



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTÀ DI INGEGNERIA
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Edile – Architettura
Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura

VALUTAZIONE SPERIMENTALE DI GIUNTI ADESIVI VETRO – LEGNO

Experimental evaluation of glass-wood adhesive joints

RELATORE
Prof. Ing. Placido Munafò

LAUREANDO
Gianluca Francioni

Anno Accademico 2023/2024

Indice

1. Introduzione.....	4
2. Materiali.....	7
2.1 Mogano.....	7
2.1.1 DESCRIZIONE GENERALE	7
2.1.2 CARATTERISTICHE DEL MOGANO.....	7
2.1.3 CARATTERISTICHE MECCANICHE.....	9
2.2 Vetro.....	9
2.2.1 DESCRIZIONE GENERALE	9
2.2.2 COS'È IL VETRO	9
2.2.3 PRODUZIONE DEL VETRO	11
2.2.4 PROPRIETÀ MECCANICHE.....	13
2.2.5 PROPRIETÀ TERMICHE.....	14
2.3 Nylon.....	16
2.3.1 DESCRIZIONE GENERALE	16
2.3.2 PROPRIETÀ E CARATTERISTICHE.....	17
2.3.3 PRODUZIONE ED USI INDUSTRIALI	18
2.4 Tessuti di nylon.....	22
2.4.1 PROPRIETÀ E CARATTERISTICHE.....	22
2.4.2 DOVE SONO APPLICATI.....	23
2.4.3 TIPI DI TESSUTI.....	24
2.5 Adesivi	27
2.5.1 RESINA EPOSSIDICA.....	28
3. Stato dell'arte e brevetti	30
3.1 Invisible Window Frame	30

3.2 Sistema di facciata continua per edifici.....	32
4. La sperimentazione	36
4.1 Test sperimentali	39
4.2 Test di taglio su provini Double-Lap	40
4.3 Assemblaggio dei provini Double-Lap	42
5. Risultati sperimentali	48
5.1 Risultati prove di taglio su provini Double-Lap	48
5.2 Modalità di rottura dei provini double-lap	55
6. Discussione dei risultati.....	59
7. Conclusioni.....	61
8. Problematiche aperte	64
9. Appendice	65
9.1 Adesivo A.....	65
9.1 Adesivo B.....	68
10. Bibliografia.....	72
11. Normativa	74
12. Indice delle figure e tabelle.....	75
13. Ringraziamenti	77

1. Introduzione

L'attività svolta con la presente tesi ha riguardato lo studio degli elementi adesivi nella giunzione tra materiali specifici utilizzati nell'ambito edilizio, in particolar modo in quello serramentistico, identificati con vetro e legno.

Questa attività si inserisce all'interno degli studi e della sperimentazione effettuata dal prof. Placido Munafò sui giunti adesivi con collanti strutturali e semi strutturali, con diverse combinazioni di aderendi: vetro-legno, vetro-alluminio, vetro-pultruso (GFRP), vetro-acciaio etc. Il vasto repertorio di combinazioni effettuate nell'attività sperimentale di laboratorio ha permesso di valutare il comportamento meccanico degli adesivi, anche dopo l'invecchiamento, allo scopo di fornire uno strumento utile per la progettazione di componenti edilizi realizzati con giunti di tipo adesivo.

In questo lavoro vengono riportati i risultati di prove sperimentali eseguite su un repertorio di giunti realizzati con differenti materiali (aderendi) uniti con diversi adesivi strutturali.

La tipologia di unione tra elementi, sia dello stesso materiale che di materiali diversi, è una connessione chimica in alternativa alla connessione meccanica.

Prima di iniziare ad illustrare l'attività svolta occorre soffermarsi brevemente sul significato del termine "adesivo" la cui definizione viene fornita da Kinloch [1] nel 1987 come "*materiale in grado di unire due superfici e di resistere alla loro separazione*".

Tale definizione è tuttavia generica in quanto riguarda diversi materiali che sono sottoposti al fenomeno dell'adesione ma in maniera del tutto differente dalla nostra trattazione.

In effetti ad oggi non esiste una definizione specifica per l'adesivo strutturale che possiamo definire come "*uno o più componenti che si legano chimicamente per formare una catena polimerica in grado di resistere a carichi esterni elevati*" [2].

La tecnologia degli adesivi strutturali è molto antica, tuttavia in campo ingegneristico viene applicata solo in anni recenti pertanto lo studio dei meccanismi di adesione e di crisi del giunto sono ad oggi al centro di numerose ricerche scientifiche.

Le tecniche tradizionali di giunzione sono quelle termiche (saldatura) e quelle meccaniche (rivettatura, bullonatura) ed entrambe hanno delle limitazioni dovute o alterazione delle proprietà specifiche dei materiali in corrispondenza della zona interessata alla giunzione o un

trasferimento dei carichi solo in determinati punti.

Gli adesivi strutturali invece permettono una giunzione tra materiali diversi con una uniforme distribuzione dei carichi su aree estese e con un peso ridotto rispetto alle giunzioni meccaniche, migliore resistenza alla corrosione, impermeabilità dei materiali adesivi.

Presentano tuttavia anche delle limitazioni come la necessità di effettuare trattamenti superficiali sugli aderendi, scarsa resistenza e fragilità alle elevate temperature, tossicità di alcuni adesivi, incertezza del comportamento a lungo termine.

Ad oggi i giunti adesivi rappresentano una tecnologia di assemblaggio diffusa in diversi settori e la ricerca scientifica ha rilevato un potenziale applicativo proprio nell'ingegneria civile [3], [4].

Un esempio applicativo nel settore dell'ingegneria civile è un prototipo di finestra che prevede l'inserimento del telaio dell'anta mobile all'interno della vetrocamera e la collaborazione per mezzo di adesivi strutturali del telaio delle ante mobili con le lastre di vetro [5], [6].

L'obiettivo dell'attività sperimentale effettuata nell'ambito dello svolgimento di questa tesi è stato quello di verificare le prestazioni del legno e del vetro e la validità prestazionale del brevetto che prevede l'inserimento del telaio delle ante di un serramento all'interno del vetro camera.

Nello studio effettuato per la presente tesi abbiamo messo in evidenza le prestazioni meccaniche dei giunti adesivi assemblati con aderendi di materiali diversi in grado di offrire valori di rigidità e resistenze ultime.

Sono stati testati l'inserimento di altri materiali nella giunzione quali nylon, sotto forma di tessuto nelle giunzioni incollate, ai fini di studiare la loro applicabilità e funzionalità nei componenti edilizi.

Scopo di tale indagine sperimentale è verificare l'aumento di rigidità in tali giunzioni testando diverse combinazioni di giunzioni tra i materiali sopracitati e con utilizzo di collanti con diverse caratteristiche meccaniche ed elastiche.

In letteratura non ci sono studi esaustivi in questo campo, infatti la ricerca scientifica svolta ha riscontrato pochi studi.

Il seguente studio mira a colmare tale mancanza nell'applicazione di orizzontamenti sollecitati a flessione, quali solai [7], [8] e facciate continue.

Un ulteriore aspetto che tale ricerca ha tenuto in considerazione è trovare un materiale economico e performante che sia di facile applicazione e reperibilità, ma soprattutto che abbia un'impronta ecologica di rilevanza. Grazie alla possibilità di riciclare tale materiale possiamo ridurre anche l'impatto ambientale della tecnologia sperimentata.

Per tale ricerca, tra i diversi tipi di tessuto in nylon è stato scelto, in relazione alle sue caratteristiche meccaniche ed alla sua reperibilità in commercio, il nylon diamante.

Per quanto riguarda gli adesivi sono state selezionate una resina e colle epossidiche con le migliori prestazioni meccaniche confermate da precedenti studi sperimentali.

A seguito dei test sperimentali e rielaborazione dei dati si evidenzia come l'inserimento del tessuto in nylon all'interno dell'incollaggio abbia incrementato le performance meccaniche del materiale e come ciò sia influenzato dal diverso posizionamento del nylon all'interno dell'incollaggio.

Le tipologie di frattura sono principalmente tre, la frattura adesiva, la frattura coesiva e la frattura mista.

Il cedimento coesivo rappresenta il modo ideale di rottura del giunto; tuttavia, nella realtà, si ha il cedimento misto che viene espresso come percentuale del cedimento coesivo ed adesivo. Dal momento che il punto debole dell'incollaggio è l'interfaccia tra vetro e legno, l'inserimento del nylon P6 ha permesso di migliorarne l'aderenza.

I test di taglio, su giunti adesivi DOUBLE-LAP, vetro-legno, hanno evidenziato che l'applicazione del nylon P6 permette di migliorare l'aderenza della colla sul vetro anche se viene ridotta la prestazione finale.

2. Materiali

2.1 Mogano

2.1.1 DESCRIZIONE GENERALE

Il legno è un materiale di origine vegetale formato da un insieme di cellule organizzate in tessuti (Giordano, 1997a). Esso ci viene fornito principalmente dalle piante appartenenti alla sottosezione delle gimnosperme, dette comunemente conifere, e delle angiosperme, relativamente alla classe delle dicotiledoni, dette latifoglie [9], [10].

Grazie alle sue caratteristiche di facilità di lavorazione, leggerezza, resistenza alle sollecitazioni e isolamento termico e acustico il legno viene usato nella costruzione e realizzazione di edifici e molti manufatti destinati sia all'uso interno che. Rispetto ad altri materiali, il legno possiede particolari caratteristiche estetiche che sono determinate dal disegno e dalla figura, dai nodi e dal colore, dalle caratteristiche fisico-chimiche.

Un comparto in cui il legno viene largamente utilizzato è quello dei serramenti. Tuttavia il legno, rispetto ad altri materiali, come l'alluminio e il pvc, oggi largamente più utilizzati, se esposto ai fattori ambientali è soggetto a degradazione. In particolare l'azione della luce solare, dell'acqua e del vento causa alterazione delle caratteristiche fisiche e meccaniche delle pareti cellule con conseguente cambiamento di colore, fessurazioni, ed erosione della superficie. Queste alterazioni fanno variare le caratteristiche fisico-chimiche ed estetiche del legno compromettendone il suo valore.

Le essenze più utilizzate per i serramenti in legno sono quelli di provenienza europea (pino, abete, frassino, rovere, castagno) oppure esotica (mogano, oukumè, teak etc)

I diversi legni hanno infatti proprietà e caratteristiche diverse, che li rendono più o meno adatti all'utilizzo strutturale.

Nella sperimentazione effettuata dal prof. Placido Munafò il legno utilizzato è il mogano.

2.1.2 CARATTERISTICHE DEL MOGANO

Il mogano è un albero che cresce nelle foreste dell'America centrale o tropicale; è ottenuto principalmente dalle specie *Swietenia mahagoni* e *Swietenia macrophylla*, che sono alberi tropicali originari dell'America Centrale e del Sud. L'origine e le caratteristiche del legno di mogano lo rendono un materiale molto apprezzato in diversi settori. Questo legno è noto per

la sua bella colorazione rosso scuro, che può variare leggermente in base alla specie. Inoltre, il legno di mogano presenta un'elevata densità e una struttura compatta che gli conferiscono una notevole resistenza e durabilità. Il legno di mogano è apprezzato non solo per la sua bellezza estetica, ma anche per la sua lavorabilità. È infatti relativamente facile da lavorare, sia con macchine sia a mano, e si presta bene alla levigatura, alla tornitura e all'intaglio. Inoltre, è facile da finire e permette di ottenere superfici lisce e lucide. La stabilità dimensionale del legno di mogano è un'altra caratteristica molto apprezzata. Questo significa che il legno non si deforma facilmente a causa delle variazioni di umidità o temperatura dell'ambiente circostante. Un'altra qualità importante del legno di mogano è la sua resistenza agli agenti atmosferici.

Il legno di mogano è da sempre considerato un materiale di grande pregio per la carpenteria ed edilizia, grazie alle sue caratteristiche uniche che lo rendono adatto a molteplici utilizzi. Uno dei suoi principali utilizzi è nella realizzazione di mobili di alta qualità, come tavoli, sedie, librerie e letti. Il colore scuro e intenso del legno di mogano conferisce eleganza e raffinatezza a qualsiasi ambiente, rendendo questi mobili veri e propri pezzi d'arte. Inoltre, la resistenza e la durezza del legno di mogano garantiscono una lunga durata nel tempo, permettendo di godere di questi arredi per molte generazioni.

La versatilità del legno di mogano si estende anche alla realizzazione di pavimenti e rivestimenti per pareti. La bellezza naturale del legno di mogano conferisce un tocco caldo ed elegante agli ambienti, creando un'atmosfera accogliente e raffinata. Inoltre, la robustezza e la resistenza del legno di mogano lo rendono ideale per ambienti ad alto traffico, come uffici, hotel e luoghi pubblici. Altresì, il legno di mogano viene utilizzato anche nella costruzione di strutture esterne, come pergole e ponti. La resistenza del legno di mogano all'umidità e agli agenti atmosferici lo rende ideale per questi utilizzi all'aperto.

Un altro utilizzo comune del legno di mogano è nella costruzione di porte e finestre. Grazie alla sua grande stabilità dimensionale e alla sua resistenza agli agenti atmosferici, il legno di mogano si presta ottimamente per la realizzazione di infissi esterni di alta qualità. Le porte e le finestre in mogano offrono un ottimo isolamento termico e acustico, garantendo un ambiente confortevole e silenzioso all'interno dell'abitazione. Inoltre, l'elevata resistenza del legno di mogano lo rende anche una scelta sicura dal punto di vista della sicurezza abitativa.

2.1.3 CARATTERISTICHE MECCANICHE

Le proprietà meccaniche del mogano sono molto solide, con un'elevata resistenza alla compressione, flessione e torsione:

- resistenza a compressione assiale mediamente 60 MPa
- resistenza a flessione 140 MPa

Il legno di mogano ha inoltre una buona attitudine all'assemblaggio con viti e colla; infatti mentre con i chiodi tende a spaccarsi ed è opportuno preforarlo con i sistemi di adesione meccanica o con gli adesivi strutturali si assembla in maniera semplice ed efficace.

Il mogano ha inoltre un'elevata durezza (si lascia scalfire difficilmente) e una buona stabilità in quanto grazie alla struttura a grana incrociata mantiene la forma anche se sottoposto a sollecitazioni.

Infine il mogano ha una buona durabilità essendo resistente al passare degli anni anche se esposto agli agenti atmosferici, inoltre resiste ai parassiti e funghi.

2.2 Vetro

2.2.1 DESCRIZIONE GENERALE

Il vetro è un prodotto antichissimo con più di 7000 anni. Il vetro si trova in natura e si forma quando la sabbia di quarzo si scioglie in seguito ad un forte innalzamento della temperatura e la massa fusa si raffredda successivamente.

E' stato il primo realizzato artificialmente dall'uomo e allo stesso tempo è uno dei più moderni.

Dalla Rivoluzione Industriale ad oggi la produzione di vetro ha incontrato una domanda sempre crescente e un ampio utilizzo in vari ambiti.

In architettura il vetro riveste un ruolo sempre di maggior rilievo nella composizione di un edificio, infatti la tendenza degli ultimi anni è quella di costruire edifici sempre più leggeri e trasparenti.

2.2.2 COS'È IL VETRO

È possibile descrivere il vetro come un materiale inorganico formato da una miscela di silicati aventi una struttura amorfa e non cristallina, prodotto per processi di fusione e raffreddamento. La fase liquida del vetro è molto viscosa e non cristallizza nel corso di un

comune raffreddamento, inoltre non fonde ad una temperatura definita ma il processo dalla fase solida a quella fusa in modo molto graduale. L'assenza di una struttura cristallina non consente alcuna dislocazione e di conseguenza nessuna plasticità nel materiale, pertanto il vetro può deformarsi solo elasticamente o si rompe immediatamente. La sua composizione chimica influisce fortemente sulle proprietà fisiche del materiale. In generale il vetro è composto da sostanze a struttura vetrosa, chiamate "formatori", come la silice (SiO_2) che si presenta sotto forma di sabbia e da "modificatori" che permettono di rendere la miscela più lavorabile a temperature più basse e solitamente si utilizzano a questo scopo ossidi di metalli alcalini e alcalino-terrosi.

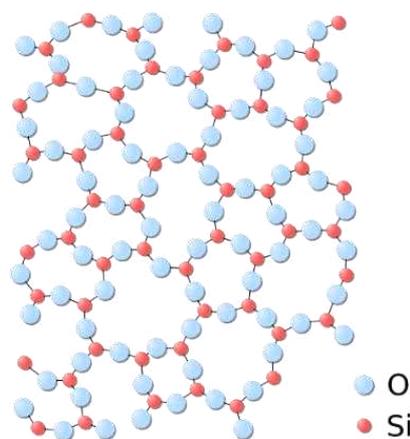


Figura 2.1 - Struttura molecolare del vetro (SiO_2)

A partire dalla silice, è possibile fare una prima distinzione tra il vetro sodico-calcico (SLSG) che presenta una percentuale di silice pari al 75% e quello borosilicato che sostituisce agli ossidi alcalini quelli di boro presenti nella miscela per circa il 7-15%.

Il vetro a base di silice di calce gassata è quello maggiormente utilizzato nell'edilizia, poiché comporta minori costi di produzione, mentre il vetro borosilicato viene utilizzato prevalentemente per usi speciali. Poiché il coefficiente di dilatazione termica è inferiore, il vetro borosilicato ha una maggiore resistenza agli sbalzi termici pertanto viene adottato quando sono richieste caratteristiche particolari come per esempio la protezione antiincendio.

Il vetro comune (sodico-calcico) come abbiamo visto ha la silice come componente fondamentale, ma è composto altresì dal 12-16% ossido di sodio (Na_2O) e dal 10-15% di calce (CaO) unitamente ad alcune sostanze che possono essere aggiunte a seconda delle proprietà che si vogliono ottenere come stabilizzanti, coloranti, opacizzanti o affinant.

	Vetro sodico-calcico	Vetro borosilicato	Vetro alluminosilicato
Sabbia silicea (SiO ₂)	69 - 74 %	70 - 87 %	58 - 62 %
Calce (CaO)	5 - 12 %	-	5 - 8 %
Sodio (Na ₂ O)	12 - 16 %	0 - 8 %	0 - 1 %
Ossido di boro (B ₂ O ₃)	-	7 - 15 %	0 - 5 %
Magnesio (MgO)	0 - 6 %	-	4 - 7 %
Ossido di alluminio (Al ₂ O ₃)	0 - 3 %	1 - 8 %	14 - 18 %
Altro	0 - 5 %	0 - 8 %	0 - 6 %

Figura 2.2 - Composizione del vetro sodico-calcico, borosilicato e alluminosilicato [11]

2.2.3 PRODUZIONE DEL VETRO

La produzione del vetro avviene attraverso le seguenti fasi:

Dopo aver macinato e miscelato le materie prime, esse vengono introdotte in un'impastatrice rotativa da cui si ottiene un impasto omogeneo che viene successivamente fuso in forni a riverbero ad una temperatura di circa 1400 - 1600 °C. Durante questa fase è possibile aggiungere affinananti e omogeneizzanti affinché non si creino bolle di gas a causa della grande viscosità della miscela, che possono alterare la trasparenza del prodotto finale. Una volta terminata la cottura in forno e il raffreddamento del vetro, stabilizzando la sua temperatura intorno ai 1200 °C, inizia il processo di formatura vero e proprio che può avvenire attraverso i seguenti metodi: galleggiamento, soffiatura, pressatura e filatura.

Il 90% del vetro piatto prodotto nel mondo viene fabbricato con il sistema "a galleggiamento" inventato da Alastair Pilkington nel 1959, in cui il vetro fuso viene fatto galleggiare su un bagno di stagno fuso che realizza una superficie perfettamente piana senza difetti, poiché sullo stagno il vetro si distende e crea uno spessore costante. L'operazione avviene inserendo il vetro fuso attraverso dei rulli laminatori nel bagno di stagno in atmosfera controllata, la velocità del rullo determina lo spessore del vetro: maggiore è la velocità, più sottile è il vetro. Successivamente, la lastra di vetro viene raffreddata lentamente per prevenire l'insorgere di sollecitazioni e, infine, il vetro viene tagliato in base alle dimensioni richieste. Il processo Pilkington, che risale al 1959, prevede tre passaggi principali per la formazione di lastre di vetro piatto:

- fusione delle materie prime a 1600 - 1800 ° C
- formazione della lastra a 800 - 1600 ° C

- raffreddamento a 100 - 800 ° C.

Questo processo garantisce prodotti a basso costo abbinati ad una buona qualità ottica ed è possibile produrre vetrate anche di grandi dimensioni. Il processo di produzione di massa e il le tecniche di post-elaborazione (rettifica, foratura, rivestimento, laminazione, rinvenimento, sabbiatura) hanno reso il vetro abbastanza economico da poter essere ampiamente utilizzato nel settore edile. I progressi nel campo delle tecnologie come la tempra e la laminazione, insieme all'utilizzo di strumenti di analisi strutturale, consentono di prendere in considerazione il vetro anche per applicazioni strutturali.

Il processo di soffiatura è utilizzato principalmente per lavorazioni artigianali e consiste nell'insufflare aria all'interno del vetro viscoso per impartirne la forma, attraverso la filatura invece si ottengono fibre di vetro e lana di vetro mentre la pressatura è utile per realizzare oggetti semplici attraverso uno stampo in cui il vetro dopo essere stato pressato viene fatto solidificare.

La caratteristica principale del vetro è indubbiamente la trasparenza, ovvero la capacità di trasmettere radiazioni nel campo del visibile, che permette di utilizzarlo per ambiti in cui la visibilità è fondamentale, come oggetti di uso comune oppure per le finestre degli edifici ma è fondamentale tenere presente oltre alle proprietà ottiche, le caratteristiche meccaniche e fisiche se si intende utilizzarlo come materiale di costruzione in ambito edilizio.

Principali proprietà dei vetri comuni	
Densità (g/cm ³)	2,5
Durezza (Mohs)	5-7
Resistenza a compressione (MPa)	300
Resistenza a trazione (MPa)	30-80
Modulo elastico (GPa)	70
Conducibilità termica (W/m°C)	1,7
Coefficiente di dilatazione termica (°C ⁻¹)	9·10 ⁻⁶
Indice di rifrazione	1,5

Figura 2.3 - Valori indicativi delle principali proprietà del vetro [12]

2.2.4 PROPRIETÀ MECCANICHE

Il vetro è un materiale duro e fragile a temperature ordinarie e non mostra nessuna capacità di snervamento, ma ha un comportamento elastico lineare fino a rottura. Essendo un materiale molto sensibile a difetti anche di ridotte dimensioni, ha una bassa resistenza a trazione e ad urti, per questo motivo, è necessario adottare misure di sicurezza per utilizzare il vetro come materiale da costruzione.

Un elemento di vetro fallisce per frattura meccanica nel momento in cui l'intensità della sollecitazione dovuta agli sforzi di trazione raggiunge il suo valore critico in un punto in cui è presente un difetto. La propagazione delle crepe dipende dal carico, il che significa che più a lungo viene applicato il carico, più profonda diventa la crepa e questo porta ad una riduzione della capacità di trazione del materiale. Infine, è possibile affermare che la resistenza a trazione del vetro non è una costante del materiale, ma è fortemente correlata alla dimensione dell'elemento, all'intensità del carico e alla durata, unitamente alla presenza di umidità residua nell'ambiente.

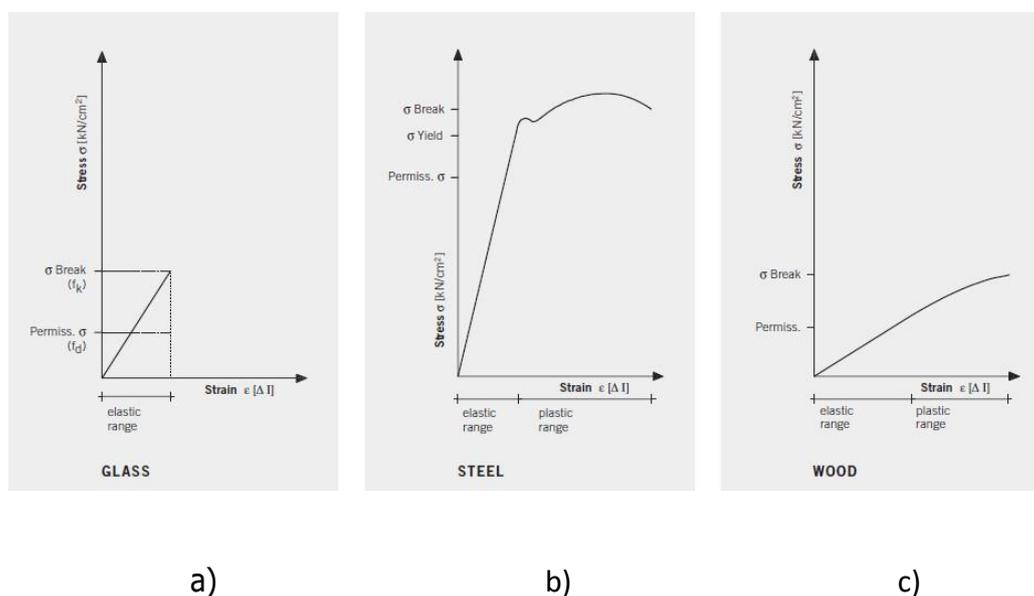


Figura 2.4 - Valori indicativi delle principali proprietà del vetro (Wurm, 2007)

La natura dei difetti del materiale è il risultato del processo di produzione del vetro, che deteriora la superficie esterna di ogni pezzo quando viene tagliato, forato, lavorato ai bordi (levigatura, smerigliatura, lucidatura) o anche solo manipolato. In questo modo, i difetti

agiscono come concentratori di stress quando vengono caricati in tensione in modo da rompersi la propagazione può iniziare da questi punti delicati.

2.2.5 PROPRIETÀ TERMICHE

Per poter utilizzare elementi in vetro in architettura è necessario considerare il loro comportamento dal punto di vista dell'isolamento termico. L'involucro trasparente di un edificio è infatti quello maggiormente soggetto alle dispersioni di calore e occorre ricorrere ad espedienti tecnologici per incrementare le caratteristiche termiche del vetro al fine di limitare l'utilizzo di impianti di riscaldamento e raffreddamento.

L'energia solare incidente su una vetrata si divide in tre componenti: essa può essere trasmessa, riflessa oppure assorbita per poi essere ritrasmessa.

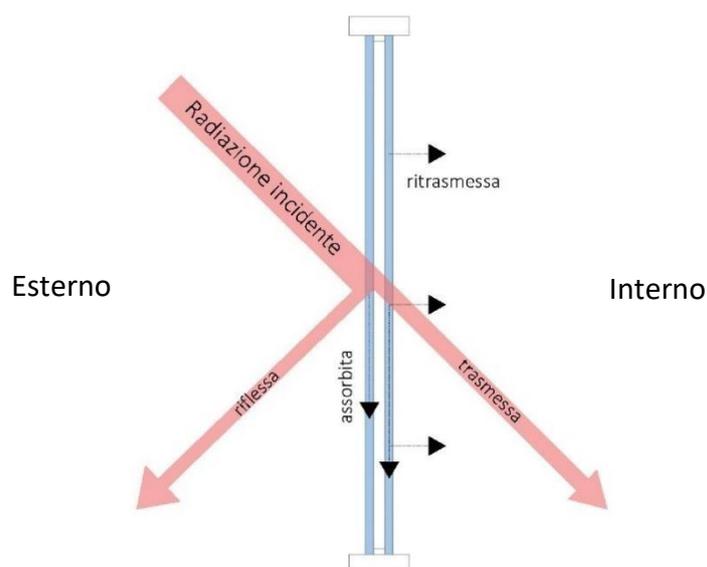


Figura 2.5 - Schematizzazione della trasmissione della radiazione solare attraverso il vetro

Per poter valutare le prestazioni del vetro occorre considerare l'energia totale trasmessa, tenendo conto che questi contributi variano a seconda della composizione del vetro, dal numero di lastre e dal loro spessore, dal gas in intercapedine e dai possibili rivestimenti. Nel periodo estivo, infatti, l'obiettivo principale è quello di ridurre l'ingresso dell'energia solare incidente sulle vetrate mentre, nel periodo invernale la priorità è limitare la perdita del calore per conduzione dall'interno all'esterno dell'edificio.

Per caratterizzare una vetrata dal punto di vista fisico è possibile analizzarne i parametri

principali che ne descrivono il comportamento. Essi sono :

U → Trasmittanza termica (W/m^2K), definita come la quantità di calore che fluisce tra un ambiente interno e un ambiente esterno in presenza di una differenza di temperatura;

λ → Conducibilità termica ($W/m^{\circ}C$), dipende dalla natura del materiale e misura quanto esso sia soggetto a trasmettere calore per conduzione termica, quando i contributi al trasferimento di calore per convezione e per irraggiamento termico sono trascurabili;

a → Fattore di assorbimento, indica la percentuale di radiazione che viene assorbita dal componente rispetto alla totale incidente;

r → Fattore di riflessione, indica la percentuale di radiazione che viene riflessa dal componente rispetto alla totale incidente;

t → Fattore di trasmissione, indica la percentuale di radiazione che viene trasmessa dal componente rispetto alla totale incidente;

T_{sol} → Trasmissione solare, indica il rapporto tra la quantità di radiazione trasmessa dal componente vetrato e la totale radiazione incidente su tale componente;

T_{vis} → Trasmissione solare visibile, indica la porzione di luce visibile che passa attraverso il componente vetrato. Essa coinvolge le lunghezze d'onda tra 0,38 e 0,78 mm.

G → Fattore solare, è un parametro che varia tra 0 e 1 e misura l'energia termica solare trasmessa direttamente o indirettamente attraverso il componente vetrato considerando l'irradianza diretta e diffusa.

e → Emissività, è il rapporto tra l'energia irradiata da un materiale e quella irradiata da un corpo nero (ovvero un oggetto ideale che assorbe tutta la radiazione solare, quindi con emissività pari a 1) alla stessa temperatura. Nel caso di un materiale il valore di emissività è compreso tra 0 e 1.

Il vetro senza particolari trattamenti è chiamato vetro chiaro ed è caratterizzato da un elevato valore di trasmissione solare visibile e infrarossa ma anche di trasmittanza termica, per questi motivi il suo utilizzo garantisce un ingresso maggiore di luce naturale all'interno di un ambiente ma trasmette un grande quantità di energia solare, la quale, in situazioni climatiche che favoriscono le alte temperature, risulta essere un elemento negativo e

impattante rendendo necessario un sistema di raffrescamento estivo.

Un'importante espediente per limitare le dispersioni è l'interposizione di una camera d'aria all'interno di due o più lastre di vetro, dando origine ad una vetrocamera. Interponendo aria secca o un gas nobile nella cavità tra due vetri è possibile incrementare in modo drastico l'isolamento di una vetrata, dal momento che l'aria o i gas come l'argon hanno una conducibilità termica molto inferiore a quella del vetro.

Al vetro chiaro, inoltre, possono essere aggiunti componenti metallici durante il processo di galleggiamento che conferiscono al vetro delle proprietà ottiche e termiche differenti. Una possibilità è rappresentata dal vetro colorato, che in genere tende a colorazioni come verde, blu, bronzo e grigio, che può essere utilizzato in architettura per facciate che possano filtrare calore e luce: i pigmenti metallici infatti riducono il passaggio dell'energia solare abbassando il valore di trasmittanza. Un'altra tipologia di vetro colorato è rappresentata dalla presenza di un rivestimento interno in ossidi metallici che riflette il calore all'interno o all'esterno dell'edificio, mantenendo in tal modo un più alto valore di trasmissione visibile pur riducendo il passaggio di calore. Sempre depositando ossidi metallici sulla superficie di una lastra è possibile ottenere un vetro riflettente, ovvero un elemento in grado di riflettere verso l'esterno una parte dell'energia solare incidente evitando il surriscaldamento degli ambienti.

Un'altra tecnica possibile per limitare il surriscaldamento degli ambienti è quella dei rivestimenti basso-emissivi o a controllo solare. Si tratta ricoprire la lastra di vetro con una patina di ossidi metallici e metalli, creando sul vetro di base uno strato di adesione, uno strato d'argento, uno strato protettivo e infine lo strato di rivestimento. Il rivestimento basso-emissivo permette di ridurre al minimo la dispersione dell'energia irradiata dai corpi riscaldati all'interno dell'edificio, riflettendola all'interno, viene posto generalmente sulla superficie interna della lastra nelle vetrocamere.

2.3 Nylon

2.3.1 DESCRIZIONE GENERALE

Il NYLON, il cui nome trova origine dall'unione delle iniziali Di New York e Londra (NY-LON), è un materiale polimero a base poliammidica Realizzato e brevettato dalla ditta "Du Pont de

Nemours” nel 1935, grazie agli studi del chimico W. H. Carothers, e successivamente introdotta su larga scala nel mercato nel 1938. In particolare nylon è il nome di ciascuna delle fibre tessili ottenute da tale polimero. Pur chiamato con nomi diversi, secondo la casa produttrice, il nylon si suddivide in due principali tipi, secondo il polimero impiegato: il nylon 6.6, ricavato dall’adipato di esametildiammina, e il nylon 6 ottenuto dal caprolattame; oltre a questi due tipi industrialmente interessa anche il nylon 11, ottenuto dall’olio di ricino. La cifra che accompagna la parola nylon si riferisce al numero di atomi di carbonio esistenti nell’unica o doppia componente della molecola elementare. Sono stati studiati altri tipi di nylon che vengono prodotti in quantitativi industriali molto modesti, come il nylon 3, ottenuto in Germania dalla beta-alanina, il nylon 7, prodotto nell’ex URSS da esametildiammina e acido sebacico, il nylon 12 ricavato in USA dal lattame dell’acido laurico. Questi nylon, come altri tipi che sono in fase sperimentale, hanno lo svantaggio del costo di produzione superiore che non compensa alcuni vantaggi tecnici di cui godono nei confronti degli altri [13].

2.3.2 PROPRIETÀ E CARATTERISTICHE

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; resiste bene agli alcali anche molto caldi; ha stabilità dimensionale al lavaggio anche a 100°C; ha 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’umidità 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. Resiste al ferro da stiro a 180 °C (il nylon G a 140 °C): 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). Accostato alla fiamma fonde prima di toccarla producendo odore di sedano e sferette dure e regolari; s’infiama con molta difficoltà. Tra gli svantaggi del nylon vi è un alto allungamento a bassi carichi;

sensibilità agli acidi, soprattutto caldi; fusione per contatto con bruce di sigaretta; facilità a caricarsi elettrostaticamente e ad attirare pulviscolo; forte bioccolatura nei tessuti da fiocco. Inoltre, salvo per alcuni tipi speciali di nylon, ha una ridotta resistenza alla luce e alle intemperie [14].

Largo impiego trova il riciclo delle poliammidi da pre-consumo le quali, attraverso un percorso di polimerizzazione, si trasformano in nuovo materiale da reimpiegare. Infatti, per ogni Kg di PA6 (la poliammide più economico) vergine sostituito con PA6 riciclato o rigenerato, vengono risparmiati 4 Kg di materie prime. La materia seconda si ottiene principalmente dal riciclo pre-consumo di sfridi di lavorazione e scarti di produzione e da quello post-consumo di componenti e accessori di veicoli, arredi ed altri beni durevoli [15].

Secondo l'IARC (International Agency for Research on Cancer, agenzia facente capo all'Organizzazione Mondiale della Sanità), il Nylon è considerabile come "non classificabile come carcinogenico per l'essere umano" (gruppo 3) [16].

2.3.3 PRODUZIONE ED USI INDUSTRIALI

Il nylon appartiene alla famiglia di termoplastici, le cui modalità di produzione sono simili tra loro. Le differenti condizioni operative determinano la realizzazione dei diversi materiali: al variare del tempo del processo, della temperatura e della pressione si ottengono i diversi tipi di poliammidi. La materia prima vergine origina vari tipi di poliammidi che differiscono tra loro per caratteristiche di duttilità, rigidità e resistenza, che però possono essere lavorati con quasi tutti i sistemi in uso per le materie termoplastiche. Il nylon viene lavorato per filatura, estrusione, stampaggio. I semilavorati (lastre, barre, tondi) possono poi essere lavorati meccanicamente con estrema facilità.

A seconda della lavorazione con cui viene processata la poliammide, possiamo trovare:

- Il NYLON TESTURIZZATO viene usato per maglieria, costumi da bagno, pantaloni da sci, calze da uomo e donna, confezioni da donna, tappeti, moquettes.
- Il FIOCCO DI NYLON, allo stato puro, viene usato per articoli in cui sia richiesta un'elevata resistenza meccanica e resistenza alle sostanze chimiche (tappeti, filtri, tessuti isolanti, ecc.); in miscela con fibre naturali come il cotone, e soprattutto con lana al 5-30%, è adoperato in tutti gli impieghi tessili. La presenza di una determinata percentuale di fiocco di nylon conferisce ai prodotti maggiore resistenza all'usura, migliore mantenimento delle pieghe e stabilità dimensionale al lavaggio, più alta

resistenza a trazione, permette la produzione di filati più sottili, di lavorarli meglio sui telai meccanici e di fabbricare tessuti più leggeri.

- Il NYLON IN SETOLA trova impiego nella fabbricazione di spazzole, pennelli, reti, corde.
- Per le sue buone caratteristiche meccaniche (in particolare l'elevato modulo di elasticità a flessione) il nylon è molto usato anche per lo STAMPAGGIO A INIEZIONI di particolari meccanici di precisione. 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 (undecammide e dodecammide) 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.

In Figura 2.6 **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** viene riportato schematicamente il ciclo di produzione di un filato in nylon 6.

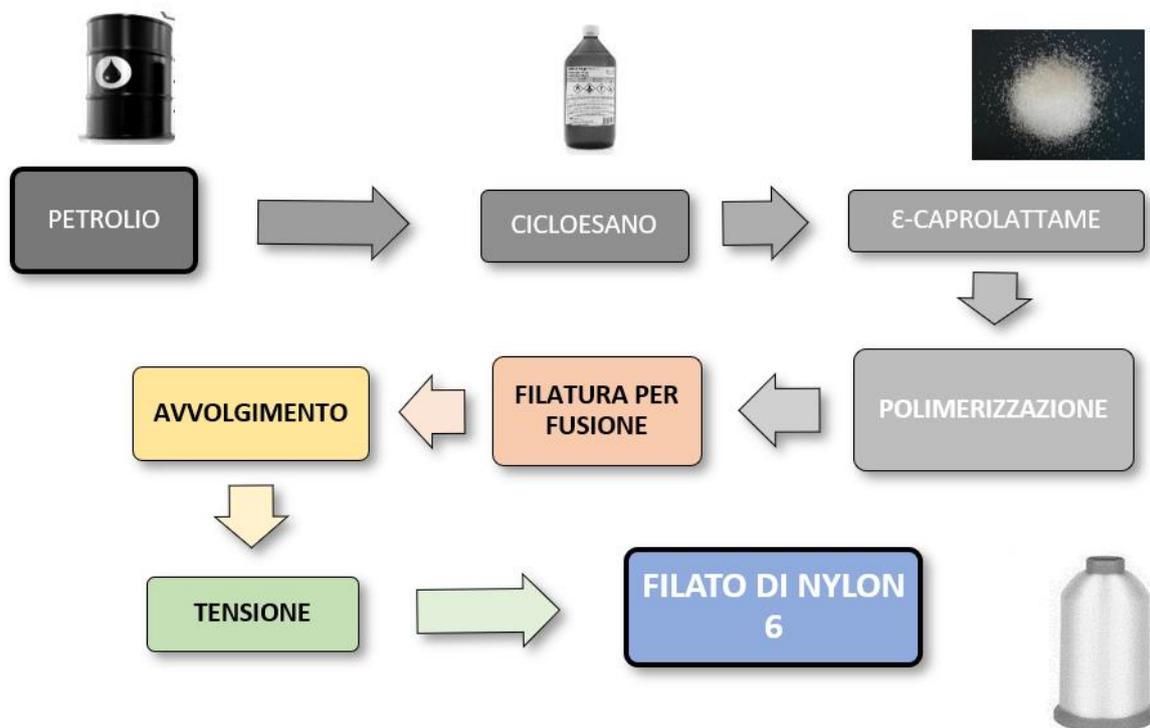


Figura 2.6 – Ciclo di vita del nylon

FILATURA

Per ottenere le fibre tessili il polimero di partenza viene fuso, in atmosfera inerte, entro un serbatoio sul fondo del quale si trova una griglia formata da una serpentina percorsa da un gas a temperatura sufficiente per provocare la fusione (270°C).

Dal serbatoio, una o due pompette a ingranaggi lo spingono, attraverso un filtro a sabbia metallica, alla filiera che ha fori del diametro di alcuni decimi di millimetro e in numero corrispondente alle bave che deve possedere il filato. Il polimero si solidifica per raffreddamento e il filo così ottenuto, dopo essere stato umettato con prodotti antistatici, viene avvolto su di una rocca o su di una bobina.

In Figura 2.7 è possibile vedere gli stadi del processo di filatura del ciclo di produzione del nylon 6.

La velocità di filatura è sempre molto elevata (800-1000 e più metri al minuto). Il filo, così come esce dalle filiere, non possiede ancora le proprietà caratteristiche del nylon commerciale per cui deve essere sottoposto allo stiro, che consiste nel far subire al filato un allungamento irreversibile; questo può far raggiungere al filo una lunghezza quattro volte quella primitiva. Il nylon può essere prodotto a tenacità elevata (per usi industriali) variando il grado di polimerizzazione e diminuendo lo stiro.

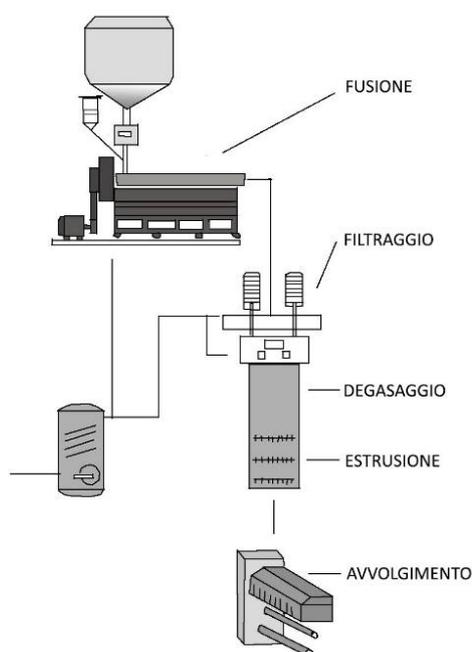


Figura 2.7 - Processo di filatura del nylon 6

Inoltre ha la proprietà di conservare la forma che gli viene data mediante il fissaggio, operazione che consiste nel riscaldare a 160-180 °C, a secco o per mezzo di vapori sotto pressione, i filati o i manufatti. Il fissaggio dei tessuti di nylon è indispensabile in quanto, rendendo immutabile la forma dell'intreccio, impedisce lo scorrimento dei fili e conferisce ai manufatti la proprietà di riprendere la loro forma dopo i lavaggi. Questa proprietà è sfruttata anche nella produzione di filati in nylon elasticizzati, anche noti commercialmente col nome di filanca. L'elasticità viene ottenuta ritorcendo fortemente il filato, facendolo passare attraverso un forno riscaldato elettricamente alla temperatura voluta e ritorcendolo completamente. Quest'ultima operazione, mentre annulla la torsione, non elimina la curvatura che le singole bavelle hanno acquistato durante il passaggio del filato ritorto nel forno. Ne risulta un filato formato da un groviglio di anse disposte in tutte le direzioni e dotato di un'elasticità straordinariamente elevata dovuta al fatto che viene sfruttata la possibilità di estendersi delle singole bave. Il nylon elasticizzato trova impiego nella produzione di costumi da bagno, pantaloni da sci e ogni altro tipo di tessuto elastico. Essendo una fibra termoplastica è possibile stabilizzare gli intrecci del nylon, per evitare le sgualciture e le deformazioni a caldo umido, testurizzarlo, applicarvi pieghe e pieghettature, goffrarlo.

Dopo la fusione, filtraggio e degassaggio, il polimero fuso viene estruso attraverso una filiera in una camera dove la massa fluida solidifica sotto forma di filamenti.

Per ottenere le proprietà desiderate attraverso l'orientamento molecolare e la cristallinità, i filamenti di nuova formazione devono essere elaborati.

TENSIONE

Poiché la temperatura di transizione vetrosa del nylon è inferiore alla temperatura ambiente, il nylon può essere teso a freddo. Anche la tensione a caldo viene usata frequentemente. I filamenti di nylon tesi sono circa quattro volte la loro lunghezza iniziale. Inoltre il modulo elastico aumenta notevolmente con l'aumentare dell'orientamento molecolare. Altre proprietà fisiche come equilibrio, densità, assorbimento dell'umidità, tenacia e allungamento a rottura sono influenzati dalla tensione del filamento.

Per quanto riguarda la tensione a caldo, l'esposizione a temperatura elevata (180°-190°C) dopo aver teso, contribuisce ad aumentare il rapporto di stiro e può realizzare un filamento con moduli e tenacità superiori. Un'ulteriore tensione del materiale cristallino solidificato porta ad una resistenza a trazione ed un modulo elastico molto alti. Ciò si traduce nelle

cosiddette fibre ad alta prestazione.

Ad una velocità di avanzamento costante, raggiungendo velocità di filatura superiori si produrranno catene più estese nel fuso per formare un filamento più fine. Pertanto la fibra più fine ha solitamente modulo elastico e tenacità superiori. Un filamento sottile non può essere teso quanto un filamento più grossolano. Come risultato i filamenti più sottili hanno un miglior rapporto volume-superficie.

Naturalmente non c'è molto spazio di miglioramento con la trafilatura a freddo dei filamenti sottili, quindi i filamenti diventano brillanti e forti.

L'insieme delle sue caratteristiche pone il nylon ad un livello superiore a quello di qualsiasi altra fibra tessile, per cui trova impiego in quasi tutti i settori dell'industria tessile, dal vestiario, all'arredamento, ai tessuti industriali.

Sotto forma di filo continuo viene usato per la fabbricazione di calze da donna e uomo, biancheria intima e corsetteria, camiceria, cravatte, impermeabili, abiti femminili, giacche a vento, tendaggi, ombrelli, tulle e merletti, filati cucirini.

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.

2.4 Tessuti di nylon

2.4.1 PROPRIETÀ E CARATTERISTICHE

Generalmente il tessuto di nylon, derivante da diverse tipologie di lavorazione del filo continuo, presenta delle caratteristiche analizzate in base a delle proprietà tipiche del materiale poliammidico da cui è composto. Il tessuto risulta infatti molto resistente, con un elevato allungamento ed elasticità, ha un'ottima resistenza all'abrasione ed ha un comportamento termoplastico. Inoltre ha la capacità di essere molto brillante, semi-lucido o opaco a seconda della lavorazione del filamento. Risulta resistente agli insetti, ai funghi, alle muffe ed al marciume.

Possiamo schematizzare le proprietà tipiche di un tessuto con le relative caratteristiche corrispondenti al nylon in Tabella 5.

Tabella 1- Caratteristiche del filamento di nylon

PROPRIETÀ	CARATTERISTICHE
ASPETTO MICROSCOPICO	Molto liscio e uniforme
LUNGHEZZA	Filamento e fiocco
COLORE	Biancastro
LUCENTEZZA	Alta lucentezza naturale che può essere controllata
FORZA	Eccezionale
ELASTICITÀ	Eccezionale
RESILIENZA	Molto buono
ASSORBIMENTO DELL'UMIDITÀ	3,80%
CALORE	Alta resistenza, fonde a 250 ° C / 482 ° F
INFIAMMABILITÀ	Si scioglie lentamente Non supporta la combustione
CONDUCIBILITÀ ELETTRICA	Basso, genera statica

2.4.2 DOVE SONO APPLICATI

I nylon come fibre tessili sono usati soprattutto per produrre piccoli manufatti (polimero termoplastico). Il primo prodotto commerciale realizzato in nylon fu uno spazzolino da denti con le setole in nylon, ma il primo vero successo del nylon è legato al suo impiego per farne calze da donna, nel 1940. Durante la Seconda Guerra Mondiale, il nylon venne ampiamente impiegato per realizzare le calotte e le funi dei paracadute.

L'insieme delle sue caratteristiche pone il tessuto nylon ad un livello superiore a quello di qualsiasi altra fibra tessile, per cui trova impiego in quasi tutti i settori dell'industria tessile, dal vestiario, all'arredamento, ai tessuti industriali.

Generalmente si possono trovare tessuti di nylon nei seguenti campi:

- ABBIGLIAMENTO (collant, calzini, abbigliamento da sci, costumi da bagno, abbigliamento sportivo, abbigliamento casual, biancheria intima, abbigliamento da pioggia, rivestimenti);
- USO DOMESTICO (rivestimenti di borse, copriletto, panni, ombrelli, filati da cucito, spazzolini da denti, ecc.);
- ARREDAMENTO (tappeti, tappetini automobilistici, tappezzerie, tappeti ecc.);
- INDUSTRIA (cavi pneumatici, airbag automobilistici, reti da pesca, fili da pesca, nastri per computer, tubi flessibili, filati per cucito industriali, calzature, arredi

automobilistici, substrato di pelle sintetica, ecc.).

2.4.3 TIPI DI TESSUTI

Da una ricerca sui tessuti presenti sul mercato, comparando tra loro le principali aziende produttrici, si è riuscito ad ottenere uno schema delle tipologie di tessuti con i quali viene lavorato il nylon.

I cosiddetti preformati tessili si suddividono principalmente in due famiglie: preformati 2D, sviluppati lungo due dimensioni e preformati 3d che risultano avere uno spessore superiore a quello del semplice filato.

Per quanto riguarda i preformati 2D, essi si suddividono in cinque tipologie: tessuto, treccia, maglia, TNT (Tessuto Non Tessuto) e combinato.

Il tessuto preformato 2D può avere tessitura biassiale o triassiale; la tipologia a treccia può avere un intreccio piatto o circolare; la maglia può avere una lavorazione di tipologia maglieria di catena o di ricamo; il TNT si ottiene mediante processo meccanico o chimico; ed infine il sistema combinato prevede una maglieria abbinata a tessitura oppure una tessitura abbinata a TNT.

Per ciò che concerne i preformati tessili 3D, possiamo trovarli sotto forma di cucito, tessuto, treccia, maglia e combinato. Il cucito a sua volta può essere eseguito a cucitura piatta o a punto catenella; il tessuto può essere di tipo biassiale, triassiale o multiasse; la treccia può essere eseguita con intrecciatura a 2 step, a 4 step oppure mediante intrecciatura solida; anche la tipologia a maglia dei preformati 3D può essere di tipo a catena o ricamo; mentre il preformato 3D combinato può essere il risultato di una tessitura più maglieria o di una tessitura più cucitura.

Le varie tipologie di tessuto sono state schematizzate nella Figura 2.8.

In particolare il tessuto di nylon 6 che è preso in considerazione per lo studio in questione è un preformato tessile di tipo 2D; in questa categoria i tessuti si distinguono per gli schemi di orditura dei filamenti.

La maglia biassiale dei tessuti preformati 2D si differenzia principalmente dalla tessitura a maglia triassiale per il numero di assi lungo i quali si intrecciano i filamenti. La prima si sviluppa lungo due direzioni ortogonali tra loro con filamenti che passano l'uno sopra l'altro, mentre la maglia triassiale presenta un terzo filamento in una direzione a 45° rispetto ad entrambe gli assi principali tra loro ortogonali, ciò permette di avere caratteristiche meccaniche differenti.

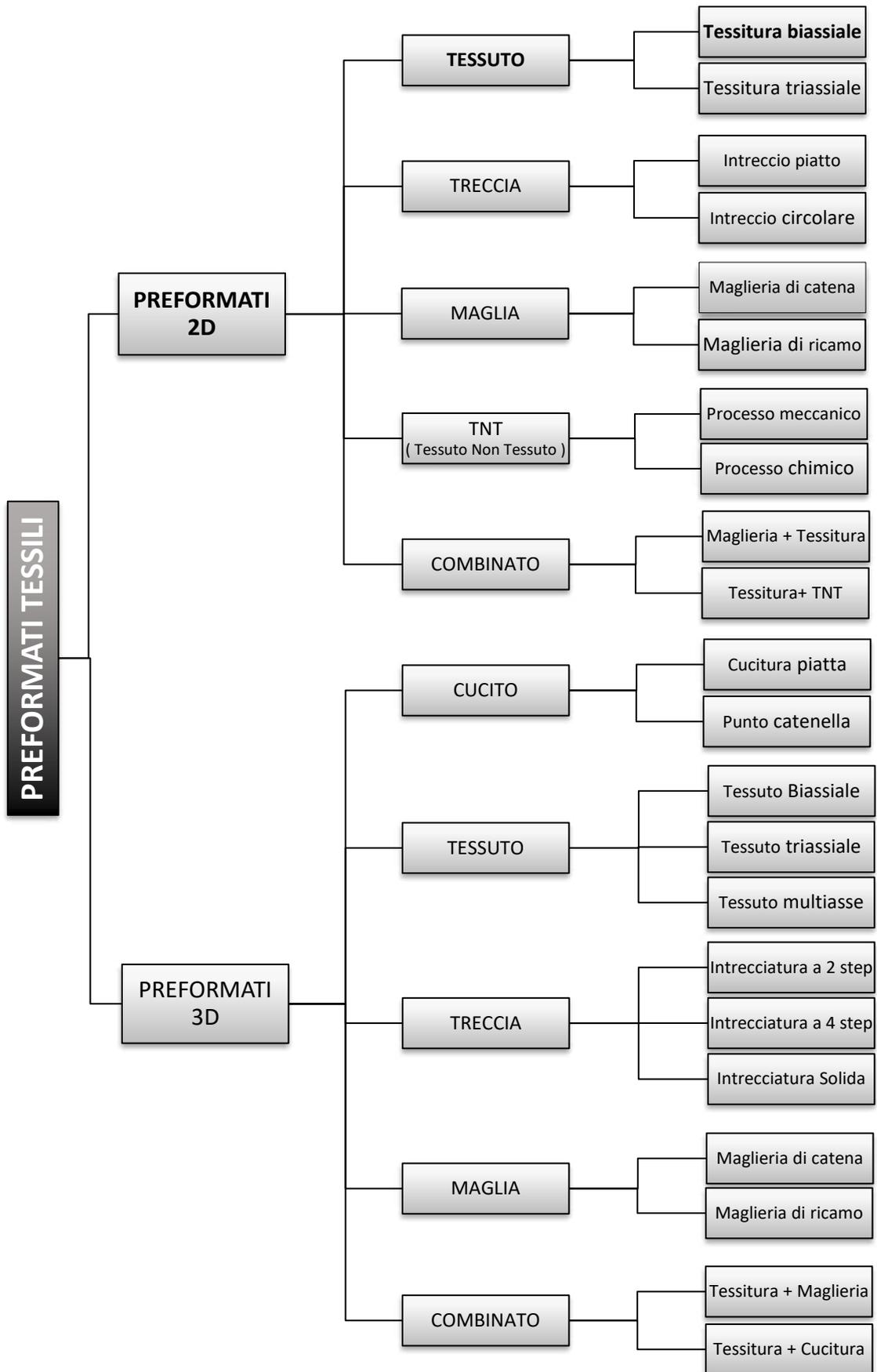


Figura 2.8 - Classificazione schematica dei preformati tessili in nylon

A seconda di come vengono intrecciati i filamenti, nella maglia biassiale, possiamo trovare tre tipologie di schemi differenti:

- Le maglie DIAMANTE hanno un'alternanza di un filo che passa sopra ed uno che passa sotto (1/1),
- le maglie REGOLARI hanno una sequenza di due fili che passano sopra e due che passano sotto (2/2), infine
- le maglie di tipo ERCOLE hanno una struttura in cui si alternano tre stoppe sopra e tre stoppe sotto (3/3).

Per lo studio in esame è stato scelto lo schema diamante poiché presenta la struttura più rigida e stabile, in quanto possiede una trama molto fitta. I principali svantaggi sono la difficoltà di impregnazione con la resina e il fatto che trama e ordito si presentano molto ondulati. Quest'ultima caratteristica implica una minore efficienza del rinforzo nel piano del laminato. L'ondulazione (*crimp*) di questo tessuto è pari a circa il 10%. Poiché le fibre hanno dimensioni dell'ordine della decina/centinaio di micron in questo caso il comportamento risulta ortotropo ed ai fini dell'analisi meccanica il materiale può essere considerato omogeneo.

Il tessuto regolare (o diagonale) e maggiormente quello di tipo ercole sono più flessibili e facilmente danneggiabili in fase di manipolazione. Quest'ultimo risulta più rigido nel piano di laminazione, in quanto presenta la minore ondulazione delle fibre in entrambe le direzioni.

In Figura 2.9 sono schematizzate le orditure delle varie tipologie di tessuti preformati 2D.

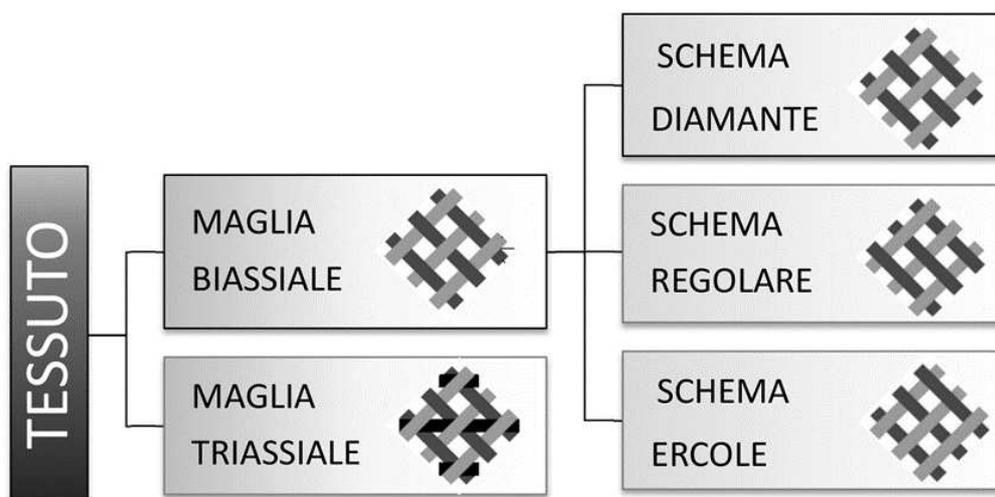


Figura 2.9 - Tipologie di tessuti preformati 2D

2.5 Adesivi

Gli adesivi permettono l'incollaggio tra due materiali uguali o diversi.

Il principale scopo degli adesivi è quello di trasmettere le tensioni tangenziali che si vanno a creare tra il substrato da rinforzare e il materiale composito, in seguito allo scorrimento relativo.

Ci sono molte categorie di adesivi naturali e sintetici, i più adatti per i materiali compositi sono gli adesivi a base di resine epossidiche.

I vantaggi delle giunzioni di questo tipo sono:

- Rapidità di operazione,
- Distribuzione uniforme degli sforzi,
- Capacità di adattamento a superfici irregolari,
- Economicità.

I limiti sono dovuti ai seguenti fattori:

- Sensibilità alle condizioni ambientali (umidità e temperatura),
- Comportamento viscoso,
- Caratteristiche indesiderate del substrato

Per quanto riguarda il substrato, sono di rilevante importanza la rugosità superficiale, poiché all'aumentare della rugosità aumenta la superficie di contatto ed il grado di pulizia della superficie, in quanto non devono esserci agenti contaminanti come grassi o polveri, strati superficiali deboli o degradati. L'umidità può interferire con il processo di indurimento, quindi bisogna prestare attenzione con i materiali porosi, poiché se l'adesivo assorbe acqua può subire plasticizzazione e rigonfiamenti.

Nel settore delle costruzioni vengono impiegati adesivi strutturali per le giunzioni di componenti edilizi. La resistenza di un giunto dipende dalle prestazioni dei materiali coinvolti e dalla qualità dell'interfaccia.

La rottura può avvenire nel materiale incollato (distacco coesivo), nell'adesivo o mista; un buon adesivo strutturale deve far avvenire la rottura all'interno del materiale incollato.

In Figura 2.10 sono schematizzati i tre tipi di frattura come indicati da Istruzioni CNR DT 200/2004 [17].



Figura 2.10 - Confronto tra le diverse tipologie di frattura [10]

Gli adesivi si suddividono in due principali categorie:

- Adesivi termoplastici: in genere hanno un unico componente e l'indurimento avviene per evaporazione del solvente o per coalescenza di un'emulsione (lattice); non hanno elevata resistenza e sono soggetti a scorrimento viscoso; i principali sono di tipo polivinilico, polistirenico o a base di gomme.
- Adesivi termoindurenti: sono ottenuti dalla reticolazione di due composti (generalmente liquidi); i tipi principali sono resine a base di formaldeide, resine poliuretaniche, resine epossidiche, resine poliestere; gli adesivi strutturali sono in genere di tipo termoindurente.

Le proprietà degli adesivi strutturali sono:

- Viscosità: bassa favorisce la miscelazione, l'applicazione e la penetrazione in substrati porosi; alta permette l'ottenimento di maggiori spessori e l'applicazione su pareti verticali o su intradossi.
- Tempo di lavorabilità: tempo disponibile per l'applicazione dopo la miscelazione (velocità di reticolazione).
- Tempo di presa e di indurimento: tempo necessario per solidificare e per raggiungere la resistenza dichiarata nella scheda tecnica fornita dal produttore.
- Resistenza a trazione e modulo elastico.

2.5.1 RESINA EPOSSIDICA

La resina epossidica è un polimero termoindurente con reazione a freddo.

Il formulato è normalmente costituito da una resina base (componente A) e da un'indurente (componente B), i quali solidificano dopo essere stati miscelati accuratamente nel rapporto d'uso indicato dal produttore.

Poiché risulta vetrosa a temperatura ambiente, la resina epossidica viene miscelata con diluenti per abbassare la viscosità a livelli adeguati per l'impregnazione delle fibre.

Questa categoria di resine è la più utilizzata per la realizzazione di materiali compositi avanzati, ottenuti mediante la combinazione della resina con delle fibre.

La resina epossidica è impiegata in svariati ambiti:

- nell' industria elettrica -elettronica grazie alla sua proprietà di isolante;
- nel settore nautico o aereo-spaziale in combinazione con tessuti rinforzati (fibre di vetro o kevlar);
- nel settore alimentare e farmaceutico per le caratteristiche di resistenza chimico-meccanica e la praticità di pulizia;
- nel settore edile per numerosi interventi di consolidamento e ripristino.

3. Stato dell'arte e brevetti

La ricerca scientifica ha dimostrato che la tecnologia adesiva ha un grande potenziale nell'ingegneria civile. Studi sperimentali recenti [6], [18] hanno evidenziato le ottime prestazioni meccaniche di giunti adesivi ibridi, realizzati con materiali diversi, che offrono elevate rigidità e resistenza ultima. La Figura 3.1 mostra un prototipo di finestra chiamata "Invisible Window Frame" [5], un esempio di applicazione nell'ingegneria civile. La novità, coperta da un brevetto europeo, consiste nell'inserimento del telaio dell'anta mobile all'interno del vetrocamera e nell'uso di adesivi strutturali per unire il telaio delle ante mobili alle lastre di vetro. Grazie ai giunti adesivi, è stato possibile estendere l'idea brevettata della "Invisible Window" a un "Sistema per facciate continue di edifici" [19].



Figura 3.1 – Prototipo "Invisible Window", Brevetto Europeo n. EP.3071775B1

3.1 Invisible Window Frame

L'idea brevettuale contenuta in "Invisible Window Frame" è destinata a trasformare radicalmente il concetto di serramenti. Questa tipologia di finestra (o porta finestra) rappresenta un'innovazione unica, caratterizzata da una superficie completamente in vetro a vista. Non solo il design moderno ne fa un elemento distintivo e accattivante, ma la sua progettazione avanzata assicura un'efficienza energetica che supera di gran lunga le prestazioni dei serramenti tradizionali.

Le Figura 3.2 e Figura 3.3 mostrano degli stralci degli elaborati brevettuali ed alcune applicazioni (rendering).

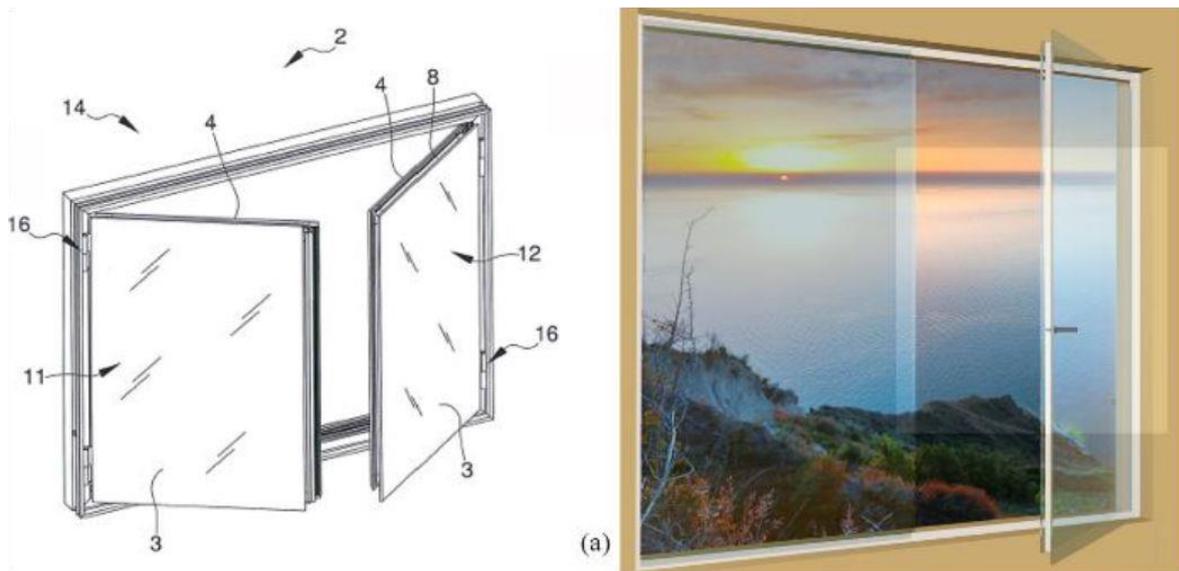


Figura 3.2 - Visione complessiva del serramento

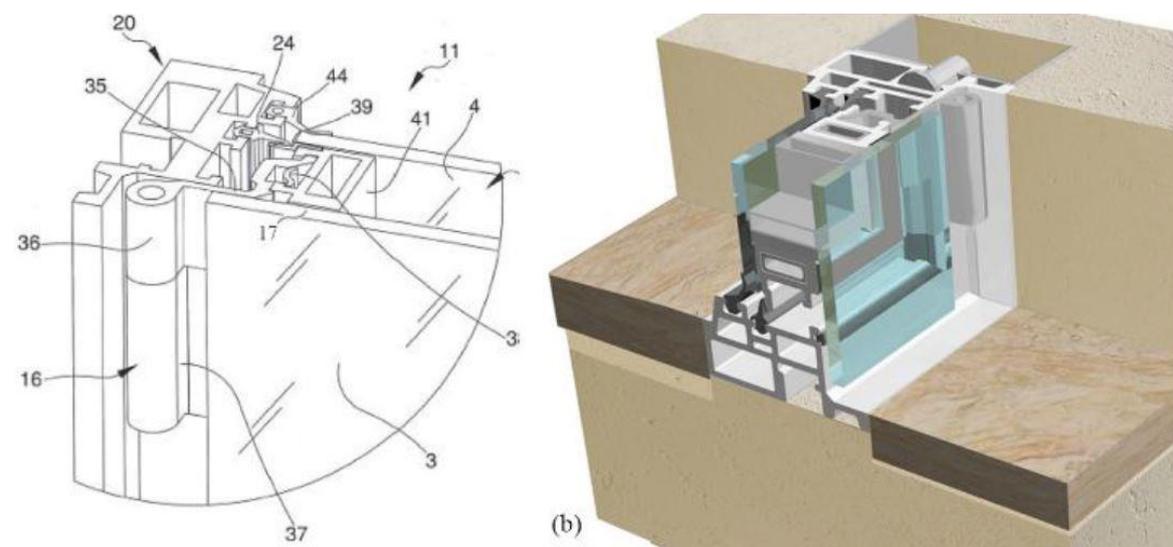


Figura 3.3 - Particolare dell'attacco telaio mobile e fisso del serramento

Questa nuova finestra integra tecnologie avanzate e materiali di ultima generazione per ottimizzare l'isolamento termico e acustico. L'uso di vetri ad alte prestazioni e di rivestimenti speciali consente di ridurre significativamente la dispersione di calore in inverno e l'ingresso di calore in estate, migliorando così il comfort abitativo e riducendo i costi energetici. Inoltre, il design di solo vetro permette di massimizzare la luminosità naturale all'interno degli ambienti, creando spazi più luminosi e accoglienti.

L'innovazione introdotta non si limita solo all'efficienza energetica e al design. Questo modello di finestra è progettato anche per essere ecologicamente sostenibile, utilizzando materiali

riciclabili e tecniche di produzione a basso impatto ambientale. La facilità di installazione e manutenzione rappresenta un ulteriore vantaggio, rendendo il prodotto conveniente sia per nuove costruzioni che per progetti di ristrutturazione.

In sintesi, il brevetto “Invisible Window Frame” introduce una finestra che combina estetica, efficienza energetica, sostenibilità e praticità, ridefinendo gli standard dei serramenti moderni e offrendo una soluzione all'avanguardia per l'architettura contemporanea.

3.2 Sistema di facciata continua per edifici

La presente invenzione riguarda un sistema di facciata continua per edifici, identificato dal Brevetto n. 102020000025636 del 18/11/2022 [19]. Questo sistema si distingue per la sua capacità di creare un rivestimento esterno prevalentemente in vetro che avvolge gli edifici, conferendo l'effetto di una superficie vetrata senza interruzioni. Contrariamente alle strutture tradizionali, che sono progettate per sopportare carichi e forze esterne, i sistemi di facciata continua non contribuiscono alla resistenza strutturale dell'edificio. Essi sono invece autoportanti e solitamente realizzati con materiali leggeri. La Figura 3.4 mostra un'applicazione della tecnologia illustrata (render).



Figura 3.4 - Montante per facciata continua (render)

Negli ultimi decenni, i sistemi di facciata continua sono stati largamente adottati in edifici di

grandi dimensioni, come edifici commerciali e uffici, per i quali conferiscono un aspetto moderno, oltre a permettere un'elevata luminosità degli spazi interni. Recentemente, tuttavia, si è osservato un aumento dell'utilizzo di questi sistemi anche in edifici residenziali, grazie ai loro vantaggi estetici e funzionali. La Figura 3.5 mostra un'applicazione dell'idea brevettuale in un ambiente residenziale.



Figura 3.5 - Montante per facciata continua: applicazione in una residenza

I sistemi di facciata continua tradizionali sono costituiti da una struttura principale (montanti) ancorata agli elementi portanti dell'edificio, come pilastri o solai, a cui vengono fissate pannellature esterne, spesso di vetro. Tuttavia, questi sistemi presentano vari svantaggi. Per sostenere efficacemente le pannellature di vetro, le strutture devono essere complesse e ingombranti, il che crea ponti termici e interrompe la continuità visiva con traversi, specialmente in superfici vetrate di grandi dimensioni. Inoltre, la loro produzione richiede tecniche laboriose e impattanti a livello ambientale, poiché coinvolge un numero rilevante di componenti.

Altri problemi includono un isolamento termico inadeguato, che comporta un aumento dei costi di riscaldamento e raffreddamento degli ambienti, e la difficoltà di assemblaggio, che necessita di manodopera specializzata.

Il Montante per facciata continua illustrato nel brevetto mira a migliorare i sistemi esistenti

per risolvere tali inconvenienti. L'obiettivo principale è creare un sistema di facciata continua che fornisca una superficie vetrata realmente senza soluzione di continuità. Altri scopi includono ridurre l'impatto ambientale del sistema, migliorare l'isolamento termico anche per ampie superfici vetrate, semplificare la struttura e facilitare un assemblaggio rapido e semplice. L'invenzione intende quindi superare i limiti dei sistemi attuali con una soluzione pratica, razionale, efficiente e a basso costo. La Figura 3.6 mostra un'applicazione del brevetto ad un edificio adibito a uffici; si noti la continuità materica in facciata.

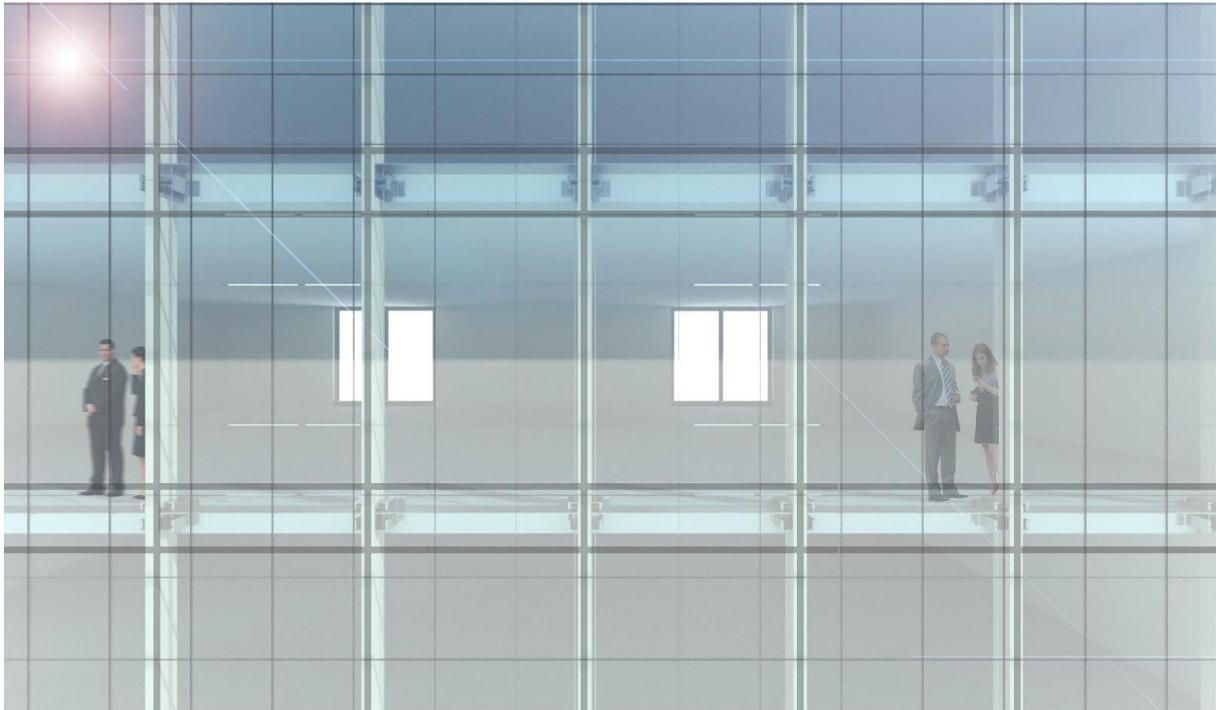


Figura 3.6 - Montante per facciata continua: applicazione vista dall'esterno

L'invenzione introduce innovazioni significative nella progettazione dei sistemi di facciata continua. Queste innovazioni includono l'utilizzo di materiali avanzati che migliorano le prestazioni termiche e riducono l'impatto ambientale. Ad esempio, l'adozione di vetri ad alta efficienza energetica e l'integrazione di elementi strutturali meno ingombranti e più facili da assemblare rappresentano passi avanti cruciali. La riduzione del numero di componenti e l'uso di tecniche di produzione più sostenibili contribuiscono a rendere il sistema più ecologico. Inoltre, l'invenzione si prefigge di migliorare l'efficienza energetica degli edifici attraverso l'uso di tecnologie innovative per l'isolamento termico. L'impiego di vetri a doppia o tripla camera, rivestimenti a bassa emissività e sistemi di schermatura solare integrati sono solo alcune delle soluzioni proposte per minimizzare la dispersione di calore in inverno e l'ingresso di calore in

estate.

L'aspetto della facilità di assemblaggio è affrontato attraverso la progettazione di un sistema modulare che può essere preassemblato in fabbrica e installato rapidamente in cantiere. Questo non solo riduce i tempi di costruzione ma diminuisce anche i costi di manodopera e la necessità di personale altamente specializzato.

In sintesi, la presente invenzione propone un sistema di facciata continua per edifici che supera i limiti dei sistemi tradizionali, offrendo soluzioni innovative per migliorare l'estetica, l'efficienza energetica, la sostenibilità ambientale e la facilità di installazione. Con queste migliorie, l'invenzione risponde alle esigenze contemporanee dell'architettura e dell'edilizia, proponendo un sistema che coniuga tecnologia avanzata e design funzionale.

4. La sperimentazione

Il presente capitolo riporta le procedure adottate sia nella preparazione dei provini dei giunti adesivi (presso il laboratorio BS&T Lab – DICEA) che nelle prove di taglio (presso il laboratorio di Progettazione meccanica – DIISM).

Per tutti i provini sono stati impiegati due adesivi epossidici strutturali commerciali bicomponenti. La scelta degli adesivi epossidici impiegati deriva sia da precedenti sperimentazioni effettuate dal gruppo di ricerca diretto dal Prof. Munafò che dal diverso valore di modulo elastico dichiarato dal produttore, come illustrato nelle pubblicazioni del gruppo di ricerca [20]–[24].

La Tabella 4.2 riporta i parametri meccanici principali degli adesivi forniti dal produttore nelle schede tecniche.

Tabella 4.2 – Parametri meccanici degli adesivi impiegati

ADESIVO	A	B
Base chimica	Bicomponente	Two-part epoxy
Viscosità	Tissotropico	Thixotropic
W_t (min)	90-300	16
Temperatura di applicazione (°C)	15-25	15-25
Temperatura di servizio (°C)	-50+120	-40+80
τ (MPa)	33.50*	29.40*
σ_t (MPa)	-	17
Modulo elastico (MPa)	3000	1500
ϵ_t^{**} (%)	3	-
Uso	Strutturale	Strutturale

*su aderendi in alluminio

Il rinforzo in nylon P6 impiegato nelle sperimentazioni è di tipo a maglia biassiale con schema di diamante, selezionato in base a lavori precedenti dello stesso gruppo di ricerca [25].

Le proprietà fisiche del materiale selezionato sono riportate in Tabella 4.3.

Tabella 4.3 – Parametri meccanici del rinforzo in nylon impiegato

Nylon P6	
Dtex al brill (gr/bave)	840/96
Fili	5600
Mechanical stop	7.5
Armatura tessuto	Tela
Peso (gr/mt)	33.50
Spessore (mm)	0.24
Modulo elastico a trazione (MPa)	968.98

La Figura 4.1 illustra il tipo di rinforzo in nylon impiegato.

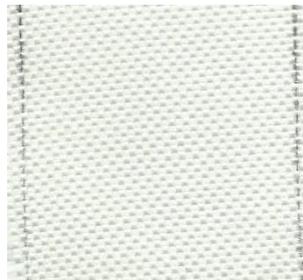


Figura 4.1 - Tessuto in nylon P6 impiegato nelle sperimentazioni

La dicitura “DTEX AT BRILL” indica il numero di bave che costituiscono i fili in ordito; il secondo valore riportato indica il DTEX, ovvero il peso in gr su 10000 m di filo.

Il tessuto in nylon P6 trova largo impiego nel settore manifatturiero per prodotti geotessili ad elevate resistenze meccaniche.

Gli aderendi impiegati nella realizzazione dei giunti sono costituiti da due diversi materiali: mogano brasiliano (aderendi interni caricati) e vetro float (aderendi esterni non caricati).

La Tabella 4.3 riporta le caratteristiche meccaniche degli aderendi in mogano, fornite dal produttore nelle schede tecniche del materiale [24], [26].

Tabella 4.4 – Parametri meccanici degli aderendi in mogano

Materiale	Sapelli Mahogany
Densità (kg/mc)	780
Densità dopo maturazione (kg/m ³)	620
Struttura istologica	Tessitura fine
Fibratura	Intrecciata
Ritiro	Moderato
σ_c (MPa)	55
E_t (MPa)	11000
Uso	Strutturale

La Tabella 4.5 riporta i parametri meccanici per gli aderendi in vetro float, secondo quanto riportato dalla normativa CNR-DT 210/2013 [17].

Tabella 4.5 – Parametri meccanici degli aderendi in vetro float (CNR-DT 210/2013).

Float glass		
α (°C ⁻¹)	E_t (GPa)	σ_t (MPa)
9×10^{-6}	75	40

Infine, l'effetto del rinforzo in nylon è stato studiato anche in relazione alla finitura superficiale degli aderendi in mogano. Il trattamento superficiale solitamente utilizzato varia a seconda della specie legnosa e dell'impiego previsto per il legno nell'ambito dell'ingegneria civile. In particolare, il trattamento superficiale del legno contribuisce a migliorare le sue prestazioni contro l'esposizione ambientale. Nella presente campagna sperimentale è stato utilizzato il trattamento superficiale per immersione.

I prodotti utilizzati sono: l'impregnante uniformante all'acqua AM508/88 e la finitura tixotropica trasparente SC1930/51.

La tabella 4.6 riporta i dati forniti dal produttore per le finiture superficiali indicate.

Tabella 4.6 – Parametri tecnici dei prodotti di finitura per gli aderendi in mogano

Prodotto	AM508/88	SC1930/51
Residuo solido (%)	14 ± 1	14 ± 1
Peso specifico (kg/lt)	1.015 ± 0.03	1.015 ± 0.03
Viscosità DIN2 a 20°C (sec)	48 ± 3	48 ± 3
	Maneggiabile 60'	Maneggiabile 60'
Essiccazione all'aria	Essiccazione 4 ore	Essiccazione 4 ore
(50g/m ² a 20°C)	Sovraverniciabile 16 ore	Sovraverniciabile 16 ore
Resa metrica (m ² /kg)	10 ÷ 12	2 ÷ 4
Numero di mani	-	Max 2
Intervallo tra le mani	-	24 ore
Grammature per mano (micron umidi)	-	150 ÷ 300
Uso	Manufatti in legno esposti all'esterno	Manufatti in legno esposti all'esterno

4.1 Test sperimentali

I test di taglio effettuati indagano le prestazioni meccaniche di giunti adesivi tra aderendi in legno di mogano e vetro float, per applicazioni relative all'ingegneria civile.

In particolare, sono sperimentate diverse configurazioni di rinforzo con tessuto in nylon P6 inserito all'interno dello strato adesivo.

I provini assemblati sono identificati secondo le seguenti sigle, dipendenti dal tipo di materiale e di finitura degli aderendi impiegati:

1. Test di taglio con su giunti adesivi DOUBLE-LAP, vetro-legno con:
 - Aderendi in mogano non trattati, adesivo epossidico tipo A e Nylon 6 applicato:
 - assente (A1, ..., A5);
 - sul legno (AM1, ..., AM5),
 - sul vetro (AV1, ..., AV5),
 - doppio, sul vetro e sul legno (AVL1, ..., AVL5);
 - Aderendi in mogano non trattati, adesivo epossidico tipo B e Nylon 6 applicato:

- assente (B1, ..., B5);
- sul legno (BM1, ..., BM5),
- sul vetro (BV1, ..., BV5),
- doppio, sul vetro e sul legno (BVL1, ..., BVL5);
- Aderendi in mogano trattati, adesivo epossidico tipo A e Nylon 6 applicato:
 - assente (A1, ..., A5);
 - sul legno (AM1, ..., AM5),
 - sul vetro (AV1, ..., AV5),
 - doppio, sul vetro e sul legno (AVL1, ..., AVL5);
- Aderendi in mogano trattati, adesivo epossidico tipo B e Nylon 6 applicato:
 - assente (B1, ..., B5);
 - sul legno (BM1, ..., BM5),
 - sul vetro (BV1, ..., BV5),
 - doppio, sul vetro e sul legno (BVL1, ..., BVL5);

4.2 Test di taglio su provini Double-Lap

Gli strumenti e la modalità di svolgimento della prova per i provini testati al tempo $T=0$ sono descritti di seguito.

La prova è stata eseguita per mezzo di una macchina di trazione equipaggiata con una cella di carico da 20kN (Figura 7), alla temperatura media di circa 20°C e ad un valore di umidità relativa media pari al 50% circa.

Con questo strumento è possibile testare gli elementi incollati fino alla rottura del campione. Il provino viene ancorato alle estremità, opportunamente carteggiate, mediante ganasce. La ganascia inferiore è fissa, mentre quella superiore è solidale alla traversa mobile della macchina.



Figura 4.2 – Test di taglio su giunti double-lap

La prova è stata eseguita ad una velocità di 1,25 mm/min.

Inoltre, sono stati posizionati dei trasduttori induttivi di spostamento (LVDT), distanziati di 120 mm, per poter misurare l'allungamento localizzato del campione.

La prova viene interrotta quando il provino arriva a rottura.

I dati misurati sono riportati su un diagramma forza-spostamento tramite il software CATMAN.

4.3 Assemblaggio dei provini Double-Lap

I provini sono stati realizzati rispettando le indicazioni geometriche fornite dalla normativa ASTM D638:2014 [27]; per ogni configurazione indicata in precedenza sono stati realizzati cinque provini.

La dimensione dei pannelli in vetro è di 200 mm × 100 mm², con spessore di 5 mm; la larghezza dei profili in legno è di 25.4 mm e la lunghezza di 140 mm.

Gli aderenti in legno hanno uno spessore di 5 mm, con area di incollaggio di dimensioni 25.4 mm × 12.7 mm² – come indicato dalla normativa ASTM D 3528-16 [28].

In tutte le configurazioni testate è stato utilizzato lo stesso spessore di incollaggio, pari a 0.30 mm, come raccomandato dal produttore.

La geometria dei provini è riportata in Figura 4.3.

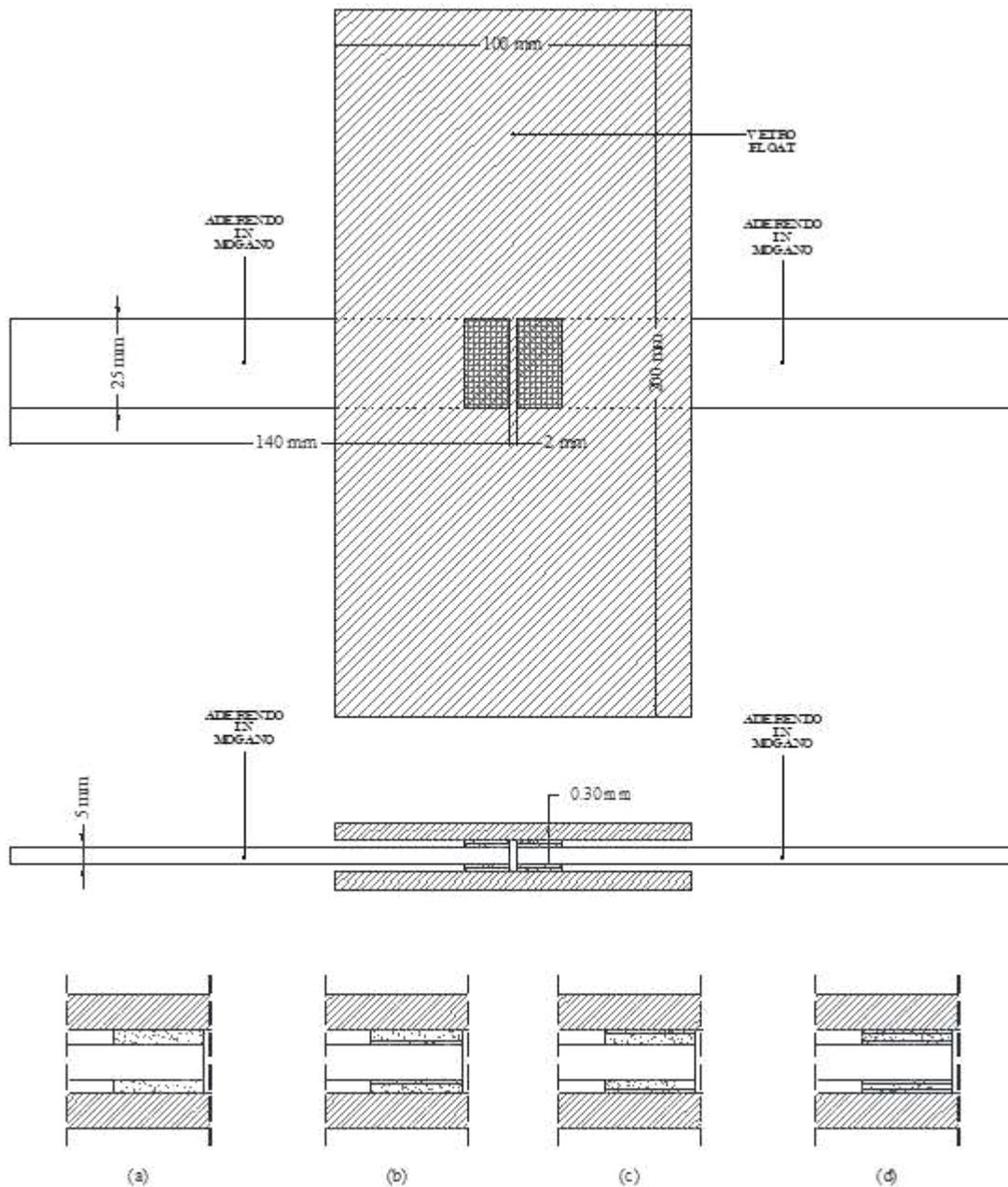


Figura 4.3 - Geometria del provino double-lap con inserto di tessuto in Nylon 6 (misure in mm)

La fase di incollaggio è stata preceduta dall'individuazione dell'area di incollaggio sugli aderendi:

sui pannelli in vetro e sugli aderendi in mogano l'area di incollaggio desiderata è stata delimitata mediante scotch carta, per evitare che la polimerizzazione dell'adesivo coinvolgesse superfici maggiori degli aderendi.

Per determinare lo spessore dello strato adesivo è stato impiegato un filo in nylon di spessore pari a 0.30 mm (come consigliato dal produttore).

È stato inoltre impiegato uno strato di scotch trasparente sui pannelli vetrati per evitare la

rottura fragile del vetro durante i test di trazione (Figura 4.4).

Prima dell'incollaggio, gli aderendi in legno sono stati abrasivi manualmente in corrispondenza della regione adesiva, mediante fogli in carta vetrata per migliorare l'adesione tra adesivo e supporto.

Tutte le superfici da incollare sono state preventivamente pulite mediante alcool isopropilico denaturato.

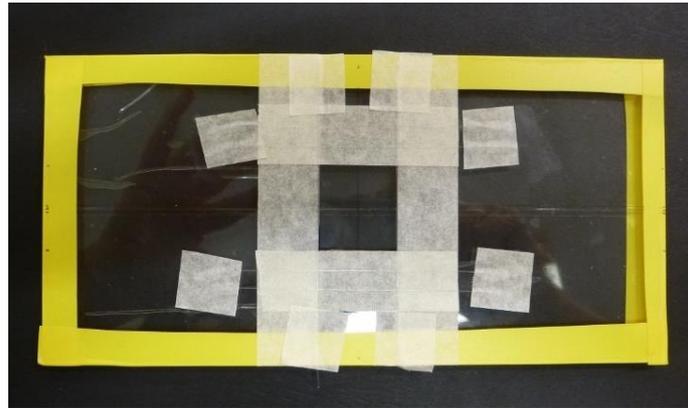


Figura 4.4 – Aderendo in vetro float per provini double-lap

Le resine epossidiche bicomponenti sono state miscelate attraverso una pistola pneumatica fornita dal produttore degli adesivi e applicate direttamente sui provini in fase di incollaggio, illustrata nella figura sottostante (Figura 4.5).



Figura 4.5 – Fase di incollaggio

Le caratteristiche meccaniche indicate dai produttori degli adesivi nelle schede tecniche

riguardano i moduli di elasticità a trazione (E_t , Elastic modulus in tension). Le caratteristiche migliori in termini di rigidità sono quelle relative all'adesivo A, con un modulo elastico pari a 3000 MPa. L'adesivo B mostra analoghe caratteristiche chimico-fisiche, con rigidità pari alla metà dell'adesivo precedente (1500 MPa). Ad un valore inferiore del modulo elastico corrisponde una maggior duttilità; pertanto, la differenza dei moduli elastici consente di verificare le prestazioni sperimentali con le applicazioni previste, validandone o meno la compatibilità meccanica.

Per ciascun adesivo strutturale impiegato (adesivi A e B) sono stati assemblati i provini secondo le seguenti configurazioni:

- V: 5 provini con il nylon 6 in prossimità della superficie del vetro float,
- M: 5 provini con il nylon 6 in prossimità dell'aderendo in mogano,
- LM: 5 provini con doppio strato di nylon sul vetro e sul legno in mogano.

La Figura 4.6 illustra le diverse configurazioni assemblate.

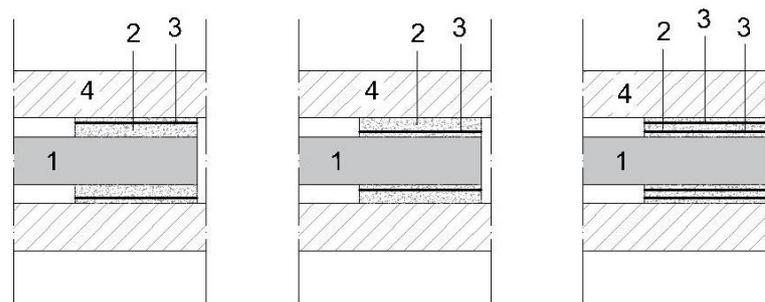


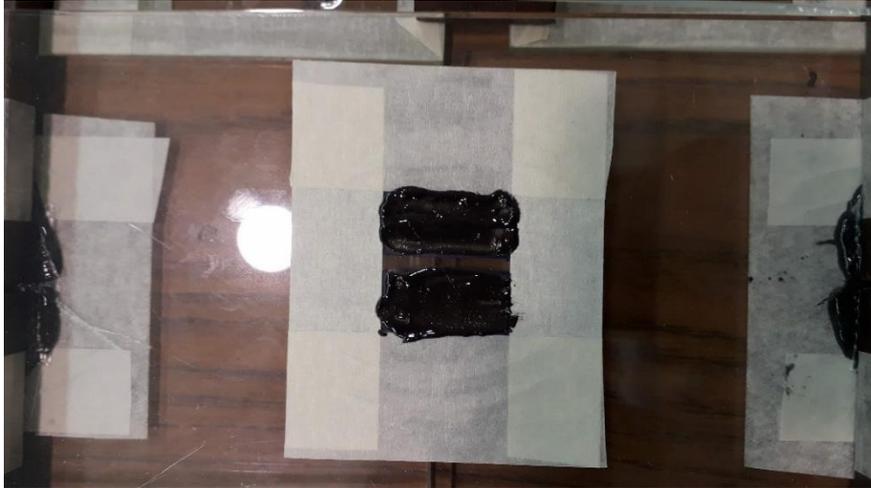
Figura 4.6 - Posizione del rinforzo in Nylon P6 nello strato adesivo

Le diverse fasi di assemblaggio (Figura 4.7) del giunto adesivo sono costituite dalle seguenti:

- a. un quantitativo sufficiente di adesivo premiscelato viene apposto sulla superficie in vetro (aderendo esterno non caricato), evitando di far fluire l'adesivo nello spazio tra le teste dei due aderendi interni caricati;
- b. l'adesivo viene livellato nella sua area di incollaggio per permettere l'eventuale applicazione dello strato in nylon P6;
- c. nelle configurazioni rinforzate viene applicato un ulteriore strato di adesivo epossidico a coprire;
- d. all'ultimo strato adesivo viene apposto il profilo dell'aderendo interno caricato (in legno di mogano);
- e. la fase indicata in (a) viene reiterata per permettere la formazione della superficie di

incollaggio del vetro;

- f. viene effettuato l'incollaggio del pannello in vetro float;
- g. al provino viene applicata una pressione esterna per circa 10 giorni, per permettere una corretta polimerizzazione dell'adesivo.



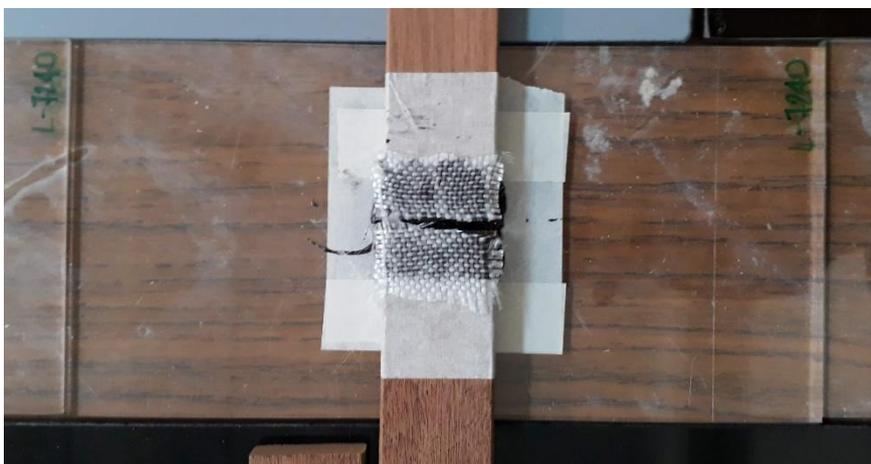
(a)



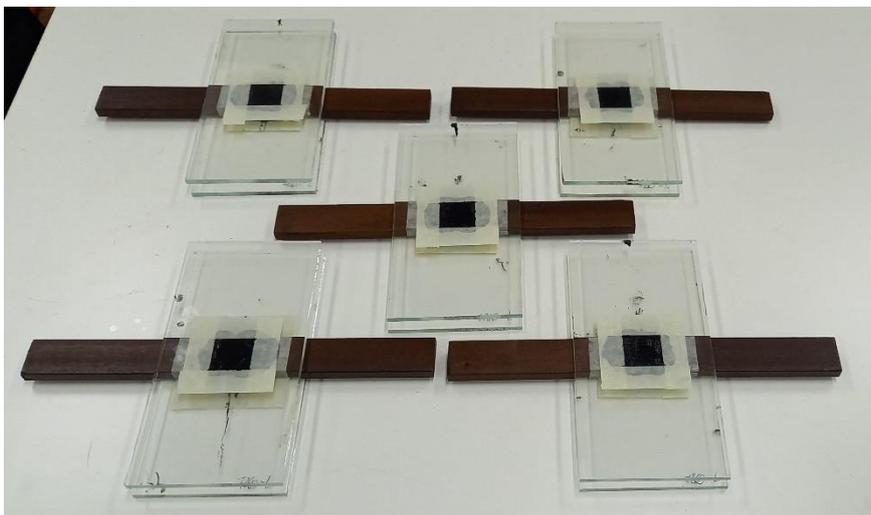
(b)



(c)



(d)



(f)

Figura 4.7 - Assemblaggio dei provini double-lap

5. Risultati sperimentali

Il presente capitolo riporta i risultati delle prove sperimentali di taglio svolte su provini double-lap tra aderendi in mogano e vetro float, con diverse configurazioni di rinforzo in nylon e di trattamento superficiale degli aderendi in legno.

5.1 Risultati prove di taglio su provini Double-Lap

Nella presente sezione si riportano i grafici sperimentali forza-spostamento delle diverse configurazioni di rinforzo in tessuto di nylon P6 (su legno, su vetro e doppio, ovvero sia sulle superfici in vetro che in mogano) per diverse tipologie di finiture superficiali degli aderendi in legno (legno grezzo e legno immerso).

I risultati sperimentali riportati sono relativi alle prove effettuate dopo maturazione in condizione di laboratorio per 28 giorni, come suggerito dal produttore degli adesivi impiegati. I valori di rigidezza globale dei giunti sono stati elaborati considerando il tratto lineare iniziale delle varie curve forza-spostamento, prima dell'insorgere della non linearità corrispondente all'innesco del danno nello strato adesivo.

In tal modo è stato possibile determinare la tensione tangenziale massima (τ_{\max}) ed il modulo di taglio (G) con la seguente relazione:

$$G = k \cdot \frac{t}{A}$$

Dove G è il modulo di taglio, k la rigidezza, A l'area di incollaggio pari a $12,5 \times 25 \text{ mm}^2$, t lo spessore dell'incollaggio.

I provini testati sono suddivisi in base all'adesivo epossidico impiegato (A, B), alla posizione del rinforzo ed alla finitura dei profili in mogano.

I provini sono siglati in base al tipo di adesivo (A, B, C), alla diversa modalità di applicazione del nylon 6 ed al numero del provino (1, 2, 3) dove:

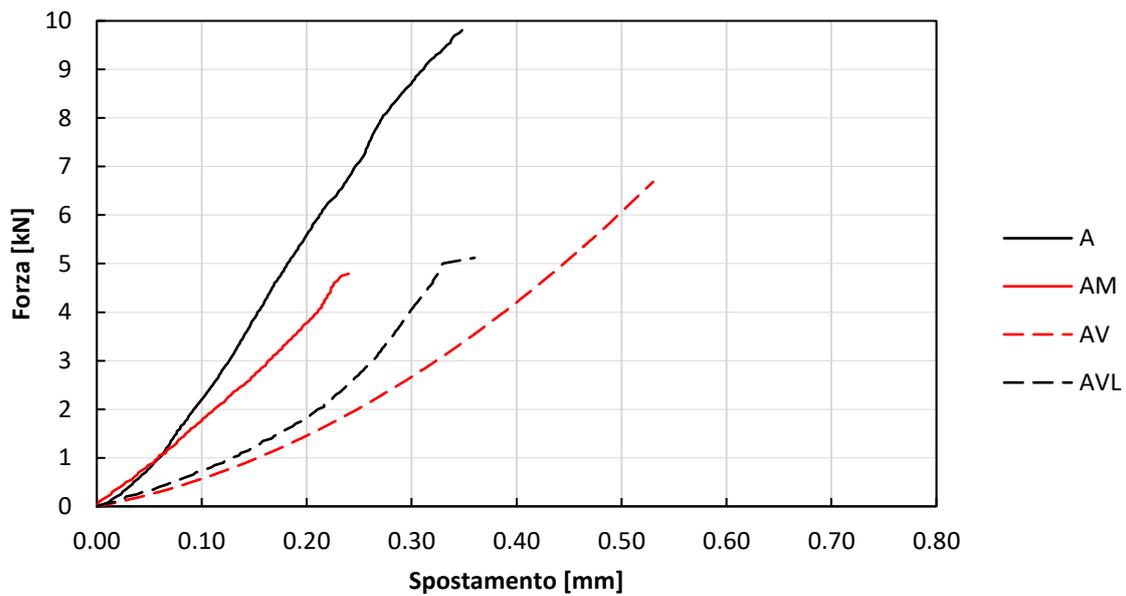
- M indica la posizione sugli aderendi in mogano
(es: AM1 è il provino n.1 con adesivo A e nylon sugli aderendi in legno),
- V in prossimità del vetro float (ad es: BV1),
- VL indica la configurazione doppia, ossia un tessuto il nylon 6 in aderenza al vetro ed all'aderendo in legno.

I provini senza nylon sono indicati semplicemente con le sigle "A" e "B".

Le Figure seguenti riportano i grafici forza-spostamento medie suddivisi in base alle configurazioni testate.

Le Tabelle riportano i parametri meccanici misurati o calcolati in seguito alle prove di laboratorio.

Adesivo A - Mogano non trattato



Adesivo A - Mogano trattato

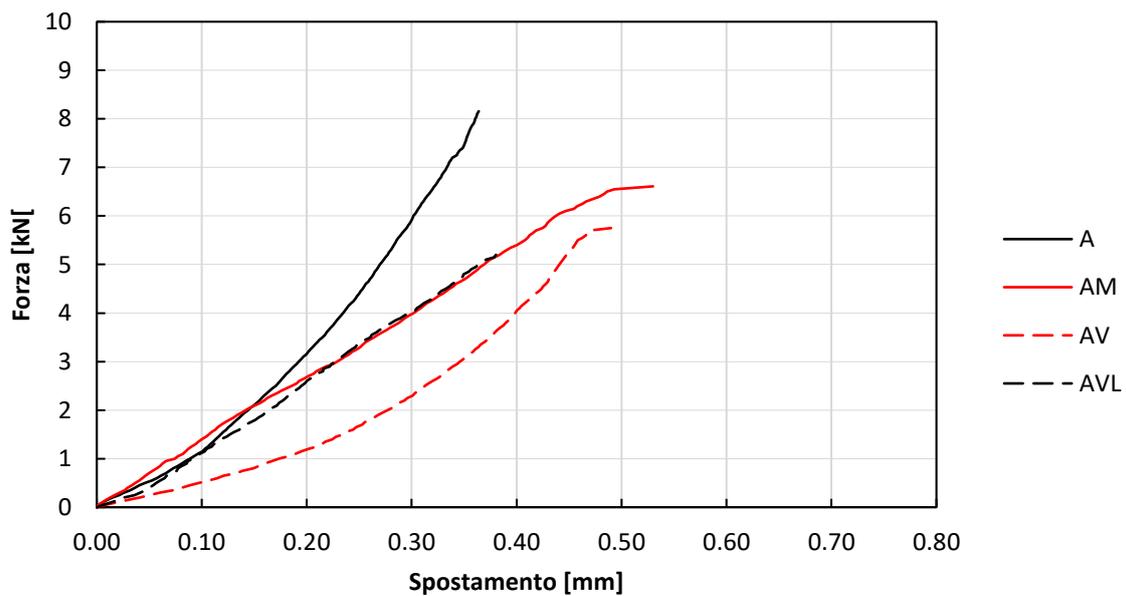


Tabella 4.7 - dati dei provini a rottura di taglio con colla A ed aderenti non trattati

ADESIVO		ADESIVO EPOSSIDICO A																			
ADERENDI		Mogano non trattato																			
G adesivo		40.50 MPa																			
spessore di default		0.30 mm																			
NYLON 6		ASSENTE					SU LEGNO					SU VETRO					DOPPIO				
PROVNI	Unità di misura	A1	A2	A3	A4	A5	AM 1	AM 2	AM 3	AM 4	AM 5	AV 1	AV 2	AV 3	AV 4	AV 5	AVL 1	AVL 2	AVL 3	AVL 4	AVL 5
F _{max}	kN	10.13	9.76	9.79	11.34	8.02	4.01	4.95	4.10	5.98	4.93	7.35	-	4.93	8.15	5.98	4.07	4.57	5.82	5.30	5.84
S _{max}	mm	0.21	0.40	0.42	0.45	0.28	0.32	0.09	0.21	0.15	0.45	0.40	-	0.58	0.58	0.55	0.05	0.22	0.36	0.52	0.66
k	kN/m	47.82	24.56	23.10	25.46	29.12	12.58	53.86	19.42	39.67	10.96	18.24	-	8.47	14.11	10.88	74.88	21.08	16.23	10.28	8.89
G	MPa	12.77	8.19	7.94	8.98	8.37	3.81	12.91	5.18	9.95	3.89	6.12	-	3.49	5.78	4.33	17.60	5.66	5.16	3.93	3.96
τ _{max}	MPa	7.85	7.57	7.59	8.79	6.21	3.11	3.84	3.18	4.63	3.82	5.70	-	3.82	6.32	4.63	3.16	3.54	4.51	4.11	4.52
K _{media}	kN/m	30.01					27.30					12.93					26.27				
DEV.ST K		10.20					18.74					4.23					27.61				
Coeff. di variaz.		34%					69%					33%					105%				
G _{media}	MPa	9.25					7.15					4.93					7.26				
DEV.ST G		2.00					4.08					1.23					5.83				
Coeff. di variaz.		22%					57%					25%					80%				
F _{max media}	kN	9.81					4.79					6.60					5.12				
DEV.ST F		1.19					0.80					1.43					0.78				
Coeff. di variaz.		12%					17%					22%					15%				
S _{max medio}	mm	0.35					0.24					0.53					0.36				
DEV.ST S		0.10					0.14					0.09					0.24				
Coeff. di variaz.		29.1%					58.7%					16.3%					66.4%				

Figura 4.5.1- Curve forza-spostamento medie ottenute per i provini double-lap con adesivo A

Dai dati visibili sopra si può notare come le giunzioni con l'adesivo epossidico di tipo A registrino un decremento graduale delle prestazioni in termini di rigidità (k), soprattutto quando il tessuto in nylon 6 è messo in aderenza con il vetro float (provino tipo AV).

Tabella 4.8 - dati dei provini a rottura di taglio con colla A ed aderendi trattati per immersione

ADESIVO		ADESIVO EPOSSIDICO A																			
ADERENDI		Mogano immerso																			
G adesivo		40.50 MPa																			
spessore di default		0.30 mm																			
NYLON 6		ASSENTE					SU LEGNO					SU VETRO					DOPPIO				
PROVNI	Unità di misura	A1	A2	A3	A4	A5	AM 1	AM 2	AM 3	AM 4	AM 5	AV 1	AV 2	AV 3	AV 4	AV 5	AVL 1	AVL 2	AVL 3	AVL 4	AVL 5
F _{max}	kN	9.35	8.80	7.38	8.50	6.75	7.17	6.81	5.51	6.94	6.60	5.59	4.55	6.82	5.98	5.81	6.78	7.05	6.77	6.33	6.86
S _{max}	mm	0.42	0.57	0.44	0.26	0.26	0.26	0.86	0.47	0.53	0.52	0.28	0.42	0.84	0.49	0.43	0.55	0.27	0.54	0.44	0.63
k	kN/m	22.50	15.57	16.62	32.70	26.34	27.75	7.96	11.85	13.04	12.63	19.64	10.94	8.12	12.28	13.38	12.24	26.09	12.62	14.34	10.85
G	MPa	7.66	6.30	5.86	9.23	7.40	7.82	4.28	4.28	5.09	4.87	5.71	3.73	4.31	4.55	4.66	4.89	7.45	4.95	5.04	4.71
τ _{max}	MPa	7.24	6.82	5.72	6.59	5.23	5.56	5.27	4.27	5.38	5.12	4.33	3.53	5.29	4.63	4.51	5.25	5.46	5.25	4.90	5.31
K _{media}	kN/m	22.75					14.65					12.87					15.23				
DEV.ST K		7.09					7.60					4.26					6.20				
Coeff. di variaz.		31%					52%					33%					41%				
G _{media}	MPa	7.29					5.27					4.59					5.41				
DEV.ST G		1.32					1.47					0.72					1.15				
Coeff. di variaz.		18%					28%					16%					21%				
F _{max media}	kN	8.16					6.61					5.75					6.76				
DEV.ST F		1.07					0.65					0.82					0.26				
Coeff. di variaz.		13%					10%					14%					4%				
S _{max medio}	mm	0.39					0.53					0.49					0.49				
DEV.ST S		0.13					0.22					0.21					0.14				
Coeff. di variaz.		33.8%					40.8%					42.5%					28.5%				

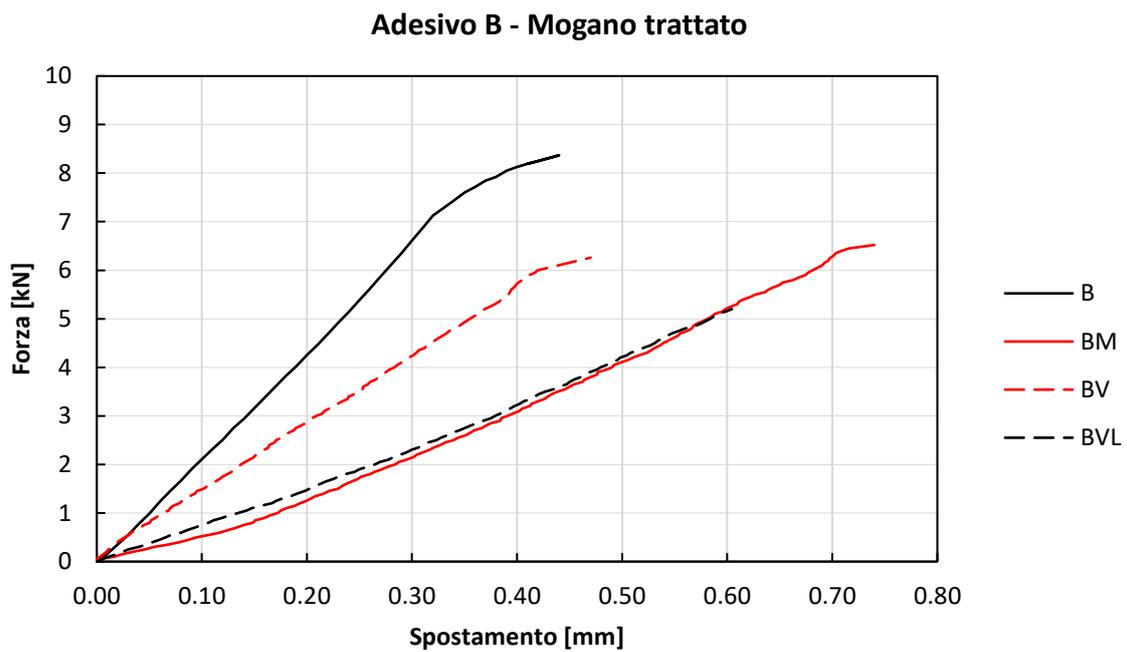
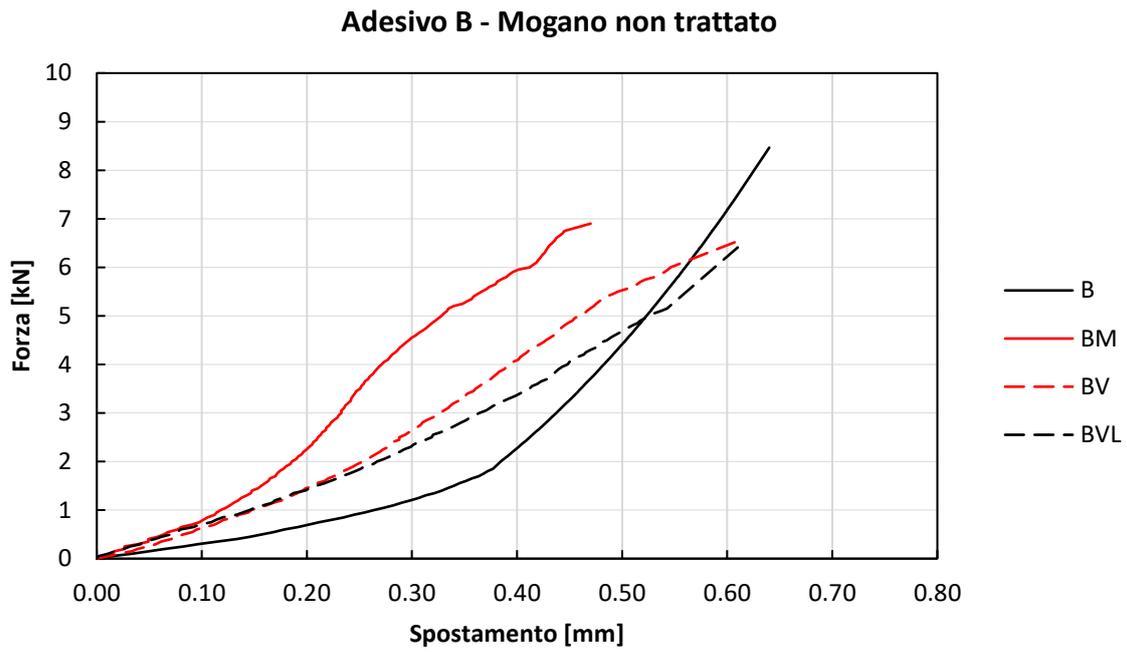


Figura 5.2- Curve forza-spostamento medie ottenute per i provini double-lap con colla B

Tabella 4.9 - dati dei provini a rottura di taglio con adesivo B ed aderendi non trattati

ADESIVO		ADESIVO EPOSSIDICO B																			
ADERENDI		Mogano non trattato																			
G adesivo		40.50 MPa																			
spessore di default		0.30 mm																			
NYLON 6		ASSENTE					SU LEGNO					SU VETRO					DOPPIO				
PROVNI	Unità di misura	B1	B2	B3	B4	B5	BM 1	BM 2	BM 3	BM 4	BM 5	BV 1	BV 2	BV 3	BV 4	BV 5	BVL 1	BVL 2	BVL 3	BVL 4	BVL 5
F _{max}	kN	9.42	3.99	7.82	9.34	10.43	7.18	5.96	7.24	7.77	6.35	7.44	6.40	7.21	5.89	5.77	5.09	7.97	5.14	7.44	6.43
S _{max}	mm	0.79	0.85	0.44	0.80	0.31	0.32	0.54	0.66	0.50	0.33	0.50	0.73	0.88	0.59	0.35	0.50	0.68	0.65	0.62	0.62
k	kN/m	11.92	4.72	17.64	11.72	33.98	22.76	10.96	10.98	15.42	19.25	14.85	8.79	8.25	9.94	16.42	10.27	11.76	7.92	11.92	10.38
G	MPa	6.04	2.51	6.21	5.98	10.14	6.87	4.33	4.90	5.82	5.91	5.59	4.20	4.51	4.14	5.17	3.84	5.35	3.50	5.13	4.45
τ _{max}	MPa	7.30	3.09	6.06	7.24	8.08	5.57	4.62	5.61	6.02	4.92	5.77	4.96	5.59	4.47	4.47	3.95	6.18	3.98	5.76	4.98
Kmedia	kN/m	16.00					15.87					11.65					10.45				
DEV.ST K		11.05					5.17					3.73					1.61				
Coeff. di variaz.		69%					33%					32%					15%				
Gmedia	MPa	6.18					5.57					4.72					4.45				
DEV.ST G		2.70					0.98					0.63					0.80				
Coeff. di variaz.		44%					18%					13%					18%				
F _{max} media	kN	8.20					6.90					6.54					6.41				
DEV.ST F		2.53					0.73					0.76					1.31				
Coeff. di variaz.		31%					11%					12%					20%				
S _{max} medio	mm	0.64					0.47					0.61					0.61				
DEV.ST S		0.25					0.14					0.20					0.07				
Coeff. di variaz.		38.5%					30.8%					33.5%					11.1%				

Analizzando i risultati sperimentali è possibile osservare nuovamente una riduzione dei coefficienti di rigidezza globale dovuti all'applicazione dei rinforzi in nylon P6. I valori di rigidezza minori sono ottenuti dalle configurazioni con rinforzo applicato sia su vetro che sugli aderendi in mogano trattato per immersione.

Tabella 4.10 - dati dei provini a rottura di taglio con adesivo B ed aderendi trattati per immersione

ADESIVO		ADESIVO EPOSSIDICO B																			
ADERENDI		Mogano immerso																			
G adesivo		40.50 MPa																			
spessore di default		0.30 mm																			
NYLON 6		ASSENTE					SU LEGNO					SU VETRO					DOPPIO				
PROVNI	Unità di misura	B1	B2	B3	B4	B5	BM 1	BM 2	BM 3	BM 4	BM 5	BV 1	BV 2	BV 3	BV 4	BV 5	BVL 1	BVL 2	BVL 3	BVL 4	BVL 5
F _{max}	kN	10.74	9.18	9.35	5.90	7.64	6.75	6.08	6.64	6.93	6.19	7.36	5.58	6.45	6.50	5.42	6.14	6.46	6.62	5.26	5.84
S _{max}	mm	0.46	0.52	0.37	0.32	0.40	0.80	0.77	0.77	0.69	0.65	0.59	0.60	0.65	0.28	0.26	0.95	0.70	0.74	0.65	0.57
k	kN/m	23.42	17.69	25.39	18.45	19.14	8.42	7.93	8.59	10.04	9.50	12.56	9.30	9.90	23.62	21.16	6.48	9.18	8.91	8.15	10.30
G	MPa	8.40	6.80	8.17	5.60	6.39	4.31	3.94	4.29	4.63	4.21	5.20	3.90	4.39	6.79	5.94	3.76	4.29	4.32	3.59	4.18
τ _{max}	MPa	8.32	7.12	7.25	4.58	5.92	5.23	4.71	5.14	5.37	4.80	5.71	4.32	5.00	5.04	4.20	4.76	5.00	5.13	4.07	4.53
K _{media}	kN/m	20.82					8.90					15.31					8.60				
DEV.ST K		3.39					0.86					6.64					1.42				
Coeff. di variaz.		16%					10%					43%					16%				
G _{media}	MPa	7.07					4.28					5.24					4.03				
DEV.ST G		1.19					0.25					1.16					0.33				
Coeff. di variaz.		17%					6%					22%					8%				
F _{max media}	kN	8.56					6.52					6.26					6.06				
DEV.ST F		1.85					0.37					0.79					0.54				
Coeff. di variaz.		22%					6%					13%					9%				
S _{max medio}	mm	0.41					0.74					0.48					0.72				
DEV.ST S		0.08					0.06					0.19					0.14				
Coeff. di variaz.		18.8%					8.6%					39.8%					19.7%				

Dai dati sperimentali riportati si osserva come l'inserimento del tessuto in nylon determina una notevole riduzione delle rigidezze medie, soprattutto nel caso di applicazione doppia su vetro e legno (BVL).

5.2 Modalità di rottura dei provini double-lap

La determinazione della tipologia di frattura (failure mode), nel caso degli adesivi, è particolarmente importante per verificare se l'adesivo è adatto alle applicazioni cui è destinato. L'analisi della frattura può essere fatta tramite microscopi più o meno precisi o tramite l'ispezione visiva.

Sono tre le tipologie di frattura che si possono avere:

- frattura coesiva: su entrambi i substrati rimane uno strato di adesivo;
- frattura adesiva: netta separazione tra l'adesivo e uno dei due substrati;
- frattura mista: combinazione di frattura adesiva e frattura coesiva.



Il cedimento coesivo rappresenta il modo ideale di rottura del giunto; tuttavia, nella realtà, si ha il cedimento misto che viene espresso come percentuale del cedimento coesivo ed adesivo.

In seguito ai test di taglio, tutti i provini sono stati analizzati graficamente per descrivere le loro particolari modalità di rottura.

Per evidenziare le diverse modalità di crisi, si fa riferimento alla normativa ASTM D 5573-99.

La Figura 5.3 mostra le diverse modalità di crisi osservate:

- **Adhesive Failure (AF):** la crisi del giunto si verifica nell'interfaccia dell'adesivo con l'aderendo, con l'adesivo che rimane aderente alla superficie del vetro o del substrato; non si osserva adesione sul lato opposto;
- **Cohesive Failure (CF):** la frattura si verifica all'interno dello strato adesivo, che resta aderente ad entrambi gli aderendi (vetro e legno);
- **Light-Fiber-Tear-Failure (LFTF):** sottile frattura delle fibre superficiali degli aderendi in legno. Si osserva una delaminazione del materiale all'interfaccia con l'adesivo, che resta tuttavia aderente al substrato in vetro;
- **Thin-Layer Cohesive Failure (TLC).** Crisi simile al modo coesivo, con un sottile strato adesivo su una superficie ed uno più spesso sull'altra. La separazione avviene all'

strato adesivo, che rimane su entrambe le superfici ma con spessore diverso.

- **Stock-Break Failure (SB)**: crisi degli aderenti fuori dalla regione di incollaggio.
- **Mixed Failure (MF)**: combinazione di due o più modalità di crisi sopra elencate.
- **Glass Failure (GF)**: la crisi si manifesta nell'aderendo in vetro.

La Tabella 4.11 riporta le modalità di crisi dei provini testati, che per quasi tutte le combinazioni testate è stata di tipo mista (**MF, Mixed Failure**). Le modalità di crisi sono composte dalle modalità LFTF e TLC combinate in varie percentuali con valori variabili a seconda delle combinazioni testate.

Tabella 4.11 – Percentuali dei provini a rottura di taglio con adesivo B ed aderendi trattati per immersione

Trattamento aderendi	Configurazione	Modo di crisi	
-	A	1 MF:(30% SB + 40% LFTF + 10% CF + 20% AF) 1 MF:(15% TLC + 85% LFTF) 1 GF 1 MF:(5% TLC + 95% LFTF) 1 MF:(5% AF + 2% TLC + 93% LFTF)	
	AM	2 MF:(80% LFTF + 20% CF) 1 MF:(30% TLC + 70% LFTF) 2 MF:(40% TLC + 60% LFTF)	
	AV	1 MF:(45% TLC + 55% CF) 2 MF:(10% TLC + 90% CF) 1 CF 1 MF:(5% TLC + 95% CF)	
	AVL	2 CF 1 MF:(50% CF + 50% GD) 2 MF:(5% TLC + 95% CF)	
	B	1 MF:(10% TLC + 90% LFTF) 2 MF:(80% LFTF + 20% TLC) 1 MF:(95% LFTF + 5% TLC) 1 MF:(93% LFTF + 7% TLC)	
	BM	1 MF:(7% TLC + 93% CF) 2 MF:(15% TLC + 85% CF) 2 CF	
	BV	1 MF:(50% TLC + 50% CF) 1 MF:(15% TLC + 85% CF) 3 CF	
	BVL	1 MF:(30% TLC + 70% CF) 2 CF 2 MF:(20% TLC + 80% CF)	
	Immersione	A	1 MF:(50% AF + 20% LFTF + 30% TLC) 1 MF:(40% AF + 17% LFTF + 40% AF + 3% TLC) 1 MF:(80% AF + 10% LFTF + 10% TLC) 1 MF:(9% TLC + 56% LFTF + 25% AF) 1 MF:(96% AF + 4% TLC)
		AM	1 MF:(50% TLC + 50% CF) 1 MF:(70% TLC + 20% LFTF + 10% CF) 1 MF:(75% TLC + 10% LFTF + 15% AF) 1 MF:(25% TLC + 60% LFTF + 5% AF + 10% CF) 1 MF:(70% LFTF + 30% CF)
AV		1 MF:(50% LFTF + 50% CF) 1 MF:(30% TLC + 15% LFTF + 15% AF + 40% CF) 1 MF:(20% TLC + 70% LFTF + 10% AF) 1 MF:(10% TLC + 60% LFTF + 5% AF + 25% CF) 1 MF:(3% TLC + 82% LFTF + 15% AF)	
AVL		1 MF:(5% TLC + 92% LFTF + 3% AF) 1 MF:(7% TLC + 88% LFTF + 5% AF) 1 MF:(5% TLC + 70% LFTF + 25% CF) 1 MF:(5% TLC + 55% LFTF + 40% CF) 1 MF:(6% TLC + 91% LFTF + 3% AF)	
B		1 MF:(20% LFTF + 88% AF + 5% CF) 1 LFTF 3 MF:(70% LFTF + 30% AF) 1 MF:(70% LFTF + 30% CF)	
BM		1 MF:(5% TLC + 75% LFTF + 20% CF) 1 MF:(7% TLC + 63% LFTF + 30% CF) 1 MF:(30% TLC + 70% LFTF) 1 MF:(35% TLC + 55% LFTF + 10% CF)	
BV		1 MF:(3% TLC + 77% LFTF + 20% CF) 1 MF:(5% TLC + 75% LFTF + 20% CF) 1 MF:(35% TLC + 65% LFTF + 5% AF) 1 SB 1 MF:(25% TLC + 72% LFTF + 3% CF)	
BVL		1 MF:(20% TLC + 30% LFTF + 50% CF) 1 MF:(5% TLC + 55% LFTF + 40% CF) 1 MF:(47% LFTF + 50% CF) 1 MF:(30% LFTF + 70% CF) 1 MF:(10% TLC + 35% LFTF + 50% AF + 5% CF)	

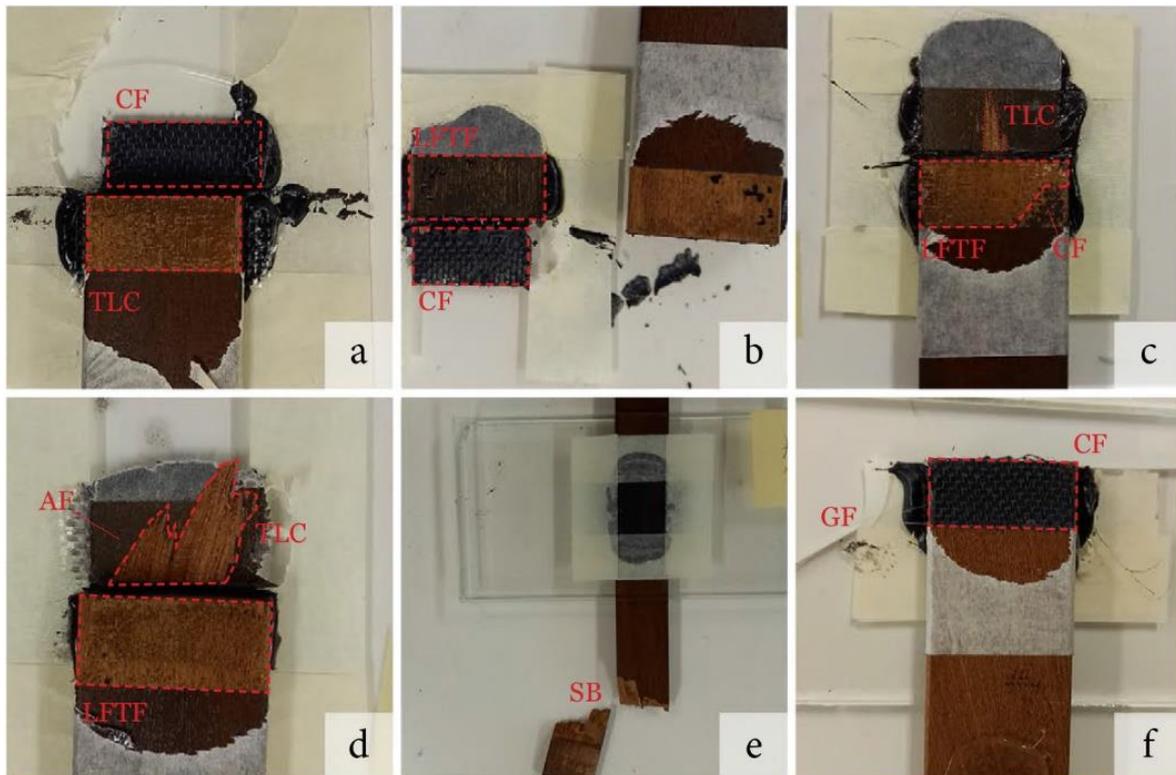


Figura 5.3 (a-f) – Modalità di crisi dei giunti adesivi double-lap: a) TLC e CF; b) CF e LFTF; c) LFTF, CF e TLC; d) LFTF, AF e TLC; e) SB; f) CF e GF.

Nel caso di giunti con aderendi in legno non trattato, si osserva - per tutti gli adesivi e le configurazioni rinforzate - una maggiore frequenza di modalità di rottura coesiva (CF), che indica una migliore adesione dello strato adesivo al substrato di legno. Nel caso di combinazioni con adesivi per legno trattato, si osserva - per tutti gli adesivi e le configurazioni rinforzate - un alto tasso di rottura che coinvolge strati profondi del materiale di supporto nella regione incollata. In alcune configurazioni (ad esempio nel caso di aderendi trattati con rinforzi su legno o su vetro) si osservano anche delaminazioni degli strati superficiali degli adesivi al di fuori della regione di incollaggio.

6. Discussione dei risultati

L'applicazione del rinforzo in fibra di nylon nello strato adesivo si accompagna ad una riduzione del carico ultimo del giunto rispetto alla configurazione non rinforzata, per tutti i casi sperimentati.

Si rileva un miglioramento dell'adesione in quanto tale applicazione permette generalmente un aumento della deformabilità globale del giunto, con conseguente aumento di duttilità rispetto alla configurazione non rinforzata. L'adesivo A esibisce la migliore prestazione meccanica in termini di resistenza ultima per la configurazione non rinforzata, mentre si osserva mediamente una maggior resistenza ultima dell'adesivo B nelle configurazioni rinforzate.

Le Figura 6.1 e Figura 6.2 riassumono i valori medi di rigidezza per i giunti al variare della posizione del rinforzo in fibra di nylon.

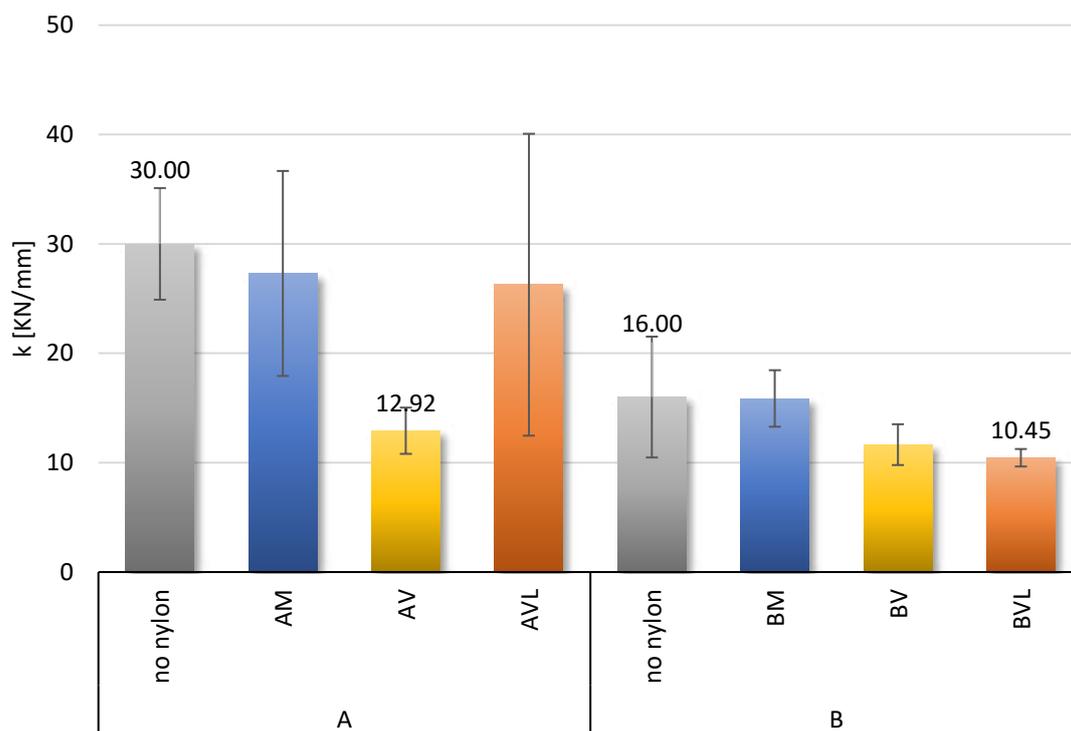


Figura 6.1 – Rigidezze medie per provini con aderenti in mogano non trattato.

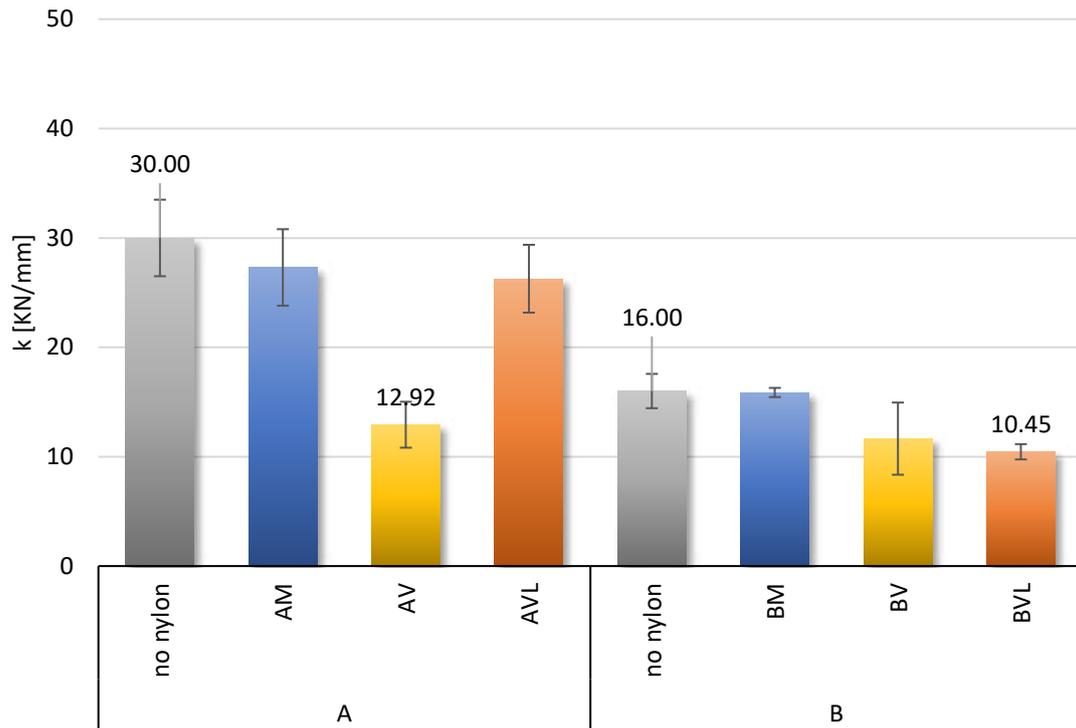


Figura 6.2 – Rigidezze medie per provini con aderendi in mogano trattato.

L'utilizzo del rinforzo comporta un aumento della duttilità globale del giunto.

L'adesivo A esibisce quasi per tutte le configurazioni testate i valori di rigidezza maggiori.

7. Conclusioni

Il presente lavoro descrive l'effetto del rinforzo in nylon P6 sul comportamento meccanico di giunti adesivi tra legno e vetro, assemblati mediante due adesivi epossidici, con diverse finiture degli aderendi (grezzi o trattati per immersione). Si evidenzia il contributo del rinforzo in nylon al variare della sua posizione nello strato adesivo. Lo scopo è di verificare la compatibilità degli aderendi e l'effetto del rinforzo sulla prestazione globale del giunto.

I test sperimentali includono:

- 5 giunti double-lap con aderendi in mogano non trattato e vetro float, incollati con due tipologie di adesivi epossidici strutturali (A e B);
- 5 giunti double-lap con aderendi in mogano trattato per immersione e vetro float, incollati con due tipologie di adesivi epossidici strutturali (A e B);
- 5 giunti double-lap con aderendi in mogano non trattato e vetro float con rinforzo in fibra di nylon sulle superfici in legno, incollati con due tipologie di adesivi epossidici strutturali (A e B);
- 5 giunti double-lap con aderendi in mogano non trattato e vetro float con rinforzo in fibra di nylon sulle superfici in vetro, incollati con due tipologie di adesivi epossidici strutturali (A e B);
- 5 giunti double-lap con aderendi in mogano non trattato e vetro float con rinforzo in fibra di nylon sia sulle superfici in legno che in vetro, con due tipologie di adesivi epossidici strutturali (A e B);

I principali risultati ottenuti sono i seguenti:

- L'adesivo A mostra i migliori valori di rigidità ($k_{max}=30.01$ kN/mm), di resistenza ultima (9.81 kN) e di tensione tangenziale (7.60 MPa) nella configurazione non rinforzata nel caso di superfici non trattate.
- L'adesivo B mostra il valore più elevato di rigidità ($k_{max}=20.82$ kN/mm), di resistenza ultima (8.56 kN) e di tensione di taglio (6.64 MPa) nella configurazione non rinforzata nel caso di superfici trattate.
- Per l'adesivo A l'impiego del rinforzo in nylon comporta un aumento degli spostamenti rispetto alle configurazioni non rinforzate ad eccezione delle configurazioni con rinforzi su legno e su entrambi gli aderendi. Infatti, si osserva una diminuzione dei valori di resistenza ultima (fino al -47%). Si osservano inoltre un aumento degli spostamenti

ultimi (fino al +51%) ed un incremento in termini di duttilità (fino al +57%).

- Anche nel caso dell'adesivo B, l'utilizzo del rinforzo in nylon comporta una diminuzione generale dei valori di resistenza ultima (fino al -30.50%). Sono inoltre osservabili un aumento degli spostamenti ultimi (fino al +15% nel caso della configurazione con mogano trattato e rinforzato rispetto alla configurazione con giunto semplice e mogano non trattato).
- I provini non rinforzati trattati superficialmente mostrano valori di resistenza ultima maggiori rispetto ai provini non rinforzati e non trattati (UTM) nel caso dell'adesivo B, evidenziando un incremento della prestazione pari al 4.39%.
- I provini rinforzati non trattati mostrano tutti valori di resistenza ultima inferiori rispetto ai provini non rinforzati nel caso dell'adesivo A. Si osserva infatti un decadimento massimo della prestazione pari a circa -51% nel caso della configurazione con aderendi non trattati e con rinforzo su legno rispetto alla configurazione non trattata e non rinforzata.
- I provini rinforzati non trattati mostrano valori di resistenza ultima inferiori rispetto ai provini non rinforzati nel caso dell'adesivo B. Si osserva un decadimento massimo della prestazione pari a circa -22% nel caso della configurazione con aderendi non trattati e rinforzi applicati su vetro rispetto alla configurazione non trattata e non rinforzata.
- Considerando l'adesivo B, i provini rinforzati trattati mostrano valori di resistenza ultima inferiori rispetto ai provini non rinforzati. Si osserva infatti una diminuzione massima della prestazione pari a circa -26% nel caso della configurazione con mogano trattato e rinforzo applicato su vetro rispetto alla configurazione non trattata e non rinforzata.
- Le modalità di crisi analizzate consentono di osservare in generale una buona adesione tra adesivo e substrati. In particolare, si osserva che il trattamento superficiale provoca un decadimento dell'adesione nell'interfaccia adesivo-legno in tutte le configurazioni.

Lo studio presentato riguarda sia la verifica della compatibilità meccanica degli aderendi in legno e vetro in giunzioni adesive epossidiche di tipo double-lap, che gli effetti dell'interposizione di uno strato in nylon all'interno della giunzione adesiva. I test effettuati hanno consentito di valutare per ogni combinazione i parametri relativi alla resistenza ultima, allo spostamento ultimo e conseguentemente le tensioni ultime e le rigidzze globali. Per gli

scopi relativi alle applicazioni del giunto adesivo in componenti edilizi, l'adesivo A nelle configurazioni non trattate si è mostrato il migliore in termini di capacità portante e di compatibilità in termini di spostamenti, mentre tra le configurazioni rinforzate l'adesivo B ha mostrato le migliori prestazioni sia relativamente alle resistenze che agli spostamenti ultimi.

8. Problematiche aperte

In generale nei provini testati si è verificata una riduzione di forza ultima che comporta in ogni caso un adeguato coefficiente di sicurezza per l'utilizzo delle giunzioni incollate in componenti edilizi.

Per ulteriori sviluppi futuri, sarebbe interessante realizzare una nuova campagna sperimentale per studiare le prestazioni meccaniche del giunto adesivo con l'interposizione del tessuto in nylon a seguito di esposizione a variazione di temperatura ed invecchiamento artificiale. Inoltre sono in corso test che analizzano le prestazioni di tali giunti sottoposti a temperature elevate, le quali possono agire sul valore di transizione vetrosa dell'adesivo oggetto di sperimentazione.

La sperimentazione futura potrà approfondire le caratteristiche delle giunzioni incollate mediante test DMA o DSC.

La prova DMA (*Dynamic Mechanical Analysis*), nota come spettroscopia meccanica dinamica, è una tecnica di analisi termica utilizzata per lo studio delle proprietà viscoelastiche dei materiali che viene realizzata applicando al provino in esame una forza oscillante ad una data temperatura. Tramite questo test è possibile determinare la temperatura di transizione vetrosa, la composizione dei polimeri, ed altri parametri quali il modulo complesso di Young, i moduli di conservazione e di perdita, oltre al fattore di smorzamento ($\tan \delta$) e lo scorrimento viscoso (creep).

La prova DSC (*Differential Scanning Calorimetry*), ossia calorimetria a scansione differenziale, consiste nel ricavare informazioni sul materiale riscaldandolo o raffreddandolo in maniera controllata. In particolare il DSC si basa sulla misura della differenza di flusso termico tra il campione in esame e uno di riferimento mentre i due sono vincolati a una temperatura variabile, definita da un programma prestabilito. Il segnale risultante può essere studiato permettendo di ricavare il comportamento proprio del materiale, o della porzione di materiale, indipendentemente dalle condizioni di prova.

9. Appendice

9.1 Adesivo A

3M Scotch-Weld™

Adesivo Epossidico 7260 FC NS B/A

Scheda Tecnica

Aggiornamento: Settembre 2015
Sostituisce: Agosto 2004

Descrizione 3M Scotch-Weld 7260 B/A FC-NS è un adesivo epossidico bicomponente, tenacizzato a veloce polimerizzazione; presenta elevata resistenza al taglio e alla pelatura ed elevata durabilità.

Caratteristiche 3M Scotch-Weld 7260 B/A FC-NS ha le seguenti caratteristiche:

- Scorrimento ottimizzato per facilitare l'applicazione
- Buona adesione su superfici metalli e plastiche termoindurenti
- Buona adesione su molte plastiche termoplastiche

Proprietà fisiche (non polimerizzato)
Nota: I seguenti dati ed informazioni tecniche devono essere considerati solo rappresentativi e non devono essere utilizzati per messa a specifica.

	Base	Accelerante
Base	Epossidica Tenacizzata	Ammina modificata
Colore	Nero	Bianco
Peso specifico	1.27/1.35	1.27/1.35
Rapporto di miscelazione in volume in peso	100 100	50 50
Viscosità (Pa.s a 23°C)	400/800	400/800
Tempo aperto a 23°C (min)	90 – 300	

Prestazioni dell'adesivo

Resistenza al taglio (MPa) - Metodo di prova EN 2241-1

Condizioni di prova	Risultato (MPa)
-40 ± 2 °C	30.4 (C)
23 ± 2 °C	32.0 (C)
70 ± 2 °C	16.1 (C)

Provini realizzati usando alluminio anodizzato 2024 T3 di spessore 1,6mm e superfici preparate con trattamento FPL.

Adesivo Epossidico 7260 B/A FC-NS

<p>Prestazioni dell'adesivo (segue)</p>	<p>Resistenza a pelatura (N/25mm) a 23°C Metodo di prova EN 2243-2 (sistema Roller Bell)</p>
	<p>127,6 N/25mm</p>
	<p>Provini realizzati usando alluminio anodizzato 2024 T3 di spessore 1,6 e 0,5 mm e superfici preparate con trattamento FPL.</p>
	<p>Ciclo di polimerizzazione/cura:</p>
	<p>7 giorni a 23 °C ± 2 °C, sotto pressione di 100kPa nelle prime 24 ore.</p>
<p>Informazioni sul prodotto</p>	<p>Tempo aperto:</p> <p>Dopo la miscelazione dei due componenti, l'adesivo rimane lavorabile per un periodo di tempo, finché non diventa troppo viscoso per poter correttamente bagnare la superficie su cui è applicato.</p> <p>Il tempo aperto e la velocità di polimerizzazione sono entrambe molto influenzate da temperatura e umidità, polimerizzando più velocemente con l'aumentare di temperatura e umidità.</p> <p>Dopo la miscelazione, si consiglia di utilizzare l'adesivo entro 90 minuti.</p>
<p>Indicazioni</p>	<p>L'adesivo 3M Scotch-Weld™ 7260 B/A è disponibile in formato cartuccia bicomponente da utilizzare con l'applicatore EPX™, oppure in formato bulk.</p> <p>Per richiedere ulteriori informazioni oppure assistenza nella scelta dei sistemi di applicazione, contattare l'ufficio 3M di riferimento.</p>
<p>Preparazione superficiale</p>	<p>L'adesivo strutturale raggiunge la massima adesione quando i materiali sono puliti, asciutti, esenti da polvere, vernici friabili, oli, distaccanti ed altri contaminanti, che devono essere completamente rimossi prima dell'applicazione. Il grado di preparazione può influire sulla tenuta e sulla resistenza nel tempo del giunto. Il tipo di preparazione superficiale sarà scelto dal cliente in funzione delle caratteristiche richieste riguardo la resistenza dell'incollaggio e la durata dello stesso.</p> <p>Pulizia Eventuali eccessi di prodotto applicato non ancora reticolato possono essere rimossi con il solvente 3M No. 2 o altri solventi chetonici di buona purezza.</p> <p>Nota Durante l'utilizzo di solventi, spegnere ogni potenziale fonte di innesco e seguire le avvertenze del produttore e le indicazioni.</p>
<p>Durata</p>	<p>Se conservato a temperatura di 20°C ±3, nel contenitore originale non aperto, il prodotto ha una durata di 24 mesi. Movimentare lo stock applicando il criterio "first in – first out"</p>

Adesivo Epossidico 7280 B/A FC-NS

Informazioni di sicurezza	<p>Fare riferimento all'etichetta ed alla Scheda di Sicurezza del prodotto (MSDS) prima dell'uso. Per ulteriori informazioni contattare l'ufficio 3M di riferimento.</p> <p>www.3M.com</p> <p>Le schede di sicurezza aggiornate sono disponibili all'indirizzo: www.mmm.com/msds</p> <p>Per informative sulle normative REACH e RoHS: www.mmm.com/regs</p>
Ulteriori informazioni	<p>Per richiedere ulteriori informazioni oppure assistenza contattare:</p> <p>3M Italia S.p.A. Adesivi e Nastri per l'Industria Via N. Bobbio 21 - 20096 Pioletto (MI) Tel: 02-7035.1 - Fax: 02-7035.2262</p>

Avvertenze importanti per l'acquirente

Tutte le informazioni, i dati tecnici e le raccomandazioni contenute nel presente fascicolo sono basate su prove affidabili ma comunque non riferibili all'intera casistica dei possibili utilizzi del prodotto. Quanto segue deve pertanto essere inteso come sostitutivo di ogni garanzia, espressa o implicita.

Il venditore e il produttore saranno responsabili unicamente di sostituire quelle quantità di prodotto di cui sia stato provato il carattere difettoso. Eventuali reclami per merce difettosa devono essere notificati per iscritto alla Società venditrice entro 6 giorni dal ricevimento. Né il venditore né il produttore saranno perseguibili per qualunque infortunio, perdita o danno, diretti o indiretti, derivati dall'uso o dal non corretto uso del prodotto. Prima dell'utilizzo, il cliente dovrà determinare se il prodotto è adatto all'uso che intende farne verificando altresì la corrispondenza dei dati qui riportati alle prove dallo stesso effettuate ed assumendosi ogni rischio e responsabilità del venditore e del produttore.

Nessuna affermazione o raccomandazione che non sia contenuta nel presente fascicolo avrà valore o effetto a meno che non compaia un accordo firmato da rappresentanti del venditore o del produttore.

Poiché il fabbricante del prodotto descritto nel presente prospetto tecnico non ha alcuna possibilità di controllare l'utilizzo finale del prodotto stesso da parte del cliente, e all'acquirente immediato e al venditore o venditori intermedi che compete la responsabilità di informare il cliente degli usi a cui tale prodotto risulta adatto e delle sue proprietà, incluse le precauzioni che debbono essere prese per garantire la sicurezza di chi lo utilizza, di terzi e di beni.

3M
Adesivi e Nastri per l'Industria
3M Italia srl
Via N. Bobbio 21 - 20096 Pioletto (MI)
Tel: 02-7035.1 - Fax: 02-7035.2262

3M e Scotch-Weld sono marchi registrati della 3M Company

9.1 Adesivo B

3M
Scotch-Weld™ 7240 FR B/A
Adesivo epossidico

pag. 1 di 4

Bollettino tecnico

Data: Gennaio 2000

Descrizione L'adesivo epossidico Scotch-Weld 7240 FR B/A è un adesivo bicomponente tenacizzato ad alte prestazioni. Presenta elevata resistenza al taglio e alla pelatura ed ha un eccellente livello di durata. Il prodotto contiene microgranuli di vetro da 300 µm per un'accurata linea d'incollaggio. Risponde alle norme FAR (bruciatura verticale) per l'autoestinguenza in 15 secondi.

Proprietà fisiche (non utilizzabili per messa a specifica)	Base	Accelerante
Natura chimica	Epossidica tenacizzata	Ammine modificata
Colore	Nero	Bianco panna
Peso specifico (appross.)	1,05÷1,10	1,12÷1,18
Rapporto di miscelazione in volume in peso	100 100	50 52
Viscosità (Pa.s a 23 °C)	100÷200	100÷200
Worklife (a 23 °C per 20 g di prodotto)		45 minuti
Tempo di manipolabilità (a 23 °C)		6 ore
Durata di magazzino	12 mesi dalla data di consegna 3M, se conservato nella confezione originale a 21 °C e con il 50% di umidità relativa	

Prestazioni tipiche e caratteristiche (non utilizzabili per messa a specifica)	Resistenza al taglio (MPa)		Metodo di prova EN 2243-1	
	Condizioni di prova	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3
	-55 ± 3 °C	17,9 (c)	18,2 (c)	19,4 (c)
	-40 ± 2 °C	20,4 (c)	21,9 (c)	22,4 (c)
	23 ± 2 °C	26,9 (c)	27,4 (c)	26,6 (c)
	70 ± 2 °C	16,2 (c)	16,4 (c)	14,3 (c)
	100 ± 2 °C	5,7 (c)	6,2 (c)	4,8 (c)
	150 ± 3 °C	1,9 (c)	1,9 (c)	2,0 (c)

Provini allestiti usando alluminio anodizzato 2024 T3 di spessore 1,6 mm e superfici preparate con pulizia chimica ottimizzata.

Scotch-Weld™ 7240 FR B/A - Adesivo epossidico

pag. 2 di 4

Prestazioni tipiche e caratteristiche (non utilizzabili per messa a specifica) (continua)	Resistenza al taglio (MPa)		Metodo di prova EN 2243-1
	(sistema roller Bell)		
	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3
	48	42	36

Provini allestiti usando alluminio galvanico 2024 T3 di spessore 1,6 mm e 0,6 mm e superfici preparate con pulizia chimica ottimizzata

Cicli di polimerizzazione:

- 7 giorni a 23 °C ± 2 °C sotto una pressione di 100 kPa nelle prime 24 ore
- 16 ore a 35 °C ± 2 °C sotto una pressione di 100 kPa
- 120 minuti a 60 ± 65 °C ± 3 °C sotto una pressione di 100 kPa

Utilizzati spaziatori in vetro Ø 300 µm per controllare lo spessore della linea d'incollaggio

Prestazioni adesive (non utilizzabili per messa a specifica)	Resistenza al taglio (MPa)		Metodo di prova EN 2243-1
	Risultati tipici ottenuti su provini preparati secondo il metodo di prova EN 2243-1. Tutti i provini sono stati polimerizzati per 24 ore a 35 °C sotto una pressione di 100 kPa.		
	Substrato	Valore	Tipo di cedimento
	Alluminio galvanico 2024 T3	22,4	Coesivo
	Lega di alluminio 5754 H111	12,5	Stiramento substrato
	Acciaio laminato a freddo	17,1	Stiramento substrato
	Acciaio inox	23,7	Coesivo
	Acciaio zincato a caldo	15,9	Stiramento substrato
	Epossidica rinforzata con fibre di carbonio	24,3	Coesivo
	Fenolica rinforzata con fibre di vetro	17,2	Delaminazione substrato
	Poliestere rinforzato con fibre di vetro	6,2	Rottura substrato

Resistenza all'invecchiamento (non utilizzabili per messa a specifica)	Resistenza al taglio (MPa)		Metodo di prova EN 2243-1
	La tabella riporta risultati tipici ottenuti su provini in alluminio nudo di spessore 1,6 mm preparati con pulizia chimica ottimizzata, dopo una polimerizzazione di 60 minuti a 60±65 °C. Prove effettuate a 23±2 °C dopo un invecchiamento di 750 ore.		
	Condizioni	Risultati	
	Riferimento (23 °C/50% umidità relativa)	19,7 (coesivo - nessun degrado)	
	20 minuti caldo secco (200 °C)	32,8 (coesivo)	
	Acqua deionizzata a 23 °C	19,9 (coesivo)	
	Carburante Jet a 23 °C	22,3 (coesivo)	
	Benzina senza piombo a 23 °C	23,2 (coesivo)	
	olio idraulico a 23 °C	24,8 (coesivo)	
	Caldo umido (70 °C/±95% u.r.)	19,4 (coesivo)*	
	5% nebbia salina a 35 °C	18,2 (coesivo)*	

*Non si riscontra corrosione sotto la linea d'incollaggio

Scotch-Weld™ 7240 FR B/A - Adesivo epossidico

pag. 3 di 4

Infiammabilità (FAR 25) Provini di adesivo delle dimensioni di 25 mm x 12,5 mm x 12,5 mm sono stati montati verticalmente ed esposti a fiamma libera per 30 secondi. Alla rimozione, il provino di adesivo autoestingente si è spento in meno di 15 secondi.

Resistenza a compressione e modulo di Young I dati numerici forniti sono stati ottenuti con provini (25 mm x 12,5 mm x 12,5 mm) polimerizzati per 24 ore a 23±3 °C seguiti da 60 minuti di post-polimerizzazione a 80±3 °C. Il peso specifico misurato a 23 °C è stato di 1,03±1,06.

Resistenza a compressione (MPa)	Modulo di Young (MPa)
23 ± 2 °C : 45 ÷ 50	23 ± 2 °C : 3500 ÷ 4000

Informazioni generali

Worklife

Dopo la miscelazione, il prodotto rimane lavorabile per un certo tempo prima di diventare troppo viscoso per essere adeguatamente steso sul materiale da incollare. Questo tempo e la velocità di polimerizzazione sono altamente influenzate dalla temperatura e dall'umidità. Più alti sono questi valori, più rapida è la polimerizzazione. Una volta miscelato, l'adesivo deve essere utilizzato entro 45 minuti.

Attrezzatura

Lo Scotch-Weld 7240 FR B/A viene fornito sia in formato a cartucce doppie, adatto all'applicatore EPX, sia in confezioni maggiori non in cartuccia. Per ulteriori informazioni, contattare il Servizio Tecnico 3M.

Pulizia

L'adesivo in eccesso può essere rimosso prima della polimerizzazione con il prodotto 3M Solvent N° 2.

Attenzione

Il 3M Solvent N° 2 è infiammabile e si raccomanda quindi di attenersi scrupolosamente alle istruzioni e precauzioni d'uso.

Preparazione delle superfici

Per ottenere fissaggi strutturali di elevate prestazioni, occorre che vengano rimossi tutti gli eventuali agenti contaminanti, come vernici, patine d'ossido, oli, polveri ecc. Il livello di preparazione delle superfici dipende dalle prestazioni che si vogliono ottenere e dalle condizioni d'esercizio previste.

Condizioni di magazzino

Il prodotto dura fino ad un anno se conservato a temperatura inferiore a 25 °C. Temperature più alte riducono la durata di magazzino. Effettuare la rotazione delle scorte secondo il criterio "FIFO": "primo in entrata - primo in uscita". A richiesta potremo indicarvi la prevedibile durata di magazzino di questo prodotto nelle condizioni specifiche del vostro stabilimento.

Scotch-Weld™ 7240 FR B/A - Adesivo epossidico

pag. 4 di 4

Avvertenza importante per l'acquirente

Tutte le informazioni, i dati tecnici e le raccomandazioni contenute nel presente fascicolo sono basate su prove affidabili ma comunque non riferibili all'intera casistica dei possibili utilizzi del prodotto. Quanto segue deve pertanto essere inteso come sostitutivo di ogni garanzia, espressa o implicita.

Il venditore e il produttore saranno responsabili unicamente di sostituire quelle quantità di prodotto di cui sia stato provato il carattere difettoso. Eventuali reclami per merce difettosa devono essere notificati per iscritto alla Società venditrice entro 8 giorni dal ricevimento. Né il venditore né il produttore saranno perseguibili per qualunque infortunio, perdita o danno, diretti o indiretti, derivati dall'uso o dal non corretto uso del prodotto. Prima dell'utilizzatore, il cliente dovrà determinare se il prodotto è adatto all'uso che intende fare verificando altresì la corrispondenza dei dati qui riportati alle prove dallo stesso effettuate ed assumendosi ogni rischio e responsabilità del venditore e del produttore.

Nessuna affermazione o raccomandazione che non sia contenuta nel presente fascicolo avrà valore o effetto a meno che non compaia un accordo firmato da rappresentanti del venditore e del produttore.

Poiché il fabbricante del prodotto descritto nel presente prospetto tecnico non ha alcuna possibilità di controllare l'utilizzatore finale del prodotto stesso da parte del cliente, è all'acquirente immediato e al venditore o venditori intermedi che compete la responsabilità di informare il cliente degli usi a cui tale prodotto risulta adatto e delle sue proprietà, incluse le precauzioni che debbono essere prese per garantire la sicurezza di chi lo utilizza, di terzi e di beni.



Tecnologie Adesive
 3M Italia S.p.A.
 20090 Segrate (MI) Loc. S. Felice - Via S. Bovio, 3
 Tel. 02/7035.2017 - Fax 02/7035.2262

3M e Scotch-Weld sono marchi commerciali della 3M Company

10. Bibliografia

- [1] A. J. Kinloch, *Adhesion and Adhesives*. Dordrecht: Springer Netherlands, 1987. doi: 10.1007/978-94-015-7764-9.
- [2] W. Brockmann, P. L. Geiß, J. Klingen, e B. Schröder, *Adhesive Bonding*. Wiley, 2008. doi: 10.1002/9783527623921.
- [3] L. F. M. da Silva, A. Öchsner, e R. D. Adams, A c. di, *Handbook of Adhesion Technology*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011. doi: 10.1007/978-3-642-01169-6.
- [4] R. D. Adams, J. Comyn, e W. C. Wake, *Structural adhesive joints in engineering*. Chapman and Hall, 1997.
- [5] P. Munafò e F. Stazi, «INVISIBLE WINDOW FRAME», European Patent 3071775, 2013
- [6] P. Terlizzi, Vanessa; Alderucci, Tiziana; Munafò, «An innovative window with an invisible frame: from the applied research to the industrial production», *Tema Technol. Eng. Mater. Archit.*, vol. 3, n. 2, pagg. 61–71, 2017, doi: <https://doi.org/10.17410/tema.v3i2.142>.
- [7] G. Chiappini *et al.*, «Assessment of the deformation behavior of a tensegrity floor through photogrammetry», *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 1214, n. 1, pag. 012031, gen. 2022, doi: 10.1088/1757-899X/1214/1/012031.
- [8] F. Marchione, G. Chiappini, M. Rossi, C. Scoccia, e P. Munafò, «Experimental assessment of the static mechanical behaviour of the steel-glass adhesive joint on a 1:2 scale tensegrity floor prototype», *J. Build. Eng.*, vol. 53, pag. 104572, ago. 2022, doi: 10.1016/j.jobbe.2022.104572.
- [9] E. Hägglund, *La chimica del legno*. Torino: Biblioteca scientifica cartiere burgo. 1942.
- [10] G. Giordano, *Antologia del legno, volume I. Consorzio LEGNOLEGNO, FNALA, CNA*. 1997.
- [11] C. Schittich, G. Staib, D. Balkow, M. Schuler, e W. Sobek, *Glass Construction Manual*. in Construction manuals. Birkhäuser, 2012. [In linea]. Available at: <https://books.google.it/books?id=pt8xCgAAQBAJ>
- [12] L. Bertolini e M. Gastaldi, *Introduzione ai materiali per l'architettura*. CittàStudi, 2001. [In linea]. Available at: <https://books.google.it/books?id=pmBjewAACAAJ>
- [13] F. Marchione, G. Chiappini, e M. Marchini, «Effect of nylon fabric reinforcement on the mechanical performance of adhesive joints made between glass and GFRP.», vol. 59, pagg. 89–104, 2022, doi: 10.3221/IGF-ESIS.59.07.
- [14] «Sapere.it». [In linea]. Available at: www.sapere.it
- [15] L. Bertolini, *Materiali da costruzione - Volume II - Degrado, prevenzione, diagnosi, restauro*. Novara: De Agostini, 2006.
- [16] PoliTo, *Glossario Materiali Food-Pack*. 2008.

-
- [17] «CNR DT 210/2013, Istruzioni per la progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Costruzioni con Elementi Strutturali di Vetro».
- [18] F. Oikonomopoulou, T. Bristogianni, F. A. Veer, e R. Nijse, «The construction of the Crystal Houses façade: challenges and innovations», *Glas. Struct. Eng.*, vol. 3, n. 1, pagg. 87–108, mar. 2018, doi: 10.1007/s40940-017-0039-4.
- [19] P. Munafò, «Sistema di facciata continua per edifici», 102020000025636, 2022
- [20] F. Stazi, M. Giampaoli, M. Rossi, e P. Munafò, «Environmental ageing on GFRP pultruded joints : Comparison between different adhesives», *Compos. Struct.*, vol. 133, pagg. 404–414, 2015, doi: 10.1016/j.compstruct.2015.07.067.
- [21] F. Marchione, G. Chiappini, e P. Munafò, «Shear performance of timber-GFRP double-lap adhesive joints for civil engineering applications», *J. Adhes. Sci. Technol.*, pagg. 1–15, nov. 2021, doi: 10.1080/01694243.2021.1998295.
- [22] M. Giampaoli, V. Terlizzi, M. Rossi, G. Chiappini, e P. Munafò, «Mechanical performances of GFRP-steel specimens bonded with different epoxy adhesives, before and after the aging treatments», *Compos. Struct.*, vol. 171, pagg. 145–157, lug. 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.03.020>.
- [23] F. Marchione, G. Chiappini, e P. Munafò, «Effect of temperature and relative humidity on the shear performance of double-lap adhesive joints between steel and glass adherends», *J. Build. Eng.*, vol. 45, pag. 103546, gen. 2022, doi: 10.1016/j.jobbe.2021.103546.
- [24] F. Marchione e P. Munafò, «Effect of thermal aging on the mechanical performance of timber-timber single-lap adhesive joints», *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 108, pag. 102883, lug. 2021, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2021.102883.
- [25] P. Munafò, F. Marchione, G. Chiappini, e M. Marchini, «Effect of nylon fabric reinforcement on the mechanical performance of adhesive joints made between glass and GFRP», *Frat. ed Integrità Strutt.*, vol. 16, n. 59, pagg. 89–104, dic. 2021, doi: 10.3221/IGF-ESIS.59.07.
- [26] F. Marchione e P. Munafò, «Experimental investigation on timber-glass double-lap adhesive joints», *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 106, pag. 102818, apr. 2021, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2021.102818.
- [27] ASTM D638: 2014, «Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics».
- [28] ASTM D3528-16, «Standard Test Method for Strength Properties of Double Lap Shear Adhesive Joints by Tension Loading».

11. Normativa

ASTM D3528-96 Metodo di prova standard per le proprietà di resistenza delle giunture adesive double lap.

ASTM D5573-99 modalità di rottura provini a taglio.

CNR – DT 200/2004 Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati.

ISO 4587/2003 Adesivi - Determinazione della resistenza a trazione a trazione degli assemblaggi rigidi-rigidi.

ISO EN 14125 Proprietà di resistenza a flessione di compositi in plastica rinforzata con fibra.

ISO EN 14125-01 Compositi plastici rinforzati con fibre. Determinazione delle proprietà a flessione.

12. Indice delle figure e tabelle

Figura 2.1 - Struttura molecolare del vetro (SiO ₂).....	10
Figura 2.2 - Composizione del vetro sodico-calcico, borosilicato e alluminosilicato [11]	11
Figura 2.3 - Valori indicativi delle principali proprietà del vetro [12]	12
Figura 2.4 - Valori indicativi delle principali proprietà del vetro (Wurm, 2007)	13
Figura 2.5 - Schematizzazione della trasmissione della radiazione solare attraverso il vetro	14
Figura 2.6 – Ciclo di vita del nylon.....	19
Figura 2.7 - Processo di filatura del nylon 6	20
Figura 2.8 - Classificazione schematica dei preformati tessili in nylon.....	25
Figura 2.9 - Tipologie di tessuti preformati 2D	26
Figura 2.10 - Confronto tra le diverse tipologie di frattura [10]	28
Figura 3.1 – Prototipo “Invisible Window”, Brevetto Europeo n. EP.3071775B1	30
Figura 3.2 - Visione complessiva del serramento	31
Figura 3.3 - Particolare dell’attacco telaio mobile e fisso del serramento	31
Figura 3.4 - Montante per facciata continua (render)	32
Figura 3.5 - Montante per facciata continua: applicazione in una residenza.....	33
Figura 3.6 - Montante per facciata continua: applicazione vista dall'esterno.....	34
Figura 4.1 - Tessuto in nylon P6 impiegato nelle sperimentazioni	37
Figura 4.2 – Test di taglio su giunti double-lap	41
Figura 4.3 - Geometria del provino double-lap con inserto di tessuto in Nylon 6 (misure in mm)	43
Figura 4.4 – Aderendo in vetro float per provini double-lap	44
Figura 4.5 – Fase di incollaggio.....	44
Figura 4.6 - Posizione del rinforzo in Nylon P6 nello strato adesivo.....	45
Figura 4.7 - Assemblaggio dei provini double-lap.....	47
Figura 4.5.1- Curve forza-spostamento medie ottenute per i provini double-lap con adesivo A	50
Figura 5.2- Curve forza-spostamento medie ottenute per i provini double-lap con colla B...	52
Figura 5.3 (a-f) – Modalità di crisi dei giunti adesivi double-lap: a) TLC e CF; b) CF e LFTF; c) LFTF, CF e TLC; d) LFTF, AF e TLC; e) SB; f) CF e GF.	58

Figura 6.1 – Rigidezze medie per provini con aderendi in mogano non trattato.....	59
Figura 6.2 – Rigidezze medie per provini con aderendi in mogano trattato.	60
Tabella 1- Caratteristiche del filamento di nylon.....	23
Tabella 4.2 – Parametri meccanici degli adesivi impiegati	36
Tabella 4.3 – Parametri meccanici del rinforzo in nylon impiegato	37
Tabella 4.4 – Parametri meccanici degli aderendi in mogano	38
Tabella 4.5 – Parametri meccanici degli aderendi in vetro float (CNR-DT 210/2013).....	38
Tabella 4.6 – Parametri tecnici dei prodotti di finitura per gli aderendi in mogano	39
Tabella 4.7 - dati dei provini a rottura di taglio con colla A ed aderendi non trattati	50
Tabella 4.8 - dati dei provini a rottura di taglio con colla A ed aderendi trattati per immersione	51
Tabella 4.9 - dati dei provini a rottura di taglio con adesivo B ed aderendi non trattati	53
Tabella 4.10 - dati dei provini a rottura di taglio con adesivo B ed aderendi trattati per immersione.....	54
Tabella 4.11 – Percentuali dei provini a rottura di taglio con adesivo B ed aderendi trattati per immersione.....	57

13. Ringraziamenti

Desidero ringraziare il mio relatore Prof. Placido Munafò, grazie al quale ho avuto l'opportunità ed il privilegio di poter essere parte attiva della ricerca universitaria, e per lo stimolo che ho ricevuto dalla sua passione nell'affrontare le varie tematiche della mia tesi.

Lo ringrazio inoltre per la pazienza e tenacia, avuta nei miei confronti, nello spronarmi a concludere il lavoro della tesi, senza le quali non sarei riuscito a giungere a questo importante traguardo.

Un grande ringraziamento va a Francesco Marchione, tutor e compagno di avventure in laboratorio, durante le varie fasi della tesi, che mi ha guidato nell'esecuzione delle prove sperimentali.