

ALMA MATER STUDIORUM

UNIVERSITA' DI BOLOGNA

SCUOLA DI INGEGNERIA

Sede di Forlì

Corso di Laurea in

INGEGNERIA MECCANICA

Classe L-9

ELABORATO FINALE DI LAUREA

In

Tecnologia Meccanica

Caratterizzazione di materiali compositi tramite prove di compressione di lastre piane

Candidato:

Francesco Semprucci

Relatore:

Prof. Lorenzo Donati

Correlatori:

Ing. Francesco Rondina

Ing. Maria Pia Falaschetti

Anno accademico 2020/2021

INDICE

Capitolo 1

La crashworthiness	3
--------------------	---

Capitolo 2

Introduzione a prove e fixture	6
--------------------------------	---

2.1 La fixture	6
----------------	---

2.2 Trigger	7
-------------	---

2.3 Luce Fixture	8
------------------	---

Capitolo 3

Produzione dei provini	9
------------------------	---

3.1 Laminazione	9
-----------------	---

3.2 Preparazione del sacco a vuoto	11
------------------------------------	----

3.3 Cura in autoclave	12
-----------------------	----

3.4 Taglio e classificazione dei provini	13
--	----

Capitolo 4

Esecuzione delle prove sperimentali	16
-------------------------------------	----

Capitolo 5

Dati ottenuti: grafici e confronti	18
------------------------------------	----

5.1 Analisi degli effetti della variazione della sequenza di laminazione dei provini	18
--	----

5.2 Analisi degli effetti della variazione dell'angolo di apertura del trigger	23
--	----

5.3 Analisi degli effetti della variazione di velocità della prova	27
--	----

5.4 Analisi degli effetti della variazione di altezza della luce della fixture	32
--	----

5.5 Analisi e confronti tramite SEA media	38
---	----

Capitolo 6

Instabilità e non conformità delle prove	40
--	----

6.1 Casi con multipli picchi	40
------------------------------	----

6.2 Casi non conformi “tradizionali” _____ 42

Capitolo 7

Conclusioni _____ 47

1. LA CRASHWORTHINESS

Le elevate caratteristiche di rigidità e resistenze specifiche mostrate dai materiali compositi, se confrontate con quelle esibite dai metalli, rendono questa categoria molto appetibile ai settori industriali dell'aerospaziale e dell'automotive nell'ottica della riduzione dei pesi e della Crashworthiness. Tuttavia, la complessità dei progetti risulta notevolmente incrementata. Infatti, benché le proprietà meccaniche delle strutture possano essere ottimizzate scegliendo opportunamente il tipo di matrice, la stratifica, il tipo e l'orientazione del rinforzo e il processo produttivo, subentrano nuove problematiche per la comprensione e la previsione dei meccanismi di rottura e di assorbimento energetico.

Inizialmente l'utilizzo intensivo dei suddetti materiali compositi era relegato, fino a qualche decennio fa, esclusivamente alla costruzione di componenti per velivoli ad uso militare, dove erano richieste alte prestazioni meccaniche con pesi ridotti. Oggigiorno, invece, grazie al progresso tecnologico, che ha portato ad una consistente riduzione dei costi di produzione, gli enormi benefici derivanti dall'utilizzo di questi materiali, quali ad esempio elevata rigidità e resistenza specifiche, sono usufruibili anche dall'aviazione commerciale e contemporaneamente, trasportati nel settore automotive.

Il significato di Crashworthiness è identificato dalla seguente definizione: "capacità di un mezzo di trasporto di salvaguardare l'incolumità degli occupanti e delle merci presenti all'interno del mezzo stesso, assorbendo l'energia cinetica dovuta ad un fenomeno di impatto"(MIL-HDBK-17-3F, Crashworthiness and energy management, vol. 3, capitolo 14.)

Quindi la crashworthiness è una filosofia di progettazione che trova la sua applicabilità in ogni campo del settore trasporti: aerei, treni sino ad arrivare agli autoveicoli. L'obiettivo principale è quello di limitare il più possibile fenomeni di alcun tipo di danno, arrecabile a persone o cose, durante fenomeni di impatto. Data la capacità del corpo umano di sopportare alte accelerazioni per un limitato periodo di tempo, l'obiettivo è sfruttare la capacità del mezzo di trasporto, di assorbire, e distribuire su di esso, l'entità delle forze in gioco durante un impatto, attraverso deformazioni controllate.

Ciò è possibile per mezzo di componenti caratterizzati da una geometria predefinita in fase progettuale, oppure attraverso l'introduzione di specifici dispositivi che hanno lo scopo di dissipare l'energia cinetica.

I materiali metallici di tipo duttile, ancora largamente impiegati, assorbono l'energia cinetica derivante da un impatto, subendo grandi deformazioni plastiche, diversamente dai materiali compositi, i quali presentano globalmente caratteristiche fragili, per la presenza dell'elemento fibra, anche se quest'ultimo è inglobate all'interno dell'elemento matrice, che ha caratteristiche duttili. Di conseguenza l'assorbimento dell'energia dovuta all'impatto, avviene prettamente attraverso fenomeni di delaminazione, o scollamento, fra l'interfaccia fibra/matrice, con successiva frantumazione e generazione di detriti.

Tuttavia, l'energia assorbita, detta EA, da sola non basta per confrontare più casi e non basta nemmeno per valutare complessivamente il comportamento di un progetto.

Per questo si introduce un parametro come la SEA (specific energy absorption) che va ad indicare l'energia assorbita per unità di massa di componente che ha preso parte allo schiacciamento.

Per determinare la SEA bisogna tuttavia passare dalla EA (energy absorption) che mi indica l'energia assorbita durante lo schiacciamento.

Per quanto riguarda la EA essa vale:

$$EA = \int F ds \quad \text{Eq.1}$$

Dove F rappresenta la forza mentre ds rappresenta l'infinitesimo di corsa di schiacciamento ad esso associata. Tipicamente l'energia assorbita viene espressa in *Joule*[J].

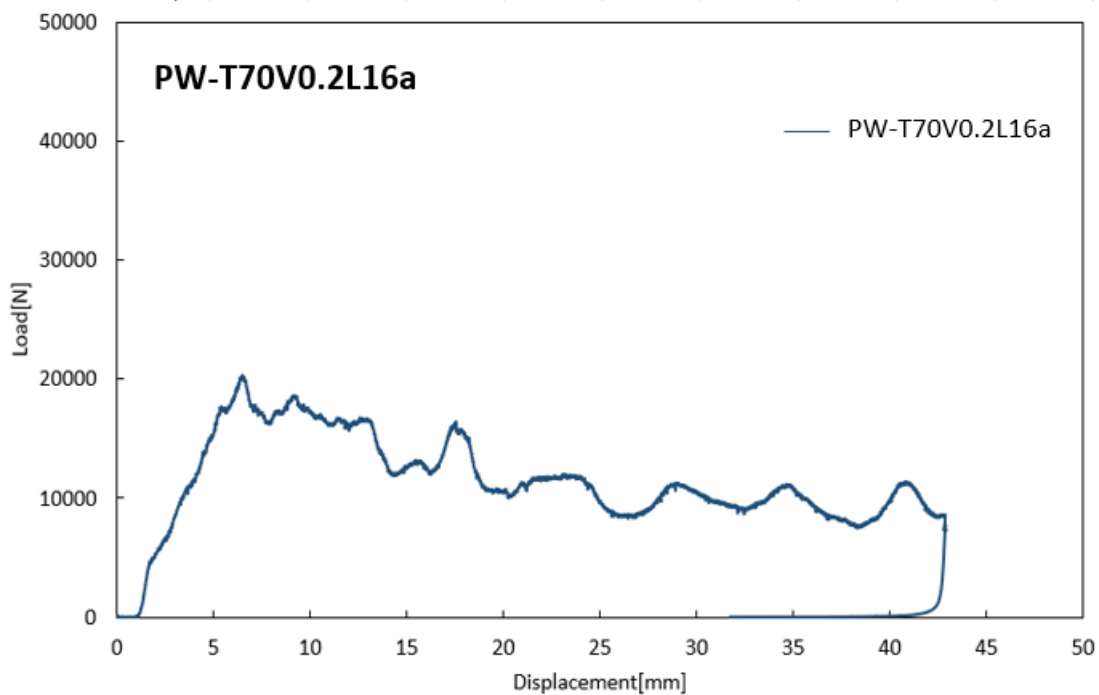


Figura 1 Esempio di diagramma forza/schiacciamento, direttamente dai dati ricavati in laboratorio

Detta m la massa del provino che ha partecipato allo schiacciamento ricavo così la SEA:

$$SEA = \frac{EA}{m} \quad \text{Eq.2}$$

La quale poi può essere riscritta esplicitando m diventando:

$$SEA = \frac{EA}{\rho V} = \frac{EA}{\rho A L} \quad \text{Eq.3}$$

Tipicamente, per strutture più o meno complesse, ci aspettiamo tre fasi nel caso in cui la progettazione è corretta, al fine di ottenere un carico costante e controllato, se così non fosse bisogna riprogettare la struttura.

Sperimentalmente si ricavano queste tre zone fondamentali per l'andamento della forza:

1. **Zona I:** il carico aumenta molto velocemente fino al raggiungimento del massimo F_{max} ;
2. **Zona II:** si ha una drastica riduzione del carico che raggiunge il minimo per poi risalire in maniera più graduale;
3. **Zona III:** il carico si stabilizza fino al termine dello schiacciamento attorno al valore medio F_{avg} .

Queste zone possono essere più o meno presenti, più o meno evidenti a seconda del materiale adottato, della sua disposizione, del rapporto fibra/matrice, le geometria e le condizioni al contorno (esempio: attrito).

2. INTRODUZIONE A PROVE E FIXTURE

2.1 LA FIXTURE

Obiettivo ultimo di questa attività era la determinazione di parametri che permettessero di sfruttare al meglio la fixture (**figura 2.1.1**) sviluppata dall'università dello Utah e quindi valutare il comportamento dei materiali compositi al variare di determinate specifiche quali geometria del trigger, sequenza di laminazione, altezza luce e velocità della macchina servo-idraulica. La fixture è stata pensata proprio per poter fare confronti di questo tipo, è relativamente facile variare l'altezza libera, lo spessore del provino (la parte che fissa il provino è regolabile) e ovviamente il laminato/forma del trigger si può scegliere a piacimento.

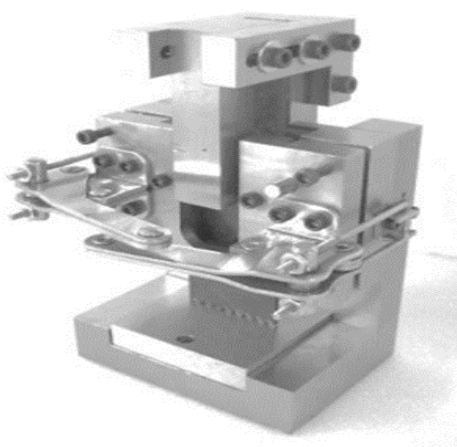


Figura 2.1.1 *La fixture*

La fixture è utilizzata per prove a crash su provini piani, ovvero lastre, regolando lo scorrimento dei provini tramite i bulloni presenti, infatti il provino deve risultare saldo nella "testa" (**figura 2.1.2**) della fixture, la parte dove viene applicato il carico, mentre nella parte centrale (**figura 2.1.3**) deve poter scorrere senza attrito in modo da non andare ad alterare il carico rilevato tramite celle di carico. Così facendo tramite cella di carico si va a misurare la forza che oppone il provino allo spostamento e tramite, appunto, lo spostamento e le specifiche del provino (peso, altezza) si va poi a ricavare la EA e la SEA.

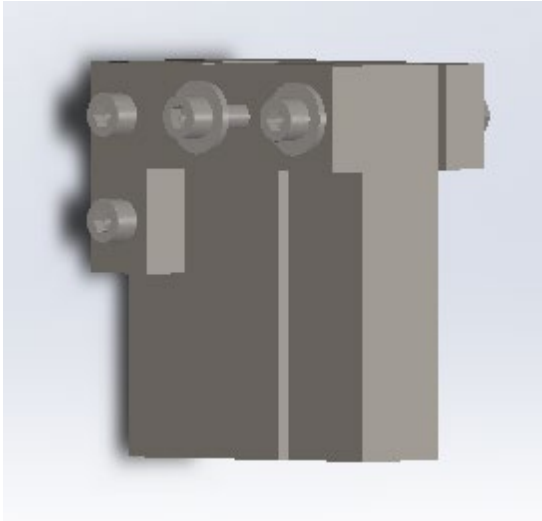


Figura 2.1.2 "testa" della fixture (solidworks)

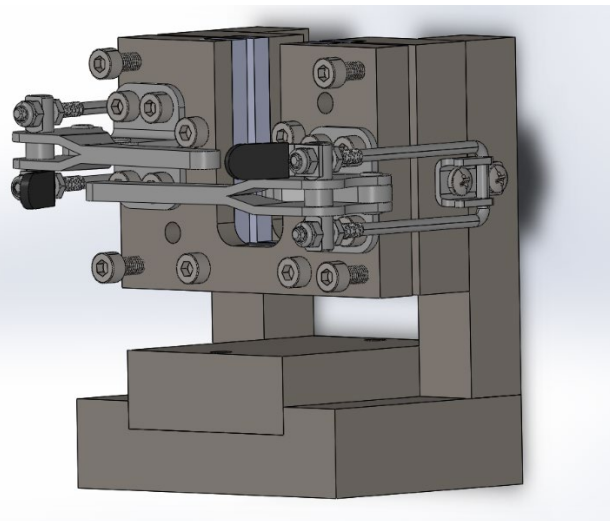


Figura 2.1.3 "corpo" della fixture (solidworks)

2.2 TRIGGER

Il trigger è una soluzione adoperata per concentrare le tensioni in una determinata zona del provino allo scopo di ottenere una modalità di cedimento controllata e progressiva, in altre parole per ottenere un danneggiamento controllato cercando di ridurre al minimo i rischi di instabilità. Abbiamo realizzato due tipologie di provino, una con angolo di 70° (**figura 2.2.1** a destra) e una con angolo di 90° (**figura 2.2.1** a sinistra), realizzati con una fresa a CNC e rifiniti a mano con l'ausilio di lime per ottenere uno spigolo dove la fresa per una questione di ingombri non poteva.



Figura 2.2.1 A sinistra trigger a 90°, a destra trigger a 70°

2.3 LUCE FIXTURE:

Andiamo a definire come “luce” l’altezza libera del provino, ovvero quella parte di provino non vincolata dalla guida, questa altezza corrisponde alla distanza tra basamento e corpo della fixture, o tra fine della guida e basamento (**figura 2.3.1**).

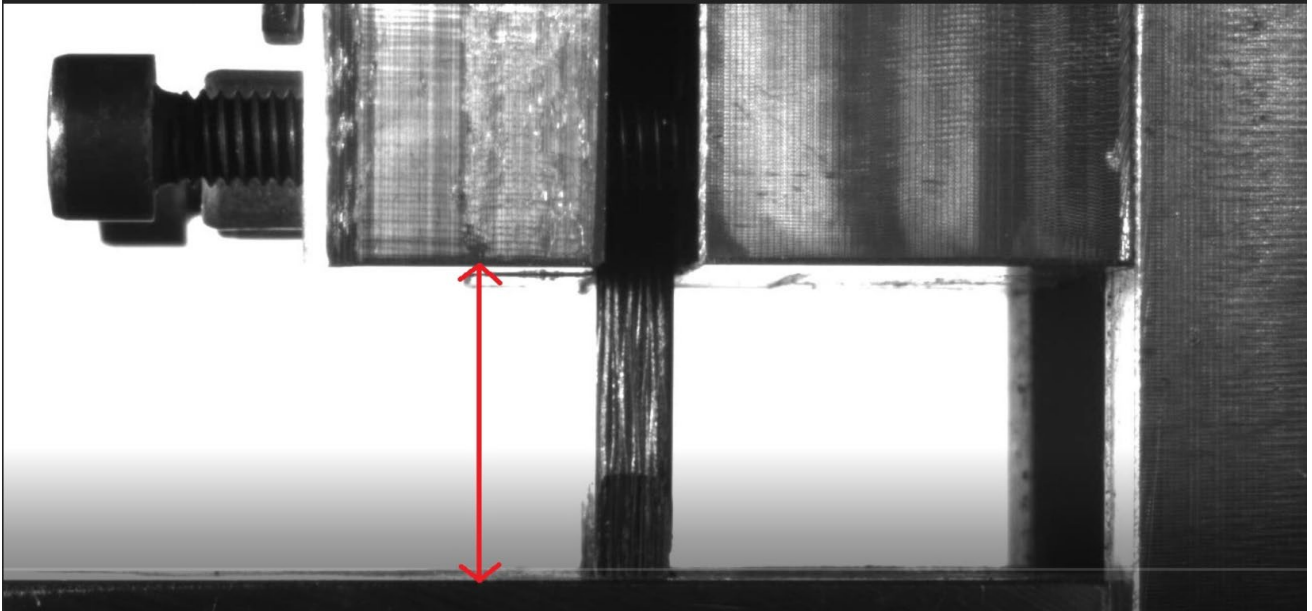


Figura 2.3.1 “Luce” nella fixture

La variazione di luce si ottiene variando l’altezza del basamento, variando l’altezza del basamento si aumenta la distanza tra la guida del provino e la base con conseguenze sulla stabilità del provino e ripetibilità della prova.

Nel corso delle nostre prove abbiamo utilizzato 2 altezze della luce, una quella di progetto, pari a 16mm, e una maggiorata, pari a 28mm. La luce svolge un ruolo di primaria importanza, infatti solo la parte di provino effettivamente fuori dalla guida, quindi la parte “alta” come la luce, partecipa attivamente alla prova ed è esattamente questa altezza che andrà ad introdurre eventuali instabilità nel provino, quali inflessioni o piegamenti.

3. PRODUZIONE DEI PROVINI

3.1 LAMINAZIONE

Per la prova abbiamo deciso di realizzare provini utilizzando degli unidirezionali (UD: UTS300-DT120-37) e tessuto (PW: GG285-T700-DT120-40).

Il pre-impregnato UD: UTS300-DT120-37, utilizzato per i provini con sequenza HL e CP, era stoccato, come usualmente accade per questa tipologia di semilavorato industriale, in un rotolo largo 600 mm e con una grammatura di 300 g/m². Le fibre di carbonio UTS-300, prodotte in Germania dalla Tenax, sono ad alta resistenza (HS) e sono costituite da 12000 filamenti ciascuna. Le proprietà vengono riportate in **tabella 3.1.1**.

Modulo Elastico [GPa]	240
Resistenza a trazione [MPa]	4800
Allungamento [%]	2
Densità [g/cm ³]	1.78
Origine	PAN

Tabella 3.1.1 Proprietà della singola fibra di carbonio

Per la realizzazione dei provini PW invece sono stati impiegati pre-impregnati in tessuto (woven fabric), del tipo bilanciato, caratterizzati da uno stile specifico in cui i filamenti di trama (1,8 fili/cm) passano una volta sopra ed una volta sotto a quelli di ordito (1,8 fili/cm), chiamato tessitura piana (dall'inglese Plain weave), identificati dalla sigla GG285P. Questo tessuto viene prodotto dall'azienda giapponese Toray Group e commercializzato dall'azienda italiana "Delta-Preg"[1]. Il pre-impregnato utilizzato viene venduto sotto forma di rotolo, largo 1000mm, con fibre formate da 12000 filamenti (yarn) del tipo ad alta resistenza (origine PAN), con una grammatura di 285 g/m², e venduto sigillato all'interno di un sacco in plastica per difenderlo, una volta stoccato in congelatore, dall'umidità. La temperatura di permanenza all'interno del congelatore, si attesta attorno ai -20°C, come consigliato dal produttore, onde rallentare la polimerizzazione della resina e consentire al prodotto di essere adoperato nell'arco di un anno.

Mentre la matrice DT120, comune ad entrambi, è costituita da una resina epossidica adatta ai processi di cura in autoclave, ad alta viscosità, alte prestazioni meccaniche soprattutto dedicate all'assorbimento di energia le cui principali proprietà sono riassunte in **Tabella 3.1.2**, **Tabella 3.1.3** e in **Figura 3.1.1**.

Natura chimica	Resina epossidica termoindurente
Range di temperatura di cura [°C]	80 - 135
Densità della sola resina curata [g/cm ³]	1.22

Tabella 3.1.2 Proprietà della resina epossidica DT120

Ciclo di cura	Tg [°C]
4 ore a 100°C	110
1.5 ore a 120°C	115
1 ora a 135°C	120

Tabella 3.1.3 Temperatura di transizione vetrosa in funzione del ciclo di cura del laminato

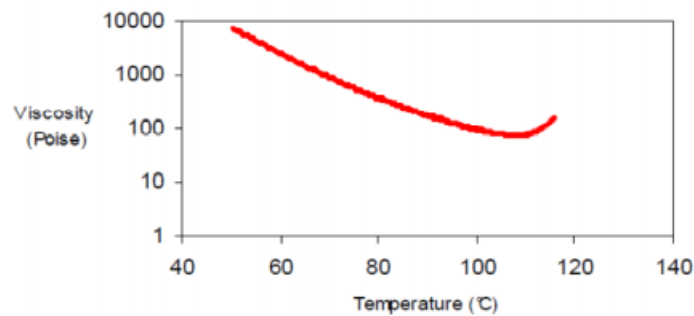


Figura 3.1.1 Andamento della viscosità della resina DT120 in funzione della temperatura

Nella fase di produzione dei provini risulta fondamentale la pulizia dell'ambiente in quanto ogni impurezza presente in esso può trasformarsi in una impurità all'interno del materiale composito tra le varie pelli.

Prima di procedere con la laminazione ovviamente si è dovuti passare tramite il taglio delle pelli con l'ausilio di un semplice taglierino e di una riga su un piano di alluminio dedicato. Una volta tagliate le pelli per scongiurare errori durante la stratifica si è proceduti a codificarle e numerarle secondo la sequenza di laminazione determinata. Per essere ulteriormente certi si è preferito fare un doppio check trascrivendosi prima le sequenze di laminazione su un foglio e poi sputando dopo la deposizione di ogni singola lamina la codifica ad essa corrispondente.

Le sequenze di laminazione utilizzate per gli unidirezionali sono state 2:

- $[90/0]_{4S}$ Cross ply
- $[90_2/0_2/\pm 45/0_2]_S$ Hard laminated

Nel caso del Plain Weave invece la stesura delle 12 pelli è stata in un'unica direzione essendo lui stesso intrinsecamente bilanciato 50% a 90° e 50% a 0°.

Per i provini Cross Ply le pelli sono disposte al 50% a 90°, lo 0% a $\pm 45^\circ$ e il restante 50% a 0° mentre per gli Hard Laminated come da specifiche le pelli sono disposte 50% a 90°, 25% a $\pm 45^\circ$ e il restante 25% a 0°.

Prima di iniziare con la vera e propria laminazione si è proceduti con la preparazione degli stampi. Sono state utilizzate due lastre di vetro temprato dapprima pulite/decappate tramite del diluente

sulle quali poi si sono passate diverse mani di distaccante Loctite Frekote 700NC. Quest'ultimo possiede l'importante compito di creare un sottile film in grado di evitare, teoricamente, che la resina epossidica, durante la polimerizzazione, aderisca allo stampo rendendo il componente in composito difficile da rimuovere senza pregiudicarne l'integrità. Durante la realizzazione del provino con sequenza di laminazione PW tuttavia, col senno di poi, questo non ha funzionato appieno andando a rovinare lo stampo stesso.

Atteso un tempo adeguato per l'asciugatura del distaccante si è proceduto con la stesura delle pelli direttamente sullo stampo secondo la sequenza predeterminata, rimuovendo le pellicole protettive caratteristiche dei pre-impregnati. Questa fase è fondamentale e quindi bisogna prestare particolare attenzione, infatti sbagliando la disposizione di una delle pelli, ovvero stendendola non secondo la direzione assegnata, si andranno ad ottenere componenti con caratteristiche e prestazioni molto diverse da quelle attese. Una volta stesa la singola pelle si procedeva poi con attenzione nella rimozione di bolle d'aria presenti, facendo fuoriuscire l'aria secondo la direzione delle fibre applicando una leggera pressione con le mani o con strumenti di supporto. Una volta ultimata questa procedura per tutte le pelli si è proceduti a chiudere lo stampo col controstampo.

3.2 PREPARAZIONE DEL SACCO A VUOTO

Ovviamente non si possono introdurre direttamente gli stampi appena creati in autoclave, occorre creare un sacco a vuoto. La creazione di due ambienti a pressione molto diversa – molto bassa al suo interno, molto alta al suo esterno – permette di avere dei benefici quali una grande compattazione delle fibre e una fuoriuscita degli eccessi di resina durante la cura. Di fatto questo processo permette di ottenere i componenti in composito con le migliori proprietà meccaniche derivanti da contenuti percentuali delle fibre molto elevati.

Per prima cosa lo stampo è stato avvolto in un film di materiale distaccante per evitare che durante la cura la resina entri in contatto con il sacco esterno, danneggiandolo e portando a problemi quali foratura e conseguente perdita del vuoto. Successivamente si avvolge il tutto con un tessuto di ventilazione, detto breather, avente lo scopo di uniformare il vuoto, di facilitare la fuoriuscita di aria dal sacco e soprattutto di evitare che il sacco entri a contatto con gli spigoli dello stampo i quali potrebbero potenzialmente danneggiarlo.

A questo punto si procede con l'introduzione dello stampo all'interno del sacco, ma prima di sigillarlo attentamente con un sigillante siliconico adatto a sopportare le temperature dei cicli di cura, si è collocata la parte inferiore della valvola per la creazione del vuoto; a questo punto si è eseguita con cura una incisione sul sacco in corrispondenza del foro centrale della parte inferiore della valvola al fine di applicare la parte superiore della valvola. Dopo aver applicato la valvola si procede con la verifica della tenuta del sacco: si applica il vuoto e si vanno a distendere il più possibile le zone con grinze vicino alla valvola o nelle zone di sigillante. La parte più importante di questa verifica è però la verifica di tenuta del vuoto, infatti nel caso di

tenuta non perfetta si riuscirà ad udire il caratteristico sibilo dovuto alla differenza di pressione tra interno ed esterno del sacco.

Questa fase è una delle più delicate ed è svolta manualmente anche in azienda, infatti se durante la cura in autoclave venisse a mancare il vuoto, per problemi di tenuta della valvola o del sigillante o problemi con l'attacco della pompa, non si avrebbe la compattazione delle fibre essendoci all'interno e all'esterno del sacco la stessa pressione. Se ciò dovesse accadere il pezzo sarebbe da scartare in quanto non rispetterebbe più nessuna delle caratteristiche richieste.

3.3 CURA IN AUTOCLAVE

Dopo aver completato la produzione dei sacchi si giunge quindi al ciclo di cura in autoclave (**figura 3.3.1**); si è utilizzata un autoclave prodotta dalla Italmatic Srl , avente una capacità di ben 3200 litri, che le consente di effettuare trattamenti ad una pressione massima di 10 bar ed una temperatura pari a 200 °C.

Per i provini si è scelto un ciclo di cura in grado di raggiungere l'ideale rapporto fibra/matrice dei componenti: 120°C per 90 minuti a 5 bar di pressione.

Questo è caratterizzato da rampe di temperatura di 3°C/min fino al raggiungimento dei 120°C alla quale si sovrappone con un certo offset una rampa di pressione fino al raggiungimento di 5 bar di pressione. Raggiunte le condizioni di regime esse sono state mantenute per 90 minuti, dopo di che la temperatura e la pressione sono state fatte calare gradualmente con una rampa da 3°C/min fino ai valori ambientali al fine di limitare le tensioni residue che provocano una indesiderata deformazione del pezzo.



Figura 3.3.1 *L'autoclave presente in laboratorio*

3.4 TAGLIO E CLASSIFICAZIONE PROVINI

Per ricavare i provini dalle lastre precedentemente prodotte si è proceduti con una fresa a CNC la quale è andata a tagliare i provini e a realizzare i trigger, successivamente rifiniti a mano tramite l'ausilio di lime a causa dei limiti intrinseci del taglio con fresa.

Una volta finita la parte di taglio dei provini si è passati alla loro classificazione in base alle prove a cui saranno poi sottoposti.

Le prove a cui saranno sottoposti servono a valutare l'influenza e il comportamento al variare di determinati parametri quali:

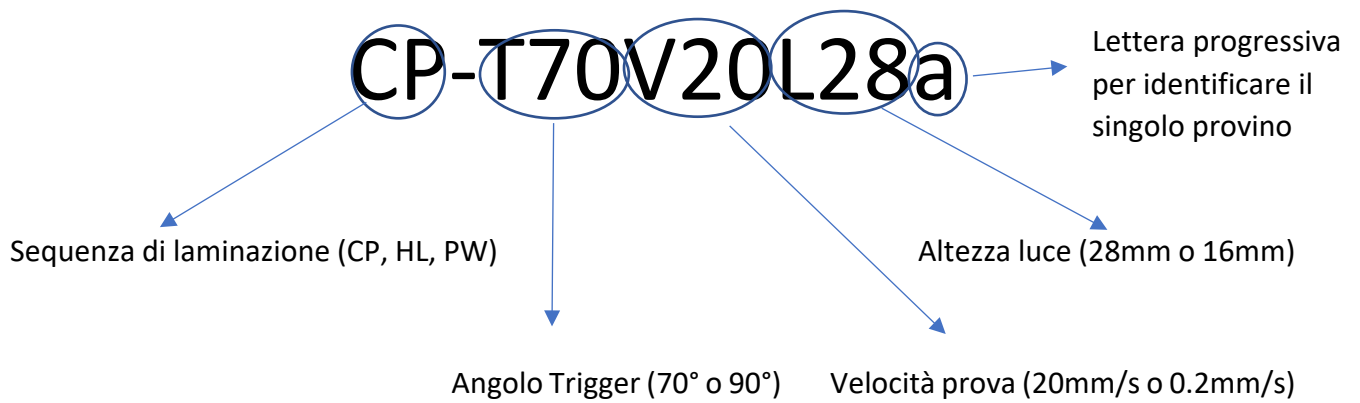
- Geometria del trigger: angolo "di punta" di 70°(T70) contro angolo di 90°(T90);
- Altezza della luce della fixture: 16mm e 28mm;
- Sequenza di laminazione e pelli:
 - Unidirezionali: hard laminate(HL), cross ply(CP)
 - Tessuto: plain weave(PW);
- -velocità della pressa: 20mm/s e 0.2mm/s

Quindi, sono stati realizzati 12 provini per ogni composito, 6 con trigger con angolo di 70°(figura 3.4.1) e 6 con trigger con angolo di 90°(figura 3.4.2), poi, per facilitare la lettura dei dati nelle varie prove (riportate in tabella), si sono aggiunti dei caratteri per identificare l'altezza della luce e la velocità delle singole prove, in particolare una lettera per la specifica e un numero per il valore della specifica: le prime 2 lettere indicano la sequenza di laminazione(CP per Cross Ply, HL per Hard Laminated, PW per Plain Weave) T per indicare il trigger(con angolo di 70° o 90°), V per indicare la velocità della prova (20mm/s o 0.2mm/s) e infine L per indicare l'altezza della luce (28mm o 16mm).

Oltre a questi caratteri si è introdotta una lettera dell'alfabeto progressiva, per identificare il singolo provino.

LAMINAZIONE	SPECIFICA	CODICE
Sequenza di Laminazione	Cross Ply, Hard Laminated, Plain Weave	CP, HL, PW
Angolo trigger	70° o 90°	T70, T90
Velocità prova	20mm/s o 0,2mm/s	V20, V0.2
Altezza luce	16mm o 28mm	L16, L28

Quindi, ricapitolando, la nomenclatura di un provino risulterà come la seguente:



Per quanto riguarda le varie misure si sono sfruttati calibri cinquantesimali e centesimali, si sono più volte le misure per ogni provino in modo da ottenere un valore medio. Per quanto riguarda il peso si è usata una bilancia con sensibilità del millesimo di grammo.

I provini per la fixture hanno una lunghezza di 13cm e una larghezza di 4cm, lo spessore invece varia a seconda della sequenza di laminazione da un minimo di poco meno di 4mm per le sequenze PW ad un massimo di poco più 5mm per le 16 pelli degli unidirezionali.

La lunghezza e larghezza erano stabilite dalle specifiche della fixture.

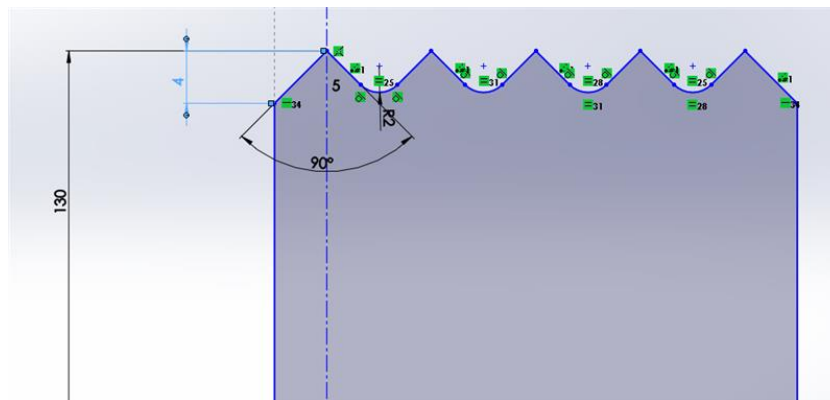


Figura 3.4.1 Dettaglio sul disegno realizzato su solidworks del trigger da 90° usato come riferimento per la fresa a CNC

4. ESECUZIONI DELLE PROVE SPERIMENTALI

La totalità delle prove sperimentali è stata eseguita presso l'ex sede del laboratorio di Ingegneria di Forlì presso l'Hangar dell'aeroporto.

Per l'esecuzione di tutte le prove è stata utilizzata una macchina servo-idraulica di capacità massima 100kN e adatta a sperimentazioni statiche e quasi-statiche.

Nelle nostre prove i dati che ci interessa andare ad acquisire sono lo spostamento e la forza, acquisiti rispettivamente con un LVDT e con una cella di carico, l'acquisizione viene realizzata a 10Hz per quanto riguarda le prove quasi-statiche, a 100Hz per le prove dinamiche.

Verrà di seguito riportata la procedura di bloccaggio per un provino, valida e ripetuta per tutti i provini.

Per prima cosa la fixture è composta da 2 parti, la testa infatti non è vincolata rigidamente al corpo perché deve permettere il bloccaggio del provino e il suo inserimento in sede.

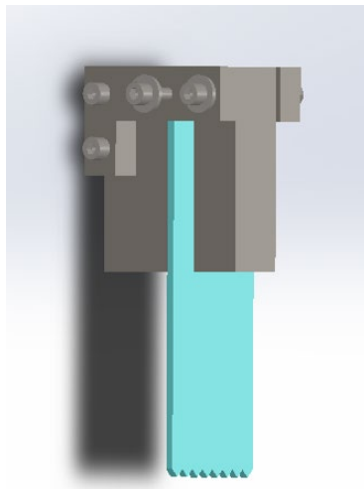


Figura 4.1 esempio di bloccaggio di un provino nella testa della fixture tramite solidworks

Per andare a bloccare il provino si va ad agire sui due bulloni presenti nella testa in alto a destra tramite brugole, invece per far sì che la guida svolga bene il suo compito, dopo aver riposizionato in sede la testa, si va ad agire sui 4 bulloni evidenziati nella figura sottostante.

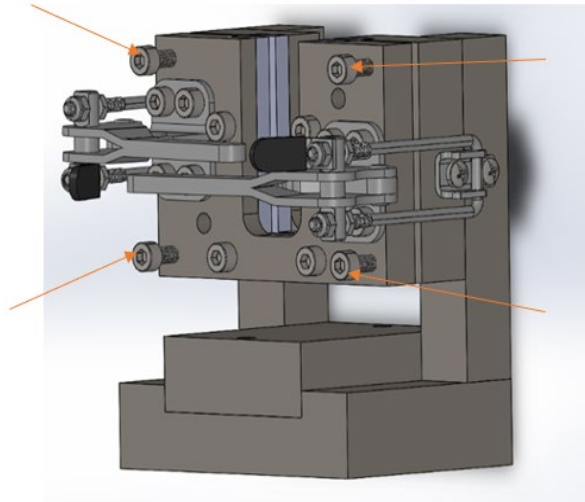


Figura 4.2 Dettaglio sui bulloni da andare a regolare nella fixture per diminuire l'attrito del provino sulla guida

Avvitando questi bulloni con una chiave a brugola si fa avanzare la parte anteriore rispetto alla posteriore in modo da lasciare più spazio per il provino diminuendone l'attrito e facilitandone lo scorrimento. I bulloni si tendono a regolare ad X per evitare sollecitazioni eccessive sul provino.

Una volta posizionato il provino si inserisce la fixture nella macchina servo-idraulica dove il carico verrà applicato nella parte superiore della testa (**figura 4.3**) che quindi dovrà essere il più centrata possibile rispetto ai piatti della macchina per evitare l'introduzione di carichi non in asse col provino.

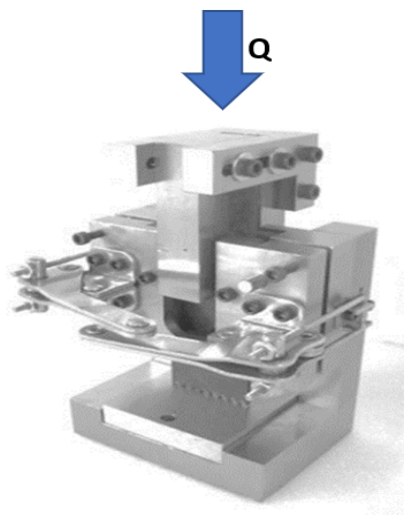


Figura 4.3 Punto di applicazione del carico

A questo punto sono state effettuate le diverse prove, variando la sequenza di laminazione (Cross Ply CP, Plain Weave PW, Hard Laminated HL), la velocità (prova dinamica a 20mm/s o prova quasi statica 0.2mm/s), l'angolo di apertura del trigger (70° e 90°) e l'altezza della luce (16mm o 28mm).

5. DATI OTTENUTI: GRAFICI E CONFRONTI

5.1 Analisi degli effetti della variazione della sequenza di laminazione dei provini

Il primo confronto che siamo andati a fare è quello sulle sequenze di laminazione per vedere quanto le pelli e la loro disposizione vada ad influire sul carico. Ci aspettavamo, vista la disposizione delle pelli (oltre a quelle a 90° a reggere il carico ci sono anche quelle a $\pm 45^\circ$), che la sequenza HL fosse quella, a parità di altre condizioni, che reggesse un carico maggiore e così è effettivamente stato, anche se la sequenza PW non si è poi distaccata di molto.

Nelle figure seguenti si può vedere l'andamento del carico nelle 3 prove a bassa velocità, con luce di 16mm e trigger di 90° per tutte e 3 le sequenze, successivamente poi verranno riportati in un unico grafico un confronto per le 3 sequenze e infine i diagrammi della SEA, anche qui con una prova indicativa per sequenza.

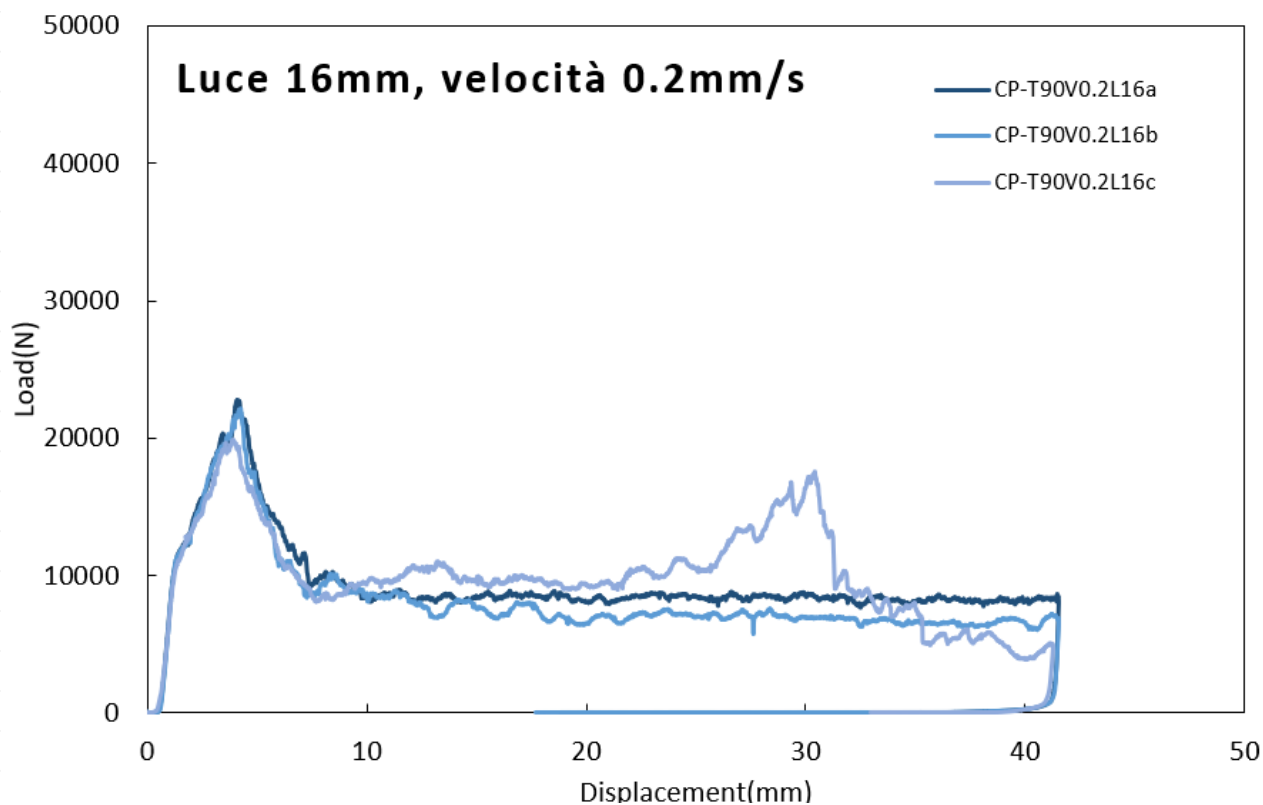


Figura 5.1.1 Andamento carico con sequenza Cross Ply

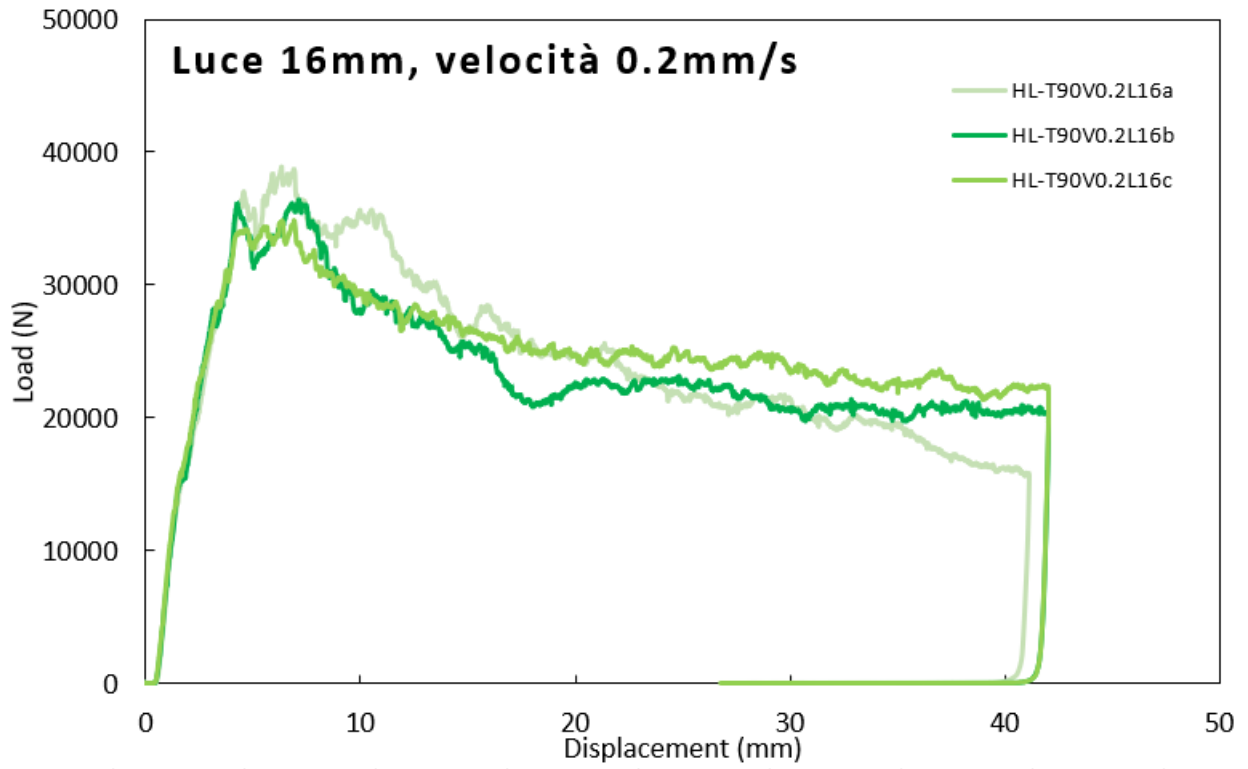


Figura 5.1.2 Andamento carico con sequenza *Hard Laminated*

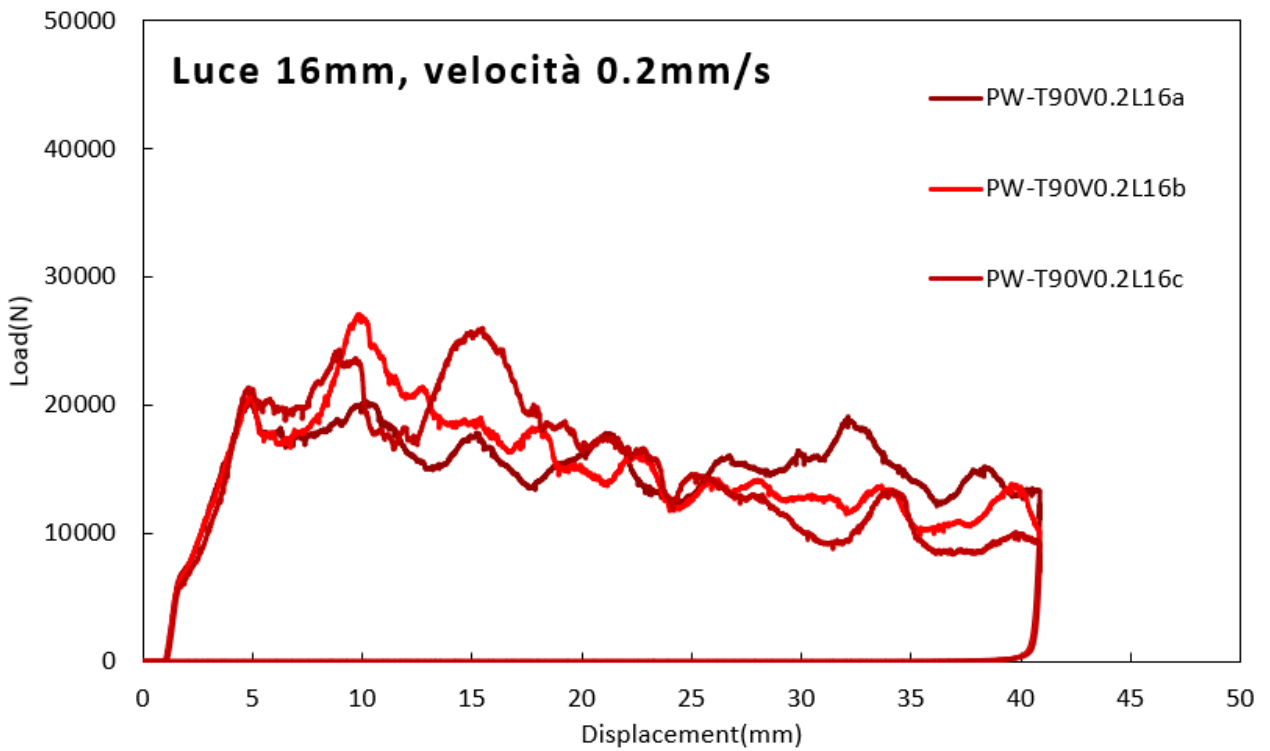


Figura 5.1.3 Andamento carico con sequenza *Plain Weave*

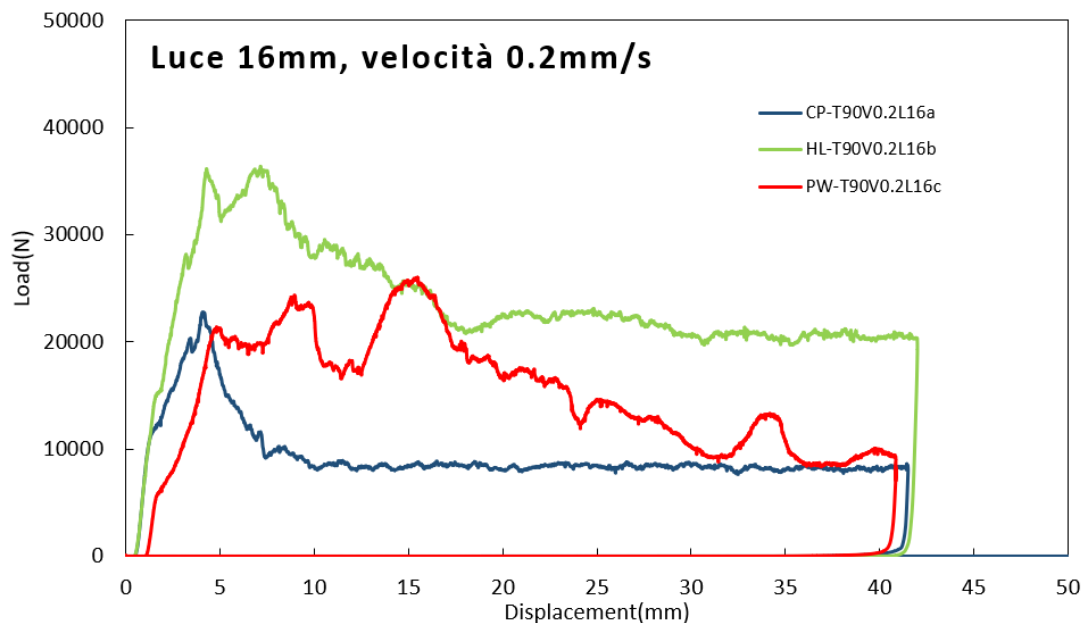


Figura 5.1.4 *Andamento carico, confronto tra le varie sequenze di laminazione*

Dai grafici si nota che le prove CP sembrano essere quelle più stabili (eccetto una), infatti alle condizioni di progetto, il carico si stabilizza a 10kN e rimane fisso. Per PW e HL invece abbiamo più o meno oscillazioni periodiche, soprattutto per PW, e un lento calo a partire dal picco iniziale.

Nel caso del provino PW risulta evidente il motivo di questo andamento oscillante, come si vede infatti dai due frame riportati in **figura 5.1.5a** e **5.1.5b** è il provino stesso ad avere un andamento oscillante rispetto alla perpendicolare al basamento, nella **figura 5.1.5a** notiamo infatti una leggera inflessione verso destra rispetto alla perpendicolare al basamento, nella **figura 5.1.5b** invece, estratto in un momento successivo del video, vediamo una leggera inflessione verso sinistra. Questo andamento oscillante periodico potrebbe essere dovuto alla natura “periodica” della sequenza di laminazione PW dovuta agli intrecci tra fibre.

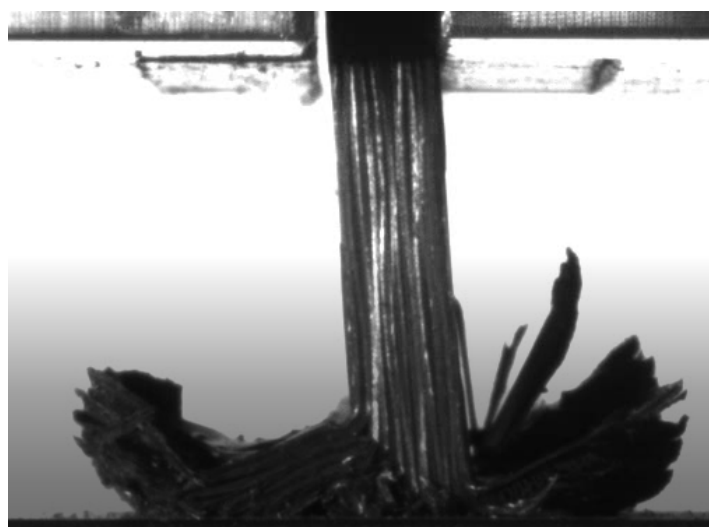


Figura 5.1.5a *Dettaglio sulla prova PW-T9002L16c in cui si nota una leggera inflessione verso destra del laminato*



Figura 5.1.5b *Dettaglio sulla prova PW-T9002L16c in cui si nota una leggera inflessione verso sinistra del laminato*

Per quanto riguarda i provini HL si nota dai video che questo calo è dovuto ad un delaminarsi del provino in maniera sempre più importante, nella **figura 5.1.6a** si nota come ad inizio prova, ove il carico è massimo, il provino sia poco delaminato, successivamente invece questa delaminazione si propaga (**figura 5.1.6b** e **5.1.6c**) e inizia a coinvolgere sempre più pelli col carico che di conseguenza viene sorretto da un numero via via sempre minore di pelli che costituzionalmente possono quindi reggere meno forza.

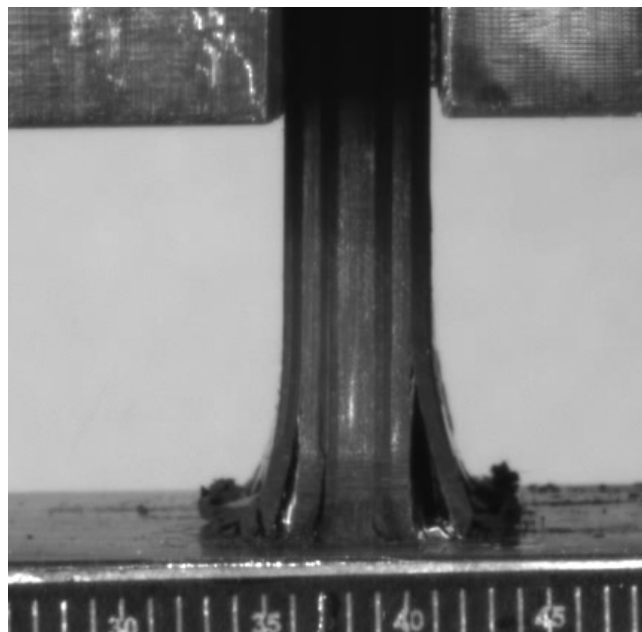


Figura 5.1.6a *Dettaglio sul provino HL-T90V0.2L16b a inizio prova*

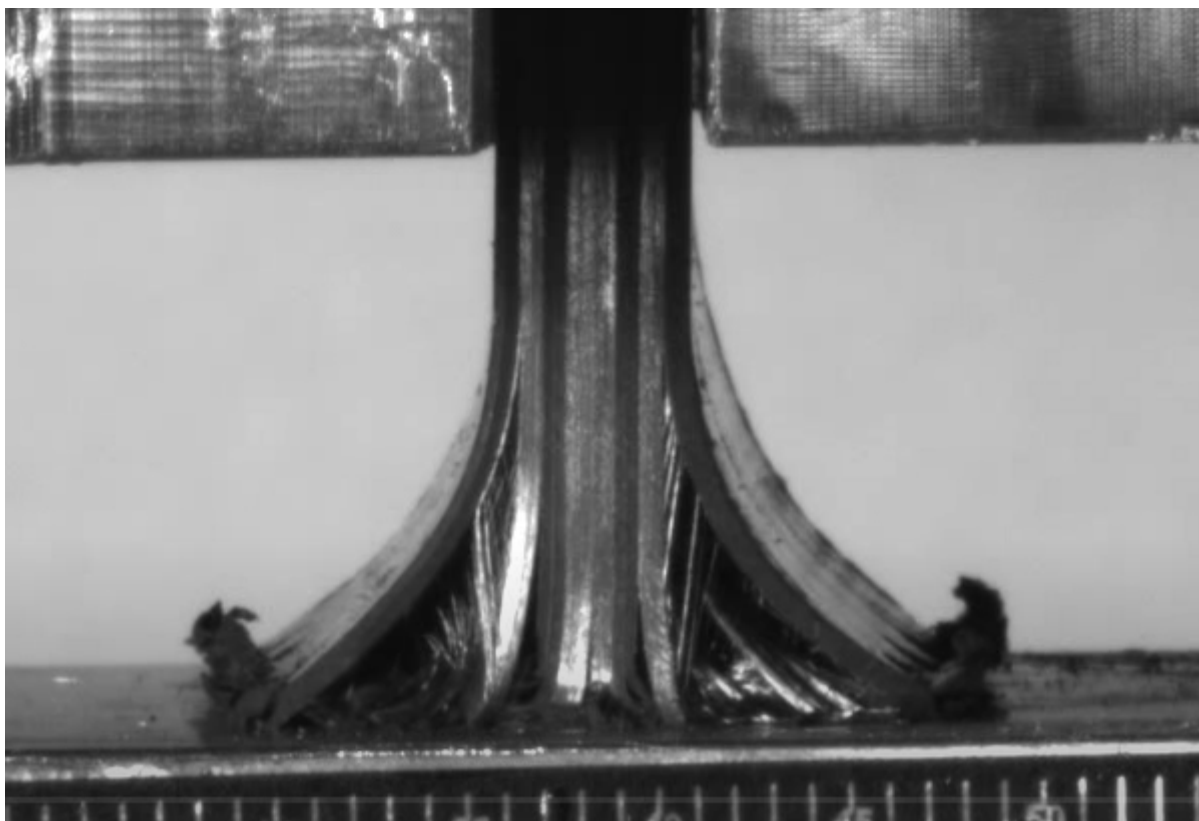


Figura 5.1.6b *Dettaglio sul provino HL-T90V0.2L16b con inizio di delaminazione*

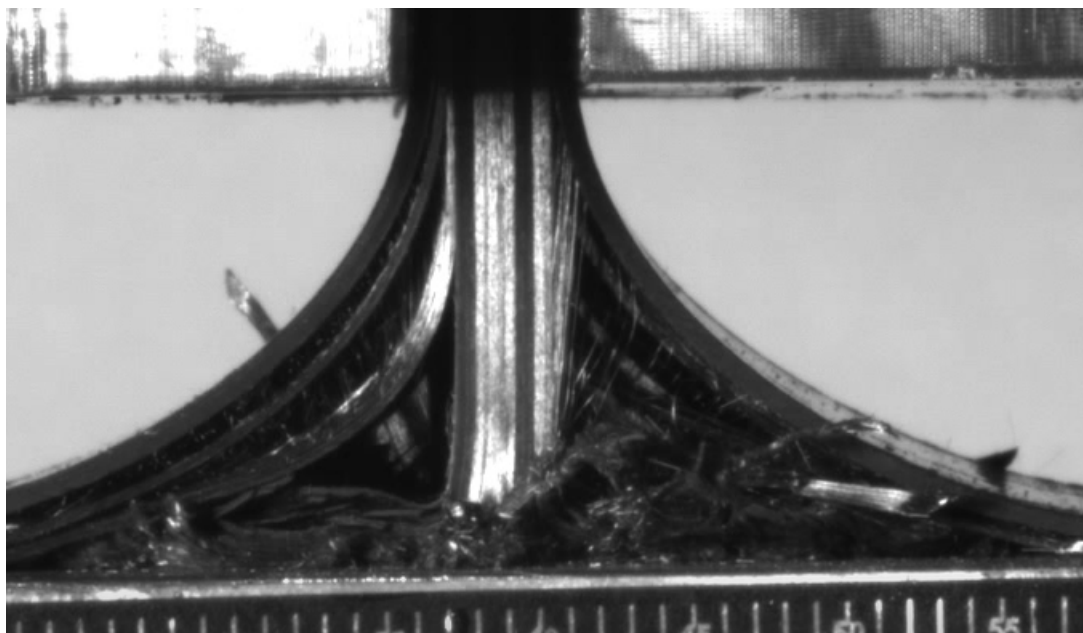


Figura 5.1.6c *Dettaglio sul provino HL-T90V0.2L16b con delaminazione evidente*

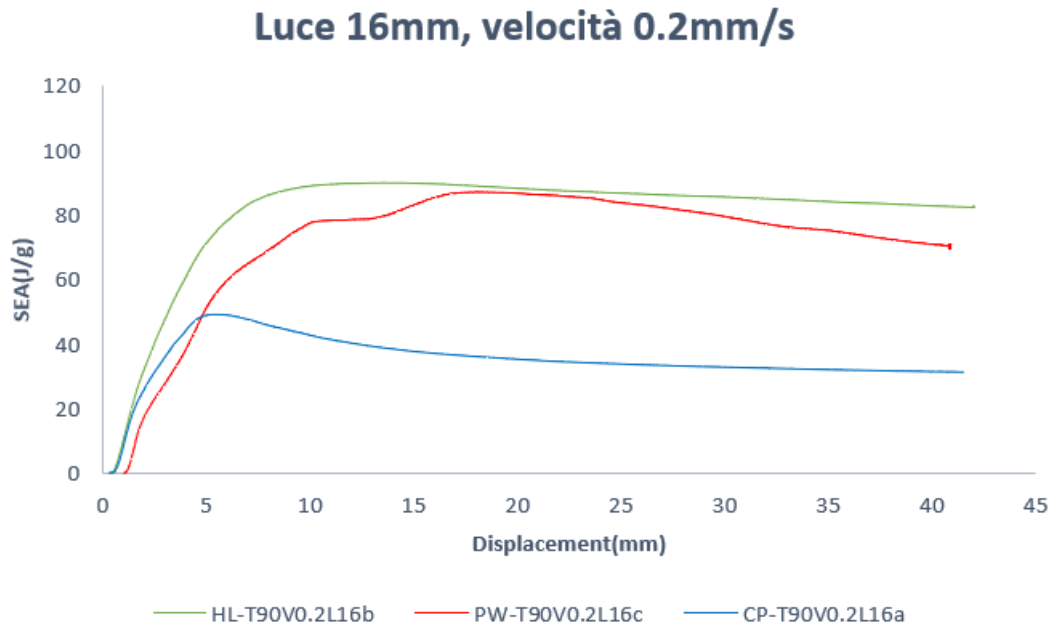


Figura 5.1.7 Andamento SEA, confronto tra le varie sequenze di laminazione

Nella SEA la sequenza Cross Ply si conferma nettamente inferiore alle altre mentre la Plain Weave si va ad avvicinare molto alla Hard Laminated, questo perché la SEA va a normalizzare l'energia sulla massa.

Il cross ply ha una SEA minore rispetto alle altre in quanto ha tutte le interfacce "deboli" dato sovrappongono 0/90. Mentre nel HL ci sono alcune ply ripetute (2 pelli a zero si comportano 'quasi' come un'unica pelle più spessa). Il tessuto invece era già in partenza composto da meno pelli, quindi ha solo 11 interfacce che possono delaminare, rispetto alle 15 per il CP.

È interessante notare come i tre layup avessero tutti il 50% di fibre a 0 gradi (e lo spessore, che per il PW è simile ma non identico a quello degli unidirezionali). Quindi si può concludere che la loro disposizione, quindi il layup ha una grande influenza sull'energia assorbita.

5.2 Analisi degli effetti della variazione di angolo di apertura del trigger

I primi confronti fatti sono stati a parità di velocità, altezza luce e sequenza di laminazione variando l'angolo di apertura del trigger.

Nelle figure sottostanti trovate i dati ottenuti nelle 3 ripetizioni con velocità 0.2mm/s, nella figura **5.2.1** i dati con trigger a 70°, nella **5.2.2** i dati con trigger a 90°, nella **5.2.3** il confronto tra i casi mediani dei 2 trigger.

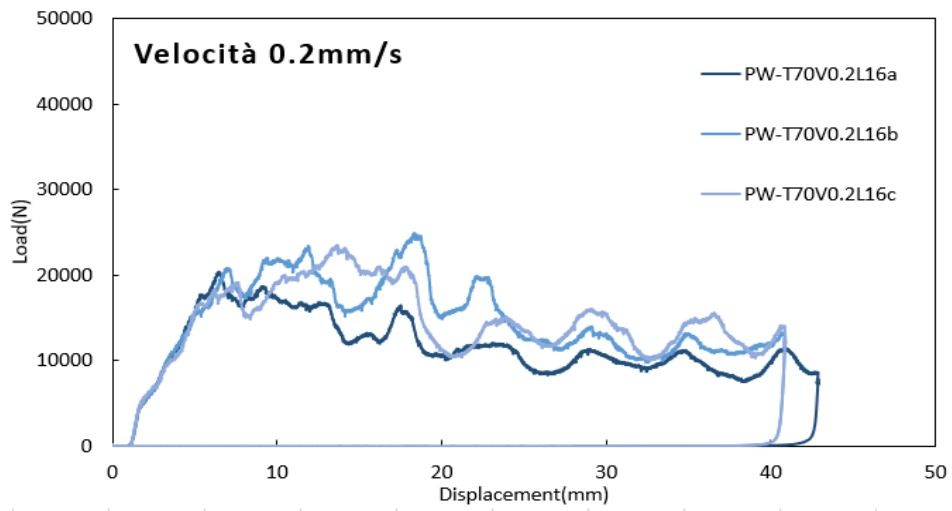


Figura 5.2.1 Confronto tra le 3 prove ottenute con provini con trigger a 70°

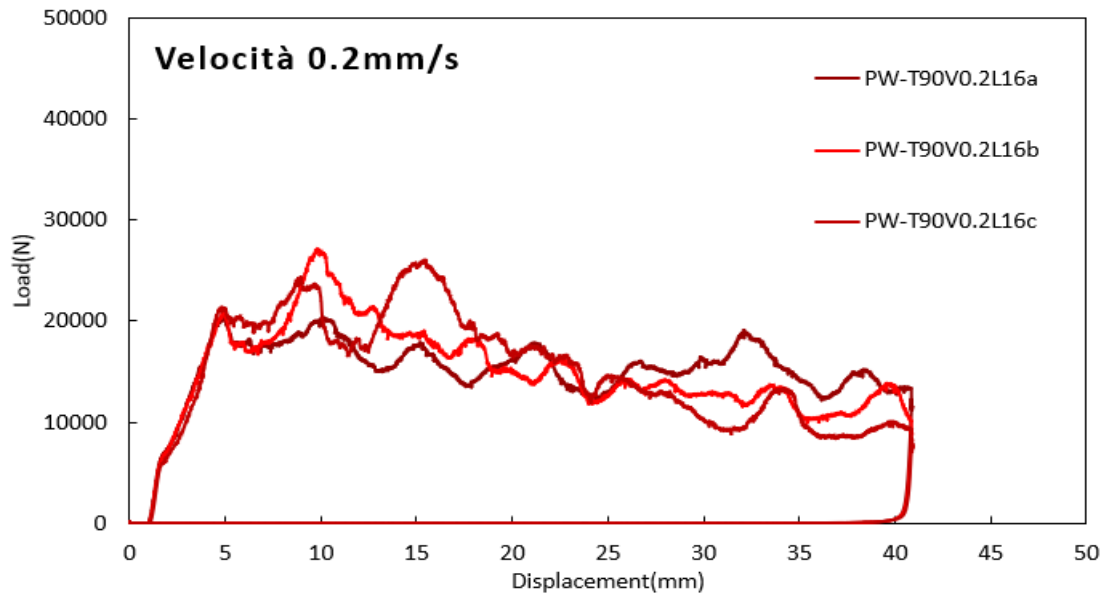


Figura 5.2.2 Confronto tra le 3 prove ottenute con provini con trigger a 90°

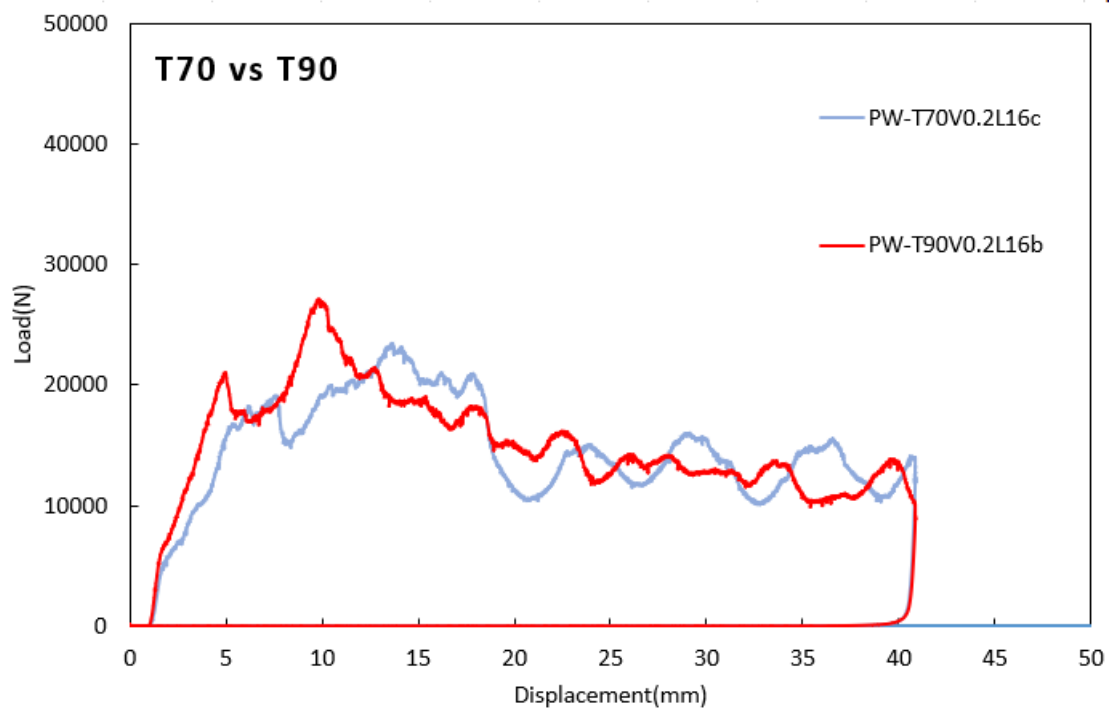


Figura 5.2.3 Confronto tra la prova mediana del caso T90 con la prova mediana del T70

Come si può notare dall'andamento delle curve il carico non viene particolarmente influenzato dalla geometria del trigger, anzi l'andamento risulta piuttosto ripetibile a prescindere dall'angolo di apertura, l'unica differenza che si nota è nella fase di salita del carico, con una inclinazione maggiore della prova con trigger a 90°, risultato che può essere riconducibile ad un'altezza del trigger minore nel caso di angolo retto (come illustrato nel capitolo 3 nelle figure 3.4.1 e 3.4.2).

Procediamo ora con l'analisi della SEA, nella figura 5.2.4 si vede l'andamento della SEA con il trigger a 70°, nella 5.2.5 l'andamento con il trigger a 90° e nuovamente nella terza figura, 5.2.6; l'andamento delle due condizioni mediane, come si vede anche da questi grafici l'andamento risulta assolutamente sovrapponibile a prescindere dall'angolo di apertura del trigger al netto di una maggiore inclinazione iniziale della SEA con trigger a 90° sempre a causa di un'altezza diversa tra i due trigger, motivo per cui nelle prove successive abbiamo considerato le prove indipendenti dall'angolo di apertura del trigger andando a valutare gli altri effetti.

Velocità 0.2mm/s

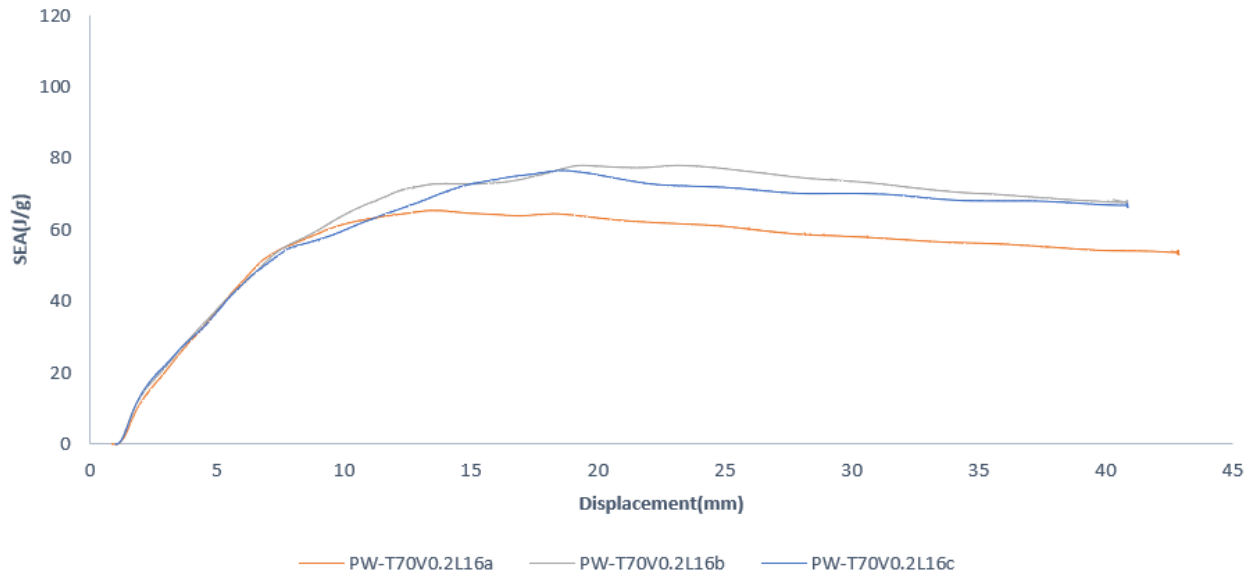


Figura 5.2.4 Andamento SEA nei 3 casi col trigger a 70°

velocità 0.2mm/s

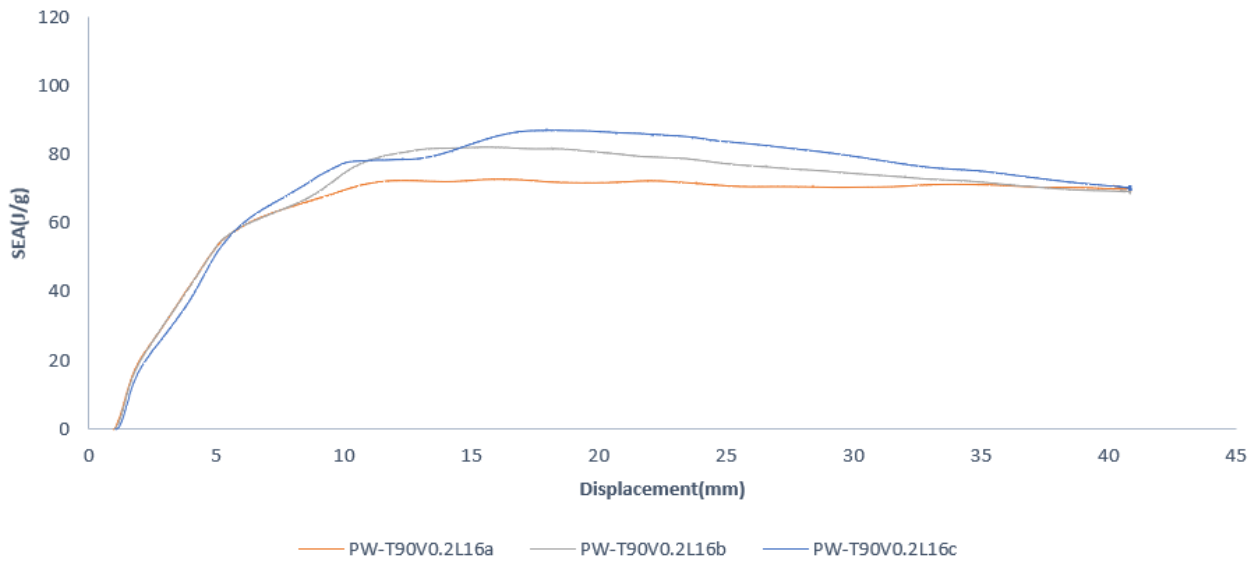


Figura 5.2.5 Andamento SEA nei 3 casi col trigger a 90°

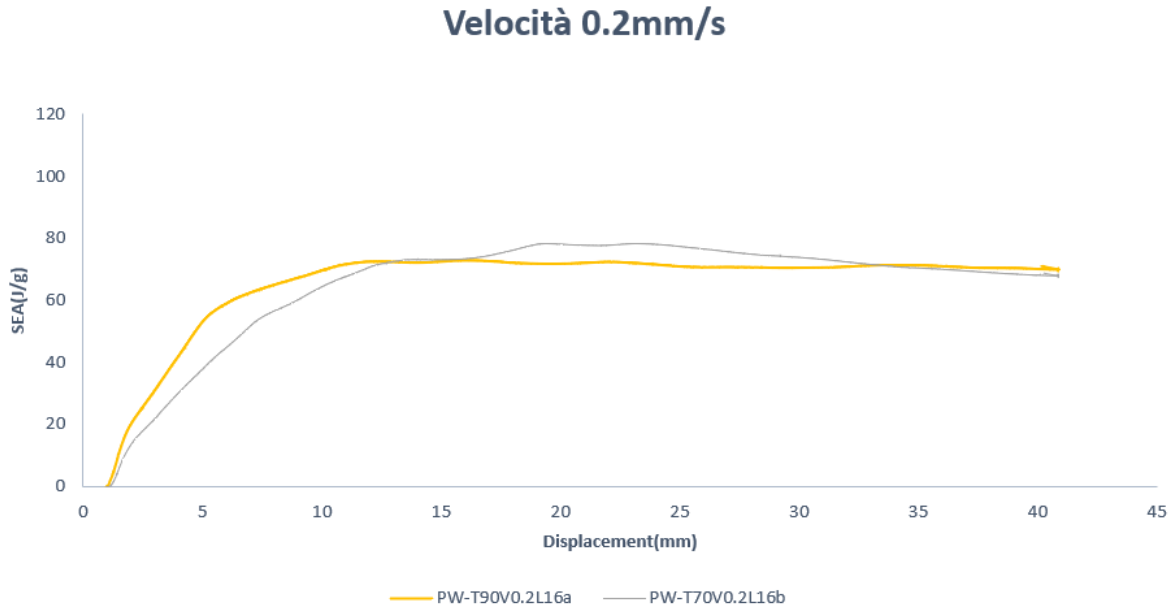


Figura 5.2.6 Confronto SEA tra trigger a 90° e trigger a 70°

5.3 Analisi degli effetti della variazione di velocità della prova

Successivamente siamo andati a confrontare tra di loro i risultati ottenuti a parità di trigger, altezza e sequenza di laminazione variando la velocità della prova (0.2mm/s contro 20mm/s), ottenendo gli andamenti dei grafici sottostanti, nella figura 5.3.1 si vede l'andamento con velocità di 0.2mm/s, nella 5.3.2 l'andamento con velocità pari a 20mm/s e nelle 5.3.3a, 5.3.3b e 5.3.3c il confronto tra due andamenti mediani delle prove per tutte i layup.

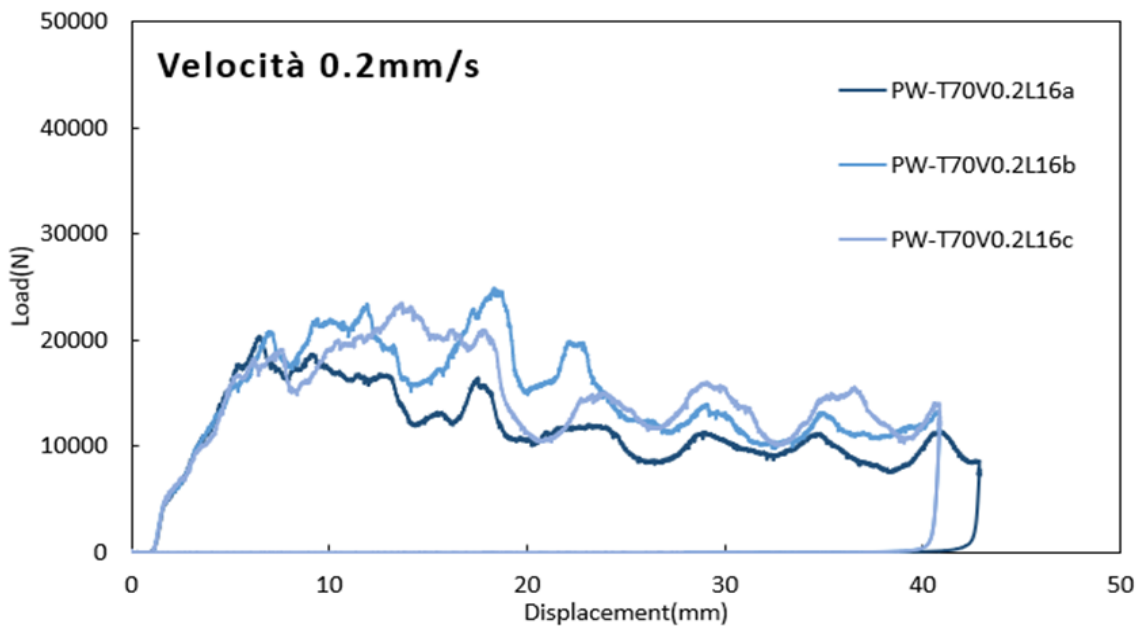


Figura 5.3.1 Confronto tra le 3 prove ottenute con velocità pari a 0.2mm/s

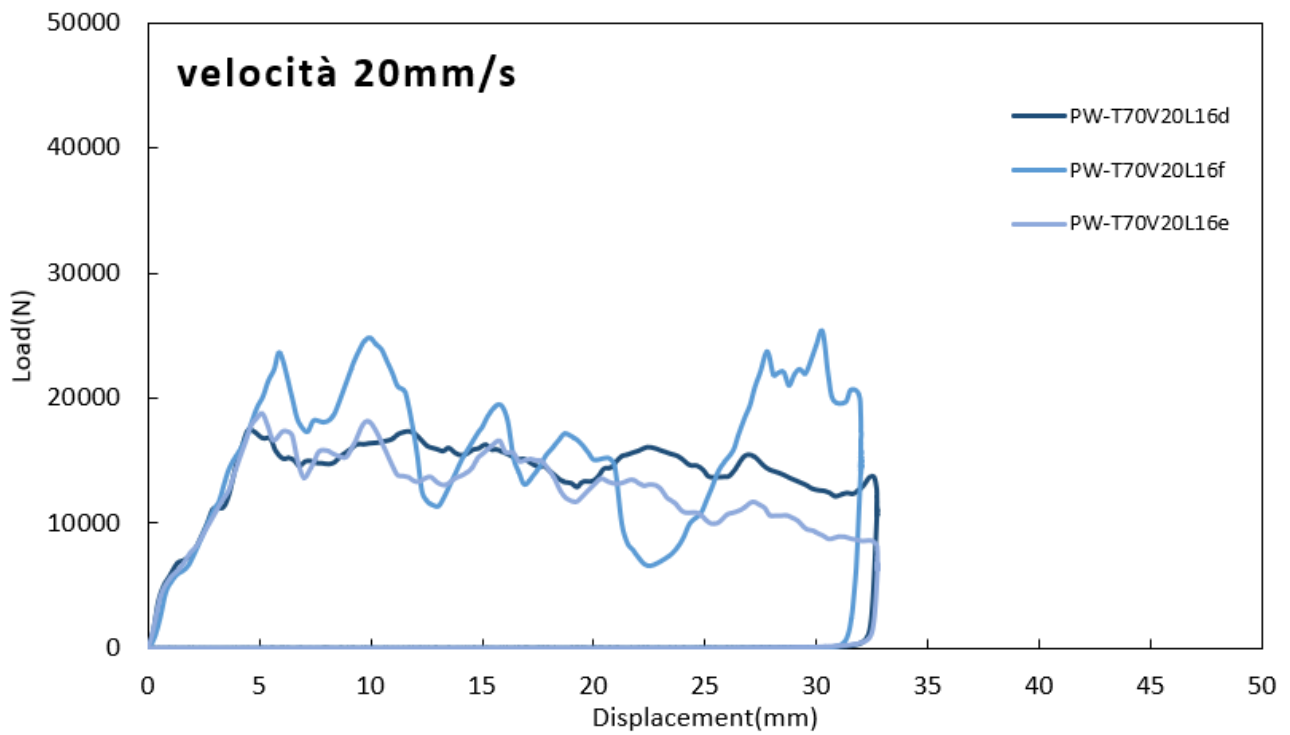


Figura 5.3.2 Confronto tra le 3 prove ottenute con velocità pari a 20mm/s

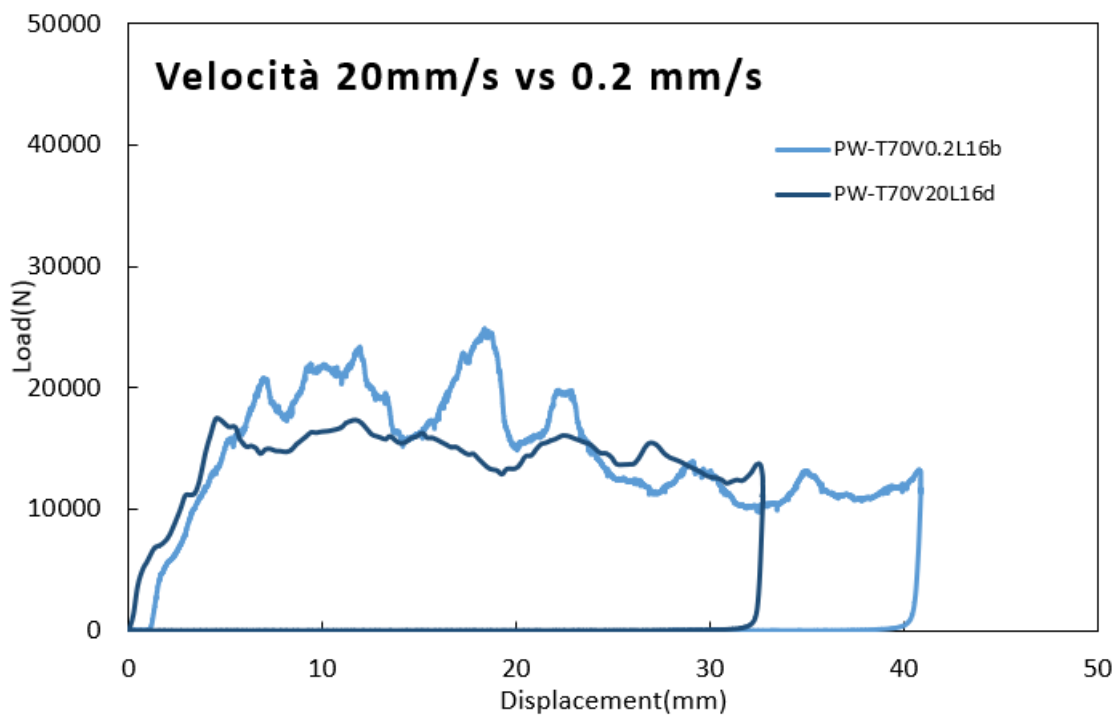


Figura 5.3.3a Confronto tra le prove ottenute a diversa velocità con sequenza PW

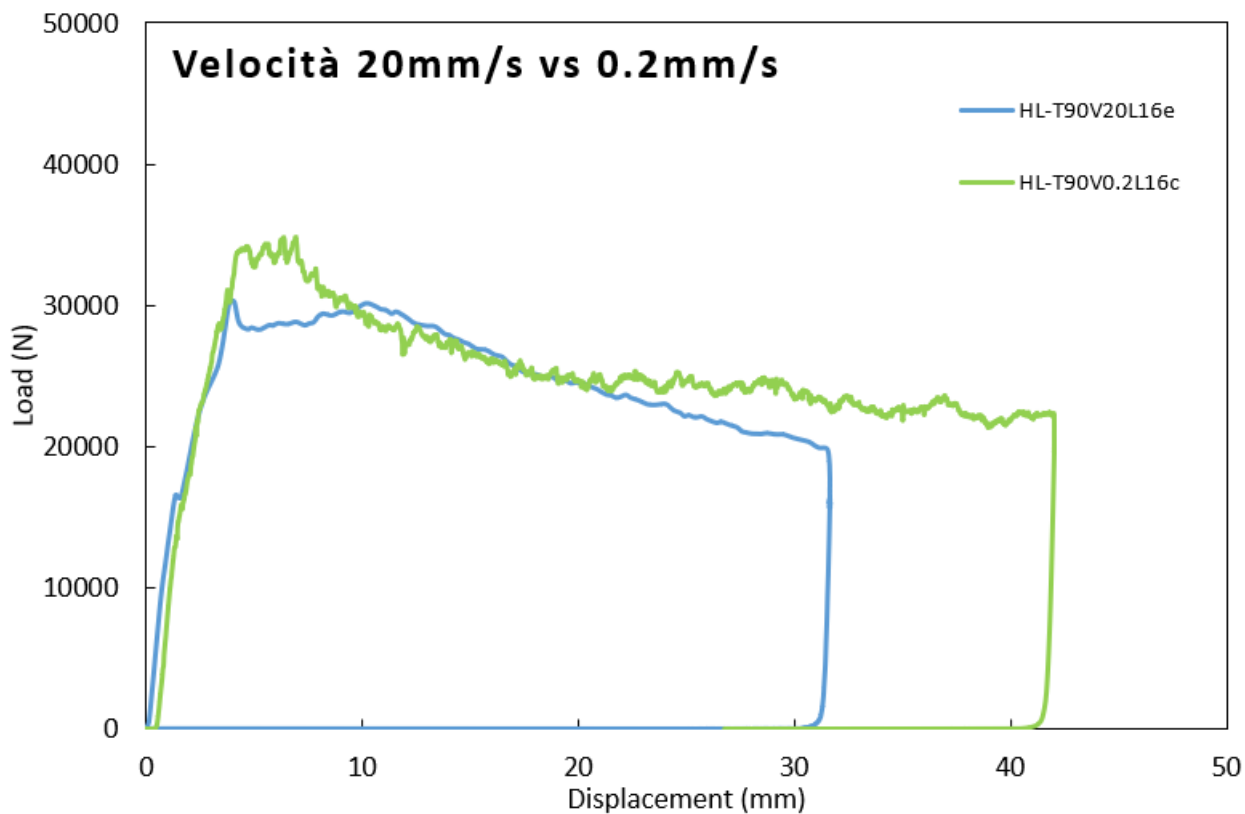


Figura 5.3.3b Confronto tra le prove ottenute a diversa velocità con sequenza HL

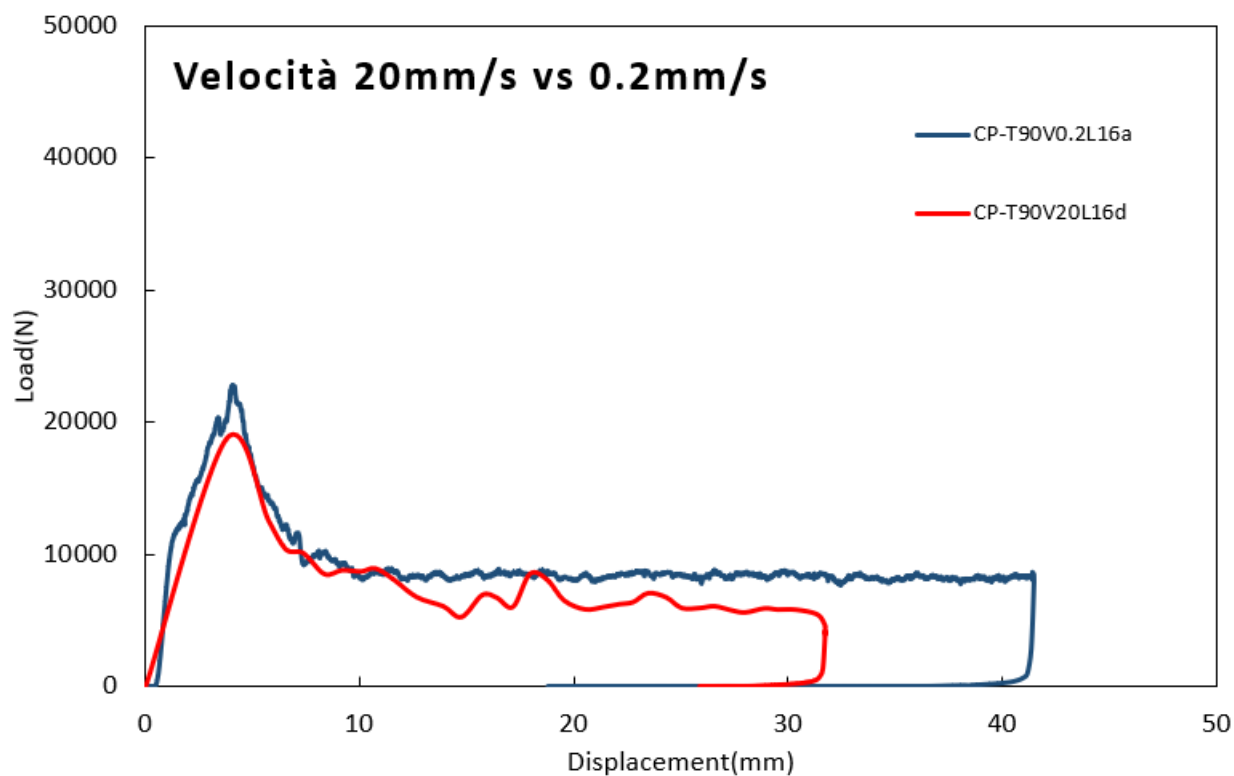


Figura 5.3.3c Confronto tra le prove ottenute a diversa velocità con sequenza CP

L'andamento tra le coppie prove non è troppo diverso, nel caso della prova lenta per sequenza PW ed HL, tuttavia, si raggiungono picchi più elevati mentre in quella veloce la prova ha un andamento più regolare con picchi positivi e negativi più smorzati. Il fatto che lo spostamento nel caso di prova dinamica sia più contenuto è normale, si va a ridurre lo spostamento per evitare problemi alla macchina viste le alte velocità in ballo.

Passando alla SEA come potete vedere dalle figure sottostanti le differenze vanno ad assottigliarsi ancora di più, nella **figura 5.3.4** vedete la SEA per velocità di 0.2mm/s, nella **5.3.5** vedete la SEA per velocità di 20mm/s e nella **5.3.6** il confronto tra le 2. Da questo grafico si deduce come la SEA sia praticamente indipendente dalla velocità delle prove.

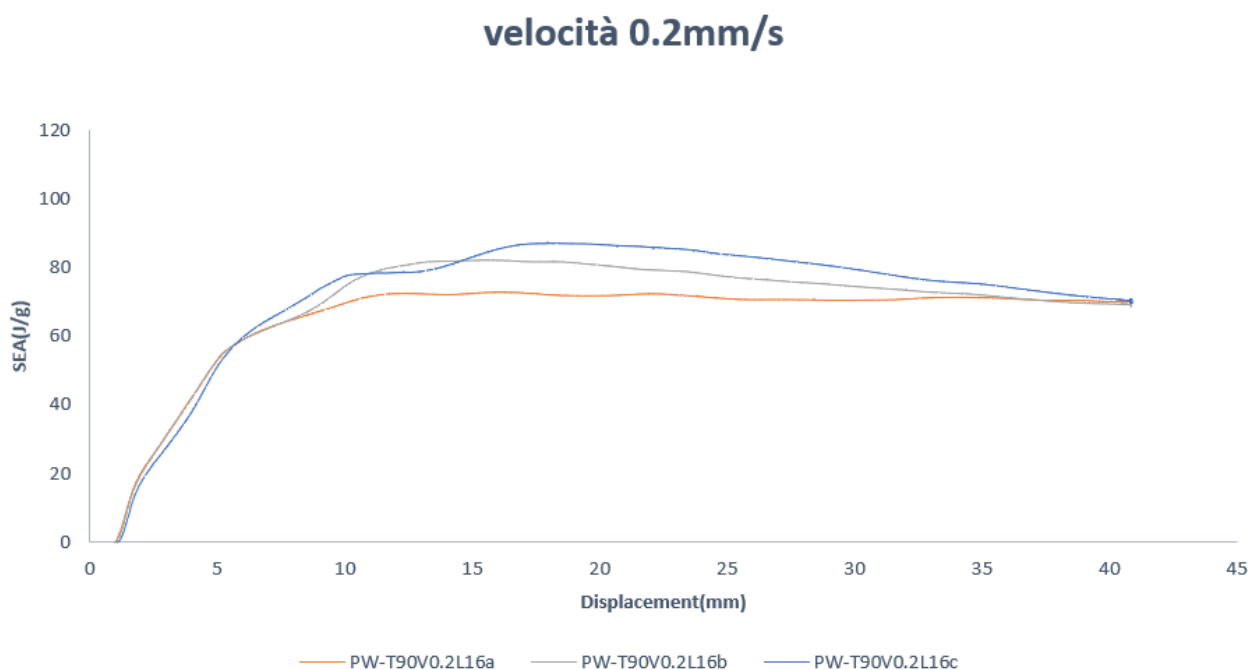


Figura 5.3.4 Confronto tra la SEA ottenuta nei 3 casi a 0.2mm/s

velocità 20mm/s

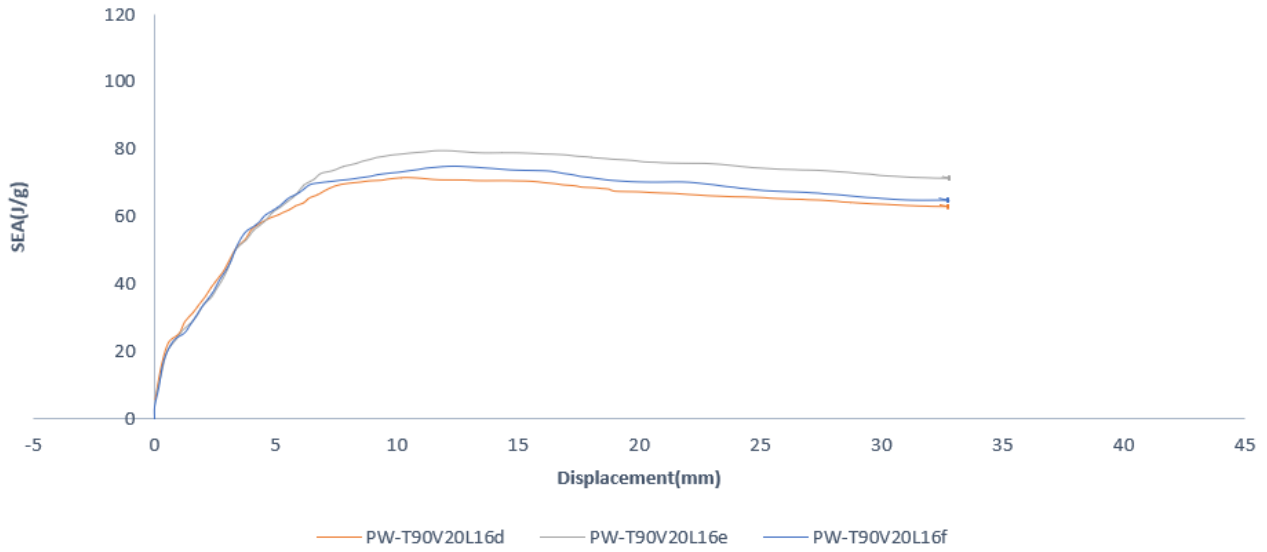


Figura 5.3.5 Confronto tra la SEA ottenuta nei 3 casi a 20mm/s

Velocità 20mm/s vs 0.2mm/s

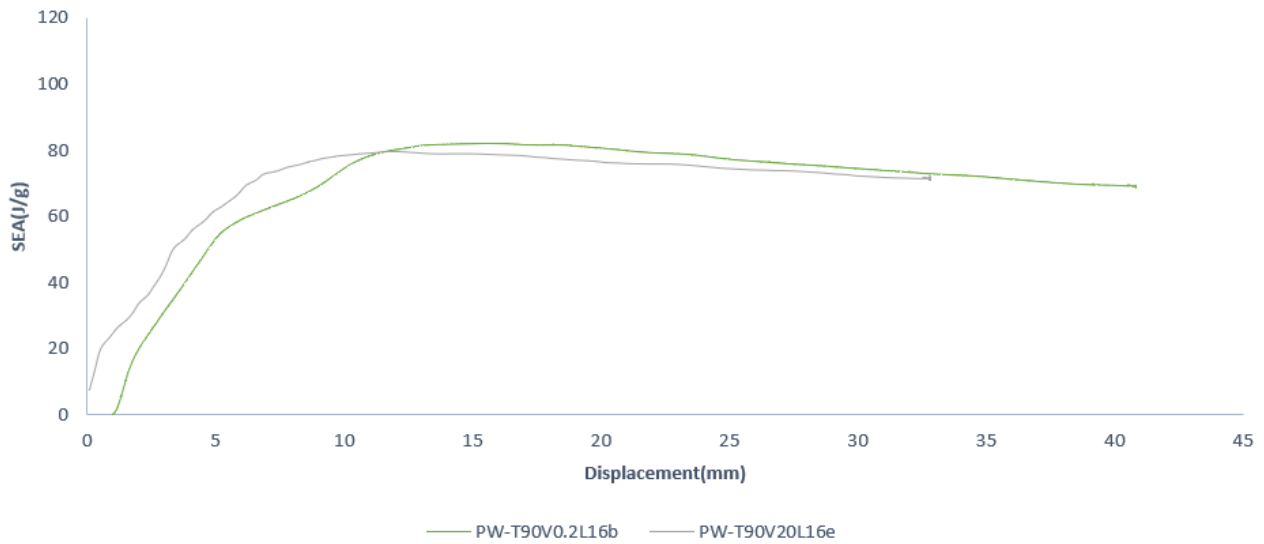


Figura 5.3.6 Confronto tra la SEA ottenuta nelle prove dinamiche e nelle prove quasi-statiche

5.4 Analisi degli effetti della variazione di altezza della luce della fixture

I confronti successivi sono stati svolti tra altezze di luce diverse, andando a vedere quanto una luce diversa dai 16mm di progetto (in questo caso 28mm) andasse ad influire sui risultati ottenibili.

Nelle figure 5.4.1a, 5.4.1b, 5.4.2a e 5.4.2b si può vedere l'andamento del carico in funzione dello spostamento durante una prova quasi statica (0.2mm/s) con luce rispettivamente di 16mm nelle prime 2 prove e 28mm nelle ultime 2 oltre a variare la luce si varia anche la sequenza di laminazione passando da CP ad HL, nelle figure 5.4.3a e 5.4.3b si può vedere l'andamento delle prove con le 2 luci a confronto, sempre variando le sequenze di laminazione.

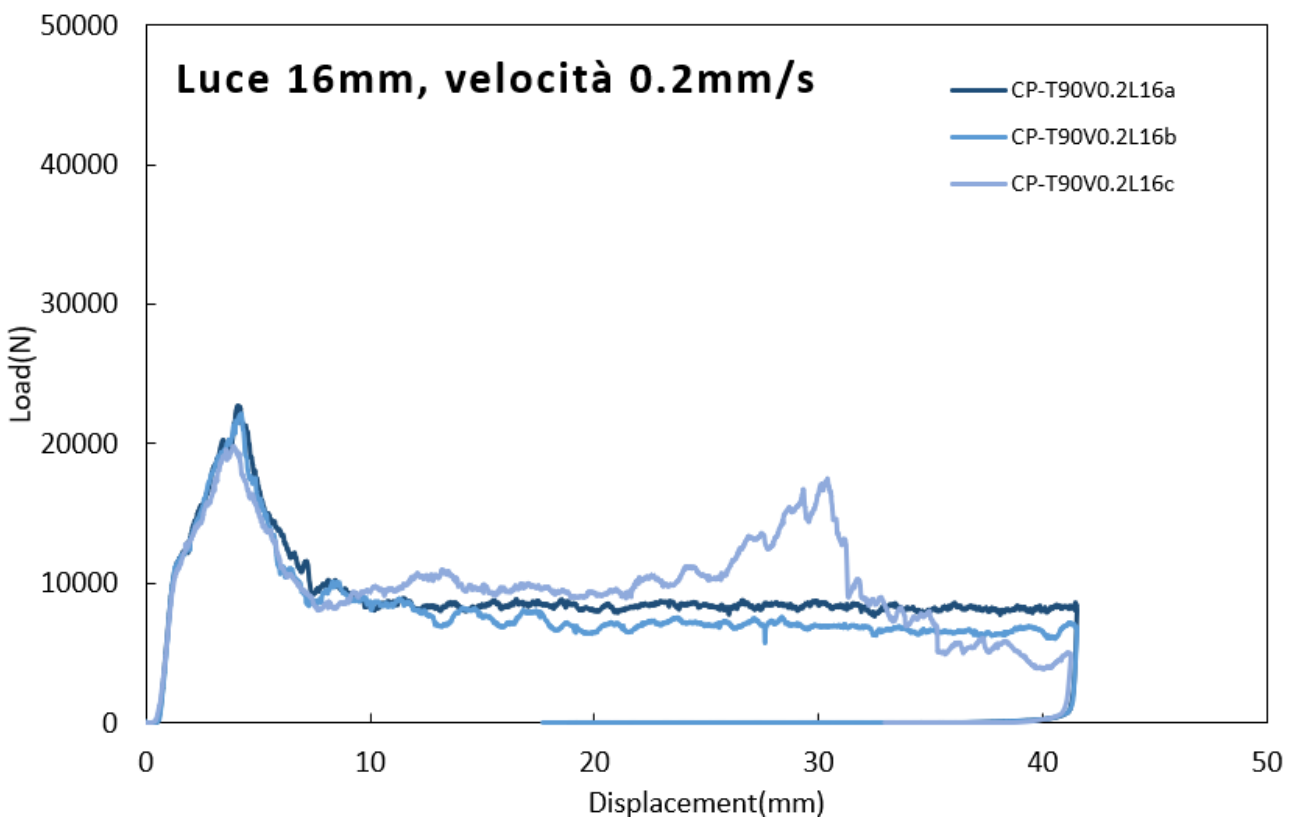


Figura 5.4.1a Andamento carico con luce di progetto, prova quasi statica e sequenza CP

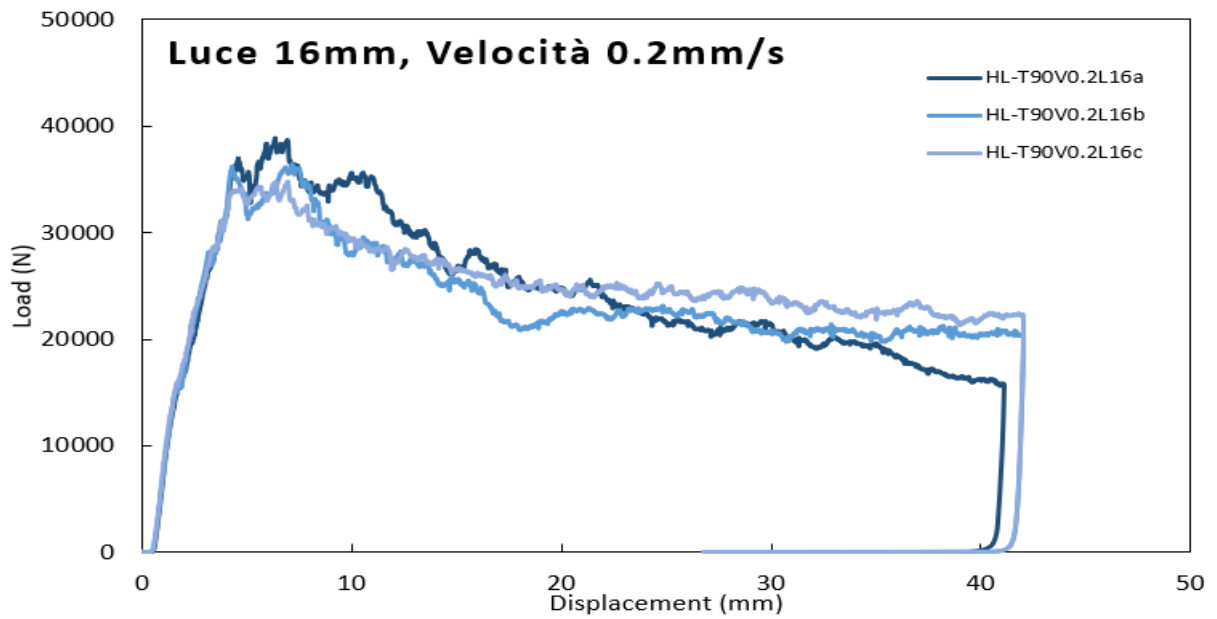


Figura 5.4.1b Andamento carico con luce di progetto, prova quasi statica e sequenza HL

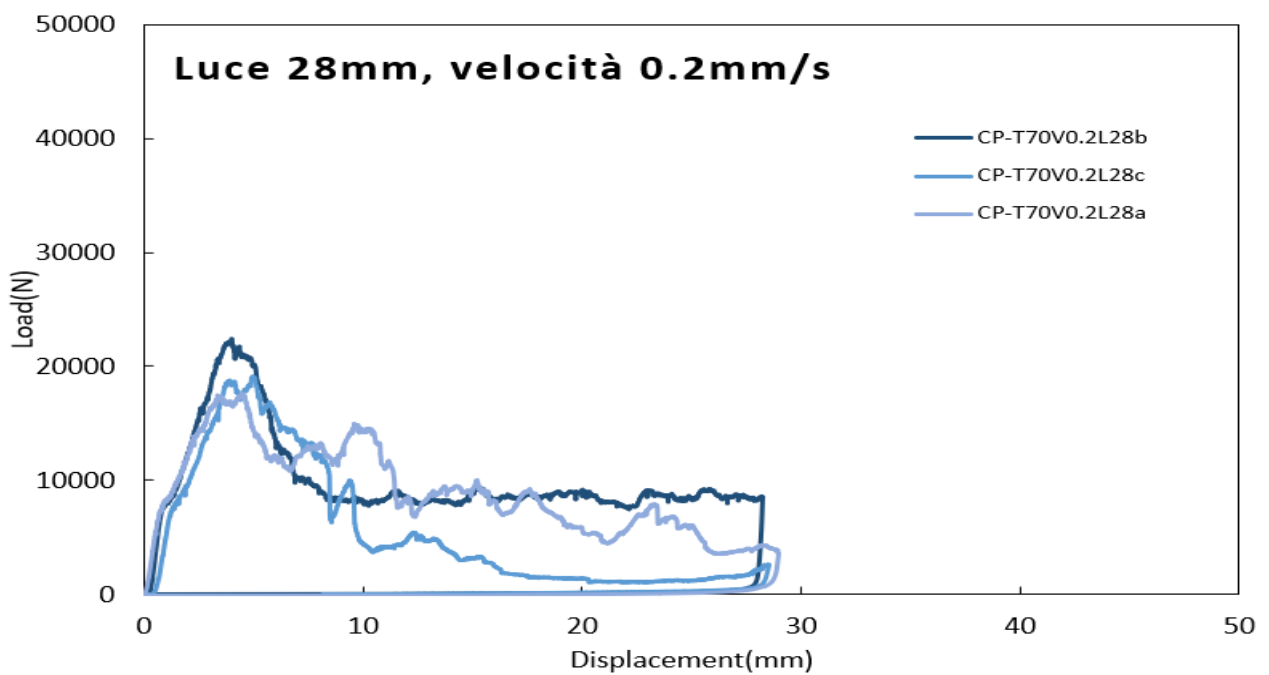


Figura 5.4.2a Andamento carico con luce maggiorata, prova quasi statica e sequenza CP

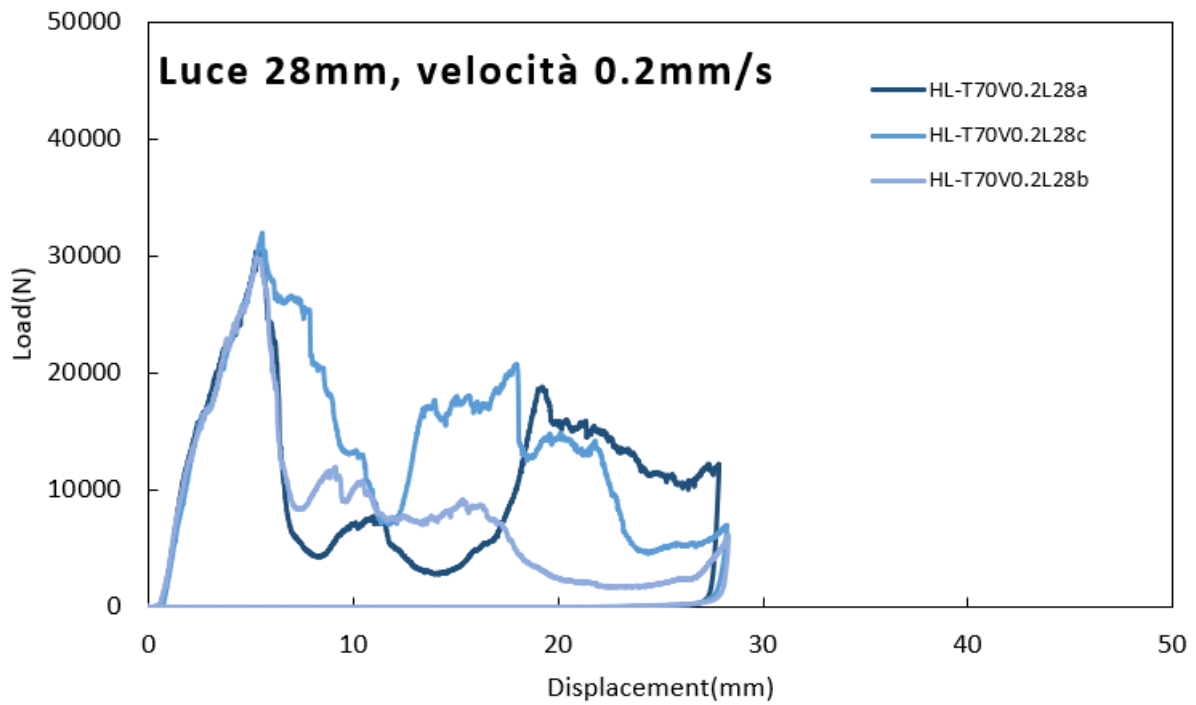


Figura 5.4.2b Andamento carico con luce maggiorata, prova quasi statica e sequenza HL

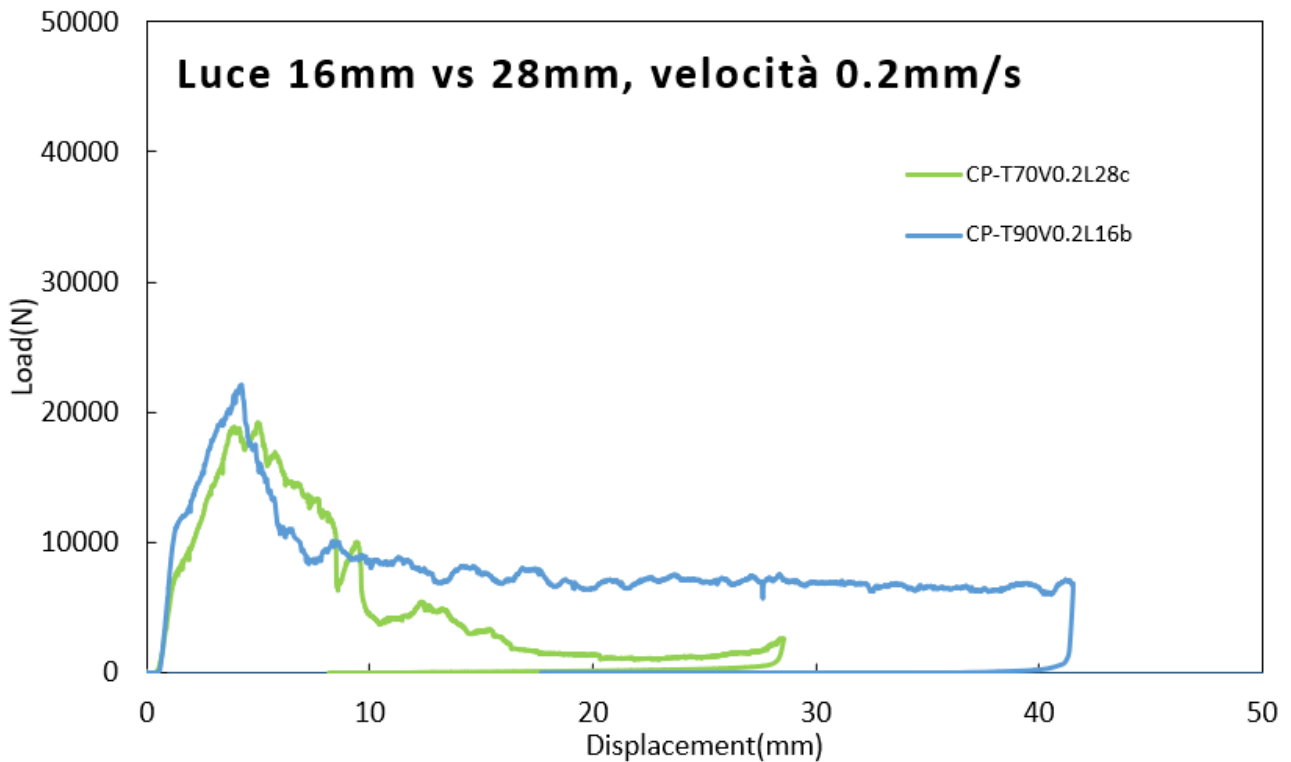


Figura 5.4.3a Confronto andamento carico tra luce di progetto e luce maggiorata, con sequenza CP

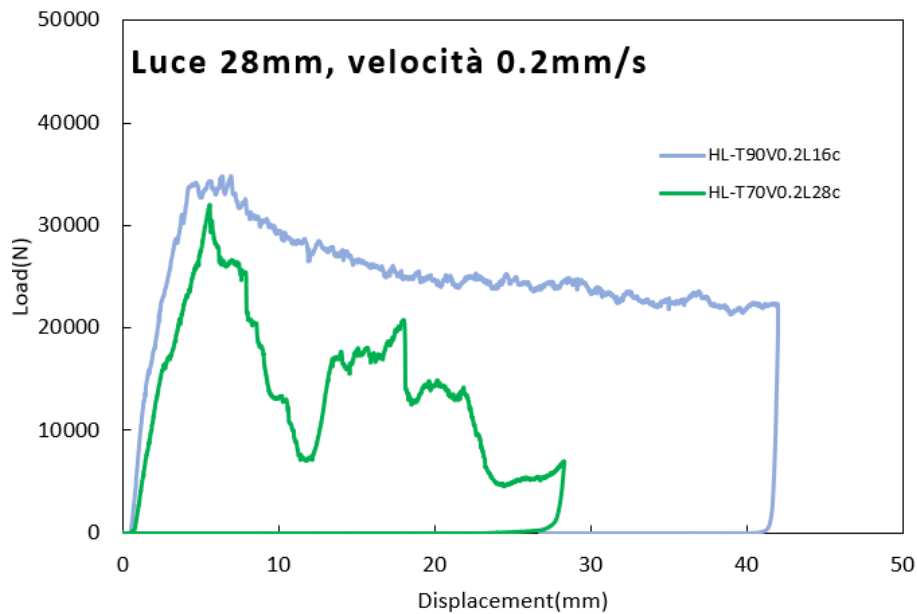


Figura 5.4.3b Confronto andamento carico tra luce di progetto e luce maggiorata, con sequenza HL

Come si vede in maniera piuttosto evidente dai grafici soprastanti all'aumentare della luce con prove quasi-statiche subentrano diversi fattori, di cui parleremo in seguito, che rendono le prove non conformi. In particolare, se con le sequenze di laminazione Cross Ply ancora si può trovare una certa similitudine tra i due andamenti con i provini HL decade anche questa vaga similitudine, come evidenziato dai grafici della SEA sottostanti. Nella **figura 5.3.4a** si vede il confronto tra la SEA della luce di progetto e quella della luce maggiorata con sequenza CP mentre nella **5.4.4b** si vedono gli stessi dati ma questa volta per una sequenza HL, come si può vedere si conferma quanto visto sopra con i provini CP che risultano meno sensibili alla variazione di luce rispetto agli HL.

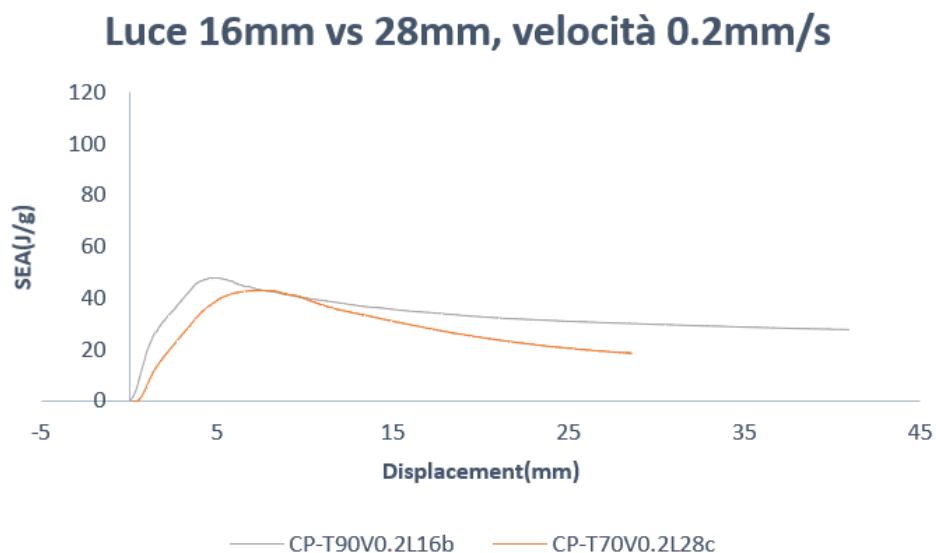


Figura 5.4.4a Confronto andamento SEA tra le 2 luci con sequenza CP, questa volta prendendo il caso più sfavorevole per la luce da 28mm. Si può comunque notare una certa similitudine tra i 2 andamenti.

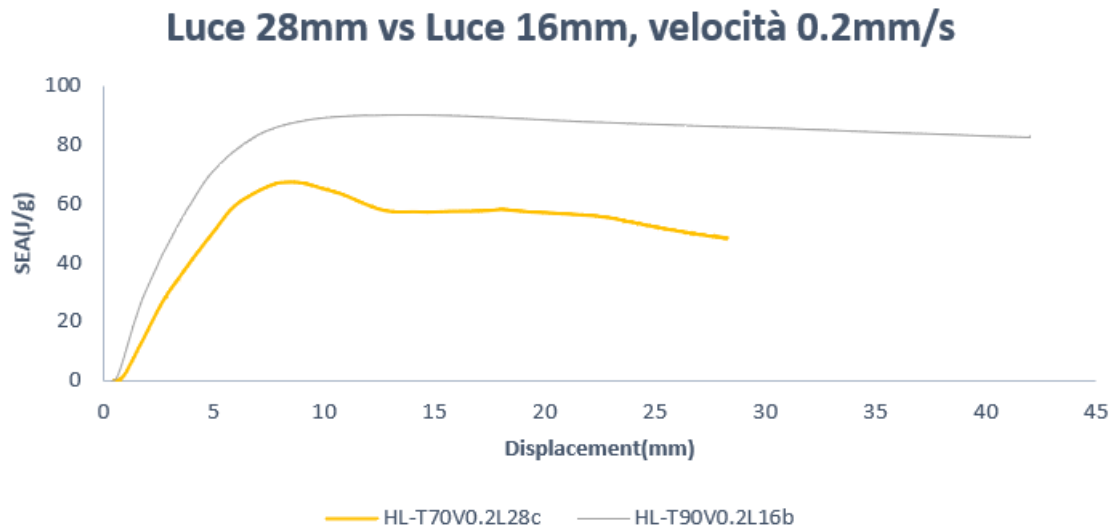


Figura 5.4.4b Confronto andamento SEA tra le 2 luci con sequenza HL, questa volta si sono cercati di graficare i due andamenti più “simili” tra loro, rimane comunque presente una netta differenza tra i due andamenti.

Successivamente si è proceduto a confrontare i risultati ottenuti variando l’altezza della luce, questa volta però con prove dinamiche, ottenendo dei risultati piuttosto interessanti.

Infatti, durante le prove dinamiche i provini sembrano risentire molto meno della variazione di luce, nelle figure sottostanti potete osservare dei confronti tra l’andamento del carico dei provini con sequenza CP e luce 16mm con dei provini con luce 28mm sempre con sequenza CP e luce 28mm.

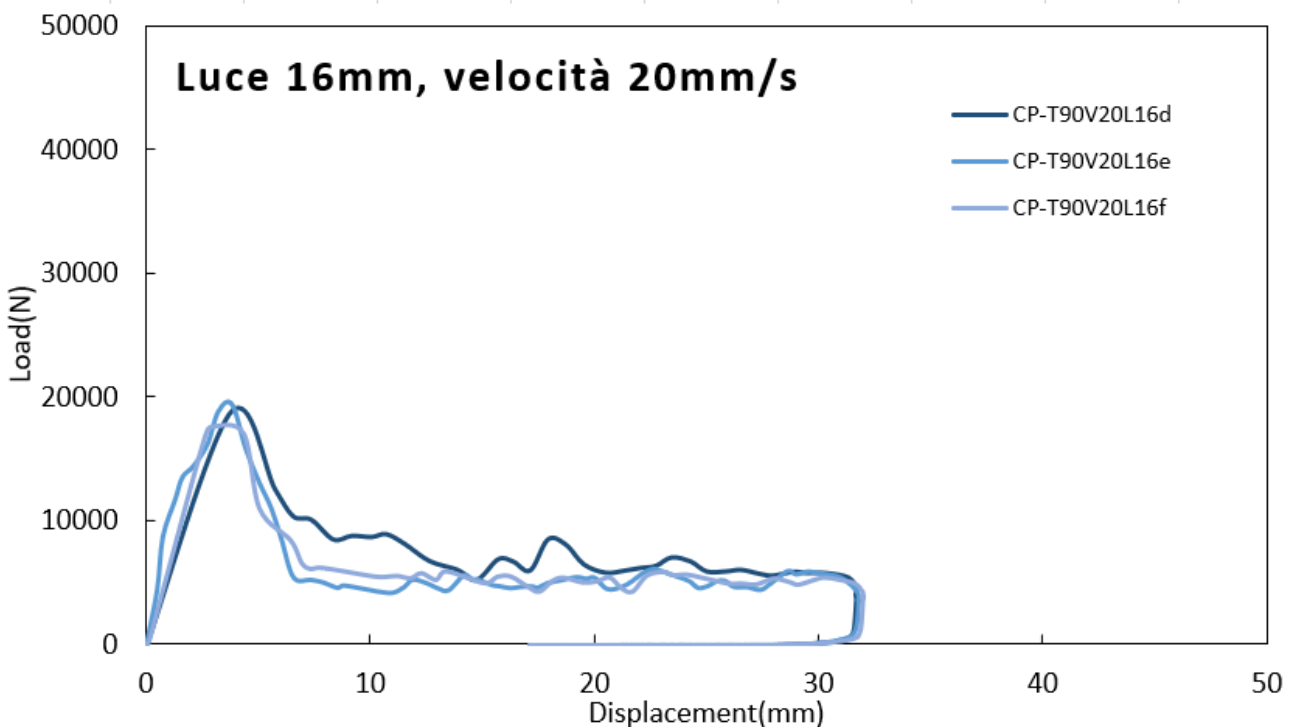


Figura 5.4.5a Andamento carico con luce di progetto, prova dinamica e sequenza CP

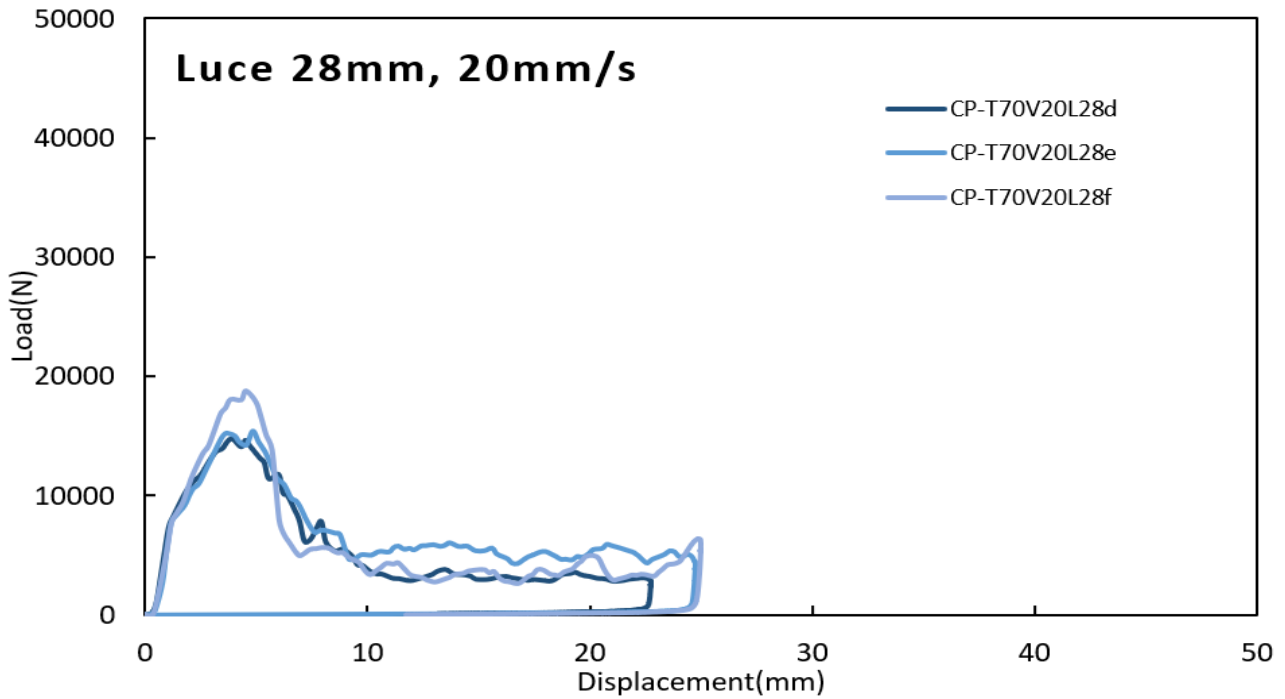


Figura 5.4.5b Andamento carico con luce di maggiorata, prova dinamica e sequenza CP

Si nota un andamento molto più simile tra le 2 prove, con anche la SEA dei grafici sottostanti che lo va a confermare. La prima parte della prova con trigger a 90° presenta un offset, esso non è dovuto a strani comportamenti del provino ma a problemi nel campionare la prova nei primi istanti.

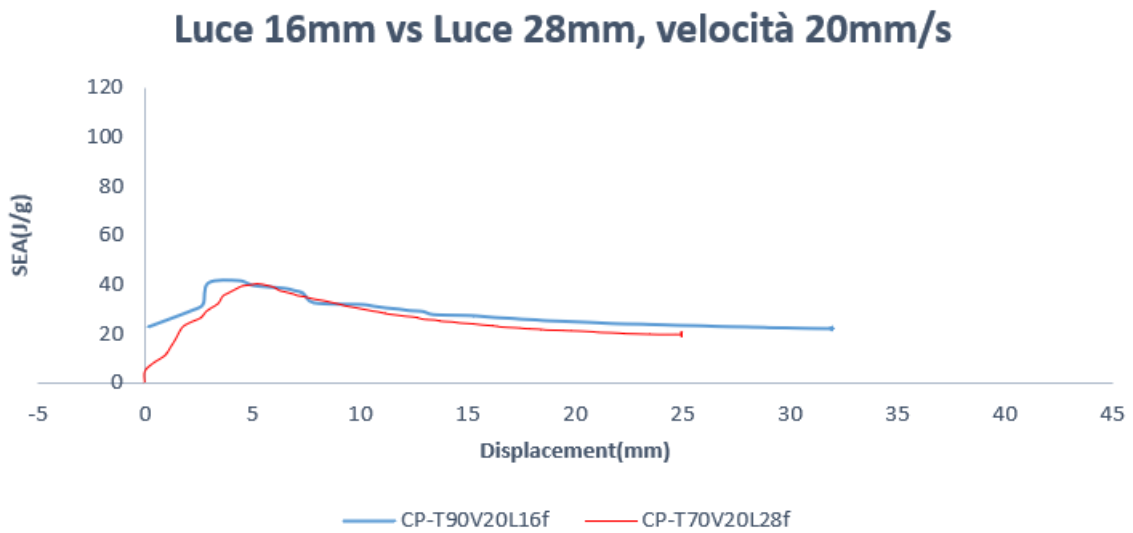


Figura 5.4.6 Andamento SEA con luce maggiorata e luce di progetto, prova dinamica e sequenza CP

5.5 ANALISI E CONFRONTI TRAMITE SEA MEDIA

Per confrontare in maniera più semplice e diretta i vari casi si è proceduti ad una semplificazione, si è trovata una SEA media per ogni prova, calcolata tra i 5mm e i 23mm; questi due dati sono stati scelti appositamente per andare a rendere trascurabile l'effetto del trigger nel caso dei 5mm, mentre per i 23mm si è scelto un valore di "fondo scala" che rendesse confrontabili tutte le prove, sia dinamiche che statiche. I risultati ottenuti si vedono in **figura 5.5.1**, rappresentati tramite istogramma.

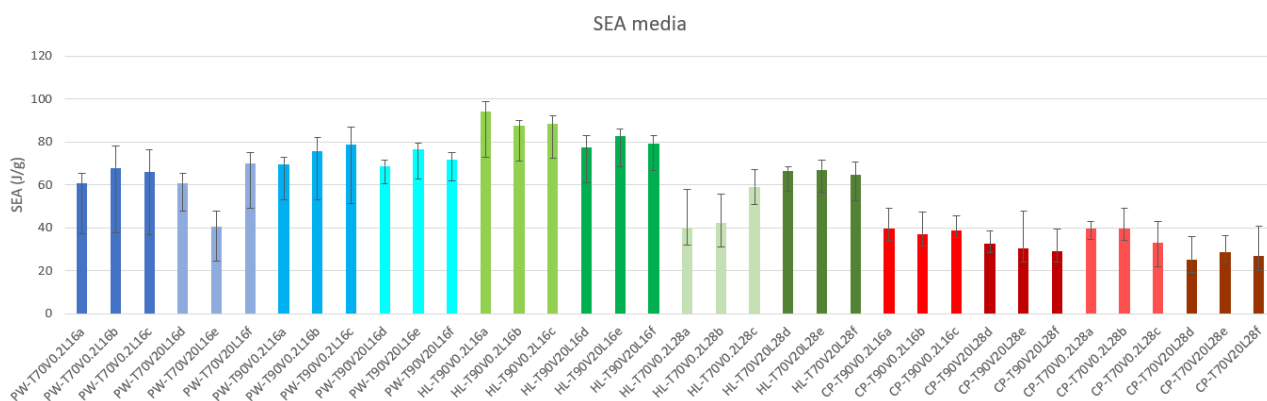


Figura 5.5.1a Istogramma che rappresenta la SEA media nelle varie prove.

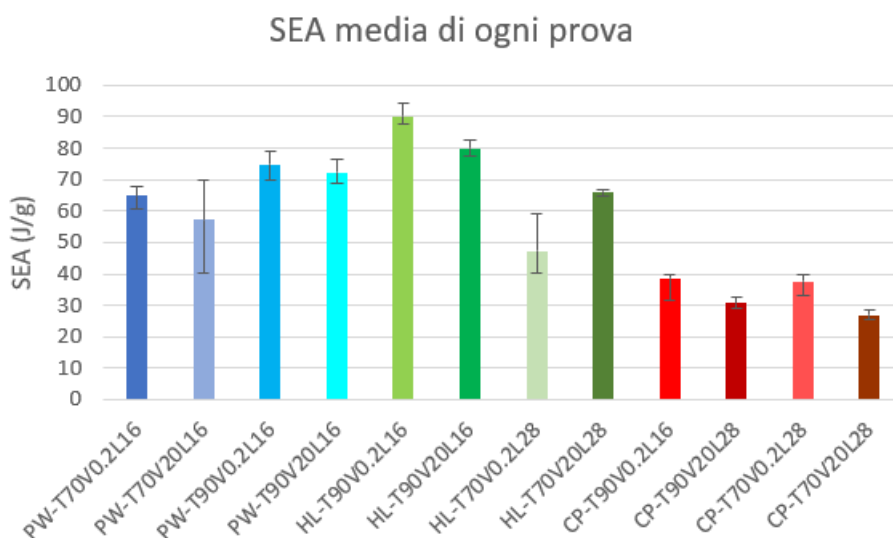


Figura 5.5.1a Istogramma che rappresenta la SEA media nelle varie configurazioni

Anche da questi grafici, al netto di qualche variazione dovuta più a fattori casuali, si nota come i fattori che vanno ad influenzare più la SEA siano la sequenza di laminazione e l'altezza della luce nelle prove quasi-statiche.

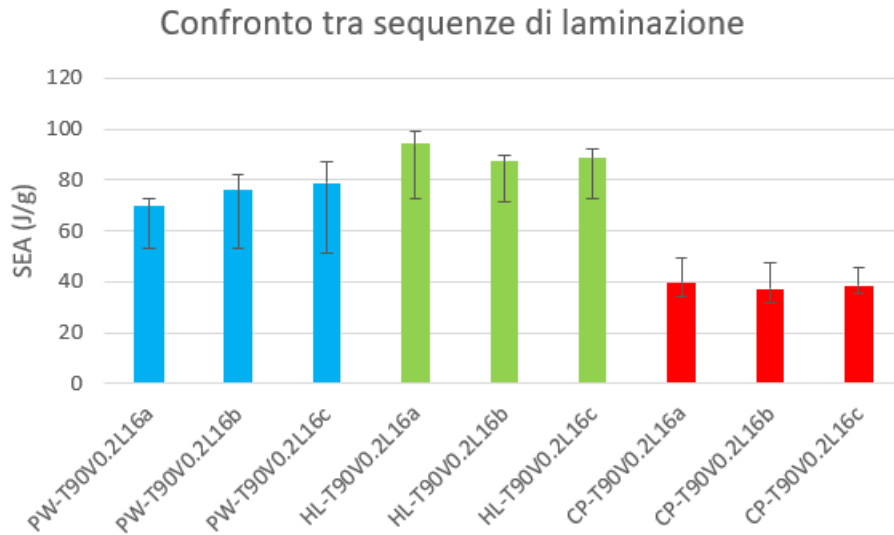


Figura 5.5.2 Confronto tra SEA media al variare della sequenza di laminazione, a pari trigger, velocità e luce

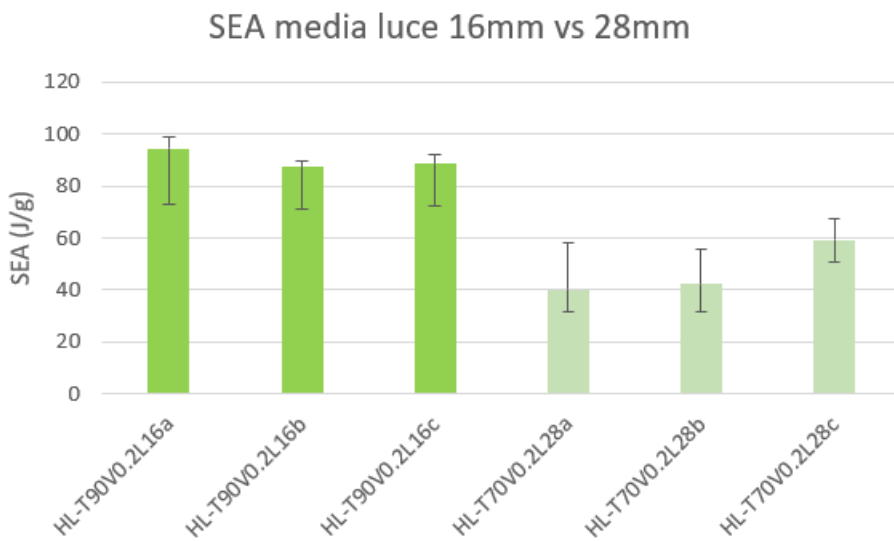


Figura 5.5.3 Confronto tra SEA media con luce pari a 16mm vs luce di 28mm

6. INSTABILITA' E NON CONFORMITA' DELLE PROVE

6.1 Casi con multipli picchi

Come risulta evidente dai dati e dai grafici precedenti la fixture presenta delle criticità nello svolgimento di determinate prove con dei risultati ottenuti non conformi alle aspettative, questa non conformità è dovuta all'instabilità a cui viene sottoposto il provino in determinate condizioni, nelle pagine seguenti andremo ad analizzare qualche specifico caso.

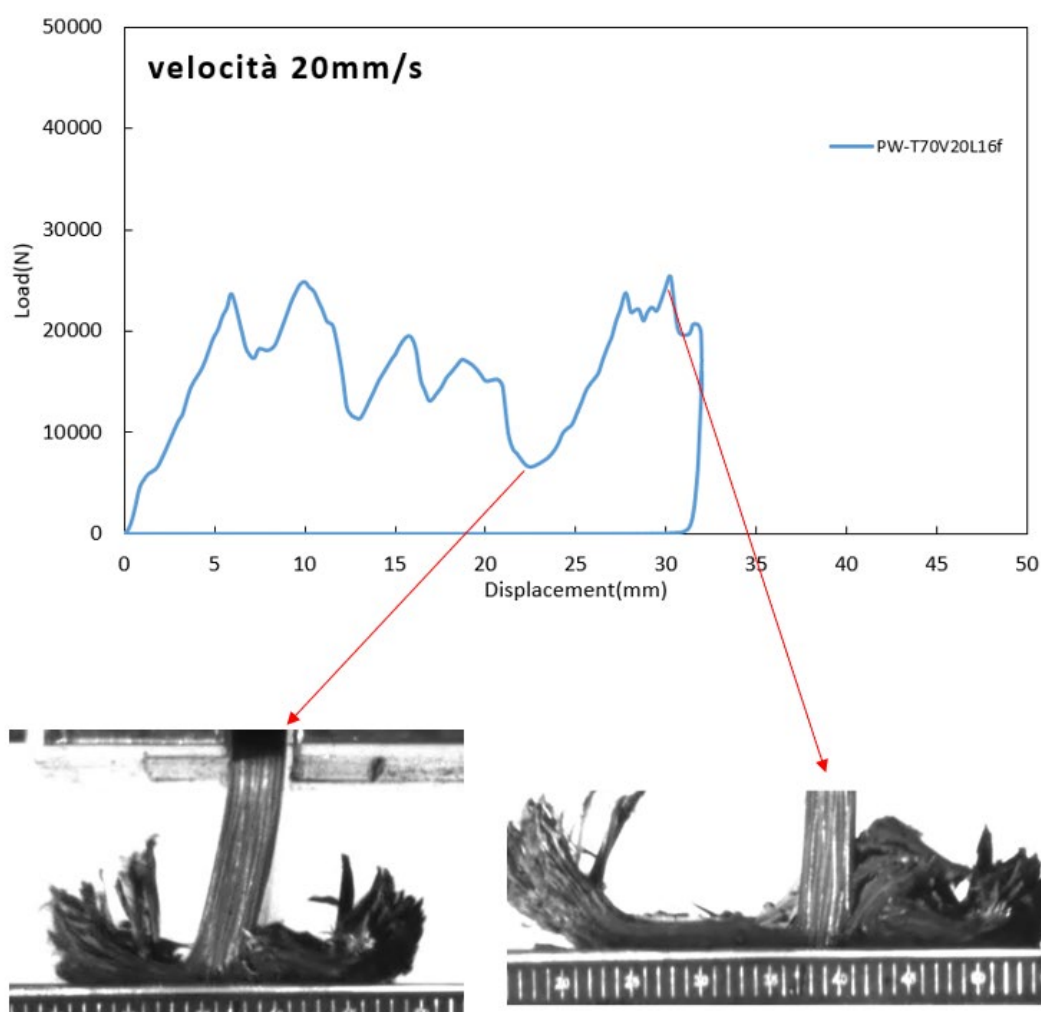


Figura 6.1.1 Dettaglio sull'instabilità del provino PW-T70V20L16f

Come si può notare dai due fotogrammi in **figura 6.1.1** il netto calo del carico in corrispondenza del minimo (spostamento circa 23mm) è dovuto ad una flessione piuttosto evidente del provino, aumentando ancora lo spostamento, tuttavia, il provino tende ad auto-centrarsi riportando il suo

asse perpendicolare al basamento con conseguente aumento del carico che il laminato riesce a reggere.

Questa tendenza alla flessione con conseguente carico con andamento non monotono è ancora più evidente nei casi con luce maggiorata (28mm) e prova quasi-statica (0.2mm/s), infatti nelle prove dinamiche questa tendenza del laminato è molto meno presente anche a causa del minore tempo da parte del provino per andarsi a inflettere.

Andiamo a vedere un esempio di una prova con un andamento che esemplifica bene questo concetto.

Nella **figura 6.1.2** troviamo 3 frame dal filmato del provino HL-T70V0.2L28c e il relativo andamento del carico.

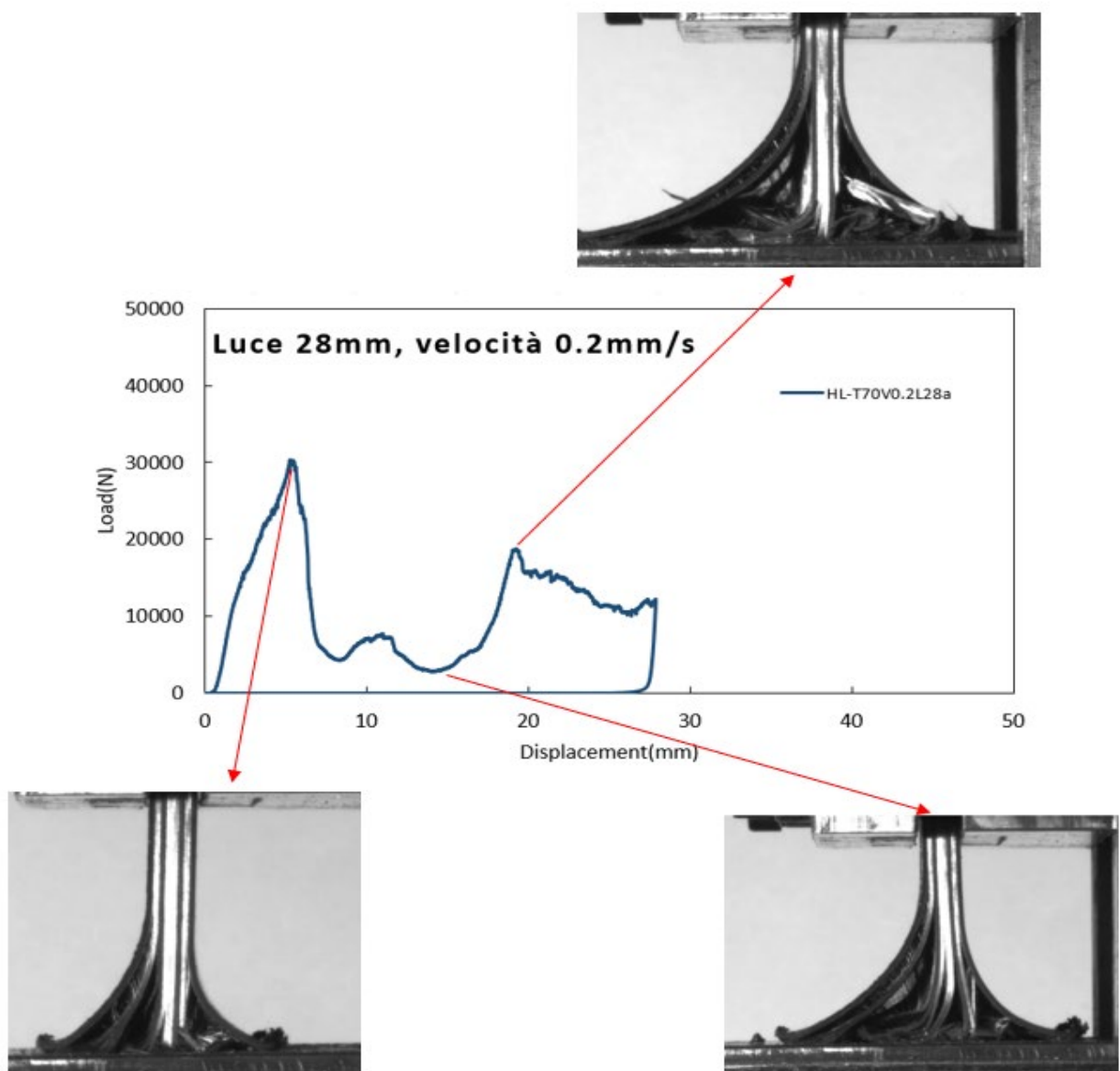


Figura 6.1.2 Provino HL-T70V0.2L28c e dettagli nei vari punti della prova

Come si evince dal terzo fotogramma l'aumento del carico che si ha nella fase tardiva della prova è dovuto ad una minor delaminazione delle pelli centrali, le pelli centrali formano un blocco unico che va poi ad opporre una maggior resistenza allo spostamento.

6.2 Casi non conformi "tradizionali"

Andando ad analizzare qualche caso non conforme si notano dei comportamenti interessanti analizzando il grafico del carico e spostamento (**figura 6.2.1**) e il relativo video, nei 3 fotogrammi riportati sotto del provino CP-T70V0.2L28c si nota un'instabilità che inizia con un'iniziale leggera inflessione verso sinistra (**figura 6.2.2**) che porta ad un carico distribuito sulle pelli non omogeneo, con conseguente delaminazione asimmetrica delle pelli (**figura 6.2.3**) che porta poi ad un netto sfaldamento del provino con conseguente carico che le ply riescono a reggere molto basso (**figura 6.2.4**).

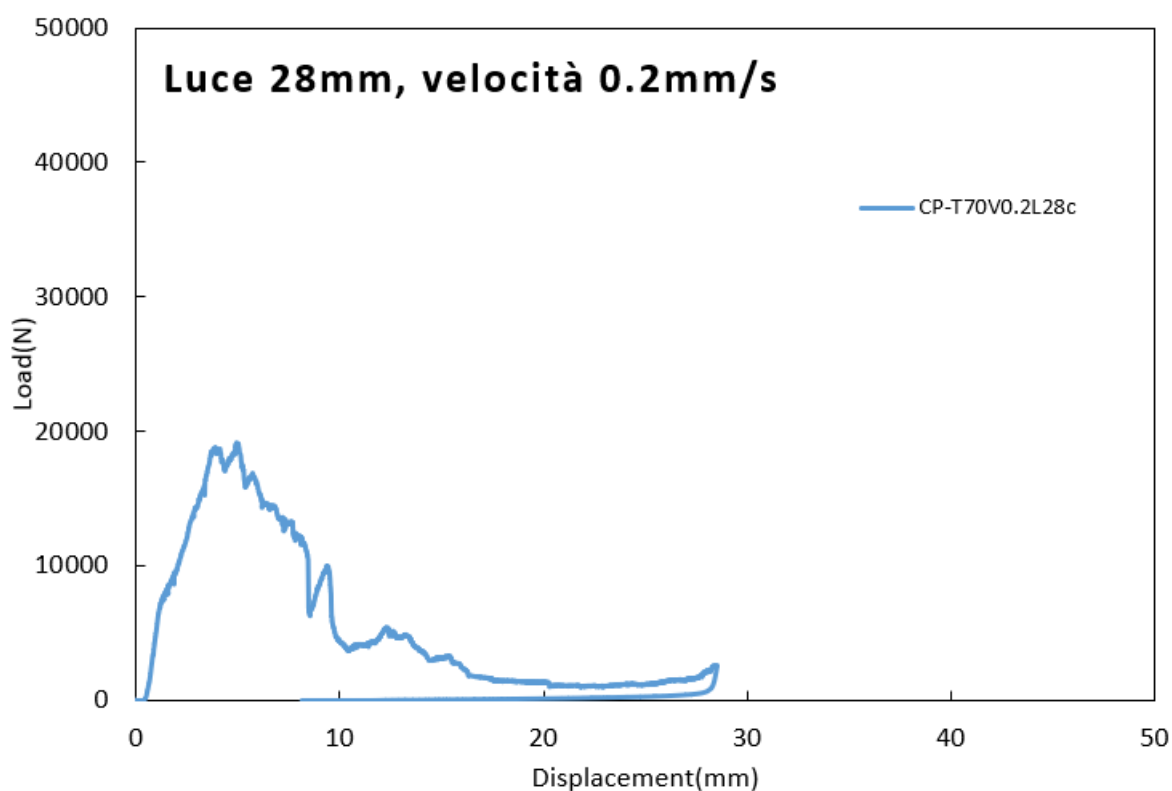


Figura 6.2.1 Grafico carico spostamento del provino CP-T70V0.2L28c

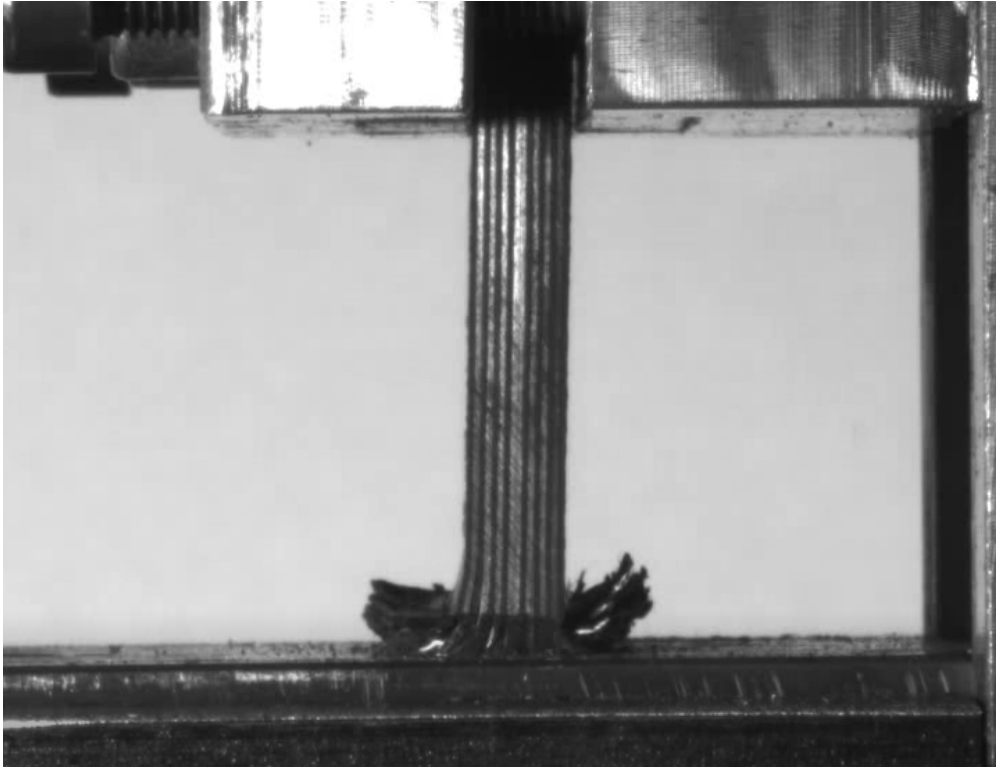


Figura 6.2.2 *Frame di inizio prova CP-T70V0.2L28c*

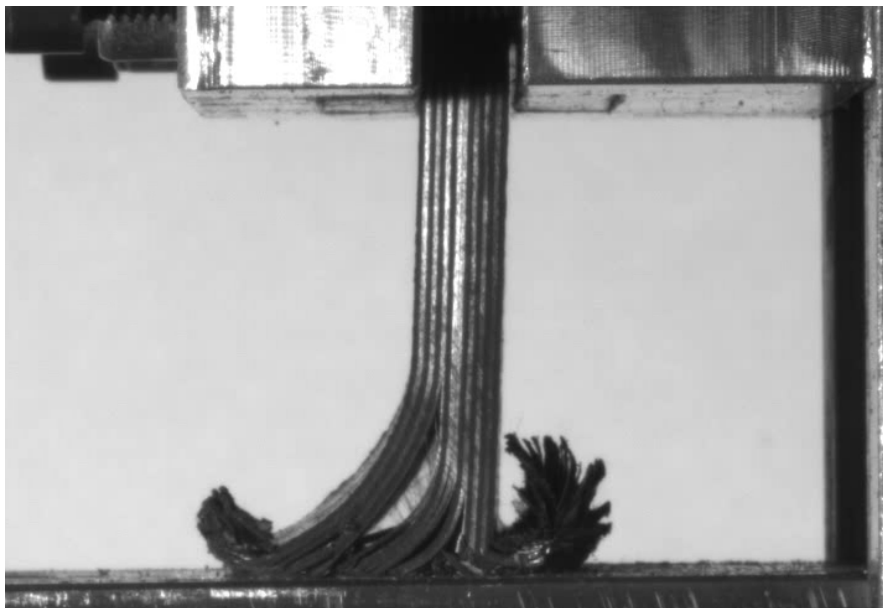


Figura 6.2.3 *Frame in cui si nota la delaminazione maggiore a sinistra con carico non uniforme tra le ply nel provino CP-T70V0.2L28c*

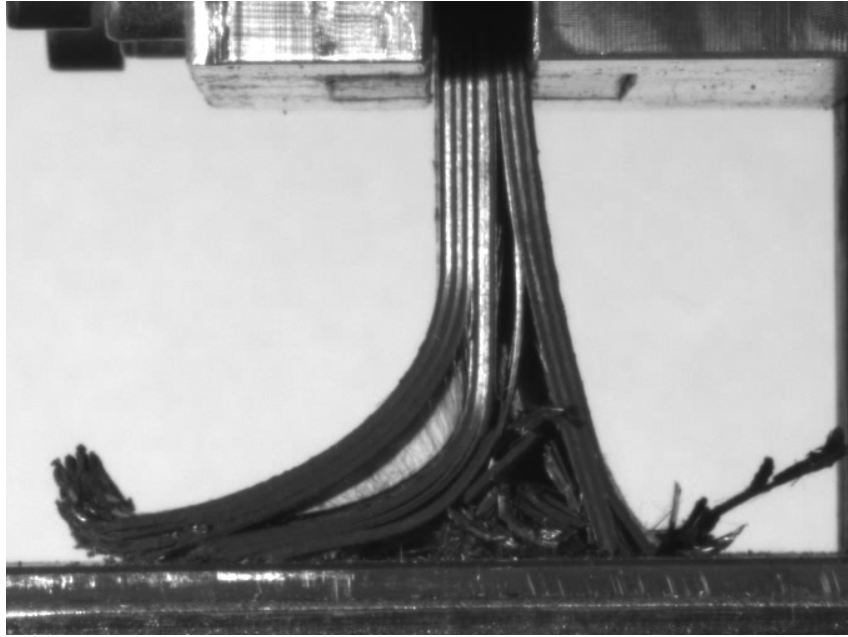


Figura 6.2.4 Frame che fa vedere come le pelli si siano sfaldate con conseguente calo drastico del carico supportato dal provino CP-T70V0.2L28c

Andando a vedere al microscopio cosa succede in queste zone si notano più fratture delle fibre, da entrambi i lati rispetto alla zona centrale di delaminazione (**figura 6.2.5**), facendo un confronto con una prova conforme, in particolare con la prova del provino CP-T90V0.2L16a, si nota una netta differenza: in quest'ultima (**figura 6.2.6**) infatti non sono presenti fratture ai lati della zona centrale di delaminazione del provino.

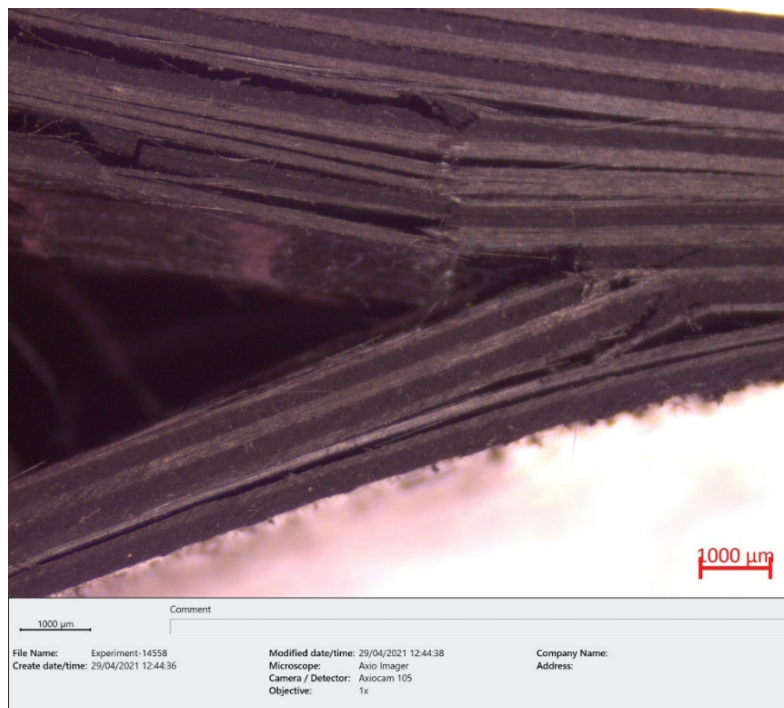


Figura 6.2.5 Immagine al microscopio delle fratture del provino CP-T70V0.2L28c



Figura 6.2.6 Immagine al microscopio del provino CP-T90V0.2L16a

Andando ad analizzare un provino con la sequenza di laminazione HL si nota un comportamento simile, in particolare in **figura 6.2.7** possiamo vedere un andamento del carico del provino HL-T70V0.2L28b paragonabile a quello del provino CP-T70V0.2L28c, seppur con un picco iniziale più elevato dovuto, come già ampiamente detto sopra, ad un carico maggiore sostenibile dai provini con sequenza hard laminated. Anche qui, come si vede dal frame in **figura 6.2.8** il provino tende ad inflettersi verso sinistra con le ply di sinistra che tendono a scorrere di più andandosi a delaminare (**figura 6.2.9**) e portandosi pian piano dietro tutte le altre ply con conseguente importante asimmetria che sfocia in uno sfaldamento del provino.

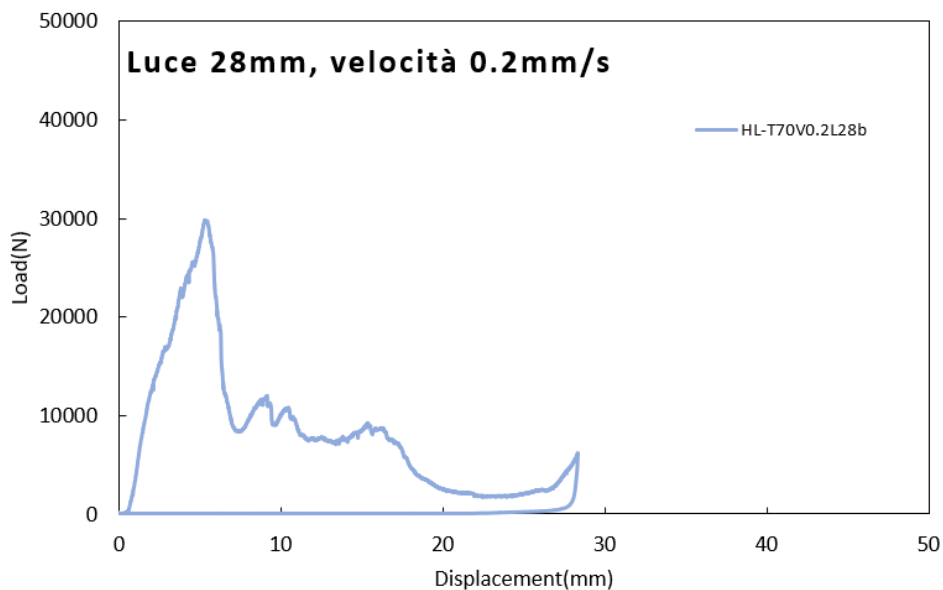


Figura 6.2.7 Grafico carico spostamento del provino HL-T70V0.2L28b

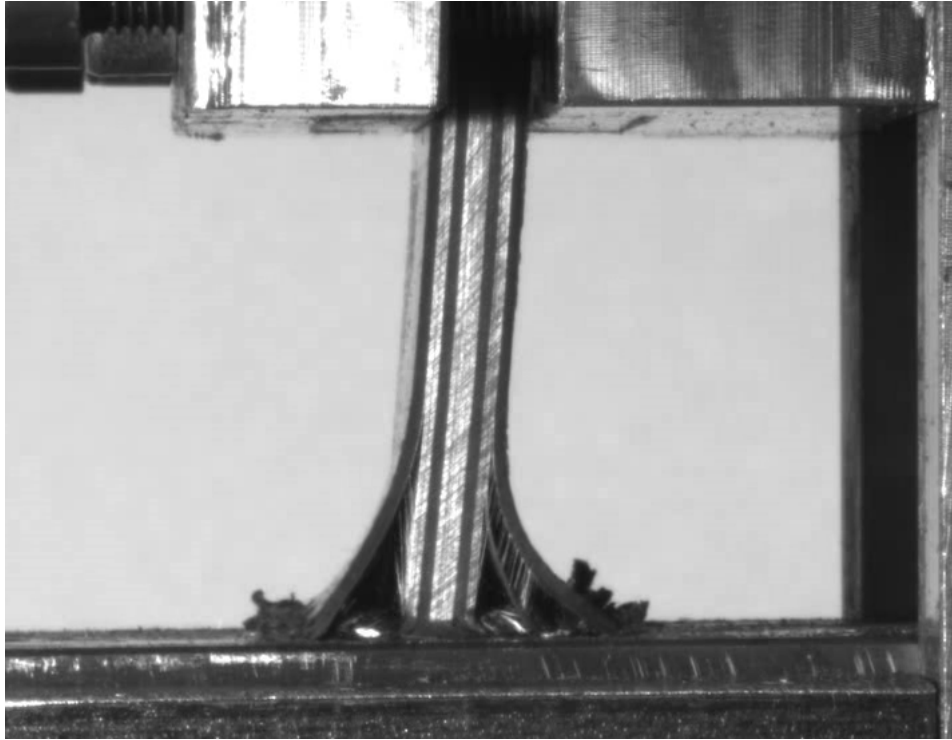


Figura 6.2.8 Frame in cui si nota una evidente inflessione verso sinistra del provino HL-T70V0.2L28b

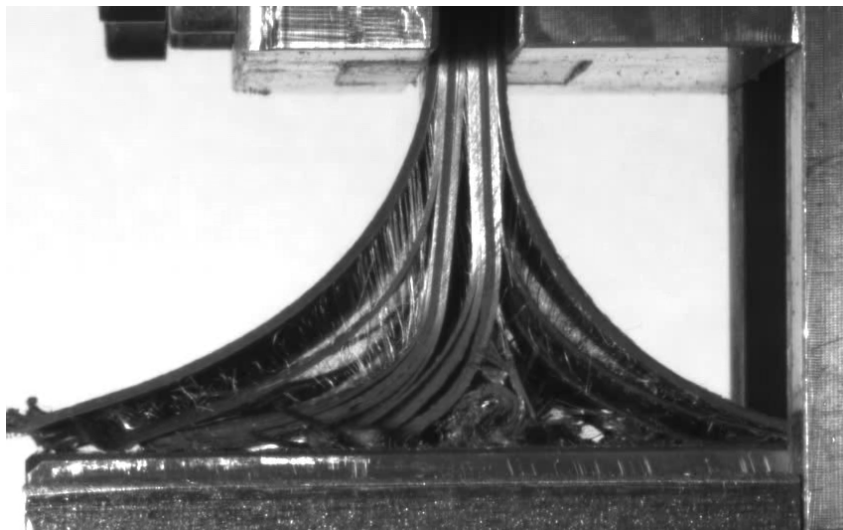


figura 6.2.9 Frame in cui si nota il completo sfaldamento del provino HL-T70V0.2L28b

Anche in questo provino si notano importanti sedi di frattura delle lamine, come si può notare dalla **figura 6.2.10**, queste fratture tra l'altro non sono simmetriche rispetto al numero di pelli, sono spostate più da una parte come era lecito aspettarsi visto lo sfaldamento delle ply.

Un altro aspetto che ci ha permesso di riconoscere le prove non conformi e le relative fratture è di tipo acustico, infatti nonostante il rumore della macchina e del laboratorio in generale durante l'esecuzione delle prove si riusciva ad udire in maniera piuttosto distinta un rumore di frattura delle lamine.

7. CONCLUSIONI

Obiettivo ultimo di questa tesi era la determinazione di parametri geometrici atti ad utilizzare correttamente la fixture ove con correttamente si intende l'ottenimento di prove ripetibili e comparabili, non soggette quindi ad instabilità e con risultati conformi.

Considerando questo fine si nota che le prove meno soggette a qualsiasi tipo di instabilità sono quelle dinamiche (20mm/s) soprattutto per gli unidirezionali, infatti esse danno risultati conformi e ripetibili con entrambe le sequenze di laminazione, ovvero con Hard Laminated HL e Cross Ply CP, con entrambe le luci (16mm di progetto e quella maggiorata di 28mm) e con tutte e due la tipologie di trigger (T70 e T90).

Diverso il discorso per i provini in tessuto, La fixture sembra non funzionare benissimo sui tessuti PW col trigger a 70° soprattutto nelle prove ad elevata velocità (15mm/s), le prove non sono troppo simili tra di loro (differenza sia nel grafico della SEA che del carico).

Un altro risultato interessante da notare è l'impatto della velocità della prova sulla SEA, nel caso di prove conformi, infatti, la SEA ha un andamento praticamente sovrapponibile tra prove quasi-statiche (0.2mm/s) e prove dinamiche (20mm/s).

Per quanto riguarda le differenze che si sono notate tra le varie prove, il cambiamento di geometria del trigger, ovvero la variazione dell'angolo di apertura, è risultato quasi sempre trascurabile, motivo per cui appurato ciò con i provini realizzati con sequenza PW siamo passati nei casi successivi ad analizzare gli altri effetti trascurando l'angolo di apertura del trigger.

I cambiamenti più impattanti sono stati la sequenza di laminazione del provino e l'altezza della luce a bassa velocità, nel primo caso si ottengono comunque risultati ripetibili e conformi a quelli della singola sequenza se le prove sono eseguite ad alta velocità o con altezza della luce equivalente a quella di progetto (16mm), per quanto riguarda invece le prove quasi-statiche (0.2mm/s) effettuate con una luce maggiorata (28mm) esse danno risultati non conformi con le lamine che si vanno a fratturare e i provini a delaminare in maniera asimmetrica portando ad un netto calo di carico che i provini riescono a sostenere.

Quindi, in conclusione le prove ad alta velocità realizzate sui provini unidirezionali (HL e CP) sono risultate conformi a prescindere dall'altezza del trigger e dalla sequenza di laminazione, quelle a bassa velocità sono risultate conformi con un'altezza della luce pari a quella di progetto e indipendenti dal trigger.

Per quanto riguarda il tessuto invece (PW), esso ha dimostrato di patire un po' le prove ad alta velocità ma nel complesso il comportamento risulta indipendente dal trigger, con una SEA con andamento piuttosto simile a prescindere che sia a bassa od alta velocità.

In generale quindi per pianificare e realizzare altre prove la condizione che porta a migliori risultati è una prova di tipo dinamico, quindi con elevata velocità (nel nostro caso 20mm/s), le prove ad alta velocità, infatti, sono quelle che risentono meno della variazione di luce e portano a risultati

paragonabili a quelle a bassa velocità. Di conseguenza, una volta scelto il layup da utilizzare conviene fare test ad alta velocità. Conviene utilizzare un trigger per concentrare le tensioni e ottenere un cedimento controllato ma anche questo non influenza più di tanto l'andamento della prova.

Per quanto riguarda studi e progetti futuri si potrebbe andare a determinare il range in cui le prove sono effettivamente conformi, ponendo dei limiti inferiori e superiori alle specifiche, ovvero, una volta notato che con la luce di progetto (16mm) la prova è conforme sia a bassa che ad alta velocità mentre col profilo maggiorato (28mm) subentra dell'instabilità sarebbe interessante trovare l'altezza tale per cui la prova è ancora stabile. Questo si potrebbe passando da un'analisi numerica/analitica, per sapere quale è l'instabilità del provino da un punto di vista strutturale, come ad esempio il criterio di buckling di Eulero, tuttavia calcolarlo correttamente su un materiale anisotropo non è facile e quindi forse risulterebbe più semplice, anche se più dispendioso da un punto di vista economico, fare delle prove variando l'altezza del basamento.

Un'altra conclusione importante che siamo riusciti a trarre è sulle prove ad alta velocità, esse infatti sono conformi in tutte le condizioni, anche se con qualche sbavatura in certe situazioni, sarebbe interessante andare a trovare un limite inferiore a questa velocità tale per cui le prove siano sempre ripetibili, quindi magari si potrebbe pensare di calare la velocità delle prove dinamiche oppure alzare quella delle prove quasi-statiche, oppure variare tutte e due fino a giungere a convergenza.