vuoti all'interno di un composito

Fondamentale è conoscere il contenuto di resina e quantificare la densità teorica del composito in maniera tale da ottenere una valutazione del contenuto di vuoti tramite il confronto con la densità reale. Generalmente i compositi di buona qualità non possono contenere una percentuale di vuoti superiore al 1%.

La densità teorica del composito si determina come:

$$\rho_{ft} = \frac{1}{P_m/\rho_m + P_{fib}/\rho_{fib}}$$

$$P_m + P_{fib} = 1$$

in cui ρ_{fib} e ρ_m rappresentano la densità della fibra e della resina [g/cm³] mentre P_{fib} e P_m sono la frazione in peso della fibra e della resina.

Il contenuto di vuoti V_v viene calcolato come:

$$V_v = \frac{(P_{fth} - \rho_f)}{\rho_{fth}}$$

dove ρ_{fth} è la densità teorica del composito mentre ρ_f è la densità misurata del composito.

Alternativamente il contenuto di vuoti può essere determinato come:

$$V_v = 1 - \rho_{fib} \left(\frac{P_m}{\rho_m} + \frac{P_{fib}}{\rho_{fib}} \right)$$

2.3 Caratteristiche meccaniche dei compositi

Le caratteristiche meccaniche dei materiali compositi utilizzati per il rinforzo non possono essere dedotte semplicemente dalle caratteristiche dei singoli componenti fibre e matrici, ma devono essere determinate e verificate sperimentalmente.

Risultano essere molteplici i fattori dovuti al processo di produzione che influiscono sulle caratteristiche finali del composito e che possono essere determinati e controllati nel caso di produzione industriale, mentre nel caso di tessuti impregnati in situ è opportuno verificare le caratteristiche del prodotto finale per ogni applicazione.



CARATTERISTICHE MECCANICHE DI FILATO, TESSUTO E LAMINATO	
Valori riferiti al filato secco fornito in rotoli	$f_{filato}; E_{filato}$
Valori riferiti al tessuto secco fornito in rotoli	$f_{tess}; E_{tess}$
Valori ottenuti per un laminato riferiti all'area del composito (fibra+resina)	$f_f; E_f$
Valori ottenuti per un laminato riferiti alla sola area delle fibre (t_{eq})	$f_{fib}; E_{fib}$
Valori nominali forniti dal produttore	$f_{fib\ nom}; E_{fib\ nom}$
Valori di progetto per un laminato riferiti alla sola area delle fibre (t_{eq})	$f_{fib,d}; E_{fib,d}$

Tabella 2.2 - Caratteristiche meccaniche di filato, tessuto e laminato

Per quanto riguarda i filati, i tessuti destinati al rinforzo strutturale sono costituiti da fasci di fibre organizzati parallelamente detti unidirezionali, intrecciati ortogonalmente o in diverse direzioni, e quindi denominati multiassiali. Ogni fascio è a sua volta costituito da un insieme di filati.

Il processo di tessitura a cui le fibre vengono sottoposte produce un decadimento della resistenza a causa di vari fattori, quali:

- il danneggiamento delle fibre durante la lavorazione;
- la torsione impressa durante la lavorazione;
- un danneggiamento locale in corrispondenza dell'intersezione tra fibre di trama ed ordito.

Generalmente si può notare che nei tessuti uniassiali i valori di resistenza e modulo elastico del filato non decadono notevolmente in seguito ai processi di tessitura, mentre nel caso della lavorazione di tessuti biassiali le proprietà meccaniche del tessuto possono risultare considerevolmente più basse rispetto a quelle del filato.

Per i tessuti invece, il modulo elastico è simile a quello del filato mentre la resistenza a trazione può risultare inferiore. Conseguentemente risulta ridotto anche il valore della deformazione ultima corrispondente.

Passando ai laminati, i valori delle caratteristiche meccaniche risultano inferiori a quelli delle fibre in quanto il processo di laminazione implica vari fattori riduttivi:

- non perfetto allineamento delle fibre rispetto alla direzione ideale;
- presenza di vuoti interlaminari;
- fenomeni locali di debonding tra fibre e matrice.

2.3.1 Valori di progetto e verifica di accettazione

Il documento CNR-DT200 indica che il valore di calcolo X_d delle proprietà di resistenza e di deformazione di un materiale o di un prodotto utilizzato per il rinforzo, può essere valutato mediante l'espressione:

$$X_d = \eta \frac{X_k}{\gamma_m}$$

Dove η considera problemi speciali di progetto come fattori ambientali, viscosità e fatica, X_k è il valore caratteristico della proprietà presa in considerazione e γ_m è un coefficiente parziale di sicurezza che tiene conto del tipo di applicazione.

Le proprietà a trazione che vengono utilizzate nei calcoli di progetto sono la tensione ultima del composito f_f e la deformazione ultima corrispondente ε_f . Essendo il comportamento dei materiali fibrorinforzati lineare fino a rottura se ne deduce che il modulo di elasticità può essere ricavato dal rapporto tra la tensione ultima e la relativa deformazione e quindi non è influenzato dalla presenza di coefficienti riduttivi e da fattori di conversione ricavando i valori di progetto da quelli caratteristici.

$$f_{fib,d} = \frac{f_{fib,nom}}{1,10} \approx 0,90 \cdot f_{fib,nom}$$

$$\varepsilon_{fib,d} = \frac{\varepsilon_{fib,nom}}{1,10} \approx 0,90 \cdot \varepsilon_{fib,nom}$$

$$E_{fib,d} = E_{fib,nom}$$

Noti i valori f_f ed E_f , del composito, è possibile determinare le quantità riferite alla sola area di fibre mediante le espressioni:

$$f_{fib} = \frac{f_f \cdot A_f}{A_{fib}}$$

$$E_{fib} = \frac{E_f \cdot A_f}{A_{fib}}$$

2.4 La fatica nei compositi⁶

L'applicazione ciclica di carichi ripetuti ad un composito può generare una rottura anche quando la massima sollecitazione risulta inferiore alla resistenza statica del materiale. Di conseguenza, rotture per fatica sono molto frequenti e per questo vengono effettuati diversi studi per comprendere il comportamento a fatica dei compositi evidenziando i fattori che primariamente ne influenzano la durata.

In generale, nei compositi la rottura per fatica è una rottura progressiva che si manifesta con la formazione e propagazione di difetti comprendendo diversi livelli di danneggiamento:



⁶ Fonte: "Progettazione meccanica con materiali non convenzionali" – B. Zuccarello

Il danneggiamento per fatica nei compositi può iniziare molto prima del cedimento e la formazione di cricche per fatica può arrestarsi e non portare alla rottura dell'elemento. È il caso di una cricca originatasi nella matrice di una lamina che può arrestarsi quando incontra la fibra di rinforzo oppure quando incontra l'interfaccia con la lamina adiacente avente diverso orientamento.

Per evitare ogni possibile danneggiamento del materiale, nella progettazione a fatica si fa in modo che il carico applicato sia sempre inferiore a quello che produce un danneggiamento del materiale abbracciando l'idea di un approccio quindi conservativo.

Il danneggiamento è correlato alla diminuzione della rigidità ed il cedimento al raggiungimento di un valore minimo di rigidità consentito, ed in linea generale, è noto che il danneggiamento coincide con l'aumento delle deformazioni sotto carico, ed il cedimento corrisponde al raggiungimento di una certa deformazione limite.

Il fenomeno della fatica dei compositi è comunque un argomento complesso ed ancora non completamente compreso. Per questo, contrariamente a quanto accade per i materiali tradizionali, per i compositi non sono ancora ben affermate relazioni attendibili che consentono la previsione della resistenza e/o della vita a fatica sotto una determinata sollecitazione applicata.

2.4.1 Meccanismi di propagazione dei difetti

Il danneggiamento per fatica inizia in genere con la formazione di cricche nelle lamine in cui la direzione delle fibre forma l'angolo più grande con la direzione di applicazione del carico e interessano l'intera sezione resistente della lamina formandosi, in alcuni casi, anche dopo un breve periodo di esercizio sotto carichi inferiori al 25% del carico di rottura.

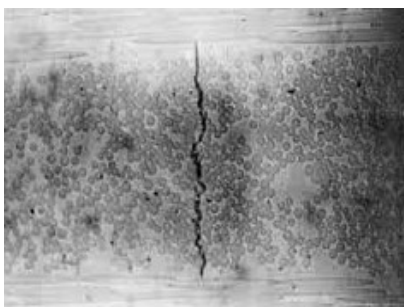


Figura 2.6 - Cricca singola

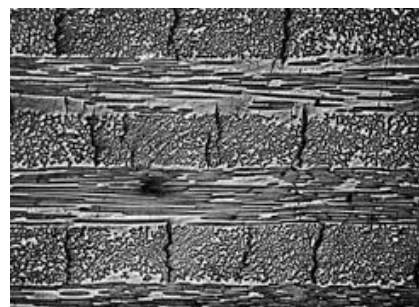


Figura 2.7 - Cricche multiple

Tali difetti iniziali possono interessare facilmente tutte le lamine ortogonali e solitamente non si propagano sulle lamine adiacenti se queste sono con fibre sufficientemente allineate col carico.

Per livelli di carico al di sopra del 25-30% circa della resistenza statica, al crescere del numero di cicli di fatica i fenomeni di concentrazione di tensione provocati dalle cricche in prossimità dell'interfaccia tra le lamine finiscono con il produrre cricche di delaminazione disposte parallelamente all'interfaccia.

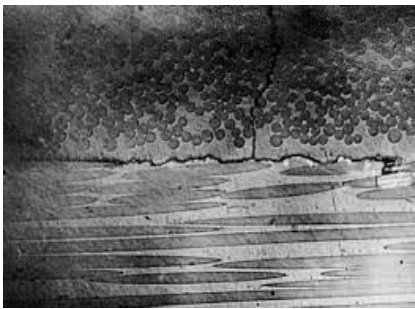


Figura 2.8 - Formazione di cricche

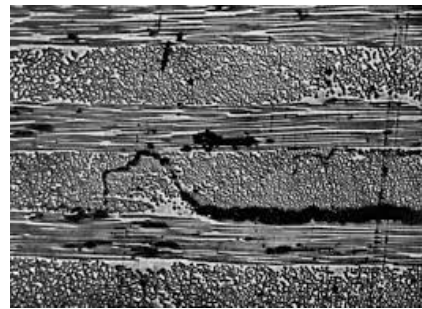


Figura 2.9 - Propagazione di cricche

La formazione e la propagazione di tali cricche possono indurre fenomeni di *delaminazione* crescente coi cicli di applicazione del carico e può portare ad una completa separazione delle lamine trasformando il composito in un insieme di lamine indipendenti, con una notevole riduzione della rigidità complessiva del materiale. In queste condizioni può facilmente avvenire la rottura della lamina più debole o più caricata.

In alcuni casi, dalla concentrazione di tensione prodotta dalla rottura di una fibra, le cricche di fatica possono presentarsi anche nelle lamine con fibre parallele al carico, propagandosi lungo l'interfaccia sotto sollecitazione di taglio.

Quando invece la cricca si origina nella matrice avvicinandosi alla fibra, può produrre *debonding* attraverso la concentrazione di tensione all'apice della cricca che avvolge la zona di interfaccia. Tale fenomeno si riscontra in compositi con bassa adesione fibra-matrice.

Se invece tale adesione è elevata, la cricca può facilmente aggirare la fibra e continuare a propagarsi.

Infine, in presenza di fibre poco resistenti a fatica la cricca può interessare direttamente la fibra stessa e, nello specifico, per fibre duttili si può propagare in modo stabile all'interno

di essa mentre in presenza di fibre fragili può provocare una rottura di tipo fragile della fibra stessa.

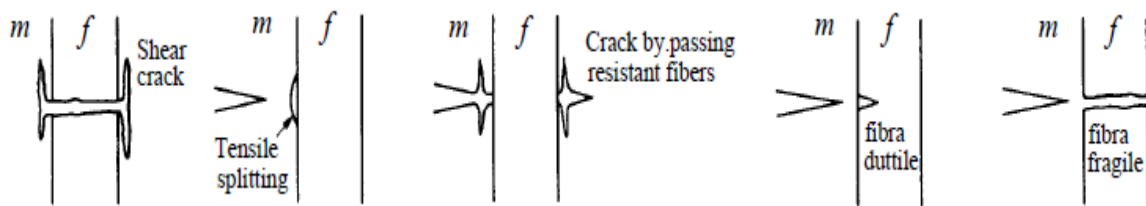


Figura 2.10 - Tipologie di formazione e propagazione di cricche

2.4.2 Determinazione del danneggiamento a fatica

Lo studio del comportamento a fatica dei materiali compositi necessita l'uso di appropriate tecniche sperimentali che consentano il monitoraggio del danneggiamento subito dal materiale a seguito della formazione e propagazione di cricche e difetti di vario tipo.

Uno dei metodi più attendibili di analisi del danneggiamento a fatica è l'analisi microscopica di sezioni trasversali mediante metallografia che consente di determinare l'entità del danneggiamento sulla base del numero di cricche per unità di superficie. Tale metodo risulta però distruttivo e quindi per monitorare il processo di danneggiamento nel tempo occorre disporre di un elevato numero di provini a perdere. Per questo sono stati messi a punto dei metodi di indagine non distruttiva come gli ultrasuoni, la termografia e i raggi X.

Attraverso gli ultrasuoni è possibile rilevare la presenza di fessurazioni interne e misurarne la loro estensione.

Anche l'indagine termografica, che viene eseguita mediante la misura della distribuzione di temperatura durante l'applicazione di una sollecitazione di fatica, permette di rilevare l'entità del danneggiamento, osservando che l'aumento della temperatura è legato al danneggiamento, riscontrando una maggiore densità dei difetti nelle zone più "calde".

Infine, un valido metodo di analisi del danneggiamento è rappresentato dalla misura della rigidità, associando direttamente il danneggiamento D alla variazione relativa di rigidità del materiale, assumendo:

$$D = \frac{E_{iniz} - E}{E_{iniz}}$$

Il valore corrente della rigidezza viene ricavato dalla diagonale del ciclo di isteresi del materiale.

Nel seguente grafico viene mostrato l'andamento del numero relativo di cricche, del modulo di Young e della resistenza a trazione residua di un laminato in fibre di vetro-resina epossidica al variare del numero di cicli di applicazione del carico di fatica.

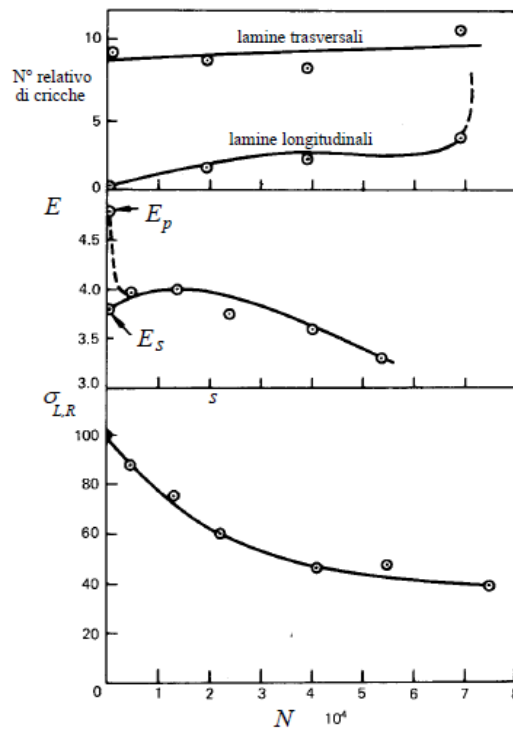


Grafico 2.2 - Andamenti di alcuni parametri al variare del n° di cicli

Si evince che nelle lamine ortogonali il numero di cricche per unità di superficie cresce in modo lineare con il numero di cicli mentre i difetti nelle lamine longitudinali risultano crescenti in un primo momento, attraversano un processo di stabilizzazione, per poi aumentare velocemente prima della rottura.

Per quanto concerne il modulo di Young del materiale, si evidenzia una forte diminuzione iniziale. Osservando con più attenzione, in un certo intervallo, si nota che tale modulo risulta superiore al modulo (teorico) secondario per poi diventare inferiore a questo dopo molteplici cicli di fatica.

Per quanto riguarda la resistenza residua si osserva un andamento decrescente fino a poco prima della rottura in cui si assiste ad una rapida evoluzione del danneggiamento che porta ad un conseguente abbassamento della resistenza residua.

Un parametro significativo del danneggiamento a fatica è la densità di difetti presenti che viene indicata dal passo medio p delle cricche, valutato come la distanza media relativa tra due cricche successive in una lamina disposta in direzione ortogonale al carico ciclico applicato.

Esiste inoltre una relazione lineare tra la diminuzione relativa del modulo di Young $\Delta E/E$ ed il rapporto p/t tra il passo p delle cricche e lo spessore t della lamina.

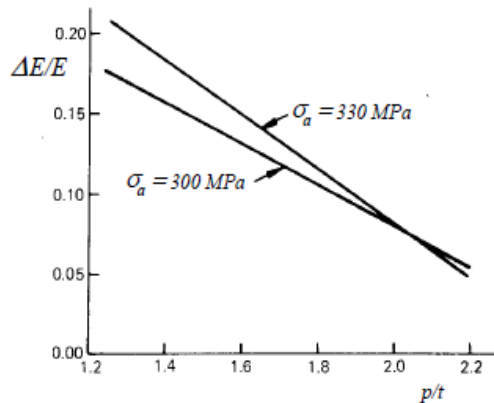


Grafico 2.3 - Legame tra variazione di rigidità e rapporto p/t

2.4.3 Parametri che influenzano la resistenza a fatica

La resistenza a fatica dei materiali compositi dipende da vari fattori legati alla natura e alla struttura del materiale nonché alle variabili condizioni di sollecitazione ed ambientali.

Fissate le caratteristiche delle fibre, la resistenza a fatica di un composito dipende essenzialmente da:

- materiale della matrice
- orientamento delle fibre
- percentuale in volume di fibre
- adesione fibra-matrice
- tipologia di sollecitazione
- tensione media
- frequenza di applicazione del carico
- condizioni ambientali
- effetti di intaglio

Per quanto riguarda l'influenza del materiale della matrice si evince che la migliore resistenza a fatica si ottiene con materiali che presentano intrinsecamente una elevata resistenza a fatica e una buona adesione fibra matrice. Attraverso studi sperimentali condotti su compositi con fibre di vetro (E), è stato riscontrato che la più alta resistenza a fatica si ha con una matrice epossidica.

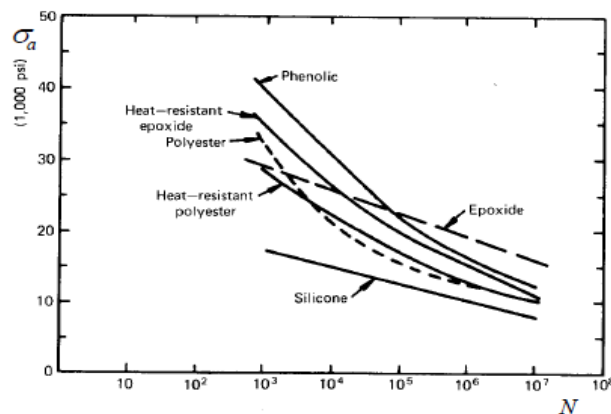


Grafico 2.4 - Influenza del materiale della matrice sulla resistenza a fatica

Dopo molteplici cicli, si nota che l'ottima resistenza a fatica ottenuta con la resina epossidica è dovuta alla intrinseca durezza e resistenza al deterioramento della resina epossidica nonché al basso ritiro. Le tensioni residue da ritiro facilitano l'innescò della frattura e quindi danno luogo a significative diminuzioni della resistenza a fatica del composito.

2.4.3.1 Orientamento delle fibre

Valutare l'influenza dell'orientamento delle fibre sulla resistenza a fatica di un composito non è un'operazione semplice. Nonostante la massima resistenza statica si ha nella direzione delle fibre, la resistenza a fatica non raggiunge il massimo per compositi con lamine tutte con fibre allineate con il carico. In queste condizioni infatti si verificano fenomeni di cedimento causati dalla bassa resistenza del laminato in direzione trasversale: si formano facilmente fessurazioni in direzione parallela alle fibre che finiscono con il danneggiare irreversibilmente il materiale.

Migliori risultati si ottengono invece disponendo alcune lamine a 90° in modo da evitare tali fenomeni di danneggiamento precoce.

2.4.3.2 Percentuale di fibre

Nei materiali compositi la resistenza a fatica aumenta con l'aumentare della percentuale di fibre presenti, cioè, contrariamente a quanto succede nei materiali tradizionali, la resistenza a fatica aumenta con l'aumentare della resistenza statica.

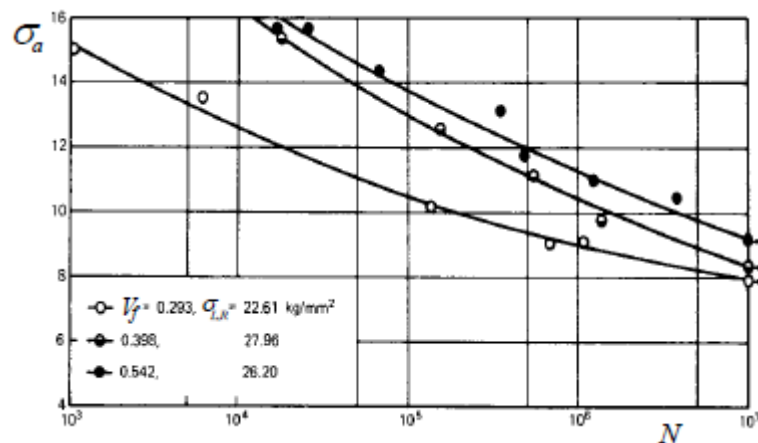


Grafico 2.5 - Influenza della percentuale di fibre sulla resistenza a fatica assiale

2.4.3.3 Adesione fibra-matrice

La resistenza a fatica di un composito può essere influenzata dalla qualità dell'adesione fibra-matrice. Vari studi condotti, considerando diversi trattamenti superficiali della fibra

finalizzati ad ottenere miglioramenti dell'adesione, hanno confermato l'influenza di questo parametro sulla vita a fatica.

Bisogna tenere in considerazione anche le condizioni ambientali in cui si verifica la sollecitazione di fatica. Ciò è risultato fondamentale osservando che compositi rinforzati con fibre di vetro senza alcun trattamento superficiale esibiscono in ambiente asciutto un comportamento a fatica migliore di quello di fibre trattate. Queste ultime però subiscono una minore riduzione della resistenza in ambiente umido. Quindi si può definire che il trattamento superficiale delle fibre è efficace solo in presenza di ambienti umidi.

2.4.3.4 Tipo di sollecitazione

La resistenza a fatica di un composito è strettamente legata al tipo di sollecitazione agente.

Si può notare che in alcuni materiali compositi, come fibra di vetro in resina epossidica, il rapporto di fatica, cioè il rapporto tra resistenza a fatica e la resistenza statica, per sollecitazione di taglio è superiore a quello di trazione.

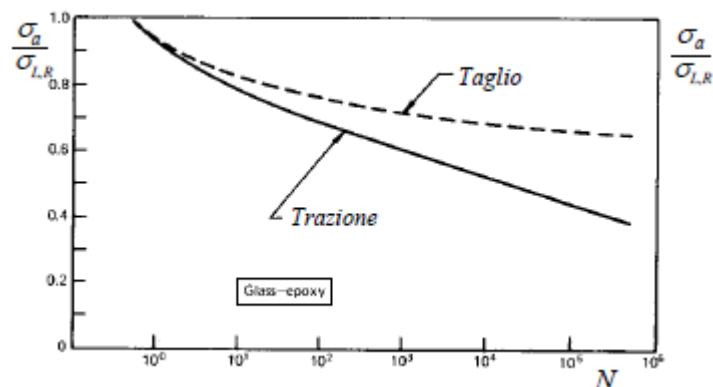


Grafico 2.6 - Influenza del tipo di sollecitazione in compositi in fibra di vetro

Non è possibile generalizzare tale osservazione per tutte le tipologie di compositi, ma bisogna valutare caso per caso in quanto i risultati ottenuti da un materiale sono diversi da un altro in funzione delle sue proprietà peculiari, dell'interfaccia, ecc.

In generale, nei materiali tradizionali il danneggiamento è progressivo e segue una legge di tipo esponenziale, nei compositi invece il danneggiamento subito durante la vita è sempre progressivo ma caratterizzato da vari momenti e velocità.

2.4.3.5 Tensione media

Al crescere della tensione media la tensione alternata cui corrisponde una vita a fatica prefissata decresce sempre e tende a zero quando la tensione media tende alla tensione di rottura del materiale.

L'influenza della tensione media viene rilevata eseguendo delle curve di fatica a tensione media costante. A temperatura ambiente ed in presenza di cicli trazione-trazione i risultati sperimentali mostrano la validità della legge di Goodman-Boller, cioè:

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_l} + \frac{\sigma_m}{\sigma_R} = 1$$

Tale legge è valida tanto per la resistenza a vita infinita che quella a termine. La tensione limite σ_l non rappresenta il limite di fatica ma la resistenza a fatica a termine.

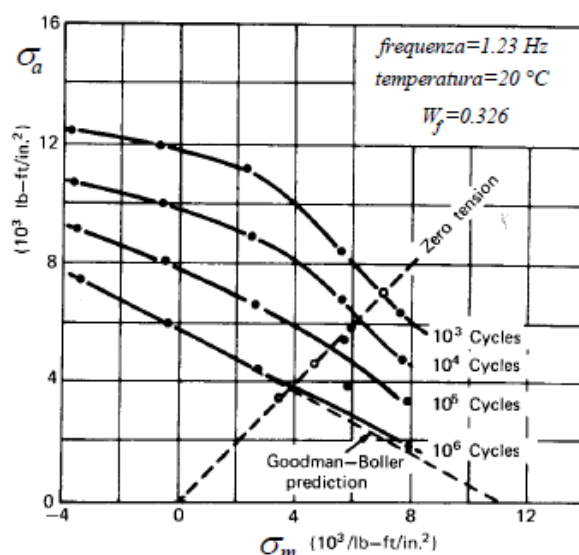


Grafico 2.7 - Influenza della tensione media sulla resistenza a fatica di composito in fibra di vetro

La validità della legge di Goodman-Boller non è però generale. Come si può vedere nei compositi in fibra di carbonio la presenza di tensioni medie negative determina una diminuzione della resistenza a fatica soprattutto in presenza di fenomeni di concentrazione delle tensioni. La presenza di una componente media di compressione dà luogo in tali materiali ad un progressivo danneggiamento della matrice con conseguenti fenomeni di *buckling* misti a *delaminazione* e *splitting* delle fibre.

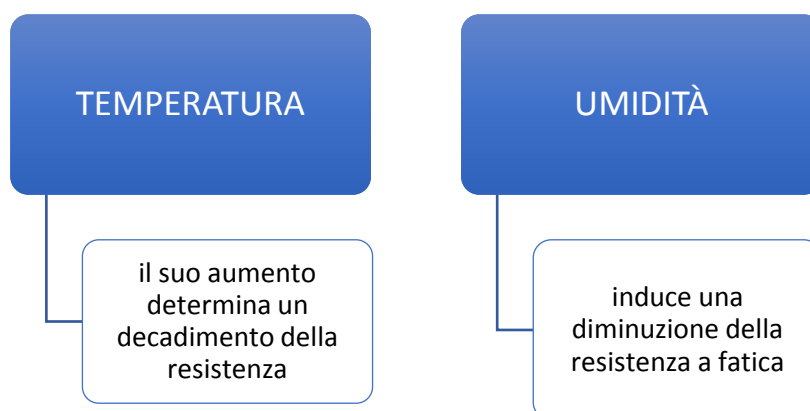
In tutti questi casi per una attendibile valutazione della resistenza e/o della vita a fatica del componente in composito è necessario disporre di dati sperimentali da valutare.

2.4.3.6 Frequenza di applicazione del carico

Un aumento della frequenza di applicazione del carico produce nei compositi un aumento della temperatura ed una conseguente diminuzione della vita a fatica. Generalmente gli effetti della frequenza di applicazione del carico sono modesti, specie per compositi rinforzati con fibre di vetro. Tale supposizione si riscontra con il fatto che la resistenza a fatica è correlata alla resistenza delle fibre che risulta essere poco sensibile a innalzamenti di temperatura.

2.4.3.7 Condizioni ambientali

I fattori ambientali che possono influenzare la vita a fatica di un materiale composito sono molteplici, due risultano fondamentali:



In bibliografia ci sono pochi dati quantitativi sull'influenza delle condizioni ambientali sulla resistenza a fatica e lo studio degli effetti dei parametri ambientali sui compositi è ancora all'inizio.

2.4.3.8 Concentrazione delle tensioni

Per molti compositi gli effetti dei fenomeni di concentrazione delle tensioni sulla resistenza a fatica sono opposti a quelli riscontrati nei materiali tradizionali.

Si osserva che in un materiale metallico la presenza di un intaglio produce in genere limitati effetti sulla resistenza statica ma significative diminuzioni della resistenza a fatica.

Nei compositi invece la presenza di intagli riduce in modo significativo la resistenza statica e leggermente anche quella a fatica. Tale considerazione è associata ai fenomeni di danneggiamento che un carico variabile induce nel materiale che si trova nella zona di concentrazione delle tensioni.

Il suddetto danneggiamento produce un rilassamento delle tensioni e quindi un incremento della resistenza statica residua dell'elemento. Solo dopo un certo numero di cicli la resistenza statica dell'elemento può raggiungere valori prossimi a quelli di un elemento privo di intaglio.

2.4.4 Stima della vita a fatica

Per i compositi non si hanno attendibili relazioni che possono essere utilizzate in sede di progetto per la stima della vita a fatica di un componente.

Vista la grande quantità di compositi realizzabili, in termini di materiali di fibra, matrice, di orientamento, numero di lamine e quant'altro, non è semplice avere a disposizione i dati di fatica del composito che si vuole utilizzare.

Per ottenere una accurata conoscenza del composito è necessario procedere quindi ad una caratterizzazione a fatica in condizioni simili a quelle effettive di esercizio.

In bibliografia sono presenti varie relazioni empiriche per mettere in relazione vita a fatica con carico e caratteristiche della sollecitazione, nella quale sono presenti delle costanti che intervengono di non facile correlazione con le altre caratteristiche meccaniche del composito come la resistenza statica e la deformazione a rottura.

Si può riscontrare che nella fatica a termine il numero di cicli è legato alla sollecitazione ed alle caratteristiche del materiale dalla seguente relazione:

$$\frac{\Delta S}{\sigma_R} = m \log N + b$$

dove m e b sono due costanti che valgono rispettivamente 0,1 ed 1.

Suddetti parametri però non possono essere applicati a qualunque materiale in quanto i valori effettivi possono subire delle variazioni relative rendendo necessaria un'indagine sperimentale per ottenere delle relazioni empiriche da poter utilizzare.

2.4.5 Compositi ad elevato modulo

Il comportamento a fatica di compositi con un elevato modulo Young, come i compositi in fibra di carbonio, boro e Kevlar, risulta diverso dai compositi in fibre di vetro.

Sperimentalmente si rileva che la resistenza a fatica trasversale di tali materiali è confrontabile con quella dei compositi con fibra di vetro, ma la resistenza a fatica longitudinale risulta più elevata grazie alla grande resistenza di tali materiali agli agenti ambientali e soprattutto alla bassa deformazione a rottura che assicura anche basse deformazioni della matrice durante la sollecitazione di fatica.

L'elevata anisotropia delle fibre di carbonio dà luogo inoltre ad un singolare comportamento a fatica dei compositi dove, considerando un provino unidirezionale in fibra di carbonio, si osserva che la resistenza a fatica di tali compositi risulta indipendente dal numero di cicli di applicazione del carico, almeno quando questi sono compresi in un range che va da 1000 a 10 milioni dove la resistenza a fatica è molto prossima alla resistenza statica rimanendo pressoché invariata fino a temperature di 350° F.

Per laminati in fibra di carbonio, le curve di fatica risultano leggermente inclinate e lievemente influenzate dalla temperatura di prova.

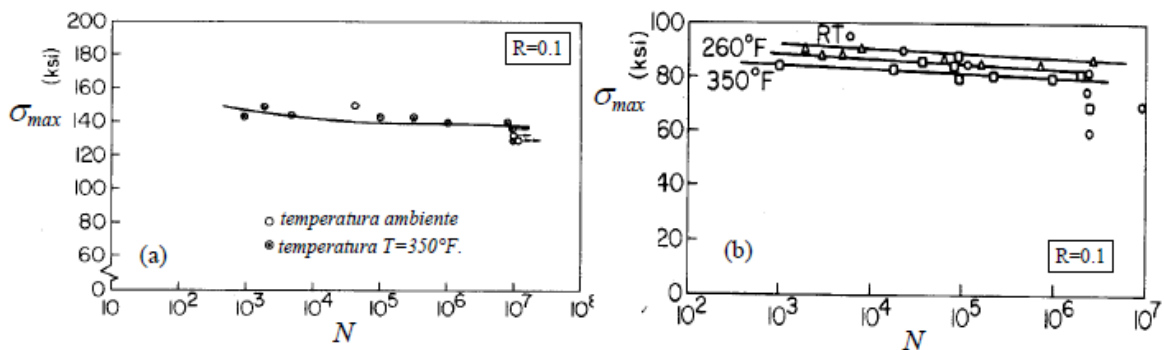


Grafico 2.8 - Curve di fatica di lamina unidirezionale e laminato in fibra di boro-resina epossidica

La resistenza a fatica nei compositi ad elevato modulo di Young subisce importanti variazioni in base al tipo di sollecitazione che sia di trazione, compressione e di taglio; generalmente quella a compressione risulta più bassa rispetto a quella di trazione, mentre in flessione alternata la resistenza a fatica corrisponde alla resistenza a compressione.

Inoltre, i compositi unidirezionali in fibre di boro presentano un comportamento a fatica dove per sollecitazione alternata simmetrica le curve di fatica sono piatte almeno fino ad un numero molto elevato di cicli (10 milioni) ed a temperature fino a 350° F.

Le curve assumono invece un andamento decrescente per rapporti di carico $R \neq -1$ e per laminati di vario tipo.

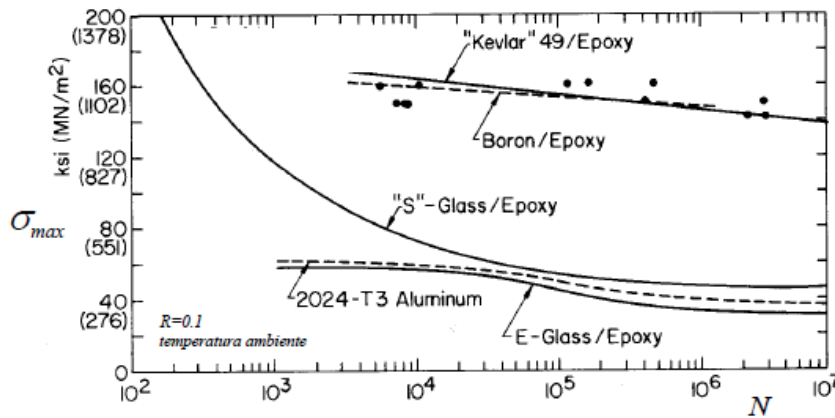


Grafico 2.9 - Curve di fatica di varie lamine composite unidirezionali

3 PROVE SPERIMENTALI

3.1 Materiale di prova e sperimentazione preliminare

Il materiale oggetto della sperimentazione è un particolare composito in GFRP, per esteso Glass Fiber Reinforced Polymer, realizzato in resina sintetica con fibre di vetro di natura isotropa.

A seconda della tipologia di fibre di rinforzo in vetro impiegate, i GFRP presentano tali proprietà:

Tipologia di fibra	Densità [g/cm ³]	Resistenza a trazione [MPa]	Modulo elastico [GPa]	Estensione alla rottura [%]	Coefficiente di Poisson	Dilatazione termica [10 ⁻⁶ /°C]
E-Glass	2,5	3450	72,4	2,4	0,31 - 0,33	5,0
S-Glass	2,5	4580	85,5	3,3	0,21 - 0,23	2,9
C-Glass	2,5	3300	69	2,3	0,39 - 0,41	n/A

Tabella 3.1 - Proprietà delle fibre dei GFRP

L'elevata resistenza alla trazione, alla compressione, alla flessione, alle alte temperature e agli agenti chimici, nonché un costo contenuto rispetto agli altri compositi, fanno dei GFRP un materiale molto utilizzato nell'industria edilizia.

I dati riportati in seguito sono ottenuti come risultato di prove sperimentali condotte su diversi provini in GFRP divisi per lotto: LOT1, LOT2 e LOT3.

Ad ogni lotto corrisponderà una sotto numerazione che identificherà univocamente il provino analizzato.

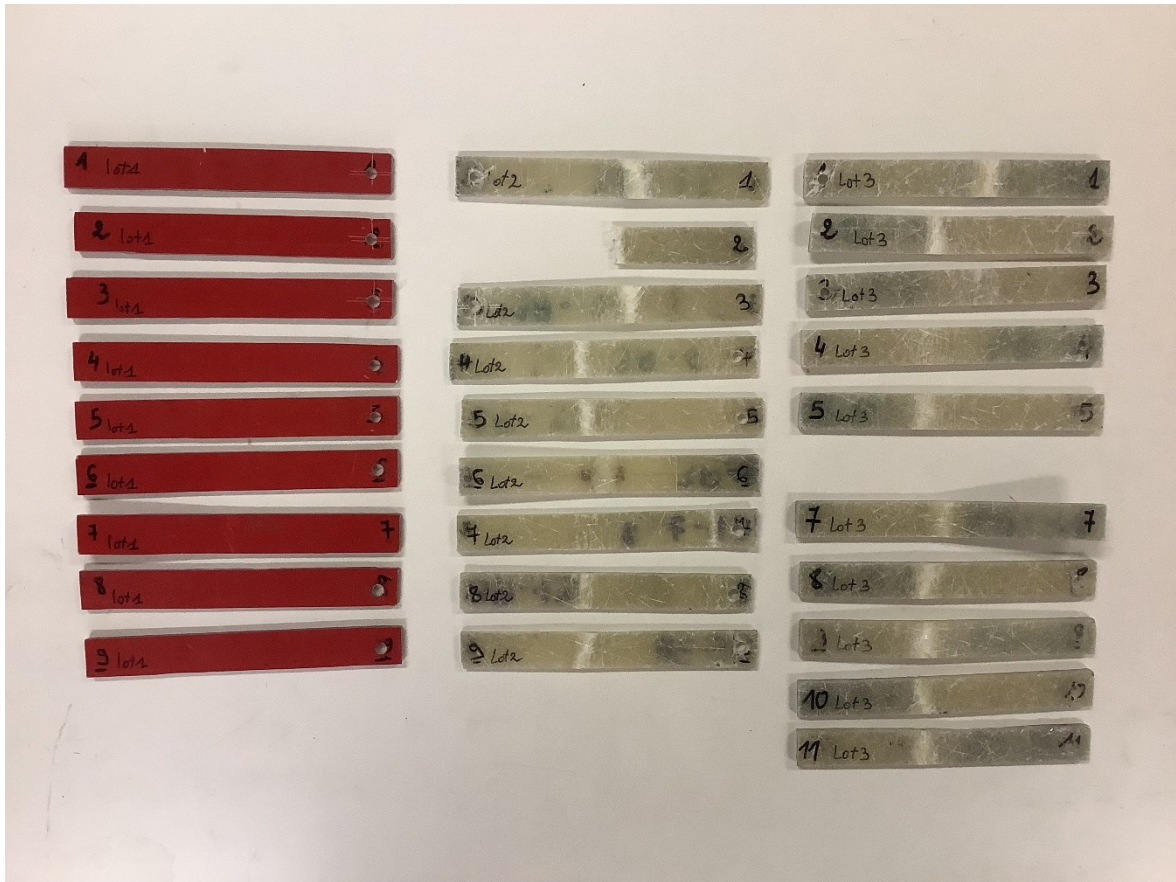


Figura 3.1 - Elenco provini testati

Nella sperimentazione oggetto del lavoro di tesi sono stati testati un totale di 29 provini:

- LOT 1: 9 provini
- LOT 2: 9 provini
- LOT 3: 11 provini

Si riportano in forma tabellare le misure caratteristiche di tutti i provini testati, quali:

- Larghezza [mm];
- Base [mm];
- altezza [mm];
- la tipologia di prova.

Provino n°	Lunghezza [mm]	Base [mm]	Altezza [mm]	Tipologia prova
LOT 1-1	121,10	15,10	3,45	rottura
LOT 1-2	117,30	14,40	3,60	ciclica
LOT 1-3	121,35	15,36	3,61	ciclica
LOT 1-4	121,01	14,88	3,42	ciclica
LOT 1-5	121,05	14,63	3,31	ciclica
LOT 1-6	121,04	15,14	3,46	ciclica
LOT 1-7	120,66	15,01	3,50	tre punti
LOT 1-8	121,45	15,08	3,48	ciclica
LOT 1-9	121,19	14,96	3,77	ciclica

Tabella 3.2 - Caratteristiche dimensionali LOT 1

Provino n°	Lunghezza [mm]	Base [mm]	Altezza [mm]	Tipologia prova
LOT 2-1	121,00	14,56	3,50	rottura
LOT 2-2	118,10	14,65	3,19	ciclica
LOT 2-3	118,48	14,23	3,20	ciclica
LOT 2-4	119,95	14,47	2,97	ciclica
LOT 2-5	118,27	14,14	3,44	ciclica
LOT 2-6	118,02	14,62	3,72	tre punti
LOT 2-7	118,89	14,31	3,18	ciclica
LOT 2-8	115,92	14,51	2,85	ciclica
LOT 2-9	118,49	14,29	3,43	ciclica

Tabella 3.3 - Caratteristiche dimensionali LOT 2

Provino n°	Lunghezza [mm]	Base [mm]	Altezza [mm]	Tipologia prova
LOT 3-1	118,50	14,19	4,51	rottura
LOT 3-2	118,04	14,50	3,70	ciclica
LOT 3-3	116,47	14,27	4,70	ciclica
LOT 3-4	118,42	14,50	4,69	ciclica
LOT 3-5	119,38	14,40	4,48	ciclica
LOT 3-6	118,24	14,44	4,69	tre punti
LOT 3-7	117,54	13,98	4,78	tre punti
LOT 3-8	118,21	13,86	4,10	ciclica
LOT 3-9	118,18	14,39	4,44	rottura
LOT 3-10	118,29	13,54	3,45	ciclica
LOT 3-11	118,78	14,03	4,69	ciclica

Tabella 3.4 - Caratteristiche dimensionali LOT 3

La strumentazione utilizzata per eseguire le prove preliminari su tre punti, per ottenere i dati sperimentali del carico di rottura e del modulo elastico, si compone di una pressa a vite ad azionamento manuale, di un trasduttore in spostamento utilizzato per misurare l'abbassamento in mezzeria del provino e di un estensimetro in grado di rilevare le deformazioni a cui è soggetto il provino sollecitato.



Figura 3.2 - Postazione di prova

Per una corretta esecuzione della prova al fine di ottenere risultati attendibili, particolare attenzione è stata fatta nell'installare l'estensimetro esattamente al centro del provino e misurare le distanze per i due punti di appoggi agli estremi.

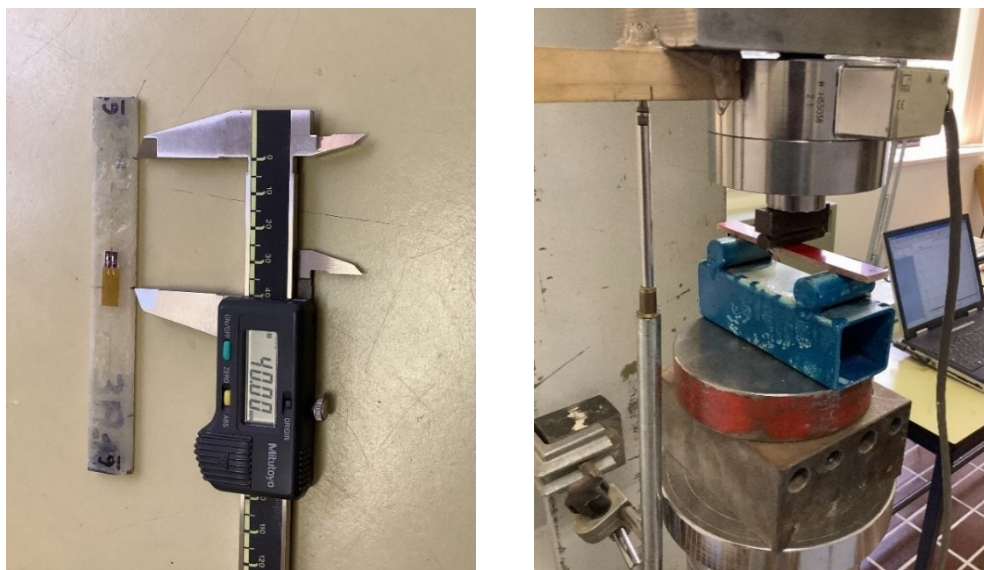


Figura 3.3 - Dettagli set-up di prova

Per eseguire la prova è stato preparato anche un provino facente funzione di compensatore che, essendo dello stesso materiale testato, fosse in grado di scorporare dai risultati di output le variazioni termiche presenti al momento della sperimentazione.

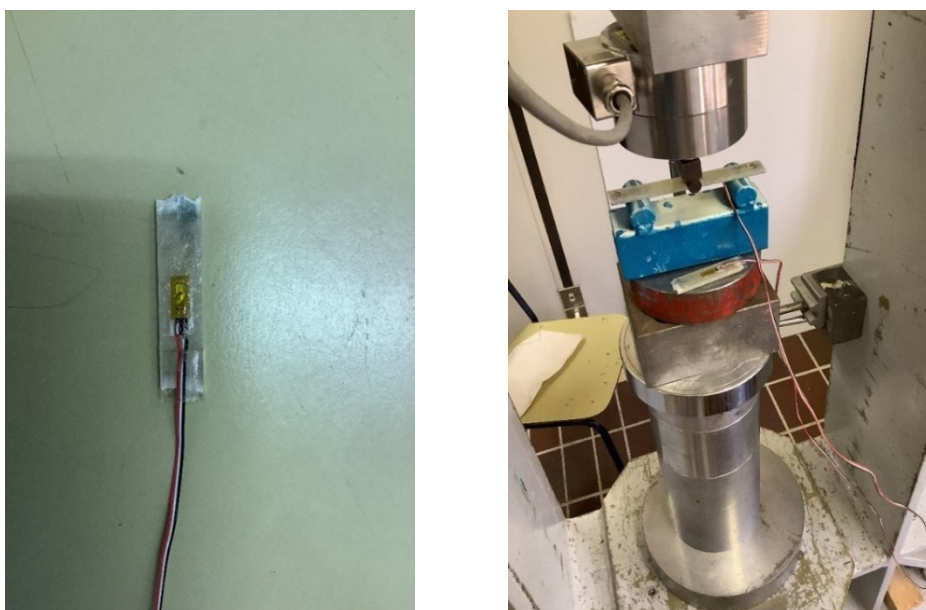


Figura 3.4 - Dettaglio del compensatore

Tutta la strumentazione elencata è stata connessa allo *SPIDER 8*, dispositivo elettronico in grado di relazionare lo sforzo applicato al provino sia al relativo abbassamento e sia alla relativa deformazione subita mediante grafici Load-Displacement e Load-Deformation.

Eseguendo quindi la prova a flessione su tre punti con carico centrato sono stati ottenuti i grafici a rottura e della deformazione registrata sotto sforzo delle tre tipologie di provini dalla quale sono stati ottenuti il modulo elastico e la tensione ultima a trazione.

- Test sul provino LOT1-7

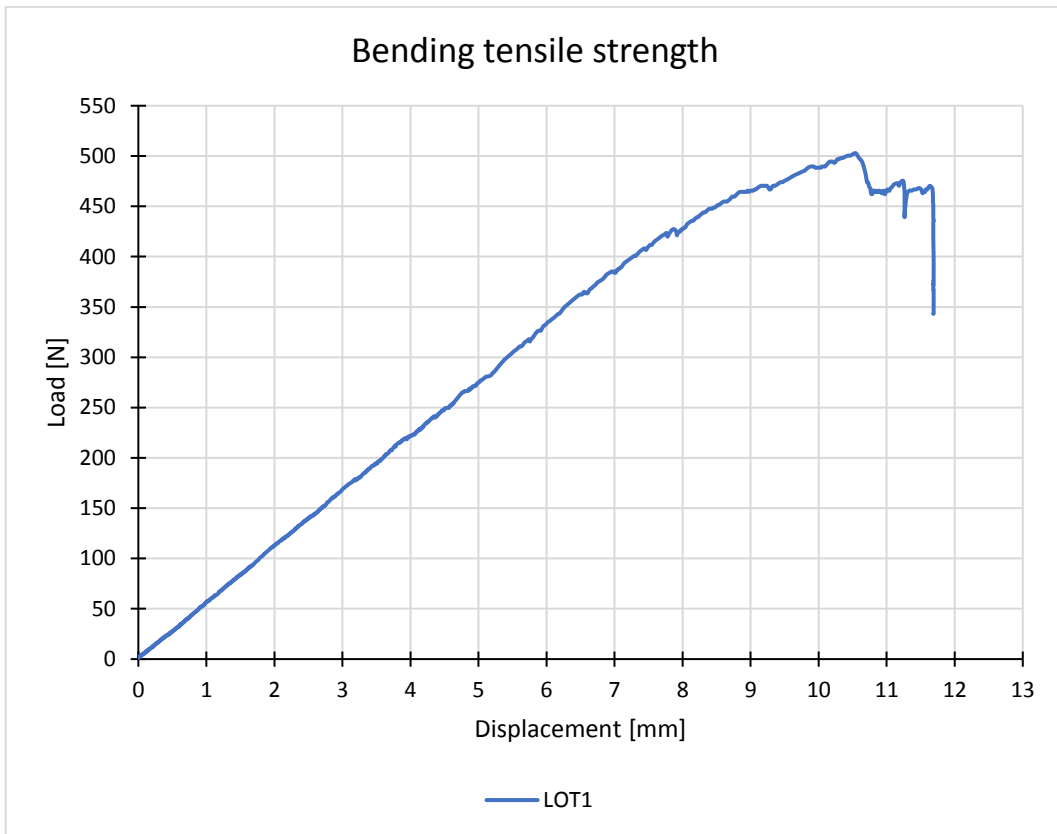


Grafico 3.1 - Curva di rottura LOT1 mediante prova su 3 punti

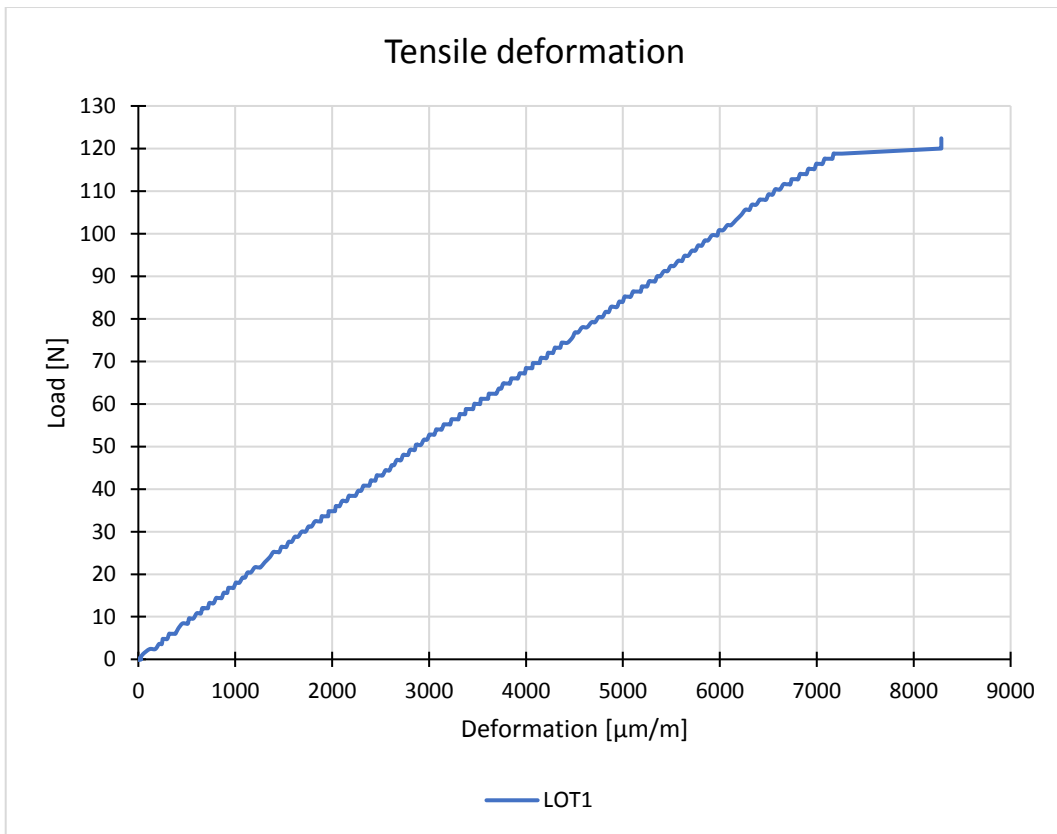


Grafico 3.2 – Diagramma carico-deformazione del LOT1

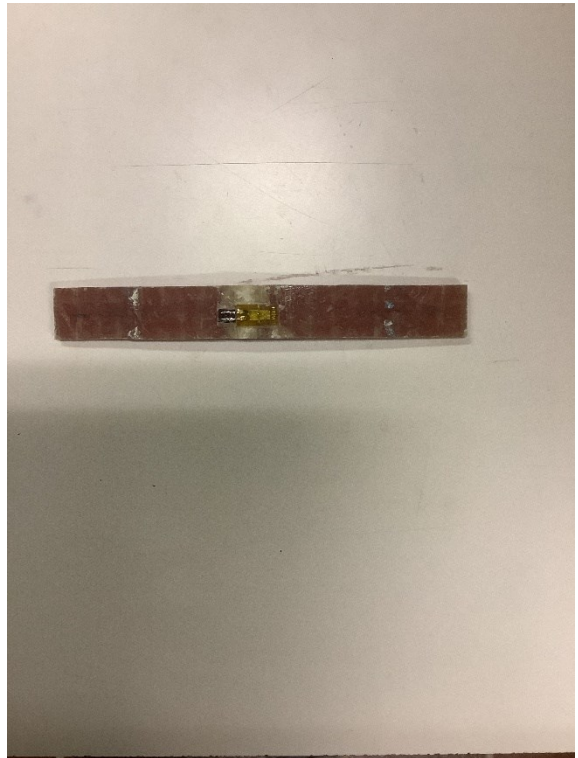
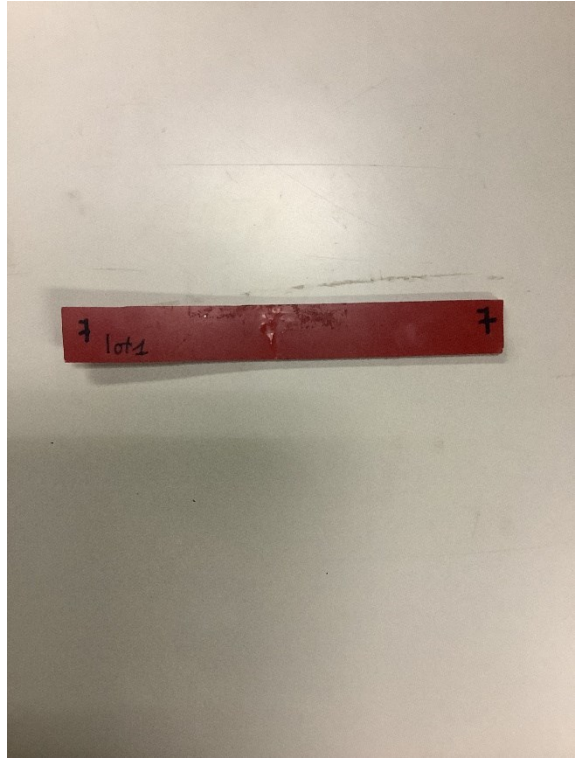


Figura 3.5 - Deformazione provino LOT1-7

- Test sul provino LOT2-6

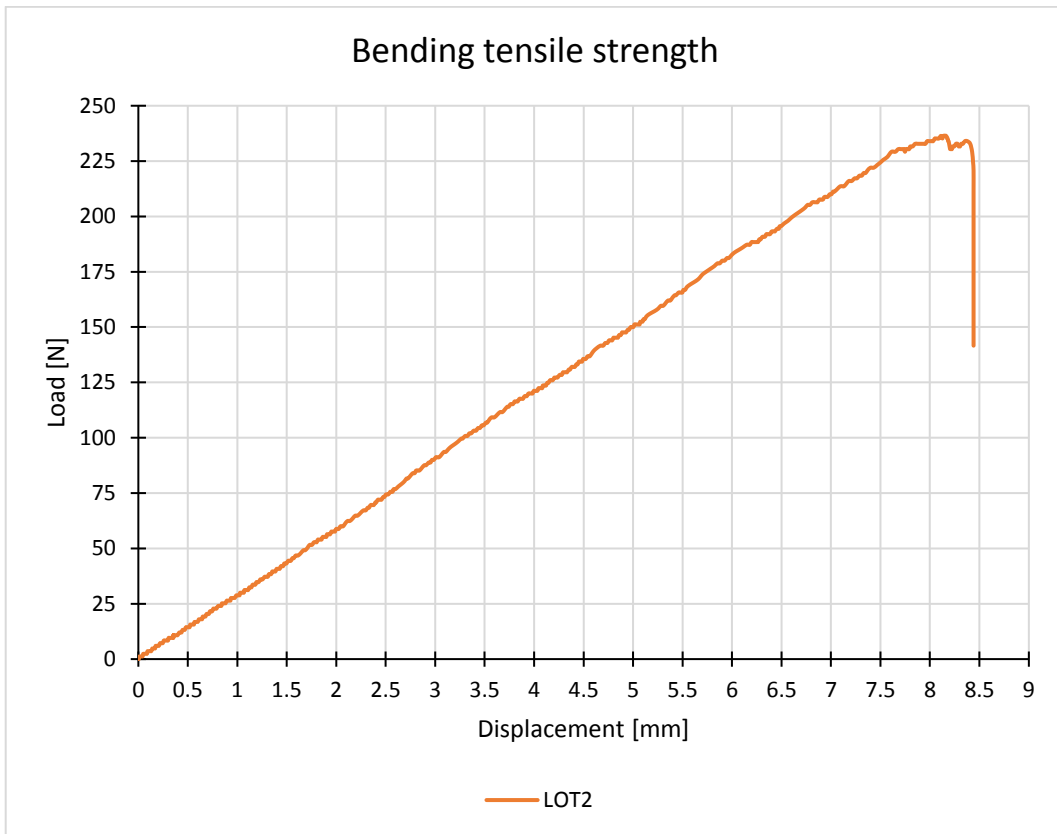


Grafico 3.3 - Curva di rottura LOT2 mediante prova su 3 punti

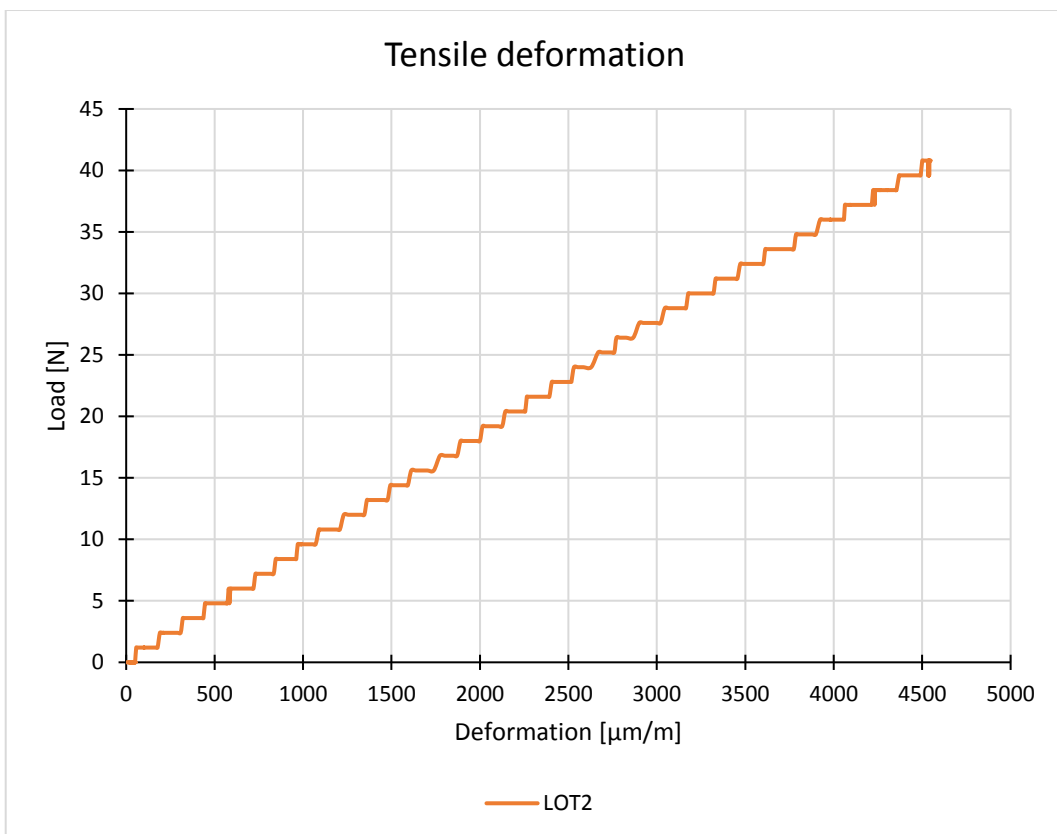


Grafico 3.4 - Diagramma carico-deformazione del LOT2

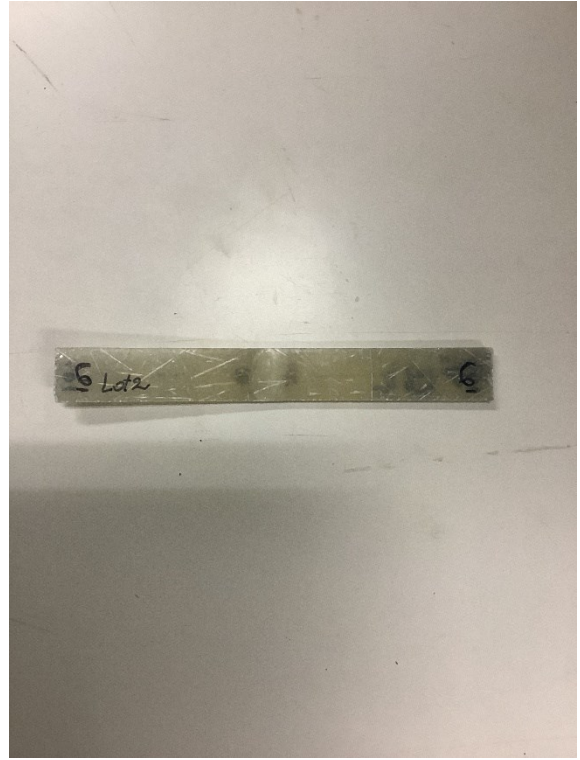


Figura 3.6 - Deformazione provino LOT2-6

- Test sul provino LOT3-6 e LOT3-7

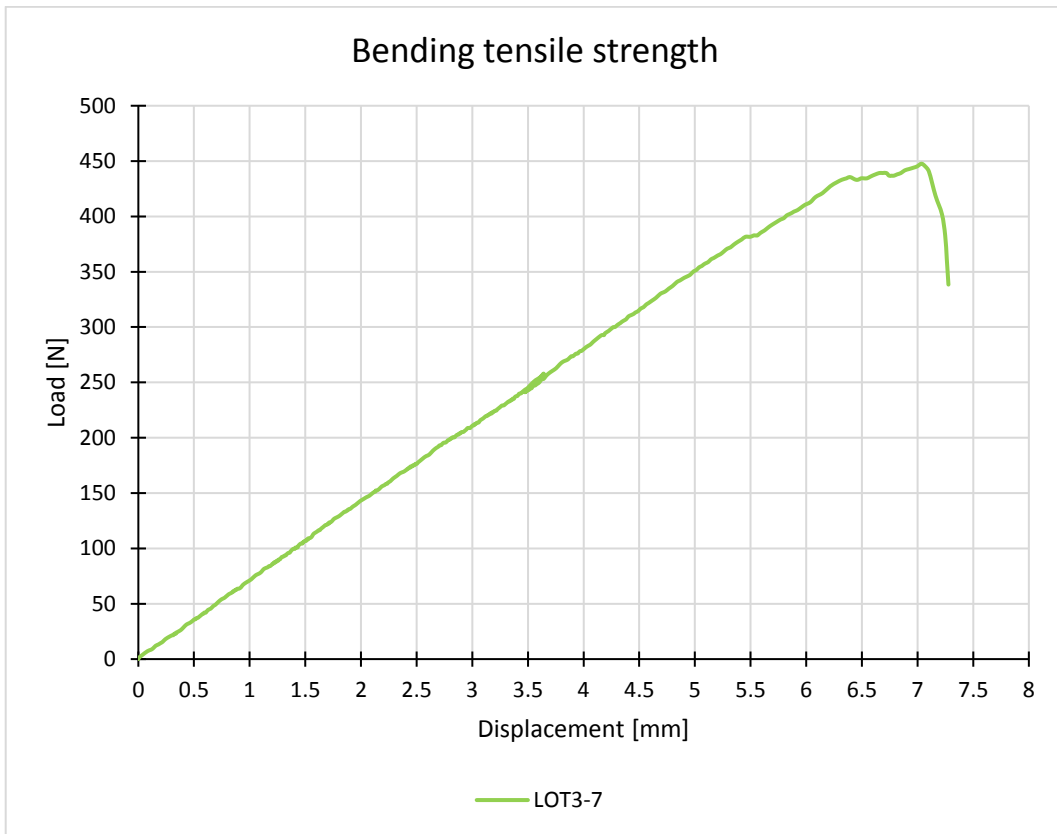


Grafico 3.5 - Curva di rottura LOT3 mediante prova su 3 punti

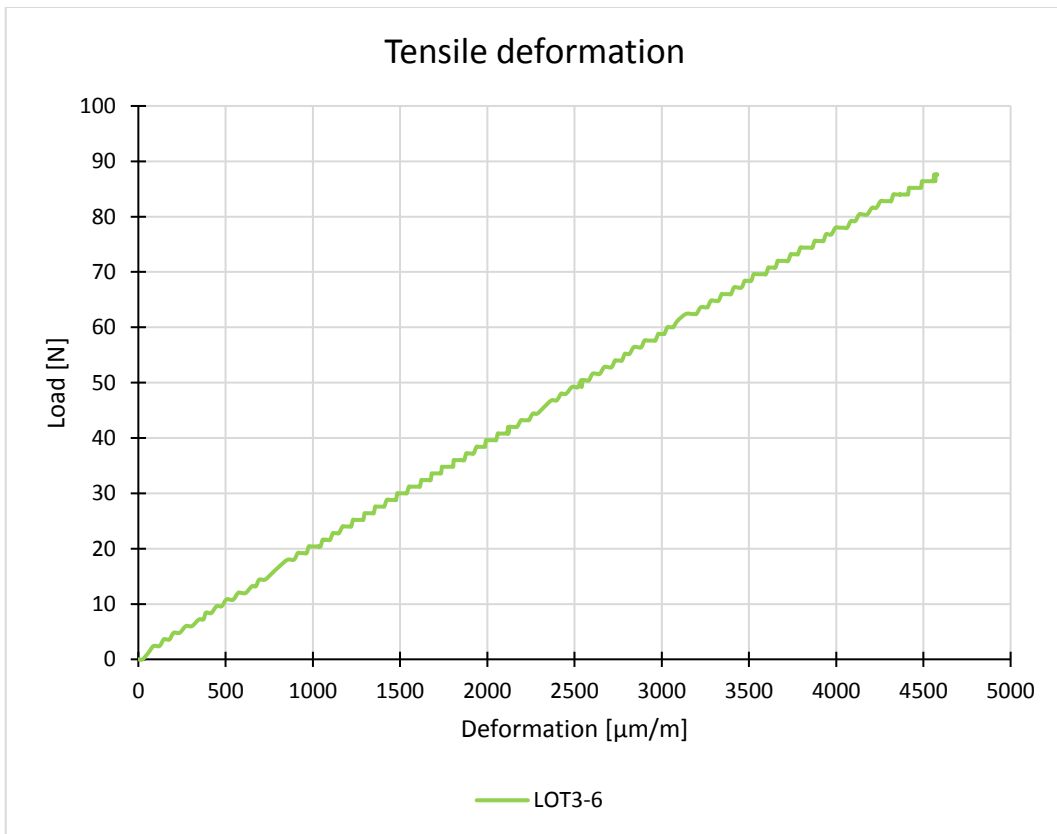


Grafico 3.6 - Diagramma carico-deformazione del LOT3

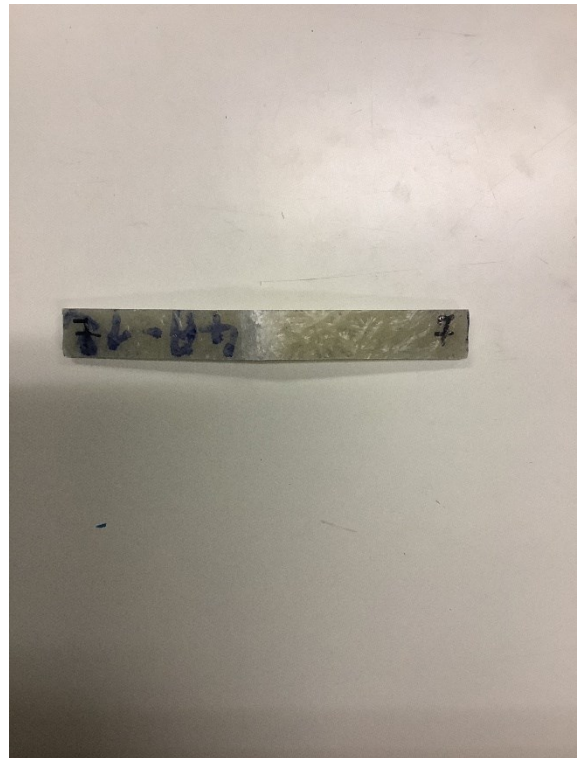
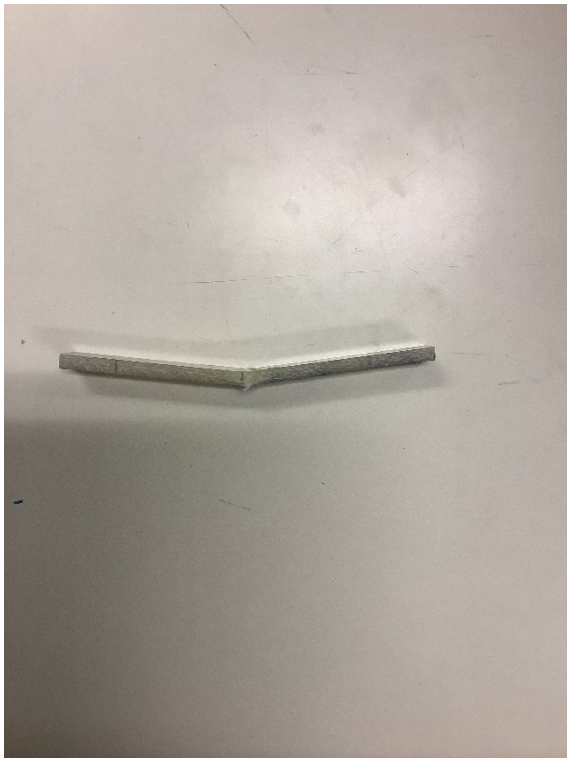
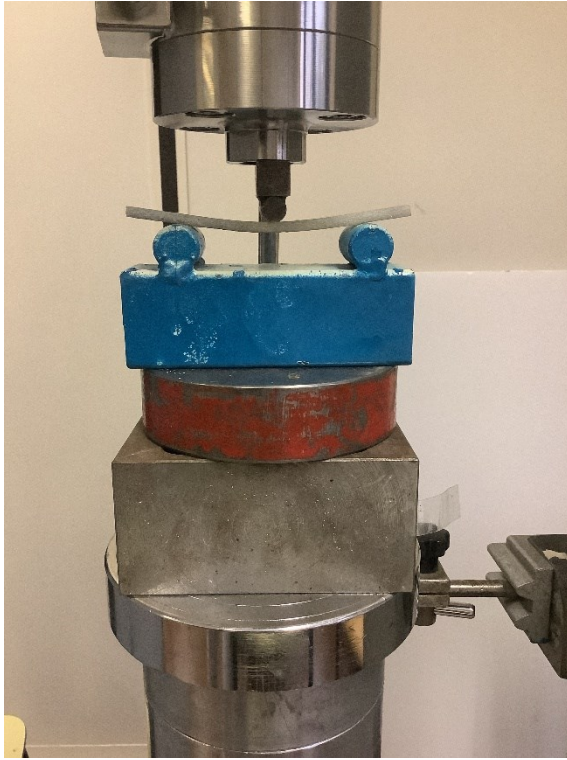


Figura 3.7 - Deformazione provino LOT3-6 e LOT3-7

Dai diagrammi Load-Displacement a rottura su tre punti con carico centrato (grafico 3.1, grafico 3.2, grafico 3.5) sono stati stimati i moduli elastici E dei differenti provini attraverso la relazione inversa della formula dell'abbassamento f a flessione da manuale:

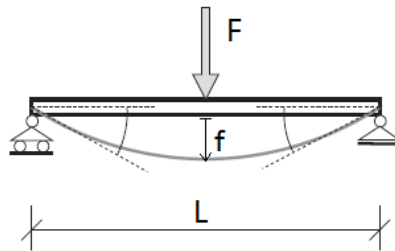


Figura 3.8 - Deformazione elastica struttura inflessa con carico centrato

$$f = \frac{1}{48} \cdot \frac{FL^3}{EI}$$

$$E = \frac{1}{48} \cdot \frac{FL^3}{If}$$

I valori di carico F presi sono desunti dal tratto lineare del rispettivo grafico a rottura alla quale corrisponde un noto abbassamento f .

Campione	Geometria			Inerzia	Carico	Abbassamento	Modulo Elastico
	L	b	h				
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm ⁴]	[N]	[mm]	[N/mm ²]
LOT1-7	120.66	15.01	3.5	53.63	400	7.3	37392.31
LOT2-6	118.02	14.62	3.72	62.72	200	6.6	16546.90
LOT3-7	117.54	13.98	4.78	127.24	350	5	18612.48

Tabella 3.5 - Determinazione modulo elastico

Conoscendo il modulo elastico E è stato possibile determinare lo stato tensionale di trazione σ nei provini attraverso i grafici di deformazione alla trazione ϵ (grafico 3.2, grafico 3.4, grafico 3.6):

$$\sigma = E \cdot \epsilon$$

Campione	Modulo Elastico	Deformazione	Tensione ultima a trazione
	E	ϵ	σ
	[N/mm ²]	[μ m/m]	[N]
LOT1-7	37392.31	7080	264.74
LOT2-6	16546.90	4500	74.46
LOT3-7	18612.48	4440	82.64

Tabella 3.6 - Determinazione tensione ultima a trazione

3.2 Set up e prove sperimentali unidirezionali

La strumentazione utilizzata per eseguire le prove unidirezionali a rottura per ottenere i dati sperimentali si compone della stessa pressa a vite con azionamento manuale in grado di indurre un'azione di compressione e trazione sul provino in composito ed un trasduttore in spostamento utilizzato per misurare l'abbassamento, positivo e negativo, del suddetto provino, visti in precedenza nelle prove preliminari.



Figura 3.9 - Strumentazione di prova

La strumentazione è stata connessa sempre al già noto *SPIDER 8* per ottenere i grafici Load-Displacement.

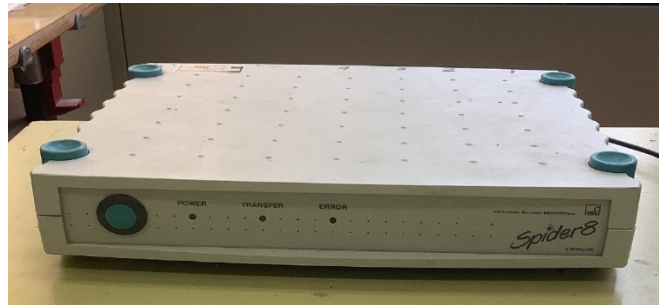


Figura 3.10 - SPIDER 8

Nel dettaglio, l'incastro in una estremità del provino viene garantita attraverso degli appositi fermi in acciaio di 5 cm ed inoltre si è resa necessaria la predisposizione e la fabbricazione di un particolare dispositivo metallico che permettesse di collegare il provino incastrato in un estremo alla cella di carico.



Figura 3.11 - Posizionamento del provino

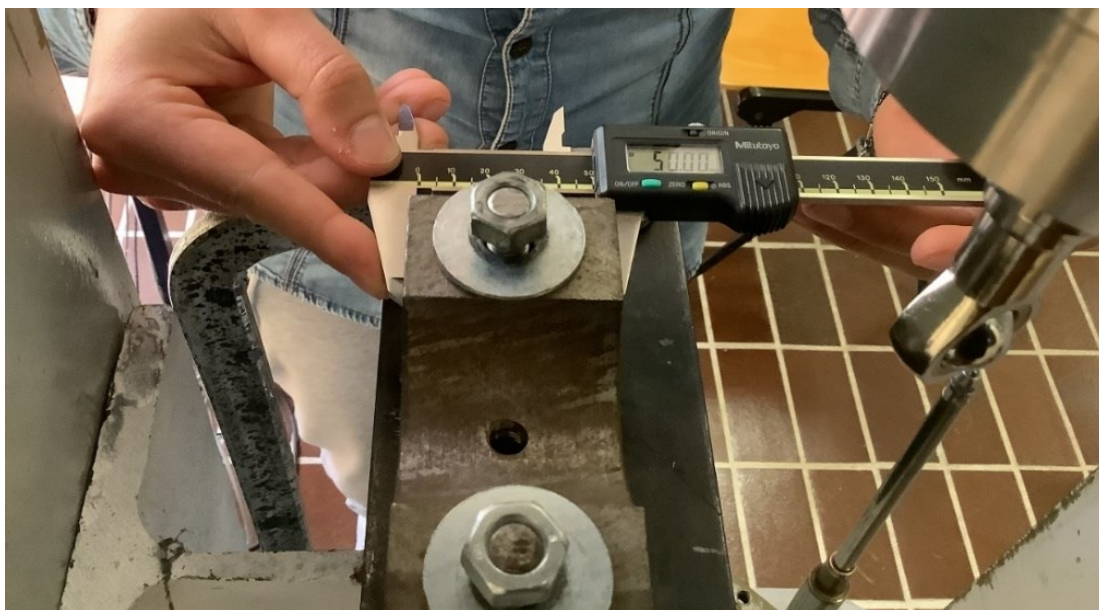


Figura 3.12 – Dettagli su incastro e strumento di supporto per l'applicazione del carico

Successivamente, dall'esito di alcune prove non andate a buon fine, è stata eliminata la vite filettata che collegava la cella di carico con il provino incastrato in un'estremità, in quanto tale vite era soggetta a deformazione per carico di punta e quindi i risultati ottenuti non sarebbero stati attendibili.

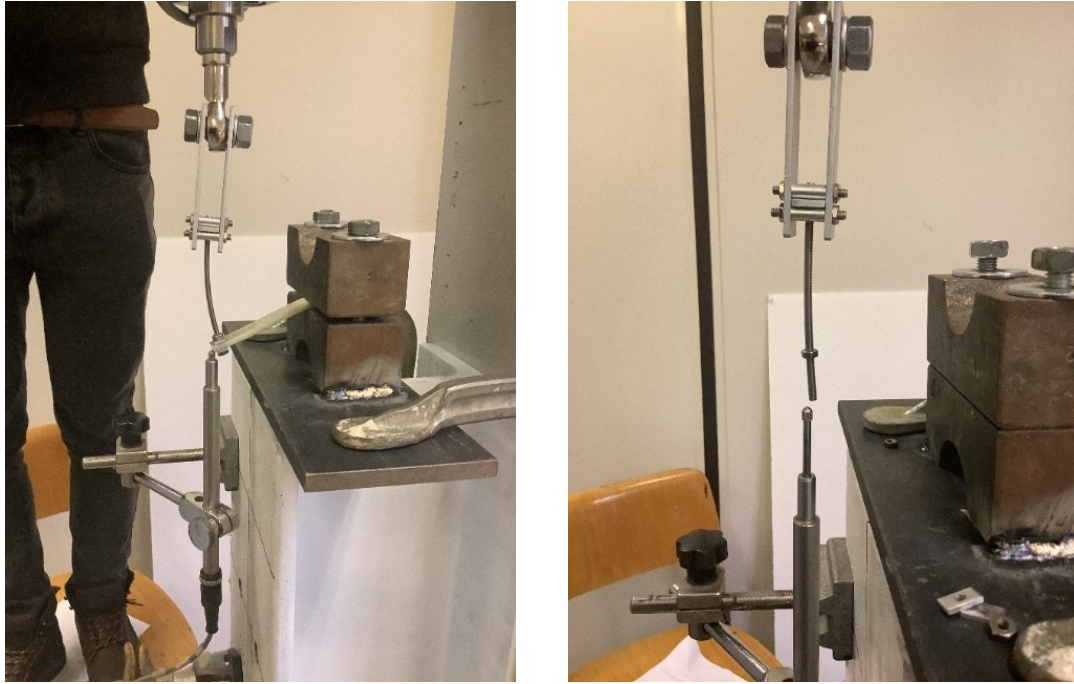


Figura 3.13 - Vite filettata rotta per carico di punta

Si è reso necessario sostituire anche il trasduttore in spostamento con un altro che avesse una corsa più lunga in grado di registrare adeguatamente gli spostamenti positivi e negativi dei provini, ottenendo il set-up di prova ideale per lo svolgimento della sperimentazione.



Figura 3.14 - Set-up finale

Si riportano di seguito i diagrammi sperimentali a rottura con carico unidirezionale in termini di Forza-Spostamento ottenuti dalle prove sopracitate sui provini LOT1-1, LOT2-1 e LOT3-1.

- Test sul provino LOT 1-1

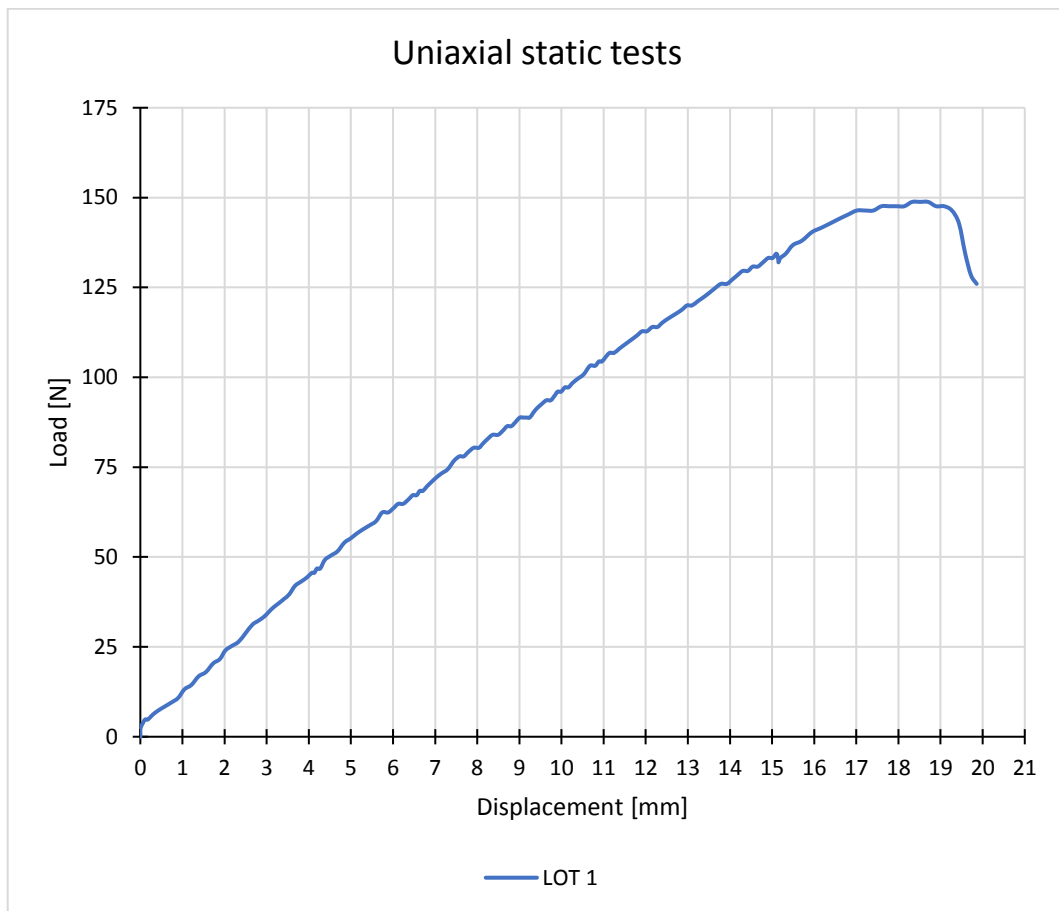


Grafico 3.7 - Curva di rottura LOT1 mediante prova unidirezionale



Figura 3.15 - Deformazione provino LOT1-1

- Test sul provino LOT 2-1

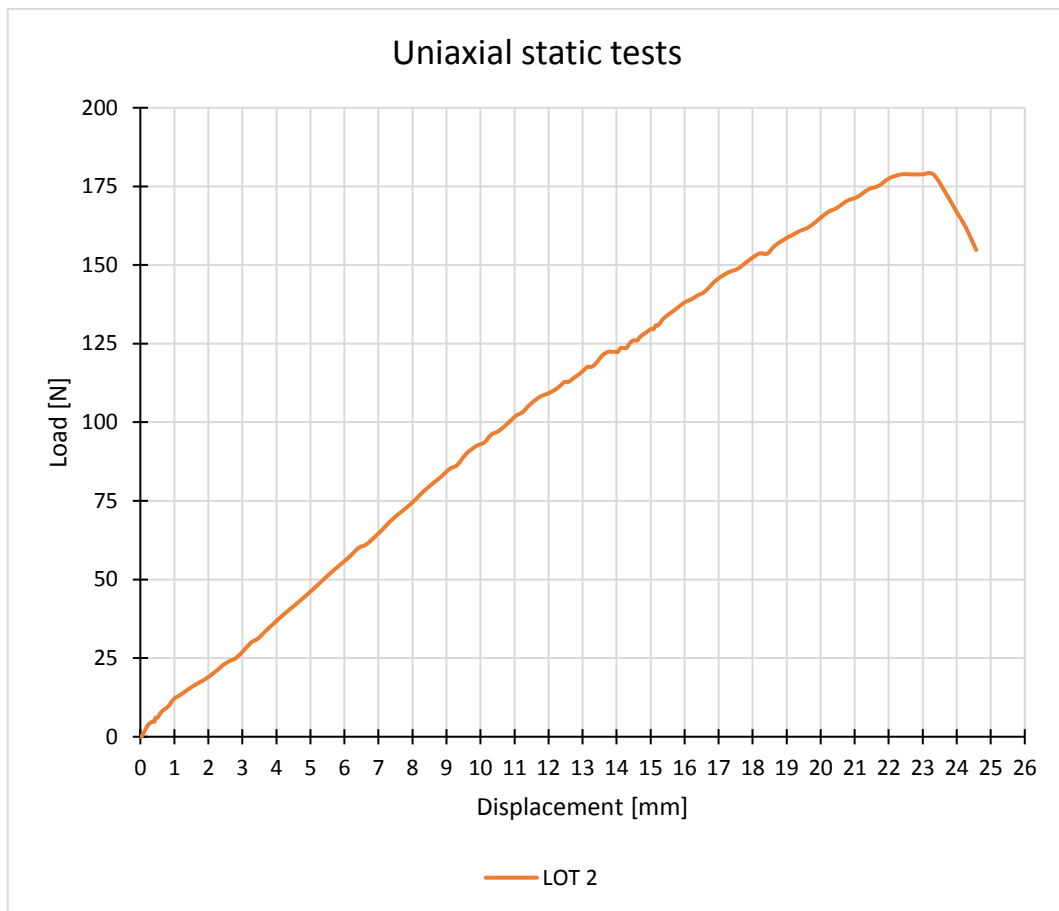


Grafico 3.8 - Curva di rottura LOT2 mediante prova unidirezionale

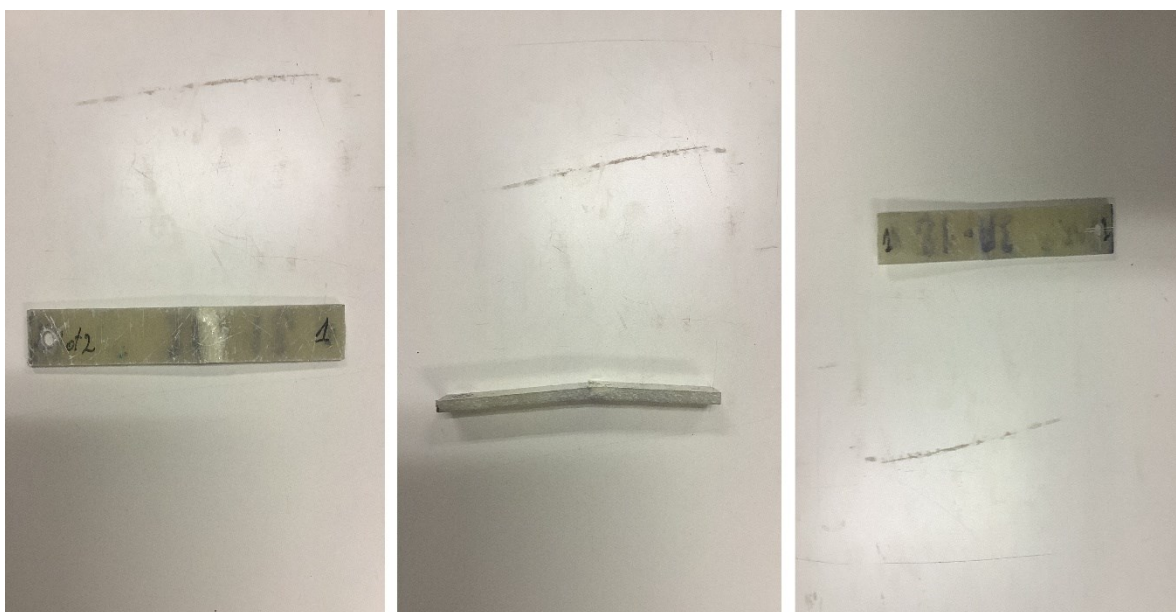


Figura 3.16 - Deformazione provino LOT2-1

- Test sul provino LOT 3-1



Grafico 3.9 - Curva di rottura LOT3 mediante prova unidirezionale



Figura 3.17 - Deformazione provino LOT3-1

Nomenclatura dei parametri utilizzati:

- $F_{u\ max}$: carico massimo applicato, espresso in Newton [N]
- $\delta_{\ max}$: abbassamento massimo del provino, espresso in millimetri [mm]
- $25\% F_{u\ max}$: carico applicato considerato al 25%, espresso in Newton [N]
- $50\% F_{u\ max}$: carico applicato considerato al 50%, espresso in Newton [N]
- $75\% F_{u\ max}$: carico applicato considerato al 75%, espresso in Newton [N]

Tipologia provino	$F_{u\ max}$ [N]	$\delta_{\ max}$ [mm]	$25\% F_{u\ max}$ [N]	$50\% F_{u\ max}$ [N]	$75\% F_{u\ max}$ [N]
LOT 1	148,80	18,7	37,20	74,40	111,60

Tipologia provino	$F_{u\ max}$ [N]	$\delta_{\ max}$ [mm]	$25\% F_{u\ max}$ [N]	$50\% F_{u\ max}$ [N]	$75\% F_{u\ max}$ [N]
LOT 2	178,80	23,31	44,70	89,40	134,10

Tipologia provino	$F_{u\ max}$ [N]	$\delta_{\ max}$ [mm]	$25\% F_{u\ max}$ [N]	$50\% F_{u\ max}$ [N]	$75\% F_{u\ max}$ [N]
LOT 3	271,20	19,20	67,80	135,60	203,40

Tabella 3.7 - Valori di carico al 25%, 50% e 75%

3.3 Prove sperimentali cicliche a fatica

Con la medesima strumentazione e lo stesso modus operandi delle prove unidirezionali, sono state eseguite le prove cicliche a fatica considerando il 25%, 50% e 75% del carico di rottura, riferito alle diverse tipologie di provini, effettuando venti cicli per tutte e tre le percentuali di carico.

Si riportano di seguito i tre grafici dei cicli caratteristici per ogni provino saggiato inerenti alle tipologie LOT1, LOT2 e LOT3 con la rispettiva documentazione fotografica delle eventuali deformazioni e/o rotture subite.

- Test sul provino LOT 1-3

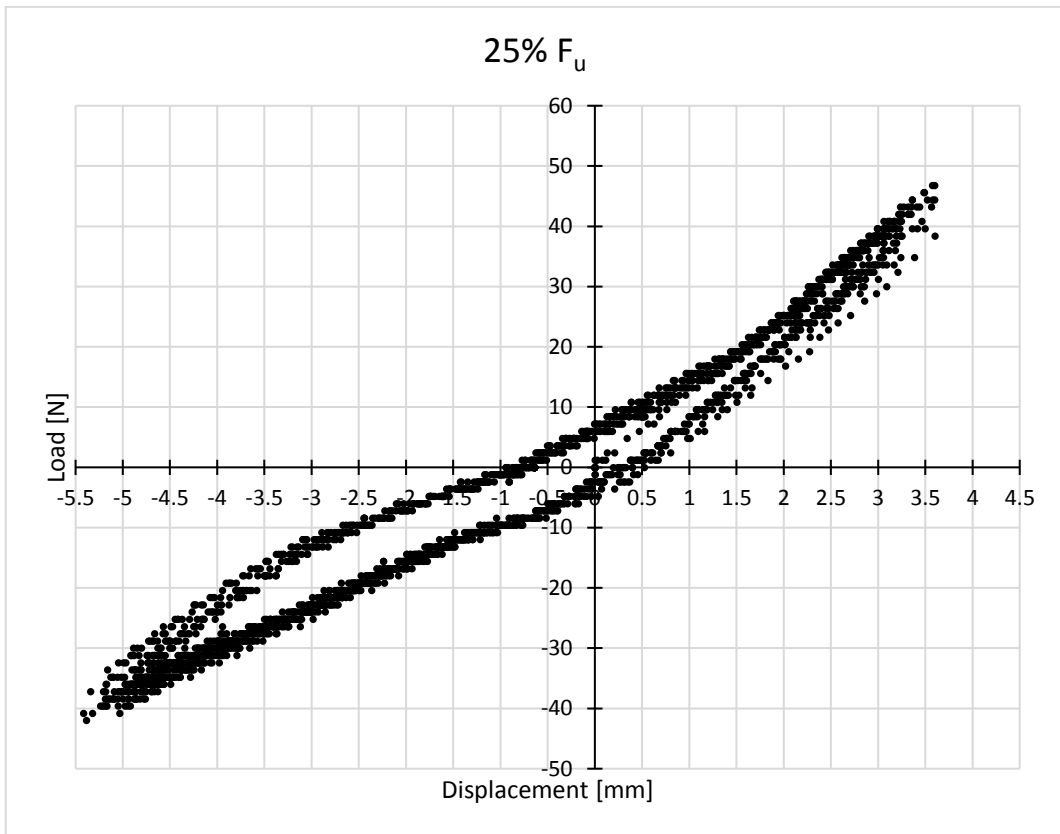


Grafico 3.10 - Cicli con carico al 25% F_u

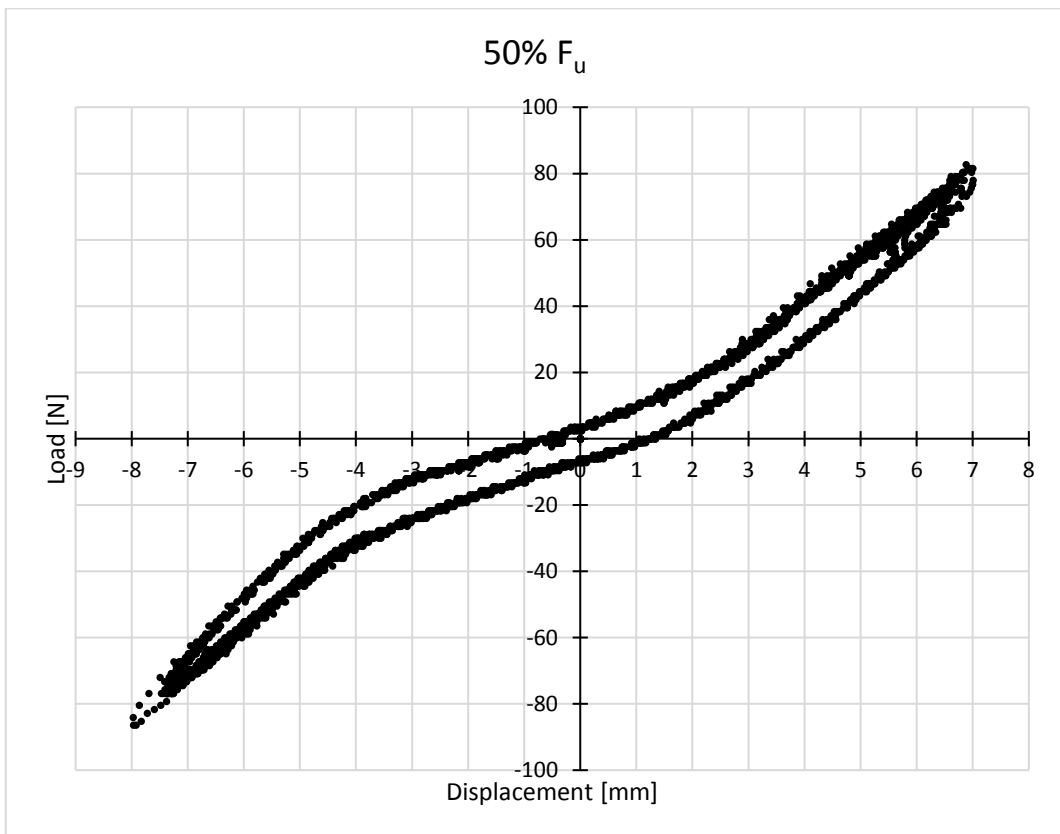


Grafico 3.11 - Cicli con carico al 50% F_u

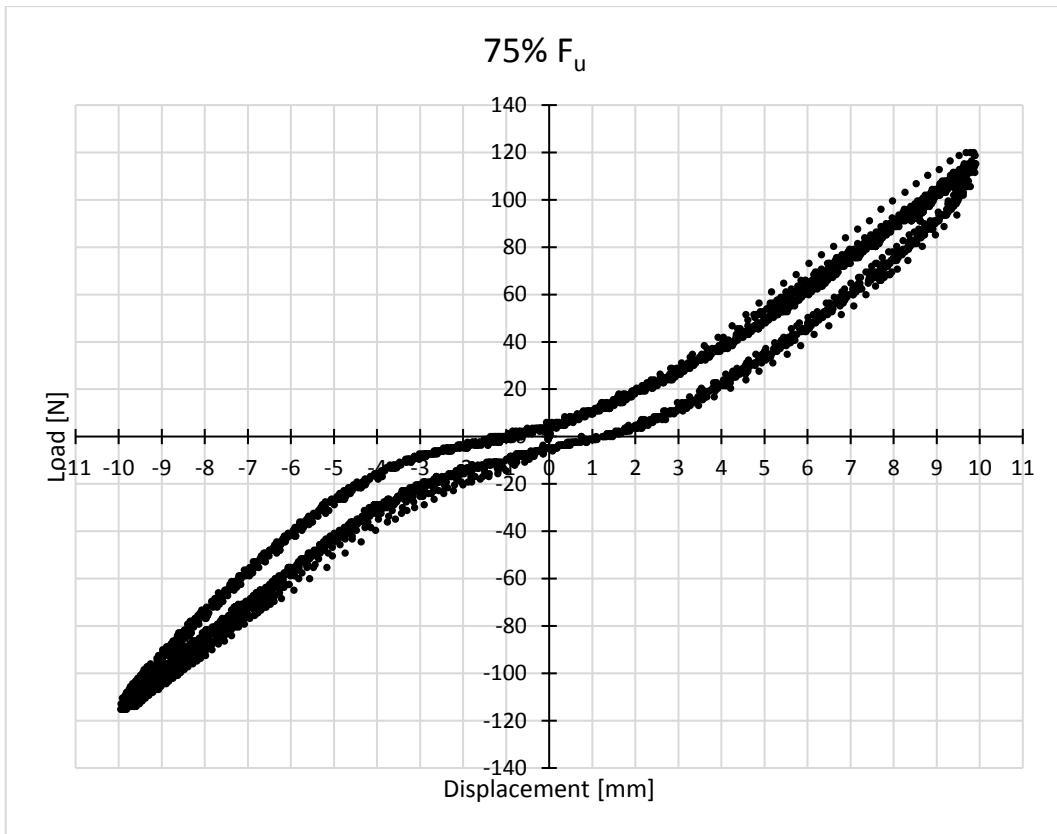


Grafico 3.12 - Cicli con carico al 75% F_u



Figura 3.18 - Deformazione provino LOT1-3

- Test sul provino LOT 1-4

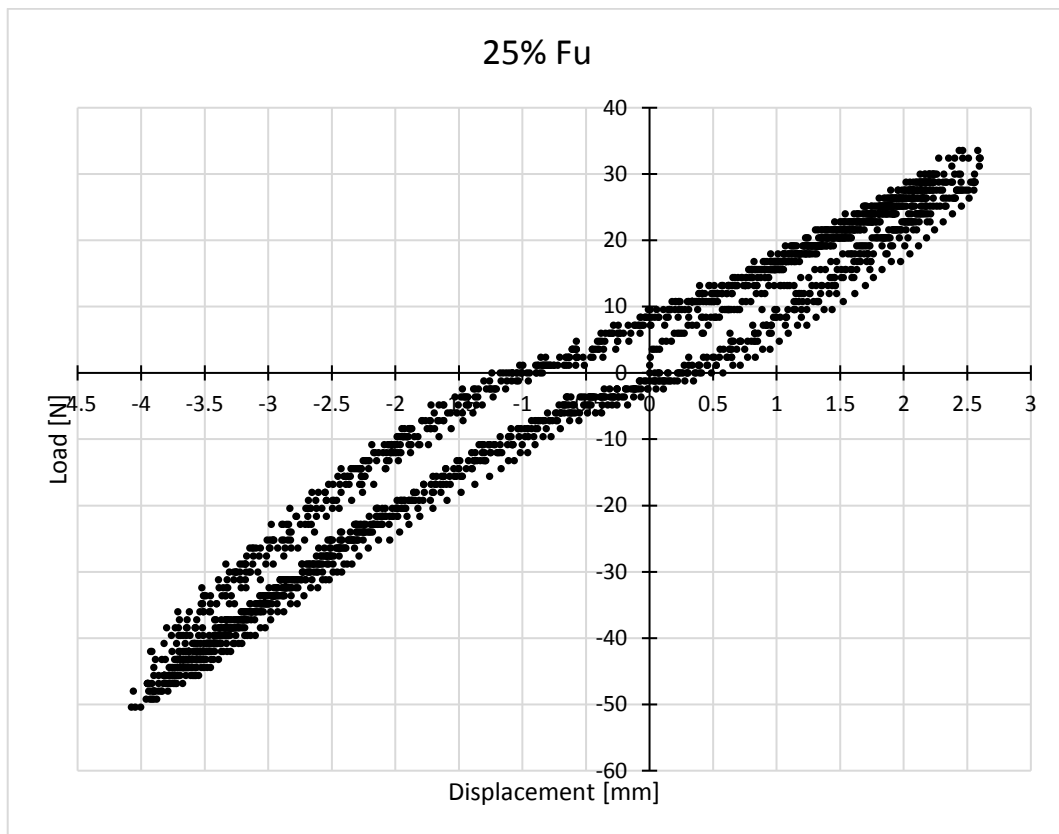


Grafico 3.13 - Cicli con carico al 25% F_u

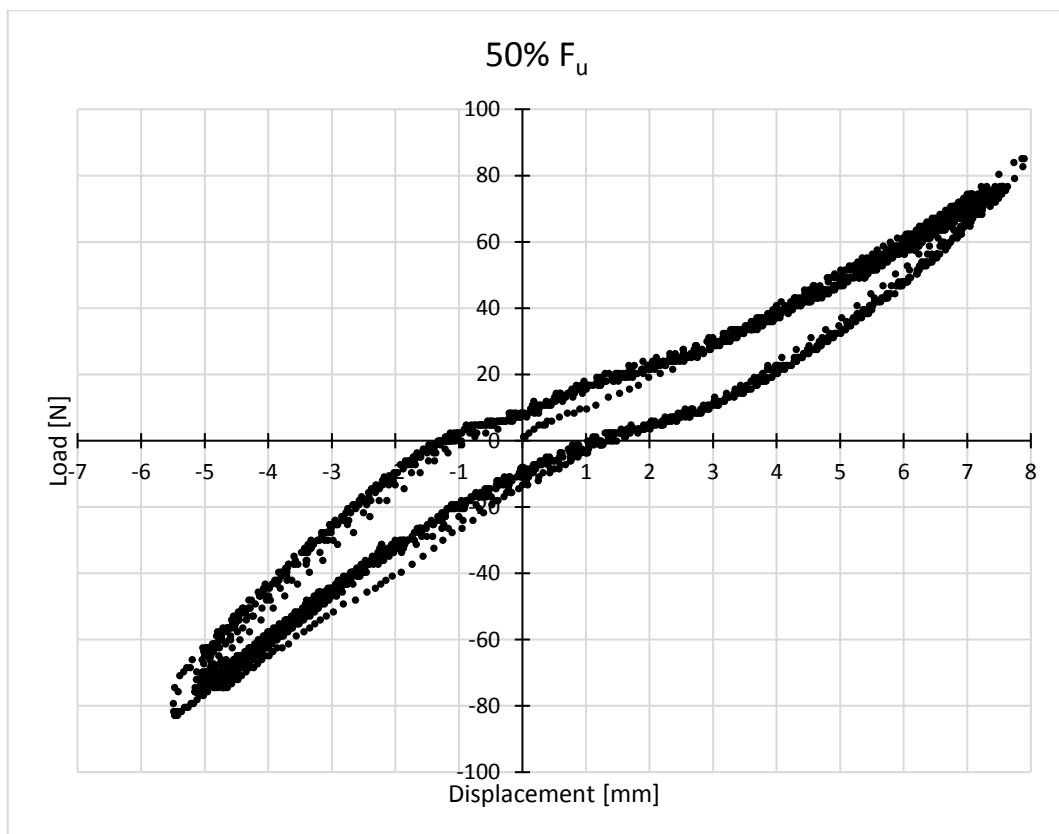


Grafico 3.14 - Cicli con carico al 50% F_u

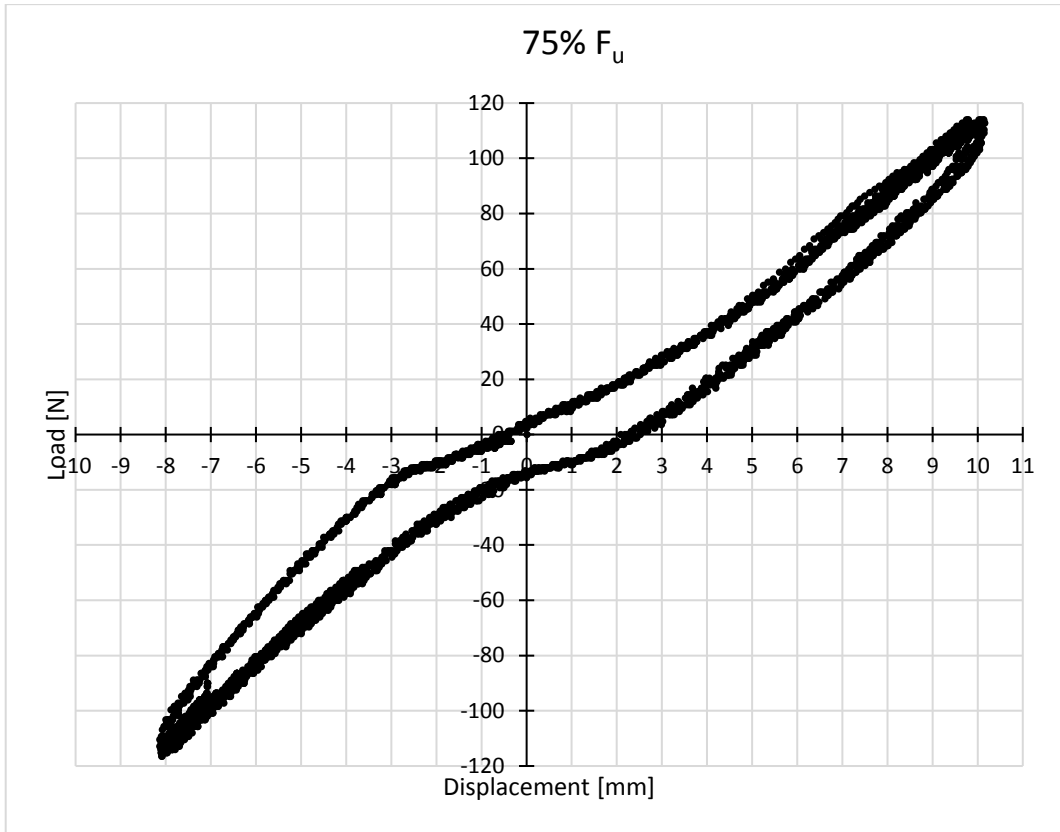


Grafico 3.15 - Cicli con carico al 75% F_u



Figura 3.19 - Deformazione provino LOT1-4

- Test sul provino LOT 1-5

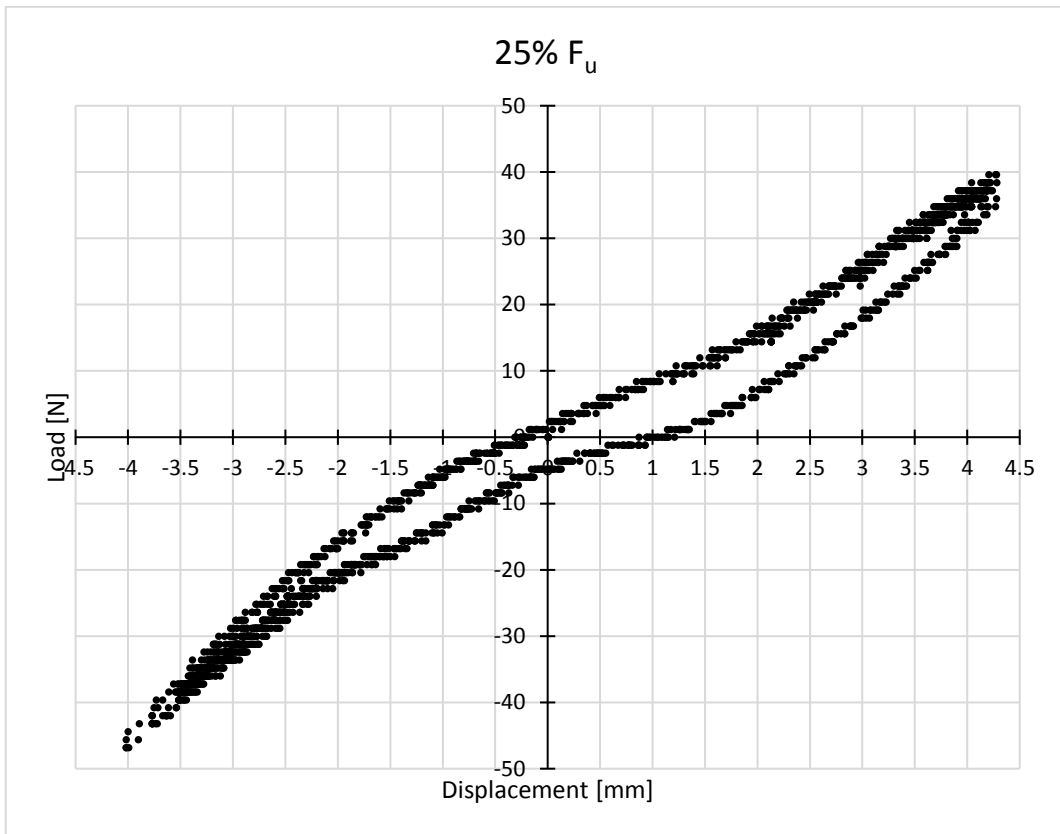


Grafico 3.16 - Cicli con carico al 25% F_u

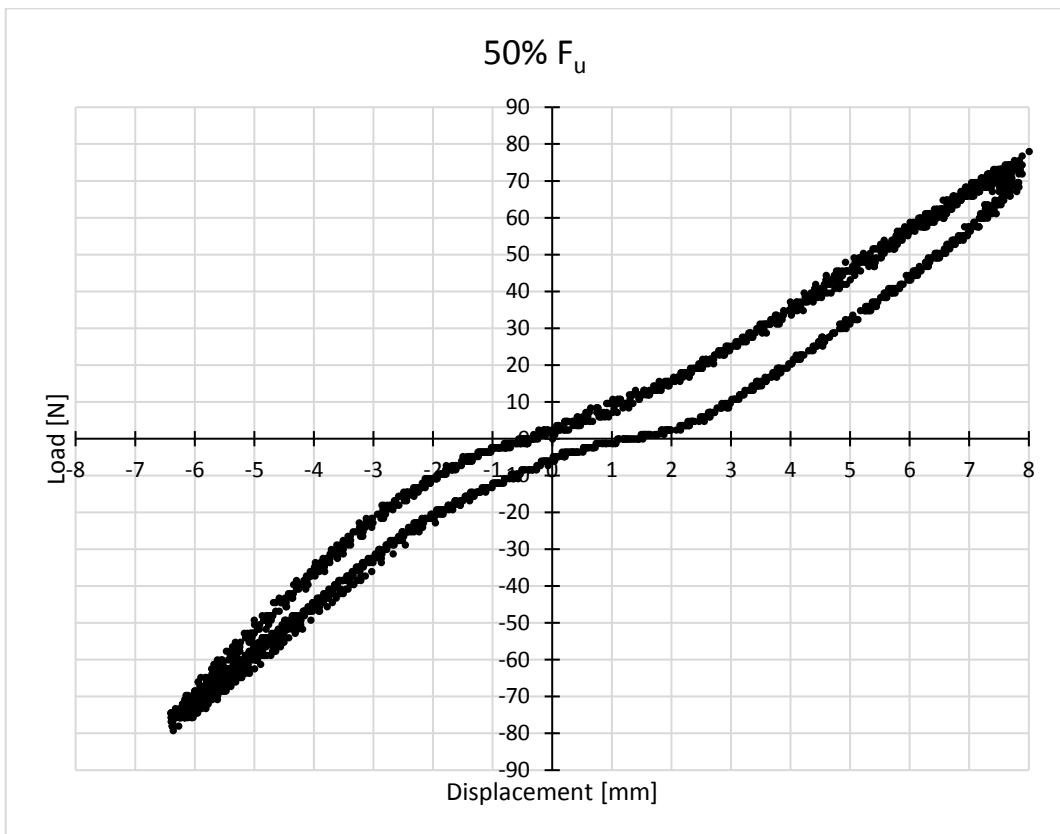


Grafico 3.17 - Cicli con carico al 50% F_u

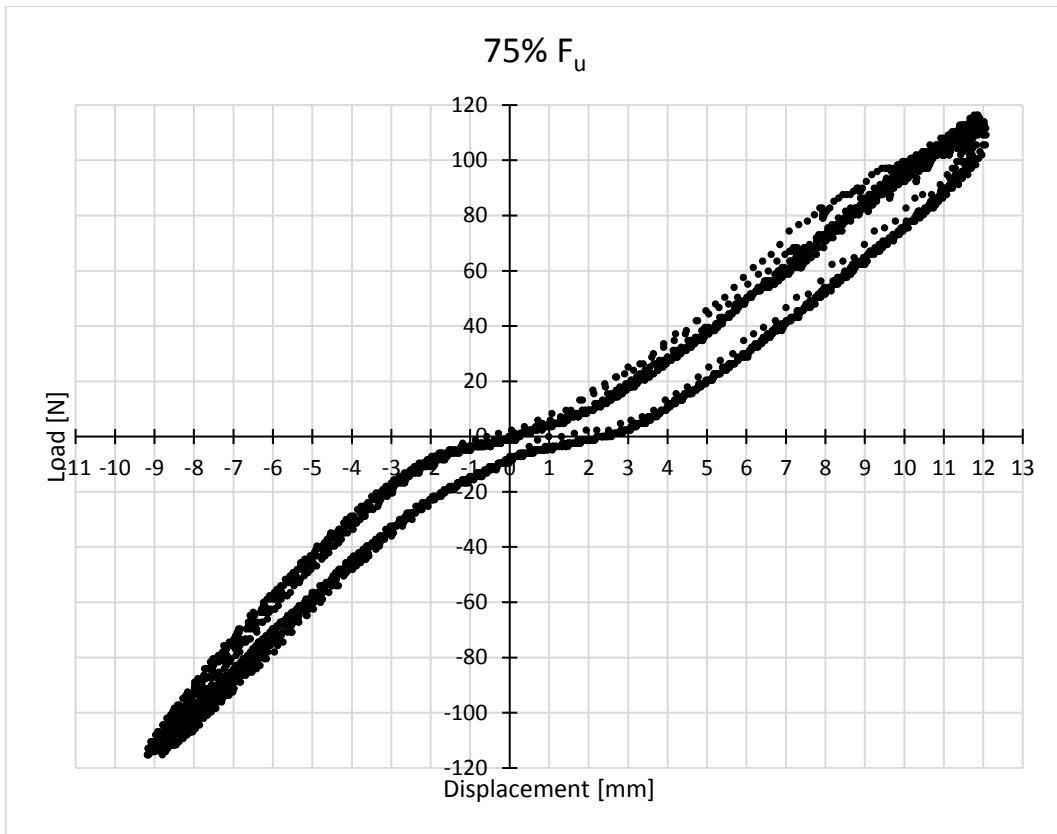


Grafico 3.18 - Cicli con carico al 75% F_u



Figura 3.20 - Deformazione provino LOT1-5

- Test sul provino LOT 1-6

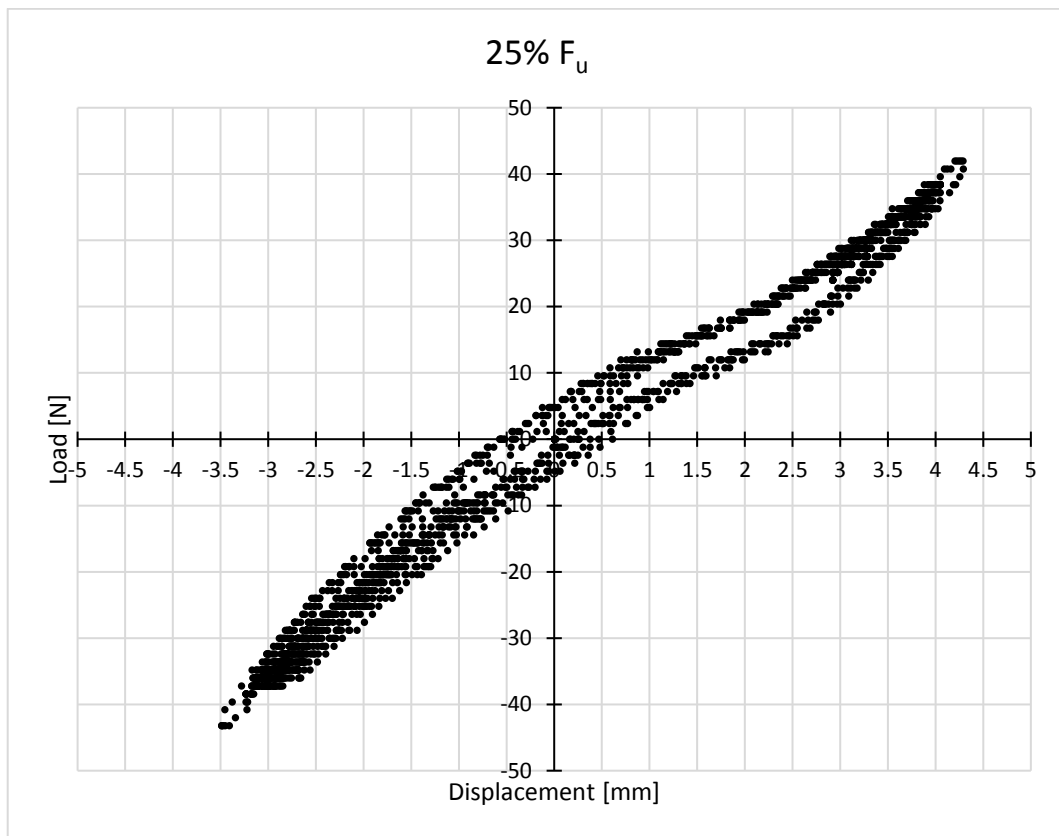


Grafico 3.19 - Cicli con carico al 25% F_u

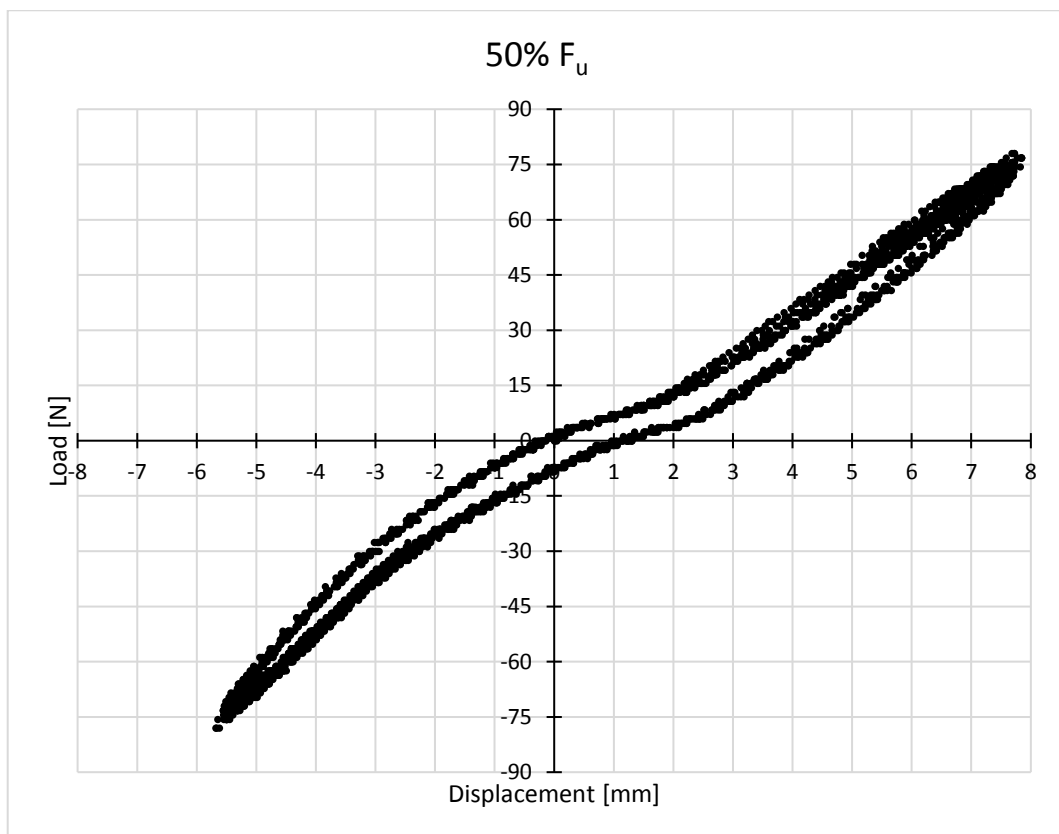


Grafico 3.20 - Cicli con carico al 50% F_u

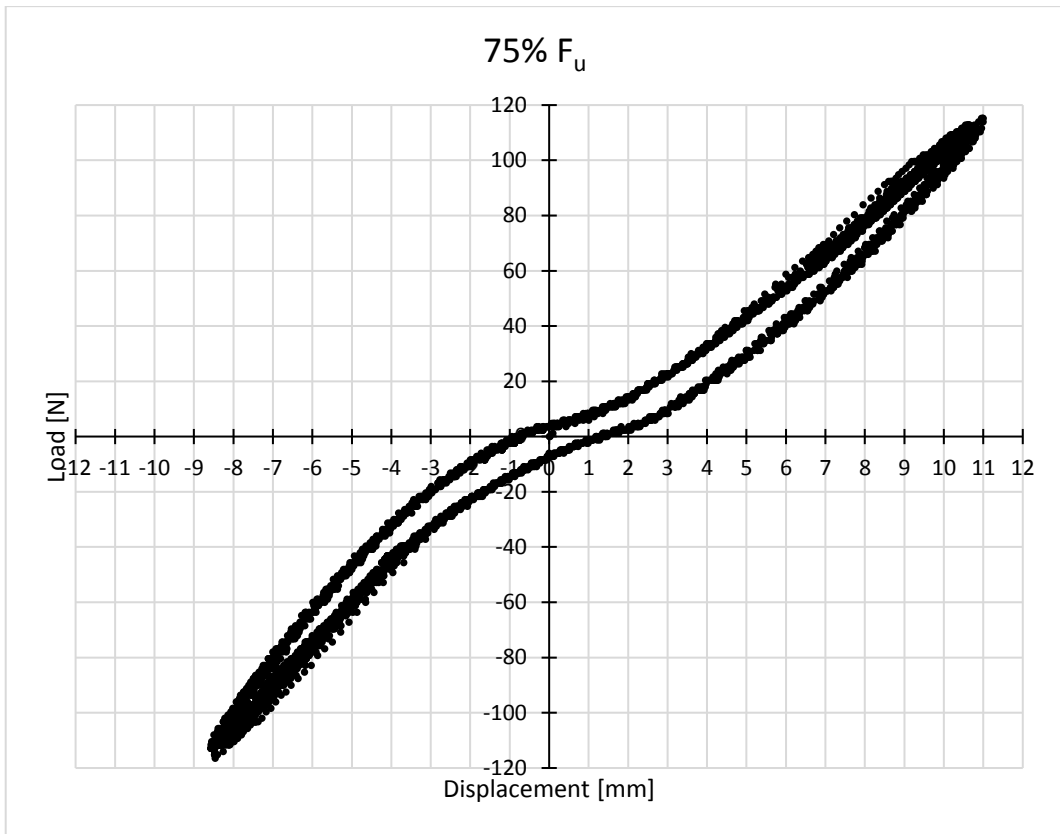


Grafico 3.21 - Cicli con carico al 75% F_u

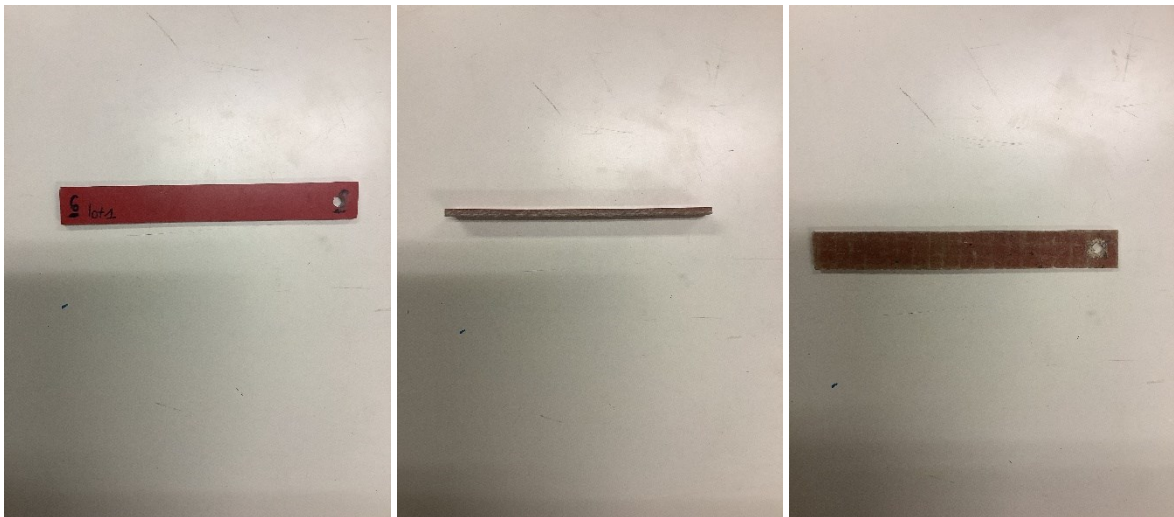


Grafico 3.21 - Deformazione provino LOT1-6

- Test sul provino LOT 1-8

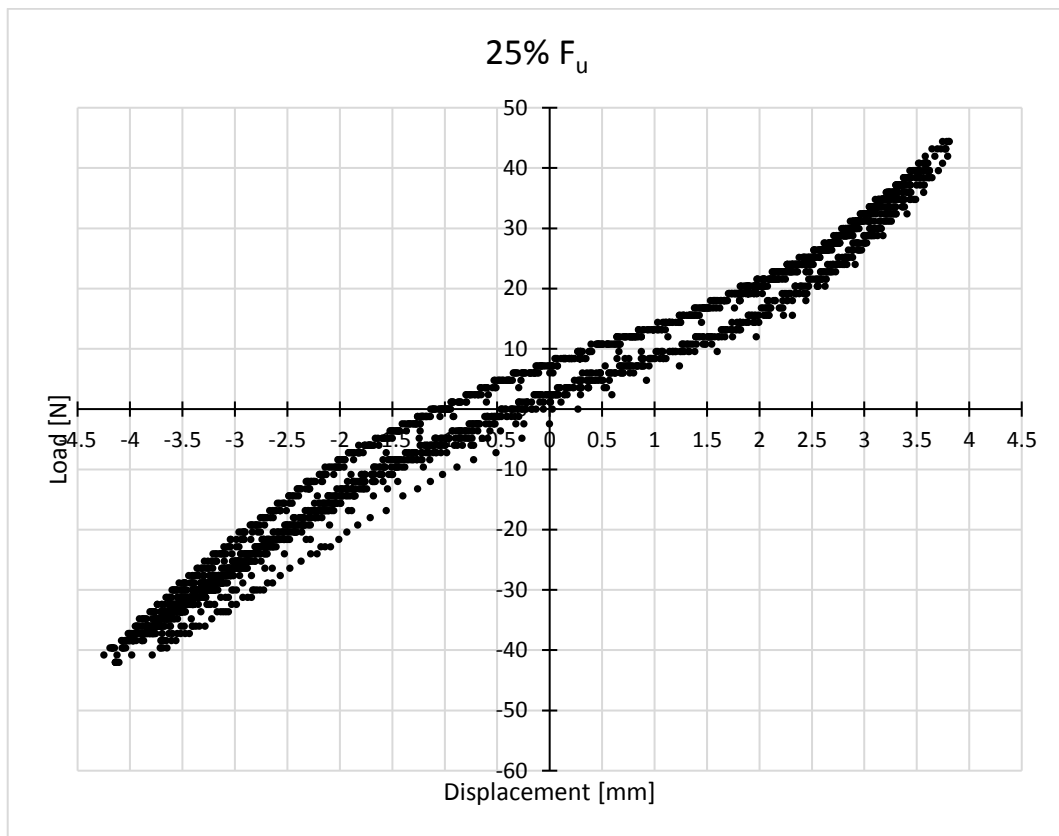


Grafico 3.22 - Cicli con carico al 25% F_u

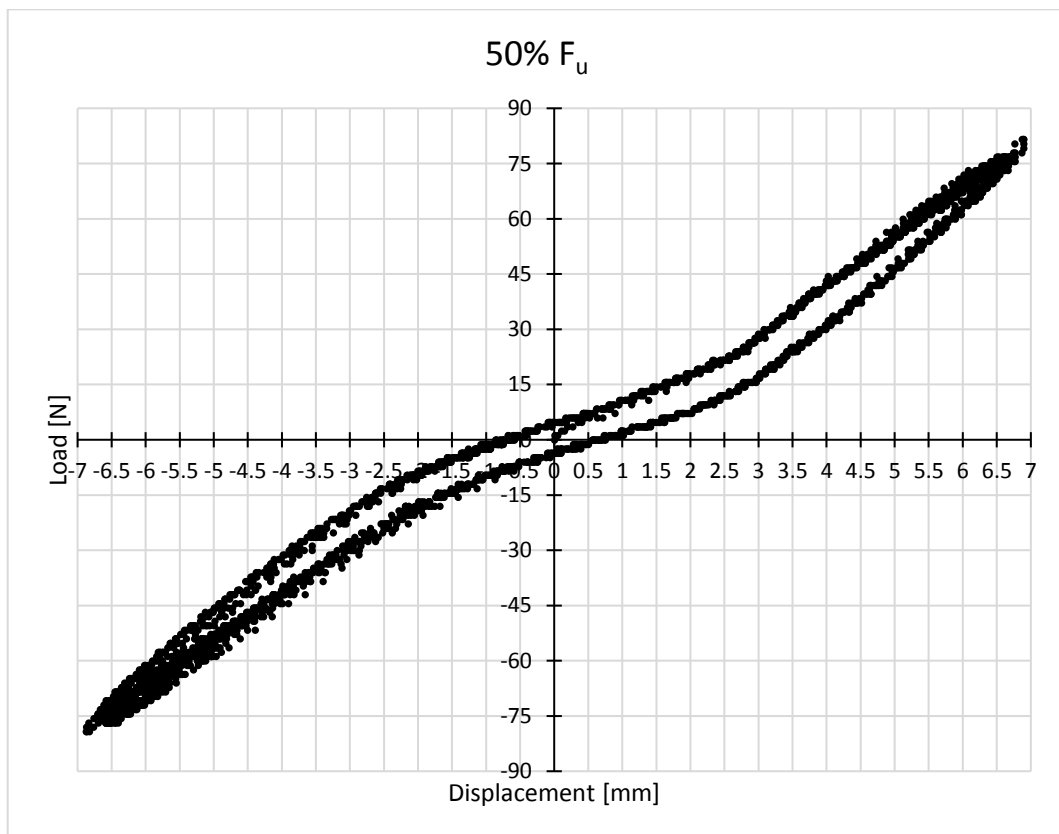


Grafico 3.23 - Cicli con carico al 50% F_u

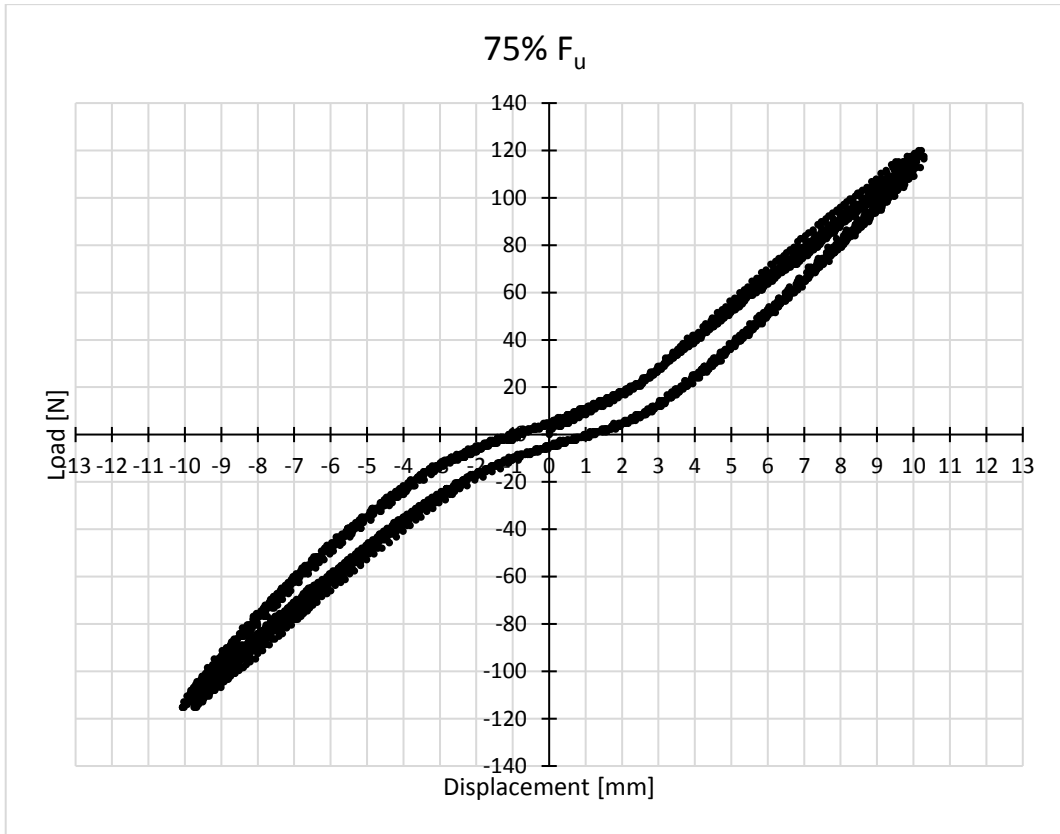


Grafico 3.24 - Cicli con carico al 75% F_u

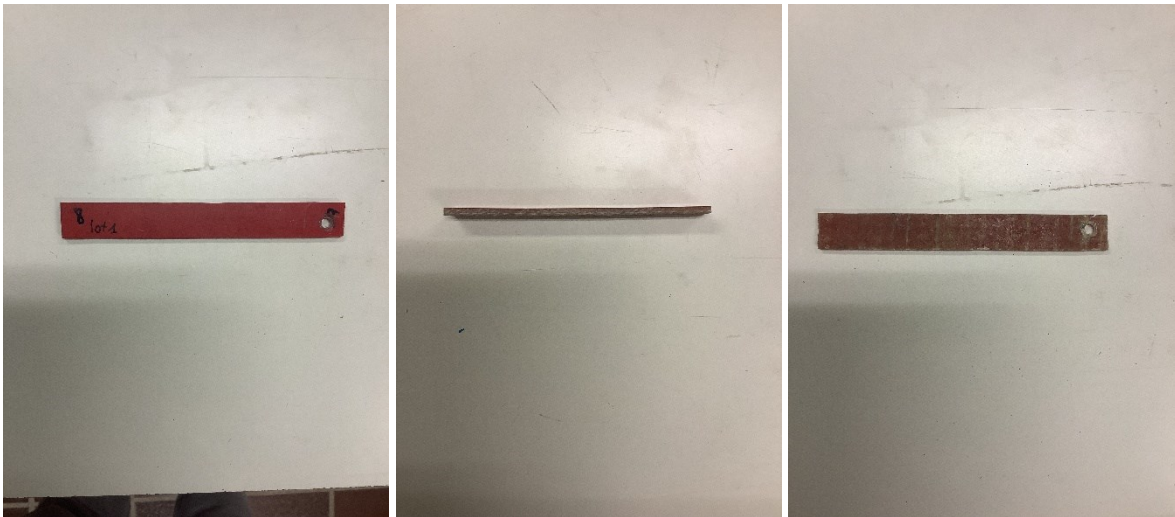


Figura 3.22 - Deformazione provino LOT1-8

- Test sul provino LOT 1-9

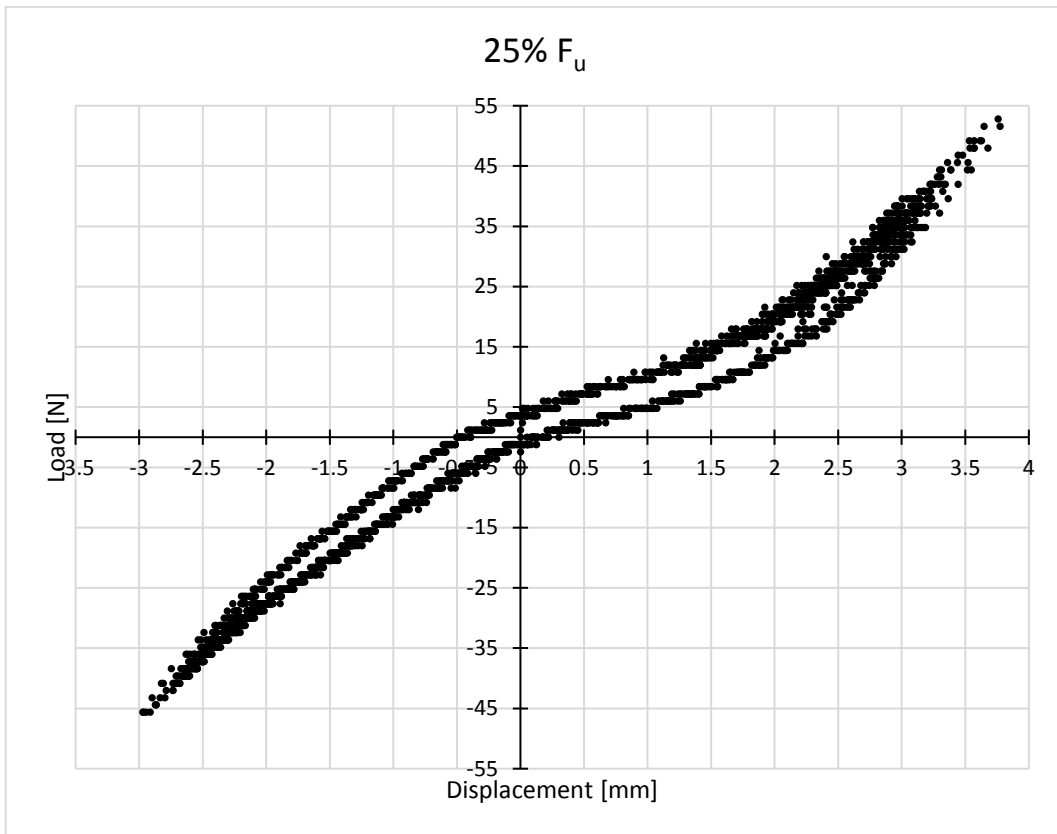


Grafico 3.25 - Cicli con carico al 25% F_u

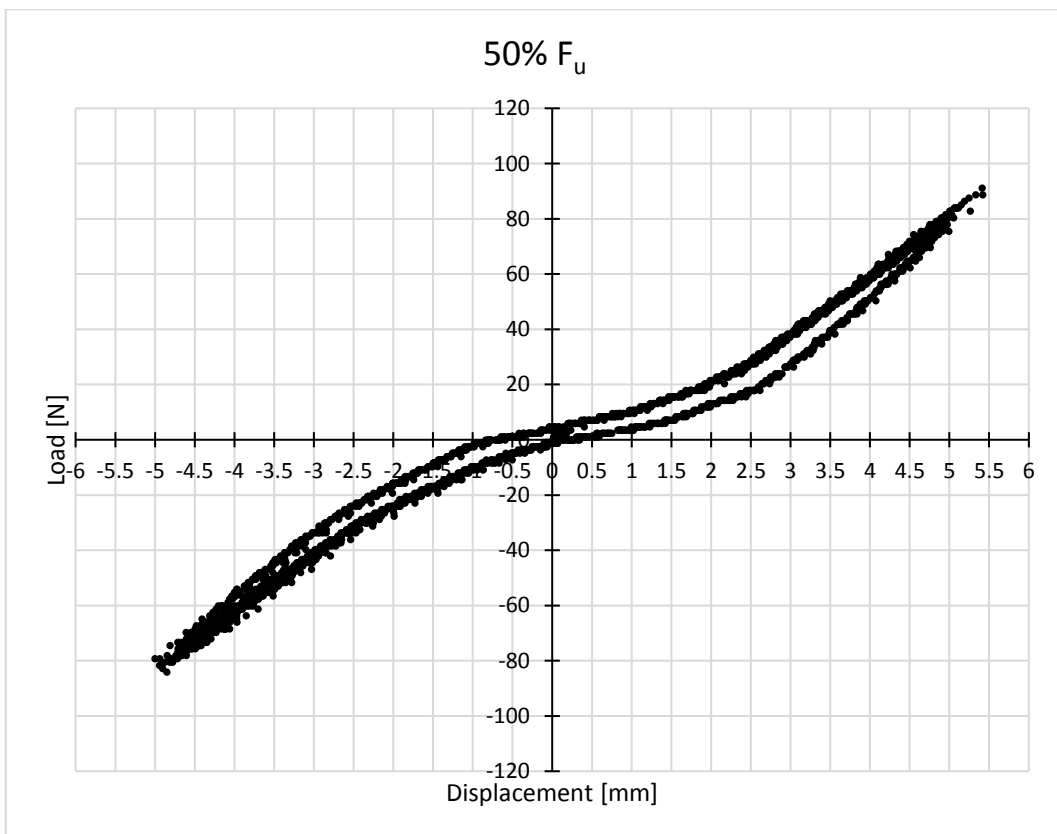


Grafico 3.26 - Cicli con carico al 50% F_u

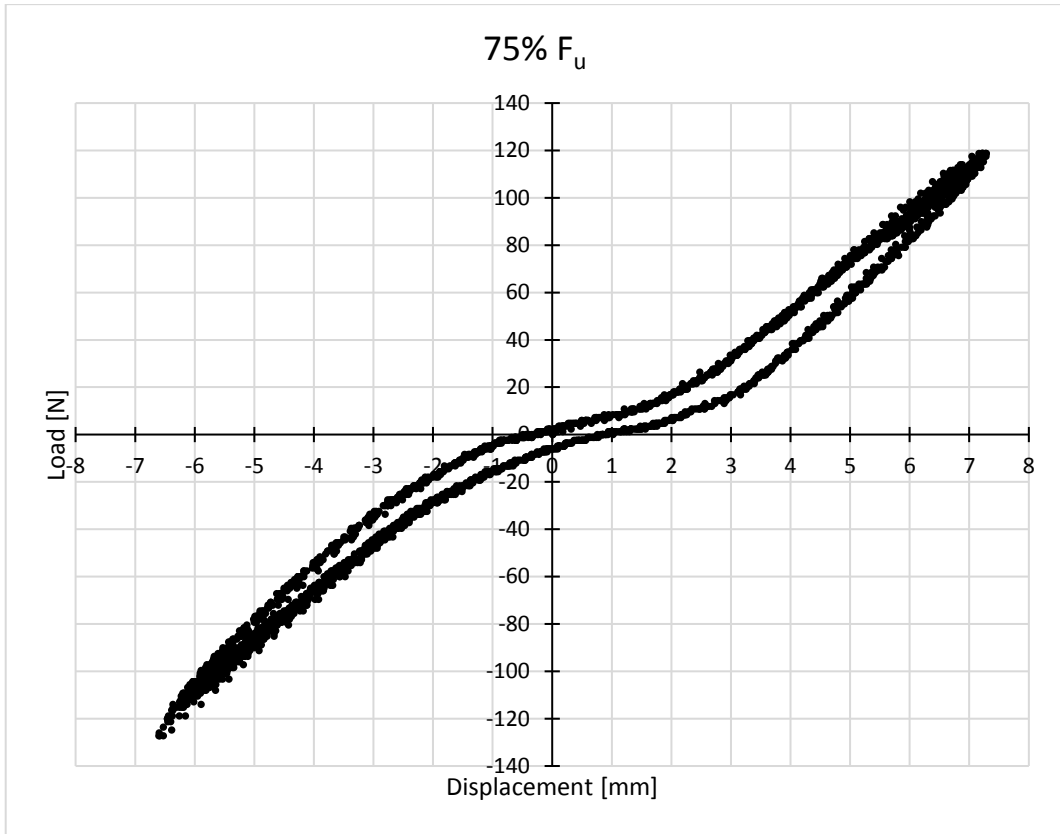


Grafico 3.27 - Cicli con carico al 75% F_u

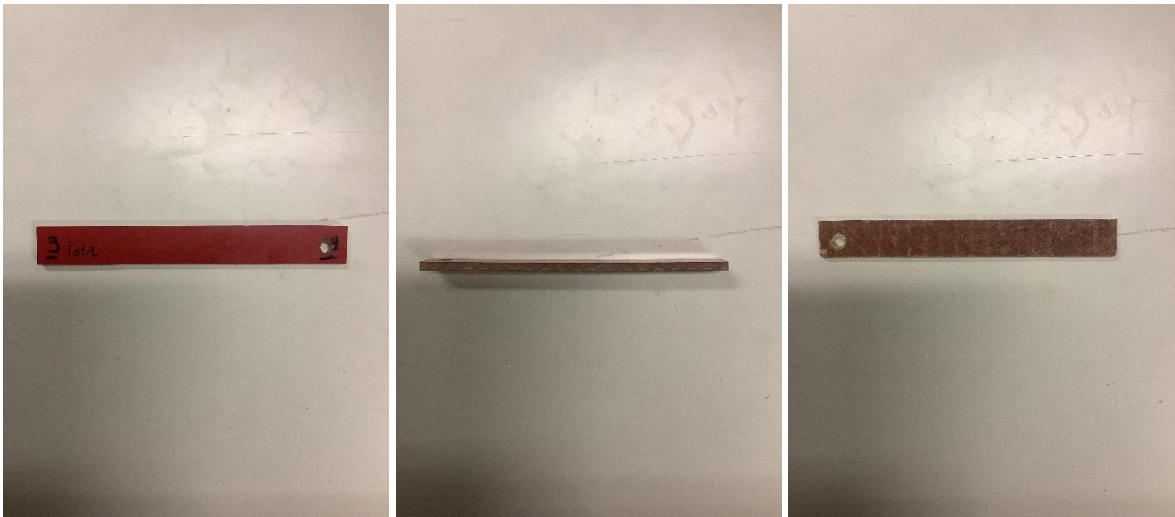


Grafico 3.23 - Deformazione provino LOT1-9

- Test sul provino LOT 2-3

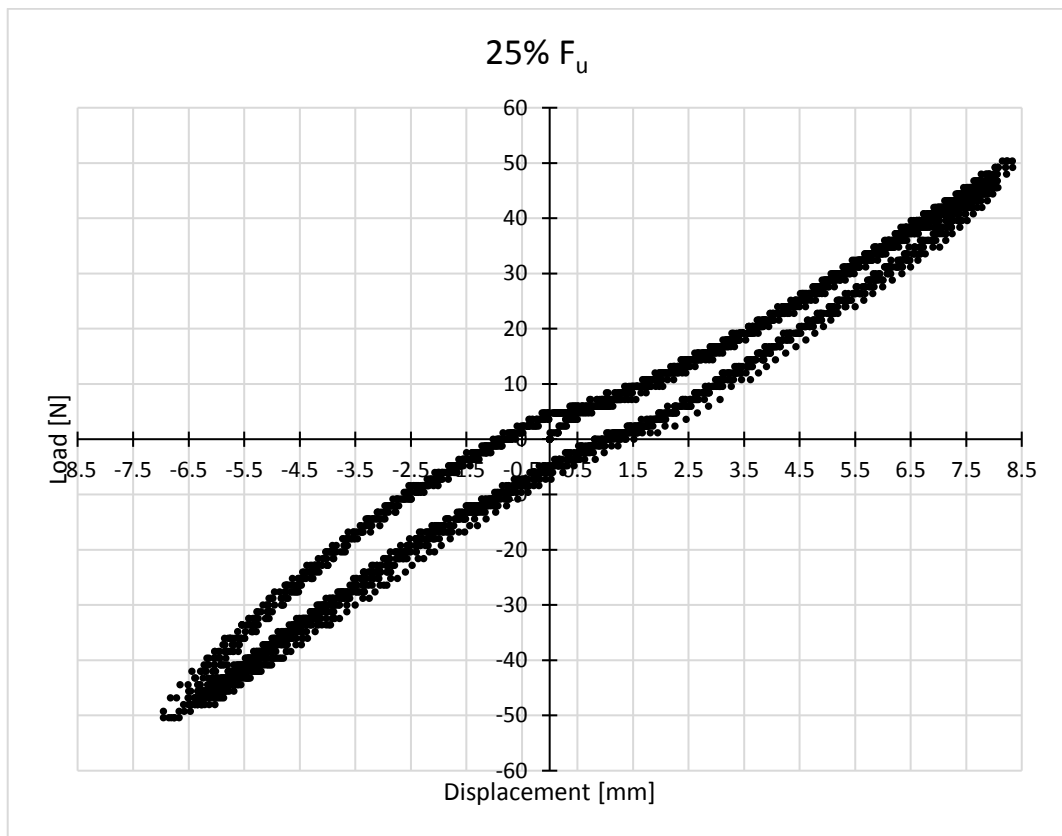


Grafico 3.28 - Cicli con carico al 25% F_u

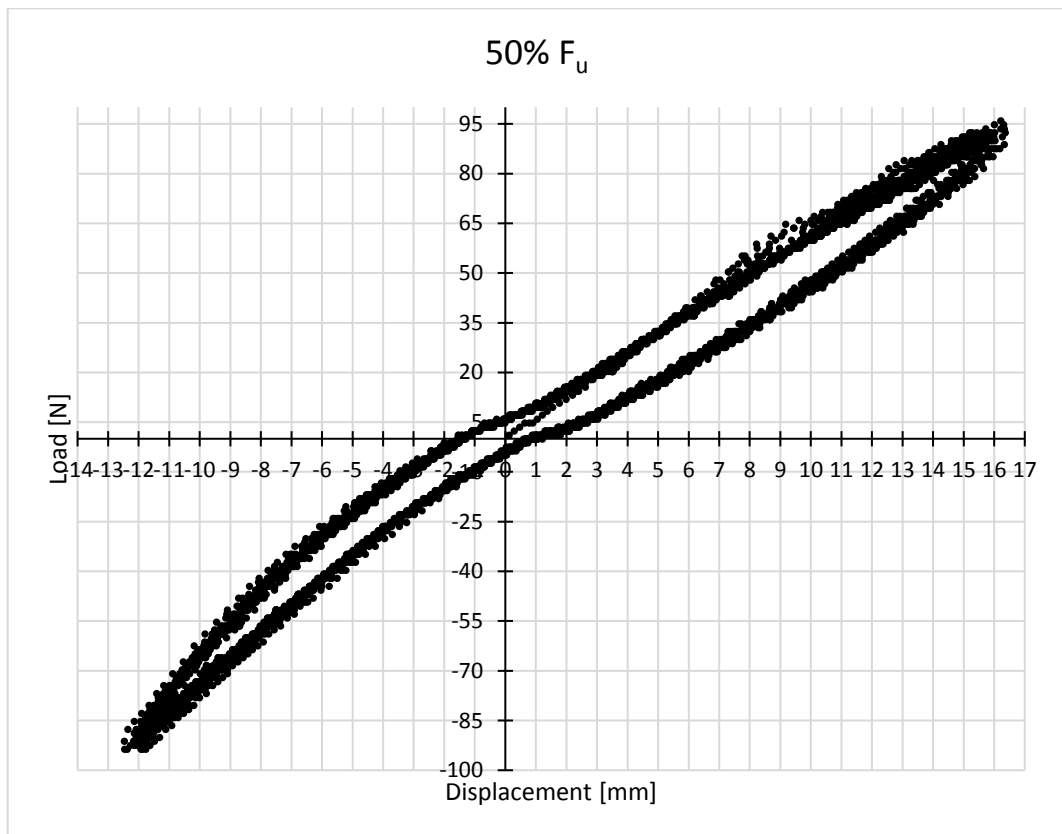


Grafico 3.29 - Cicli con carico al 50% F_u

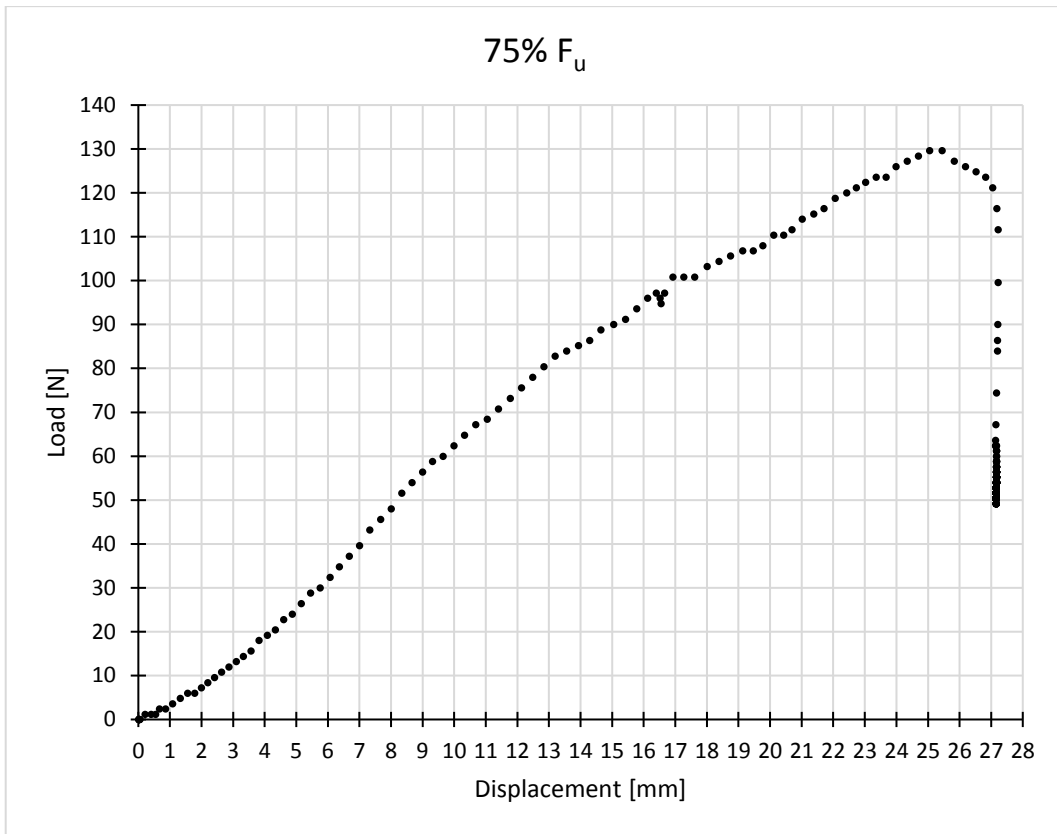


Grafico 3.30 - Cicli con carico al 75% F_u

Il provino ha raggiunto la rottura nel primo ciclo al 75% F_u .

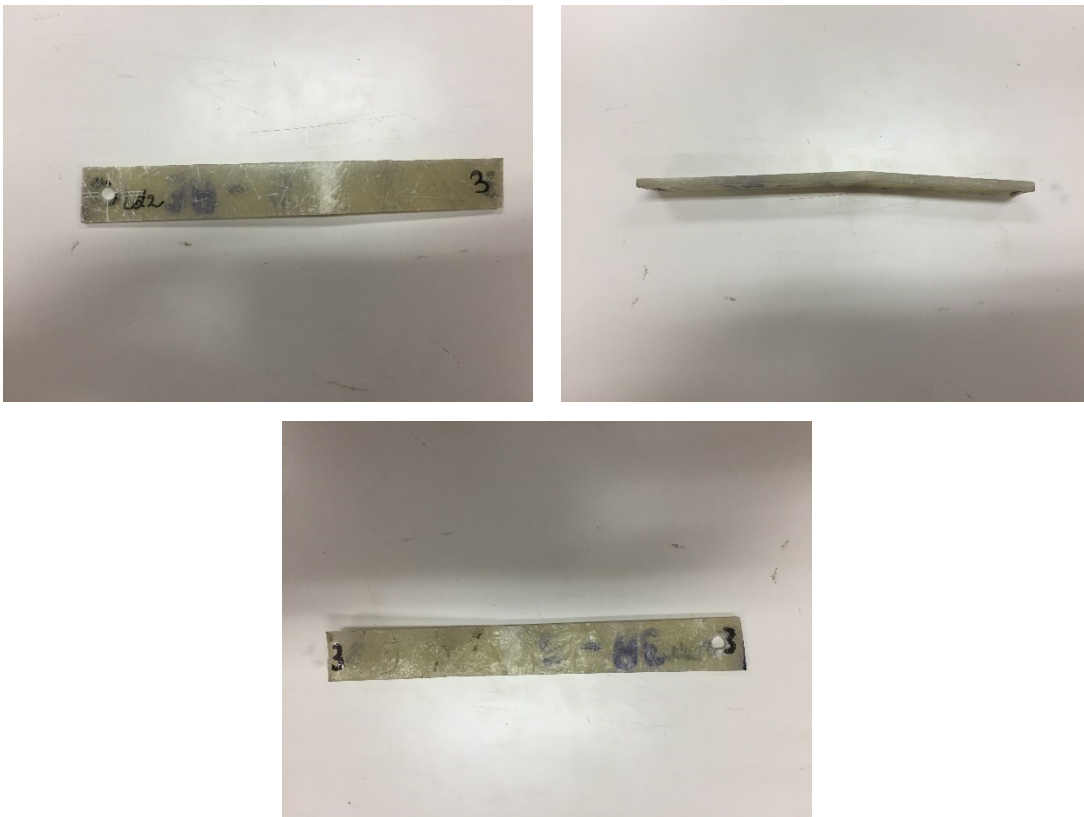


Figura 3.24 - Deformazione provino LOT2-3

- Test sul provino LOT 2-4

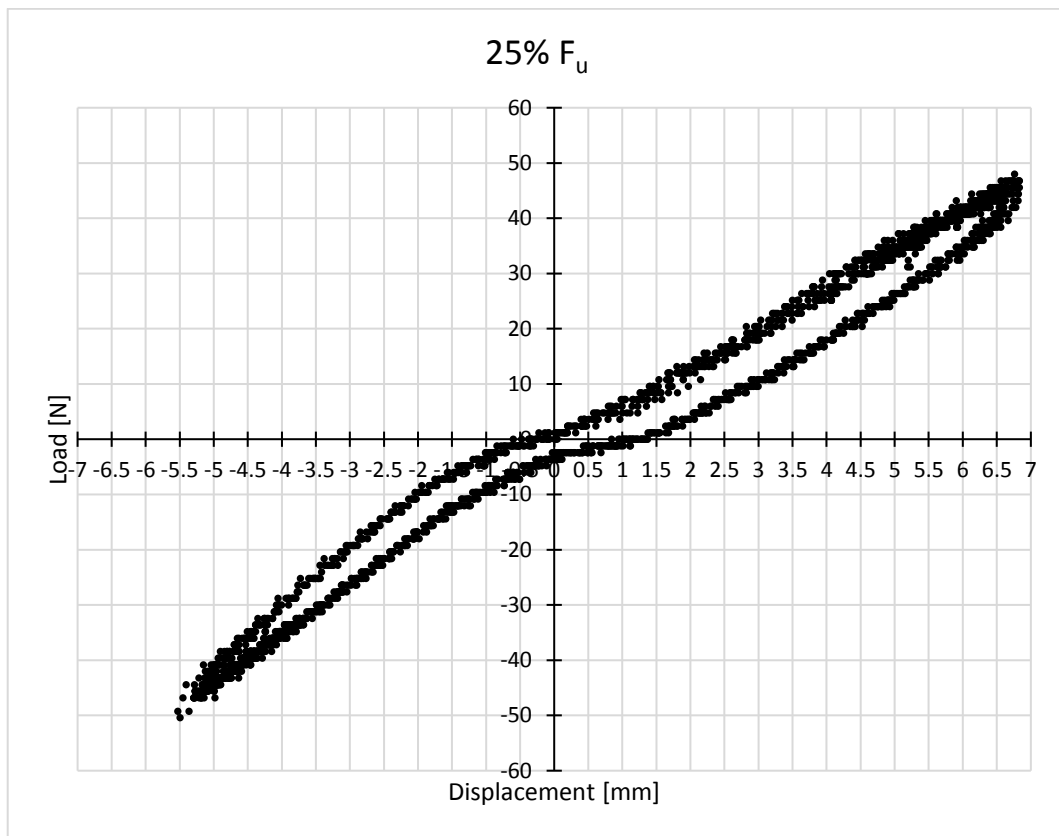


Grafico 3.31 - Cicli con carico al 25% F_u

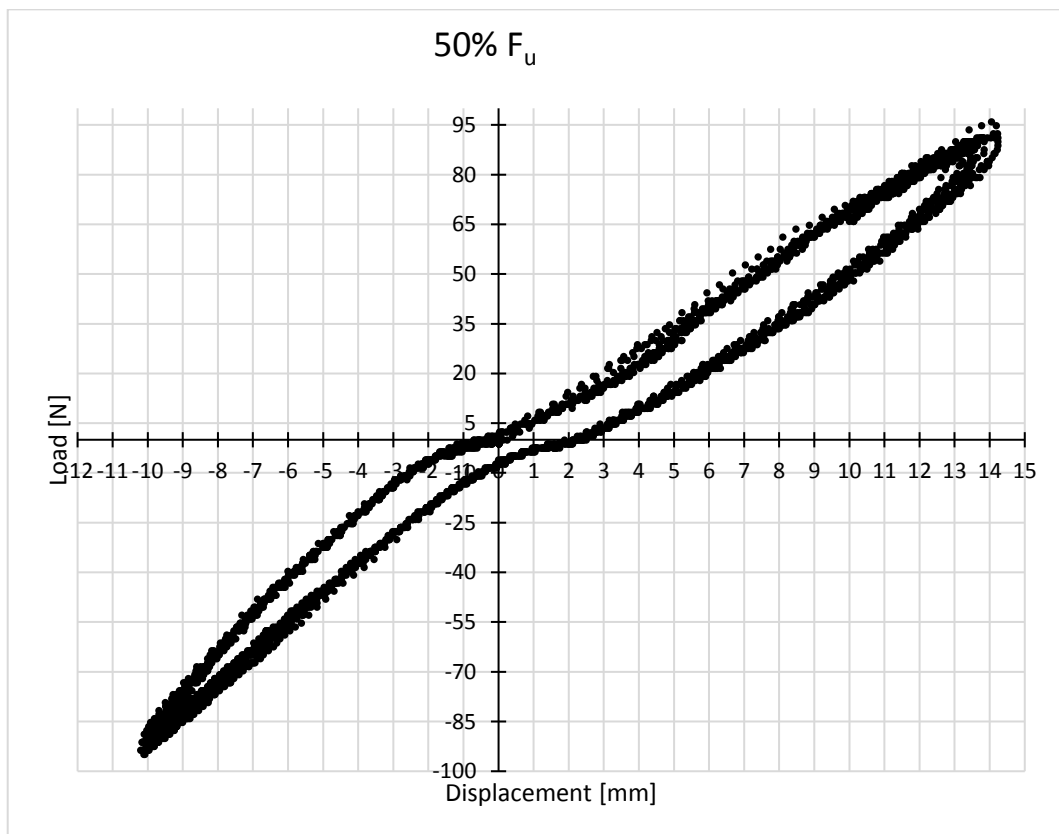


Grafico 3.32 - Cicli con carico al 50% F_u

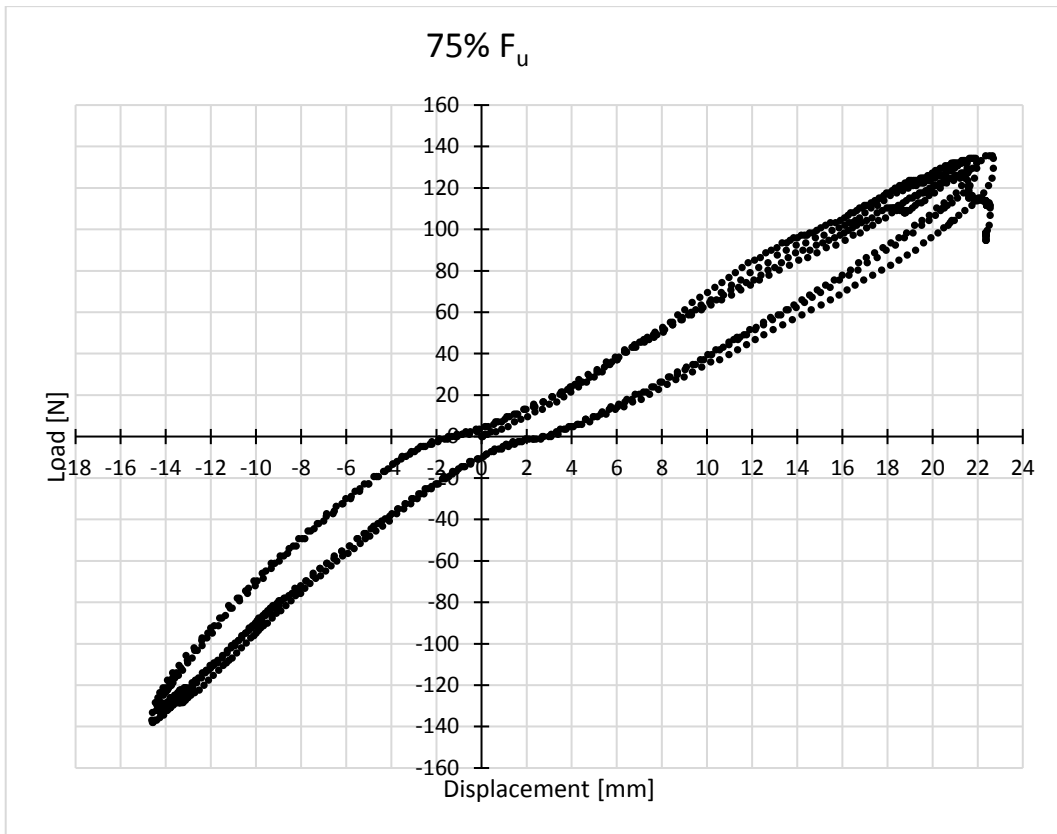


Grafico 3.33 - Cicli con carico al 75% F_u

Il provino ha raggiunto la rottura nel quarto ciclo al 75% F_u .



Figura 3.25 - Deformazione provino LOT2-4

- Test sul provino LOT 2-5

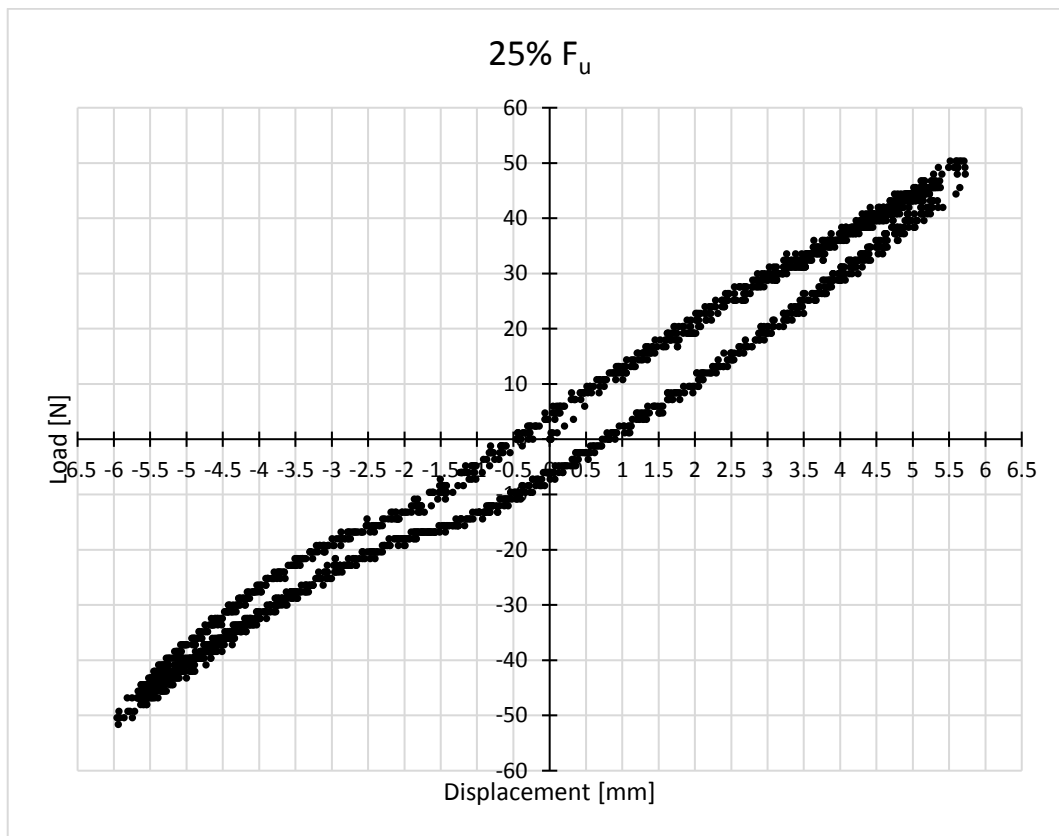


Grafico 3.34 - Cicli con carico al 25% F_u

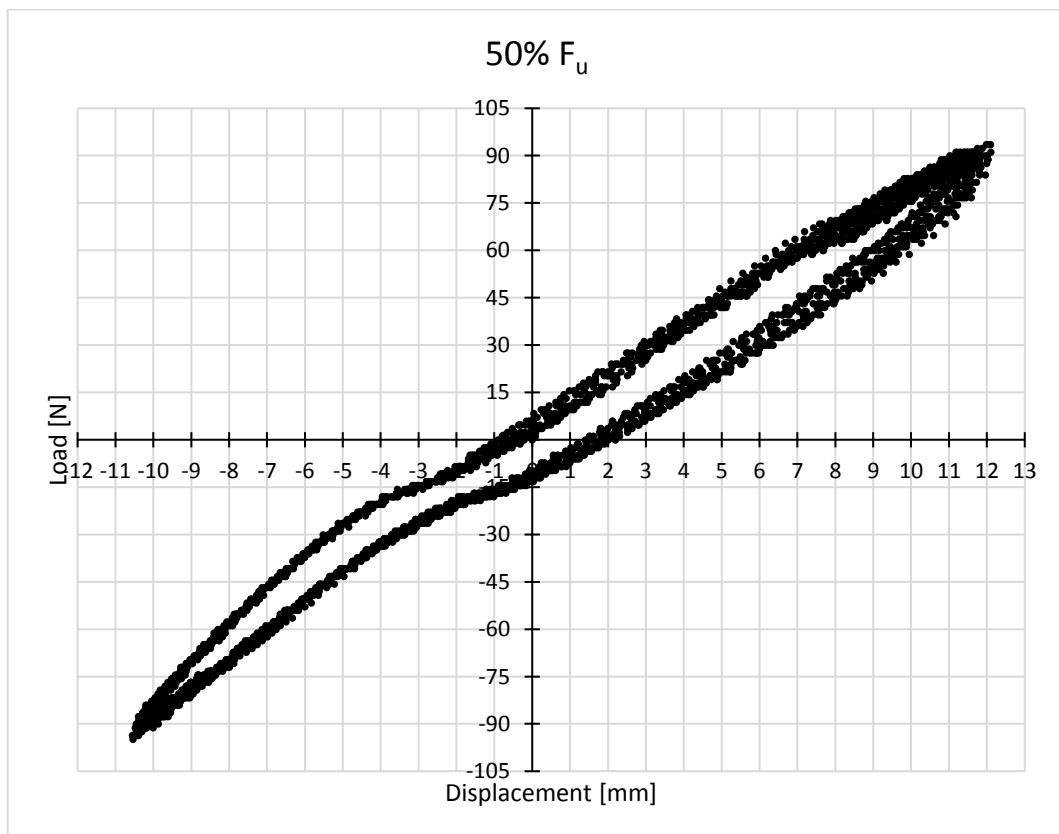


Grafico 3.35 - Cicli con carico al 50% F_u

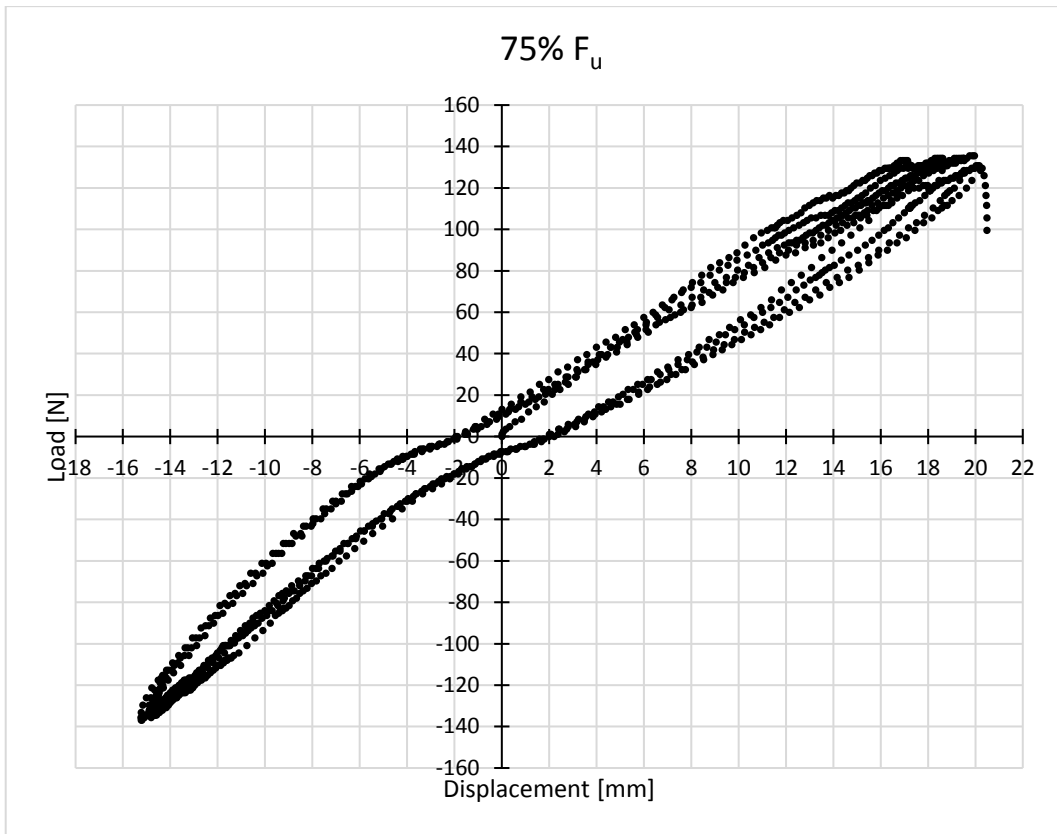


Grafico 3.36 - Cicli con carico al 75% F_u

Il provino ha raggiunto la rottura nel quinto ciclo al 75% F_u .



Figura 3.26 - Deformazione provino LOT2-5

- Test sul provino LOT 2-7

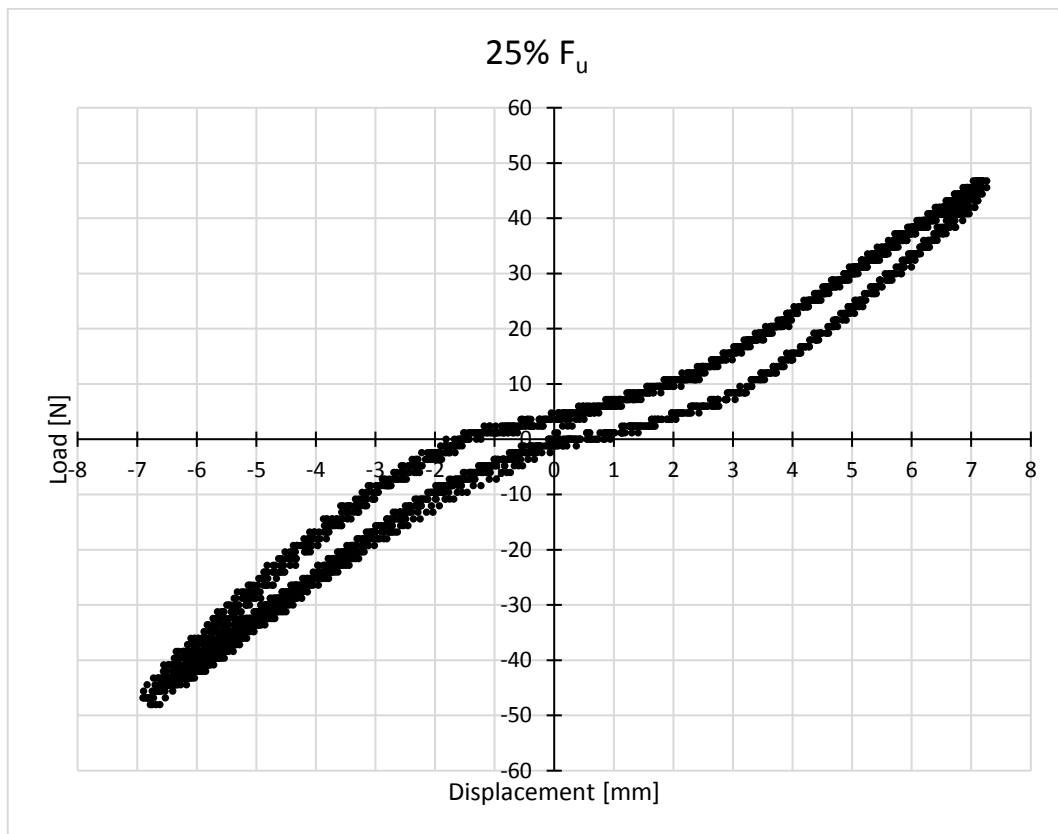


Grafico 3.37 - Cicli con carico al 25% F_u

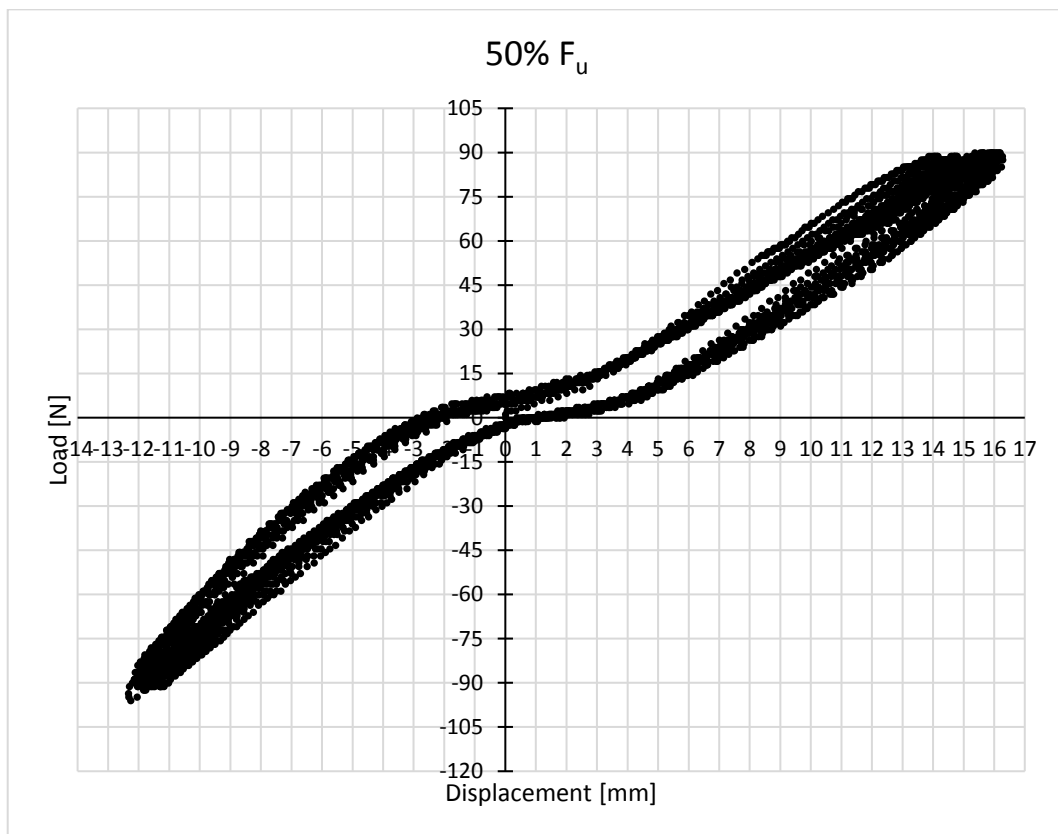


Grafico 3.38 - Cicli con carico al 50% F_u

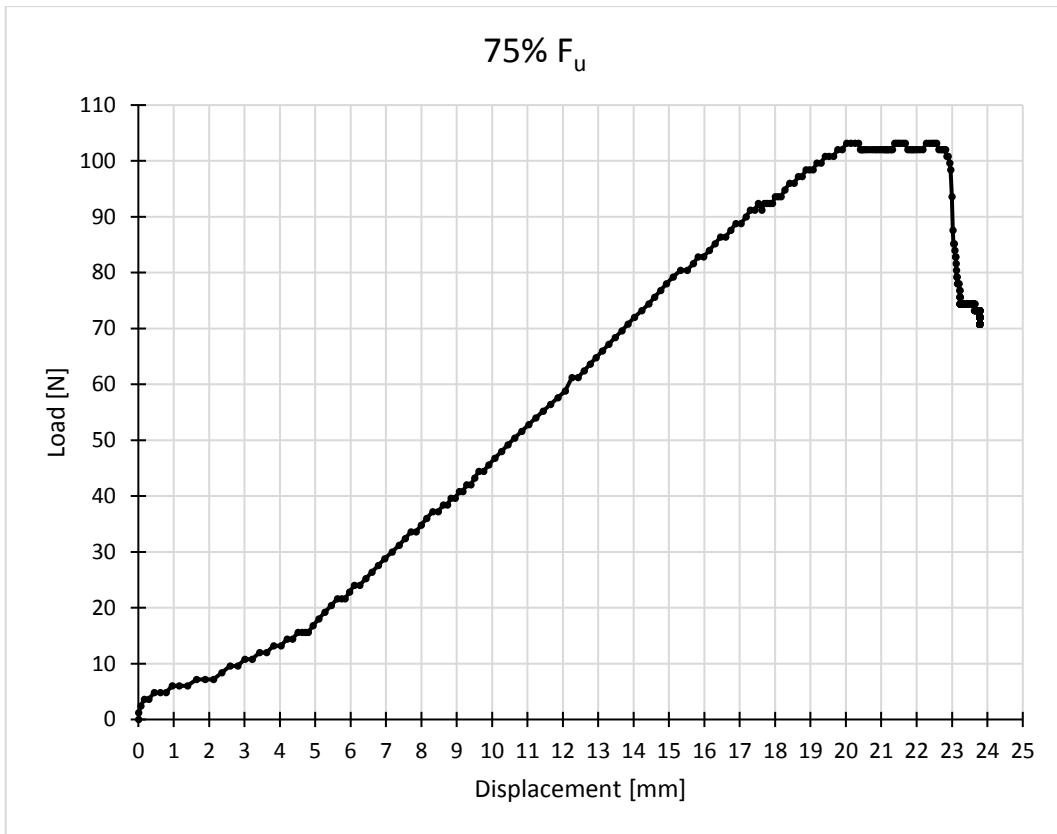


Grafico 3.39 - Cicli con carico al 75% F_u

Il provino ha raggiunto la rottura nel primo ciclo al 75% F_u .

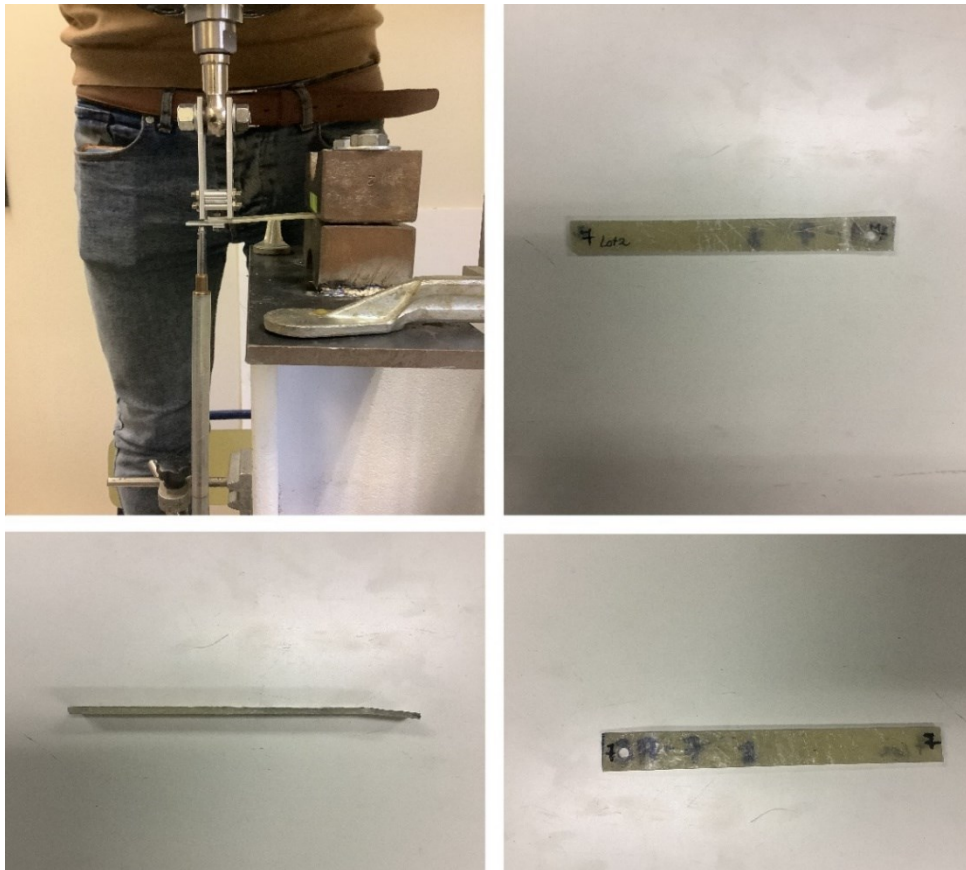


Grafico 3.27 - Deformazione provino LOT2-7

- Test sul provino LOT 2-8

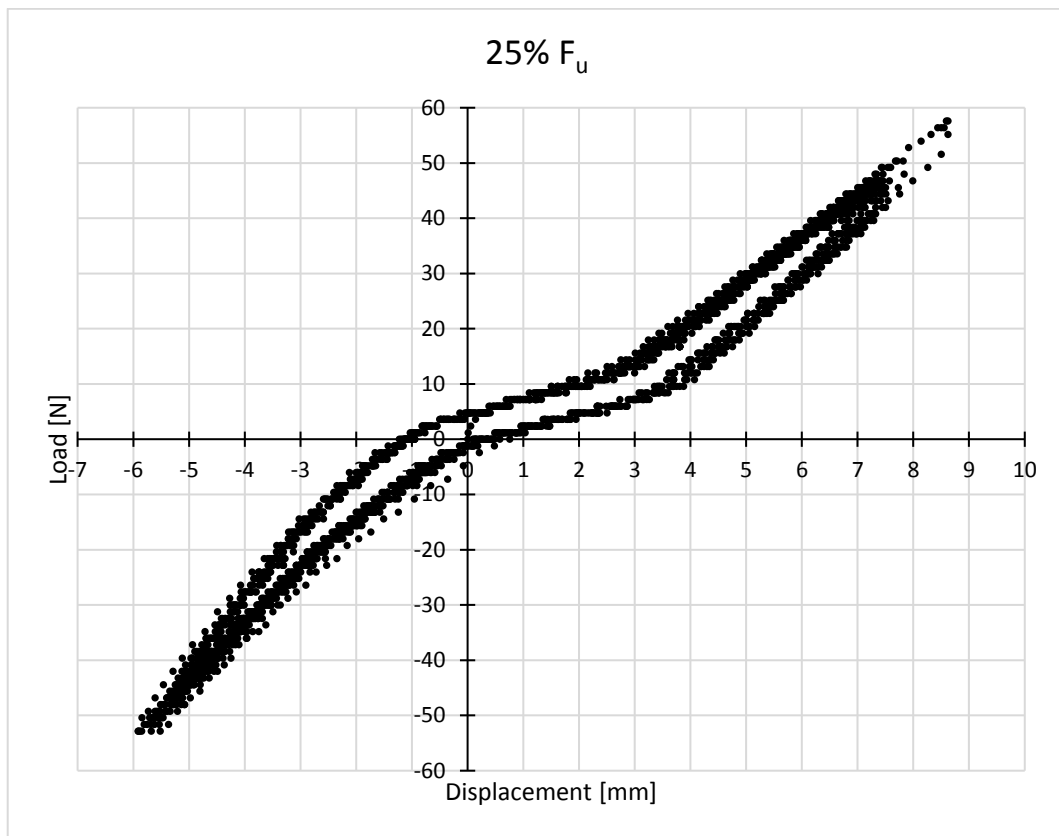


Grafico 3.40 - Cicli con carico al 25% F_u

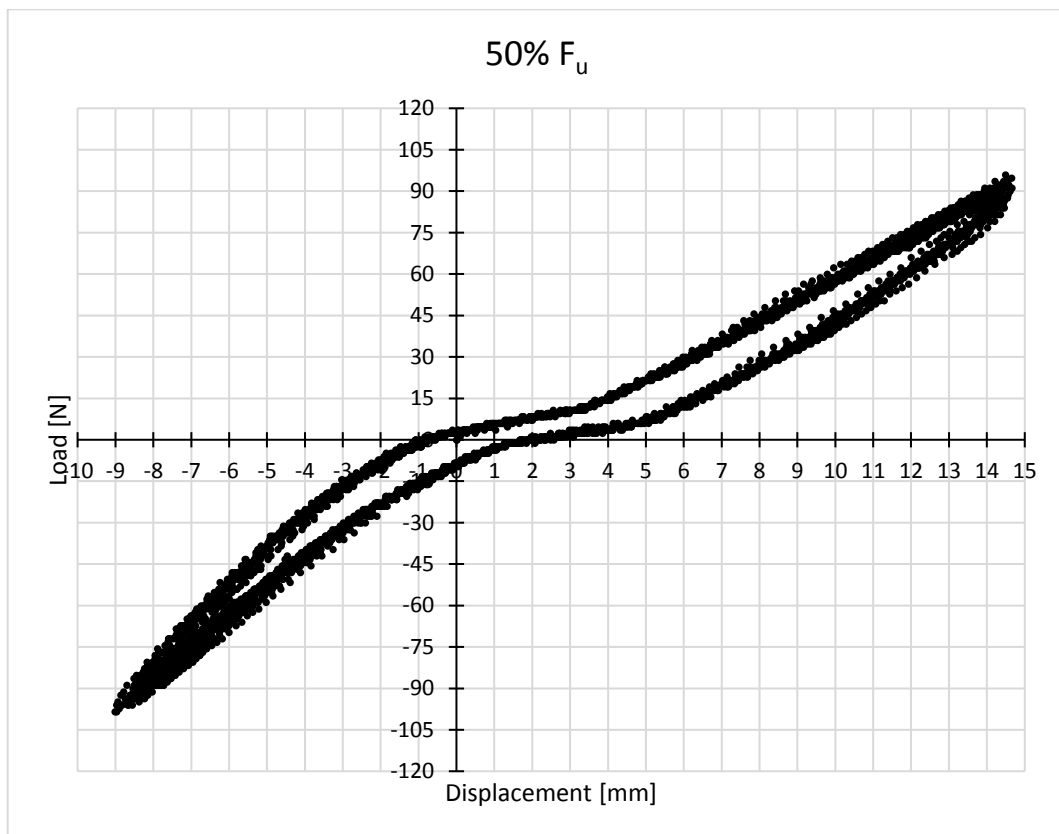


Grafico 3.41 - Cicli con carico al 50% F_u

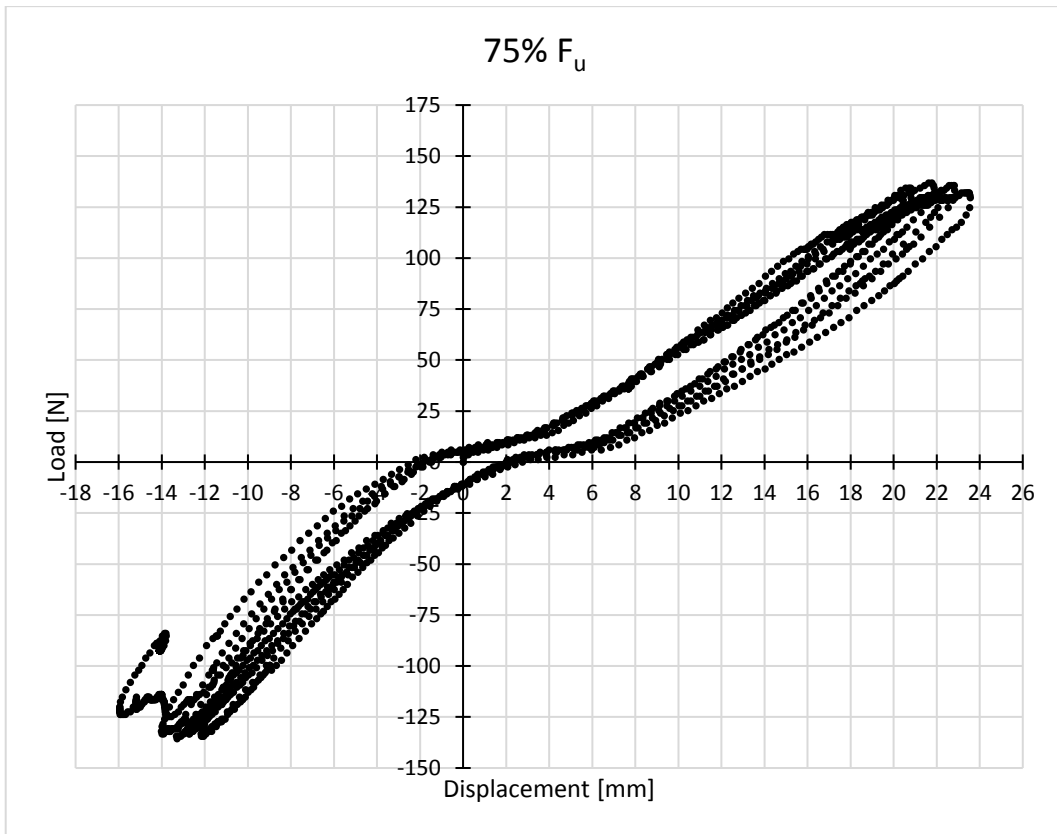


Grafico 3.42 - Cicli con carico al 75% F_u

Il provino ha raggiunto la rottura nel sesto ciclo al 75% F_u .



Figura 3.28 - Deformazione provino LOT2-8

- Test sul provino LOT 2-9

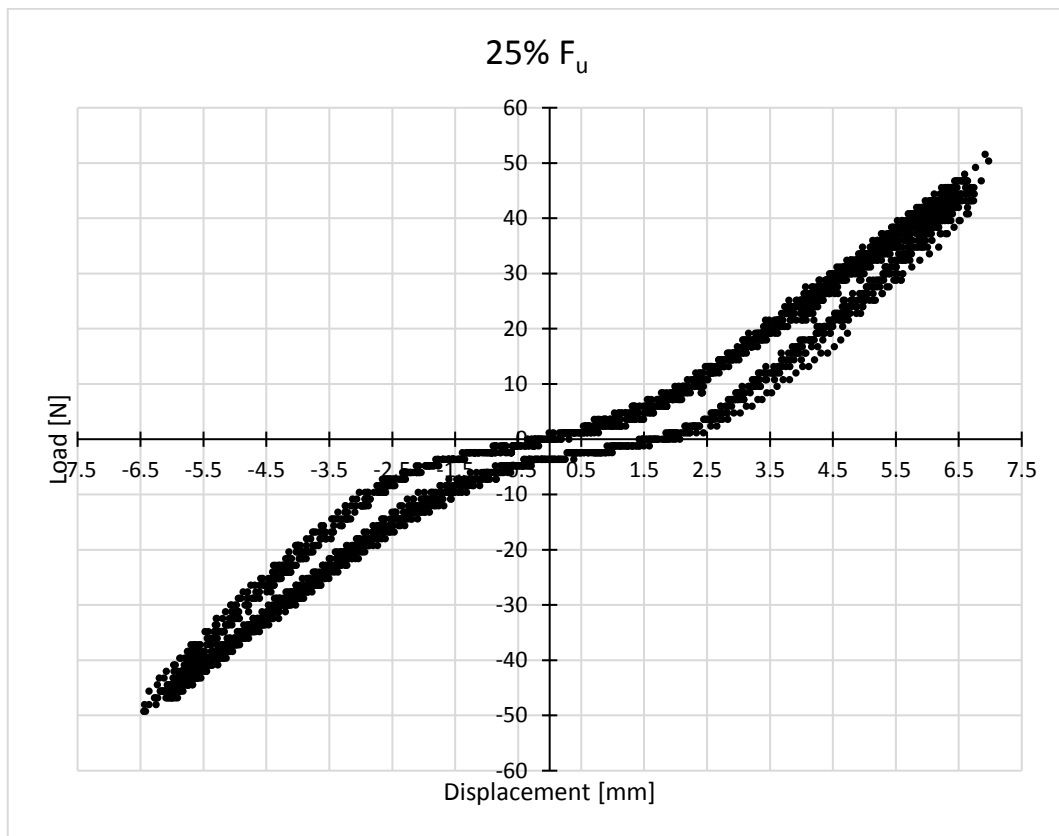


Grafico 3.43 - Cicli con carico al 25% F_u

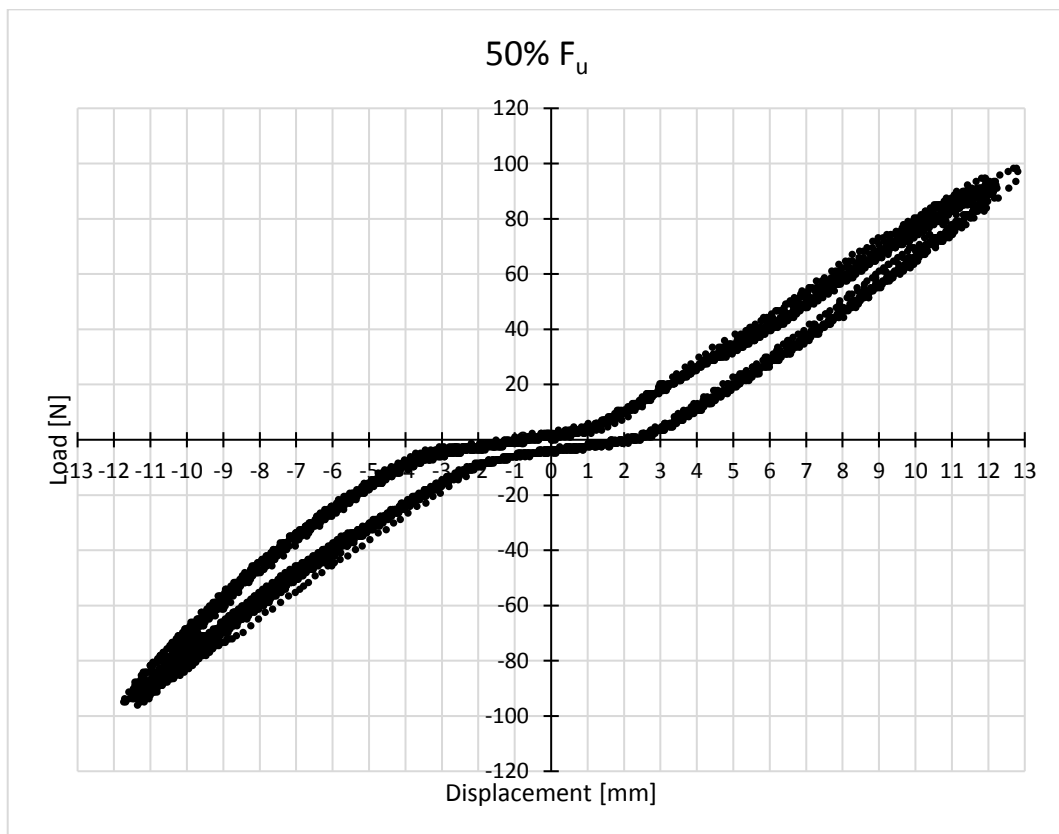


Grafico 3.44 - Cicli con carico al 50% F_u

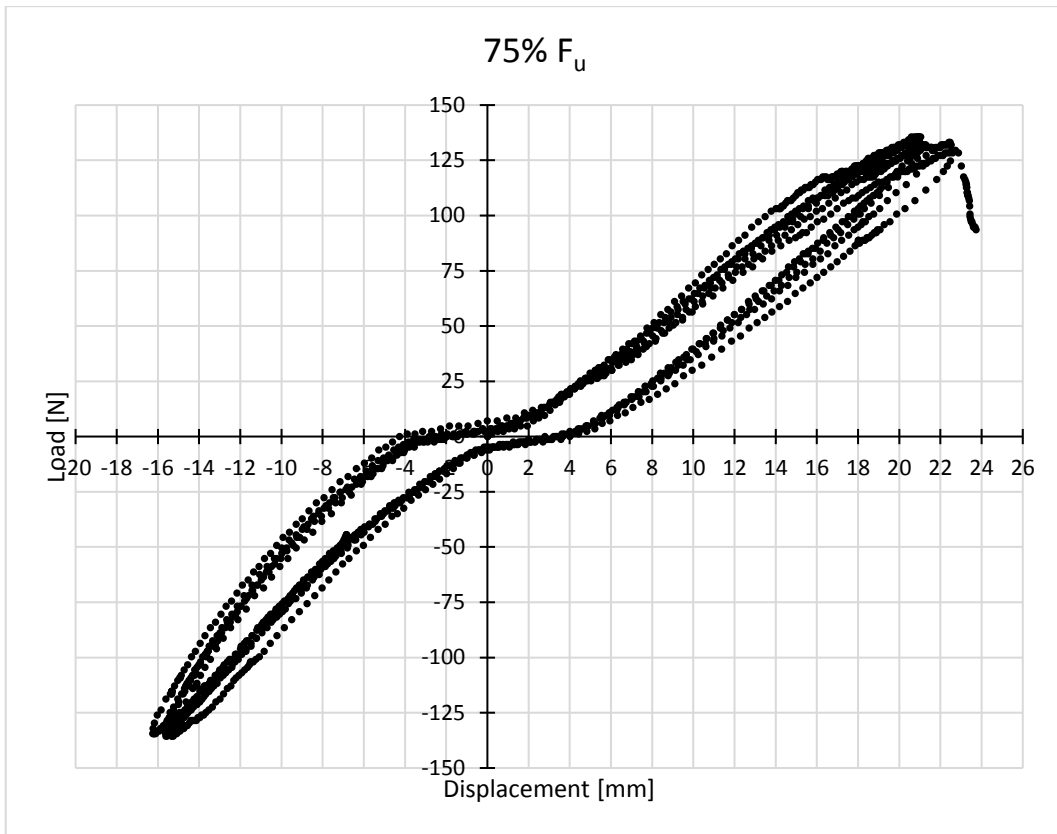


Grafico 3.45 - Cicli con carico al 75% F_u

Il provino ha raggiunto la rottura nel sesto ciclo al 75% F_u .



Figura 3.29 - Deformazione provino LOT2-9

- Test sul provino LOT 3-3

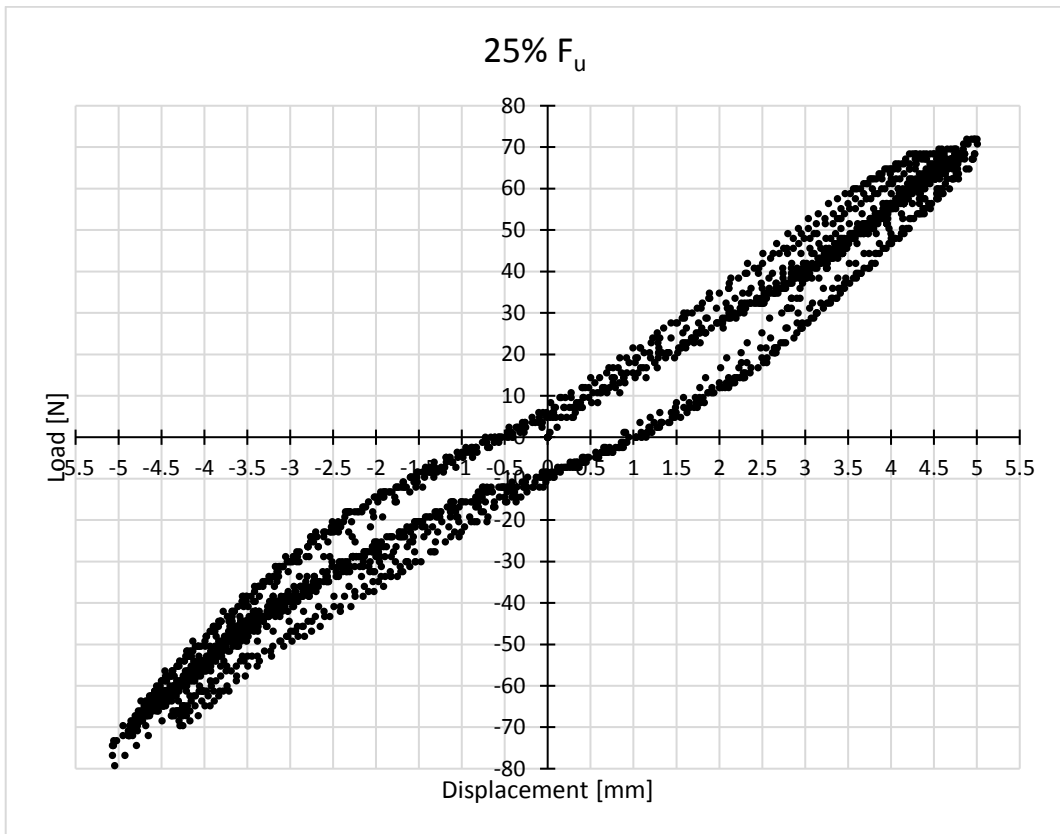


Grafico 3.46 - Cicli con carico al 25% F_u

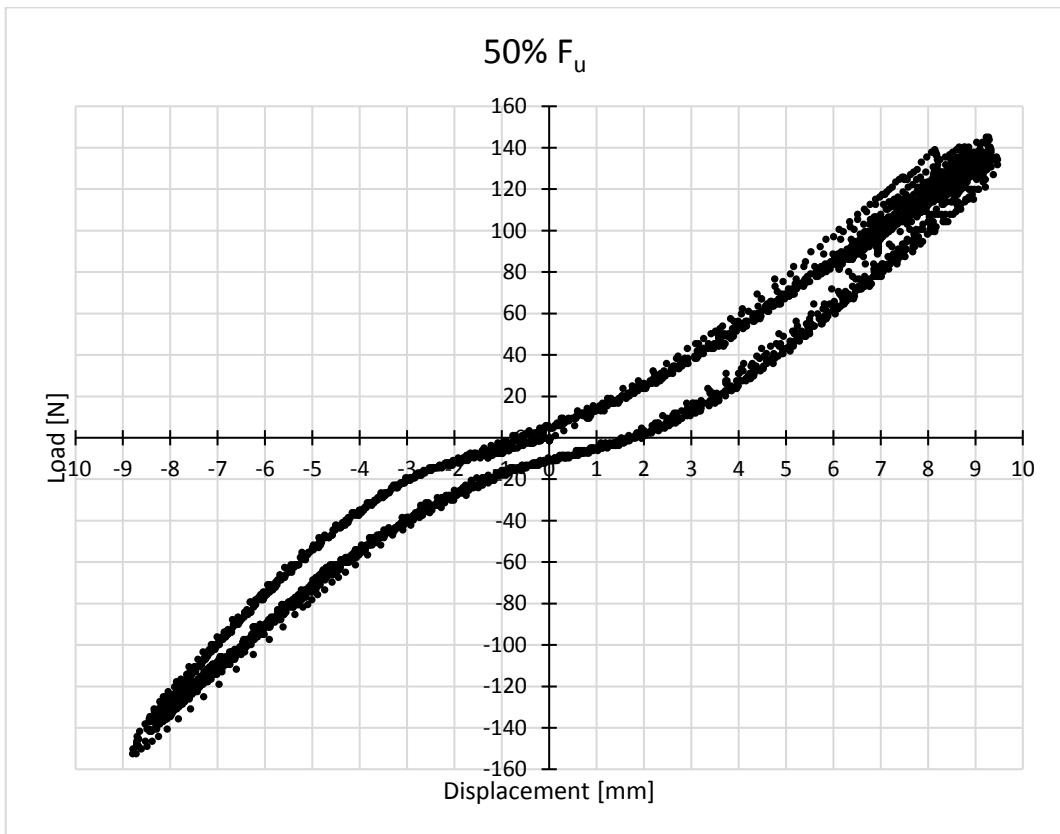


Grafico 3.47 - Cicli con carico al 50% F_u

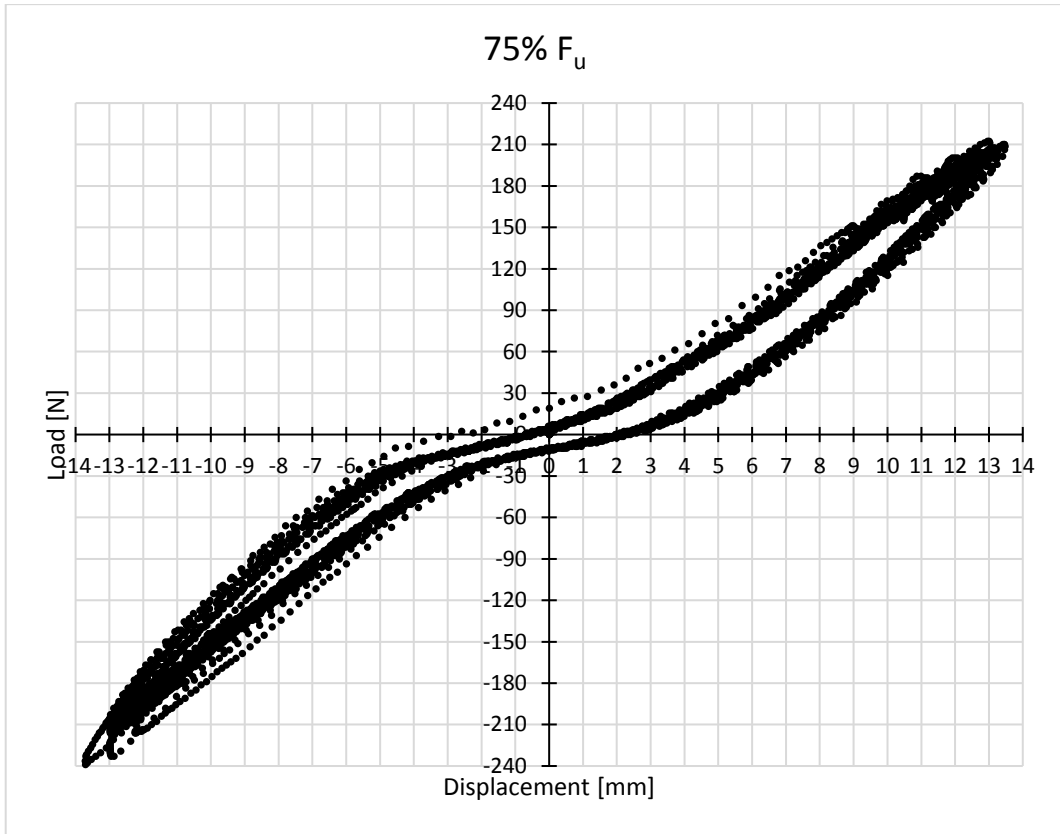


Grafico 3.48 - Cicli con carico al 75% F_u



Grafico 3.30 - Deformazione provino LOT3-3

- Test sul provino LOT 3-4

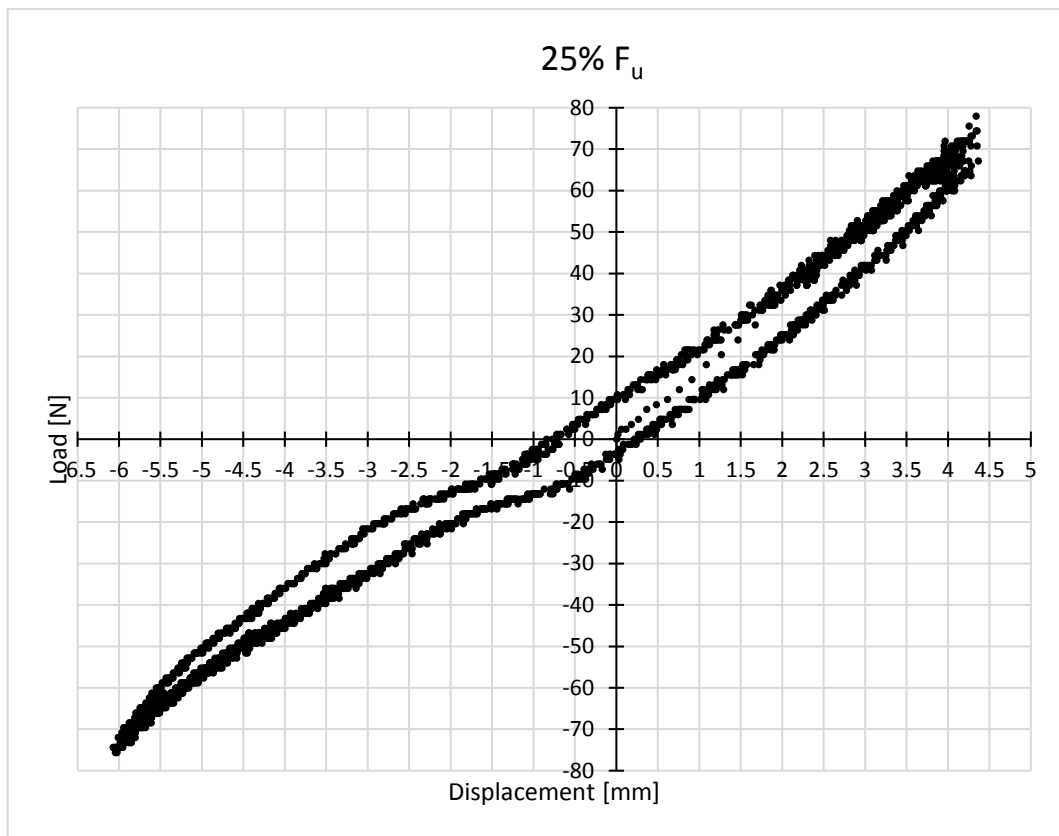


Grafico 3.49 - Cicli con carico al 25% F_u

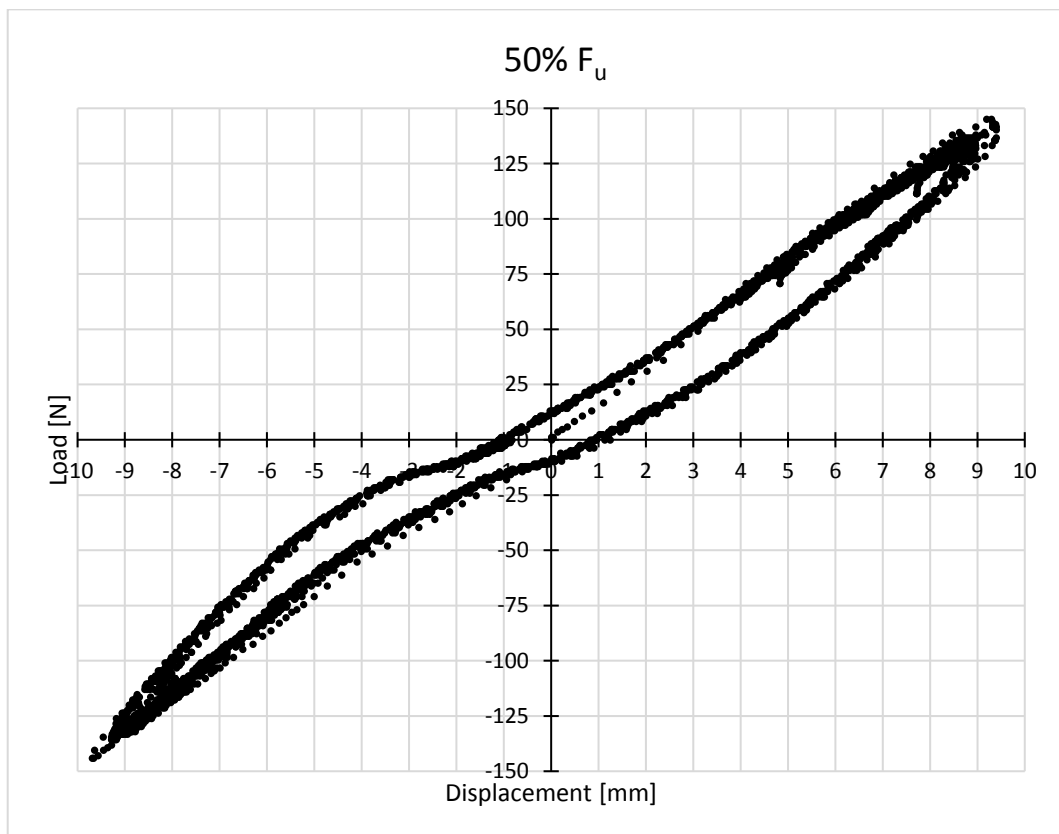


Grafico 3.50 - Cicli con carico al 50% F_u

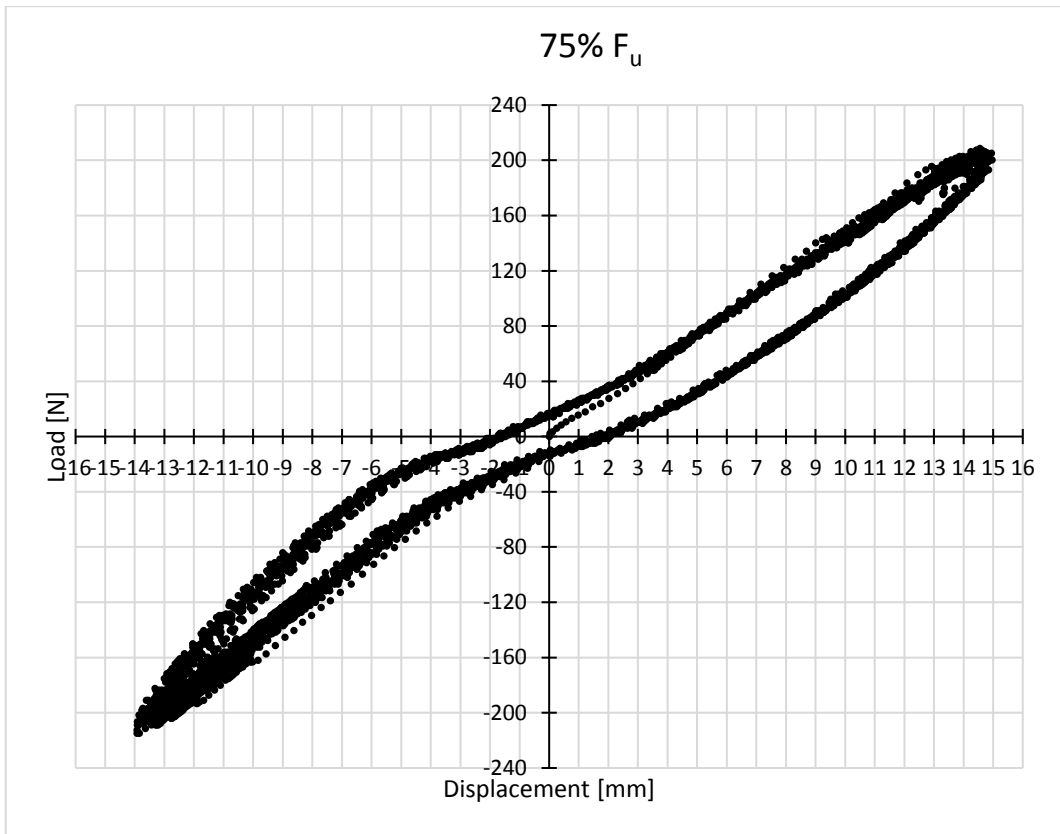


Grafico 3.51 - Cicli con carico al 75% F_u



Figura 3.31 - Deformazione provino LOT3-4

- Test sul provino LOT 3-5

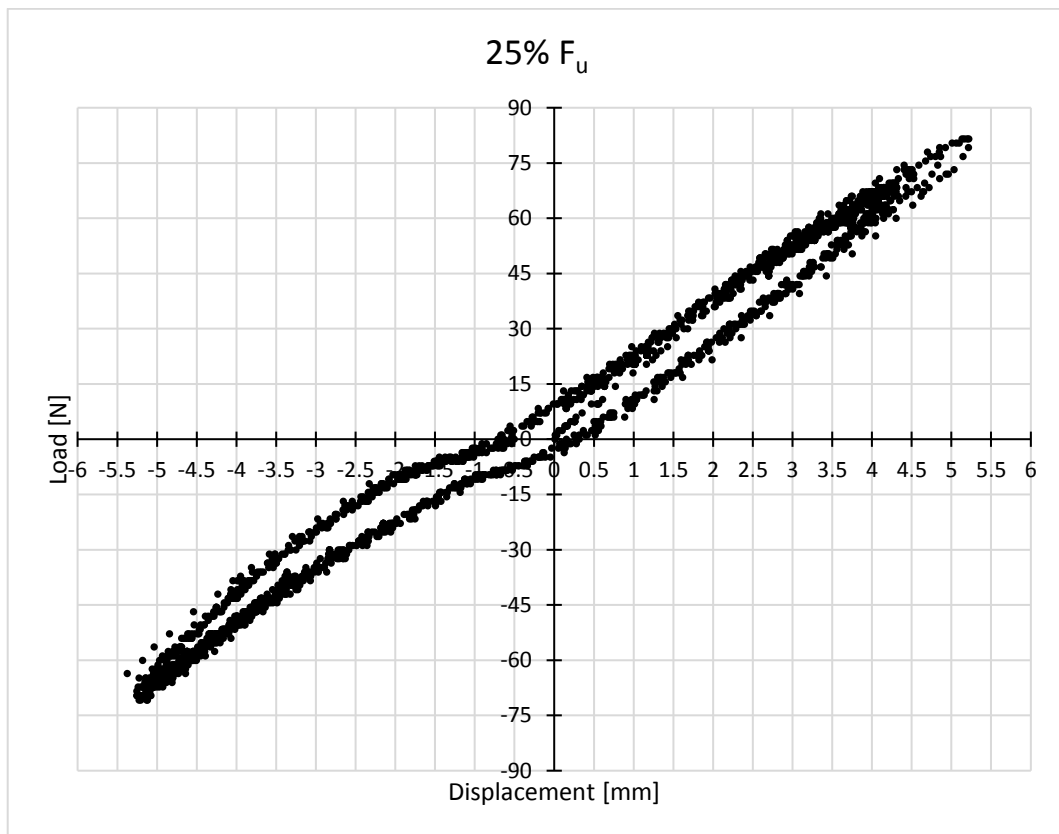


Grafico 3.52 - Cicli con carico al 25% F_u

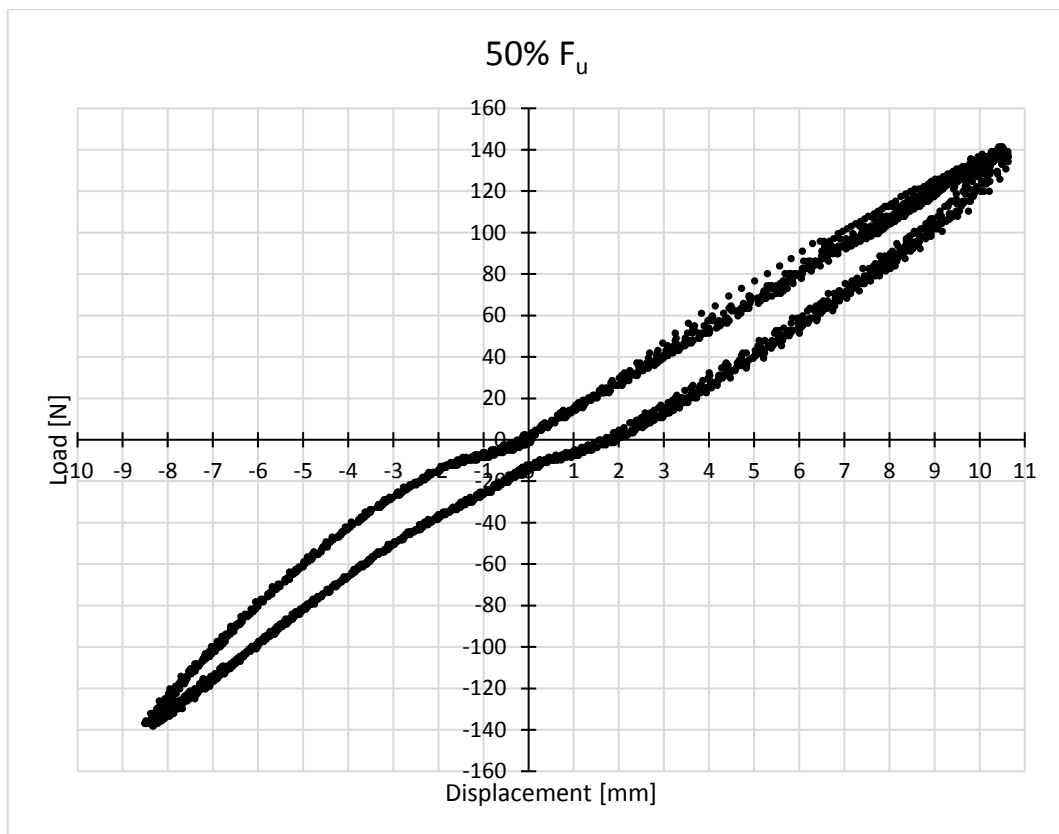


Grafico 3.53 - Cicli con carico al 50% F_u

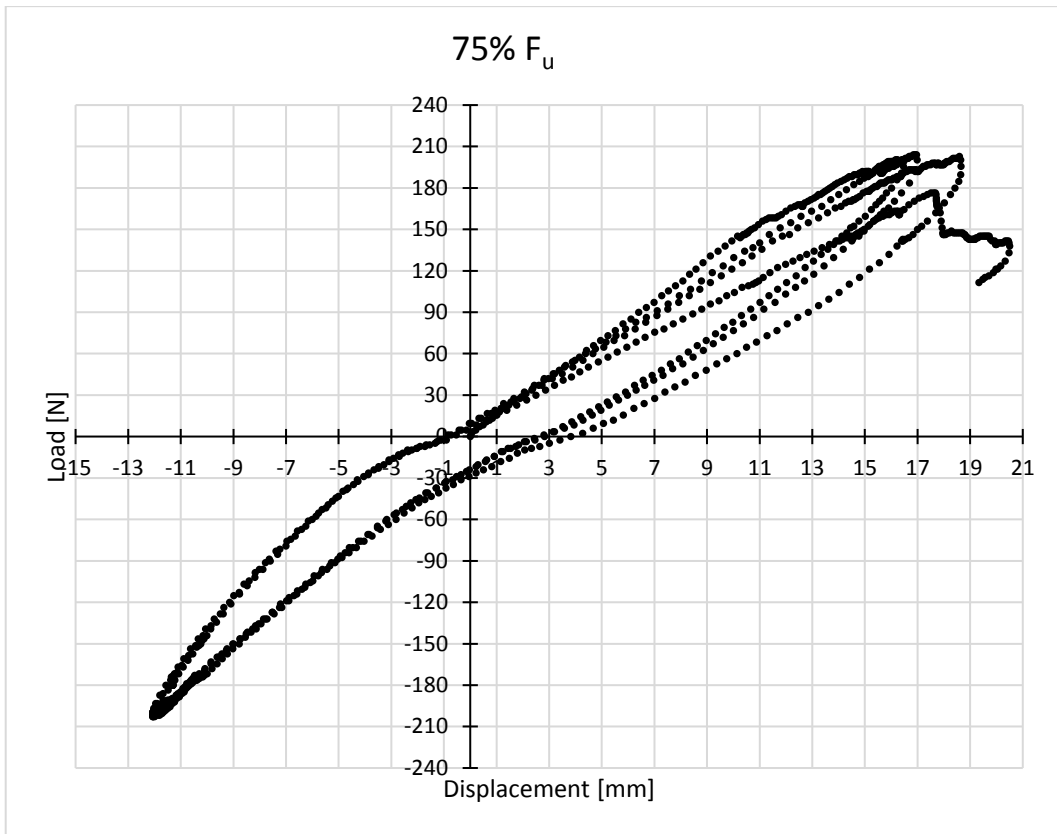


Grafico 3.54 - Cicli con carico al 75% F_u

Il provino ha raggiunto la rottura nel quarto ciclo al 75% F_u .



Figura 3.32 - Deformazione provino LOT3-5

- Test sul provino LOT 3-8

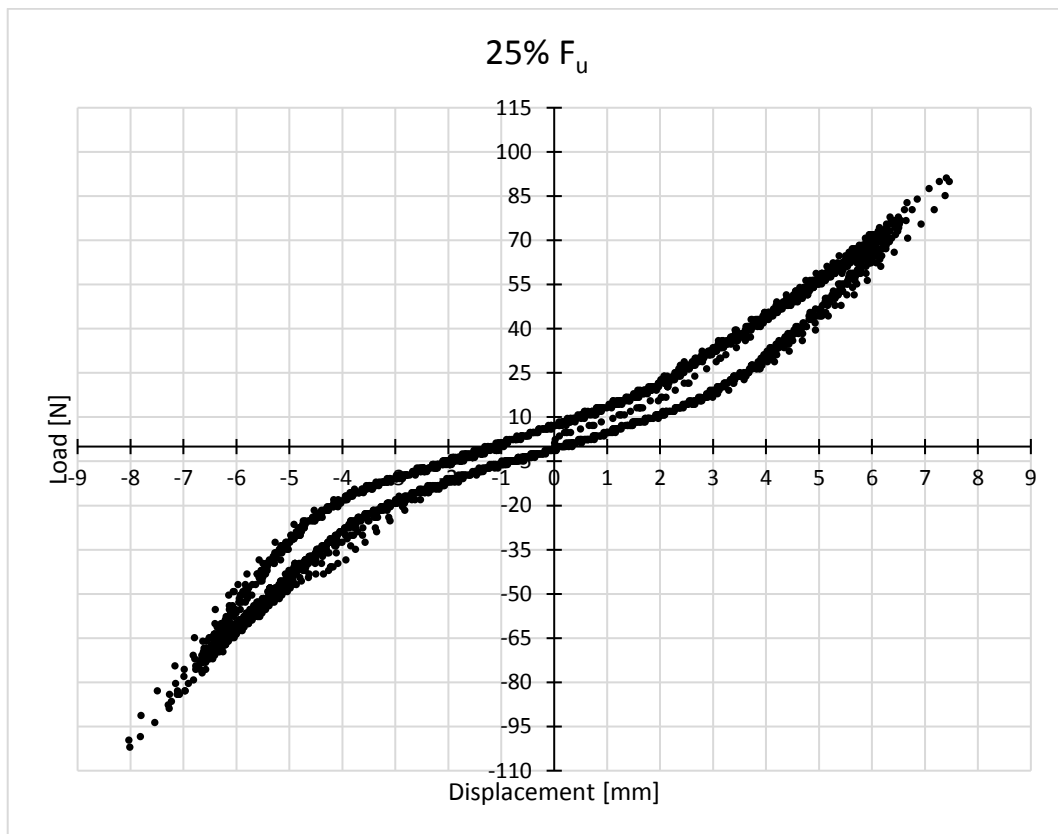


Grafico 3.55 - Cicli con carico al 25% F_u

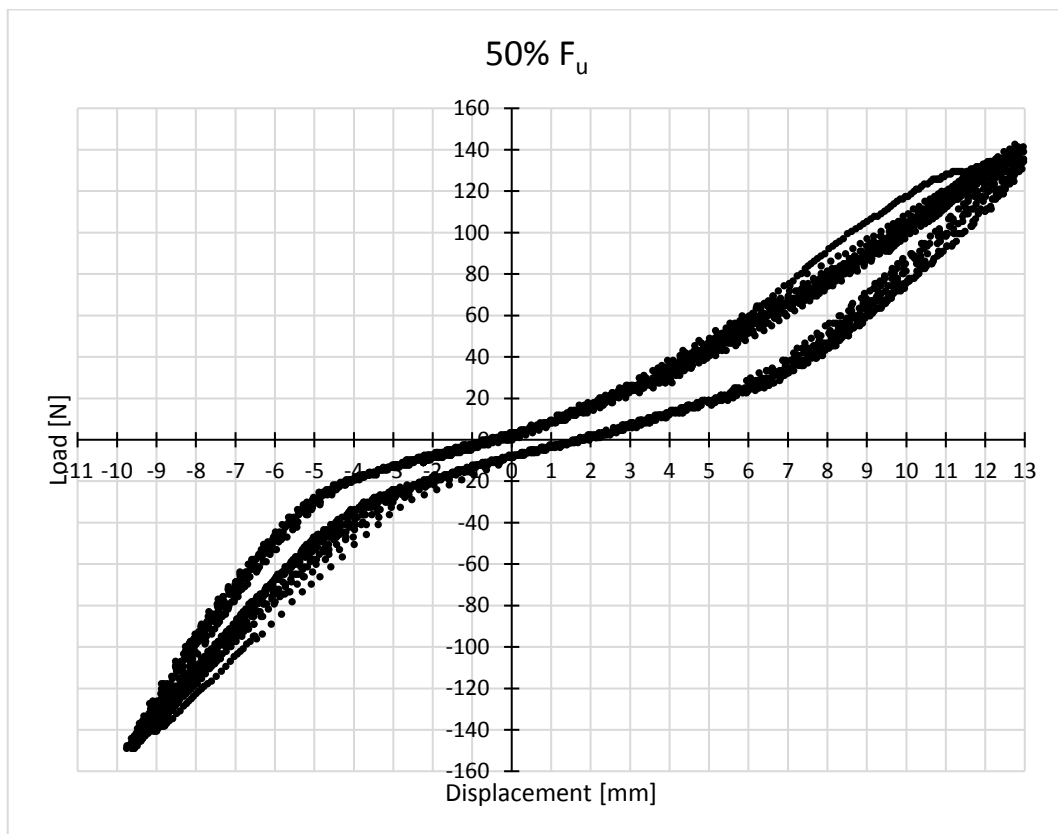


Grafico 3.56 - Cicli con carico al 50% F_u

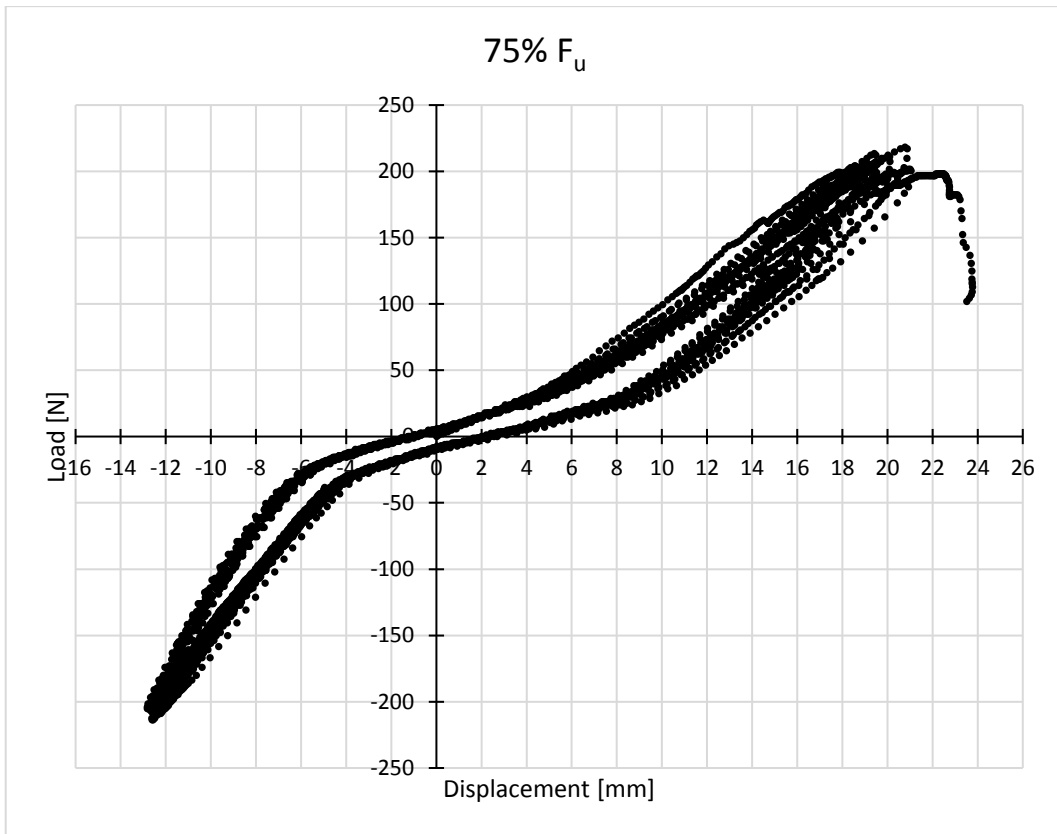


Grafico 3.57 - Cicli con carico al 75% F_u

Il provino ha raggiunto la rottura nel quindicesimo ciclo al 75% F_u .



Figura 3.33 - Deformazione provino LOT3-8

- Test sul provino LOT 3-10

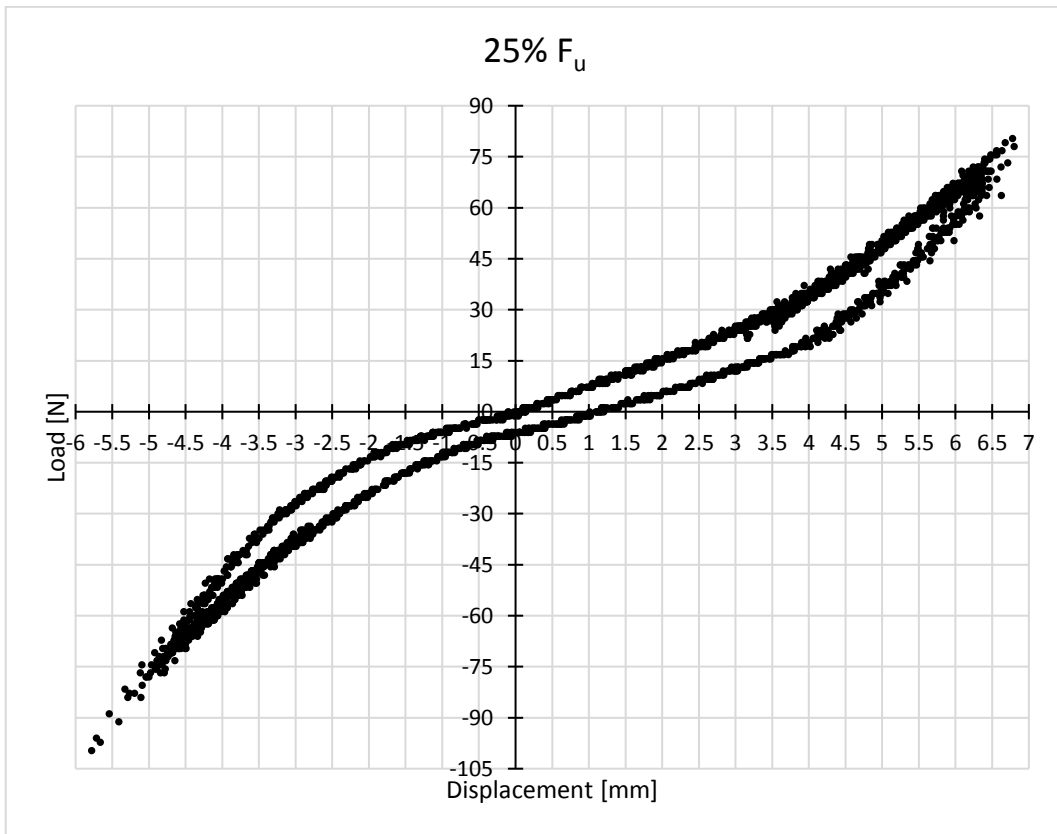


Grafico 3.58 - Cicli con carico al 25% F_u

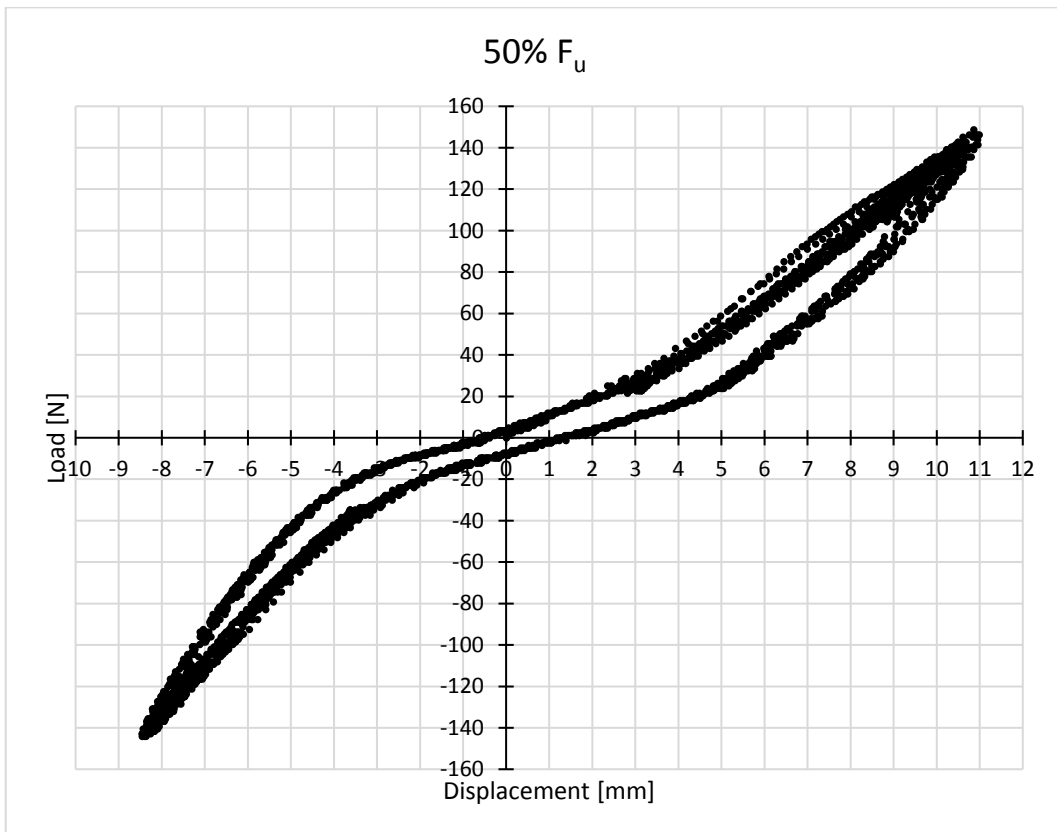


Grafico 3.59 - Cicli con carico al 50% F_u

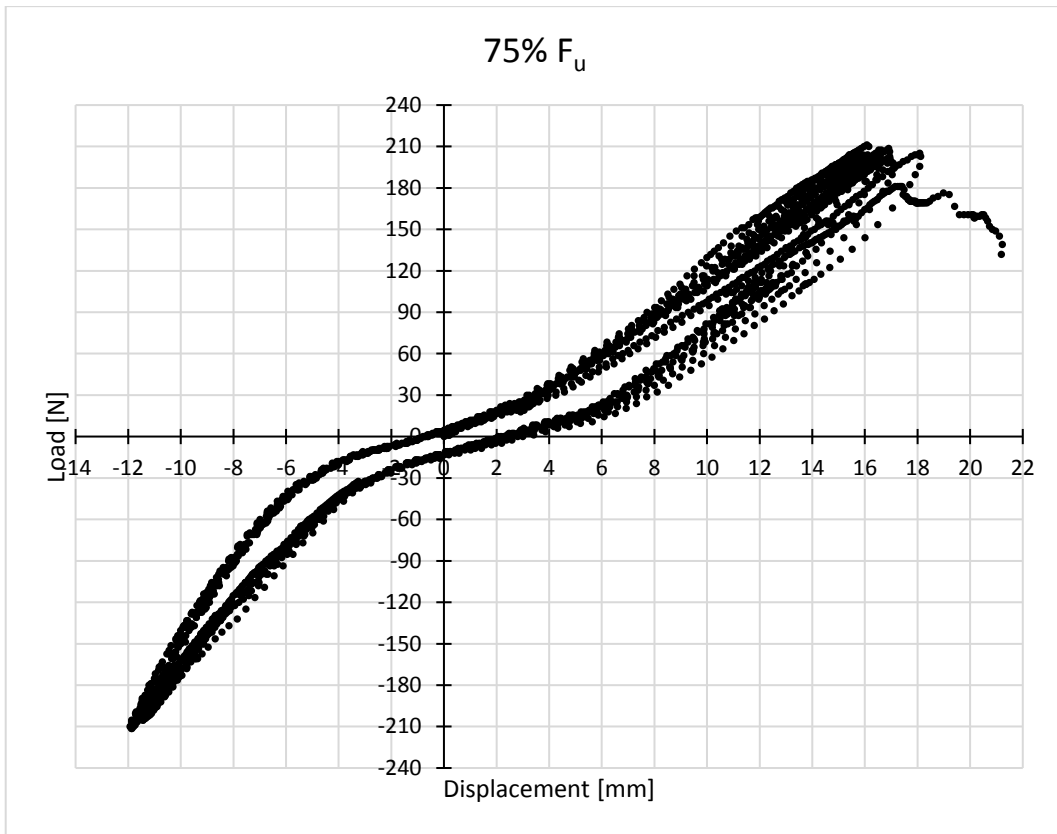


Grafico 3.60 - Cicli con carico al 75% F_u

Il provino ha raggiunto la rottura nel dodicesimo ciclo al 75% F_u .

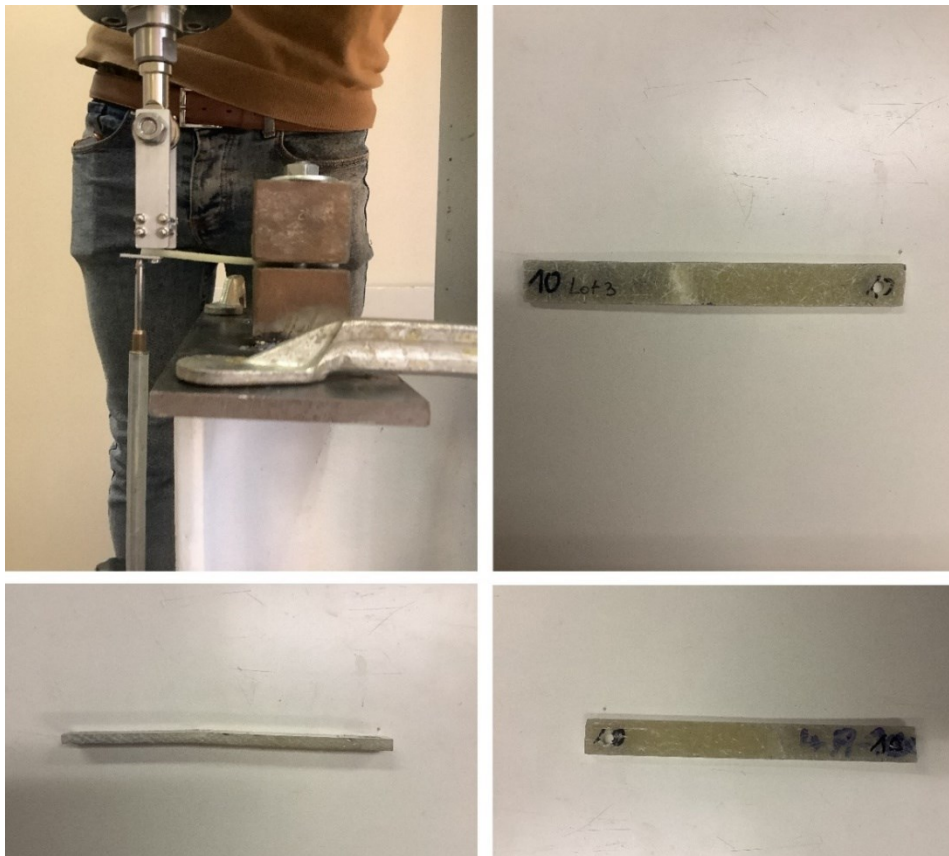


Figura 3.34 - Deformazione provino LOT3-10

- Test sul provino LOT 3-11

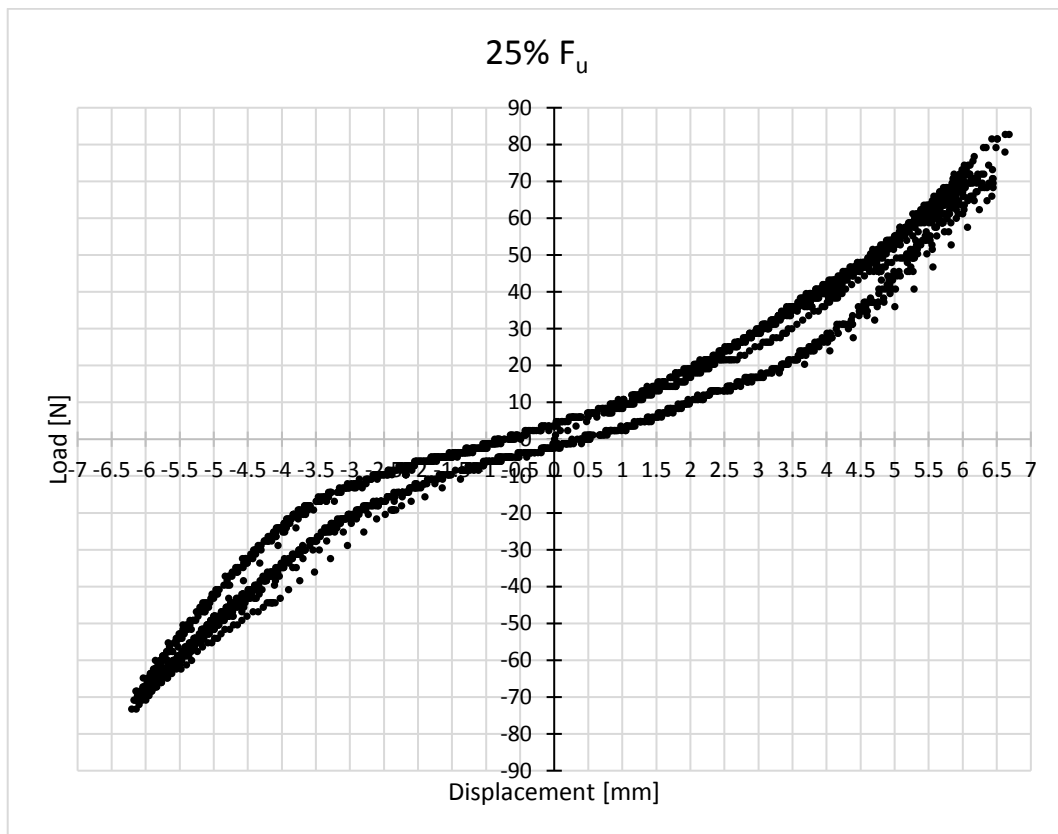


Grafico 3.61 - Cicli con carico al 25% F_u

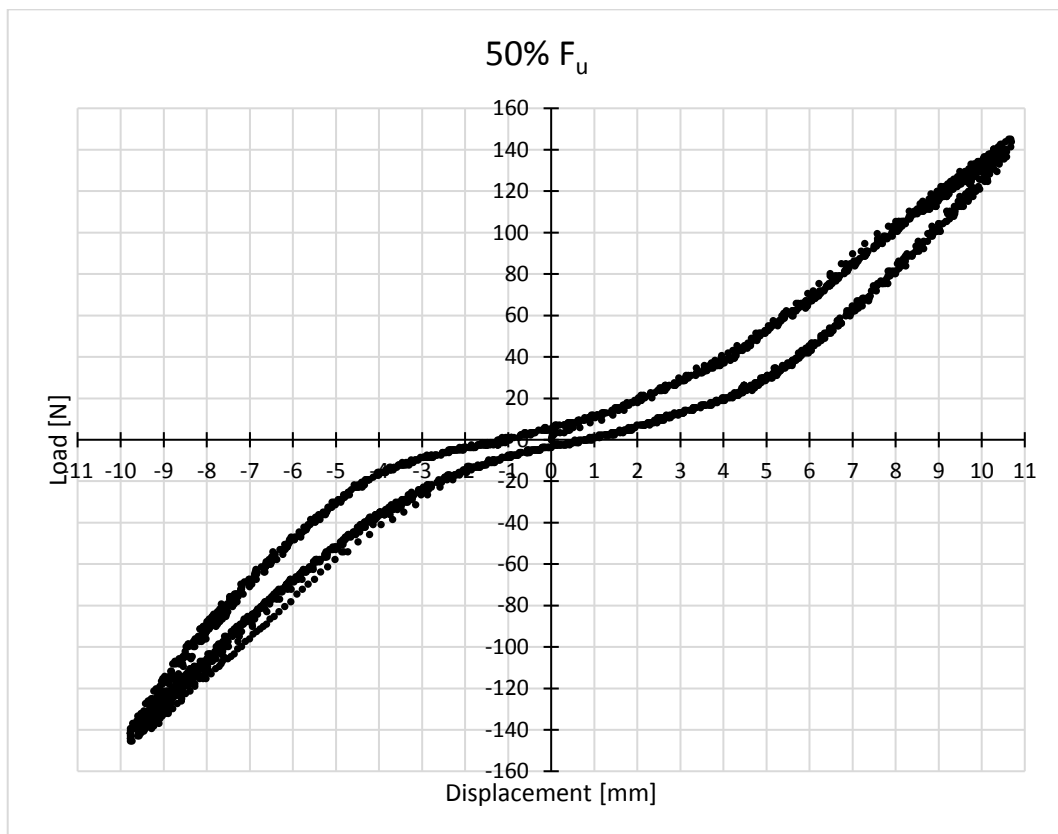


Grafico 3.62 - Cicli con carico al 50% F_u

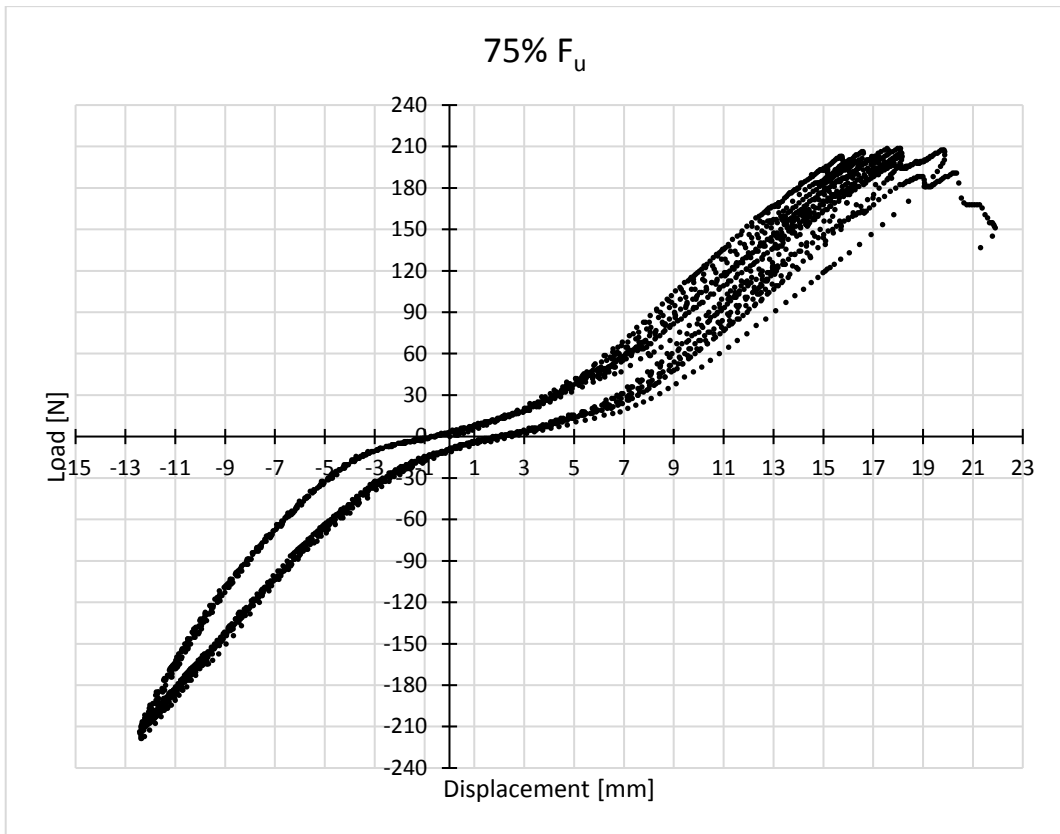


Grafico 3.63 - Cicli con carico al 75% F_u

Il provino ha raggiunto la rottura nel dodicesimo ciclo al 75% F_u .



Figura 3.35 - Deformazione provino LOT3-11

4 ELABORAZIONE DATI

Per una valutazione della risposta sul comportamento dei provini in GFRP è stato necessario analizzare i grafici Load-Displacement, ottenuti dai provini saggiati con prove cicliche ripetute, considerando lo spostamento che subisce il provino nei vari cicli e, nello specifico, si è pensato di andare a comparare il primo ciclo con il ventesimo valutandone lo spostamento nel primo quadrante positivo sempre in termini di carico e spostamento.

Per effettuare tale confronto tra i cicli è stato necessario elaborare i dati traslando lo spostamento del ventesimo ciclo dello scarto necessario per poterlo comparare con il primo ciclo affinché potesse essere valutato il suddetto spostamento tra i cicli ad inizio e fine prova.

Tale confronto è stato quindi effettuato per tutti i provini saggiati considerando tutte e tre le percentuali dello sforzo di rottura utilizzate per caricare i provini nei test (25% F_u - 50% F_u - 75% F_u).

Un ulteriore elaborato utile alla valutazione del comportamento dei provini in GFRP è quello che mette a confronto la curva unidirezionale a rottura caratteristica per ogni tipologia di LOT con la curva di inviluppo costruita prendendo i punti di spostamento massimo tra il primo e ventesimo ciclo nei vari diagrammi con l'aggiunta dell'ultimo ciclo discendente per valutare anche l'eventuale rottura del provino.

Di seguito vengono riportati tutti i grafici divisi per tipologia di LOT e percentuale di carico F_u .

- Provino LOT 1-3

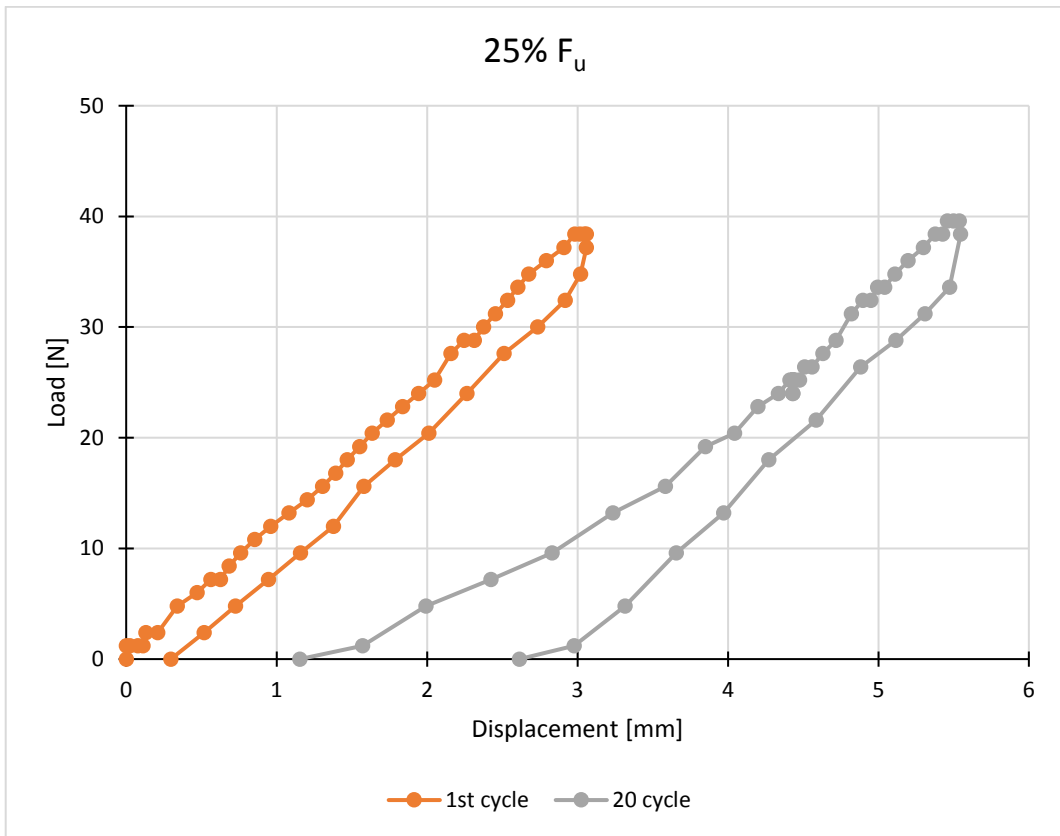


Grafico 4.1 - Confronto tra 1° e 20° ciclo al 25% di F_u

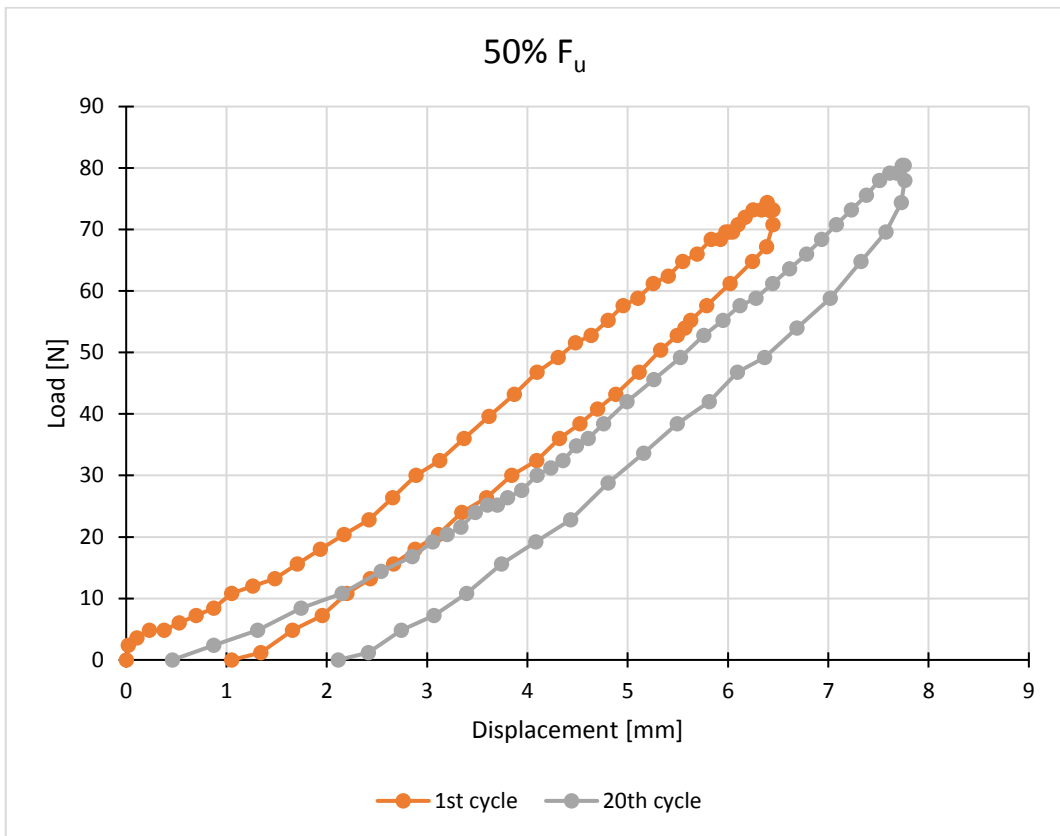


Grafico 4.2 - Confronto tra 1° e 20° ciclo al 50% di F_u

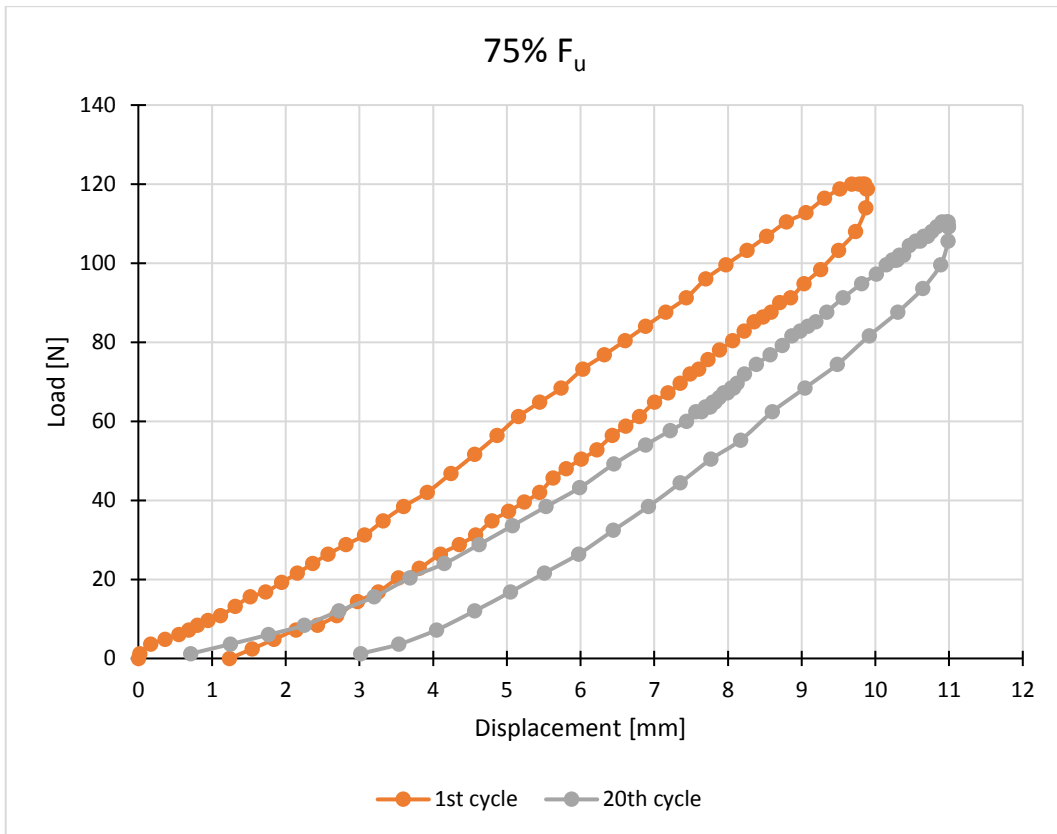


Grafico 4.3 - Confronto tra 1° e 20° ciclo al 75% di F_u

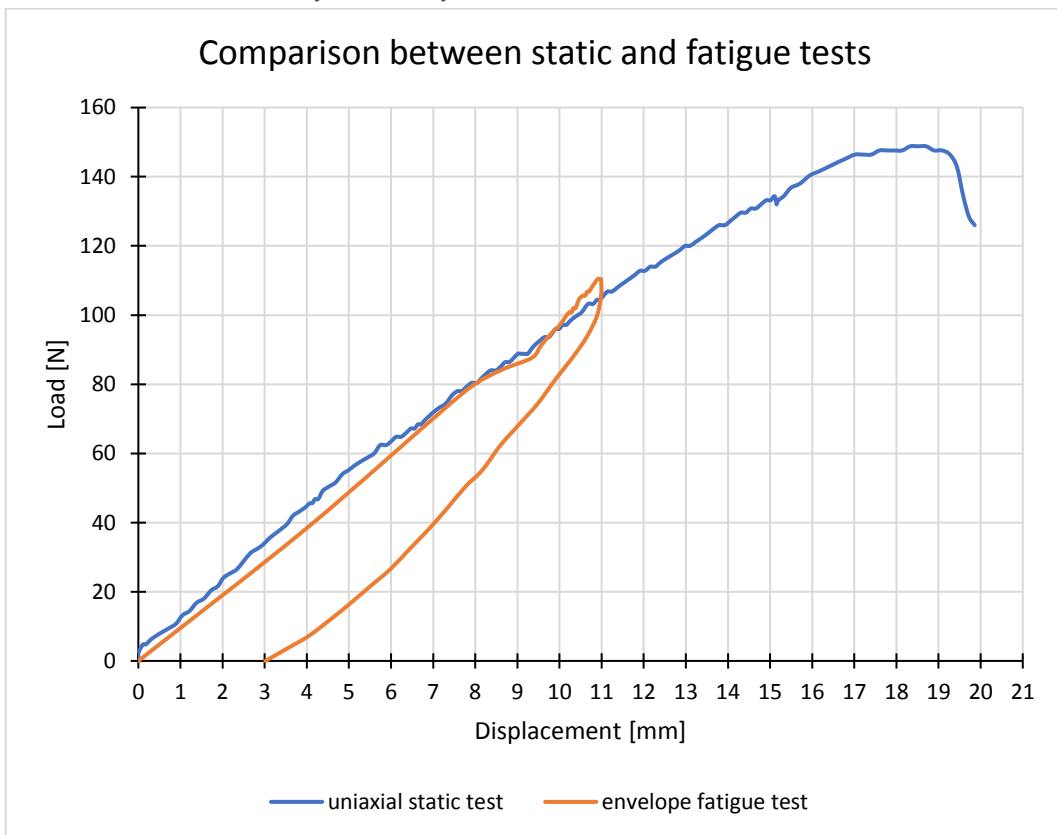


Grafico 4.4 - Confronto tra prove cicliche e unidirezionale

Dai grafici ciclici si evince un incremento di spostamento del provino mentre in quello di confronto tra rottura e involuppo si nota come lo stesso completi le prove senza rompersi.

- Provino LOT 1-4

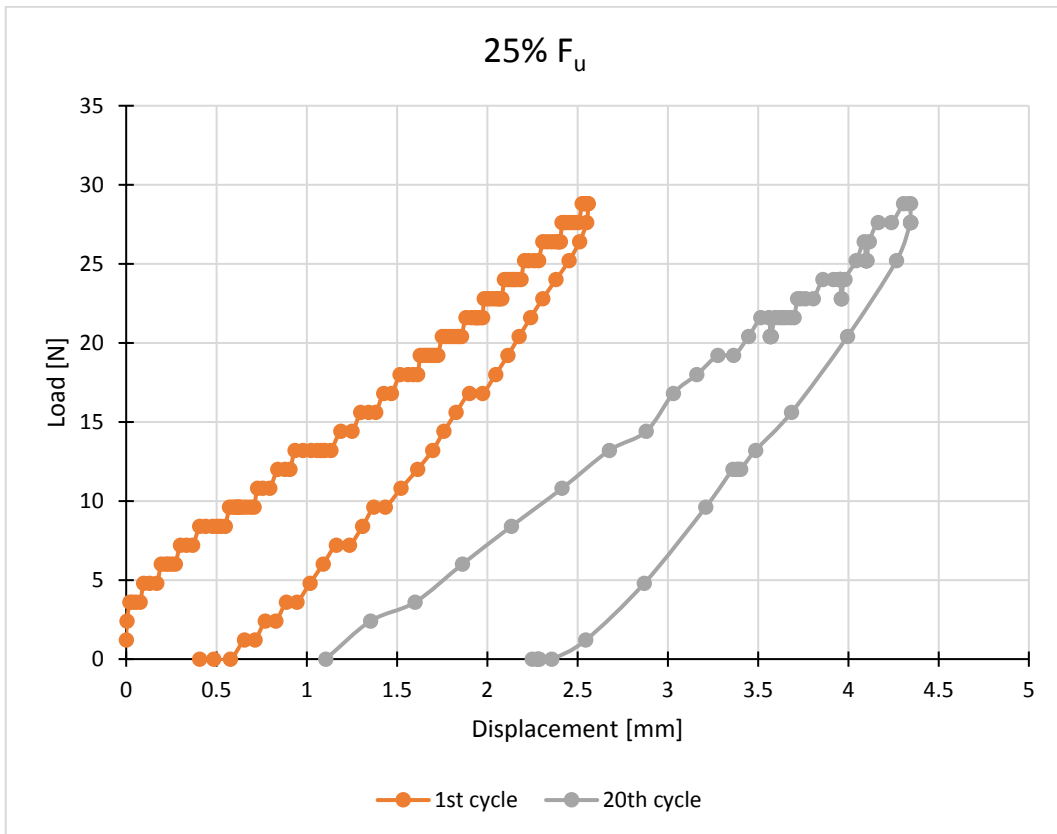


Grafico 4.5 - Confronto tra 1° e 20° ciclo al 25% di F_u

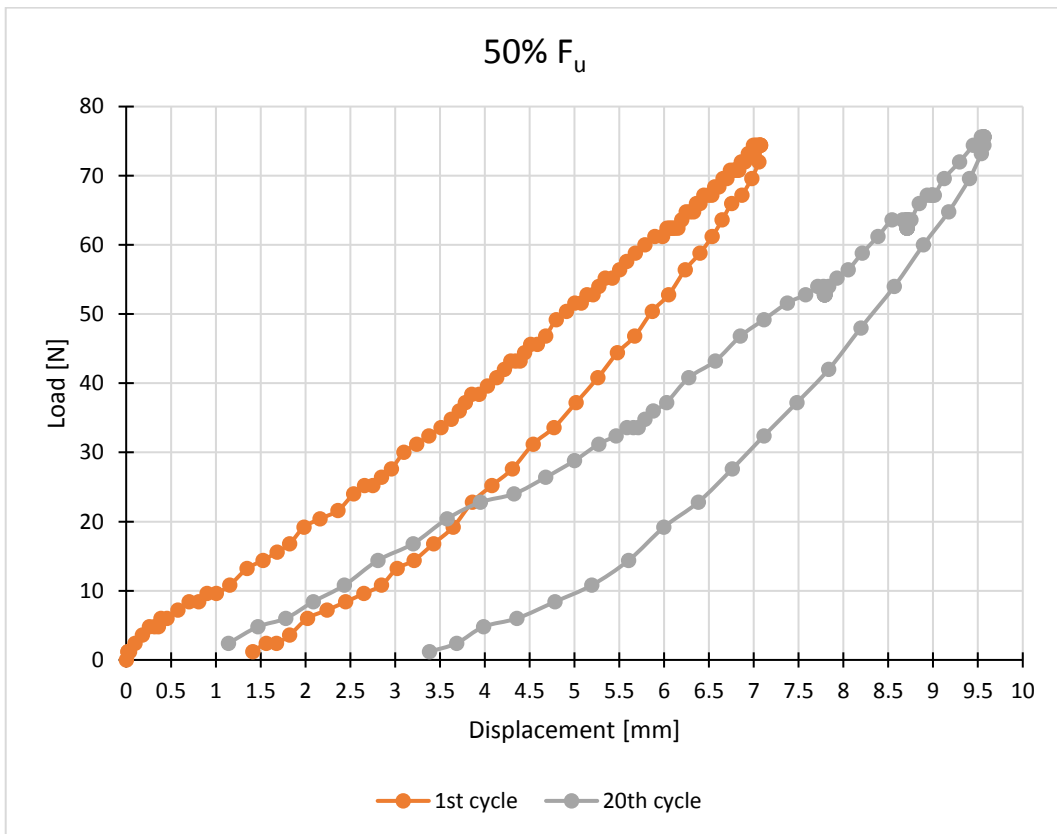


Grafico 4.6 - Confronto tra 1° e 20° ciclo al 50% di F_u

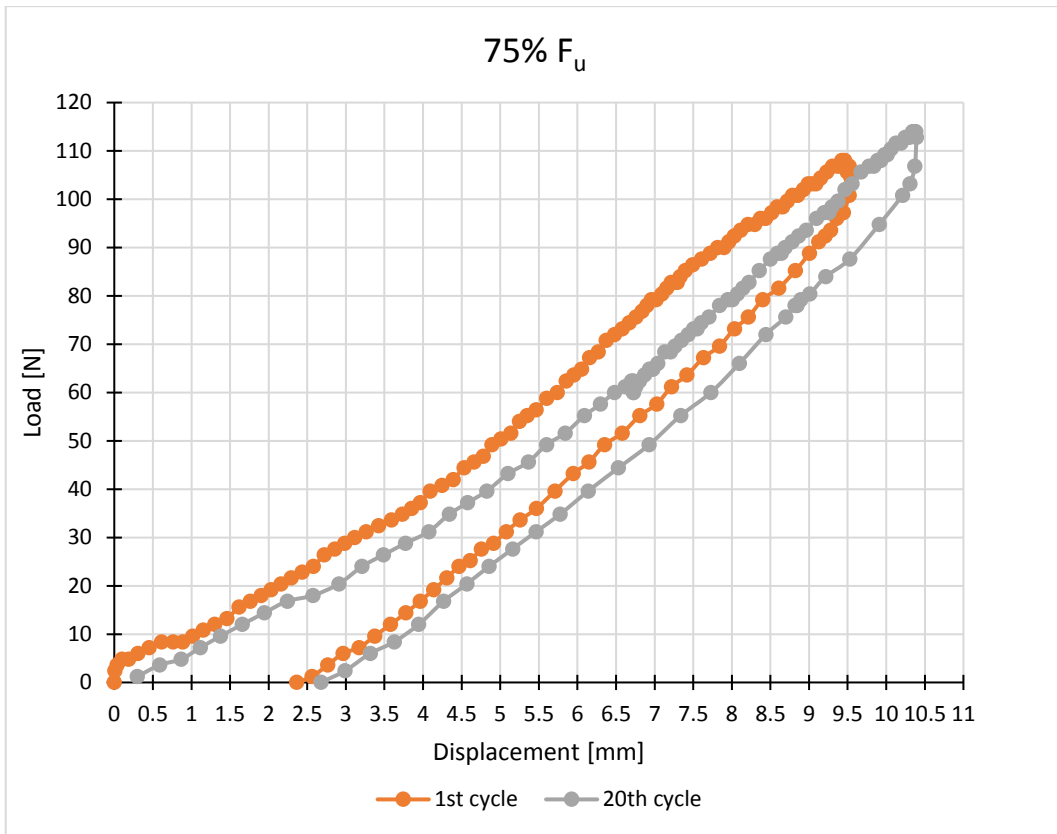


Grafico 4.7 - Confronto tra 1° e 20° ciclo al 75% di F_u

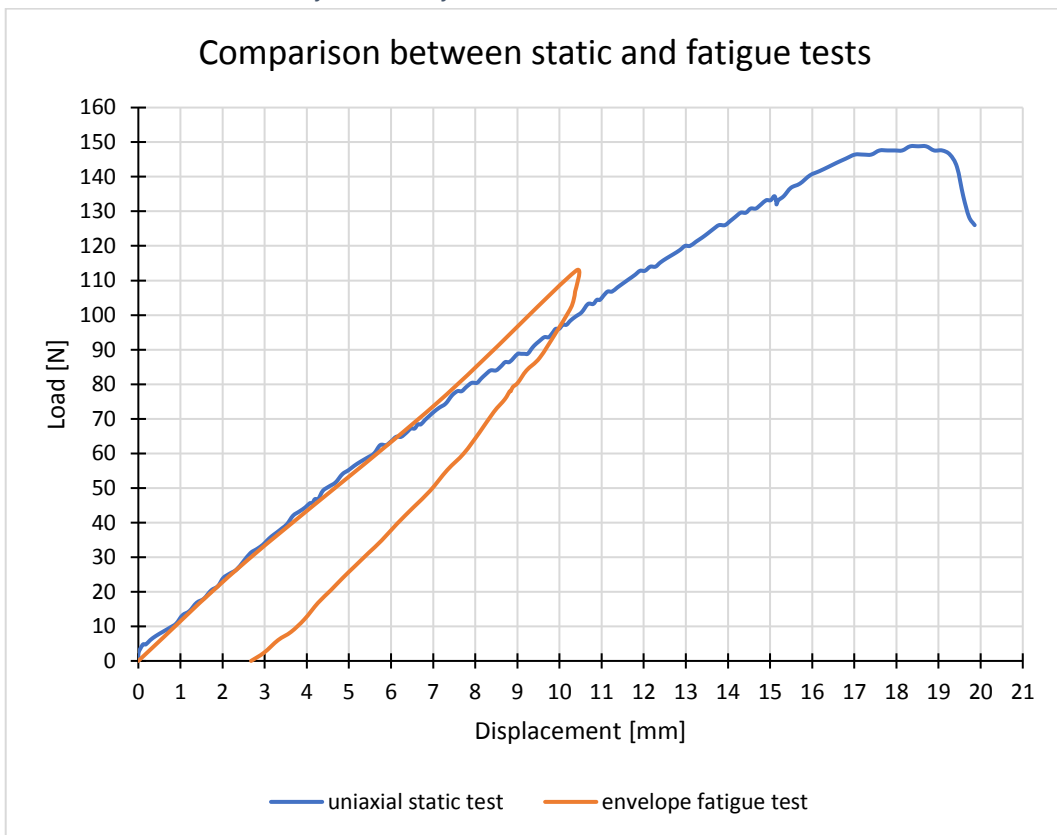


Grafico 4.8 - Confronto tra prove cicliche e unidirezionale

Dai grafici ciclici si evince un incremento di spostamento del provino mentre in quello di confronto tra rottura e involuppo si nota come lo stesso completi le prove senza rompersi.

- Provino LOT 1-5

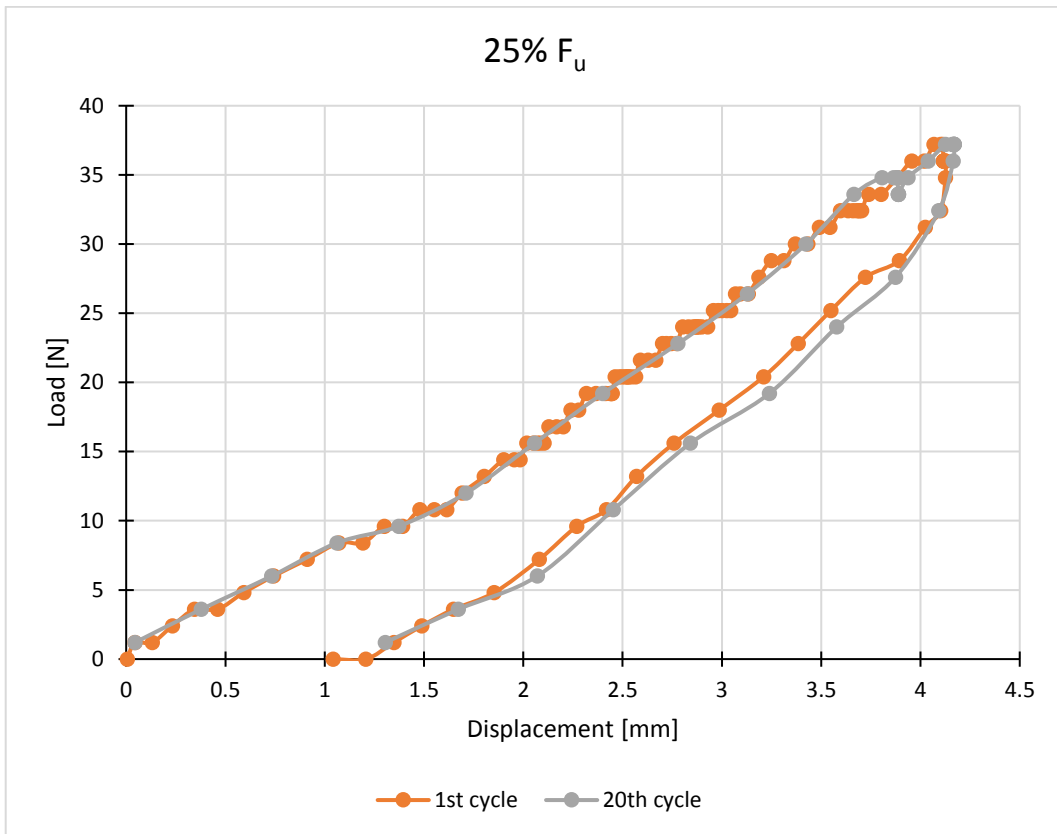


Grafico 4.9 - Confronto tra 1° e 20° ciclo al 25% di F_u

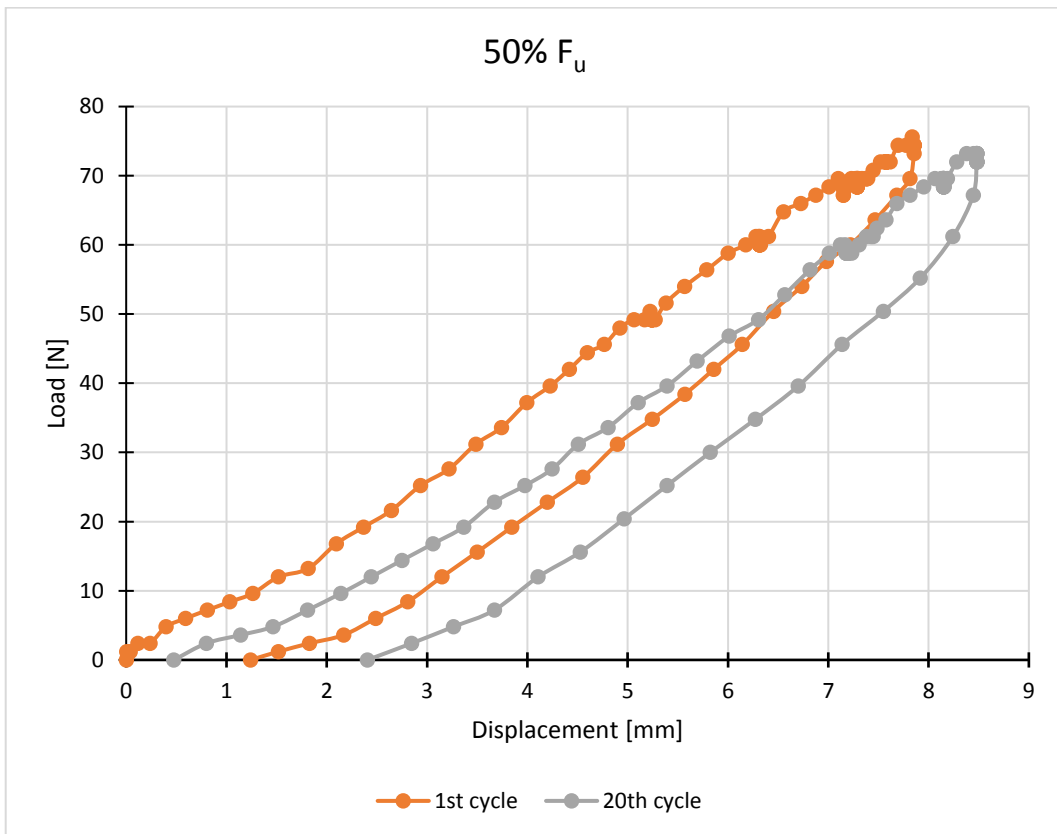


Grafico 4.10 - Confronto tra 1° e 20° ciclo al 50% di F_u

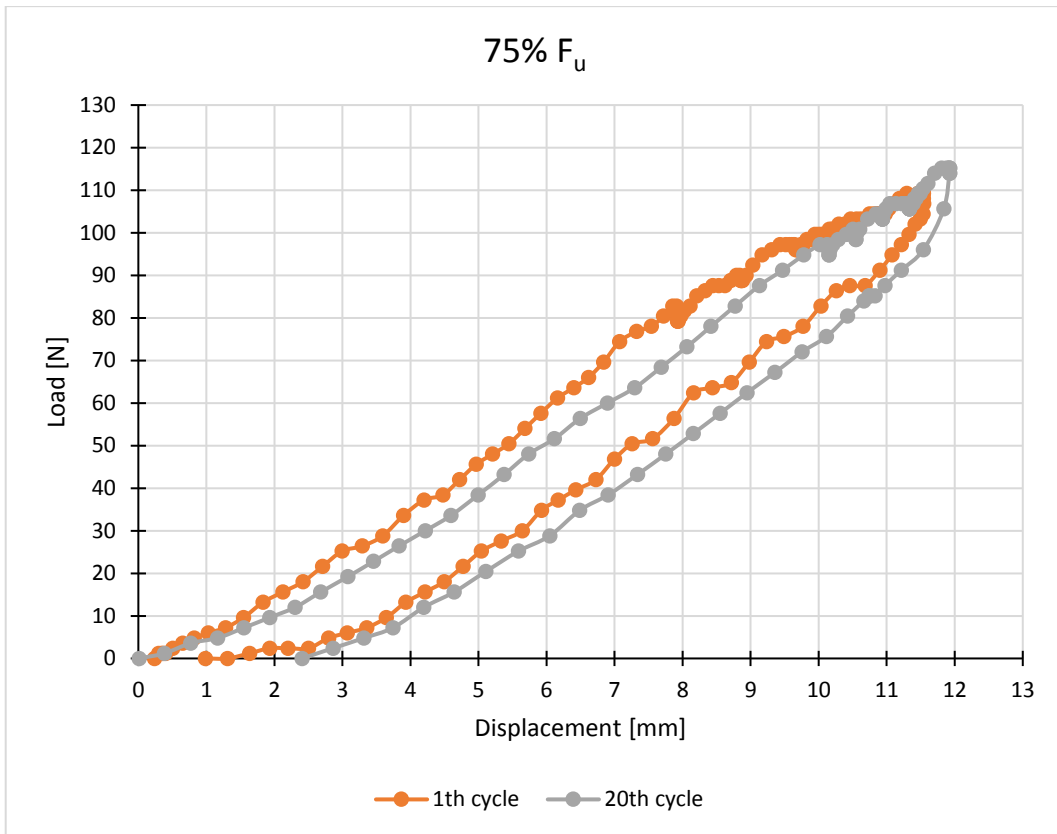


Grafico 4.11 - Confronto tra 1° e 20° ciclo al 75% di F_u

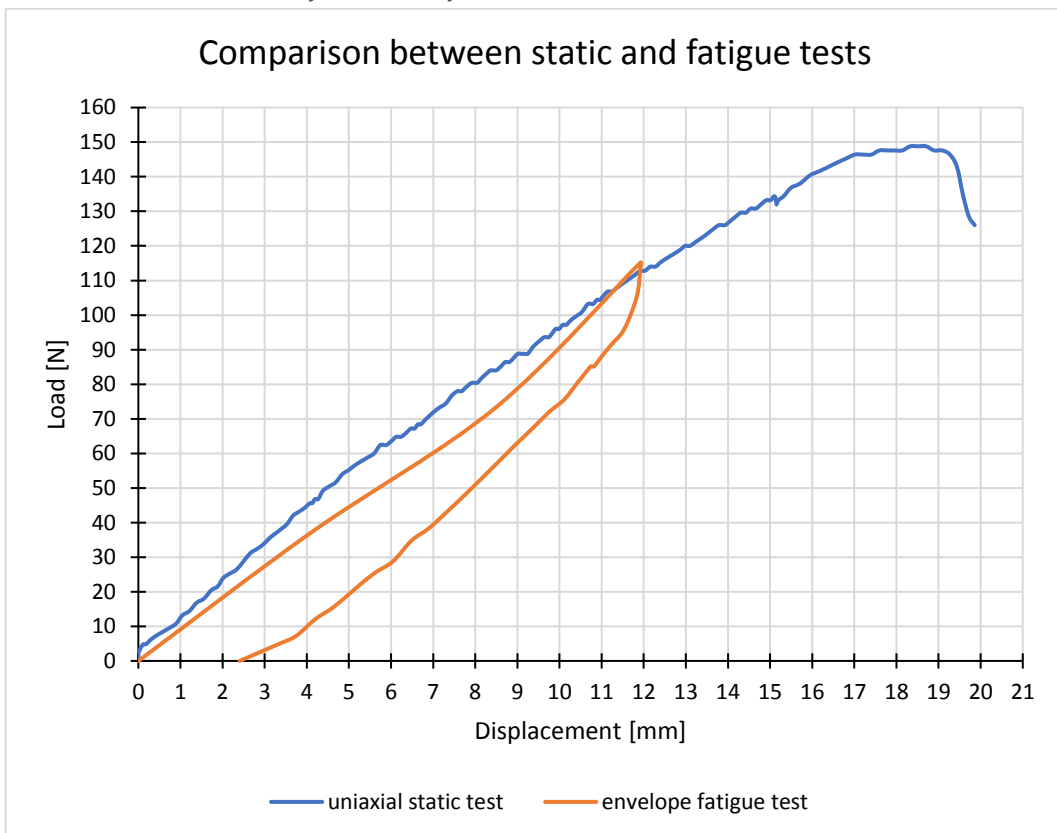


Grafico 4.12 - Confronto tra prove cicliche e unidirezionale

Dai grafici ciclici si evince un incremento di spostamento del provino mentre in quello di confronto tra rottura e involuppo si nota come lo stesso completi le prove senza rompersi.

- Provino LOT 1-6

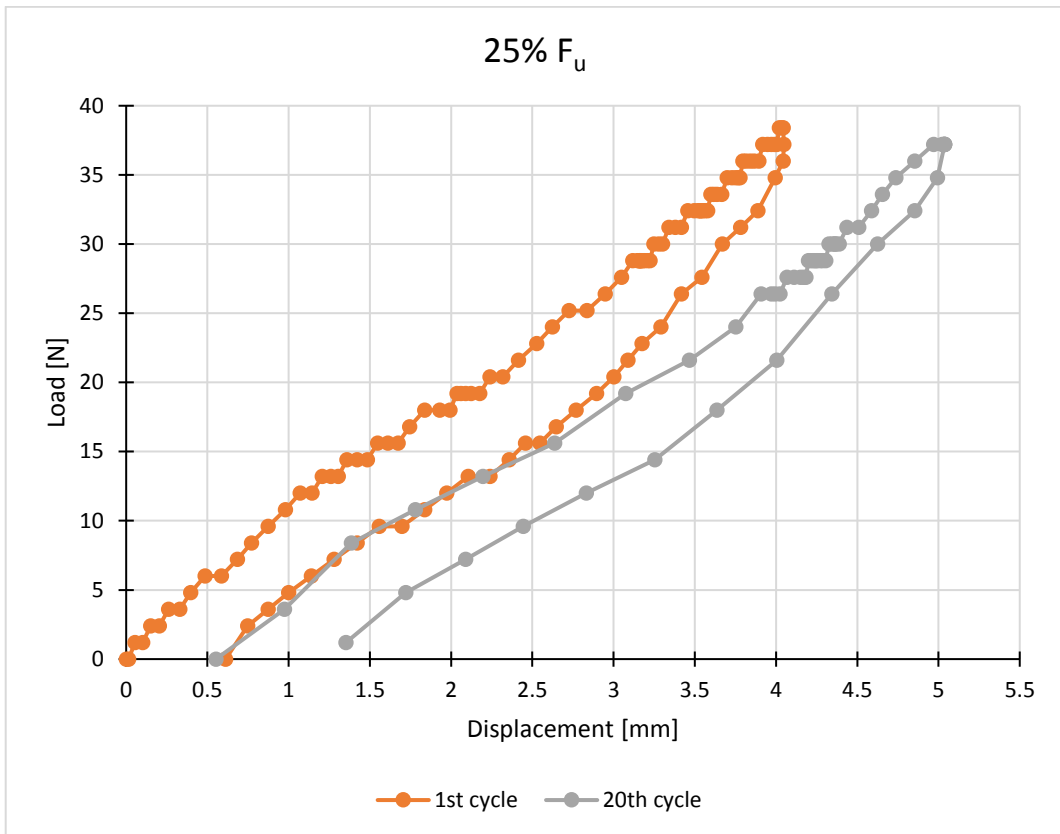


Grafico 4.13 - Confronto tra 1° e 20° ciclo al 25% di F_u

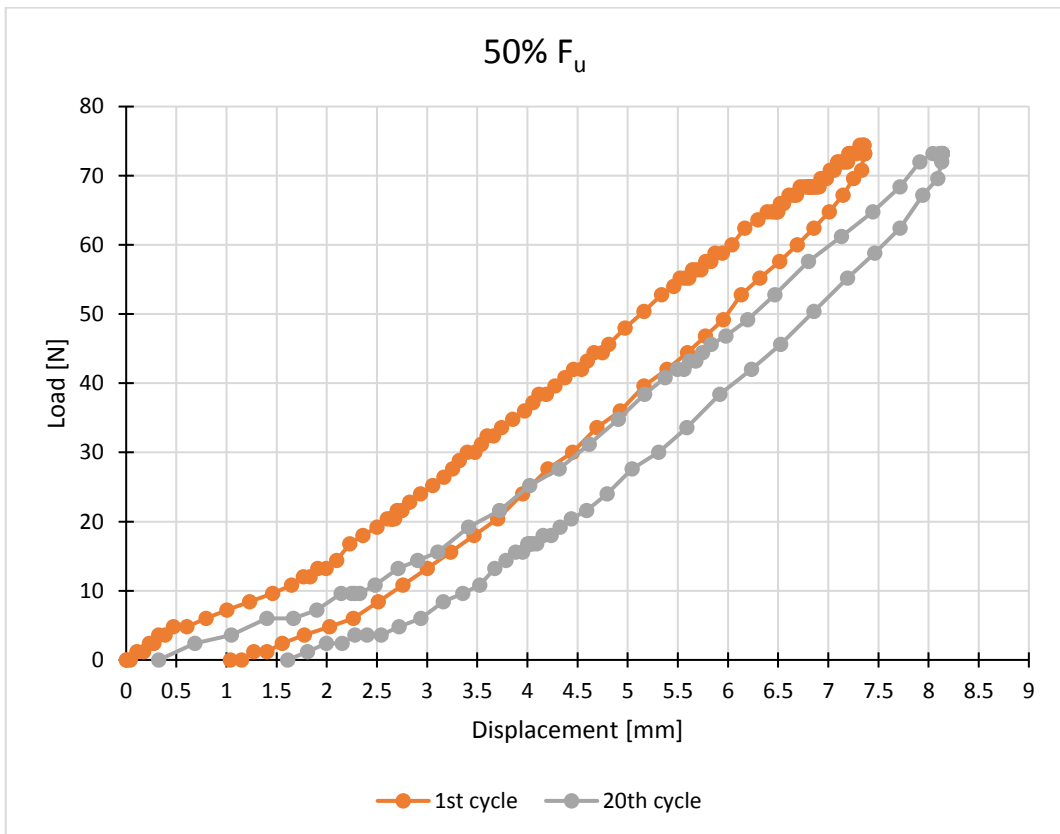


Grafico 4.14 - Confronto tra 1° e 20° ciclo al 50% di F_u

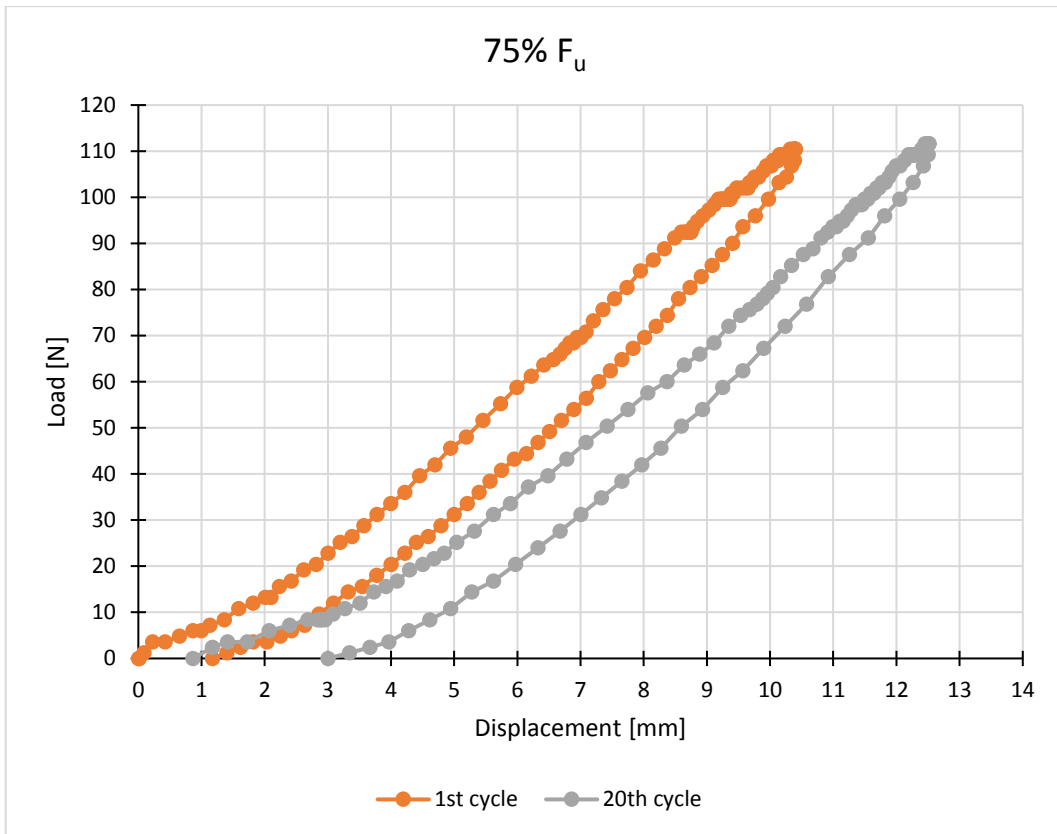


Grafico 4.15 - Confronto tra 1° e 20° ciclo al 75% di F_u

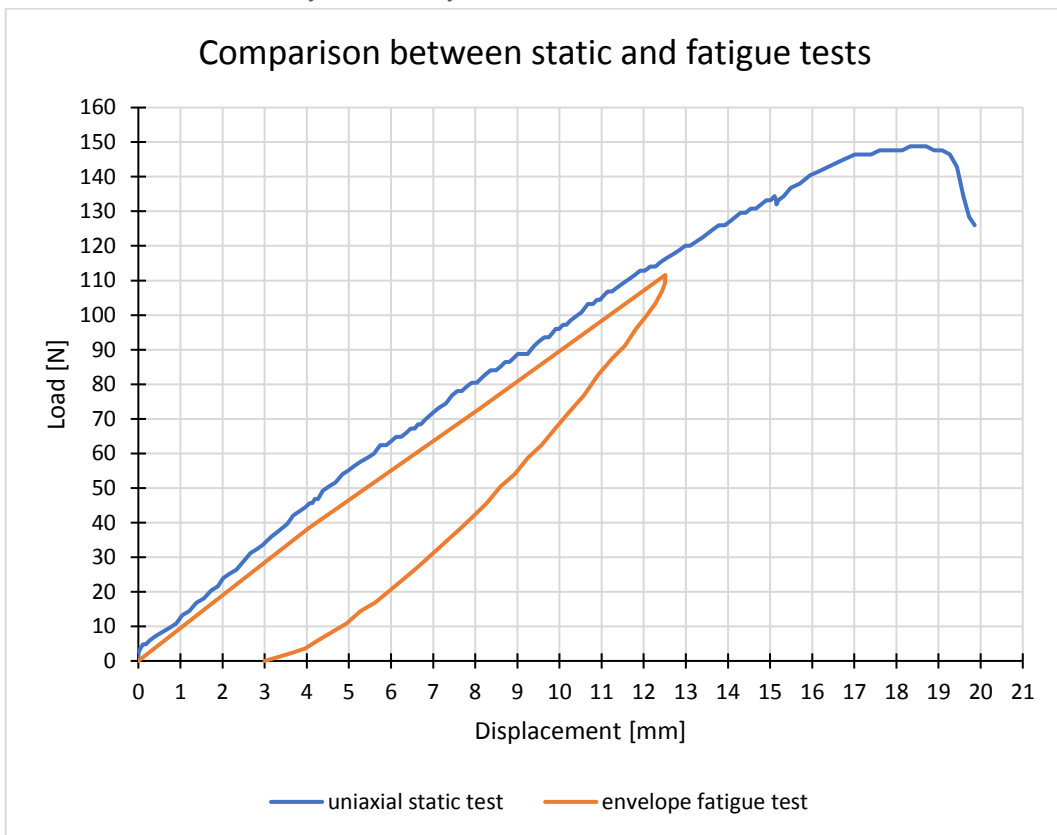


Grafico 4.16 - Confronto tra prove cicliche e unidirezionale

Dai grafici ciclici si evince un incremento di spostamento del provino mentre in quello di confronto tra rottura e involuppo si nota come lo stesso completi le prove senza rompersi.

- Provino LOT 1-8

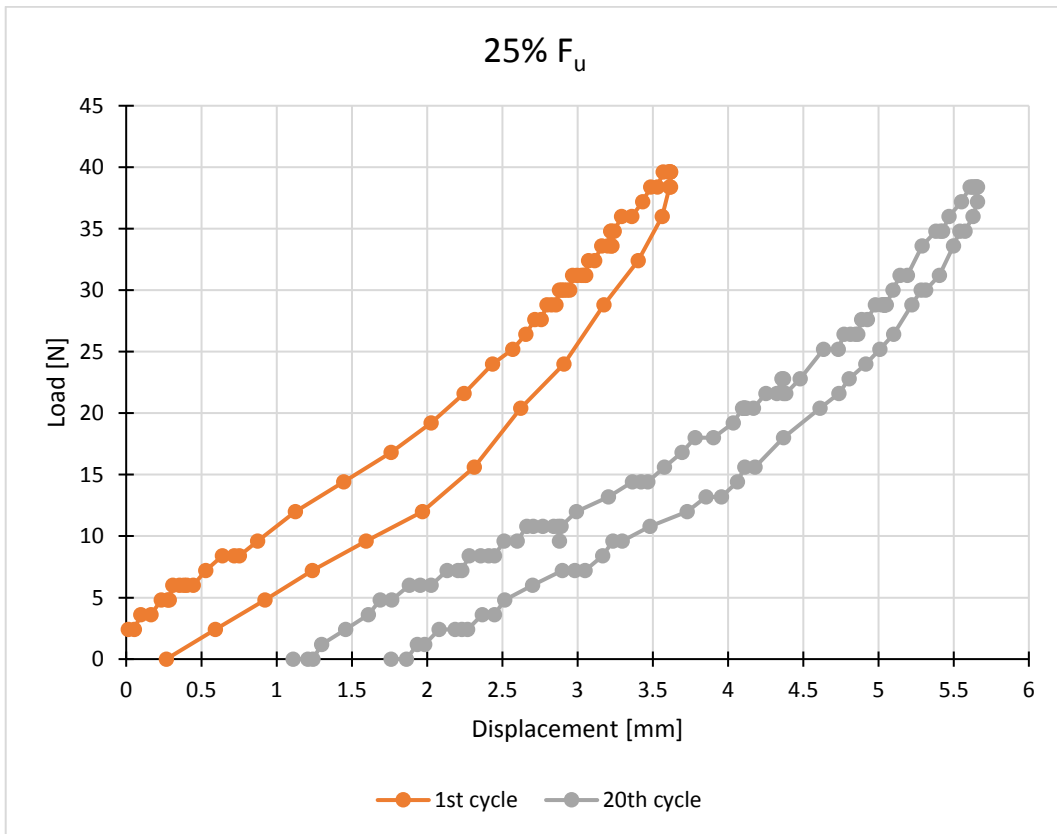


Grafico 4.17 - Confronto tra 1° e 20° ciclo al 25% di F_u

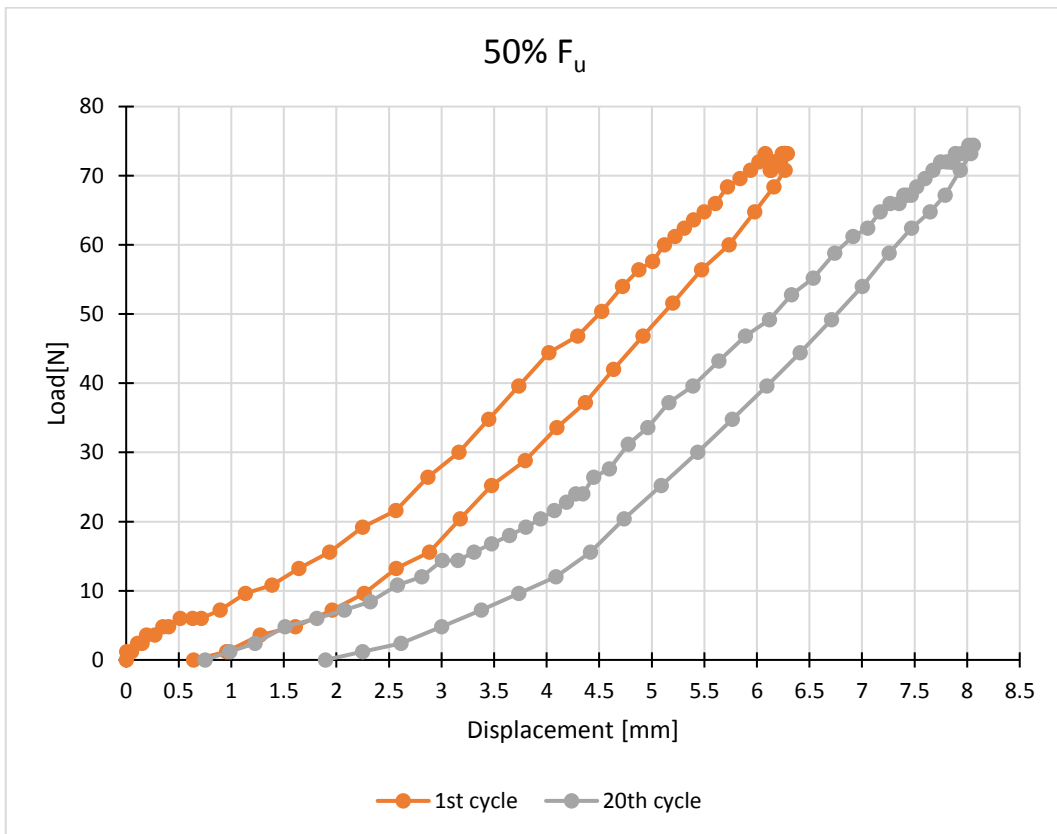


Grafico 4.18 - Confronto tra 1° e 20° ciclo al 50% di F_u

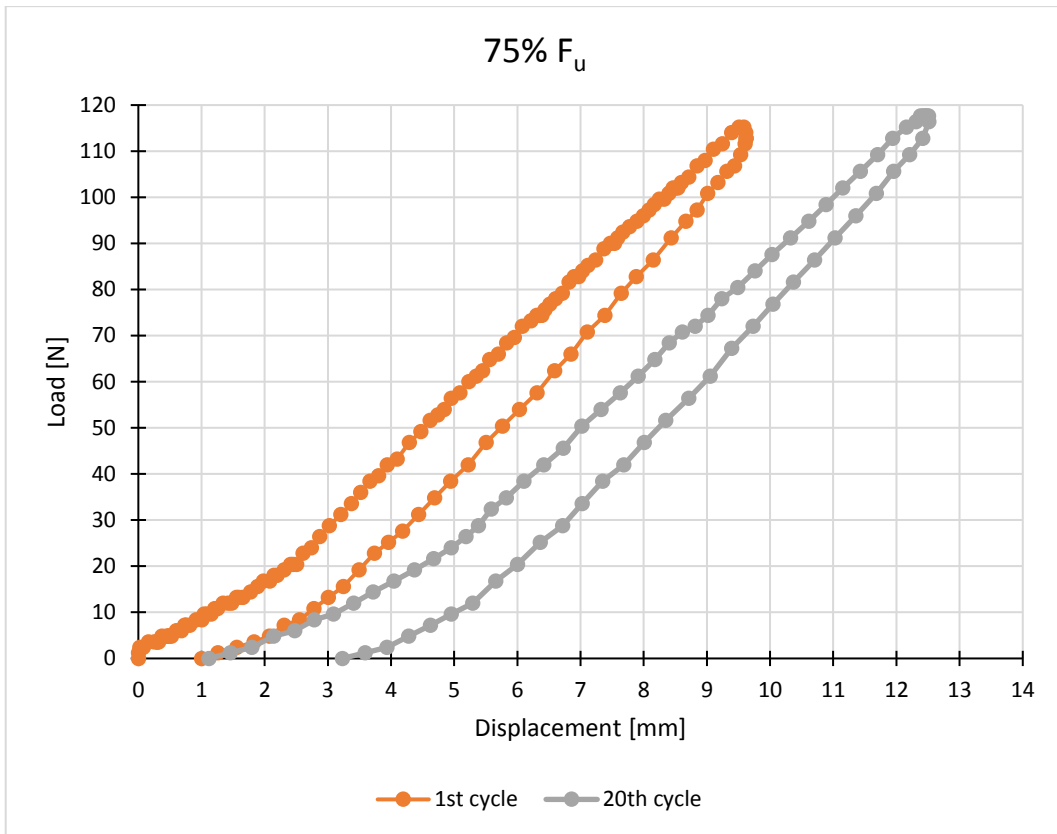


Grafico17 4.19- Confronto tra 1° e 20° ciclo al 75% di F_u

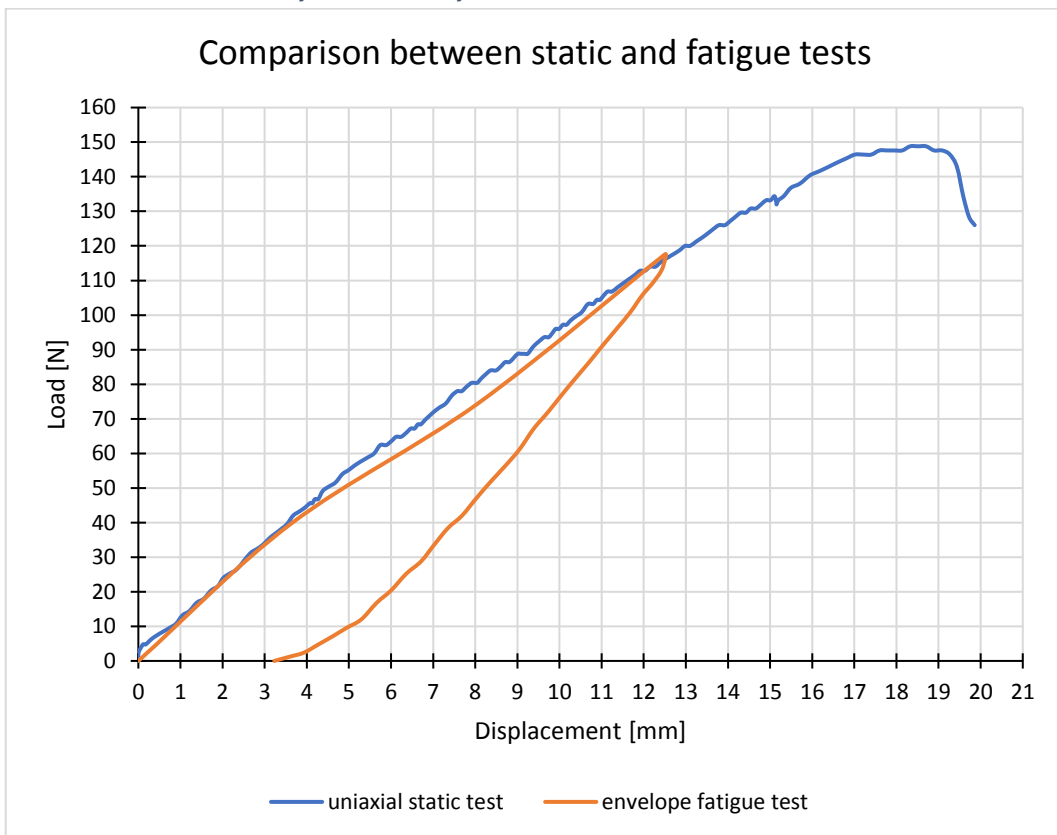


Grafico 4.20 - Confronto tra prove cicliche e unidirezionale

Dai grafici ciclici si evince un incremento di spostamento del provino mentre in quello di confronto tra rottura e involuppo si nota come lo stesso completi le prove senza rompersi.

- Provino LOT 1-9

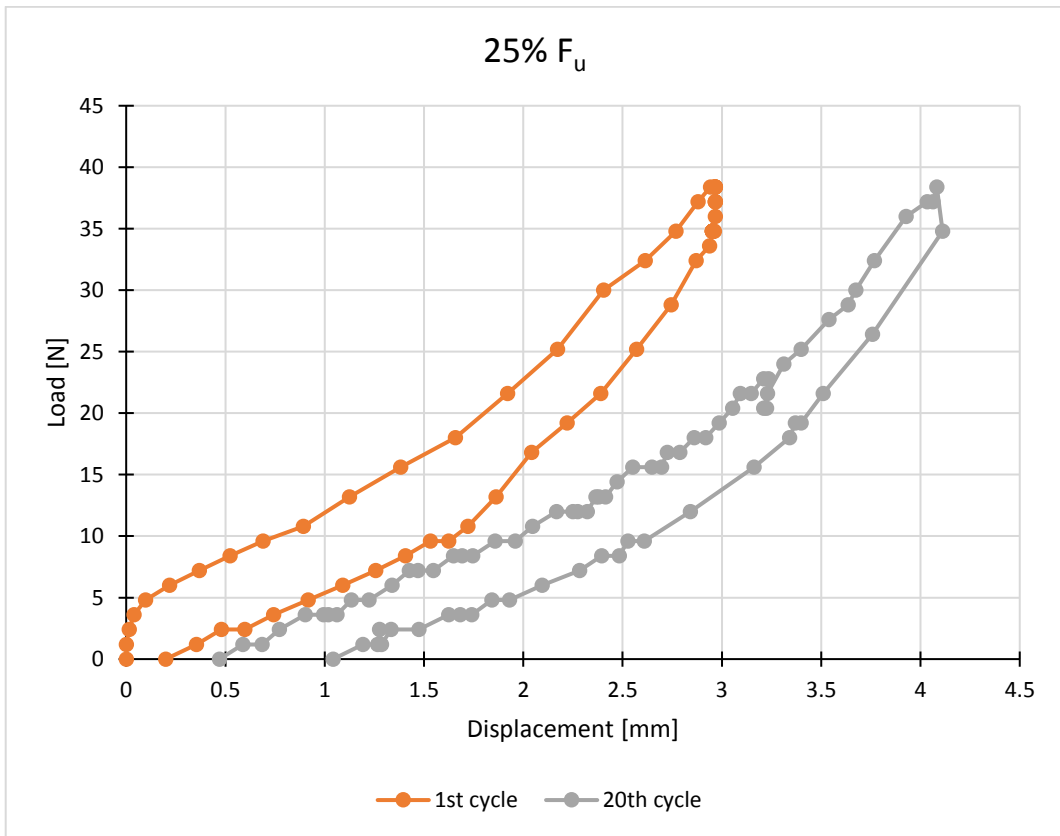


Grafico 4.21 - Confronto tra 1° e 20° ciclo al 25% di F_u

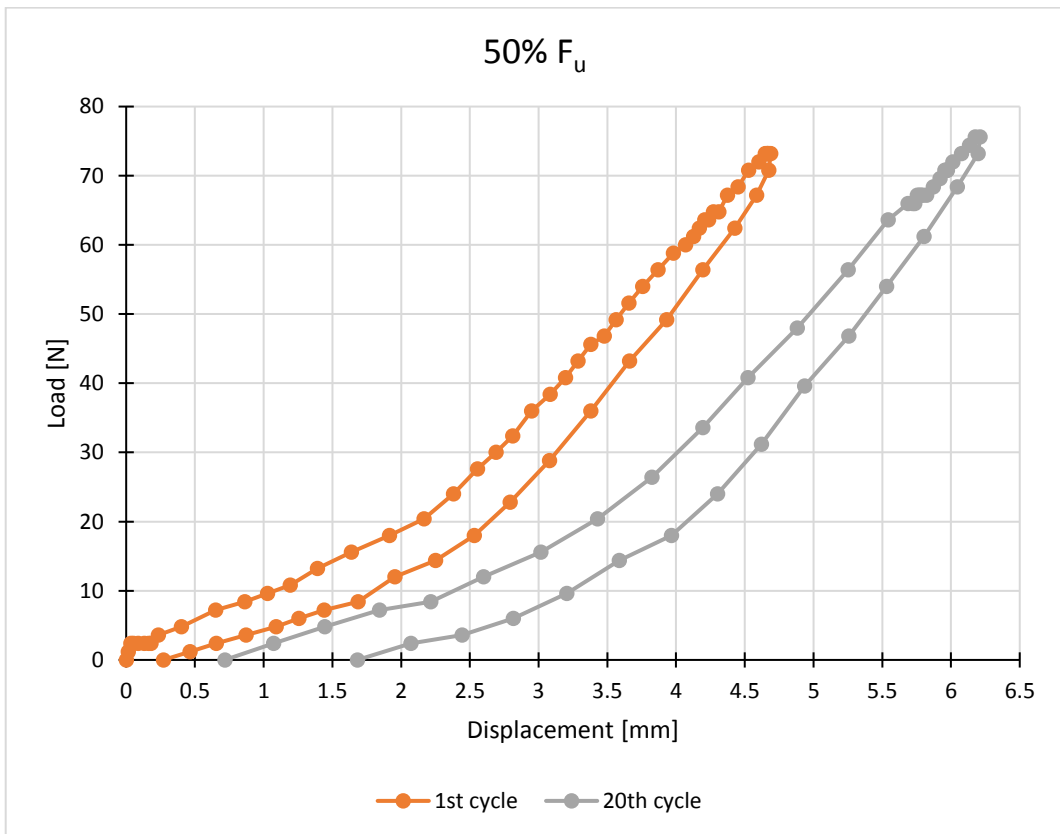


Grafico 4.22 - Confronto tra 1° e 20° ciclo al 50% di F_u

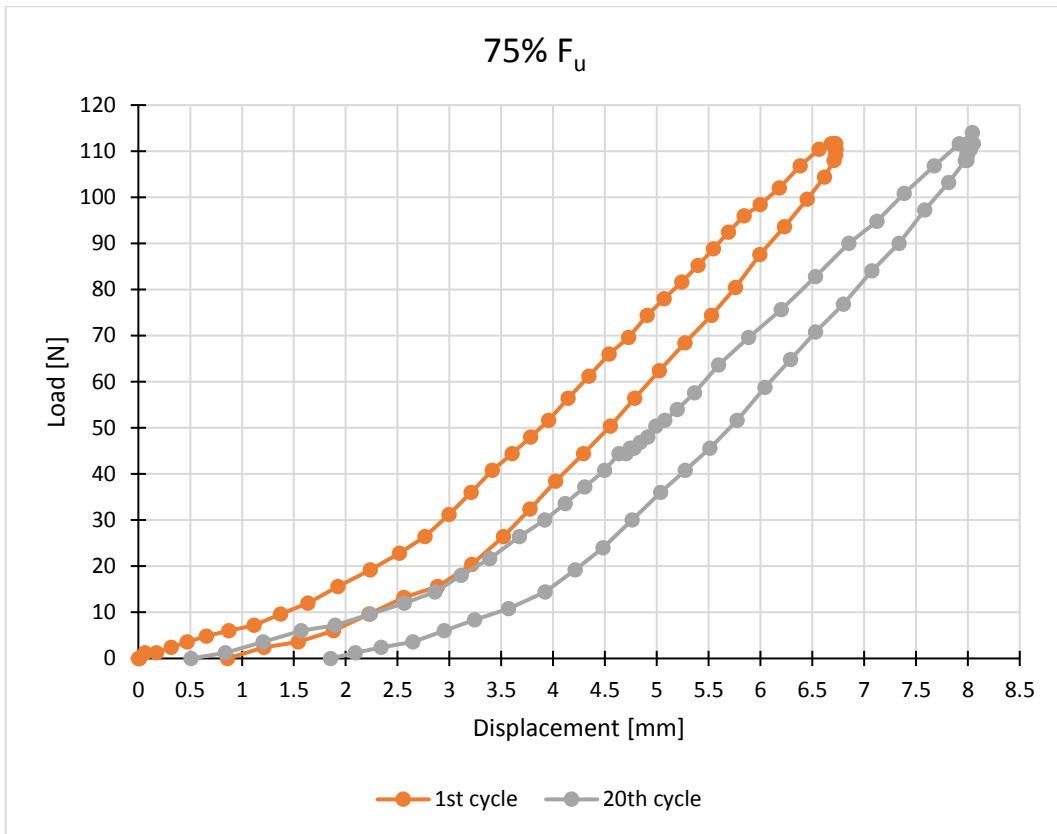


Grafico 4.23 - Confronto tra 1° e 20° ciclo al 75% di F_u

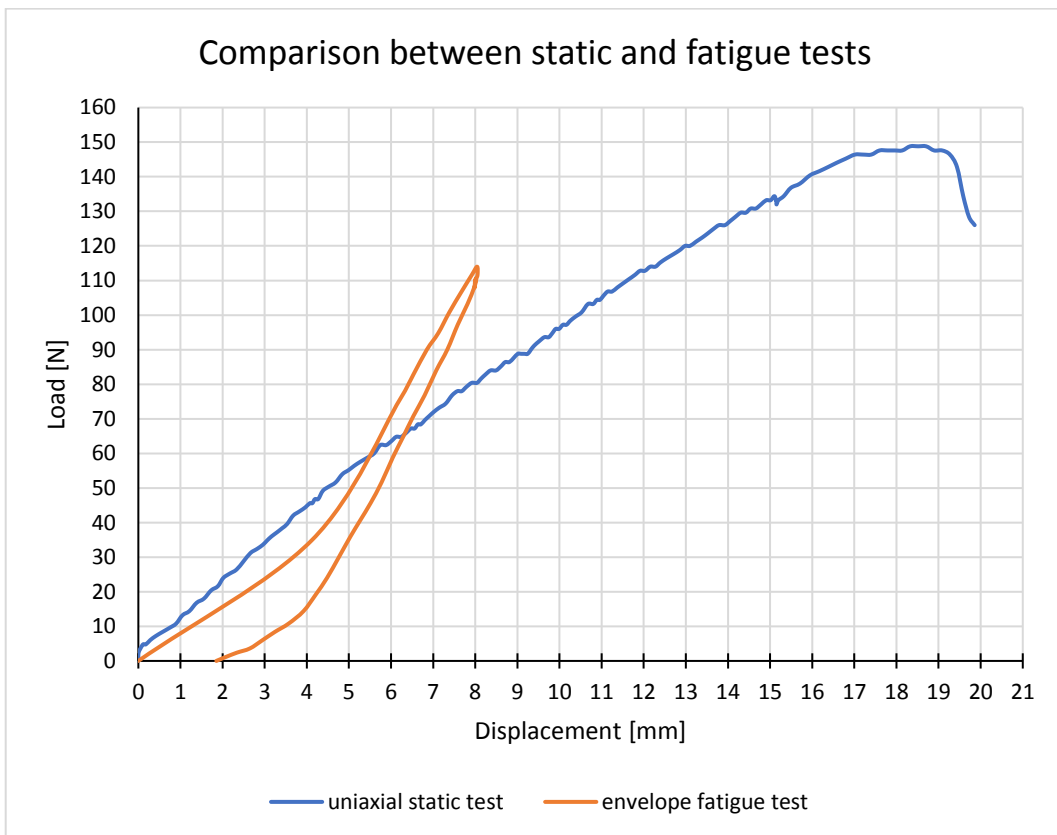


Grafico 4.24 - Confronto tra prove cicliche e unidirezionale

Dai grafici ciclici si evince un incremento di spostamento del provino mentre in quello di confronto tra rottura e involuppo si nota come lo stesso completi le prove senza rompersi.

- Provino LOT 2-3

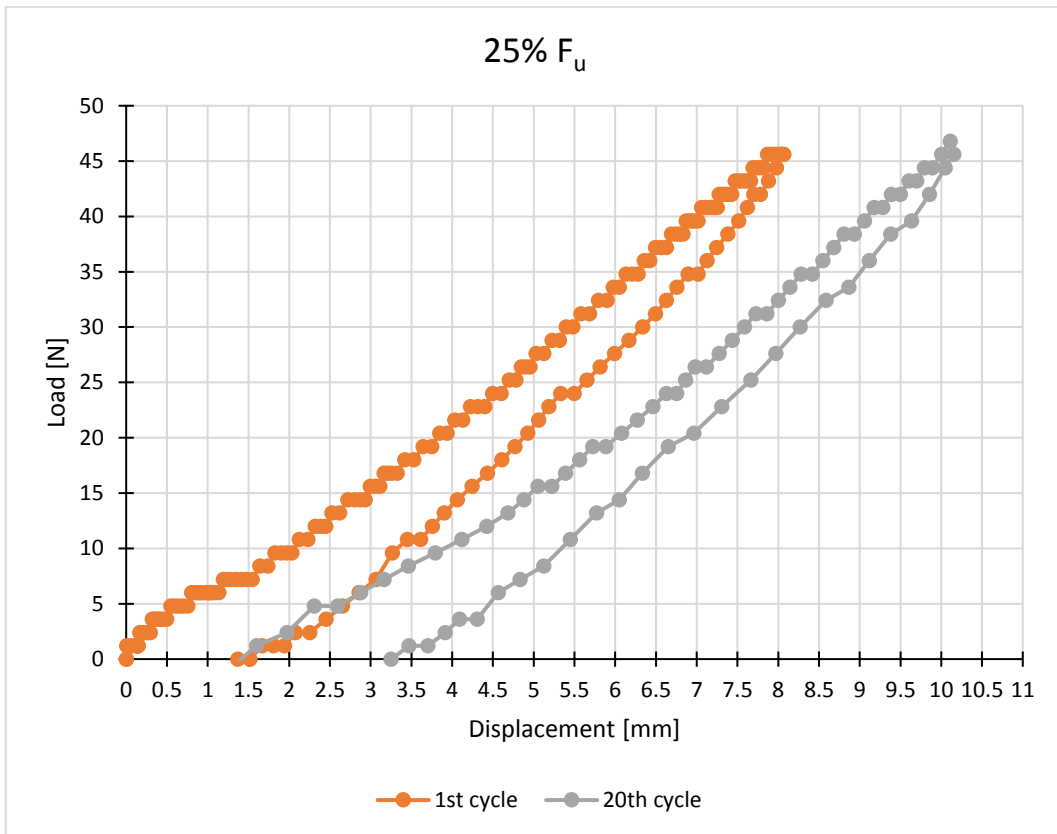


Grafico 4.25 - Confronto tra 1° e 20° ciclo al 25% di F_u

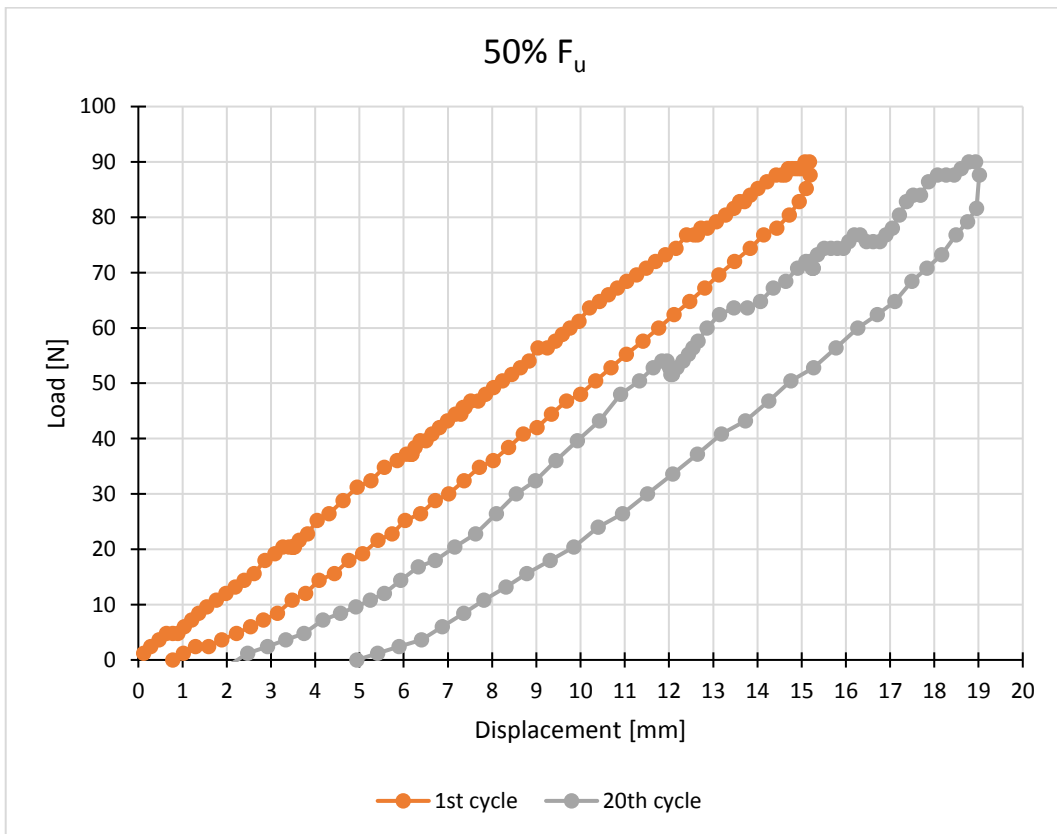


Grafico 4.26 - Confronto tra 1° e 20° ciclo al 50% di F_u

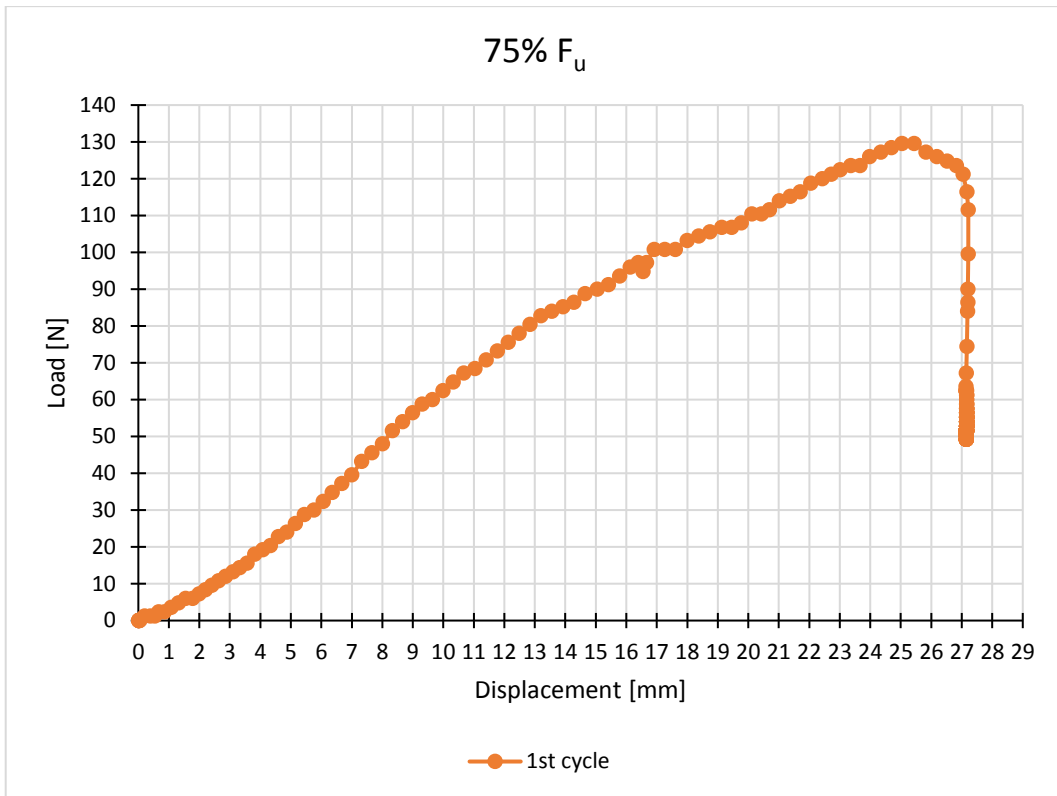


Grafico 4.27 - Confronto del solo 1° ciclo al 75% di F_u

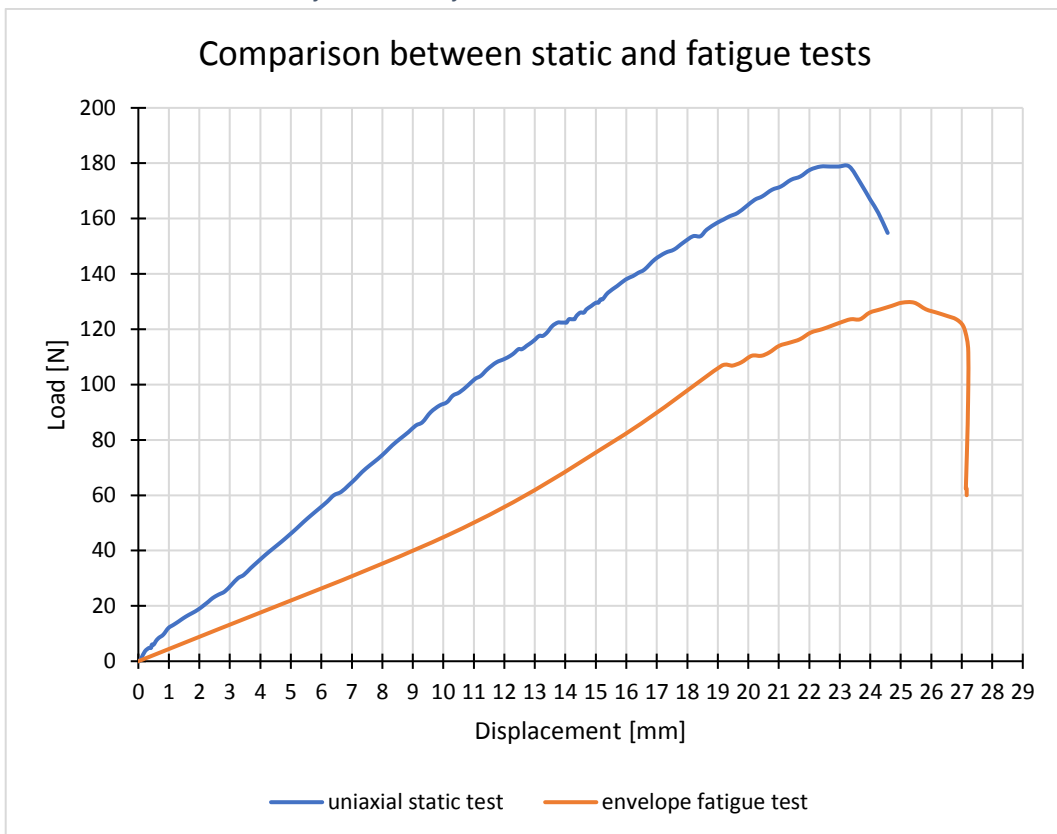


Grafico 4.28 - Confronto tra prove cicliche e unidirezionale

Dai grafici ciclici si evince un incremento di spostamento del provino mentre in quello di confronto tra rottura e involuppo si nota come lo stesso non completi le prove raggiungendo la rottura nel primo ciclo al 75% F_u .

- Provino LOT 2-4

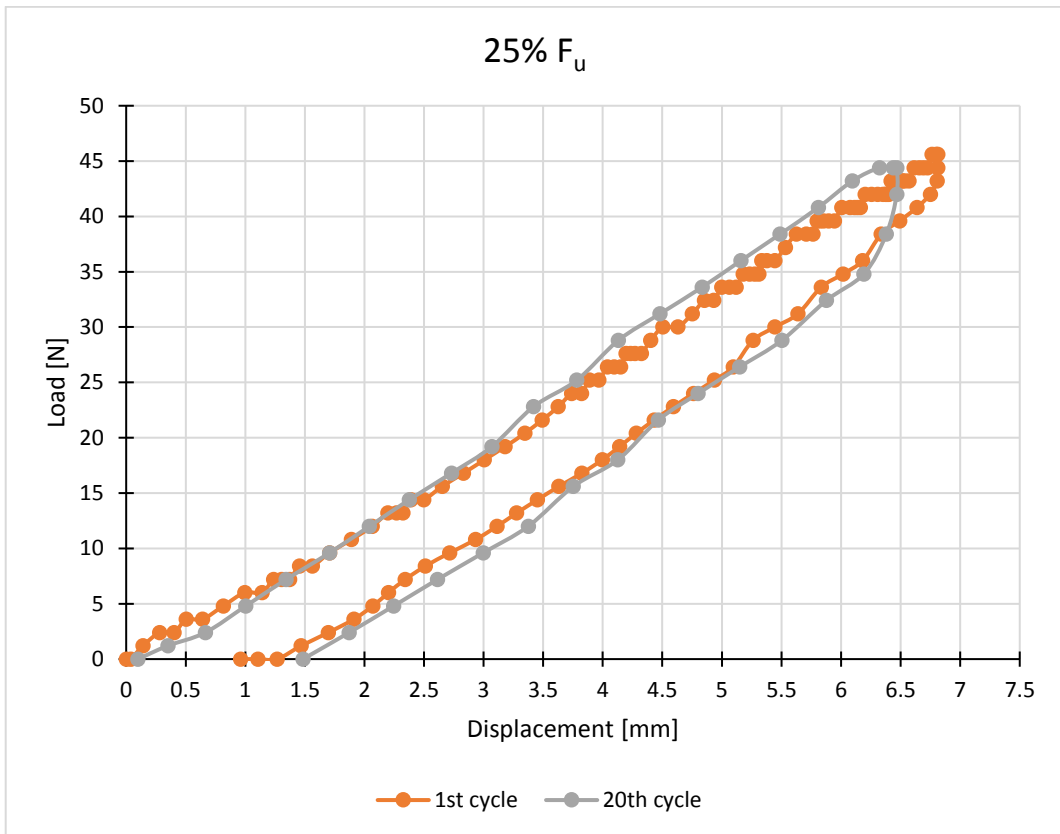


Grafico 4.29 - Confronto tra 1° e 20° ciclo al 25% di F_u

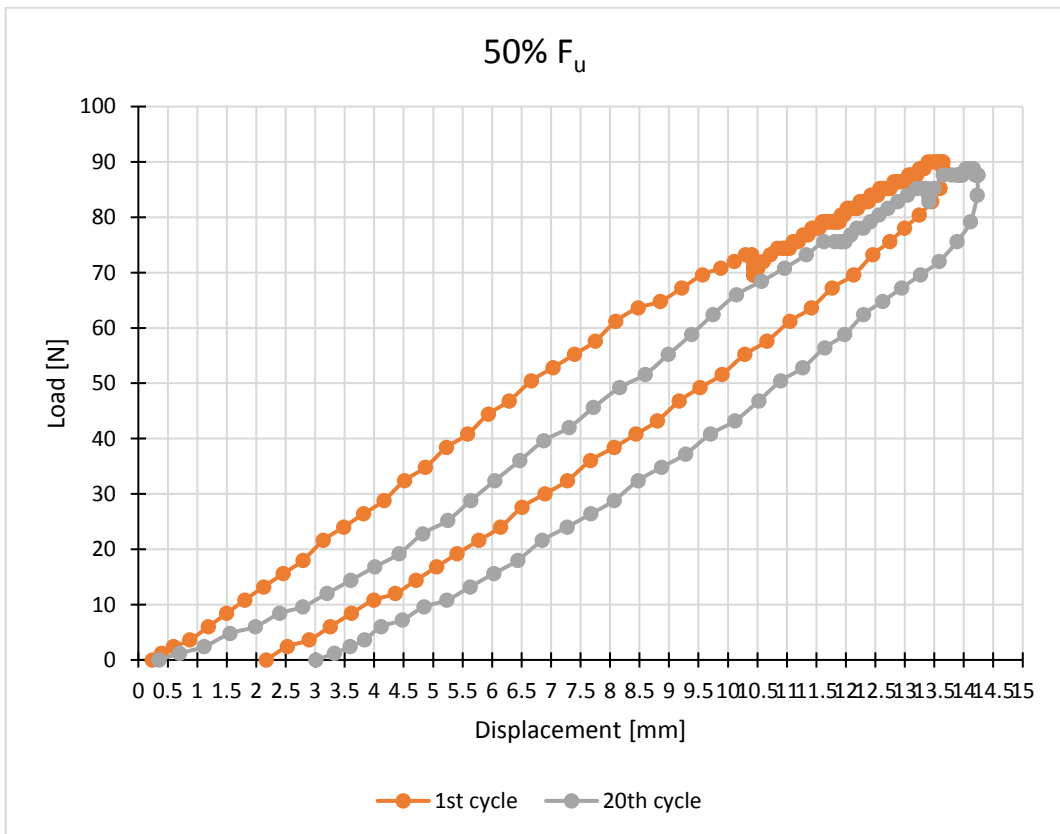


Grafico 4.30 - Confronto tra 1° e 20° ciclo al 50% di F_u

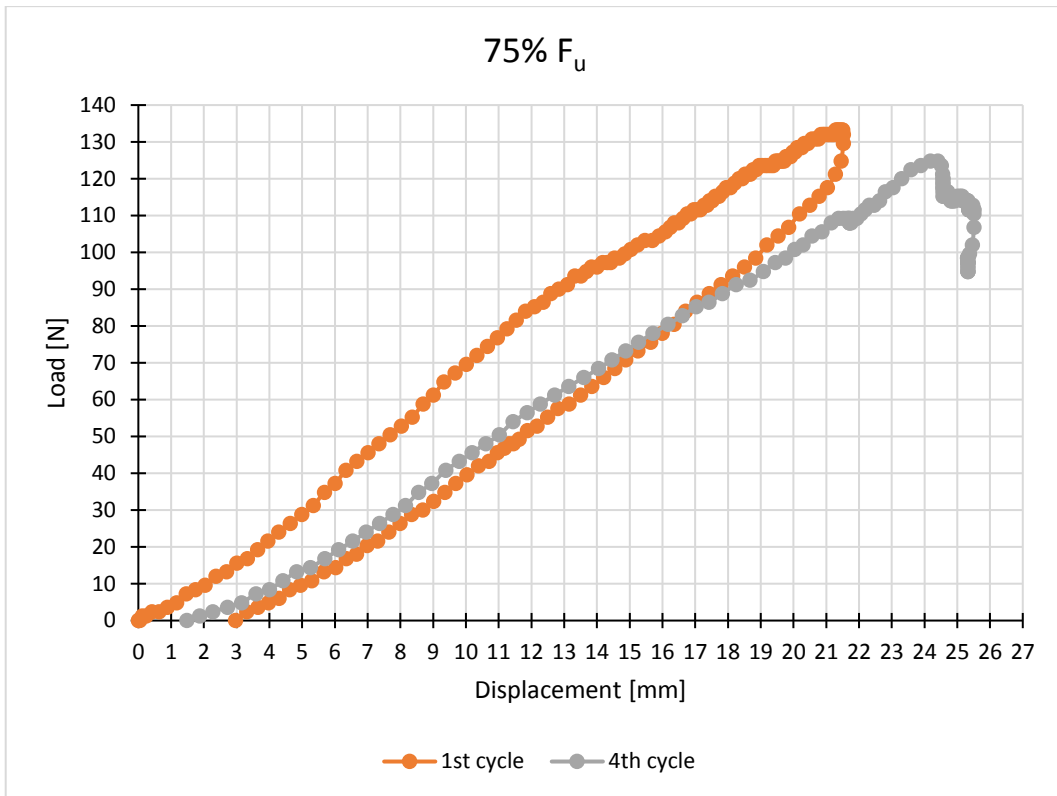


Grafico 4.31 - Confronto tra 1° e 4° ciclo al 75% di F_u

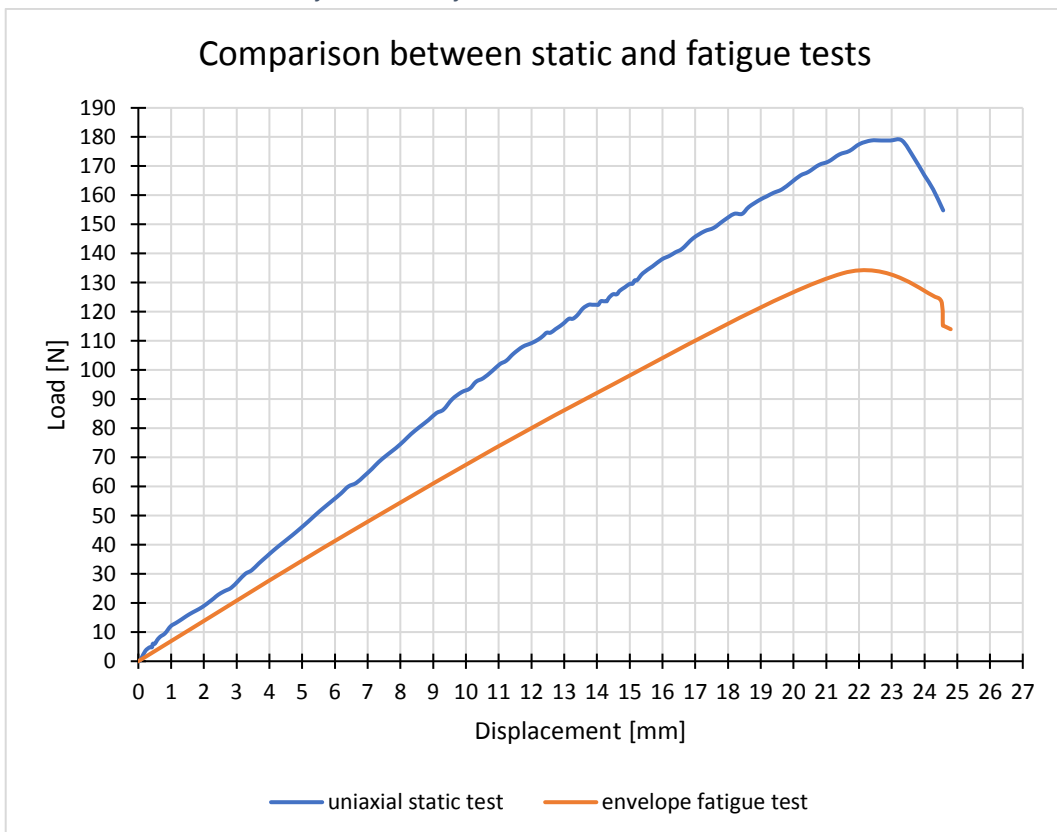


Grafico 4.32 - Confronto tra prove cicliche e unidirezionale

Dai grafici ciclici si evince un incremento di spostamento del provino mentre in quello di confronto tra rottura e inviluppo si nota come lo stesso non completi le prove raggiungendo la rottura nel quarto ciclo al 75% F_u .

- Provino LOT 2-5

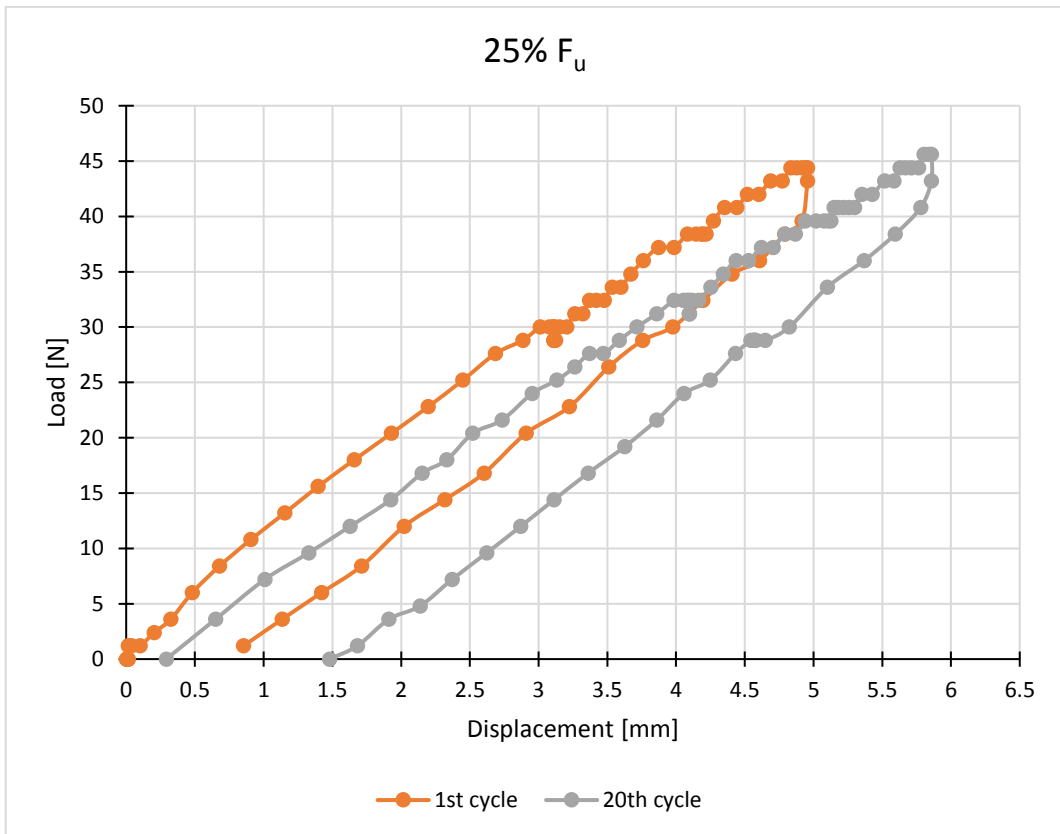


Grafico 4.33 - Confronto tra 1° e 20° ciclo al 25% di F_u

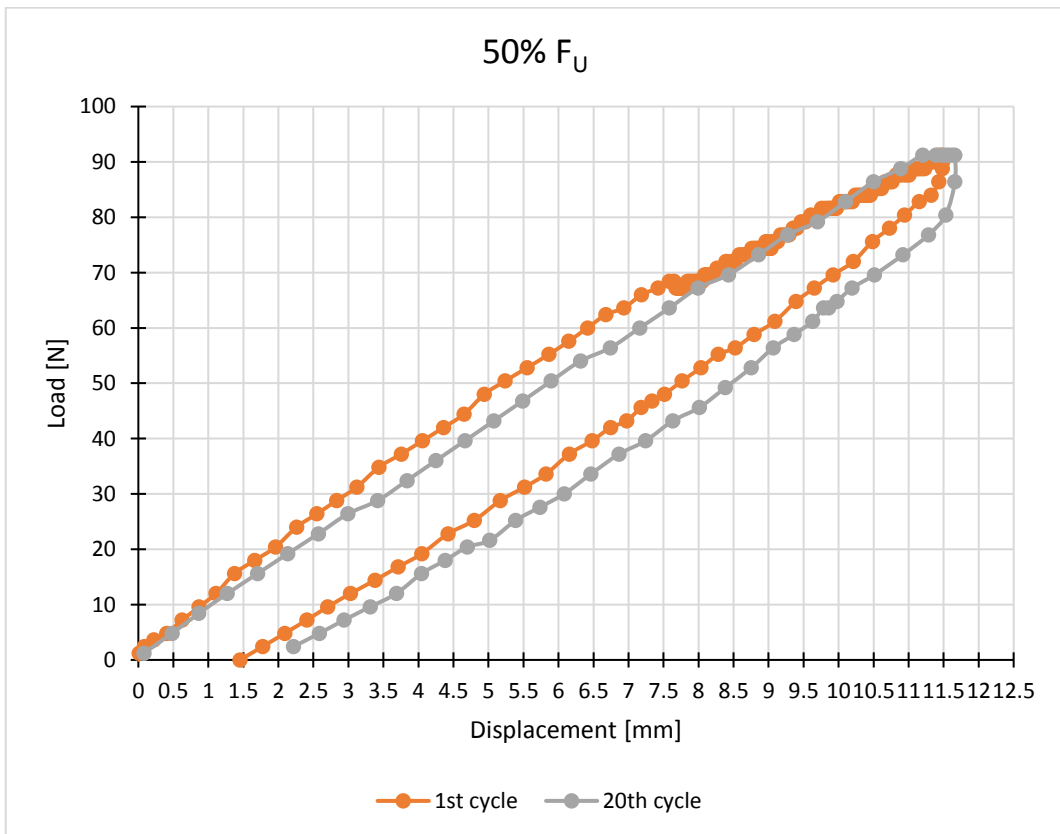


Grafico 4.34 - Confronto tra 1° e 20° ciclo al 50% di F_u

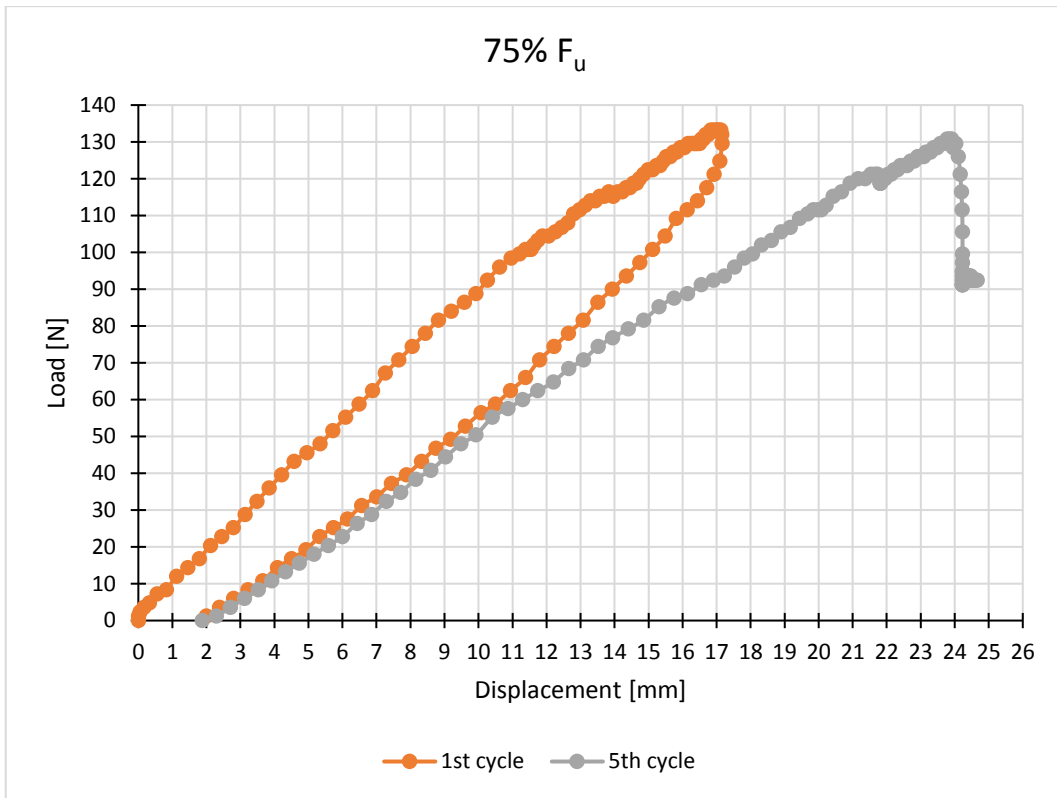


Grafico 4.35 - Confronto tra 1° e 5° ciclo al 75% di F_u

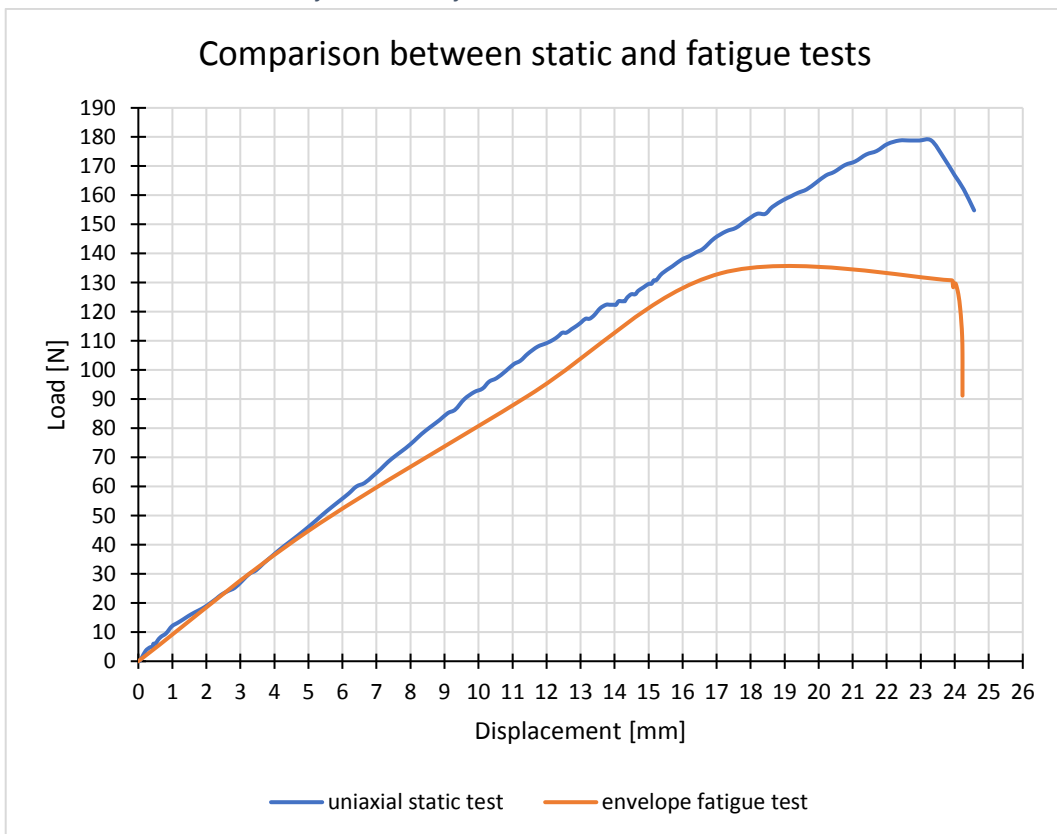


Grafico 4.36 - Confronto tra prove cicliche e unidirezionale

Dai grafici ciclici si evince un incremento di spostamento del provino mentre in quello di confronto tra rottura e inviluppo si nota come lo stesso non completi le prove raggiungendo la rottura nel quinto ciclo al 75% F_u .

- Provino LOT 2-7

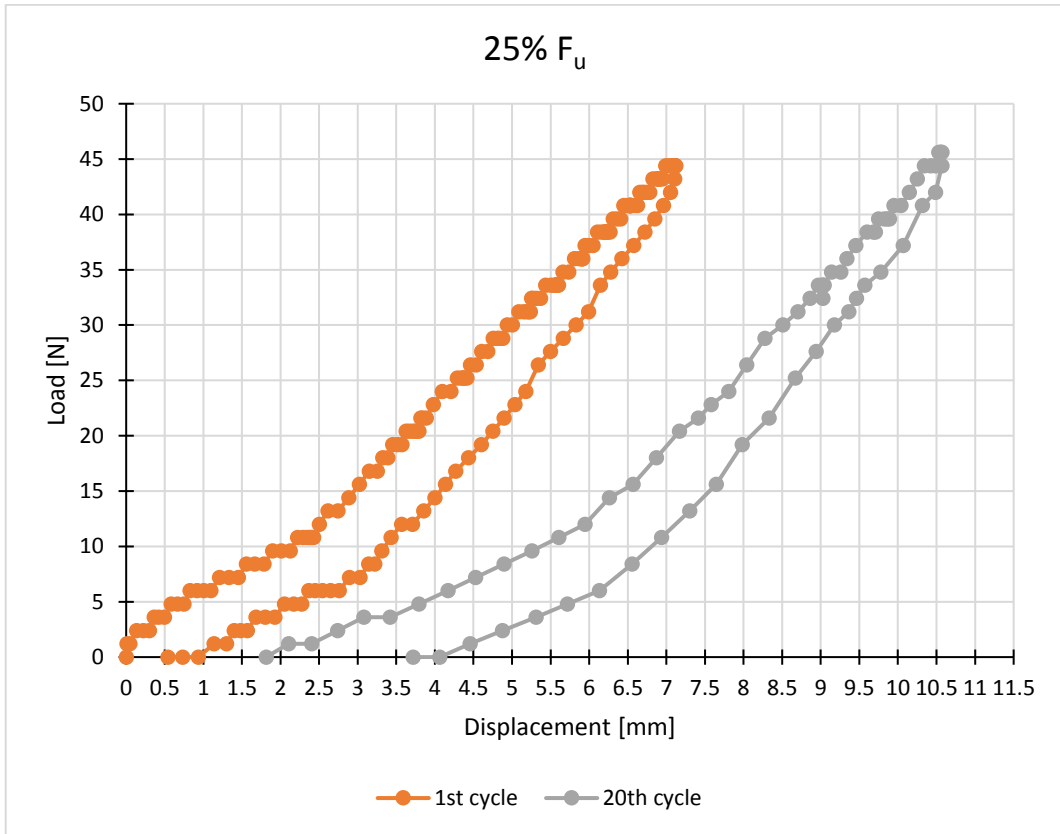


Grafico 4.37 - Confronto tra 1° e 20° ciclo al 25% di F_u

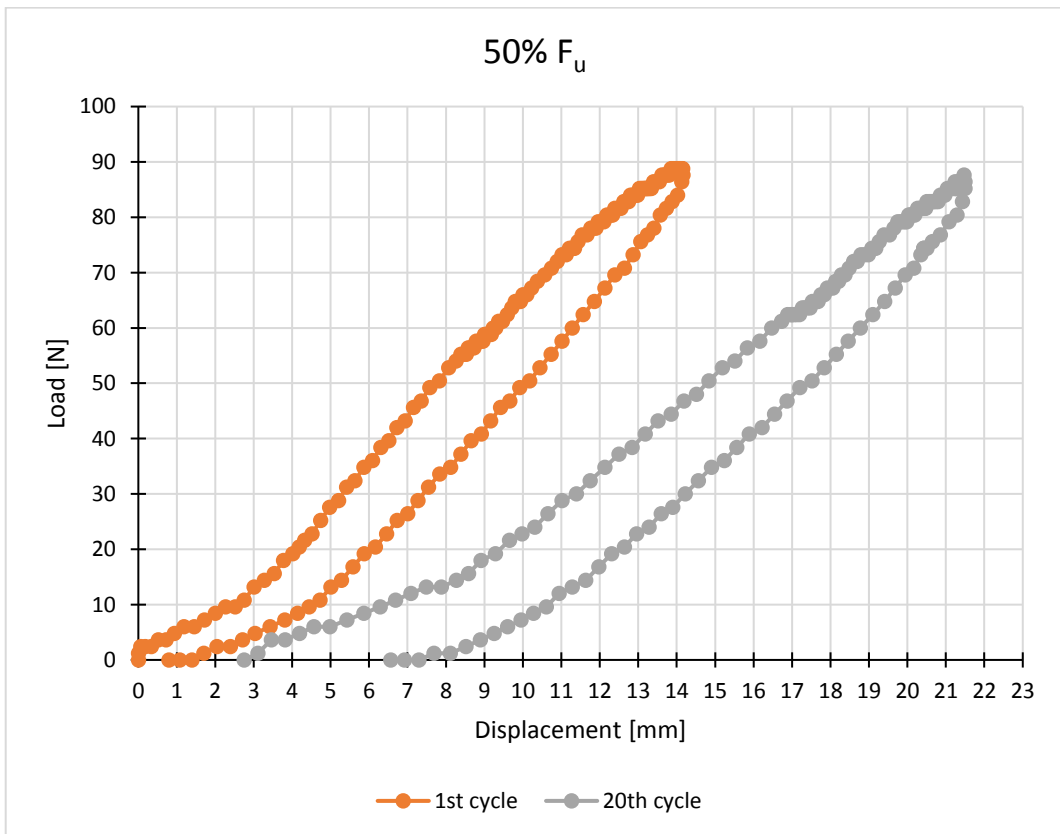


Grafico 4.38 - Confronto tra 1° e 20° ciclo al 50% di F_u

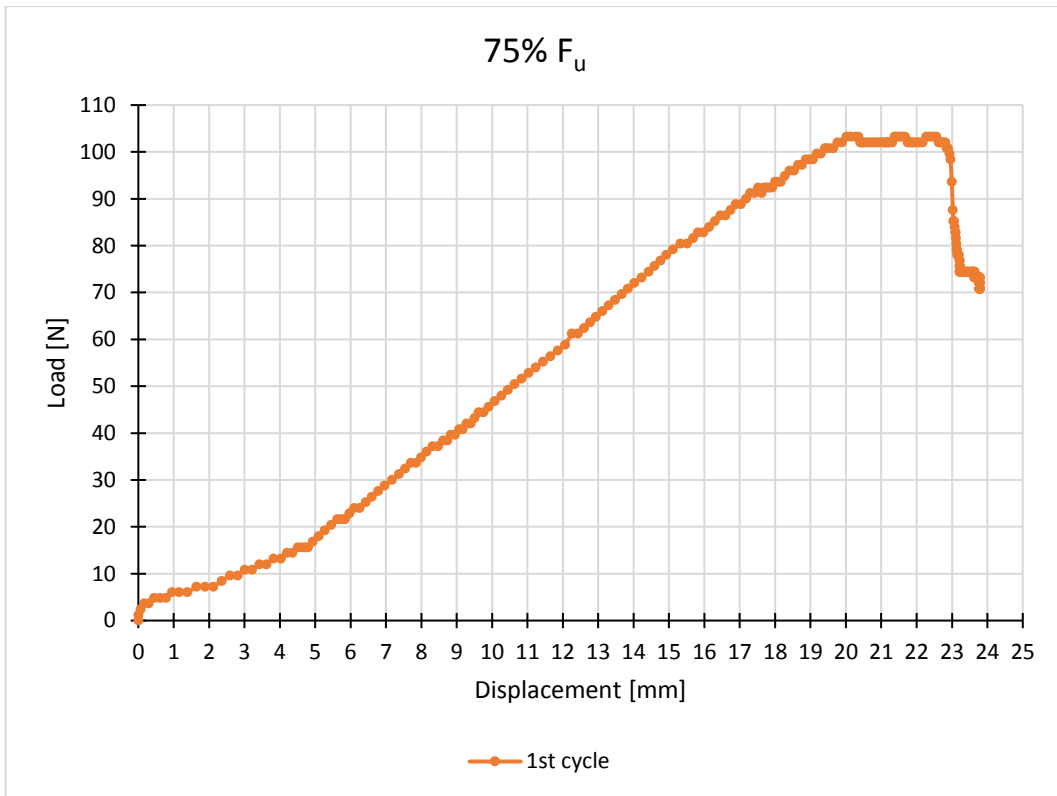


Grafico 4.39 – Confronto del solo 1° ciclo al 75% di F_u

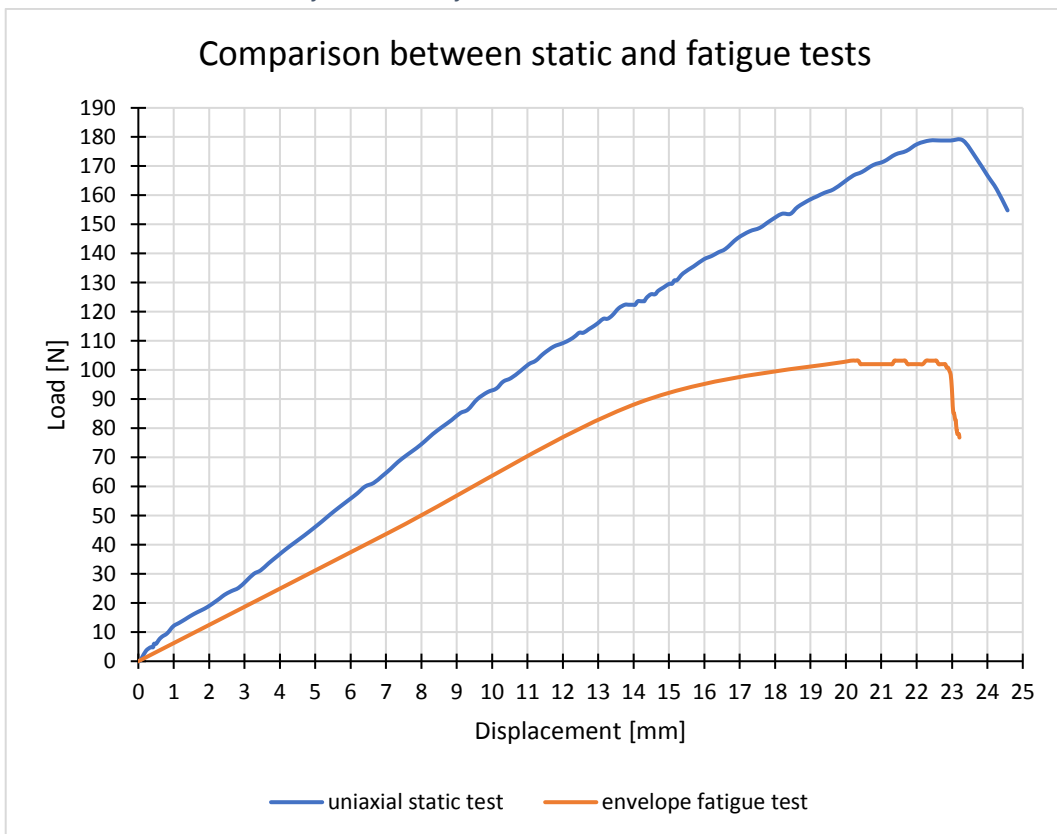


Grafico 4.40 - Confronto tra prove cicliche e unidirezionale

Dai grafici ciclici si evince un incremento di spostamento del provino mentre in quello di confronto tra rottura e inviluppo si nota come lo stesso non completi le prove raggiungendo la rottura nel primo ciclo al 75% F_u .

- Provino LOT 2-8

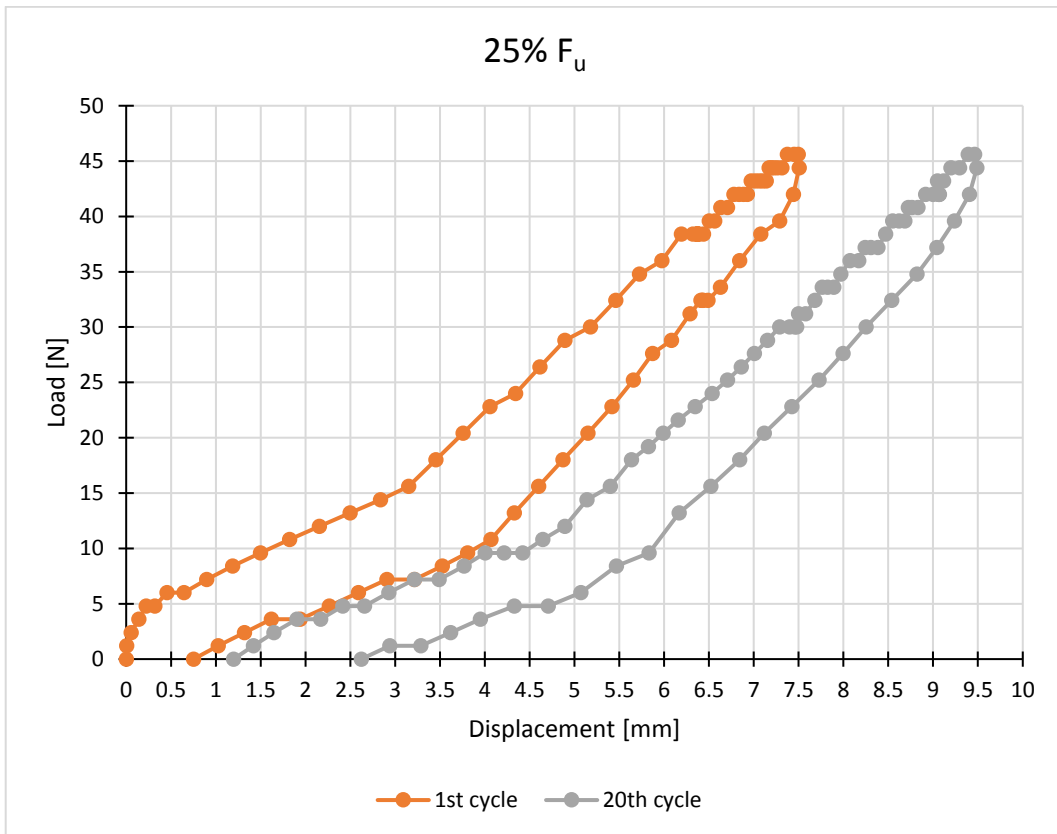


Grafico 4.41 - Confronto tra 1° e 20° ciclo al 25% di F_u

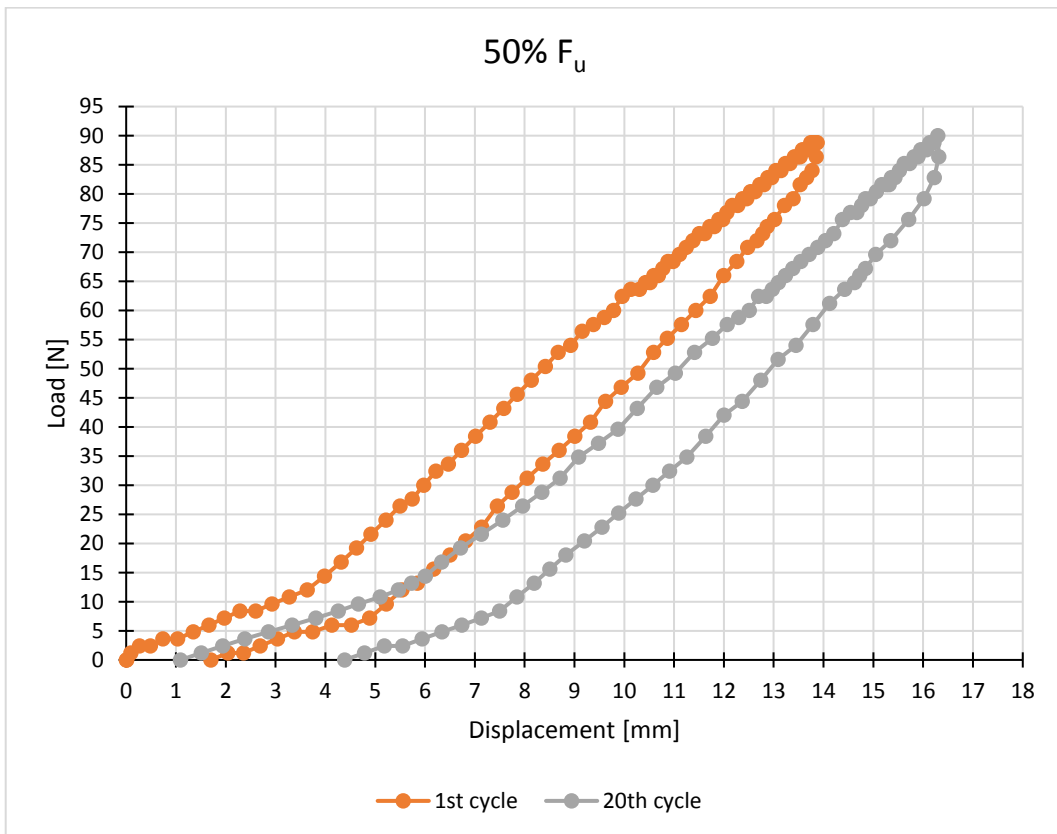


Grafico 4.42 - Confronto tra 1° e 20° ciclo al 50% di F_u

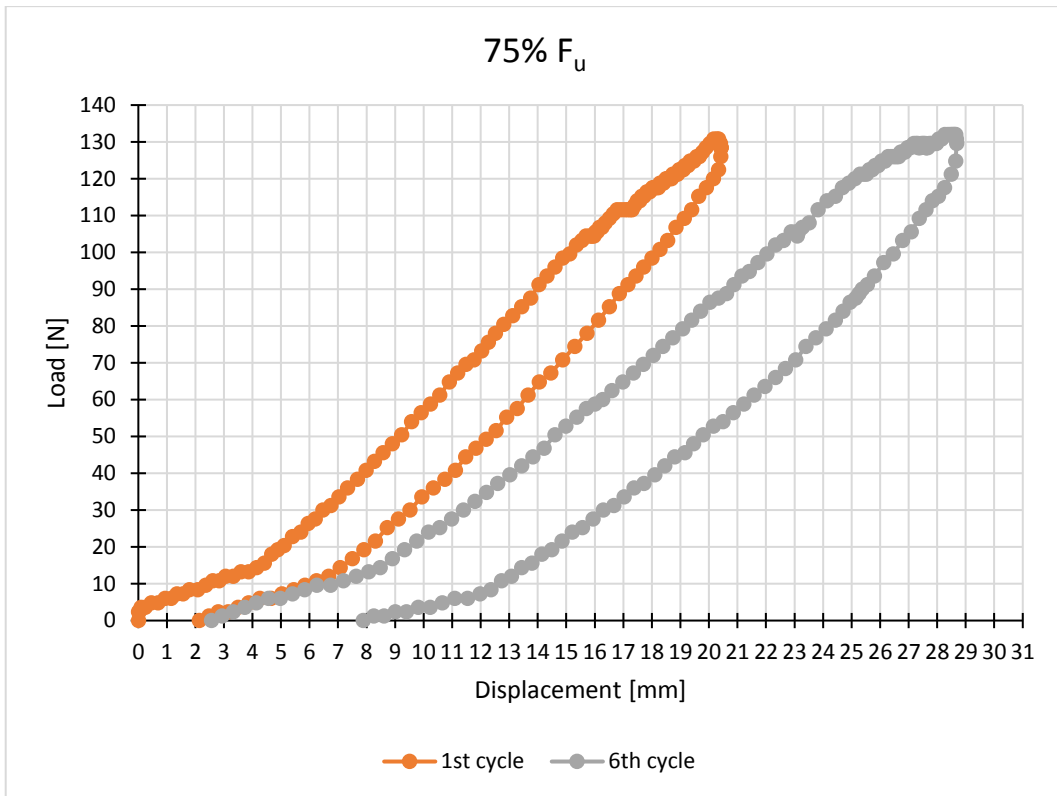


Grafico 4.43 - Confronto tra 1° e 6° ciclo al 75% di F_u

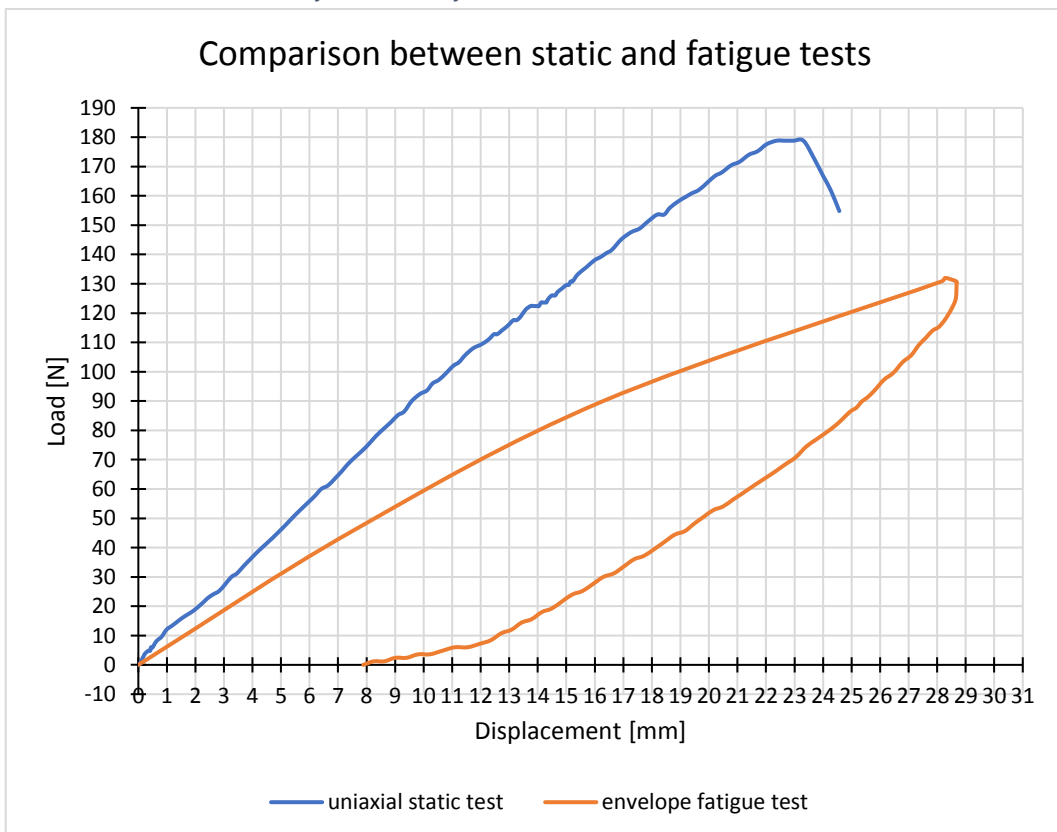


Grafico 4.44 - Confronto tra prove cicliche e unidirezionale

Dai grafici ciclici si evince un incremento di spostamento del provino mentre in quello di confronto tra rottura e inviluppo si nota come lo stesso non completi le prove raggiungendo la rottura nel sesto ciclo al 75% F_u .

- Provino LOT 2-9

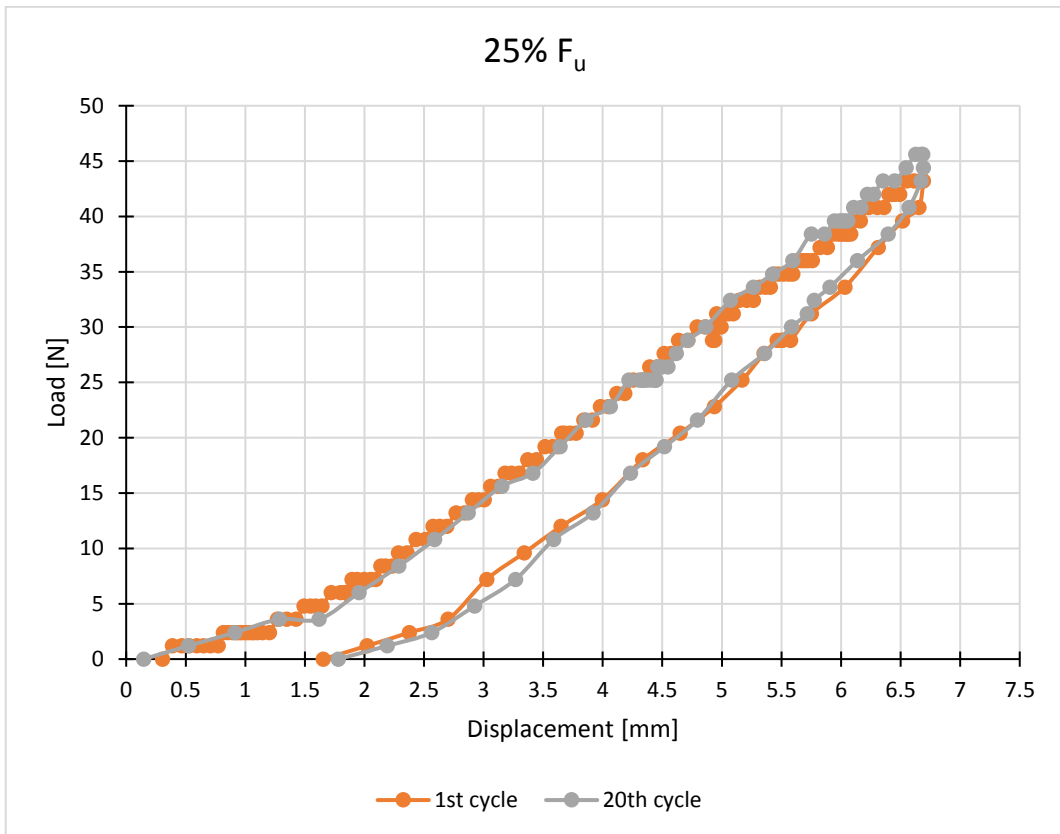


Grafico 4.45 - Confronto tra 1° e 20° ciclo al 25% di F_u

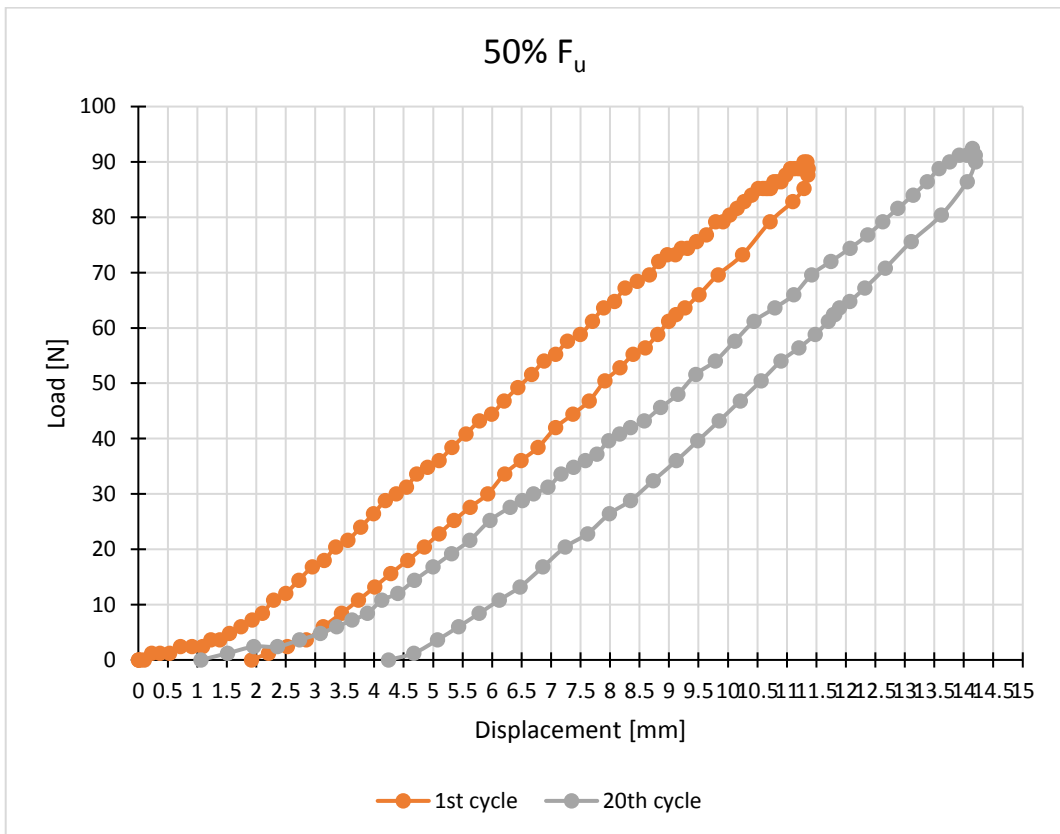


Grafico 4.46 - Confronto tra 1° e 20° ciclo al 50% di F_u

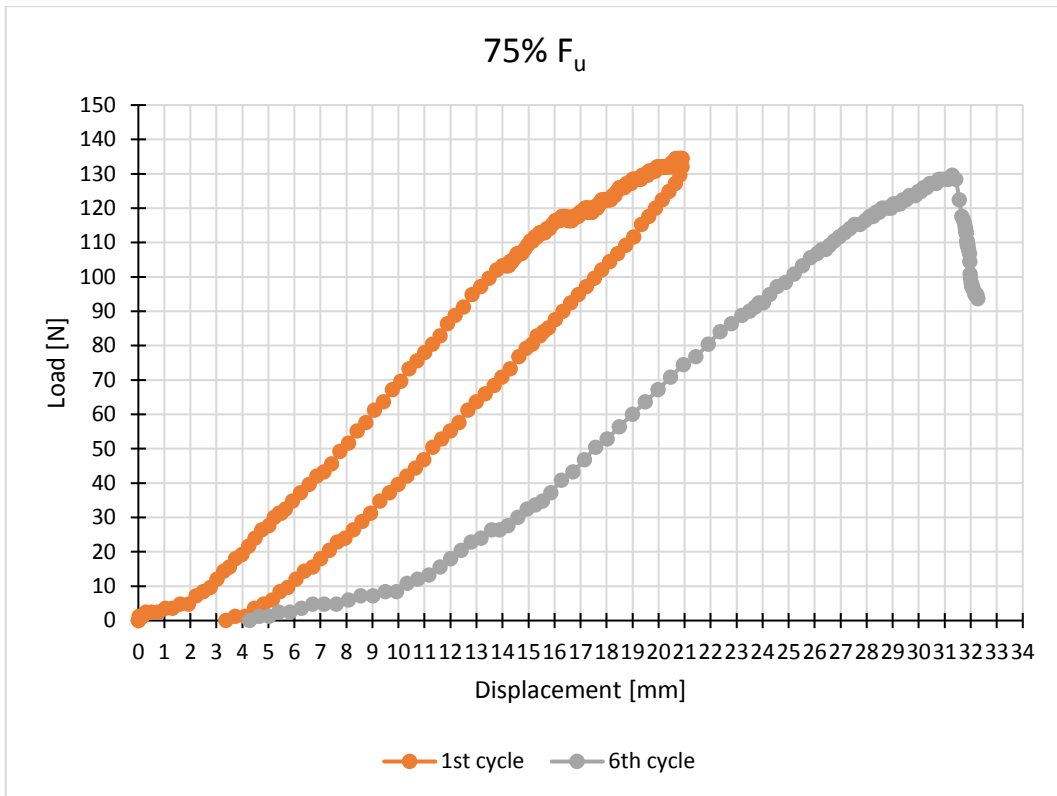


Grafico 4.47 - Confronto tra 1° e 6° ciclo al 75% di F_u

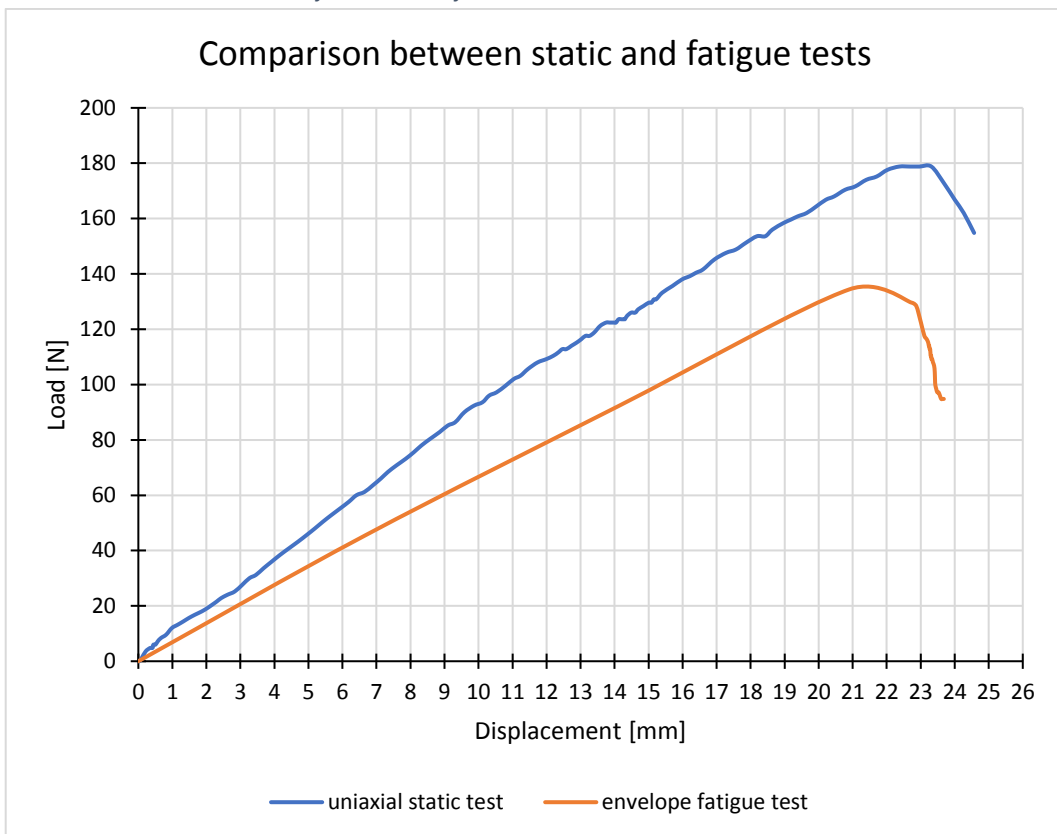


Grafico 4.48 - Confronto tra prove cicliche e unidirezionale

Dai grafici ciclici si evince un incremento di spostamento del provino mentre in quello di confronto tra rottura e inviluppo si nota come lo stesso non completi le prove raggiungendo la rottura nel sesto ciclo al 75% F_u .

- Provino LOT 3-3

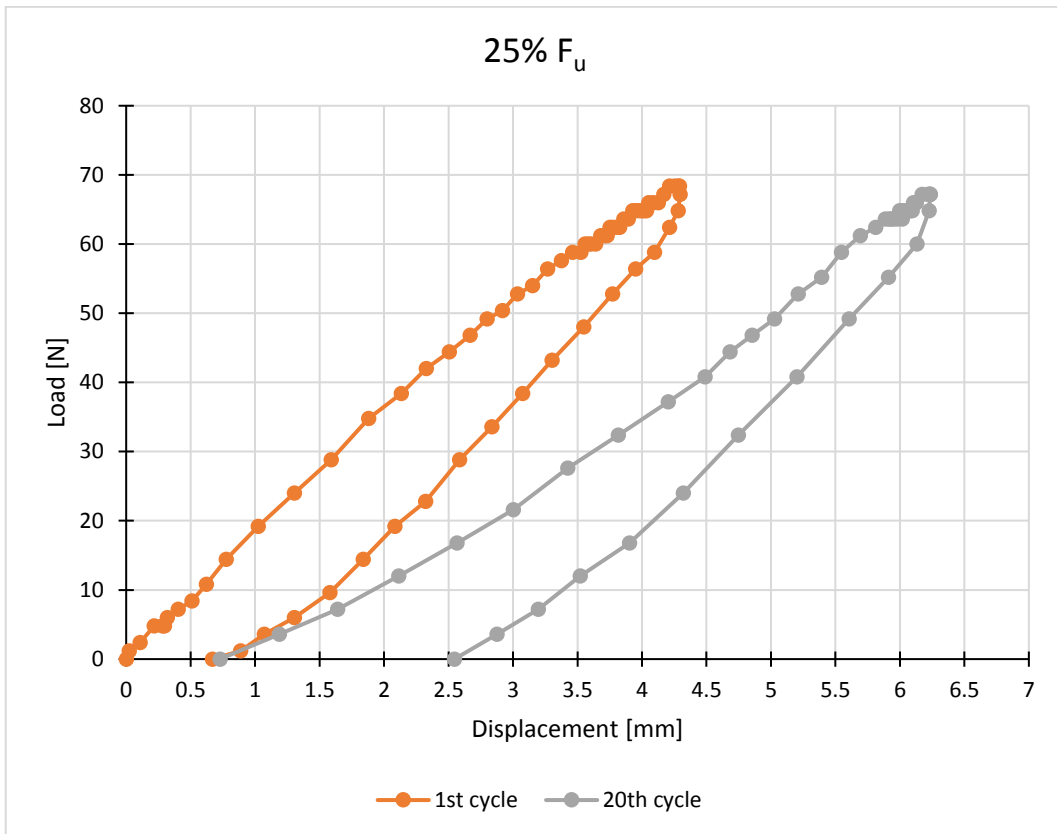


Grafico 4.49 - Confronto tra 1° e 20° ciclo al 25% di F_u

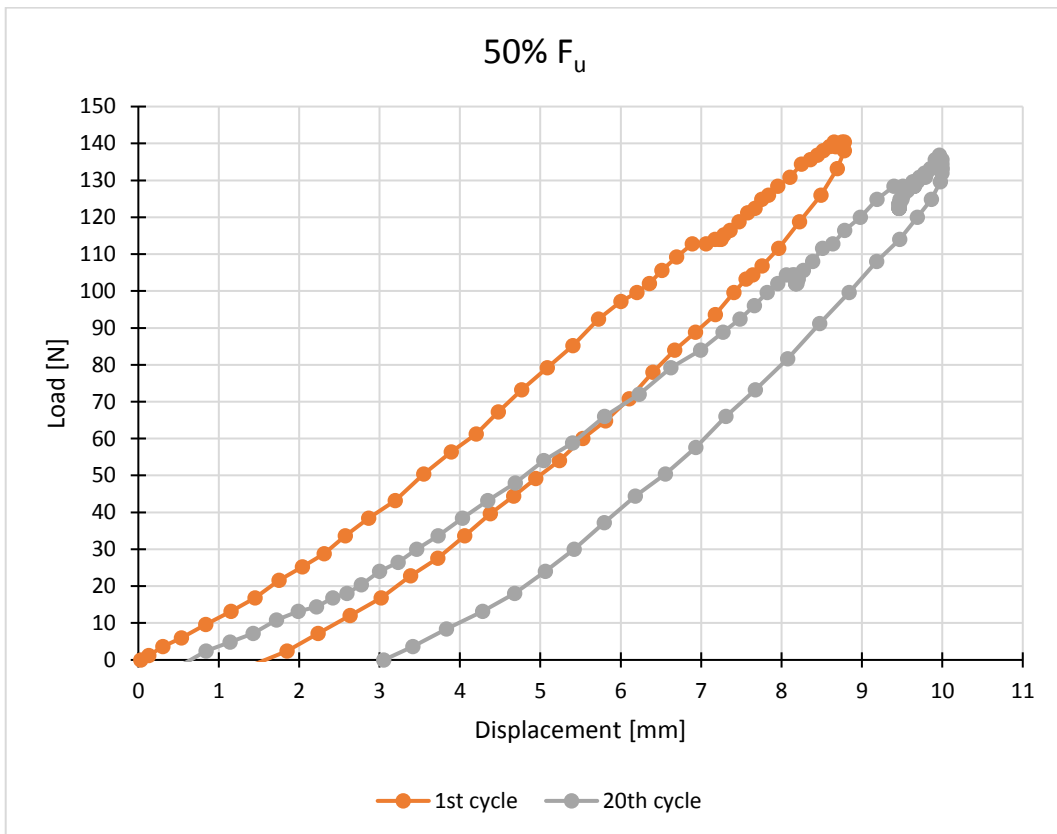


Grafico 4.50 - Confronto tra 1° e 20° ciclo al 50% di F_u

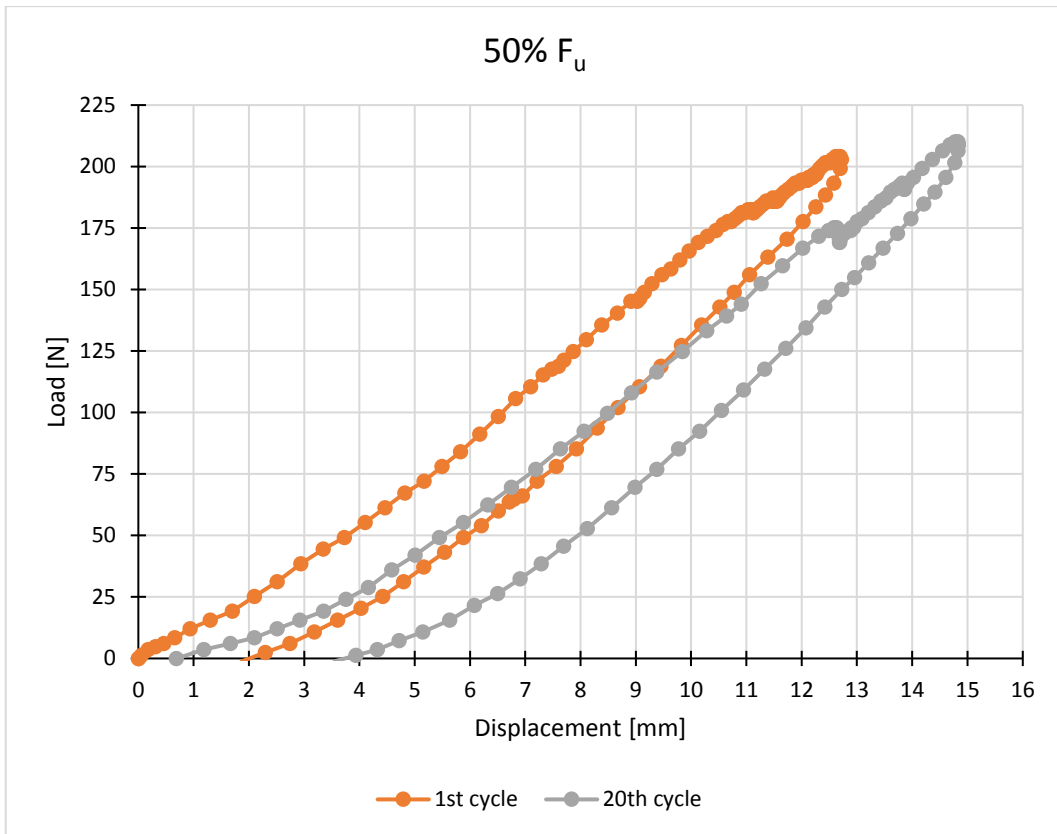


Grafico 4.51 - Confronto tra 1° e 20° ciclo al 75% di F_u

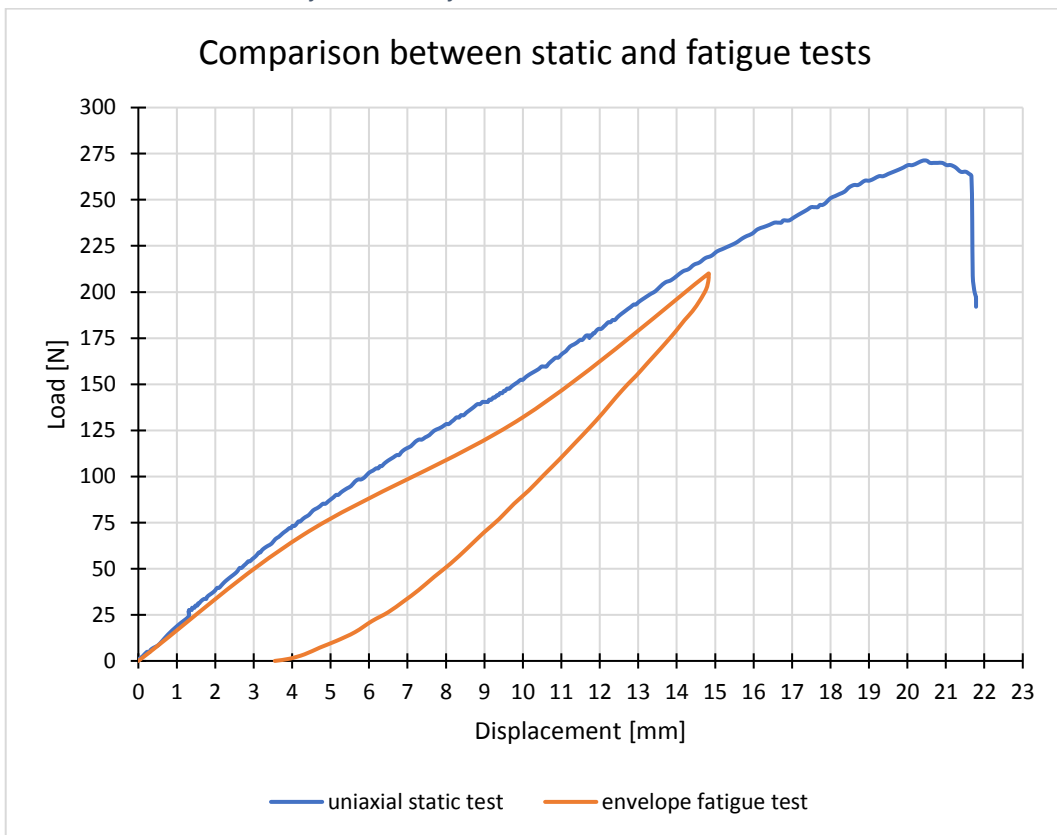


Grafico 4.52 - Confronto tra prove cicliche e unidirezionale

Dai grafici ciclici si evince un incremento di spostamento del provino mentre in quello di confronto tra rottura e involuppo si nota come lo stesso completi le prove senza rompersi.

- Provino LOT 3-4

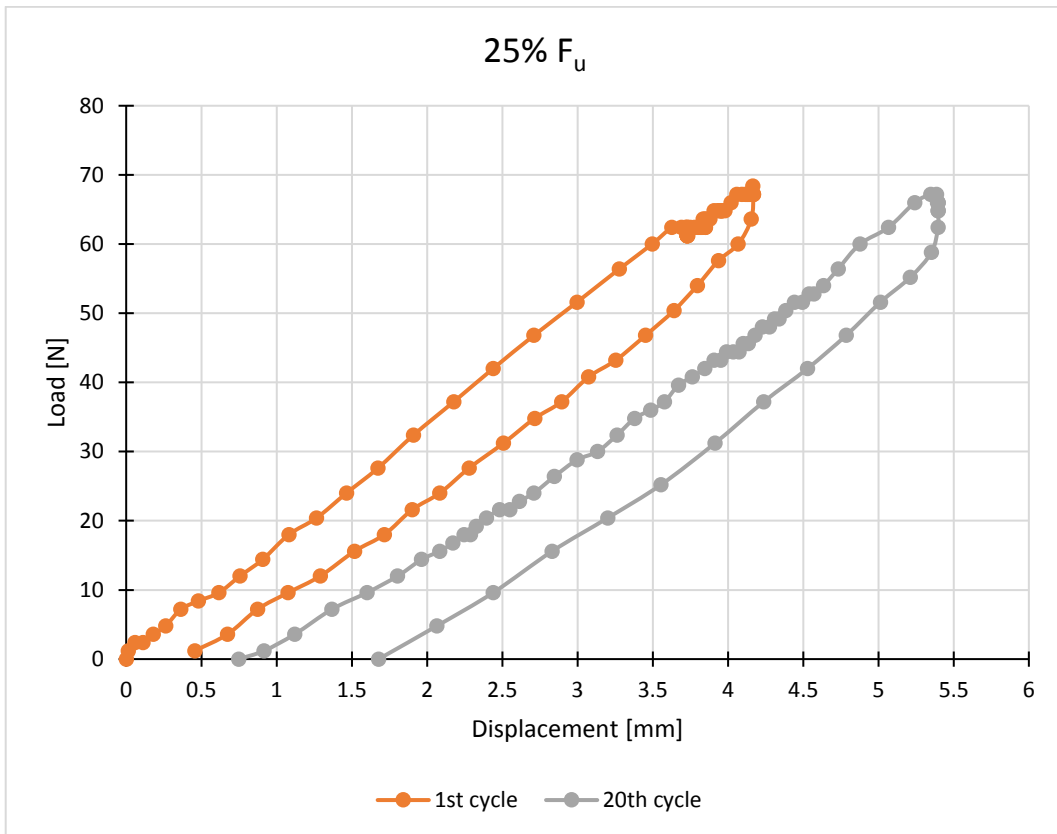


Grafico 4.53 - Confronto tra 1° e 20° ciclo al 25% di F_u

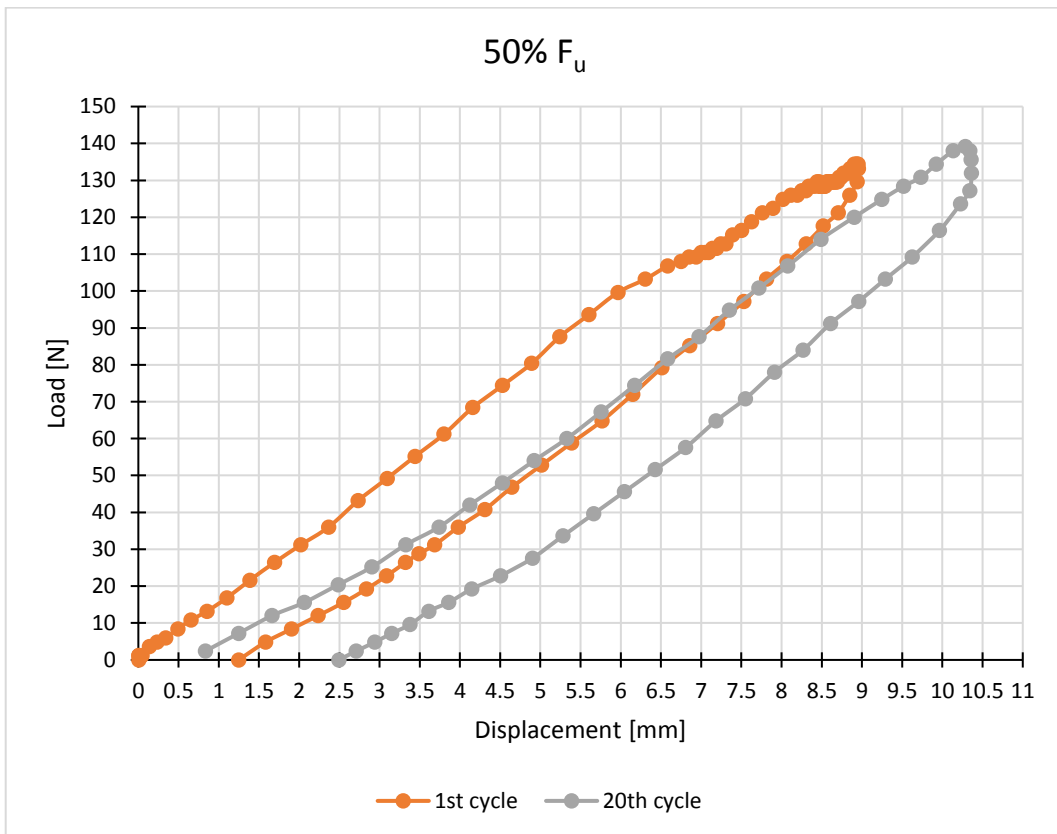


Grafico 4.54 - Confronto tra 1° e 20° ciclo al 50% di F_u

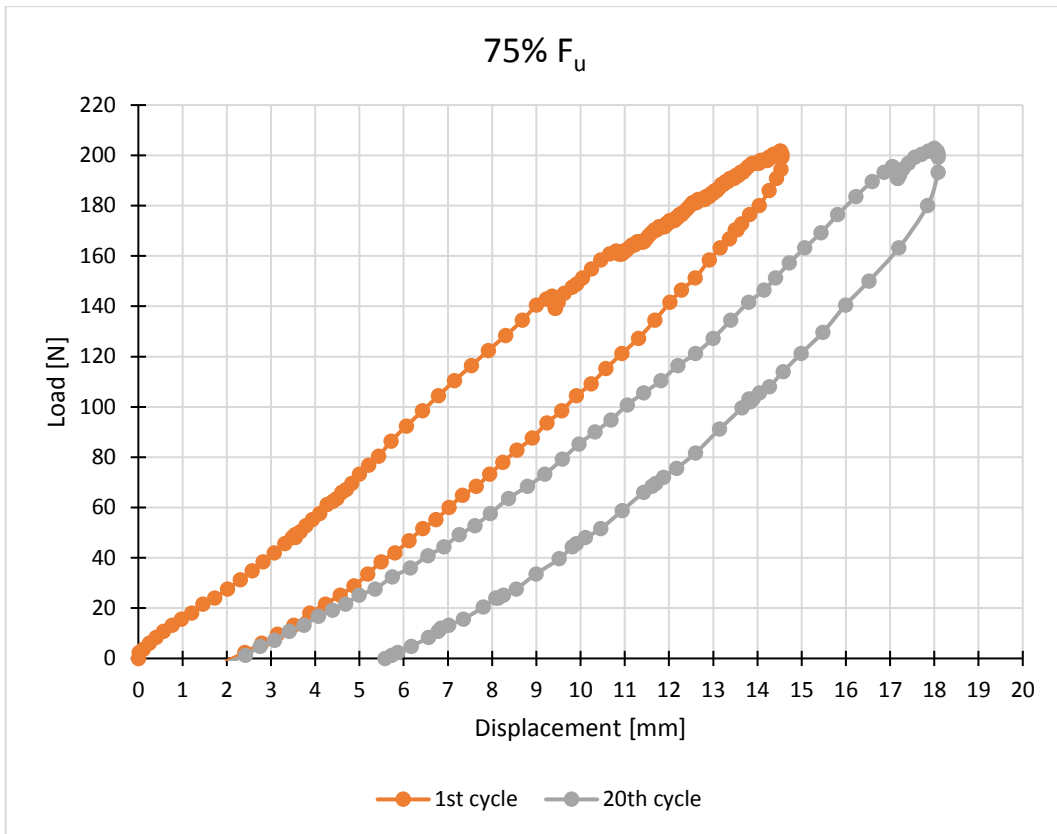


Grafico 4.55 - Confronto tra 1° e 20° ciclo al 75% di F_u

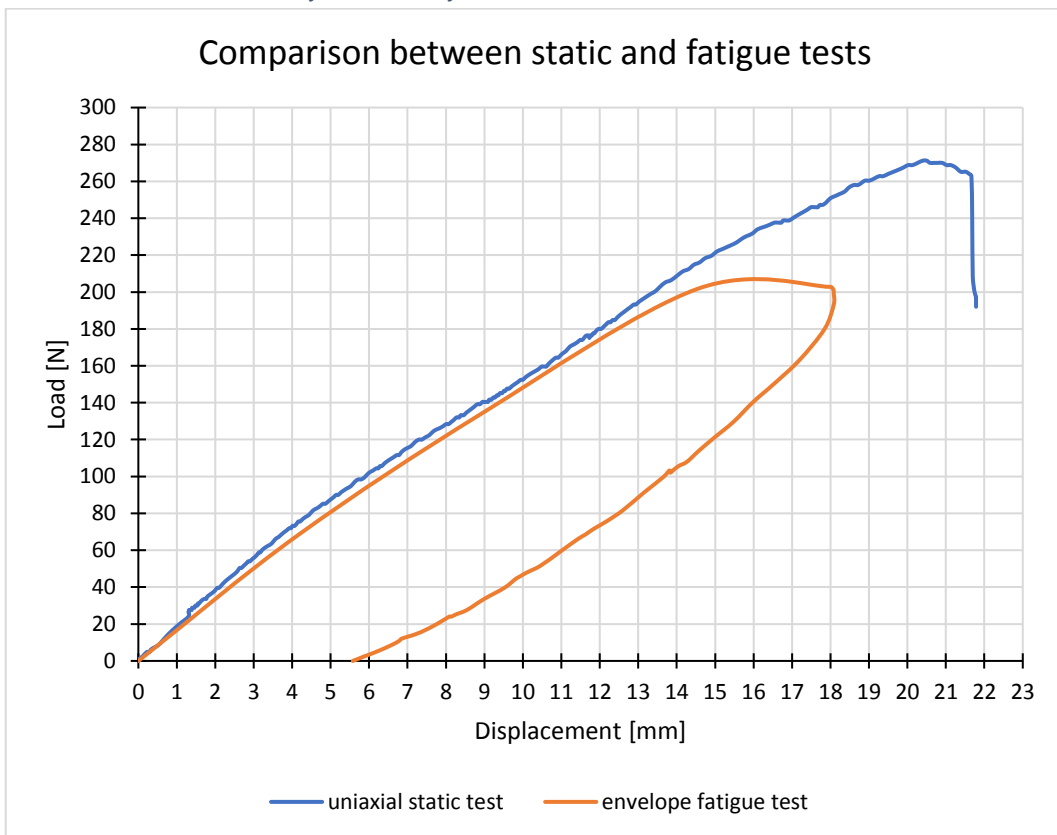


Grafico 4.56 - Confronto tra prove cicliche e unidirezionale

Dai grafici ciclici si evince un incremento di spostamento del provino mentre in quello di confronto tra rottura e involuppo si nota come lo stesso completi le prove senza rompersi.

- Provino LOT 3-5

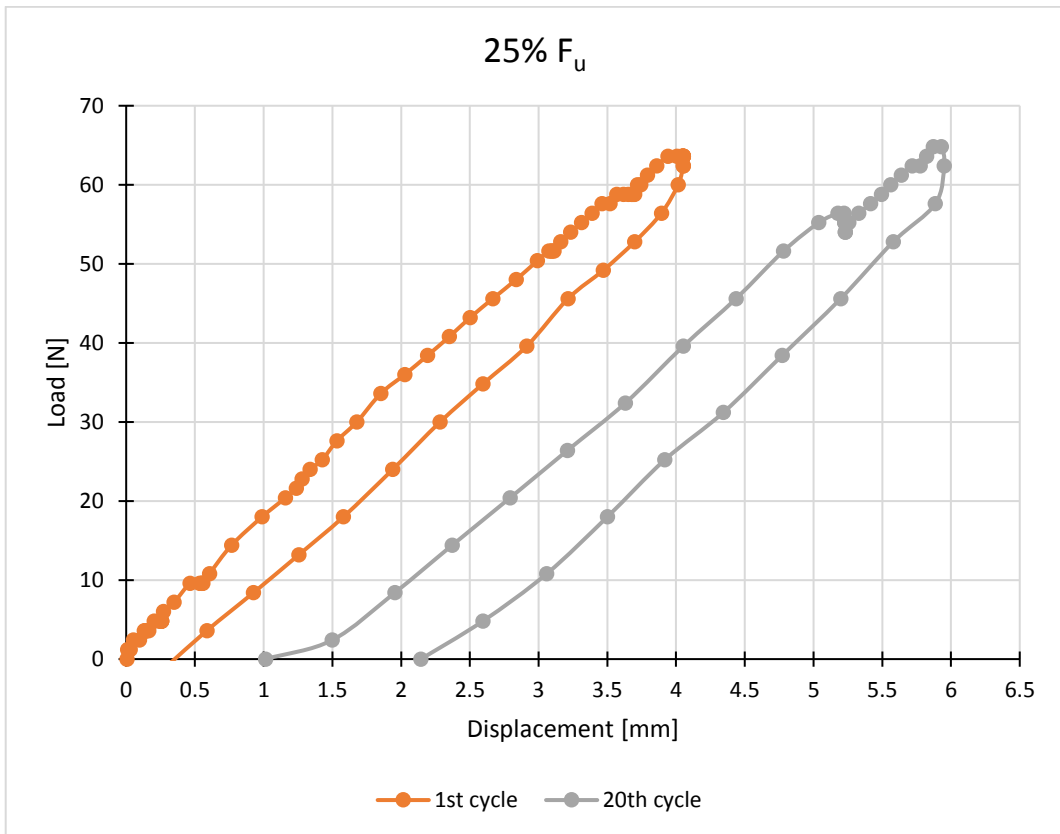


Grafico 4.57 - Confronto tra 1° e 20° ciclo al 25% di F_u

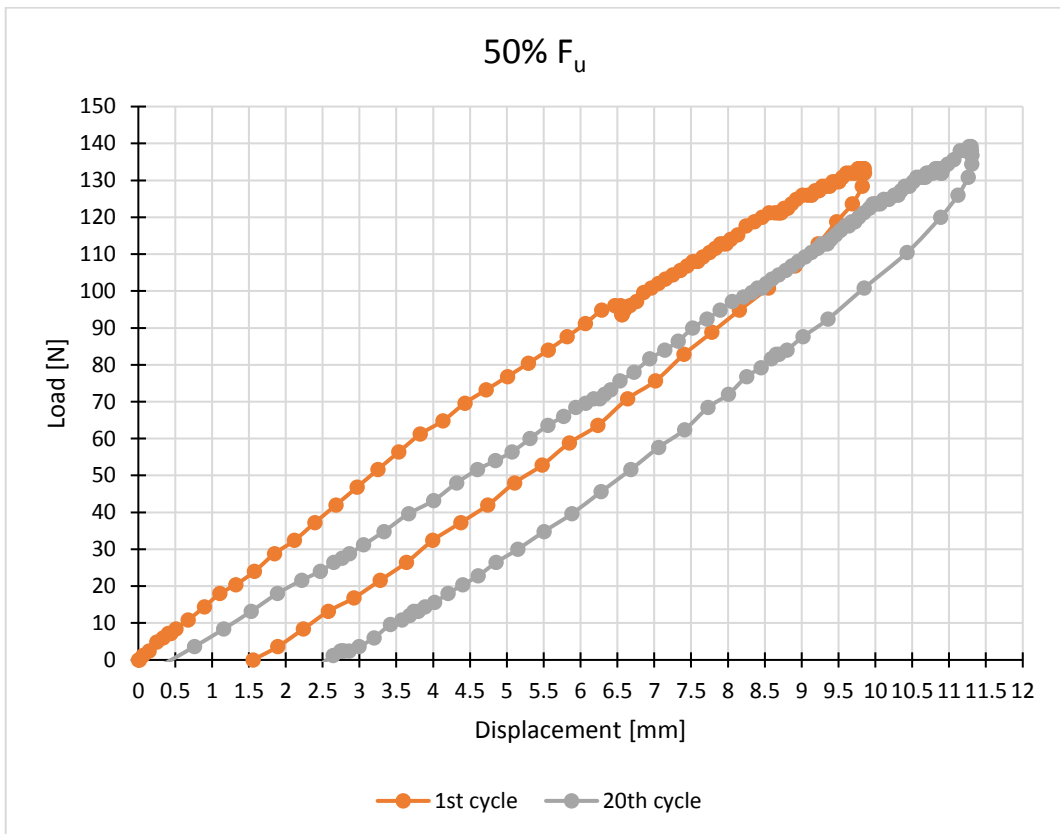


Grafico 4.58 - Confronto tra 1° e 20° ciclo al 50% di F_u

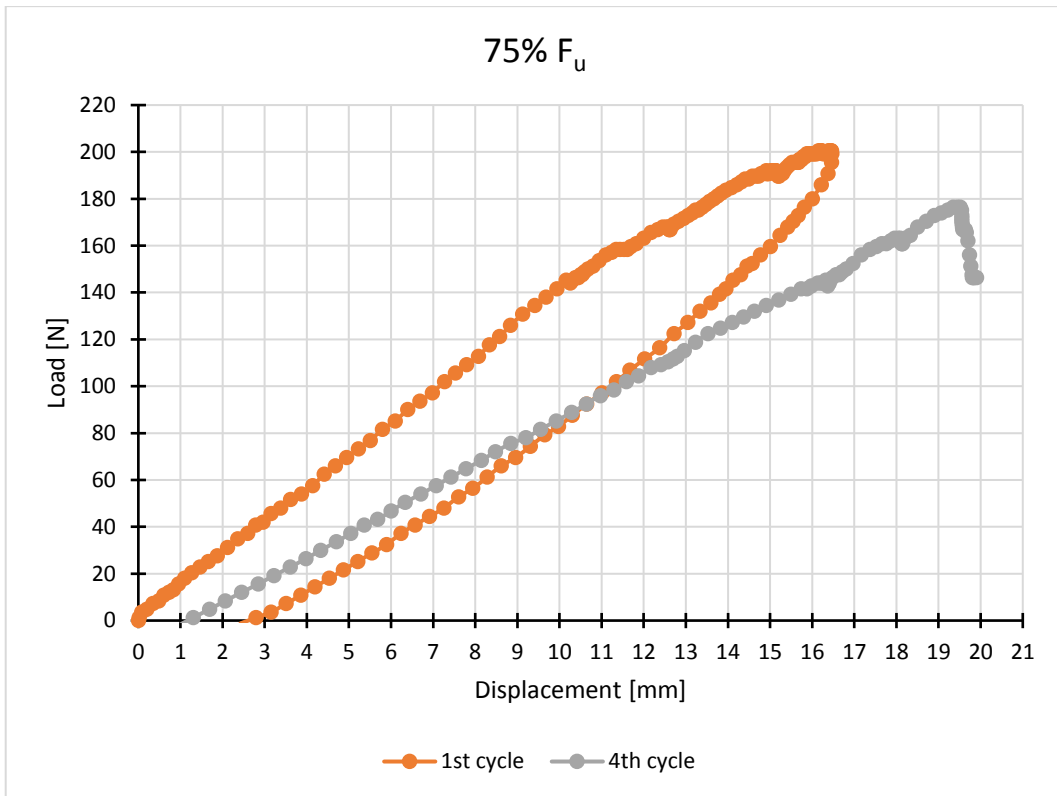


Grafico 4.59 - Confronto tra 1° e 4° ciclo al 75% di F_u

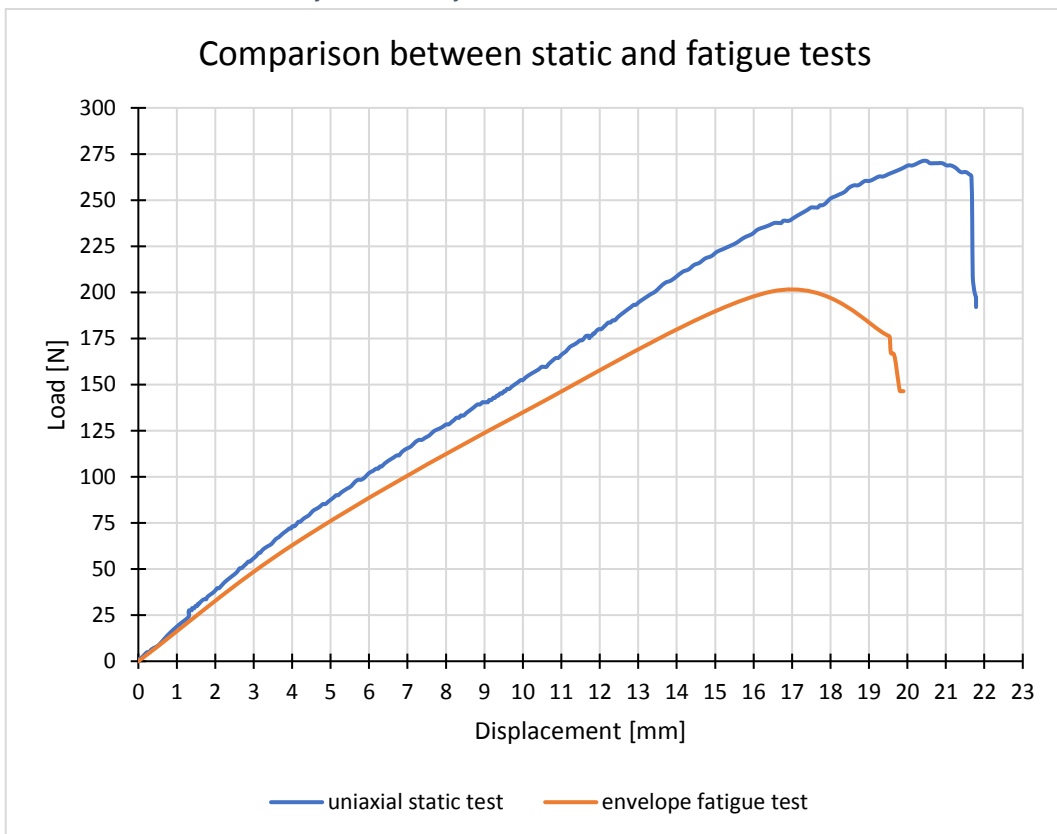


Grafico 4.60 - Confronto tra prove cicliche e unidirezionale

Dai grafici ciclici si evince un incremento di spostamento del provino mentre in quello di confronto tra rottura e inviluppo si nota come lo stesso non completi le prove raggiungendo la rottura nel quarto ciclo al 75% F_u .

- Provino LOT 3-8

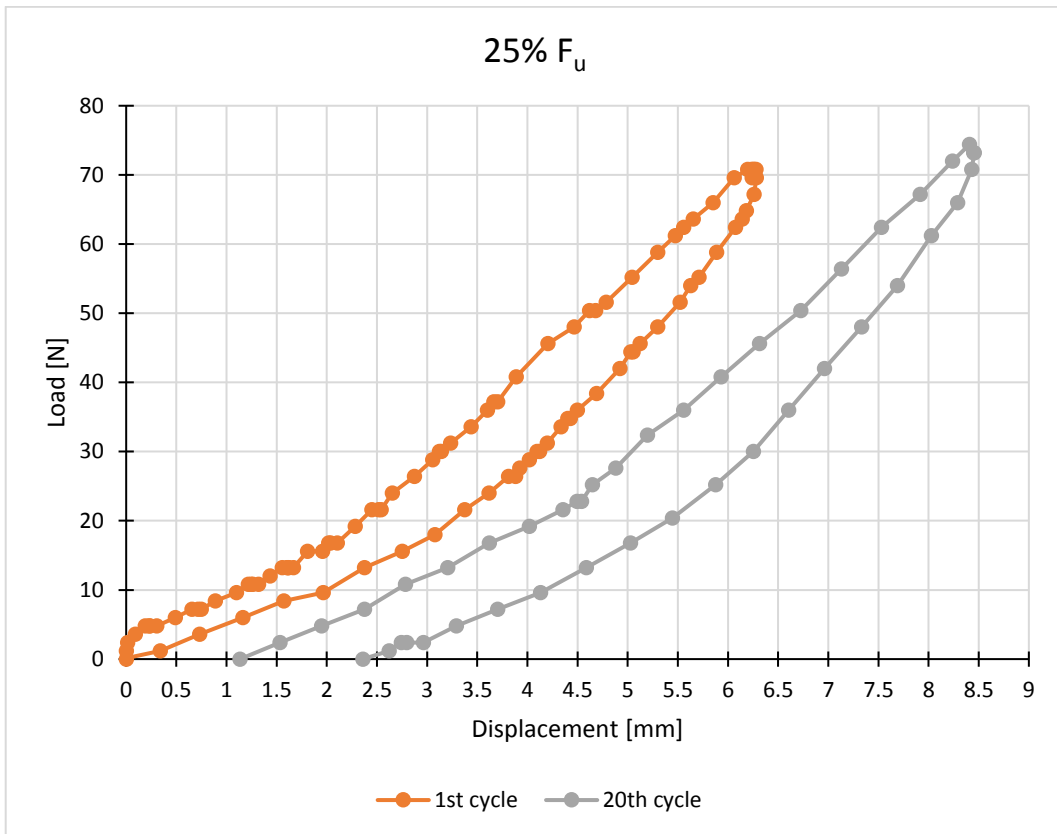


Grafico 4.61 - Confronto tra 1° e 20° ciclo al 25% di F_u

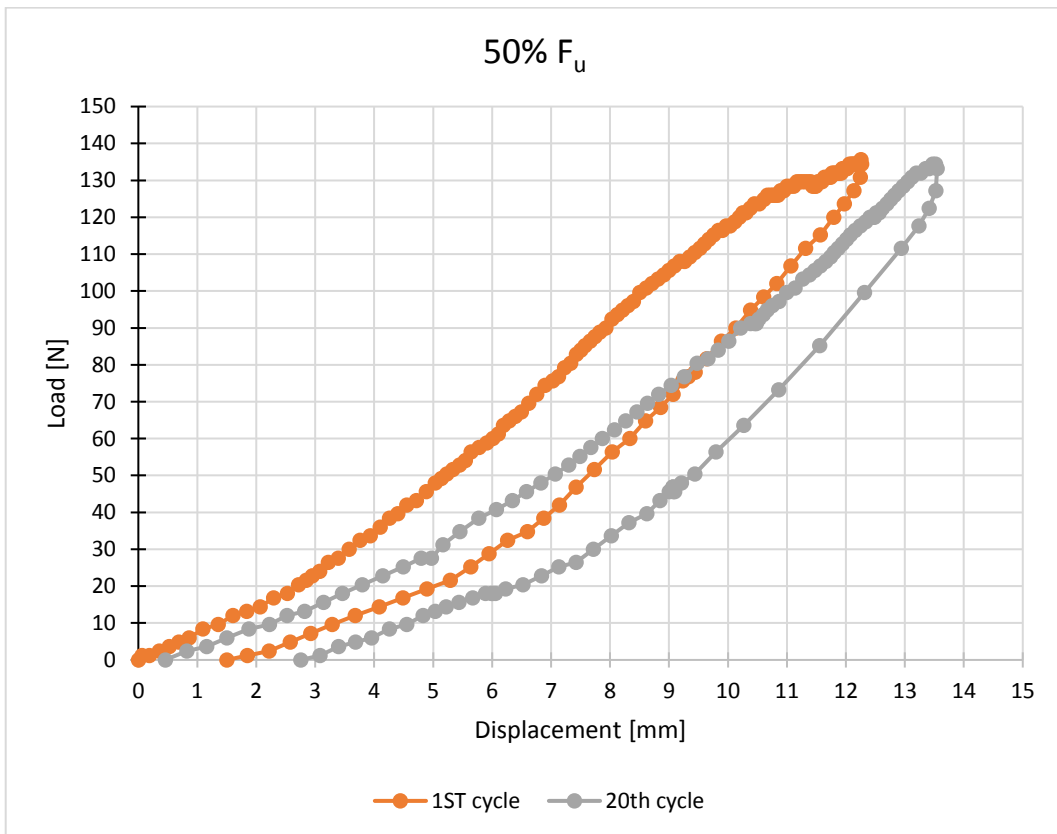


Grafico 4.62 - Confronto tra 1° e 20° ciclo al 50% di F_u

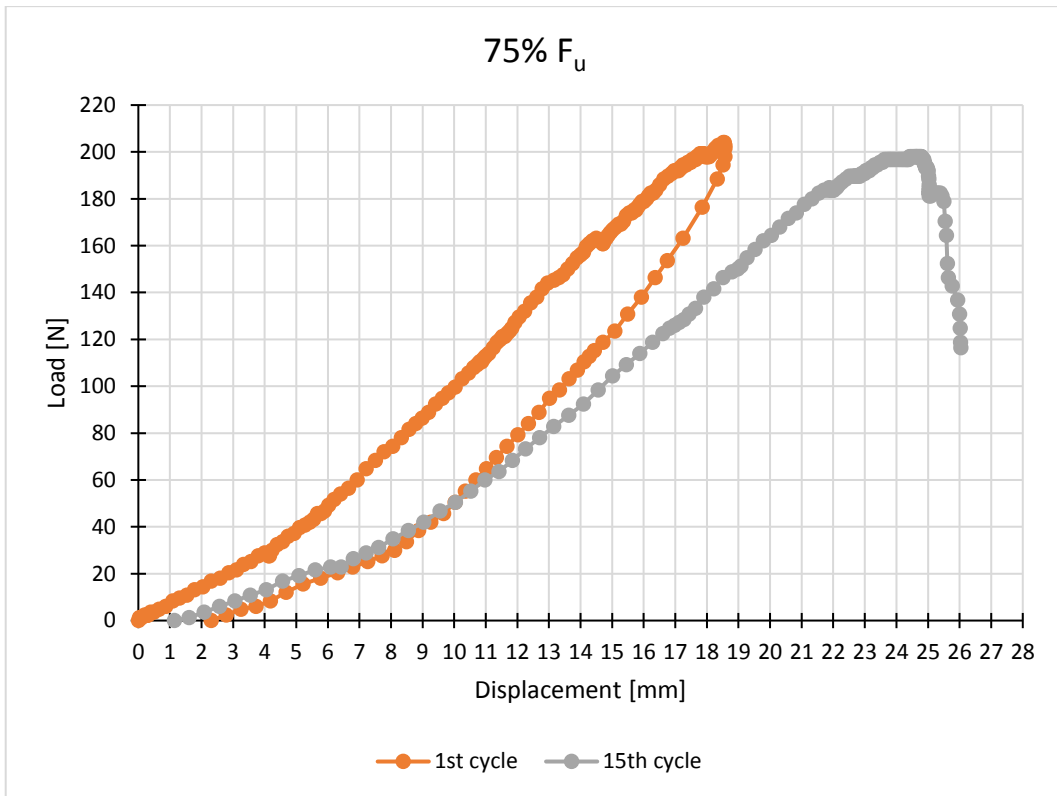


Grafico 4.63 - Confronto tra 1° e 15° ciclo al 75% di F_u

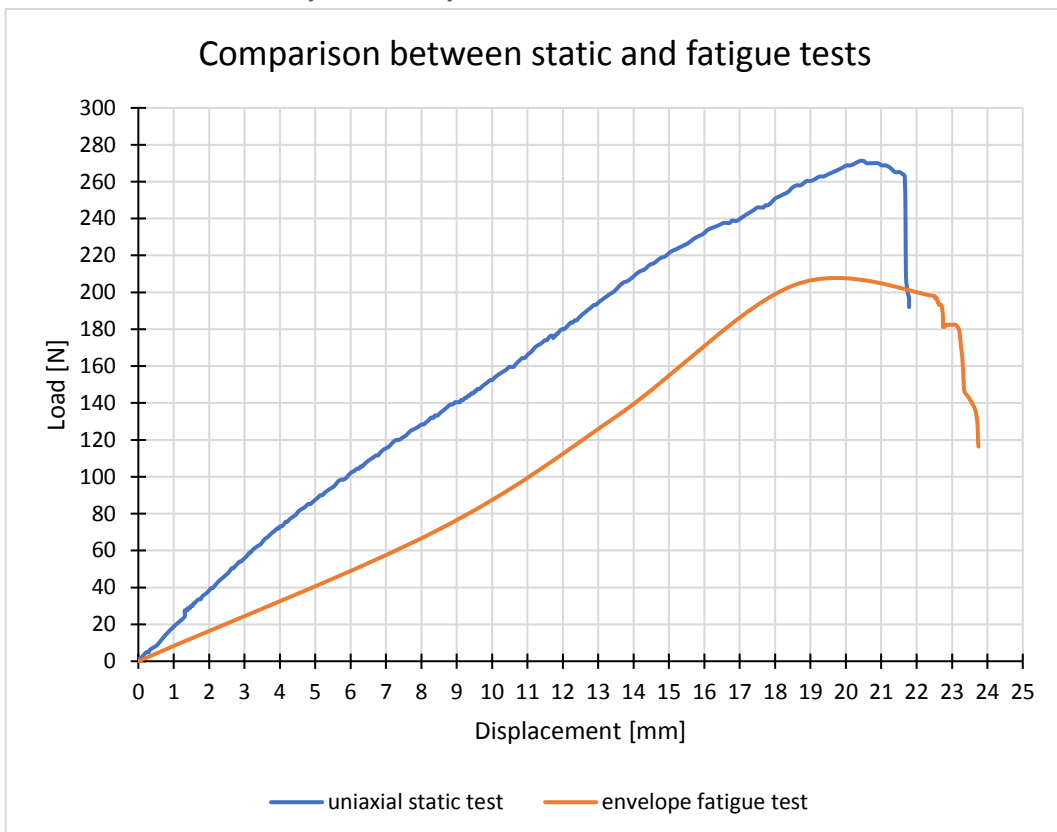


Grafico 4.64 - Confronto tra prove cicliche e unidirezionale

Dai grafici ciclici si evince un incremento di spostamento del provino mentre in quello di confronto tra rottura e inviluppo si nota come lo stesso non completi le prove raggiungendo la rottura nel quindicesimo ciclo al 75% F_u .

- Provino LOT 3-10

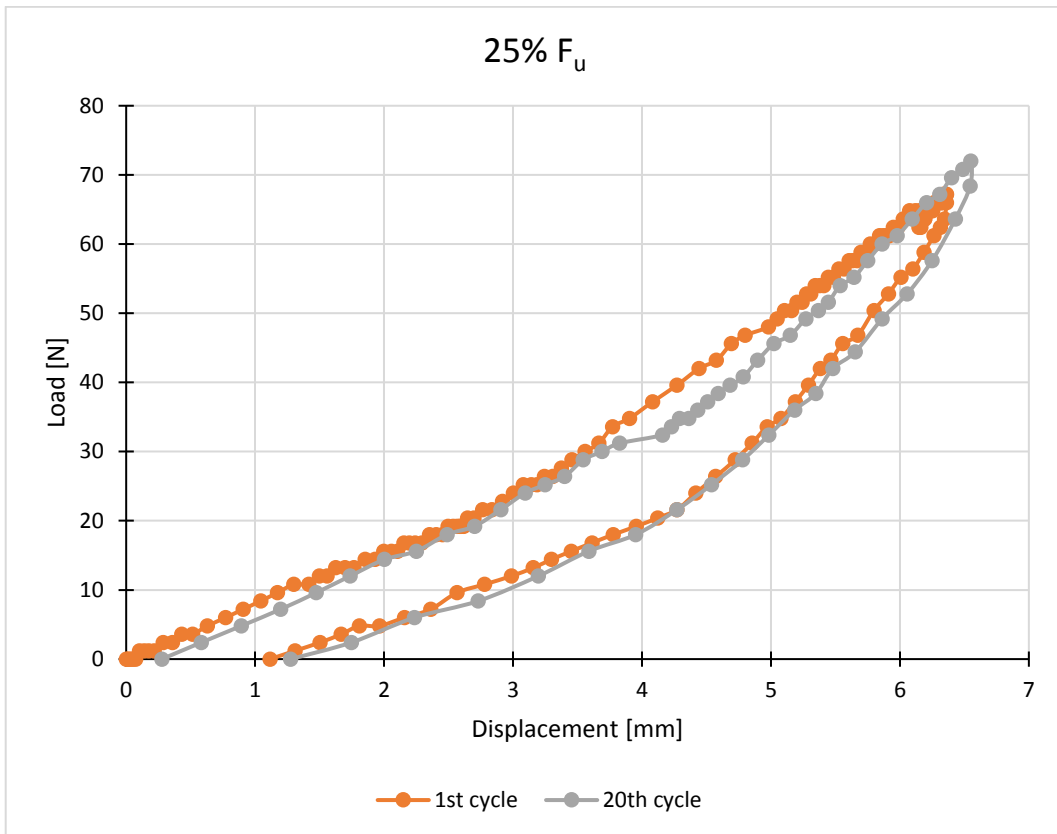


Grafico 4.65 - Confronto tra 1° e 20° ciclo al 25% di F_u

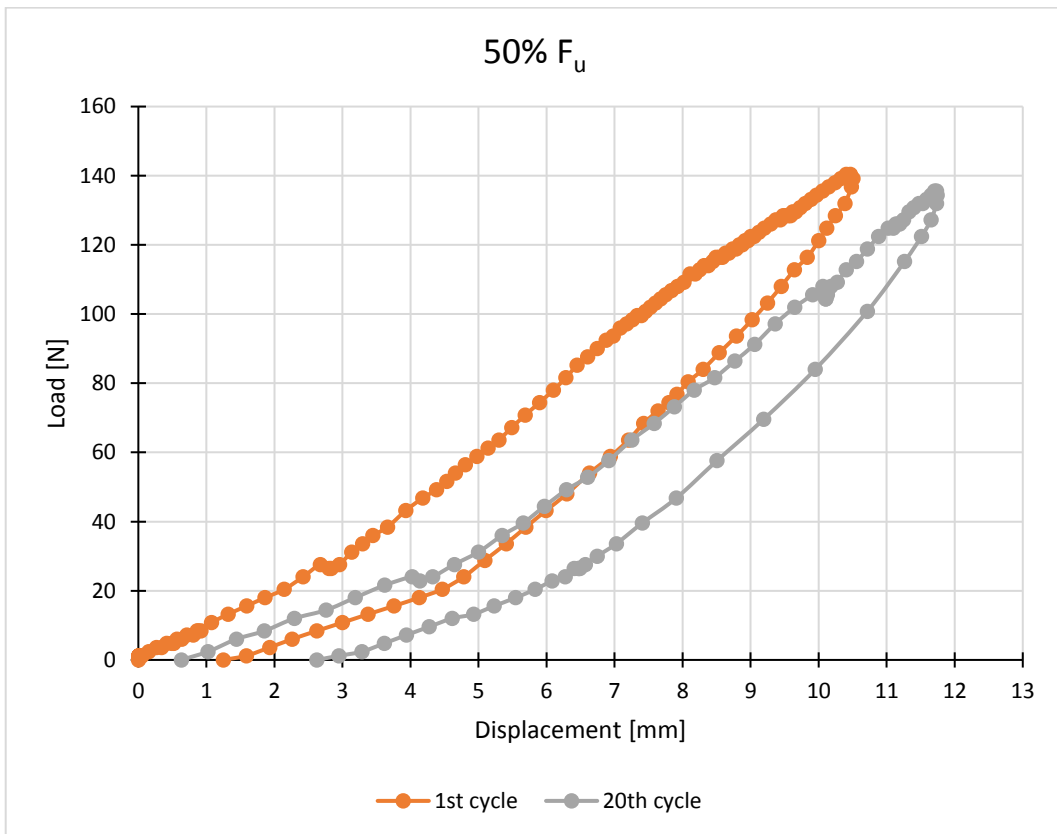


Grafico 4.66 - Confronto tra 1° e 20° ciclo al 50% di F_u

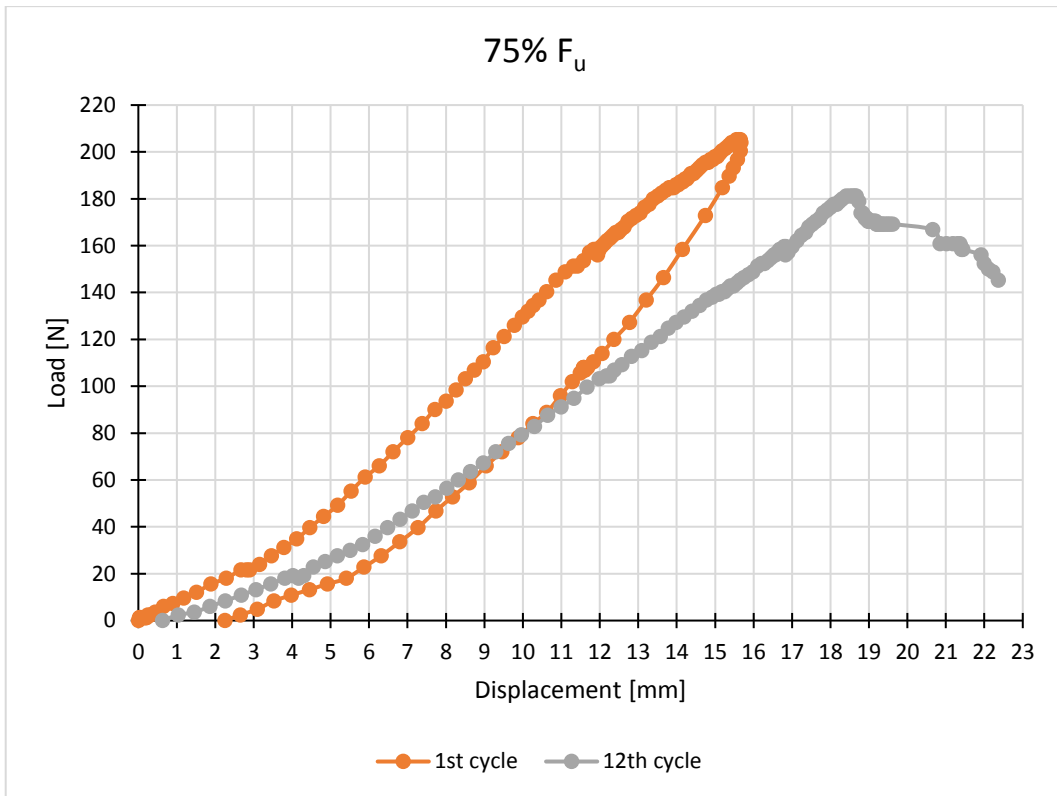


Grafico 4.67 - Confronto tra 1° e 12° ciclo al 75% di F_u

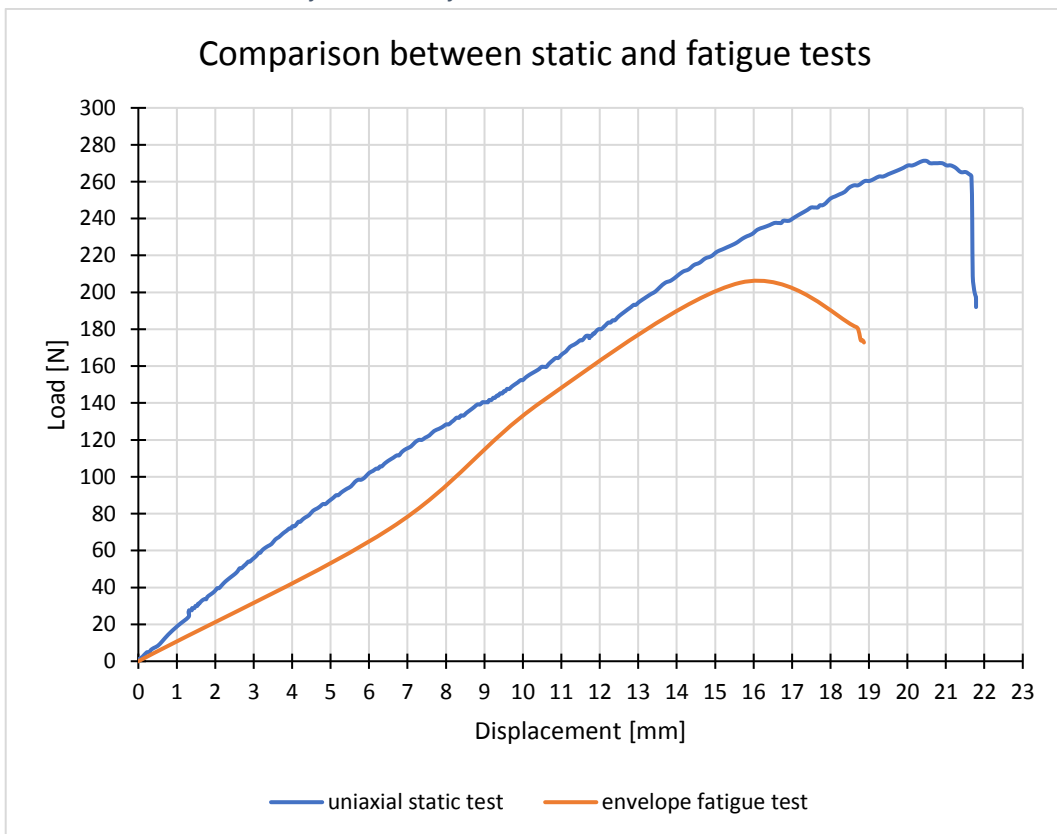


Grafico 4.68 - Confronto tra prove cicliche e unidirezionale

Dai grafici ciclici si evince un incremento di spostamento del provino mentre in quello di confronto tra rottura e inviluppo si nota come lo stesso non completi le prove raggiungendo la rottura nel dodicesimo ciclo al 75% F_u .

- Provino LOT 3-11

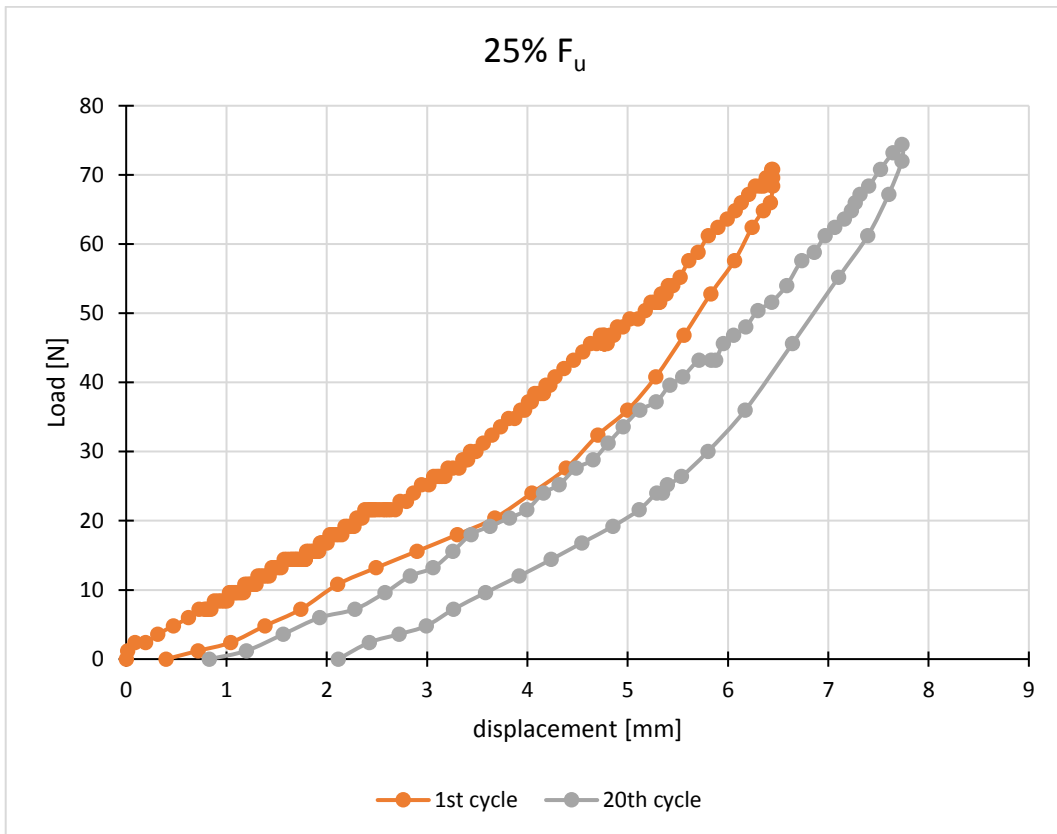


Grafico 4.69 - Confronto tra 1° e 20° ciclo al 25% di F_u

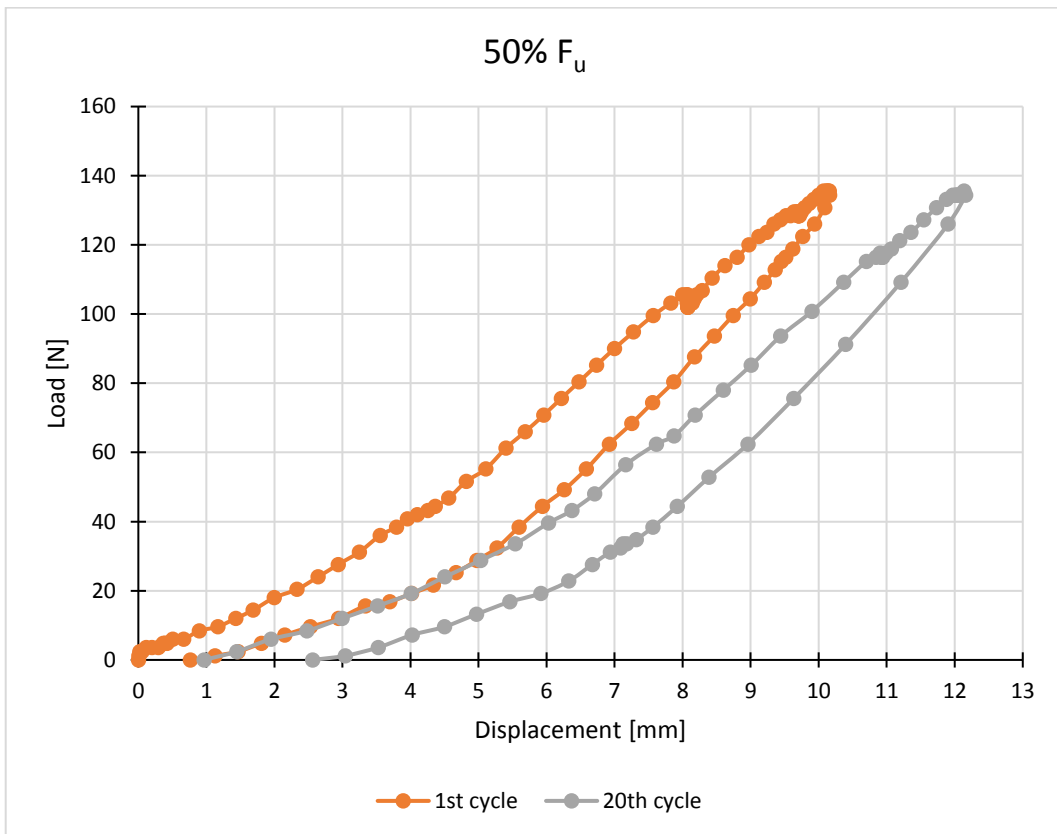


Grafico 4.70 - Confronto tra 1° e 20° ciclo al 50% di F_u

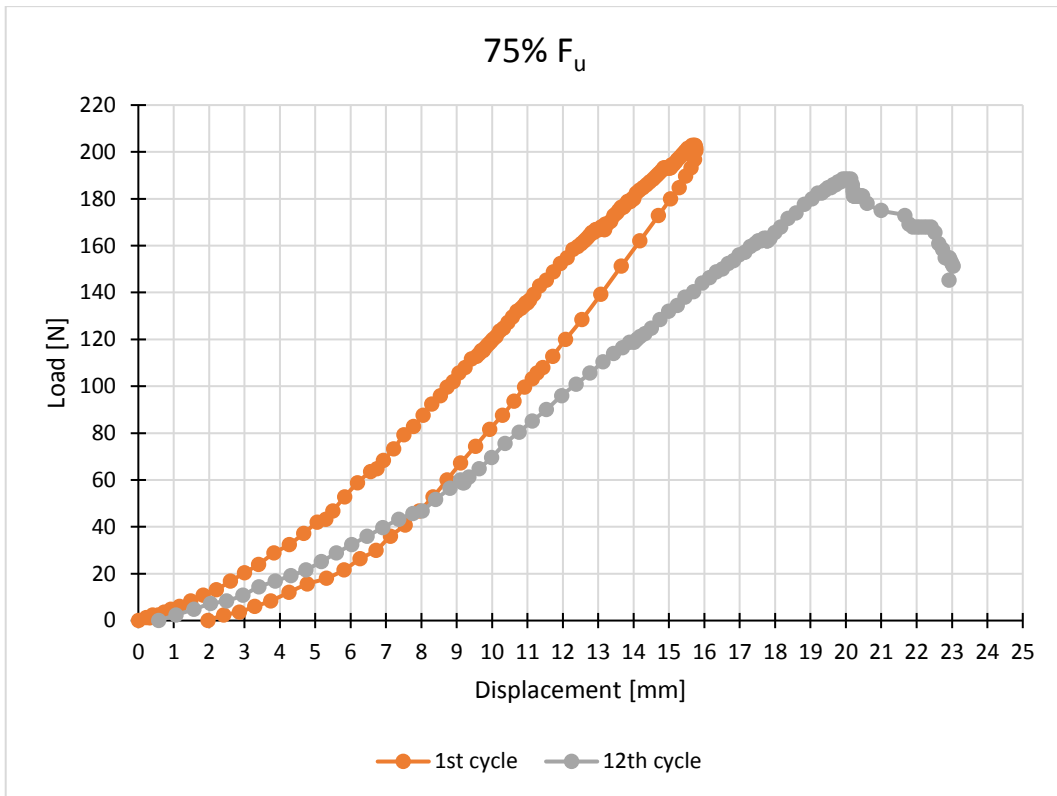


Grafico 4.71 - Confronto tra 1° e 12° ciclo al 75% di F_u

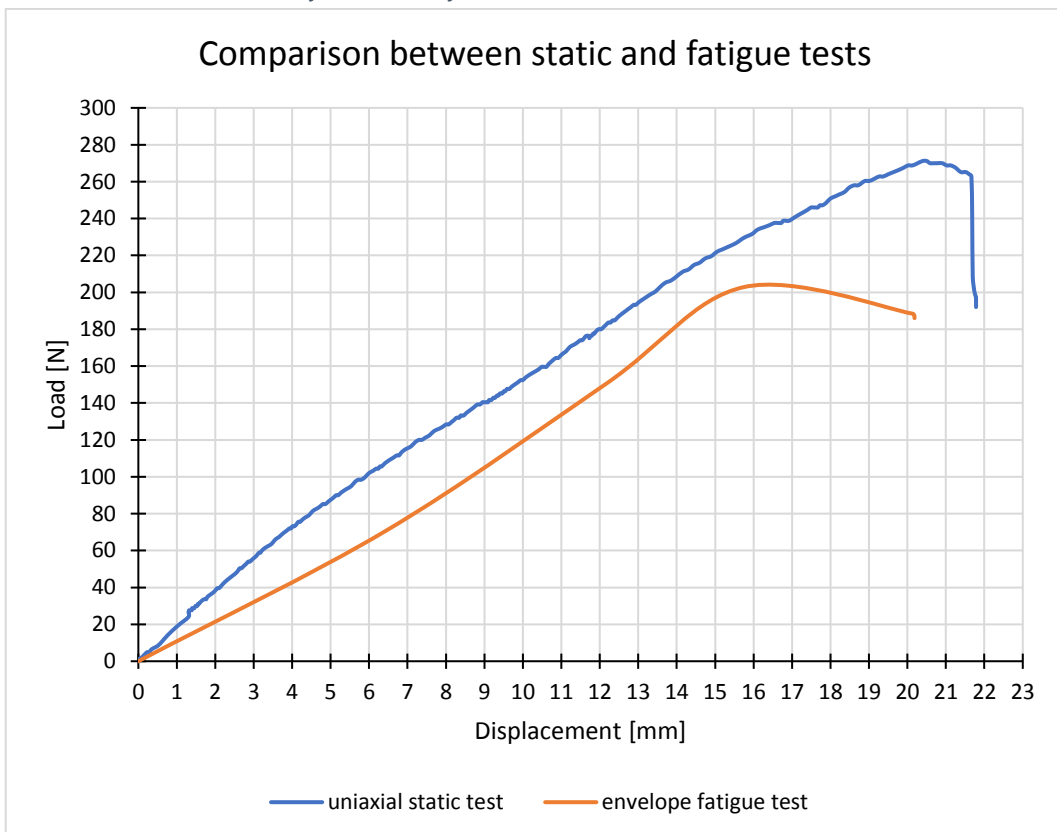


Grafico 4.72 - Confronto tra prove cicliche e unidirezionale

Dai grafici ciclici si evince un incremento di spostamento del provino mentre in quello di confronto tra rottura e inviluppo si nota come lo stesso non completi le prove raggiungendo la rottura nel dodicesimo ciclo al 75% F_u .

5 CONCLUSIONI

Analizzando e confrontando i grafici Load-Displacement delle tre tipologie di GFRP saggiate, si evince che i provini LOT1 e LOT2 presentano un andamento molto simile nel grafico a rottura unidirezionale, con la differenza che la seconda tipologia è caratterizzata da un carico ed uno spostamento ultimi leggermente maggiori alla prima.

Diversamente, la tipologia LOT3 è caratterizzata da un grafico a rottura unidirezionale con un carico ultimo più elevato ma con uno spostamento finale intermedio tra quello del LOT1 e LOT2.

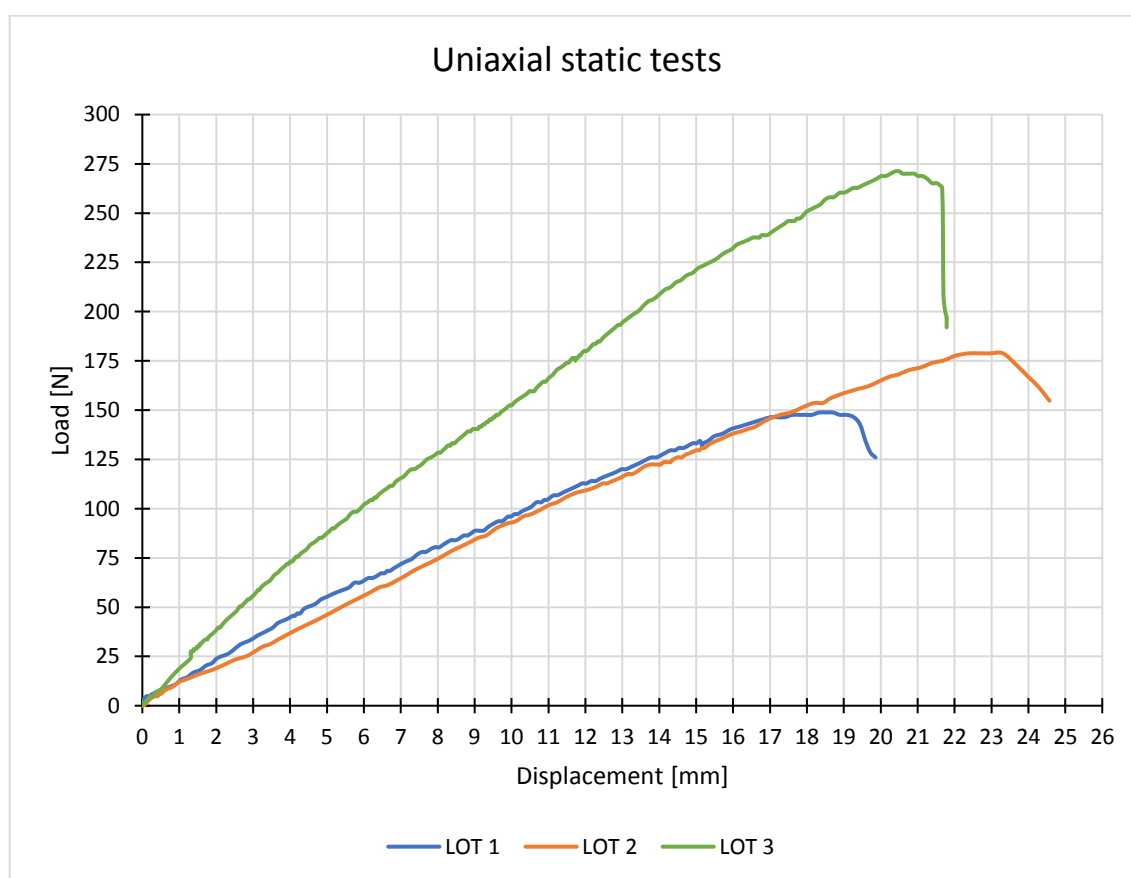


Grafico 5.1 - Comparazione curve a rottura unidirezionali LOT1, LOT2 e LOT3

Valutando i grafici sui confronti e sugli involuppi tra il primo e il ventesimo ciclo, nella fase successiva alle prove cicliche ripetute al 25%, 50% e 75% del carico a rottura F_u estrapolato dal grafico unidirezionale a seconda della tipologia di LOT testato, si evidenzia un comportamento analogo per tutti i provini testati: tra il primo e l'ultimo ciclo risulta un evidente spostamento sotto carico.

- LOT 1

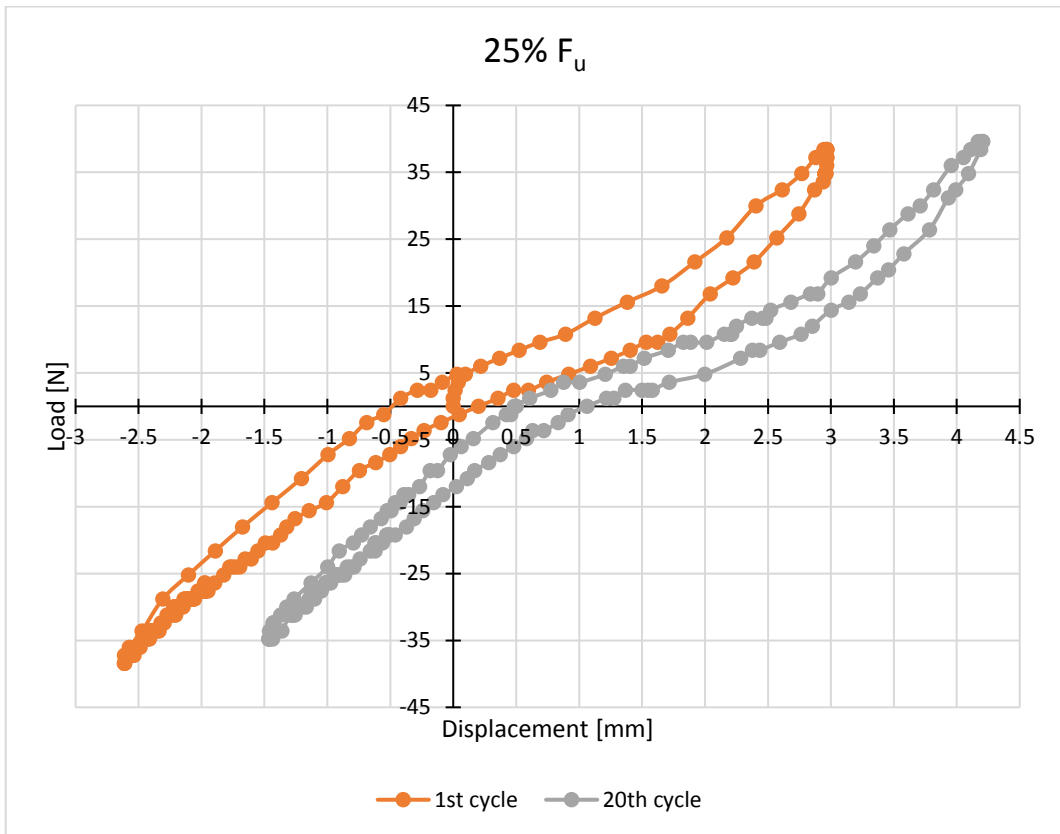


Grafico 5.2 - Confronto dello spostamento tra primo ed ultimo ciclo al 25% di F_u

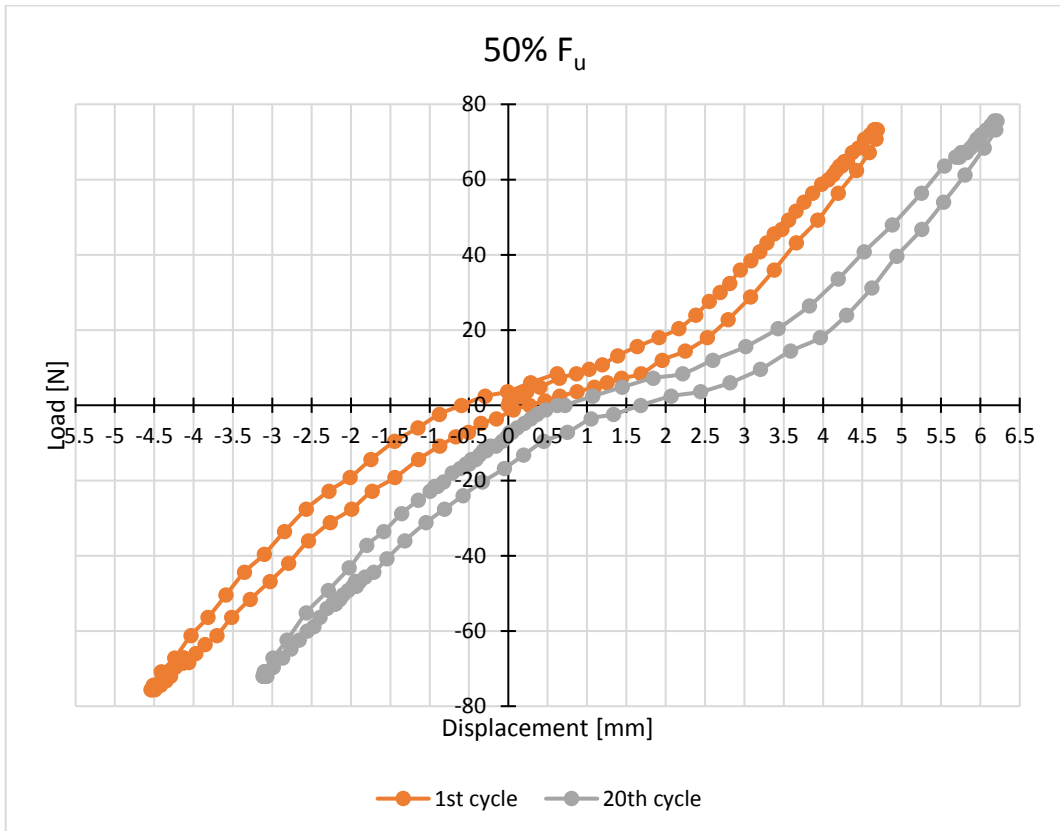


Grafico 5.3 - Confronto dello spostamento tra primo ed ultimo ciclo al 50% di F_u

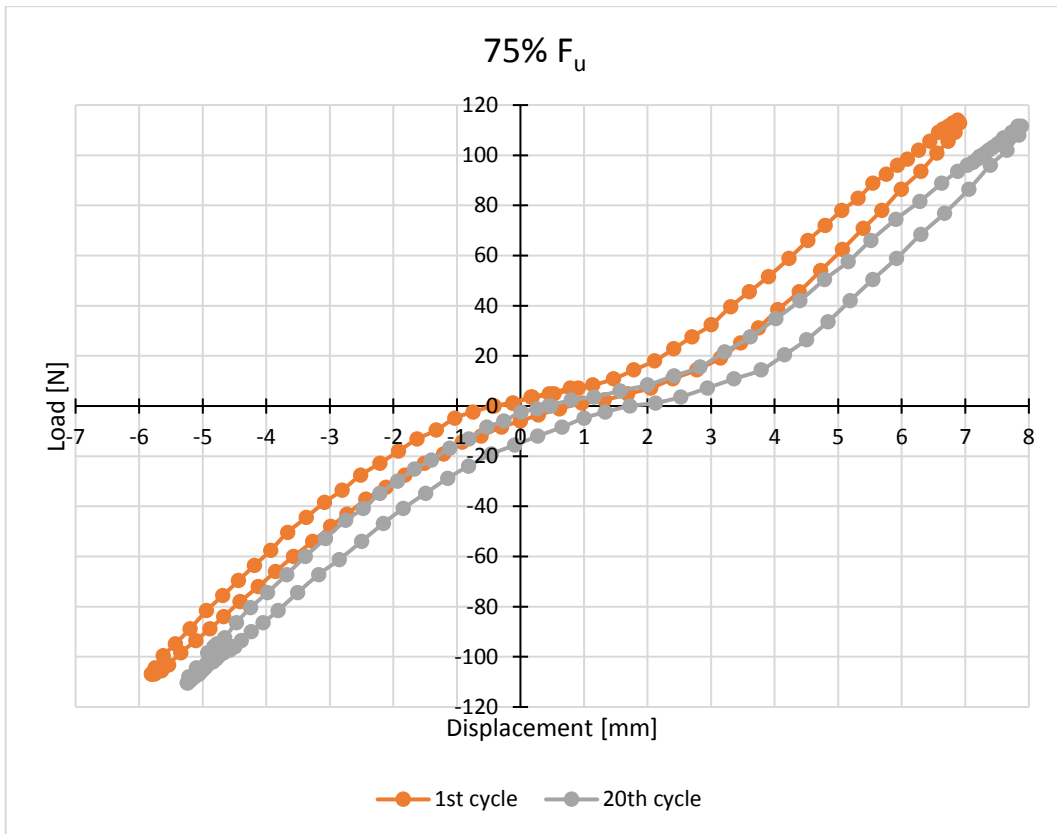


Grafico 5.4 - Confronto dello spostamento tra primo ed ultimo ciclo al 75% di F_u

- LOT 2

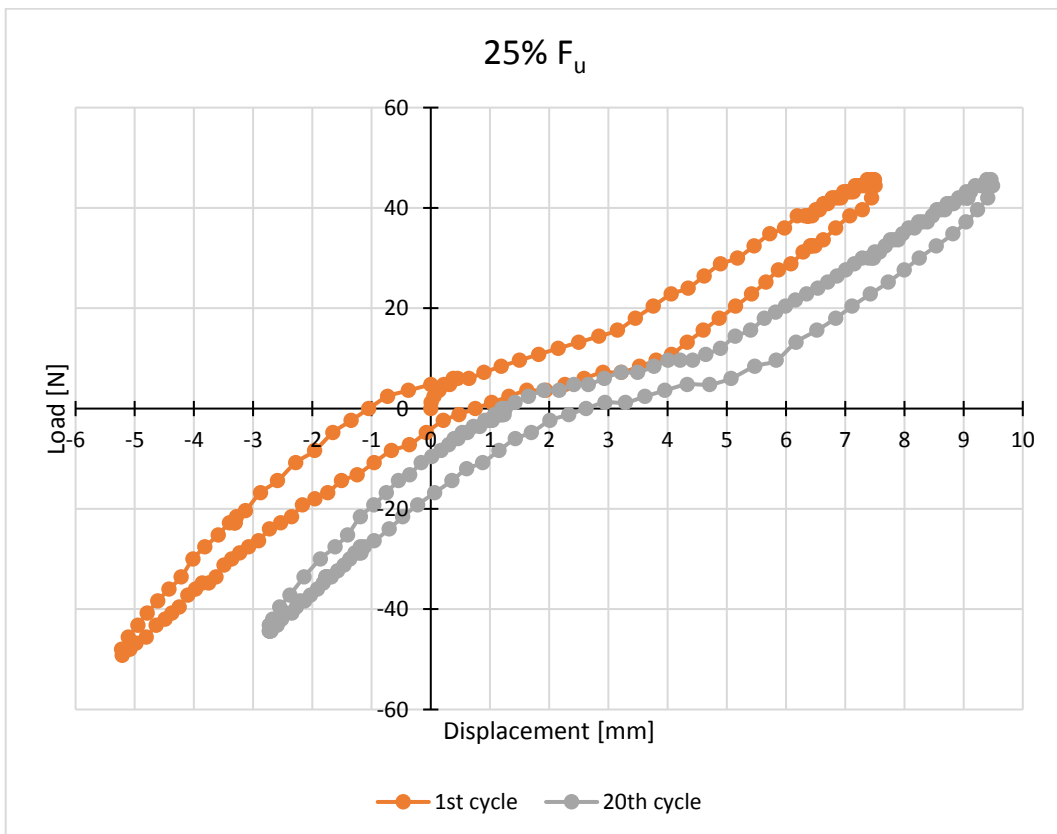


Grafico 5.5 - Confronto dello spostamento tra primo ed ultimo ciclo al 25% di F_u

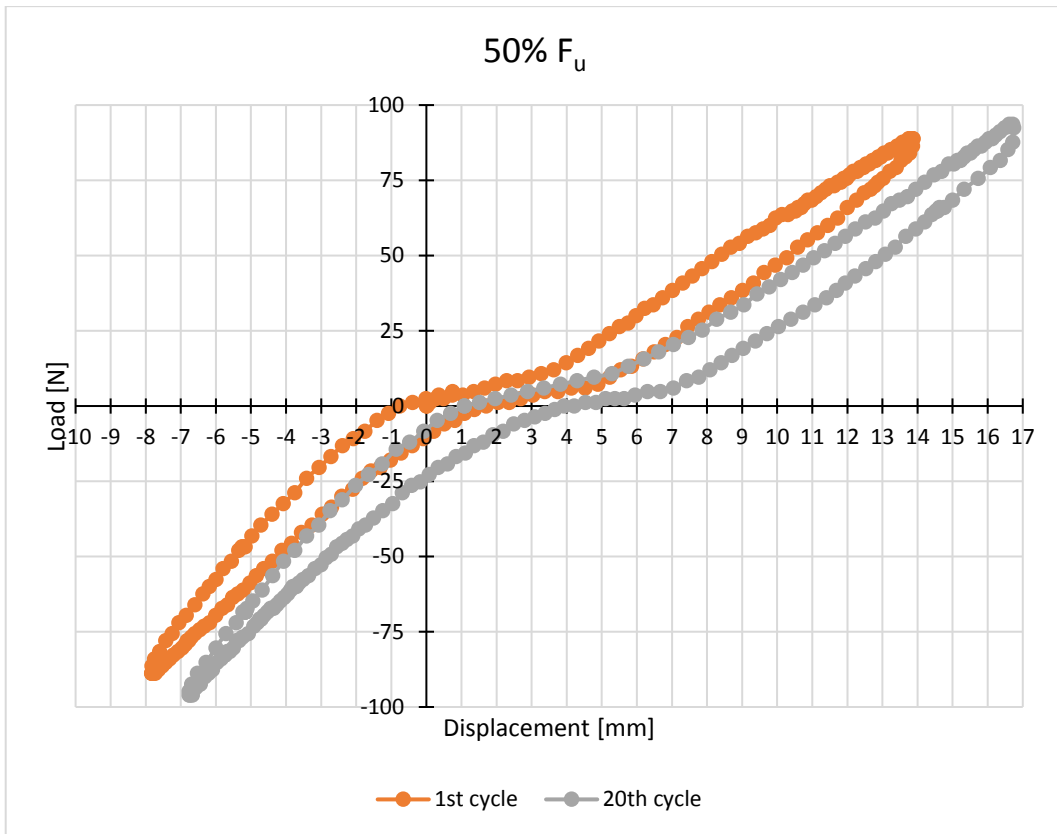


Grafico 5.6 - Confronto dello spostamento tra primo ed ultimo ciclo al 50% di F_u

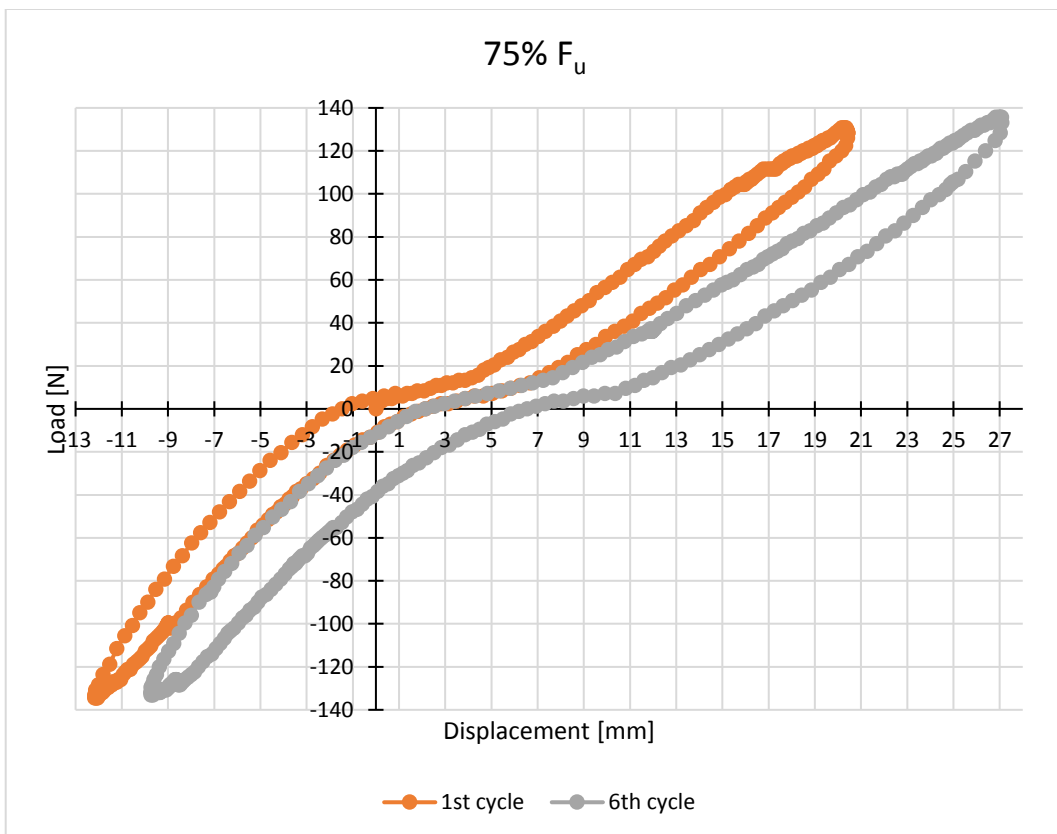


Grafico 5.7 - Confronto dello spostamento tra primo ed ultimo ciclo al 75% di F_u

- LOT 3

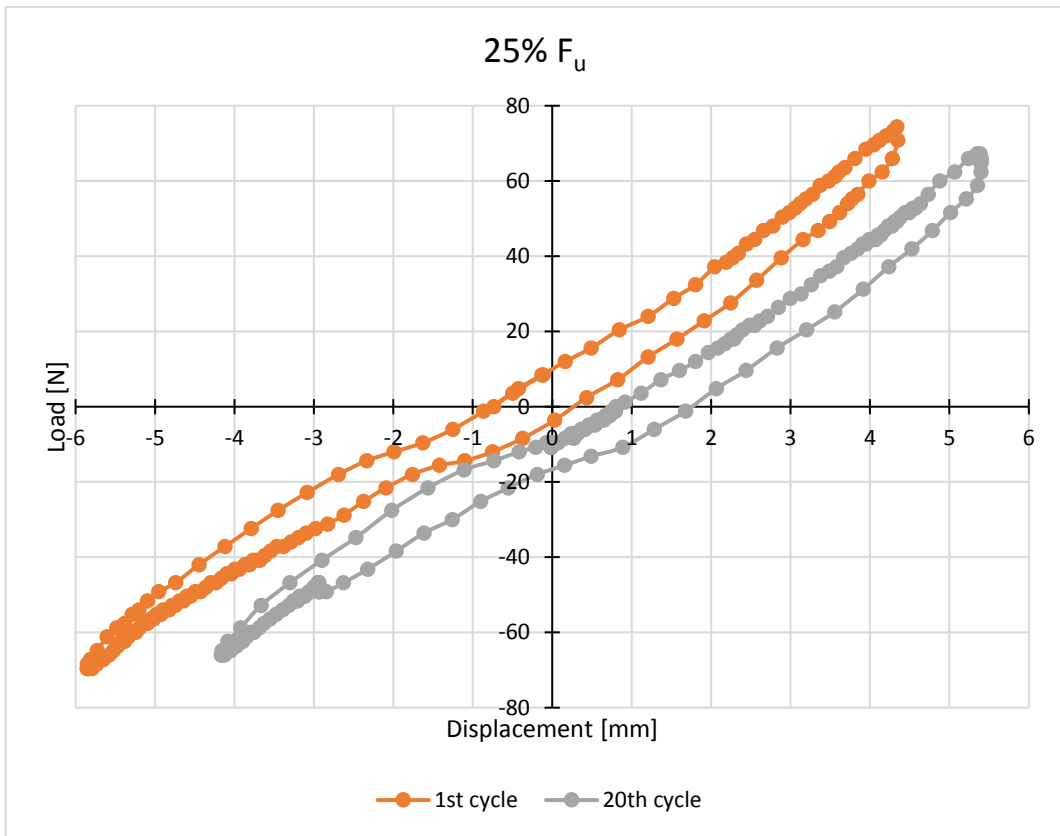


Grafico 5.8 - Confronto dello spostamento tra primo ed ultimo ciclo al 25% di F_u

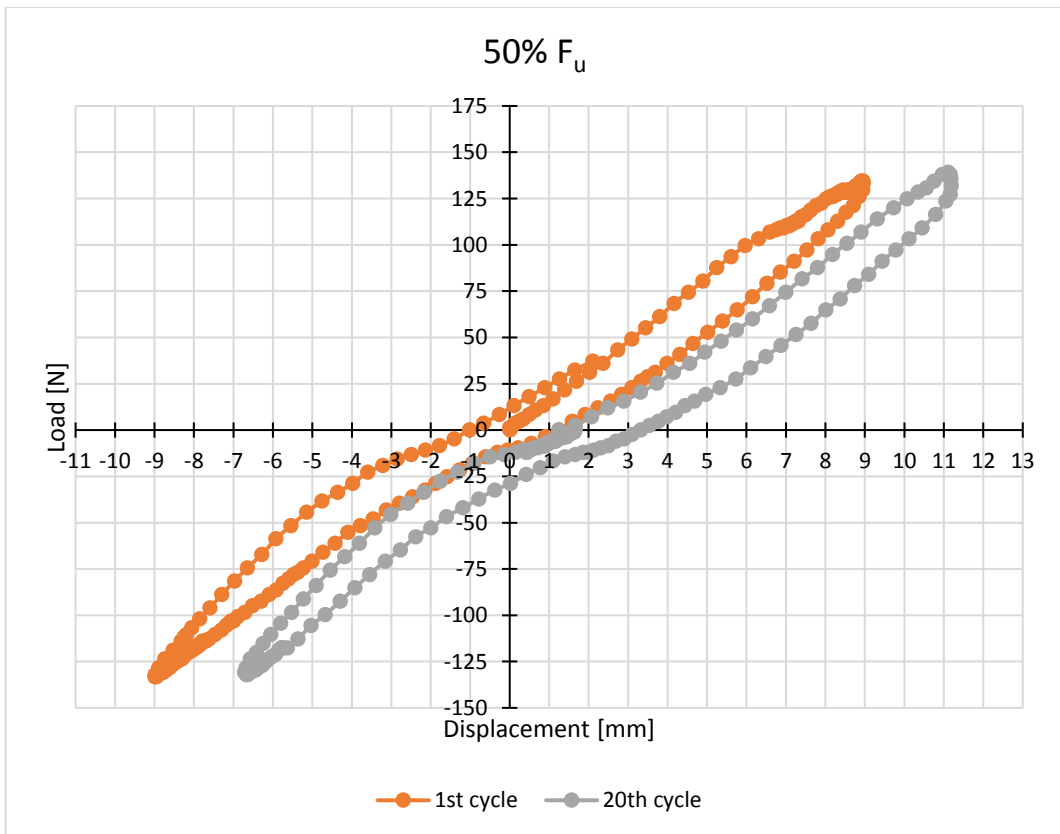


Grafico 5.9 - Confronto dello spostamento tra primo ed ultimo ciclo al 50% di F_u

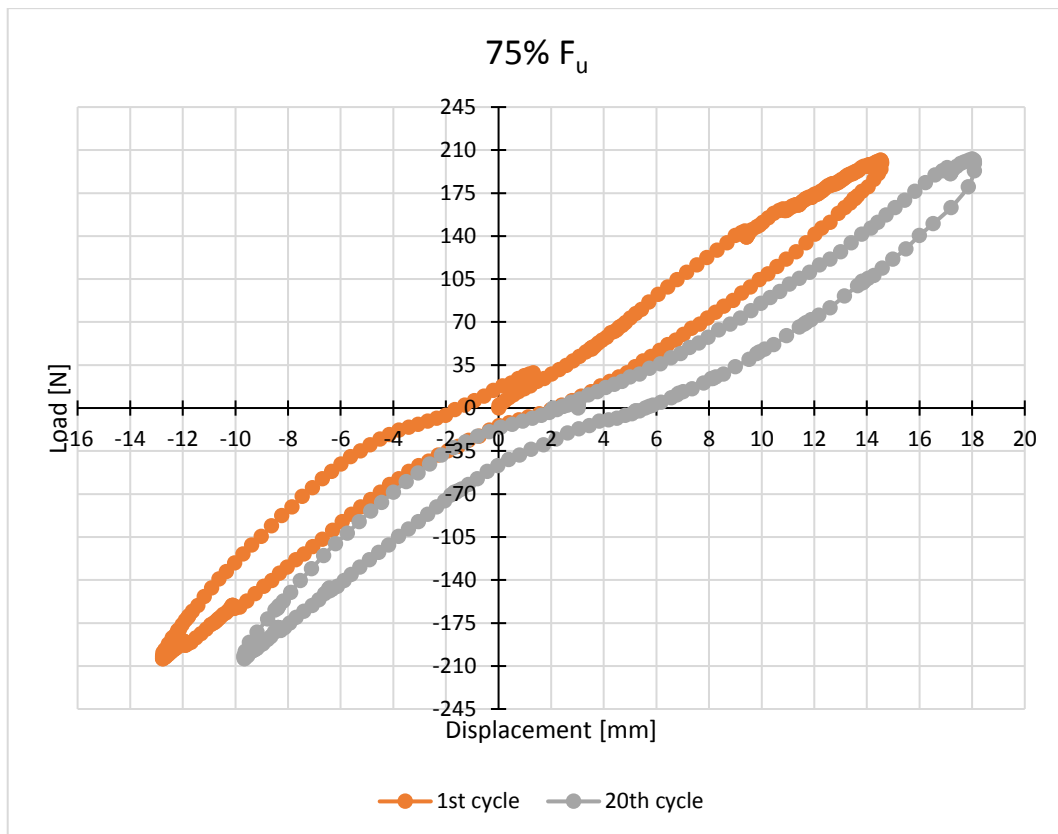


Grafico 5.10 - Confronto dello spostamento tra primo ed ultimo ciclo al 75% di F_u

Dagli stessi risultati si desume anche che il LOT1 presenta un miglior comportamento sotto carichi ciclici ripetuti non arrivando a rottura e completando tutti i cicli di prova al 75% di F_u , mentre LOT2 e LOT3 giungono a rottura prima del ventesimo ciclo nella medesima prova nonostante presentassero valori di carico a rottura e spostamento ultimi più elevati.

A conferma di quanto detto è possibile osservare l'aumento dello spostamento in funzione del carico e del numero dei cicli attraverso i grafici di confronto tra la curva unidirezionale a rottura caratteristica di ogni LOT con la curva di involucro costruita prendendo i punti di spostamento massimo tra il primo e ventesimo ciclo nei vari diagrammi con l'aggiunta dell'ultimo ciclo discendente per valutare anche l'eventuale rottura del provino.

- LOT 1

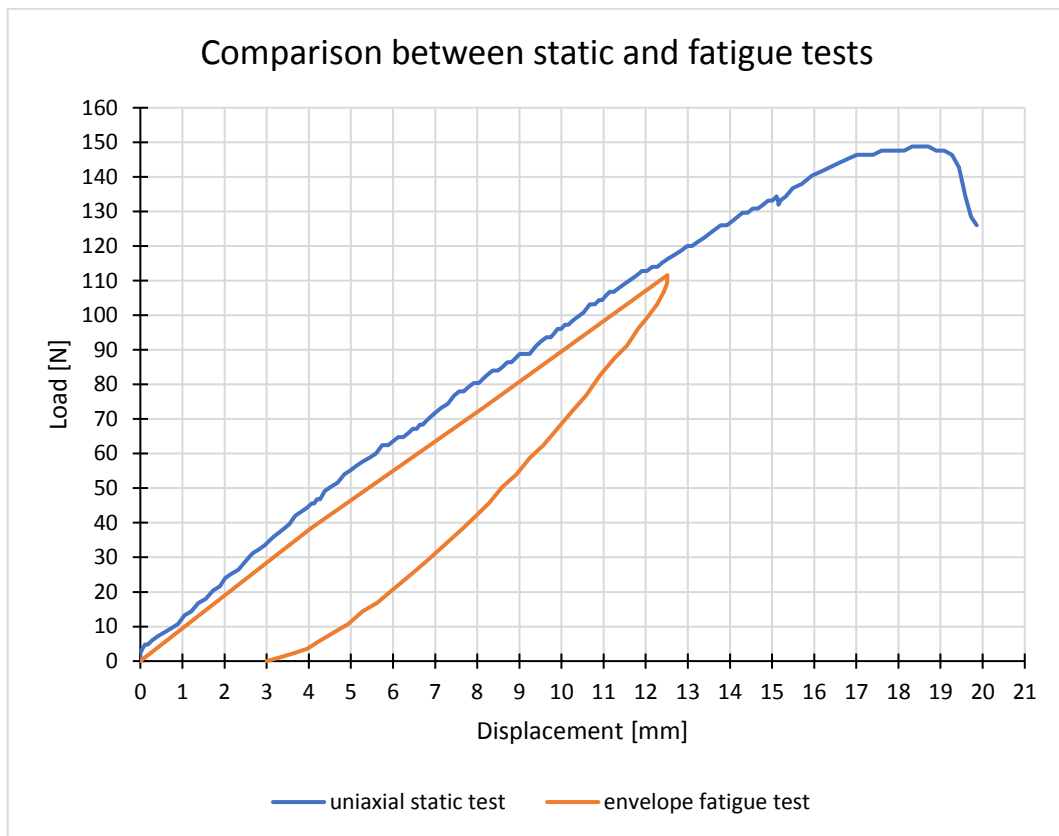


Grafico 5.11 - Confronto tra prove cicliche e unidirezionale

Dal grafico 5.11, relativo alla tipologia di GFRP del LOT-1, si desume come lo spostamento aumenti al crescere del carico e dei cicli per poi arrivare allo spostamento massimo e tornare indietro all'ultimo ciclo del 75% di F_u completando la prova senza arrivare a rottura.

- LOT 2

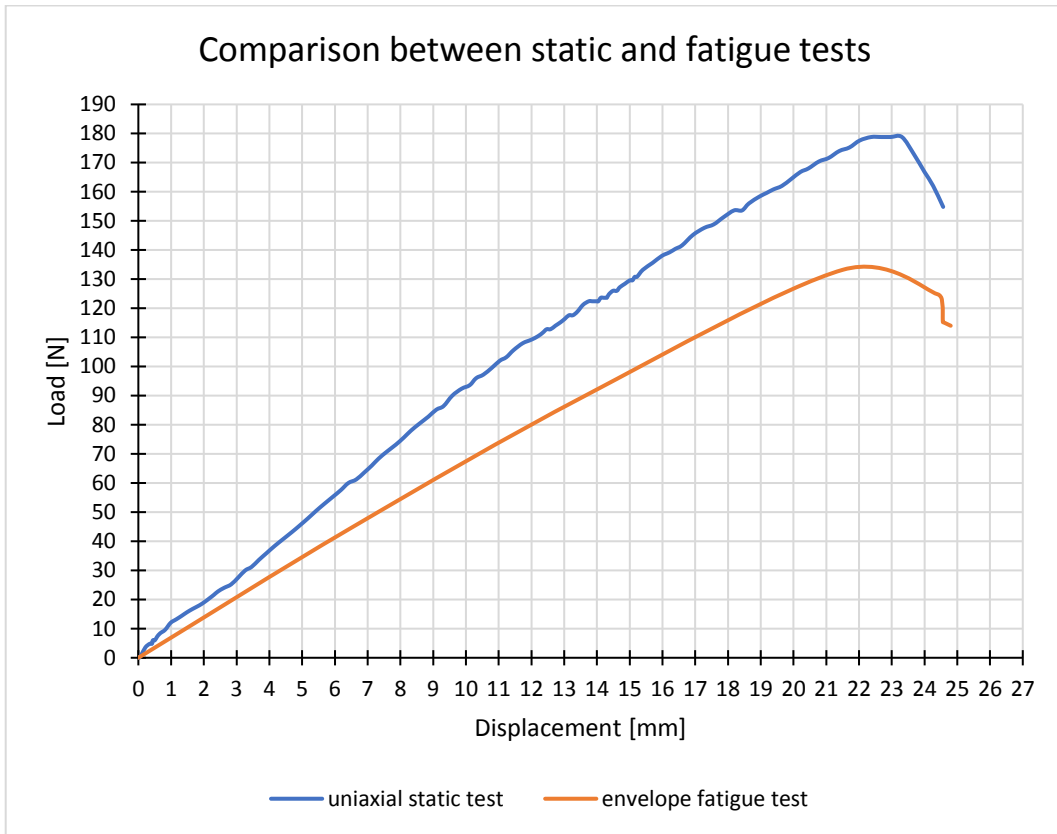


Grafico 5.12 - Confronto tra prove cicliche e unidirezionale

- LOT 3

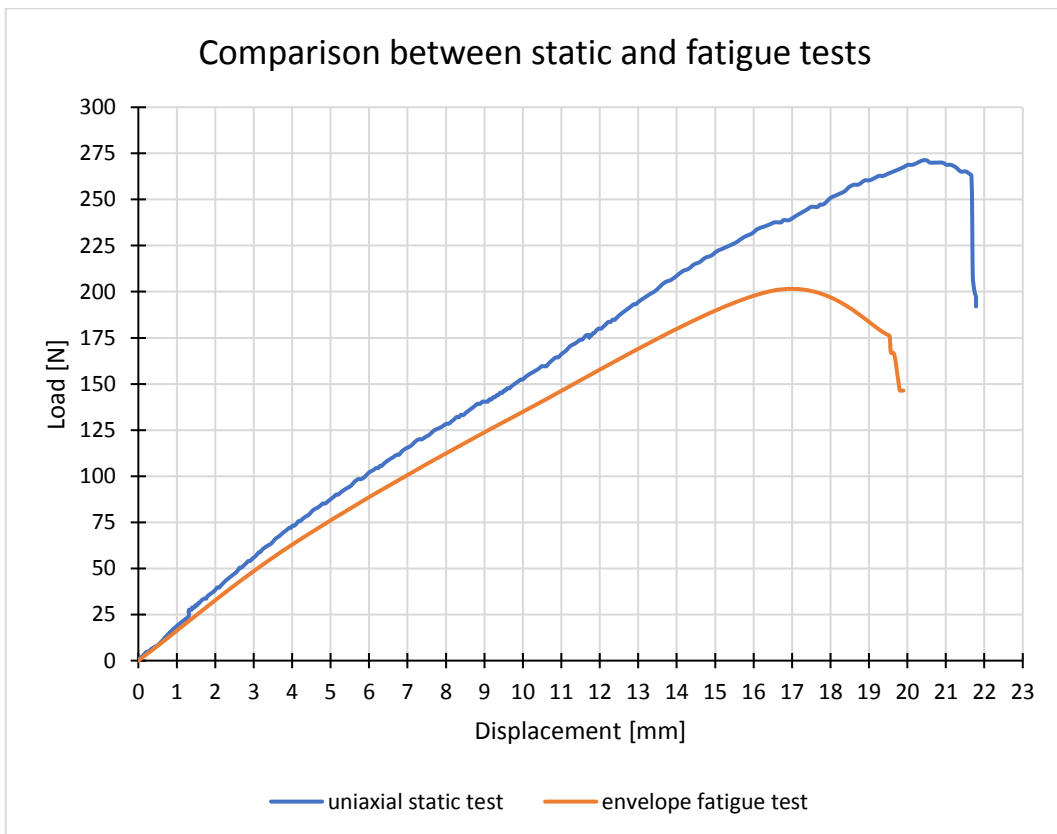


Grafico 5.13 - Confronto tra prove cicliche e unidirezionale

Dai grafici 5.12 e 5.13, relativi rispettivamente alle tipologie di GFRP del LOT-2 e LOT-3, si evince, come per il LOT-1, che lo spostamento aumenta al crescere del carico e dei cicli per poi arrivare al massimo spostamento constatando la rottura del provino prima di poter effettuare l'ultimo ciclo al 75% di F_u .

Un ulteriore risultato è stato raggiunto indagando sul modulo elastico E dei differenti provini in GFRP per relazione inversa partendo dall'abbassamento f a mensola da manuale riferito alle prove cicliche:

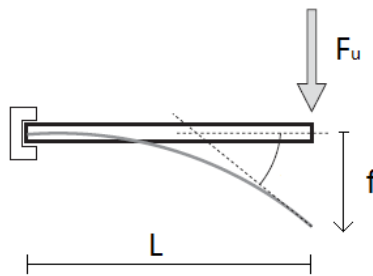


Figura 5.1 - Deformazione elastica struttura inflessa con carico concentrato in un'estremità

$$f = \frac{1}{3} \cdot \frac{F_u L^3}{EI}$$

$$E = \frac{1}{3} \cdot \frac{F_u L^3}{If}$$

I valori F_u considerati sono desunti dal valore di carico massimo sul tratto lineare del rispettivo grafico a rottura unidirezionale considerandolo anche al 25%, 50% e 75% al primo e ventesimo ciclo alla quale corrisponderanno i rispettivi abbassamenti f .

Vengono riportate di seguito le tabelle relative alla stima del modulo elastico E considerando la deformata a mensola dei provini sottoposti alle prove cicliche.

- LOT 1

Campione	Geometria			Inerzia	Carico		Ciclo	Abbassamento	Modulo Elastico
	L	b	h	l	F _u			f	E
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm ⁴]	[N]	% F _u		[mm]	[N/mm ²]
1	121.1	15.1	3.45	51.67	148.8	100%	1st	18.7	91163.19
3	121.4	15.36	3.61	60.22	37.2	25%	1st	3.06	120290.12
							20th	6.20	59340.02
					74.4	50%	1st	6.39	115169.79
							20th	7.76	94812.55
					111.6	75%	1st	9.86	111991.73
							20th	10.90	101238.30
4	121	14.88	3.42	49.60	37.2	25%	1st	2.56	173039.60
							20th	4.34	101975.45
					74.4	50%	1st	7.07	125242.12
							20th	9.57	92615.80
					111.6	75%	1st	9.46	140495.20
							20th	10.39	127906.07
5	121.1	14.63	3.31	44.21	37.2	25%	1st	4.11	120980.65
							20th	4.17	119297.94
					74.4	50%	1st	7.84	126987.22
							20th	8.48	117328.40
					111.6	75%	1st	11.54	129336.79
							20th	11.92	125181.79
6	121	15.14	3.46	52.26	37.2	25%	1st	4.04	104071.49
							20th	5.04	83517.47
					74.4	50%	1st	7.36	114414.96
							20th	8.14	103431.91
					111.6	75%	1st	10.4	121373.37
							20th	12.51	100869.67
8	121.5	15.08	3.48	52.96	37.2	25%	1st	3.62	115959.92
							20th	5.66	74129.91
					74.4	50%	1st	6.29	133405.54
							20th	8.06	104102.02
					111.6	75%	1st	9.51	132339.20
							20th	12.48	100823.81
9	121.2	14.96	3.77	66.80	37.2	25%	1st	2.97	111360.22
							20th	4.08	80942.13
					74.4	50%	1st	4.69	140958.10
							20th	6.21	106393.75
					111.6	75%	1st	6.72	147502.58
							20th	8.04	123239.76

Tabella 5.1 - Determinazione modulo elastico del LOT 1 con deformata a mensola

- LOT 2

Campione	Geometria			Inerzia I	Carico		Ciclo	Abbassamento f	Modulo Elastico E
	L	b	h		F _u				
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm ⁴]	[N]	% F _u		[mm]	[N/mm ²]
1	120	14.56	3.5	52.02	178.8	100%	1st	23.31	84930.46
3	118.5	14.23	3.2	38.86	44.7	25%	1st	8.04	79292.07
							20th	10.11	63086.96
					89.4	50%	1st	14.99	85112.25
							20th	18.78	67924.82
134.1	75%	1st	25.44	75205.91					
-	-	-	-	-	-	-	-	-	
4	120	14.47	2.97	31.59	44.7	25%	1st	6.81	119496.66
							20th	6.47	125871.54
					89.4	50%	1st	13.64	119330.24
							20th	14.24	114367.58
134.1	75%	1st	21.50	113567.11					
		4th	24.40	100075.14					
5	118.3	14.14	3.44	47.97	44.7	25%	1st	4.96	103710.54
							20th	5.86	87738.73
					89.4	50%	1st	11.47	89628.63
							20th	11.66	88137.51
134.1	75%	1st	17.12	90050.07					
		5th	23.91	64482.90					
7	118.9	14.31	3.18	38.35	44.7	25%	1st	7.12	91745.66
							20th	10.57	61774.25
					89.4	50%	1st	14.15	92277.26
							20th	21.47	60813.44
134.1	75%	1st	20.41	95966.18					
		-	-	-	-				
8	115.9	14.51	2.85	27.99	44.7	25%	1st	7.50	110629.00
							20th	9.46	87612.47
					89.4	50%	1st	13.87	119553.66
							20th	16.30	101762.93
134.1	75%	1st	20.34	122295.63					
		6th	28.67	86765.95					
9	118.5	14.29	3.43	48.05	44.7	25%	1st	6.69	77091.59
							20th	6.69	77149.24
					89.4	50%	1st	11.36	90813.35
							20th	14.14	72943.48
134.1	75%	1st	20.90	74034.04					
		6th	31.29	49460.14					

Tabella 5.2 - Determinazione modulo elastico del LOT 2 con deformata a mensola

- LOT 3

Campione	Geometria			Inerzia	Carico		Ciclo	Abbassamento	Modulo Elastico
	L	b	h	I	F _u			f	E
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm ⁴]	[N]	% F _u		[mm]	[N/mm ²]
1	118.5	14.19	4.51	108.48	271.2	100%	1st	20.50	67645.49
3	116.5	14.27	4.7	123.46	67.8	25%	1st	4.29	67399.37
							20th	6.24	46385.04
					135.6	50%	1st	8.78	65871.93
							20th	9.96	58056.95
					203.4	75%	1st	12.70	68328.25
							20th	14.83	58520.98
4	118.4	14.5	4.69	124.65	67.8	25%	1st	4.16	72304.88
							20th	5.39	55900.02
					135.6	50%	1st	8.95	67279.89
							20th	10.28	58558.30
					203.4	75%	1st	14.53	62180.40
							20th	18.00	50179.59
5	119.4	14.4	4.48	107.90	67.8	25%	1st	4.05	87924.78
							20th	5.40	65980.21
					135.6	50%	1st	9.85	72379.23
							20th	11.30	63094.74
					203.4	75%	1st	16.46	64950.02
							4th	19.52	54782.34
8	118.2	13.86	4.1	79.60	67.8	25%	1st	6.28	74699.25
							20th	8.43	55623.52
					135.6	50%	1st	12.26	76527.72
							20th	13.52	69362.80
					203.4	75%	1st	18.55	75841.66
							15th	24.81	56706.39
10	118.3	13.54	3.45	46.33	67.8	25%	1st	6.36	126920.69
							20th	6.55	123252.76
					135.6	50%	1st	10.06	160569.32
							20th	11.70	137960.10
					203.4	75%	1st	15.36	157735.43
							12th	18.67	129749.16
11	118.8	14.03	4.69	120.61	67.8	25%	1st	6.21	50597.81
							20th	7.32	42920.99
					135.6	50%	1st	10.16	61831.25
							20th	12.14	51752.78
					203.4	75%	1st	15.74	59857.03
							12th	20.14	46785.69

Tabella 5.3 - Determinazione modulo elastico del LOT 3 con deformata a mensola

Dalle tabelle di tutte e tre le tipologie risulta evidente come il modulo elastico E riferito alla deformata a mensola sia maggiore nei primi cicli per poi ridursi con l'aumentare degli stessi e che la tipologia di LOT-1 è caratterizzata da un modulo elastico maggiore rispetto a quello di LOT-2 e LOT-3.

Tali valori del modulo elastico E (tabella 5.1, tabella 5.2, tabella 5.3) risultano differenti da quelli ottenuti nelle prove preliminari a flessione su tre punti (§ 3.1).

Campione	Geometria			Inerzia	Carico	Abbassamento	Modulo Elastico
	L	b	h	I	F	f	E
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm ⁴]	[N]	[mm]	[N/mm ²]
LOT1-7	120.66	15.01	3.5	53.63	400	7.3	37392.31
LOT2-6	118.02	14.62	3.72	62.72	200	6.6	16546.90
LOT3-7	117.54	13.98	4.78	127.24	350	5	18612.48

Tabella 5.4 - Determinazione modulo elastico del LOT 1, LOT 2 e LOT 3 con deformata a flessione con carico centrato

In definitiva al lavoro di tesi sulle tre tipologie di materiale composito in GFRP si evince:

- un adattamento del materiale con ragionevole incremento di deformazione in termini di spostamento sotto carico a cicli ripetuti;
- un diverso valore di modulo elastico E in funzione delle tipologie di prova, ma constatando comunque un valore più alto per il LOT1 rispetto a LOT2 e LOT3, risultanti pressoché simili tra loro;
- una certa diminuzione generale del modulo elastico E con l'aumentare dei cicli nelle prove a fatica.

BIBLIOGRAFIA

- Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR) – *DT 200 R1/2013: Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione ed il controllo di interventi di consolidamento statico mediante l'utilizzo di compositi fibrorinforzati.*
- Dr. Stratford Tim – *The condition of the Aberfeldy footbridge after 20 years of service.*
- Abruzzese D. e Miccoli L. – *I nuovi materiali nell'ingegneria civile: i compositi FRP.*
- Burgoyne C.J. e Head P.R. – *Aberfeldy Bridge - an advanced textile reinforced footbridge.*
- Sola R. – *Introduzione ai materiali compositi.*
- Fava G. e Poggi C. – *Il controllo di accettazione di materiali fibrorinforzati per il rinforzo strutturale.*
- Zuccarello B. – *Progettazione meccanica con materiali non convenzionali.*
- Bertolini L., Bolzoni F., Cabrini M. e Pedferri P. – *Tecnologia dei Materiali. Ceramiche, polimeri e compositi.*
- Furiozzi B., Messina C. e Paolini L. – *Calcolo di elementi strutturali.*