

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II
DIPARTIMENTO INGEGNERIA DEI MATERIALI E DELLA PRODUZIONE



DOTTORATO DI RICERCA IN INGEGNERIA
DEI MATERIALI E DELLA PRODUZIONE

indirizzo in
Tecnologie e Sistemi di Produzione

XX ciclo

TESI DI DOTTORATO

**COMPORTAMENTO ALL'IMPATTO
DEI MATERIALI COMPOSITI**

**COORDINATORE
PROF. CH.MO
ING. GIUSEPPE GIORLEO**

**DOTTORANDO
ING. ARTURO BUSCO**

**TUTOR
CH.MO. PROF. ING.
GIANCARLO CAPRINO**

ANNO ACCADEMICO 2006-2007

Indice

RINGRAZIAMENTI.....	1
PRESENTAZIONE DEL PROGETTO.....	2
PARTE PRIMA.....	5
CAPITOLO I - RICERCA BIBLIOGRAFICA	5
1.1 INTRODUZIONE.....	5
1.2 DANNI DA IMPATTO A BASSA VELOCITÀ	6
1.3 UNA TIPICA CURVA DI IMPATTO	8
1.4 PRIMA ROTTURA NEL LAMINATO	11
1.4.1 Influenza del diametro dell'impattatore.....	12
1.4.2 Influenza dello spessore	15
1.5 SVILUPPO DELLE DELAMINAZIONI	19
1.6 RIDUZIONE DELLA RESISTENZA A TRAZIONE CAUSATA DA IMPATTO A BASSA VELOCITÀ	24
1.7 INDENTAZIONE	27
1.8 CONCLUSIONI	32
PARTE SECONDA	34
COMPORAMENTO ALL'IMPATTO DI UNA CARBORESINA NCF.....	34
CAPITOLO II – MATERIALI E METODI DI PROVA	34
2.1 GENERALITÀ	34
2.2 MATERIALE TESTATO	34
2.3 PROVE D'IMPATTO CON CARICO DINAMICO	42
2.3.1 La norma.....	42
2.3.2 La macchina di prova	44
2.3.3 Prove di impatto effettuate	47
2.4 MISURA DELL'INDENTAZIONE	48
2.4.1 Apparecchiatura di prova	48
2.4.2 Prove di indentazione	49
CAPITOLO III	51
PROVE SPERIMENTALI- ANALISI DEI RISULTATI.....	51
3.1 INTRODUZIONE.....	51
3.2 PROVE DI IMPATTO DINAMICO	52

3.2.1 Materiale testato	52
3.3 PROVE DI PENETRAZIONE	54
3.3.1 Analisi delle curve di carico F-s.....	54
3.3.2 Analisi della curva Energia-spostamento (U-s).....	58
3.4 PROVE AD ENERGIA CRESCENTE.....	61
3.4.1 Introduzione	61
3.4.2 Prove effettuate	64
3.5 INDENTAZIONE	73
3.6 ANALISI DEI RISULTATI.....	80
3.6.1 Andamento dell'energia di penetrazione in funzione del prodotto $t \times V_f \times D_p$	80
3.6.2 Indentazione in funzione dell'energia di impatto e del rapporto adimensionale energia di impatto/ energia di penetrazione	83
3.6.3 Modelli di previsione dell'indentazione ad una e due variabili.....	89
3.6.4 Influenza del diametro del percussore	95
3.6.5 Area delaminata in funzione dell'energia di impatto.....	99
3.6.6 Area delaminata in funzione della forza massima	102
3.6.7 Area delaminata in funzione dell'indentazione	105
CAPITOLO IV	108
ANALISI MICROSCOPICA	108
4.1 INTRODUZIONE.....	108
4.2 TECNICHE DI ISPEZIONE	109
4.2.1 Indagine ultrasonica	109
4.2.2 Microscopia.....	114
4.3 CORRELAZIONI ULTRASUONI-MICROSCOPIA	118
4.3.1 Analisi ultrasonica e microscopica su laminati biassiali serie H	118
4.3.2 Analisi ultrasonica microscopica su laminati quadriassiali serie H	141
PARTE TERZA.....	158
COMPORAMENTO ALL'IMPATTO DELLA VETRORESINA	158
CAPITOLO V – MATERIALI E METODI DI PROVA	158
5.1 GENERALITÀ	158
5.2 CARATTERISTICHE DEL MATERIALE	158
5.3 METODOLOGIA DI FABBRICAZIONE DEL PREPREG.....	163
5.4 FABBRICAZIONE DEI PROVINI.....	164

5.4.1 Taglio del prepreg	164
5.4.2 Sovrapposizione delle lamine	165
5.4.3 Pressatura e polimerizzazione	166
5.4.4 Taglio dei laminati	170
5.5 PROVE D'IMPATTO CON CARICO DINAMICO	171
5.5.1 La macchina di impatto.....	171
5.5.2 Tipo di prove effettuate	172
CAPITOLO VI	174
PROVE SPERIMENTALI – ANALISI DEI RISULTATI	174
6.1 INTRODUZIONE.....	174
6.2 PROVE AD ENERGIA VARIABILE CON METODO DINAMICO.....	175
6.3 INFLUENZA DELLO SPESSORE DEL PROVINO E DEL DIAMETRO DEL PENETRATORE SULL'ANDAMENTO DELLE CURVE (F-S)E (U-S)	176
6.3.1 Generalità.....	176
6.3.2 Curve di carico (F – s)	177
6.3.3 Curve Energia – spostamento (U- s).....	179
6.4 INFLUENZA DELLO SPESSORE DEL PROVINO E DEL DIAMETRO DEL PERCUSSORE SUI PARAMETRI CARATTERISTICI	180
6.4.1 Curva forza elastica-spessore (Fe - t)	180
6.4.2 Curva Energia elastica-spessore (Ue - t)	182
6.4.3 Curva Forza di prima rottura delle fibre - spessore (FFFF - s)	183
6.4.4 Curva Energia corrispondente alla FFF - spessore (UFFF - t)	184
6.4.5 Curva forza massima - spessore (Fmax - t).....	185
6.4.6 Energia massima - spessore (Umax - t)	187
6.4.7 Curva energia di perforazione – spessore (Uperf - t)	187
6.4.8 Curva energia di penetrazione - spessore (Up- t).....	189
6.4.9 Differenza Energia di penetrazione - Energia di prima rottura in funzione dello spessore.....	189
6.4.10 Sovrapposizione curve (F- s) e (U- s) per laminati di diverso spessore	190
6.5 INFLUENZA DEL DIAMETRO DELL'IMPATTATORE (D _p) NELLA DETERMINAZIONE DEI VALORI CARATTERISTICI.....	195
6.5.1 Curve di carico (F - s).....	195
6.5.2 Curve Energia – Spostamento (U –s).....	196
6.5.3 Sovrapposizione curve (F-s) ed (U-s) ottenute per i due D _p esaminati	197
6.6 PROVE AD ENERGIA CRESCENTE – VALUTAZIONE INDENTAZIONE	199
6.6.1 Introduzione	199

6.6.2 Prove effettuate	203
6.6.3 Misure d' indentazione.....	203
6.6.4 Analisi dei risultati	204
6.6.5 Confronto tra i due metodi.....	213
6.6.6 Confronto tra la vetroresina e la carboresina	214
6.6.7 Legame tra l'indentazione ed il diametro del penetratore	216
CAPITOLO VII.....	219
NASCITA E PROPAGAZIONE DEL DANNO DA IMPATTO.....	219
7.1 INTRODUZIONE.....	219
7.2 DANNI DA IMPATTO A BASSA VELOCITÀ	219
7.3 SVILUPPO DELLE DELAMINAZIONI	221
7.4 CARATTERIZZAZIONE DELLA DIMENSIONE IN PIANO DELL' IMPRONTA	222
7.5 CARATTERIZZAZIONE DELL' AREA DELAMINATA	226
7.6 SVILUPPO DEL DANNO ALL'INTERNO DEL PROVINO.....	228
7.6.1 Organizzazione dei dati ed estrapolazione dei risultati.....	231
7.6.2 Area delaminata.....	232
7.6.3 Lunghezza fibre rotte	235
7.6.4 Sovrapposizione della curva F-E con Area tot -E	238
CONCLUSIONI	240
BIBLIOGRAFIA	244

Ringraziamenti

Mi sembra doveroso, alla fine di un percorso durato tre anni, ringraziare tutte le persone che mi sono state vicine e che mi hanno permesso di giungere a questo traguardo.

Questi tre anni passati all'interno del Dimp mi hanno permesso di stringere rapporti con Professori, Ricercatori e colleghi che si sono succeduti nel tempo. Sarebbe ingiusto ringraziare qualcuno in particolare perché con TUTTI ho instaurato rapporti di amicizia, stima e fiducia.

Per questo motivo mi limiterò a fare un ringraziamento particolare solo al Prof. Langella e al Prof. Caprino, entrambi miei relatori di tesi di laurea (il Prof. Caprino anche relatore in questo lavoro di tesi). Tutto quello che ho imparato lo devo a loro, si sono mostrati sempre disponibili e comprensivi e mi hanno aiutato a risolvere dubbi teorici e pratici nati nel tempo.

Mi sono stati accanto in momenti difficili della mia vita ma hanno anche gioito con me per momenti felici. Per tutto questo non smetterò mai di ringraziarli.

Dal punto di vista morale mi sento di dover ringraziare Maddalena, oggi mia moglie, che mi è stata sempre vicina e mi ha aiutato a superare i momenti di tensione. Un grazie lo devo a anche alla mia famiglia che mi ha sostenuto e mi ha sempre spronato a percorrere la mia strada.

Chiudo ringraziando mio Padre, a cui dedico questo lavoro di tesi e a cui devo TUTTO; il giorno della mia laurea era al settimo cielo oggi sarebbe stato felicissimo di vivere questo importante traguardo con me.

Anche se non mi potrà essere vicino fisicamente sono convinto che mi sarà accanto con il cuore.

Grazie Papà

PRESENTAZIONE DEL PROGETTO

L'impiego dei materiali compositi nel campo delle applicazioni strutturali comporta notevoli vantaggi rispetto a quello dei materiali tradizionali. Tali vantaggi sono correlati in particolare alla possibilità di una progettazione contemporanea non solo dell'elemento, ma anche del materiale con cui realizzarlo, consentendo la fabbricazione di componenti con proprietà ottimizzate rispetto alla distribuzione spaziale degli sforzi.

In campo aeronautico, per la realizzazione di parti strutturali, sono principalmente usati composti a matrice plastica e rinforzo fibroso di carbonio; elementi siffatti, per la loro leggerezza e per la loro elevata resistenza meccanica, permettono l'aumento del carico pagante rispetto al caso in cui vengano utilizzati materiali tradizionali.

I compositi per applicazioni aeronautiche vengono comunemente prodotti attraverso l'utilizzo di preimpregnati curati in autoclave; questa tecnologia permette di ridurre sensibilmente i difetti, come porosità o eccessi di resina, e fornisce al pezzo finito ottime proprietà specifiche.

Il limite di questa tecnologia è, però, l'elevato costo; per questo motivo la ricerca è volta a trovare tecnologie di fabbricazione che, pur offrendo al pezzo finito elevate caratteristiche meccaniche, abbiano costi inferiori.

In questo senso, una valida alternativa alla tecnologia in autoclave, potrebbe essere rappresentata dalla tecnologia per Infusion.

Sebbene i materiali compositi offrano delle proprietà specifiche molto attraenti per manufatti in cui il peso sia un fattore determinante di successo, la loro vulnerabilità all'impatto pone notevoli problemi in quanto costringe ad adottare elevati coefficienti di sicurezza, penalizzando l'efficienza delle struttura.

Essi sono particolarmente sensibili a "fattori di intensificazione delle tensioni" come fori, improvvise variazioni di spessori e nello specifico ambito di questo lavoro, agli impatti a bassa velocità dovuti, ad esempio, a carichi accidentali impartiti alla struttura durante le fasi di produzione, stoccaggio,

manutenzione, oltre a quelli impartiti in esercizio. Basti pensare al danno causato alla pala di un elicottero in seguito alla accidentale caduta di un attrezzo ad un tecnico durante una operazione di manutenzione.

È infatti ampiamente documentato in letteratura che livelli di energia innocui per un metallo possono indurre in un laminato rotture, quali fessurazioni interlaminari e delaminazioni, che determinano cospicue perdite di resistenza a trazione e compressione.

Si osserva che un danno prodotto in un laminato in seguito ad urto, anche se appena visibile sulla sua superficie, può causare riduzione di resistenza dell'ordine del 25% nel caso di sollecitazione di trazione e del 60% nel caso di sollecitazione di compressione. In alcuni casi, come ad esempio nella realizzazione della cabina del conducente di un treno, occorre evitare l'intrusione di oggetti esterni e quindi assume parametro principale nell'ambito della progettazione, la valutazione dell'energia di penetrazione, cioè di quella necessaria all'impattatore per poter passare dall'altro lato del pannello.

A volte è importante non solo l'aliquota di energia assorbita, ma sono fondamentali le modalità con cui avviene l'impatto, è il caso di un casco motociclistico che deve far sì che l'accelerazione subita dal cervello umano in seguito ad un incidente non superi determinate soglie di rischio. E' importante quindi, la valutazione del danno che può subire il casco in seguito ad una semplice caduta da un piano su cui era stato adagiato in precario equilibrio.

I laminati in composito assorbono generalmente energia attraverso meccanismi di cedimento come la delaminazione, la cricatura della matrice e la rottura delle fibre.

Proprio a causa del meccanismo di cedimento, il danno da impatto non è evidente e chiaramente classificabile come pericoloso o meno con una semplice analisi visiva.

Ciò nonostante esiste in ambito aeronautico il concetto di "danno da impatto appena visibile" (Barely Visible Impact Damage) attualmente valutabile dalla misura dell'impronta lasciata dall'impattatore, in genere dalla sua massima profondità (indentazione).

Le domande cui vuole dare risposta questo studio:

- A parità di diametro del penetratore, di spessore del provino di energia di impatto cosa suggerisce il confronto tra prove su campioni con differenti configurazioni?
- Come si sviluppa e come si propaga il danno?
- Quale è la legge che ci consente di risalire all'energia di impatto semplicemente misurando la profondità dell'impronta?
- La relazione che ci fornisce l'energia di penetrazione U_p in funzione dello spessore effettivo delle fibre $V_f \times t \times D_p$ resta valida?
- L'indentazione dipende dal diametro del penetratore in prove dinamiche ad impatto a bassa velocità? Ed in che modo ?
- Esiste una relazione che ci consenta di predire l'area delaminata al variare delle condizioni d'impatto?

PARTE PRIMA

CAPITOLO I - RICERCA BIBLIOGRAFICA

1.1 Introduzione

Nel primo capitolo di questo lavoro di ricerca sono riportati, esaminati e commentati i risultati del primo anno di dottorato. L'attività principale di tale periodo è stata la ricerca del materiale presente in letteratura scientifica e nei database dipartimentali.

Sebbene i materiali compositi offrano delle proprietà specifiche molto attraenti per manufatti in cui il peso sia un fattore determinante di successo, la loro vulnerabilità all'impatto pone notevoli problemi, in quanto costringe ad adottare elevati coefficienti di sicurezza, penalizzando l'efficienza della struttura.

È infatti ampiamente documentato in letteratura che livelli di energia innocui per un metallo possono indurre in un laminato rotture, quali fessurazioni interlaminari e delaminazioni, che determinano cospicue perdite di resistenza soprattutto a compressione [1-15].

Nonostante lo sforzo di molti ricercatori, il problema della previsione della geometria del danno in funzione delle condizioni d'urto rimane aperto.

Sono stati tuttavia prodotti molti dati sperimentali e modelli di tipo teorico, empirico e numerico utili a individuare i parametri che influenzano il comportamento del materiale e ad illustrare i modi di rottura che si verificano.

I parametri di cui tener conto nello studio di tale fenomenologia sono variabili a seconda delle applicazioni cui sono destinati i laminati: materiale, stratificazioni, percentuale di rinforzo, grammatura e formato delle fibre, velocità d'impatto, condizioni di vincolo, forma e caratteristiche elastiche dell'impattatore, temperatura, presenza d'umidità, etc.

Al fine di semplificare il lavoro non considereremo la variazione dei parametri ambientali (temperatura, umidità dell'aria, presenza d'acqua) anche perché uno studio completo in tale ambito presenta notevoli difficoltà di realizzazione.

In questo lavoro, che si limita all'impatto a bassa velocità di compositi in carboresina e vetroresina, vengono dapprima richiamate le caratteristiche fondamentali dei danni da impatto; sono poi discussi aspetti che riguardano la prima rottura di un laminato, la crescita delle delaminazioni, e le leggi che governano lo sviluppo dell'impronta nel punto di contatto.

1.2 Danni da impatto a bassa velocità

C'è un sostanziale accordo fra i diversi ricercatori sui meccanismi di generazione e crescita del danno in un laminato composito sottoposto ad impatto a bassa velocità [16,17].

Generalmente, il materiale ha un comportamento elastico fino a un livello caratteristico di energia, U_i , spesso indicato come "energia limite", al di là del quale si manifestano fratture intralaminari nella matrice o all'interfaccia fibra-matrice.

Tali fratture possono essere di due tipi (fig. 1.1):

a) fratture normali, posizionate nelle lamine più distanti dal punto di contatto pannello-percussore e orientate secondo la direzione dello spessore;

b) fratture taglienti, presenti nelle lamine più interne e orientate approssimativamente a 45° rispetto alla direzione dello spessore.

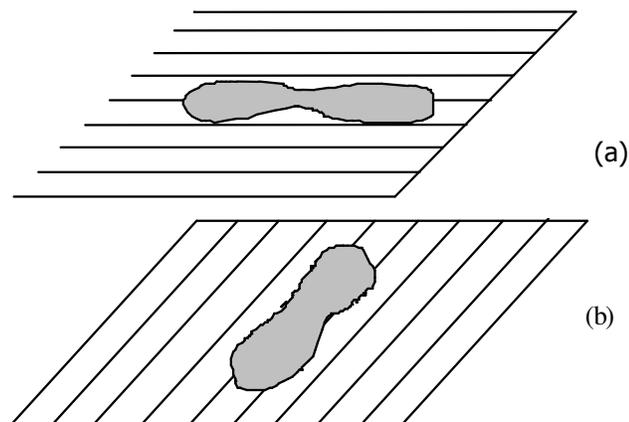


Fig 1.1- Fratture normali (a) e taglienti (b)

La denominazione delle due tipologie di fessurazioni è legata alla loro origine: le fratture normali sono provocate dalle sollecitazioni normali legate al momento flettente, che eccedono la resistenza della lamina in direzione trasversale; quelle taglienti sono dovute alle sollecitazioni derivanti dalle forze di taglio, che superano la corrispondente resistenza del singolo strato. Solitamente, le fratture appena descritte attraversano completamente lo spessore della lamina in cui si generano, e si bloccano all'interfaccia con lamine ad orientazione differente. Qui tendono a propagarsi sotto forma di delaminazione, di forma lenticolare allungata secondo la direzione delle fibre della lamina inferiore (fig. 1.2).

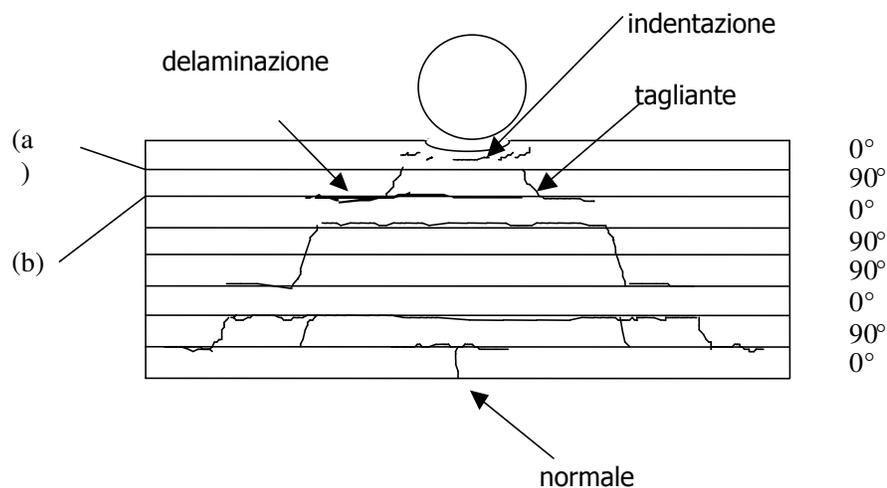


Fig. 1.2 - Schematizzazione dei modi di rottura tipici in un laminato sottoposto a impatto.

Questo meccanismo fa in modo che non si verifichi delaminazione fra lamine adiacenti caratterizzate dalla stessa orientazione del rinforzo.

All'aumentare dell'energia d'urto, le fessurazioni intralaminari crescono in numero, e le delaminazioni si estendono in dimensioni.

In particolare, le fratture taglienti e le conseguenti delaminazioni descrivono lungo lo spessore del laminato un caratteristico percorso tronco-conico, con estensione delle delaminazioni via via maggiore all'allontanarsi dalla superficie direttamente esposta all'impatto.

Sebbene più raramente, un percorso inverso viene seguito dalle delaminazioni generate dalle fratture normali.

Ai modi di rottura appena esposti si possono aggiungere fenomeni di cedimento nel volume di materiale immediatamente al di sotto della superficie di contatto laminato-percussore, a causa delle intense sollecitazioni generate dal carico localizzato.

Il segnale esterno di questi fenomeni è un'impronta (indentazione: fig. 1.2), la cui profondità cresce al crescere dell'energia di impatto.

Per valori sufficientemente elevati di quest'ultima, le fibre nella lamina disposta sulla superficie opposta a quella impattata iniziano a cedere e il loro cedimento si propaga progressivamente a quelle più vicine alla superficie di contatto, fino a determinare la perforazione del pannello.

La possibilità di prevedere la nascita delle fratture intralaminari, la loro estensione e localizzazione è di limitata utilità pratica di per sé, in quanto questi tipi di rottura influenzano in modo marginale le proprietà meccaniche di un laminato.

Tuttavia, è stato dimostrato che la nascita delle fessurazioni normali e taglienti facilita l'insorgere delle delaminazioni [18], la cui crescita iniziale è solitamente instabile [5,8] e la cui presenza è la principale causa della riduzione di resistenza a compressione del materiale.

Risulta quindi importante disporre di strumenti per la previsione delle condizioni che determinano la prima rottura in un laminato.

Inoltre, poiché la perdita di resistenza è fortemente dipendente dall'estensione, dal numero e dalla posizione delle aree delaminate, sarebbe allettante uno strumento analitico in grado di fornire queste informazioni per condizioni d'impatto fissate.

Infine, nelle applicazioni aeronautiche riveste un particolare interesse il comportamento del materiale in relazione alla sua indentazione. L'impronta lasciata dall'oggetto contundente è infatti il primo segno visibile ad occhio nudo dell'avvenuto impatto, e permette quindi di percepire una situazione potenzialmente critica al semplice esame visivo.

Ovviamente, perché ciò avvenga è necessario che l'alterazione superficiale sia sufficientemente evidente: da questa esigenza deriva la definizione di "Barely Visible Impact Damage" (BVID), che lega generalmente il concetto di visibilità alla profondità dell'indentazione.

1.3 Una tipica curva di impatto

Lo studio del comportamento dei laminati compositi in condizioni d'impatto a bassa velocità viene condotto quasi esclusivamente con macchine strumentate a caduta libera di grave: un pannello piano viene opportunamente supportato lungo i bordi e viene colpito da un percussore di geometria e massa definite che cade da un'altezza assegnata.

La storia dell'urto è ricostruita attraverso la curva forza-tempo, che permette di risalire alla curva forza-spostamento mediante opportune integrazioni numeriche.

In figura 1.3 è riportata la descrizione schematica di una tipica curva Forza - Spostamento.

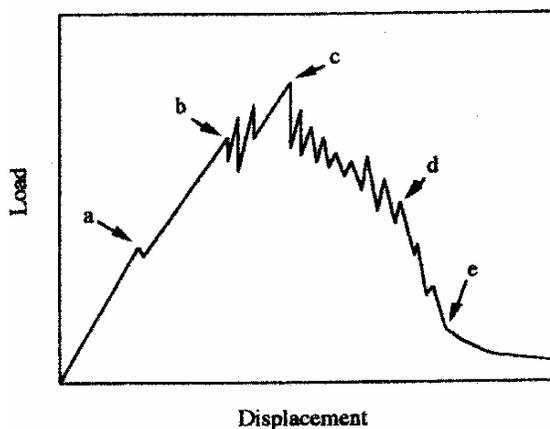


Fig. 1.3 - Rappresentazione schematica di una curva di carico

Per bassi valori del carico si nota una risposta del materiale approssimativamente lineare, dovuta ad una prima fase di deformazione elastica.

Questo andamento si mantiene pressoché costante fino al punto 'a', dove inizia la propagazione della delaminazione e si nota un'improvvisa caduta di carico ed una perdita di rigidità locale, tanto più evidente, quanto maggiore è lo spessore del provino esaminato.

Secondo alcuni ricercatori [19-20] esiste un'interazione tra la rottura della matrice e l'inizio della delaminazione: quest'ultimo fenomeno dovrebbe propagarsi partendo da cricche intralaminari, causate da sforzi di taglio negli strati interni, o da sforzi normali negli strati esterni opposti alla superficie impattata.

Dopo l'inizio della delaminazione, il carico riprende a crescere fino al verificarsi di significative rotture delle fibre che, a volte, corrispondono alla forza massima ('b' e 'c' coincidenti), altre volte (in particolare nei provini più spessi), avvengono per valori della forza inferiori alla forza massima; i valori di forza massima ed energia corrispondente verranno d'ora in poi indicate con F_{max} ed U_{max} .

Nell'intervallo 'b' - 'd' le fibre dei vari strati vengono progressivamente rotte; l'energia corrispondente al punto 'd' viene in genere definita di "perforazione" (U_{perf}).

Nel tratto 'd' - 'e' si ha una rapida diminuzione dei valori del carico, con la punta dell'impattatore che penetra sempre più negli strati perforati. Dal punto 'e', la forza di contatto diminuisce lentamente; l'area sottesa all'ultimo tratto della curva (da "e" in poi) indica l'energia dissipata in attrito, necessaria per far scorrere la parte cilindrica dell'impattatore nel foro che si è creato nel laminato; generalmente quest'ultima parte del diagramma $F - s$ non è oggetto di interesse, almeno ai fini del presente lavoro;

si indica con U_p l'energia di penetrazione, cioè quella sottesa alla curva dall'inizio del contatto fino al punto 'e', e necessaria affinché una sfera passi dall'altro lato del laminato.

Eseguendo prove d'impatto a diversi livelli di energia (variando l'altezza di caduta e/o la massa del percussore), si possono indurre nel materiale differenti gradi di danneggiamento.

Ovviamente, i parametri che possono essere scelti arbitrariamente nell'esecuzione di una prova d'impatto sono molteplici.

A parte la natura della lamina di base, il numero e l'orientazione delle lamine, la sequenza di laminazione, la geometria del pannello, le sue dimensioni in piano e le condizioni di vincolo possono essere scelti in modo differente; il materiale costitutivo e la geometria dell'impattatore, la sua massa e velocità possono assumere i valori più disparati.

Ognuno dei fattori appena elencati, in misura maggiore o minore, può influenzare il comportamento del materiale.

Di fatto, questo rende difficile sia il confronto diretto fra risultati sperimentali provenienti da fonti diverse, sia il trasferimento di esperienze acquisite in laboratorio a casistiche di strutture reali mediante opportuni fattori di scala.

Nell'affrontare il problema dell'urto, uno degli effetti più complicati da razionalizzare è quello della velocità, che può avere una duplice influenza:

- a) sul comportamento del materiale in prova
- b) sul comportamento della struttura, a causa di fenomeni vibrazionali.

Per quanto riguarda il materiale, è stato mostrato che laminati in vetroresina rispondono in modo differente se caricati staticamente o impattati a bassa velocità, probabilmente a causa della natura viscoelastica delle fibre di rinforzo, più che della matrice.

Viceversa le carboni appaiono poco o per nulla sensibili a variazioni anche cospicue della velocità di applicazione del carico.

L'insorgere di fenomeni dinamici è invece la base per un'utile distinzione fra bassa ed alta velocità: in condizioni di bassa velocità, la risposta della struttura è essenzialmente governata dalla sua deformata statica, e può quindi essere assimilata a un caso quasi-statico; al contrario, nel campo dell'alta velocità essa è dominata dalle oscillazioni di natura dinamica, che non possono essere trascurate per un'analisi accurata del problema. Ovviamente questa definizione, che prescinde dal valore assoluto della velocità del corpo contundente, implica che l'impatto a bassa velocità su un materiale, insensibile agli effetti dello strain-rate, possa essere completamente trattato mediante un'analogia statica.

1.4 Prima rottura nel laminato

È stato notato in precedenza che le prime rotture in un laminato sottoposto ad impatto sono di tipo intralaminare e interessano la matrice o l'interfaccia fibra-matrice.

Naturalmente, il primo modo di rottura consisterà in fessurazioni normali, taglianti o localizzate nella zona di contatto a seconda dell'entità relativa delle sollecitazioni coinvolte.

In generale, laminati sottili (il cui spessore è piccolo rispetto alle dimensioni in piano) privilegiano le sollecitazioni flessionali, e tendono perciò a sviluppare precocemente fessurazioni normali.

D'altra parte, la forte localizzazione della forza di contatto dà luogo a notevoli tensioni taglianti, che favoriscono le rotture per taglio soprattutto quando il diametro dell'impattatore è piccolo.

Infine, laminati spessi generano elevate sollecitazioni nel punto di contatto, mostrando fessurazioni localizzate nella zona adiacente alla superficie di applicazione del carico.

Diversi autori hanno notato che la prima rottura, più che dal livello di energia, dipende dalla forza di contatto; in altri termini, esiste una forza critica F_i , più che un'energia critica U_i , che dà luogo alla prima rottura in un laminato.

Partendo da questa osservazione, Sjöblom [1] ha proposto un semplice modello per il calcolo di F_i , ipotizzando che la prima rottura si verifichi quando la sollecitazione tagliente nella direzione dello spessore raggiunge un valore critico, τ_c , caratteristico del materiale.

Per la valutazione della sollecitazione tagliente, l'autore ha assunto che essa sia uniformemente distribuita su una superficie cilindrica di altezza pari allo spessore t del laminato e raggio uguale a quello r della superficie di contatto materiale-percussore.

Per il calcolo di r è stato adottato il modello di contatto hertziano, ottenendo la (1.4.1) in cui k_c è la rigidità locale nel punto di contatto, e D_t il diametro del percussore.

L'eq. (1.4.1) è stata sviluppata in [19], dove la forza di prima rottura è stata espressa nella forma :

$$F_i = \frac{(2\pi \cdot t \cdot \tau_c)^{1.5} \cdot D_t^{0.75}}{k_c^{0.5}} \quad (1.4.1)$$

$$F_i = \delta \cdot D_t^{0.5} \cdot t^{1.5} \quad (1.4.2)$$

con δ costante.

Confrontando la (1.4.1) e la (1.4.2), si nota che entrambe prevedono una dipendenza della forza di prima rottura dallo spessore elevato alla potenza 1.5.

Viceversa, sembra ci sia una discrepanza nell'effetto di D_t , che nella (1.4.1) è affetto dall'esponente 0.75, e nella (1.4.2) dall'esponente 0.5.

L'apparente incongruenza è spiegata dal fatto che la rigidezza locale k_c è funzione anch'essa del diametro del percussore, e questa dipendenza è stata esplicitata nella (1.4.2).

1.4.1 Influenza del diametro dell'impattatore

La Fig. 1.4 riporta i risultati sperimentali presentati in [21] per verificare l'applicabilità dell'eq. (1.4.2), ottenuti su laminati quasi-isotropi in carboresina T400/HMF 934.

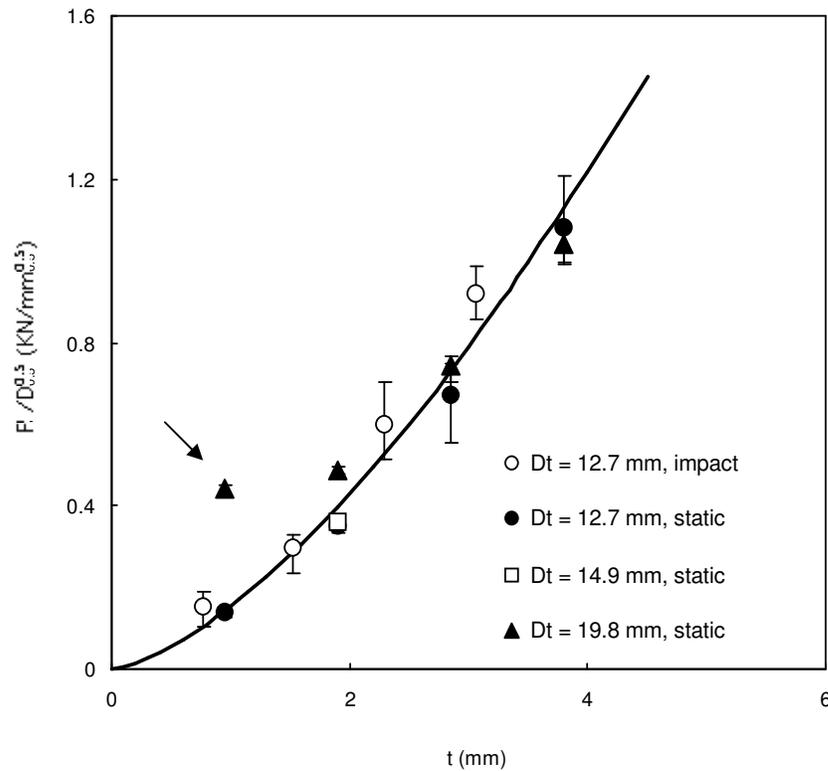


Fig. 1.4- Effetto dello spessore t del laminato e del diametro D_t del penetratore sulla forza di prima rottura F_i .

In accordo all'eq. (1.4.2), tutti i dati ricavati da prove eseguite utilizzando differenti diametri del percussore dovrebbero convergere in un'unica curva, se il termine $F_i/D_t^{0.5}$ viene impiegato in ordinata.

La figura mostra che questo accade effettivamente, e che quindi l'effetto di D_t è modellato correttamente.

Si noti, inoltre, che la stessa curva è sostanzialmente valida sia in condizioni di carico quasi-statico ("static") che a bassa velocità ("impact").

La curva a tratto continuo in figura 1.4 è la rappresentazione grafica dell'eq. (1.4.2), in cui la costante δ è stata ottenuta con il metodo dei minimi quadrati, fornendo $\delta = 0.152 \text{ KN/mm}^2$.

Chiaramente, l'eq. (1.4.2) è in generale efficace nel prevedere il carico di prima rottura.

La sola eccezione è costituita dal punto indicato dalla freccia: esso è relativo a pannelli di piccolo spessore caricati con un percussore di elevato diametro.

In queste condizioni di prova, la rigidità flessionale è limitata, mentre la forza di prima rottura è relativamente elevata, a causa dell'efficace distribuzione del carico locale.

Di conseguenza, il provino assume all'atto della prima rottura una forte curvatura, che altera sostanzialmente la legge di contatto penetratore-materiale rispetto all'ipotesi di contatto hertziano, su cui l'eq. (1.4.2), si basa.

Delfosse e Poursartip [22] hanno ricavato una legge di variazione dell'energia di penetrazione con il diametro del percussore meno che lineare, con esponente 0.7, relativamente a provini in carboresina.

Tuttavia le prove erano condotte con percussori a punta piatta, emisferica e conica ($18,5^\circ$) e senza rispetto della similitudine geometrica tra D_p e le dimensioni dei supporti, avendo così un effetto indesiderato e non valutabile a priori.

E' stato invece ricavato, da altri autori, [23] una relazione del tipo:

$$U_p = K \cdot D_p^\alpha$$

dove $\alpha \approx 1.5$ e k è una costante dipendente dal materiale; in pratica una legge con andamento più che lineare.

Inoltre se si diagramma U_p in funzione del prodotto ($t \times V_f \times D_p$) i dati relativi a diversi materiali, stratificazioni, e forme dell'impattatore, convergono su un'unica curva di equazione:

$$U_p = 0.49 \cdot (t \cdot V_f \cdot D_p)^{1.4} \quad (1.4.1.1)$$

Ciò è chiaramente visibile nelle figure seguenti (1.5):

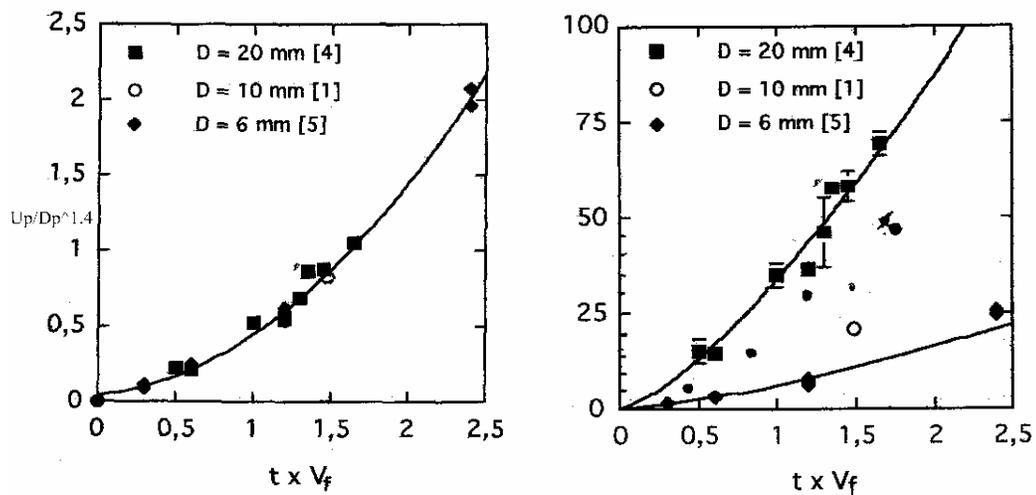


Fig. 1.5- Convergenza dei valori dell'energia di penetrazione ricavati per diverse condizioni al contorno tramite la (2.4.1.1)

A questo punto è importante sottolineare che, riferendosi al volume percentuale di fibre si commette sicuramente un certo errore, essendo quest'ultimo dipendente non solo dalle percentuali volumetriche impiegate al momento della stratificazione, ma anche dal ciclo di cura stesso che subisce il laminato; infatti prima della completa polimerizzazione una parte di resina fuoriesce dal sacco in pressione o dallo stampo, rendendo difficile una valutazione delle percentuali volumetriche di fibra e matrice nel prodotto finito.

Si può ovviare a ciò molto semplicemente, riferendosi alla grammatura delle fibre ed alla loro densità che sono valori garantiti dal produttore.

Indicando infatti con:

W_f = grammatura fibre,

γ_f = densità fibre,

V_f = volume percentuale di fibre,

t_f = spessore effettivo di fibre,

t_T = spessore totale provino

si ha:

$$W_f = \gamma_f \cdot t_f, \quad (1.4.1.2)$$

da cui si ricava

$$t_f = W_f / \gamma_f ; \quad (1.4.1.3)$$

essendo però

$$t_f = V_f \cdot t_T$$

sostituendo nella (1.4.1.3):

$$V_f = \frac{W_f}{t_T \cdot \gamma_f} , \quad (1.4.1.4)$$

quindi, in sostanza, sostituendo nella (1.4.1.1) si ha:

$$U_p = K \cdot D_p^{1.4} , \quad (1.4.1.5)$$

dove K è una costante facilmente ricavabile, dipendente dalla grammatura delle fibre e dalla loro densità.

1.4.2 Influenza dello spessore

Risultati simili a quelli di figura 1.5 sono stati presentati in [14], dove sono state esaminate circa 350 prove d'impatto a bassa velocità eseguite su laminati di differenti spessori e stratificazioni, ottenuti con tre tipi di lamina di base.

Le condizioni di vincolo e la geometria del percussore erano in questo caso fissate.

Tuttavia, i dati hanno confermato che la forza di prima rottura è dipendente secondo l'esponente 3/2 dallo spessore, mentre è poco influenzata dalla stratificazione. Inoltre, la costante δ dell'eq. (1.4.2) è fortemente influenzata dal tipo di matrice [14].

Nel valutare i risultati disponibili in letteratura, occorre tener presente che l'individuazione del punto di prima rottura sul diagramma carico-spostamento non è sempre agevole.

Sebbene parecchi ricercatori abbiano notato che l'inizio del danno comporta un'improvvisa caduta di carico [7,9], in [24] è stato anche dimostrato che questa caduta è tanto meno percepibile quanto

minore è lo spessore del composito. In figura 1.6 sono riportate due curve di carico ottenute in [24], relative a pannelli di diverso spessore e uguale sequenza di laminazione sollecitati in condizioni quasi-statiche.

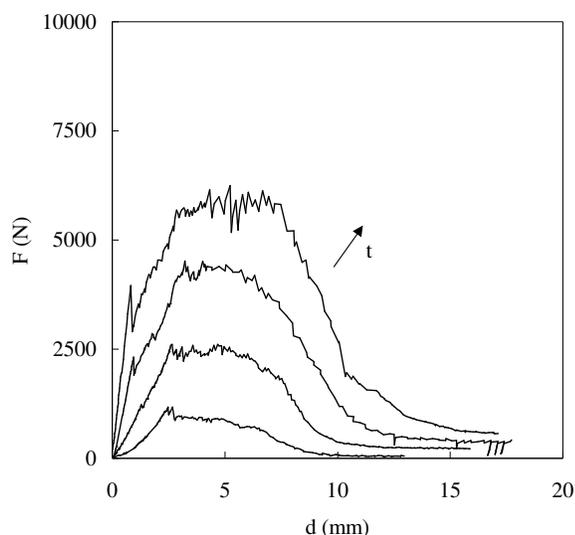


Fig. 1.6 - Curve carico spostamento ottenute da prove quasi-statiche su laminati in carbonio di differente spessore t , ma uguale sequenza di laminazione [24].

Si può osservare che la discontinuità all'atto della prima rottura è più limitata per lo spessore minore. La posizione del punto di prima rottura, comunque identificabile quando il carico è applicato lentamente, può divenire problematica a bassa velocità, a causa del disturbo provocato dalle vibrazioni proprie della struttura.

E' inoltre probabile che, più che essere correlata alle prime rotture intralaminari, la caduta di carico segnali l'inizio delle rotture per delaminazione [4].

Caprino, Lopresto, Scarponi e Briotti [23] hanno condotto prove su laminati di grafite/resina epossidica tipo T400/HMF934 di diverso spessore, usando un impattatore emisferico (diametro 12,7 mm) ed una macchina tipo CEAST Fractovis Mk 4 a caduta di peso.

Nella figura 1.7 si riportano i risultati ottenuti per la forza d'inizio delaminazione, d'ora in poi indicata con F_{er} , in funzione dello spessore, per i quattro spessori esaminati:

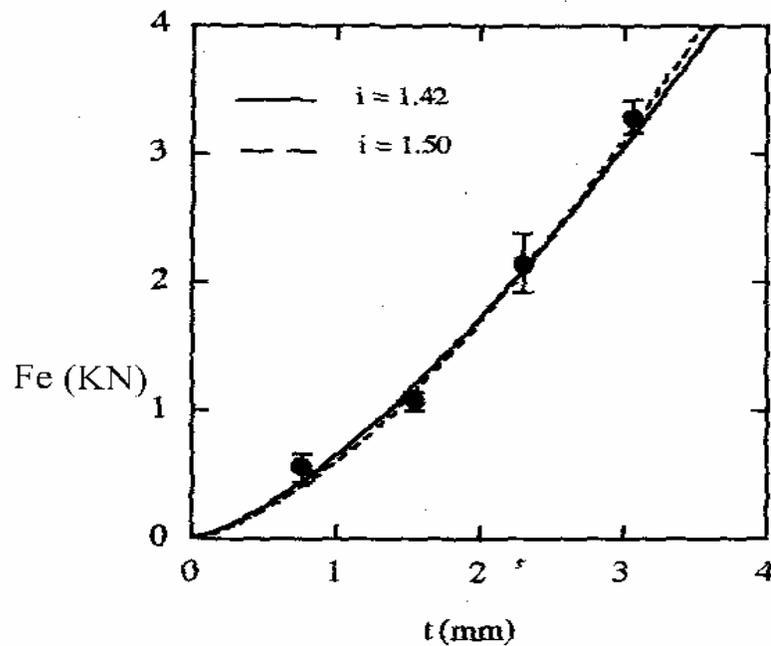


Fig. 1.7 - Andamento della forza elastica in funzione dello spessore

Si nota che una relazione del tipo:

$$F_e = F_{e0} \cdot t^i \quad (1.4.2.1)$$

è adeguata a descrivere l'andamento della forza elastica se si pone al posto di ' F_{e0} ' il valore 0.64 KN/mm ^{i} ed al posto di ' i ' il valore 1.42.

Studiando il contatto tra una sfera rigida ed un laminato, alcuni ricercatori [26-27] hanno dimostrato che la legge di contatto elastico di Hertz può essere applicata con successo.

Secondo questa legge si può assumere $F = K\alpha^{1.5}$ con α pari alla profondità dell'impronta; il raggio nella zona di contatto è dato da:

$$R \propto \sqrt[3]{F} \quad (1.4.2.2)$$

da considerazioni di equilibrio si ricava che lo sforzo di taglio varia con lo spessore secondo la legge:

$$\tau = \frac{F}{2\pi R t} \quad (1.4.2.3)$$

da cui:

$$2\pi \tau R = F$$

e, sostituendo al raggio la (1.4.2.2) si ottiene

$$2\pi \tau \cdot F^{\frac{1}{3}} \propto F$$

quindi

$$2\pi \tau \propto F^{\frac{2}{3}}$$

cioè

$$F_e \propto (\bar{\tau} \cdot t)^{1.5} \quad (1.4.2.4)$$

dove $\bar{\tau}$ è lo sforzo di taglio interlaminare del materiale.

Guardando la figura 1.7 si apprezza il buon accordo tra la linea continua, relativa all'esponente ricavato dalle prove sperimentali col metodo della curva di minima dispersione, e la linea tratteggiata ottenuta sostituendo il valore 1.5 all'esponente dell'equazione 1.4.2.1.

Se consideriamo invece l'influenza dello spessore sull'energia di penetrazione è stato dimostrato [22] che la capacità del composito di assorbire energia d'impatto per unità di spessore è maggiore quanto più grande è lo spessore.

La sua variazione segue una legge di potenza:

$$U_p = U_{p0} \cdot t^p \quad (1.4.2.5)$$

ottenuta col metodo della minima dispersione.

1.5 Sviluppo delle delaminazioni

Per definire la sensibilità all'impatto di un laminato composito, è stata coniata l'etichetta di "resistenza al danno"; un materiale è ovviamente tanto più resistente al danno quanto più limitato è il danno fornito da un contundente che lo percuote in condizioni di prova fissate.

Il termine "resistenza al danno" non deve essere confuso con quello di "tolleranza al danno", legato invece all'aliquota di resistenza che il materiale è in grado di garantire in presenza di un danno da impatto.

Generalmente, la resistenza al danno viene misurata attraverso l'estensione dell'area delaminata, così come rivelata da un'indagine ultrasonica in C-scan. Ciò deriva dal fatto che la perdita di resistenza è in qualche modo dipendente da questo parametro. Alcuni autori hanno tuttavia correlato la resistenza residua, più che all'area della delaminazione, alla sua larghezza valutata trasversalmente alla direzione del carico applicato [5,11].

Naturalmente, qualunque sia il parametro assunto per quantizzare il danno, esso è intrinsecamente limitato, in quanto non ha la capacità di descrivere la morfologia reale delle delaminazioni che, come mostrato in precedenza, si sviluppano su piani differenti con diversa orientazione.

Un tentativo di spiegare l'origine e la forma che le delaminazioni assumono è stato effettuato da Liu [2].

L'autore ha attribuito questo fenomeno di rottura al fatto che le lamine, data la loro ortotropia, tendono a curvarsi in modo differente l'una dall'altra quando la piastra è sottoposta a un carico trasversale. La necessità di assumere una deformata comune, dovuta ai legami interfacciali, si traduce in sollecitazioni normali e taglianti, che generano rottura. Liu postula quindi che la tendenza alla delaminazione fra due lamine adiacenti sia governata dalla differenza fra le rigidità flessionali, attraverso il coefficiente M (mismatch) definito come:

$$M = \frac{[D_{11}(\theta_b) - D_{11}(\theta_t)]}{[D_{11}(0^\circ) - D_{11}(90^\circ)]} \quad (1.5.1)$$

dove il simbolo D_{11} rappresenta il primo termine della matrice di rigidità flessionale, mentre θ_b , θ_t sono le orientazioni delle lamine rispettivamente al di sotto e al di sopra della superficie interlaminare considerata.

Utilizzando l'eq. (1.5.1), Liu è riuscito a ricostruire con buona approssimazione la forma che le delaminazioni assumono sulle singole superfici interlaminari, e a spiegare perché la loro dimensione dipende dal tipo di fibra di rinforzo e dalla sequenza di laminazione.

Da quest'ultimo punto di vista, un'indicazione molto utile per la scelta della sequenza, ricavabile dal coefficiente M , è che un laminato è tanto più resistente al danno quanto più limitata è la differenza di orientazione fra lamine adiacenti. Ovviamente, quando $\theta_b = \theta_t$, $M=0$.

L'eq. (1.5.1) prevede quindi, come ampiamente dimostrato dalle osservazioni sperimentali, come non ci sia possibilità di delaminazione fra lamine in cui le fibre siano disposte secondo la stessa orientazione.

Poiché la rigidità flessionale è funzione del cubo dello spessore, dal modello di Liu si desume che fra due laminati uguali in tutto, eccetto che nello spessore della lamina di base, il più spesso dovrebbe soffrire una delaminazione maggiore di quello più sottile.

Per verificare questa ipotesi, l'autore sottopose a prove d'impatto tre compositi, rispettivamente di stratificazione $[0_4/90_4]$, $[0_8/90_8]$, $[0_{12}/90_{12}]$, e ne misurò la superficie delaminata. Egli notò che le aree delaminate avrebbero dovuto essere nel rapporto 43:83:123 (cioè 1:8:27). L'esperienza fornì invece 1:2.8:11.5, confermando comunque la tendenza qualitativa desumibile dalla definizione di M .

In realtà nell'eseguire le sue prove Liu mantenne costante l'energia d'impatto per unità di spessore, assumendo implicitamente che questo parametro determini l'estensione della delaminazione. Quali siano i fattori a cui legare la crescita del danno è invece, a tutt'oggi, argomento di dibattito.

Alcuni ricercatori hanno evidenziato una dipendenza lineare dell'area delaminata dall'energia d'urto [3,12]; altri hanno indicato la forza massima come la quantità meglio correlata al progredire del danno [8,15].

Saranno ora discussi alcuni risultati sperimentali, non pubblicati in precedenza, che sembrano confermare l'utilità della forza massima di contatto nella previsione del danno.

In [28] sono state eseguite prove su laminati in carboresina T400/HMF 934 di stratificazione $[(0,90)_n/+45n/-45n]_s$, con $n = 2, 3$, corrispondenti rispettivamente a spessori $t = 1.90$ mm e 2.85 mm. Le parentesi tonde nella designazione della stratificazione denotano lamine in tessuto. I pannelli sono stati semplicemente appoggiati su una piastra dotata di foro circolare avente diametro di 50 mm e caricati al centro fino a livelli di carico predefiniti mediante un punzone emisferico.

Per verificare l'effetto di D_t , sono stati adottati i tre valori $D_t = 6$ mm, 12.7 mm e 19.8 mm. La Fig. 1.8 riporta l'area delaminata, misurata mediante ultrasuoni in C-scan, in funzione dell'energia U impartita.

La legenda indica lo spessore e il diametro del punzone, in mm, secondo la simbologia t/D_t .

Come predetto dal modello di Liu, la superficie del danno è tanto maggiore quanto più elevato è lo spessore della singola lamina (n più elevato, e quindi spessore totale t maggiore).

Si può osservare che questo accade addirittura a parità di energia, per cui laminati più spessi soffrono una minore resistenza al danno a parità di condizioni di prova.

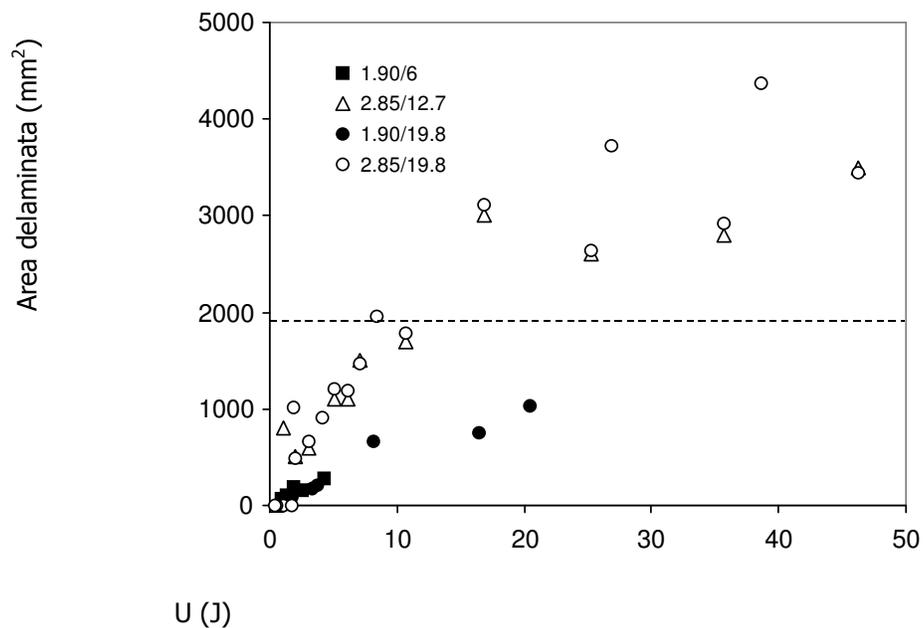


Fig. 1.8 - Area delaminata in funzione dell'energia d'impatto, U , per pannelli di spessore differente.

I dati in figura 1.8 sembrano essere in contrasto con l'incremento lineare dell'area delaminata in funzione di U , mostrato da altri autori [3,12]. Da essi si ricava piuttosto che, dopo una crescita rapida immediatamente al di là dell'energia di prima rottura, il tasso di incremento tende a livellarsi. A questo proposito, occorre rilevare che molti ricercatori hanno indagato sul comportamento dei laminati per livelli di energia d'impatto ben lontani da quelli di perforazione, catturando quindi solo la prima parte della legge di crescita.

Quando ci si è spinti a energie significativamente superiori a quella di prima rottura [10,13], è stata evidenziata la stessa tendenza visibile in figura 1.8.

Si può infine osservare che l'influenza di D_t sullo sviluppo della delaminazione è piuttosto limitato: a parità di energia, pannelli di uguale spessore esibiscono la stessa area danneggiata, indipendentemente dal diametro del percussore.

La retta orizzontale tratteggiata in figura 1.8 rappresenta l'area del provino compresa all'interno del perimetro di supporto. La presenza di punti sperimentali al di sopra della retta segnala che, per i provini più spessi, la superficie delaminata interferisce con l'appoggio, superandone i confini. Ovviamente, i risultati ottenuti in queste condizioni devono essere considerati con cautela. Gli stessi risultati di figura 1.8 sono utilizzati in figura 1.9 per correlare la superficie delaminata alla forza massima di contatto, F_{max} . Abbastanza sorprendentemente, tutti i punti sperimentali convergono con

buona approssimazione su una singola curva, che viene seguita anche quando la superficie delaminata si estende al di là dei confini dell'appoggio.

L'analisi della delaminazione in funzione della forza massima dà quindi una spiegazione al risultato, osservato in figura 1.8, s laminati spessi subiscono delaminazioni più estese a parità di energia: questo dipende dalla maggior forza di contatto sviluppata nell'urto, dovuta alla più elevata rigidità e resistenza della struttura.

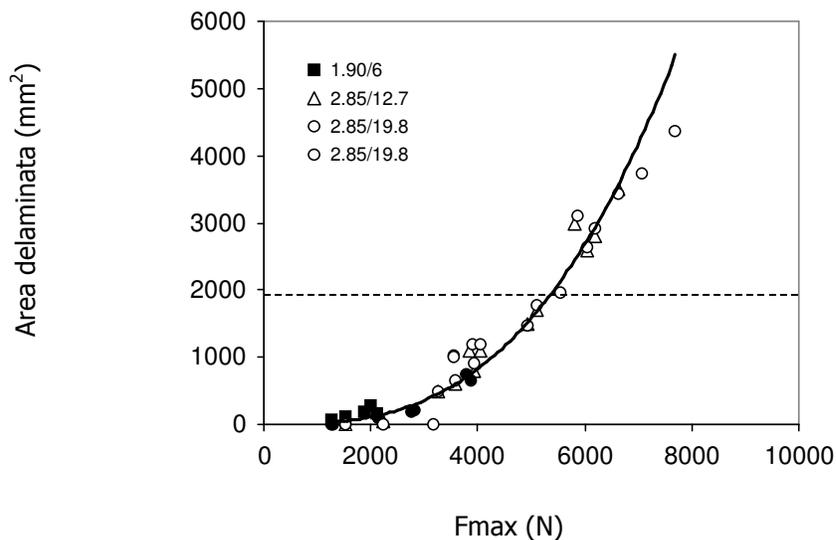


Fig. 1.9 - Area delaminata in funzione della forza massima di contatto, F_{max} , per pannelli di spessore differente.
Diametro dell'appoggio 50 mm.

La curva a tratto continuo in figura 1.9 è la rappresentazione grafica dell'equazione empirica:

$$A = \eta \cdot F_{max}^{\beta} \quad (1.5.2)$$

dove A indica l'area delaminata, e η , β sono due costanti che, calcolate con il metodo dei minimi quadrati, valgono $\eta = 3.13 \times 10^{-8} \text{ mm}^2/\text{N}^{\beta}$ e $\beta = 2.89$.

In base ai risultati ottenuti, le due costanti dovrebbero essere indipendenti dal diametro del percussore e dallo spessore del pannello.

È invece ipotizzabile che esse siano funzione del tipo di laminato, in quanto l'estensione della delaminazione è influenzata sia dalla natura della matrice [10] che dalla sequenza di laminazione [6].

In ogni caso, la validità dell'eq. (1.5.2) dovrebbe essere limitata, per ogni coppia di valori spessore-diametro del percussore, al campo in cui $F_{\max} > F_i$, dove F_i è calcolato dall'eq. (1.4.2).

Applicando quest'ultima al caso $t = 2.85$ mm, $D_t = 19.8$ mm, si ricava $F_i = 3254$ N, che spiega la presenza dei tre punti a delaminazione nulla chiaramente visibili in figura; tali punti sono stati esclusi dal calcolo delle costanti η , β .

Ovviamente, se si assume che l'eq. (1.5.2) sia valida solo quando $F_{\max} > F_i$, la legge di variazione di A presenta una discontinuità nel punto individuato dall'uguaglianza $F_{\max} = F_i$.

Questa caratteristica non deve essere necessariamente interpretata come un'inefficacia del modello: alcuni autori [5,8] hanno notato che la prima propagazione del danno interlaminare può essere instabile, per cui le sue dimensioni assumono valori relativamente elevati appena la forza di prima rottura viene superata. La curva a tratto continuo di figura 1.9 viene riportata a scopo di confronto in figura 1.10, dove sono diagrammati i risultati di prove identiche a quelle appena discusse, fatta eccezione per il diametro del supporto (pari in questo caso a 100 mm) sui soli laminati di spessore $t = 2.85$ mm [21].

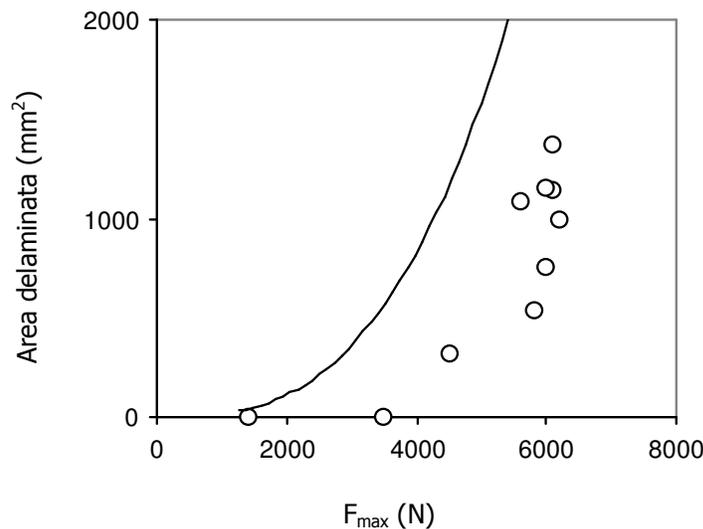


Fig. 1.10 - Area delaminata in funzione della forza massima di contatto, F_{\max} , per pannelli di 2.85 mm di spessore. Diametro dell'appoggio 100 mm.

Si osserva innanzi tutto che non esiste una buona correlazione fra i dati di figura 1.9 e quelli di figura 1.10: l'area delaminata è sensibilmente più bassa per il diametro d'appoggio maggiore; si deve quindi concludere che le costanti che appaiono nell'eq. (1.5.2) sono funzione di quest'ultimo parametro.

La figura 1.10 mette però in evidenza anche un altro limite dell'approccio alla delaminazione basato sulla forza: quando quest'ultima raggiunge il valore di circa 6200 N, c'è un'elevata variabilità dell'area delaminata. Questo fenomeno, più che essere attribuibile allo scarto sperimentale, dipende dal fatto che la delaminazione continua ad estendersi anche durante la perforazione, che si sviluppa al di là della massima forza sostenibile da parte del pannello.

Le considerazioni precedenti sottolineano la complessità del problema della crescita delle rotture interlaminari, che a tutt'oggi è lontano dall'aver trovato una soluzione soddisfacente.

1.6 Riduzione della resistenza a trazione causata da impatto a bassa velocità

È stata valutata la riduzione di resistenza a trazione per i laminati compositi a strati angolari, dovuta ad impatto a bassa velocità [29].

Sono state scelte tre diverse stratificazioni: $[+30^\circ, -30^\circ]_{2s}$, $[+45^\circ, -45^\circ]_{2s}$ e $[+60^\circ, -60^\circ]_{2s}$ sulle quali eseguire le prove di impatto, effettuate a diversi livelli di energia; successivamente i provini sono stati analizzati agli ultrasuoni per valutare i danni nati in seguito agli impatti.

I provini impattati sono stati soggetti a carico di trazione fino al verificarsi del cedimento ed è stata confrontata la resistenza massima a trazione dopo impatto con il valore corrispondente ai provini non danneggiati.

Inoltre, per una maggiore comprensione del fenomeno del cedimento, alcune prove di trazione sono state interrotte a diversi livelli di carico (rispettivamente a 30%, 60%, 85% e 90% del corrispondente carico di rottura) e sono state eseguite analisi ultrasoniche in ogni fase per valutare la crescita della delaminazione dovuta al carico di trazione.

È stata determinata una correlazione tra la quantità delle aree di delaminazione e l'energia d'impatto.

È stato utilizzato un sistema di resina epossidica e fibra di carbonio T400. Tutti i laminati sono a 8 strati e simmetrici (cioè $[+\alpha, -\alpha]_{2s}$ dove $\alpha = 30^\circ, 45^\circ$ oppure 60°), quindi ci riferiremo ad essi solo con l'angolo (es. $+/-30^\circ$). Tutti i laminati hanno lo spessore nominale di 1.2 mm.

Le prove d'impatto sono state eseguite utilizzando un apparecchio a caduta di peso tipo CEAST Fractovis MK 4.

I provini sono stati bloccati da due piastre di acciaio con un'apertura circolare di 40 mm di diametro con pressione di bloccaggio di 0.3 MPa.

L'impattatore ha una parte anteriore emisferica di diametro 12.7 mm ed è fornito di un trasduttore di forza per poter misurare la forza di contatto.

Il rimbalzo è stato evitato bloccando l'impattatore dopo il primo impatto.

È disponibile un sensore fotoelettrico per la valutazione della velocità dell'impattatore al momento dell'inizio del contatto, quindi è stata registrata la curva F-t e da queste, mediante integrazione sono state ricavate curve F-s ed U-s.

Ciascun laminato è stato sottoposto a livelli di energia di 2, 3, 5, e 7 Joule; a tale ultimo livello avviene la perforazione per tutti i provini.

Le prove di trazione sono state condotte su una macchina servoidraulica Instron 4508, alla velocità costante della traversa di 1 mm/s, la pressione di bloccaggio è 10 Mpa; sono state eseguite sia su provini integri che danneggiati, per ottenere così la perdita percentuale di resistenza a trazione. La direzione di trazione è la 0° del laminato.

La perdita percentuale di resistenza a trazione è stata calcolata come:

$$\Delta\sigma\% = 100 \cdot \frac{\sigma_v - \sigma_{dan}}{\sigma_v}$$

dove σ_v e σ_{dan} sono la tensioni di rottura dei provini rispettivamente vergine e danneggiato.

Con riferimento alla figura 1.11 sembra che al valore più basso (2.5 Joule) il laminato +/- 30 mostri una riduzione di resistenza a trazione minore del +/- 60; mentre per valori maggiori di energia d'impatto sia il laminato +/- 60 a presentare performance migliori del +/- 30. Il migliore comportamento è comunque registrato per il +/- 45.

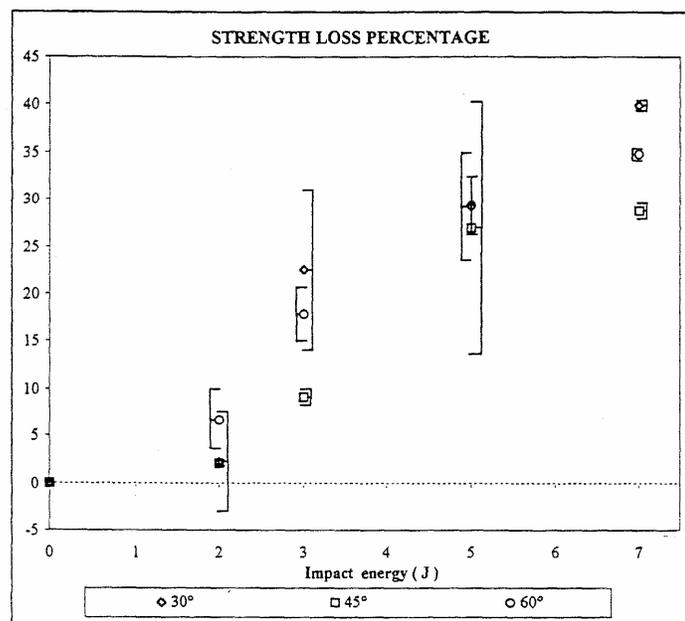


Fig. 1.11 -Perdita percentuale di resistenza a trazione

Focalizzando l'analisi ultrasonica sui provini impattati a 3 e 5 Joule è stato notato come le delaminazioni sono localizzate alla terza, quinta e settima interfaccia.

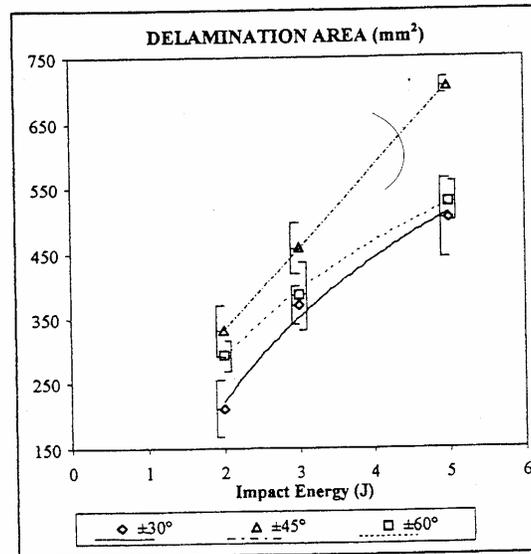


Fig. 1.12-Area delaminata in funzione dell'energia d'impatto

Nella figura 1.12 l'area delaminata è riportata in funzione dell'energia d'impatto; si nota che i laminati +/- 45 sono più sensibili al fenomeno dell'impatto, essendo più estesa l'area di delaminazione; inoltre si può notare come, per tali laminati, l'andamento area delaminata – energia d'impatto sia lineare. Interessante è notare l'andamento della crescita della delaminazione man mano che i provini vengono caricati a trazione durante le prove tensione/analisi; dalle figure seguenti, (provini a 3J e 5J), risulta evidente come si osservano incrementi di danno molto piccoli finché non si raggiunge un valore di trazione pari all'85% della resistenza limite (valore in corrispondenza del quale invece la crescita del danno è notevole); questo suggerisce applicazioni pratiche, in campo di progetto/verifica.

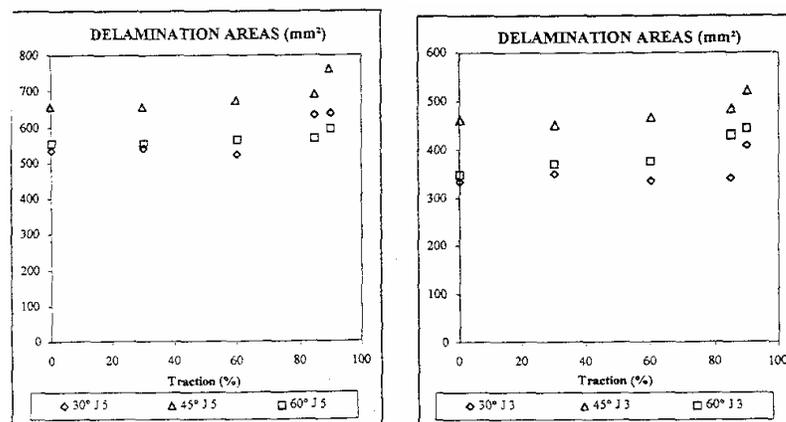


Fig. 1.13 -Andamento della delaminazione in funzione del carico applicato; i livelli di energie d'impatto sono 3 e 5 Joule, rispettivamente per le figure a destra e a sinistra.

Infine, riportando l'area delaminata in funzione dell'energia assorbita, si notano due aspetti importanti: il primo indica che la legge di variazione del danno in funzione dell'energia assorbita, ha andamento lineare; il secondo che il laminato +/- 45 presenta la zona delaminata più estesa a parità di energia assorbita.

Quest'ultimo aspetto sta ad indicare un diverso meccanismo di assorbimento d'energia tra i laminati +/- 45 ed i +/- 30 o +/- 60, indicante la correlazione tra l'energia assorbita ed il meccanismo di cedimento: delaminazione per i primi, e rottura di matrice e fibre per i secondi (figura 1.14).

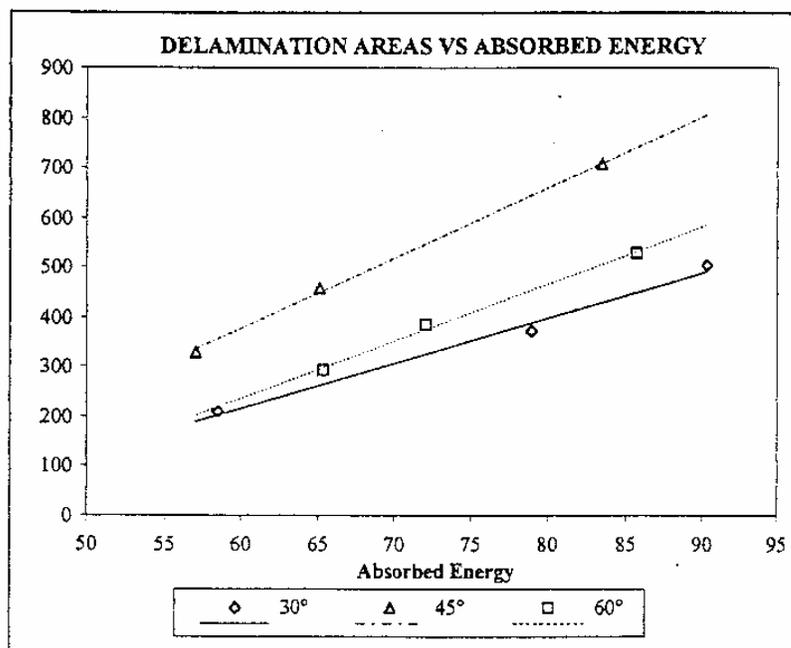


Fig. 1.14- Area di delaminazione in funzione dell'energia assorbita

1.7 Indentazione

Abbiamo già accennato ampiamente agli aspetti potenzialmente pericolosi che un carico accidentale può causare in un laminato in composito; spesso infatti si verificano danni interni notevoli e considerevoli perdite di resistenza e rigidità anche se la superficie impattata apparentemente non mostra segni di lesioni molto evidenti.

Questo è conseguenza del fatto che mentre l'indicazione esterna dell'impatto è l'indentazione (nell'ambito del nostro lavoro ci riferiremo ad essa intesa come massima profondità dell'impronta causata dall'impattatore), i meccanismi di sviluppo e propagazione del danno interessano,

principalmente, la parte interna del laminato ed in minor misura, ed in dipendenza dalle specifiche stratificazioni, il lato opposto all'impatto, spesso non ispezionabile visivamente.

Ciò nonostante esiste, in ambito di progettazione aeronautica, il concetto di "barely visibile impact damage" (BVID), secondo il quale il laminato deve garantire adeguata sicurezza in termini di perdita percentuale di resistenza, in presenza di una "zona indentata appena visibile"; in genere ci si riferisce ad una profondità massima dell'impronta di $0.3 \approx 0.4$ mm anche se il giudizio su questo valore di indentazione è largamente variabile.

Si comprende, dunque quanto sia importante poter stabilire una correlazione tra l'indentazione e la riduzione di resistenza della struttura impattata, individuando, sempre che ciò sia possibile, il "valore di soglia" in termini di indentazione, al di sotto del quale il laminato impattato presenta perdita di resistenza nulla.

Da un punto di vista progettuale, è di primaria importanza stabilire quale sia l'energia che induce un BVID, perché una struttura aeronautica deve essere in grado di sopportare in sicurezza i carichi assegnati in presenza di un danno di questo tipo.

Occorre quindi disporre di strumenti analitici che permettano di correlare l'energia d'urto all'indentazione I . Naturalmente per assegnate condizioni d'impatto, I sarà tanto maggiore quanto minore è lo spessore del laminato.

Questo è mostrato in figura 1.15, dove sono raccolti i risultati di prove di indentazione eseguite in [30] su laminati caratterizzati dalla stratificazione già specificata nella discussione delle figure 1.8 e 1.9 utilizzando un percussore di 12.7 mm di diametro. Il motivo per cui laminati più spessi coprono un campo di energie più ampio dipende dal fatto che, al di là di un livello di energia crescente con lo spessore, il percussore penetra il pannello, attraversandolo e proseguendo la sua corsa.

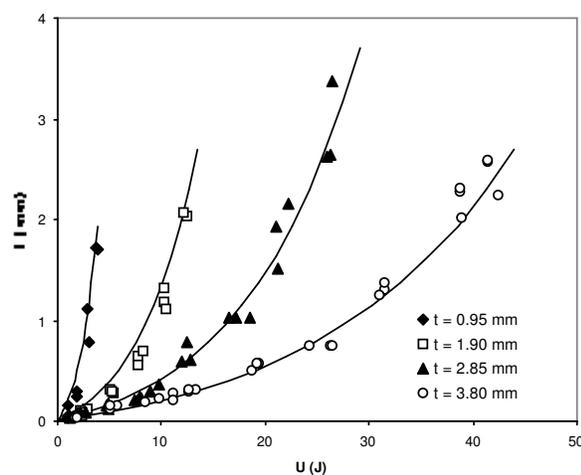


Fig. 1.15 - Variazione dell'indentazione, I , in funzione dell'energia d'urto, U , per laminati in carboresina di spessore t differente.

È intuitivo che la profondità dell'impronta sia direttamente proporzionale all'energia d'impatto, pertanto una relazione del tipo

$$U = U(I) \quad (1.7.1)$$

dove $U(I)$ è una funzione monotona di I , permetterebbe di risalire noto il sistema materiale e le condizioni al contorno, all'energia d'impatto da una misura d'indentazione.

In letteratura [31-32], sono stati proposti alcuni modelli capaci di predire la resistenza residua di un laminato in composito soggetto ad impatto a bassa velocità, come funzione dell'energia d'impatto:

$$\frac{\sigma_R}{\sigma_V} = \sigma(U) \quad (1.7.2)$$

essendo σ_R e σ_V la resistenza residua dopo impatto e quella del materiale vergine, rispettivamente.

Combinando le equazioni (1.7.1) e (1.7.2), si ottiene:

$$\frac{\sigma_R}{\sigma_V} = \sigma[U(I)] \quad (1.7.3)$$

Parrebbe quindi possibile stabilire la resistenza residua dalla misura dell'indentazione nota la resistenza del materiale vergine; in effetti è necessario fare alcune considerazioni:

1. la dispersione nei valori dell'indentazione potrebbe inficiare la predizione della resistenza residua;
2. riguardo la resistenza a compressione, l'equazione 1.7.2 può assumere una forma complicata a causa degli effetti della delaminazione sul meccanismo di propagazione del danno;
3. alcuni autori hanno osservato che, in conseguenza dei fenomeni viscoelastici, il valore dell'indentazione diminuisce durante il tempo intercorrente tra l'impatto e la misurazione, complicando notevolmente l'applicabilità della (1.7.1) eccetto ai casi di impatto durante la fabbricazione o le operazioni di manutenzione.

Caprino e Lopresto [33] hanno compiuto uno studio avente come obiettivi:

1. accertare la possibilità di stabilire una relazione tra l'indentazione e l'energia d'impatto [eq. 1.7.1];
2. verificare la possibilità di predire la resistenza residua (a trazione) dalla misura dell'indentazione [eq. 1.7.3].

Hanno verificato che se si esprime la legge dell'indentazione in funzione dell'energia d'impatto, adimensionalizzata rispetto l'energia di penetrazione, i risultati, per un dato sistema fibra/resina, sono sostanzialmente indipendenti dall'architettura e dalle orientazioni del rinforzo nonché dallo spessore del laminato e dal contenuto di resina; suggerendo, inoltre, che anche il tipo di fibra e di resina hanno un effetto secondario sulla relazione tra la profondità dell'indentazione e l'energia adimensionalizzata. Il modello analitico di valutazione della resistenza residua in funzione della profondità dell'impronta è in ottimo accordo con i dati sperimentali.

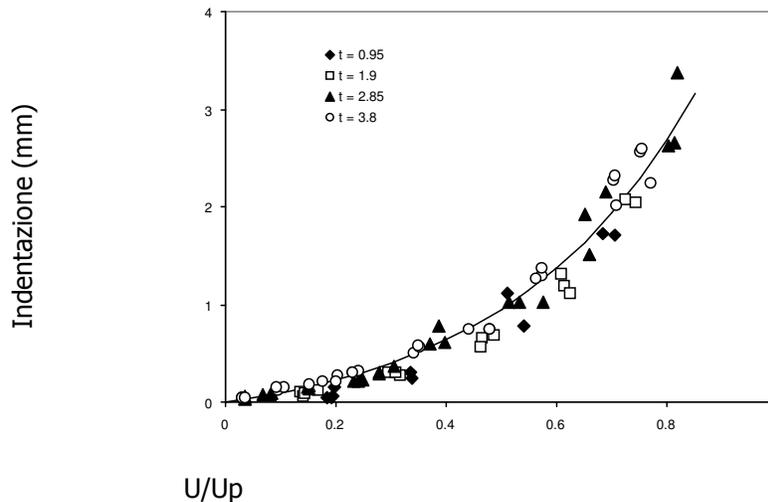


Fig. 1.16 - Variazione dell'indentazione, I , in funzione dell'energia d'urto adimensionalizzata, per laminati in carboresina di spessore t differente. Gli spessori indicati in didascalia si intendono in mm.

L'energia limite per la penetrazione, U_p , è stata misurata in [30] per tutti i laminati considerati. In figura 1.16 gli stessi dati di figura 1.15 sono diagrammati in funzione dell'energia adimensionalizzata U/U_p .

Impiegando quest'ascissa, tutti i punti si raggruppano in un'unica curva maestra, mostrando che l'indentazione in laminati di spessore differente è identica quando ad essi viene impartita la stessa aliquota dell'energia di penetrazione.

La curva a tratto continuo in figura 2.7.2 è la rappresentazione grafica dell'equazione empirica:

$$I = k \cdot \left(10^{\gamma \frac{U}{U_p}} - 1\right) \quad (1.7.4.)$$

proposta in [30] per il calcolo dell'indentazione.

Nell'eq. (1.7.4) k , γ sono due costanti che, calcolate in base ai dati di figura 1.16, valgono $k = 0.288$ mm e $\gamma = 1.269$.

Tali costanti sembrano indipendenti dalla stratificazione del laminato, dal tipo di matrice e dall'orientazione ed architettura delle fibre nelle diverse lamine, purché l'anisotropia del composito sia moderata [30].

Inoltre, k e γ sono scarsamente sensibili alla velocità d'impatto e alle condizioni di vincolo; a tutt'oggi, non esistono esperienze che mostrino se esse siano influenzate dal diametro del percussore e dalla natura delle fibre.

Per determinare il livello di energia in corrispondenza del quale un laminato assegnato sviluppi un'indentazione al limite del visibile, nel settore aeronautico si eseguono solitamente prove ripetute ad energia crescente, fino ad ottenere il risultato desiderato.

La disponibilità dell'eq. (1.7.4) semplifica notevolmente questa procedura: conoscendo l'energia di penetrazione, da essa si può valutare immediatamente l'energia U che determina l'indentazione assunta come limite del danno visibile.

Peraltro, in [34] è stato mostrato che anche U_p può essere calcolata con buona approssimazione mediante la formula:

$$U_p = K \cdot (t \cdot V_f \cdot D_t)^\alpha \quad (1.7.5)$$

dove K e α sono due costanti dipendenti unicamente dal tipo di fibra, che nel caso specifico delle carboresine valgono rispettivamente $K = 0.49$ J/mm^{2 α} e $\alpha = 1.40$.

Il simbolo V_f nella formula rappresenta invece il volume relativo di fibre.

Nelle stesse prove a cui si riferiscono le figure 1.15 e 1.16 sono state eseguite anche alcune misure dell'estensione dell'area delaminata.

La figura 1.17 riporta la relazione esistente fra quest'ultima e l'indentazione per ognuno degli spessori presi in considerazione.

È evidentissima la dipendenza del legame funzionale fra le due grandezze dallo spessore del laminato: per laminati sottili, la delaminazione si estende relativamente poco, ed è accompagnata da un'impronta consistente; viceversa, laminati più spessi presentano aree delaminate di notevole estensione, pur non rivelando un chiaro segnale dell'urto all'analisi visiva.

Da questo punto di vista, è emblematico il pannello di 3.8 mm di spessore: quando la dimensione di A supera i 2500 mm², l'indentazione è di circa 0.3 mm, molto inferiore ai valori di I usualmente associati al limite del visibile.

Da quanto appena esposto si ricava che l'analisi visiva è di gran lunga più problematica per strutture in composito di grosso spessore che per strutture costituite da laminati sottili.

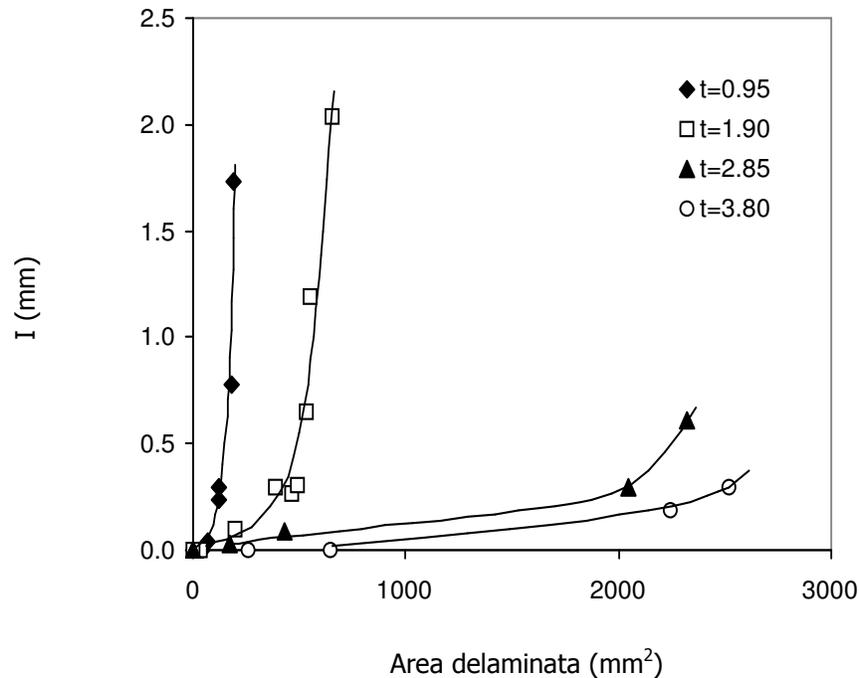


Fig. 1.17- Indentazione I in funzione dell'area delaminata per laminati in carboresina di diverso spessore t . Gli spessori indicati in didascalia si intendono in mm .

1.8 Conclusioni

I risultati presentati e discussi in questo lavoro, dedicato ai fenomeni di frattura che si verificano in laminati sottili in carboresina in seguito ad urti a bassa velocità, supportano le seguenti conclusioni:

- la prima rottura di un laminato, consistente in fratture intralaminari che coinvolgono la sola matrice, appare legata alla forza massima di contatto che si sviluppa fra materiale e percussore, più che all'energia impartita; la forza critica per la prima rottura può essere prevista mediante una semplice equazione basata sulla legge di contatto hertziano, che cade in difetto soltanto quando sono presi in esame laminati particolarmente sottili impattati con un punzone di diametro elevato;
- l'indentazione provocata da un percussore di diametro noto è associata all'aliquota di energia di penetrazione impiegata nell'urto, cioè al rapporto fra l'energia d'urto e

quella di penetrazione che compete al pannello; l'utilizzazione di questo parametro adimensionale rende la profondità dell'impronta indipendente dallo spessore del laminato, e ne permette il calcolo mediante una formula empirica recentemente proposta in letteratura; ulteriori prove dovrebbero accertare se le costanti che appaiono nella formula dipendono dalla natura delle fibre di rinforzo e dal diametro del contundente;

- il problema della previsione dell'area delaminata in funzione dei parametri di prova è ancora irrisolto e necessita di ulteriori sviluppi in termini sia di dati sperimentali che di modellazioni teoriche; i risultati a disposizione permettono tuttavia di affermare che sia la resistenza al danno da impatto che la visibilità del danno decrescono al crescere dello spessore del laminato, rendendo difficoltoso il controllo di strutture in composito ad elevato spessore.

PARTE SECONDA

COMPORAMENTO ALL'IMPATTO DI UNA CARBORESINA NCF

CAPITOLO II – MATERIALI E METODI DI PROVA

2.1 Generalità

In questo capitolo sono presentate, in una prima parte, le caratteristiche del materiale oggetto della sperimentazione e la metodologia di fabbricazione dei laminati dai quali sono stati ottenuti i campioni successivamente testati.

Nella seconda parte vengono descritte, invece, le apparecchiature usate per le prove d'impatto e per le misure dell'indentazione e dell'area delaminata.

2.2 Materiale testato

I provini, nel formato 150 x 100 mm, sono stati ricavati, mediante taglio con sega diamantata, da pannelli di fibra di carbonio/resina epossidica.

I pannelli sono stati fabbricati con tecnologia RIFT: secondo questo metodo i pannelli, preformati con lavorazione manuale sono trattati con cicli di cura in sacchi a vuoto.

Durante il processo produttivo sono state avviate infiltrazioni attraverso lo spessore e infiltrazioni lungo il piano della preforma.

Il sistema materiale è costituito da fibre di carbonio unidirezionali e resina epossidica HEXCEL COMPOSITES HEXPLY M36, quest'ultima è un'evoluzione della resina epossidica classica adatta ad alte performance (aerospaziali e industriali). La densità delle M36 è di circa $1,17\text{g/cm}^3$.

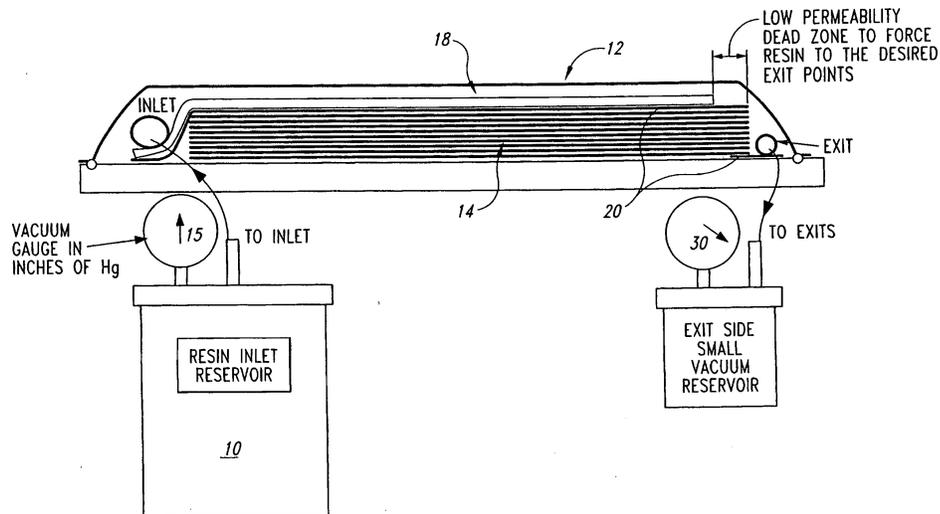


Fig 2.1- Tecnologia produzione pannelli.

Il ciclo di cura ha le seguenti specifiche:

Infiltrazione

- Temperatura resina 80°C
- Temperatura NCF 120°C
- Tempo: fino a riempimento della preforma

Cura

- Riscaldamento a 180°C con velocità di $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$
- Cura a 180°C per due ore

– Raffreddamento con velocità di 2°C/min

Il contenuto di fibre nei laminati è risultato di circa il 55% in volume.

I pannelli dai quali sono stati ricavati i campioni utilizzati per la caratterizzazione ad impatto, rientrano nella classe dei **Non Crimp Fabric** (di seguito anche NCF).

E' da pochi anni che per far fronte al problema della riduzione delle proprietà in piano sono stati sviluppati dei materiali denominati Non-Crimp Fabric (NCF), la cui struttura è costituita da fibre non intrecciate tra loro. I NCF, infatti, vengono assemblati mediante la sovrapposizione di strati successivi (ply) di fibre in cui ogni strato è fatto da insiemi di fibre unidirezionali.

I vari strati sono tenuti insieme da una cucitura e formano una preforma secca.

L'iniezione di resina e la successiva cura sono le ultime operazioni per la realizzazione della struttura in composito. Oltre al vantaggio di avere fibre tra loro non intrecciate, i NCF, grazie alla cucitura dei tow, che fornisce un rinforzo lungo lo spessore, hanno un buon comportamento anche quando sono soggetti a carichi fuori dal piano. Le lamine unidirezionali sono state sovrapposte con angoli [+45°/-45°] e [-45°/+45°] per ottenere laminati simmetrici. La notazione proposta per i suddetti laminati è dunque : $(BA_n, BB_n)^{45}$, dove BA sta per i biassiali lungo la direzione A [+45°/-45°] e BB è il corrispondente simmetrico lungo la direzione B [-45°/+45°]. Sono stati realizzati pannelli aventi lo spessore di 4 mm.

Nella figura 2.2 è rappresentato il processo completo di preparazione della preforma.

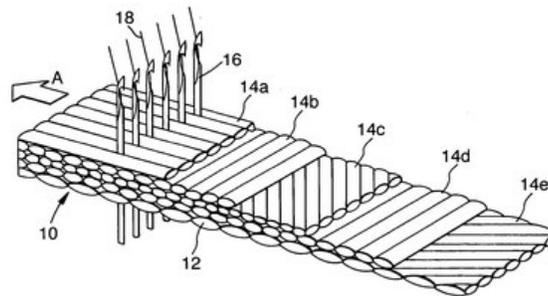


Fig 2.2 - Processo di preparazione della preforma

Come si vede dalla figura 2.2 gli strati sono cuciti nella terza direzione da un filo di poliestere, due strati cuciti insieme formano la lamina dei biassiali, quattro strati cuciti insieme la lamina dei quadriassiali.

Il filo ha l'unico compito di tenere unite le lamine durante la fabbricazione; la sua temperatura di fusione, 120°C, fa sì che si fonda durante la cura dei laminati (180°C).

Il filo di partenza è avvolto su rocchetti/bobine, preferibilmente in tensione. Il controllo della tensione può essere fatto manualmente dagli operatori ma è preferibile che siano installati degli equipaggiamenti per avere dei parametri di tensione misurabili e ripetibili.

I gomitoli sono poi posizionati su una macchina che esegue la cucitura, incroci a $\pm 45^\circ$ e 90° effettuati lungo la direzione della lamina. Gli incroci si ottengono con movimenti di avvolgimento della macchina attorno al pezzo; la direzione 0° corre lungo la lunghezza dell'asse della macchina e per questo non richiede alcun movimento trasversale.

In figura 2.3 sono illustrate le singole fasi di produzione.

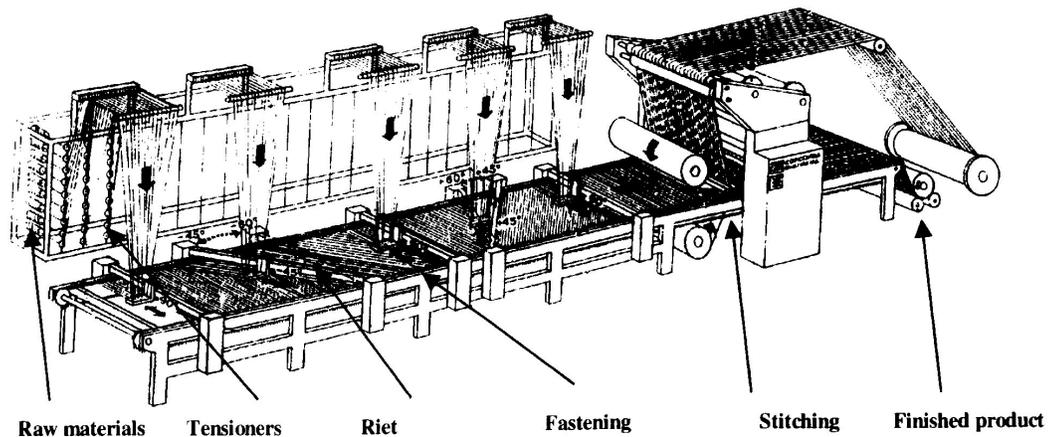


Fig 2.3 - La filiera

La cucitura presenta molte variabili, dal modello al tipo del filo, dal suo diametro alla sua tensione.

Il processo di cucitura è rappresentato in figura 2.4.

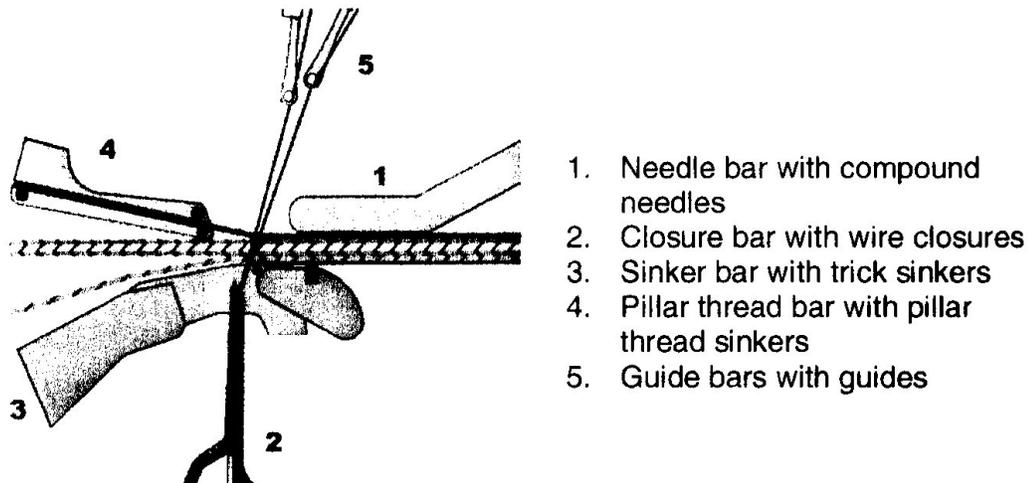


Fig 2.4-La cucitura

Alla fine il materiale superfluo viene tagliato e i gomitolini avvolti nel polietilene e inscatolati.

I laminati che sono stati utilizzati nel presente lavoro di tesi sono suddivisi in due categorie:

1. **quadriassiali** con configurazione: [(45/0/-45/90), (45/0/-45/90), (90/-45/0/45/), (90/-45/0/45).]
2. **biassiali** [(45/-45), (0/90), (45/-45), (0/90), (90/0), (45/-45), (0/90), (45/-45)].

Di questi due gruppi esistono inoltre specifiche configurazioni che si differenziano per il tipo e il modello di cucitura che tiene insieme le lamine unidirezionali.

I **biassiali** si suddividono nelle seguenti 6 sottocategorie:

O = base configuration (configurazione base)

Due strati cuciti con cucitura dritta distanziata di 2 mm con filo di poliestere a bassa tensione

H = high stitch tension (biassiali cuciti ad alta tensione)

Due strati con lo stesso modello di cucitura e spaziatura di quello della configurazione O ma con la tensione del filo di poliestere incrementata durante il processo

L = long stitch

Due strati cuciti con cucitura dritta distanziata di 5 mm con filo di poliestere a bassa tensione

M = mixed chain tricot knit pattern (biassiali cuciti con cucitura mista)

Due strati cuciti con modello di cucitura a zig-zag e distanza 2 mm con filo di poliestere a bassa tensione

G = 2-5 mm gap width

In ogni pacchetto di lamine, due roving sono posizionate insieme e divise dalle altre con divisioni artificiali: la cucitura è dritta e spaziata di 2 mm con filo poliestere a bassa tensione.

T = thermoplastic stitch fibre (biassiali termoplastici)

Due strati cuciti con cucitura dritta distanziata di 2 mm con filo termoplastico a bassa tensione.

I quadriassiali si suddividono nelle seguenti 4 sottocategorie:

O = base configuration (configurazione base)

Quattro strati cuciti con cucitura dritta distanziata di 2 mm con filo di poliestere a bassa tensione

H = high stitch tension (quadriassiali cuciti ad alta tensione)

Quattro strati con lo stesso modello di cucitura e spaziatura della configurazione O ma con la tensione del filo di poliestere incrementata durante il processo

L = long stitch

Quattro strati cuciti con cucitura dritta distanziata di 5 mm con filo di poliestere a bassa tensione

M = mixed chain tricot knit pattern (quadriassiali cuciti con cucitura mista)

Quattro strati cuciti con distanza 2 mm con filo di poliestere a bassa tensione ma con modello di cucitura è a zig-zag.

Nelle tabelle 2.1 e 2.2. sono riassunte le caratteristiche delle varie configurazioni. La prima tabella si riferisce alle configurazioni base la seconda alle altre.

NCF Type	Fibre type	Ply orientation ("a" hand)	Ply orientation ("b" hand)	Knit pattern	Stitch Details: Material Lenght	Stitch Details: Tension
Biaxial	HTS 5631 12K	45/-45	-45/45	Chain polyester	2.5mm	Low
Quadriaxial	HTS 5631 12K	45/0/-45/90	90/-45/0/45	Chain polyester	2.5mm	Low

Tab 2.1- Configurazioni base dei quadriassiali e dei biassiali

NCF variant	Fibre type	Fibre Vf	Ply orientation ("a" hand)	Ply orientation ("b" hand)	Gap	Knit pattern	Stitch Details: Material Length	Stitch Details: Tension
B:H	HTS 5631 12K	50	45/-45	-45/45	0	Chain polyester	2.5mm	High
B:L	"	50	45/-45	-45/45	0	Chain polyester	5mm	Low
B:M	"	50	45/-45	-45/45	0	Mixed-tricot polyester	2.5m	Low
B:G	"	50	45/-45	-45/45	2-5	Chain polyester	2.5m	Low
B:T	"	50	45/-45	-45/45	0	Chain termoplastic	2.5m	Low
B:O	"	50	45/-45	-45/45	0	Chain polyester	2.5m	Low
Q:L	"	50	45/0/-45/90	90/-45/0/45	0	Chain polyester	5mm	Low
Q:M	"	50	45/0/-45/90	90/-45/0/45	0	Mixed-tricot polyester	2.5m	Low
Q:H	"	50	45/0/-45/90	90/-45/0/45	0	Chain polyester	2.5m	High

Tab 2.2- Configurazioni dei quadriassiali e dei biassiali NCF

2.3 Prove d'impatto con carico dinamico

2.3.1 La norma

La norma seguita per questo studio è la EN 6038 che si utilizza per caratterizzare un materiale plastico rinforzato, all'impatto a bassa velocità.

La norma può essere applicata a lamine unidirezionali e a tessuti.

Il principio del metodo prevede che il provino sia sottoposto ad impatto ad energia variabile e sia misurata, poi, la profondità della scalfitura (indentazione).

L'apparecchiatura di prova consiste in:

- Macchina di impatto a caduta di peso capace di bloccare il peso dopo il primo impatto e con elevata precisione nella rivelazione del carico (1% di errore nell'intero range).
- Penetratore a urto strumentato
- Micrometro piano con punta emisferica di diametro inferiore ai 6 mm
- Calibro di profondità con adattatore emisferico, diametro di 3mm
- Macchina da test con elevata precisione nella rivelazione del carico (1% di errore nell'intero range).

I provini devono essere ricavati da laminati mediante lama diamantata che non ne determini la delaminazione.

Il coefficiente di variazione dello spessore nel laminato deve essere inferiore al 2%.

I laminati in carboresina devono essere prodotti in accordo con la EN 2565; prima di essere testati devono essere ispezionati mediante scansione per stabilire la loro integrità.

La misura dello spessore e della larghezza dei provini va ricavata dalla media effettuata su tre misurazioni. Dopo le scansioni 8 provini devono essere testati con i seguenti valori di energia pari a: 9, 12, 16, 20 e 25 joule, con impattatore di massa compresa tra 1 e 3 Kg e 30 e 40 joule con impattatore

di massa compresa tra 4 e 6 Kg. Altri 3 provini devono essere testati ad un energia (E_{BVID}) tale da provocare un'indentazione di 0,3 mm. Tale energia sarà ricavata dalle curve sperimentali I vs U per interpolazione al termine del primo lotto di prove. I provini devono ricevere un solo colpo; il rimbalzo deve essere evitato attraverso un apposito dispositivo di cui deve essere dotata la macchina.

La prova deve essere eseguita su provino asciutto alla temperatura di 23 ± 2 C° e al 50 ± 5 % di umidità relativa, tutto in accordo con la norma EN2743.

L'indentazione deve essere valutata su ogni provino: dal lato della superficie impattata e sulla faccia opposta evidenziando sia l'indentazione visibile sia la rottura delle fibre.

Attraverso un calibro di profondità si misura la profondità dell'indentazione sulla faccia impattata con la seguente procedura:

- Si misura l'indentazione in quattro punti distanti 20 mm dall'impatto centrale (nord, sud, est e ovest) come mostrato in figura 2.5.
- Si misura l'indentazione nel punto in cui è maggiore (punto in cui il campione ha ricevuto l'impatto) sia lungo la linea Nord-Sud che lungo la linea Est-Ovest;

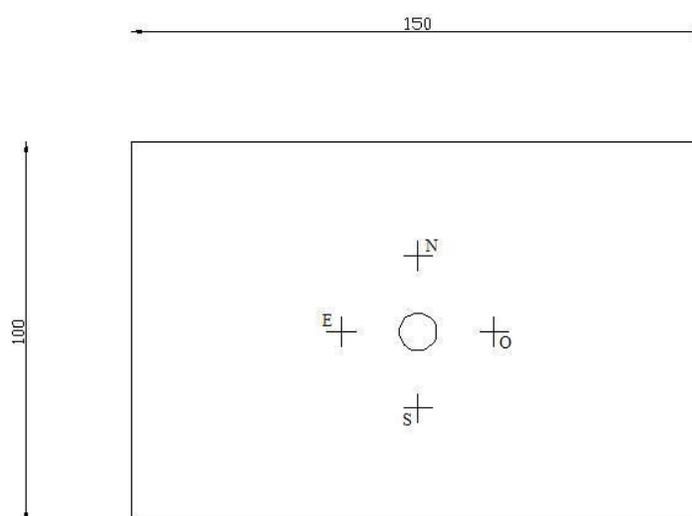


Fig 2.5 - Schema per la misura dell'indentazione

- Si calcolano le seguenti differenze:
 - I centrale – I nord
 - I centrale – I sud
 - I centrale – I est
 - I centrale – I ovest
- Si effettua una media dei quattro risultati ottenuti.

2.3.2 La macchina di prova

La macchina adoperata per effettuare le prove di impatto con carico dinamico è del tipo Ceast Fractovis a caduta di peso (vedi figura 2.6).

Essa permette di variare l'energia di cui è dotata la massa battente (fig. 2.7) in modo continuo, semplicemente agendo sull'altezza iniziale di caduta e sulla massa e di acquisire i dati su un sistema di acquisizione tipo DAS 4000 Fig (2.8).

La massa minima utilizzabile per una prova è di 3,640 Kg pari alla somma delle massa del carrello (2,920 Kg) e del penetratore (0,720 Kg).

Altre masse possono invece essere aggiunte per raggiungere energie di impatto più elevate. L'altezza massima raggiungibile dal carrello è di 1 m. La velocità massima di prova è pari a 4.43 m/s ed è relativa alla caduta della massa battente dall'altezza massima di 1 metro. Il sistema di acquisizione permette di acquisire fino a 4000 punti in una prova; impostato il tempo di prova la macchina calcola in automatico quello di campionamento che nel caso di prova con acquisizione di 4000 punti è pari a quello di prova diviso 4000. La Ceast Fractovis dialoga con un Pc attraverso un software di

comunicazione; dal menu si sceglie l'opzione *cambia parametri strumenti* e si impostano i valori caratteristici della prova (in genere l'energia di impatto). Impostati i parametri si può scegliere di salvarli per una prova successiva. Prima di iniziare il test deve essere eseguita l'operazione di calibrazione; nella realtà tale dicitura è impropria in quanto non si tratta di una vera e propria calibrazione ma di un'operazione di posizionamento del carrello. Dal menu si sceglie calibrazione e attraverso dei pulsanti UP e DOWN si posiziona il carrello all'altezza zero.



Fig 2.6 - La macchina di prova



Fig. 2.7 -La massa battente



Fig. 2.8 -Sistema di acquisizione DAS

A questo punto si pone il provino sul supporto e, attraverso una coppia vite-madrevite, si posiziona il provino in modo che tocchi leggermente la punta del percussore.

A questo punto se si confermano le informazioni inserite nei vari campi appare una barra che dopo un po' comincia a colorarsi di rosso, quando ciò avviene si deve sganciare il carrello per effettuare la prova premendo il tasto SAFETY OFF e poi contemporaneamente i due pulsanti TEST posti sul pannello di comando. In uscita il sistema di acquisizione fornisce fogli di excel con colonne riportanti, in 4000 istanti diversi : tempo, forza, energia, velocità, deformazione. Attraverso i dati così ottenuti si possono costruire i grafici forza-spostamento, forza-tempo, energia-spostamento, energia-tempo caratteristici della prova.

2.3.3 Prove di impatto effettuate

In accordo con quanto previsto dalla norma EN 6038 sono state eseguite prove di impatto, sui provini biassiali e quadriassiali, sia a completa penetrazione sia ad energia variabile (minore dell'energia di penetrazione). Analizzati i risultati e determinata per interpolazione l'energia E_{BVID} , sono state effettuate tre prove ad energia di impatto pari alla determinata E_{BVID} .

Nelle tabelle 2.3 e 2.4 è riportato l'elenco delle prove eseguite rispettivamente sui provini quadriassiali e biassiali al variare delle energie e del diametro del percussore.

Configurazione dei provini quadriassiali	Prove energia variabile (9,12,16,20,25,30,40, E_{BVID}) (J)	Prove a penetrazione	D_p (mm)
H	10	2	16
L	10	2	16
M	10	2	16
O	10	2	16
H	0	1	19,8
L	0	0	19,8
M	8	0	19,8
O	6	1	19,8

Tab 2.3- Prove di impatto effettuate sui campioni quadriassiali

Configurazione dei provini biassiali	Prove a energia variabile (9,16,20,30,40, E_{BVID}) (J)	Prove a penetrazione	D_p (mm)
G	7	1	16
M	7	1	16
O	7	1	16
T	7	0	16
H	7	0	16

Tab 2.4 - Prove di impatto effettuate sui campioni biassiali

2.4 Misura dell'indentazione

2.4.1 Apparecchiatura di prova

Le misure dell'indentazione, intesa come massima profondità dell'impronta lasciata dal corpo contundente in seguito all'impatto, sono state effettuate tramite un comparatore centesimale digitale Mitutoyo con tastatore emisferico abbinato ad una tavola micrometrica, come mostrato in figura 2.9.

Il comparatore è dotato di un display digitale e di un'astina scorrevole verticalmente alla cui estremità c'è un tastatore emisferico con diametro di 5 mm.

Attraverso l'utilizzo della tavola micrometrica è stato possibile muovere il provino lentamente intorno alla posizione in cui il campione era stato colpito dal percussore.

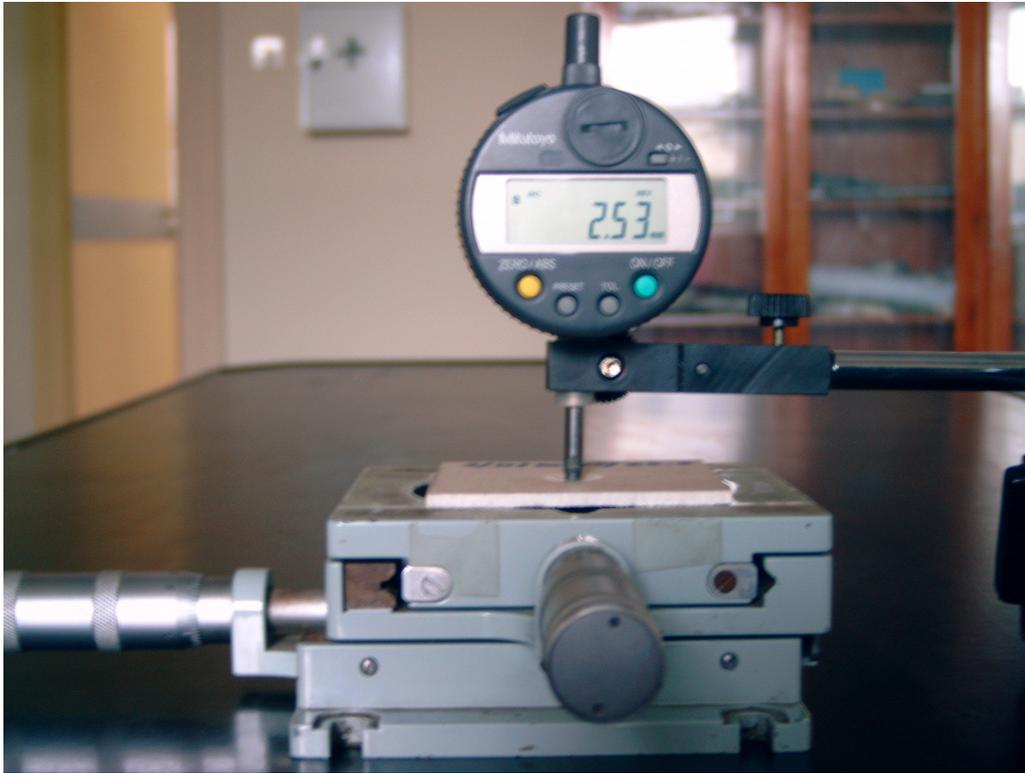


Fig 2.9 - Strumentazione per la misura dell'indentazione

Con questa tecnica è stata valutata la profondità massima dell'impronta e il valore dell'indentazione nei 4 punti a 20 mm di distanza dal punto centrale e, attraverso i calcoli prescritti dalla norma, è stata determinata l'indentazione.

2.4.2 Prove di indentazione

Su tutti i provini impattati, tranne quelli usati per i test a penetrazione, è stata misurata l'indentazione.

Nelle tabelle 2.5 e 2.6 sono riassunte le prove che sono state eseguite.

Configurazione dei provini quadriassiali	Numero misure
H	10
L	10
M	10
O	10

Tab 2.5-Prove di indentazione quadriassiali

Configurazione dei provini quadriassiali	Numero misure
G	7
M	7
O	7
T	7
H	7

Tab 2.6 -Prove di indentazione biassiali

CAPITOLO III

Prove Sperimentali- Analisi dei Risultati

3.1 Introduzione

In questo capitolo si riportano i principali risultati ottenuti dallo studio dei parametri influenzanti la risposta ad impatto a bassa velocità di laminati NCF.

La maggior parte dei risultati reperibili in letteratura sono stati ottenuti mediante utilizzo di macchine di prova del tipo "a caduta di peso"; tale tipologia di prove è detta di *tipo dinamico* ed è, per la modalità di applicazione del carico, la più vicina alle condizioni effettive del "fenomeno di impatto".

Metodi tradizionali come la prova Charpy o quella Izod, generalmente usate per materiali macroscopicamente omogenei, si sono rivelati non adatti quando applicati ai materiali compositi.

In effetti non si è ancora giunti ad una standardizzazione in proposito e la possibilità di eseguire prove di tipo dinamico, di gran lunga più semplici e "controllabili", non può far altro che portare ad un incremento nella comprensione dei fenomeni di rottura che interessano il laminato soggetto ad urto.

Le domande cui vuole dare risposta lo studio sono:

- Esiste la possibilità di una semplice correlazione tra la resistenza residua a trazione e la profondità dell'impronta lasciata all'impattatore?
- A parità di diametro del penetratore, di spessore del provino di energia di impatto cosa suggerisce il confronto tra prove su campioni con differenti configurazioni?

- Come si sviluppa e come si propaga il danno in questi laminati?
- Quale è la legge che ci consente di risalire all'energia di impatto semplicemente misurando la profondità dell'impronta?
- La relazione che ci fornisce l'energia di penetrazione U_p in funzione dello spessore effettivo delle fibre $V_f \times t \times D_p$ resta valida?
- L'indentazione dipende dal diametro del penetratore in prove dinamiche ad impatto a bassa velocità? Ed in che modo?
- Esiste una relazione che ci consenta di predire l'area delaminata al variare delle condizioni d'impatto?

3.2 Prove di impatto dinamico

3.2.1 Materiale testato

I provini utilizzati nelle prove sono stati ricavati da pannelli di fibra di carbonio/resina epossidica.

I pannelli sono stati fabbricati con tecnologia RIFT; una volta preformati con lavorazione manuale sono stati trattati con cicli di cura variabili in sacchi a vuoto.

Il sistema materiale è costituito da fibre di carbonio nel formato HTS e resina epossidica HEXCEL COMPOSITES HEXPLY M36, quest'ultima è un'evoluzione della resina epossidica classica adatta ad alte performance (aerospaziali e industriali). La densità delle M36 è $1,17\text{g/cm}^3$.

Il contenuto di fibre nei laminati è di circa il 55 % in volume.

I laminati sono suddivisi in **quadriassiali** con configurazione: [(45/0/-45/90), (45/0/-45/90), (90/-45/0/45/), (90/-45/0/45).] e **biassiali** [(45/-45), (0/90), (45/-45), (0/90), (90/0), (45/-45), (0/90), (45/-45)]. Di questi due gruppi esistono inoltre specifiche configurazioni che si differenziano per il tipo e il modello di cucitura che tiene insieme le lamine.

La nomenclatura attribuita ai provini è del tipo:

tipo di stratificazione (biassiali o quadriassiali) / configurazione / tecnologia / tipo di prova (penetrazione o energia variabile) / numero progressivo.

Ad esempio la sigla QHL3IM2 sta ad indicare un provino quadriassiale con configurazione H prodotto con tecnologia L3 (rift) sottoposto a una prova di impatto ad energia variabile con il primo valore di energia proposto dalla norma EN6038 ovvero 9J; per ogni configurazione 1 provino è stato lasciato integro (provino 1).

Prima di eseguire i test di impatto tutti i campioni sono stati sottoposti ad una analisi ultrasonica, attraverso l'utilizzo di una macchina di cui si parlerà al capitolo successivo, al fine di evidenziare l'eventuale presenza di difetti di produzione che avrebbero potuto influire sulla resistenza del materiale. I campioni a disposizione sono stati impattati adoperando una macchina CEAST a caduta di peso con la quale è stato possibile fissare i diversi livelli di energia di impatto.

La velocità al momento dell'impatto è sempre stata tenuta nei limiti delle prove a bassa velocità.

Durante il tempo di campionamento, vale a dire durante il brevissimo lasso di tempo che intercorre tra l'istante in cui c'è il primo contatto tra percussore e superficie del provino e l'istante in cui il percussore si ferma, sono stati acquisiti 4000 punti attraverso il sistema di acquisizione dati DAS 4000.

Le prove effettuate possono dividersi in tipologie:

- a penetrazione
- ad energia variabile (con energia inferiore all'energia di penetrazione).

3.3 Prove di penetrazione

Per prova di penetrazione si intende quella condotta in maniera tale da ottenere l'attraversamento completo dell'impattatore attraverso lo spessore dei provini.

Tutte le prove sono state eseguite seguendo la norma EN 6038 come descritto nel precedente capitolo.

Le curve sono state troncate della parte terminale, rappresentativa di un avanzamento del penetratore sotto carico pressoché costante; tale carico indica la forza d'attrito richiesta per far scorrere la parte cilindrica dell'impattatore nel foro che ha generato in seguito all'impatto.

3.3.1 Analisi delle curve di carico F-s

Sono state condotte prove con due diversi percussori; entrambi avevano la testa emisferica, il primo un diametro da 16 mm ed il secondo un diametro da 19,8 mm. Di seguito le prove effettuate con il percussore da 16 mm di diametro si indicheranno con la sigla QA per i quadriassiali e con la sigla BA per i biassiali mentre quelle effettuate con il percussore da 19,8 mm con QB.

Per le prove di tipo QA, nel rispetto della norma EN 6038, sono stati utilizzati i seguenti parametri di prova:

- spessore del provino $t = 4$ mm;
- diametro del percussore $D_p = 16$ mm;
- massa di impatto $M = 15,6$ kg (massa carrello = 2,920 Kg – massa percussore = 0,720 Kg – massa aggiuntiva = 12 Kg);
- velocità di impatto 4,38 m/s
- altezza di caduta $h = 0,98$ m;
- configurazioni testate L,H,M,O.

Per la tipologia QB (quadriassiali con percussore di diametro 19,8 mm) le seguenti condizioni:

- spessore del provino $t = 4$ mm;
- diametro del percussore $D_p = 19,8$ mm;
- massa di impatto $M = 15,6$ kg (massa carrello = 2,920 Kg – massa percussore = 0,720 Kg – massa aggiuntiva = 12 Kg);
- velocità di impatto 4,23 m/s
- altezza di caduta $h = 0,91$ m;
- configurazioni testate H,O.

Per la tipologia BA (biassiali con percussore di diametro 16 mm):

- spessore del provino $t = 4$ mm;
- diametro del percussore $D_p = 16$ mm;
- massa di impatto $M = 15,6$ kg (massa carrello = 2,920 Kg – massa percussore = 0,720 Kg – massa aggiuntiva = 12 Kg);
- velocità di impatto 4,08 m/s
- altezza di caduta $h = 0,84$ m;
- configurazioni testate G,M,O.

In queste condizioni abbiamo proceduto ad una prova di carico fino a completa penetrazione del provino. Successivamente, dall'analisi dei dati ottenuti, sono state costruite le curve F-s.

Nelle figure 3.1 e 3.2 sono rappresentate le curve F-s per i campioni quadriassiali effettuate rispettivamente con percussore da 16 e 19,8 mm.

Nella figura 3.3 sono rappresentate le curve F-s per i biassiali con percussore 16 mm.

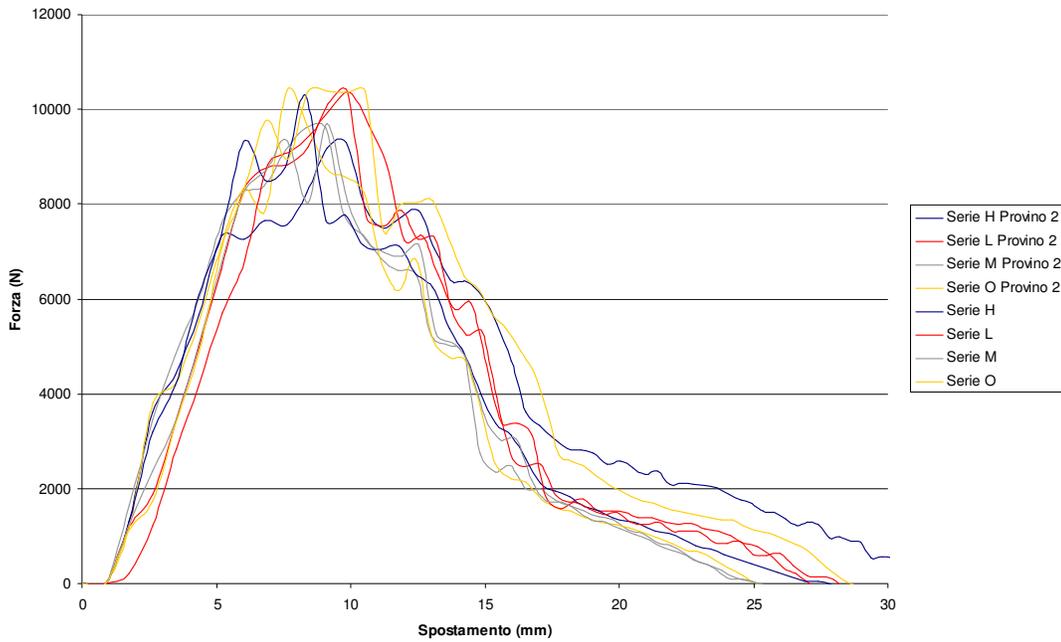


Fig 3.1 -Curve forza spostamento per i provini quadriassiali (D_p 16 mm)

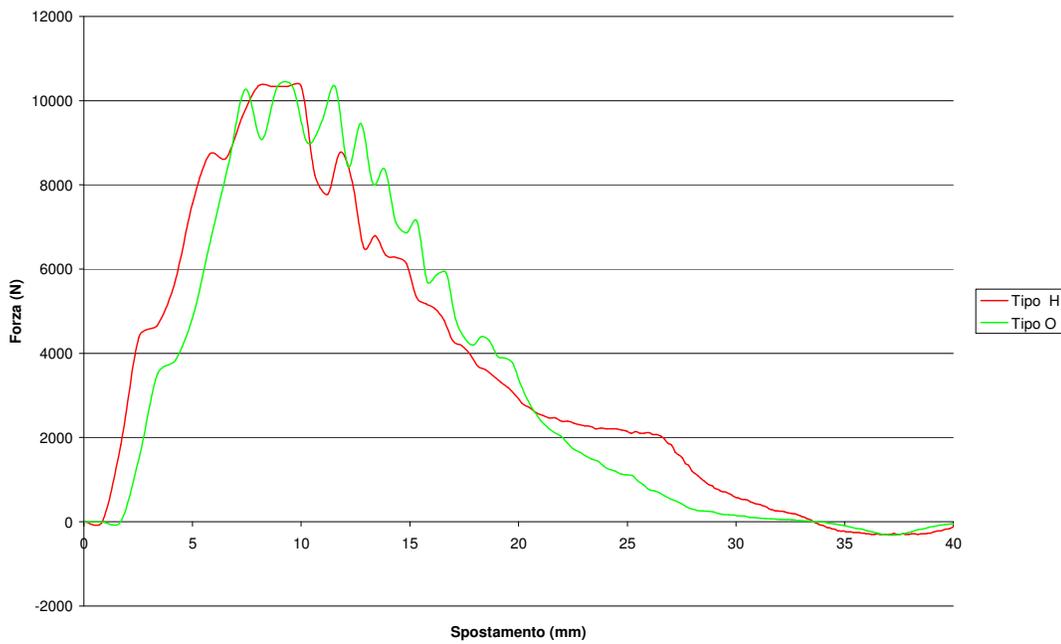


Fig 3.2 -Curve forza spostamento per i provini quadriassiali (D_p 19.8 mm)

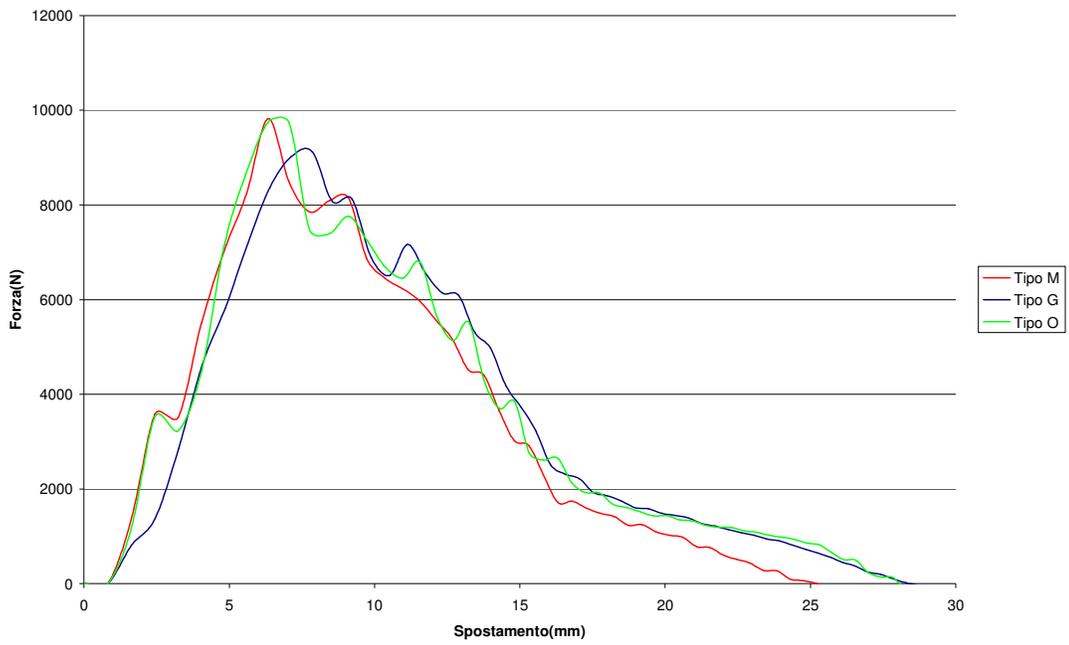


Fig 3.3 -Curve forza spostamento per i provini biassiali (D_p 16 mm)

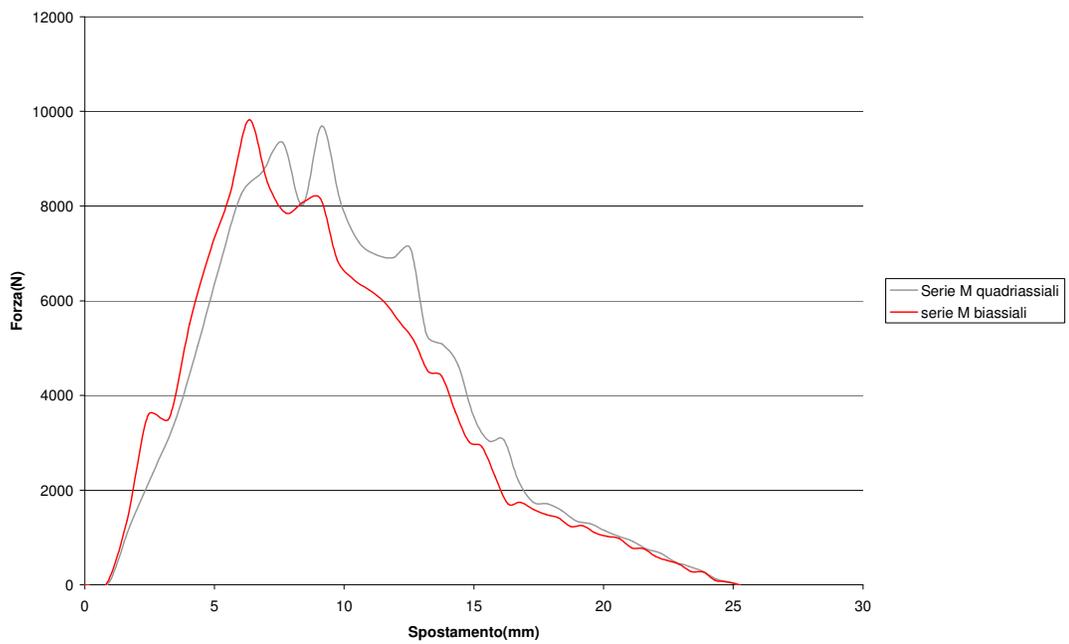


Fig 3.4 - Confronto tra provino biassiale e quadriassiale

I risultati sperimentali ci permettono di affermare che il comportamento del materiale non presenta sostanziali differenze al variare della configurazione. Anche il confronto, a parità di configurazione, spessore, massa e diametro del penetratore tra un provino biassiale e uno quadriassiale (fig. 3.4) non evidenzia sostanziali differenze.

Analizzando la curva F-s si osserva che: per bassi valori del carico si nota una risposta del materiale approssimativamente lineare, dovuta ad una prima fase di deformazione elastica.

All'aumentare del carico si innesta il meccanismo di delaminazione che nel grafico è rappresentato da un'improvvisa caduta di carico.

Quando la delaminazione cessa di propagarsi, il carico riprende a crescere fino al verificarsi di significative rotture delle fibre che si instaurano in corrispondenza alla forza massima.

Le fibre dei vari strati vengono progressivamente rotte e la forza decresce.

Ad un certo punto si verifica il fenomeno della perforazione (passaggio di luce da una parte all'altra del provino) e successivamente quello della penetrazione (il percussore passa da una parte all'altra del provino).

Da questo punto in poi l'area sottesa dalla curva indica l'energia dissipata in attrito, necessaria per far scorrere la parte cilindrica dell'impattatore nel foro che si è creato nel laminato; generalmente quest'ultima parte del diagramma F – s non è oggetto di interesse.

3.3.2 Analisi della curva Energia-spostamento (U-s)

L'area sottesa dalla curva F-s ricavata da una prova di impatto, rappresenta l'energia assorbita dal materiale in seguito al fenomeno d'urto.

E' stata calcolata come somma delle aree dei singoli trapezi rettangoli aventi base maggiore il valore della forza attuale, base minore la forza precedente, e altezza pari alla differenza spostamento attuale-precedente.

Essa presenta un tipico andamento ad "S" e può essere schematizzata in tre parti:

- a) una prima parte della curva è caratterizzata da una piccola pendenza, indicativa della scarsa aliquota di energia assorbita dal materiale fino al valore di forza elastica;
- b) nella seconda parte si osserva un repentino incremento della pendenza, indicante la maggior richiesta di energia per rompere progressivamente le fibre;
- c) il terzo e ultimo tratto della curva è caratterizzato da un ulteriore cambio di pendenza (diminuzione) ed è relativa al fenomeno di strisciamento delle pareti del percussore nello spessore del provino; si ha dissipazione di energia per attrito nel contatto tra le pareti del foro creatosi e la parte cilindrica del punzone.

Nelle figure 3.5 e 3.6 è riportata la sovrapposizione delle curve U-s per le differenti configurazioni dei quadriassiali rispettivamente per D_p 16 mm e D_p 19,8 mm, mentre nella figura 3.7 è riportata la sovrapposizione delle curve U-s per le configurazioni dei biassiali con D_p 16 mm.

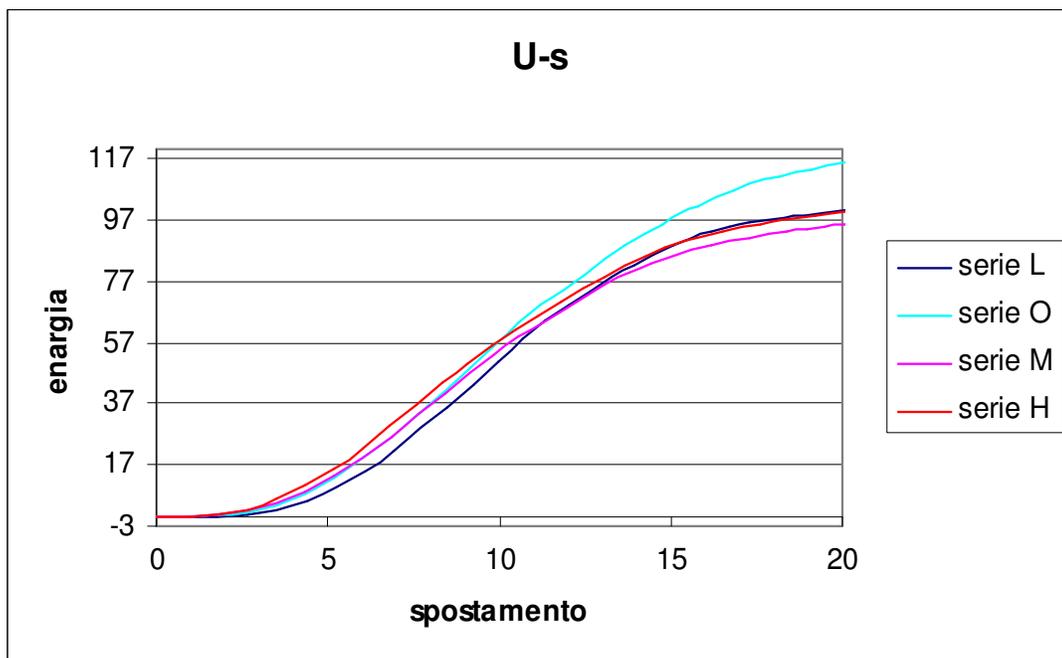


Fig 3.5 - Confronto tra le configurazioni dei provini quadriassiali (D_p 16 mm)

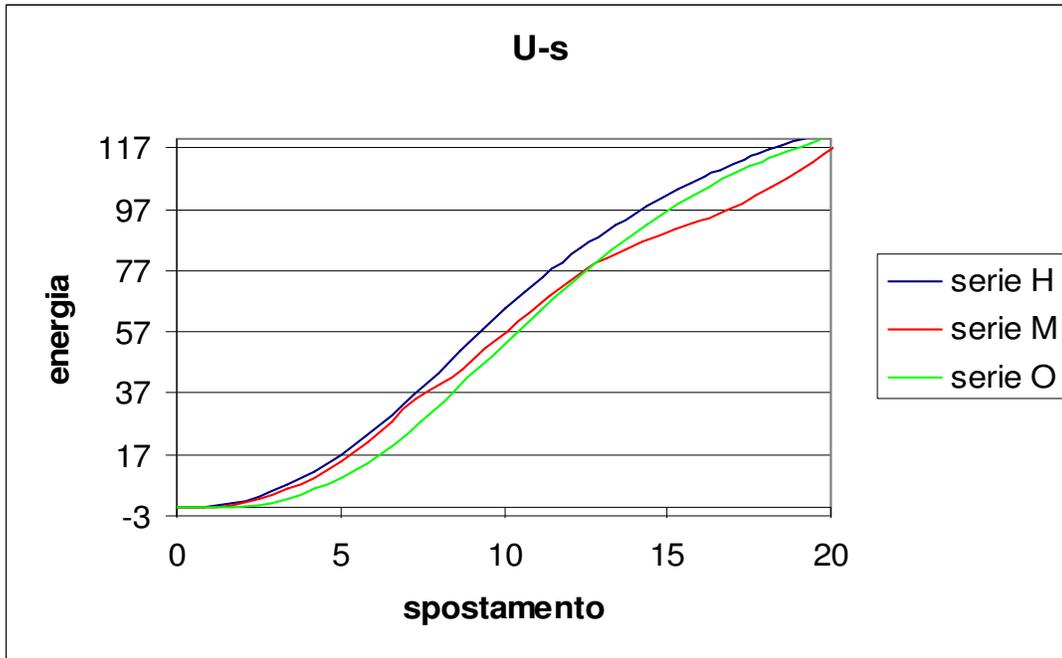


Fig 3.6 - Confronto tra le configurazioni dei provini quadriassiali (D_p 19.8 mm)

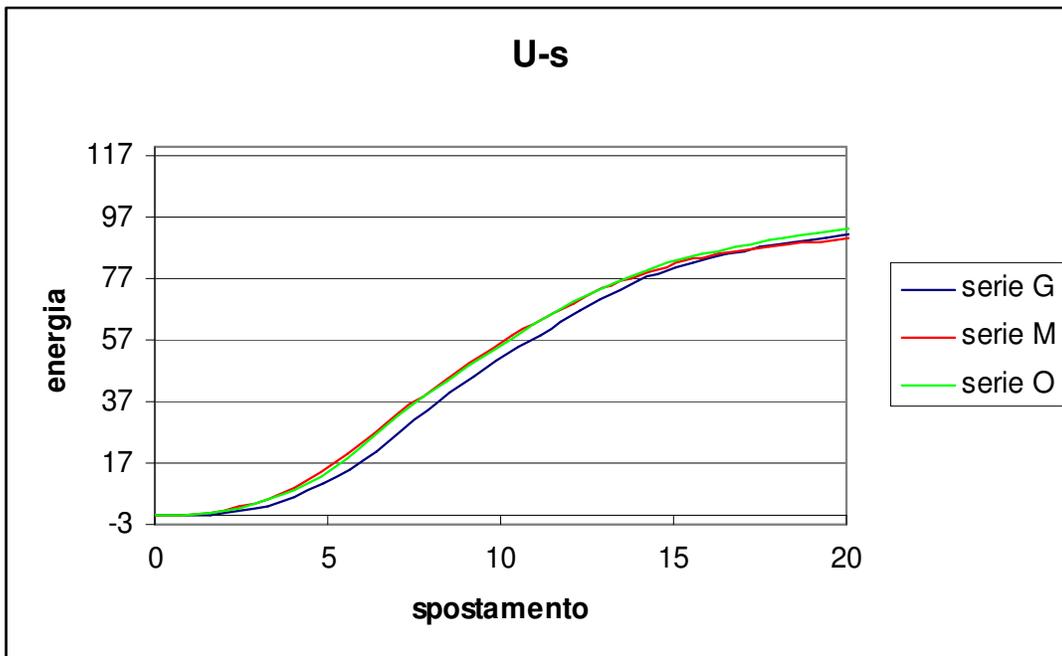


Fig 3.7 - Confronto tra le configurazioni dei provini biassiali (D_p 16 mm)

3.4 Prove ad energia crescente

3.4.1 Introduzione

Come già accennato precedentemente uno degli aspetti cui tende la ricerca è la possibilità di stabilire una relazione tra il danno da impatto e la perdita delle caratteristiche strutturali di un laminato in composito.

È necessaria, pertanto, la possibilità di una catalogazione del danno in base a parametri facilmente misurabili; questa è la "filosofia progettuale" che ha condotto, in ambito aeronautico, al concetto di "danno da impatto appena visibile" (BVID - *Barely Visible Impact Damage* -).

Secondo tale criterio il laminato deve garantire "adeguata sicurezza", in termini di perdita percentuale di resistenza, in presenza di una profondità dell'impronta superiore a $0.3 \approx 0.4$ millimetri.

Purtroppo non sempre il laminato conserva inalterate le proprie caratteristiche meccaniche in presenza di un danno simile; mentre l'indicazione esterna dell'impatto è l'indentazione (intesa nel nostro lavoro come massima profondità dell'impronta), i meccanismi di genesi e sviluppo del danno interessano, principalmente, la parte interna del laminato ed il lato opposto all'impatto, spesso non ispezionabile visivamente.

Inoltre è stato riscontrato che, come conseguenza di fenomeni viscoelastici, il valore dell'indentazione diminuisce durante il tempo intercorrente tra l'impatto e la misurazione.

Trascurando, nell'ambito del presente lavoro quest'ultimo fenomeno, si è cercata una correlazione tra l'energia spesa per la formazione del danno e l'indentazione; una relazione del tipo del tipo:

$$U = U(I), \quad (3.4.1.1)$$

con $U(I)$ funzione monotona di I .

Essendo infatti proposti in letteratura [31-32] alcuni modelli in grado di predire la resistenza residua a trazione di un laminato in composito come funzione dell'energia d'impatto, del tipo:

$$\frac{\sigma_R}{\sigma_V} = \sigma(U), \quad (3.4.1.2)$$

essendo σ_R e σ_V rispettivamente la resistenza residua (dopo impatto) e quella del materiale vergine, sembrerebbe possibile la validità di una relazione del tipo:

$$\frac{\sigma_R}{\sigma_V} = \sigma[U(I)], \quad (3.4.1.3)$$

cioè la possibilità di risalire, da una misura semplice da effettuare, alla resistenza residua del manufatto.

A questo punto si tratterebbe di un lavoro volto alla catalogazione del danno in un unico sistema materiale, per determinati spessori e tipi di impattatore. Vedremo invece che la legge di indentazione risulterà sostanzialmente indipendente dall'architettura delle fibre e dall'orientazione delle stesse nel laminato quando l'energia di impatto verrà adimensionalizzata rispetto l'energia di penetrazione; in altre parole una relazione del tipo:

$$I = I\left(\frac{U}{U_p}\right), \quad (3.4.1.4)$$

è applicabile anche per sistemi materiali diversi.

Inoltre, il valore di U_p è ricavabile con sufficiente accuratezza e per diverse condizioni al contorno e diversi sistemi materiali, attraverso la relazione:

$$U_p = K \cdot D_p^i, \quad (3.4.1.5)$$

con K pari al rapporto $(W_f/\gamma_f)^i$.

Il valore di U ricavabile dalla (3.4.1.4), sostituito in un modello di resistenza residua tipo (3.4.1.3), porta alla determinazione della resistenza residua da una semplice misura dell'indentazione.

Analizziamo il modello di resistenza residua a trazione proposto:

$$\frac{\sigma_R}{\sigma_V} = \left(\frac{U_{\sigma 0}}{U} \right)^\alpha, \quad (3.4.1.6)$$

in esso $U_{\sigma 0}$ ed α sono due costanti da determinare sperimentalmente e di cui la prima rappresenta fisicamente l'energia limite al di sotto della quale non si verifica riduzione di resistenza.

Il valore $U_{\sigma 0}$ è dato dall'area sottesa alla curva di carico fino al valore FFF (figura 3.8) essendo infatti la rottura delle fibre il fenomeno responsabile della diminuzione di resistenza a trazione, piuttosto che la delaminazione.

Tale valore dipende fortemente dal sistema materiale usato e quindi dal valore di *indentazione limite* I_{lim} che è l'indentazione corrispondente a $U_{\sigma 0}$.

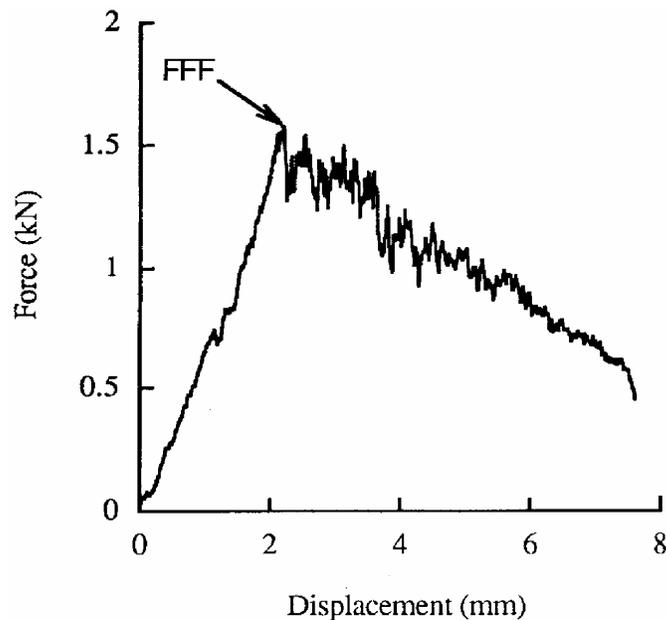


Fig. 3.8 - Rappresentazione schematica di una curva di carico

Ne scaturisce che, per alcuni sistemi materiali, il valore di I_{lim} può essere tanto piccolo da essere praticamente "invisibile" e ben al di sotto dei $0.3 \approx 0.4$ mm.

Resta la validità dell'eq 3.4.1.4 che consente, nell'ambito di queste sperimentazioni accennate, la possibilità di concentrare la ricerca alla specificità della costruzione di relazioni del tipo:

$$\frac{\sigma_R}{\sigma_V} = \frac{\sigma_R}{\sigma_V} \left(\frac{I}{I_{lim}} \right), \quad (3.4.1.7)$$

in cui I_{lim} dipende dal sistema fibre/resina utilizzato.

3.4.2 Prove effettuate

E' stata condotta una campagna di prove seguendo la norma EN6038 e caricando ogni configurazione di provini quadriassiali e biassiali con energie crescenti (9, 12, 16, 20, 25, 30, 40, Joule), per un totale di circa cento prove, mediante la procedura descritta nel capitolo precedente.

Dopo aver eseguito le prove di impatto, su ogni provino è stata misurata l'indentazione e sono stati costruiti i grafici Indentazione vs Energia di impatto; per interpolazione è stata ricavata l'energia corrispondente al valore di indentazione di 0,3 mm.

Con questo valore di energia (E_{BVID}) sono stati impattati tre provini per ogni configurazione quadriassiale e due per ogni configurazione biassiale.

Al fine di indagare, mediante l'ausilio di tecniche di controllo distruttive (microscopia) e non distruttive (ultrasuoni), sulla genesi e propagazione del danno nel laminato testato, ogni configurazione è stata soggetta a tipologie di prove mirate ad individuare cosa accade alla superficie del provino, ed internamente ad esso, in corrispondenza di punti ben precisi della curva di carico.

In particolare sono stati presi in considerazione valori immediatamente precedenti ed immediatamente successivi alla forza elastica e alla forza massima e punti successivi a questa per indagare sul meccanismo di perforazione inteso come rottura successiva delle fibre nelle varie lamine.

Nelle figure 3.9 - 3.15 sono riportate le curve di carico della configurazione quadriassiale H, impattata con percussore di D_p 16 mm, alle differenti energie di impatto.

In figura 3.16 sono riportate, su un unico grafico, le curve relative alle prove eseguite alle differenti energie di impatto.

In maniera analoga in fig. 3.17-3.24 sono stati costruiti i grafici per le altre configurazioni di biassiali e quadriassiali.

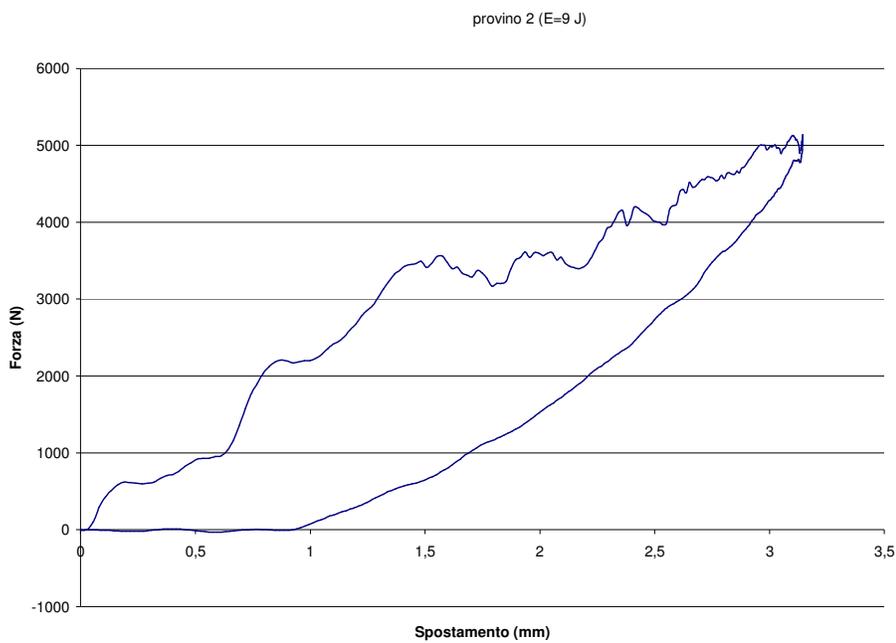


Fig 3.9 -Provino quadriassiale serie H prova a 9 J

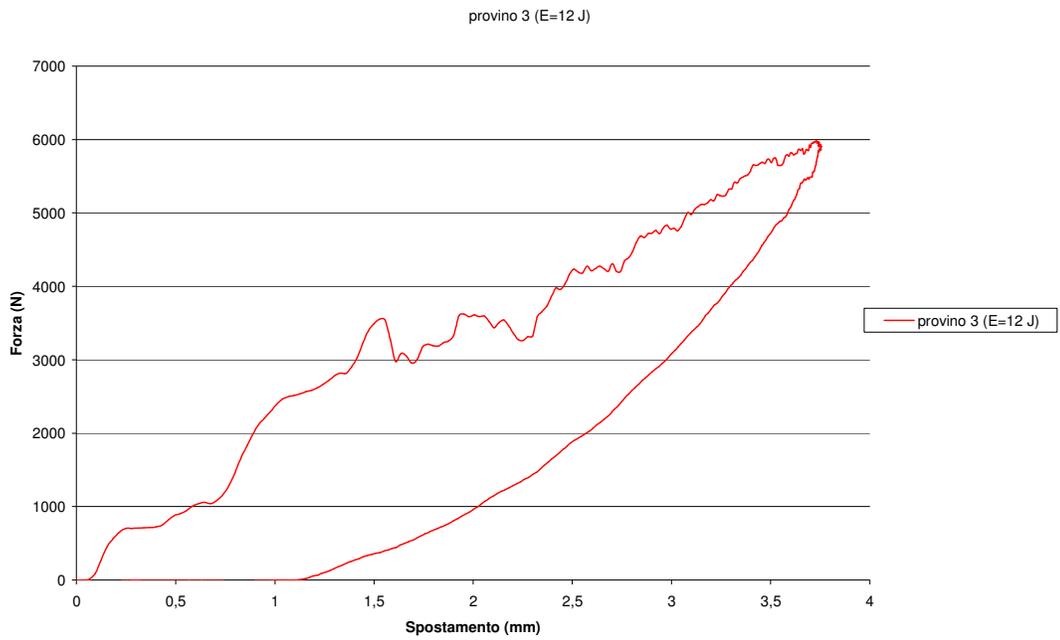


Fig 3.10 -Provino quadriassiale serie H prova a 12 J

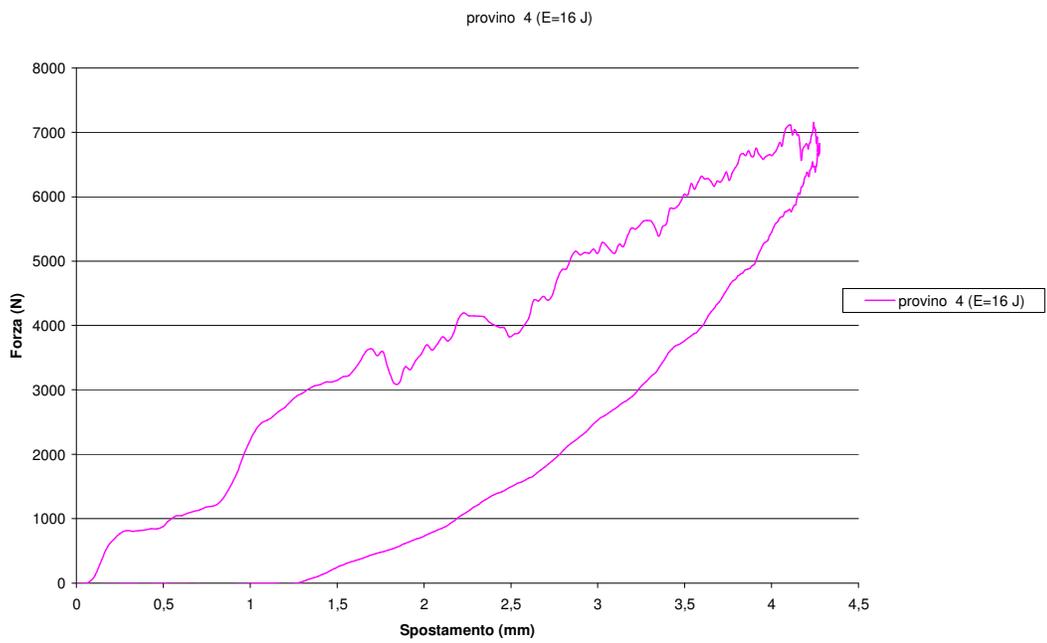


Fig 3.11 - Provino quadriassiale serie H prova a 16 J

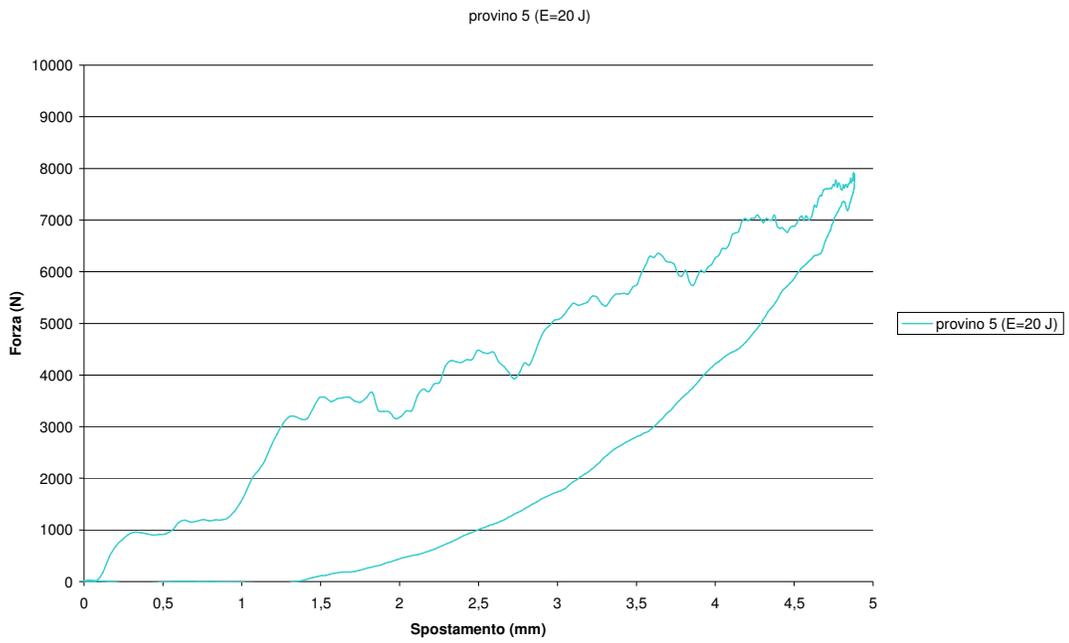


Fig 3.12 - Provino quadriassiale serie H prova a 20 J

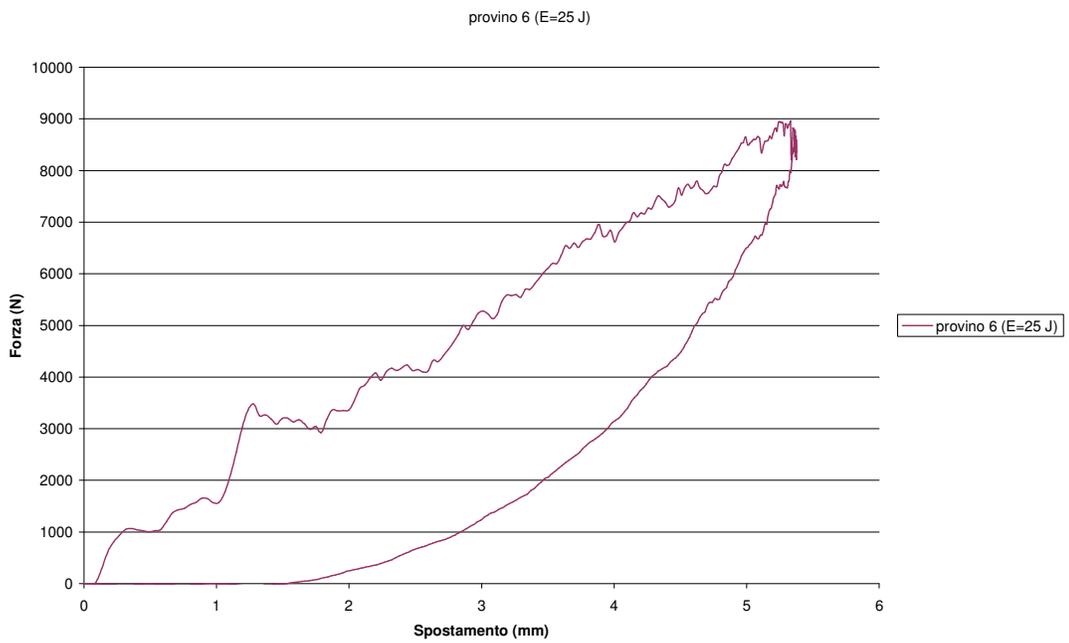


Fig 3.13- Provino quadriassiale serie H prova a 25 J

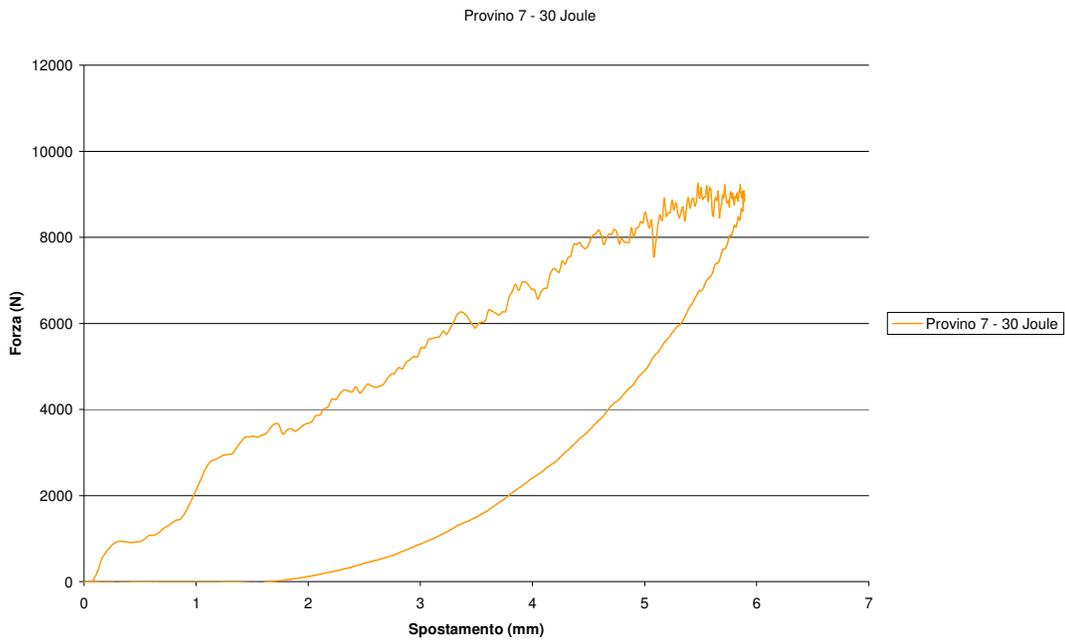


Fig 3.14 -Provino quadriassiale serie H prova a 30 J



Fig 3.15 -Provino quadriassiale serie H prova a 40 J

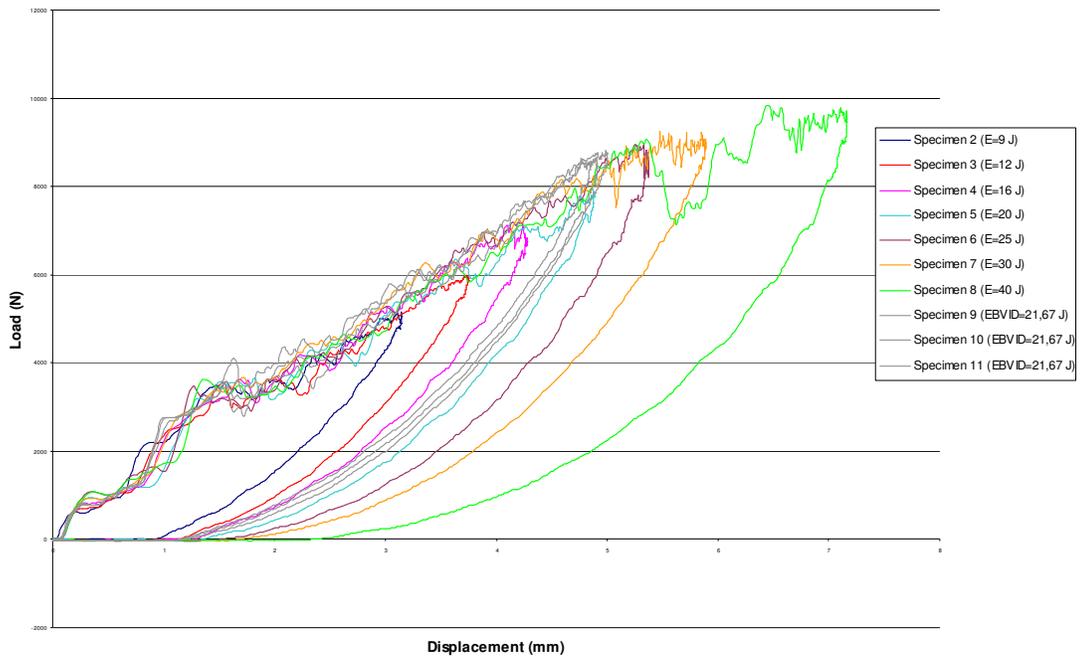


Fig 3.16- Provini quadriassiali configurazione H

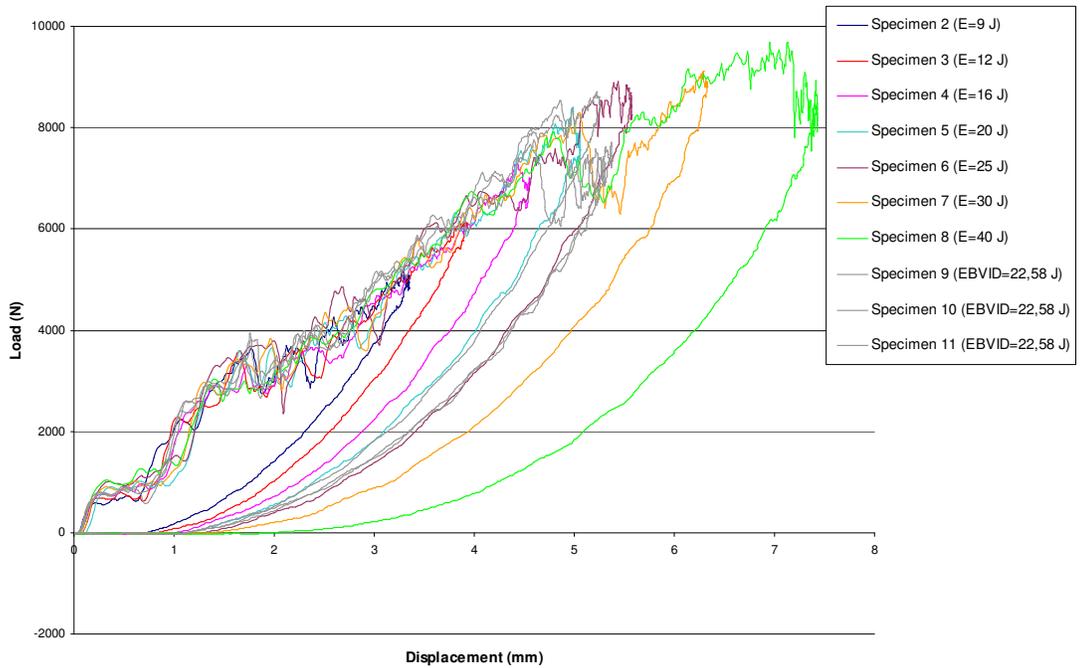


Fig 3.17 -Provini quadriassiali configurazione L

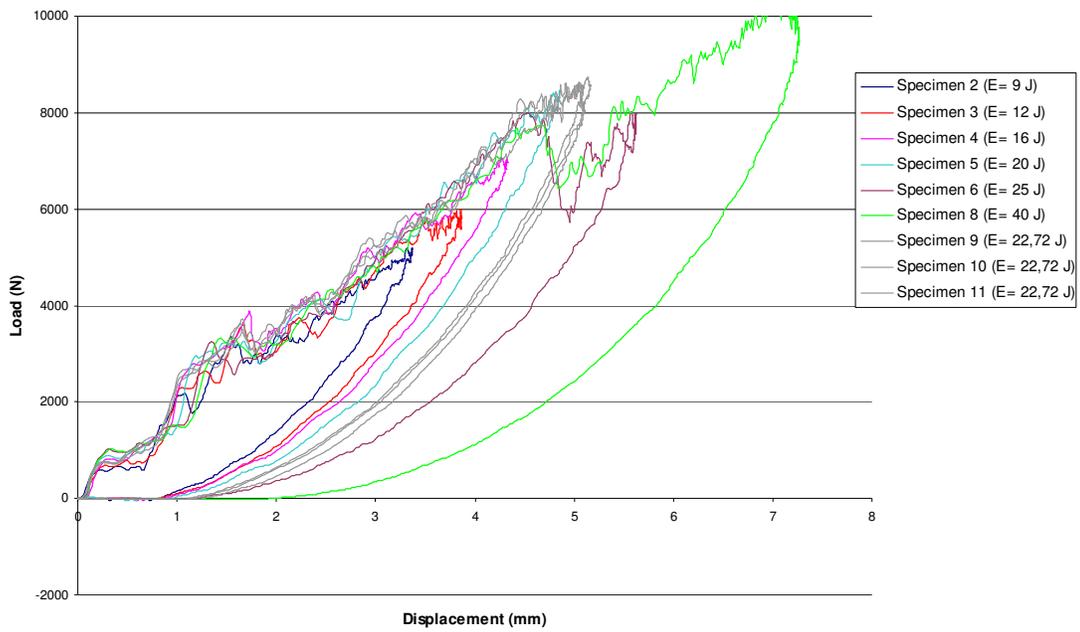


Fig 3.18 -Provini quadriassiali configurazione O

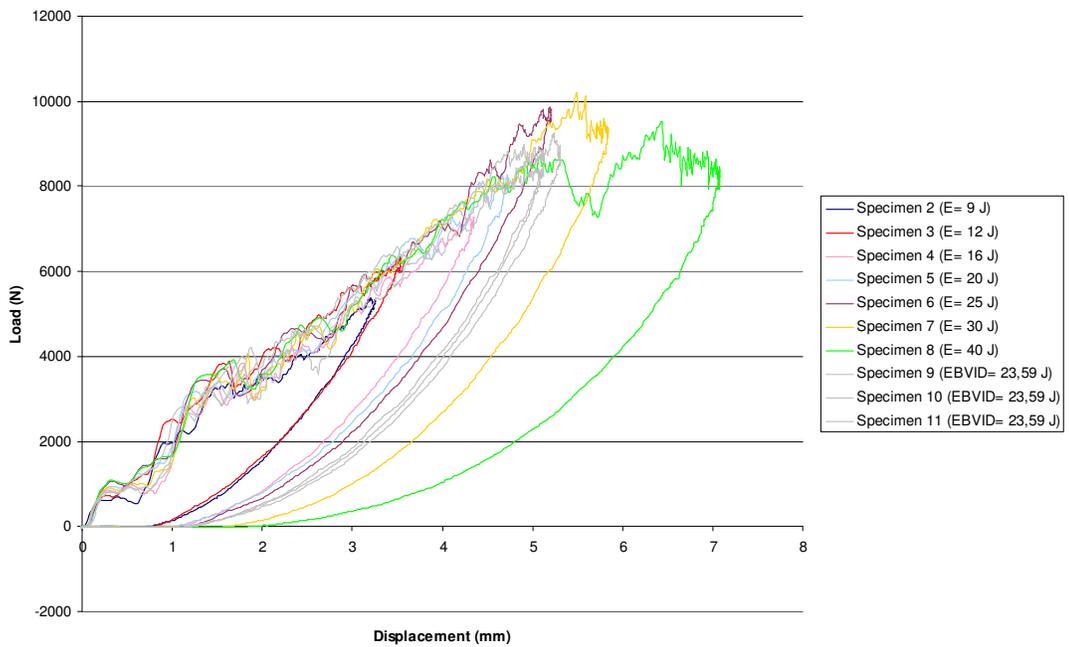


Fig 3.19 -Provini quadriassiali configurazione M

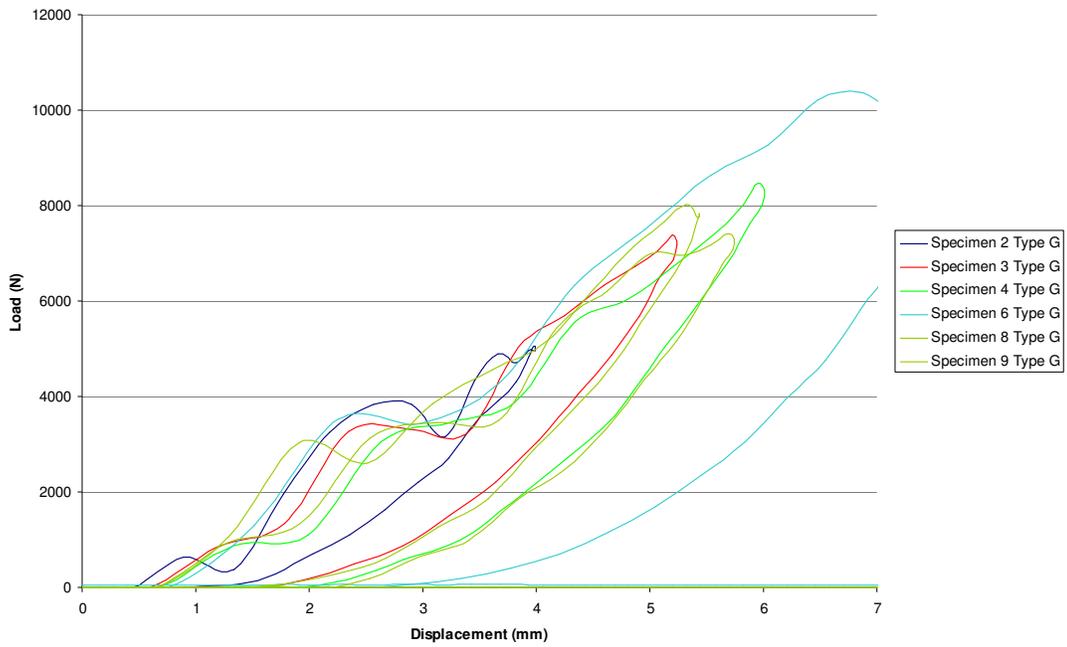


Fig 3.20 -Provini biassiali configurazione G

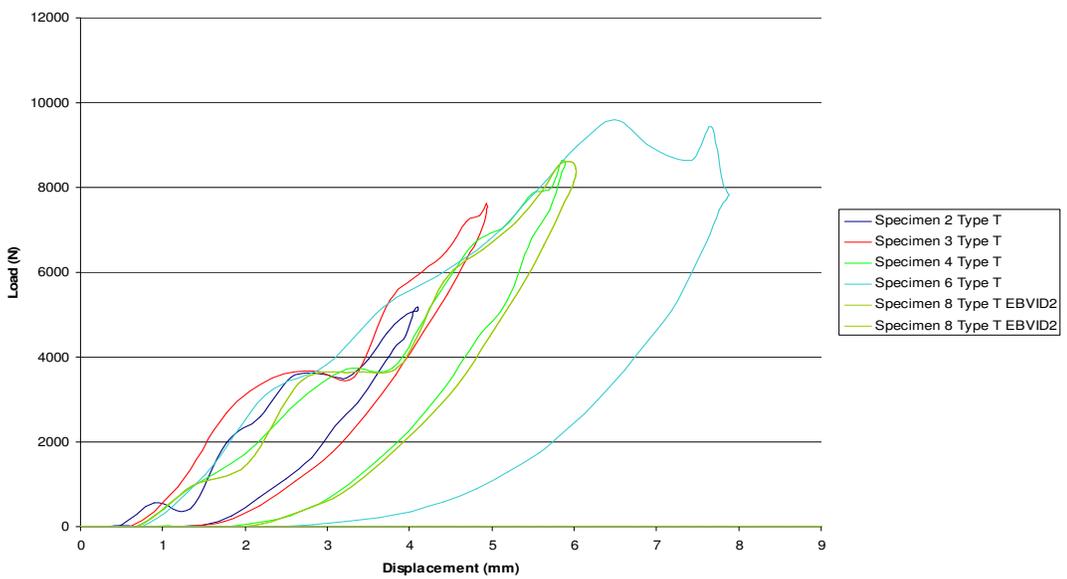


Fig 3.21 -Provini biassiali configurazione T

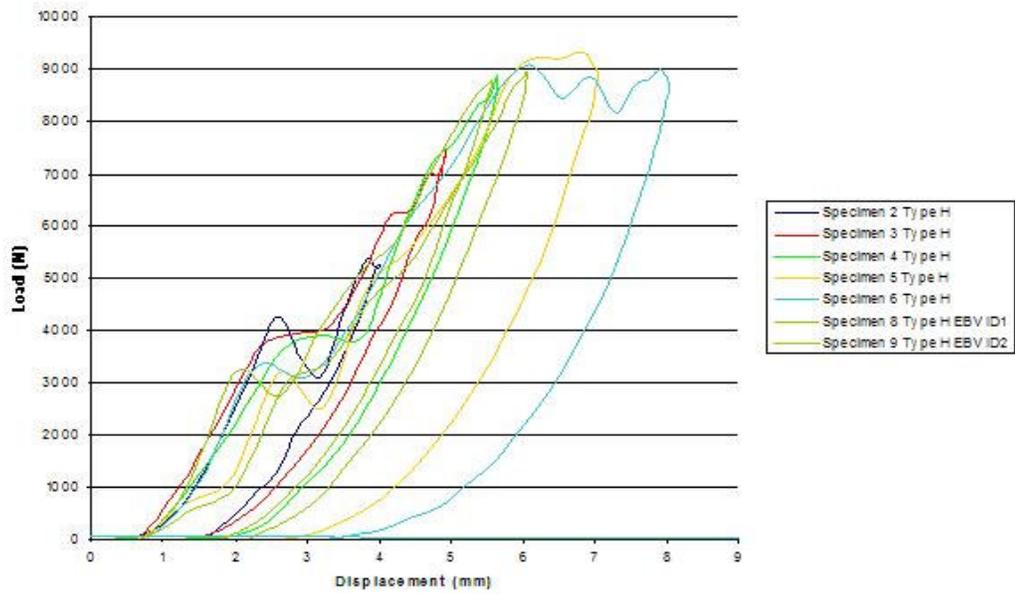


Fig 3.22 -Provini biassiali configurazione H

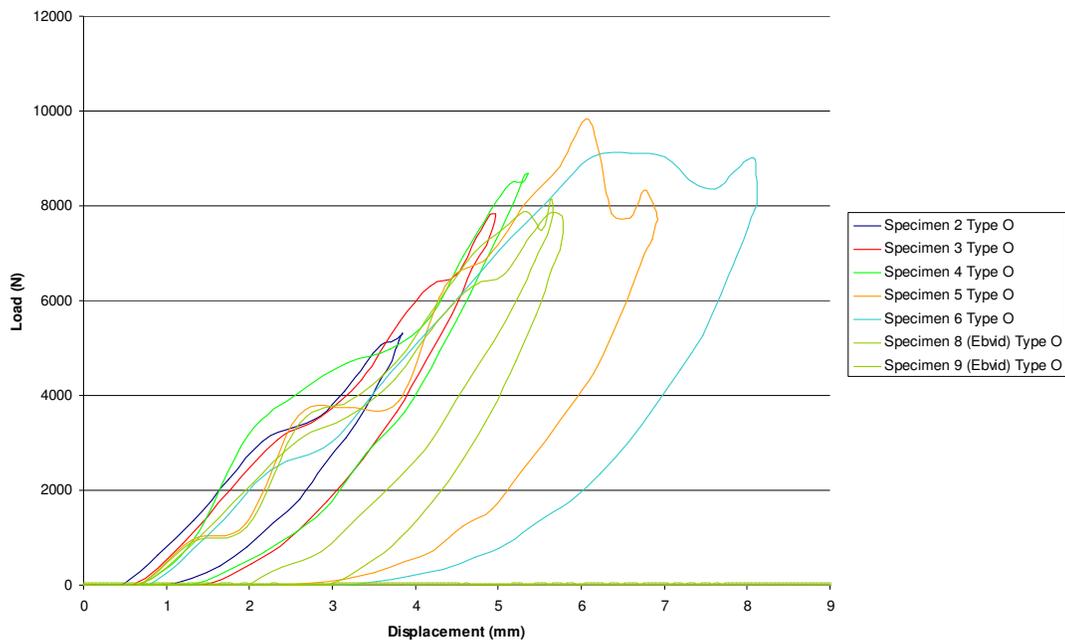


Fig 3.23 -Provini biassiali configurazione O

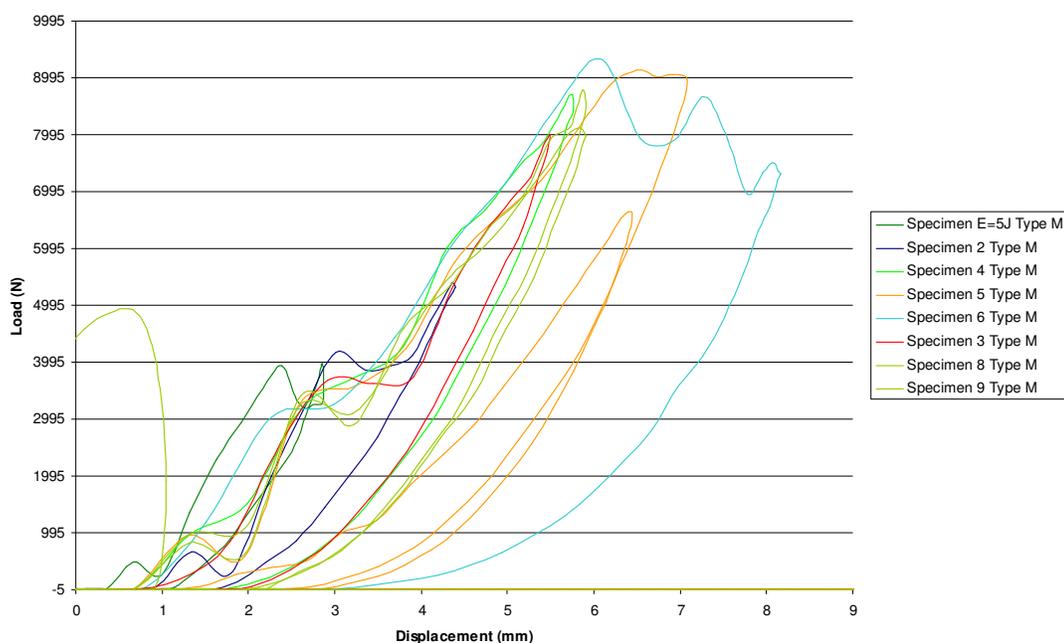


Fig 3.24 -Provini biassiali configurazione M

3.5 Indentazione

La misura dell'indentazione, così come già detto in precedenza, è stata effettuata con l'ausilio di un comparatore centesimale del tipo Mitutoyo a due cifre significative.

Nelle tabelle seguenti (tab 3.1- 3.2) sono riportate le misure di indentazione rispettivamente per i campioni quadriassiali impattati con percussore di diametro di 19,8 mm e con D_p 16 mm.

La tabella 3.3 riporta le misure di indentazione per i campioni biassiali con D_p 16 mm.

Il valore da considerare è, come specificato nel capitolo precedente, quello che in tabella è indicato come I_{medio} .

<u>Provino</u>	<u>I Nord</u> <u>(mm)</u>	<u>I Sud</u> <u>(mm)</u>	<u>I Est</u> <u>(mm)</u>	<u>I Ovest</u> <u>(mm)</u>	<u>I centro</u> <u>(mm)</u>	<u>I medio</u> <u>(mm)</u>
<u>QMLIM2</u>	<u>0,01</u>	<u>0,05</u>	<u>0,02</u>	<u>0,00</u>	<u>0,10</u>	<u>0,08</u>
<u>QMLIM3</u>	<u>0,02</u>	<u>0,02</u>	<u>0,05</u>	<u>0,02</u>	<u>0,16</u>	<u>0,13</u>
<u>QMLIM4</u>	<u>-0,01</u>	<u>0,04</u>	<u>0,00</u>	<u>0,00</u>	<u>0,26</u>	<u>0,25</u>
<u>QMLIM5</u>	<u>0,01</u>	<u>0,00</u>	<u>0,01</u>	<u>0,01</u>	<u>0,28</u>	<u>0,27</u>
<u>QMLIM6</u>	<u>0,00</u>	<u>-0,03</u>	<u>0,07</u>	<u>0,00</u>	<u>0,29</u>	<u>0,28</u>
<u>QMLIM7</u>	<u>0,01</u>	<u>-0,08</u>	<u>0,03</u>	<u>0,00</u>	<u>0,40</u>	<u>0,41</u>
<u>QHLIM50J</u>	<u>0,01</u>	<u>-0,12</u>	<u>0,11</u>	<u>0,00</u>	<u>0,64</u>	<u>0,64</u>
<u>QHLIM60J</u>	<u>-0,01</u>	<u>0,10</u>	<u>0,11</u>	<u>0,03</u>	<u>1,06</u>	<u>1,00</u>
<u>QOLIM2</u>	<u>0,00</u>	<u>0,05</u>	<u>0,01</u>	<u>0,01</u>	<u>0,15</u>	<u>0,13</u>
<u>QOLIM3</u>	<u>0,03</u>	<u>0,20</u>	<u>0,02</u>	<u>-0,02</u>	<u>0,26</u>	<u>0,20</u>
<u>QOLIM4</u>	<u>0,00</u>	<u>-0,08</u>	<u>0,03</u>	<u>0,00</u>	<u>0,23</u>	<u>0,24</u>
<u>QOLIM5</u>	<u>0,03</u>	<u>0,20</u>	<u>0,02</u>	<u>0,00</u>	<u>0,36</u>	<u>0,30</u>
<u>QOLIM6</u>	<u>0,07</u>	<u>0,15</u>	<u>-0,05</u>	<u>0,01</u>	<u>0,44</u>	<u>0,39</u>
<u>QOLIM7</u>	<u>0,06</u>	<u>0,26</u>	<u>0,07</u>	<u>0,00</u>	<u>0,6</u>	<u>0,50</u>

Tab 3.1-Valori delle indentazioni per provini quadriassiali (D_p 19,8 mm)

<u>Provino</u>	<u>I Nord</u> <u>(mm)</u>	<u>I Sud</u> <u>(mm)</u>	<u>I Est</u> <u>(mm)</u>	<u>I Ovest</u> <u>(mm)</u>	<u>I centro</u> <u>(mm)</u>	<u>Imedio</u> <u>(mm)</u>
<u>QHL3IM2</u>	<u>0,07</u>	<u>0,09</u>	<u>0,07</u>	<u>0,07</u>	<u>0,26</u>	<u>0,18</u>
<u>QHL3IM3</u>	<u>0,08</u>	<u>0,09</u>	<u>0,09</u>	<u>0,07</u>	<u>0,29</u>	<u>0,21</u>
<u>QHL3IM4</u>	<u>0,03</u>	<u>0,04</u>	<u>0,08</u>	<u>0,03</u>	<u>0,28</u>	<u>0,23</u>
<u>QHL3IM5</u>	<u>0,01</u>	<u>0,05</u>	<u>0,01</u>	<u>0,04</u>	<u>0,31</u>	<u>0,28</u>
<u>QHL3IM6</u>	<u>0,08</u>	<u>0,00</u>	<u>0,10</u>	<u>-0,02</u>	<u>0,37</u>	<u>0,33</u>
<u>QHL3IM7</u>	<u>0,01</u>	<u>0,02</u>	<u>-0,12</u>	<u>0,00</u>	<u>0,47</u>	<u>0,49</u>
<u>QHL3IM8</u>	<u>0,00</u>	<u>0,19</u>	<u>0,16</u>	<u>0,07</u>	<u>0,71</u>	<u>0,60</u>
<u>QHL3IM9</u>	<u>0,01</u>	<u>-0,01</u>	<u>-0,03</u>	<u>0,00</u>	<u>0,27</u>	<u>0,28</u>
<u>QHL3IM10</u>	<u>0,00</u>	<u>-0,04</u>	<u>0,00</u>	<u>-0,01</u>	<u>0,24</u>	<u>0,25</u>
<u>QHL3IM11</u>	<u>0,00</u>	<u>0,02</u>	<u>-0,01</u>	<u>-0,01</u>	<u>0,26</u>	<u>0,26</u>
<u>QHL3IM5J</u>	<u>0,03</u>	<u>0,00</u>	<u>0,01</u>	<u>0,00</u>	<u>0,14</u>	<u>0,13</u>
<u>OLL3IM2</u>	<u>0,03</u>	<u>0,00</u>	<u>-0,02</u>	<u>0,03</u>	<u>0,19</u>	<u>0,18</u>
<u>OLL3IM3</u>	<u>0,00</u>	<u>0,00</u>	<u>-0,07</u>	<u>-0,03</u>	<u>0,17</u>	<u>0,19</u>
<u>OLL3IM4</u>	<u>0,02</u>	<u>0,01</u>	<u>-0,08</u>	<u>0,00</u>	<u>0,25</u>	<u>0,26</u>
<u>OLL3IM5</u>	<u>0,00</u>	<u>-0,03</u>	<u>-0,06</u>	<u>0,00</u>	<u>0,21</u>	<u>0,23</u>

<u>QLL3IM6</u>	<u>-0,24</u>	<u>-0,05</u>	<u>0,00</u>	<u>0,03</u>	<u>0,30</u>	<u>0,36</u>
<u>QLL3IM7</u>	<u>0,00</u>	<u>0,05</u>	<u>-0,16</u>	<u>-0,03</u>	<u>0,38</u>	<u>0,41</u>
<u>QLL3IM8</u>	<u>0,05</u>	<u>0,02</u>	<u>0,10</u>	<u>0,05</u>	<u>0,77</u>	<u>0,71</u>
<u>QLL3IM9</u>	<u>0,01</u>	<u>-0,01</u>	<u>-0,05</u>	<u>0,00</u>	<u>0,29</u>	<u>0,30</u>
<u>QLL3IM10</u>	<u>-0,01</u>	<u>0,00</u>	<u>-0,07</u>	<u>-0,02</u>	<u>0,29</u>	<u>0,31</u>
<u>QLL3IM11</u>	<u>0,00</u>	<u>0,02</u>	<u>-0,06</u>	<u>-0,03</u>	<u>0,28</u>	<u>0,30</u>
<u>QLL3IM5J</u>	<u>0,00</u>	<u>0,10</u>	<u>-0,01</u>	<u>0,06</u>	<u>0,13</u>	<u>0,09</u>
<u>QOL3IM2</u>	<u>0,02</u>	<u>0,02</u>	<u>-0,02</u>	<u>0,00</u>	<u>0,16</u>	<u>0,15</u>
<u>QOL3IM3</u>	<u>-0,01</u>	<u>0,00</u>	<u>-0,06</u>	<u>-0,01</u>	<u>0,19</u>	<u>0,21</u>
<u>QOL3IM4</u>	<u>-0,01</u>	<u>0,00</u>	<u>-0,03</u>	<u>0,00</u>	<u>0,22</u>	<u>0,23</u>
<u>QOL3IM5</u>	<u>0,02</u>	<u>0,00</u>	<u>0,01</u>	<u>-0,01</u>	<u>0,23</u>	<u>0,22</u>
<u>QOL3IM6</u>	<u>-0,01</u>	<u>0,06</u>	<u>0,01</u>	<u>-0,03</u>	<u>0,34</u>	<u>0,33</u>
<u>QOL3IM7</u>	<u>0,00</u>	<u>-0,03</u>	<u>0,02</u>	<u>-0,03</u>	<u>1,09</u>	<u>1,10</u>
<u>QOL3IM8</u>	<u>0,00</u>	<u>0,03</u>	<u>0,01</u>	<u>-0,02</u>	<u>0,70</u>	<u>0,69</u>
<u>QOL3IM9</u>	<u>-0,01</u>	<u>0,00</u>	<u>-0,07</u>	<u>-0,02</u>	<u>0,24</u>	<u>0,26</u>
<u>QOL3IM10</u>	<u>0,08</u>	<u>0,05</u>	<u>0,05</u>	<u>-0,08</u>	<u>0,38</u>	<u>0,35</u>
<u>QOL3IM11</u>	<u>-0,03</u>	<u>0,04</u>	<u>0,02</u>	<u>0,03</u>	<u>0,31</u>	<u>0,29</u>

<u>QML3IM2</u>	<u>-0,02</u>	<u>0,00</u>	<u>-0,03</u>	<u>-0,02</u>	<u>0,14</u>	<u>0,16</u>
<u>QML3IM3</u>	<u>-0,04</u>	<u>-0,03</u>	<u>-0,04</u>	<u>0,00</u>	<u>0,18</u>	<u>0,20</u>
<u>QML3IM4</u>	<u>-0,05</u>	<u>0,00</u>	<u>-0,14</u>	<u>-0,01</u>	<u>0,16</u>	<u>0,21</u>
<u>QML3IM5</u>	<u>0,00</u>	<u>0,06</u>	<u>0,00</u>	<u>0,01</u>	<u>0,25</u>	<u>0,23</u>
<u>QML3IM6</u>	<u>0,00</u>	<u>-0,01</u>	<u>0,00</u>	<u>0,01</u>	<u>0,25</u>	<u>0,25</u>
<u>QML3IM7</u>	<u>0,01</u>	<u>0,06</u>	<u>-0,05</u>	<u>-0,04</u>	<u>0,42</u>	<u>0,42</u>
<u>QML3IM8</u>	<u>-0,01</u>	<u>-0,05</u>	<u>-0,06</u>	<u>-0,03</u>	<u>0,72</u>	<u>0,76</u>
<u>QML3IM9</u>	<u>0,03</u>	<u>0,08</u>	<u>0,02</u>	<u>0,01</u>	<u>0,34</u>	<u>0,30</u>
<u>QML3IM10</u>	<u>0,01</u>	<u>-0,03</u>	<u>-0,06</u>	<u>0,00</u>	<u>0,30</u>	<u>0,32</u>
<u>QML3IM11</u>	<u>0,00</u>	<u>-0,08</u>	<u>-0,08</u>	<u>-0,03</u>	<u>0,34</u>	<u>0,39</u>

Tab 3.2- Valori delle indentazioni per provini quadriassiali D_p 16 mm

<u>Provino</u>	<u>I Nord</u> <u>(mm)</u>	<u>I Sud</u> <u>(mm)</u>	<u>I Est</u> <u>(mm)</u>	<u>I Ovest</u> <u>(mm)</u>	<u>I centro</u> <u>(mm)</u>	<u>Imedio</u> <u>(mm)</u>
<u>BTLIM2</u>	<u>-0,01</u>	<u>-0,03</u>	<u>-0,1</u>	<u>-0,03</u>	<u>0,17</u>	<u>0,21</u>
<u>BTLIM3</u>	<u>0,02</u>	<u>0,01</u>	<u>-0,03</u>	<u>0,01</u>	<u>0,27</u>	<u>0,27</u>
<u>BTLIM4</u>	<u>0,00</u>	<u>-0,06</u>	<u>0,00</u>	<u>-0,02</u>	<u>0,24</u>	<u>0,26</u>
<u>BTLIM5</u>	<u>0,01</u>	<u>0,02</u>	<u>0,02</u>	<u>0,01</u>	<u>0,67</u>	<u>0,65</u>

<i>BTLIM6</i>	<i>0,00</i>	<i>0,02</i>	<i>-0,06</i>	<i>0,00</i>	<i>1,04</i>	<i>1,05</i>
<i>BTLIMBVID</i>	<i>0,01</i>	<i>0,00</i>	<i>0,01</i>	<i>0,02</i>	<i>0,29</i>	<i>0,28</i>
<i>BTLIMBVID</i>	<i>0,00</i>	<i>0,04</i>	<i>0,03</i>	<i>0,02</i>	<i>0,34</i>	<i>0,32</i>
<i>BHLIM12</i>	<i>0,01</i>	<i>0,00</i>	<i>-0,04</i>	<i>-0,01</i>	<i>0,18</i>	<i>0,19</i>
<i>BHLIM3</i>	<i>0,00</i>	<i>-0,04</i>	<i>0,07</i>	<i>0,02</i>	<i>0,29</i>	<i>0,28</i>
<i>BHLIM4</i>	<i>0,00</i>	<i>-0,03</i>	<i>0,02</i>	<i>0,03</i>	<i>0,29</i>	<i>0,28</i>
<i>BHLIM5</i>	<i>0,00</i>	<i>-0,04</i>	<i>0,07</i>	<i>0,03</i>	<i>0,62</i>	<i>0,60</i>
<i>BHLIM6</i>	<i>0,02</i>	<i>0,02</i>	<i>-0,01</i>	<i>0,00</i>	<i>1,03</i>	<i>1,02</i>
<i>BHLIMBVID</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	<i>-0,01</i>	<i>0,29</i>	<i>0,29</i>
<i>BHLIMBVID</i>	<i>0,01</i>	<i>0,01</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	<i>0,30</i>	<i>0,29</i>
<i>BOLIM2</i>	<i>0,00</i>	<i>-0,04</i>	<i>-0,02</i>	<i>-0,01</i>	<i>0,19</i>	<i>0,21</i>
<i>BOLIM3</i>	<i>0,01</i>	<i>-0,03</i>	<i>-0,01</i>	<i>0,01</i>	<i>0,25</i>	<i>0,25</i>
<i>BOLIM4</i>	<i>-0,01</i>	<i>0,00</i>	<i>0,02</i>	<i>0,00</i>	<i>0,31</i>	<i>0,31</i>
<i>BOLIM5</i>	<i>-0,01</i>	<i>0,10</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	<i>0,48</i>	<i>0,46</i>
<i>BOLIM6</i>	<i>-0,07</i>	<i>-0,01</i>	<i>0,30</i>	<i>0,06</i>	<i>1,31</i>	<i>1,24</i>
<i>BOLIMBVID</i>	<i>0,00</i>	<i>-0,02</i>	<i>-0,02</i>	<i>0,03</i>	<i>0,30</i>	<i>0,30</i>
<i>BOLIMBVID</i>	<i>0,02</i>	<i>-0,05</i>	<i>-0,06</i>	<i>-0,01</i>	<i>0,24</i>	<i>0,26</i>

<i>BGLIM2</i>	<i>-0,01</i>	<i>-0,03</i>	<i>0,03</i>	<i>0,02</i>	<i>0,22</i>	<i>0,22</i>
<i>BGLIM3</i>	<i>0,00</i>	<i>-0,03</i>	<i>-0,01</i>	<i>0,00</i>	<i>0,25</i>	<i>0,26</i>
<i>BGLIM4</i>	<i>0,00</i>	<i>-0,03</i>	<i>-0,01</i>	<i>0,00</i>	<i>0,31</i>	<i>0,32</i>
<i>BGLIM5</i>	<i>0,00</i>	<i>0,09</i>	<i>-0,08</i>	<i>0,01</i>	<i>0,44</i>	<i>0,43</i>
<i>BGLIM6</i>	<i>-0,03</i>	<i>0,09</i>	<i>0,16</i>	<i>0,07</i>	<i>0,86</i>	<i>0,79</i>
<i>BGLIMBVID</i>	<i>-0,01</i>	<i>0,00</i>	<i>-0,02</i>	<i>0,00</i>	<i>0,27</i>	<i>0,28</i>
<i>BGLIMBVID</i>	<i>0,03</i>	<i>0,04</i>	<i>0,03</i>	<i>0,02</i>	<i>0,31</i>	<i>0,28</i>
<i>BMLIM5J</i>	<i>0,02</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	<i>0,01</i>	<i>0,10</i>	<i>0,09</i>
<i>BMLIM2</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	<i>-0,02</i>	<i>0,00</i>	<i>0,17</i>	<i>0,17</i>
<i>BMLIM3</i>	<i>0,02</i>	<i>0,00</i>	<i>0,03</i>	<i>0,00</i>	<i>0,24</i>	<i>0,23</i>
<i>BMLIM4</i>	<i>0,00</i>	<i>0,01</i>	<i>-0,03</i>	<i>-0,01</i>	<i>0,30</i>	<i>0,31</i>
<i>BMLIM5</i>	<i>0,00</i>	<i>-0,04</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	<i>0,49</i>	<i>0,50</i>
<i>BMLIM6</i>	<i>-0,06</i>	<i>0,03</i>	<i>0,08</i>	<i>0,00</i>	<i>1,39</i>	<i>1,38</i>
<i>BMLIMBVID</i>	<i>0,10</i>	<i>0,01</i>	<i>-0,04</i>	<i>-0,03</i>	<i>0,32</i>	<i>0,31</i>
<i>BMLIMBVID</i>	<i>-0,03</i>	<i>-0,03</i>	<i>-0,05</i>	<i>0,00</i>	<i>0,26</i>	<i>0,29</i>

Tab 3.3 -Valori delle indentazioni per provini biassiali con D_p 16 mm

3.6 Analisi dei risultati

3.6.1 Andamento dell'energia di penetrazione in funzione del prodotto $t \times V_f \times D_p$

Analizzando una curva tipica $F-s$, figura 3.25, si può osservare come l'energia di penetrazione è rappresentata dall'area sottesa alla curva fino al punto "e". Per ogni provino sottoposto a completa penetrazione è stata valutata la relativa energia e i valori ottenuti sono riassunti di seguito nella tabella 3.4

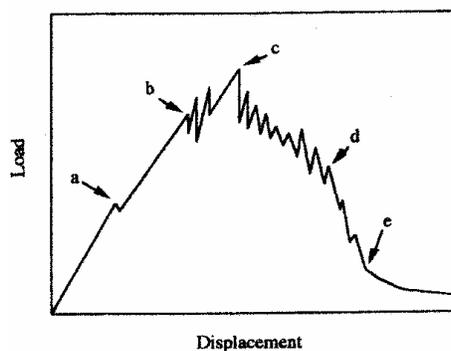


Fig 3.25 -Curva tipica F-s

Provino	Up (J)	Up media
QHLIMPEN1	104,44	115,22
QHLIMPEN2	126,01	
QLLIMPEN1	106,79	108,10
QLLIMPEN2	109,39	
QMLIMPEN1	98,15	99,15
QMLIMPEN2	100,16	
QOLIMPEN1	125,42	112,90
QOLIMPEN2	100,37	
BGLIMP1	98,01	98,01
BOLIMP1	99,92	99,92
BMLIMP1	92,73	92,73
QHLIMP	143,09	138,26
QOLIMP	133,43	138,26

Tab 3.4 - Valori energie di penetrazione.

Per la previsione della U_p esiste in letteratura un modello del tipo:

$$U_p = K * (t * V_f * D_p)^\alpha \quad (3.6.1.1)$$

Dove:

t = spessore provino

V_f = percentuale volumetrica di fibre nel composito

D_p = diametro del percussore

Le costanti, trovate da altri autori [36], per laminati classici in carboresina valgono:

$$K = 0,49$$

$$\alpha = 1,44$$

Il modello si può quindi così particularizzare:

$$U_p = 0,49 * (t * V_f * D_p)^{1,44} \quad (3.6.1.2)$$

Nel grafico di figura 3.26 sono riportati i risultati sperimentali ricavati dalla prove di penetrazione condotte e il modello di cui alla 3.6.1.2

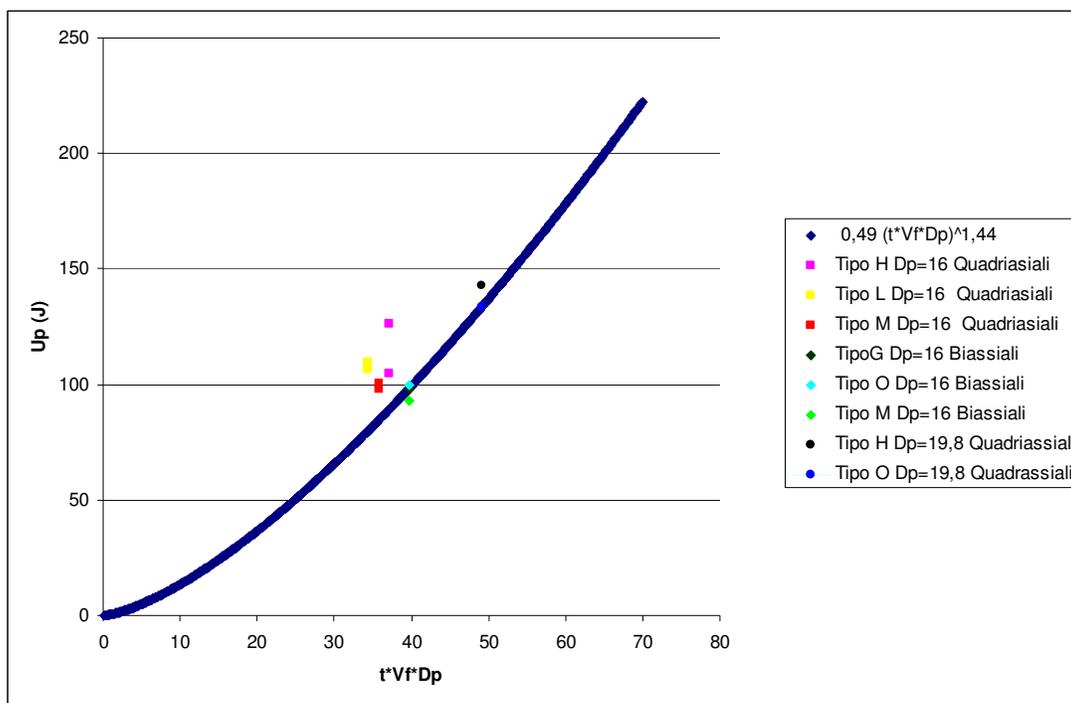


Fig 3.26 -Applicazione del modello $U_p = 0,49 * (t * V_f * D_p)^{1,44}$; dati sperimentali

Come si osserva, il modello proposto in letteratura approssima abbastanza bene i dati sperimentali ottenuti dai test meccanici. Applicando questo modello ai nostri dati, inoltre, abbiamo cercato delle costanti K e α che approssimassero meglio i dati sperimentali.

Si è ricavato:

$$K = 0,55$$

$$\alpha = 1,44$$

Con queste costanti la 3.6.1.1 diventa:

$$U_p = 0,55 * (t^*V_f^*D_p)^{1,44} \quad (3.6.1.3)$$

Nel grafico di figura 3.27 è riportato un confronto tra il modello con le costanti calcolate per i NCF e quello con le costanti per una generica carboresina (vecchi dati di letteratura).

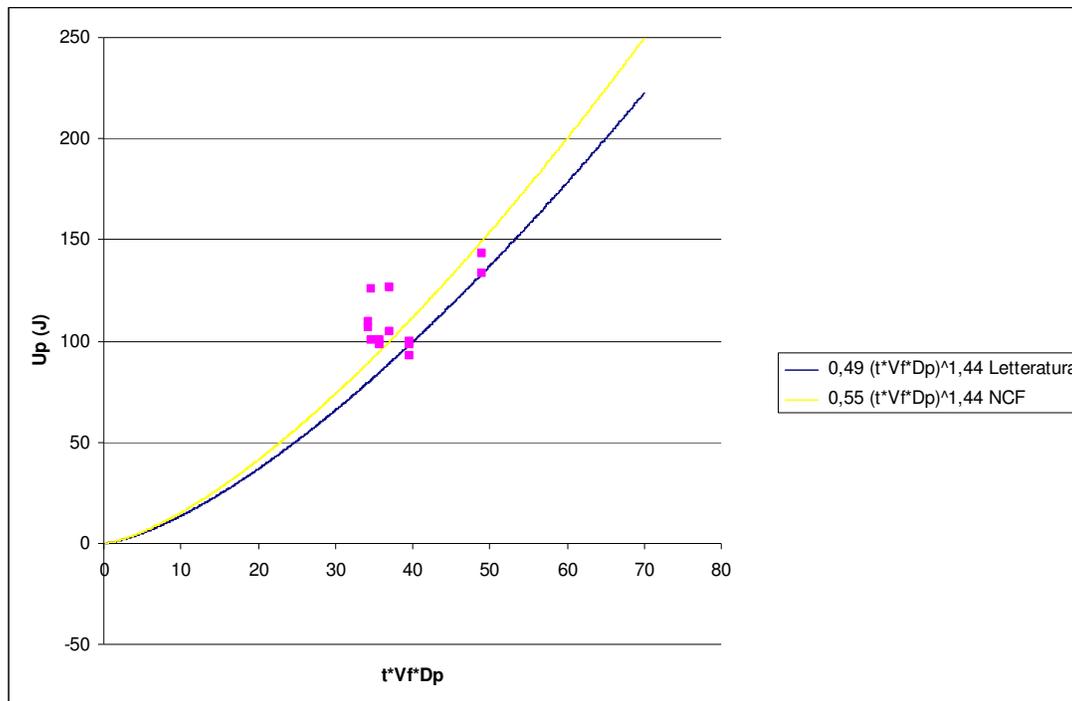


Fig 3.27-Confronto modello con costanti calcolate per NCF e costanti carboresina letteratura

Si osserva che la differenza tra le costanti è davvero minima (α è la stessa e la K passa da 0,49 a 0,55). Si può concludere dicendo che il modello di previsione della U_p ben approssima i dati sperimentali e che non esistono sostanziali differenze, in termini di energia di penetrazione tra laminati classici e NCF.

3.6.2 Indentazione in funzione dell'energia di impatto e del rapporto adimensionale energia di impatto/ energia di penetrazione

Per confermare il legame tra energia di impatto e indentazione le coppie di valori (Energia ; Indentazione), sono state elaborate mediante l'ausilio di fogli di calcolo Excel, per la costruzione di una curva $I = I(U)$. I risultati per i campioni quadriassiali e i biassiali, impattati con D_p 16 mm, sono riportati rispettivamente nelle figure 3.28 e 3.29.

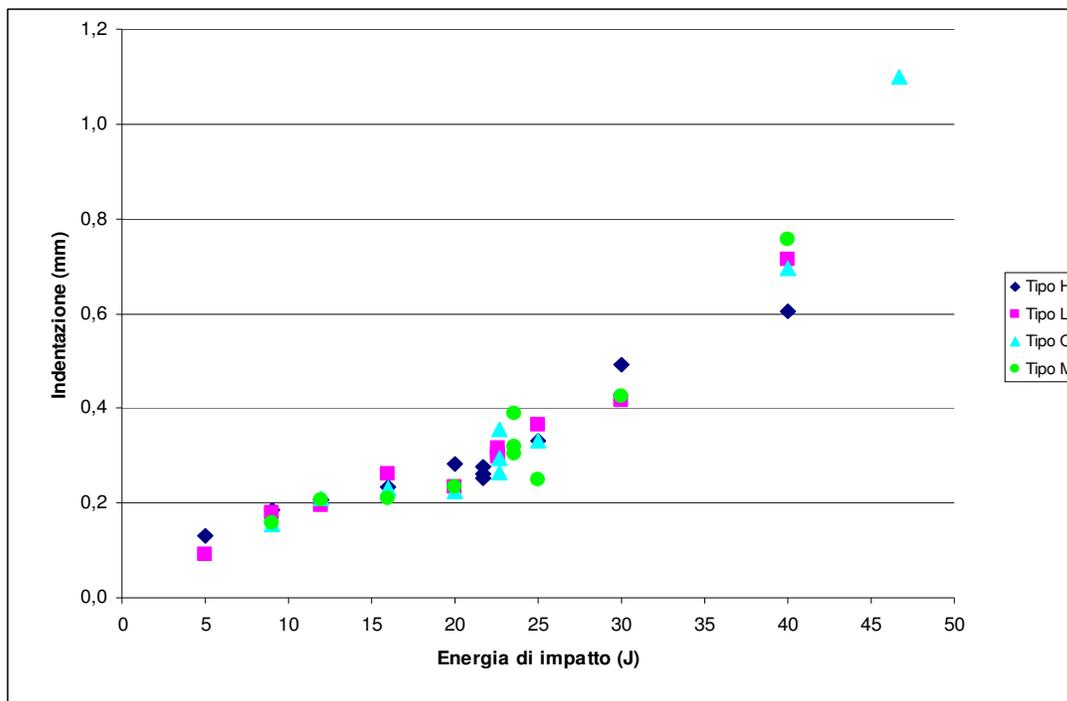


Fig. 3.28- I vs U per campioni quadriassiali ($D_p=16$ mm)

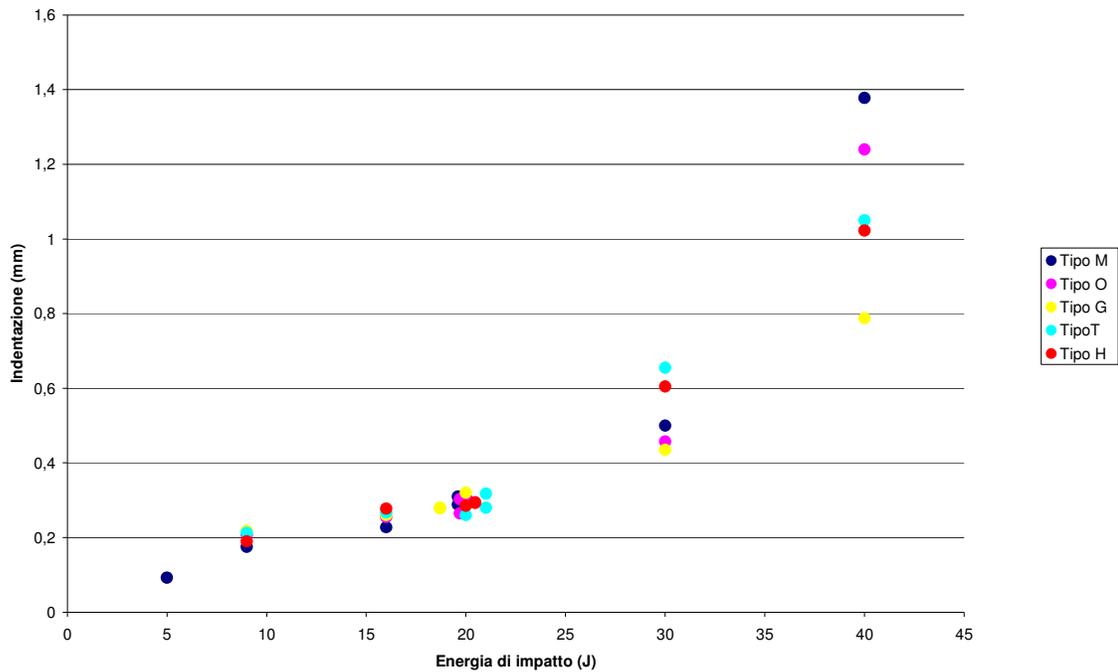


Fig. 3.29 - I vs U per campioni biassiali ($D_p=16\text{ mm}$)

Si osserva come non ci sono sostanziali differenze tra le varie configurazioni dei campioni biassiali. Stessa cosa si può dire per i quadriassiali.

Analizziamo, su un unico grafico, i provini biassiali e quadriassiali; prima distinguendo le varie serie con diversi colori (fig. 3.30) poi (fig 3.31) con un grafico bicromico dove tutti i quadriassiali sono in blu e tutti i biassiali in rosso.

Dal confronto si evince un andamento simile per le due diverse configurazioni (soprattutto per bassi valori dell'energia di impatto).

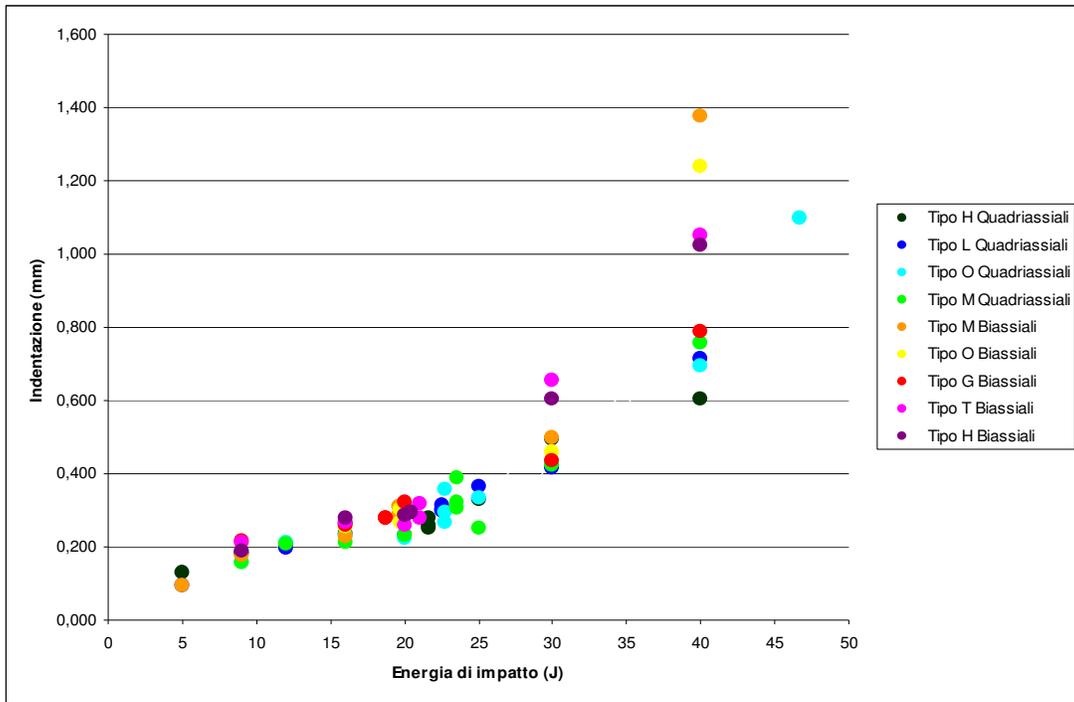


Fig. 3.30- I vs U per campioni quadriassiali e biassiali ($D_p = 16$ mm)

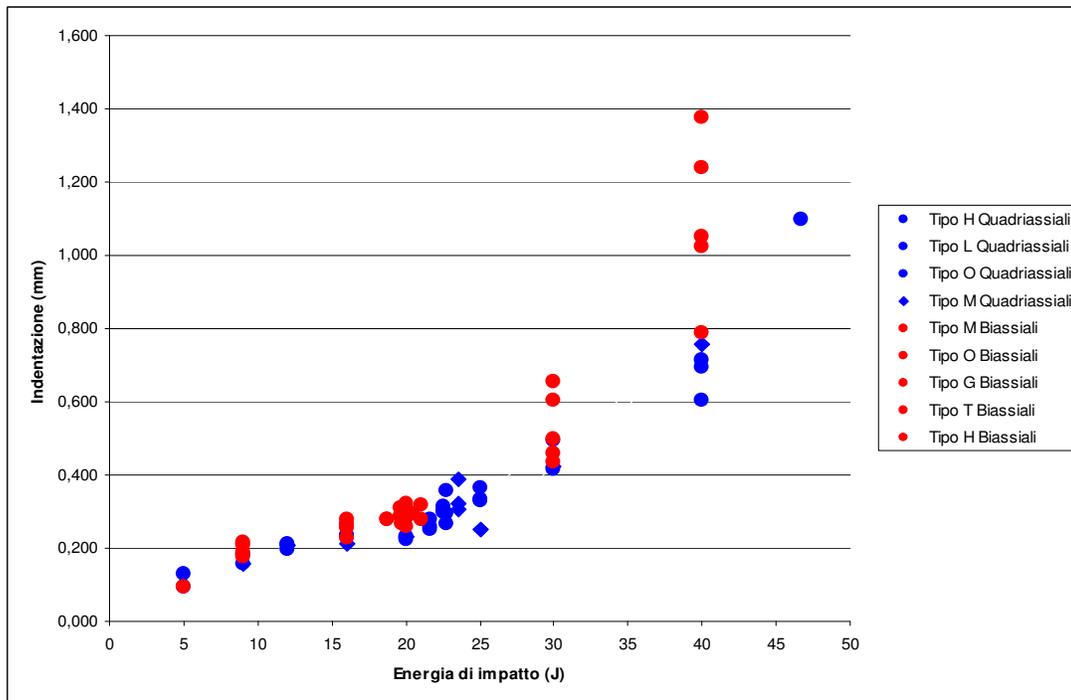


Fig. 3.31- I vs U per campioni quadriassiali e biassiali ($D_p = 16$ mm)

Infine, in figura 3.32, si riporta il grafico per i provini quadriassiali impattati con percussore avente diametro di 19,8 mm.

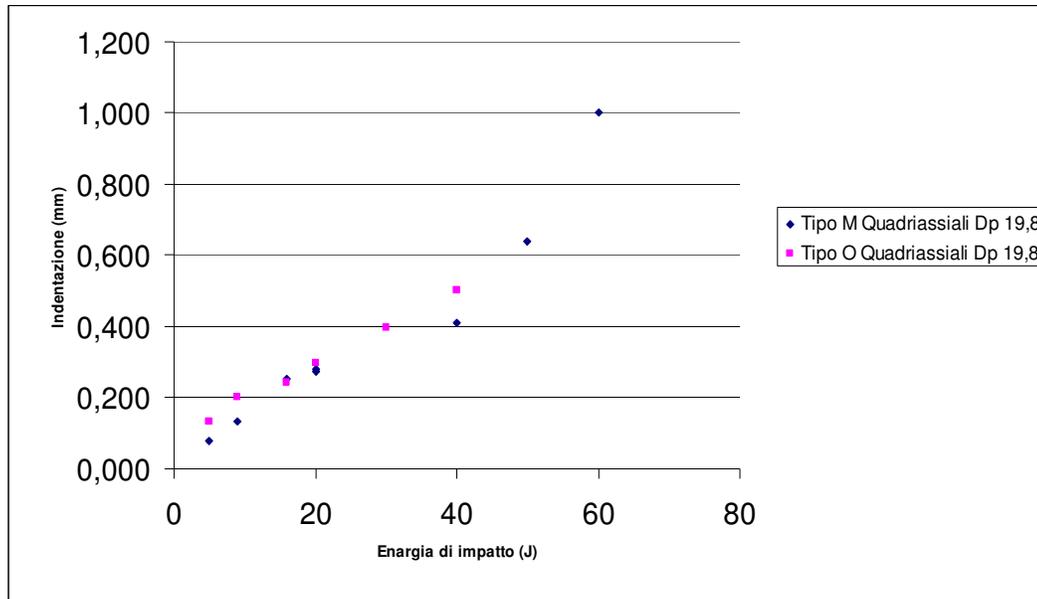


Fig. 3.32 I vs U per campioni quadriassiali ($D_p = 19,8$ mm)

La legge di variazione dell'indentazione al variare dell'energia di impatto mostra, per tutte le configurazioni testate, di seguire una legge ben descritta da una bilatera;

Il cambio di pendenza si ha approssimativamente in corrispondenza di una energia di impatto pari a 22 J per i campioni quadriassiali e di circa 30 J per i campioni biassiali.

Questo cambio di pendenza è indicativo del fatto che si stanno verificando numerose e progressive rotture di fibre. Analogamente a quanto sviluppato da altri autori, è stata diagrammata l'indentazione in funzione del rapporto U/U_p , cioè dell'energia registrata per ogni prova adimensionalizzata rispetto l'energia di penetrazione. I valori di U_p utilizzati sono i valori medi ricavati sperimentalmente per ogni configurazione. Come si nota dalle figure 3.33 e 3.34 diagrammando I in funzione di U/U_p i dati sperimentali mostrano una minore dispersione rispetto alla curva maestra che descrive il fenomeno.

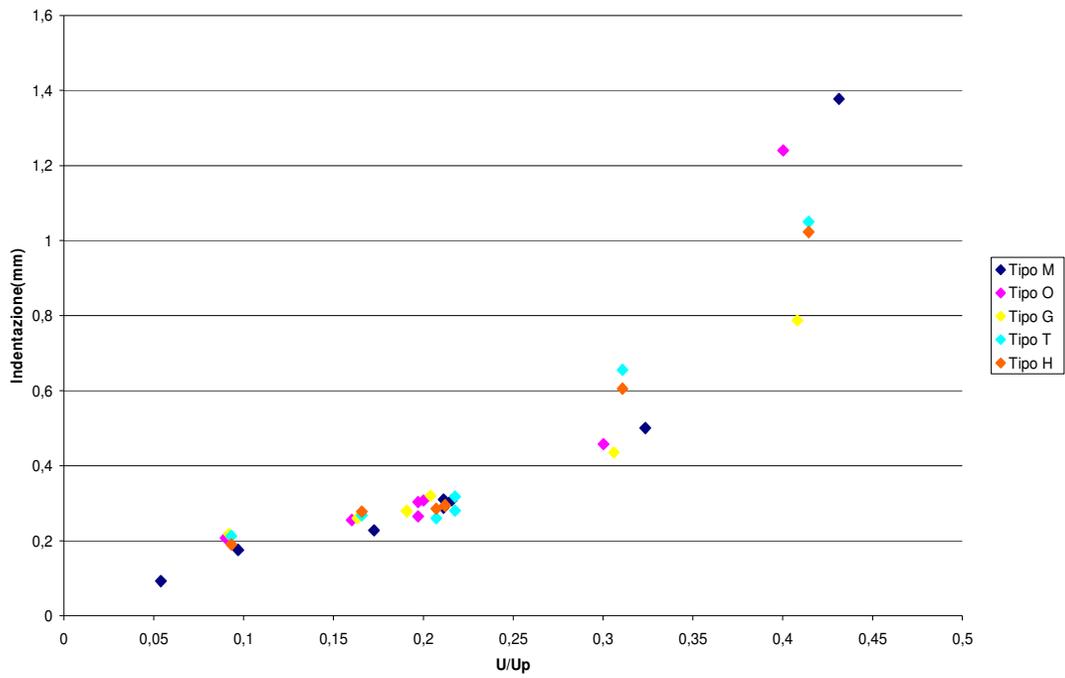


Fig 3.33 - I vs U/Up per campioni biassiali ($D_p=16$ mm)

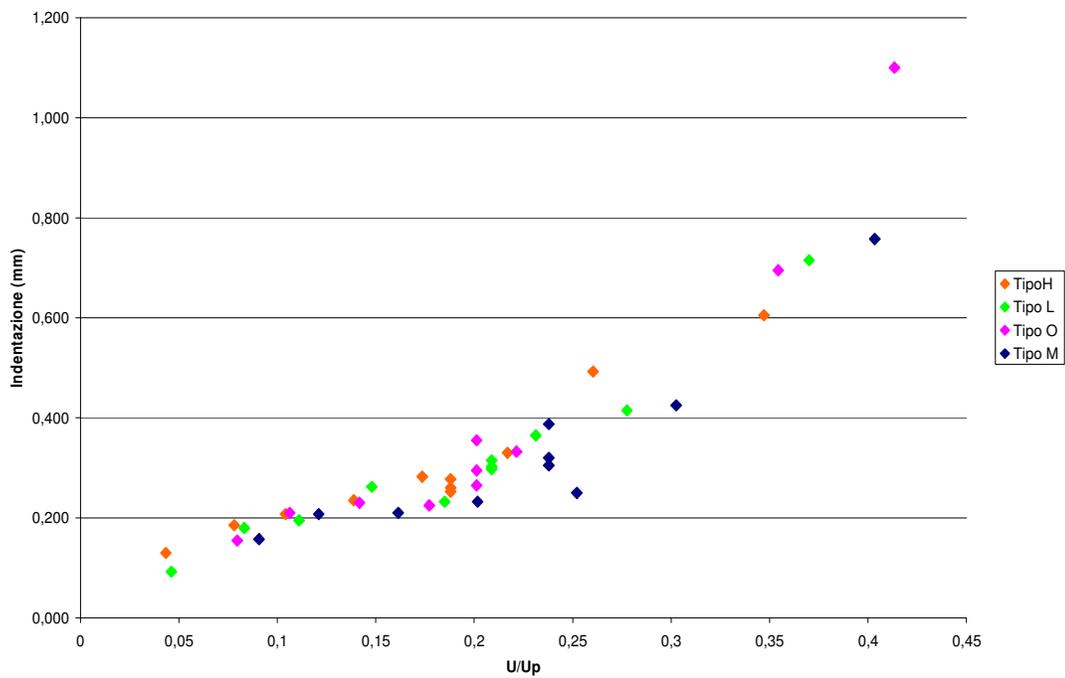


Fig 3.34- I vs U/Up per campioni quadriassiali ($D_p=16$ mm)

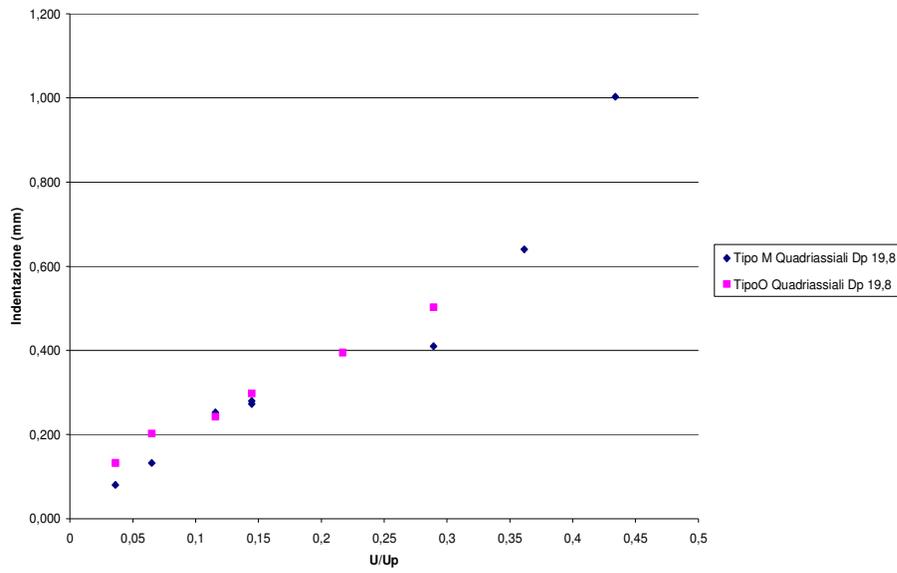


Fig 3.35- I vs U/Up per campioni quadriassiali ($D_p=19,8$ mm)

Nella figura 3.36, su un unico grafico I vs U/Up, sono rappresentati i dati relativi ai provini biassiali e quadriassiali impattati con percussore di D_p 16 mm. Il confronto vuole confermare o meno una corrispondenza tra le due configurazioni testate.

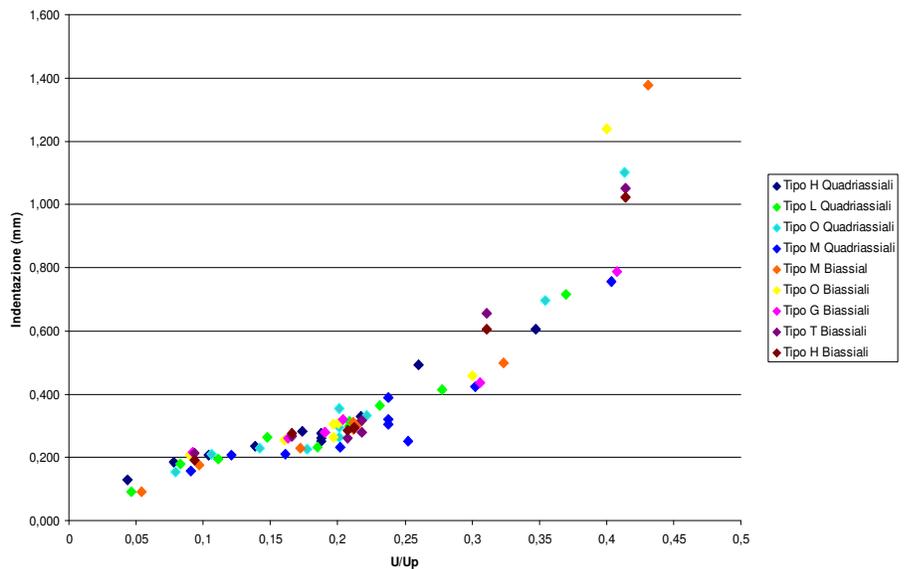


Fig 3.36 I vs U/Up per campioni quadriassiali e biassiali ($D_p=16$ mm)

Il grafico evidenzia un comportamento simile dei provini biassiali e quadriassiali, per il primo tratto la dispersione dei dati è minima.

3.6.3 Modelli di previsione dell'indentazione ad una e due variabili

Autori che hanno preceduto questo lavoro hanno trovato e verificato una curva esponenziale che approssima molto bene la descrizione analitica del fenomeno di impatto relativamente al nascita del danno esterno (indentazione).

Il metodo d'analisi adottato è di seguito riportato.

Partendo dal rispetto delle condizioni al contorno ($U/U_p = 0 \Rightarrow I = 0$), si è cercata una relazione del tipo:

$$I = k \cdot [10^{(\alpha U/U_p)} - 1] \quad (3.6.3.1)$$

La 3.6.3.1 è equivalente alla seguente:

$$[(I/k) + 1] = 10^{(\alpha U/U_p)} \quad (3.6.3.2)$$

O meglio ancora alla (3.6.3.3)

$$\log [(I/k) + 1] = \alpha U/U_p \quad (3.6.3.3)$$

imponendo per K un valore di tentativo, si è riportato in ascisse il rapporto U/U_p ed in ordinate i valori $\log[(I/K)+1]$.

Si è così ottenuto il seguente grafico (3.37) per la ricerca delle costanti.

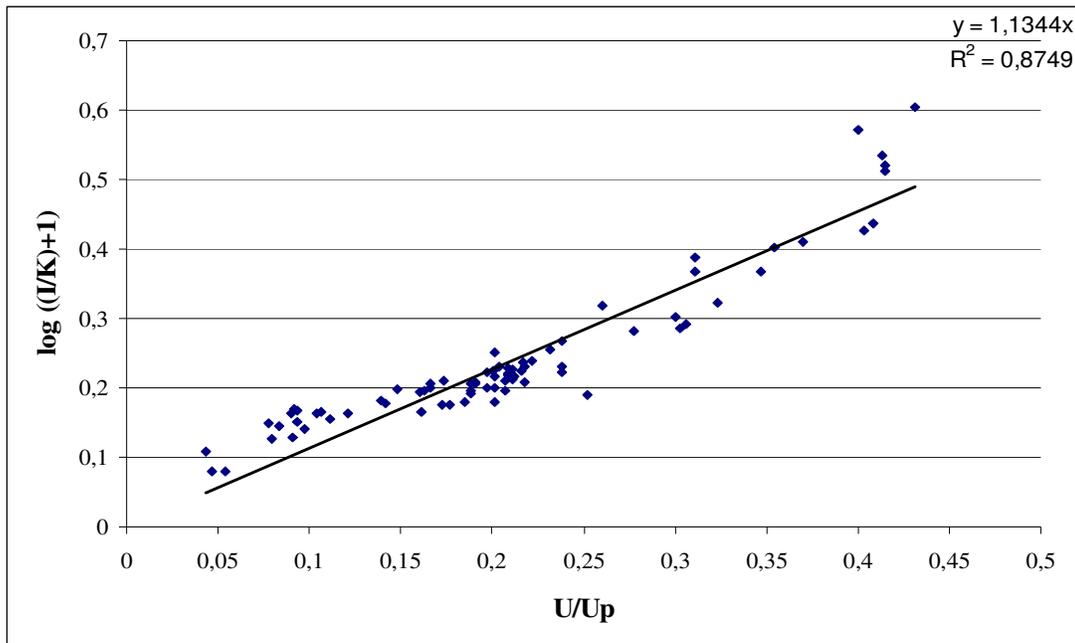


Fig 3.37 -Calcolo costanti modello previsione I a due variabili

Si è rappresentata la legge lineare di minima dispersione avente equazione del tipo:

$$y = \alpha x + q$$

dove α è il coefficiente angolare della retta di minima dispersione.

Si è imposto che per $x = 0$ sia $y=0$ imponendo che l'intercetta passi per l'origine degli assi ($q = 0$) è stato modificato il valore di K nella 3.6.3.3 fino ad ottenere il più alto valore del coefficiente di correlazione.

Si è ottenuto un valore di $K = 0,455$ e un valore di $\alpha = 1.1344$

Riportiamo di seguito il grafico con la legge esponenziale sopra citata e con i dati sperimentali delle nostre prove:

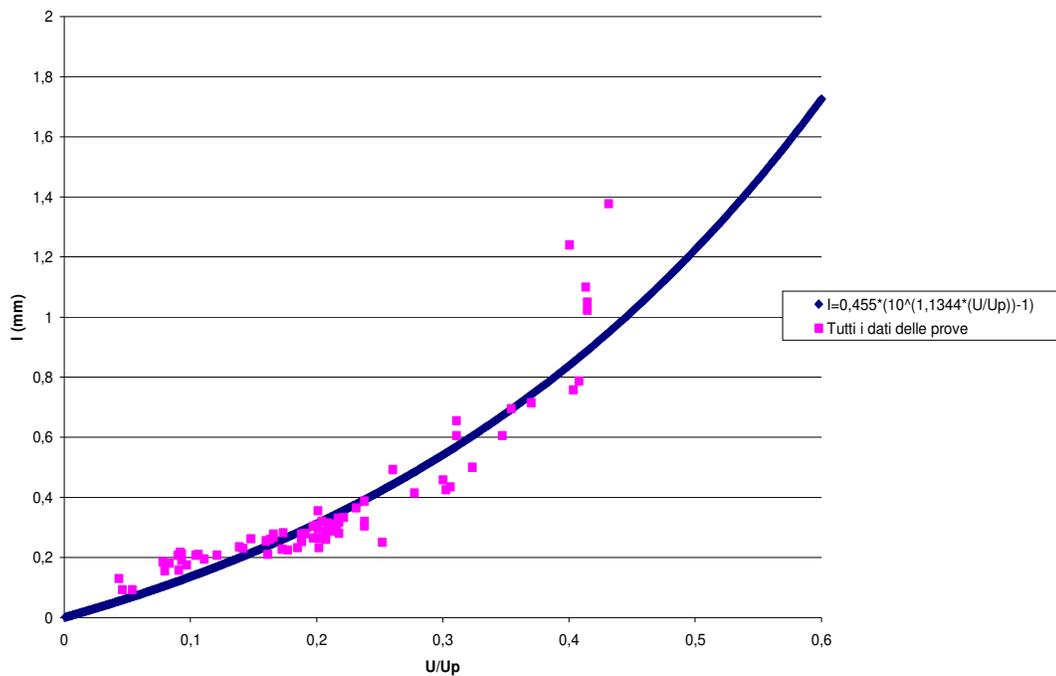


Fig 3.38 - Modello di previsione I a due variabili.

Un’analisi attenta dei risultati ci porta a concludere che l’approssimazione di questo modello è buona fino a un valore dell’energia pari al 40% della U_p .

Sebbene, come abbiamo detto, il modello esponenziale a 2 variabili si è dimostrato valido, la ricerca ci ha spinti alla individuazione di un modello alternativo, ad una variabile, che risultasse di più semplice applicazione (determinazione di 1 e non 2 costanti).

Il metodo d’analisi adottato è di seguito riportato. Partendo dal rispetto delle condizioni al contorno ($U = 0 \Rightarrow I = 0$), si è cercata una relazione del tipo:

$$I = [k U/U_p]/[1-U/U_p] \quad (3.6.3.4)$$

La (3.6.3.4) è equivalente alla seguente (3.5.3.5)

$$I (1 - U/U_p) = k U/U_p \quad (3.6.3.5)$$

O meglio ancora alla (3.6.3.6)

$$I (U_p - U) = k U \quad (3.6.3.6)$$

imponendo per K un valore di tentativo, si è riportato in ascisse il valore di U ed in ordinate i valori I (Up - U).

Il modello è stato applicato separatamente per i biassiali e i quadriassiali e poi contemporaneamente per tutti i provini.

Il calcolo delle costanti non mostrava differenze significative dunque si è proceduto costruendo un modello unico per tutte le configurazioni.

Si sono così ottenuti i grafici di figura 3.39 – 3.41 con k unica costante da determinare.

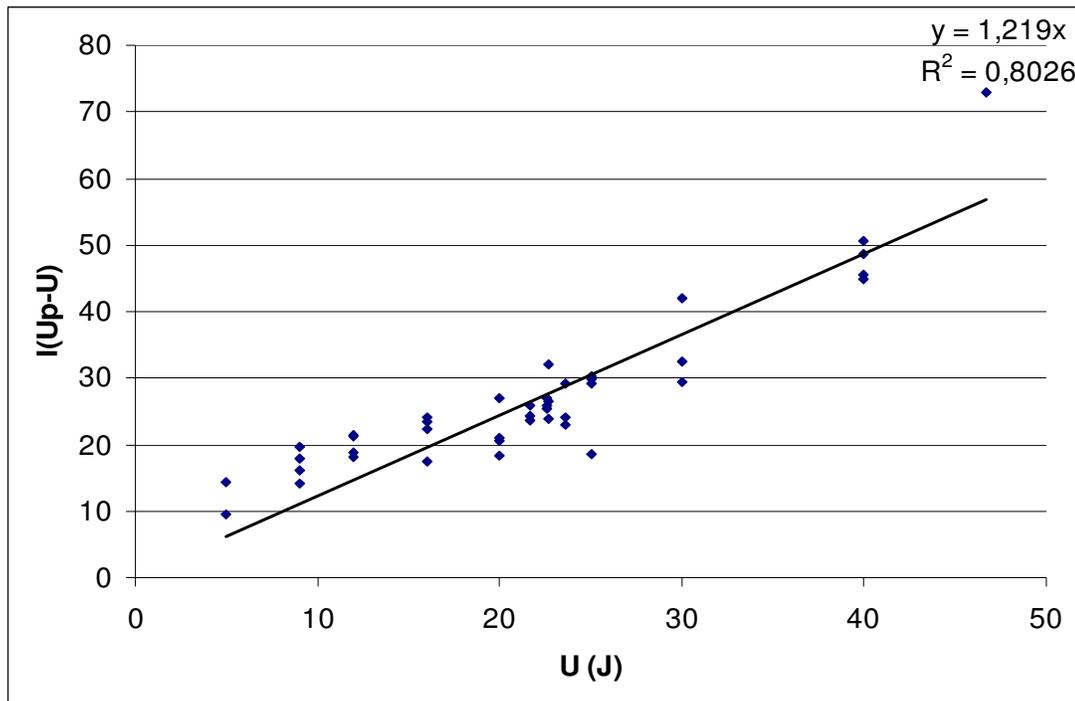


Fig. 3.39 -Determinazione delle costanti per i provini quadriassiali con D_p 16 mm

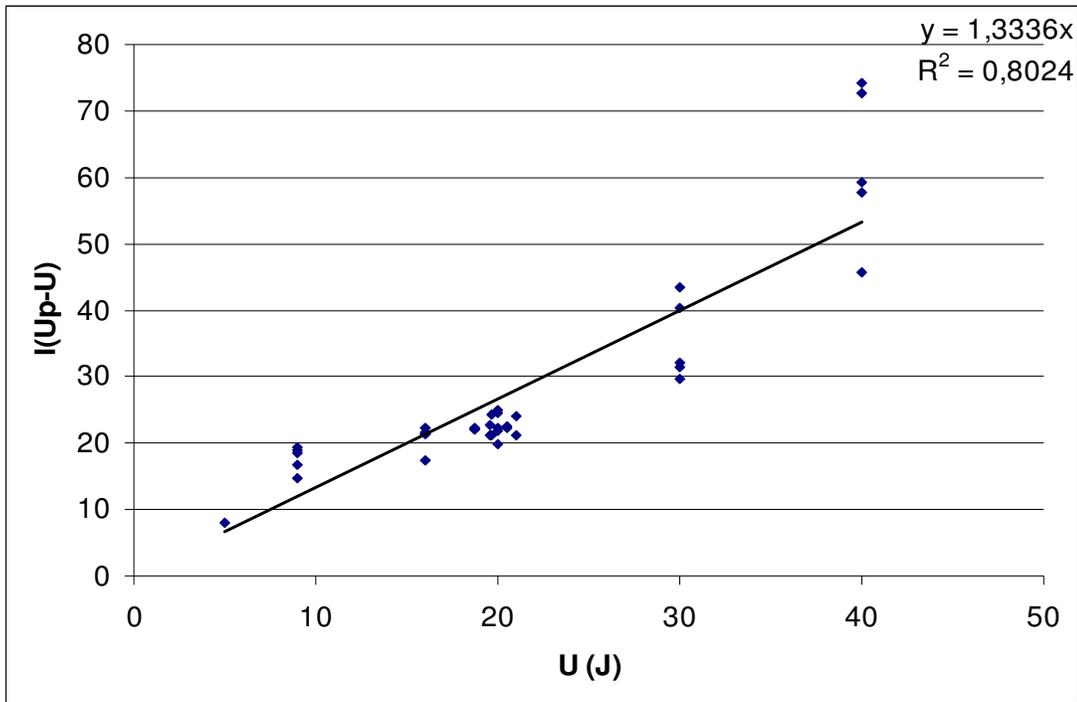


Fig 3.40 - Determinazione delle costanti per i provini biassiali con D_p 16 mm

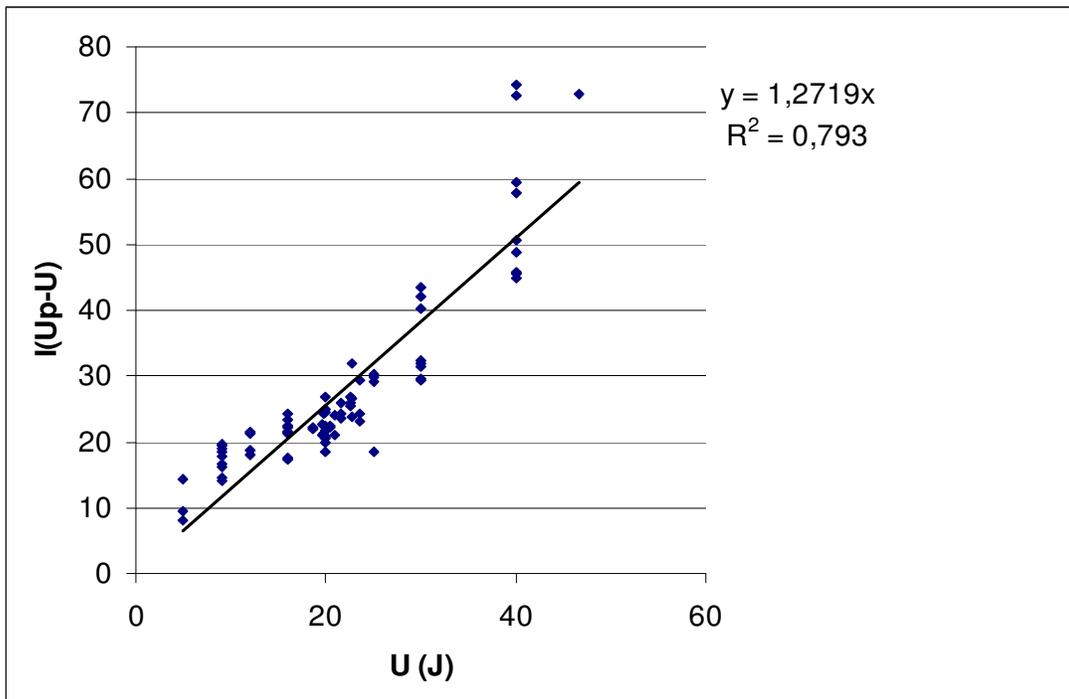


Fig 3.41- Determinazione delle costanti per i provini quadriassiali e biassiali con D_p 16 mm

Si è rappresentata la legge lineare di minima dispersione avente equazione del tipo:

$$y = \alpha x + q$$

dove α è il coefficiente angolare della retta di minima dispersione.

Si è imposta la condizione al contorno che per $x = 0$ sia $y=0$ imponendo che l'intercetta passi per l'origine degli assi, ($q = 0$) ed è stato modificato il valore di K nella 3.6.3.6 fino ad ottenere il valore di R^2 più prossimo a uno (un coefficiente di correlazione prossimo ad 1 indica la bontà dell'approssimazione).

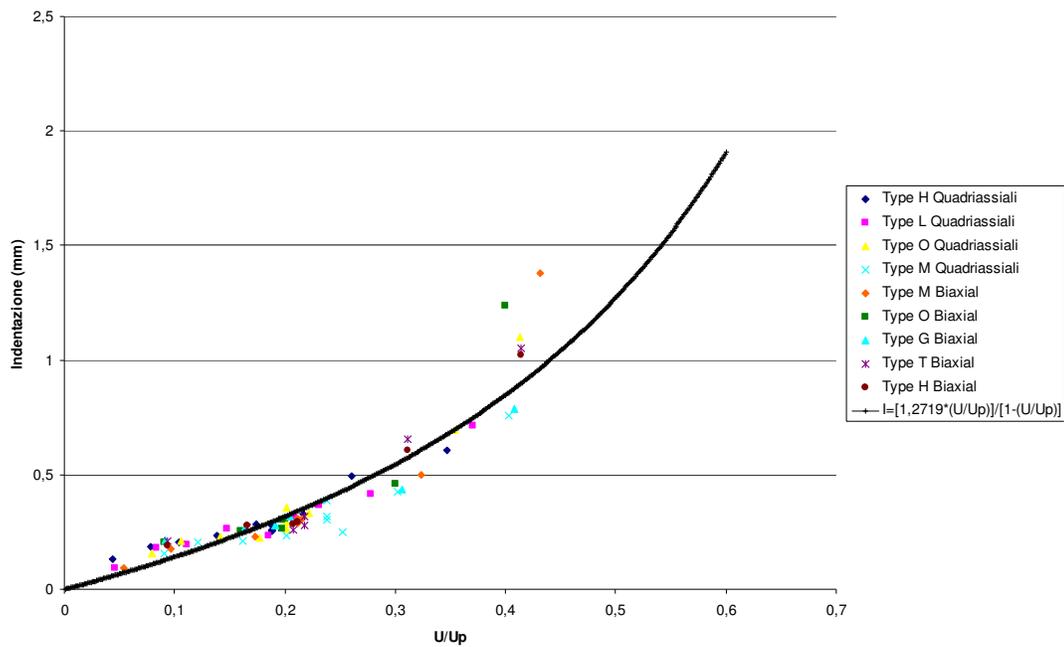


Fig 3.42 - Modello per il calcolo di U_p ad una variabile

Analizzando il grafico si nota che il modello a una costante approssima bene i dati sperimentali fino a un valore dell'energia di impatto pari al 45% della U_p .

In figura 3.43 è riportato un grafico nel quale, oltre ai dati sperimentali, sono riportati entrambi i modelli (in blu quello a due variabili, in verde quello a un'unica variabile).

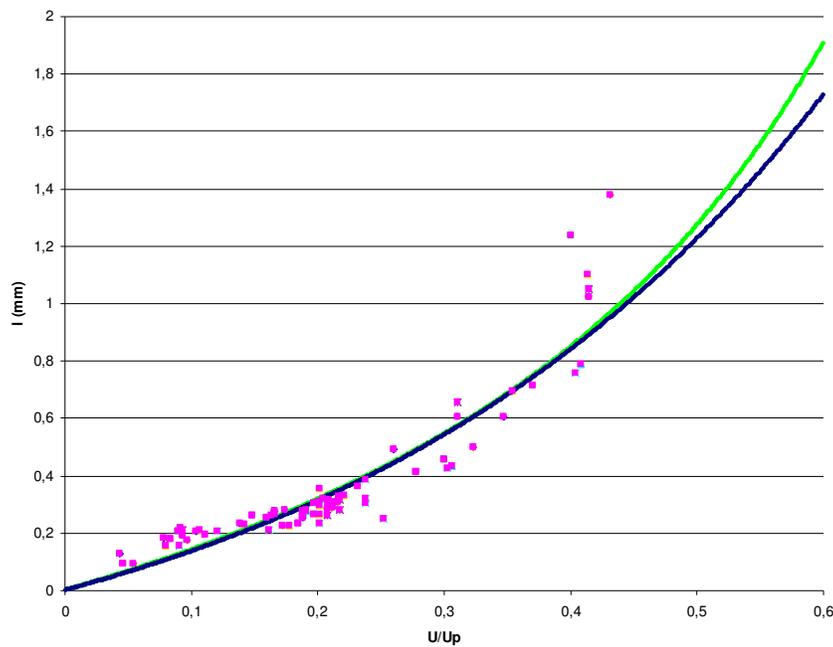


Fig 3.43 - Confronto metodi per il calcolo di U_p a una e due variabili.

Dal grafico di figura 3.43 si evince che entrambi i modelli approssimano bene i dati sperimentali fino a valori dell'energia di impatto compresi tra il 40 e il 45 % dell'energia di penetrazione.

Si può anche osservare come lo scarto tra le due leggi di previsione sia minimo.

Risulta pertanto evidente la convenienza dell'utilizzo del modello di previsione ad una variabile in quanto di più facile applicazione.

3.6.4 Influenza del diametro del percussore

In questo paragrafo si è valutato l'effetto della dimensione del percussore sulla legge dell'indentazione.

Per fare un'analisi completa è stato preventivamente analizzato come variano le curve U-s al variare di D_p .

Se si confrontano quadriassiali con la stessa configurazione al variare del diametro dell'impattatore si ottengono valori dell'energia tanto maggiori quanto maggiore è il diametro dell'impattatore. Si può osservare, dalla figura 3.44, come vi sia una grossa divergenza specie nella parte finale del diagramma U – s. E' questa la zona che risente maggiormente dell'influenza del diametro del percussore.

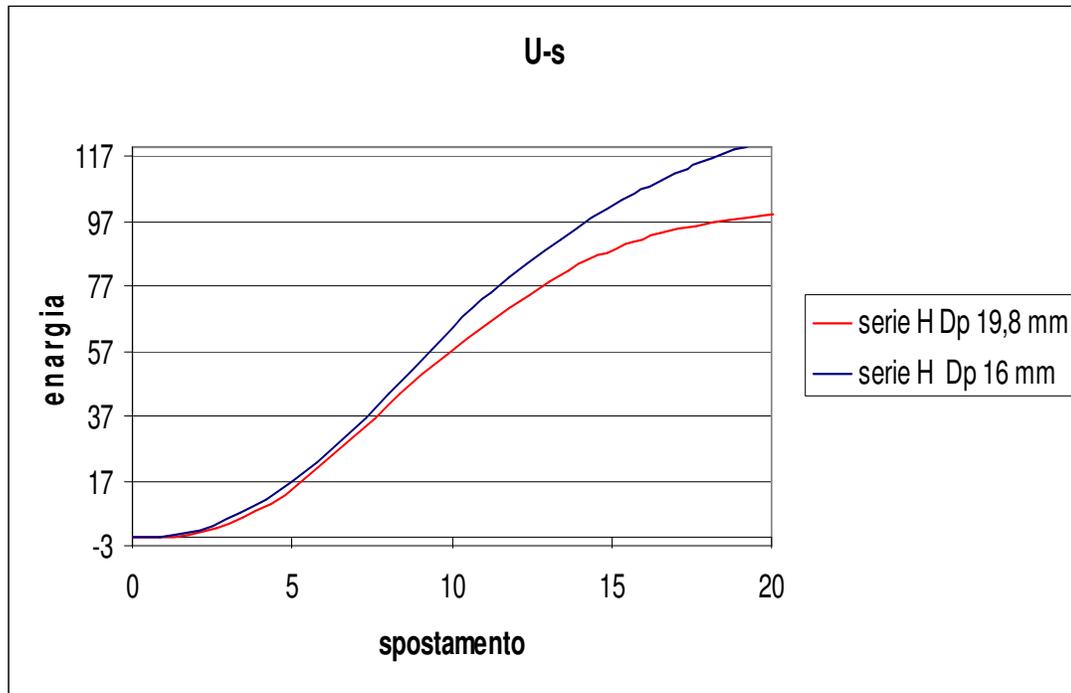


Fig. 3.44 -Variazione dell'energia al variare di D_p

E' stata eseguita la stessa analisi sulle curve F-s per provini quadriassiali di uguale configurazione ma impattati con differente penetratore (fig 3.45); si osserva che l'area sottesa alla curva è maggiore per il penetratore con diametro maggiore.

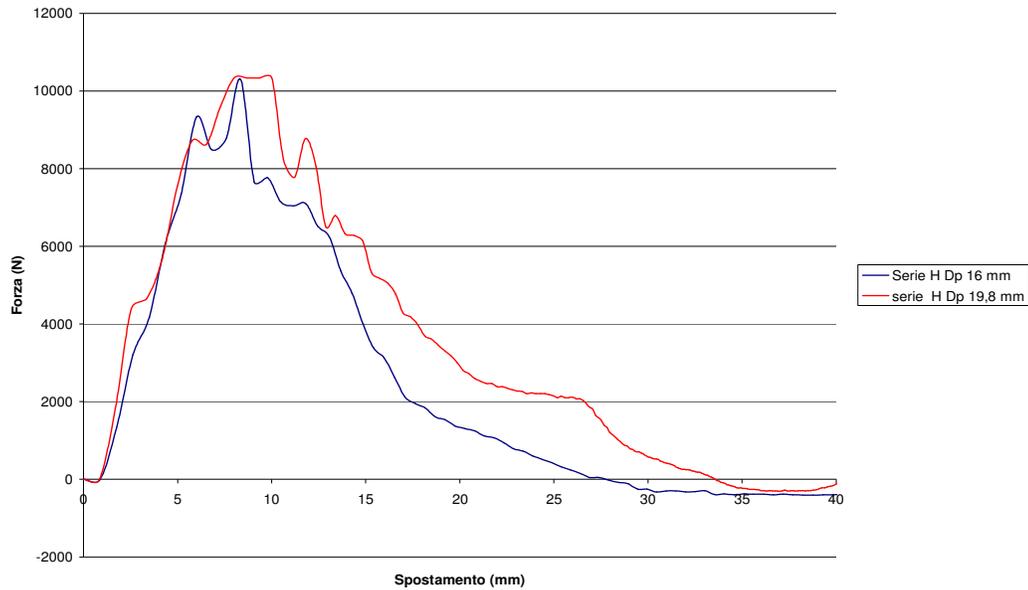


Fig 3.45 -Confronto tra uguali configurazioni quadriassiali al variare di D_p

Al fine di valutare l'effetti del percussore sull'indentazione in funzione dell'energia di impatto consideriamo il grafico 3.46 dove si è diagrammato, per l'unico spessore testato (4 mm), il valore dell'indentazione in funzione dell'energia di impatto U :

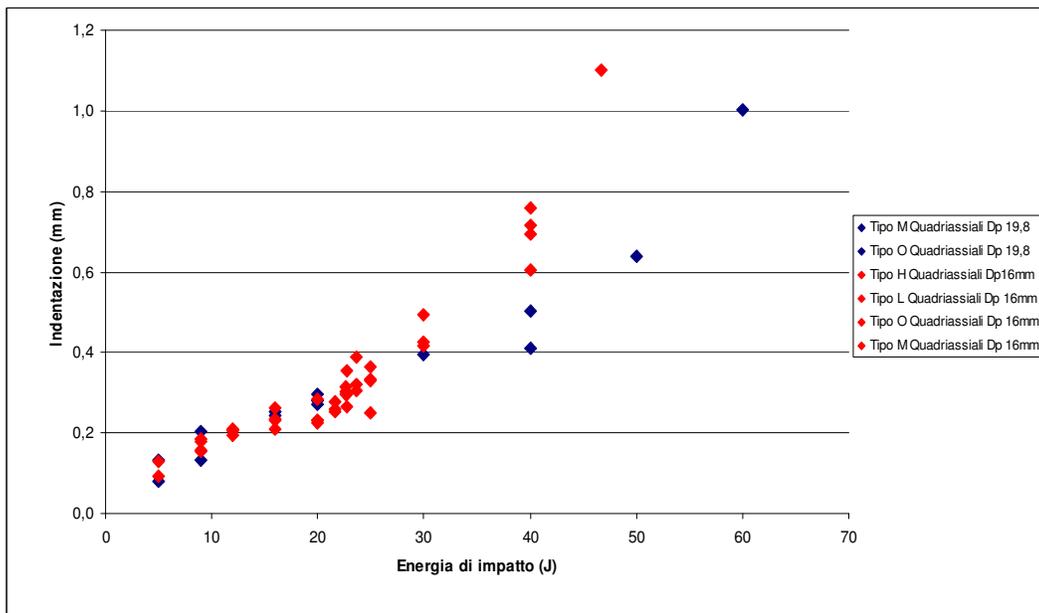


Fig 3.46 - I vs U per i quadriassiali con i due impattatori utilizzati

Come si può notare, l'effetto del percussore sulla variazione dell'indentazione con l'energia di impatto è sensibile; in particolare si osserva come le curve si spostino sempre più verso l'alto al diminuire di D_p .

Si è analizzato attraverso il grafico I vs U/U_p di figura 3.47 se l'adimensionalizzazione dell'energia di impatto rispetto a quella di penetrazione riduce questa dipendenza.

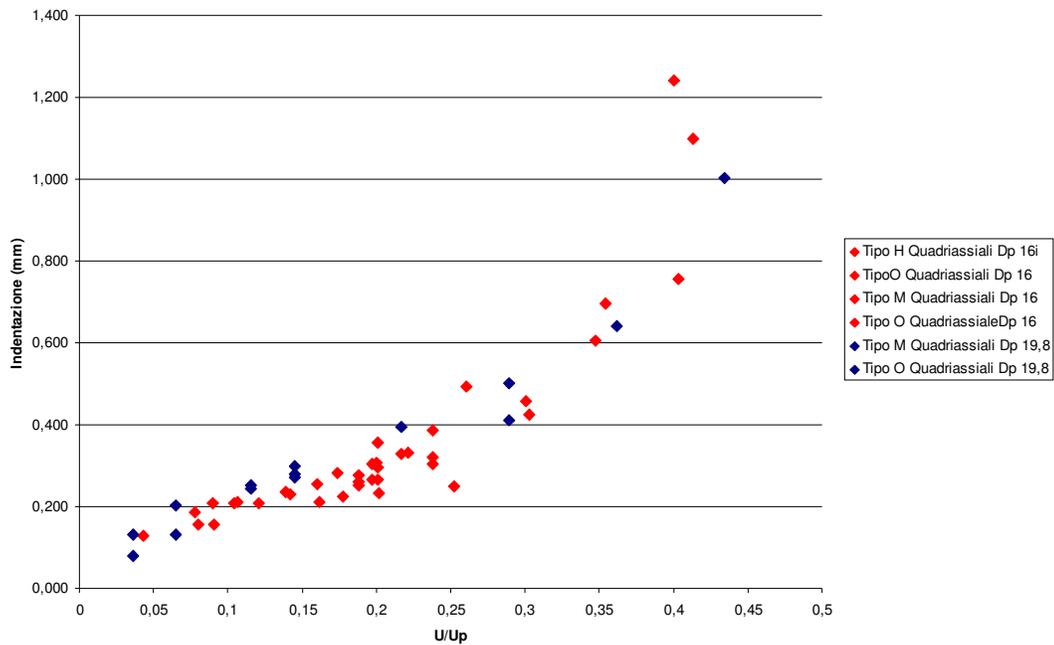


Fig. 3.47- I vs U/U_p per i vari impattatori utilizzati

Come si può osservare dal grafico di figura precedente, l'adimensionalizzazione porta a una buona sovrapposizione dei dati relativi ai due diversi percussori.

Per eliminare completamente la dipendenza dal D_p si è pensato di adimensionalizzare l'indentazione rispetto al diametro del percussore.

I risultati di tali analisi sono rappresentati nel grafico di figura 3.48.

Il grafico fornisce una minore dispersione dei dati; ciò avviene perché l'adimensionalizzazione è avvenuta sia rispetto al diametro del percussore sia rispetto all'energia di penetrazione.

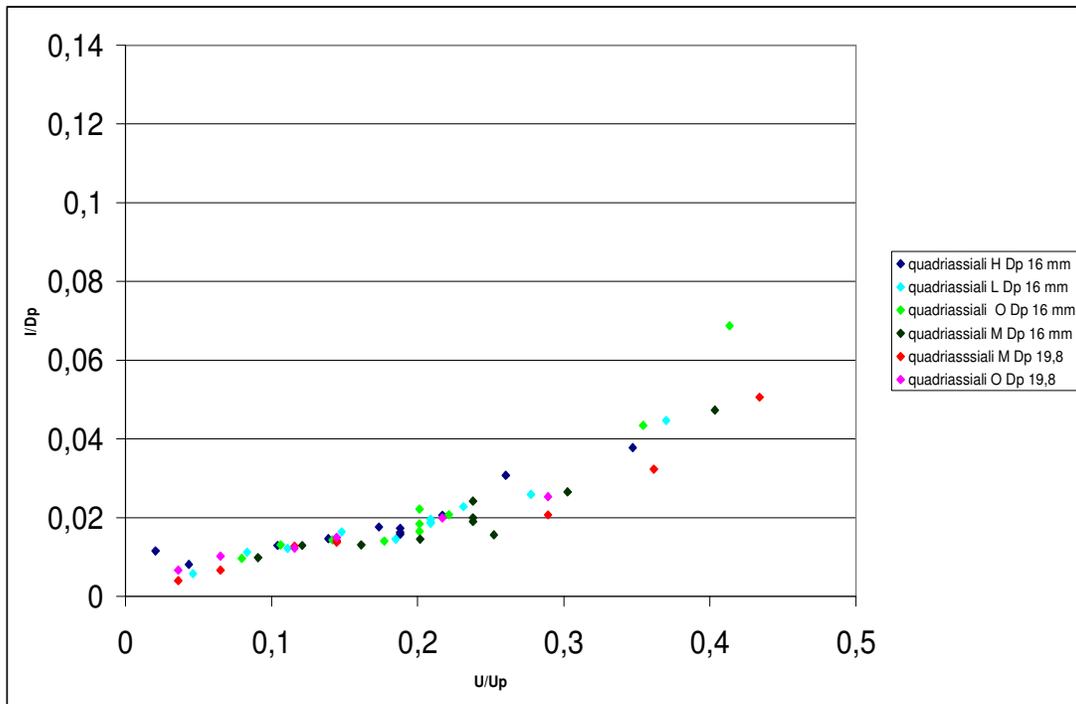


Fig. 3.48- I/D_p vs U/U_p per i vari impattatori utilizzati

3.6.5 Area delaminata in funzione dell'energia di impatto

I provini impattati sono stati sottoposti a scansione ultrasonora mediante l'apparecchiatura descritta nel capitolo successivo. Le scansioni ultrasonore hanno fornito una immagine, l'eco di fondo, rappresentativa dell'intero danno.

Mediante opportuno software il provino è stato scalato e l'area delaminata calcolata con buona approssimazione.

Di seguito si riportano due tabelle (3.5 e 3.6) con i valori delle aree delaminate rispettivamente per i provini biassiali e quadriassiali e il grafico di figura 3.49 che mostra come queste varino al variare della energia di impatto.

Provino	Energia Impatto (Joule)	Area danno (mm²)
BMLIM2	9	608,7
BMLIM3	16	1210,5
BMLIM4	20	2381,9
BMLIM5	30	2857,5
BMLIM6	40	2884
BMLIM8	19,16	2113,6
BMLIM9	19,16	2429,5
BHLIM2	9	740,6
BHLIM3	16	1536
BHLIM4	20	2110,1
BHLIM5	30	2164,9
BHLIM6	40	3616,7
BHLIM7	20,47	2218,9
BHLIM8	20,47	2416,2
BGLIM2	9	1559,3
BGLIM3	16	1830,4
BGLIM4	20	2598,2
BGLIM5	30	4505,2
BGLIM6	40	4196,7
BGLIM8	18,7	3451,4
BGLIM9	18,7	3548,9
BTLIM2	9	993
BTLIM3	16	1830
BTLIM4	20	2549
BTLIM5	30	3218
BTLIM6	40	4500
BTLIM7	21,01	2548
BTLIM8	21,01	4478
BOLIM2	9	924
BOLIM3	16	1323
BOLIM4	20	1734
BOLIM5	30	2146
BOLIM6	40	3267
BOLIM8	19,4	1870
BOLIM9	19,4	3231,7

Tab 3.5 - Valore aree delaminate per i campioni biassiali.

Provino	Energia Impatto (Joule)	Area danno (mm²)
QHL3IM2	9	1040,27
QHL3IM3	12	1176,60
QHL3IM4	16	2601,62
QHL3IM5	20	3936,76
QHL3IM6	25	4017,80
QHL3IM7	30	4722,51
QHL3IM8	40	8339,64
QHL3IM9	21,67	3980,28
QHL3IM10	21,67	3085,43
QHL3IM11	21,67	4025,45
QLL3IM2	9	1223,30
QLL3IM3	12	1381,20
QLL3IM4	16	2531,70
QLL3IM5	20	4387,34
QLL3IM6	25	5264,39
QLL3IM7	30	6869,98
QLL3IM8	40	6381,54
QLL3IM9	22,58	4204,34
QLL3IM10	22,58	5302,46
QLL3IM11	22,58	5509,72
QML3IM2	9	779,02
QML3IM3	12	1690,76
QML3IM4	16	2479,13
QML3IM5	20	3673,06
QML3IM6	15	3265,03
QML3IM7	30	4315,36
QML3IM8	40	7034,40
QML3IM9	23,59	3672,15
QML3IM10	23,59	3872,24
QML3IM11	23,59	4122,51
QOL3IM2	9	955,06
QOL3IM3	12	2013,90
QOL3IM4	16	3290,14
QOL3IM5	20	2186,42
QOL3IM6	25	5096,08
QOL3IM7	46,67	6493,19
QOL3IM8	40	7196,20
QOL3IM9	22,72	4347,74
QOL3IM10	22,72	3191,28
QOL3IM11	22,72	4299,90

Tab 3.6-Valori aree delaminate per i campioni quadriassiali

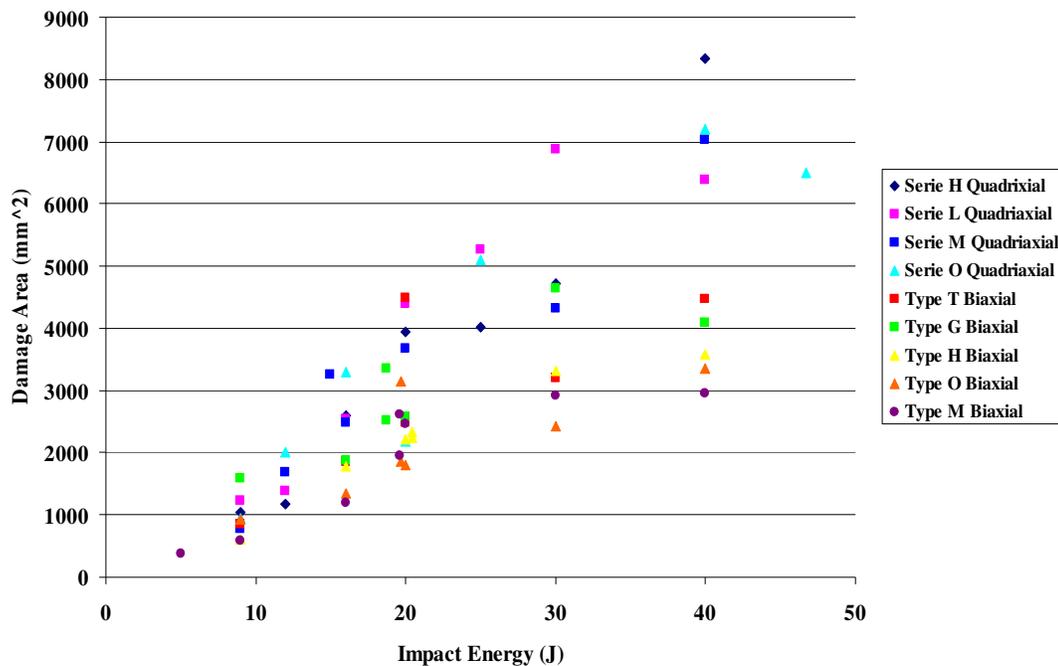


Fig 3.49 - Aree delaminate in funzione dell'energia di impatto

Dal grafico di figura 3.49 si evidenzia che non ci sono grosse differenze tra le varie configurazioni dei provini biassiali. Stessa cosa si può dire per le configurazioni dei quadriassiali. Si osserva, invece, come la tendenza dei biassiali si discosta dai quadriassiali. Il confronto sull'area delaminata è il primo che mostra una differenza di comportamento tra i campioni biassiali e quelli quadriassiali.

I campioni quadriassiali, infatti, a parità di energia presentano sempre aree delaminate maggiori.

3.6.6 Area delaminata in funzione della forza massima

Secondo alcuni studi recenti [10-13], ricavando un grafico Area delaminata/ F_{max} tutti i punti sperimentali convergono con buona approssimazione su una singola curva, che viene seguita anche quando la superficie delaminata si estende al di là dei confini dell'appoggio. L'analisi della delaminazione in funzione della forza massima dà quindi una spiegazione al fatto che laminati spessi

subiscono delaminazioni più estese a parità di energia: questo dipende dalla maggior forza di contatto sviluppata nell'urto, dovuta alla più elevata rigidità e resistenza della struttura. Si può ricavare una curva a tratto continuo che è la rappresentazione grafica dell'equazione empirica:

$$A = \eta \cdot F_{max}^{\beta} \quad (3.6.6.1)$$

dove A indica l'area delaminata, e η, β sono due costanti che, calcolate con il metodo dei minimi quadrati, per i laminati classici in carboresina valgono $\eta = 3.13 \times 10^{-8} \text{ mm}^2/\text{N}^{\beta}$ e $\beta = 2.89$. In base ai risultati ottenuti, le due costanti dovrebbero essere indipendenti dal diametro del percussore e dallo spessore del pannello. È invece ipotizzabile che esse siano funzione del tipo di laminato, in quanto l'estensione della delaminazione è influenzata sia dalla natura della matrice [10] che dalla sequenza di laminazione [6]. In ogni caso, la validità dell'equazione precedente dovrebbe essere limitata, per ogni coppia di valori spessore-diametro del percussore, al campo in cui $F_{max} > F_i$. E' stato applicato il modello sia ai soli provini quadriassiali che ai soli biassiali (fig 3.50 e fig 3.51) e sono state ricavate le relative costanti μ e β .

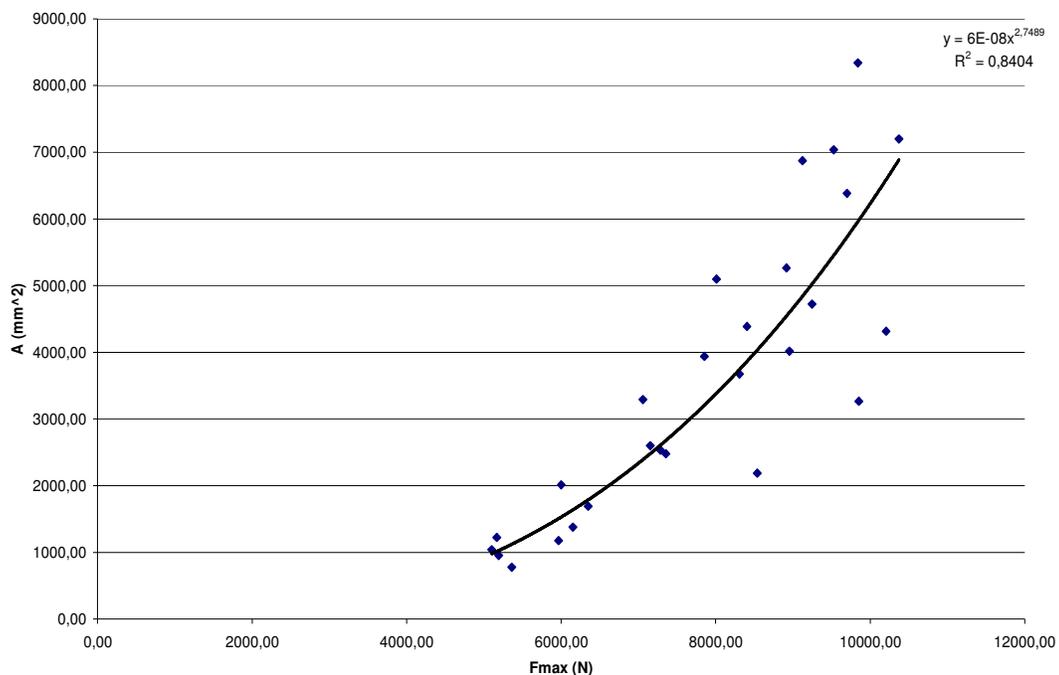


Fig 3.50 -Calcolo delle costanti per provini quadriassiali

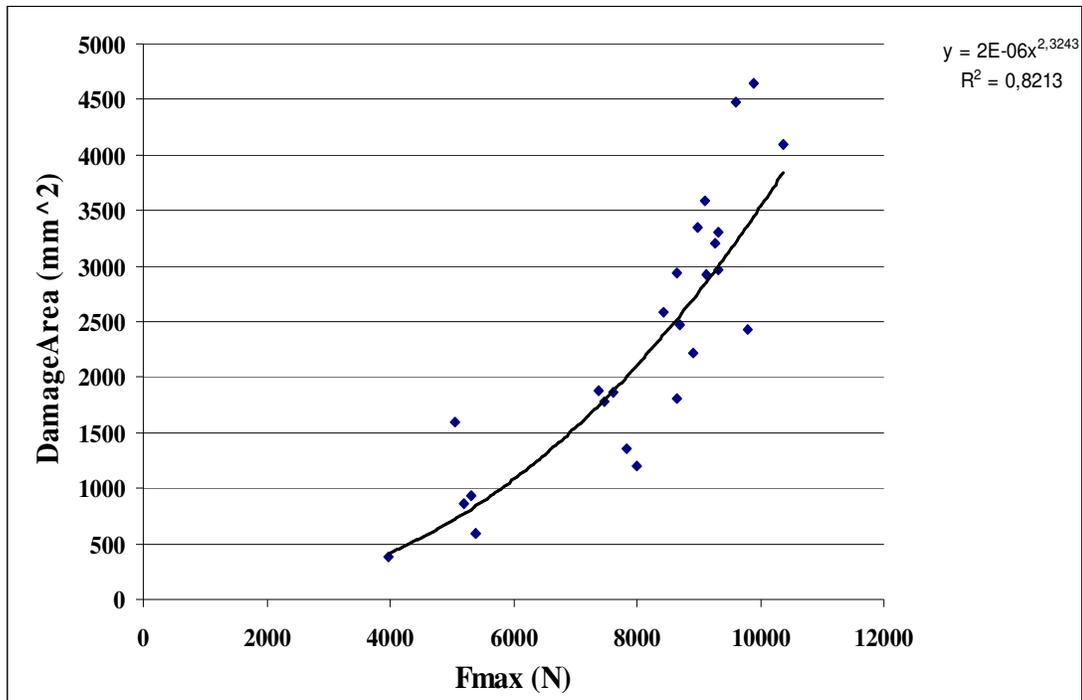


Fig 3.51 -Calcolo delle costanti per provini biassiali

Le costanti ricavate sono:

$$\eta = 2,7489$$

$$\beta = 6E-08$$

per i quadriassiali e

$$\eta = 2,3243$$

$$\beta = 2E-06$$

per i biassiali.

Considerando un modello che tenga conto, contemporaneamente di entrambe le configurazioni otteniamo il grafico di figura 3.52.

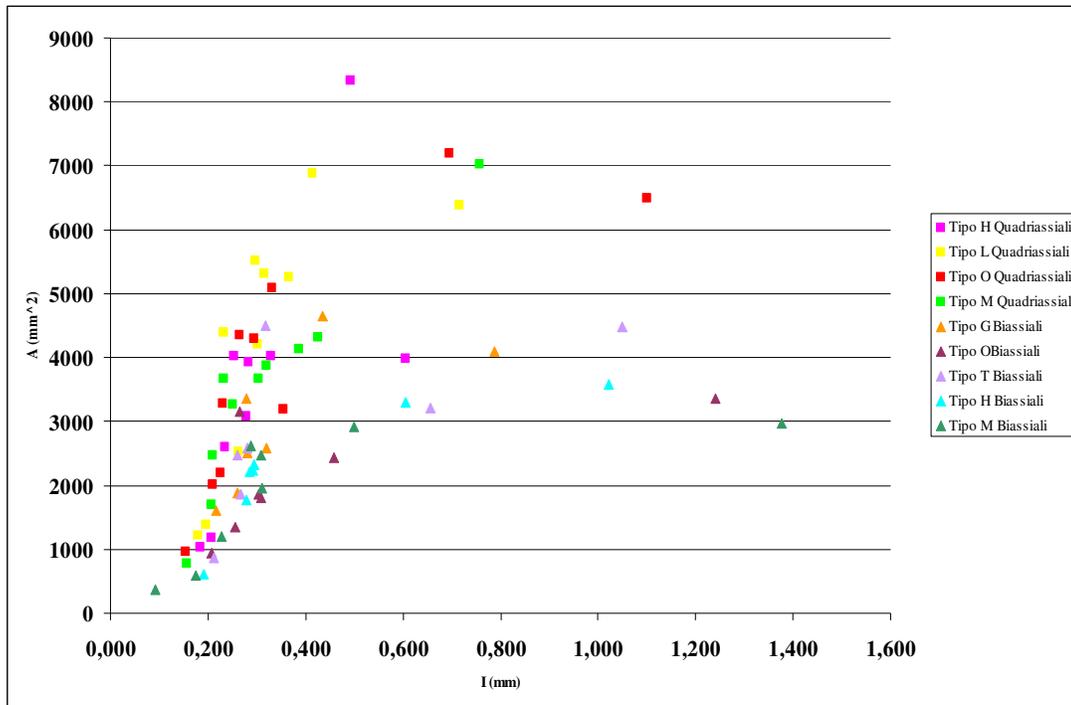


Fig 3.53- Area delaminata-Indentazione: confronto biassiali quadriassiali

Si può osservare come per piccoli valori di indentazione i provini si comportano allo stesso modo.

Per una migliore distinzione del comportamento delle differenti configurazioni nel grafico 3.54 le serie biassiali e quadriassiali sono distinte con due soli colori: in rosso i quadriassiali e i blu i biassiali.

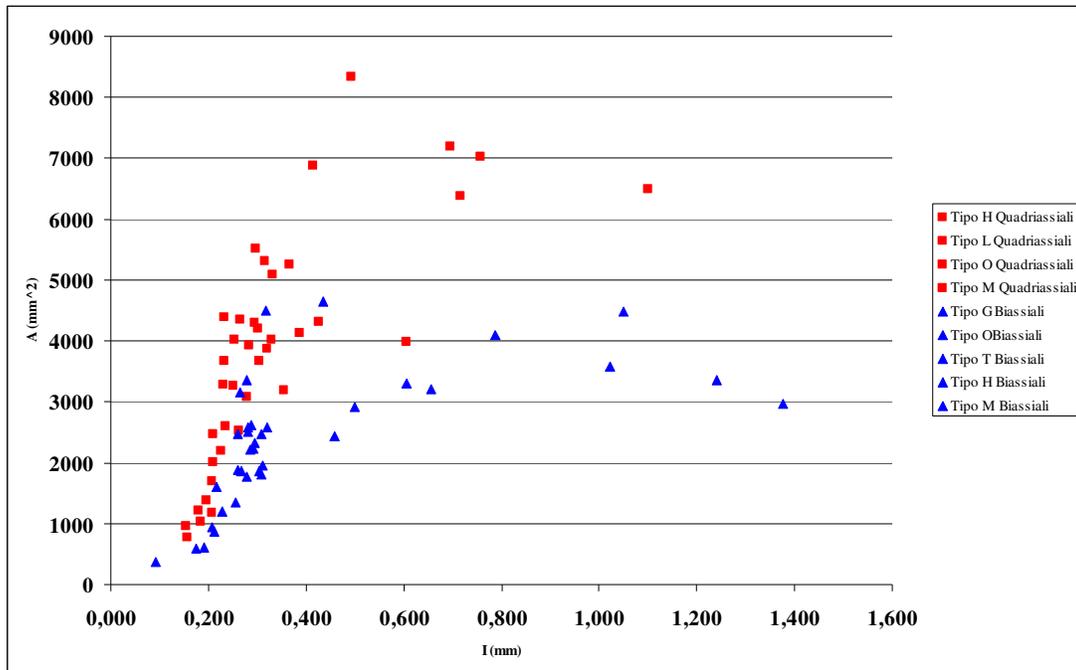


Fig 3.54 - Area delaminata-Indentazione: confronto biassiali quadriassiali

Il grafico di figura 3.54 mostra una sostanziale differenza tra i provini biassiali e quadriassiali: i punti relativi ai provini biassiali sono sempre al di sotto dei quadriassiali; questo vuol dire che a parità di indentazione i quadriassiali presentano un danno più esteso.

Questa è una considerazione importante soprattutto alla luce del concetto della BVID; indentazioni al limite dell'accettabilità possono dare, per i quadriassiali, aree delaminate estese e non tollerabili.

Ciò che accomuna i biassiali e i quadriassiali è l'andamento della tendenza dei dati: in entrambi i casi la curva di approssimazione cresce fino a un certo valore di indentazione raggiunge un massimo e successivamente comincia a decrescere.

CAPITOLO IV

Analisi Microscopica

4.1 Introduzione

È stata eseguita, sui provini caricati ad energia crescente, una campagna di ispezioni ultrasonore e di microscopia, volte ad individuare la genesi e la successiva evoluzione del danno nel materiale impattato.

I meccanismi di cedimento in un laminato composito sono sostanzialmente cricche intralaminari e delaminazioni; la correlazione tra le une e le altre è però di difficile individuazione perché, a causa dell'intrinseca rigidità del sistema materiale, il danno, una volta innescatosi, procede di schianto per poi bloccarsi quando l'energia richiesta alla propagazione ridiventa superiore a quella liberata nella nascita delle superfici di frattura.

Inoltre non bisogna perdere di vista il fatto che un materiale intrinsecamente anisotropo danneggiato presenta, a parità di carico, una distribuzione di tensioni completamente diversa a quella presente prima della formazione del danno stesso, dipendendo i meccanismi di rottura oltre che dal sistema resina/matrice, dalle stratificazioni adottate e dagli spessori dei laminati.

Si è indagato sull'intera storia del danno registrato nei provini impattati ad energia crescente.

Di ogni provino, corredato dalla rispettiva curva di carico, è stata eseguita analisi ultrasonica e frattografica.

4.2 Tecniche di ispezione

4.2.1 Indagine ultrasonica

Le scansioni agli ultrasuoni sono state eseguite presso i laboratori del DIMP.

È stata adottata una tecnica *Full Volume* con sonda trasmittente\ricevente da 25 MHz.

Tutte le scansioni, nel formato 155 x 110 mm sono state condotte con passo 0,25 mm da un manipolatore robotica (braccio antropomorfo), una struttura complessa con sei assi di rotazione con tre giunti rotazionali e un nodo sferico con altri tre giunti che garantiscono piena libertà di movimento al robot in tutte le direzioni (figura 4.1).





Fig 4.1- a) il braccio antropomorfo b) sonda di scansione

Il manipolatore robotico ha un raggio di lavoro di 865 mm, una ripetitività di $\pm 33 \mu\text{m}$ e un'accuratezza di $\pm 50 \mu\text{m}$; la massima velocità cartesiana raggiungibile è di 1,8 m/s e la capacità di peso nominale è di 1,5 Kg.

Il tempo richiesto per ogni scansione è di 2,5 h (escluso i tempi di "settaggio" della strumentazione).

Un eventuale difetto è "visibile", nel treno d'onda, da una diminuzione dei picchi del segnale indicante perdita di energia per riflessione.

Un adatto software consente la rilevazione di tutti i parametri di prova e, fatto estremamente importante ai fini del nostro lavoro, la possibilità di rappresentare graficamente le scansioni alle varie profondità selezionando apposite "gates" sul treno d'onda.

Purtroppo non tutte le scansioni riguardano le interfacce delle varie lamine, ma la buona risoluzione dell'immagine, unita alla conoscenza della velocità di propagazione dell'onda nel laminato, ci consentono di associare comunque, con estrema sicurezza, ogni immagine alla profondità dello spessore cui è relativa.

Di tutti i provini sono state effettuate due scansioni, una precedente l'impatto (a provino integro), l'altra dopo l'impatto.

La prima scansione ha avuto l'unico scopo di escludere eventuali difetti preesistenti che avrebbero falsato il risultato finale; la seconda ci ha permesso di studiare la propagazione del danno.

Sono state condotte prove comparative per ogni configurazione disponibile e a parità di carico applicato onde controllare la riproducibilità del danno. Acquisite le immagini, l'eco di fondo è stato importato con opportuno software di disegno grafico con il quale è stato scalato ed è stata ricalcata l'immagine del danno prodotto in seguito all'impatto.

In questo modo si può avere una conoscenza completa della geometria del danno e della sua estensione in termini di area delaminata.

A titolo di esempio in figura 4.2 è riportato l'eco i fondo (è una immagine nella quale sono proiettati i danni presenti a vari livelli dello spessore del campione) ottenuta per il provino BHLIM2.

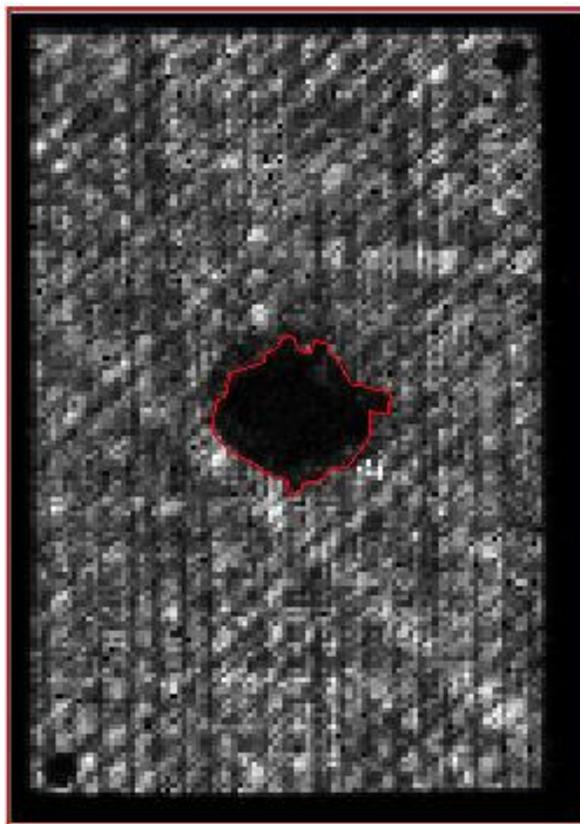


Fig 4.2 -Eco di fondo del provino BHLIM2 (danno evidenziato in rosso)

Nelle tabelle 4.1 e 4.2 sono riportati, rispettivamente, i risultati in termini di area delaminata per i provini biassiali e quadriassiali.

Provino	Area danno (mm²)	Energia Impatto (Joule)
BMLIM2	608,7	9
BMLIM3	1210,5	16
BMLIM4	2381,9	20
BMLIM5	2857,5	30
BMLIM6	2884	40
BMLIM8	2113,6	19,16
BMLIM9	2429,5	19,16
BHLIM2	740,6	9
BHLIM3	1536	16
BHLIM4	2110,07	20
BHLIM5	2164,9	30
BHLIM6	3616,68	40
BHLIM7	2218,9	20,47
BHLIM8	2416,2	20,47
BGLIM2	1559,3	9
BGLIM3	1830,4	16
BGLIM4	2598,18	20
BGLIM5	4505,25	30
BGLIM6	4196,7	40
BGLIM8	3451,4	18,7
BGLIM9	3548,9	18,7
BTLIM2	993	9
BTLIM3	1830	16
BTLIM4	2549	20
BTLIM5	3218	30
BTLIM6	4500	40
BTLIM7	2548	21,01
BTLIM8	4478	21,01
BOLIM2	924	9
BOLIM3	1323	16
BOLIM4	1734	20
BOLIM5	2146	30
BOLIM6	3267	40
BOLIM8	1870	19,4
BOLIM9	3231,69	19,4

Tabella 4.1- Valore aree delaminate per i campioni biassiali.

Provino	Area danno (mm²)	Energia Impatto (Joule)
QHL3IM2	1040,27	9
QHL3IM3	1176,60	12
QHL3IM4	2601,62	16
QHL3IM5	3936,76	20
QHL3IM6	4017,80	25
QHL3IM7	4722,51	30
QHL3IM8	8339,64	40
QHL3IM9	3980,28	21,67
QHL3IM10	3085,43	21,67
QHL3IM11	4025,45	21,67
QLL3IM2	1223,30	9
QLL3IM3	1381,20	12
QLL3IM4	2531,70	16
QLL3IM5	4387,34	20
QLL3IM6	5264,39	25
QLL3IM7	6869,98	30
QLL3IM8	6381,54	40
QLL3IM9	4204,34	22,58
QLL3IM10	5302,46	22,58
QLL3IM11	5509,72	22,58
QML3IM2	779,02	9
QML3IM3	1690,76	12
QML3IM4	2479,13	16
QML3IM5	3673,06	20
QML3IM6	3265,03	15
QML3IM7	4315,36	30
QML3IM8	7034,40	40
QML3IM9	3672,15	23,59
QML3IM10	3872,24	23,59
QML3IM11	4122,51	23,59
QOL3IM2	955,06	9
QOL3IM3	2013,90	12
QOL3IM4	3290,14	16
QOL3IM5	2186,42	20
QOL3IM6	5096,08	25
QOL3IM7	6493,19	46,67
QOL3IM8	7196,20	40
QOL3IM9	4347,74	22,72
QOL3IM10	3191,28	22,72
QOL3IM11	4299,90	22,72

Tab 4.2 -Valori aree delaminate per i campioni quadriassiali

4.2.2 Microscopia

Acquisite le immagini ultrasoniche i provini sono stati sezionati in base a precisi criteri volti sia all'individuazione della rispondenza immagine ultrasonora \ danno effettivo, che ai meccanismi di innesco e sviluppo del danno.

Tutti i provini sono stati sezionati longitudinalmente in corrispondenza del punto centrale dell'impatto e ad una distanza dal centro pari ad $\frac{1}{4}$ della larghezza del provino (fig 5.2.2.1).

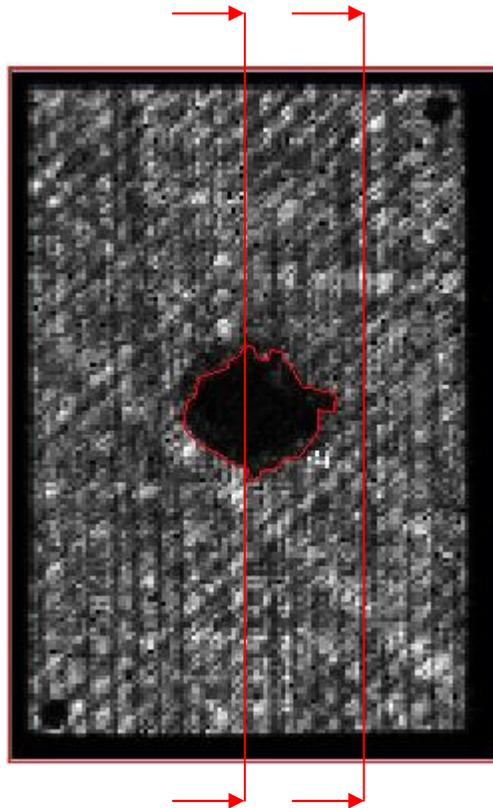


Fig. 4.3 - Sezioni effettuate

Naturalmente nell'eseguire i tagli si è tenuto conto dello spessore della lama della troncatrice e della quantità di materiale che, successivamente, si sarebbe perso nell'operazione di lucidatura.

Il taglio è avvenuto mediante una troncatrice con lama circolare diamantata (fig 4.4).



Fig 4.4 -Troncatrice con lama circolare

La lucidatura è avvenuta in umido con l'utilizzo di carte abrasive di differente granulometria.

Si è partiti dalla grana 180; si è proceduto quindi con carte di grana sempre più fine attraverso l'utilizzo di grane 300, 400, 600, 800, 1200, 2000, 2400 (i valori si riferiscono al numero di granelli abrasivi per pollice quadrato) ed infine ad una lucidatura con panno e pasta diamantata con grana di 3μ .

Nella foto successiva (4.5) è rappresentata la macchina utilizzata per la lucidatura.



Fig. 4.5 - Lucidatrice

Per le indagini microscopiche è stato usato un microscopio ottico tipo Zeiss (fig 4.6) con ingrandimento 5x, 10x, 20x, 50x, 100x.



Fig. 4.6 -Microscopio ottico Zeiss

Al microscopio è stata collegata una macchina fotografica digitale da 5 mega pixel, tipo Nikon Coolpix.

Di ogni provino è stata esaminata una superficie lunga 75 mm. Sono stati eseguiti diversi scatti fotografici (circa quaranta per ogni provino) e, successivamente, attraverso un opportuno software si è proceduto all'incollaggio delle varie immagini.

Per ogni provino si è così ottenuta un'immagine fotografica rappresentativa dalla zona ispezionata (lunga 75 mm).

Dall'osservazione di quest'ultima sono state ricavate la posizione e la lunghezza delle delaminazioni e delle cricche interlaminari.

Si è poi proceduto alla costruzione di schemi che riproducono l'esatta posizione del danno all'interno del provino.

Le immagini ottenute sono del tipo in figura 4.7.

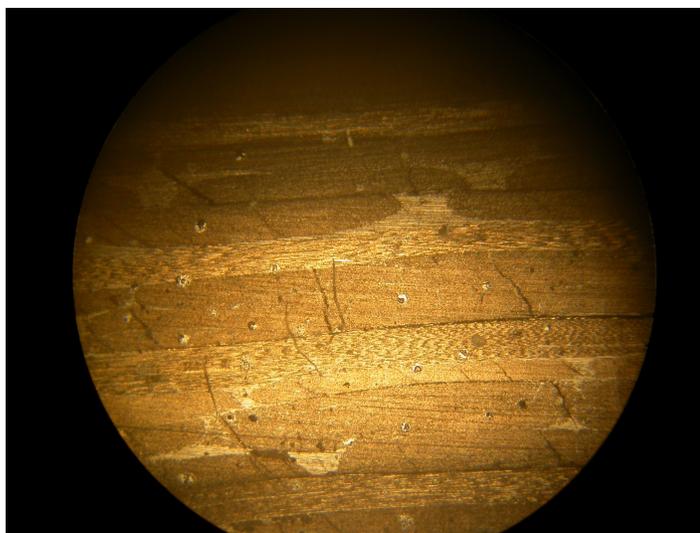


Fig 4.7 -Immagine al microscopio di una parte del provino BHLIM2 ad ingrandimento 5x

4.3 Correlazioni ultrasuoni-microscopia

È stato analizzato lo sviluppo del danno e la sua successiva propagazione per una configurazione di campioni quadriassiali e una di campioni biassiali. È stata fatta una differenziazione sulle modalità di genesi e sviluppo del danno al variare dell'energia per analizzare la crescita e la propagazione dello stesso.

Si è scelto di analizzare solamente una serie per i biassiali e una per i quadriassiali perché, così come detto nel capitolo precedente, le scansioni mostravano chiaramente che non esistono sostanziali differenze tra le varie configurazioni.

4.3.1 Analisi ultrasonica e microscopica su laminati biassiali serie H

Provino BHLIM2

Prima dell'impatto il provino, ispezionato mediante analisi ultrasonica, risultava integro.

In tabella 4.3 sono riportate le caratteristiche principali del provino e della prova.

Campione	Energia di impatto	Indentazione (mm)	Area delaminata (mm ²)
BHLIM2	9J	0,10	740,6

Tab. 4.3- Valori relativi al provino BHLIM2

Nelle figure seguenti (4.8 – 4.9 – 4.10) sono mostrate la faccia impattata, con l'impatto rivolto verso l'alto, la faccia posteriore all'impatto e la sezione.

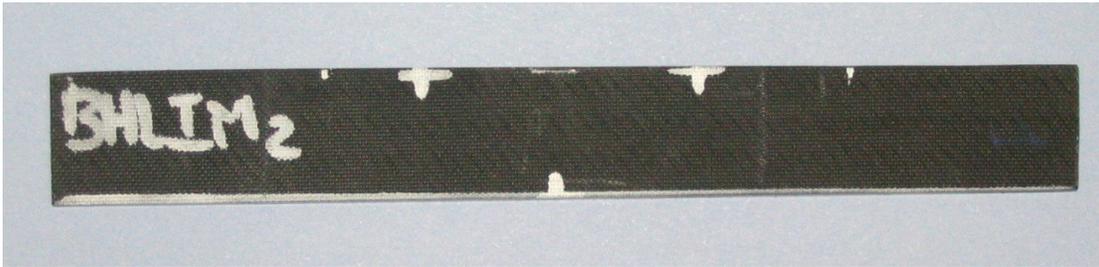


Fig. 4.8 – Vista provino lato impatto



Fig. 4.9 – Vista provino lato opposto all'impatto



Fig. 4.10 - Sezione

Come è evidente dalle foto questo provino non presenta danni visibili; questo trova riscontro nella misura dell'indentazione (0,10 mm), inferiore anche al limite della BVID.

Dalle immagini U.S. (fig. 4.11) si nota la nascita di una delaminazione già in corrispondenza della prima interfaccia $0^{\circ}/90^{\circ}$ mentre vi sono delle cricche intralaminari all'interfaccia $-45^{\circ}/+45^{\circ}$.

Inoltre delaminazioni sono presenti nei pacchetti centrali simmetrici $0^{\circ}/90^{\circ}/90^{\circ}/0^{\circ}$ e nella successiva interfaccia $0^{\circ}/90^{\circ}$. In pratica la delaminazione sembrerebbe passare dall'interfaccia del lato impattato, a quella del lato opposto, attraverso cricche intralaminari nelle lamine unidirezionali $-45^{\circ}/+45^{\circ}$.

È stato, inoltre, osservato che il danno rivelabile dall'immagine ottenuta dalle scansioni ad un determinato livello risulta maggiore di quello rilevabile dall'eco di fondo.

Ciò accade quando al di sotto del livello in esame non vi sono lamine danneggiate e quindi, il segnale, attenuandosi, fornisce un danno di dimensione inferiore.

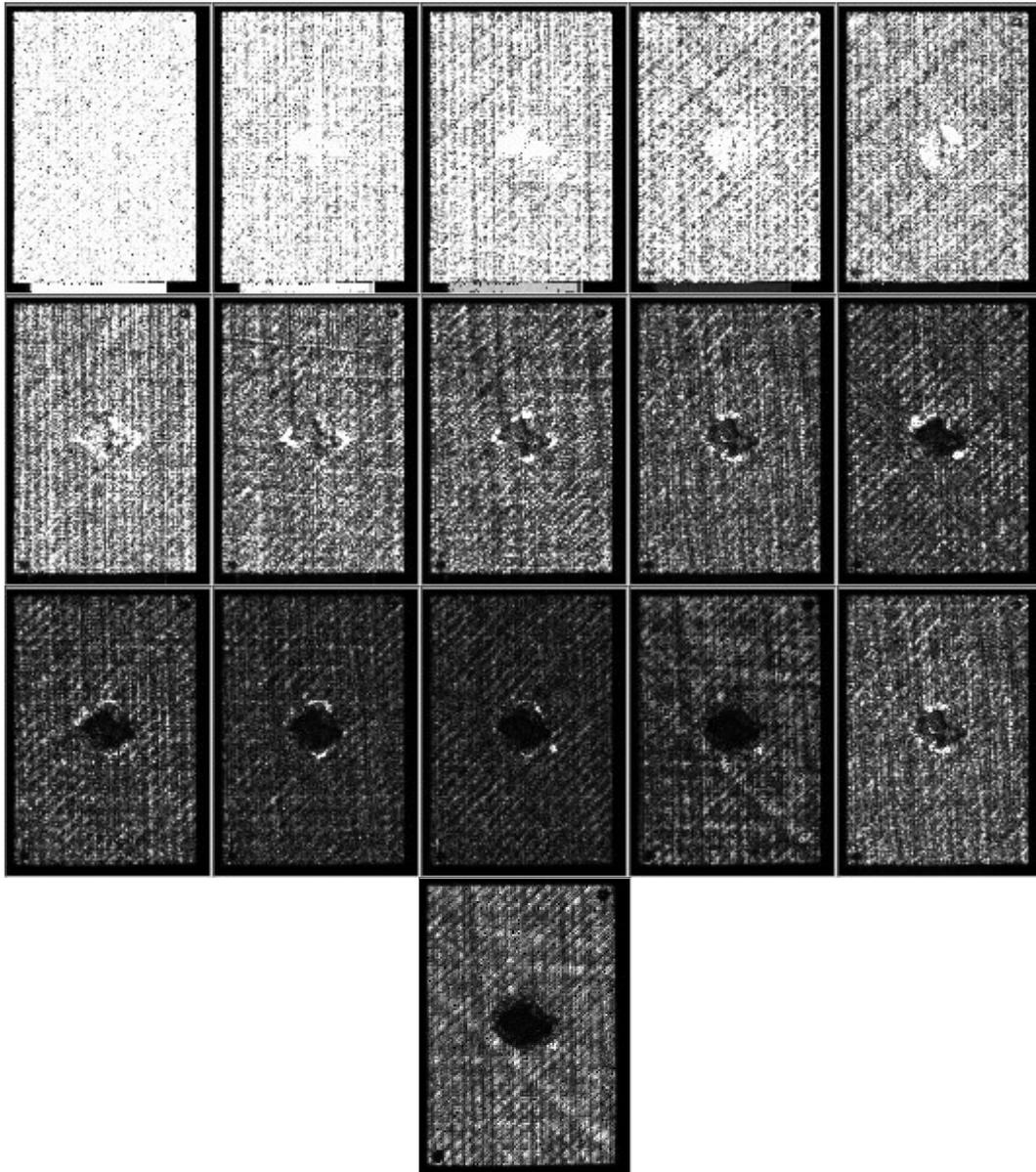


Fig 4.11 - Immagini scansione provino BHLIM2

E' stato confrontato quanto osservato nelle scansioni con lo schema ricavato dall'analisi microscopica (figura 4.12). Lo schema riporta solo i pacchetti perché la microscopia a ingrandimento 5x non consentiva di distinguere le singole lamine di ogni pacchetto. Ingrandimenti superiori, invece, non consentivano una visione globale del danno. I pacchetti riportati nello schema sono sette e non otto perché quelli centrali erano indistinguibili (il laminato è simmetrico). Dunque le divisioni in figura 4.12 rappresentano, nell'ordine:

1. pacchetto $+45^{\circ}/-45^{\circ}$
2. pacchetto $0^{\circ}/90^{\circ}$
3. pacchetto $+45^{\circ}/-45^{\circ}$
4. pacchetto $0^{\circ}/90^{\circ}/90^{\circ}/0^{\circ}$
5. pacchetto $+45^{\circ}/-45^{\circ}$
6. pacchetto $0^{\circ}/90^{\circ}$
7. pacchetto $+45^{\circ}/-45^{\circ}$

La configurazione è identica per tutti i biassiali. Nell'analisi dello schema di figura 4.12 si ha conferma di quanto osservato dalle scansioni. Si evidenzia, inoltre il tipico cono di impatto descritto nel secondo capitolo.

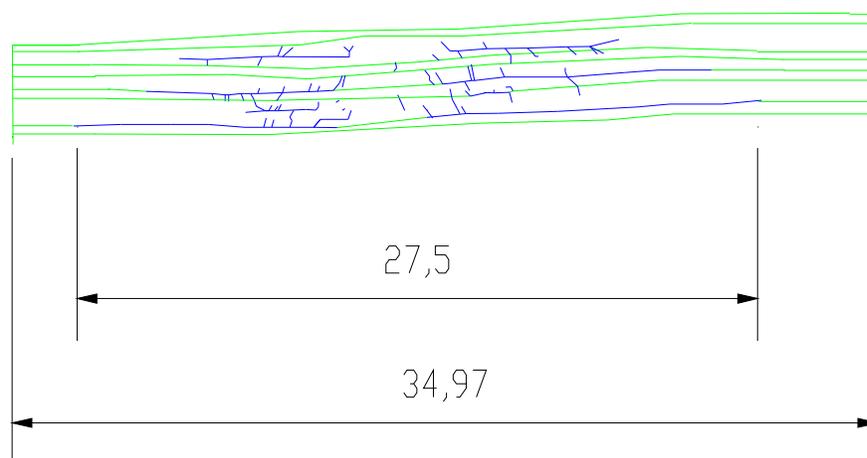


Fig 4.12 -Schema microscopia provino BHLIM2

Un ulteriore confronto può essere fatto comparando l'estensione della delaminazione ottenuta attraverso le due indagini.

Dalla microscopia la massima delaminazione risulta essere di 27,5 mm, dall'eco di fondo (figura 4.13), ottenuto dalle scansioni, si ottiene un valore simile, cosa che garantisce un perfetto accordo tra i due tipi di analisi.

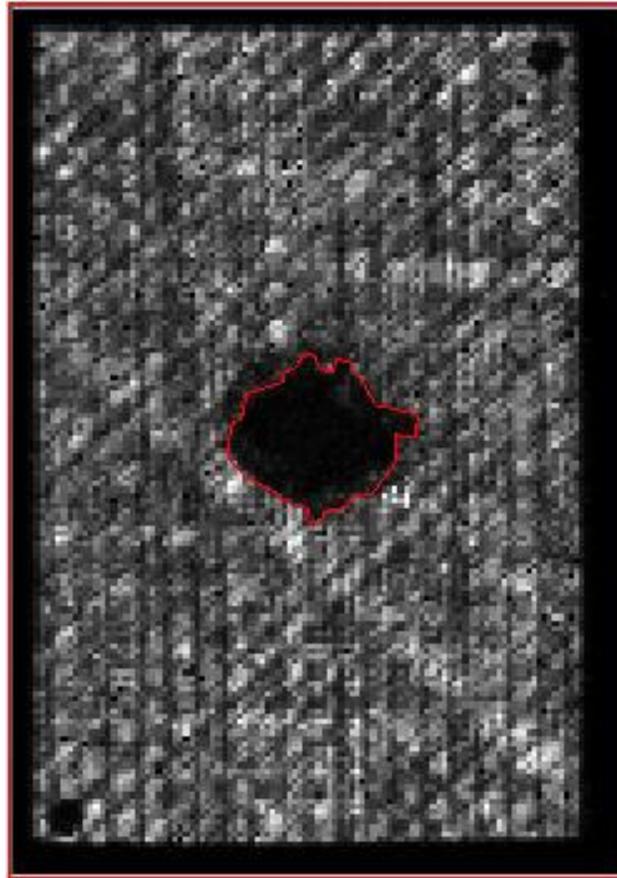


Fig 4.13 -Eco di fondo con area delaminata in rosso per il provino BHLIM2

Provino BHLIM3

Prima dell'impatto il provino, ispezionato mediante analisi ultrasonica, risultava integro.

In tabella 5.3.1.2 sono riportate le caratteristiche principali del provino e della prova.

Provino	Energia di impatto	Indentazione (mm)	Area delaminata (mm ²)
BHLIM3	16J	0,29	1536

Tab. 4.4 - Valori relativi al provino BHLIM3

Nelle figure seguenti (4.14 – 4.15 – 4.16) sono mostrate la faccia impattata, la faccia posteriore all’impatto e la sezione.



Fig. 4.14 - Vista provino lato impatto



Fig. 4.15 – Vista provino lato opposto all’impatto



Fig. 4.16 - Sezione

In questo caso il danno è appena visibile, ciò è confermato dall'indentazione (0,29 mm) che è proprio al limite della BVID.

L'analisi visiva mostra una leggera curvatura delle lamine in corrispondenza del lato opposto dell'impatto.

In figura 4.17 sono riportati i risultati dell'analisi ultrasonore, si osserva che il danno è visibile già nella seconda immagine inizia prima rispetto al provino BHLIM2, ovvero, tra la lamina a 45° e la lamina a 0°.

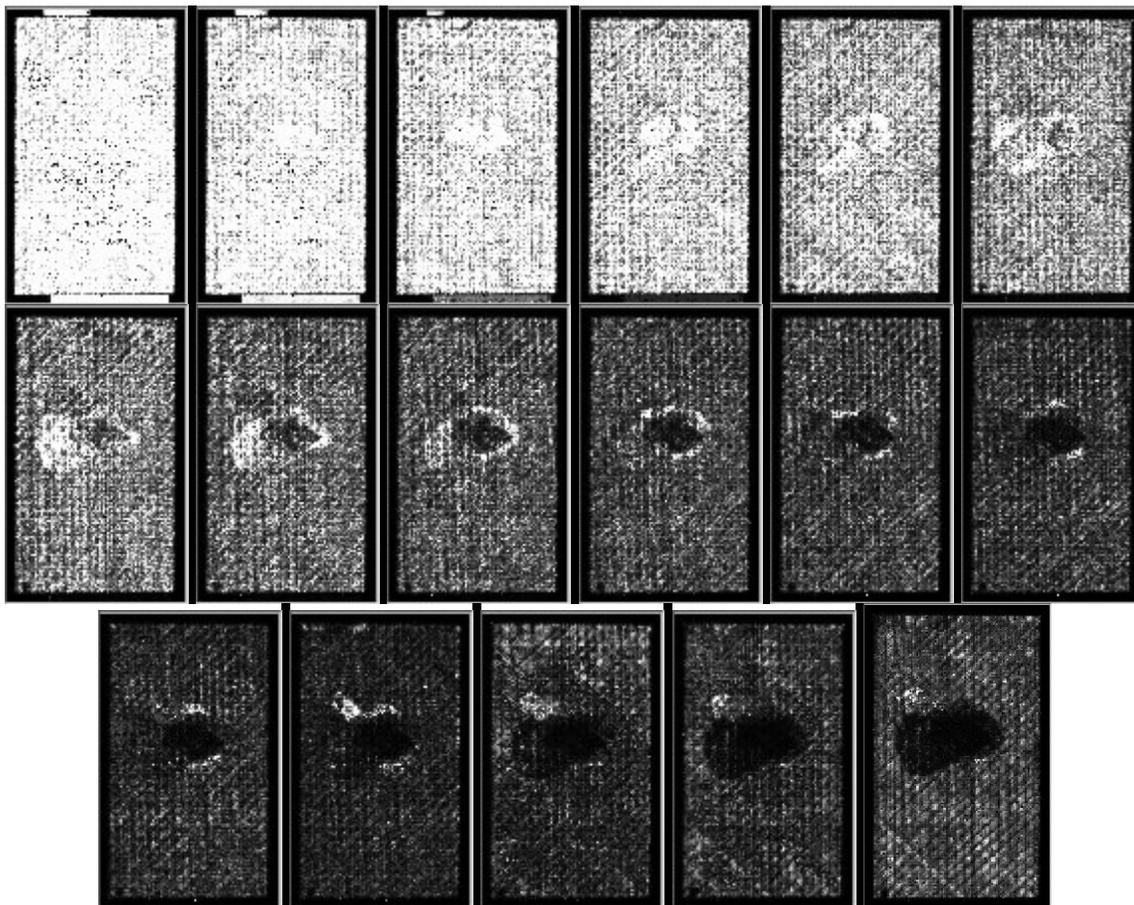


Fig 4.17 -Immagini scansione provino BHLIM3

Lo sviluppo del danno sembra lo stesso del caso precedente; questa volta nessuna immagine è significativamente più grande dell'eco di fondo questo dovrebbe indicare un danno esteso fino all'ultimo pacchetto, cosa che è stata verificata dall'analisi microscopica (figura 4.18). Dal confronto tra il valore di laminazione ottenuto dall'analisi microscopica (40,22 mm) e quello ottenuto dalla scansione ultrasonica 43,33 mm si osserva che esiste una differenza ma che è comunque contenuta.

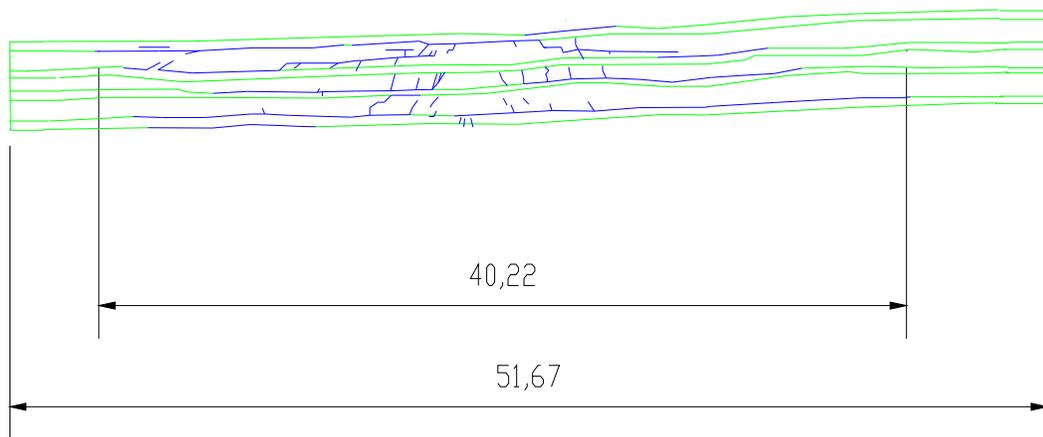


Fig 4.18 - Schema microscopia provino BHLIM3

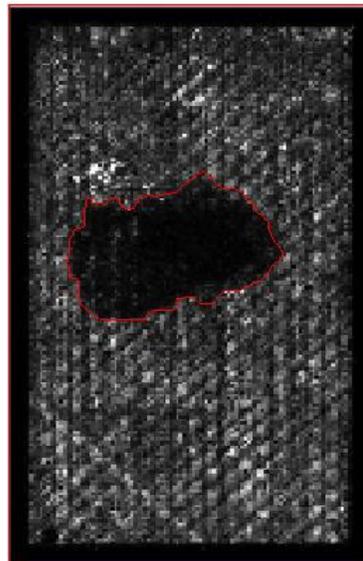


Fig 4.19 -Eco di fondo con area delaminata in rosso provino BHLIM3

Provino BHLIM4

Prima dell'impatto il provino, ispezionato mediante analisi ultrasonica, risultava integro.

In tabella 4.5 sono riportate le caratteristiche principali del provino e della prova.

Provino	Energia di impatto	Indentazione (mm)	Area delaminata (mm ²)
BHLIM4	20J	0,29	2119,6

Tab. 4.5 -Valori relativi al provino BHLIM4

Nelle figure seguenti (fig. 4.20 – 4.21 – 4.22) sono mostrate la faccia impattata, la faccia posteriore all'impatto e la sezione.



Fig. 4.20 – Vista provino lato impatto



Fig. 4.21 Vista provino lato opposto all'impatto



Fig. 4.22 - Sezione

In questo caso anche un esame visivo mostra dei danni. Come nel caso precedente la sezione presenta una curvatura delle lamine in corrispondenza del lato opposto dell' impatto questa volta, in modo più evidente. Dall'analisi ultrasonora, (fig. 4.23) si evidenzia che il danno è visibile già nella seconda immagine, così come nel caso del provino precedente; l'interfaccia di inizio delaminazione è sempre la $45^{\circ}/0^{\circ}$.

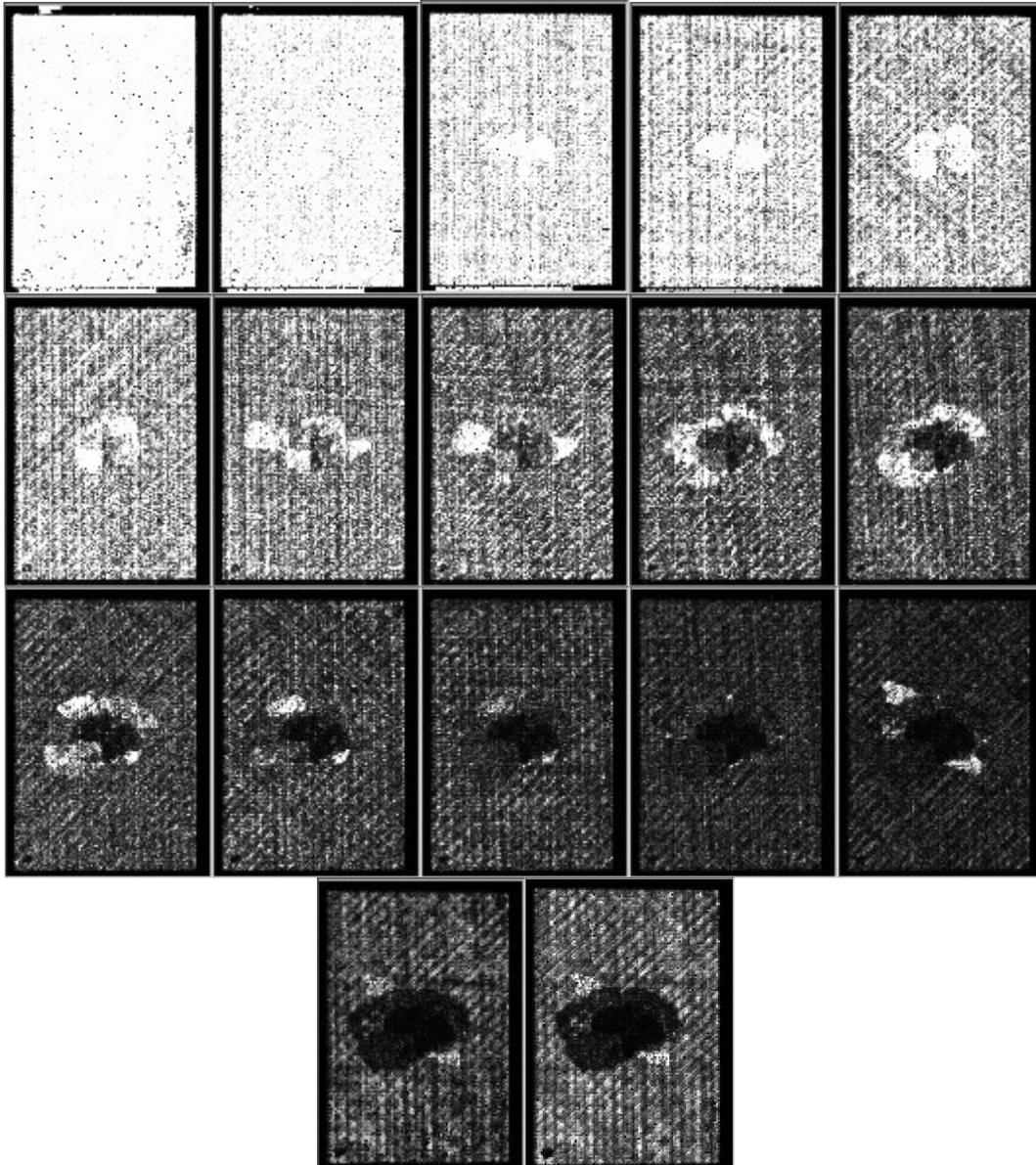


Fig 4.23 - Immagini scansione provino BHLIM4

Lo sviluppo del danno sembra lo stesso del caso precedente, del resto le prove avevano fornito valori di indentazione e aree delaminate praticamente identici.

L'analisi microscopica (figura 4.24) ha evidenziato una curvatura delle ultime lamine (così come era stato notato con l'esame visivo). Per la propagazione del danno troviamo conferma dell'analisi U-S.

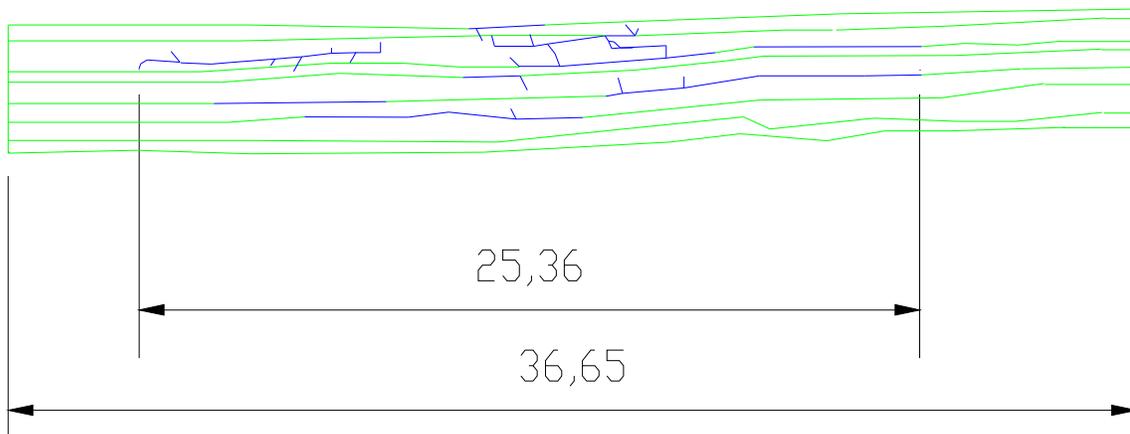


Fig. 4.24 -Schema microscopia provino BHLIM4

Si può dedurre che la differenza di energia di impatto tra i due provini di soli 4J (BHILM3 =16J, BHLIM4=20J) non ha causato danni molto differenti.

Confrontando il valore di delaminazione massima ottenuto con la tecnica della microscopia con quello ricavato dalle scansioni (figura 4.25) si evince una coincidenza di risultati a testimonianza della bontà del metodo.

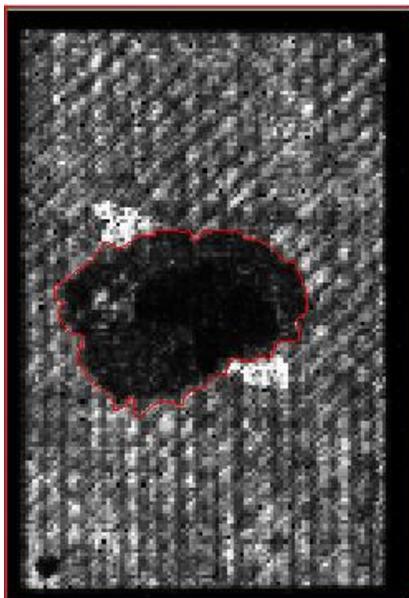


Fig 4.25 - Eco di fondo con area delaminata in rosso provino BHLIM4

Provino BHLIM5

Prima dell'impatto il provino, ispezionato mediante analisi ultrasonica, risultava integro. In tabella 4.6 sono riportate le caratteristiche principali del provino e della prova.

Commento	Energia di impatto	Indentazione (mm)	Area delaminata (mm ²)
BHLIM5	30J	0,62	2164,9

Tab 4.6 -Valori relativi al provino BHLIM5

Nelle figure seguenti (fig. 4.26 – 4.27 – 4.28) sono mostrate la faccia impattata, la faccia posteriore all'impatto e la sezione.



Fig. 4.26 – Vista provino lato impatto

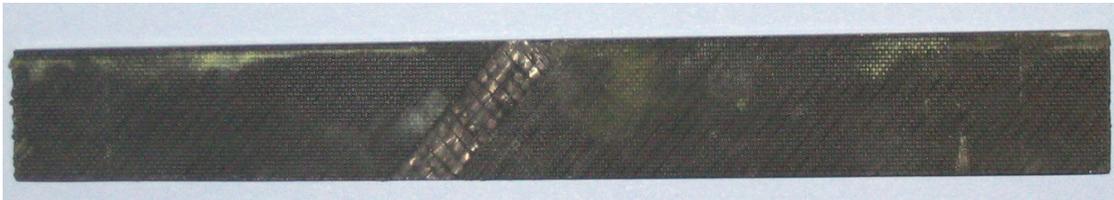


Fig. 4.27 – Vista provino lato opposto all'impatto



Fig. 4.28 - Sezione

In questo caso anche un esame visivo mostra danni evidenti, è chiaramente visibile l'impronta lasciata dall'impattatore; l'energia infatti è aumentata di 10J rispetto al provino precedente (BHLIM4=20J, BHLIM5=30J) e l'indentazione è pari a 0,62 più del doppio del valore del caso precedente. Il retro del provino mostra distacco delle lamine lungo tutta la larghezza della superficie analizzata. La sezione appare incurvata dal lato opposto dell'impatto dove si osservano lamine rotte. Dall'analisi ultrasonora (fig. 4.29) si osserva che il danno è visibile nella terza immagine, ovvero in corrispondenza della lamina a 0° del primo pacchetto 0°/90°.

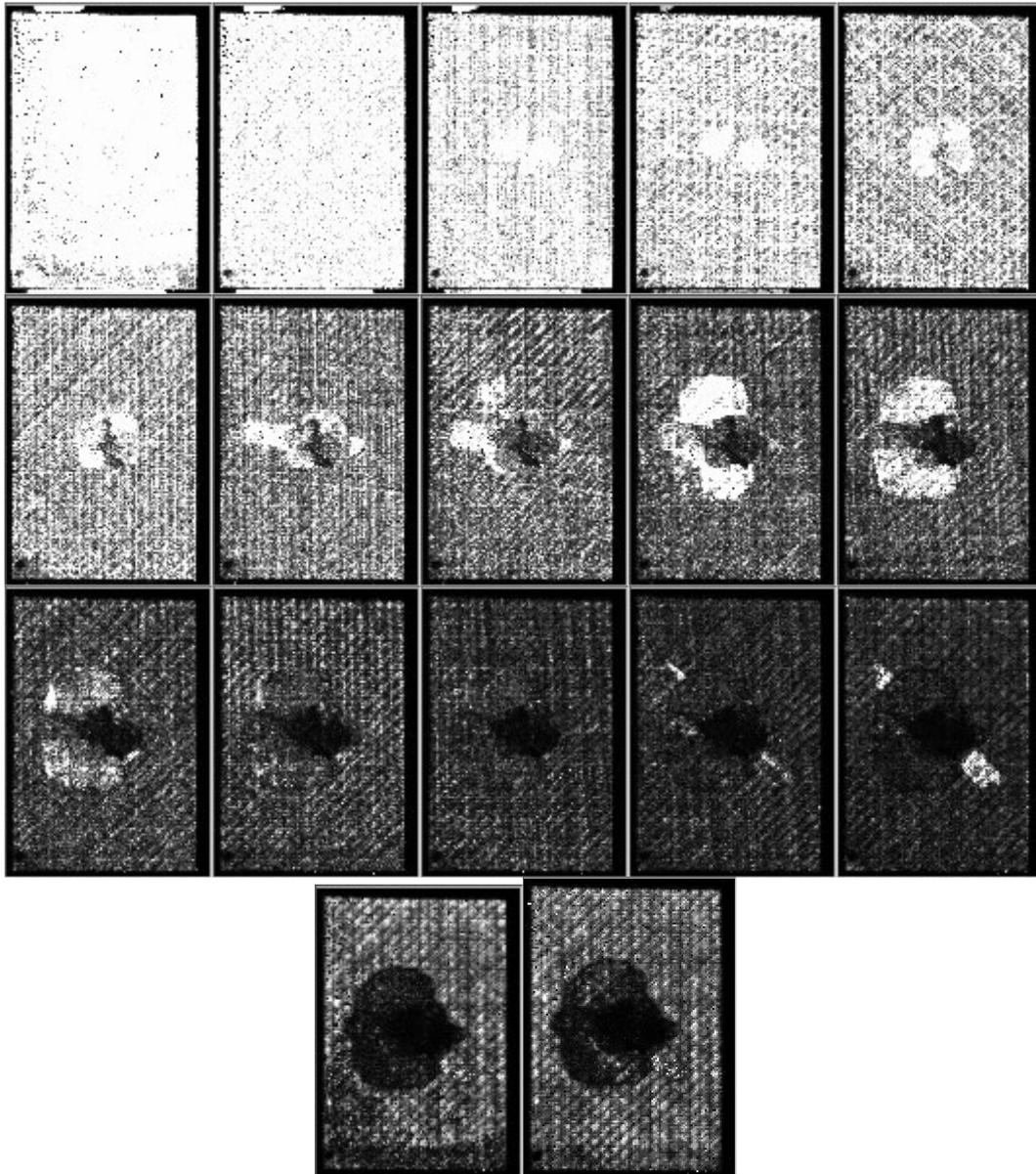


Fig 4.29- Immagini scansione provino BHLIM5

Lo schema costruito in seguito all'analisi microscopica è riportato nella figura seguente:

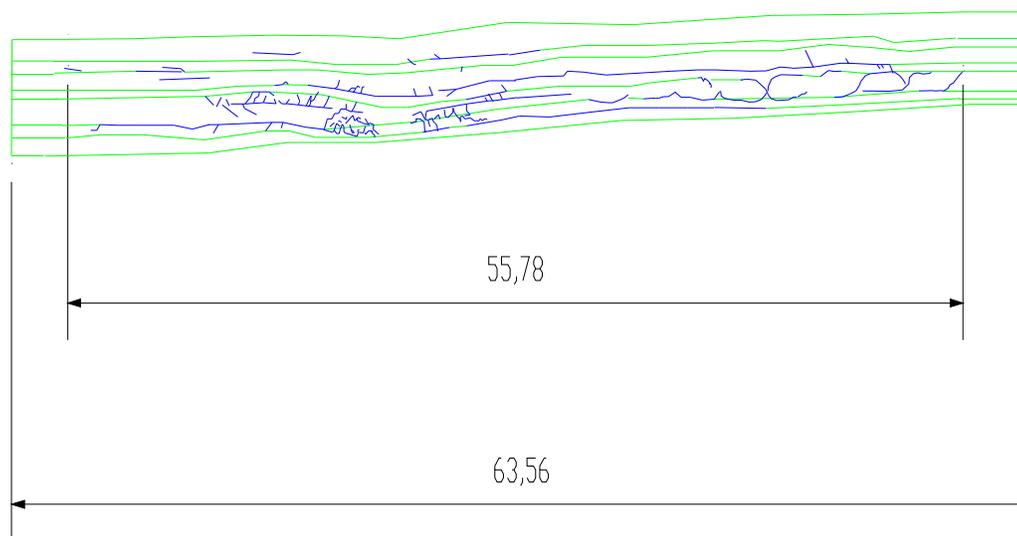


Fig 4.30 - Schema microscopia provino BHLIM5

Dall'analisi microscopica è evidente la lunga delaminazione che si sviluppa nello strato centrale e le numerose cricche che la fanno avanzare lungo gli strati.

Molto meno evidente rispetto agli altri provini è il cono di delaminazione, questo a causa delle numerosissime rotture sul fondo del provino e dell'estensione laterale delle delaminazione molto sviluppata.

Confrontando i valori di delaminazione massima si osserva che dall'analisi microscopica la massima delaminazione è di 55,78 mm, dall'analisi ultrasonora dell'eco di fondo (figura 4.31) si ricava un valore simile questo a testimonianza del fatto che per forme regolari del danno la rispondenza è buona e il confronto risulta positivo.

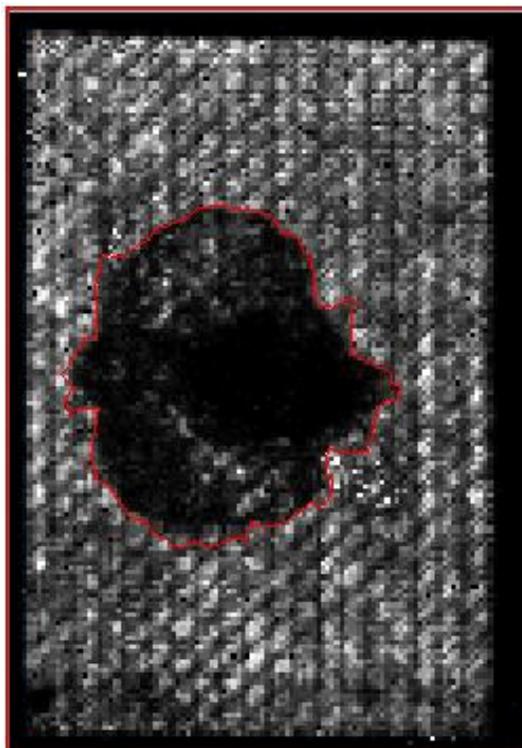


Fig. 4.31 - Eco di fondo con area delaminata in rosso per il provino BHLIM5

Provino BHLIM6

Prima dell'impatto il provino, ispezionato mediante analisi ultrasonica, risultava integro.

In tabella 4.7 sono riportate le caratteristiche principali del provino e della prova.

Commento	Energia di impatto	Indentazione (mm)	Area delaminata (mm ²)
BHLIM6	40J	1,03	3616,68

Tab. 4.7 - Valori relativi al provino BHLIM6

Prima di analizzarlo nel dettaglio, il provino, è stato osservato visivamente.

Nelle figure seguenti (fig. 4.32 – 4.33 – 4.34) sono mostrate la faccia impattata, la faccia posteriore all’impatto e la sezione.

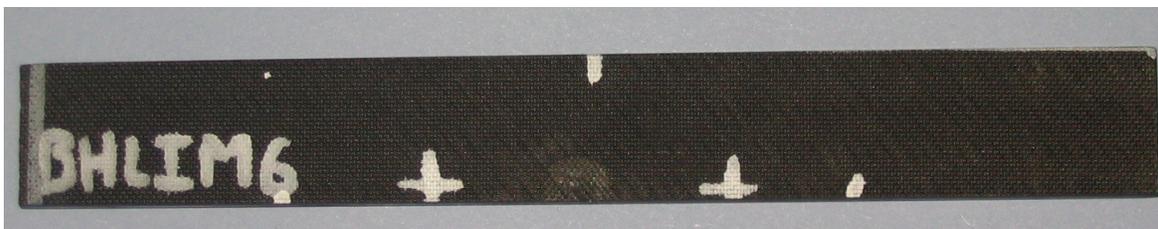


Fig. 4.32 – Vista provino lato impatto

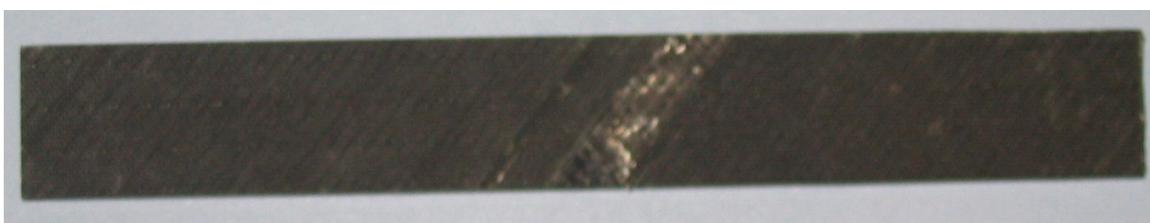


Fig. 4.33 – Vista provino lato opposto all’impatto



Fig. 4.35 - Sezione

Anche in questo caso un esame visivo mostra danni evidenti; è chiaramente visibile l’impronta lasciata dall’impattatore in seguito all’urto.

L’indentazione è pari a 1,03 più del triplo rispetto al limite della BVID e quasi il doppio di quella relativa al provino precedente.

Anche il retro del provino mostra danni consistenti nel distacco delle lamine lungo tutta la larghezza della superficie analizzata.

La sezione risulta incurvata in corrispondenza del lato opposto all'impatto e si notano lamine rotte.

Dall'analisi ultrasonora, (4.36) si osserva che il danno è visibile già dalla prima immagine ovvero nel pacchetto $-45^{\circ}/+45^{\circ}$.

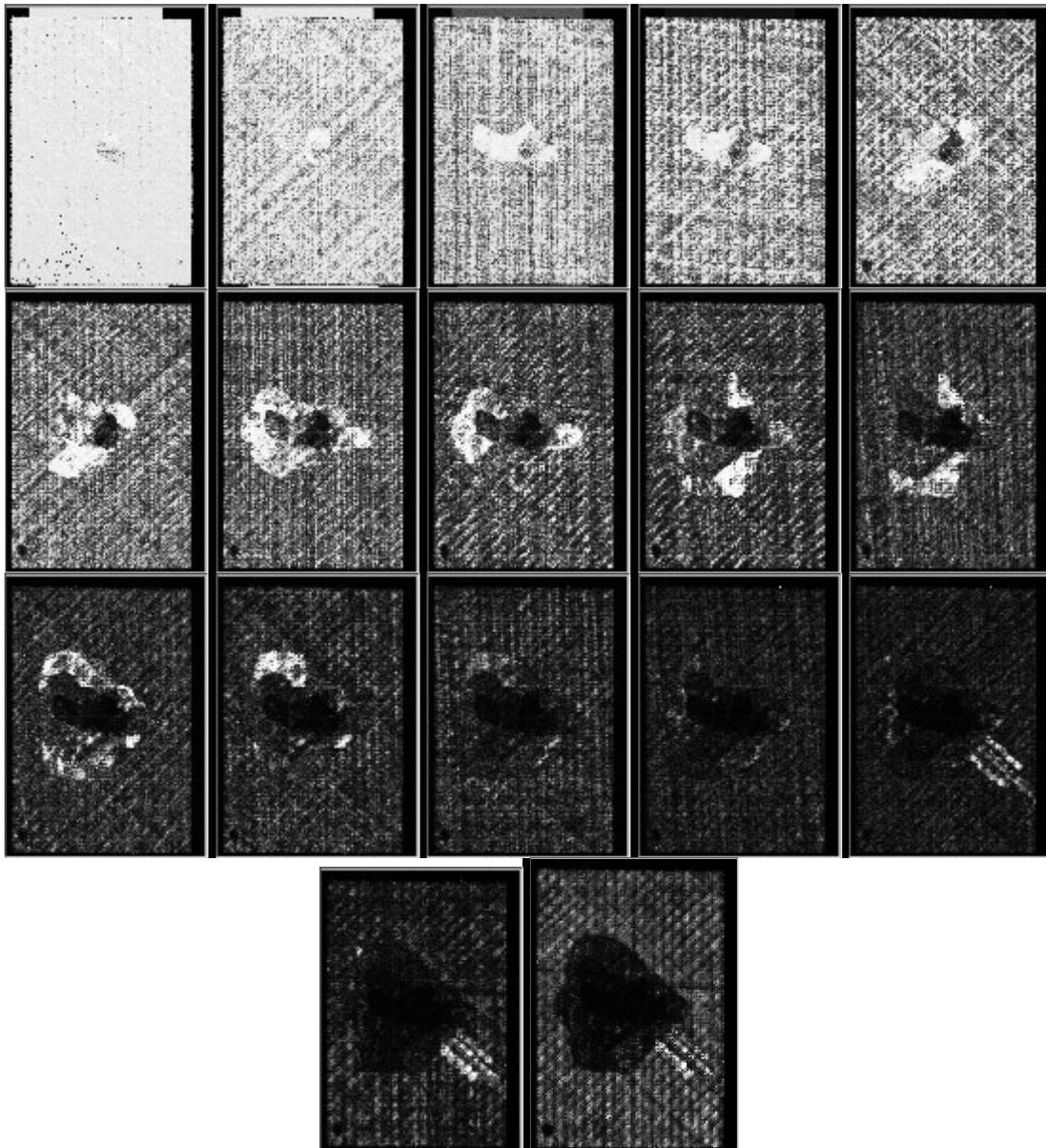


Fig 4.36 - Immagini scansione provino BHLIM6

In figura 4.37 è rappresentato lo schema costruito in seguito all'analisi microscopica condotta.

Dallo schema ricavato si deduce un sostanziale accordo con le scansioni.

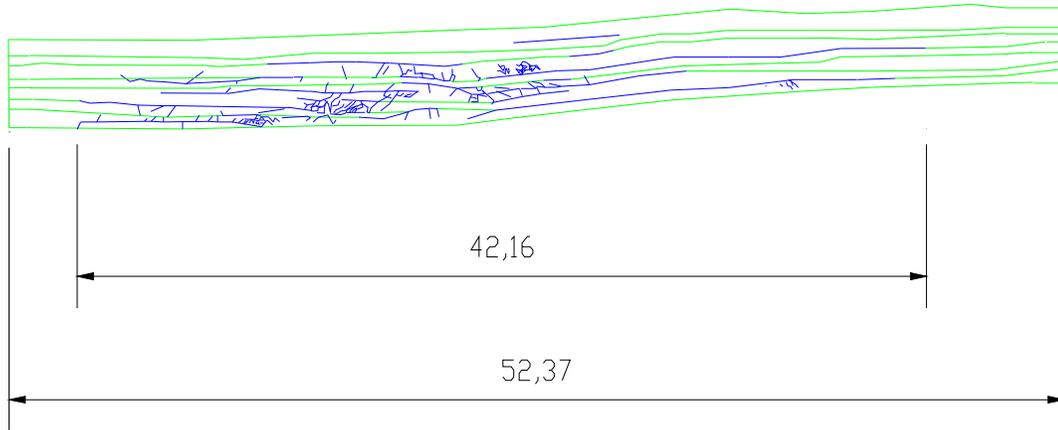


Fig 4.37 -Schema microscopia provino BHLIM6

In particolare si osserva come le cricche sono distinguibili solo fino all'ultimo strato del pacchetto centrale; negli altri strati il danno è talmente esteso da non poter essere distintamente identificato.

Questo è il motivo per il quale non si riesce a distinguere il cono di impatto (molte cricche nella parte bassa).

Confrontando i valori di delaminazione massima ricavati mediante le due tecniche di indagine si osserva che il valore di 42,2 mm ricavato dall'analisi microscopica e un valore leggermente superiore a quello che si ottiene dall'analisi ultrasonica (fig. 4.38).

Probabilmente la forma irregolare del danno ci ha indotti a un valutazione errata del danno dall'indagine U.S.

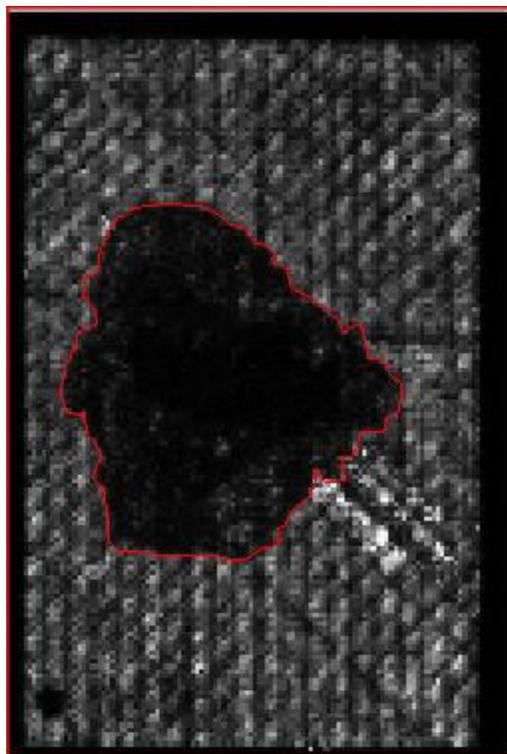


Fig. 4.38 - Eco di fondo con area delaminata in rosso per il provino BHLIM6

Provino BHLIM8

Prima dell'impatto il provino, ispezionato mediante analisi ultrasonica, risultava integro.

In tabella 4.8 sono riportate le caratteristiche principali del provino e della prova.

Provino	Energia di impatto	Indentazione (mm)	Area delaminata (mm ²)
BHLIM8	20,47J	0,30	2416,2

Tabella 4.8 - Valori relativi al provino BHLIM8

Nelle figure seguenti (fig. 4.39 – 4.40 – 4.41) sono mostrate la faccia impattata, la faccia posteriore all'impatto e la sezione.



Fig. 4.39 – Vista provino lato impatto



Fig. 4.40 – Vista provino lato opposto all'impatto



Fig. 4.41 -Sezione trasversale

Questo provino è stato impattato con un'energia tale da produrre un'indentazione pari alla BVID; un esame visivo non mostra danni evidenti, non si vede distintamente l'impronta dell'impattatore. La sezione appare incurvata in corrispondenza del lato opposto dell' impatto. I risultati delle scansioni, riportate in figura 4.42, evidenziano che il danno è visibile già nella seconda immagine, dunque inizia tra la lamina a 45° e la lamina a 0°. Lo sviluppo del danno sembra lo stesso del caso dei provini BHLIM3 e BHLIM4, questo era prevedibile in quanto il valore di energia con il quale il campione è stato

impattato è simile a quello dei due campioni richiamati. In pratica la delaminazione sembrerebbe passare dall'interfaccia lato impatto a quella del lato opposto attraverso cricche intralaminari nelle lamine unidirezionali $-45^{\circ}/+45^{\circ}$.

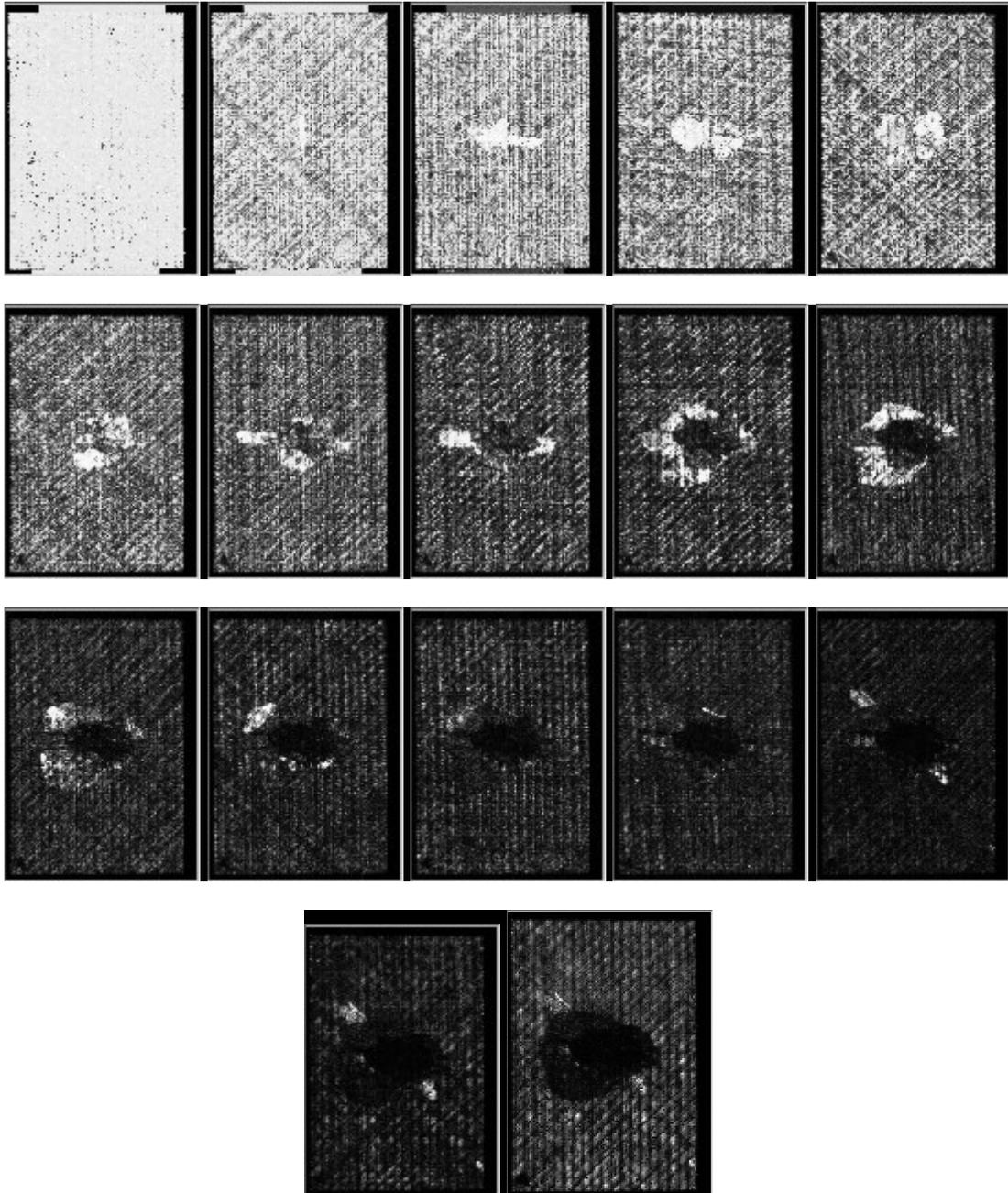


Fig 4.42 -Immagine scansioni provino BHLIM8

Confrontiamo il risultato della scansione con lo schema ricavato dall'analisi microscopica (figura 4.43).

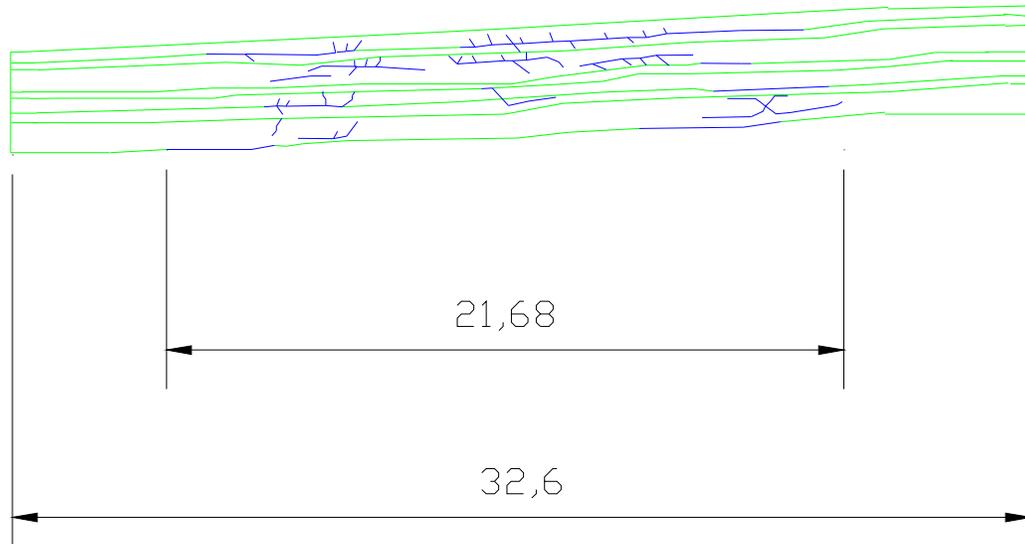


Fig 4.43 -Schema microscopia provino BHLIM8

La prima delaminazione risulta effettivamente tra la lamina a 45° e la lamina a 0°; sono, inoltre, evidenti le cricche interlaminari che fanno avanzare la delaminazione verso il lato opposto dell'impatto.

Si crea così il tipico cono di impatto.

Confrontando i valori di delaminazione massima si osserva che dall'analisi microscopica la massima delaminazione è di 21,26 mm, dall'eco di fondo scalato (figura 4.44) si ricava un valore simile.

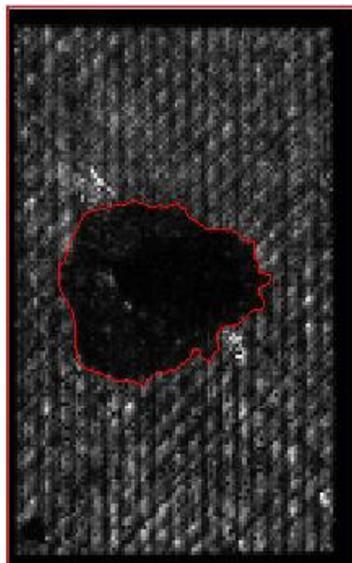


Fig 4.44 - Eco di fondo con area delaminata in rosso per il provino BHLIM8

4.3.2 Analisi ultrasonica microscopica su laminati quadriassiali serie H

Provino QHLIM2

Prima dell'impatto il provino, ispezionato mediante analisi ultrasonica, risultava integro.

In tabella 4.9 sono riportate le caratteristiche principali del provino e della prova.

Provino	Energia di impatto	Indentazione (mm)	Area delaminata (mm ²)
QHLIM2	9J	0,185	1030

Tabella 4.9 - Valori relativi al provino QHLIM2

Nelle figure seguenti (fig. 4.45 – 4.46 – 4.47) sono mostrate la faccia impattata, la faccia posteriore all’impatto e la sezione.



Fig. 4.45 – Vista provino lato impatto



Fig. 4.46 – Vista provino lato opposto all’impatto



Fig. 4.47 -Sezione

Da un esame visivo, non è distinguibile l’impronta lasciata sul campione in seguito all’impatto.

La sezione, invece, appare leggermente incurvata in corrispondenza del lato opposto dell’ impatto; l’analisi visiva conferma i dati misurati (indentazione=0,185 mm dunque al di sotto del limite della BVID).

In figura 4.48 sono riportate le immagini ottenuti dalla scansie ultrasonica, si osserva un danno già nella prima immagine, questo indica la nascita di una delaminazione già in corrispondenza dell'interfaccia 0° del primo pacchetto (45/0/-45/90).

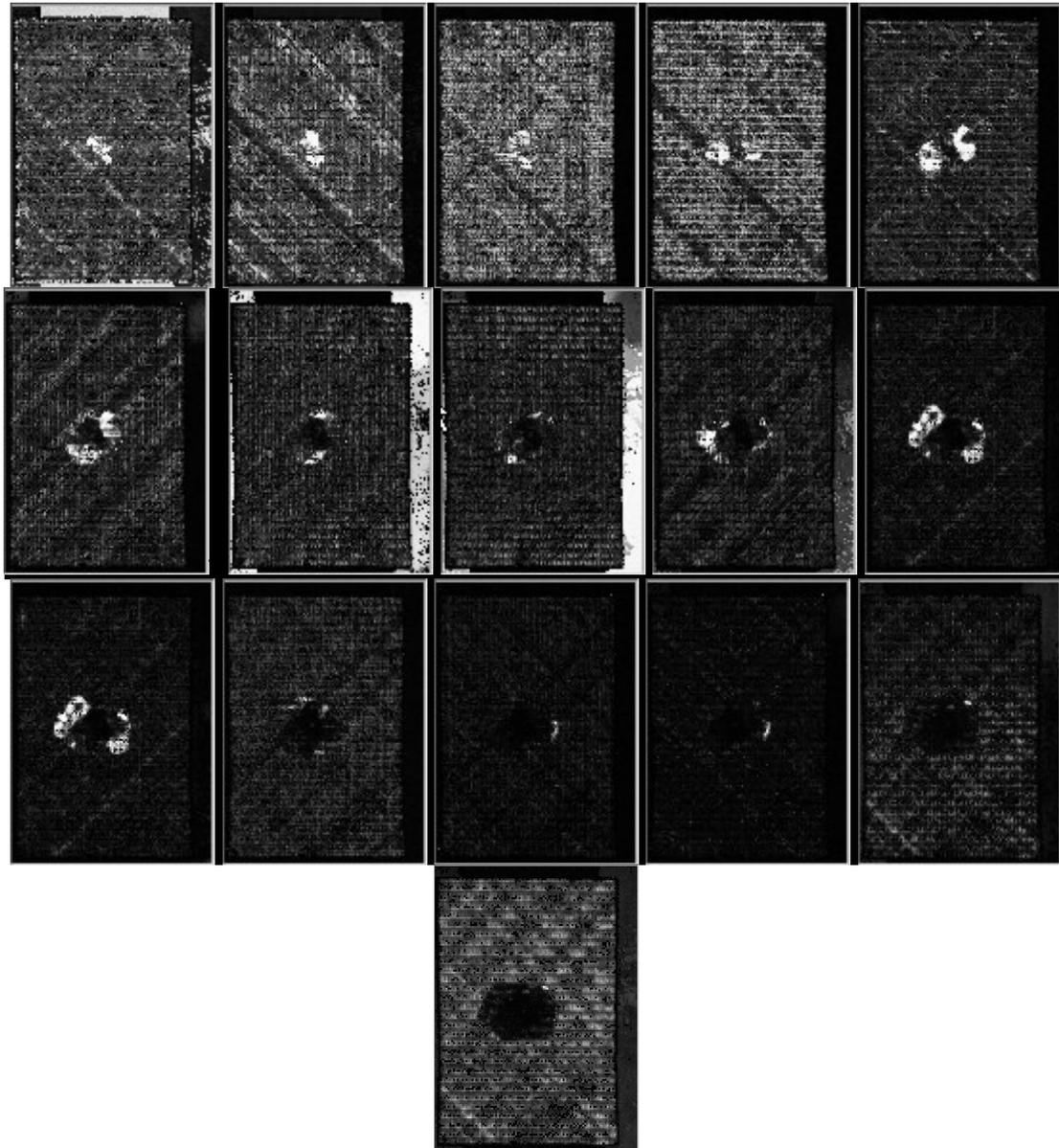


Fig 4.48 - Immagini scansioni provino QHLIM2

La propagazione parrebbe indicare lo sviluppo di questa delaminazione attraverso cricche verso il lato opposto all'impatto. Si nota la presenza distinta di cricche fino all'ultima lamina a 45° del primo

pacchetto $[90^\circ/-45^\circ/0^\circ/45^\circ]$. Come già evidenziato nel provino BHLIM2 le indagini U-S mostrano che il danno rivelabile dall'immagine ad un determinato livello risulta maggiore di quello rilevabile dall'eco di fondo. Ciò accade quando al di sotto del livello in esame non vi sono lamine danneggiate e quindi, il segnale, attenuandosi, fornisce un danno di dimensione inferiore. Confrontando questi risultati con lo schema ricavato dall'analisi microscopica (figura 4.49) si riscontra un sostanziale accordo tra i risultati.

Per i provini quadriassiali lo schema della microscopia è simile a quello dei biassiali, si hanno ancora sette divisioni che stavolta rappresentano metà strato tranne quello centrale che è, come in precedenza, unificato. Nello specifico le divisioni in figura 4.49 rappresentano, nell'ordine:

1. lamine $+45^\circ/0^\circ$
2. lamine $45^\circ/90^\circ$
3. lamine $+45^\circ/0^\circ$
4. lamine $-45^\circ/90^\circ/90^\circ/-45^\circ$
5. lamine $0^\circ/+45^\circ$
6. lamine $90^\circ/-45^\circ$
7. lamine $0^\circ/+45^\circ$



Fig 4.49- Schema microscopia provino QHLIM2

La prima delaminazione risulta effettivamente nel primo pacchetto in accordo con l'analisi U.S.

Sono, inoltre, evidenti cricche interlaminari che fanno avanzare la delaminazione verso il lato opposto dell'impatto; le cricche si propagano fino all'ultima lamina a 45° del primo pacchetto del tipo [90°/-45°/0°/45°]. Anche in questo caso si ottiene il tipico cono di impatto. Secondo lo schema precedente la massima delaminazione è di 25,29 mm; dall'eco di fondo (figura 4.50) si ricava lo stesso valore, a testimonianza della bontà del confronto tra i due metodi.

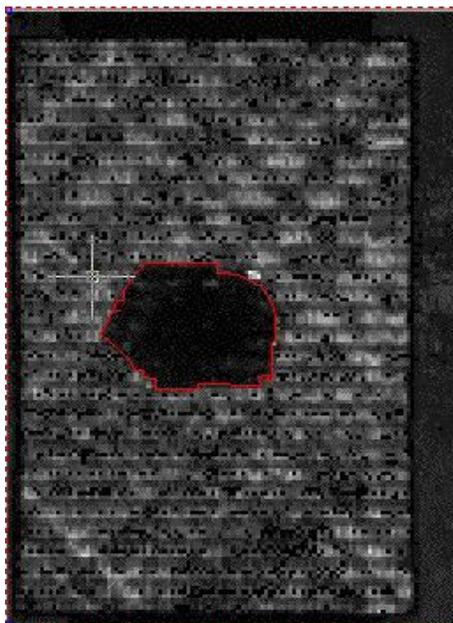


Fig 4.50 -Eco di fondo con area delaminata in rosso per il provino QHLIM2

Provino QHLIM4

Prima dell'impatto il provino, ispezionato mediante analisi ultrasonica, risultava integro.

In tabella 5.3.2.2 sono riportate le caratteristiche principali del provino e della prova.

Commento	Energia di impatto	Indentazione (mm)	Area delaminata (mm ²)
QHLIM4	16J	0,275	2582

Tabella 4.10 Valori relativi al provino QHLIM4

Nelle figure seguenti (fig. 4.51, 4.52, 4.53) sono mostrate la faccia impattata, , la faccia posteriore all'impatto e la sezione. All'analisi visivo il provino mostra una lieve impronta dell'impattatore; il lato opposto all'impatto non mostra segni di cedimento. La sezione appare leggermente incurvata in corrispondenza del lato opposto dell'impatto.



Fig. 4.51 - Vista provino lato impatto



Fig. 4.52 - Vista provino lato opposto all'impatto



Fig. 4.53 - Sezione

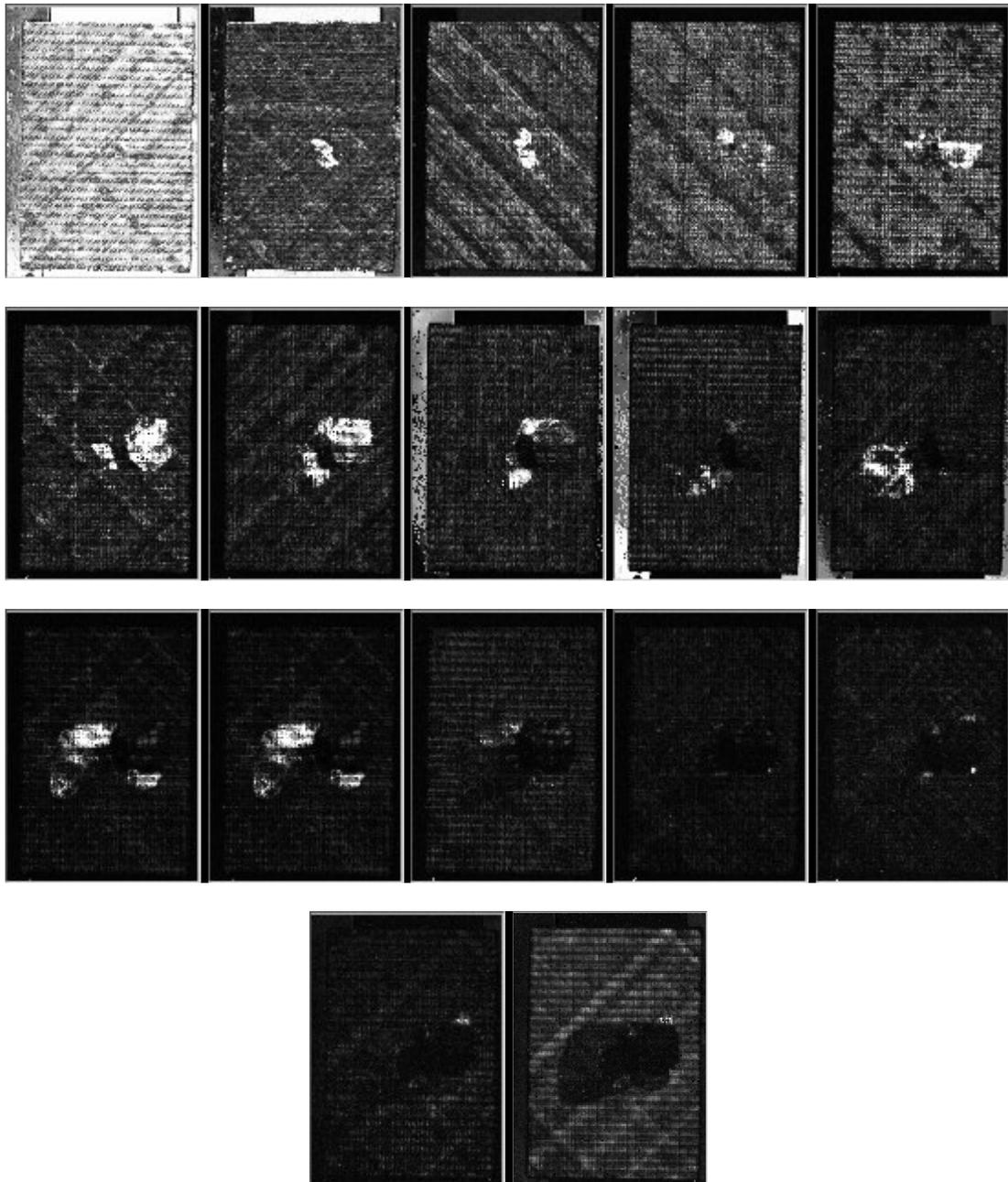


Fig. 4.54 - Immagini scansione provino QHLIM4

In figura 4.54 sono riportati i risultati delle analisi ultrasonore da cui si evidenzia la nascita di una delaminazione già in corrispondenza dell'interfaccia 0° del primo pacchetto del tipo (45/0/-45/90) e la propagazione parrebbe indicare lo sviluppo di questa delaminazione attraverso cricche verso il lato opposto all'impatto. Si nota la presenza distinta di cricche fino all'ultima lamina a 45° del primo

pacchetto [90°/-45°/0°/ 45°]. La sostanziale differenza con il provino precedente sta nell'area danneggiata che in questo caso è molto più estesa.

L'analisi microscopica (figura 4.55) ha evidenziato che la prima delaminazione si propaga effettivamente nel primo pacchetto.

Sono, inoltre, evidenti cricche interlaminari che fanno avanzare la delaminazione verso il lato opposto all'impatto; si crea così il tipico cono di impatto.

Quello che differenzia questo provino dal precedente è la presenza maggiore di cricche nella parte bassa del provino, questo spiega anche la maggiore area danneggiata.

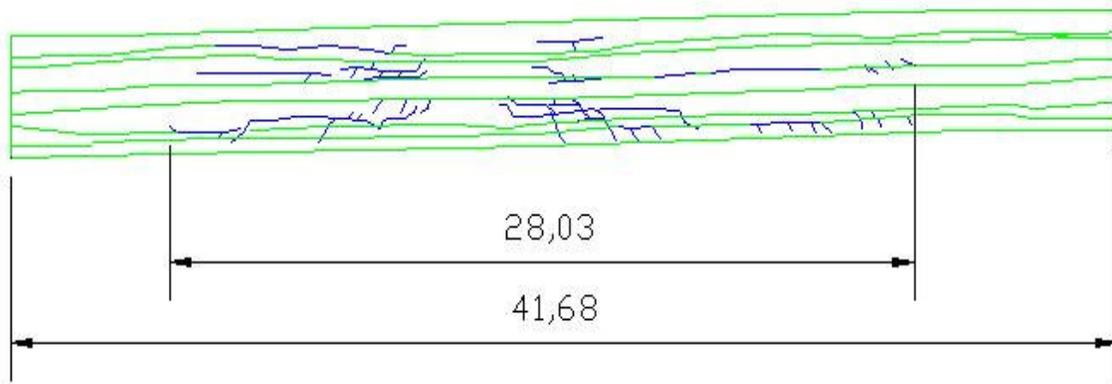


Fig 4.55 -Schema microscopia provino QHLIM4

Un ulteriore confronto può essere fatto comparando l'estensione della delaminazione ottenuta attraverso le due indagini.

Dalla microscopia la massima delaminazione è di 28,03 mm, dall'eco di fondo (figura 4.56) si ricava un valore simile.

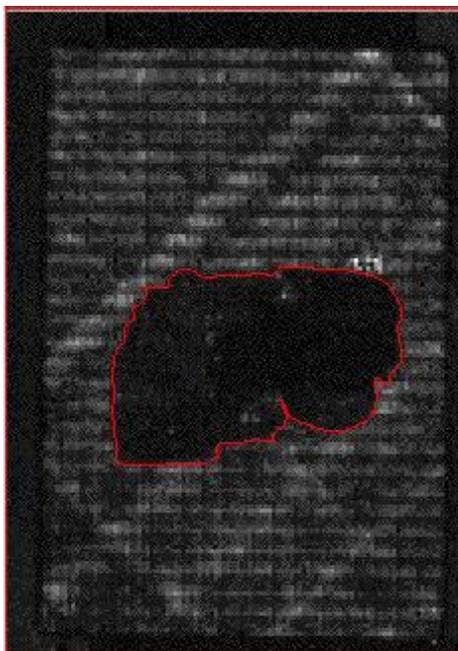


Fig 4.56 - Eco di fondo con area delaminata in rosso per il provino QHLIM4

Provino QHLIM5

Prima dell'impatto il provino, ispezionato mediante analisi ultrasonica, risultava integro.

In tabella 4.11 sono riportate le caratteristiche principali del provino e della prova.

Commento	Energia di impatto	Indentazione (mm)	Area delaminata (mm ²)
QHLIM5	20J	0,28	3837

Tabella 4.11 -Valori relativi al provino QHLIM5

Nelle figure seguenti (fig. 4.57, 4.58, 4.59) sono mostrate la faccia impattata, la faccia posteriore all'impatto e la sezione.



Fig. 4.57 – Vista provino lato impatto

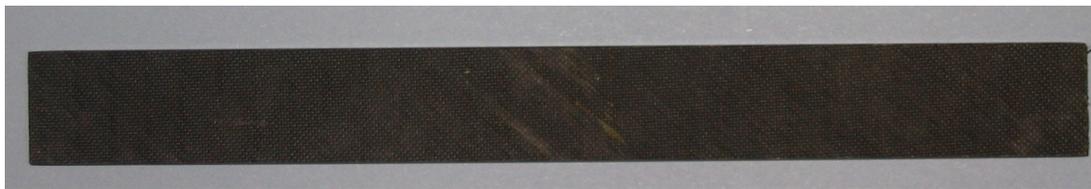


Fig. 4.58 – Vista provino lato opposto all'impatto



Fig. 4.59 - Sezione

Si osserva una lieve impronta dell'impattatore; il retro del provino non mostra chiari segni di impatto.

La sezione appare leggermente incurvata in corrispondenza del lato opposto dell' impatto, questo è perfettamente conforme alla indentazione misurata che è appena 0,28 mm dunque al limite della BVID.

Dall'analisi ultrasonora (fig. 4.60), si osserva la nascita di una delaminazione già in corrispondenza della prima interfaccia a orientazione 45°.

Le cricche si propagano verso i pacchetti centrali simmetrici e attraversano tutto lo spessore del provino. In pratica la delaminazione sembrerebbe passare dal lato impattato a quello opposto, attraverso cricche intralaminari.

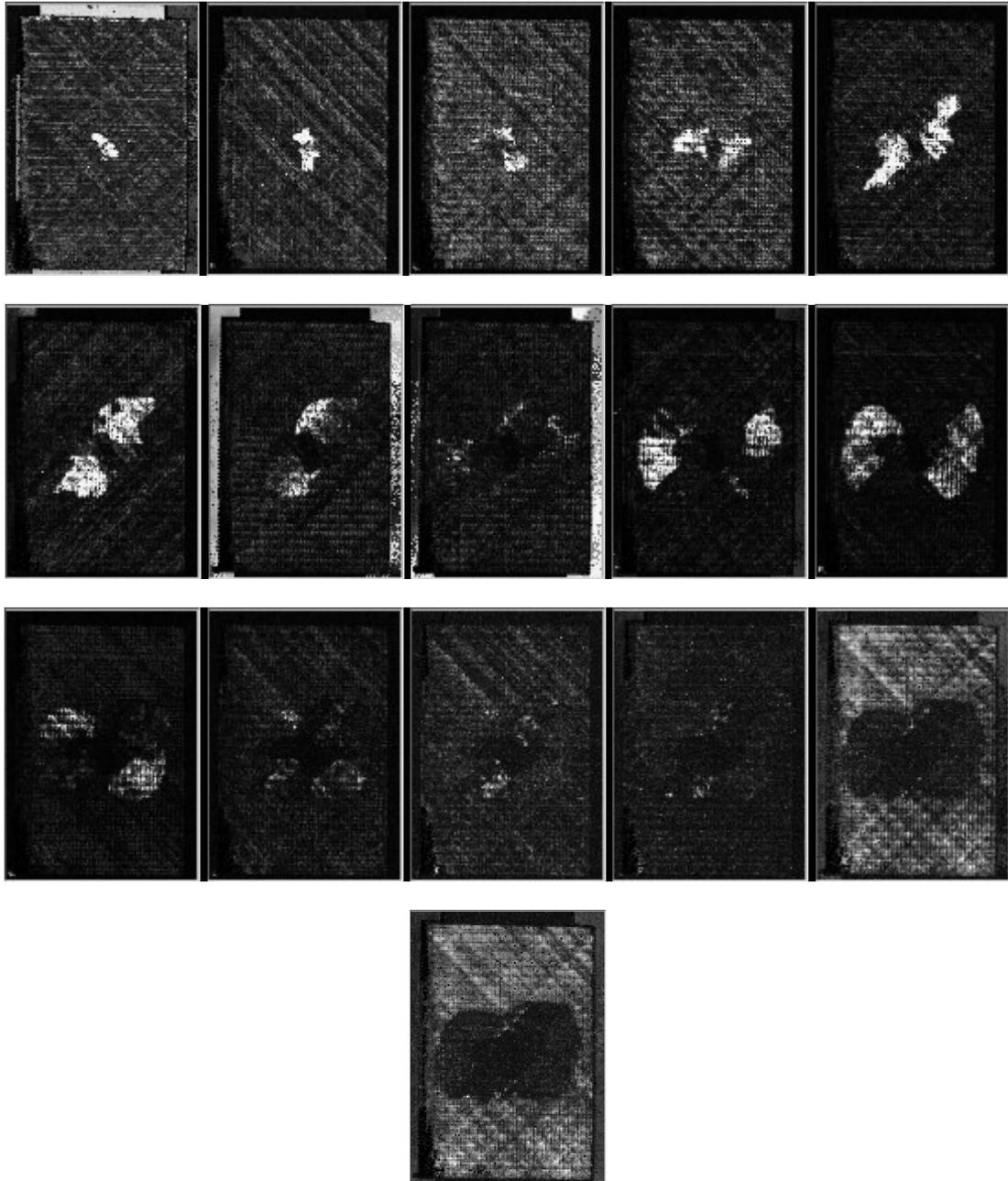


Fig 4.60 -Immagine scansioni provino QHLIM5

Sono stati confrontati i risultati della analisi ultrasonora con quelli dell'analisi microscopica.

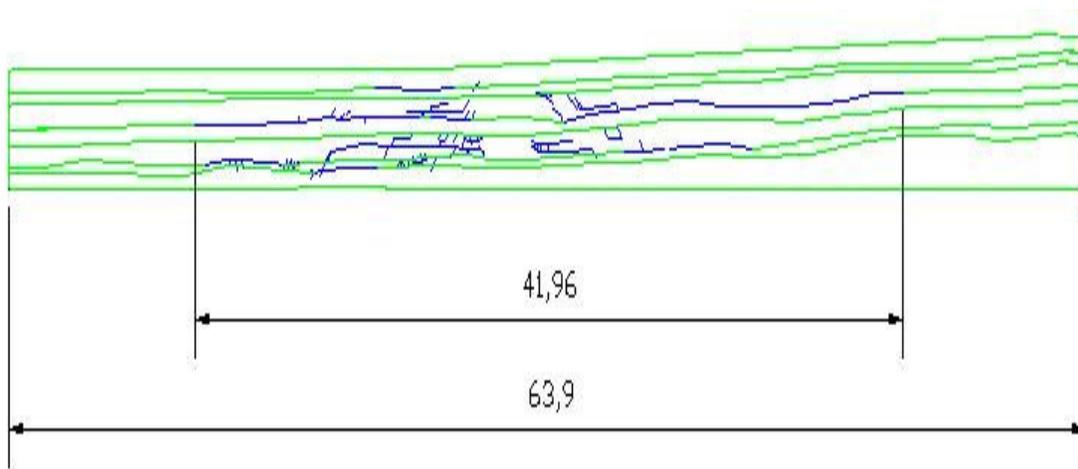


Fig 4.61-Schema microscopia provino QHLIM5

La prima delaminazione risulta effettivamente nel primo pacchetto, sono inoltre evidenti le cricche interlaminari che fanno avanzare la delaminazione verso il lato opposto dell'impatto; si crea così il tipico cono di impatto.

Quello che differenzia questo provino dal precedente è la presenza maggiore di cricche e di delaminazioni nella parte bassa del provino, cioè quella corrispondente al lato opposto all'impatto; questo spiega anche la maggiore area danneggiata.

Un ulteriore confronto può essere fatto comparando l'estensione della delaminazione ottenuta attraverso le due indagini, dalla microscopia la massima delaminazione è di 41,96 mm, dall'eco di fondo (figura 4.62) si ricava un valore simile, cosa che garantisce un perfetto accordo tra i due tipi di analisi.

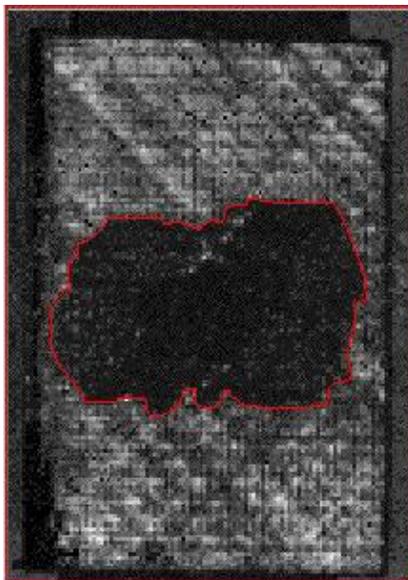


Fig 4.62 - Eco di fondo con area delaminata in rosso per il provino QHLIM5

Provino QHLIM8

Prima dell'impatto il provino, ispezionato mediante analisi ultrasonica, risultava integro.

In tabella 4.12 sono riportate le caratteristiche principali del provino e della prova.

Commento	Energia di impatto	Indentazione (mm)	Area delaminata (mm ²)
QHLIM8	40J	0,6	8548

Tabella 4.12 -Valori relativi al provino QHLIM8

Nelle figure seguenti (fig. 4.63, 4.64 e 4.65) sono mostrate la faccia impattata, la faccia opposta all'impatto e la sezione.

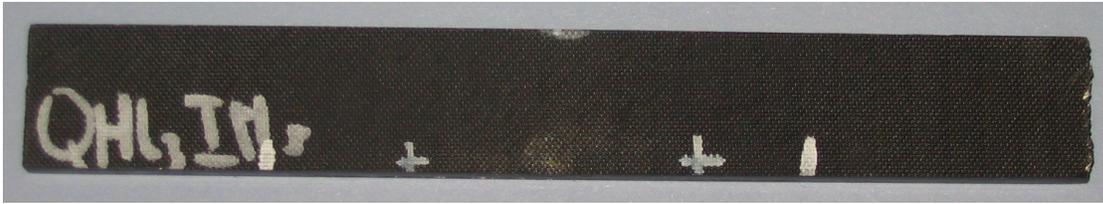


Fig. 4.63 – Vista provino lato impatto

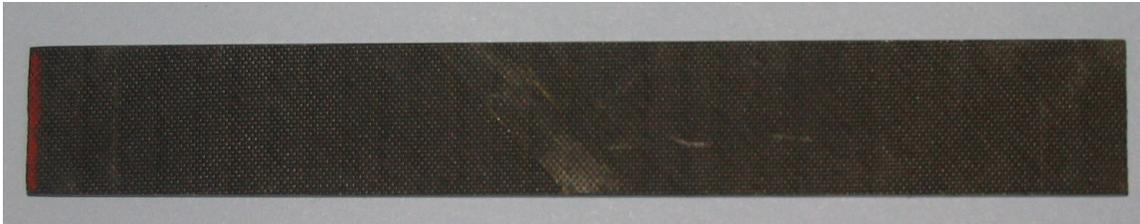


Fig. 4.64 – Vista provino lato opposto all'impatto

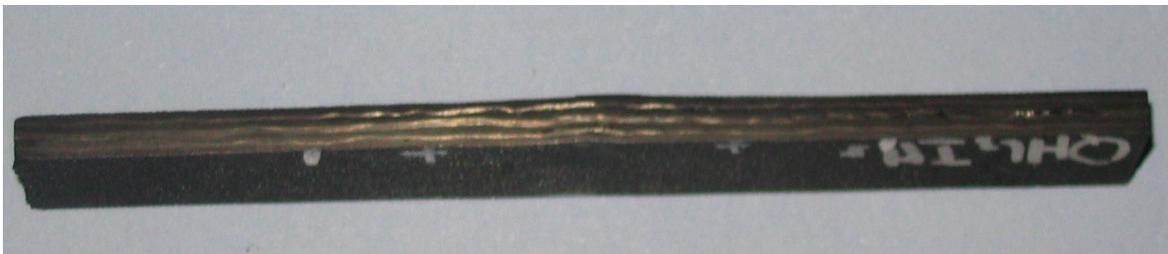


Fig. 4.65 - Sezione

Si osserva chiaramente l'impronta dell'impattatore; la superficie opposta all'impatto mostra chiari segni di cedimento (distacco delle lamine).

La sezione appare incurvata in corrispondenza del lato opposto all'impatto.

L'indentazione è di 0,6 mm ed è minore rispetto a quella misurata su un provino biassiale testato con lo stesso valore di energia.

Dall'analisi ultrasonora, (4.66) si osserva la nascita di una delaminazione già in corrispondenza della prima interfaccia a orientazione 45° e, a partire dalla metà del secondo pacchetto il danno è estremamente esteso in tutte lamine.

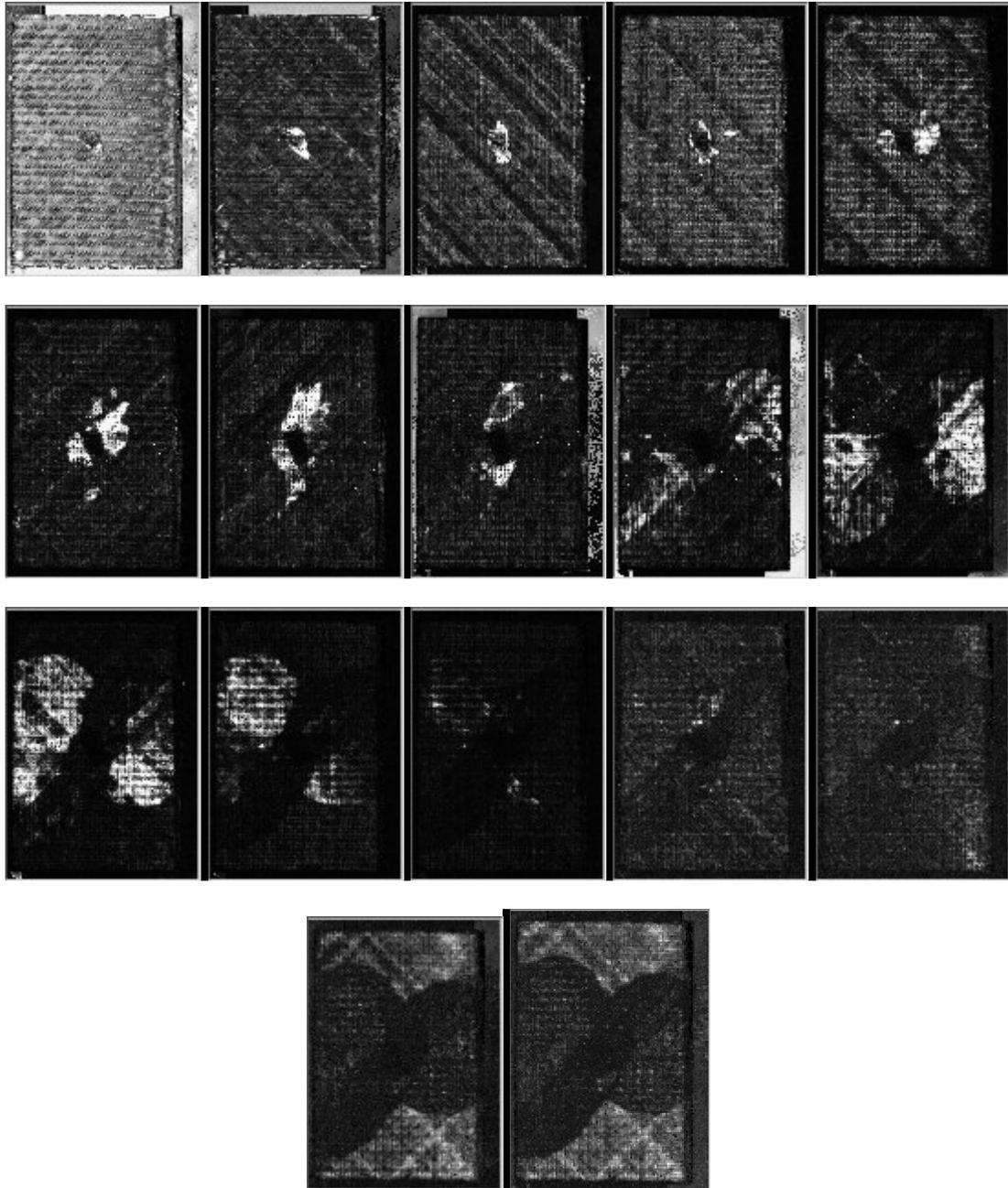


Fig 4.66 - Immagini scansione provino QHLIM8

Confrontando questi risultati con lo schema ricavato dall'analisi microscopica (figura 4.67) si evince un sostanziale accordo.

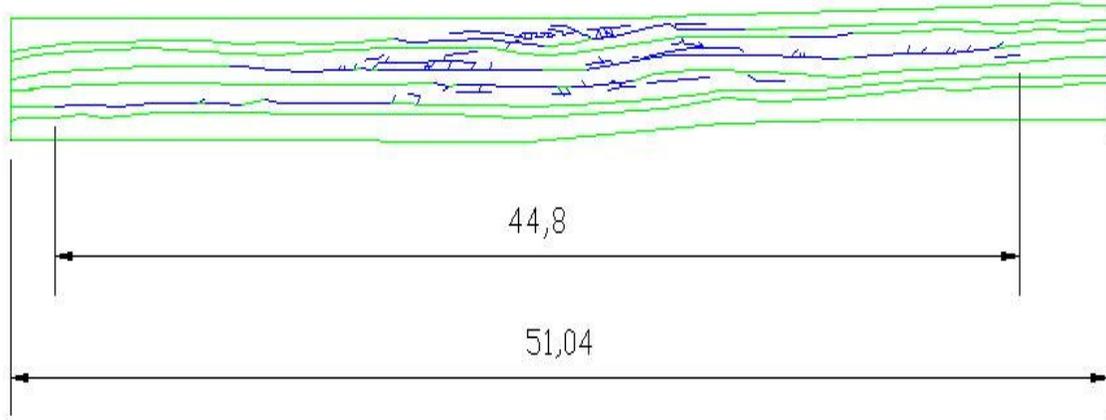


Fig 4.67 - Schema microscopia provino QHLIM8

La differenza con i provini precedenti sta nel fatto che non è distinguibile il cono di impatto.

Interessante è evidenziare, come già ritrovato da altri autori, che le delaminazioni più lunghe si ritrovano allontanandosi dalla superficie direttamente esposta all'impatto.

Un ulteriore confronto può essere fatto comparando l'estensione della delaminazione ottenuta attraverso le due indagini.

Dalla microscopia la massima delaminazione è di 44,8 mm, dall'eco di fondo (figura 4.68) si ricava un valore discordante.

Evidentemente la forma irregolare del danno ci ha indotti a un valutazione errata del danno dall'indagine U.S.

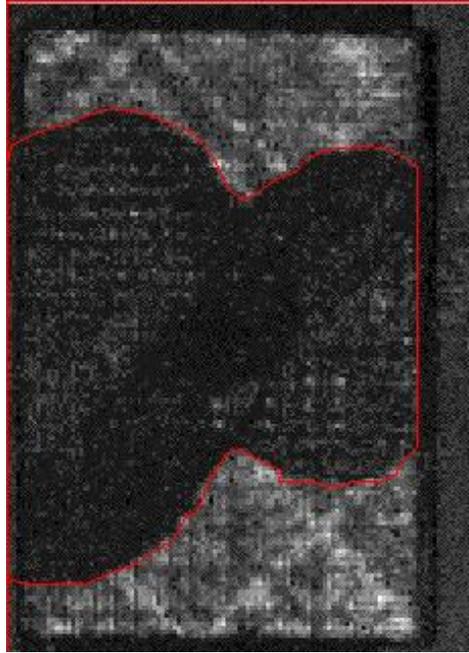


Fig 4.68 - Eco di fondo con area delaminata in rosso QHLIM8

PARTE TERZA

COMPORTAMENTO ALL'IMPATTO DELLA VETRORESINA

CAPITOLO V – MATERIALI E METODI DI PROVA

5.1 Generalità

In questo capitolo sono presentate le caratteristiche del materiale oggetto della sperimentazione, la metodologia di fabbricazione dei laminati utilizzati (Prepreg) e la tecnica utilizzata per la realizzazione dei campioni.

5.2 Caratteristiche del materiale

Il materiale con cui si sono realizzati i provini, poi testati ad impatto, è un prepreg con fibre di vetro e resina epossidica (CYCOM 7701 Epoxy Resin) prodotto dalla Cytec Engineered Materials (California). Dall'analisi al microscopio si è verificato che il rinforzo è disposto sotto forma di trama-ordito secondo una orientazione (0;90) e che ogni sua fibra (vetro E stile 7781) sia il risultato di tanti filamenti intrecciati (fig. 5.1).



Fig. 5.1 - Immagine al microscopio del rinforzo

Le proprietà meccaniche fornite dal produttore sono di seguito riportate:

<i>Mechanical properties</i>	<i>- 54 °C</i>	<i>RT °C</i>	<i>82 °C</i>
<i>0° Tensile properties</i>			
Strength, Mpa	441-462	407-421	331-352
Modulus, GPa	19-21	22-24	21-22
<i>0° Compressive properties</i>			
Strength, MPa	462-483	441-476	317-345
Modulus, GPa	24-26	27-28	24-26
<i>Interlaminar shear properties</i>			
Strength, MPa	---	67-70	39-41

Tabella 1 – Proprietà meccaniche del materiale

Il volume di fibre dichiarato è variabile tra il 50 ed il 55%. L'importanza di questo parametro ha richiesto l'esecuzione di una prova di bruciatura.

La prova consiste essenzialmente nell'eliminazione della resina con l'ausilio di un comune bruciatore (fig. 5.2) e nel rilevare la perdita in massa.



Fig. 5.2 - Fase di bruciatura

A tal fine è stato ricavato un provino quadrato di 49 cm^2 e ne è stata misurata la massa mediante una bilancia elettronica. La massa m_t è risultata pari a $8,25 \text{ g}$. Il provino al calibro digitale ha fornito uno spessore $t_t = 0,99 \text{ mm}$. E' stato scelto un campione di piccolo spessore per due diverse ragioni:

1. il risultato è tanto più preciso quanto maggiore è la capacità della massa di abbandonare il rivestimento, il che è inversamente proporzionale al valore dello spessore.
2. al diminuire dello spessore diminuisce il volume dei fumi della combustione, riducendo quindi l'inquinamento atmosferico.

E' stato previsto un indebolimento della fibra dovuto all'esposizione prolungata ad alta temperatura, per questo motivo il test è stato realizzato inserendo il provino in una rete metallica a maglia fine (fig. 5.3) evitando, in tal modo, eventuali perdite di massa di vetro che avrebbero compromesso il risultato finale.

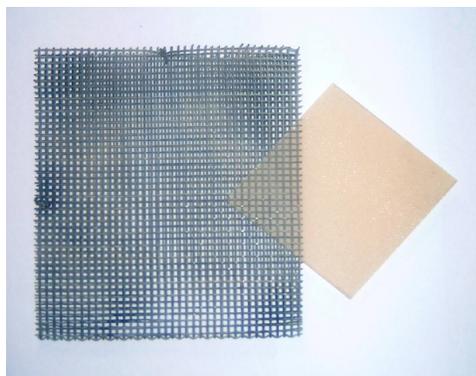


Fig. 5.3 - Inserimento del provino nel supporto metallico

Per permettere al rinforzo di liberarsi completamente della resina la fase di bruciatura è durata circa sei ore. Terminata questa fase è stato estratto il provino dal supporto e si è passati ad un'operazione di pesatura. Il valore ottenuto della massa del rinforzo $m_r=5,8$ g, ha permesso di ottenere la massa m_m della resina, presente nel provino ed eliminata nella bruciatura, nel modo seguente:

$$m_m = m_t - m_r = 8,25 - 5,8 = 2,45 \text{ g}$$

Considerato che il provino era stato realizzato con la sovrapposizione di 4 lamine di prepreg non è stato difficile separare il rinforzo ed ottenere i tessuti (0;90) costituenti le lamine. Con il semplice ausilio di un calibro digitale è stato ricavato il valore dello spessore t_t del tessuto di vetro che è risultato pari a 0,12 mm.

Il valore dello spessore t_r , misurato è in buon accordo con quello che si ricava con l'ausilio della densità del vetro $\gamma_v=2,55$ g/cm², della grammatura del prepreg $G_p=0,0484$ g/cm², di quella del rinforzo $G_r = 0,0295$ g/cm² e della resina $G_m = G_p - G_r = 0,0189$ g/cm².

Nota la grammatura del rinforzo, possiamo calcolare la massa di vetro presente nel provino:

$$M_v = 0,0295 * 49 * 4 = 5,78 \text{ g}$$

valore, questo ultimo, molto vicino a quello ottenuto dalla pesata.

Lo spessore del rinforzo sarà :

$$t_r = [m_r/S * \gamma_r] = [5,78/49 * 2,55] = 0,0463 \text{ cm} = 0,463 \text{ mm}$$

La massa della resina presente nel provino è:

$$m_m = 8,25 - 5,78 = 2,47 \text{ g} \approx 2,45 \text{ g (valore pesato)}$$

Noto lo spessore t_r , lo spessore del tessuto sarà :

$$t_t = 4 / t_r = 0,116 \text{ mm} \approx 0,12 \text{ mm (valore misurato)}$$

Per completezza si ricorda che, dopo il ciclo di cura, una parte della resina è andata persa e che la sua densità è diminuita dal valore iniziale di $1,24 \text{ g/cm}^3$ a quello finale di $0,96 \text{ g/cm}^3$.

Il conseguente spessore della matrice, sarà:

$$t_m = t_t - t_r = 0,527 \text{ mm}$$

Raccolti i dati necessari, si è passati al calcolo della % in volume di fibra:

$$V_r = (100 \cdot W_r) / [W_r + (\gamma_r / \gamma_m) \cdot (1 - W_r)]$$

Sviluppando, si ha :

$$V_r = (100 \cdot m_r / m_t) / [m_r / m_t + (m_r / (S \cdot t_r)) \cdot ((S \cdot t_m) / m_m) \cdot (1 - m_r / m_t)]$$

$$V_r = (100 \cdot m_r / m_t) / [m_r / m_t + (m_r / t_r) \cdot (t_m / m_m) \cdot (m_m / m_t)]$$

$$V_r = (100 \cdot m_r / m_t) / [m_r / m_t + (m_r / m_t) \cdot (t_m / t_r)]$$

$$V_r = 100 / [1 + (t_m / t_r)] = 100 \cdot (t_r / t_t)$$

Sostituendo, si ricava:

$$V_r = 100 \cdot (0,463 / 0,99) \approx 47 \%$$

Analogamente, per il contenuto in peso di fibra, si ottiene:

$$W_r = 100 \cdot (m_r / m_t) = 70 \%$$

$$\gamma_m = \text{densità matrice nel provino} = m_m / (S \cdot t_m) \approx 0,96 \text{ g/cm}^3 < 1,24 \text{ g/cm}^3$$

$V_m = 53$ % contenuto di matrice in volume

$W_m = 30$ % contenuto di matrice in peso

5.3 Metodologia di fabbricazione del prepreg

Col termine prepreg s'indicano lamine costituite da fibre impregnate di resina (di qualche decimo di mm di spessore). Il rinforzo fibroso può essere di tipo unidirezionale (tape) o tessuto (woven).

Per quanto riguarda i processi di produzione, ricordiamo:

- impregnazione con ausilio di solventi
- impregnazione a caldo

Nel primo le fibre passano in un bagno di resina in soluzione con un solvente e in seguito tra rulli che ne regolano la quantità applicata; il solvente è rimosso in un essiccatore.

Nel secondo la resina (che ha un'alta viscosità a temperatura ambiente) in forma di film è applicata sulle fibre (di solito Tapes) tramite rulli riscaldati.

L'uso del preimpregnato consente un controllo più efficiente delle proprietà del composto, un'affidabilità sull'omogeneità del laminato e la ripetitività delle proprietà.

Oltre alle dimensioni, al tipo di resina, di fibra ed alla disposizione delle fibre i parametri che caratterizzano un preimpregnato sono:

- Gel time (tempo necessario affinché il materiale gelifichi ad una fissata temperatura)
- Tack level ("appiccicosità") e Drape ("formabilità")

sono due parametri soggettivi che definiscono rispettivamente la capacità di adesione del prepreg e la capacità di adattarsi a forme complesse; dipendono dall'invecchiamento della resina e del rapporto resina/fibra

- Viscosità (misura la capacità della resina di fluire per effetto della pressione applicata nel ciclo di cura; è misurata a temperatura costante per valutare il grado d'invecchiamento del prepreg)
- Contenuto di resina (rappresenta il contenuto atteso nel composito comprensivo dell'eccesso di resina eliminato durante la cura per favorire l'espulsione d'aria e volatili)
- Parametri cinetici

Note:

La presenza d'aria e volatili → Microvuoti → Riduzione delle proprietà meccaniche (interlaminar Shear Strength –ILSS).

Fino al 4% di vuoti si ha una riduzione del 7% dell' ILSS per ogni punto % di vuoti presenti .

Tipicamente la max % di vuoti consentita è < 0,5% .

5.4 Fabbricazione dei provini

I provini, nel formato 70 x 70 mm e di diverso spessore sono stati ricavati come di seguito indicato:

1. Taglio del Prepreg
2. Sovrapposizione delle lamine
3. Pressatura e polimerizzazione
4. Taglio del laminato

5.4.1 Taglio del prepreg

L'operazione consiste nel ricavare dal materiale in dotazione (prepreg) lamine di dimensioni 330mm x 330mm.

Il taglio è stato realizzato con comuni forbici.

Le difficoltà incontrate in quest'operazione sono imputabili alla ripresa della reticolazione a cui è soggetto il materiale quando è a temperatura ambiente; a T_a il prepreg diventa attaccaticcio e quindi di non facile manipolazione. Dopo un primo grossolano taglio, si sono in seguito ricavate lamine delle dimensioni desiderate.

Per facilitare le operazioni, per ridurre al minimo il tempo di permanenza del materiale fuori dal freezer di stoccaggio e per minimizzare lo spreco di materiale ci si è serviti di una dima in legno (330mm x 330mm) per segnare le lamine da tagliare (fig.5.4).

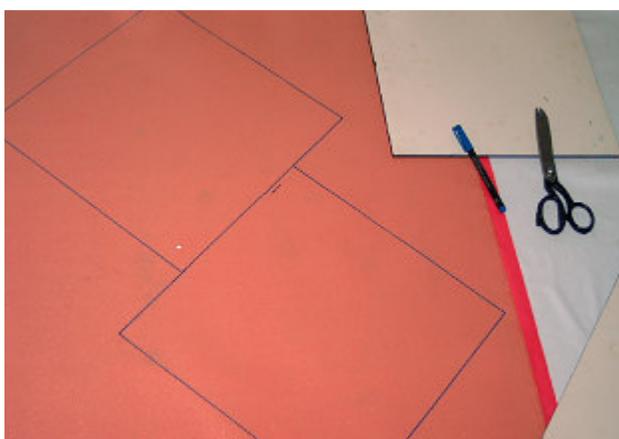


Fig. 5.4 - Taglio del Prepeg

Poiché lo scopo era quello di ottenere provini in cui si susseguissero e/o s'alternassero stratificazioni (0;90) e (+45;-45) sono state ritagliate lamine che avessero questa orientazione delle fibre.

5.4.2 Sovrapposizione delle lamine

L'operazione consente di ottenere un laminato con determinate caratteristiche:

- costruttive (stratificazioni)
- dimensionali (spessore)

e consiste nel giustapporre le lamine estratte dal freezer private del proprio foglio di supporto. La sovrapposizione è stata realizzata manualmente e con l'ausilio di un comune rullo per evitare la formazione di bolle d'aria e di sovrapposizioni irregolari (grinze) che avrebbero, inevitabilmente, alterato la risposta del materiale.

Nella tabella seguente sono riassunti il numero di lamine sovrapposte e la sequenza per i diversi spessori presi in esame.

<u>Spessore di riferimento del provino (mm)</u>	<u>Sequenza di sovrapposizione</u>	<u>N° lamine sovrapposte</u>
1	$[(0;90)/(-45;+45)/(-45;+45)/(0;90)]$	4
2	$[(0;90)/(-45;+45)/(-45;+45)/(0;90)]_2$	8
3	$[(0;90)/(-45;+45)/(-45;+45)/(0;90)]_3$	12
4	$[(0;90)/(-45;+45)/(-45;+45)/(0;90)]_4$	16

Tabella 2 – Stratificazione laminati

5.4.3 Pressatura e polimerizzazione

L'operazione è stata realizzata con l'ausilio della pressa in dotazione al laboratorio del DIMP. La macchina è dotata di due piastre riscaldate attraverso opportune resistenze elettriche. D'ora in poi distingueremo le due piastre indicandole con piastra superiore e piastra inferiore.

La pressa è provvista di un circuito oleodinamico che permette di raggiungere elevate pressioni.

La macchina è gestita da un personal computer dotato del software Movicon ma, in ogni caso, può essere gestita anche senza PC.

I parametri caratteristici del ciclo di cura vengono impostati nel software; in particolare si impostano:

- Temperatura set-point piastra superiore
- Temperatura set-point piastra inferiore
- Tempo di raggiungimento temperatura set-point piastra superiore
- Tempo di raggiungimento temperatura set-point piastra inferiore
- Tempo di permanenza della piastra superiore a temperatura di set-point
- Tempo di permanenza della piastra inferiore a temperatura di set-point
- Pressione set-point
- Tempo di raggiungimento della pressione di set-point
- Tempo di permanenza alla pressione di set-point

Nella realtà, la macchina è corredata anche di una pompa per la circolazione di un fluido di raffreddamento. Il fluido può circolare all'interno delle due piastre sottraendo calore e, all'uscita, passare in un apposito scambiatore di calore nel quale il fluido refrigerante risulta è acqua.

I nostri laminati non hanno sfruttato tale circuito di raffreddamento perché non ancora perfettamente funzionante al momento in cui gli stessi sono stati realizzati.

Il raffreddamento è allora avvenuto a temperatura ambiente.

Il software di gestione della pressa, tra l'altro, ci fornisce in tempo reale l'andamento nel tempo della temperatura e della pressione.

Il sistema, inoltre, memorizza continuamente i valori delle variabili in un database; il campionamento avviene ogni 2 secondi e, una volta pieno, il database continua a riempirsi seguendo una logica di tipo fifo.

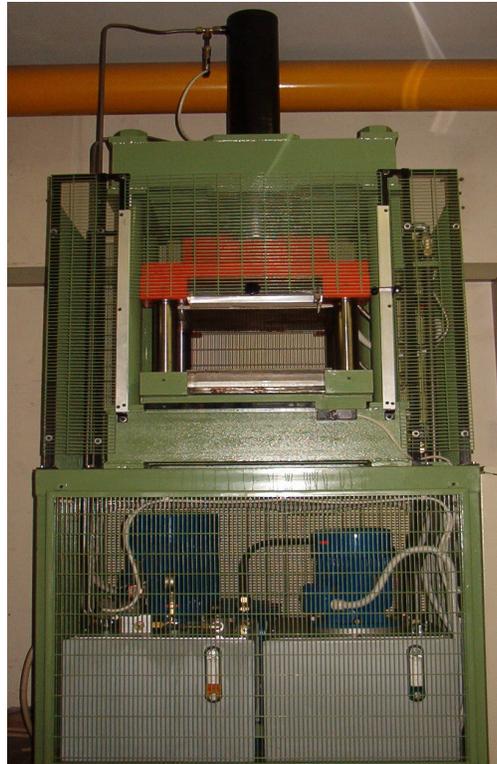


Fig 5.5 - Pressa utilizzata per la polimerizzazione dei laminati

Il laminato è stato disposto tra due contropiastre ed è stato separato da queste da un film di distaccante resistente alle alte temperature. L'utilizzo del distaccante ha evitato che la resina smaltita durante la fase di cura potesse rendere poi difficoltosa l'estrazione del laminato una volta terminata la polimerizzazione.

In fig. 5.6 è riportato uno schema dal quale si comprende la posizione del laminato tra le piastre.

Tra le contropiastre sono stati interposti anche dei distanziali metallici di spessore pari a quello che si voleva ottenere per il laminato finale. Il laminato tra le piastre metalliche è stato sottoposto ad un ciclo

- termico
- di pressione

Il ciclo di cura (fig 5.7) consente di accelerare e di completare il processo di reticolazione. Quello utilizzato per la realizzazione di tutti i laminati è schematizzato nella tabella 3:

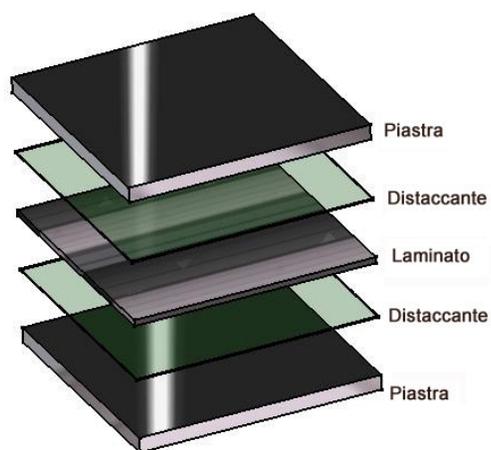


Fig. 5.6 - Disposizione laminato tra i piatti della pressa

<u>Controllo Temperatura</u> <u>Piastra Superiore</u>	Temperatura Set point	120 °C
	Tempo rampa di salita	1800 sec
	Tempo di permanenza	5870 sec
<u>Controllo Temperatura</u> <u>Piastra Inferiore</u>	Temperatura Set point	120 °C
	Tempo rampa di salita	1800 sec
	Tempo di permanenza	5870 sec
<u>Controllo Pressione</u>	Pressione Set point	2 bar
	Tempo rampa di salita	120 sec
	Tempo di permanenza	7680 sec

Tabella 3 – Ciclo di cura dei laminati

Il raffreddamento è avvenuto a temperatura ambiente. La macchina ci ha fornito i records necessari per tracciare l'andamento delle due grandezze al variare del tempo. A titolo di esempio, si riportano di seguito gli andamenti caratteristici relativi alla polimerizzazione di uno dei laminati di vetroresina realizzati.

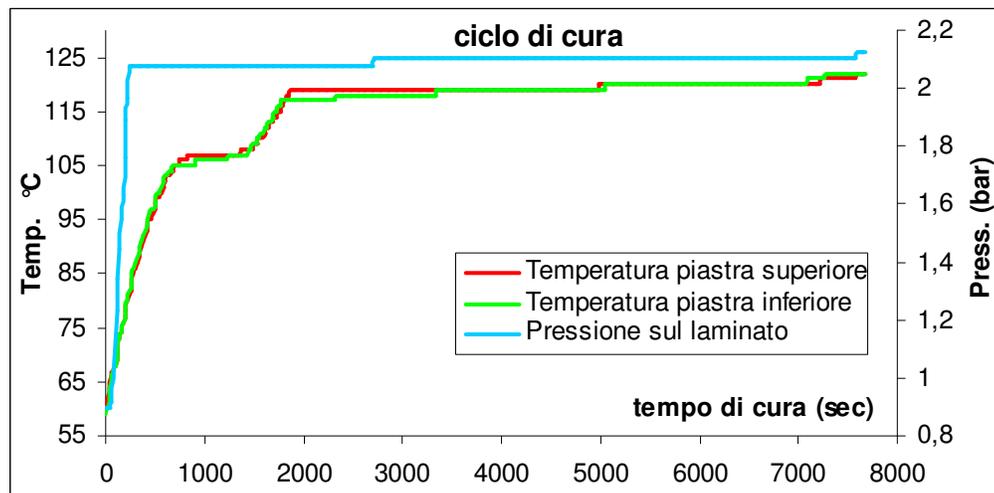


Fig. 5.7 Ciclo termico e di pressione

5.4.4 Taglio dei laminati

Dopo l'estrazione del laminato dalla pressa lo si è segnato per facilitarne le operazioni di taglio. Per i laminati da 1 e 2 mm il taglio è stato realizzato con una taglierina mentre per quelli di spessore superiore si è utilizzata una sega a nastro.

Da ciascun laminato si sono ottenuti 16 provini di dimensioni 70 mm x 70 mm.

5.5 Prove d'impatto con carico dinamico

5.5.1 La macchina di impatto

La macchina adoperata per eseguire le prove d'impatto con carico dinamico è stata la stessa macchinaglia descritta nei capitoli precedenti ed utilizzate per l'esecuzione delle prove sulle carboresine NCF.



Fig. 5.8 - Macchina d'Impatto

Essa permette di variare l'energia potenziale U di cui è dotata la massa battente in modo continuo, semplicemente agendo sull'altezza di caduta ($U = mgh$).

5.5.2 Tipo di prove effettuate

Nell'ambito del presente lavoro sono stati testati provini dello spessore di 1, 2, 3, 4 mm utilizzando due diversi impattatori. Per avere condizioni di vincolo assialsimmetriche si è utilizzato un supporto cilindrico di 50 mm di diametro; condizione quest'ultima mantenuta costante durante tutta la sperimentazione.



Fig. 5.9 - Supporto utilizzato

Con i due penetratori utilizzati, dopo alcune prove condotte fino a completa penetrazione, sono state eseguite prove ad energia variabile (con energia inferiore ad U_p), al fine di valutare la massima profondità dell'impronta lasciata dall'impatto (indentazione), nonché la dimensione media in piano. Tali misure sono state ottenute con lo stesso comparatore digitale Mitutoyo descritto nei capitoli precedenti.

La scelta del valore d'energia a cui eseguire le prove d'indentazione non è casuale; a tal proposito dalle curve (F-s) di penetrazione per un fissato spessore (t) e diametro del penetratore (D_p), si sono individuati particolari punti, caratteristici della zona più frastagliata, come mostrato dalla fig. 5.10; lo spostamento che li contraddistingue ci consente di risalire tramite la curva (U-s) all'energia a cui

effettuare le prove. E' consuetudine generale assumere come energie quelle relative al 20%, 40%, 60% e 80% dell'energia di perforazione (U_{perf}).

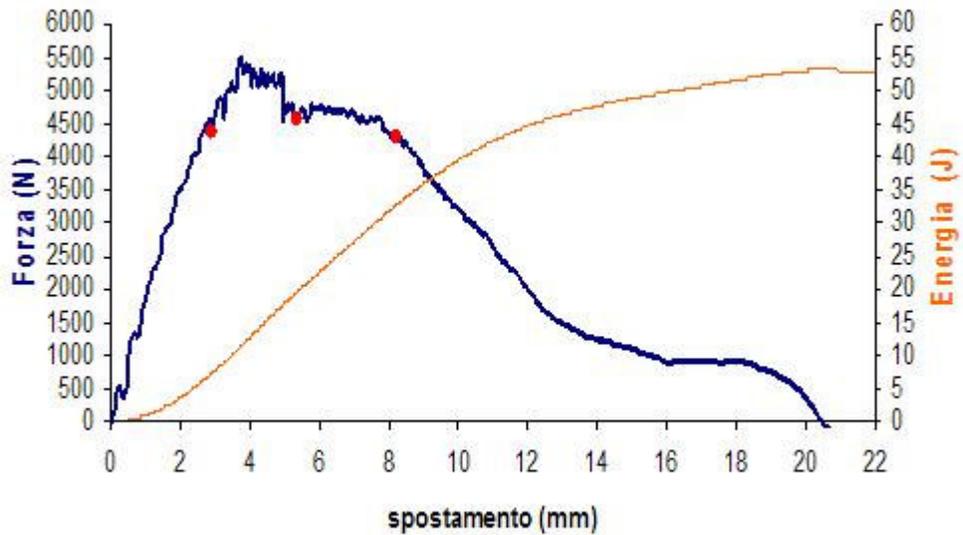


Fig. 5.10 - Individuazione dei punti per le prove ad energia variabile con diametro del penetratore da 16 mm, su provini con spessore di 3 mm

CAPITOLO VI

PROVE SPERIMENTALI – ANALISI DEI RISULTATI

6.1 Introduzione

In questo capitolo si riportano i principali risultati ottenuti dallo studio dei parametri influenzanti la risposta ad impatto a bassa velocità di laminati in fibra di vetro.

Le prove hanno interessato provini di diverso spessore impattati con due diversi penetratori. Il sistema materiale è un prepreg in vetro e resina epossidica (**CYCOM 5215/7781**). Come in letteratura, i risultati sono stati ottenuti mediante l'utilizzo di una macchina di prova del tipo "a caduta di peso". Tale tipologia di prove è detta di *tipo dinamico* ed è, per il modo d'applicazione del carico, la più vicina alle condizioni reali.

Metodi tradizionali come la prova Charpy o quell'Izod, generalmente usate per materiali macroscopicamente omogenei, si sono rivelati non adatti quando applicati ai materiali compositi.

Le domande cui vuole dare risposta lo studio:

1. Esiste la possibilità di una semplice correlazione tra l'indentazione ed il rapporto adimensionale U/U_{pc} alternativa a quell'esponenziale classica?
2. La relazione che fornisce l'energia di penetrazione U_p in funzione del prodotto $(D_p \cdot t \cdot V_f)$ resta valida anche per la vetroresina?
3. Cosa si può dire della dimensione media in piano dell'impronta d ?
4. E' possibile trovare una relazione che ci permetta di risalire alle dimensioni dell'oggetto contundente partendo dalla misura della dimensione in piano dell'impronta?

5. Esiste una relazione che ci consente di predire l'area delaminata al variare delle condizioni d'impatto?
6. Esiste la possibilità di una semplice correlazione tra la resistenza residua e la profondità dell'impronta lasciata dall'impattatore?
7. E' possibile correlare l'indentazione della vetroresina a quella della carboresina?

D'ora in poi ci riferiremo ai quattro spessori disponibili mediante "spessori di comodo" secondo la seguente associazione:

<u>SPESSORE MISURATO</u> (mm)	<u>SPESSORE DI COMODO</u> (mm)
0,96	1
1,92	2
2,88	3
3,84	4

La nomenclatura attribuita ai provini è del tipo:

spessore provino/diametro impattatore/diametro supporto/nome provino; tradotto in simboli diventa:

$t / D_p / D_s /$ codice alfanumerico

6.2 Prove ad energia variabile con metodo dinamico

I provini sono stati impattati adoperando una macchina CEAST a caduta di peso fissando i diversi livelli d'energia di impatto agendo sulla altezza di caduta e, laddove necessario, anche sulla massa così come illustrato in precedenza allorquando abbiamo descritto la macchina. La velocità al momento dell'impatto è sempre stata tenuta nei limiti delle prove a bassa velocità. Durante il tempo di

campionamento, vale a dire durante il brevissimo intervallo che intercorre tra l'istante in cui c'è il primo contatto tra penetratore e superficie del provino e l'istante in cui il penetratore si ferma, sono stati acquisiti 4000 punti con il software d'acquisizione dati DAS4000. I dati così acquisiti sono stati poi esportati su fogli Excel ed elaborati per costruire le curve ed in particolare quelle di carico F-s. Le stesse sono state troncate della parte terminale rappresentativa di un avanzamento del penetratore sotto carico pressoché costante. Tale carico indica la forza d'attrito richiesta per far scorrere la parte cilindrica dell'impattatore nel foro che ha generato.

E' chiaro che nei provini più sottili, a parità di condizioni al contorno, la penetrazione avviene prima, ne risulta che la costruzione della curva di carico richiede l'acquisizione di più punti man mano che lo spessore passa da 1 a 4 mm. I punti richiesti variano quindi da poco meno di 1000 a circa 2000.

6.3 Influenza dello spessore del provino e del diametro del penetratore sull'andamento delle curve (F-s) e (U-s)

6.3.1 Generalità

Sono state eseguite prove a penetrazione e ad energia variabile sui quattro spessori disponibili sia con $D_p=16$ mm che con $D_p=19,8$ mm; in entrambi i casi, il diametro del supporto D_s è stato di 50 mm.

L'analisi si è basata sul tentativo di stabilire le leggi di variazione della forza elastica (F_e), dell'energia elastica (U_e), della forza di prima rottura delle fibre e della corrispondente energia assorbita (F_{FFF} ed U_{FFF}), della forza massima (F_{max}), dell'energia massima (U_{max}), dell'energia di perforazione (U_{perf}), dell'energia di penetrazione (U_p) e della differenza tra l'energia di penetrazione e quella di prima rottura delle fibre (U_p-U_{FFF}), al variare dello spessore per entrambi i penetratori.

6.3.2 Curve di carico (F – s)

Anticipiamo fin d’ora come le curve di carico riguardanti i diversi spessori (e a parità di diametro del percussore) presentano andamento differente che indica una diversa modalità d’assorbimento dell’energia d’impatto. Considerato che nel nostro studio è stata presa in considerazione anche la variabilità del penetratore, si è ritenuto opportuno confrontare, a parità di spessore, l’andamento della forza in funzione dello spostamento per i due diversi penetratori.

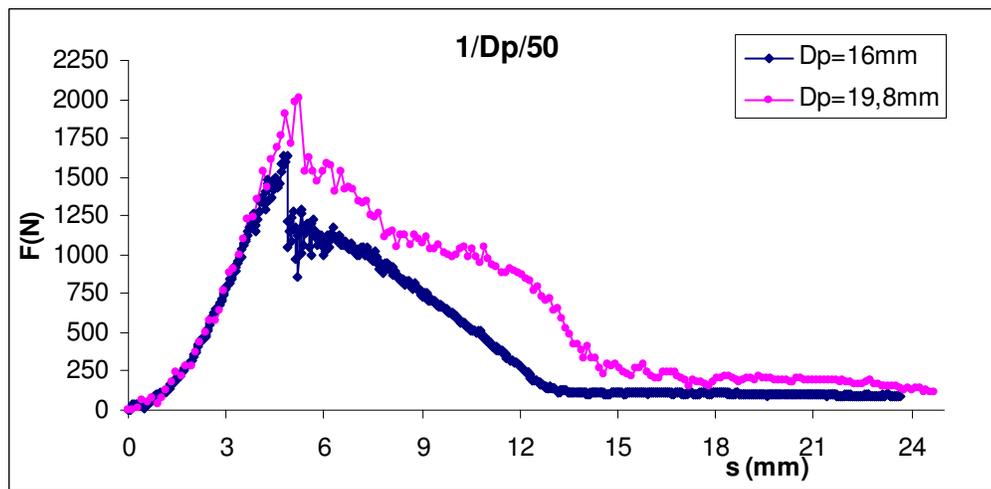


Fig. 6.1 – Curve F-s per provini da 1 mm

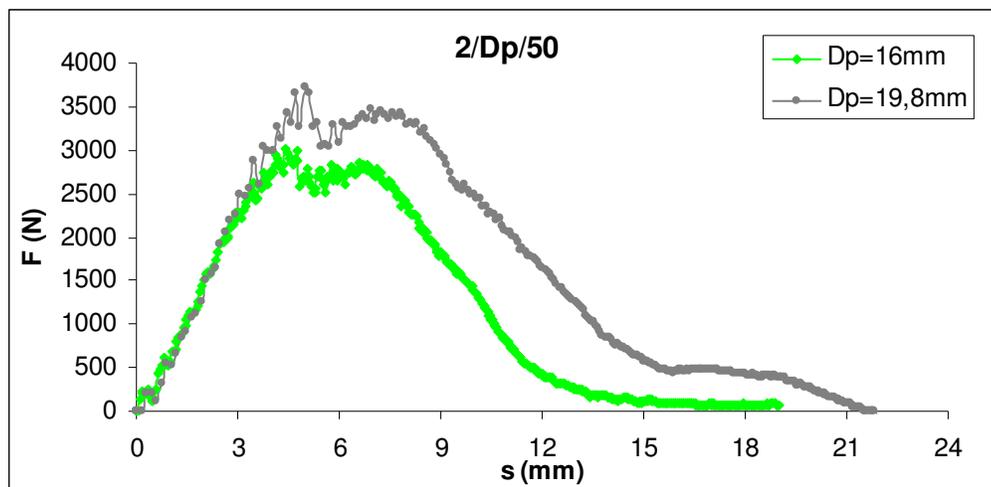


Fig. 6.2 – Curve F-s per provini da 2 mm

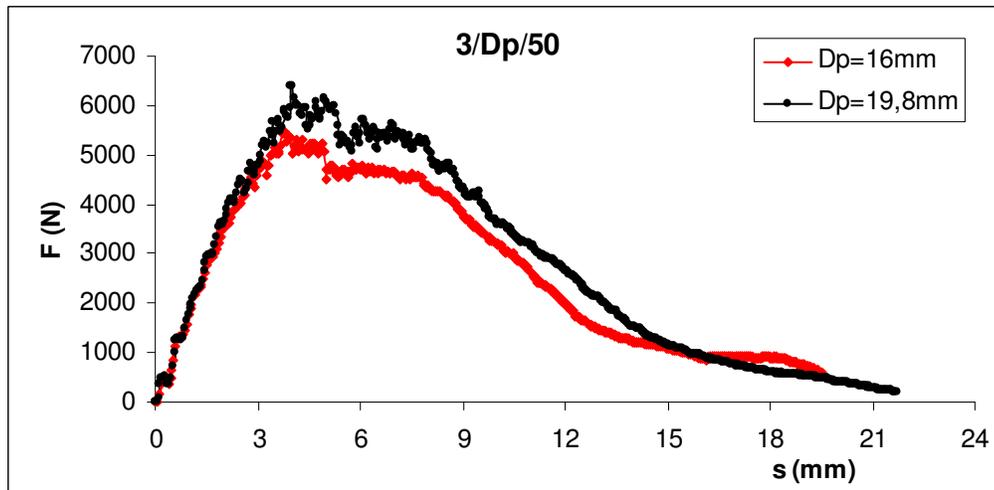


Fig. 6.3 – Curve F-s per provini da 3 mm

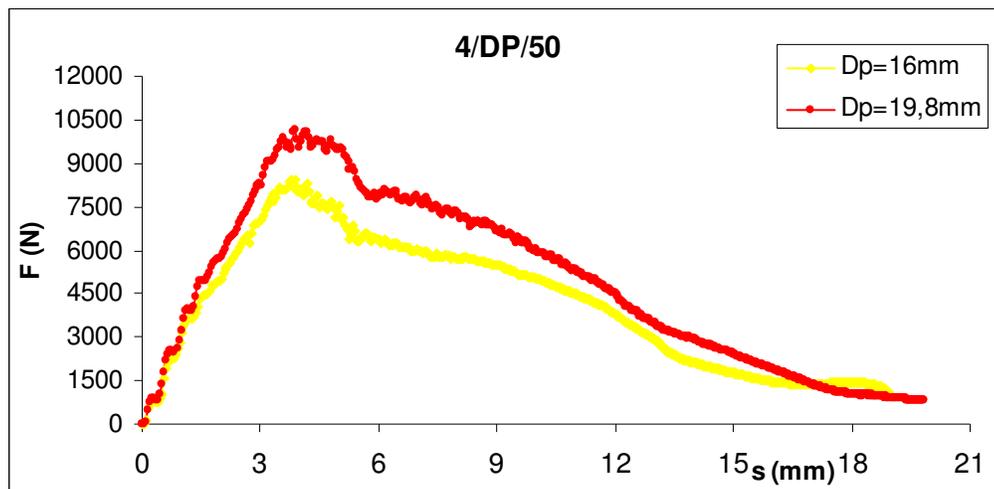


Fig. 6.4 – Curve F-s per provini da 4 mm

Nei provini con spessore superiore ad 1mm il valore della "forza elastica" è più facilmente distinguibile anche se, a differenza di ciò che accade per la carboresina, non si riscontra un'improvvisa caduta del carico che testimonia la nascita della prima delaminazione .

Dalla visione dei diagrammi si nota come l'andamento sia diverso man mano che si passa dallo spessore di 1 mm a quelli maggiori.

Per bassi valori dello spessore potrebbe essere il momento flettente la grandezza guida del fenomeno di frattura; quando invece si passa a spessori maggiori è il taglio a rivestire maggiore importanza.

E' aleatorio attribuire a questi concetti base della Scienza delle costruzioni rigore applicativo essendo validi lontano dalle zone caricate; nel nostro caso oltre ad operare con un materiale anisotropo, ci troviamo in prossimità del punto di applicazione del carico. Tuttavia la semplicità di tali modelli fornisce se non altro una prima guida alla comprensione delle diversità dei fenomeni riscontrabili.

Inoltre l'effetto grandezza, fondamentale nella progettazione dei materiali metallici, potrebbe essere d'aiuto nel tentativo di dare una spiegazione all'aumento di fragilità che si ottiene al crescere dello spessore. Così come l'aumento dello spessore, inducendo *costrizione plastica*, è causa del comportamento fragile di un materiale metallico (notoriamente duttile), anche in materiali polimerici in un "opportuno spessore" farebbe sì che il danno, una volta innescatosi, proseguiva poi di schianto fin quando l'energia richiesta al suo sviluppo non diventi superiore a quella nata dalla creazione delle superfici di frattura. Si nota un'altra differenza importante e anch'essa intuibile a priori: nei provini da 1mm la F_{FFF} (first fiber failure) corrispondente alla prima rottura delle fibre non coincide con il valore di forza massima; questo aumenta il margine di sicurezza nel prevenire la perforazione del pannello di piccolo spessore.

Lo spostamento connesso al passaggio della forza dal valore F_{FFF} al valore di F_{perf} cresce al crescere degli spessori dei laminati a causa del maggior numero di fibre da rompere. Ricordiamo che l'area sottesa alla curva F-s altro non è che l'energia d'impatto; è ovvia quindi la sua correlazione al numero di lamine di cui è composto il provino, o meglio, allo spessore totale di fibre coinvolte.

6.3.3 Curve Energia – spostamento (U- s)

L'area sottesa alla curva F-s rappresenta l'energia assorbita dal materiale. E' stata calcolata come somma delle aree dei singoli rettangoli aventi come altezza il valore della forza media $((F_i - F_{i-1})/2)$ e base pari alla differenza spostamento attuale-precedente $(S_i - S_{i-1})$. Nella fig. 6.5 è evidente il suo tipico andamento ad "S" e può essere schematizzata in tre parti: una parte iniziale con piccola pendenza, indicativa della scarsa aliquota d'energia assorbita dal materiale (fino al valore di forza

elastica), una seconda parte con incremento rapido della pendenza della curva indicante la maggior richiesta di energia per rompere progressivamente le fibre ed una parte, che rappresenta il fenomeno di strisciamento del percussore sulle pareti del foro, che ha andamento praticamente uniforme.

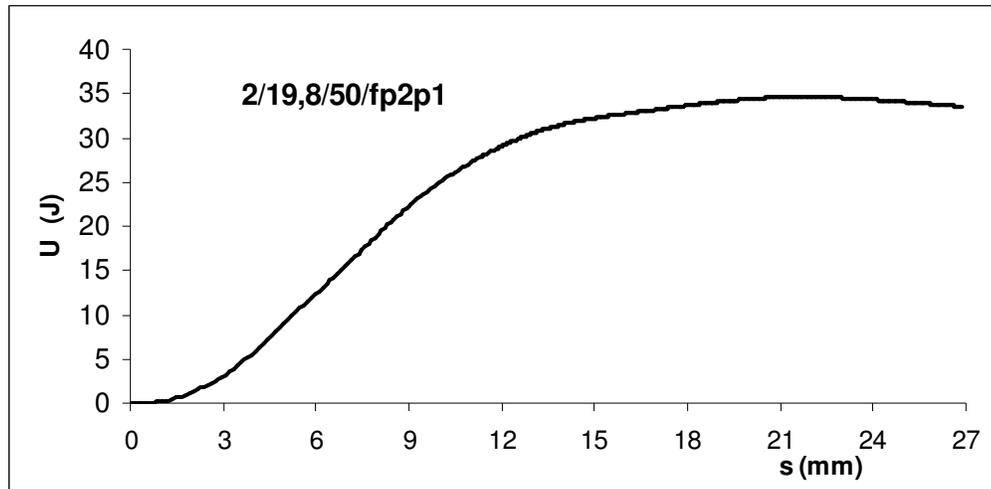


Fig. 6.5 - Andamento di una curva U-s (diametro del percussore da 19,8 mm e spessore del provino di 2 mm)

6.4 Influenza dello spessore del provino e del diametro del percussore sui parametri caratteristici

6.4.1 Curva forza elastica-spessore ($F_e - t$)

Riportando in un grafico i valori della F_e relativi ai diversi spessori e penetratori è stata ottenuta la curva in figura 6.6.

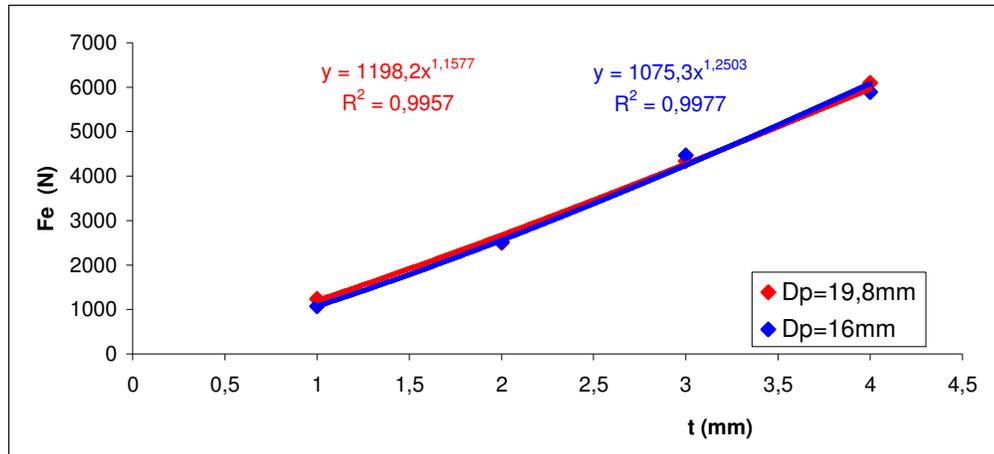


Fig. 6.6 - Andamento della forza elastica in funzione dello spessore

La curva di minima dispersione, ottenuta con la regola dei minimi quadrati, ha equazione:

$$F_e = F_{e0} \cdot t^i$$

Per $D_p=16\text{mm}$ si ha:

$$F_{e0} = 1075,3 \text{ N/mm}^i$$

$$i = 1,2503$$

mentre per $D_p=19,8\text{mm}$ si ha:

$$F_{e0} = 1198,2 \text{ N/mm}^i$$

$$i = 1,1577 \text{ per}$$

L'esponente i presenta in entrambi i casi valore inferiore ad 1,5 (legge di Hertz sui contatti elastici).

Dal diagramma risulta chiaramente l'indipendenza dal diametro del penetratore per tutti gli spessori.

6.4.2 Curva Energia elastica-spessore (Ue - t)

Nel diagramma di figura seguente sono riportate le leggi di variazione dell'energia elastica in funzione dello spessore per i due differenti percussori. La curva di minima dispersione ha equazione:

$$U_e = U_{e0} \cdot t^i$$

Per $D_p=16\text{mm}$ si ha:

$$U_{e0} = 1,5042 \text{ N/mm}^i$$

$$i = 1,2786 \text{ per}$$

mentre per $D_p=19,8\text{mm}$ si ha:

$$U_{e0} = 1,6872 \text{ N/mm}^i$$

$$i = 1,1099 \text{ per}$$

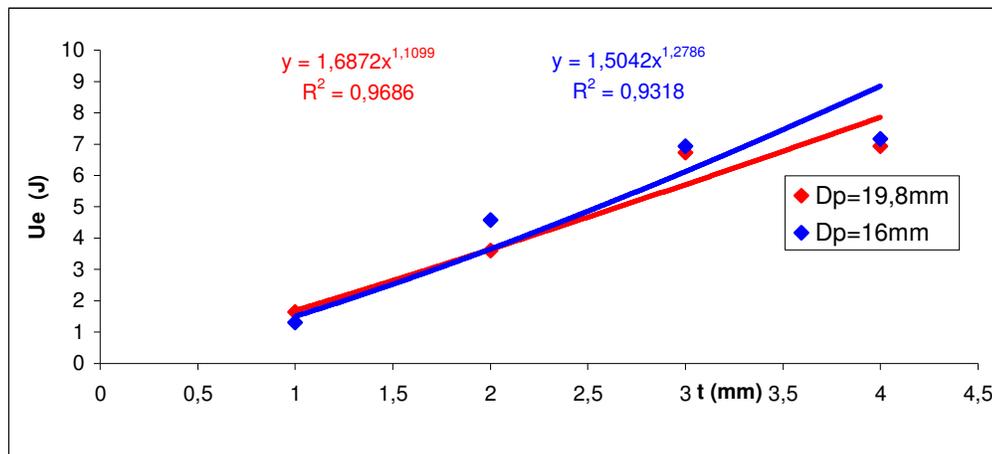


Fig. 6.7 - Energia elastica in funzione dello spessore e di D_p

Per l'energia elastica si può parlare d'indipendenza dal diametro del percussore solo per i piccoli spessori.

6.4.3 Curva Forza di prima rottura delle fibre - spessore (FFFF - s)

Nella figura seguente (6.8) sono riportati i valori sperimentali e la curva di minima dispersione relativi all'andamento della forza in corrispondenza della prima rottura delle fibre in funzione di t e di D_p .

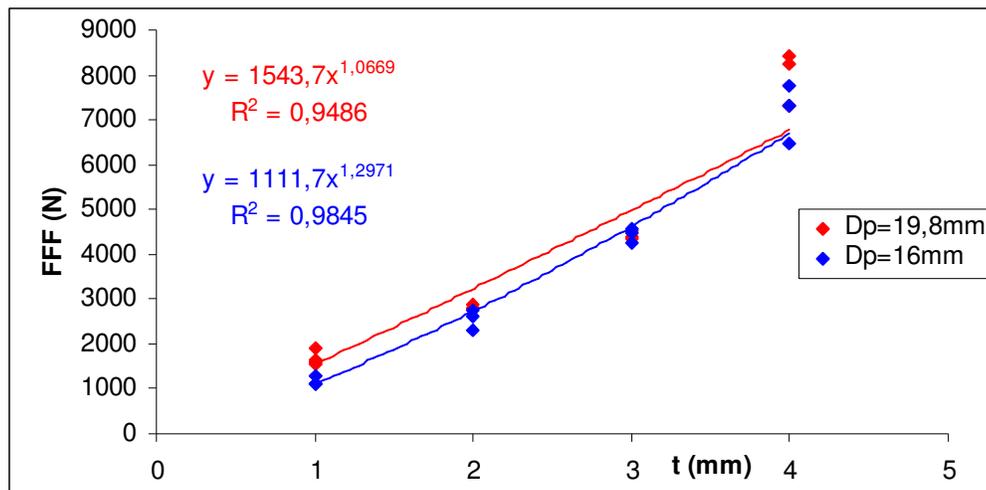


Fig. 6.8 - Andamento della F_{FFF} in funzione dello spessore dei laminati per i diversi diametri del percussore

Un'equazione del tipo:

$$F_{FFF} = F_{FFF0} \cdot t^i$$

Dove per $D_p=16$ mm:

$$F_{FFF0} = 1111,7 \text{ (N/mm}^i \text{)}$$

$$i = 1,2971$$

e per $D_p = 19,8$ mm

$$F_{FFF0} = 1543,7 \text{ (N/mm}^i \text{)}$$

$$i = 1,0669$$

fornisce una buona interpretazione dei valori sperimentali.

6.4.4 Curva Energia corrispondente alla FFF - spessore ($U_{FFF} - t$)

La possibilità di relazionare analiticamente l'area sottesa alla curva di carico fino al valore di forza corrispondente alla prima rottura di fibre nel laminato allo spessore di quest'ultimo riveste notevole importanza, nella determinazione della resistenza residua a trazione.

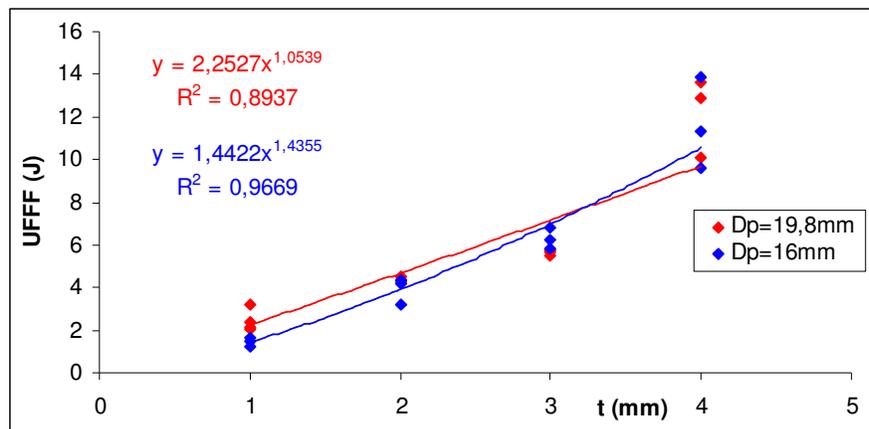


Fig. 6.9 - Andamento della U_{FFF} in funzione dello spessore dei laminati per i diversi diametri del percussore

Nella figura 6.9 sono riportati i valori sperimentali ricavati.

Un'equazione del tipo:

$$U_{FFF} = U_{FFF0} \cdot t^i$$

Dove per $D_p=16$ mm:

$$U_{FFF0} = 1,4422 \text{ (J/mm}^i \text{)}$$

$$i = 1,4355$$

e per $D_p=19,8$ mm

$$U_{FFF0} = 1,2527 \text{ (J/mm}^i \text{)}$$

$$i = 1,0539$$

fornisce una buona interpretazione dei valori sperimentali.

6.4.5 Curva forza massima - spessore (Fmax - t)

In figura 6.10 sono riportati i dati sperimentali ottenuti dalle prove meccaniche effettuate.

L'equazione della curva di minima dispersione è del tipo:

$$F_{\max} = F_{\max 0} \cdot t^i$$

Nella quale per $D_p=16$ mm si ha:

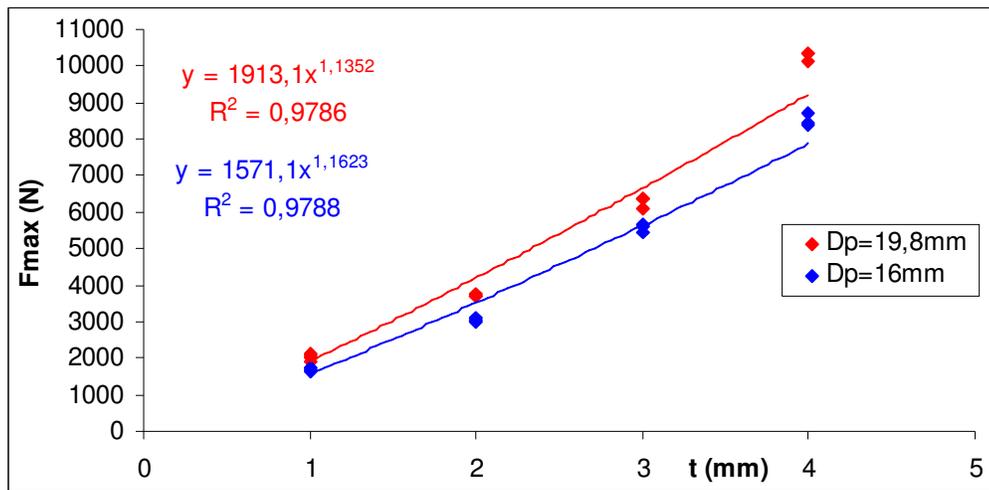


Fig. 6.10 - Andamento della forza massima al variare dello spessore

$$F_{\max 0} = 1571,1 \text{ (N/mm}^i \text{)}$$

$$i = 1,16$$

e per $D_p=19,8$ mm si ha:

$$F_{\max 0} = 1913,1 \text{ (N/mm}^i \text{)}$$

$$i = 1,1352$$

Il valore trovato per l'esponente è molto prossimo a quello caratteristico della carboresina [23] ed è in accordo con quanto riportato da alcuni autori a proposito di campioni di vetroresina. Si può altresì osservare come, indipendentemente dal tipo di materiale, il valore di forza massima cresca al crescere del diametro del penetratore.

6.4.6 Energia massima - spessore (U_{max} - t)

Come per la forza massima anche per i corrispondenti valori d'energia la minima dispersione dei dati rende opportuno il tentativo di rappresentarli con la curva dei minimi quadrati. Si è osservata l'indipendenza dell'esponente da D_p.

$$U_{\max} = U_{\max 0} \cdot t^{1,27}$$

Dove per D_p=16 mm si ha:

$$U_{\max 0} = 3,1883$$

mentre per D_p=19,8 mm si ha:

$$U_{\max 0} = 3,8788$$

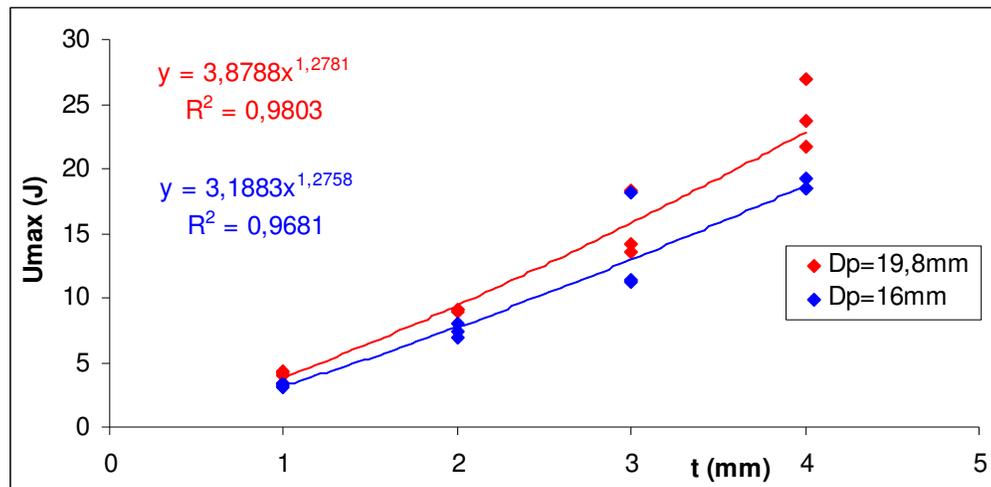


Fig. 6.11 - Andamento dell'energia massima in funzione dello spessore

6.4.7 Curva energia di perforazione – spessore (U_{perf} - t)

L'energia di perforazione è quella necessaria per provocare un primo taglio nel provino.

Nella figura 6.12 sono riportati i valori sperimentali dell'energia di perforazione ricavati dai test eseguiti. Le curve di minima dispersione sono del tipo:

$$U_{\text{perf}} = U_{\text{perf0}} \cdot t^i$$

Dove per $D_p=16$ mm si ha:

$$U_{\text{perf0}} = 6,5739 \text{ (J/mm}^i \text{)}$$

$$i = 1,41$$

mentre per $D_p=19,8$ mm si ha:

$$U_{\text{perf0}} = 10,353 \text{ (J/mm}^i \text{)}$$

$$i = 1,2564$$

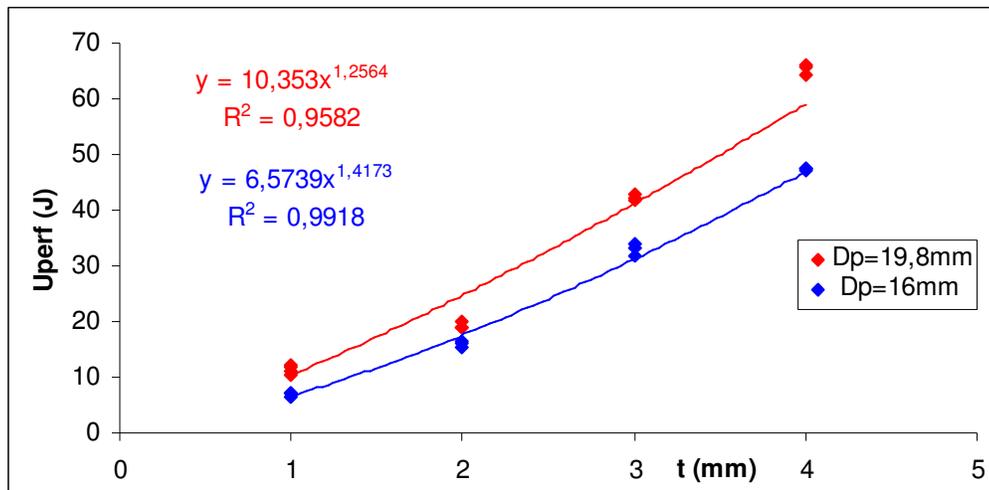


Fig. 6.12 - Energia di perforazione in funzione dello spessore

6.4.8 Curva energia di penetrazione - spessore (U_p - t)

Riportiamo infine, in figura 6.13, i risultati ottenuti sull'energia di penetrazione per i quattro campioni testati.

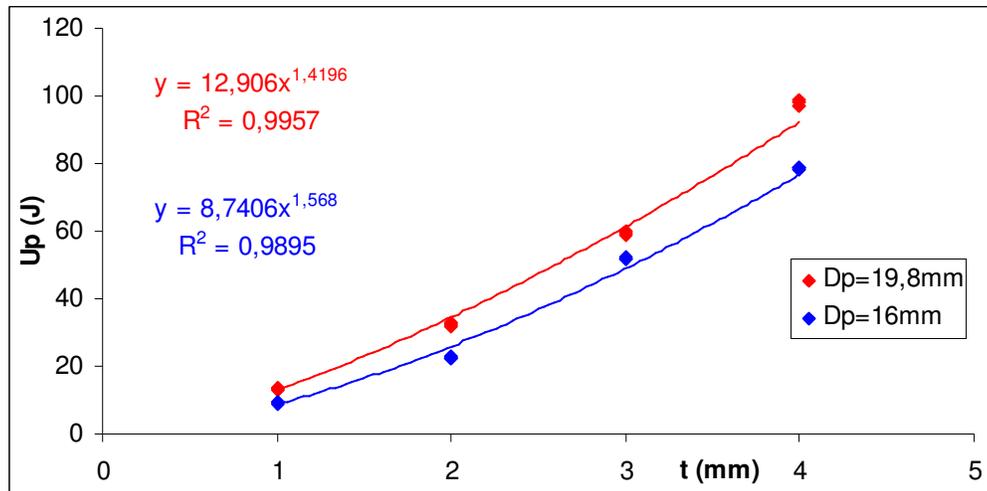


Fig. 6.13 Energia di penetrazione in funzione dello spessore

Le curve ottenute presentano le seguenti equazioni:

$$U_p = 8,7406 \cdot t^{1,568} \quad (D_p = 16\text{mm})$$

$$U_p = 12,906 \cdot t^{1,4196} \quad (D_p = 19,8\text{mm})$$

6.4.9 Differenza Energia di penetrazione - Energia di prima rottura in funzione dello spessore

La differenza tra questi due valori d'energia indica l'energia necessaria affinché il danno, una volta sviluppatosi significativamente al punto da interessare la rottura delle fibre, interessi l'intero spessore

del laminato fino alla penetrazione completa. E' inoltre un utile parametro per confrontare prove eseguite con diverse condizioni al contorno (ad esempio diverso diametro del supporto), in quanto in U_{FFF} è incamerata l'aliquota d'energia flessionale. Pertanto, se il valore di U_p resta costante ma la differenza $U_p - U_{FFF}$ varia, la variazione nell'energia assorbita nella prima parte dal laminato è dovuta ad una variazione di energia flessionale. Nella figura 6.13 sono riportati i valori sperimentali e la curva di potenza di minima dispersione. Si nota come anche in tal caso il valore dell'indice di regressione sia tale da poterci permettere di affermare che le equazioni:

$$U_p - U_{FFF} = 7,2823 \cdot t^{1,5909}$$

$$U_p - U_{FFF} = 10,606 \cdot t^{1,4827}$$

interpretino ottimamente i valori sperimentali nell'ambito dei laminati e degli spessori analizzati.

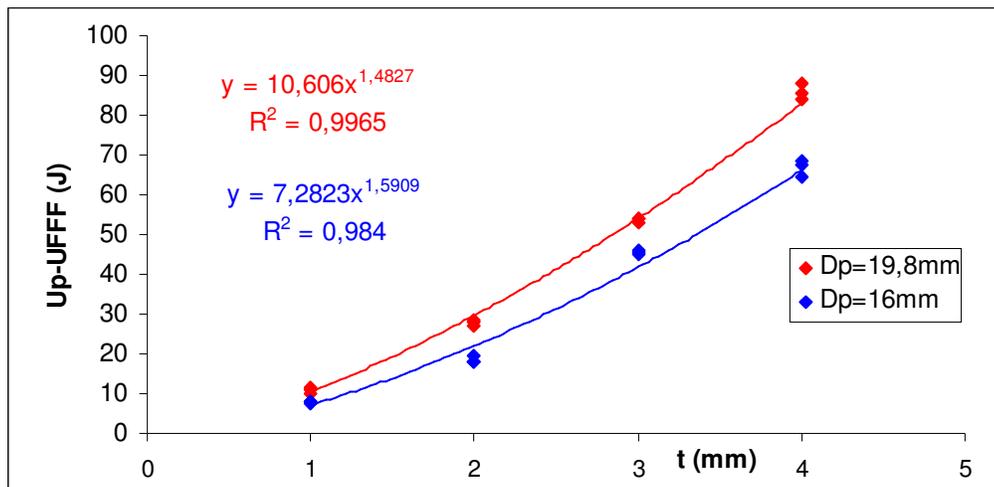


Fig. 6.14 - $(U_p - U_{FFF})$ in funzione dello spessore

6.4.10 Sovrapposizione curve (F- s) e (U- s) per laminati di diverso spessore

Ottenute le curve Forza - Spostamento e quelle Energia - Spostamento, fissate le condizioni al contorno relative ai quattro spessori esaminati e dopo aver indagato sulle leggi di variazione di Forza ed Energia

caratterizzanti la risposta ad impatto, si sono cercate delle leggi di correlazione che permettessero la sovrapposizione di tutte le curve di carico ottenute.

In figura 6.15 a)-b) e 6.16 a)-b) sono riportati per entrambi i diametri dei percussori utilizzati, le curve F-s e le curve U-s.

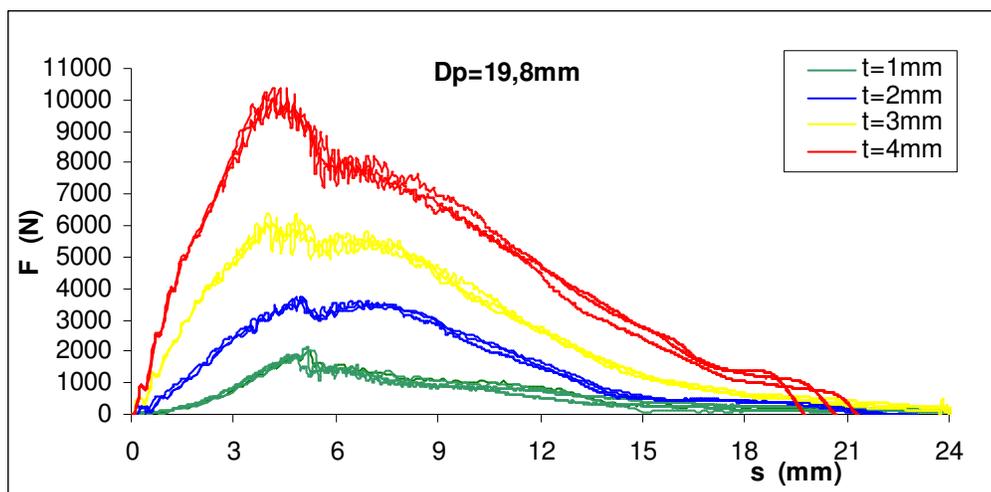
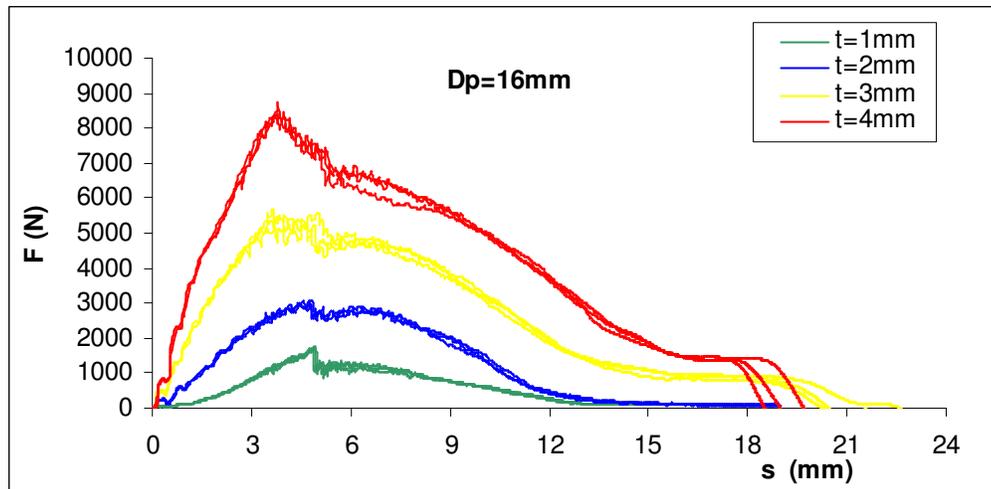


Fig 6.15 a)-b) - Rappresentazione delle curve di carico per tutti gli spessori testati

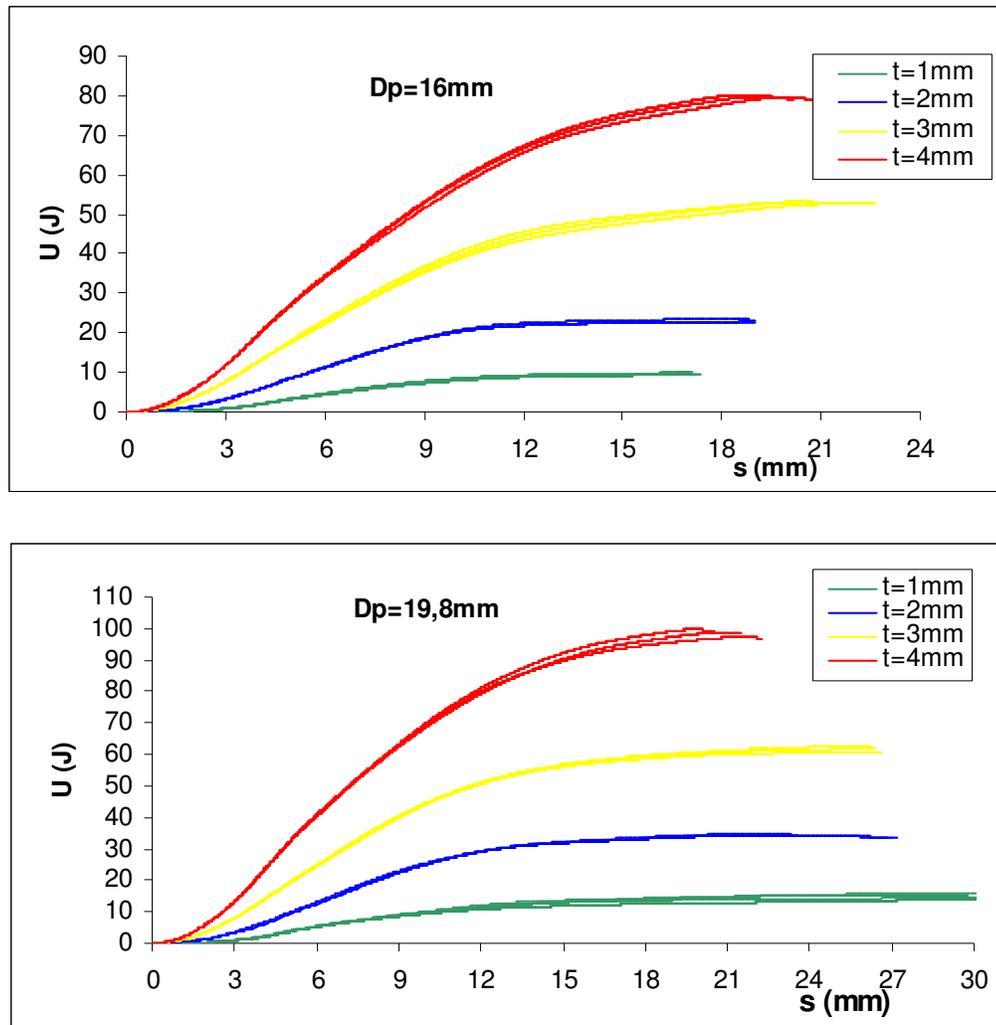


Fig. 6.16 a).b) - Rappresentazione delle curve U-s per tutti gli spessori testati

Dai grafici di figura 6.15 e 6.16 appare chiara la ripetitività delle prove.

Lo scopo è quello di ricercare espressioni che consentano di ridurre la dipendenza dallo spessore.

Come appare dalla figura 6.17, per $D_p=16$ mm si può ottenere una discreta sovrapposizione diagrammando i valori ottenuti semplicemente dividendoli per lo spessore elevato ad 1,3. L'esponente è stato scelto nel tentativo di ottenere buone sovrapposizioni nella parte iniziale ed in quella centrale delle curve di carico. Per il diametro del percussore di 19,8 mm questo risultato è ancora più evidente (fig. 6.18).

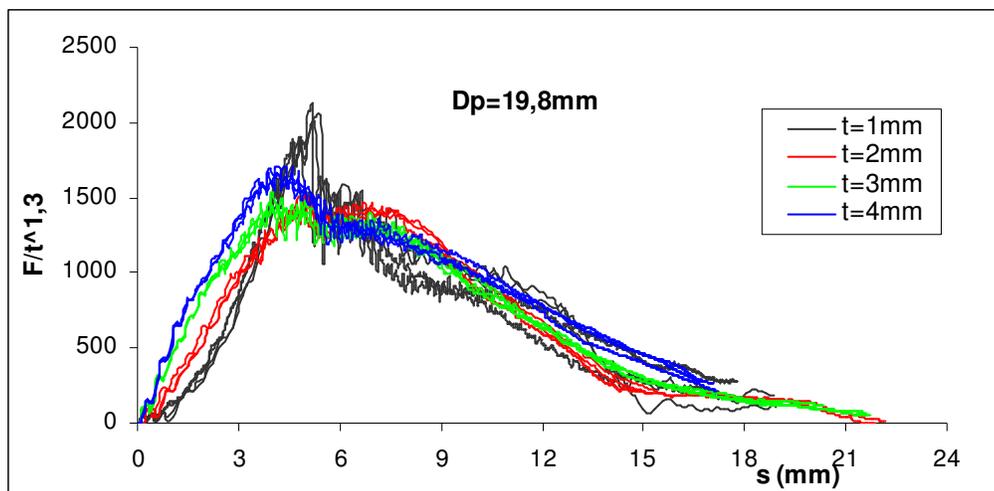
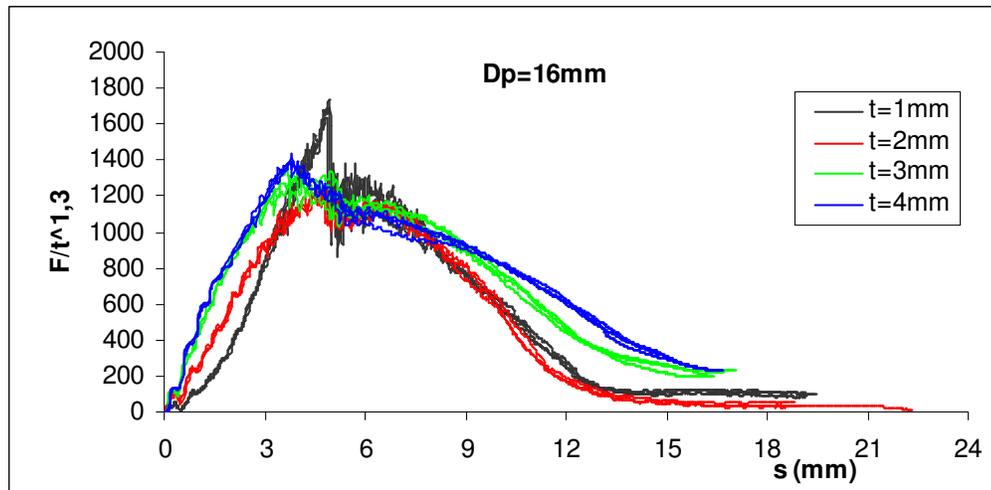


Fig 6.18 - Sovrapposizione Curve Forza- Spostamento al variare dello spessore

Così come accade per la carboresina, anche per la vetroresina il coefficiente 1,45 (fig. 6.19) consente l'avvicinamento cercato delle curve ($U - s$) nei primi due tratti per un diametro del percussore di 16 mm; lo stesso fattore, inoltre, consente una sovrapposizione completa anche per le curve relative ad un diametro del percussore di 19,8 mm.

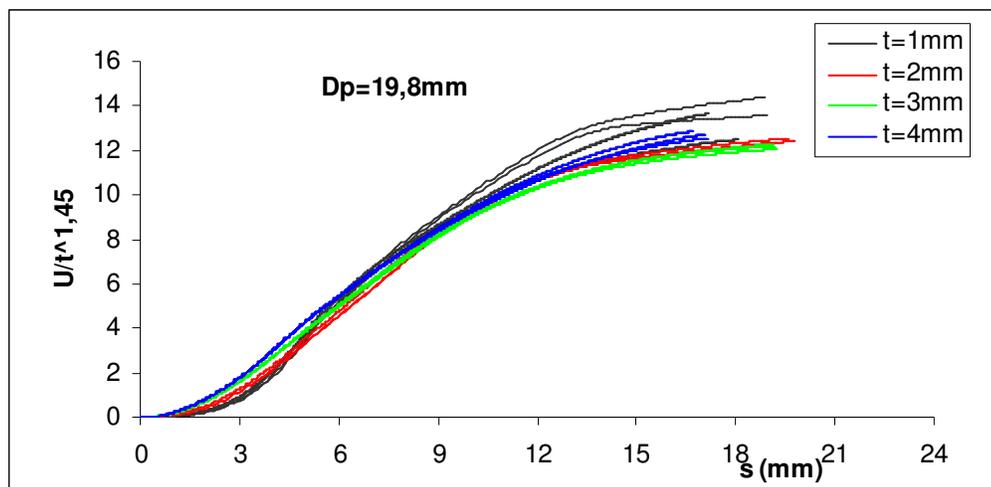
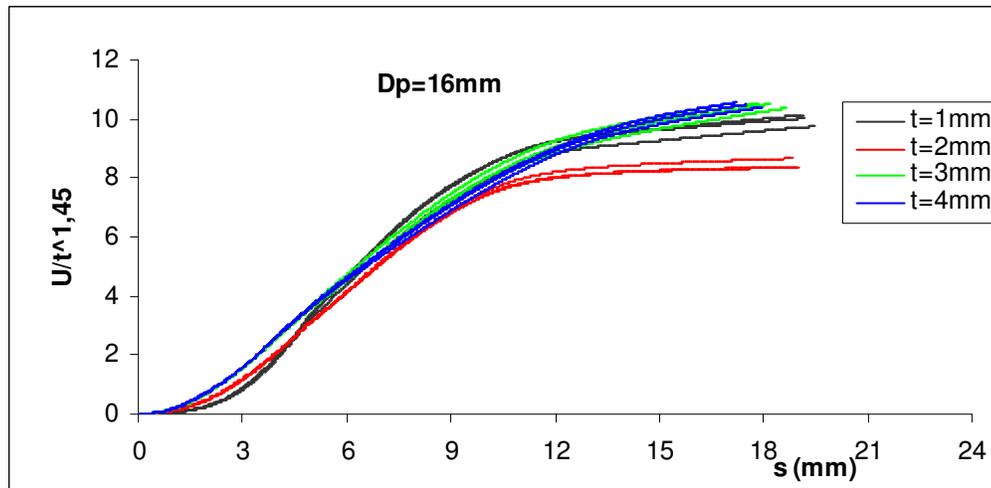


Fig 6.19 - Sovrapposizione Curve Energia – Spostamento al variare dello spessore

Si sarebbero potute ottenere, limitatamente a zone specifiche, migliori sovrapposizioni usando esponenti diversi.

Le vere limitazioni a quanto esposto in questo paragrafo sono soprattutto la dipendenza dallo specifico sistema materiale testato e dalle condizioni di vincolo e di applicazione del carico nelle prove eseguite.

6.5 Influenza del diametro dell'impattatore (D_p) nella determinazione dei valori caratteristici

6.5.1 Curve di carico (F - s)

L'effetto dell'aumento del diametro dell'impattatore sulla curva di carico è principalmente quello di elevare i valori caratteristici. Nel diagramma di figura 6.20 sono riportate le curve di carico ottenute per i due percussori utilizzati e relative ad un unico spessore.

A titolo di esempio sono riportate le sole curve riguardanti gli spessori di 2 mm e 4 mm.

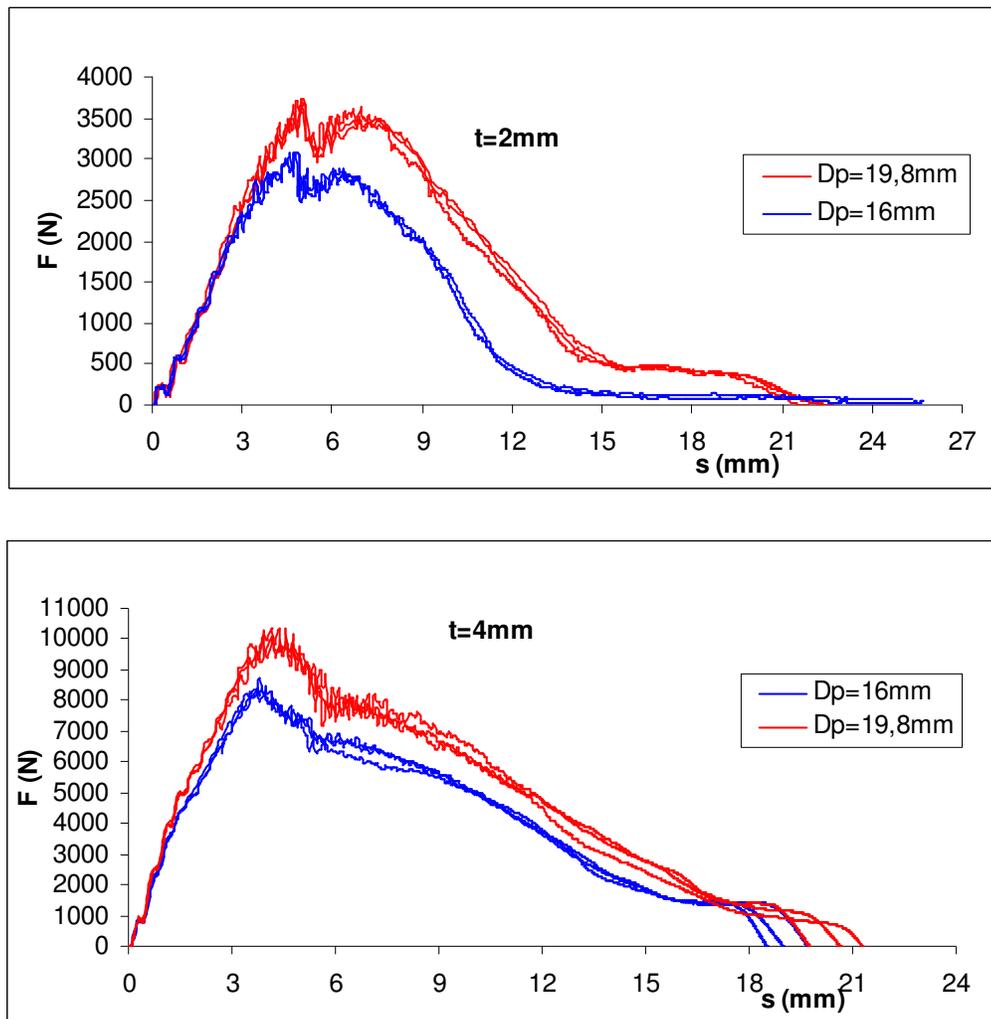


Fig 6.20 - Curve Forza- Spostamento per $t=2\text{ mm}$ e $t=4\text{ mm}$

6.5.2 Curve Energia – Spostamento (U –s)

Così come nel caso delle curve forza spostamento, nel caso delle curve U-s un aumento del diametro del percussore utilizzato non fa altro che elevare i valori caratteristici.

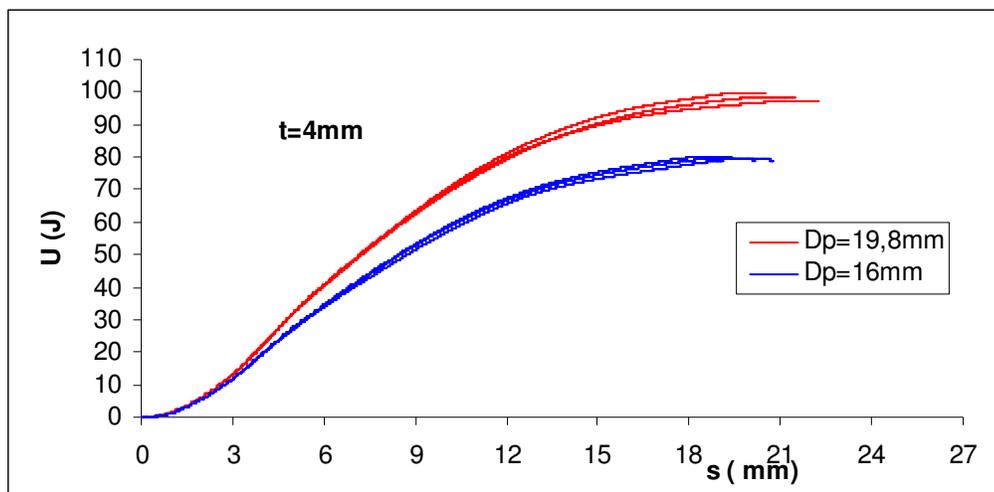
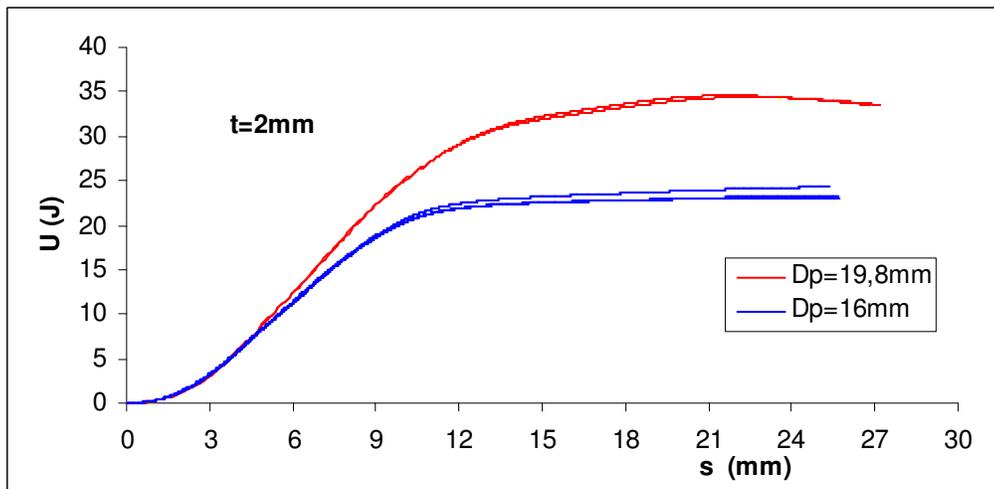


Fig 6.21 - Curve Energia- Spostamento per t=2 mm e t=4 mm

6.5.3 Sovrapposizione curve (F-s) ed (U-s) ottenute per i due Dp esaminati

Si è cercata una relazione veramente semplice che permettesse una buona sovrapposizione delle curve F-s ed U-s ottenute impiegando percussori di diverso diametro.

Riportando in ordinata F/D_p^k si ottiene la sovrapposizione cercata.

Per lo spessore di 2 mm ciò è stato possibile utilizzando un valore di k compreso tra 0.7 e 0.9; in questo modo si è avuta una buona sovrapposizione nel tratto iniziale ed in quello centrale.

Con $k=0,7$ questo risultato si ha anche per i laminati aventi uno spessore di 1mm, mentre per i laminati di 3 mm di spessore si riesce ad avere un ravvicinamento che riguarda l'intera curva di carico.

Per $t=4$ mm la riduzione del gap tra le curve si riesce ad ottenere considerando un coefficiente tra 0,7 e 0,8; con $k=0,8$ (fig. 6.23) si ottiene l'accostamento migliore per il tratto finale.

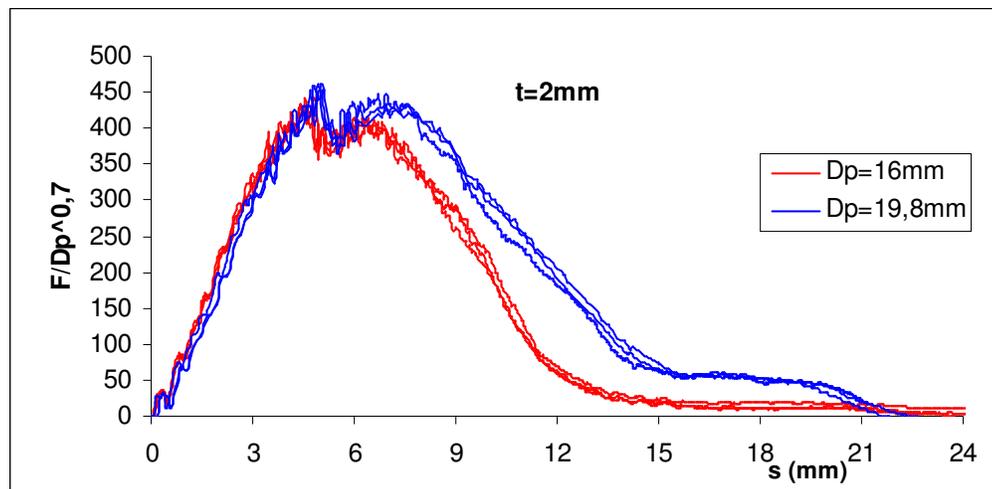


Fig 6.22 - Sovrapposizione delle curve di carico per $t = 2$ mm

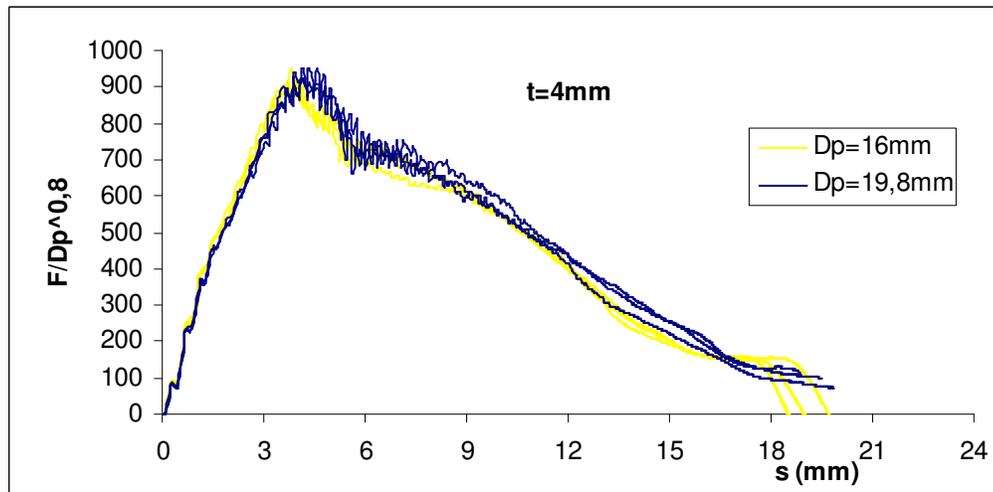


Fig 6.23 - Sovrapposizione delle curve di carico per $t = 4\text{mm}$

Per le curve dell'energia si è riportato in ordinata il valore U/D_p^z ; la sovrapposizione è relativamente buona per tutti gli spessori. In particolare come appare chiaramente dalla fig. 6.24 il coefficiente 0,9 per $t = 4\text{mm}$ consente una sovrapposizione completa cosa che invece non accade ne per $t=2\text{mm}$ (fig. 6.25) ne per $t=1\text{mm}$.

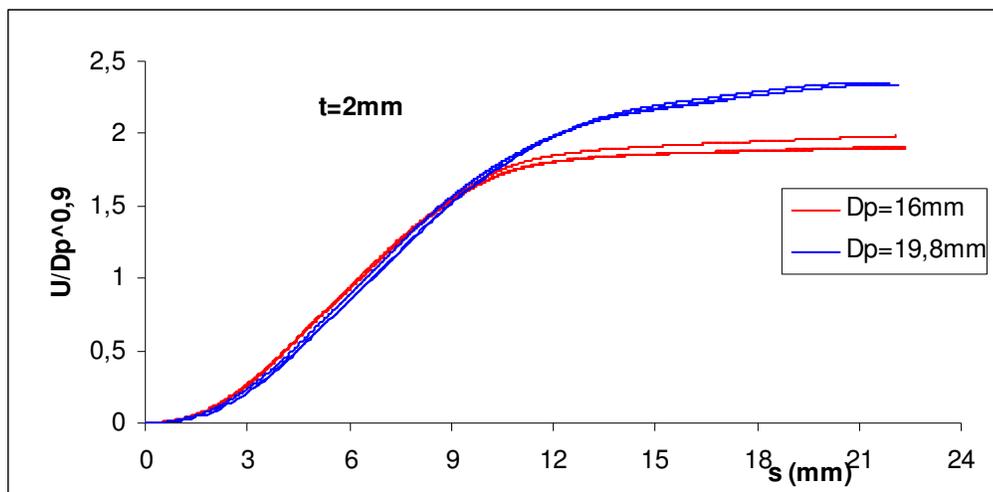


Fig 6.24 - Sovrapposizione delle curve di energia per $t = 2\text{mm}$

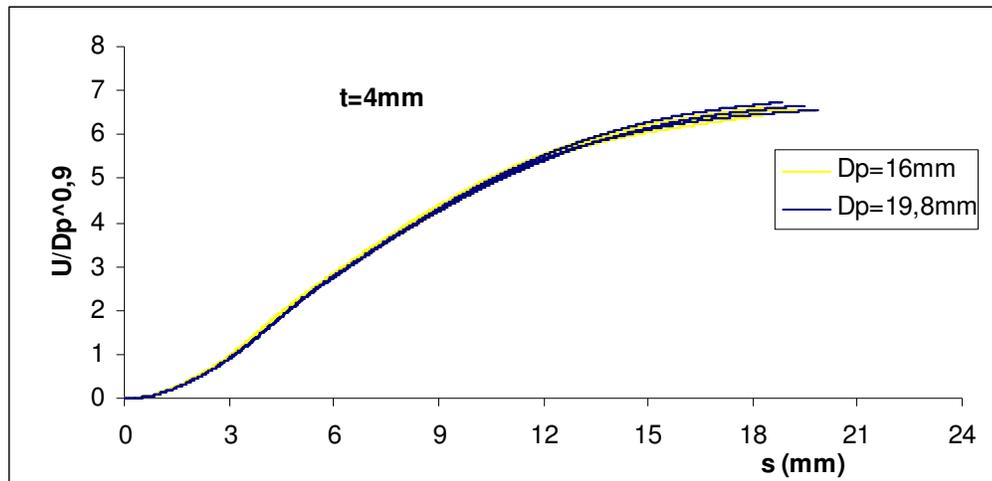


Fig 6.25 - Sovrapposizione delle curve di energia per $t = 4$ mm

6.6 Prove ad energia crescente – valutazione indentazione

6.6.1 Introduzione

Come già accennato uno degli aspetti cui tende la ricerca è la possibilità di stabilire una relazione tra il danno da impatto e la perdita delle caratteristiche strutturali del laminato in composito.

E' necessaria, pertanto, la possibilità di una catalogazione del danno secondo parametri facilmente misurabili; questa è la "filosofia progettuale" che ha condotto, in ambito aeronautico, al concetto di *danno da impatto appena visibile* (BVID).

Secondo tale criterio il laminato deve garantire *adeguata sicurezza*, in termini di perdita percentuale di resistenza, alla presenza di una profondità dell'impronta causata dall'impatto superiore a $0.3 \approx 0.4$ millimetri. Purtroppo non sempre il laminato conserva inalterate le proprie caratteristiche meccaniche alla presenza di un danno simile, diretta conseguenza del fatto che mentre l'indicazione esterna dell'impatto è l'indentazione (intesa nel nostro lavoro come massima profondità dell'impronta), i

meccanismi di genesi e sviluppo del danno interessano, principalmente, la parte interna del laminato ed il lato opposto all'impatto, spesso non ispezionabile visivamente.

Inoltre, a complicare le cose è stato riscontrato che, in conseguenza dei fenomeni visco-elastici, il valore dell'indentazione diminuisce durante il tempo intercorrente tra l'impatto e la misurazione.

Trascurando, nell'ambito del presente lavoro questo ultimo fenomeno, si è cercata una correlazione tra l'energia spesa per la formazione del danno e l'indentazione, del tipo:

$$U = U(I) \quad (6.6.1.1)$$

con $U(I)$ funzione monotona di I .

Essendo, infatti, proposti in letteratura [31,32] alcuni modelli capaci di predire la resistenza residua a trazione di un laminato in composito in funzione dell'energia d'impatto:

$$\frac{\sigma_R}{\sigma_V} = \sigma(U) \quad (6.6.1.2)$$

essendo σ_R e σ_V la resistenza residua (dopo impatto) e quella del materiale vergine rispettivamente, parrebbe possibile una relazione del tipo:

$$\frac{\sigma_R}{\sigma_V} = \sigma[U(I)] \quad (6.6.1.3)$$

cioè la possibilità di risalire, da una misura semplice da effettuare, alla resistenza residua del manufatto. A questo punto sembrerebbe un lavoro volto alla catalogazione del danno in un unico sistema materiale per determinati spessori e tipi d'impattatore. Vedremo invece che la legge d'indentazione sarà sostanzialmente indipendente dall'architettura delle fibre e dall'orientazione delle

stesse nel laminato quando l'energia di impatto verrà adimensionalizzata rispetto l'energia di penetrazione; in altre parole una relazione del tipo:

$$I = I \left(\frac{U}{U_p} \right) \quad (6.6.1.4)$$

è applicabile anche per sistemi materiali diversi.

Inoltre, il valore di U_p è ricavabile, con sufficiente accuratezza, per diverse condizioni al contorno e diversi sistemi materiali, mediante la relazione:

$$U_p = K \cdot D_p^i \quad (6.6.1.5)$$

con K pari al rapporto $(W_f / \gamma_f)^i$.

Il valore di U ricavabile dalla (6.6.1.4), sostituito in un modello di resistenza residua tipo (6.6.1.3), porta alla determinazione della resistenza residua da una semplice misura dell'indentazione.

In realtà, in quanto appena concluso c'è una grave "incongruenza" e cioè che il valore di resistenza residua dipende dal sistema materiale; per capirne in modo semplice il perché analizziamo il modello di resistenza residua a trazione proposto:

$$\frac{\sigma_R}{\sigma_V} = \left(\frac{U_{\sigma 0}}{U} \right)^\alpha \quad (6.6.1.6)$$

in esso $U_{\sigma 0}$ ed α sono due costanti da determinare sperimentalmente e di cui la prima rappresenta fisicamente l'energia limite al di sotto della quale non si verifica riduzione di resistenza. Il valore $U_{\sigma 0}$ è dato dall'area sottesa alla curva di carico fino al valore FFF (figura 6.26) essendo, infatti, la rottura delle fibre, la responsabile della diminuzione di resistenza a trazione, piuttosto che la delaminazione. Tale valore dipende fortemente dal sistema materiale usato e così il valore di indentazione limite I_{lim}

che è l'indentazione corrispondente U_{σ_0} .

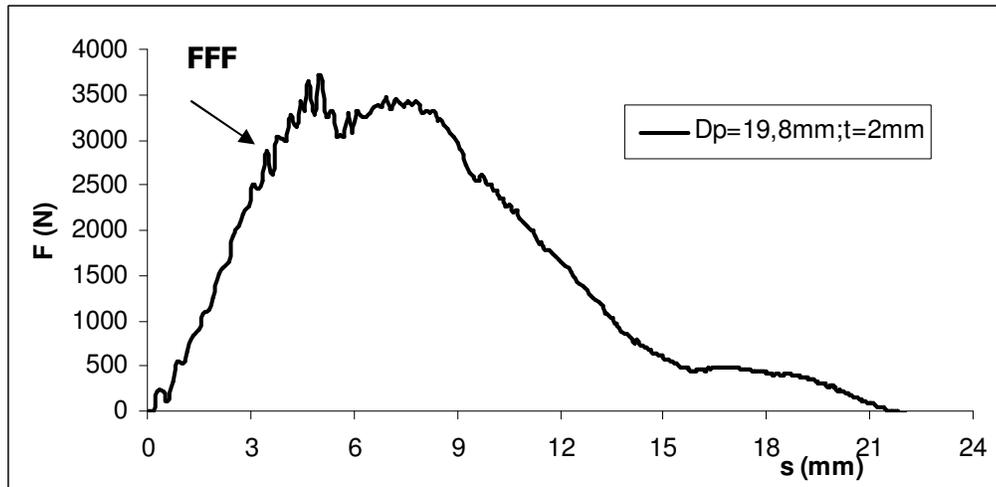


Fig. 6.26 - Rappresentazione schematica di una curva di carico

Ne scaturisce che, per alcuni sistemi materiali, il valore di I_{lim} può essere tanto piccolo da essere praticamente *invisibile* e ben al di sotto dei $0.3 \approx 0.4$ mm della BVID, comportando la necessità di una scelta del sistema materiale da impiegare e quindi di sperimentazioni specifiche.

Resta la validità della 6.6.1.4 che consente, nell'ambito di queste sperimentazioni accennate, la possibilità di concentrare la ricerca alla specificità della costruzione di relazioni del tipo:

$$\frac{\sigma_R}{\sigma_V} = \frac{\sigma_R}{\sigma_V} \left(\frac{I}{I_{lim}} \right) \quad (6.6.1.7)$$

in cui I_{lim} dipende dal sistema fibre/resina utilizzato.

6.6.2 Prove effettuate

E' stata condotta una campagna di prove completa caricando, in maniera dinamica, circa 100 provini diversi e riuscendo ad ispezionare l'intera curva di carico eseguendo prove ad energia variabile.

Per indagare sulla propagazione del danno nei laminati testati, ogni spessore è stato soggetto a tipologie di prove mirate ad individuare cosa accade alla superficie del provino, in corrispondenza di punti ben precisi della curva di carico e per i quali si osservano significative cadute di carico. In particolare sono stati presi in considerazione valori prossimi alla forza elastica, alla forza massima e punti successivi per indagare sul meccanismo di perforazione inteso come rottura successiva delle fibre nelle varie lamine (fig. 6.27).

Di ogni provino impattato si è analizzata la curva di carico ed è stata calcolata l'energia assorbita; inoltre, mediante l'ausilio di un comparatore centesimale, si è misurata la massima profondità dell'impronta.

Il "range" coperto in termini di energia è stato fin all'80% dell'energia di perforazione per ogni spessore, non avendo significato una misura della profondità d'impronta per valori maggiori.

6.6.3 Misure d' indentazione

Con l'ausilio di un comparatore centesimale del tipo Mitutoyo è stato possibile misurare la profondità dell'impronta lasciata dal percussore in seguito all'impatto. Esso prevede un display digitale ed un'astina scorrevole verticalmente alla cui estremità c'è un tastatore emisferico il cui diametro è di 5 mm. Per alcuni provini la misura è stata particolarmente complicata per la presenza d'impronte sulla superficie talmente piccole da confondersi con le imperfezioni superficiali dei campioni.

6.6.4 Analisi dei risultati

Lo scopo è quello di cercare una relazione che ci fornisce l'indentazione in funzione del rapporto adimensionale U/U_p . In questo modo si cerca conferma del legame tra l'energia d'impatto e l'indentazione e quindi tra questa ultima e il danno. Infatti, attraverso la catalogazione dell'indentazione a diversi livelli d'energia, si può risalire al danno subito dal materiale al suo interno.

Altri autori hanno verificato che il danno è più visibile nei laminati sottili anziché in quelli spessi.

Questo ha fatto subito pensare ai concetti base della meccanica della frattura, secondo i quali la dimensione critica di un difetto, intesa come quella tale da causare la rottura, nei materiali fragili diminuisce all'aumentare dello spessore.

Le coppie di valori (Energia - Indentazione) sono state elaborate mediante l'ausilio di fogli di calcolo Excel per la costruzione di una curva $I=I(U)$.

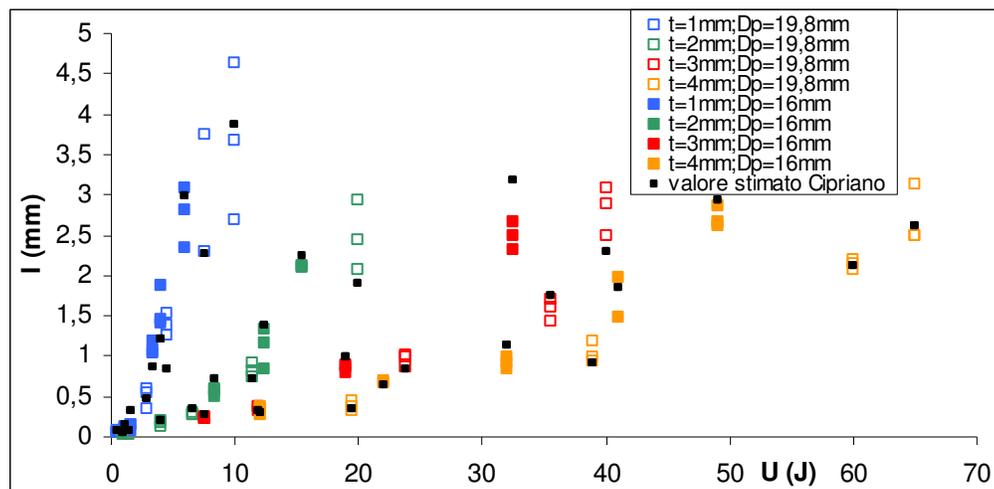


Fig. 6.27 - Indentazione in funzione di U (tutti gli spessori e tutti i diametri dei percussori)

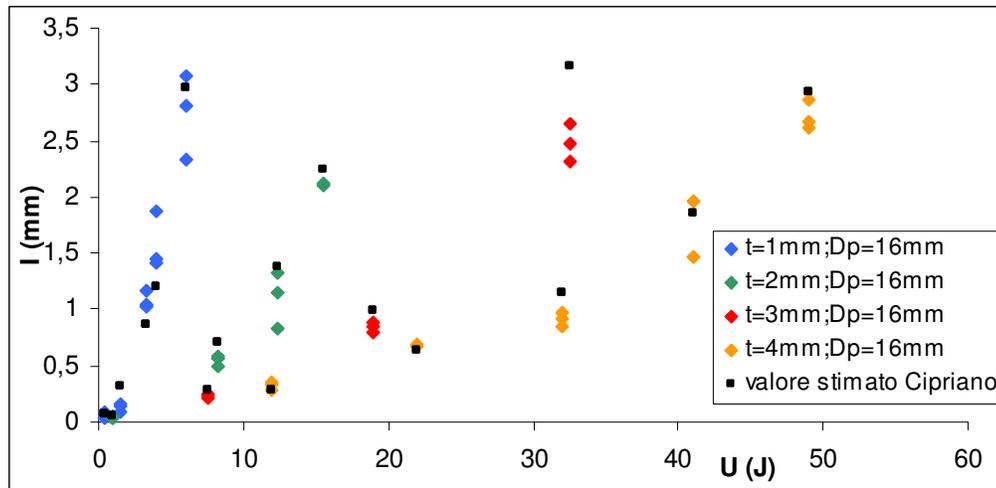


Fig. 6.28 - Indentazione in funzione di U per $D_p=16\text{mm}$ e tutti gli spessori

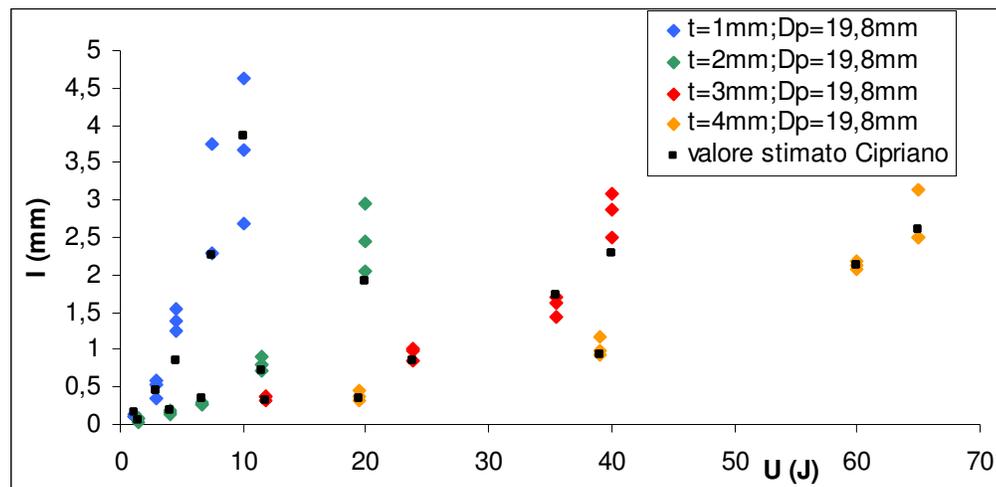


Fig. 6.29 Indentazione in funzione di U per $D_p=19,8\text{mm}$ e tutti gli spessori

Questi risultati sono in accordo con quanto ricavato da altri autori a proposito di diversi sistemi materiali.

Analogamente a quanto sviluppato da questi ultimi, è stata diagrammata l'indentazione in funzione del rapporto U/U_p cioè dell'energia registrata per ogni prova adimensionalizzata rispetto all'energia di penetrazione.

Gli autori che hanno preceduto questo lavoro hanno verificato (per la carboresina) che una curva esponenziale è quella che meglio descrive analiticamente il fenomeno.

Il modo d'analisi adottato è di seguito riportato.

Partendo dal rispetto delle condizioni al contorno ($U/U_p = 0 \Rightarrow I = 0$), si è cercata una relazione del tipo:

$$I = k \cdot [10^{(aU/U_p)} - 1] \quad (6.6.4.1)$$

la 6.6.4.1 è equivalente alla seguente 6.6.4.2:

$$[(I/k) + 1] = 10^{(aU/U_p)} \quad (6.6.4.2)$$

o meglio ancora alla (6.6.4.3):

$$\log[(I/k) + 1] = aU/U_p \quad (6.6.4.3)$$

Imponendo per K un valore di tentativo, si è riportato in ascisse il rapporto U/U_p ed in ordinate i valori $\log[(I/K)+1]$. Si sono così ottenuti i seguenti grafici:

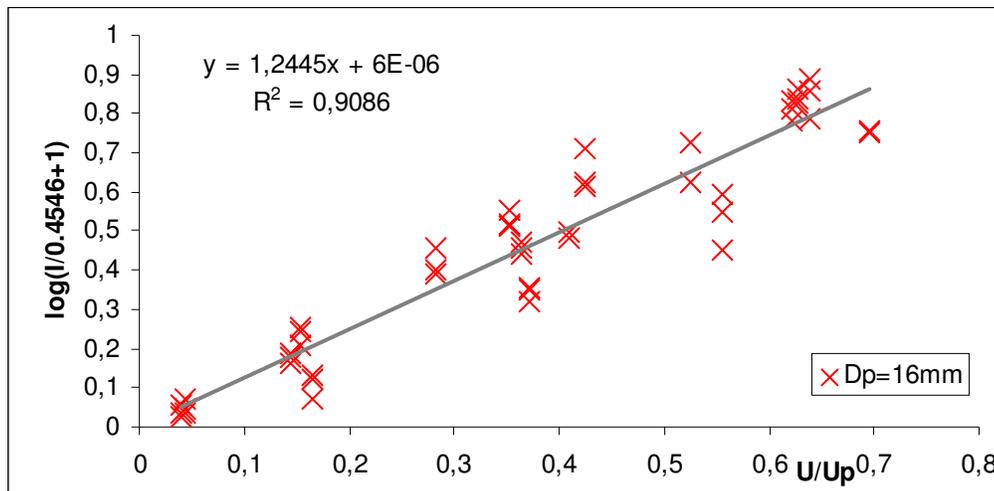


Fig. 6.30 - Grafico $\log[(I/K)+1]$ vs U/U_p per $D_p=16mm$

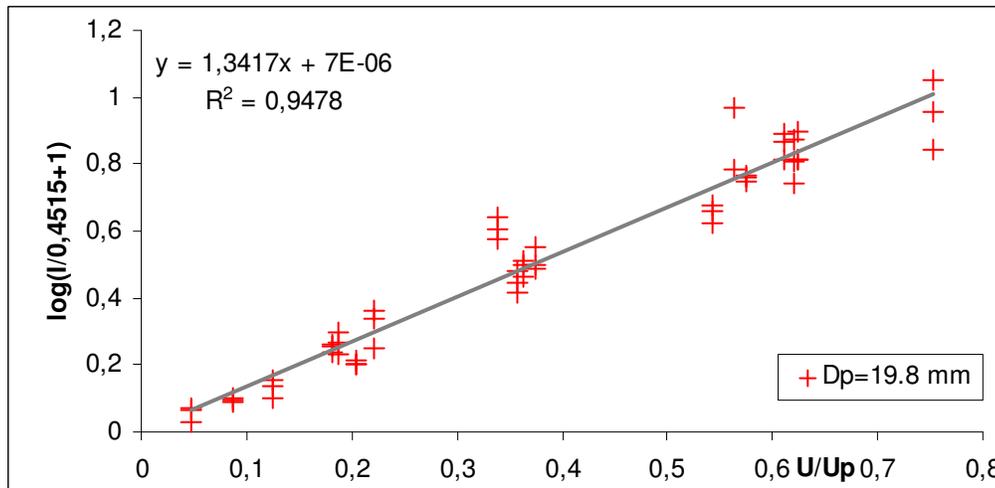


Fig. 6.31 - Grafico $\log[(I/K)+1]$ vs U/U_p per $D_p=19,8\text{mm}$

Si è rappresentata la legge lineare di minima dispersione avente equazione del tipo:

$$y = \alpha x + q$$

dove α è il coefficiente angolare della retta di minima dispersione. Si è imposta la condizione al contorno, ormai nota, che per $x = 0$ sia $y=0$ e si è modificato il valore di K nella 6.6.4.3 fino ad ottenere $q = 0$. Quindi si è assegnata ai dati sperimentali (I ; U/U_p) l'equazione 6.6.4.1 con K ed α determinati.

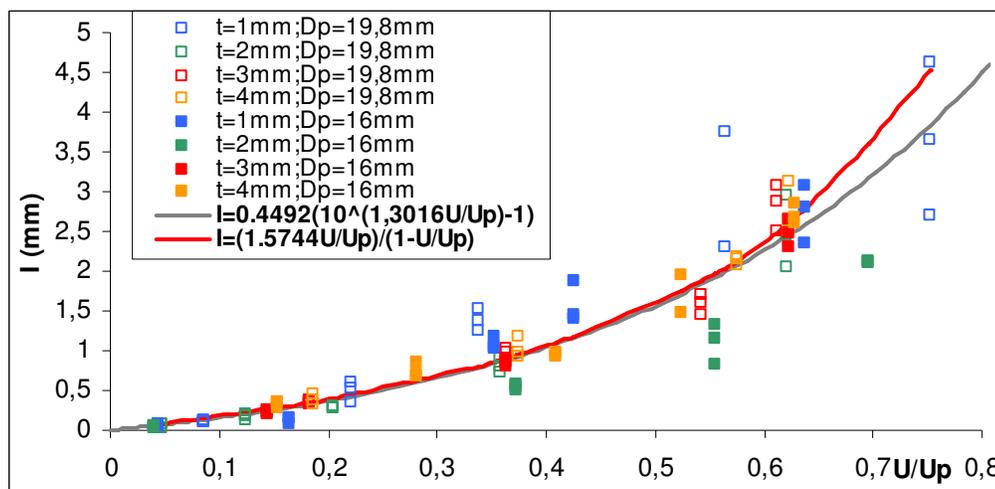


Fig. 6.32 - Indentazione in funzione del rapporto U/U_p

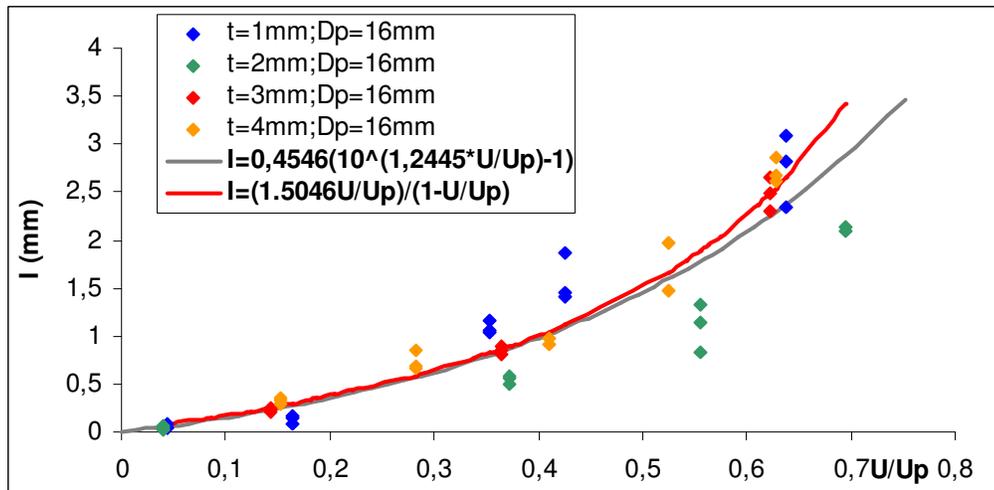


Fig. 6.33 - Indentazione in funzione del rapporto U/U_p per $D_p=16\text{mm}$

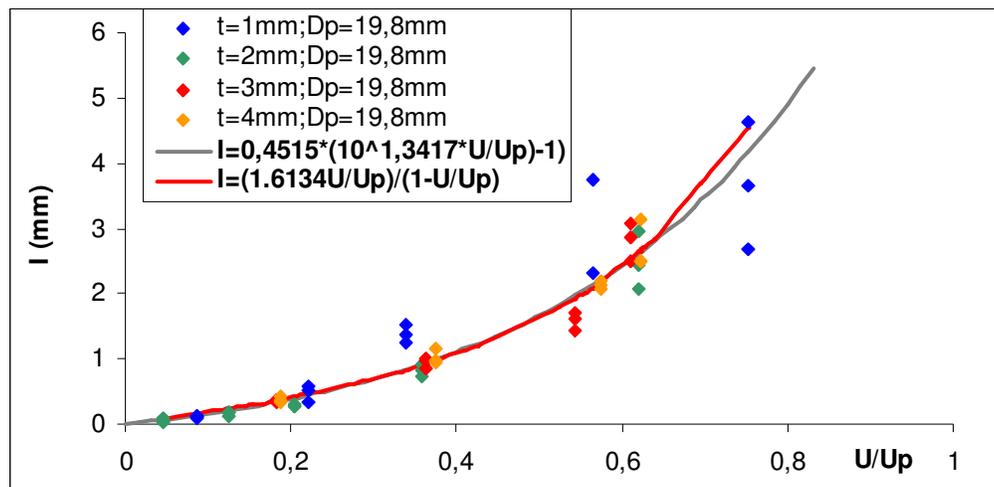


Fig. 6.34 - Indentazione in funzione di U/U_p per $D_p=19,8\text{mm}$

La relativa tendenza esponenziale è stata ricavata per i diversi spessori al variare del diametro del penetratore.

I risultati ottenuti con $D_p=16\text{mm}$ sono i seguenti:

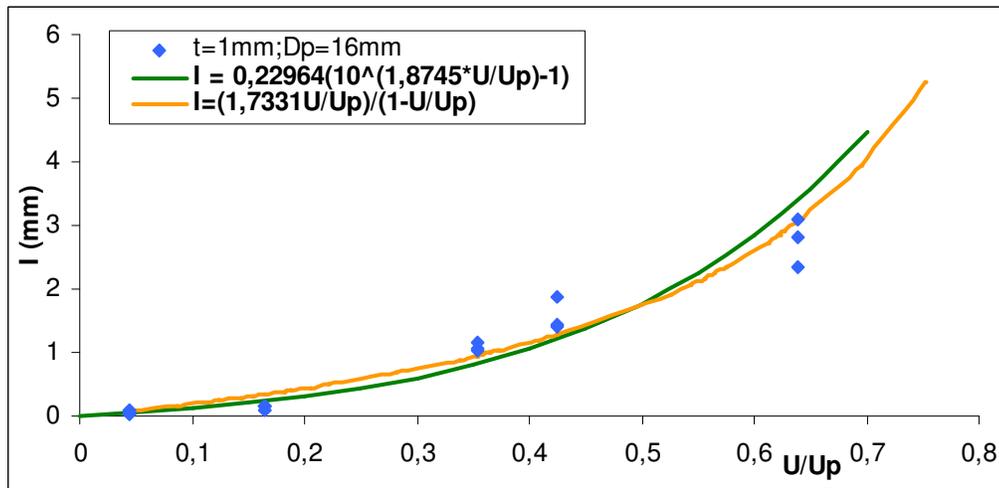


Fig. 6.35 Curve di minima dispersione per $t=1\text{ mm}$

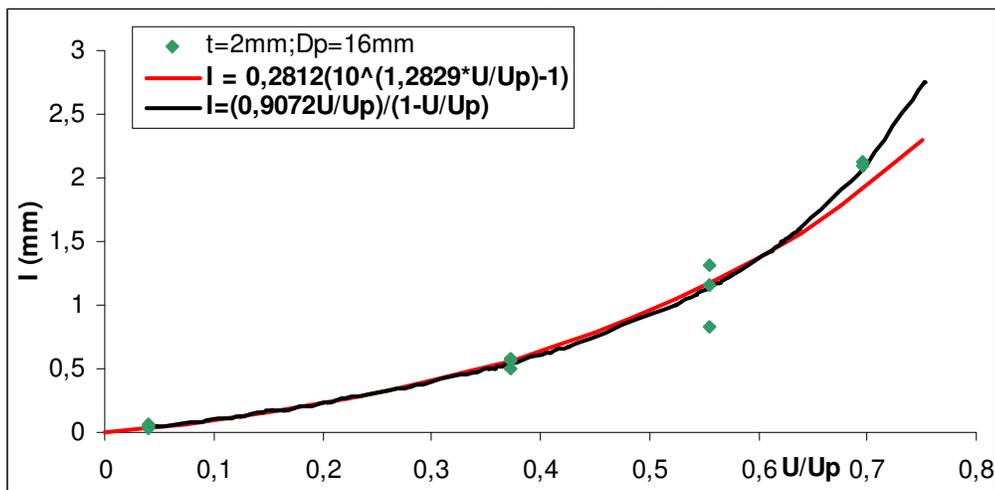


Fig. 6.36 - Curve di minima dispersione per $t = 2\text{ mm}$

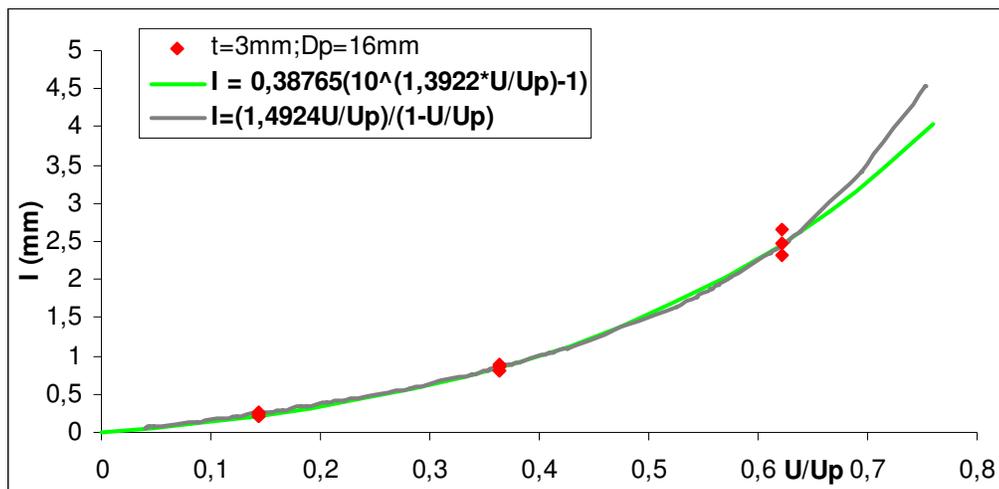


Fig. 6.37 - Curve di minima dispersione per $t = 3\text{ mm}$

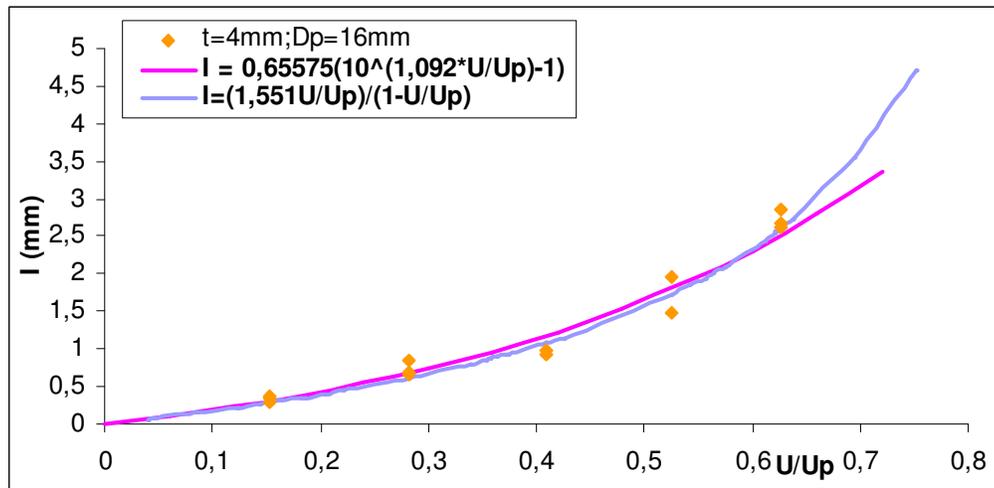


Fig. 6.38 - Curve di minima dispersione per $t= 4 \text{ mm}$

Con il diametro del penetratore da 19,8mm, si ha:

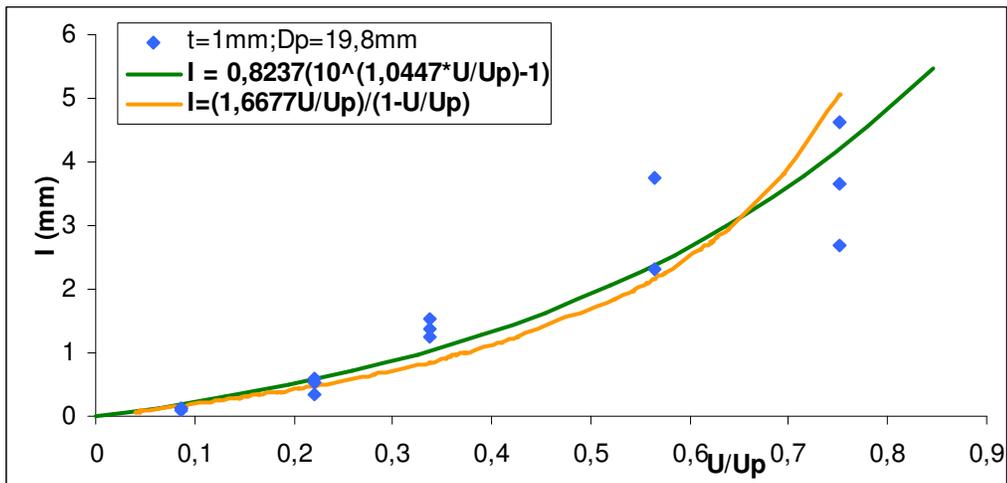


Fig.6.39 - Curve di minima dispersione per $t = 1 \text{ mm}$

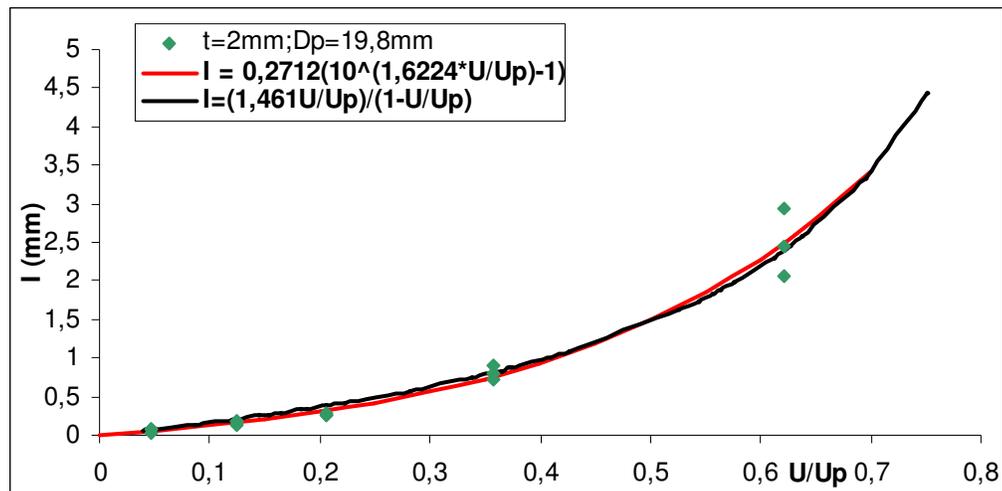


Fig. 6.40 - Curve di minima dispersione per $t = 2 \text{ mm}$

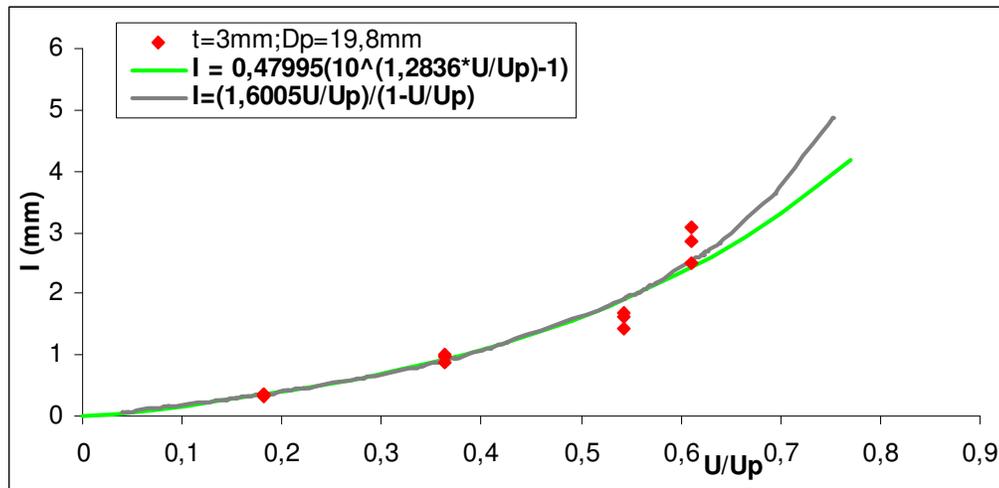


Fig.6.41 - Curve di minima dispersione per $t = 3 \text{ mm}$

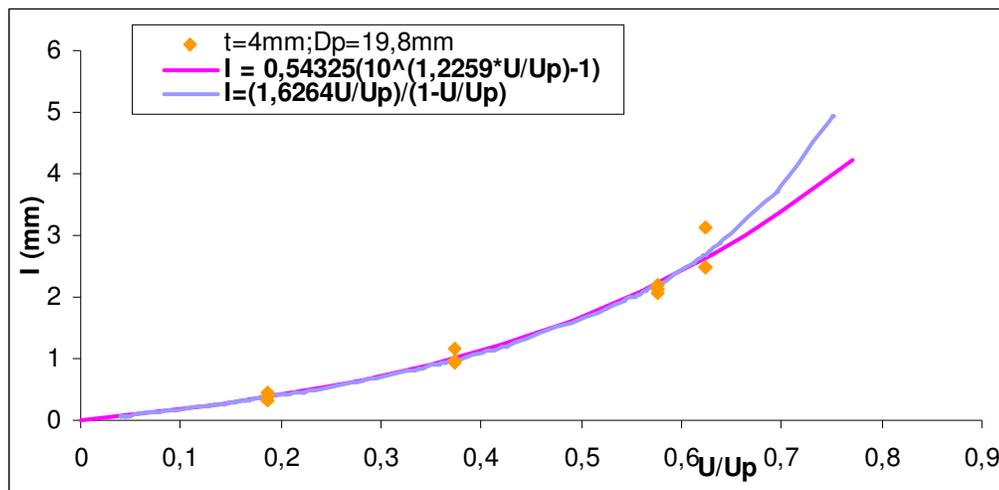


Fig. 6.42 - Curve di minima dispersione per $t = 4 \text{ mm}$

Dall'esame dei diagrammi sin qui mostrati si può notare che, oltre alle tendenze esponenziali descritte, sono state riportate anche le tendenze relative ad un nuovo modello di previsione dell'indentazione da noi formulato. Trattasi di un modello del tipo:

$$I = [kU/U_p]/[1-U/U_p]$$

con k unica costante da determinare. La natura della costante k è facilmente riscontrabile dal seguente diagramma:

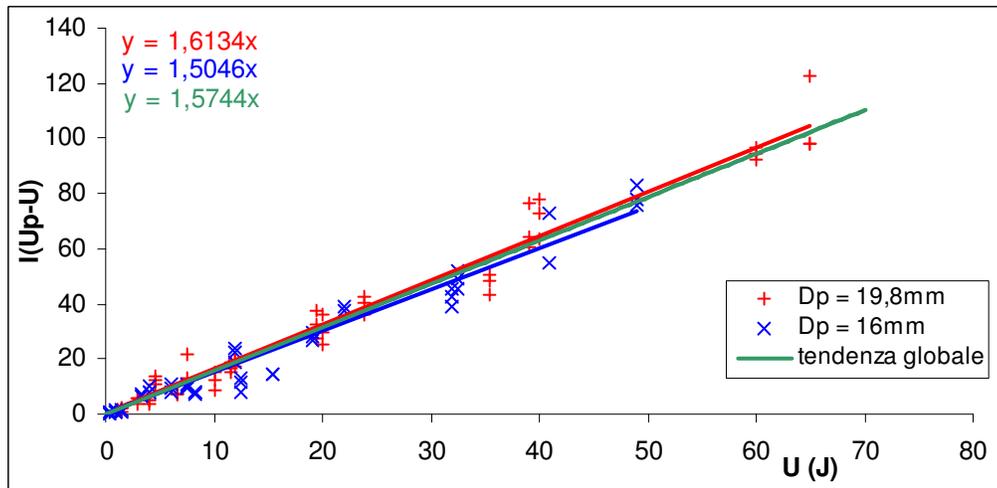


Fig. 6.43 - Calcolo della costante k con U_p misurata

Dall'osservazione del diagramma si intuisce che la costante in questione altro non è che il coefficiente angolare della tendenza lineare dei valori $I/[1/(U_p-U)]$ in funzione dell'energia d'impatto U.

A questo punto della trattazione è stato pensato di sostituire nella relazione precedente ad U_p la relativa espressione ricavata in precedenza:

$$U_{pc} = 0,4213(tV_f D_p)^{1,5187}$$

Si è ottenuto il seguente grafico:

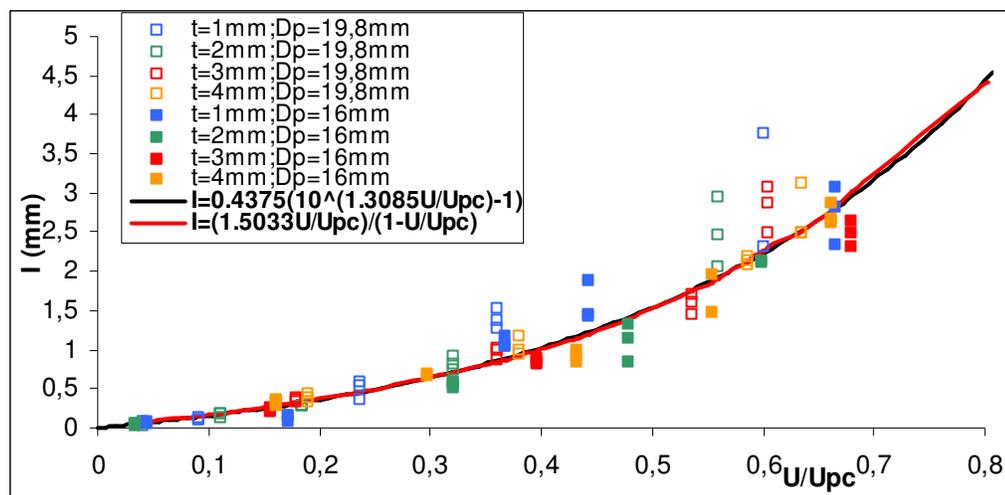


Fig. 6.44 - Indentazione in funzione del rapporto U/U_{pc}

In cui la costante K è stata determinata con l'ausilio del grafico seguente.

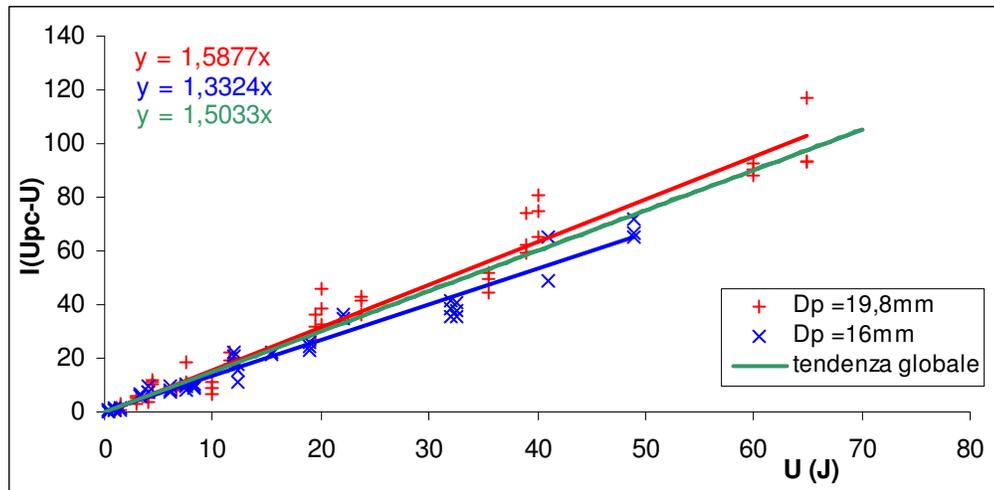


Fig. 6.45 - Calcolo della costante k con U_p calcolata

6.6.5 Confronto tra i due metodi

L'acquisita possibilità di stimare l'indentazione con un metodo alternativo a quello esponenziale ci spinge ad un inevitabile paragone tra i due modelli (quello di letteratura e quello da noi formulato). Il risultato di questo confronto è riassunto nel grafico di figura seguente:

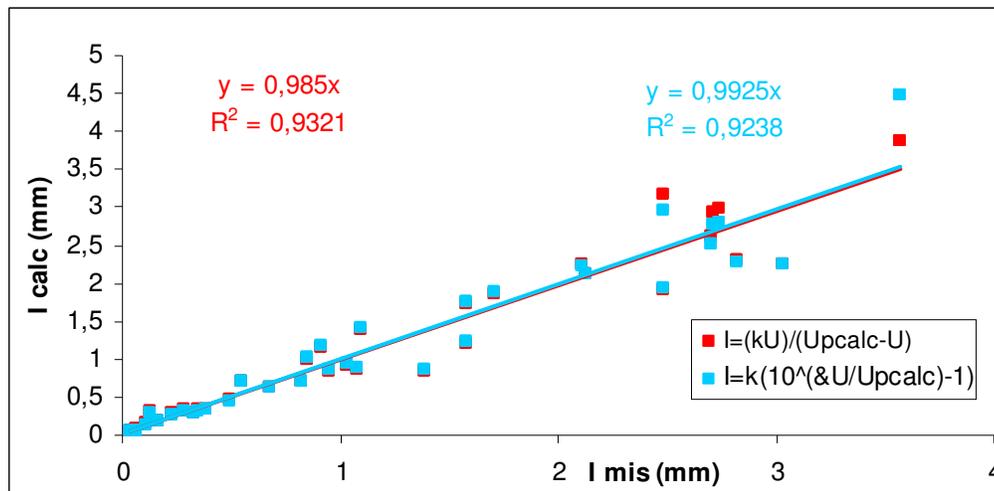


Fig. 6.46 - Confronto tra l'indentazione calcolata e quella misurata

Esaminando il diagramma si nota immediatamente come il nuovo metodo risulti una valida alternativa al più laborioso metodo esponenziale che necessita della conoscenza di due costanti.

La prossimità al valore unitario dei coefficienti angolari delle tendenze lineari ricavate con entrambi i metodi e l'elevato coefficiente di correlazione ci permettono di considerare lecita l'uguaglianza tra l'indentazione I_{calc} calcolata e l'indentazione I_{mis} misurata sperimentalmente.

6.6.6 Confronto tra la vetroresina e la carboresina

Il nuovo metodo di previsione dell'indentazione permette di prevedere la profondità dell'impronta lasciata da un percussore in seguito ad urto, noto che sia il sistema materiale.

Il metodo è stato applicato anche a dati bibliografici relativi a diverse carboresine.

Si è ottenuto:

$$I_{carboresina} = [0,7621U/(U_{pc}-U)]$$

Ricordiamo che per la vetroresina testata si è trovato:

$$I_{vetroresina} = [1,5033U/(U_{pc}-U)]$$

Il grafico di figura seguente ha permesso di determinare le costanti presenti nelle relazioni precedenti.

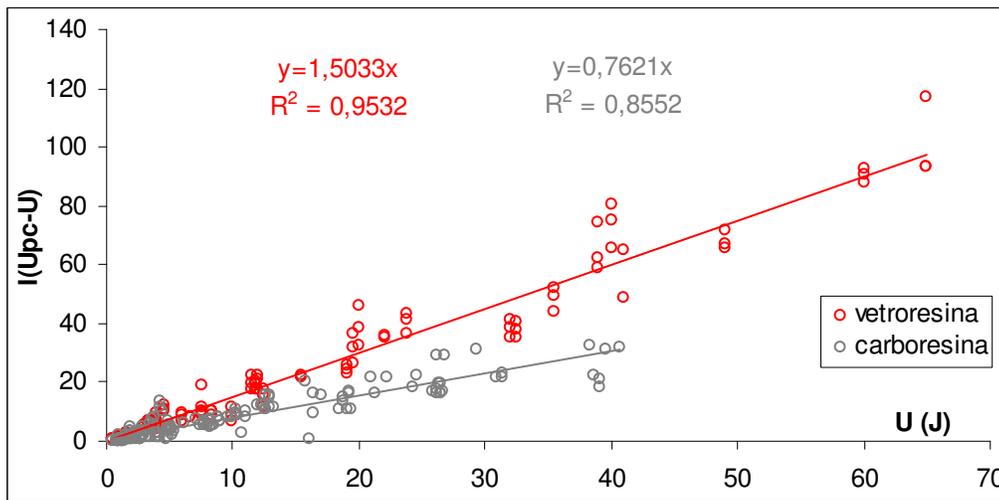


Fig. 6.47 - Determinazione delle costanti per le leggi di previsione dell'indentazione (vetroresina e carboresina)

Dal rapporto delle espressioni appena descritte si ottiene il coefficiente che relaziona l'indentazione dei due sistemi materiali.

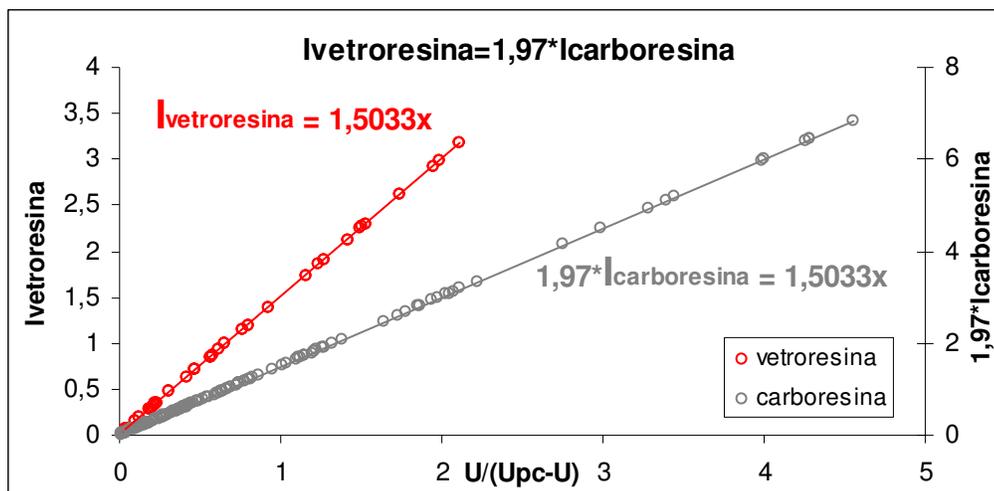


Fig. 6.48 – Coefficiente che relaziona il comportamento della vetroresina con quello della carboresina

6.6.7 Legame tra l'indentazione ed il diametro del penetratore

Nel tentativo di svincolarci dall'influenza del singolo percussore, si è diagrammato l'andamento del rapporto I/D_p in funzione del rapporto U/U_{pc} . Il grafico ottenuto è riportato in figura seguente.

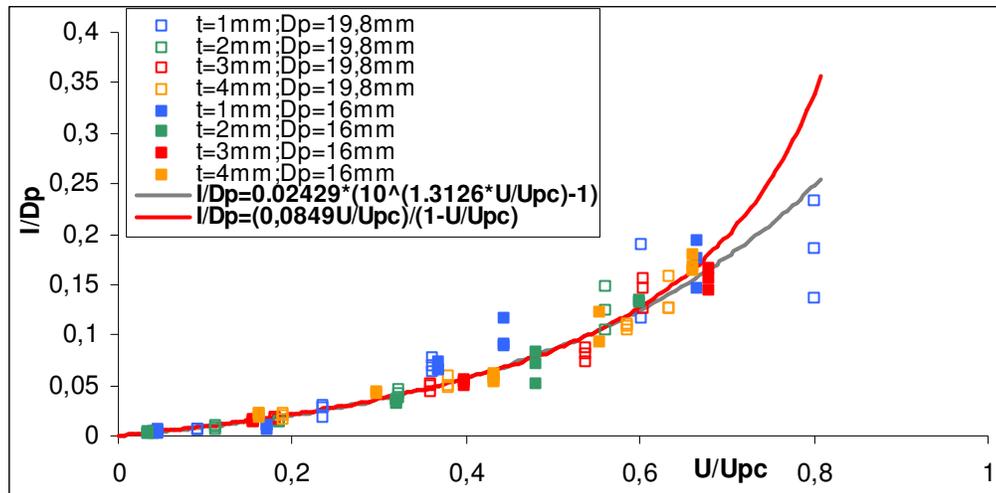


Fig. 6.49 - Diagramma I/D_p vs U/U_{pc} per i due valori di D_p

A questo punto, con l'ausilio di un foglio di calcolo Kaleidagraph, si è cercato, imponendo come condizioni al contorno che per $U/U_{pc} = 0$ sia $I/D_p = 0$, quella che meglio approssima i i dati che si avevano a disposizione. Partendo dal rispetto delle condizioni al contorno ($U/U_{pc} = 0 \Rightarrow I/D_p = 0$), si è cercata una relazione del tipo:

$$I/D_p = k \cdot [10^{(aU/U_{pc})} - 1]$$

equivalente alla seguenti :

$$[(I/k \cdot D_p) + 1] = 10^{(aU/U_{pc})}$$

$$\log[(I/k \cdot D_p) + 1] = aU/U_{pc} \quad (6.6.7.1)$$

imponendo per K un valore di tentativo, si è diagrammato il primo membro della 6.6.7.1 in funzione del rapporto U/U_{pc} .

Si è ottenuto il grafico riportato di seguito :

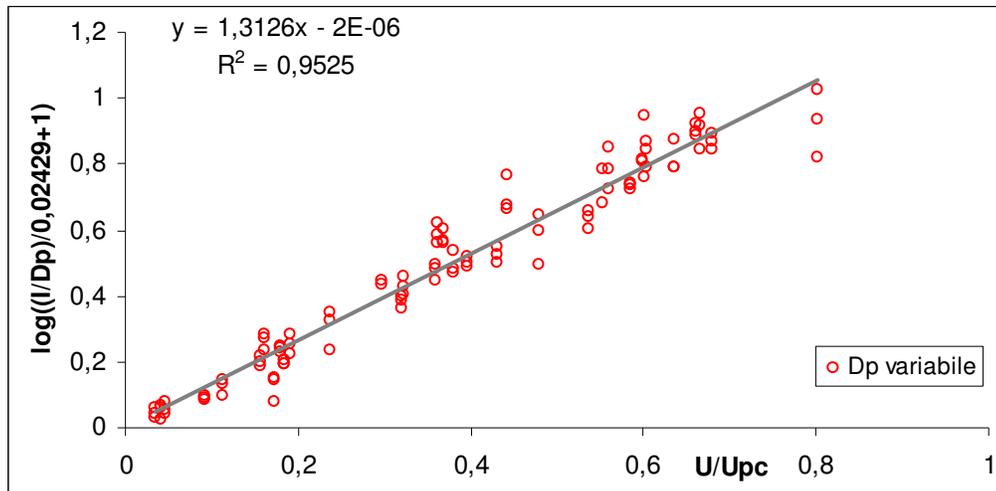


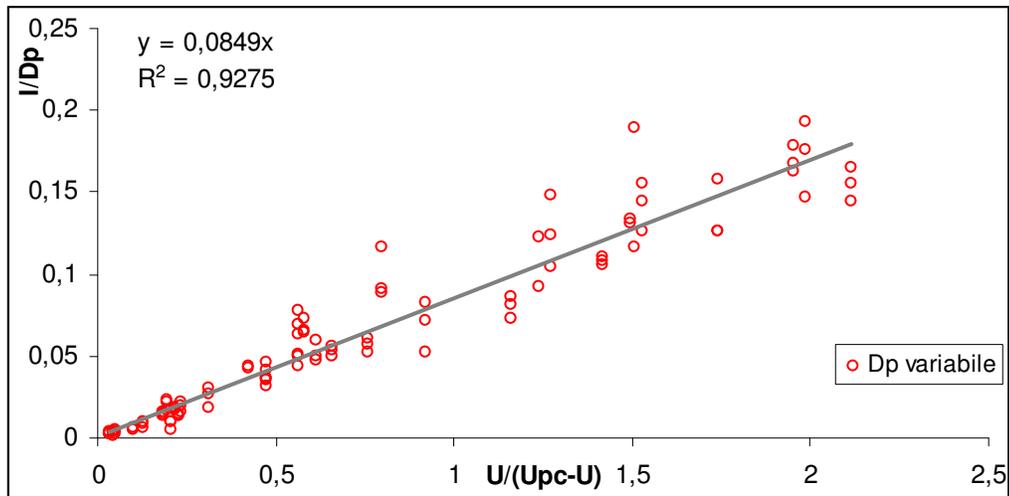
Fig. 6.50 - Diagramma $\log[(I/k \cdot D_p) + 1]$ vs aU/U_{pc}

Si è rappresentata la legge lineare di minima dispersione avente equazione del tipo $y = \alpha x + q$ in cui α è il coefficiente angolare della retta di minima dispersione.

Si è imposta la condizione al contorno, ormai nota, che per $x = 0$ sia $y=0$, e si è modificato il valore di K fino ad ottenere $q = 0$. In particolare si è ottenuto: $K = 0,02429$ ed $\alpha = 1,3126$.

Come al solito è stata affiancata alla classica trattazione esponenziale quella derivante dal metodo ricavato ed utilizzato sin qui in tutta l'analisi dell'indentazione ricavando per l'unica costante k il valore 0,0849.

$$I/D_p = [kU/U_{pc}]/[1-U/U_{pc}]$$

Fig.6.51 - Diagramma I/D_p vs $U/(U_{pc}-U)$

Le relazioni trovate, benché ci consentano di sintetizzare in un unico andamento situazioni d’impatto così diverse, hanno tuttavia introdotto quella che risulta essere inevitabilmente un’incognita: la dimensione del corpo impattante. Per risolvere questo problema abbiamo allora bisogno di un’altra relazione (vedi capitolo successivo), che leghi il diametro del percussore ad un parametro facilmente determinabile.

CAPITOLO VII

NASCITA E PROPAGAZIONE DEL DANNO DA IMPATTO

7.1 Introduzione

Sebbene i materiali compositi offrano delle proprietà specifiche molto attraenti per manufatti in cui il peso sia un fattore determinante di successo, la loro vulnerabilità all'impatto pone notevoli problemi, in quanto costringe ad adottare elevati coefficienti di sicurezza, penalizzando l'efficienza della struttura. E', infatti, ampiamente documentato in letteratura che livelli di energia innocui per un metallo possono indurre in un laminato rotture, quali fessurazioni intralaminari e delaminazioni, che determinano cospicue perdite di resistenza a compressione e considerevoli perdite di resistenza a trazione.

7.2 Danni da impatto a bassa velocità

C'è un sostanziale accordo fra i diversi ricercatori sui meccanismi di generazione e crescita del danno in un laminato composito sottoposto ad impatto a bassa velocità [16,17]. Generalmente, il materiale ha un comportamento elastico fino a un livello caratteristico di energia U_j , spesso indicato come "energia

limite", al di là del quale si manifestano fratture intralaminari nella matrice o all'interfaccia fibra-matrice. Tali fratture possono essere di due tipi (Fig. 7.1):

- a) fratture normali, sistemate nelle lamine più distanti dal punto di contatto pannello-percussore e orientate secondo la direzione dello spessore
- b) fratture taglienti, presenti nelle lamine più interne e orientate approssimativamente a 45° rispetto alla direzione dello spessore.

La denominazione delle due tipologie di fessurazione è legata alla loro origine: le fratture normali sono provocate dalle sollecitazioni normali legate al momento flettente, che eccedono la resistenza della lamina in direzione trasversale; quelle taglienti sono dovute alle sollecitazioni derivanti dalle forze di taglio, che superano la corrispondente resistenza del singolo strato.

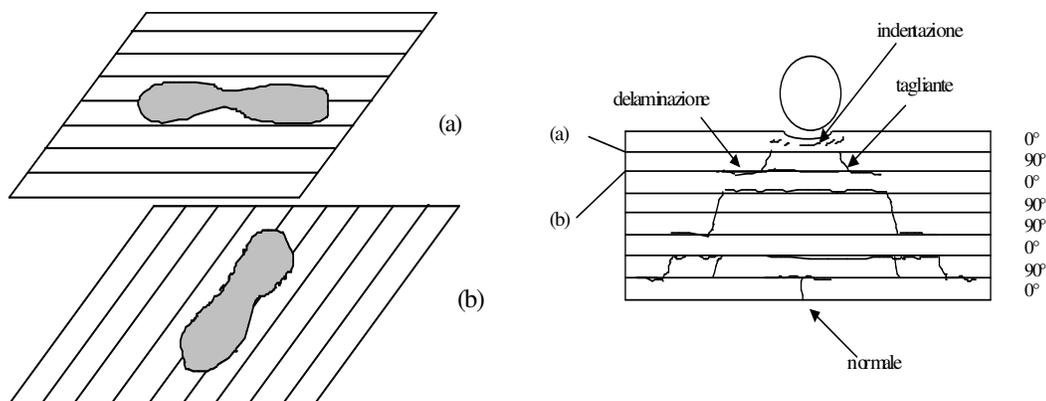


Fig. 7.1 - Schematizzazione dei modi di rottura tipici in un laminato sottoposto a impatto; a) fratture normali b) fratture taglienti

Solitamente le fratture appena descritte attraversano completamente lo spessore della lamina in cui si generano e si bloccano all'interfaccia con lamine ad orientazione differente. Qui tendono a propagarsi sotto forma di delaminazione, di forma lenticolare allungata secondo la direzione delle fibre della lamina inferiore (Fig. 7.1). Questo meccanismo fa in modo che non si osservi delaminazione fra lamine

adiacenti eventualmente caratterizzate dalla stessa orientazione del rinforzo. All'aumentare dell'energia d'urto, le fessurazioni intralaminari si accrescono in numero, e le delaminazioni si estendono in dimensioni. In particolare, le fratture taglienti e le conseguenti delaminazioni descrivono lungo lo spessore del laminato un caratteristico percorso tronco-conico, con estensione delle delaminazioni sempre maggiore all'allontanarsi dalla superficie direttamente esposta all'impatto. Come sappiamo, i parametri che possono essere scelti arbitrariamente nell'esecuzione di una prova d'impatto sono molteplici. A parte la natura della lamina di base, il numero e l'orientazione delle lamine, la sequenza di laminazione, la geometria del pannello, le sue dimensioni in piano e le condizioni di vincolo possono essere scelte in modo differente; il materiale costitutivo e la geometria dell'impattatore, la sua massa e velocità possono assumere i valori più disparati. Ognuno dei fattori appena elencati, in misura maggiore o minore, può influenzare il comportamento del materiale. Di fatto, questo rende difficile sia il confronto diretto fra risultati sperimentali provenienti da fonti diverse, sia il trasferimento d'esperienze acquisite in laboratorio a casistiche di strutture reali mediante opportuni fattori di scala. Nell'affrontare il problema dell'urto, uno degli effetti più complicati da razionalizzare è quello della velocità, che può avere una duplice influenza: a) sul comportamento del materiale in prova (nel caso la sua curva σ - ε sia sensibile alla velocità di carico); b) sul comportamento della struttura, a causa di fenomeni vibrazionali. Per quanto riguarda il materiale, è stato mostrato che laminati in vetroresina rispondono in modo differente se caricati staticamente o impattati a bassa velocità, probabilmente a causa della natura viscoelastica delle fibre di rinforzo, più che della matrice.

7.3 Sviluppo delle delaminazioni

Per definire la sensibilità all'impatto di un laminato composito, è stata conosciuta l'etichetta di "resistenza al danno"; un materiale è ovviamente tanto più resistente al danno quanto più limitato è il danno offerto da un contundente che lo percuote in condizioni di prova fissate. Il termine "resistenza al

danno" non deve essere confuso con quello di "tolleranza al danno", legato invece all'aliquota di resistenza che il materiale è in grado di garantire in presenza di un danno da impatto.

Generalmente, la resistenza al danno viene misurata attraverso l'estensione dell'area delaminata. Ciò deriva dal fatto che la perdita di resistenza è in qualche modo dipendente da questo parametro. Alcuni autori hanno tuttavia correlato la resistenza residua, più che all'area della delaminazione, alla sua larghezza valutata trasversalmente alla direzione del carico applicato [5,11]. Naturalmente, qualunque sia il parametro assunto per quantizzare il danno, esso è intrinsecamente limitato, in quanto non ha la capacità descrivere la morfologia reale delle delaminazioni che, come mostrato in precedenza, si sviluppano su piani differenti con diversa orientazione.

Un tentativo di spiegare l'origine e la forma che le delaminazioni assumono è stato effettuato da Liu [2]. L'autore ha attribuito questo fenomeno di rottura al fatto che le lamine, data la loro ortotropia, tendono a curvarsi in modo differente l'una dall'altra quando la piastra è sottoposta a un carico trasversale. La necessità di assumere una deformata comune, dovuta ai legami interfacciali, si traduce in sollecitazioni normali e taglienti, che generano rottura.

7.4 Caratterizzazione della dimensione in piano dell'impronta

Finora, come parametro rappresentativo del danno è stato considerato l'indentazione che è la misura della massima profondità dell'impronta. Tuttavia, anche se essa ci dà una prima idea significativa dell'entità del danno, non ci permette di avere una visione globale essendo una misura effettuata in una sola direzione. Si ha bisogno di ulteriori informazioni che permettano di avere una visione "spaziale" del danno e che siano funzione della misura della dimensione media dell'impronta d .

Sul tessuto testato, avente sequenza di laminazione $[(90/45/-45/90)_s]$, il danno ha assunto una forma romboidale. Il valore d è quello derivante dalla media di misure effettuate lungo due direzioni ortogonali tra loro corrispondenti in linea di massima alle due diagonali del rombo (fig. 7.2).

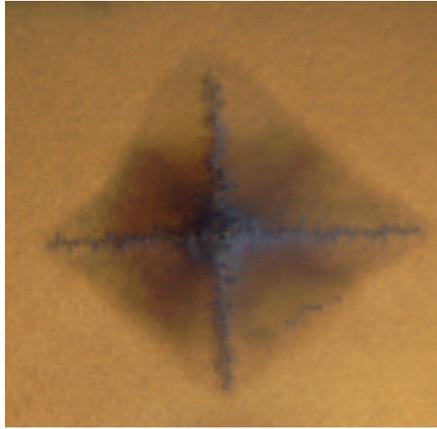


Fig. 7.2 - Provino danneggiato

Nelle figure seguenti, si riportano gli andamenti di d rispetto ad U ed U/U_{pc} per i due impattatori utilizzati e per i vari spessori testati.

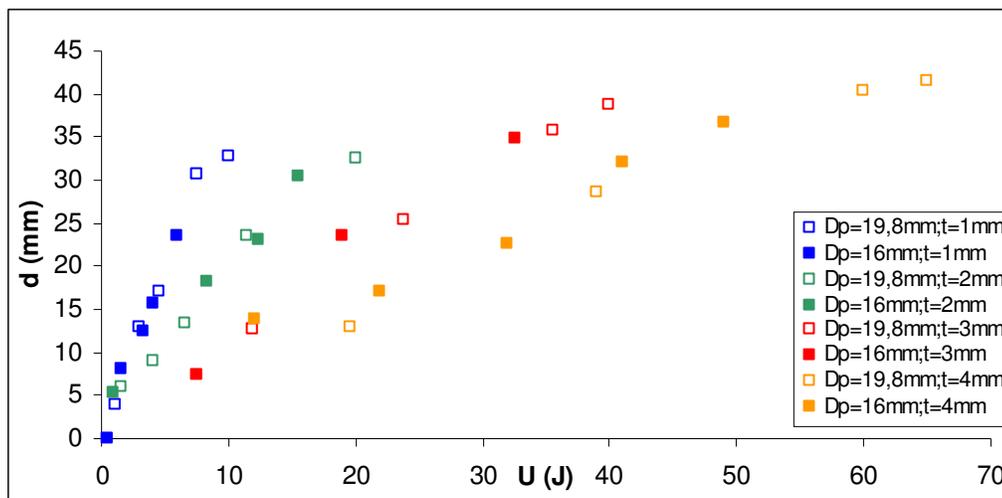


Fig. 7.3 - d vs U per i vari impattatori utilizzati

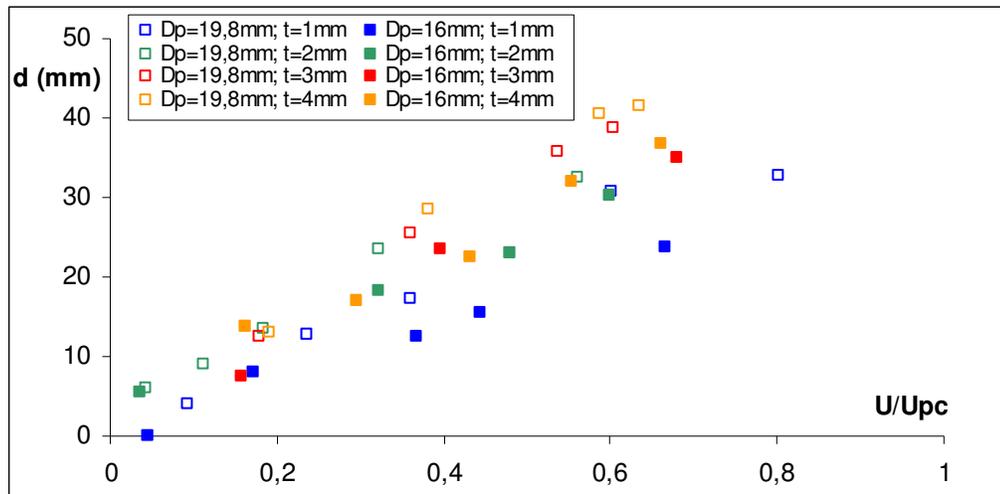


Fig 7.4 - d vs U/U_{pc} per i vari impattatori utilizzati

Dall'analisi del primo diagramma si intuisce come la dimensione d

- non vari al crescere del diametro del penetratore per un fissato spessore
- a parità di energia di impatto diminuisce al crescere dello spessore.

Nel secondo grafico, i valori relativi ad un unico spessore e diverso D_p si distanziano a causa dell'effetto amplificante dovuto alla differente energia di penetrazione.

Nel tentativo di ridurre la notevole dispersione dei dati, con lo scopo di ottenere un'espressione del tipo $d = d(U/U_{pc})$, è stato costruito il grafico di figura seguente.

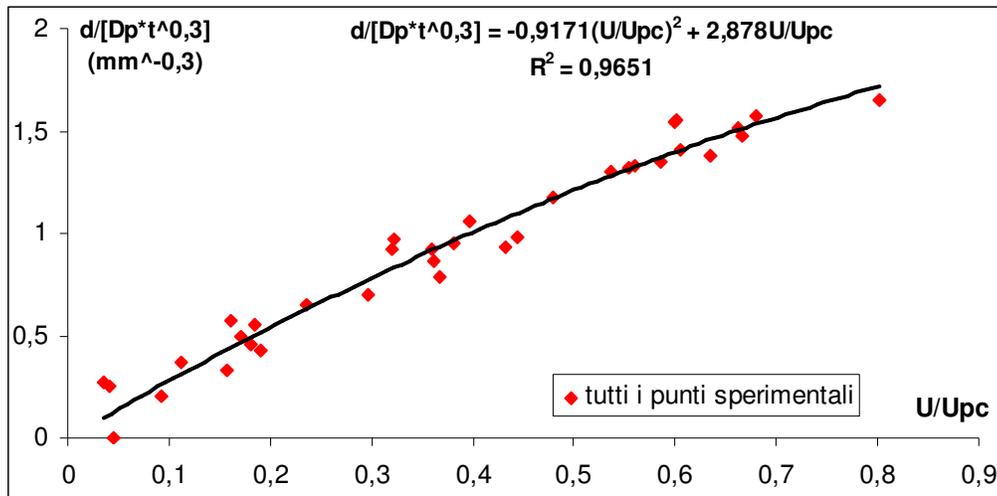


Fig. 7.5 - Diagramma $d/(D_p \cdot t^{0,3})$ vs U/U_{pc} per tutti i valori di D_p e spessore

La polinomiale che meglio approssima i dati risulta avere la seguente espressione:

$$d/[D_p \cdot t^{0,3}] = 2,878(U/U_{pc}) - 0,9171(U/U_{pc})^2$$

da cui:

$$d/D_p = [2,878(U/U_{pc}) - 0,9171(U/U_{pc})^2] \cdot t^{0,3}$$

La conoscenza delle leggi con cui I/D_p e d/D_p variano al variare di U/U_{pc} ci forniscono un utile strumento di progettazione che ci permette di risalire all'energia posseduta ed alle dimensioni del corpo contundente dalle semplici misure di I e d ; ricordiamo che per U_p vale la seguente espressione:

$$U_{pc} = 0,4213(t \cdot V_f \cdot D_p)^{1,5187}$$

Si ottiene un sistema di tre equazioni che, a partire dalla conoscenza del sistema materiale e dopo la misura di I e d tramite un comparatore centesimale, presenta solo tre incognite : U_{pc} , U , D_p , potendo quindi essere risolto in forma chiusa.

7.5 Caratterizzazione dell' area delaminata

L'area delaminata è la regione del provino che subisce in seguito all'impatto mutamenti strutturali.

Forma ed estensione sono funzioni dell'energia d'impatto, della sequenza di laminazione, dello spessore, del diametro del percussore e, presumibilmente, anche di quello del supporto.

Il tipo di tessuto preimpregnato utilizzato nella sperimentazione ha permesso al danno di estendersi, principalmente, in due direzioni ortogonali ottenendo una superficie rombica.

Si è misurata l'area con l'ausilio di un software CAD (i provini sono stati fotografati controluce, le immagini sono state importate in autocad e sono stati valutati i valori di d) e si sono riportati i valori ottenuti in funzione dell'energia d'impatto e della stessa rapportata all'energia di penetrazione.

Osservando il diagramma (fig. 7.6) si può affermare che l'area danneggiata, a parità di spessore del provino, non ha dipendenza dal diametro del percussore.

Altresì importante è notare come, a parità di energia impartita, l'estensione del danno sia inversamente proporzionale allo spessore del composito.

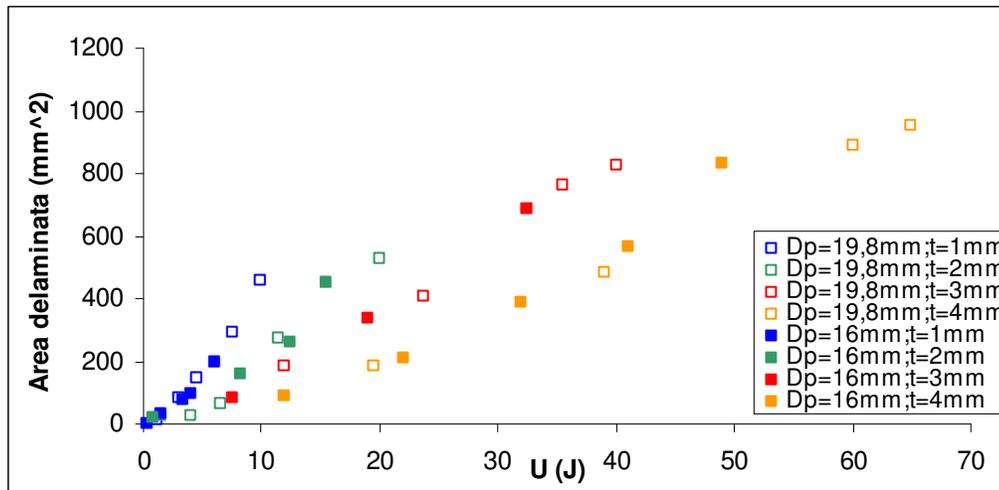


Fig. 7.6 - Area vs U per i vari impattatori utilizzati

Se si riporta l'area in funzione del parametro adimensionale U/U_{pc} (fig. 7.7), si osserva che la sovrapposizione riscontrata nel caso del grafico precedente si perde e ciò a causa della dipendenza dell'energia di penetrazione dal diametro del percussore.

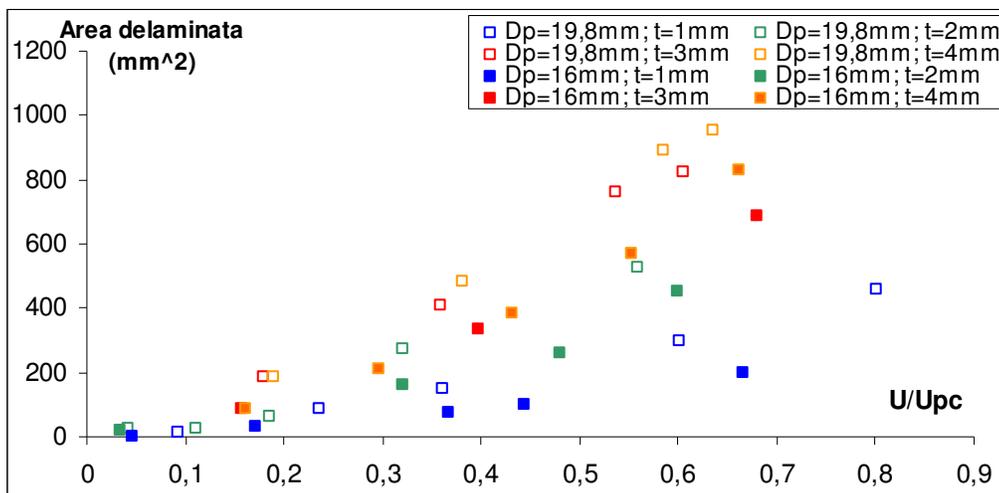


Fig. 7.7 - Area vs U/U_{pc} per i vari impattatori utilizzati

Come per la dimensione in piano d , lo scopo è ridurre la dispersione dei dati sperimentali.

Un buon risultato si ottiene dividendo l'area per t e D_p entrambi elevati a opportuni coefficienti. La legge che consente di ricavare l'area in funzione di U/U_{pc} è desumibile (fig. 7.8) dall'equazione :

$$\text{Area}/[t^\alpha \cdot D_p^\beta] = 1,0004(U/U_{pc}) + 2,076(U/U_{pc})^2$$

con $\alpha = \beta/2 = 0,8$. In particolare si ha che:

$$\text{Area} = t^\alpha \cdot D_p^{2\alpha} \cdot [1,0004(U/U_{pc}) + 2,076(U/U_{pc})^2]$$

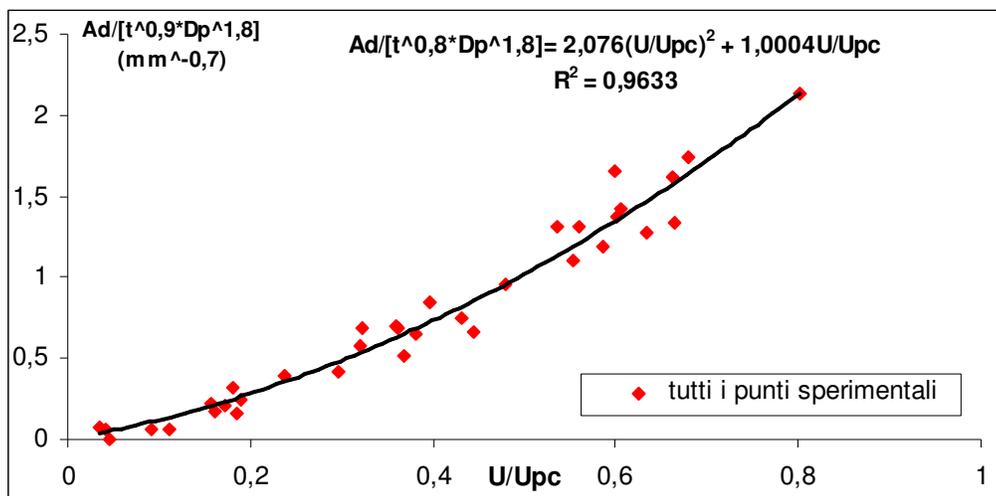


Fig. 7.8 - Diagramma $\text{Area}/[t^\alpha \cdot D_p^\beta]$ vs U/U_{pc} per tutti i valori di D_p e spessore

7.6 Sviluppo del danno all'interno del provino

Oltre alla misura dell'area proiettata (che è quell'area ottenuta dalle sovrapposizioni di tutte le aree delaminate presenti tra le interfacce del provino) che è stata effettuata sfruttando la trasparenza della vetroresina si é messa a punto una procedura per separare le singole lamine per poter analizzare

strato per strato il danno che si è creato a seguito dell'impatto. Tale tecnica, definita invasiva perché comporta la distruzione del provino, è di seguito illustrata.

Su ogni provino è stato praticato un piccolo foro con punta di trapano da 2 mm al centro dell'indentazione. I provini sono stati poi immersi in vaschette contenenti inchiostro blu ad alcool per circa un'ora, in modo tale da consentire all'inchiostro di penetrare, attraverso il foro, nelle rotture intralaminari al fine di evidenziare i danni provocati dall'impatto. Una volta estratti dalla vaschetta, i provini sono stati accuratamente puliti e messi ad asciugare per circa un ora.

Al fine di dividere le lamine si è bruciato un lato di ciascun provino con un cannello in tale modo e si è afferrata ogni singola lamina con delle comuni pinze. Per sfogliare il provino senza perdere l'informazione fornitaci dall'inchiostro, non era possibile bruciare l'intero provino col cannello perché, in tal modo, sarebbe divenuto completamente nero non lasciando traccia dell'inchiostro. Per allentare il legame tra le lamine al fine di sfogliare il provino è stata necessaria una fonte costante di calore, quindi si è fissato su un supporto una asciugatore termico e si è sfogliato il provino tenendolo costantemente esposto alla corrente di aria calda da esso generata. Il metodo si è rivelato molto efficace perché non c'è stato bisogno di applicare molta forza nello sfogliare il provino e si è scongiurata così una possibile distruzione della lamina; ha richiesto la massima attenzione e velocità in quanto l'inchiostro contenendo alcool se esposto per troppo tempo alla corrente d'aria calda sarebbe evaporato. Una volta divise, le lamine sono state numerate in maniera tale da poter risalire al provino originario nel giusto ordine ed identificate, per non perdere l'informazione relativa allo spessore e all'energia di impatto. In tutto sono state ricavate 152 lamine. In ciascuna di queste l'inchiostrato ha ben marcato le aree delaminate e le zone in cui si sono avute rotture di fibre, come si osserva dalle foto seguenti.

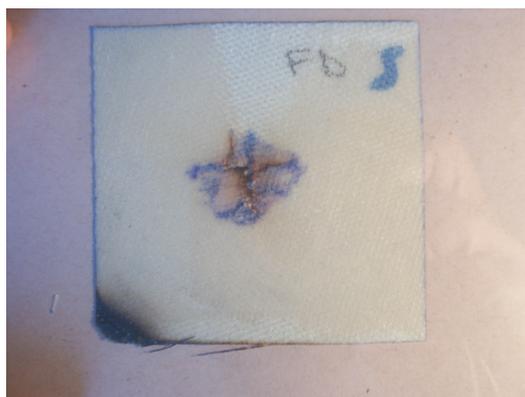


Fig. 7.9 - area delaminata e fibre rotte

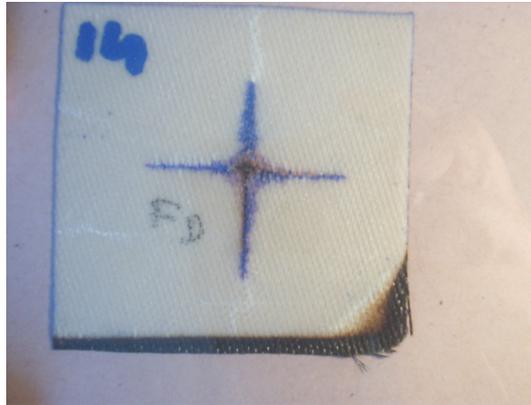


Fig 7.10 : fibre rotte

Per ogni provino è stato necessario disporre le lamine su un piano e osservarle attentamente: infatti, essendo la vetroresina traslucida bisognava capire a quale interfaccia apparteneva la macchia d' inchiostro. Per risolvere il problema è bastato osservare che le interfacce nelle quali si è verificata delaminazione, presentavano una macchia di inchiostro sulle superfici superiore ed inferiore molto simili tra loro in forma e dimensioni. La mancanza di questa somiglianza ha indicato l'assenza di delaminazione nell'interfaccia.



Fig. 7.11 - interfaccia in cui è presente la delaminazione

Una volta contrassegnate le interfacce in cui si è avuta delaminazione e rottura di fibre, le lamine sono state fotografate ponendole al disotto di una lastra di vetro al fine di evitare che la lamina si curvasse e le foto sono state importate in Autocad dove è stato possibile misurare con molta precisione la lunghezza delle fibre rotte e l'area delaminata. Tutti i dati raccolti sono stati, poi, organizzati in tabelle in cui si sono evidenziati : lo spessore del provino, l'energia a cui è stato impattato, il numero di lamine

con relativa orientazione delle fibre, le interfacce, l'area delaminata in ogni interfaccia e la lunghezza delle fibre rotte.

7.6.1 Organizzazione dei dati ed estrapolazione dei risultati

Tutte le misure riguardanti aree delaminate tra le interfacce e lunghezza delle fibre rotte sono state organizzate in tabelle in cui si sono indicate:

- Spessore del provino
- Energia di impatto
- Numero di lamine
- Orientazione delle lamine
- Le interfacce
- Aree delaminate sulle superfici superiore ed inferiore delle interfacce
- Lunghezza delle fibre rotte

Campione di spessore pari ad 1 mm impattato con energia di 10J						
LAM		LUNGHEZZA	interfaccia	ORIENTAZIONE	AREA SUP	AREA INF
0		60,86		0/90		
1		94,14	A	45	243,58	291,28
2		112,9	B	45	0	0
3		107,3	C	0/90	409,91	379,52
TOT		375,2				

Tabella 7.1 - di organizzazione dei dati

Una volta ordinati i dati é stato possibile combinarli tra loro e confrontarli con i dati precedentemente ricavati.

7.6.2 Area delaminata

Per ogni provino si è deciso di realizzare un grafico, al fine di comprendere meglio i dati analizzati; il grafico presenta sull'asse delle ascisse l'interfaccia mentre sull'asse delle ordinate il valore dell'area delaminata. Siccome per ogni interfaccia abbiamo trovato due valori dell'area delaminata, uno per la superficie inferiore e uno per la superficie superiore, si è diagrammato il maggiore dei due valori. Le interfacce sono state contrassegnate con le lettere dell'alfabeto in ordine crescente a partire da quella più vicina al punto di impatto. La prima cosa notata, dopo un'attenta analisi visiva, è che la delaminazione si propaga seguendo per ogni interfaccia l'orientazione delle fibre della lamina sottostante, per lo spessore 1mm si ha:

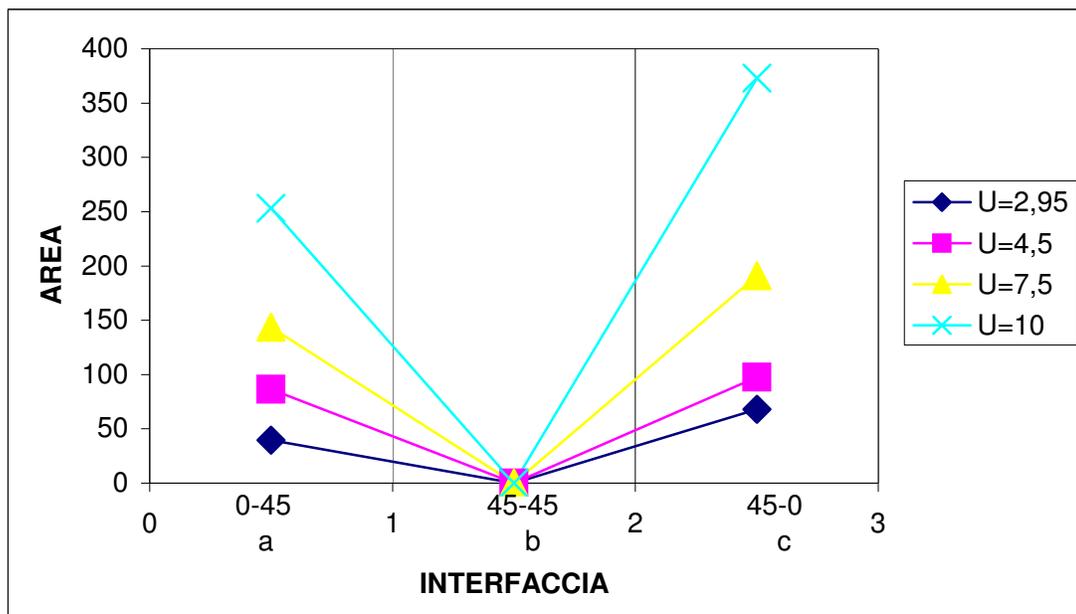


fig. 7.12 - spessore 1 mm area delaminata in funzione dell' interfaccia

Per tale spessore si può notare che tra le interfacce avente la stessa orientazione si presenta un valore di delaminazione nulla a conferma di ciò che è stato ricavato con tecniche non invasive la delaminazione quindi si propaga tra interfacce aventi diversa orientazione.

Inoltre si osserva che il valore delle aree delaminate cresce al crescere dell' energia con cui è stato impattato il provino e che l' interfaccia che presenta una delaminazione maggiore è quella più distante dal punto di impatto.

Per lo spessore 2 mm si ha:

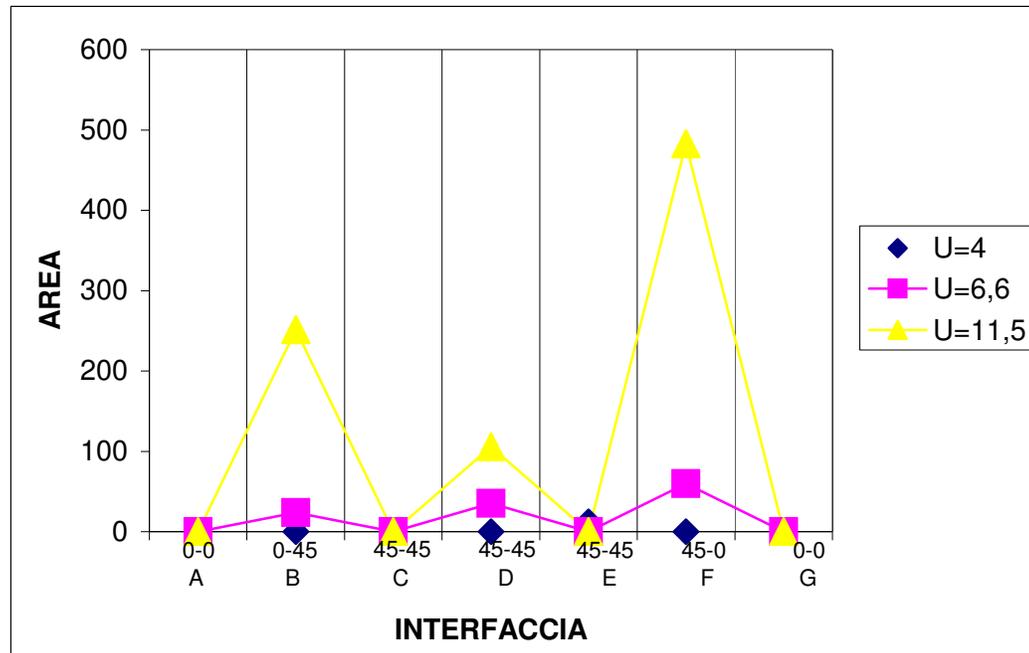


fig. 7.13 - spessore 2mm area delaminata in funzione dell' interfaccia

Anche per questo spessore l' area delaminata aumenta all' aumentare dell' energia con cui è stato impattato il provino e inoltre come per lo spessore precedente l'interfaccia con area delaminata maggiore è sempre quella in cui si verifica il cambio d' orientazione a distanza maggiore dal punto d' impatto, che risente, quindi, maggiormente dell' effetto di taglio e in cui si verifica il cambio d' orientazione . Questo risultato vale per tutti gli spessori.

Differentemente da quanto visto nel provino avente spessore 1mm qui si nota la presenza di un area delaminata anche nelle interfacce in cui non c'è il cambio d' orientazione.

Inoltre, se consideriamo spessori via via crescenti, si nota all' aumentare dell' energia, un aumento dell' area delaminata anche nelle interfacce in cui non c'è il cambio d' orientazione.

Ciò è causato dall' effetto del taglio, infatti per lo spessore 3mm (fig. 7.14) si è notato che l' area delaminata maggiore si presenta in corrispondenza dell' interfaccia F che è quella sottoposta a un maggior effetto del taglio perché posta nella zona centrale del provino.

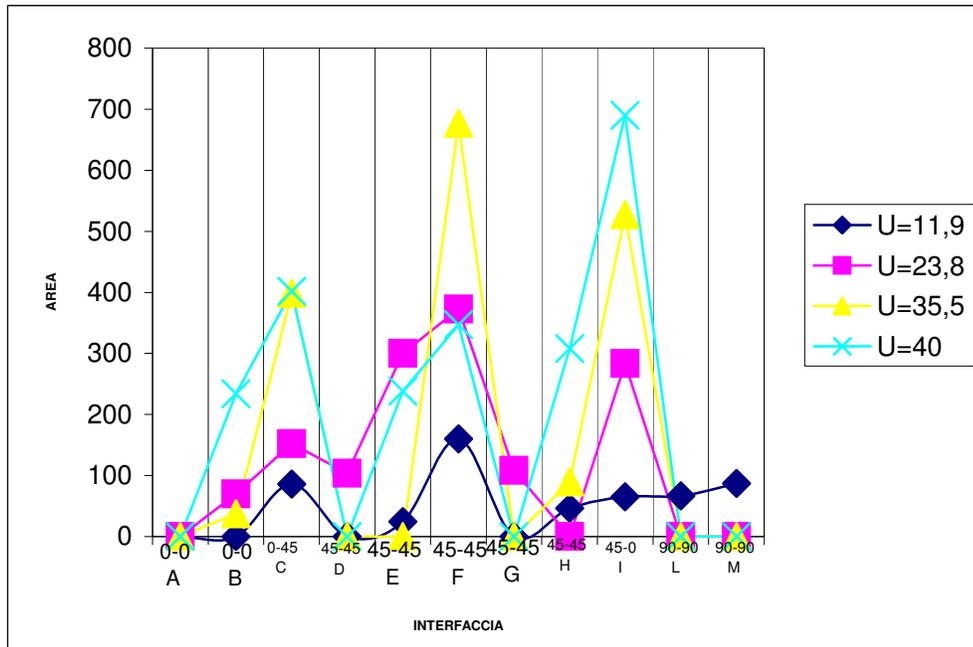


fig. 7.14 - spessore 3 mm area delaminata in funzione dell' interfaccia

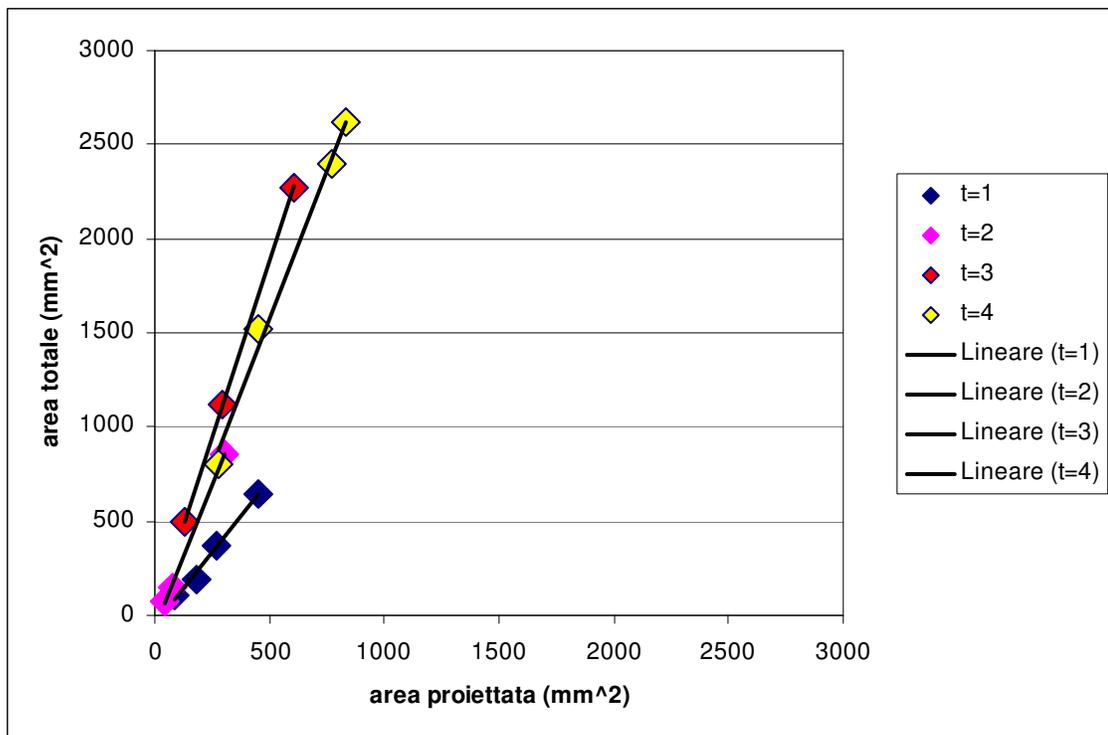


Fig 7.15 - area totale in funzione dell'area proiettata

Diagrammando l'area totale in funzione dell' area proiettata si è visto che il legame tra le due aree è pressoché lineare quindi si può trovare una costante che leghi approssimativamente questi due valori. Come ci si aspettava l'area totale è maggiore dell' area proiettata.

7.6.3 Lunghezza fibre rotte

Sommando le lunghezze di tutti i segmentini indicanti rottura di fibre su ciascuna lamina si ottiene la lunghezza di fibre rotte lamina per lamina. Riportando su un grafico tale lunghezza in funzione delle lamine e per ogni valore di energia si ottengono i grafici seguenti:

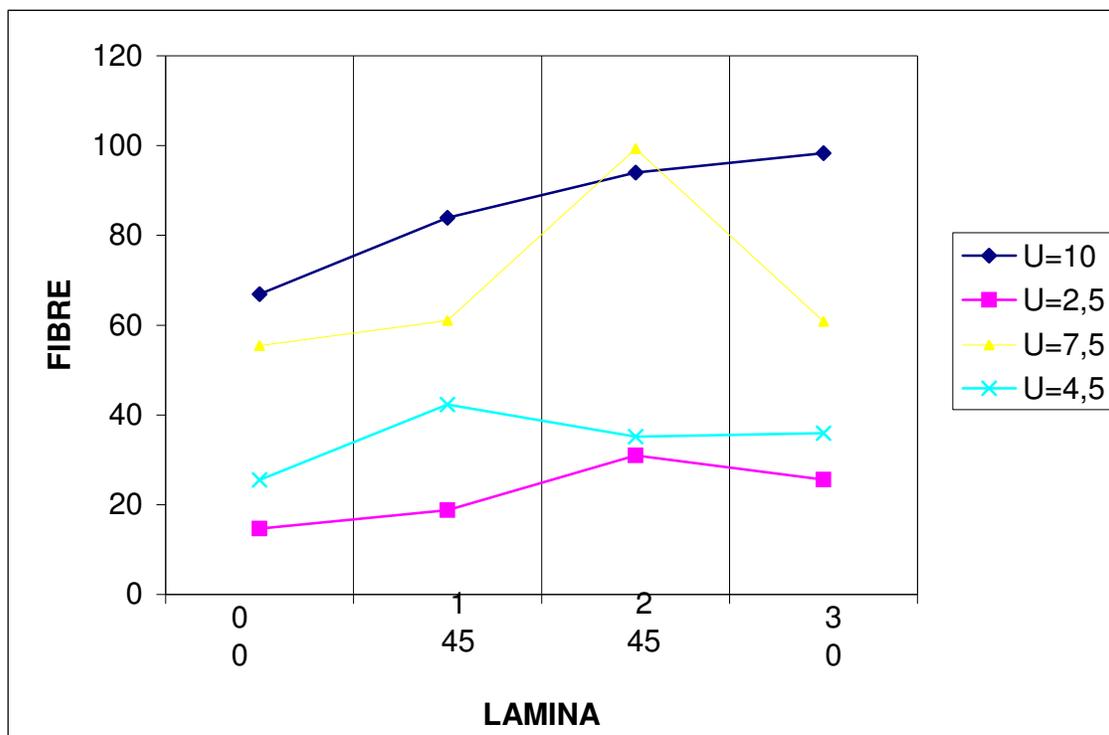


Fig 7.16 - lunghezza fibre rotte in funzione della lamina $t=1$

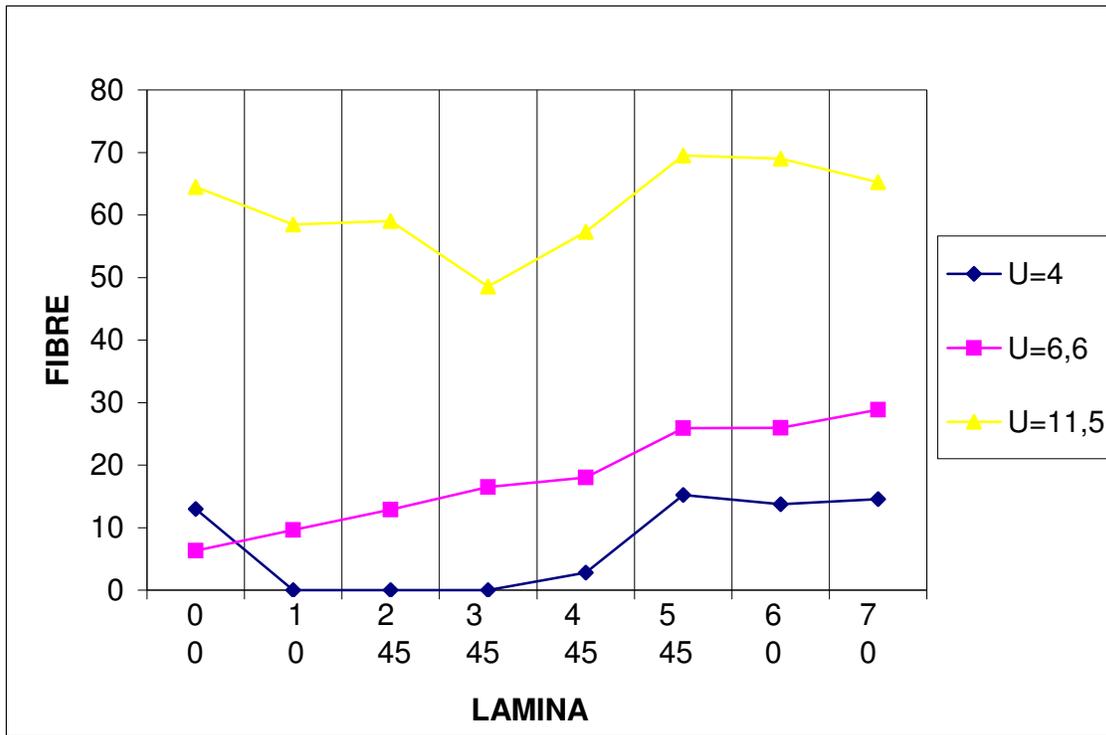


Fig 7.17 - lunghezza fibre rotte in funzione della lamina t=2

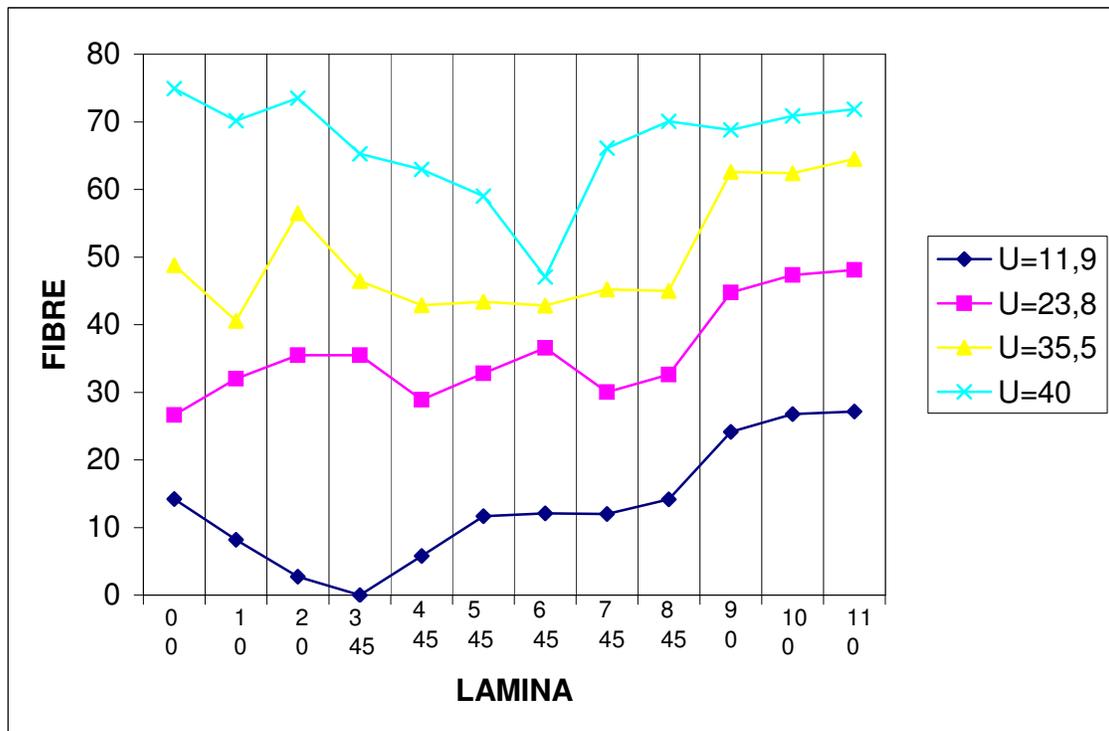


Fig 7.18 - lunghezza fibre rotte in funzione della lamina t=3

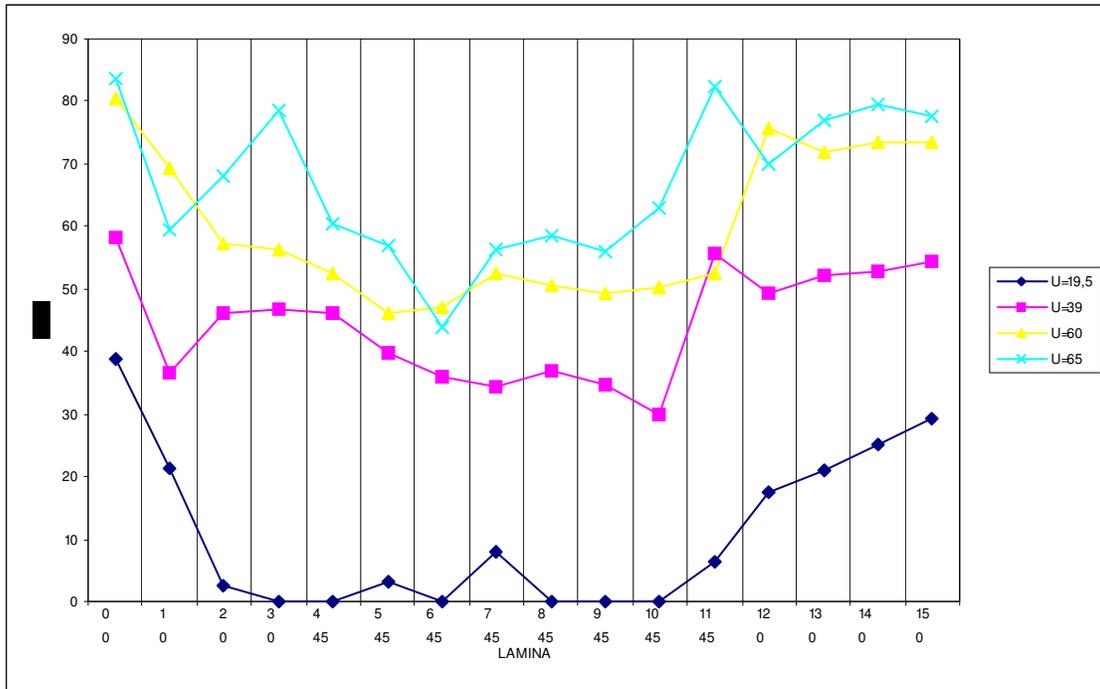


Fig 7.19 - lunghezza fibre rotte in funzione della lamina $t=4$

Dai diagrammi sopra riportati si nota che per energie di impatto maggiori si ha una quantità di fibre rotte maggiore, e che ad essere maggiormente danneggiate sono le prime e le ultime lamine che compongono il provino. Per avere un'idea del danno totale sono state sommate tutte le lunghezze di fibre rotte per ogni provino. Graficando tale grandezza in funzione dell'energia di impatto si ottiene il grafico di figura seguente:

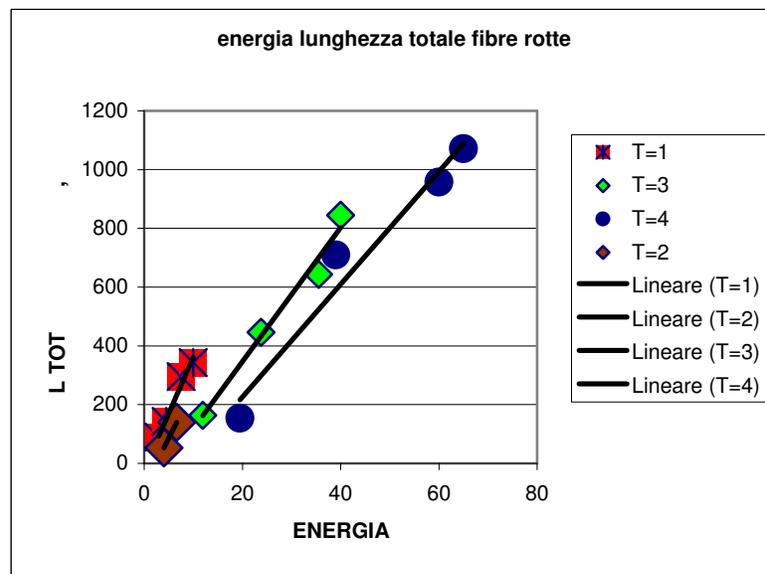


Fig 7.20 - lunghezza totale fibre rotte in funzione dell'energia

Anche in questo caso, così come visto per l'area delaminata, la lunghezza totale cresce più o meno linearmente con l'energia. Quanto detto si verifica per ogni spessore; si osserva inoltre che la pendenza della retta è minore all'aumentare dello spessore, cioè a parità di energia il danno è minore quanto maggiore è lo spessore.

7.6.4 Sovrapposizione della curva F-E con Area tot -E

Sovrapponendovi la curva Area delaminata tot- Energia alla curva di carico, si ottiene un interessante risultato.

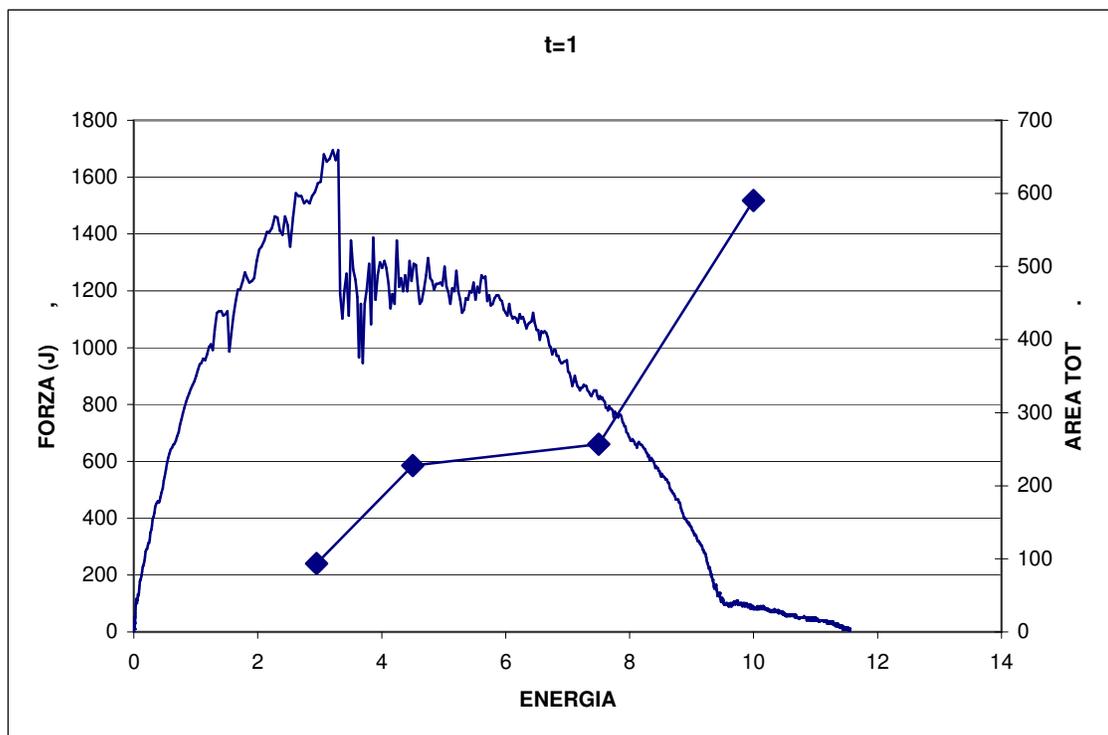


Fig 7.21 - sovrapposizione curva di carico-curve del danno (t= 1mm)

La sovrapposizione ci dà l'idea di dove e quando si sviluppa il danno in un materiale impattato. L'area delaminata comincia a crescere in corrispondenza della forza massima e questo indica che la vetroresina analizzata ha poca tendenza a delaminarsi. Come si può osservare l'area delaminata continua a crescere anche oltre il picco di forza massima. Lo stesso risultato si ricava se si sovrappone alla curva F-E la curva Lunghezza tot -E.

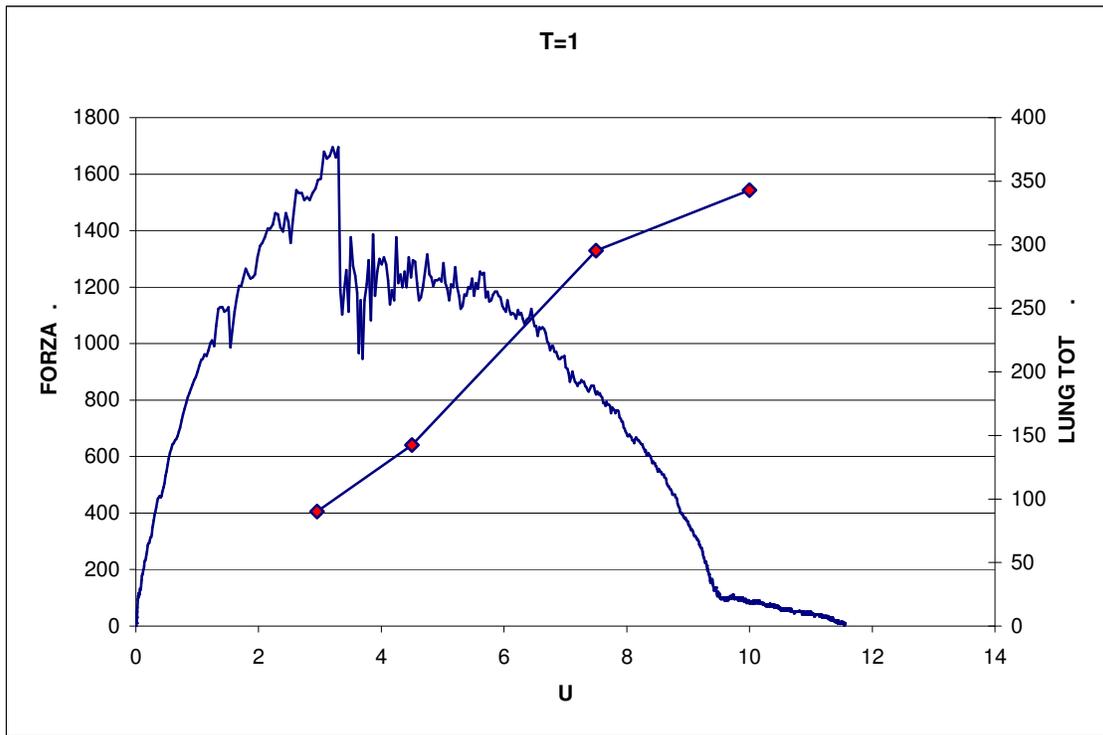


Fig 7.22 - sovrapposizione curva di carico – curva del danno (t= 1 mm)

Lo stesso risultato si é avuto per tutti gli altri spessori.

Conclusioni

In questo lavoro è stata eseguita una serie di prove meccaniche volte alla caratterizzazione all'impatto di materiali NCF, prodotti con tecnologia RIFT, a matrice polimerica (di tipo epossidica), e rinforzo fibroso di carbonio e di materiali prodotti a partire da preimpregnati, con matrice epossidica e rinforzo di fibre di vetro.

Per quanto riguarda i NCF in carboresina sono state testate due configurazioni, una quadriassiale e una biassiale. Per ognuna delle due configurazioni si avevano a disposizione diverse tipologie di provini, caratterizzate da una diversa tipologia, geometria e tensione della cucitura. In particolare sono state testate quattro tipologie di quadriassiali e cinque di biassiali.

Sono state condotte prove a completa penetrazione e prove ad energia variabile (con energia di impatto inferiore all'energia di penetrazione); sono state misurate le impronte lasciate sulla superficie dei campioni a seguito dell'impatto ed è stata effettuata una analisi del danno sia attraverso l'ausilio delle scansioni ultrasonore sia attraverso una indagine microscopica.

I numerosi tests di caratterizzazione meccanica e le analisi condotte sui risultati ottenuti hanno fornito diversi importanti informazioni:

- non è emersa una sostanziale differenza sia tra le due configurazioni che tra le diverse tipologie di una stessa configurazione; si sono infatti ottenute curve caratteristiche simili e quindi simili valori delle energie di penetrazioni.
- è stata verificata una legge di previsione dell'indentazione, presente in bibliografia e già applicata al caso di laminati classici, a due variabili; tale legge ha fornito ottimi risultati fino a valori dell'energia di impatto pari al quaranta per cento dell'energia di penetrazione.

- è stata elaborata una legge di previsione dell'indentazione ad una variabile, e quindi di più semplice applicazione rispetto alla precedente; anche tale legge ha fornito un'ottima approssimazione fino a valori dell'energia di impatto pari al quaranta per cento dell'energia di penetrazione.
- è stata confermata la validità di una legge di previsione dell'energia di penetrazione già utilizzata per laminati classici con rinforzo fibroso di carbonio; attraverso tale legge è possibile predire l'energia di penetrazione del materiale dalla semplice conoscenza del volume percentuale di fibre, delle dimensioni del corpo contundente e dello spessore del materiale testato.
- in termini di aree delaminate i tests hanno fatto emergere un miglior comportamento delle configurazioni biassiali. Tutte le configurazioni di campioni hanno comunque mostrato elevati valori di area delaminata anche in presenza di piccoli valori di indentazione (inferiori al valore di 0,3 mm).
- i risultati forniti dall'analisi frattografica, svolta comparando i risultati dell'analisi microscopica a quelli dell'analisi ultrasonica, hanno mostrato estese fratture interlaminari nella matrice e all'interfaccia fibra matrice già a bassi valori dell'energia di impatto.

Per quanto riguarda i pannelli prodotti a partire da preimpregnati a matrice epossidica e rinforzo sotto forma di tessuto di vetro, sono state testati campioni (estratti da laminati prodotti con la tecnologia di stampaggio) aventi 4 diversi valori dello spessore e utilizzando due diversi diametri del percussore.

Sono state condotte prove a completa penetrazione e prove ad energia variabile (con energia di impatto inferiore all'energia di penetrazione); sono state misurate le impronte lasciate sulla superficie

dei campioni a seguito dell'impatto ed è stata effettuata una analisi del danno in termini di area delaminata e di fratture intralaminari.

I numerosi tests di caratterizzazione meccanica e le analisi condotte sui risultati ottenuti hanno fornito diversi importanti informazioni:

- è stato elaborato un metodo, alternativo a quello classico esponenziale, che permette di relazionare l'indentazione al rapporto tra l'energia di impatto e quella di penetrazione (calcolata) dello specifico sistema materiale (U/U_{pc}):

$$I = [1,5033U/U_{pc}]/[1-U/U_{pc}]$$

La relazione consente di risalire all'energia posseduta dall'oggetto contundente semplicemente misurando la profondità dell'impronta dovuta all'impatto.

- così come fatto in precedenti lavori sulla carboresina, è emerso che anche per la vetroresina risulta valida, con la legge di seguito riportata, la bontà di una relazione esponenziale:

$$I = 0,4375 \cdot [10^{(1,3085U/U_{pc})} - 1]$$

- il confronto tra il vetro ed il carbonio in termini d'indentazione ha condotto al seguente risultato:

$$I_{vetroresina} = 1,97 \cdot I_{carboresina}$$

- è stata confermata la possibilità di utilizzare una relazione del tipo $U_{pc} = f(D_p \cdot t \cdot V_f)$ per la predizione dell'energia di penetrazione prescindendo da altri fattori che in prima analisi potrebbero sembrare più influenti, quali le proprietà elastiche di fibre e matrice, ricavando la seguente espressione:

$$U_{pc} = 0,4213(t \cdot V_f \cdot D_p)^{1,5187}$$

- partendo dalla misura della profondità e della dimensione in piano dell'impronta è stato possibile risalire alle dimensioni dell'oggetto contundente (D_p nella sperimentazione) attraverso la risoluzione del seguente sistema di tre equazioni in tre incognite:

$$I/D_p = [0,0849U/U_{pc}]/[1-U/U_{pc}]$$

$$I/D_p = 0,02429 \cdot [10^{(1,3126U/U_{pc})} - 1]$$

$$d/D_p = [2,878(U/U_{pc}) - 0,9171(U/U_{pc})^2] \cdot t^{0,3}$$

- alla stregua di quanto affermato nel precedente punto si è misurata l'area delaminata ottenendo la seguente relazione polinomiale per la stima dell'area delaminata nata in seguito ad un urto con un corpo contundente:

$$Area/D_p^{1,8} = [1,0004(U/U_{pc}) + 2,076(U/U_{pc})^2] \cdot t^{0,9}$$

BIBLIOGRAFIA

- [1] P. Sjöblom, "Simple design approach against low velocity impact damage", *Proc. 32th SAMPE Symp., Anaheim, 1987*, pp. 529-39.
- [2] D. Liu, "Impact-induced delamination - A view of bending stiffness mismatching", *J. Compos. Mater.*, Vol. 22, 1988, pp. 674-92.
- [3] W.J. Cantwell and J. Morton, "The influence of varying projectile mass on the impact response of CFRP", *Compos. Struct.*, Vol. 13, 1989, pp. 101-114.
- [4] A.D. Curson, D.R. Moore and D.C. Leach, "Impact failure mechanisms in carbon fiber/PEEK composites", *J. Thermopl. Compos.*, Vol. 3, 1990, pp. 24-31.
- [5] J.C. Pritchard and P.J. Hogg, "The role of impact damage in post-impact compression testing", *Composites*, Vol. 21, 1990, pp. 503-511.
- [6] E.F. Dost, L.B. Ilcewicz and W.B. Avery, "Effects of stacking sequence on impact damage resistance and residual strength for quasi-isotropic laminates", *ASTM STP 1110*, T.K. O'Brien Ed., 1991, pp. 476-500.
- [7] Y.S. Kwon and B.V. Sankar, "Indentation-flexure and low-velocity impact damage in graphite epoxy laminates", *J. Compos. Technol. Res.*, Vol. 15, 2, 1993, pp. 102-11.

- [8] W.C. Jackson and C.C. Poe, "The use of impact force as a scale parameter for the impact response of composite laminates", *J. Compos. Technol. Res.*, Vol. 15, 1993, pp. 282-9.
- [9] G.A.O. Davies, X. Zhang, G. Zhou and S. Watson, "Numerical modeling of impact damage", *Composites*, Vol. 25, 5, 1994, pp. 342-50.
- [10] D. Delfosse and A. Poursartip, "Energy-based approach to impact damage in CFRP laminates", *Composites Part A*, Vol. 28A, 1997, pp. 647-55.
- [11] G.A. Bibo, P.J. Hogg, R. Backhouse and A. Mills, "Carbon-fibre non-crimp fabric laminates for cost-effective damage-tolerant structures", *Compos. Sci. Technol.*, Vol. 58, 1998, pp. 129-43.
- [12] Y.P. Siow and V.P.W Shim, "An experimental study of low velocity impact damage in woven fiber composites", *J. Compos. Mater.*, Vol. 32, 1998, pp. 1178-202.
- [13] S.L. Gao and J.K. Kim, "Effect of cooling rate on impact performance of carbon fibre/PEEK laminates", *Proc. 8th Europ. Conf. Compos. Mater. (ECCM-8)*, Woodhead Publ., Cambridge, 1998.
- [14] G.A. Schoeppner and S. Abrate, "Delamination threshold loads for low velocity impact on composite laminates", *Composites Part A*, Vol. 31, 2000, pp. 903-15.
- [15] R. Teti, P. Buonadonna, V. Lopresto, G. Caprino, "Volumetric Ultrasonic NDE of damaged CFRP laminates", *Acts of ECCM 10, Brugge, June 3-7 2002, Paper n. 346*.
- [16] M.O.W. Richardson and M.J. Wisheart, "Review of low-velocity impact properties of composite materials", *Composites Part A*, Vol. 27A, 1996, pp. 1123-31.

[17] S. Abrate, *Impact on composite structures*, Cambridge University Press, Cambridge, 1998.

[18] S. Liu and F.-K. Chang, "Matrix cracking effect on delamination growth in composite laminates induced by a spherical indenter", *J. Compos. Mater.*, Vol. 28, 1994, pp. 940-77.

[19] F. K. Chang, H. Y. Choi, H. S. Wang "Damage of laminated composites due to low velocity impact", 31st AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Struct. Dyn. And Mater. Conf., Long Beach, CA, Aprile 2-4, 1990,]pp. 930-940

[20] s.Liu, Z.Kutlu, F: K..Chang "Matrix cracking and delamination propagation in laminated composites subjected to transversely concentrated loading", *Journal of COMPOSITE MATERIALS*, Vol.27, No. 5, pp. 436-470

[21] G. Caprino, A. Langella and V. Lopresto, "Prediction of the first failure energy of circular carbon fibre reinforced plastic plates loaded at the centre", *Composites Part A*, Vol. 34, 2003, pp. 349-57.

[22] D. Delfosse, A. Poursartip "Experimental parameter study of static and dynamic out-of-plane loading of CFRP laminates", *Proceedings of ICCM – 10, Whistler, Canada, Agosto 1995*, pp 583 – 590.

[23] G. Caprino , V. Lopresto, C. Scarponi, G: Briotti "Influence of material thickness on the response of graphite fabric/epoxy panels to low velocity impact, *Composites Science and Technology*, vol. 59 1999 pp. 2279 – 2286.

[24] G. Caprino, A. Langella and V. Lopresto, "Elastic behaviour of circular composite plates transversely loaded at the centre", *Composites Part A*, Vol. 33, 2002, pp. 1191-1197.

[25] W. J. Cantwell, J. Morton "Impact perforation of carbon fibre reinforced plastic", *Journal of COMPOSITE MATERIALS*, Vol. 38, 1990, 119-141

[26] S. H. Yang, C. T. Sun "Indentation law for composite laminates", *COMPOSITE MATERIALS: Testing and Design (sixth Conf.)*, ASTM STP 787, I Daniel Ed. 1982, pp. 425 – 449.

[27] T. M. Tan, C. T. Sun « Use of static indentation laws in the impact analysis of laminated composite plates", *J. Appl. Mech.*, Vol. 52, No. 8, 1985, pp. 6 – 12.

[28] G. Caprino e V. Lopresto, *dati non pubblicati*.

[29] C. Scarponi, G. Briotti, R Barboni, A. Marcone "Reduction of Tensile Strength in Angle-ply Composite Laminates due to Low-Velocity Impact" *J Reinf Plast Compos* 1999; 18:63-85.

[30] G. Caprino, A. Langella and V. Lopresto, "Indentation and penetration of carbon fibre reinforced plastic laminates", *Composites Part B*, Vol. 34, 2003, pp. 319-25.

[31] Caprino G. "Residual strength prediction of impacted CFRP laminates", *Journal of COMPOSITE MATERIALS*, Vol.18, 1984, pp. 508 – 518.

[32] HUSMAN GE, WHITNEY JM, HALPIN JC. " Residual strength characterisation of laminated composites subjected to impact loading" (ASTMSTP 568), 1975, pp. 92 – 113.

[33] Caprino G., Lopresto V., "The significance of indentation in the inspection of carbon fibre reinforced plastic panels damaged by low – velocity impact." *COMPOSITES SCIENCE AND TECHNOLOGY*, 2000, vol 60, pp. 1003 – 1012.

[34] G. Caprino and V. Lopresto, "On the penetration energy of fibre reinforced plastics under low-velocity impact conditions", *Compos. Sci. Technol.*, Vol. 61, 2001, pp. 65-73.

[35] G. Caprino and V. Lopresto, "Fracture surface of CFRP laminates statically loaded at the centre"
Department of materials and production engineering

[36] Lucenteforte L. , "Analisi sperimentale dell'impatto a bassa velocità di laminati CFRP", *Tesi di laurea presentata presso l'Università degli studi di Napoli "Federico II", Facoltà di ingegneria – Dipartimento di Ingegneria dei Materiali e della Produzione – Settore Tecnologie – Anno Accademico 1999/2000*

[37] Bencivenga G. , "Danneggiamento di laminati compositi sottoposti a carico concentrato trasversale", *Tesi di laurea presentata presso l'Università degli studi di Napoli "Federico II", Facoltà di ingegneria – Dipartimento di Ingegneria dei Materiali e della Produzione – Settore Tecnologie – Anno Accademico 2000/2001*