

INAIL

**CORTINE FLESSIBILI
PER FORA-FRESATRICI DA LEGNO
A CONTROLLO NUMERICO
Materiali e configurazioni innovative**

Pubblicazione realizzata da**INAIL**

Settore Ricerca, Certificazione e Verifica
Dipartimento Tecnologie di Sicurezza (DTS)

Autori

Fabio Pera, *INAIL DTS*
Antonella Pireddu, *INAIL DTS*
Iuri Betti, *S.C.M. Group S.p.A.*
Carlo Ratti, *INAIL DTS*

collaborazione

Francesca Ceruti, *INAIL DTS*

Informazioni

INAIL - Settore Ricerca, Certificazione e Verifica
Dipartimento Tecnologie di Sicurezza
Via Alessandria, 220/E - 00198 Roma
r.dts@inail.it
www.inail.it

© 2013 INAIL

La pubblicazione viene distribuita gratuitamente e ne è quindi vietata la vendita nonché la riproduzione con qualsiasi mezzo. È consentita solo la citazione con l'indicazione della fonte.

ISBN 978-88-7484-376-3

Tipolitografia INAIL - Milano, febbraio 2014

INDICE

| | |
|---|----|
| Abstract | 5 |
| Introduzione | 7 |
| 1. Obiettivi | 13 |
| 2. Generalità sul rischio residuo di proiezione di frammenti e la direttiva 2006/42/CE | 14 |
| 3. Attrezzatura di prova | 16 |
| 4. I proiettili | 19 |
| 5. I materiali | 21 |
| 6. Procedura di prova | 25 |
| 7. Geometria e dimensioni delle cortine | 27 |
| 8. Sistema di fissaggio e supporto | 29 |
| 9. La sperimentazione | 30 |
| 9.1 Assemblaggi in prova | 30 |
| 9.1.1 Assemblaggi a “doppio pacco” in PVC | 30 |
| Assemblaggio n. 1 | 30 |
| Assemblaggio n. 2 | 31 |
| Risultati | 31 |
| 9.2 Assemblaggi in Kevlar e Nylon: primi test | 32 |
| 9.2.1 Assemblaggi in tela KEVLAR | 32 |
| Prove su assemblaggio h =200 mm | 33 |
| Prove su assemblaggio h =400 mm | 33 |
| Osservazioni | 33 |
| 9.2.2 Assemblaggi in Nylon PEOX | 34 |
| Prove su assemblaggio h =200 mm | 34 |
| Prove su assemblaggio h =400 mm | 34 |
| Osservazioni | 34 |
| 9.2.3 Assemblaggi in Nylon MATRIX | 35 |
| Prove su assemblaggio h =200 mm | 35 |
| Prove su assemblaggio h =400 mm | 35 |
| Osservazioni | 35 |
| Conclusioni dei primi test sui materiali compositi | 36 |

| | |
|--|----|
| 10. La sperimentazione su materiale composito: test finali | 40 |
| 10.1 Assemblaggi lineari in materiale composito | 40 |
| 10.1.1 Assemblaggi con bandelle in Fibra Aramidica Tipo A | 40 |
| Prove negative per assemblaggi h=400 mm (codice AL4) | 41 |
| Prove positive per assemblaggi h=400 mm (codice AL4) | 41 |
| Prove positive per assemblaggi h=300 mm (Codice AL3) | 42 |
| Prove positive per assemblaggi h=200 mm (Codice AL2) | 43 |
| Osservazioni | 44 |
| 10.1.2 Assemblaggi con bandelle in Poliestere Tipo B | 48 |
| Prove negative su assemblaggio h =400 mm (Codice BL4) | 48 |
| Prove positive su assemblaggio h =400 mm (Codice BL4) | 49 |
| Prove positive su assemblaggio h =300 mm (Codice BL3) | 50 |
| Prove positive su assemblaggio h =200 mm (Codice BL2) | 51 |
| Risultati | 51 |
| 10.2 Assemblaggi ad angolo | 54 |
| 10.2.1 Prove su assemblaggio h =200 mm ad angolo semplice (Codice AAL2) | 54 |
| 10.2.2 Prove su assemblaggio h =200 mm ad angolo/linea | 56 |
| | |
| 11. Contributo alla revisione della norma UNI EN 848-3 | 59 |
| | |
| 12. Conclusioni | 62 |
| | |
| Allegato I | |
| Traiettoria del proiettile per tipo di materiale e per altezza delle cortine | 65 |
| | |
| Allegato II | |
| Rette di regressione Altezza - Traiettorie nel poliestere e nell'aramidica | 66 |
| | |
| Allegato III | |
| Rette di regressione Rapporto peso - traiettorie Poliestere a sinistra e rapporto peso - traiettorie Aramidica a destra | 67 |
| | |
| Allegato IV | |
| Poliestere - Confronto regressione Traiettorie in funzione di Rapporto di peso e Altezza | 68 |
| | |
| Allegato V | |
| Aramidica - Confronto regressione Traiettorie in funzione di Rapporto di peso e Altezza | 69 |
| | |
| 13. Bibliografia | 70 |

Abstract

(Parole chiave: cortine, ripari, fibre aramidiche, proiezione di parti di utensile, lavorazione del legno)

Le macchine foratrici/fresatrici a controllo numerico per la lavorazione del legno utilizzano barriere realizzate in materiale flessibile termoplastico come protezione contro eventuali proiezioni di parti di utensile verso l'operatore. Tali barriere costituiscono una chiusura parziale e permettono il passaggio del pezzo da lavorare, potendo trattenere piccole parti di utensile, quali taglienti riportati o frammenti di taglienti di utensili complessi proiettati ad alta velocità.

L'ISPESL nell'anno 2007 ha condotto una ricerca per valutare la reale efficacia di tali barriere, studiare la dinamica del loro comportamento ed approntare un test di validazione. I risultati importanti ottenuti nell'ambito di tale ricerca hanno determinato la revisione della norma EN 848-3 "Macchine foratrici/fresatrici a controllo numerico per la lavorazione del legno" con l'edizione del 2007 ed hanno evidenziato che le barriere in PVC potevano, se opportunamente realizzate, trattenere fino a 20 grammi di massa lanciata alla velocità di 70 ms^{-1} .

Questo documento contiene il proseguimento di tale attività, attraverso la ricerca "Materiali e configurazioni innovative per barriere flessibili atte a trattenere parti di utensili proiettate ad alta velocità nelle macchine a controllo numerico per la lavorazione del legno", terminata nel 2012, supportata sia dalla spinta dell'innovazione tecnologica che dalla necessità di garantire livelli sempre più alti di sicurezza, studiando il comportamento di cortine realizzate in materiali compositi, cosiddetti tecnici, con maglia in fibra aramidica (Kevlar), in Nylon ed in Poliestere, ottenendo risultati sorprendenti: infatti è stato possibile individuare assemblaggi di cortine, in grado di trattenere masse di 100 g (5 volte superiori alle prestazioni del PVC) proiettate alla velocità di 70 ms^{-1} .

Tali risultati hanno contribuito alla revisione della norma EN 848-3 con la pubblicazione dell'edizione attualmente in vigore del 2012.

L'attività di ricerca in questione ha anche permesso di iniziare lo studio di assemblaggi di forma particolare, quali quelli ad angolo, evidenziandone le carenze ed individuando i possibili accorgimenti per aumentarne l'efficacia.

Introduzione

Le cortine flessibili vengono impiegate sulle macchine foratrici e fresatrici a controllo numerico per la lavorazione del legno (fig. 1) come protezione contro il rischio residuo di proiezione di parti di utensile o di parti dei pezzi in lavorazione, dopo che sono state adottate tutte le misure per ridurre tale rischio alla fonte. Infatti la norma EN 848-3, che regola le macchine in questione, prevede a tal scopo prescrizioni che riguardano la prevenzione della sopravvelocità degli utensili, dell'errata programmazione del ciclo di lavoro (per evitare l'inserimento di parametri errati e l'urto degli utensili contro parti rigide) e richiede la scelta di utensili adeguati che rispettino le norme EN 847-1 ed EN 847-2.



Figura 1. Fora-Fresatrice a CNC (per concessione di SCM Group)

I requisiti delle cortine flessibili sono stati per la prima volta studiati nell'ambito della ricerca "Efficacia delle cortine di protezione contro le proiezioni di parti di utensili nelle macchine da legno foratrici/fresatrici a controllo numerico", condotta dall'Istituto Superiore per la Sicurezza e Prevenzione del Lavoro (ISPESL) nel 2007. Tale ricerca fu istituita perché un paese membro della Comunità Europea contestò l'efficacia delle cortine flessibili, in quanto questa non era stata comprovata da test qualificati, nonostante non vi fosse evidenza di incidenti occorsi sulle macchine che utilizzano questi ripari, che sono costruite in conformità alla norma UNI EN 848-3 ed utilizzate nel rispetto delle istruzioni fornite dal costruttore.

Lo studio effettuato e le prove di laboratorio hanno dimostrato che queste protezioni, opportunamente realizzate, hanno una certa efficacia nel fermare piccole masse proiettate. È stata studiata ed individuata la complessa dinamica del fenomeno ed i risultati ottenuti sono stati pubblicati ed utilizzati durante la successiva revisione della norma EN 848-3 del marzo 2007, nella quale per la prima volta è stato introdotto un test di prova approntato con il contributo degli esperti dell'ISPESL.

I risultati ottenuti però non potevano essere applicati a barriere flessibili realizzate con materiale diverso dal PVC e con configurazioni differenti da quelle previste dalla norma EN 848-3 del 2007. Infatti, come era stato osservato e dimostrato nella ricerca effettuata, l'efficacia delle barriere flessibili dipende dal comportamento in condizioni dinamiche che, a sua volta, è funzione del materiale impiegato e della configurazione scelta. In particolare il fenomeno che si osserva è completamente diverso da quello classico delle barriere rigide, dove la capacità di trattenere una massa dipende quasi esclusivamente dalla resistenza meccanica del materiale.

L'attività sopra descritta ha fatto sì che l'esperienza accumulata nella gestione delle prove e l'attrezzatura acquisita abbiano collocato il Dipartimento Tecnologie di Sicurezza dell'ISPESL ieri e dell'INAIL oggi, al primo posto a livello internazionale sia nella ricerca che nella conduzione dei test, tanto che le maggiori aziende del settore richiedono la certificazione delle cortine flessibili adottate sulle macchine di loro produzione.

In questo contesto i nuovi sviluppi del mercato, sostenuti sia dalla spinta concorrenziale che dalla necessità di trovare soluzioni più efficaci nel garantire un adeguato livello di sicurezza degli operatori, hanno portato i costruttori ad adottare in questi anni nuovi materiali ed a sviluppare configurazioni innovative. Per esempio, sono stati presi in considerazione assemblaggi di cortine costituite da due pacchi distinti (detti a "doppio pacco") e distanziati di 25 mm (vedi fig. 2) in modo da sottoporre il proiettile a due urti consecutivi separati, per ridurne maggiormente l'energia (soluzioni brevettata da SCM Group Spa). Con questi assemblaggi, ai quali si farà cenno durante la descrizione della sperimentazione, sono stati ottenuti ottimi risultati con il PVC quando si utilizzava il proiettile da 20 g: infatti quest'ultimo veniva avvolto dalle strisce della prima barriera, come in un "cartoccio", mentre la seconda barriera contribuiva con il successivo urto a dissiparne drasticamente l'energia. Questo fenomeno era valido sia per bandelle corte (250 mm) che per bandelle lunghe (400 mm) ed erano sufficienti per ciascun impacchettamento 4 cortine dello spessore di 2 mm.



Figura 2. Assemblaggio a doppio pacco

Sono stati fatti molti test controllando il comportamento anche nelle fenditure e nella parte bassa delle strisce, ma l'obiettivo principale rimaneva sempre quello di superare la soglia dei 20 g del proiettile.

Al tempo stesso, anche le modalità di prova ed i requisiti richiesti per il suo superamento hanno subito progressivamente modifiche ed ampliamenti, in base alle evidenze sperimentali, al fine di valutare in maniera più puntuale l'efficacia delle cortine di protezione. Di conseguenza l'attività di ricerca non si è mai fermata ed è proseguita esaminando le prestazioni raggiunte con le nuove soluzioni ed i nuovi strumenti, valutando il comportamento delle barriere durante l'impatto, l'effetto dei nuovi materiali, l'energia residua dei frammenti/proiettili, l'efficacia delle nuove configurazioni.

La ricerca su materiali diversi dal PVC ha subito una svolta quando, da test effettuati in Germania presso l'Università di Stoccarda (IFW), è emersa la possibilità di poter fermare

proiettili lanciati a 70 m/s, aventi massa superiore ai 20 g permessi dal PVC, utilizzando cortine realizzate con tessuti definiti “tecnici”, con maglie in fibre aramidiche denominate comunemente Kevlar.

Inoltre in sede europea, proprio in vista dell'utilizzo di nuovi materiali e nuove configurazioni aventi lo scopo di migliorare l'efficacia delle barriere flessibili, sono state programmate revisioni della norma EN 848-3, alla quale è stato apportato il contributo di conoscenza acquisito tramite questa nuova attività di ricerca e sperimentazione, che ha modificato i requisiti richiesti per questo tipo di ripari e migliorato ed integrato la procedura del test di validazione e la strumentazione richiesta.

Infatti dopo l'edizione del 2007, in occasione dell'adeguamento alla nuova Direttiva Macchine, è stata pubblicata la revisione EN 848-3:2007+A2:2009 contenente due emendamenti (A1 ed A2), nella quale sono state introdotte le modifiche di cui sopra, riguardanti le cortine flessibili. Un'ulteriore revisione della norma EN 848-3 è stata ultimata e pubblicata nell'edizione di ottobre 2012.

In questo documento saranno illustrate le varie fasi della ricerca, compresi i primi passi del periodo di transizione nel passaggio al Kevlar, riguardanti l'impiego di configurazioni nuove, l'utilizzo di materiali per le cortine quali le fibre aramidiche, le fibre di poliestere e Nylon ed il contributo ai lavori di revisione normativa. In particolare si farà riferimento ai primi test sperimentali, non ufficiali, condotti su disposizioni delle cortine ad angolo (come richiesto dalla norma) che saranno comunque oggetto di un approfondito esame nella futura attività di ricerca.

A tale ricerca hanno collaborato l'ACIMALL (Associazione Italiana dei Costruttori di Macchine da Legno) e l'SCM Group Spa.

Basi scientifiche di partenza

La ricerca già effettuata sulle cortine realizzate in PVC rappresenta la base dalla quale si è partiti per sperimentare i nuovi materiali e le nuove configurazioni, mentre la norma EN 848-3 del 2007, citata nell'introduzione, è il documento nel quale sono confluiti i contributi della passata attività.

In tale contesto sembra opportuno specificare le basi scientifiche di partenza, quali risultati della precedente attività di ricerca, che ovviamente per quanto detto sono validi solo per il PVC, e ricordare molto sinteticamente alcune caratteristiche del test introdotto per la prima volta nella norma EN 848-3 del 2007, in quanto le modifiche successive, che hanno portato agli emendamenti ed alla nuova revisione, e delle quali si tratterà più avanti, sono da considerare come un contributo della presente attività di ricerca, portato e discusso a livello normativo in sede europea.

Ricordiamo che una cortina deve essere costituita da strati sovrapposti di materiale flessibile come indicato in figura 3. Ogni singolo strato S di cortine è costituito come noto

da una serie di strisce verticali, dinamicamente indipendenti una dall'altra, che permettono al pezzo in lavorazione di passare agevolmente tra esse.

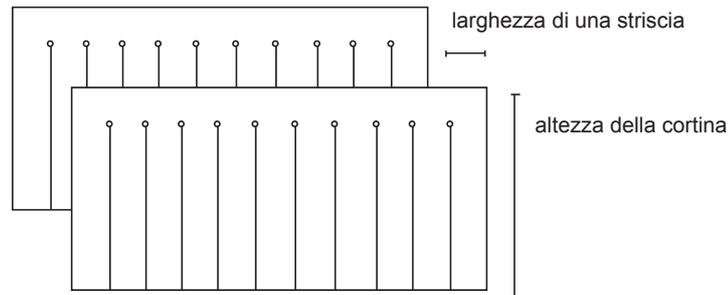


Figura 3. Cortina costituita da strati sovrapposti, vista frontale

È stato evidenziato come, con riferimento al punto di impatto ed alla capacità di trattenuta di proiettili e frammenti, la cortina potesse essere divisa in 3 fasce: la fascia alta in prossimità del serraggio dove è concentrata la resistenza maggiore, quella bassa in prossimità del piano di lavoro, che presenta il comportamento peggiore, e quella centrale, che comprende la mezzeria della cortina, per la quale la resistenza risulta avere un valore compreso fra quelli anzidetti.

Per quanto riguarda la parte inferiore, la resistenza risulta bassa a causa dell'elevata flessibilità e mobilità di tale zona, per cui le valutazioni in merito alla capacità di trattenere parti di utensile risultano inappropriate se non addirittura di scarsa utilità, essendo la parte inferiore decisamente non rappresentativa del comportamento del resto della protezione. Occorre tener presente che se viene colpita una zona bassa l'inclinazione del frammento, il quale subisce in ogni caso un rallentamento, è tale che esso colpisce con elevata probabilità il piano di lavoro, con notevole riduzione della sua energia cinetica; è pur vero che non si possono escludere traiettorie casuali e rimbalzi. La parte centrale che comprende la mezzeria ha un comportamento intermedio, vicino a quello della parte alta, con risultati omogenei uniformi e riproducibili (a differenza di quelli della parte bassa) che permettono di definire una velocità limite, intesa come target raggiungibile dalla protezione, in termini di capacità di trattenuta e quindi di sicurezza auspicabile.

Ne deriva che la parte centrale delle cortine si presta meglio delle altre a valutazioni riguardanti la capacità di trattenere parti di utensile, sia perché rappresenta il comportamento medio e più probabile della barriera, sia perché garantisce la riproducibilità dei dati. Tale parte risulta inoltre, considerata la posizione degli utensili, quella che con più probabilità può essere colpita dai frammenti. L'andamento della resistenza fra la parte alta e quella più bassa non risulta lineare.

Per quanto riguarda i proiettili e soprattutto la loro forma, nella precedente attività di ricerca sono state considerate diverse geometrie, giungendo alla scelta della forma troncoconica quale quella più idonea a garantire la riproducibilità dei dati ed i risultati più conservativi ai fini della sicurezza.

In relazione al comportamento delle cortine erano stati individuati i seguenti aspetti:

- l'efficacia della cortina aumenta nei punti d'impatto vicini al sistema di vincolo;
- l'efficacia della cortina non si riduce con la diminuzione dell'altezza;
- l'efficacia aumenta nelle cortine con strisce più larghe;
- l'efficacia aumenta nelle cortine che a parità di spessore totale sono formate da più strati;
- la deformabilità del primo strato colpito influenza fortemente il fenomeno;
- il proiettile non perfora tutti gli strati ma quando riesce a perforare il primo resta bloccato dalla cortina oppure intrappolato dalla stessa;
- il proiettile passa solo per sollevamento della cortina;
- la linea di separazione tra le strisce della cortina non influenza in maniera significativa il comportamento della cortina;
- ai fini del comportamento della cortina l'energia cinetica del proiettile non sembra essere significativa quanto la quantità di moto.

I fattori che risultano più importanti sono il numero degli strati, la larghezza delle strisce e la loro altezza. A questo proposito si ricorda che sono state considerate cortine aventi altezza massima pari a 400 mm, larghezza minima e massima delle strisce pari rispettivamente a 40 mm e 60 mm, come richiesto dalla norma EN 848-3 e come confermato poi nell'edizione del 2007.

È opportuno notare che il limite dell'altezza di 400 mm è sempre stato fissato dalla norma in relazione alla possibilità per l'operatore di entrare in contatto con gli utensili, mentre i valori relativi alla larghezza delle strisce derivavano dall'utilizzo e dall'esperienza.

Per quanto riguarda l'assemblaggio, in origine era richiesto che le singole strisce si sovrapponevano l'una sull'altra proporzionalmente al numero degli strati cioè $1/3$ se 3 strati, $1/4$ se 4 e così via. È stato verificato che per più di tre strati l'efficacia della cortina aumentava se la sovrapposizione fra le strisce era $1/2$ (vedi fig. 4 per 6 strati).

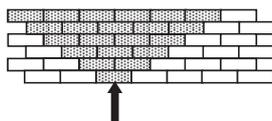


Figura 4. Assemblaggio di 6 strati con sfalsamento $1/2$

In conseguenza, la sovrapposizione proporzionale $1/n$ veniva accettata nella norma EN 848-3:2007 solamente per 3 strati (fig. 5) perché altrimenti risultava penalizzante. Con un numero di strati superiore a 3 la sovrapposizione fra le strisce doveva essere $1/2$.

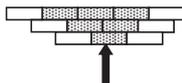


Figura 5. Assemblaggio di 3 strati con sfalsamento $1/3$

Il test doveva essere effettuato con un proiettile, come già detto, troncoconico avente massa pari a 20 g sparato da un sistema di propulsione ad una velocità pari a 70 m/s. Ogni cortina in PVC che avesse superato il test o che fosse identica a questa ma con un numero di strati maggiore o con un'altezza inferiore oppure con strisce più larghe, era considerata conforme alla norma EN 848-3:2007. Queste proprietà e questi requisiti in parte sono rimasti, in parte sono stati modificati o sostituiti dalle nuove evidenze sperimentali, come sarà possibile constatare più avanti, nel corso della descrizione dell'attività di ricerca e dei relativi risultati.

1. Obiettivi

Lo scopo della presente attività di ricerca è quello di studiare l'efficacia delle cortine di protezione, impiegate nelle macchine da legno foratrici/fresatrici a controllo numerico, realizzate con materiali innovativi diversi dal PVC. In particolare si tratta di tessuti fabbricati con maglie in fibre aramidiche o Kevlar e tessuti in poliestere. Questi possono poi essere rivestiti o meno di altro materiale per esempio PVC o poliuretano.

Di conseguenza l'obiettivo è quello di studiare il comportamento dei nuovi materiali in relazione alla forma, la massa e la velocità delle parti di utensile, aventi un peso assimilabile a 100 g, che possono colpire le cortine durante la lavorazione, ed individuare i principali fattori che influenzano la loro capacità nel trattenerle. La conoscenza di tali fattori è essenziale per la progettazione di cortine efficaci ed in particolare per la scelta della loro forma e della loro costituzione, della loro posizione e delle loro condizioni di vincolo in relazione alle caratteristiche della macchina, tenendo conto anche delle esigenze della lavorazione.

Importante obiettivo della ricerca è stato anche quello di trovare soluzioni da proporre in sede normativa per il documento EN 848-3, per modificare e migliorare la metodologia di prova per la valutazione dell'efficacia delle protezioni realizzate con le cortine flessibili. A tal scopo l'attività è iniziata con una prima serie di prove preliminari di approccio su tessuti diversi dal PVC realizzati in Kevlar ed in Nylon per individuarne le caratteristiche di resistenza. In tale occasione è stata valutata anche l'efficacia di proiettili di forma "speciale", cilindrica con punta troncoconica a impronta quadrata, che è stata confrontata con i "vecchi" proiettili a punta conica e troncoconica semplice.

Un altro obiettivo da raggiungere era quello di eliminare il disturbo creato sulle cortine al momento dello sparo¹. Successivamente, è stata sviluppata la fase vera e propria di ricerca con la sperimentazione sistematica dei materiali che potevano permettere di raggiungere i risultati attesi, cioè le fibre aramidiche ed il poliestere, dotati o meno di rivestimento esterno superficiale, atto a garantirne la resistenza all'usura.

Infine, ultimo obiettivo è stato quello di cominciare a dare delle prime valutazioni di massima dell'efficacia di cortine disposte ad angolo, in quanto questo studio vero e proprio verrà effettuato nella futura attività.

¹ Tale disturbo è dovuto sia all'aria spinta fuori dal proiettile, sia al gas di propulsione utilizzato (aria o azoto): infatti si era notato, con la fotocamera ad alta velocità, che le strisce si muovevano prima che il proiettile le colpisse. Inoltre, test mirati ed il confronto con altri laboratori (che utilizzano un sistema diverso con polvere da sparo), avevano fatto supporre che anche il gas di propulsione, investendo la cortina insieme al proiettile, influisse sul suo comportamento.

2. Generalità sul rischio residuo di proiezione di frammenti e la direttiva 2006/42/CE

Si ritiene utile soffermarsi su alcuni concetti riguardanti il rischio di proiezione di frammenti ed i relativi requisiti richiesti dalla normativa di legge (D.Lgs. 17/2010, recepimento della Direttiva 2006/42/CE) e tecnica, che permettono fra l'altro di introdurre una specifica terminologia.

Il rischio di proiezione è trattato specificatamente al punto 1.3.3 dell'Allegato I della Direttiva 2006/42/CE dove è richiesto che vengano prese precauzioni per evitarlo. La Guida all'applicazione della direttiva "macchine" - 2^a edizione giugno 2010 – specifica al §208 che nel caso non sia possibile evitare completamente la proiezione possono essere utilizzati ripari e coperture per proteggere le persone e se necessario anche dispositivi di protezione individuale. Per le macchine da legno in particolare la Direttiva 2006/42/CE al punto 2.3 b) stabilisce come requisiti supplementari relativi al rischio di proiezione di pezzi o loro elementi, che la macchina "deve essere progettata, costruita o attrezzata in modo da impedire tale proiezione o, qualora ciò non sia possibile, in modo che la proiezione non produca danni per l'operatore e/o le persone esposte".

Il rischio di proiezione è trattato anche nel quarto paragrafo del punto 1.3.2, dove si considera il caso in cui, nonostante l'uso di materiali e assemblaggi appropriati, permane un rischio residuo di rottura o disintegrazione durante il funzionamento. Anche in tal caso si devono adottare le misure necessarie per evitare che i frammenti possano colpire le persone, per esempio montando e posizionando gli elementi passibili di rottura, in modo che i frammenti vengano contenuti da altre parti della macchina quali il telaio, oppure dotandola di ripari adeguati. A prescindere dal fatto che siano gli elementi funzionali della macchina o i ripari a contenere i frammenti, gli elementi coinvolti devono essere abbastanza robusti da contrastare la forza dei frammenti proiettati (cfr. Guida all'applicazione della direttiva "macchine" - 2^a edizione giugno 2010 - : §169 commenti sul punto 1.1.1, lettera f) e § 216 commenti sul punto 1.4.1.).

Nello specifico per le fora-fresatrici per legno a controllo numerico, poiché le esigenze di lavorazione non permettono la chiusura totale con ripari rigidi, fissi o mobili, la protezione viene assicurata prevenendo la sopravvelocità degli utensili, l'inserimento di parametri errati e l'urto degli utensili contro parti rigide, tramite criteri di programmazione e sistemi di controllo affidabili. In aggiunta, gli utensili vengono scelti secondo specifici criteri di sicurezza (per evitare l'inserimento dell'utensile sbagliato), nel rispetto delle norme che li regolamentano, la EN 847-1 e la EN 847-2.

Nonostante questo, sussiste un rischio residuo di proiezione: si ricorda che per rischio residuo (EN 12100:2010) si intende quello che permane dopo che sono state prese le misure protettive sia da parte del progettista della macchina che dell'utilizzatore.

Le cortine flessibili sono la misura di protezione adottata per far fronte a questo rischio residuo. Non sono ovviamente delle chiusure complete per le aperture della macchina, ma vengono considerate una chiusura parziale. La norma EN 848-3 definisce la chiusura parziale come una combinazione di ripari fissi e mobili, di dispositivi di sicurezza e di

cortine che racchiudono una zona definita pericolosa della macchina, che può o non può avere aperture o copertura.

Nel corso della descrizione di questa attività di ricerca si menzionerà più volte la “velocità limite” della parte di utensile proiettata pericolosamente fuori dalla macchina: con tale termine si intende il valore massimo della velocità per cui l’energia cinetica del proiettile dopo l’urto con le cortine viene giudicata, con il sistema qualitativo che verrà descritto, non pericolosa per l’operatore. Tale giudizio viene dato a vista con l’ausilio della telecamera.

3. Attrezzatura di prova

La strumentazione di prova (v. fig. 6) è costituita da un dispositivo di sparo del proiettile ad aria compressa (pressione max 16 bar) o a gas inerte – azoto – in pressione, da un sistema per la rilevazione delle immagini ad alta velocità asservito ad un personal computer e da un supporto per il posizionamento ed il fissaggio delle cortine.

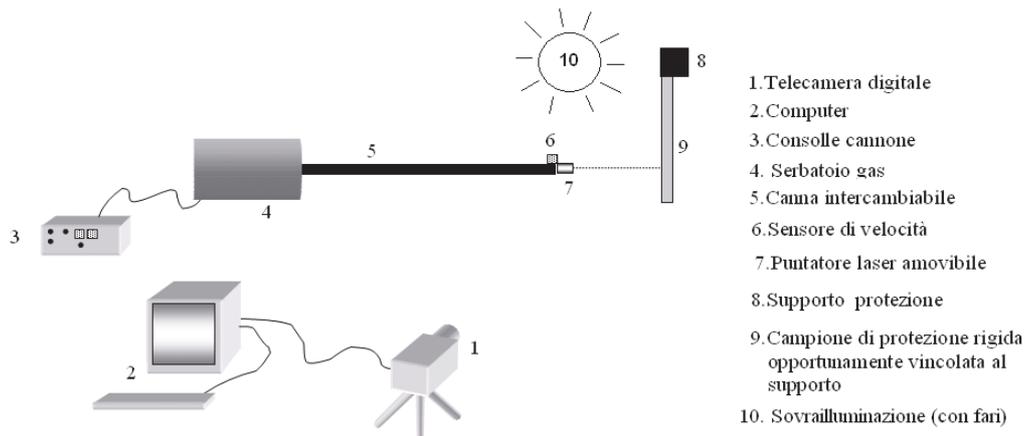


Figura 6. Schema di principio del sistema di prova balistico

Il dispositivo di sparo è un prototipo, fabbricato dalla A.D. Engineering, denominato HPG 1200/R4 (fig. 7, sx), composto da:

- a) telaio di supporto;
- b) camera di prova per il fissaggio, il posizionamento delle cortine di protezione e per eseguire i test in sicurezza;
- c) canna intercambiabile di diametro da 6 a 20 mm;
- d) terminale della canna con fotodiode di T&R che permette di misurare la velocità in uscita dalla canna (fino a 120 m/s) e dispositivo di sostituzione della canna;
- e) meccanismo di caricamento;
- f) serbatoio di accumulo gas dal compressore (aria) o dalle bombole (azoto);
- g) pistone di comando della valvola di scarico;
- h) elettrovalvola di scarico;
- i) rilevatore di pressione;
- j) pannello comandi;
- k) compressore per l'aria;
- l) puntatore laser per fissare con precisione il punto d'impatto (fig. 7, dx);
- m) elettronica di comando e controllo, che consente sia di impostare i parametri della prova (pressione e velocità) che di rilevare con precisione la velocità di passaggio del proiettile attraverso i sensori di velocità posti all'uscita della camera di prova.

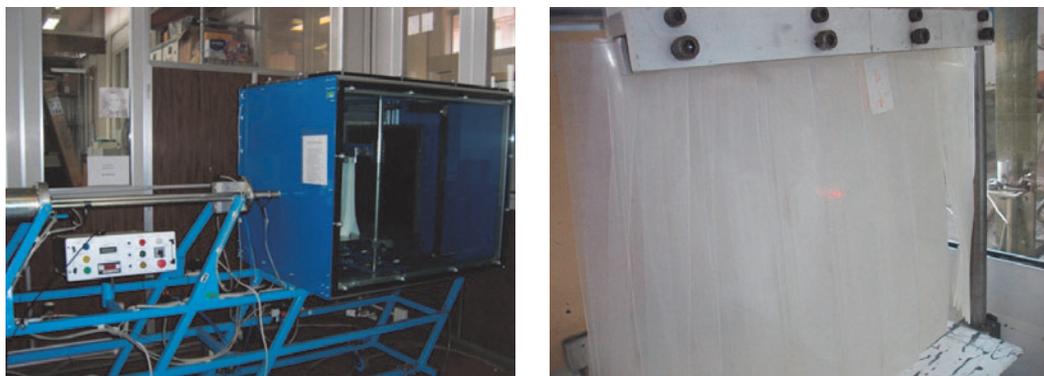


Figura 7. (sx) Dispositivo di sparo (HPG 1200/R4) e camera di prova; (dx) sistema di puntamento laser per centrare la canna nel punto desiderato del provino (questa immagine di repertorio mostra una protezione realizzata con cortine flessibili sottoposta a prova)

Il sistema per la rilevazione delle immagini ad alta velocità, denominato “Motionscope PCI - High speed digital imaging system”, è in grado di rilevare fino a 2000 fotogrammi al secondo, dispone di obiettivi da 3.6, 6, 12 mm ed è collegato ad un PC che consente di variare la velocità di playback ed esaminare le immagini registrate.

Oltre a questa speciale telecamera, l'acquisizione di immagini ad alta velocità richiede anche una sovrailluminazione ottenuta con speciali lampade che, come riportato schematicamente in fig.6, rappresentano un componente fondamentale del “set-up” sperimentale. Per queste prove sono stati acquistati due fari professionali ARRI 4000 equipaggiati con lampade da 4000 W di potenza (del tipo usato per le riprese cinematografiche o nel settore fotovoltaico ove si utilizzano come “sole artificiale”).

Il supporto universale in dotazione per il montaggio dei campioni (Fig. 8) è registrabile nel piano verticale sia in altezza, lungo due barre cilindriche del telaio interno, sia lateralmente, potendo scorrere su apposite guide. Dispositivi di serraggio a vite consentono il bloccaggio in un punto arbitrario lungo l'asse di sparo permettendo la regolazione della distanza tra il punto di uscita della canna ed il punto di impatto sul provino.

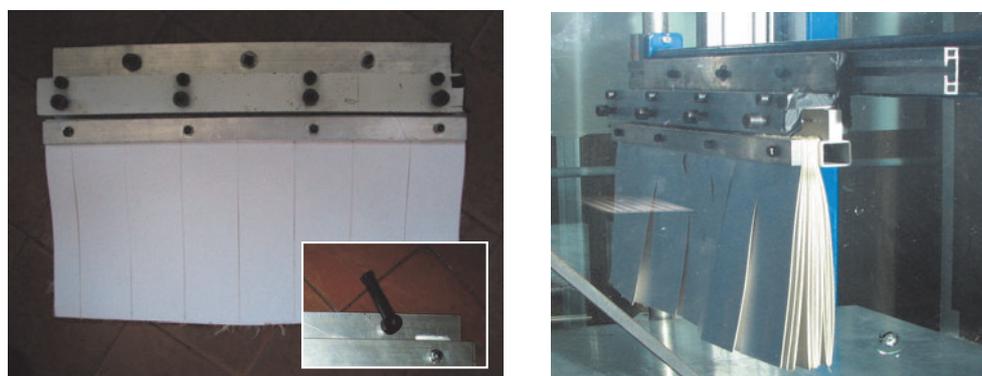


Figura 8. Assemblaggio e dispositivo di serraggio (sx) supporto con telaio mobile verticale (dx)

È stato notato, dalle immagini registrate ad alta velocità durante la sperimentazione, che le cortine si muovevano prima che il proiettile le raggiungesse, modificando il loro assetto durante le prove a causa dell'aria spinta fuori dalla canna. Prove sperimentali hanno dimostrato che anche il gas di propulsione contribuisce a disturbare il comportamento delle cortine.

Per evitare che l'aria ed il gas di propulsione possano influenzare i risultati del test, modificando la configurazione della cortina in prova, è stato predisposto un sistema costituito da 2 lastre in policarbonato forate (v. fig. 9).

Questo allestimento permette al proiettile di passare attraverso i fori ma impedisce all'aria, spinta fuori dalla canna dal proiettile, ed al gas di propulsione, di influenzare il comportamento della cortina, fornendo risultati ripetibili. Per rendere ancora più efficace il sistema, il primo foro viene chiuso con un sottile foglio di carta che riduce il passaggio dell'aria, ma non costituisce alcun impedimento per il proiettile e non influenza la prova. I risultati e le immagini rilevate ad alta velocità dimostrano l'efficacia di questo sistema.



Figura 9. Setti di plexiglas per ridurre l'effetto dell'aria sparata con il proiettile

4. I proiettili

Durante la sperimentazione, in funzione degli obiettivi da raggiungere e delle risultanze delle prove stesse, sono stati utilizzati i seguenti tipi di proiettile:

Proiettile cilindrico da 20g a punta tronco-conica semplice:

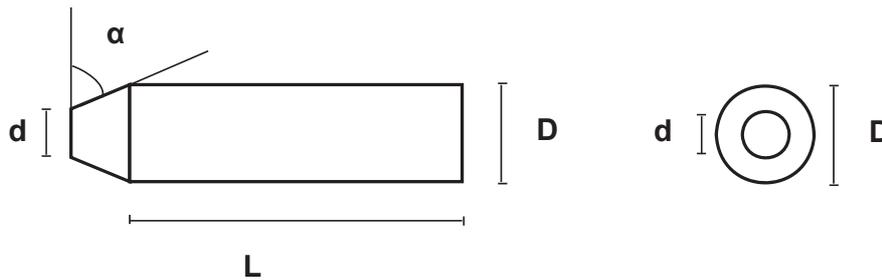


Figura 10. Proiettile da 20 g tronco-conico - Viste laterale e frontale

α : 60°

d: 3 mm

D: 12 mm

Proiettile cilindrico da 100 g a punta conica:

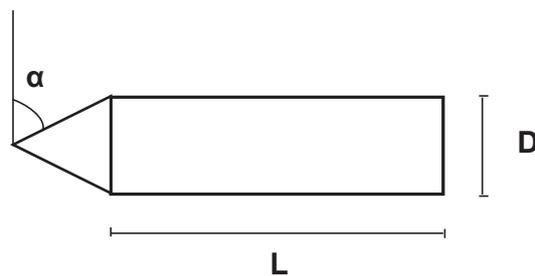


Figura 11. Proiettile a punta conica da 100 g - Vista laterale

α : 60°

D: 20 mm



Figura 12. Proiettile cilindrico da 100 g a punta tronco-conica ad impronta quadrata, detta "speciale":

a: 10 mm

D: 20 mm

Tutti i proiettili sopra indicati hanno le seguenti caratteristiche fisiche:

- materiale: acciaio;
- resistenza a trazione: $R_m = 560 \text{ Nmm}^{-2} \div 690 \text{ Nmm}^{-2}$;
- tensione snervamento $R_{02} \geq 330 \text{ Nmm}^{-2}$;
- tensione di rottura $A \geq 20\%$;
- tempra dell'acciaio a 56_0^{+4} HRC a profondità di almeno 0,5 mm.

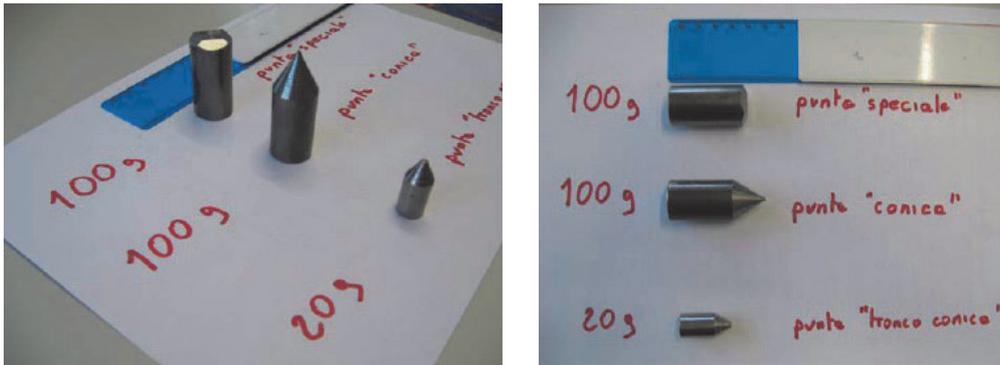


Figura 13. Caratteristiche geometriche dei vari proiettili

Il proiettile da 20 g a punta troncoconica è quello previsto nel test richiesto dalla norma EN 848-3 del 2007 che per la prima volta presentava una procedura per validare le cortine sulla base della pregressa attività di ricerca. È stato utilizzato, in questa nuova attività, in via preliminare prima di usare proiettili da 100 g, per verificare che i tessuti realizzati in materiale diverso dal PVC garantissero effettivamente prestazioni superiori, constatando che assicuravano facilmente l'arresto del proiettile da parte della barriera, con una capacità di trattenuta di gran lunga superiore.

Il proiettile da 100 g a punta conica è stato impiegato per verificare l'effetto sui nuovi tessuti di una parte proiettata appuntita o tagliente, per testare la capacità di produrre danni ed attraversare la barriera.

Il proiettile "speciale" da 100 g a punta troncoconica con impronta quadrata è quello che viene utilizzato per testare i ripari di macchine per metallo. È stato proposto il suo impiego in sede normativa, considerata la già esistente "omologazione", dopo che se ne fosse verificata l'idoneità nella sperimentazione.

5. I materiali

I materiali impiegati nelle prove sono tessuti realizzati con fibre di poliesteri o di poliammidi alifatiche (Nylon) o poliammidi aromatiche (Kevlar). Questi tessuti possono o meno essere rivestiti o per così dire spalmati, per esempio con PVC o poliuretano, che ne migliorano le caratteristiche di resistenza all'abrasione e di durabilità di impiego.

Essi sono caratterizzati da particolari proprietà fisico-meccaniche quali densità, resistenza a trazione, modulo di elasticità, deformazione a rottura, che sono importanti sia ai fini della loro caratterizzazione sia per il comportamento della cortina in conseguenza dell'impatto dei proiettili.

Il poliestere è un materiale organico ottenuto attraverso un processo di polimerizzazione a stadi, via condensazione. La sua struttura molecolare è caratterizzata dalla presenza del gruppo funzionale degli esteri lungo la catena carboniosa principale. È un materiale che tende, in presenza di fiamma, a ridursi fino ad estinguersi. Le caratteristiche dei fili di poliestere sono: un'ottima tenacità² e resilienza³, elevata resistenza all'abrasione, alle pieghe e al calore, elevato modulo di elasticità e una minima ripresa di umidità (la percentuale massima d'umidità), nonché una buona resistenza agli agenti chimici e fisici.

La fibra aramidica è una fibra poliammidica aromatica con contenuto di gruppi aromatici superiore all'85% e con elevatissime caratteristiche meccaniche, ottenute per filatura umida di una soluzione liquido-cristallina di p-fenilendiammina e cloruro tereftalico polimerizzata in acido solforico. La lunghezza della diammina aromatica conferisce ai polimeri aramidici diverse caratteristiche meccaniche. In particolari formulazioni, il modulo elastico di queste fibre può raggiungere 135 GPa e la resistenza a rottura 3,6 GPa.

La struttura altamente anisotropa delle stesse fibre le rende comunque adatte ad applicazioni dove siano presenti solo carichi di trazione. La loro resistenza a compressione, infatti, è bassissima e ciò conferisce un'altissima tenacità a questo materiale che per questo viene utilizzato per produrre strutture ad alta resistenza all'impatto come, per esempio, quelle antiproiettile e ad alta resistenza al calore.

Il cedimento di questi materiali è sempre fibrillare in trazione e, quando soggette a flessione, hanno un cedimento plastico della zona in compressione che permette lo spostamento dell'asse neutro, non facendo raggiungere il limite di rottura nella zona in trazione ed aumentando quindi la capacità della fibra di deformarsi. L'alta tenacità quindi, ne consiglia l'uso in applicazioni dove sono richieste alte resistenze all'impatto. Sono in studio ulteriori formulazioni del materiale che si prevede possano raggiungere moduli elastici di circa 190 GPa e resistenze alla trazione di 3- 4 GPa.

² Tenacità - È la forza rapportata alla massa lineare. Indica la maggiore o minore attitudine di una fibra a resistere alla *trazione*. Si parla anche di carico di rottura. La tenacità può essere indicata con diversi sistemi di misura: i più diffusi sono i g/den, g/dtex e i cN/tex. Le fibre ed i filati possono essere sottoposti a prove di tenacità a secco o a umido. Nel caso delle prove di tenacità ad umido solitamente si ha una diminuzione più o meno accentuata della tenacità del materiale, tranne nel caso delle fibre vegetali, che presentano un incremento del valore.

³ Resilienza - È la capacità di un materiale tessile di riprendere il proprio spessore dopo essere stato sottoposto ad una determinata pressione superficiale.

Nylon è il nome commerciale dato al polimero a base poliammidica riconducibile ai seguenti tre tipi in funzione dei monomeri impiegati nylon 6, nylon 6.6 e nylon 11.

Il nylon viene prodotto sotto forma di filo continuo (a una o più bavelle in titoli diversi da 15 a 1200 den) di *tow* di fiocco, di setole. Può essere opaco o lucido ed è generalmente di colore bianco; è prodotto anche tinto in pasta. La sezione longitudinale è liscia, quella trasversale senza rilievi e quasi circolare; mediante speciali filiere si possono produrre però tipi di nylon a sezione trilobata, nastriforme o profilata. Il nylon ha un peso specifico molto basso (1,14 per il nylon 6.6 e 6 e 1,04 per il nylon 11), ha un'eccellente tenacità (da 4 a 7 g/den, 9 per i tipi ad alta tenacità), un buon allungamento (dal 20 al 60%), ottima ripresa elastica e resistenza a flessioni ripetute e all'usura, ha una buona resistenza agli alcali, ha stabilità dimensionale al lavaggio anche a 100°C ed una notevole resistenza alle muffe, ai batteri e agli insetti.

Non viene attaccato dai solventi abitualmente utilizzati nei lavaggi a secco e nemmeno da alcoli, aldeidi, eteri; ha una ripresa all'umidità⁴ del 4%, la più alta fra le fibre sintetiche. Non è tossico e non produce allergie: eventuali reazioni cutanee sono dovute esclusivamente a insufficiente lavaggio dopo le operazioni di filatura, tintura e tessitura. La temperatura di rammollimento ha inizio a 235 °C (per il nylon 6 a 160 °C), quella di fusione è sui 250 °C (210-220 °C per il nylon 6). Tra gli svantaggi del nylon vi è un alto allungamento a bassi carichi; sensibilità agli acidi, soprattutto caldi, fusione per contatto con fonti di calore e facilità a caricarsi elettrostaticamente e ad attirare pulviscolo. Inoltre, salvo per alcuni tipi speciali di nylon, ha una ridotta resistenza alla luce e alle intemperie.

L'insieme delle sue caratteristiche pone il nylon a un livello superiore a quello di qualsiasi altra fibra tessile, per cui trova impiego in svariati settori. Il nylon a più alta tenacità è usato per carcasse di pneumatici, reti da pesca, corde, tessuti per paracadute, nastri trasportatori, cuscinetti, pulegge, cinghie di trasmissione, cinture di sicurezza per automobili, copertoni impermeabili, manicotti antincendio, serbatoi gonfiabili, capannoni ad aria (palloni), ecc. Per le sue buone caratteristiche meccaniche (in particolare l'elevato modulo di elasticità a flessione) il nylon è molto usato anche nell'industria meccanica. L'inconveniente principale è costituito dal forte assorbimento di acqua (fino al 10% per il nylon 6 a saturazione) che comporta anche variazioni dimensionali e di resistenza; in presenza di umidità, si preferisce perciò impiegare il nylon 11 o 12 (undecammine e dodecammine) di costo maggiore, ma con assorbimento d'acqua inferiore all'1%. Le caratteristiche meccaniche possono essere ulteriormente migliorate con l'aggiunta di fibre di vetro.

Le fibre di questi materiali sono impiegate per creare il materiale composito che costituisce la cortina e che è la combinazione di due o più materiali semplici, "assiemati" al fine di ottenere prestazioni che il singolo materiale costituente, da solo, non è in grado di fornire. Come tutti i compositi, le cortine si compongono di uno strato detto matrice, che funge da legante e da supporto negli sforzi di compressione (duttile) ed un insieme di fibre (Kevlar, Nylon, Poliestere) disposte secondo diverse tessiture che assorbono gli sforzi di trazione.

Tale combinazione qualitativa e quantitativa di materiali è il risultato di un'attività di studio e progettazione allo scopo di ottenere determinate caratteristiche e prestazioni e viene indicata con il termine "formulazione".

⁴ Ripresa di umidità esprime l'attitudine delle fibre tessili ad assorbire e trattenere acqua

Nel caso di matrici polimeriche è fondamentale il comportamento termico, che dà origine alla classificazione in polimeri termoplastici (TP) e polimeri termoindurenti (TI). I primi sono polimeri a catena lineare che sottoposti a temperature superiori alla temperatura di transizione vetrosa (T_g), differente per ogni materiale, fluidificano, solidificando dopo raffreddamento; questa trasformazione reversibile rende possibile il loro riciclo. I polimeri termoindurenti derivano invece da resine fluide o fluidificabili che per trattamento termico solidificano formando una struttura molecolare reticolata con i punti di reticolazione tra una catena e l'altra costituiti da legami chimici; il processo di solidificazione è irreversibile, e tali polimeri sono quindi insolubili ed infusibili con ovvie conseguenze per il riciclo.

Sono termoplastici i poliesteri saturi, acrilici e stirenici, le poliolefine, le poliammidi (fibre aramidiche) e i policarbonati; sono termoindurenti i poliesteri insaturi, alcune resine epossidiche e fenoliche, e i poliuretani.

Questi due tipi di matrici si distinguono anche nel caso di impatto. Come è possibile osservare, le resine termoplastiche (fig. 14 A) si adeguano deformandosi in una sola direzione, assorbendo l'energia dovuta all'impatto e alla flessione. Nelle resine termoindurenti (fig. 14 B) la rottura avviene invece in tutte le direzioni.

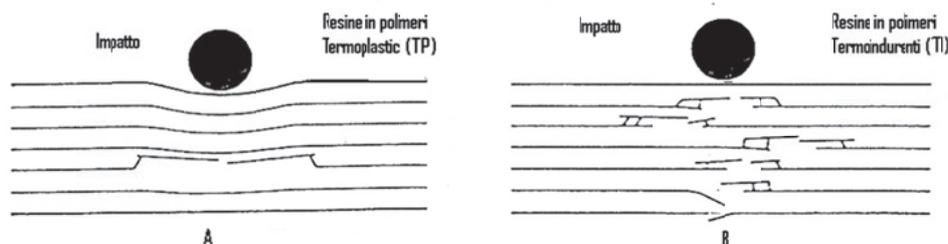


Figura 14. Comportamento all'impatto di resine termoplastiche (A) e termoindurenti (B)

Le Fibre aramidiche Kevlar generalmente impiegate nella "formulazione" delle cortine possono avere tessiture variabili da 440 a 8050 dtex e resistenza meccanica elevata, che ne consente l'utilizzo in applicazioni come protezione balistica, funi e cavi. Queste fibre hanno una struttura anisotropa che le rende molto deboli in direzione trasversale; i compositi da esse ottenuti si distinguono al variare della formulazione per: densità, resistenza a trazione assoluta (intesa come carico di rottura nella direzione delle fibre), resistenza a compressione, resistenza a taglio, allungamento a rottura della fibra (generalmente 3 e 6 %).

Al variare della temperatura il coefficiente di dilatazione termica è minimo nella direzione longitudinale e massimo nella direzione trasversale e può raggiungere gli stessi valori dell'acciaio o dell'alluminio. Con temperature molto basse inoltre aumenta la rigidità e la vulnerabilità agli effetti dovuti a carichi ciclici (fatica).

Ne deriva che le caratteristiche meccaniche delle cortine dipendono dal tipo di materiale impiegato nelle fibre che costituiscono il composito (es. fibre aramidiche o Kevlar) nonché dalla forma, dal peso e dalla disposizione delle stesse fibre. Le caratteristiche termiche, chimiche ed elettriche dipendono dalla matrice e dal tipo di lavorazione adottato nella

produzione delle stesse resine che la costituiscono. Le prestazioni e il costo, dipendono dal metodo di lavorazione. Si ritiene probabile che il comportamento dinamico delle cortine e la loro capacità di trattenere il pezzo, non solo disperdendone l'energia ma anche avvolgendolo, dipenda dall'insieme di tutte le caratteristiche e quindi sia proprio dello specifico prodotto.

Infine vi è il polivinilcloruro (PVC) del quale è stato ampiamente discusso nell'attività di ricerca precedente. In questa sede se ne discute ancora, sia perché impiegato in sperimentazioni con assemblaggi costituiti da due pacchi di cortine separate da un distanziale, sia perché utilizzato per la spalmatura dei materiali compositi. Il PVC è un materiale rigido, che deve la sua versatilità applicativa alla possibilità di essere miscelato anche in proporzioni elevate a prodotti plastificanti, quali ad esempio gli esteri dell'acido ftalico, che lo rendono flessibile e modellabile.

Risulta essere molto sensibile alla luce e al calore che determinano su di esso un effetto di degrado, che si manifesta dapprima con l'ingiallimento e, a temperature più elevate, con la decomposizione, dalla quale si libera acido cloridrico, ragione per la quale viene sottoposto a processo di stabilizzazione. Il PVC plastificato, ovvero addizionato di additivi plastificanti che ne aumentano la morbidezza, è abitualmente stabilizzato con l'aggiunta di formulati contenenti soprattutto sali di calcio (stearato, ricinoleato), bario, piombo e zinco.

6. Procedura di prova

Le prove devono simulare il comportamento delle cortine di protezione impiegate in macchine fresatrici e fora-fresatrici al fine di minimizzare i rischi di proiezione di parti di utensili e / o pezzi fuori dalla zona di lavorazione.

Il provino vincolato al supporto viene posizionato a 250 mm dall'uscita della canna del dispositivo di sparo, come riportato in fig. 15. Questa configurazione corrisponde ad una disposizione lineare delle cortine, la cui superficie giace nel piano verticale e non tocca in basso il piano orizzontale di riferimento ma lo sfiora appena. In tal modo è possibile riprodurre i risultati essendo l'allestimento del tutto generale ed indipendentemente da situazioni specifiche.

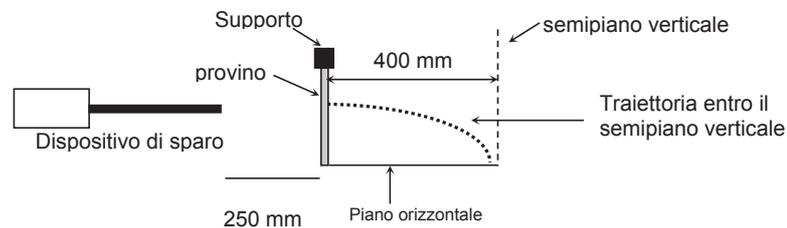


Figura 15. Schema del metodo di prova per valutare l'efficacia di una cortina

Il proiettile è considerato trattenuto quando non oltrepassa il provino oppure, se passa, la sua traiettoria non supera il semipiano verticale π posto a 400 mm dietro il provino stesso come mostrato in fig. 15. Vengono testati consecutivamente 5 provini con lo stesso assemblaggio e la prova viene considerata superata quando il proiettile è trattenuto da tutti i provini. È possibile riutilizzare uno stesso provino cambiando le cortine danneggiate purché l'insieme sia considerabile perfettamente integro ed assimilabile ad uno nuovo. Il punto di impatto viene centrato con un puntatore laser.

Come già indicato precedentemente, per caratterizzare il comportamento di una cortina di protezione occorre colpire al centro la singola striscia di altezza utile h , assemblata sul supporto, come indicato nella figura 16 seguente, in un'area avente un diametro di 3 mm. In questo modo si ottengono risultati ripetibili ed uniformi, ma soprattutto si riesce ad avere una indicazione della capacità del riparo di trattenere il proiettile. È pur vero che la parte bassa risulta essere notevolmente meno efficace, ma la probabilità di una traiettoria in tale direzione è ridotta e coinvolgerebbe anche parti della struttura della macchina, come il piano di lavoro, che ne ridurrebbero l'energia.

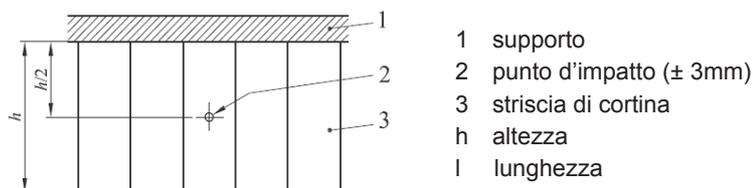


Figura 16. Punto di impatto sulla cortina

Ai fini della ricerca e della comprensione del fenomeno, è stata solo in pochi casi effettuata qualche prova colpendo anche nella fenditura fra una striscia e l'altra, secondo lo schema di figura 17 di seguito riportato.

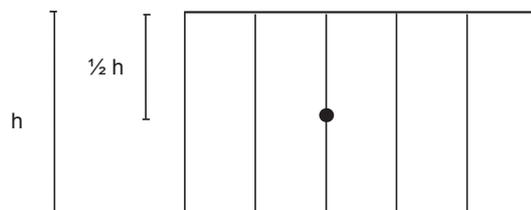


Figura 17. Punto d'impatto su di una fenditura

Le cortine vengono sottoposte al lancio dei proiettili precedentemente descritti con una velocità di $70 \text{ ms}^{-1} \pm 5 \%$. Per la propulsione può essere utilizzata aria compressa (fino a 10 bar) o gas inerte (azoto) compresso in bombole, fino ad una pressione massima pari a 16 bar. L'azoto si è dimostrato finora la soluzione più comoda ed efficace.

L'acquisizione delle immagini con la telecamera ad alta velocità, asservita ad un personal computer, permette di registrare le prove e di analizzare i fotogrammi relativi all'impatto del proiettile sulle cortine ed alla sua traiettoria dopo l'urto.

Considerata la durata del fenomeno (frazioni di secondo), la telecamera permette di verificare se la prova è stata superata o meno, ma soprattutto permette di vedere il comportamento del materiale all'urto, il movimento delle singole strisce e la traiettoria del proiettile.

I dati rilevati vengono riportati su schede dove viene registrato il tipo di assemblaggio (identificato con un codice), la disposizione delle cortine (in linea, ad angolo), le caratteristiche geometriche dell'assemblaggio (numero di strati n , altezza utile h , larghezza provino L_a , larghezza striscia L_s , spessore di uno strato, spessore del provino, sfalsamento fra strati, velocità del proiettile, esito positivo o negativo, data, tipo di proiettile e note di commento).

7. Geometria e dimensioni delle cortine

Le configurazioni considerate per le cortine di prova sono state determinate in funzione degli ingombri dell'interno della camera di sparo e delle dimensioni e caratteristiche del supporto e del sistema di fissaggio. I provini sono costituiti da strati di larghezza L_a pari a 450 mm, che sono, per gli assemblaggi in esame, in numero sempre superiore a tre e quindi sovrapposti secondo uno sfalsamento delle singole strisce pari a $1/2$ della loro larghezza ($L_s/2$).

Un campione di cortina di queste dimensioni, se colpito al centro di una striscia che si trova alla metà della larghezza L_a oppure in una posizione immediatamente prossima, risulta essere rappresentativo del comportamento della protezione installata sulla macchina. Risulta infatti fondamentale che il campione abbia lo stesso comportamento della protezione originaria e che le sue dimensioni ed il punto di impatto consentano di verificare l'effettiva efficacia contro la proiezione di parti di utensile.

Nella figura 18 sono indicate le dimensioni caratteristiche di una cortina in prova e la sovrapposizione degli strati.

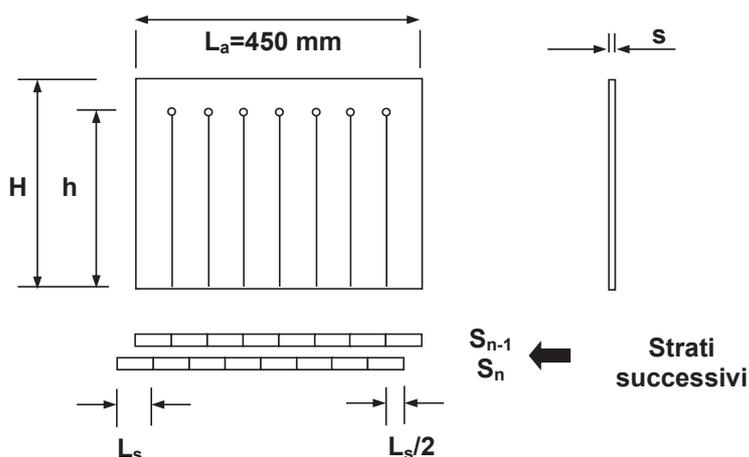


Figura 18. Caratteristiche geometriche dello strato S

Sono state prese in considerazione anche cortine disposte ad angolo con lo scopo di verificare, come già detto, l'efficacia di assemblaggi di questo tipo, in relazione a punti che potrebbero risultare di resistenza non adeguata nei confronti dell'impatto del proiettile.

In particolare la discontinuità creata dalla cuspidine interna del vertice della disposizione angolare risulta essere il punto da verificare, in quanto introduce una variazione nell'allineamento delle strisce ed una deformazione della disposizione del materiale. Il test viene effettuato con le stesse modalità stabilite per le cortine piane al centro della striscia situata sulla bisettrice dell'angolo come indicato nella figura seguente (v. fig. 19).

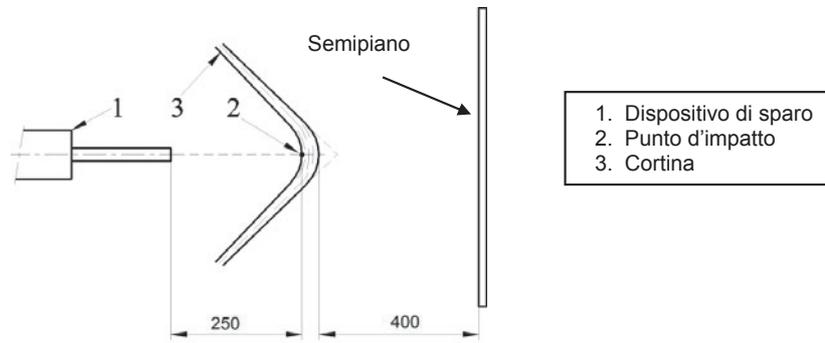


Figura 19. Schema di prova per cortine ad angolo

8. Sistema di fissaggio e supporto

Il sistema di fissaggio ed il supporto dei provini devono stabilire condizioni equivalenti a quelle esistenti a seguito del montaggio sulle macchine per quanto riguarda il tipo di vincolo, la solidità e robustezza, la geometria. Come già indicato le cortine devono restare appese al supporto senza toccare con la parte inferiore alcun piano.

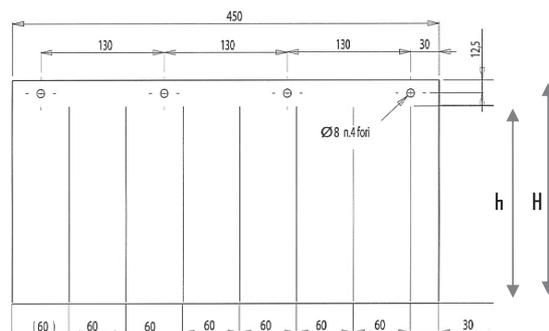


Figura 20. Caratteristiche di una cortina per il fissaggio

Nella figura 20 è rappresentato uno strato di un assemblaggio dove è visibile la parte superiore della cortina predisposta per l'applicazione del sistema di fissaggio e l'adattamento al supporto.

La parte superiore della bandella, costituita in figura 20 da una fascia di larghezza di 25 mm, è destinata ad essere serrata nel supporto con l'aiuto di due fasce metalliche per migliorare il contatto. Il resto della cortina, di altezza h nella stessa figura, costituisce la parte libera sottoposta a prova della protezione vera e propria. Sono visibili i fori per le viti passanti che servono per serrare tutti gli strati assemblati bloccandoli, con le due fasce metalliche, nell'apposita sede, a gola, del supporto. Quest'ultimo è mobile longitudinalmente su una traversa scorrevole verticalmente su barre cilindriche.

Con appositi serraggi a vite si fissano la posizione orizzontale e quella verticale, allineando il punto di impatto con la bocca del cannone tramite il puntatore laser. Nella figura 21 sono riportate alcune immagini del supporto, che ne chiariscono il funzionamento.



Figura 21. Particolari del supporto nella camera di prova

9. La sperimentazione

In questo paragrafo si farà riferimento alla sperimentazione condotta in questa attività di ricerca a partire dai test sugli assemblaggi a “doppio pacco” in PVC, con proiettile da 20 g, fino a quelli con proiettili da 100 g, sugli assemblaggi in materiale composito e sulle configurazioni ad angolo.

9.1 Assemblaggi in prova

9.1.1 Assemblaggi a “doppio pacco” in PVC

Questo tipo di assemblaggio, realizzato con due pacchi di cortine separate da un distanziale di 25 mm, è stato testato per verificare la possibilità di ottenere prestazioni superiori da protezioni in PVC utilizzando proiettili da 20 g di forma troncoconica sparati a 70 m/s. I risultati ottenuti dimostrarono con questa soluzione una efficacia maggiore di quella riscontrata con il singolo “pacco”. Inoltre si presentava il vantaggio di poter impiegare un numero minore di strati di PVC, a parità di efficacia.

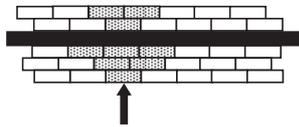
Poiché sono stati eseguiti parecchi test, dai quali si è constatata l'effettiva capacità di questo tipo di assemblaggio con cortine in PVC di arrestare la proiezione di masse di 20 g, si ritiene importante riportare di seguito, a titolo informativo, i risultati ottenuti per due cortine di altezza rispettivamente di 200 mm e 400 mm. Per questi è stato impiegato PVC con la denominazione commerciale KAUTEX TEXTRON, in strati di spessore S pari a 2 mm. Il materiale è caratterizzato dalle seguenti proprietà fisiche:

| | KAUTEX TEXTRON PVC | Metodo |
|--------------------------------------|---------------------------|---------------|
| Densità | 1,18 g/cm ³ | ISO 3801 |
| Resistenza ad abrasione (Martindale) | >50000 giri | ISO 12947 |
| Prova di lacerazione | - | ISO13937-2 |
| Resistenza a trazione | 13 MPa | ISO 13934-1 |
| Allungamento a Rottura | 420% | Su 100mm |

Tabella 1. Caratteristiche fisiche del KAUTEX TEXTRON

Assemblaggio n. 1

Questo assemblaggio ha altezza totale H=225 mm e altezza utile h=200 mm e larghezza della singola striscia L_s = 60 mm. Il primo pacco (verso il proiettile, vedi schema seguente) è costituito da 3 strati sovrapposti con uno sfalsamento fra le strisce pari ad 1/3 della loro larghezza. Il secondo pacco è costituito da 2 strati sovrapposti con uno sfalsamento fra le strisce pari ad 1/2 della loro larghezza. Nella figura 22 che segue è riportata una sezione orizzontale ed a fianco un riepilogo delle principali caratteristiche geometriche.

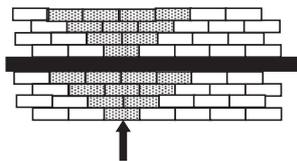


- H=225 mm
- h=200 mm
- S=2 mm
- L_s=60 mm
- Materiale : Kautex Textron
- Trattamento del materiale: depolarizzazione con talco
- 1° Pacco (verso il proiettile)
 - N_s=3 (numero strati)
 - Sfalsamento: 1/3
 - St=6 mm (spessore totale)
- 2° Pacco
 - N_s=2 (numero strati)
 - Sfalsamento: 1/2
 - St=4 mm (spessore totale)

Figura 22. Cortina a doppio pacco h=200 mm

Assemblaggio n. 2

Questo assemblaggio ha altezza totale H=425 mm e altezza utile h=400 mm e larghezza della singola striscia L_s=60 mm. Il primo pacco (verso il proiettile, vedi schema) è costituito da 4 strati sovrapposti con uno sfalsamento fra le strisce pari ad 1/2 della loro larghezza. Il secondo pacco è costituito da 4 strati sovrapposti con uno sfalsamento fra le strisce pari ad 1/2 della loro larghezza. Nella figura 23 che segue è riportata una sezione orizzontale ed a fianco un riepilogo delle principali caratteristiche geometriche.



- H=425 mm
- h=400 mm
- S=2 mm
- L_s=60 mm
- Materiale : Kautex Textron
- Trattamento del materiale: depolarizzazione con talco
- 1° Pacco (verso il proiettile)
 - N_s=4 (numero strati)
 - Sfalsamento: 1/2
 - St=8 mm (spessore totale)
- 2° Pacco
 - N_s=4 (numero strati)
 - Sfalsamento: 1/2
 - St=8 mm (spessore totale)

Figura 23. Cortina a doppio pacco h=400 mm

Risultati

Entrambi gli assemblaggi hanno superato il test in quanto 5 prove su 5, condotte secondo le modalità già descritte, hanno avuto esito positivo. Infatti il proiettile o non ha mai oltrepassato il provino oppure, anche se passato, la sua traiettoria non ha superato il semipiano verticale posto a 400 mm dietro il provino stesso (vedi fig.15). È anche accaduto che il proiettile restasse conficcato nel primo strato di PVC grazie all'esiguo spessore.

Dall'esame dei fotogrammi registrati durante l'impatto l'arresto del proiettile è dovuto alla duplice azione dei due pacchi di cortine. Infatti il primo pacco avvolge il proiettile nei suoi strati come un "cartoccio" mentre colpisce il secondo pacco. In tal modo l'energia cinetica del proiettile viene fortemente ridotta, complice l'imprigionamento nel primo pacco, se non completamente assorbita. Ovviamente le configurazioni degli assemblaggi devono essere tali da poter creare questo effetto, sia per caratteristiche geometriche che di materiale.

Nonostante i risultati positivi e le prestazioni decisamente superiori a quelli del pacco singolo non è stato possibile arrestare masse con valore intorno ai 100 g.

9.2 Assemblaggi in Kevlar e Nylon: primi test

La ricerca di materiali per le cortine in grado di arrestare masse molto superiori a 20 g ha portato ad eseguire una serie di test su tessuti compositi, con i quali è possibile realizzare strati aventi spessori più sottili, ma più resistenti alle abrasioni durante le lavorazioni e capaci di assorbire in maggior misura l'energia cinetica dei proiettili.

Le prime prove sono state effettuate su tessuti "tecnici", cioè destinati ad applicazioni ed impieghi specifici, con elevate prestazioni, quali il Kevlar ed il Nylon, a seguito di risultati positivi ottenuti con masse da 100 g e velocità di 70 m/s presso il laboratorio dell'Università di Stoccarda. In tale contesto, e considerati i lavori in corso in sede normativa, si è reso necessario iniziare una campagna di ricerca su questi tessuti per studiare il fenomeno dinamico dell'urto, valutare il comportamento delle cortine e verificarne l'efficacia nel fermare parti di utensile, proiettate all'esterno delle fora-fresatrici a controllo numerico per la lavorazione del legno.

Si fa notare che in queste prove non era stato ancora messo a punto il sistema per evitare l'interferenza creata dall'aria espulsa dal proiettile. Sono stati effettuati parecchi test su questi nuovi materiali prima di trovare le configurazioni che meglio delle altre si avvicinassero, in termini di prestazioni, ai requisiti richiesti. Quelle riportate di seguito, per obbligo di sintesi, sono le prove che più si prestano a descrivere i risultati ottenuti e che sono rappresentative della fase preliminare di approccio al problema.

Le prove sono state effettuate colpendo gli assemblaggi con bersaglio al centro della striscia, ma sono stati anche effettuati alcuni test esplorativi nella parte bassa delle strisce ed in corrispondenza delle fenditure nonché su cortine a doppio pacco. Come sarà possibile notare, in alcuni casi sono state impiegate strisce di larghezza pari a 80 mm perché con esse si ottenevano risultati migliori.

Tale evidenza ha portato ad incrementare a tale valore il requisito previsto per la larghezza massima delle strisce nella norma EN 848:2007+A2:2009, revisione della EN 848:2007, dove erano invece richiesti 60 mm. Di questi test esplorativi verranno brevemente indicati i risultati.

9.2.1 Assemblaggi in tela KEVLAR

Le caratteristiche del materiale in prova sono riportate nella tabella seguente.

| | KEVLAR | Metodo |
|--------------------------------------|---------------|---------------|
| Peso | 280 g/mq | ISO 3801 |
| Resistenza ad abrasione (Martindale) | >50000 giri | ISO 12947 |
| Prova di lacerazione | 354-351 N | ISO13937-2 |
| Resistenza a trazione | 3039-3066 N | ISO 13934-1 |
| Allungamento a Rottura | 12% | Su 100mm |

Tabella 2. Caratteristiche del Kevlar

Prove su assemblaggio h =200 mm

L'assemblaggio in prova è costituito da 30 strati di Kevlar di altezza pari a 200 mm, con strisce di 80 mm di larghezza, sfalsate di $\frac{1}{2}$ della lunghezza, di spessore del singolo strato pari a 0,3 mm per uno spessore totale di 9,0 mm. È stato utilizzato il proiettile conico di forma speciale, avente massa pari a 100 g, sparato al centro della bandella a velocità di 70 m/s. Su questo tipo di assemblaggio sono stati effettuati 2 test.

Nel primo caso si è avuto un esito positivo in quanto il proiettile è stato deviato verticalmente verso il soffitto ed è ricaduto entro i 400 mm, compresi fra la cortina ed il piano limite verticale di riferimento. Nel secondo caso l'esito è stato considerato negativo in quanto il proiettile è stato deviato verso l'alto, conservando una velocità elevata, con una direzione che si scostava dalla verticale in misura tale da rendere incerto il giudizio. A tal proposito si ricorda che come criterio di accettazione si considera positiva una prova in cui il proiettile viene deviato dalla cortina con una direzione verticale o approssimativamente verticale.

Prove su assemblaggio h =400 mm

L'assemblaggio in prova è costituito da 30 strati di Kevlar di altezza pari a 400 mm, con strisce di 60 mm, con spessore del singolo strato pari a 0,3 mm, sfalsate di $\frac{1}{2}$ lunghezza, per uno spessore totale di 9,0 mm. Su questo tipo di assemblaggio sono stati effettuati 3 test.

Sono stati utilizzati proiettili di massa pari a 100 g di forma conica sia semplice che speciale, per valutare i differenti effetti. Nella prima prova è stato usato il proiettile di forma conica speciale, il quale è stato deviato verso l'alto, conservando una velocità elevata, con una direzione che si scostava dalla verticale in misura tale da rendere incerto il giudizio: l'esito è stato quindi considerato negativo. Nella seconda e terza prova è stato usato il proiettile a punta conica semplice, con esito per entrambe positivo. Infatti in una il proiettile ha forato 10 strati di bandelle senza però attraversare la lacerazione, è stato deviato verso il soffitto ed è ricaduto entro i 400 mm, nell'altra è stato arrestato in modo eccellente ed è ricaduto sotto le cortine.

Osservazioni

Si nota che sono stati assemblati fino a 30 strati di Kevlar del tipo descritto, senza ottenere risultati pienamente accettabili, tranne che con il proiettile di forma conica semplice; questo tipo di proiettile, per la sua conformazione, risulta più facilmente trattenuto dalle protezioni e tende a lacerare il tessuto e ad essere rallentato con maggiore efficacia rispetto a quello di forma speciale che invece scivola su di esso.

Un'importante novità è stata la verifica che aumentando la larghezza delle strisce da 60 mm ad 80 mm si migliorano le prestazioni. Questo ha costituito uno dei contributi dell'attività sperimentale nella norma revisionata EN 848:2007+A2.

9.2.2 Assemblaggi in Nylon PEOX

Le caratteristiche del materiale in prova sono riportate nella tabella seguente.

| | PEOX | Metodo |
|--------------------------------------|-------------|-------------|
| Peso | 687 g/mq | ISO 3801 |
| Resistenza ad abrasione (Martindale) | >50000 giri | ISO 12947 |
| Prova di lacerazione | 479-612 N | ISO13937-2 |
| Resistenza a trazione | 3016-3007 N | ISO 13934-1 |
| Allungamento a Rottura | 24-25% | su 100 mm |

Tabella 3. Caratteristiche del Peox

Prove su assemblaggio h =200 mm

L'assemblaggio in prova è costituito da 20 strati di PEOX di altezza pari a 200 mm e strisce di 80 mm sfalsate di 1/2 lunghezza, di spessore del singolo strato pari a 0,7 mm per uno spessore totale di 14 mm. È stato utilizzato il proiettile di forma conica speciale, avente massa pari a 100 g, sparato al centro della bandella a velocità di 70 m/s.

Sono state effettuate tre prove di cui solo una avente esito positivo. In questo caso il proiettile è stato fermato ottimamente ed è ricaduto sulla verticale della cortina. Nei due casi negativi, pur notevolmente rallentato, il proiettile è andato ad urtare il piano di riferimento verticale posto a 400 mm di distanza.

Prove su assemblaggio h= 400 mm

L'assemblaggio in prova è costituito da 20 strati di PEOX di altezza pari a 400 mm con strisce di 60 mm sfalsate di 1/2 lunghezza, di spessore del singolo strato pari a 0,7 mm per uno spessore totale di 14,0 mm.

È stato utilizzato il proiettile di forma conica speciale, avente massa pari a 100 g, sparato al centro della bandella a velocità di 70 m/s. Sono state effettuate due prove di cui solo una avente esito positivo. In questo caso il proiettile è stato deviato verso l'alto ed è ricaduto entro i 400 mm dal piano di riferimento. Nella seconda prova il proiettile è stato deviato verso l'alto ed è ricaduto oltre i 400 mm.

Osservazioni

Sono stati utilizzati spessori totali superiori a quelli del Kevlar. Per altezze pari a 200 mm e larghezza delle strisce 80 mm si è ottenuto un risultato positivo, ma la presenza di risultati negativi anche se associati ad un notevole rallentamento del proiettile ne pregiudicano l'impiego.

9.2.3 Assemblaggi in Nylon MATRIX

Le caratteristiche del materiale in prova sono riportate nella tabella seguente.

| | MATRIX | Metodo |
|--------------------------------------|---------------|---------------|
| Peso | 867 g/mq | ISO 3801 |
| Resistenza ad abrasione (Martindale) | >50000 giri | ISO 12947 |
| Prova di lacerazione | 536-374 N | ISO13937-2 |
| Resistenza a trazione | 3007-3006 N | ISO 13934-1 |
| Allungamento a Rottura | 24-23% | Su 100 mm |

Tabella 4. Caratteristiche del Matrix

Prove su assemblaggio h =200 mm

L'assemblaggio in prova è costituito da 20 strati di MATRIX di altezza pari a 200 mm con strisce di 80 mm sfalsate di 1/2 lunghezza, di spessore del singolo strato pari a 1,0 mm per uno spessore totale di 20,0 mm. E' stato utilizzato il proiettile di forma conica speciale, avente massa pari a 100 g, sparato al centro della bandella a velocità di 70 m/s. Sono state effettuate due prove di cui solo una avente esito positivo. In questo caso il proiettile è stato rallentato ed è ricaduto entro i 400 mm. Nella seconda prova la proiezione verso l'alto è avvenuta con una direzione che si scostava parecchio dalla verticale, per essere considerato positivo, e la velocità rimaneva sostenuta.

Prove su assemblaggio h= 400 mm

L'assemblaggio in prova è costituito da 20 strati di MATRIX di altezza pari a 400 mm con strisce di 80 mm, sfalsate di 1/2 lunghezza, di spessore del singolo strato pari a 1,0 mm per uno spessore totale di 20,0 mm. È stato utilizzato il proiettile di forma conica speciale, avente massa pari a 100 g, sparato al centro della bandella a velocità di 70 m/s. Sono state effettuate sei prove tutte con esito positivo in quanto il proiettile è stato trattenuto ottimamente ricadendo, privo di energia, entro i 400 mm.

È stato altresì provato un assemblaggio uguale al precedente tranne per la larghezza delle strisce pari a 60 mm. Sono stati effettuate tre prove di cui 2 con esito positivo ed una con esito negativo. Nelle prove con esito positivo il proiettile è stato deviato verso l'alto ed in un caso è caduto prima delle cortine, nell'altro entro i 400 mm. Nella seconda prova la proiezione verso l'alto è avvenuta con una direzione che si scostava parecchio dalla verticale, per essere considerato positivo, e la velocità rimaneva sostenuta.

Osservazioni

Si nota che con questo materiale sono stati provati spessori totali superiori a quelli del Kevlar ed anche del PEOX. Per altezze degli assemblaggi pari a 200 mm sono stati evidenziati gli stessi problemi rilevati con il PEOX nonostante l'impiego di spessori totali superiori.

Viceversa per assemblaggi di 400 mm di altezza, con larghezza delle strisce di 80 mm ed uno spessore totale di 20 mm, sono stati ottenuti consecutivamente ottimi risultati.

L'aumento della larghezza delle strisce da 60 mm ad 80 mm ha dimostrato di essere positivo ai fini della protezione.

Conclusioni dei primi test sui materiali compositi

Le prove in oggetto hanno evidenziato un comportamento delle cortine realizzate in materiali compositi, quali il Kevlar ed i polimeri poliammidici (Nylon), notevolmente migliore del PVC per quanto riguarda la capacità di arrestare il proiettile. Infatti, i risultati ottenuti, pur non essendo soddisfacenti, sono diventati la base di partenza per ulteriori approfondimenti sperimentali che, come vedremo, porteranno all'individuazione di tessuti e configurazioni in grado di fermare parti di utensile aventi massa pari a 100 g, secondo i criteri previsti dalla normativa.

Le tabelle 5 e 6 di seguito riportate riassumono, in forma sinottica, i risultati delle prove sopra descritte.

| Materiale h=400 mm | Forma Proiettile | Ls mm | Esito per prove effettuate | Strati | S strisce mm | S tot mm |
|-----------------------|---------------------|----------|-------------------------------|--------|--------------------|----------|
| Kevlar | speciale | 60 | Negativo 1/1 | 30 | 0.3 | 9 |
| Kevlar | conico | 60 | Positivo 2/2 | 30 | 0.3 | 9 |
| Peox | speciale | 60 | Positivo 1/2 | 20 | 0.7 | 14 |
| Matrix | speciale | 80 | Positivo 6/6 | 20 | 1 | 20 |
| Matrix | speciale | 60 | Positivo 2/3 | 20 | 1 | 20 |

Tabella 5. Sintesi prove su assemblaggi di altezza 400 mm

| Materiale h=200 mm | Forma Proiettile | Ls mm | Esito | Strati | S strisce mm | S tot mm |
|-----------------------|---------------------|-------|--------------|--------|--------------------|----------|
| Kevlar | speciale | 80 | Positivo 1/2 | 30 | 0.3 | 9 |
| Peox | speciale | 80 | Positivo 1/3 | 20 | 0.7 | 14 |
| Matrix | speciale | 80 | Positivo 1/2 | 20 | 1 | 20 |

Tabella 6. Sintesi prove su assemblaggi di altezza 200 mm

Il KEVLAR sembrerebbe aver dato i risultati peggiori, ma occorre considerare che gli spessori totali sono sensibilmente inferiori a quelli degli altri materiali. Il comportamento dinamico di questo materiale indica l'esistenza di buone prospettive per un numero maggiore di strati.

Il PEOX è stato provato con spessori intermedi fra i tre tipi di materiali e nel complesso il comportamento dinamico non ha dato evidenza di risultati significativamente superiori al KEVLAR, come già detto testato con spessori inferiori.

Il MATRIX è stato testato fino a spessori totali più grandi degli altri tessuti ed il risultato in termini di comportamento dinamico ha dato evidenza di una capacità di trattenere proiettili in maniera più efficace. Si chiarisce che per comportamento dinamico si intende il meccanismo con cui la cortina durante l'urto ed il passaggio del proiettile ne riduce

l'energia per urto ed attrito e/o lo devia verso una direzione sicura (es. verso la verticale, dietro la cortina).

È possibile osservare questo comportamento solo attraverso i fotogrammi registrati con la telecamera ad alta velocità. In generale il meccanismo con cui il proiettile viene rallentato, oltre che alla perdita di energia per urto ed attrito, è dominato da un fenomeno di cattura dello stesso da parte delle strisce del materiale in movimento, diversamente a quanto accadeva nel PVC; tale cattura è facilitata dalla maggiore flessibilità del materiale. Le figure che seguono cercano di chiarire questo processo che verrà descritto in seguito in occasione della trattazione dei test finali specifici.

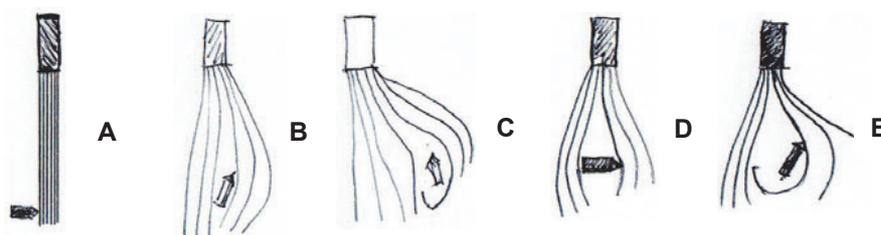


Figura 24. A, B, C, D, E sequenza di cattura del proiettile

Le figure 24 A,B,C indicano come, in successione, il proiettile dopo l'urto venga catturato fra le strisce della cortina di protezione. Il fenomeno si accentua all'aumentare della lunghezza delle strisce ed è caratterizzato da un evidente rigonfiamento di tutto l'assemblaggio, all'interno del quale il proiettile dissipa la sua energia, come indicato nelle figure 24 D ed E.

Per questo motivo le cortine alte 400 mm presentano un comportamento migliore di quello delle cortine alte 200 mm. Contrariamente a quanto avveniva per il PVC, non si può più affermare che l'efficacia delle cortine non diminuisce al diminuire della loro altezza: è necessario invece testare sempre l'assemblaggio nelle condizioni di impiego per verificarne l'idoneità.

Per quanto riguarda la larghezza L_s delle singole strisce, si nota un certo miglioramento delle prestazioni con dimensioni da 80 mm, dovuto probabilmente al fatto che le strisce più larghe offrono maggiori possibilità, sia di disperdere energia cinetica e sia soprattutto di catturare il proiettile, essendo flessibili e disponendosi in maniera disordinata dopo l'urto. Tale flessibilità ed il moto disordinato, non riscontrabili nel PVC, riducono sensibilmente le aperture che si provocano al momento dell'urto con il proiettile. Contrariamente a quanto avveniva nel PVC, nel quale in alcuni casi i proiettili con punta conica erano rimasti conficcati, in questi materiali compositi ciò non è mai accaduto, tutt'al più il tessuto veniva forato e lacerato ed il proiettile rallentato o deviato nella sua corsa.

Viceversa, con l'uso di proiettili a punta conica speciale, indicati nella norma EN 848-3 per effettuare le prove dei ripari fissi, non si è mai osservata alcuna lacerazione: proprio a causa di questa differenza si è ritenuto di credere che questi proiettili siano a vantaggio della sicurezza e quindi validi e rappresentativi anche per effettuare test sulle bandelle.

Infatti se una cortina trattiene un proiettile a punta conica speciale, è possibile ipotizzare che essa sia anche in grado di trattenere inserti metallici di utensile.

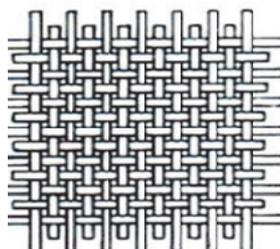


Figura 25. Particolare della trama e ordito del tessuto

Ulteriori evidenze riguardano l'effetto dovuto all'impatto del proiettile speciale sulle singole strisce dove è stato possibile evidenziare un avvallamento superficiale determinato dall'impronta del proiettile. A tale avvallamento superficiale è associabile una deformazione del materiale composito a seguito della quale si modifica la trama e l'ordito (v. fig. 25) del tessuto nel punto di impatto.



Figura 26. Fibre di Kevlar spostate

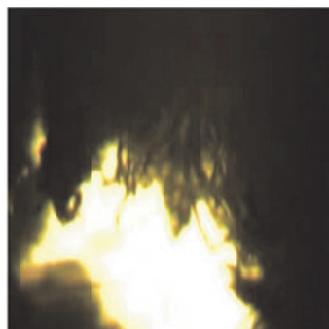


Figura 27. Fibre di Nylon lacerate

È interessante notare che nelle immagini al microscopio, effettuate negli studi condotti in Germania, le fibre del tessuto nel caso del Kevlar danneggiato risultavano molto sottili, deviate e spostate dal proiettile e poche di esse erano spezzate (v. fig. 26). Viceversa, nel caso del Peox e del Matrix, le fibre in corrispondenza della lacerazione del proiettile risultavano spezzate come se fossero state strappate (v. fig. 27).

Sono stati effettuati anche dei test nella parte bassa delle cortine e nelle fenditure che separano le singole strisce. Queste prove non sono state descritte, sia perché i test non sono stati condotti in maniera sistematica sia per esigenze di sintesi. Si ritiene comunque interessante accennare brevemente di seguito ai risultati. È stato riscontrato che colpendo la zona bassa delle cortine, in corrispondenza di 60 mm dal bordo inferiore, la resistenza al passaggio del proiettile era notevolmente inferiore a quella opposta dal PVC. Questo sembra essere dovuto alla densità dei materiali compositi, decisamente inferiore. Per

quanto riguarda le fenditure si è riscontrata una capacità di trattenere il proiettile inferiore, ma le differenze rispetto a quanto avviene colpendo la striscia nel centro, non sono sensibili, analogamente a quanto accade per il PVC.

Si fa notare che sono state provate alcune configurazioni a doppio pacco, come per il PVC, con la differenza che non sono state evidenziate significative differenze, forse a causa del fatto che in questo caso la massa del proiettile è notevolmente superiore (100 g invece di 20 g). Sarebbero necessari un maggior numero di test per verificare quanto osservato.

10. La sperimentazione su materiale composito: test finali

10.1 Assemblaggi lineari in materiale composito

Le prove sistematiche descritte nel seguito sono state effettuate su assemblaggi in materiale composito, per dimostrare l'efficacia nel trattenere proiettili di forma conica speciale, sparati a 70 m/s nel centro della cortina con la procedura descritta al paragrafo 5.

Le prove si basano sui risultati dei test già effettuati. I materiali scelti sono la fibra aramidica ed il poliestere, entrambi rivestiti di PVC. Per evidenti ragioni, non essendo possibile fornire la denominazione commerciale dei singoli tessuti in prova, questi verranno indicati rispettivamente come Tipo A e Tipo B, rispettivamente per la fibra aramidica ed il poliestere. Le caratteristiche fisiche dei suddetti tessuti sono indicate più avanti nei paragrafi specificatamente dedicati alle prove.

In base all'esperienza acquisita si è iniziato con un numero di strati pari a 14 per poi considerare assemblaggi di 16 strati o di numero superiore. La lunghezza delle strisce è stata assunta in tutti i test pari a 60 mm. È bene precisare che la scelta di 16 strati è in linea con i risultati ottenuti per gli spessori provati in precedenza e deriva dal fatto che in prove con 14 strati si erano ottenuti risultati non completamente soddisfacenti, risultando qualche prova dubbia o negativa. Come si vedrà, in un caso è stato anche necessario utilizzare un numero di strati superiore a 16.

Per ciascun materiale, con riferimento alla geometria indicata in figura 19, sono stati considerati assemblaggi di lunghezza pari a 450 mm ed altezza h pari 200, 300 e 400 mm, in modo da interessare il range completo delle altezze impiegabili per le cortine di protezione.

10.1.1 Assemblaggi con bandelle in Fibra Aramidica Tipo A

Le caratteristiche fisiche e le proprietà più significative per il materiale di Tipo A in fibra aramidica impiegato per i test sono riportate nella tabella seguente.

| Caratteristiche | Descrizione | Metodo |
|---|-------------------------|-------------------------------|
| Tessuto | Materiale Aramidico | DIN ISO 2076 |
| Filato | dtex 1680 | DIN ISO 2060 |
| Peso totale | 1000 g / m ² | EN ISO 2286-2 |
| Resistenza a trazione (ordito/trama) | 8500/7000 N | DIN 53354, DIN EN ISO 1421 |
| Resistenza a lacerazione (ordito/trama) | 650/650 N | DIN 53363, ISO13937-2 |
| Durezza Shore | 87 | ISO 12947, EN 868, UNI ISO 48 |
| Resistenza al freddo | - 30 ° C | DIN 53361 |
| Resistenza all'alta temperatura | +70 ° C | Complan-Richtlinie standard |
| Allungamento a Rottura | 12% | Su 100 mm |

Tabella 7. Caratteristiche del materiale in fibra aramidica Tipo A

Prima di descrivere i test che hanno permesso di identificare gli assemblaggi in grado di arrestare il proiettile di forma troncoconica speciale, avente una velocità di 70 m/s, si ritiene interessante mostrare anche i risultati dei test negativi immediatamente precedenti su cortine alte 400 mm, sia per una migliore comprensione del fenomeno dinamico sia perché mediante questi è stato possibile circoscrivere il numero di strati necessario allo scopo.

Prove negative per assemblaggi h=400 mm (codice AL4)

È stato provato un assemblaggio di bandelle di altezza h=400 mm con un numero delle strisce pari a 14 il cui spessore totale è pari a 11.9 mm. L'esito di questa prova è stato negativo, pertanto tutte le prove successive sono state effettuate con 16 strati.

In figura 28 è riportata l'immagine relativa alle cortine in questione, dove il proiettile non è stato sufficientemente rallentato, ma deviato dalla traiettoria di sparo, ha colpito il piano verticale di riferimento (π) rimbalzando indietro.

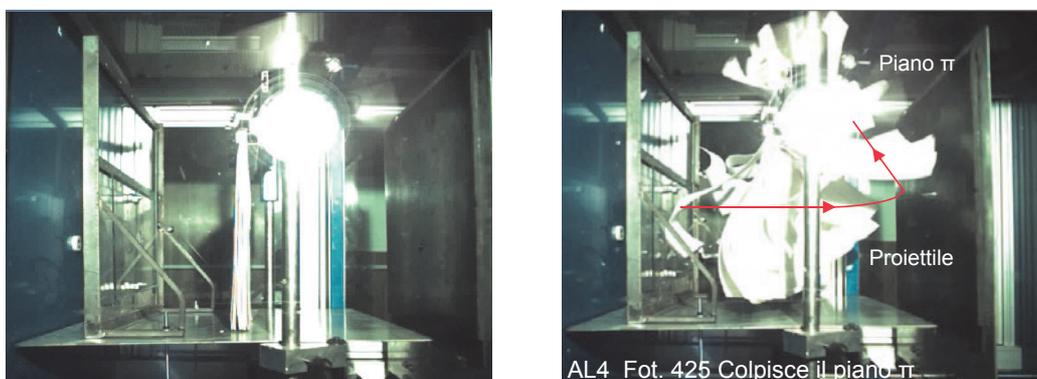


Figura 28. Prova negativa Aramidica 14 strati h= 400 mm prima (A) e dopo l'impatto (B)

Prove positive per assemblaggi h= 400 mm (codice AL4)

Dopo aver osservato i casi precedenti con 14 strati di cortine, sono stati considerati assemblaggi con 16 strati di Aramidica di altezza h= 400 mm, strisce di 60 mm sfalsate di 1 / 2 lunghezza, con spessore del singolo strato pari a 0.85 mm, per uno spessore totale di 13.6 mm.

Sono state effettuate 5 prove tutte con esito positivo. Gli strati che compongono l'assemblaggio al momento dell'impatto si rigonfiano e catturano il proiettile trasportandolo nel loro moto. La rotazione che le cortine effettuano intorno al supporto fa sì che in due casi il proiettile venga proiettato verso l'alto sulla verticale ed in tre casi all'indietro fra la bocca del cannone e l'assemblaggio stesso.

Nel complesso il fenomeno è in linea con quanto già descritto per cortine lunghe: è caratteristica, come già sottolineato, la cattura del proiettile fra le strisce rese disordinate dall'urto e la dissipazione completa della sua energia cinetica fra di esse. In figura 29 è riportato il particolare della traiettoria del proiettile verso l'alto sulla verticale mentre in figura 30 è riportato il particolare della traiettoria del proiettile verso l'alto dietro al supporto.

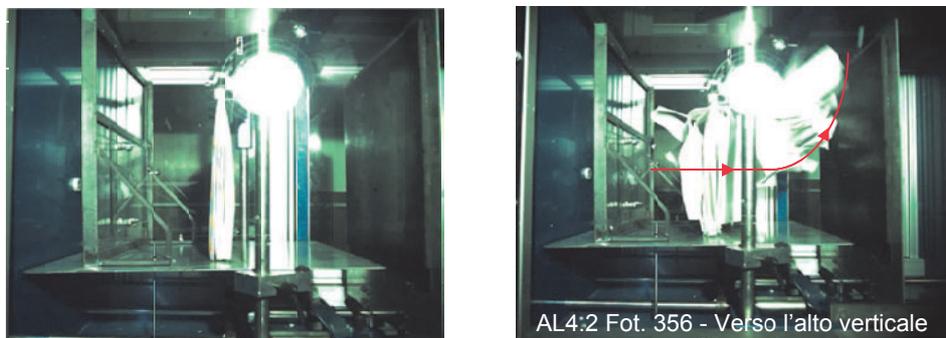


Figura 29. Prove positive Assemblaggi in Aramidica h= 400 mm prima (A) e dopo l'impatto (B)

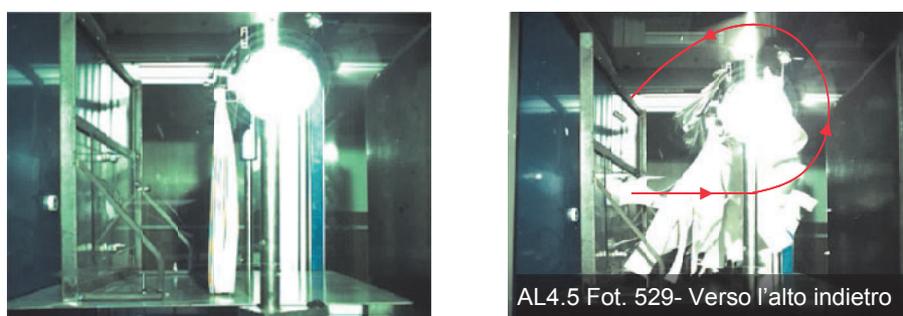


Figura 30. Prove positive Assemblaggi in Aramidica h=400 mm prima (A) e dopo l'impatto (B)

Prove positive per assemblaggi h=300 mm (Codice AL3)

L'assemblaggio in prova è costituito da 16 strati di tipo A di altezza pari a 300 mm con strisce di 60 mm, sfalsate di 1/2 lunghezza, con spessore del singolo strato pari a 0.85 mm, per uno spessore totale di 13.6 mm.

Sono state effettuate 5 prove con esito positivo. In due casi il proiettile è stato catturato dalla cortina e proiettato verso l'alto all'indietro e nei restanti tre casi, il proiettile è stato proiettato sulla verticale. Come nel caso precedente, il proiettile perde la sua energia cinetica nella disposizione disordinata delle strisce ma, a differenza del caso precedente, prevale la proiezione sulla verticale. Sembra quindi che al diminuire dell'altezza delle cortine diminuisca il livello di intrappolamento del proiettile. In questo caso il tempo che passa prima che il proiettile venga rilasciato dalle cortine è molto inferiore a quello relativo a bandelle alte 400 mm.

A sinistra in figura 31 A è riportato il momento dello sparo del proiettile con le cortine "a riposo", mentre nella figura a destra è visibile il provino con le strisce in movimento a causa del passaggio del proiettile. Nel fotogramma è stata indicata in rosso la traiettoria del proiettile verticale verso l'alto, considerata ai fini della valutazione della prova, avente esito positivo. In figura 32 viene invece riportata la traiettoria del proiettile verso l'alto dietro al supporto.

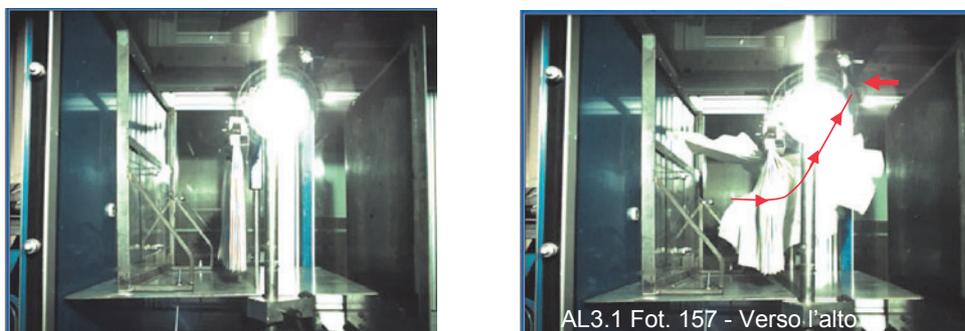


Figura 31. Prova positiva Assemblaggi in Aramidica h= 300 mm prima (A) e dopo l'impatto (B)

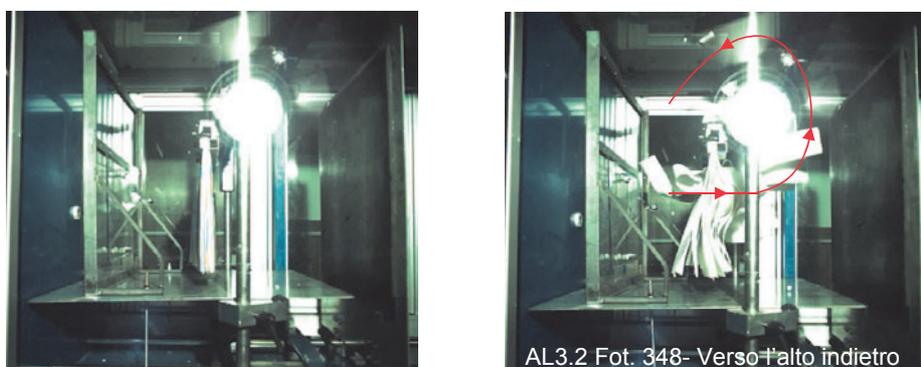


Figura 32. Prova positiva Assemblaggi in Aramidica h= 300 mm prima (A) e dopo l'impatto (B)

Prove positive per assemblaggi h=200 mm (Codice AL2)

L'assemblaggio in prova è costituito da 16 strati di tipo A di altezza pari a 200 mm con strisce di 60 mm, sfalsate di 1/2 lunghezza, di spessore del singolo strato pari a 0.85 mm, per uno spessore totale di 13.6 mm.

Sono state effettuate 5 prove con esito positivo. In tre casi il proiettile è stato deviato verso l'alto lungo la verticale con dei tempi di intrappolamento molto brevi rispetto ai casi precedenti, e compresi tra 20 ms e 60 ms. I fotogrammi relativi ai test, rappresentativi di questo comportamento, sono di seguito riportati (v. fig. 33).

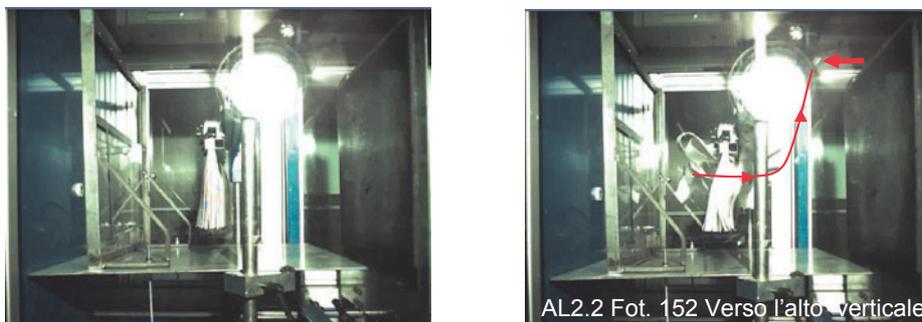


Figura 33. Prova positiva Assemblaggio in Aramidica h=200 prima (A) e dopo l'impatto (B)

Nelle altre due prove il proiettile è stato trattenuto dalle cortine per un tempo superiore a 100 ms (134 ms e 126 ms) ed è caduto entro i 400 mm. Il fotogramma seguente (v. fig. 34), relativo alla prova 3, è rappresentativo di tale comportamento.

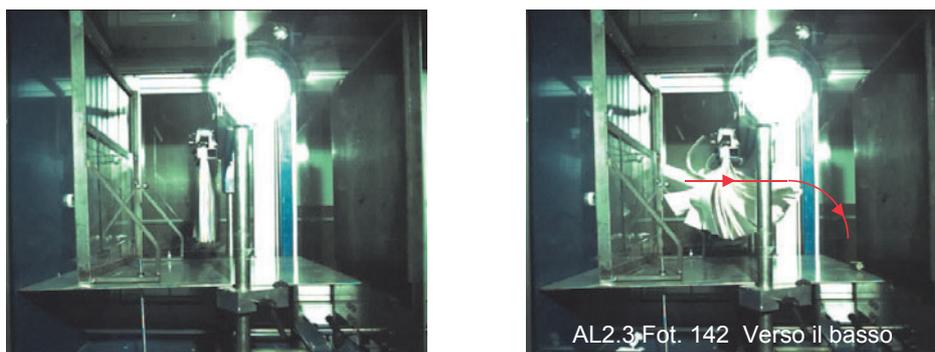


Figura 34. Prova positiva Assemblaggio in Aramidica h=200 prima (A) e dopo l'impatto (B)

Osservazioni

Gli aspetti oggetto di analisi ai fini dello studio del comportamento delle cortine colpite da un proiettile riguardano: traiettoria e velocità del proiettile dopo l'urto, deformazione delle cortine al passaggio dello stesso, danni (deformazioni, lacerazioni, strappi) a carico dei primi strati di cortine.

Le cortine non hanno avuto danni che vadano oltre l'impronta del proiettile dopo l'impatto, mentre la configurazione dell'assemblaggio in condizioni dinamiche ha subito, in generale, rigonfiamenti o spostamenti delle strisce che hanno causato un assetto per così dire disordinato dell'insieme. Per quanto riguarda le traiettorie occorre distinguere tra i casi associati ad esito positivo e negativo della prova.

Nel caso di esito positivo, fermo restando che il proiettile non deve mai colpire il pannello di riferimento (piano π), le possibili traiettorie sono: verso il basso (in caduta), verso l'alto intorno alla verticale, verso l'alto all'indietro.

La caduta verso il basso si verifica in pochi casi, solo nelle cortine di altezza pari a 200 mm.

Come già indicato, la traiettoria verso l'alto intorno alla verticale determina un esito positivo della prova, perché il proiettile non va ad intercettare il piano di riferimento che simula la presenza dell'operatore ed è frequente nelle cortine di altezza 300 mm e 200 mm.

La traiettoria verso l'alto all'indietro si nota spesso nelle cortine alte 400 mm dove il proiettile resta, come già visto, più facilmente intrappolato e ricade tra la bocca di sparo del cannone ed il provino stesso (vedi fig. 32).

Al fine di studiare quest'ultimo aspetto, è stata considerata la variabile (y) frequenza della traiettoria alto-indietro ed il valore della variabile indipendente (x) P_{1s}/P_{pr} , data dal rapporto tra peso di un singolo strato di cortine e peso del proiettile. I valori sono riportati in tabella 8 per le cortine di tipo A (aramidica).

| Altezza mm | Peso di uno strato g | P_{1s}/P_{pr} |
|------------|----------------------|-----------------|
| 200 | 90 | 0.90 |
| 300 | 135 | 1.35 |
| 400 | 180 | 1.80 |

Tabella 8. Variabili quantitative del campione di prova per cortine di Tipo A

Il risultato di questa analisi evidenzia l'esistenza di una dipendenza della variabile (y) frequenza della traiettoria alto-indietro, dalla variabile (x) P_{1s}/P_{pr} . Nella figura 35 è riportata la frequenza (y) in funzione dei valori del rapporto (x) ed è anche evidenziato un valore di $R^2 = 0.96$, che segnala l'esistenza di una relazione lineare.

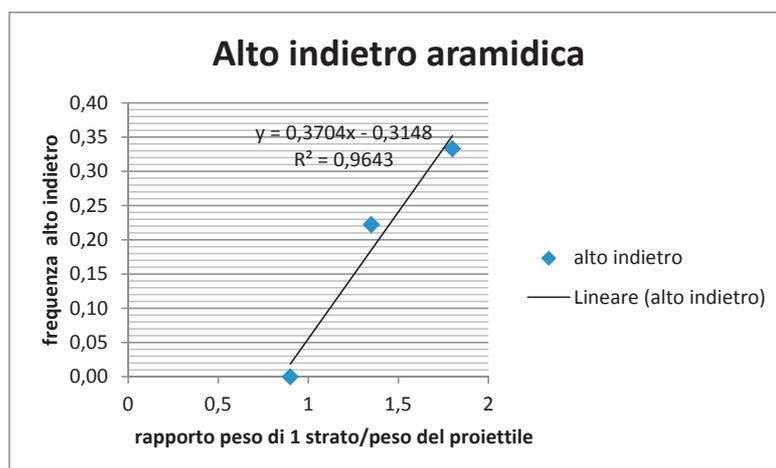


Figura 35. Frequenze di traiettorie verso l'alto indietro nelle cortine in aramidica

È opportuno evidenziare che la caduta verso il basso non è mai stata osservata nelle cortine alte 400 mm mentre si è verificata due volte nelle cortine in fibra aramidica di altezza pari a 200 mm.

In generale si può affermare che nelle cortine in fibra aramidica, all'aumentare dell'altezza, esiste una tendenza per il proiettile a seguire traiettorie che tendono verso l'alto.

Nel caso di esito negativo le possibili traiettorie comportano o l'urto del proiettile sul pannello o la deviazione dello stesso verso l'alto in una direzione che non è verticale e che intercetta la giacitura del piano di riferimento e può interessare l'eventuale operatore presente.

Nella tabella seguente sono riportati, in forma sintetica, i test sopra descritti, condotti sulle fibre aramidiche ed i relativi risultati; sono presenti anche valutazioni sulla velocità del proiettile dopo l'urto, effettuate in maniera del tutto qualitativa mediante l'osservazione delle registrazioni delle prove.

| Codice Assemblaggio | Disposizione | n° strati | h(mm) | Ls (mm) | L _a (mm) | Spessore s (mm) 1 strato/ 16 strati | sfalsamento | velocità (m/s) | Esito positivo | Esito negativo | Descrizione |
|---------------------|--------------|-----------|---|---------|---------------------|--|--------------------|----------------|----------------|----------------|--|
| AL2 | In linea | 16 | 200 | 60 | 450 | 0.85/13.6 | 1/2 L _s | 70 | x | | Il proiettile esce con traiettoria verticale verso l'alto. La velocità è ridotta. |
| | | | | | | | | 70 | x | | Il proiettile esce con traiettoria verticale verso l'alto. La velocità è medio bassa. |
| | | | | | | | | 70 | x | | Il proiettile cade in basso entro 400 mm dal piano di riferimento π. |
| | | | | | | | | 70 | x | | Il proiettile esce con traiettoria verticale verso l'alto. La velocità è ridotta. |
| | | | | | | | | 70 | x | | Il proiettile cade in basso entro 400 mm dal piano di riferimento π. |
| AL3 | In linea | 16 | 300 | 60 | 450 | 0.85/13.6 | 1/2 L _s | 70 | x | | Il proiettile esce con traiettoria verticale verso l'alto. La velocità è bassa. |
| | | | | | | | | 70 | x | | Il proiettile esce con traiettoria verso l'alto all'indietro. La velocità è medio bassa. |
| | | | | | | | | 70 | x | | Il proiettile esce con traiettoria verso l'alto all'indietro. La velocità è medio bassa. |
| | | | | | | | | 70 | x | | Il proiettile esce con traiettoria verticale verso l'alto. La velocità è medio alta. |
| | | | | | | | | 70 | x | | Il proiettile esce con traiettoria verticale verso l'alto. La velocità è medio bassa. |
| AL4 | In linea | 14 | 400 | 60 | 450 | 0.85/11.9 | 1/2 L _s | 69 | | x | Il proiettile colpisce il pannello. |
| | | 16 | 400 | 60 | 450 | 0.85/13.6 | 1/2 L _s | 70 | x | | Il proiettile esce con traiettoria verso l'alto verticale. |
| | | | | | | | | 70 | x | | Il proiettile esce con traiettoria verso l'alto verticale. |
| | | | | | | | | 70 | x | | Il proiettile esce con traiettoria verso l'alto all'indietro. |
| | | | | | | | | 70 | x | | Il proiettile esce con traiettoria verso l'alto all'indietro. |
| 70 | x | | Il proiettile esce con traiettoria verso l'alto all'indietro. | | | | | | | | |

Tabella 9. Sintesi dei risultati per la fibra aramidica

10.1.2 Assemblaggi con bandelle in Poliestere Tipo B

Le caratteristiche fisiche e le proprietà più significative per il materiale di Tipo B, in poliestere, impiegato per i test sono riportate nella tabella seguente.

| Caratteristiche | Descrizione | Metodo |
|---|--------------------------|-----------------------|
| Tessuto | Poliestere alta tenacità | DIN 60001 |
| Filato | dtex 1100 | DIN 53830 |
| Peso totale | 950 g/m ² | DIN 53352 |
| Resistenza a trazione (ordito / trama) | 4000/4000 N | ISO13937-2, DIN 53354 |
| Resistenza a lacerazione (ordito / trama) | 500/500 N | DIN 53363 |
| Durezza Shore A/15 | 90 | EN 868, UNI ISO 48 |
| Resistenza al freddo | - 30°C | DIN 53361 |
| Resistenza all'alta temperatura | + 70°C | DIN 53361 |
| Allungamento a Rottura | 24-32% | DIN 53354 |

Tabella 10. Caratteristiche del poliestere Tipo B

Anche in questo caso, come per le fibre aramidiche, è stato necessario individuare il numero di strati in grado di arrestare la proiezione del proiettile di prova, effettuando test che hanno avuto esito negativo. Tali test, per i motivi già enunciati ed ai fini di una maggiore completezza e per la comprensione del fenomeno, vengono inseriti nel contesto di questa trattazione.

Prove negative su assemblaggio h =400 mm (Codice BL4)

Sono stati considerati assemblaggi con 16 strati di Poliestere, di altezza pari a 400 mm, strisce di 60 mm sfalsate di 1/2 lunghezza, di spessore del singolo strato pari a 0.8 mm, per uno spessore totale di 12.8 mm.

Sono state effettuate 2 prove con esito negativo, in quanto il proiettile non è stato rallentato sufficientemente, ha attraversato la cortina ed ha colpito il piano verticale ad elevata velocità. Nella figura 36 B è riportato il fotogramma relativo ad una di tali prove in cui il proiettile colpisce il piano di riferimento π . Nell'impatto, le cortine subiscono il classico rigonfiamento rilevato nei casi precedenti.

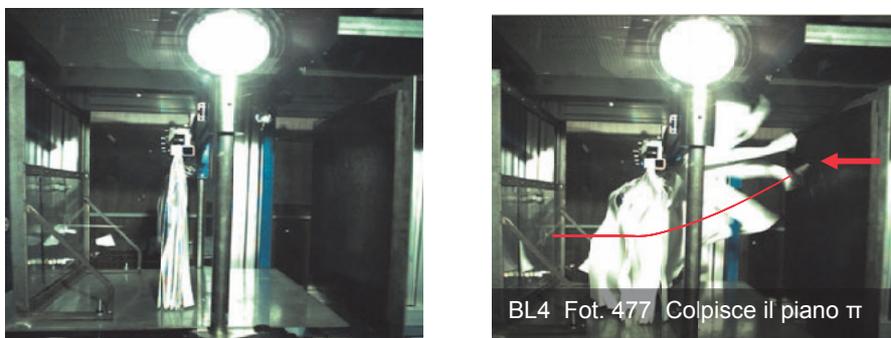


Figura 36. Prova negativa Assemblaggi Poliestere 16 strati h=400 mm prima (A) e dopo l'impatto (B)

Prove positive su assemblaggio h =400 mm (Codice BL4)

Dopo le prove negative con 16 strati, sono stati considerati assemblaggi con 20 strati, strisce di 60 mm sfalsate di 1/2 della lunghezza, di spessore del singolo strato pari a 0.8 mm, per uno spessore totale di 16 mm.

Sono state effettuate 5 prove con esito positivo. In tre casi il proiettile veniva deviato verso l'alto all'indietro (figg. 37 e 38) e in due casi in direzione verticale (fig. 39). I fotogrammi che seguono sono rappresentativi di tale comportamento.

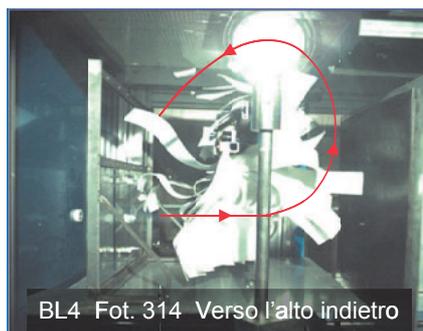


Figura 37. Prova positiva Assemblaggi Poliestere 20 strati h= 400 mm prima (A) e dopo l'impatto (B)

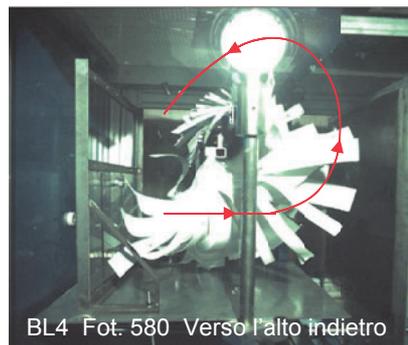
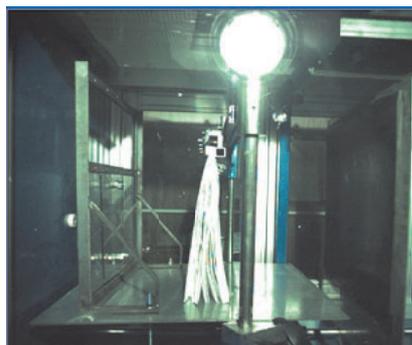


Figura 38. Prova positiva Assemblaggi Poliestere 20 strati h= 400 mm prima (A) e dopo l'impatto (B)

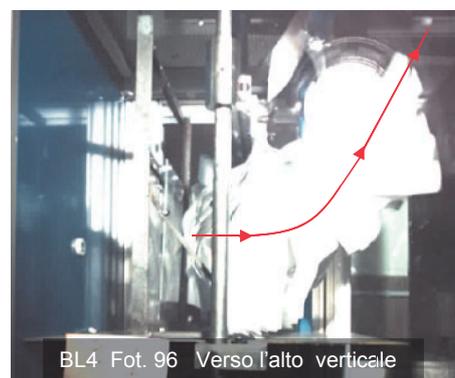


Figura 39. Prova positiva Assemblaggio Poliestere 20 strati h=400 mm prima (A) e dopo l'impatto (B)

Prove positive su assemblaggio h =300 mm (Codice BL3)

L'assemblaggio in prova è costituito da 16 strati di Poliestere di altezza pari a 300 mm con strisce di 60 mm, sfalsate di 1/2 lunghezza, di spessore del singolo strato pari a 0.8 mm, per uno spessore totale di 12.8 mm.

Sono state effettuate 5 prove con esito positivo. In tre di queste prove il proiettile, avvolto dalle cortine, viene sufficientemente deviato in verticale verso l'alto (vedi fig. 40). Nella quarta prova cade in basso entro 400 mm con tempi di ritenzione del proiettile pari a circa 300 ms (vedi fig. 41) mentre nella quinta prova viene proiettato all'indietro (vedi fig. 42).

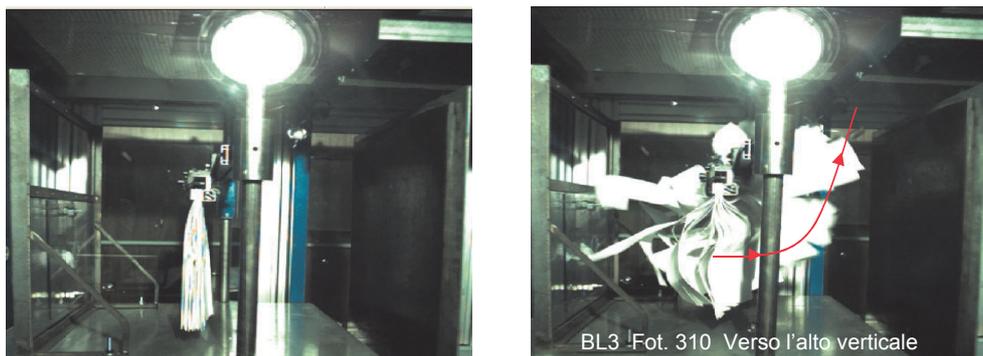


Figura 40. Prova positiva Assemblaggio Poliestere 20 strati h=300 mm prima (A) e dopo l'impatto (B)



Figura 41. Prova positiva Provino BL3 Poliestere 20 strati h=300 mm prima (A) e dopo l'impatto (B)

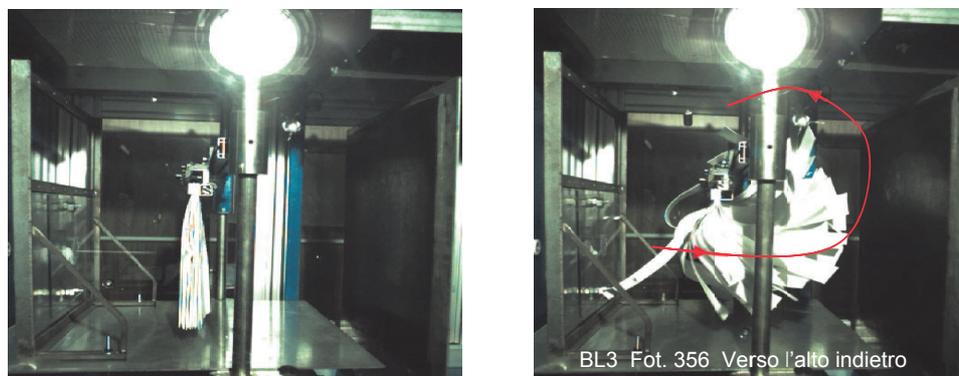


Figura 42. Prova positiva Assemblaggio Poliestere 20 strati h=300 mm prima (A) e dopo l'impatto (B)

Prove positive su assemblaggio h= 200 mm (Codice BL2)

L'assemblaggio in prova è costituito da 16 strati di Poliestere di altezza pari a 200 mm con strisce di 60 mm, sfalsate di 1/2 lunghezza, di spessore del singolo strato pari a 0.8 mm, per uno spessore totale di 12.8 mm. Sono state effettuate 5 prove con esito positivo. Nelle prime tre il proiettile viene rallentato dalle cortine e cade entro i 400 mm permessi (vedi fig. 43).

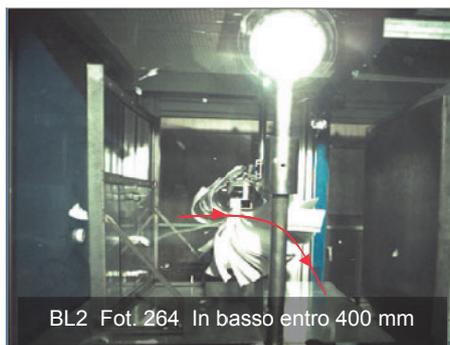


Figura 43. Prove positive Assemblaggio in poliestere h= 200 mm prima (A) e dopo l'impatto (B)

Nelle due prove successive è deviato in verticale verso l'alto senza toccare il piano di riferimento (vedi fig. 44).

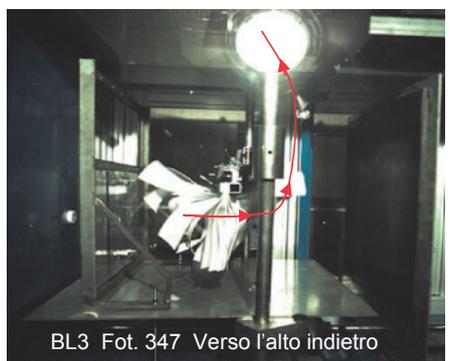


Figura 44. Prove positive Assemblaggio in poliestere h= 200 mm prima (A) e dopo l'impatto (B)

Risultati

Anche per le cortine in poliestere, per lo studio del fenomeno e per l'interpretazione dei risultati, vengono fatte considerazioni che riguardano la velocità e la traiettoria del proiettile, la deformazione di strati e strisce dell'assemblaggio ed eventuali danni permanenti (deformazioni, lacerazioni, strappi) sul tessuto. Come per la fibra aramidica, si è riscontrato soltanto uno schiacciamento della superficie delle prime strisce in corrispondenza del punto d'impatto del proiettile. Per quanto riguarda la deformazione della disposizione delle bandelle causata dall'urto e dal passaggio del proiettile, anche per questo materiale si rilevano i rigonfiamenti ed il moto disordinato delle strisce che contribuiscono all'intrappolamento ed alla dispersione dell'energia. Allo stesso modo tale

fenomeno è più accentuato per altezze delle cortine di 400 mm e 300 mm. Si riscontra che nel poliestere risulta più frequente la proiezione del proiettile dopo l'urto in direzione verticale verso l'alto, soprattutto per gli assemblaggi di altezza pari a 400 mm e 300 mm.

Il rallentamento del proiettile e la sua caduta entro 400 mm di distanza tra l'assemblaggio ed il piano di riferimento si è verificato solo per altezze di cortine inferiori a 300 mm e con maggiore frequenza in quelle di altezza pari a 200 mm: ciò potrebbe essere giustificato dal fatto che la lunghezza di tali protezioni agisce più rallentando il proiettile che intrappolandolo.

In figura 45 è stata evidenziata la dipendenza della variabile (y), traiettoria verso il basso dalla variabile (x), P_{1s}/P_{pr} , data dal rapporto di peso tra il singolo strato di cortina e il peso del proiettile. Nella stessa figura è stato evidenziato un valore di $R^2 = 1$, che avvalorata questa relazione. In tabella 11 sono riportati i valori di (x) per le cortine di tipo B (poliestere).

| Altezza mm | Peso di uno strato g | P_{1s}/P_{pr} |
|------------|----------------------|-----------------|
| 200 | 86 | 0,86 |
| 300 | 128 | 1,28 |
| 400 | 171 | 1,71 |

Tabella 11. Variabili quantitative del campione di prova per cortine di Tipo B

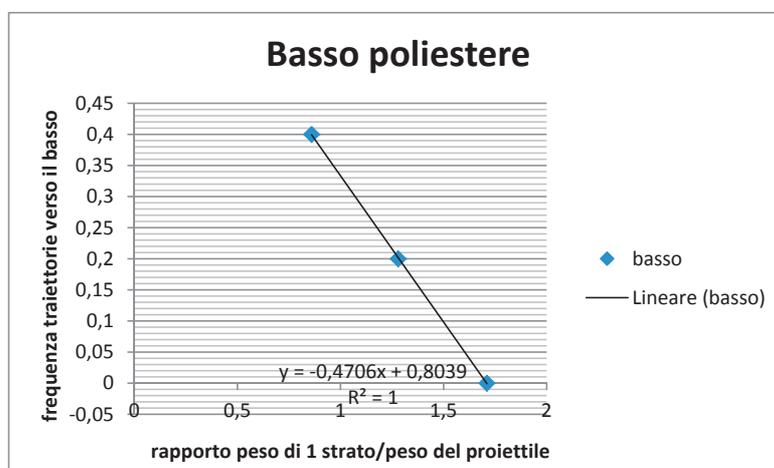


Figura 45. Frequenze di traiettorie verso il basso nelle cortine in poliestere

Per la stima qualitativa della velocità del proiettile, si rimanda a quanto già espresso per le fibre aramidiche e per la sperimentazione in generale.

Si nota che per le cortine in poliestere di altezza pari a 400 mm è stato necessario utilizzare 20 strati per arrestare il proiettile di prova mentre per le fibre aramidiche ne erano sufficienti 16: occorre precisare che queste ultime erano costituite da strati di spessore leggermente superiore.

I risultati delle prove effettuate sulle cortine in poliestere sopra descritte sono riportati sinteticamente nella tabella seguente.

| Assemblaggio | Disposizione | n° strati | H (mm) | Ls (mm) | L _a (mm) | Spessore (mm) 1 strato/ strati | Sfalsamento | velocità (m/s) | Esito positivo | Esito negativo | Descrizione |
|--------------|--------------|-----------|--------|---------|---------------------|-----------------------------------|--------------------|----------------|----------------|----------------|---|
| BL2 | In linea | 16 | 200 | 60 | 450 | 0.80/12.8 | 1/2 L _s | 70 | X | | Il proiettile cade in basso entro 400 mm dal piano di riferimento. |
| | | | | | | | | 70 | X | | Il proiettile cade in basso entro 400 mm dal piano di riferimento. |
| | | | | | | | | 70 | X | | Il proiettile cade in basso entro 400 mm dal piano di riferimento. |
| | | | | | | | | 70 | X | | Il proiettile esce con traiettoria verso l'alto all'indietro. |
| | | | | | | | | 70 | X | | Il proiettile esce con traiettoria verticale verso l'alto. La velocità è media. |
| BL3 | In linea | 16 | 300 | 60 | 450 | 0.80/12.8 | 1/2 L _s | 70 | X | | Il proiettile esce con traiettoria verticale verso l'alto. La velocità è medio bassa. |
| | | | | | | | | 70 | X | | Il proiettile esce con traiettoria verticale verso l'alto. La velocità è medio bassa. |
| | | | | | | | | 70 | X | | Il proiettile esce con traiettoria verticale verso l'alto. La velocità è media. |
| | | | | | | | | 69.1 | X | | Il proiettile cade in basso entro 400 mm dal piano di riferimento. |
| | | | | | | | | 69.2 | X | | Il proiettile esce con traiettoria verso l'alto all'indietro. |
| BL4 | In linea | 16 | 400 | 60 | 450 | 0.80/12.8 | 1/2 L _s | 70 | | X | Il proiettile colpisce il pannello. |
| | | | | | | | | 70 | | X | Il proiettile colpisce il pannello. |
| | | 20 | 400 | 60 | 450 | 0.80/16 | 1/2 L _s | 70 | X | | Il proiettile esce con traiettoria verso l'alto all'indietro. |
| | | | | | | | | 70 | X | | Il proiettile esce con traiettoria verso l'alto all'indietro. |
| | | | | | | | | 70 | X | | Il proiettile esce con traiettoria verticale verso l'alto. La velocità è medio bassa. |
| | | | | | | | | 70 | X | | Il proiettile esce con traiettoria verticale verso l'alto. La velocità medio bassa. |
| | | | | | | | | 70 | X | | Il proiettile esce con traiettoria verso l'alto all'indietro. |

Tabella 12. Esito degli assemblaggi in linea in Poliestere

10.2 Assemblaggi ad angolo

Sulle macchine fora-fresatrici a controllo numerico per la lavorazione del legno è possibile la disposizione delle cortine anche in configurazioni differenti da quella in linea, per esempio ad angolo o circolare. In sede normativa è emersa l'esigenza di controllare il livello di sicurezza di questo tipo diverso di assemblaggi, verificando la capacità di trattenere parti di utensili o di pezzi in lavorazione proiettati verso l'esterno della macchina. Per tale motivo si è ritenuto opportuno effettuare in questa sede alcune prove, sia per avere le prime indicazioni sull'argomento sia per impostare la futura attività di ricerca in cui tali aspetti verranno approfonditi.

In questo contesto è stata presa in considerazione la configurazione ad angolo nella quale il bersaglio si trova sulla bisettrice dell'angolo stesso ed al centro di una singola striscia, con le modalità di prova già indicate al par. 5. I materiali adottati per le prove sono gli stessi di quelli sopra descritti, cioè la fibra aramidica tipo A ed il poliestere tipo B, per altezze utili delle cortine pari a 200 mm. Il proiettile impiegato è sempre quello di forma troncoconica speciale, proiettato dal sistema di sparo ad azoto compresso alla velocità di 70 m/s. Il supporto impiegato, visibile nelle figg. 46 e 47, è costituito da due barre di acciaio piegate ad angolo. Le cortine vengono vincolate al supporto tramite viti passanti che le serrano con elementi piatti di contrasto. Il supporto è dotato di elementi per l'aggancio alla traversa mobile all'interno della camera di prova, davanti alla bocca del cannone a gas compresso.

10.2.1 Prove su assemblaggio $h=200$ mm ad angolo semplice (Codice AAL2)

L'assemblaggio in prova è costituito da 16 strati di cortine disposte ad angolo, altezza $h=200$ mm, con strisce di 60 mm, sfalsate di $1/2$ lunghezza di spessore pari a 0.85 mm, e spessore totale pari a 13.6 mm, in fibra aramidica di tipo A. Lo schema di prova è quello di seguito riportato nella figura 46, già descritto e qui ripresentato per comodità di trattazione. La figura 47 mostra l'immagine di un assemblaggio di prova ad angolo.

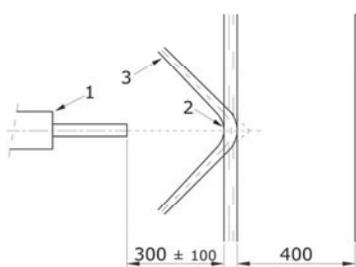


Figura 46. Schema di prova ad angolo



Figura 47. Immagine di assemblaggio di prova ad angolo

Sono state effettuate solo due prove perché entrambe hanno avuto esito negativo, in quanto il proiettile non è stato rallentato e, a velocità *molto elevata*, ha colpito violentemente il piano di riferimento π , rimbalzando chiaramente su di esso, come indicato nella figura 48 seguente.

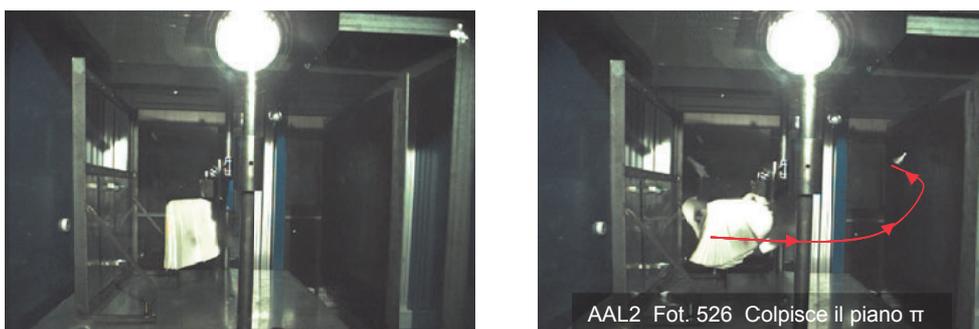


Figura 48. Prova negativa Assemblaggio aramidica h= 200 mm prima (A) e dopo l'urto (B)

Questo risultato ha evidenziato che le cortine ad angolo, almeno nella configurazione descritta, non sono in grado di trattenere il proiettile e di rallentarne la corsa.

Aumentare il numero di strati è stato giudicato inutile e non conveniente dal punto di vista dell'utilizzo pratico sulle macchine. Parimenti, a seguito di questi risultati negativi, non sono stati sottoposti a prova assemblaggi analoghi in poliestere.

Rispetto alle cortine disposte in linea, in quelle ad angolo non si verifica la dissipazione dell'energia del proiettile, dissipazione associabile alla deformazione delle cortine stesse ed al loro moto disordinato. Per chiarire questo concetto si riportano due fotogrammi, entrambi relativi al momento in cui il proiettile ha colpito le cortine ed esce da esse. Nel primo (fig. 49 A) relativo a cortine in linea è visibile la configurazione disordinata di tutto l'assemblaggio coinvolto nell'urto. Nel secondo (fig. 49 B), relativo a cortine ad angolo, è chiaramente visibile che la struttura dell'assemblaggio è variata in forma del tutto minima.

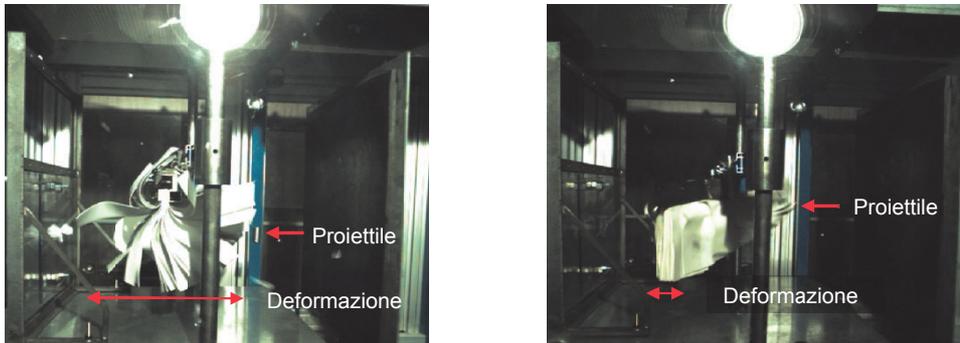


Figura 49. Massima deformazione assemblaggio in linea (A) e ad angolo (B)

Nella tabella seguente sono riportati sinteticamente i risultati delle prove descritte avendo indicato con S_1 lo spessore di una striscia e con S_{tot} lo spessore totale dell'assemblaggio.

| Assemblaggi ad angolo Fibra aramidica Tipo A | | Strati | S_1/S_{tot} mm | Esito |
|---|--------|--------|------------------|----------|
| Test 1 | 200 mm | 16 | 0,85/13,6 | Negativo |
| Test 2 | 200 mm | 16 | 0,85/13,6 | Negativo |

Tabella 13. Esito delle prime prove ad angolo semplice in fibra Aramidica

10.2.2 Prove su assemblaggio $h = 200$ mm ad angolo/linea

Considerato che la disposizione delle cortine ad angolo, così come descritta e testata nel paragrafo precedente, si è rivelata inadatta a trattenere il proiettile di prova da 100 g, si è proceduto a modificare l'assemblaggio inserendo una variante alla configurazione ad angolo, per sfruttare l'efficacia della disposizione in linea. La variante consiste nel disporre ulteriori strati di cortine in linea, in aggiunta all'angolo, perpendicolarmente alla direzione di sparo ed alla bisettrice dell'angolo stesso, così da costruire un assemblaggio assimilabile alla forma di prisma triangolare isoscele, secondo lo schema costruttivo riportato nella fig. 50 seguente.

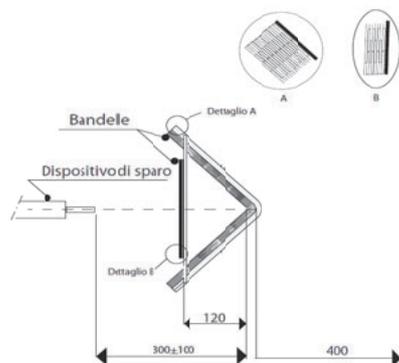


Figura 50. Configurazione ad angolo/linea

Il supporto ad angolo, descritto nel paragrafo precedente, è stato di conseguenza modificato, saldando una barra di acciaio, a 120 mm dal vertice e perpendicolarmente alla bisettrice dell'angolo (v. figg. 51 A, B, C), in modo tale da potervi applicare, mediante il serraggio di viti ed elementi di contrasto, le cortine in linea.

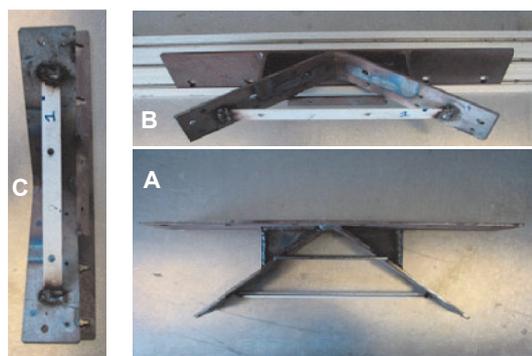


Figura 51. A, B, C Supporto per prove su cortine in configurazione ad angolo

Sono stati sottoposti a prova 5 assemblaggi di cortine rispettivamente in fibra aramidica tipo A (codice AAL2) e poliestere tipo B (codice BAL2). Gli strati disposti ad angolo erano 16 mentre quelli in linea erano 8. Le altre caratteristiche erano: altezza utile pari a 200 mm, larghezza delle strisce di 60 mm, sfalsamento di 1/2 lunghezza, spessore singolo di 1 mm, per un totale di 16 mm per la parte ad angolo e di 8 mm per quella in linea.

È stato utilizzato anche in queste prove il proiettile di forma speciale, di massa pari a 100 g, sparato al centro di una singola striscia centrale alla velocità di 70 m/s.

Le prove hanno dato tutte esito positivo in quanto il proiettile è stato sempre rallentato ed è ricaduto entro i 400 mm di distanza tra l'assemblaggio ed il piano di riferimento senza colpirlo. Nell'immagine che segue (fig. 52), si vede il proiettile che ha appena attraversato la protezione e si appresta a ricadere entro i 400 mm previsti dalla norma dopo aver dissipato del tutto la propria energia. Esso è stato trattenuto sensibilmente dalle cortine (circa 200 ms) prima di essere rilasciato. Si nota che l'impatto ha determinato una fortissima sollecitazione del supporto.



Figura 52. Prova positiva Assemblaggio AAL2 Aramidica h=200 mm prima (A) e dopo l'impatto (B)

Nella tabella seguente sono riportati sinteticamente i risultati delle prove descritte.

| Assemblaggio | Disposizione | n° strati | H (mm) | Ls (mm) | spessore s (mm) | sfalsamento | velocità (m/s) | Esito positivo | Esito negativo | Descrizione |
|--------------|--------------|-----------|--------|---------|-----------------|-------------------|----------------|----------------|----------------|--|
| AAL2 | Angolo/linea | 16/8 | 200 | 60 | 1 | $\frac{1}{2} L_s$ | 70 | X | | Il proiettile cade entro 400 mm dal piano di riferimento |
| | | | | | | | 70 | X | | Il proiettile cade entro 400 mm dal piano di riferimento |
| | | | | | | | 70 | X | | Il proiettile cade entro 400 mm dal piano di riferimento |
| | | | | | | | 70 | X | | Il proiettile cade entro 400 mm dal piano di riferimento |
| | | | | | | | 70 | X | | Il proiettile cade entro 400 mm dal piano di riferimento |
| BAL2 | Angolo/linea | 16/8 | 200 | 60 | 1 | $\frac{1}{2} L_s$ | 70 | X | | Il proiettile cade entro 400 mm dal piano di riferimento |
| | | | | | | | 70 | X | | Il proiettile cade entro 400 mm dal piano di riferimento |
| | | | | | | | 70 | X | | Il proiettile cade entro 400 mm dal piano di riferimento |
| | | | | | | | 69 | X | | Il proiettile cade entro 400 mm dal piano di riferimento |
| | | | | | | | 70 | X | | Il proiettile cade entro 400 mm dal piano di riferimento |

Tabella 14. Esito delle prove ad angolo/linea per fibra Aramidica tipo A e Poliestere tipo B

11. Contributo alla revisione della norma UNI EN 848-3

Contribuire alla revisione della norma EN 848-3 “Sicurezza delle macchine per la lavorazione del legno – Foratrici su un solo lato con utensile rotante – Parte 3: foratrici e fresatrici a controllo numerico” era uno degli obiettivi principali della presente ricerca. Tale contributo, come già accennato, è stato distribuito su due edizioni corrispondenti ai documenti EN 848-3:2007+A2:2009 ed EN 848-3:2012.

Il gruppo di lavoro europeo del CEN/TC142 “Macchine per la lavorazione del legno – Sicurezza”, per la revisione della UNI EN 848-3, ha stabilito, sulla base dei risultati della sperimentazione effettuata, di modificare alcuni requisiti delle procedure di prova delle cortine di protezione impiegate nelle macchine fora-fresatrici a controllo numerico per la lavorazione del legno.

I risultati della presente ricerca introdotti nell’ultima revisione della norma riguardano: le attrezzature di prova, i materiali e le configurazioni, la valutazione dei risultati delle prove.

Relativamente alle *attrezzature di prova* la revisione delle procedure ha riguardato:

- l’utilizzo di un proiettile di forma tronco-conica ad impronta quadrata di 100 g (v. fig.13) che colpisce a velocità di 70 ms^{-1} il punto-bersaglio della cortina. L’utilizzo di questo tipo di proiettili costituisce una condizione più restrittiva, sotto il profilo della sicurezza, rispetto a quella derivante dall’utilizzo di proiettili aventi forma appuntita;
- l’introduzione di un sistema per evitare che il flusso dell’aria, necessario alla propulsione del proiettile, influenzi il comportamento delle cortine in prova. Questo può essere per esempio ottenuto mediante una barriera forata in plexiglass, disposta tra la bocca del cannone e lo strato di cortine (v. fig. 9). Tale sistema si è dimostrato efficace a contenere l’effetto di disturbo dovuto all’aria fuoriuscita dalla canna del dispositivo di sparo del proiettile. Più barriere forate in serie si utilizzano e migliore sarà il risultato: nelle nostre prove ne sono state utilizzate due;
- la disposizione delle cortine ad una distanza comprese tra 200 e 400 mm (300 ± 100 mm) dalla bocca del cannone.

Per quanto riguarda i *materiali e le configurazioni* da sottoporre a prova, la revisione della norma ha comportato le seguenti modifiche:

- la possibilità di utilizzare qualsiasi materiale purché superi il test dell’Allegato B nella versione del 2012 e dell’ Allegato C in quella del 2009. Nella versione del 1999 era ammesso utilizzare poliammide (PA), polipropilene (PP), poliuretano (PU), cloruro di polivinile (PVC), o materiali con caratteristiche meccaniche almeno pari. La norma del 2007 prevedeva solo il PVC;
- la larghezza di ogni singola striscia di cortina non deve essere superiore ad 80 mm (versioni del 2009 e del 2012). Nella versione del 1999 e del 2007 tale larghezza era compresa fra 40 mm e 60 mm;
- le cortine devono essere costituite da almeno sei strati; la sovrapposizione delle strisce deve essere pari ad 1/2 (versione 2009 e 2012) in quanto la sperimentazione ha dimostrato che è la più efficace. Nella versione del 1999 le cortine dovevano essere

costituite da almeno due strisce, la sovrapposizione era pari ad $1/n$, dove n erano gli strati utilizzati e lo spessore totale doveva essere pari a 10 mm. Nella versione del 2007 il numero minimo di strati doveva essere di 3, sovrapposti di $1/3$ o 4 sovrapposti di $1/2$, mentre per un numero di strati superiore a 4 lo sfalsamento doveva essere $1/2$.

- le configurazioni ad angolo e circolari, nelle versioni della norma del 2009 e del 2012, devono essere provate.

Per quanto riguarda la *valutazione dei risultati*, si evidenzia quanto segue:

- Rispetto alle precedenti versioni della norma del 2007 e del 2009, nelle quali il test era ritenuto positivo se il proiettile non attraversava il piano verticale di riferimento, situato a distanza di 400 mm dallo strato di cortine, nella versione del 2012 si definisce meglio il requisito, anche con l'ausilio di figure chiarificatrici. Secondo la norma EN 848-3:2012 il test è considerato valido quando il proiettile cade sul piano orizzontale passante per il bordo inferiore delle cortine, entro 400 mm dal piano verticale di riferimento. Le figure 53 e 54 seguenti, tratte dalla norma, chiariscono quanto detto ed evidenziano soprattutto come un proiettile, diretto su una traiettoria verticale, determini un esito positivo della prova.

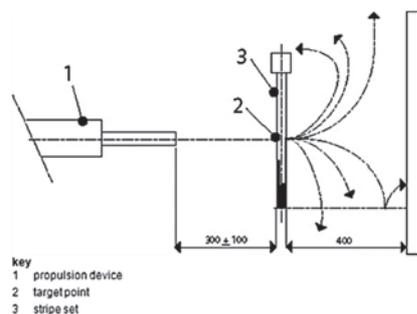


Figura 53. Risultato positivo

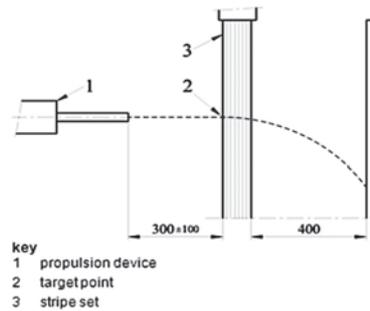


Figura 54. Risultato negativo

- Rimane invariato il criterio secondo il quale si considerano superate le prove che forniscono 5 risultati positivi su 5.
- La nuova norma EN 848-3:2012 richiede che le cortine superino il test indicato nell'Allegato B. È stato eliminato il requisito introdotto nella versione del 2007, valido per cortine in PVC, secondo il quale una cortina era conforme alla norma se era identica ad una che aveva superato il test e conteneva un numero di strisce sovrapposte maggiore o aveva strisce più larghe o un'altezza inferiore.

| EN 848-3: 1999 | EN 848-3: 2007 | EN 848-3: 2007 + A1:2009 | EN 848-3: 2012 |
|---|---|---|---|
| Nessun test è richiesto | Allegato C – Test d’impatto | Allegato C – Test d’impatto | Allegato B – Test d’impatto |
| la cortina deve essere realizzata in poliammide (PA), polipropilene (PP), poliuretano (PU), cloruro di polivinile (PVC), o materiale con caratteristiche meccaniche almeno pari | la cortina deve essere realizzata in PVC. | il materiale e le cortine di prova devono essere sottoposte a prova di impatto secondo l'allegato C | il materiale e le cortine di prova devono essere sottoposte a prova di impatto secondo l'allegato B |
| | la prova di impatto deve essere svolta con un proiettile di 20g di forma troncoconica che colpisce a velocità di 70 ms ⁻¹ in un punto fissato dalle procedure di prova. | la prova di impatto deve essere svolta con un proiettile di 100g di forma troncoconica ad impronta quadrata, che colpisce a velocità di 70 ms ⁻¹ in un punto fissato dalle procedure di prova. | la prova di impatto deve essere svolta con un proiettile di 100g di forma troncoconica ad impronta quadrata, che colpisce a velocità di 70 ms ⁻¹ in un punto fissato dalle procedure di prova. |
| la cortina deve essere composta da strisce con uno spessore totale di 10 mm e larghezza compresa fra 40 mm e 60 mm. | la cortina deve essere composta da strisce di larghezza compresa fra 40 mm e 60 mm | la cortina deve essere composta da strisce di larghezza massima di 80 mm | la cortina deve essere composta da strisce di larghezza massima di 80 mm |
| la cortina deve essere costituita almeno da due strati sovrapposti dello stesso spessore. | le cortine devono essere costituite di minimo 3 strati con sfalsamento di 1/3 o 4 strati con sfalsamento pari ad ½. Per un numero di strati superiore a 4 lo sfalsamento deve essere ½. | le cortine devono essere costituite di minimo 6 strati. | le cortine devono essere costituite di minimo 6 strati. |
| le cortine devono essere assemblate in modo che in quelle a due strati le strisce siano sovrapposte per metà, in quelle a tre strati per 1/3 e così via. | | le cortine devono essere sovrapposte di un mezzo di larghezza | le cortine devono essere sovrapposte di un mezzo di larghezza |
| | | Le configurazioni di cortine ad angolo e circolari devono essere sottoposte a prova. | Le configurazioni di cortine ad angolo e circolari devono essere sottoposte a prova. |
| | Distanza dalla bocca del cannone pari a 250 ± 10 mm). | Distanza dalla bocca del cannone compresa tra 200 e 400 mm (300 ± 100 mm) | Distanza dalla bocca del cannone compresa tra 200 e 400 mm (300 ± 100 mm) |
| | | | L'effetto del flusso d'aria dovuto alla propulsione del proiettile deve essere evitato p.e. con una barriera dotata di un foro per il suo passaggio |
| | Esito positivo del test se il proiettile attraversa il piano verticale situato a 400 mm dalle cortine. | Esito positivo del test se il proiettile attraversa il piano verticale situato a 400 mm dalle cortine. | Esito positivo del test se il proiettile cade sul piano orizzontale passante per il bordo inferiore delle cortine, entro 400 mm dal piano verticale di riferimento. Fornite figure chiarificatrici |

Tabella 15. Quadro sinottico: revisioni della norma EN 848-3 per il test d’impatto e le caratteristiche delle cortine.

12. Conclusioni

Lo studio effettuato conferma la sostanziale efficacia delle cortine in materiali compositi e poliestere, nel trattenere parti di utensili proiettate a velocità dell'ordine di 70 m/s. Le prove svolte hanno dimostrato che le cortine in materiale composito da 200, 300, 400 mm di altezza, nelle configurazioni in linea possono trattenere o rallentare la corsa di una massa di 100 grammi proiettata ad una velocità di 70 ms^{-1} .

Nelle prove è stato analizzato il comportamento dinamico delle cortine, la traiettoria del proiettile e la deformazione temporanea dell'assemblaggio.

È stato osservato che dopo l'impatto si verificano contemporaneamente due fenomeni:

- il rigonfiamento della parte centrale dell'assemblaggio nella zona colpita dal proiettile;
- l'apertura a ventaglio alla base delle cortine.

L'apertura a ventaglio alla base ed il rigonfiamento delle cortine sembrano dipendere dall'altezza dell'assemblaggio. Le immagini tratte dalle riprese, effettuate durante le prove, mostrano che le cortine da 200 mm (fig. 55 a sinistra), più corte, si aprono a ventaglio alla base in tempi più brevi rispetto alle altre. Le cortine più alte, da 400 mm (fig. 55 a destra), si aprono invece più lentamente alla base e più velocemente al centro, determinando un rigonfiamento dell'assemblaggio.



Figura 55. Deformazione in caso di assemblaggio 16 strati $h=200 \text{ mm}$ e $h=400 \text{ mm}$

Ai fini dell'efficacia delle cortine, questo rigonfiamento sembra essere positivo, in quanto causa sia di una maggiore dissipazione di energia del proiettile sia del suo intrappolamento nella distribuzione disordinata di strisce. In questo modo, in caso di esito positivo delle prove, in funzione del livello di energia cinetica dispersa nell'ammasso di strisce del rigonfiamento e del grado di intrappolamento del proiettile si può verificare:

1. La caduta del proiettile verso il basso

- entro i 400 mm dal piano di riferimento π se predomina la dispersione dell'energia e le cortine si aprono più velocemente alla base mentre il rigonfiamento risulta molto ridotto. Questo fenomeno si riscontra negli assemblaggi più corti di altezza utile pari a 200 mm;

- *sotto le cortine* se il proiettile è stato catturato e/o la sua energia completamente dispersa. Questo fenomeno può verificarsi per tutte le altezze.

La caduta del proiettile *verso il basso, entro i 400 mm dal piano di riferimento π* , si è verificata con la stessa frequenza nelle cortine in poliestere e in aramidica (30% v. Allegato I). Si è inoltre riscontrata una maggiore frequenza della stessa traiettoria, nelle cortine di altezza 200 mm (v. Allegato I). Per la traiettoria verso il basso nei due materiali, è stato approfondito lo studio delle rette di regressione relative all'altezza e al rapporto di peso cortina/proiettile. Si è riscontrato che nel poliestere, è possibile ipotizzare una relazione lineare negativa con le variabili *altezza* e *rapporto di peso* che è giustificata da entrambi i valori di $R^2 = 1$ (v. Allegato II e Allegato III).

2. La deviazione del proiettile in *direzione verticale verso l'alto*, in modo tale da non intercettare il piano di riferimento. Questo avviene quando la dispersione di energia è ridotta, ma il proiettile viene sufficientemente intrappolato e segue le cortine nella loro rotazione intorno all'asse del supporto, abbandonandole quando si trova sulla traiettoria verticale. Il fenomeno è caratteristico delle cortine di altezza utile pari a 300 mm; la traiettoria alto verticale si è verificata con la stessa frequenza nei due materiali (30% v. Allegato I). È stata invece riscontrata una maggiore frequenza della stessa, nelle cortine di altezza 300 mm. Per i due materiali e per la traiettoria *verticale verso l'alto*, è stato approfondito lo studio delle rette di regressione altezza- traiettoria e rapporto di peso cortina/proiettile - traiettoria. Si è riscontrato che non è possibile ipotizzare né una relazione con l'altezza, né una relazione con i rapporti di peso (v. Allegato II e Allegato III). Ciò nonostante, le osservazioni portano ad indicare che queste traiettorie si riscontrano più frequentemente nelle altezze superiori a 200 mm, anche se non è stata riscontrata una legge di dipendenza statistica lineare.
3. La deviazione del proiettile *verso l'alto oltre la perpendicolare e la sua proiezione indietro*. In questo caso predomina l'intrappolamento ed il proiettile segue le cortine nella loro rotazione intorno all'asse del supporto, abbandonandole quando si trova oltre la verticale. La traiettoria *verso l'alto indietro* si è verificata con frequenza pressoché uguale, nei due materiali (40%). È stata invece riscontrata una maggiore frequenza di questa traiettoria, nel caso di cortine di altezza 400 mm (v. Allegato I). Per i due materiali e per la traiettoria *verso l'alto indietro*, è stato approfondito lo studio delle rette di regressione altezza – traiettoria e rapporto di peso cortina/proiettile-traiettoria. Si è riscontrato che solo nel caso di cortine in aramidica e solo per il rapporto di peso cortina/proiettile-traiettoria, è possibile ipotizzare una relazione lineare positiva, giustificata da un valore di $R^2 = 0.96$ (v. Allegato II e Allegato III).

L'esito negativo della prova è associato invece ad un insufficiente cedimento di energia e ad uno scarso intrappolamento del proiettile il quale, conservando elevata velocità, prosegue *colpendo il piano* di riferimento π , fisicamente installato a 400 mm dall'assemblaggio, oppure attraversando la sua immaginaria giacitura, se la sua traiettoria verso l'alto non è verticale.

Per quanto riguarda i danneggiamenti, non si sono mai verificati rotture o strappi sensibili con il proiettile troncoconico ad impronta quadrata. Nel punto di impatto è visibile sul

materiale solo lo schiacciamento determinato nel punto soggetto all'urto, con i contorni dell'impronta fortemente marcati, come indicato in figura 56. L'impronta è risultata variabile in funzione del materiale impiegato nelle prove. Tale fenomeno dissipativo consiste in una deformazione tipica del materiale che deforma la trama e l'ordito del composito originale (v. figg. a pag. 38).



Figura 56. Impronta del proiettile nel punto d'impatto

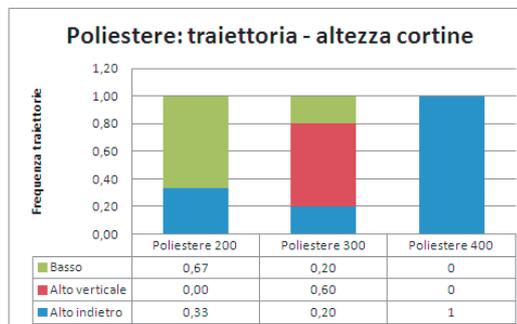
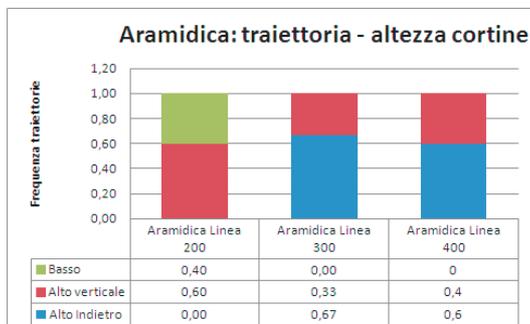
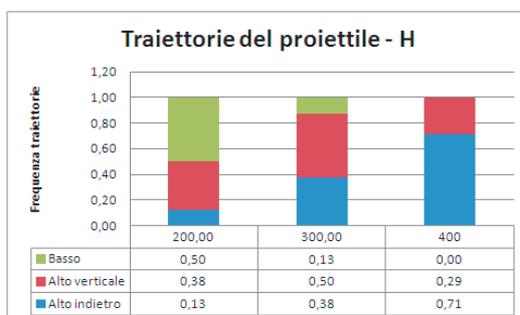
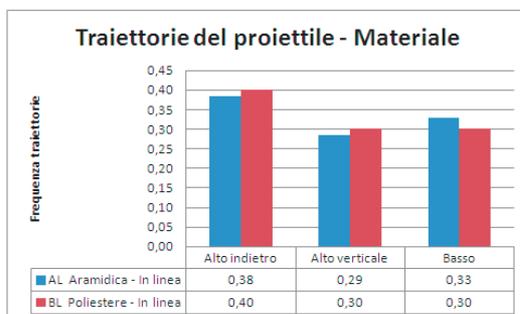
Inoltre per quanto riguarda il comportamento delle cortine in fibre aramidiche e poliestere si possono sottolineare i seguenti aspetti:

- la riduzione dell'altezza non aumenta l'efficacia delle cortine come invece avveniva per il PVC;
- l'efficacia delle cortine aumenta con la larghezza delle strisce, almeno fino ad 80 mm.

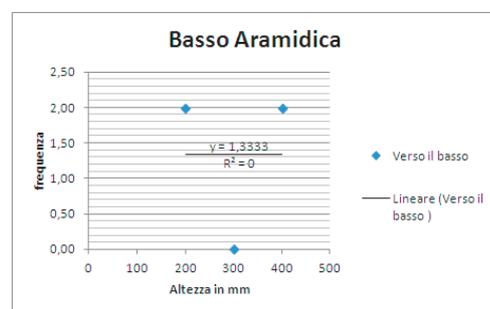
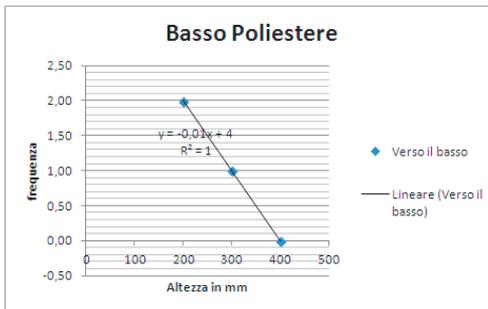
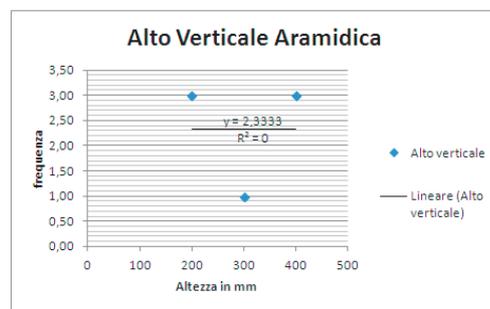
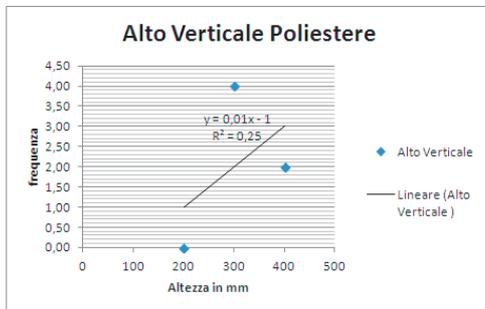
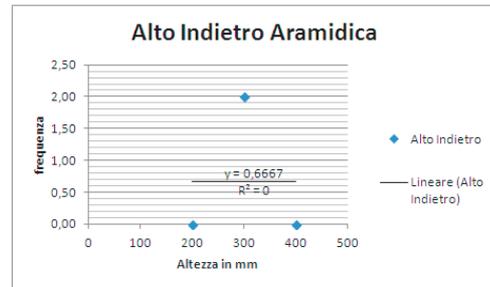
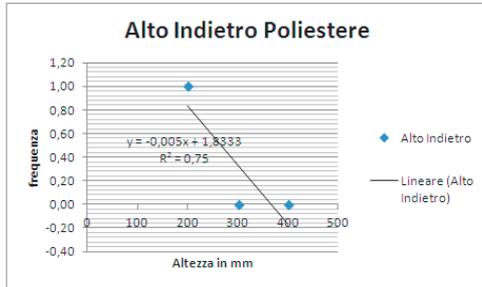
Questi risultati sono stati presentati e discussi in sede normativa, all'interno del gruppo di lavoro del CEN/TC142 per la sicurezza delle macchine da legno, ed hanno contribuito alla revisione della norma EN 848-3.

I primi saggi effettuati su assemblaggi ad angolo, con altezza utile di 200 mm, hanno dimostrato che questo costituisce un punto debole per la protezione, inadatto a trattenere frammenti proiettati fuori dalla macchina. Per ottenere risultati positivi è stato necessario adottare l'accorgimento di frapporre, sulla traiettoria del proiettile, alcuni strati di cortine in linea. Saranno necessari ulteriori test per completare lo studio e raccogliere le necessarie informazioni non solo sugli assemblaggi ad angolo ma anche su quelli di forma circolare. Ulteriori sviluppi, per la futura attività di ricerca, riguardano lo studio del comportamento di cortine di altezza superiore a 400 mm, al momento non previste dalla norma EN 848-3, ma proposte da diversi costruttori europei, che progettano di realizzare macchine più grandi dotate di conseguenza di aperture superiori a quelle sinora considerate. Parallelamente procede la ricerca di nuovi materiali che abbiano prestazioni superiori a quelle sinora rilevate garantendo una sicurezza sempre più alta per coloro che operano sulle macchine.

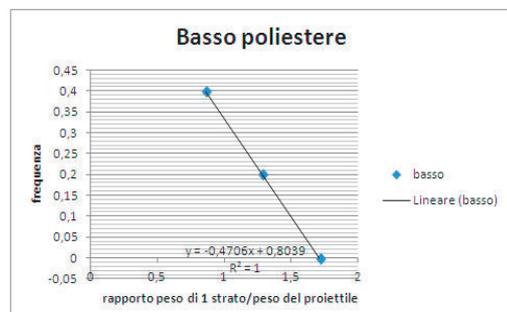
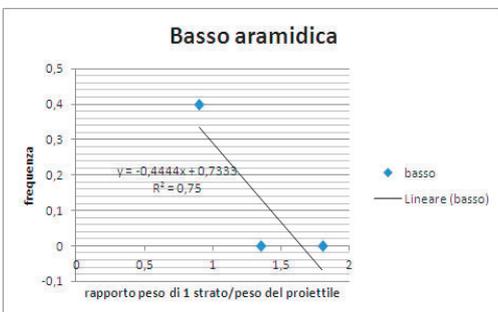
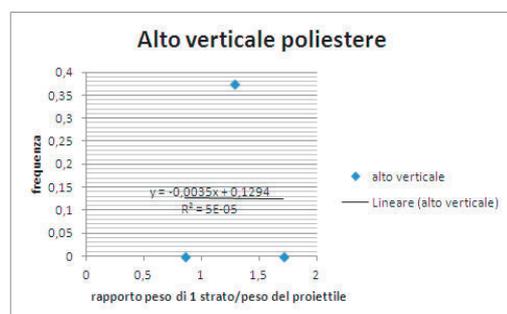
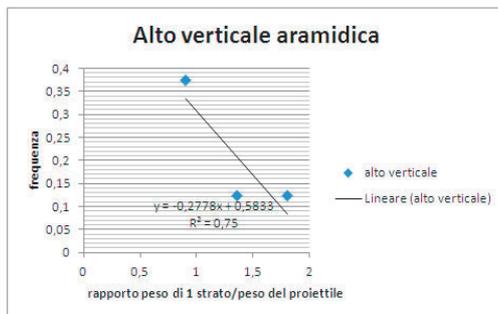
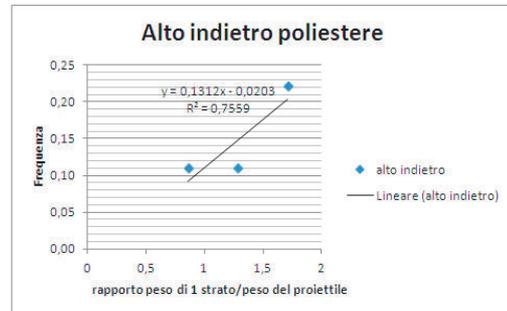
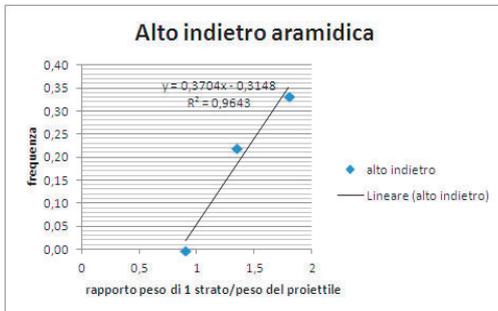
Allegato I – Traiettoria del proiettile per tipo di materiale e per altezza delle cortine.



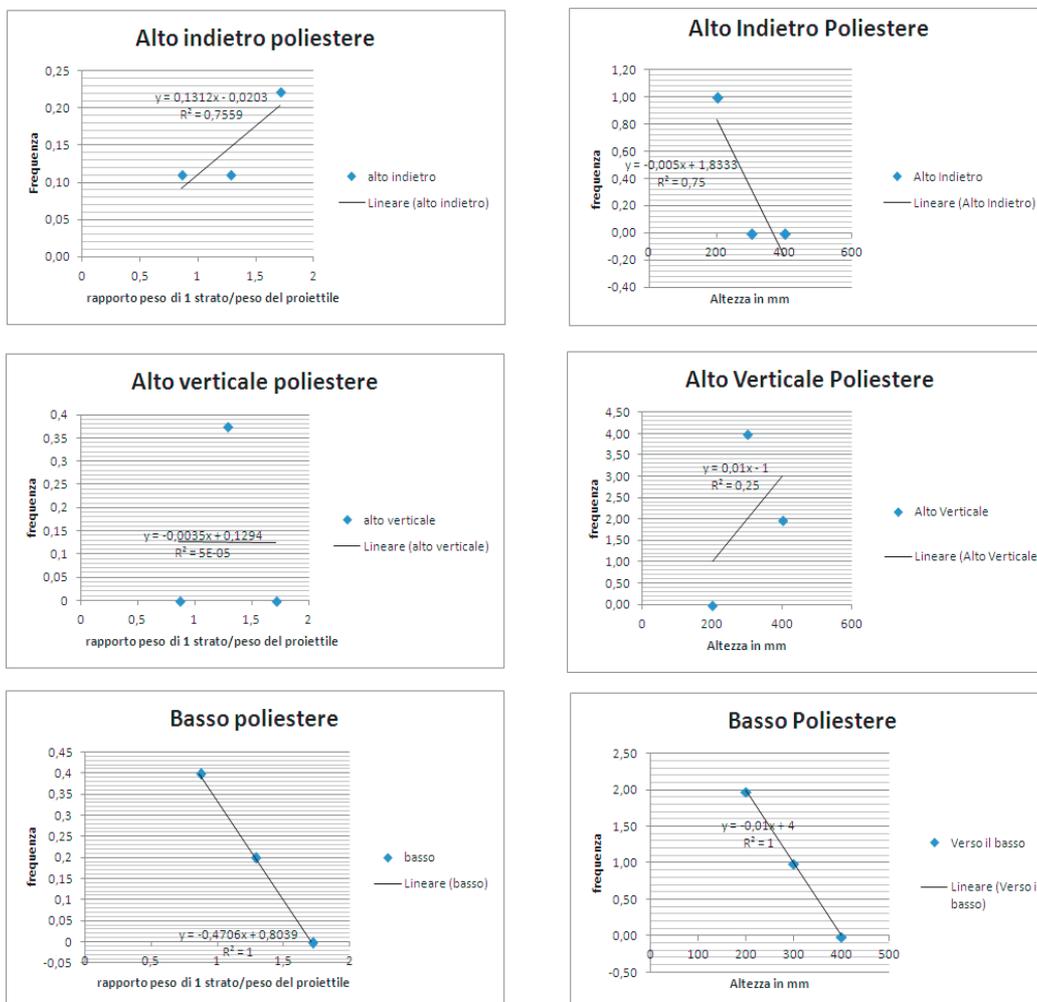
Allegato II – Rette di regressione Altezza - Traiettorie nel poliestere e nell'aramidica.



Allegato III – Rette di regressione Rapporto peso - traiettorie Aramidica a sinistra e rapporto peso - traiettorie Poliestere a destra.

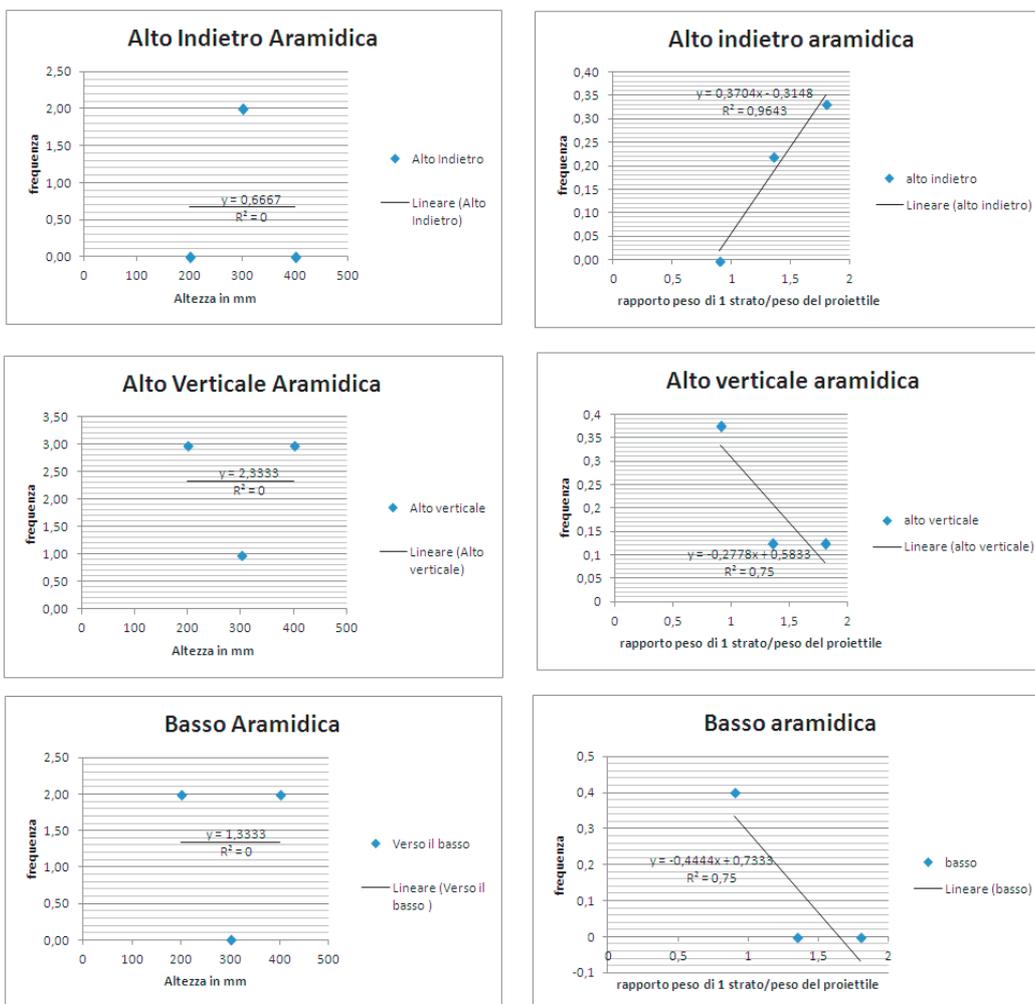


Allegato IV – Poliestere - Confronto regressione Traiettorie in funzione di Rapporto di peso e Altezza.



Questo confronto, fatto per il poliestere, evidenzia il diverso tipo di relazione che si stabilisce se si considera la variabile altezza o il rapporto di peso.

Allegato V – Aramidica - Confronto regressione Traiettorie in funzione di Altezza e Rapporto di peso.



Questo confronto, fatto per l'aramidica, evidenzia il diverso tipo di relazione che si stabilisce se si considera la variabile altezza o il rapporto di peso.

13. Bibliografia

UNI EN 848-3: 2002 Safety of woodworking machines – One side moulding machines with rotative tool – Part 3: Numerical control (NC) boring machines and routing machines.

UNI EN 848-3: 2010 Sicurezza delle macchine per la lavorazione del legno – Fresatrici su un solo lato con utensile rotante – Parte 3 Foratrici e fresatrici a controllo numerico

prEN 848-3: 2011 Safety of woodworking machines – One side moulding machines with rotating tools – Part 3. NC boring and routing machines. (non risulta pubblicata dall'UNI, norma pubblicata solo da EN).

EN 848-3: 2012 Safety of woodworking machines One side moulding machines with rotating tool Numerical control (NC) boring machines and routing machines

UNI EN 847-1: 1999 Tools for woodworking – Safety requirements – Part I: milling tools and circular saw blades

UNI EN 847-2: 2001 Tools for woodworking – Safety requirements – Part II: Requirements for the shank of shank mounted milling tools

UNI EN 12415: 2004 Safety of machine tools. Small numerically controlled turning machines and turning centres

UNI EN 13128: 2004 Safety of machine tools – Milling machines (including boring machines)

F. Pera, E. Borzelli, L. Cortis, C. Ratti, L. Rossi The capacity of curtains made from flexible material to contain tool pieces projected at high speed Vol. 1, n. 2, 39-56 Prevenzione Oggi April - June 2005

Heisel. Forschungsthema: Maschinensicherheit bei Bearbeitungszentren der Holzbearbeitung, Schutz gegen berstende Werkzeuge, Stuttgart, 31.01.2007

M. Hegger, Atlante dei materiali, UTET scienze tecniche, Torino, 2006

