DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA CIVILE PER LA PROTEZIONE DAI RISCHI NATURALI

RELAZIONE DI FINE TIROCINIO

PROVE DI DELAMINAZIONE DI MATERIALI COMPOSITI SULLA MURATURA

TUTOR UNIVERSITARIO:

Prof. Gianmarco de Felice

STUDENTE:

Matteo Giustini

Mat.: 416560

TUTOR AZIENDALE:

Arch. Lorena Sguerri

A.A.2014/2015

Gennaio 2016

Indice

1 Introduzione 3

1.1.1 Specifiche per le prove di delaminazione 3

2 Caratteristiche dei materiali e dei strumenti di acquisizione dei dati 7

2.1 Supporti 9

2.1.1 Mattone pieno San Marco – Rosso Vivo 9

2.1.2 Malta di allettamento Biocalce Muratura 9

2.2 Sistemi di rinforzo Kerakoll 11

2.2.1 Sistema di rinforzo Kerakoll GeoCalce Fino- ARV100 11

2.2.2 Rete in fibra di acciaio GeoSteel G2000 13

2.3 Sistemi di rinforzo G&P 14

2.3.1 Sistema di rinforzo G&P C-NET 14

2.3.2 Sistema di rinforzo G&P B-NET 15

2.3.3 Sistema di rinforzo G&P G-NET 16

2.4 Sistemi di rinforzo Ruredil 17

2.4.1 Sistema di rinforzo RUREDIL X MESH C10 17

2.4.2 Sistema di rinforzo RUREGOLD XR MURATURA 18

2.5 Polimero Poliuretanico PS 19

2.6 Materiali utilizzati per l'afferraggio dei provini 19

2.6.1 Resina epossidica GeoLite Gel 19

2.6.2 Adesivo bicomponente Araldite 21

2.6.3 Cella di carico integrata della MTS 23

2.6.4 Trasduttore di spostamento induttivo (LVDT) 24

3 Programma sperimentale 26

3.1 Confezionamento dei provini 27

3.1.1 Fasi di confezionamento dei provini utilizzati per le prove di delaminazione con gli FRCM 28

3.1.2 Fasi di confezionamento dei provini utilizzati per le prove di delaminazione con gli FRP 34

3.2 Set-up di prova 40

3.3 Esecuzione dei test 42

3.4 Elaborazione dei dati 44

1 Introduzione

Lo scopo di tali prove sperimentali è lo studio del comportamento a delaminazione, ovvero come avviene il distacco del materiale composito rispetto al supporto in muratura.

Questo programma di prove nasce in seguito alle prove effettuate per il Round Robin, dove il materiale composito ha presentato la stessa identica rottura per tutti i tipi di fibra, escluso l'acciaio, nella parte non adesa al supporto.

Questo tipo di rottura potrebbe essere legato al fatto che il tessuto è stato lasciato a secco nella parte non adesa, condizione che nella realtà risulta impossibile, e per questo nelle prove che verranno affrontate si ricoprirà il tessuto anche nella parte non adesa al supporto, potendo cosi avere un termine di paragone anche con le prove effettuate a trazione sempre nel Round Robin.

Le altre prove che verranno affrontate sono legate all'FRP con le fibre d'acciaio, le uniche a non rompersi nella parte non adesa, in modo da avere un confronto con le prove sull'FRCM. La matrice legante è un polimero.

Per quanto riguarda gli FRCM in particolare si è in una fase ancora preliminare, per cui risulta necessario affidarsi a programmi di analisi sperimentali che possano chiarire meglio il comportamento e le caratteristiche meccaniche dei rinforzi e che possano permettere di definire un metodo di qualificazione adeguato.

Le prove devono essere eseguite da laboratori con comprovata esperienza e dotati di strumentazione adeguata per prove su FRCM (art. 59 del DPR n.380/2001) che sono forniti da una ditta (fornitore); quest'ultimo deve qualificare il prodotto sia riguardo l'installazione che le caratteristiche dei materiali. In caso di esito negativo delle prove infatti sarà proprio il fornitore a dover apportare opportune azioni correttive e a darne comunicazione al laboratorio affinché possano essere ripetute le prove.

Per la prima volta verranno infine realizzati 4 provini per ciascuna matrice negli FRCM proprio per la caratterizzazione della stessa, che verrà provata a compressione.

1.1.1 Specifiche per le prove di delaminazione

Le prove di delaminazione servono per verificare la resistenza del sistema di rinforzo nei confronti del distacco da supporti standard, in vista della loro qualificazione per applicazioni strutturali. Per le prove di delaminazione occorre realizzare provini di opportune dimensioni realizzati con le fasi commercializzate, secondo le modalità utilizzate in cantiere e con condizioni atmosferiche standard (20°C e pressione atmosferica).

Le prove di delaminazione, da eseguire secondo le indicazioni dell'Allegato 2, sono sei per ognuno dei tipi commercializzati dal Fornitore sui quali bisogna caratterizzare il tipo di rottura, che può manifestarsi secondo le modalità esposte nella figura 3.6 e fornire il valore della tensione e della deformazione ultima attinte nel corso della prova allorché si manifesta la rottura in una delle possibili modalità.

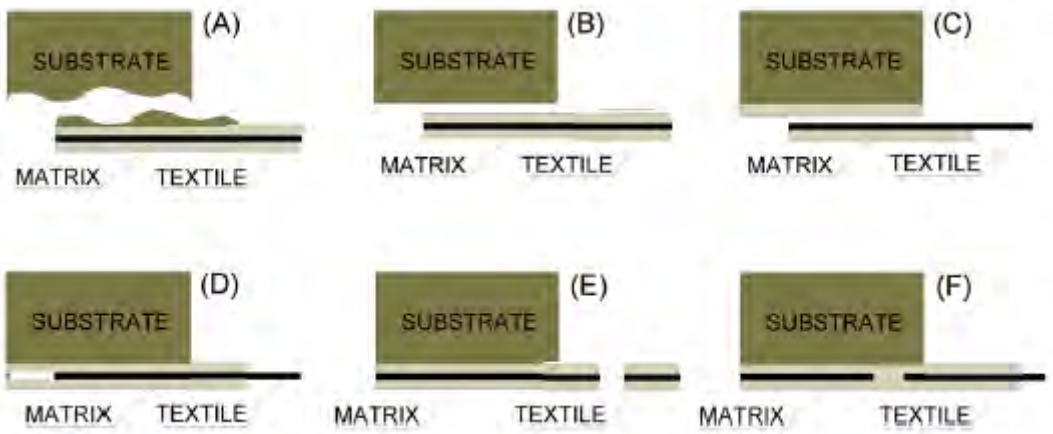


Figura 2.1 Modalità di rottura dei provini nei test di delaminazione: debonding con rottura coesiva nel substrato (A), all'interfaccio substrato-matrice di rinforzo (B), e all'interfaccia tessuto-matrice (C), scorrimento del tessuto all'interno dello spessore di rinforzo (D), rottura a trazione del tessuto nella porzione non adesa (E) e all'interno della matrice (F).

L'aderenza del composito dipende in modo fondamentale dalle caratteristiche del supporto, in termini meccanici (soprattutto resistenza ed energia di frattura, in particolare a trazione) ma anche fisico-chimici (trattamento della superficie prima dell'applicazione, dimensione dei grani, presenza di porosità, compatibilità della matrice con il supporto, etc.).

Le prove di delaminazione devono essere quindi condotte in condizioni standard del materiale di supporto considerato e di trattamento della superficie.

Anche le prove devono essere condotte con modalità che devono tendere a riprodurre in modo più fedele possibile le condizioni effettive di applicazione del rinforzo, per questo viene ricoperta con la matrice anche la parte adesa, come suddetto, e servono a verificare che il distacco si manifesta per rottura coesiva e che il valore della tensione corrispondente è almeno pari al prodotto del valore caratteristico della deformazione di rottura del rinforzo per il valor medio di quest'ultimo per un ulteriore coefficiente riduttivo (che dipende dal materiale del supporto), per tutti i casi esaminati;

1.1.1.1 Set-up di prova e requisiti della strumentazione

Per l'esecuzione della prova di delaminazione è necessario fare uso di un sistema meccanico sufficientemente rigido (macchine universali o altri sistemi dimensionati per una forza di almeno 100 kN) e in grado di condurre le prove in controllo di spostamento.

Il rinforzo può essere applicato su una sola faccia (*single-lap*) del provino, oppure su due opposte sollecitate contemporaneamente (*double-lap*); nel secondo caso, particolare cura deve essere posta nel controllo di una sufficiente simmetria del sistema durante l'esecuzione della prova.

Per la misura degli spostamenti si deve fare uso di strumenti idonei con precisione pari ad almeno 0,001 mm; la forza deve essere misurata mediante cella di carico di capacità correlata alla massima forza attesa . Nel caso di misura delle deformazioni, possono essere usati estensimetri resistivi o altre metodologie di comprovata validità. Tutte le misure provenienti dalla strumentazione devono essere opportunamente registrate con frequenza non inferiore a 2 Hz.

La prova deve essere eseguita in controllo di spostamento con una velocità di 0,03 mm/sec. La prova deve essere condotta con modalità che consentano di assicurare l'allineamento della forza di trazione applicata con l'asse del rinforzo. Tale allineamento deve essere assicurato durante tutto lo svolgimento della prova.

Durante la prova deve essere misurata la forza applicata, lo spostamento della sezione iniziale del rinforzo rispetto al supporto, e le deformazioni lungo il rinforzo (opzionale).

Il campione deve essere collocato in un telaio in acciaio (fatta di piastre per formare un angolo di 90 °), sufficiente a evitare rotazioni e distorsioni. Un accurato posizionamento del campione è necessario per garantire l'allineamento della piastra superiore del dispositivo di supporto in acciaio e la striscia di composito non adeso che è tirato. In questo modo, un carico di taglio puro viene applicato sul rinforzo. Il sistema SL richiede una particolare cura nel serrare l'estremità libera della striscia. L'estremità del tessuto può essere incollata tra due piastre (alluminio, acciaio, piombo, o PRFV) per garantire una distribuzione omogenea delle sollecitazioni ed evitare fenomeni di slittamento in corrispondenza delle morse.

Lo slip tra il substrato e il rinforzo deve essere misurato direttamente o derivato dopo la fase di elaborazione. I trasduttori di spostamento potrebbero essere di diversi tipi: sensori induttivi, potenziometri, sensori trasduttore differenziale variabile lineare e indicatori digitali.

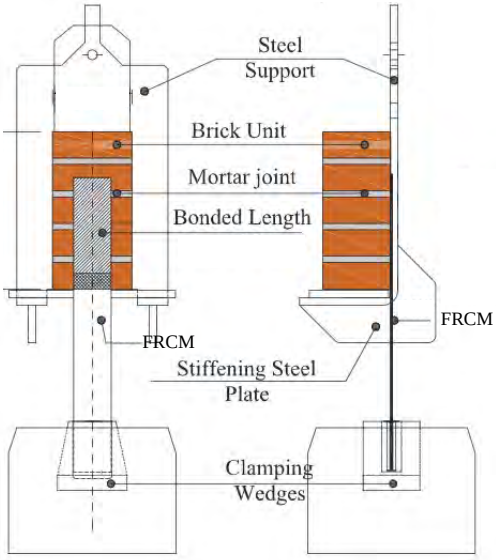


Figura 2.2 Possibile configurazione di set-up

1.1.1.2 Caratteristiche del supporto e realizzazione dei provini

Attese le inevitabili differenze tra i possibili materiali delle strutture oggetto del rinforzo, la qualificazione dei materiali deve essere condotta realizzando provini del supporto con criteri che assicurino la conduzione delle prove in condizioni per quanto possibile standardizzate.

Deve perciò essere scelto un materiale di supporto con caratteristiche meccaniche e fisico-chimiche omogenee, per ridurre la dispersione dei risultati. I provini di muratura di laterizio devono essere realizzati con dimensioni della faccia ove è applicato il rinforzo di larghezza pari ad almeno 200 mm e lunghezza di almeno 400 mm.

Le matrici devono essere di forma rettangolare; la loro larghezza deve essere tale da includere un numero minimo di fasci ("strands") di fibre e comunque non minore di quattro volte lo spessore degli stessi provini;

possibilmente, la larghezza della matrice deve essere uguale ad un multiplo intero della distanza tra i singoli yarn del tessuto.

Per quanto riguarda gli FRCM rinforzo deve essere situato ad una distanza pari a 30 mm dalla faccia superiore del mattoncino e almeno 20 mm dal lato. La lunghezza di ancoraggio deve essere pari a 260 mm. La lunghezza del tessuto non adeso dovrebbe essere pari a 440 mm, suddivisi in:

- 20 mm superiori che fuoriescono dalla matrice adesa (per verificare se c'è rottura o scorrimento all'interno della matrice)
- 300 mm ricoperti dalla matrice nella parte non adesa
- 120 mm per realizzare l'afferraggio.

Per quanto riguarda gli FRP invece sono state realizzate strisce di tessuto lunghe 600 mm, per 6 provini con superficie di adesione di 260 mm, per gli altri 6 di invece 280 mm, con la rispettiva parte in avanzo della lunghezza rimanente.

Lo spessore del sistema di rinforzo deve essere uguale allo spessore dei provini preparati nel Round Robin per le prove di trazione (pari a circa 10 mm). Tale valore deve essere rappresentativo dello spessore utilizzato nelle applicazioni di rinforzo.

La stagionatura deve durare almeno 28 giorni. Nella fase di indurimento, è necessario garantire adeguate condizioni di umidità relativa per prevenire lo sviluppo di ritiro differenziale, che provocherebbe fessure.

Prima di testare il campione deve essere conservata in condizioni standard di laboratorio (circa 20-25 ° C e 50-60% di umidità relativa) per almeno 7 giorni.

2 Caratteristiche dei materiali e dei strumenti di acquisizione dei dati

Nel seguente capitolo si andranno ad analizzare le componenti dei vari sistemi di rinforzo utilizzati per i test FRCM e FRP e le loro rispettive caratteristiche meccaniche.

Per le prove sperimentali sugli FRCM i compositi sono realizzati con diverse matrici inorganiche a base di calce idraulica, rinforzate con le reti in fibre di basalto, carbonio, vetro, PBO e vetro-arammide.

Mentre per le prove sugli FRP sono stati presi in esame fibre d'acciaio insieme ad un polimero.

Per quanto riguarda i supporti, sono stati realizzati in mattoni, per i quali si è fatto riferimento alla San Marco Terreal, sul quale viene gettata una matrice inorganica a base di calce idraulica o a base minerale, rinforzata sempre con le reti già descritte.

Le *fibre* rappresentano l'elemento attivo del rinforzo in termini di resistenza ed è infatti contraddistinto da elevato modulo di rigidezza e basso peso specifico, che consente di migliorare il comportamento strutturale senza modificare sensibilmente il peso degli elementi su cui viene applicato.

La loro composizione in termini di materiale può essere molto variegata, mentre in termini di tessitura si possono facilmente distinguere fibre disposte con un'orientazione precisa o non orientate. Le fibre sono costituite da filamenti continui molto sottili e quindi difficili da manipolare singolarmente. Per tale motivo esse sono disponibili commercialmente in varie forme, di cui le più comuni sono indicate in figura 3.1.

FORMA	DESCRIZIONE	
FILAMENTO (MONOFILAMENT)	**Elemento base di diametro di circa 10μm**	
CAVO DI FILATURA (TOWN)	Fascio di gran numero di filamenti (migliaia), senza torsione. Usato per essere filato e strappato (fibre corte)	
FILO O FILATO (YARN)	Filo formato da fibre tenute assieme da torsione	
FILO ASSEMBLATO (ROVING)	Fascio costituito da filati, assemblati parallelamente e senza torsione intenzionale.	
TAPE	Formato da centinaia di filati	
TESSUTO	Le fibre sono disposte in modo da garantire una quasi isotropia nel piano (ordito warp = direzione Principale e trama weft= direzione trasversale)	

Figura 3.1 Classificazione delle fibre

Per quanto riguarda il confezionamento dei provini, la Kerakoll s.p.a. ha fornito i tessuti in microtrefoli in acciaio G2000, da legare con il polimero per gli FRP, e la rete ARV100 (vetro e aramide) con la malta Kerakoll GeoCalce Fino.

La G&P Intech ha fornito i tessuti in carbonio C-Net 170 BS, in vetro G-NET 251 BA, e in basalto B-NET 250B per la realizzazione in laboratorio di provini con malte Limecrete e Concrete Rock S.

Infine la Ruredil ha fornito i tessuti in carbonio X Mesh C10 e in PBO Ruregol XR per la realizzazione in laboratorio di provini con malte Ruregold Mx Muratura e Ruredil X Mesh M25.

La *matrice* del rinforzo può essere considerata, almeno nei casi più comuni, come un continuo isotropo. La matrice è un elemento imprescindibile in quanto, anche se è contraddistinta da caratteristiche meccaniche molto più scarse delle fibre con cui collabora, riveste quattro ruoli fondamentali:

- E' il legante che assicura il mantenimento della forma del rinforzo;
- E' il collante che preserva la corretta adesione del rinforzo stesso all'elemento danneggiato;
- Protegge la fibra dagli attacchi degli agenti esterni garantendo un perfetto binomio di durabilità-resistenza;
- E' l'elemento che trasferisce le sollecitazioni dall'elemento strutturale rinforzato al rinforzo e le ripartisce tra le fibre.

Come detto in precedenza, negli ultimi anni è stato sperimentato con successo l'impiego di rinforzi costituiti da fibre ad alta resistenza entro matrici inorganiche (malta cementizia) che risultano compatibili sotto il profilo chimico, fisico e meccanico con supporti in c.a. e in muratura. A fronte della minore capacità adesiva della matrice cementizia rispetto alle resine polimeriche, la prima offre tuttavia alcuni vantaggi:

- Ha la medesima resistenza al fuoco del supporto (calcestruzzo o muratura) e quindi garantisce una buona prestazione anche in caso di incendio;
- Ha una permeabilità comparabile con quella della muratura che permette uno scambio termo igrometrico con l'esterno e quindi una certa traspirabilità dell'elemento rinforzato;
- Garantisce l'applicabilità del sistema di rinforzo anche su supporti umidi, al contrario dei sistemi FRP;
- È di semplice applicazione, essendo la malta un materiale di uso comune nella pratica edilizia, che non necessita di particolari misure precauzionali o di manodopera altamente specializzata.

I materiali trattati sono utilizzabili per realizzare "sistemi di rinforzo" esterni, di strutture esistenti di muratura o di conglomerato cementizio armato. Gli elementi della rete possono essere costituiti a loro volta da fibre assemblate con resine di tipo organico o da fili messi in opera sotto forma di piccoli trefoli. La malta della matrice funge anche da adesivo al substrato interessato dall'intervento di rinforzo. E' possibile che nello strato di malta, di adeguato spessore, siano presenti più reti di rinforzo, opportunamente distanziate.

I sistemi di rinforzo FRCM presi in considerazione sono costituiti da fasi commercializzate da una stessa impresa. Non è consentito l'uso di rinforzi FRCM ottenuti selezionando e combinando fasi disponibili sul mercato ma non commercializzate da uno stesso Fornitore.

2.1 Supporti

Un criterio di scelta per quanto riguarda i mattoni e la malta costituenti il supporto per il rinforzo da testare è stato quello di adottare materiali con caratteristiche paragonabili ai materiali di costruzione di edifici storici. Si è fatto riferimento alla San Marco Terreal, che ha fornito i mattoni per costruire i supporti con i quali effettuare le prove di delaminazione,

2.1.1 Mattone pieno San Marco – Rosso Vivo

Figura 3.2 Mattone pieno San Marco-Rosso Vivo

In accordo con i criteri di scelta precedentemente descritti sono stati adottati mattoni pieni "a pasta molle" con dimensioni nominali 120mm x 250mm x 55mm denominati San Marco – Rosso Vivo (A6R55W). Di seguito si riportano le caratteristiche meccaniche rilasciate dal produttore:

DATI TECNICI:	
Colore e finitura	Rosso Vivo
Codice	A6R55W
Resistenza a compressione media (MPa)	18
Forza di adesione (MPa)	0,128
Massa volumica lorda (kg/m^3)	1560

2.1.2 Malta di allettamento Biocalce Muratura

Biocalce Muratura è una malta di classe M5 specifica per la costruzione, il recupero e il rincoccio traspirante di murature portanti e di tamponamento in laterizio, mattone, tufo, pietra e miste interne ed esterne.

Figura 3.3 Elementi naturali presenti nella malta

Biocalce Muratura è particolarmente adatto come malta da costruzione, ristrutturazione e recupero nell'edilizia dove l'origine rigorosamente naturale dei suoi ingredienti garantisce il rispetto dei parametri fondamentali di porosità, igroscopicità e traspirabilità richiesti.

Biocalce Muratura è idoneo per ricostruzioni nel Restauro Storico, dove la scelta di ingredienti della tradizione come calce naturale, pietra, marmo e granito sapientemente dosati garantisce interventi conservativi nel rispetto delle strutture esistenti e dei materiali originari.

DATI TECNICI SECONDO NORMA DI QUALITÀ KERAKOLL

Tipo di malta	malta da muratura a prestazione garantita per scopi generali (G) per l'utilizzo esterno in elementi soggetti a requisiti strutturali	EN 998-2
Natura chimica del legante	pura Calce Idraulica Naturale NHL 3.5	EN 459-1
Intervallo granulometrico	0 – 1,5 mm	EN1015-1
Massa volumica apparente della polvere	≈ 1,47 kg/dm³	UEAtc
Conservazione	≈ 12 mesi nella confezione originale	
Confezione	sacchi 25 kg	
Acqua d'impasto	≈ 4,8 ℓ / 1 sacco 25 kg	
Consistenza malta fresca	≈ 178 mm	EN1015-3
Massa volumica apparente della malta fresca	≈ 2,04 kg/dm³	EN 1015-6
Massa volumica apparente della malta indurita essiccata	≈ 1,79 kg/dm³	EN 1015-10
pH impasto	≥ 12	
Temperature limite di applicazione	da +5 °C a +35 °C	
Resa	≈ 1,7 kg/dm³	

Rilevazione dati a +20 ± 2 °C di temperatura, 65 ± 5% U.R. e assenza di ventilazione. Possono variare in funzione delle specifiche condizioni di cantiere.

PERFORMANCE

QUALITÀ DELL'ARIA INTERNA (IAQ) VOC - EMISSIONI SOSTANZE ORGANICHE VOLATILI			
Conformità	EC 1-R plus GEV-Emicode		Cert. GEV 2749/11.01.02
QUALITÀ DELL'ARIA INTERNA (IAQ) ACTIVE - DILUIZIONE INQUINANTI INDOOR *			
	Flusso	Diluizione	
Toluene	124 µg m²/h	+28%	metodo JRC
Pinene	202 µg m²/h	+25%	metodo JRC
Formaldeide	4698 µg m²/h	test non superato	metodo JRC
Biossido di Carbonio (CO_2)	29 mg m²/h	+31%	metodo JRC
Umidità (Aria Umida)	14 mg m²/h	test non superato	metodo JRC
QUALITÀ DELL'ARIA INTERNA (IAQ) BIOACTIVE - AZIONE BATTERIOSTATICA **			
Enterococcus faecalis	Classe B+ proliferazione assente		metodo CSTB
QUALITÀ DELL'ARIA INTERNA (IAQ) BIOACTIVE - AZIONE FUNGISTATICA **			
Penicillium brevicompactum	Classe F+ proliferazione assente		metodo CSTB
Cladosporium sphaerospermum	Classe F+ proliferazione assente		metodo CSTB
Aspergillus niger	Classe F+ proliferazione assente		metodo CSTB
HIGH-TECH			
Resistenza a compressione	categoria M 10		EN 998-2
Coefficiente di resistenza alla diffusione del vapore acqueo (µ)	≥15 ≤35 (valore tabulato)		EN 1015-19
Assorbimento idrico capillare	≈ 0,7 kg/(m² · min^{0,5})		EN 1015-18
Reazione al fuoco	classe A1		EN 13501-1
Resistenza a taglio iniziale	≥ 0,2 N/mm²		EN 1052-3
Aderenza al supporto (laterizio)	≥ 0,5 N/mm² - FP: B		EN 1015-12
Contenuto di cloruri	≤ 0,004% Cl		EN 1015-17
Conducibilità termica (λ_{10}, dry)	0,83 W/mK (valore tabulato / determinato in Klimaroom)		EN 1745 / EN 1934
Calore specifico (Cp)	1,7 (10^6 J/m³K) misurato con analizzatore di scambio di calore		
Durabilità (al gelo-disgelo)	valutazione basata sulle disposizioni valide nel luogo di utilizzo previsto della malta		EN 998-2

2.2 Sistemi di rinforzo Kerakoll

Di seguito si riportano i sistemi di rinforzo Kerakoll utilizzati per la sperimentazione.

2.2.1 Sistema di rinforzo Kerakoll GeoCalce Fino- ARV100

La matrice è costituita dalla malta a base di calce Kerakoll GeoCalce Fino insieme alla rete in fibra di vetro ARV100 come rinforzo.

Questo sistema permette di dissipare notevoli quantità di energia, conferendo alle strutture un comportamento duttile prevenendo il collasso fragile dei tamponamenti, e il rafforzamento nel piano e fuori dal piano dipareti in muratura.

2.2.1.1 Malta Kerakoll GeoCalce Fino

GeoCalce Fino è una geomalta di classe di resistenza M15, CS IV e R1, specifica per il rinforzo e l'adeguamento strutturale in zona sismica in accoppiamento con appropriate armature strutturali; idonea per l'intonacatura, il rinforzo estradossale di volte e coperture. Si tratta di una malta naturale ecocompatibile ideale per il rincoccio, l'allettamento e il rinforzo di strutture storiche.

Le caratteristiche tecniche da fornitura sono riportate nella pagina seguente.

DATI TECNICI SECONDO NORMA DI QUALITÀ KERAKOLL

Aspetto	polvere	
Natura mineralogica aggregato	silico-carbonatica	
Intervallo granulometrico	0 – 1,4 mm	
Conservazione	≈ 12 mesi nella confezione originale in luogo asciutto	
Confezione	sacchi 25 kg	
Acqua d'impasto	≈ 5,3 ℓ / 1 sacco 25 kg	
Massa volumica apparente della malta fresca	≈ 1,73 kg/dm³	EN 1015-6
Massa volumica apparente della malta indurita essiccata	≈ 1,58 kg/dm³	EN 1015-10
Temperature limite di applicazione	da +5 °C a +35 °C	
Spessore min.	> 1 cm	
Spessore max per strato	≈ 1,5 cm	
Resa	≈ 14 kg/m² per cm di spessore	

Rilevazione dati a +23 ± 2 °C di temperatura, 50 ± 5% U.R. e assenza di ventilazione. Possono variare in funzione delle specifiche condizioni di cantiere

PERFORMANCE			
QUALITÀ DELL'ARIA INTERNA (IAQ) VOC - EMISSIONI SOSTANZE ORGANICHE VOLATILI			
Conformità	EC 1-R plus GEV-Emicode		Cert. GEV 4093/11.01.02
QUALITÀ DELL'ARIA INTERNA (IAQ) ACTIVE - DILUIZIONE INQUINANTI INDOOR *			
	Flusso	Diluizione	
Toluene	299 µg m^2/h	+100%	metodo JRC
Pinene	162 µg m^2/h	+14%	metodo JRC
Formaldeide	2330 µg m^2/h	test non superato	metodo JRC
Biossido di Carbonio (CO_2)	388 mg m^2/h	+453%	metodo JRC
Umidità (Aria Umida)	26 mg m^2/h	+21%	metodo JRC
QUALITÀ DELL'ARIA INTERNA (IAQ) BIOACTIVE - AZIONE BATTERIOSTATICA **			
Enterococcus faecalis	Classe B+ proliferazione assente		metodo CSTB
QUALITÀ DELL'ARIA INTERNA (IAQ) BIOACTIVE - AZIONE FUNGISTATICA **			
Penicillum brevicompactum	Classe F+ proliferazione assente		metodo CSTB
Cladosporium sphaerospermum	Classe F+ proliferazione assente		metodo CSTB
Aspergillus niger	Classe F+ proliferazione assente		metodo CSTB
HIGH-TECH			
Resistenza a compressione a 28 gg	categoria M15		EN 998-2
Permeabilità al vapore acqueo (µ)	da 15 a 35 (valore tabulato)		EN 1745
Assorbimento idrico capillare	≈ 0,3 kg/(m^2 · $min^{0,5}$)		EN 1015-18
Resistenza a taglio	> 1 N/mm^2		EN 1052-3
Adesione al supporto a 28 gg	> 1 N/mm^2 - FP: B		EN 1015-12
Conducibilità termica (λ_{10}, dry)	0,83 W/mK (valore tabulato)		EN 1745
Modulo elastico statico	8,49 GPa		EN 998-2
Conformità	classe di resistenza M15		EN 998-2

2.2.1.2 Rete mista in fibre di vetro e arammide ARV100

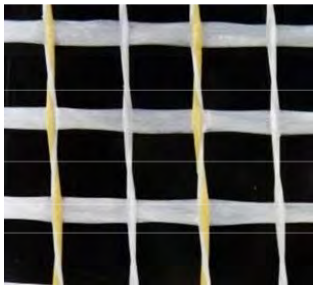


Figura 3.4 Tessuto di rinforzo ARV100

Rete di armatura biassiale in fibra di vetro alcali-resistente e aramide, specifica per il rinforzo, il miglioramento e l'adeguamento antisismico in basso spessore di edifici in calcestruzzo armato, con tamponature in laterizio, e strutture in muratura.

Di seguito la scheda tecnica:

DATI TECNICI SECONDO NORMA DI QUALITÀ KERAKOLL	
Aspetto	rete apprettata
Natura del materiale	vetro e aramide
Conservazione	illimitata
Confezione	rotoli 25 m
Larghezza rotolo	≈ 1 m
Lunghezza rotolo	≈ 25 m
Larghezza maglia	≈ 15x18 mm
Peso rete aprettata	≈ 250 g/m^2 ± 5%
Resistenza a trazione	> 50 kN/m
Allungamento a rottura	5,5 ± 1%

2.2.2 Rete in fibra di acciaio GeoSteel G2000

Il GeoSteel G2000 è un tessuto unidirezionale formato da micro-trefoli di acciaio ad altissima resistenza, fissati su una microrete in fibra di vetro che ne facilita le fasi di installazione. Generalmente viene legato con le matrici di Kerakoll GeoLite o Geolite Gel a seconda delle esigenze.

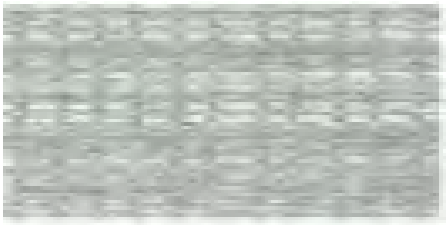


Figura 3.5 Tessuto di rinforzo GeoSteel G2000

Questo tessuto garantisce risorse strutturali e meccaniche uniche, superiori di gran lunga rispetto ai tradizionali tessuti in altre fibre, risultando così particolarmente efficaci nelle diverse applicazioni per rinforzo strutturale e miglioramento o adeguamento sismico.

Di seguito si riportano le caratteristiche meccaniche dei fili e dei trefoli in acciaio:

DATI TECNICI SECONDO NORMA DI QUALITÀ KERAKOLL		
Filo		
- tensione caratteristica a trazione	σ_{filo}	> 2900 MPa
- modulo elastico	E_{filo}	> 205 GPa
- area	A_{filo}	0,1076 mm²
Nastro secco/Trefolo		
Trefolo 3x2 ottenuto unendo fra loro 5 filamenti, di cui 3 rettilinei e 2 in avvolgimento con elevato angolo di torsione		
- area effettiva di un trefolo 3x2 (5 fili)	$A_{trefolo}$	0,538 mm²
- n° trefoli/cm		4,72 trefoli/cm
- massa (comprensivo di termosaldatura)		≈ 2000 g/m²
- carico di rottura a trazione di un trefolo		> 1500 N
- resistenza a trazione del nastro, valore caratteristico	σ_{nastro}	> 3000 MPa
- resistenza a trazione per unità di larghezza	σ_{nastro}	> 7,11 kN/cm
- modulo di elasticità normale del nastro	E_{nastro}	> 190 GPa
- deformazione a rottura del nastro, valore caratteristico	ε_{nastro}	> 2%
Sistemi FRCM - valori caratteristici:		
SRM - GeoLite® - GeoSteel G2000		
- resistenza a trazione	σ_{SRM}	≈ 2900 MPa
- modulo elastico	E_{SRM}	≈ 160 GPa
- allungamento a rottura	ε_{SRM}	≈ 1,8 ± 0,1%
- spessore equivalente del nastro secco	t_f	≈ 0,254 mm
Sistemi FRP - valori caratteristici:		
SRP - GeoLite® Gel - GeoSteel G2000		
- resistenza a trazione	σ_{SRP}	≈ 3000 MPa
- modulo elastico	E_{SRP}	≈ 190 GPa
- allungamento a rottura	ε_{SRP}	≈ 2,1 ± 0,1%
- spessore equivalente del nastro secco	t_f	≈ 0,254 mm
Confezione	rotoli 30 m (h 30 cm)	
Peso 1 rotolo	≈ 24 kg inclusa confezione	

2.3 Sistemi di rinforzo G&P

2.3.1 Sistema di rinforzo G&P C-NET

La matrice è costituita dalla malta Concrete Rock S a base di leganti inorganici, mentre il rinforzo è la rete in fibra di carbonio C-NET 170 BS.

2.3.1.1 Malta G&P Concrete Rock S

E' una malta monocomponente tixotropica premiscelata a base di leganti inorganici ad alta resistenza, a reattività pozzolanica con leganti polimerici ed aggregati selezionati, fibrorinforzata, pronta all'uso, da mescolare con acqua, per ottenere impasti non segregabili, tixotropici, a ritiro compensato.

Di seguito si riportano i dati tecnici della malta:

Dati tecnici (Classe R2-UNI EN 1504-3)	
Resa	ca. 1500 kg/m³
Acqua d'impasto	19% in peso sulla polvere
Tempo di lavorabilità (20°C e 65% U.R.)	> 60 min.
Contenuto ioni cloruro	< 0,05%
Resistenza a compressione a 28 g	25 N/mm² (Classe R3)
Modulo elastico a 28 g	15.000 N/mm² ca. (Classe R3)
Aderenza al mattone a 28 g	> 0,6 N/mm²
Permeabilità al vapore acqueo μ	20
Assorbimento capillare	< 0,5 kg m^{-2} $h^{-0,5}$
Reazione al fuoco EN 1015-1	classe A1
Resistenza ai cicli di gelo e disgelo	resistente
Resistenza ai solfati	nessun degrado dopo attacco in solfato di magnesio
Resistenza all'attacco degli olii lubrificanti	nessun degrado dopo immersione in olio a 40°C per 60 g
Essudamento d'acqua (bleeding)	assenza d'acqua essudata
Temperatura di applicazione	da +5 °C a +40 °C

2.3.1.2 Rete in fibra di carbonio C-NET 170 BS

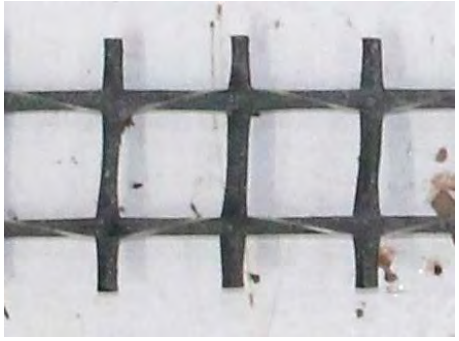


Figura 3.6 Rete in fibra di carbonio C-NET 170 BS

E' una rete bidirezionale in fibra di carbonio apprettata per il consolidamento da impiegare con malte strutturali cementizie ed in calce e pozzolana.

La rete C-NET 170BS presenta una grande flessibilità di impiego ed è idonea ad essere utilizzata nel rinforzo di strutture in c.a., c.a.p. ed in muratura, con malte idrauliche strutturali della linea Concrete Rock.

Le caratteristiche tecniche da fornitura sono:

Grammatura rete in carbonio	200 g/m²	170 g/m²
Dimensione maglia	17x34 mm	20x20 mm
Spessore nominale rete	0,117 mm	0,047 mm*
Resistenza a trazione filamento	4700 N/mm²	4700 N/mm²
Modulo elastico a trazione filamento	240 GPa	240 GPa
Allungamento ultimo a trazione filamento	1,8%	1,8%
Resistenza a trazione alla deformazione del 7,5‰	210 kN/m	84 kN/m*

2.3.2 Sistema di rinforzo G&P B-NET

La matrice è costituita dalla malta Limecrete a base di calce, mentre il rinforzo è la rete in fibra di basalto B-NET 350 B.

2.3.2.1 Malta G&P Limecrete

E' una malta premiscelata da muratura in calce e pozzolana naturale ed inerti silicei priva di cemento, di elevate resistenze meccaniche, buona traspirabilità e compatibilità con le murature antiche. Limecrete è particolarmente indicata per il consolidamento di murature in generale e storiche in particolare utilizzando reti unidirezionali e bidirezionali in fibra di carbonio tipo C-NET.

Le caratteristiche tecniche da fornitura sono:

Densità della malta fresca	2,05 g/cm³
Resa	17-18 kg./m² x cm spessore
Acqua di impasto	22-24%
Resistenza a compressione UNI EN 1745	> 15 N/mm²
Coefficiente di diffusione del vapore EN 1745	μ< 30
Sali idrosolubili nella malta indurita	
Conduttività elettrica Nor-Mal 13-83	< 85 μS cm-1
Sali solubili	ione solfato < 0,1%
	ione sodio <0,05 %
	ione potassio < 0,05 %
Coefficiente di assorbimento capillare UNI EN 1015/18	0,2 Kg x $m^{-2}min^{-0,5}$
Resistenza allo sfilamento di barre d'acciaio e barre M Bar RILEM-CEB-FIP RC6-78	6,5 N/mm²
Adesione al supporto UNI 1015/12 (trazione diretta)	0,6 N/mm² (rottura interfaccia malta/supporto)
Reazione al fuoco EN 13501/1	A1
Temperatura di applicazione	da+5 a +35°C

2.3.2.2 Rete in fibra di basalto B-NET 350 B

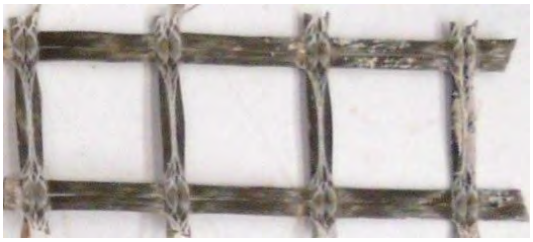


Figura 3.7 Tessuto di rinforzo B-NET 350 B

E' una rete di rinforzo in fibra di basalto apprettata per l'impiego con malte cementizie e in calce strutturale. La rete in fibra di basalto di elevata qualità è costituita da fibre di basalto prodotte dalla fusione e dalla filatura

di rocce vulcaniche. E'indicata per rinforzi di calcestruzzi e murature e per strutture soggette a forti urti e impatti.

Le caratteristiche tecniche da fornitura sono:

Grammatura	350 g/m²
Dimensione maglia	25x25 mm
Spessore fibra per direzione	0,058 mm
Resistenza a trazione filamento	>3200 MPa
Modulo elastico a trazione filamento	>90 GPa
Allungamento a trazione filamento	>3%
Resistenza a trazione alla deformazione 1% per dir.	62 kN/m

2.3.3 Sistema di rinforzo G&P G-NET

La matrice è costituita dalla malta Limecrete a base di calce, le cui caratteristiche meccaniche sono state descritte precedentemente, mentre il rinforzo è la rete in fibra di vetro G-NET 251 BA.

2.3.3.1 Rete in fibra di vetro G-NET 251 BA AR

Figura 3.8 Tessuto di rinforzo G-NET 251 BA

E' una rete di rinforzo in vetro AR per l'impiego con malte cementizie e in calce strutturale. La fibra utilizzata per la rete presenta un elevato contenuto in ossido di zirconio (la fibra è classificata AR ai sensi della Norma UNI EN 15422) che conferisce alla rete un'elevata resistenza agli ambienti alcalini, tipici delle malte cementizie e delle calci.

Le caratteristiche tecniche da fornitura sono:

Grammatura	250 g/m²
Dimensione maglia	25 mm
Spessore fibra per direzione	0,05 mm
Resistenza a trazione filamento	>2000 MPa
Carico di rottura per direzione	46/50 kN/m
Modulo elastico a trazione filamento	70 GPa
Allungamento a rottura filamento	>3%

2.4 Sistemi di rinforzo Ruredil

2.4.1 Sistema di rinforzo RUREDIL X MESH C10

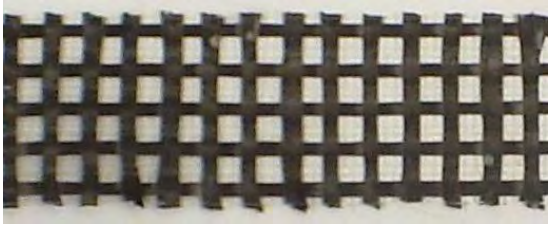


Figura 3.9 Tessuto di rinforzo RUREDIL X MESH C10

E' un sistema di rinforzo strutturale costituito da una rete bidirezionale in fibra di carbonio e da una matrice inorganica stabilizzata di natura pozzolanica appositamente formulata per l'utilizzo su supporti in muratura. Questo sistema brevettato, denominato FRCM (Fiber Reinforced Cementitious Matrix), non utilizza resine epossidiche ma una matrice costituita da un legante idraulico pozzolanico perfettamente compatibile con il supporto in muratura. Il sistema può essere utilizzato negli interventi di rinforzo strutturale delle murature, sostituendo e migliorando affidabilità e prestazioni delle tecniche tradizionali basate sull'impiego di reti in fibre di vetro e di acciaio e, più in generale dei sistemi FRP con tutti i tipi di fibre.

Il sistema RUREDIL X MESH C10 e costituito da:

- RUREDIL X MESH C10: rete in fibra di carbonio, larghezza 100 cm e lunghezza 15 m;
- RUREDIL X MESH M25: matrice inorganica stabilizzata conforme alla norma UNI EN 998-2.

Il sistema RUREDIL X MESH C10, grazie all'impiego della matrice inorganica RUREDIL X MESH M25, offre maggiori prestazioni anche rispetto ad un rinforzo FRP a base di resina epossidica o poliestere.

RUREDIL X MESH C10 viene impiegato per il rinforzo delle strutture in muratura, comprese quelle soggette all'azione del fuoco o alle alte temperature.

Le caratteristiche tecniche da fornitura sono:

CARATTERISTICHE DELLA FIBRA DI CARBONIO	
Carico di rottura a trazione	4.800 MPa
Modulo elastico	240 GPa
Densità fibra	1,82 g/cm^3
Allungamento a rottura	1,8 %

CARATTERISTICHE DELLA RETE RUREDIL X MESH C10	
Peso di fibra di carbonio nella rete	168 g/m^2
Spessore per il calcolo della sezione di carbonio a 0° e 90°	0,047 mm

CARATTERISTICHE DELLA MATRICE INORGANICA RUREDIL X MESH M25	
Consistenza (UNI EN 1015-3)	165 mm
Peso specifico malta fresca (UNI EN 1015-6)	1,50 ± 0,05 g/cc
Acqua d'impasto per 100 kg di RUREDIL X MESH M25	25 - 27 litri
Resa (prodotto secco)	≈ 1,200 kg/m²/mm
Resistenza a compressione (UNI EN 196-1)	> 20,0 MPa (a 28 gg)
Resistenza a flessione (UNI EN 196-1)	> 3,5 MPa (a 28 gg)
Modulo elastico secante (UNI EN 13412)	> 7000 MPa (a 28 gg)

2.4.2 Sistema di rinforzo RUREGOLD XR MURATURA

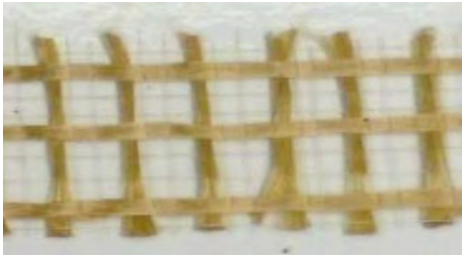


Figura 3.10 Tessuto di rinforzo RUREGOLD XR MURATURA

E' un sistema di rinforzo strutturale costituito da una rete bidirezionale in fibre di PBO (poliparafenilenbenzobisoxazolo) e da una matrice inorganica stabilizzata di natura pozzolanica appositamente formulata per l'utilizzo su supporti in muratura. Questo sistema brevettato, denominato FRCM (Fiber Reinforced Cementitious Matrix), non utilizza resine epossidiche ma impiega un legante idraulico pozzolanico perfettamente compatibile con il supporto di muratura. Il sistema può essere utilizzato negli interventi di rinforzo strutturale delle murature, sostituendo e migliorando affidabilità e prestazioni delle tecniche tradizionali basate sull'impiego di reti di fibre di vetro e di acciaio e, più in generale, dei sistemi FRP con tutti i tipi di fibre.

Il sistema RUREGOLD® XR MURATURA è costituito da:

- RUREGOLD® XR MURATURA: rete bidirezionale in fibra di PBO, larghezza 100 cm e lunghezza 15 m;
- RUREGOLD® MX MURATURA: matrice inorganica stabilizzata di natura pozzolanica conforme alla norma UNI EN 998-2.

Il sistema RUREGOLD® XR MURATURA, grazie all'impiego della matrice inorganica RUREGOLD® MX MURATURA, offre maggiori prestazioni anche rispetto ad un rinforzo FRP a base di resina epossidica o poliestere.

RUREGOLD® XR MURATURA viene impiegato per il rinforzo delle strutture in muratura, comprese quelle soggette all'azione del fuoco o ad alte temperature.

Caratteristiche tecniche:

CARATTERISTICHE DELLA FIBRA IN PBO (POLIPARAFENILENBENZOBISOXAZOLO)	
Resistenza a trazione	5,8 GPa
Modulo elastico	270 GPa
Densità di fibra	1,56 g/cm³
Allungamento a rottura	2,15 %

CARATTERISTICHE DELLA RETE RUREGOLD® XR MURATURA	
Peso delle fibre di PBO nella rete	44 g/m²
Spessore per il calcolo della sezione di PBO a 0° e 90°	0,014 mm

CARATTERISTICHE DELLA MATRICE INORGANICA RUREGOLD® MX MURATURA	
Consistenza (UNI EN 1015-3)	170 mm
Peso specifico malta fresca (EN 1015-6)	1,65 ± 0,05 g/cc
Acqua d'impasto per 100 kg di RUREGOLD® MURATURA MX	25 - 27 litri
Resa	1,300 kg/m²/mm
Resistenza a compressione (UNI EN 196-1)	20,0 MPa
Resistenza a flessione (UNI EN 196-1)	3,5 MPa
Modulo elastico secante (UNI EN 13412)	7.500 MPa

2.5 Polimero Poliuretanico PS

Per quanto riguarda le prove su FRP verranno utilizzate le strisce d'acciaio della Kerakoll descritte in precedenza, insieme ad un polimero poliuretanico altamente flessibile, chiamato PS.

Questo polimero presenta una resistenza media a trazione di 2,2 MPa e un modulo elastico di 8 MPa.

E' stato studiato e realizzato dal professor Arkadiusz Kwiecien dell'università di Cracovia, insieme al suo assistente Bogusław Zajac.

Il polimero si compone di due parti denominate Gray e Yellow rispettivamente A e B dove la parte B si compone di circa l'11% rispetto alla parte A.

Il polimero nasce come adesivo per la riparazione delle murature, facendo da collante nelle fessure.

Tuttavia può essere utilizzato come matrice polimerica data la sua composizione ed è gia stato analizzato e provato in questo senso.

2.6 Materiali utilizzati per l'afferraggio dei provini

2.6.1 Resina epossidica GeoLite Gel

E' un adesivo minerale epossidico, eco-compatibile, per l'impregnazione dei tessuti GeoSteel o per il placcaggio di rinforzi strutturali in genere.

L'adesivo Geolite Gel è bicomponente, quindi si ottiene dalla miscela delle parti A e B, presenti nella figura 2.12, rispettando le indicazioni della scheda tecnica.

La destinazione d'uso riguarda la realizzazione di rinforzi strutturali in elementi in c.a., c.a.p. e acciaio, mediante l'incollaggio di tessuti in fibra di acciaio galvanizzato ad altissima resistenza o rinforzi strutturali in genere.

Prima di applicare GeoLite Gel occorre irruvidire e pulire il substrato in calcestruzzo mediante spazzolatura o preferibilmente mediante sabbiatura, eliminando qualsiasi residuo di polvere, grasso, olii e altre sostanze contaminanti, fino ad ottenere un substrato pulito e ben coeso. GeoLite Gel si applica mediante spatola dentata di spessore 6 mm tale da consentire la distribuzione sul supporto di una quantità di adesivo sufficiente nel quale inglobare il tessuto di rinforzo, con l'accortezza di far penetrare adeguatamente il prodotto nelle zone del supporto di maggiore irregolarità.

Figura 3.11 Adesivo bicomponente Geolite Gel: Parte A e B

Di seguito si riportano le informazioni del prodotto da scheda tecnica:

DATI TECNICI SECONDO NORMA DI QUALITÀ KERAKOLL

Aspetto	parte A pasta grigia, parte B pasta beige	
Massa volumica	parte A 1650 kg/m³ – parte B 1720 kg/m³	
Conservazione	≈ 12 mesi nella confezione originale	
Avvertenze	teme il gelo, l'insolazione diretta e fonti di calore	
Confezione	parte A secchio 5 kg, parte B secchio 5 kg	
Rapporto d'impasto	parte A : parte B = 1 : 1	
Viscosità dell'impasto	≈ 1000000 mPas (rotore 95 RPM 2,5)	metodo Brookfield
Massa volumica dell'impasto	≈ 1700 kg/m³	
Durata dell'impasto (1 kg):		
- a +5 °C	≥ 100 min	
- a +21 °C	≥ 20 min	
- a +30 °C	≥ 15 min	
Temperature di applicazione	da +5 °C a +30 °C sia substrato che ambiente	
Resa	≈ 1,7 kg/m² per mm di spessore	

Rilevazione dati a +23 °C di temperatura, 50% U.R. e assenza di ventilazione. Possono variare in funzione delle specifiche condizioni di cantiere.

PERFORMANCE

HIGH-TECH

Caratteristica prestazionale	Metodo di prova	Requisiti richiesti EN 1504-4			Prestazione GeoLite® Gel
Aderenza/forza di legame	EN 12188	resistenza a trazione		≥ 14 N/mm²	> 14 N/mm²
		resistenza al taglio inclinato	50°	≥ 50 N/mm²	> 50 N/mm²
			60°	≥ 60 N/mm²	> 60 N/mm²
			70°	≥ 70 N/mm²	> 70 N/mm²
Resistenza al taglio	EN 12188	> 12 N/mm²			> 12 N/mm²
Ritiro lineare	EN 12617-1	≤ 0,1%			< 0,1%
Lavorabilità a 20 °C	EN ISO 9514	misurato con ≈ 0,5 kg di prodotto		–	35 min.
Temperatura di transizione vetrosa	EN 12614	> 40 °C			> 40 °C
Modulo elastico secante a compressione	EN 13412	≥ 2000 N/mm²			> 2000 N/mm²
Coefficiente di dilatazione termica	EN 1770	misurato tra -25 °C e +60 °C		≤ $100x10^{-6}$ K^{-1}	< $100x10^{-6}$ K^{-1}
Durabilità (resistenza a cicli gelo-disgelo)	UNI EN 13733	taglio a compressione > della resistenza a trazione del calcestruzzo		nessun collasso dei provini acciaio/adesivo/acciaio	specifica superata

2.6.2 Adesivo bicomponente Araldite

Figura 3.12 Adesivo Araldite 2011

L'Araldite 2011 è un adesivo multifunzionale in pasta, a due componenti, di alta resistenza e durezza, che polimerizza a temperatura ambiente. È adatto per unire una vasta gamma di metalli, ceramiche, vetro, gomma, plastica rigida e la maggior parte dei materiali di uso comune. È un adesivo versatile per uso artigianale come anche per la maggior parte delle applicazioni industriali. Le sue proprietà principali sono l'alta resistenza al taglio e allo spellamento, la buona resistenza al carico dinamico, e il fatto di unire un'ampia gamma di materiali di uso comune.

Dati sul prodotto

Proprietà	2011/A	2011/B	2011 (miscelato)
Colore (visivo)	neutro	giallo pallido	giallo pallido
Peso specifico	ca. 1,15	ca. 0,95	ca. 1,05
Viscosità (Pas)	30-50	20-35	30-45
Durata lattina (100 gr a 25°C)	-	-	100 minuti
Scadenza (2-40°C)	3 anni	3 anni	-

Lavorazione

Rapporto di miscelazione	Parti in peso	Parti in volume
Araldite 2011/A	100	100
Araldite 2011/B	80	100

- La resina e l'induritore devono essere mescolati fino a formare una miscela omogenea.
- Applicazione dell'adesivo: la miscela resina/induritore è applicata con una spatola sulle superfici da unire, pre-trattate ed asciutte. Uno strato di adesivo, dello spessore compreso tra 0,05 e 0,10mm, conferirà solitamente al legame la maggiore resistenza al taglio da sovrapposizione. I componenti di unione devono essere assemblati e imbrigliati subito dopo l'applicazione dell'adesivo. Una pressione di contatto uniforme su tutta l'area unita assicurerà un'ottima polimerizzazione.
- Caratteristiche dopo indurimento: se non altrimenti indicato, i valori riportati più oltre sono stati ottenuti in seguito ai test cui sono stati sottoposti campioni standard, prodotti dall'unione a sovrapposizione di strisce in lega di alluminio, di dimensioni 170 x 25 x 1,5 mm. In ogni caso, l'area da unire era di 12,5 x 25 mm.

2.6.3 Cella di carico integrata della MTS

Figura 3.13 Macchina universale MTS

Le prove sono eseguite con la macchina universale MTS. Le prove vengo eseguite in controllo di spostamento con una velocità di carico costante pari a 0,02 mm/s per le prove di trazione su tessuto secco, 0,01 mm/s per le prove di trazione su composito e 0,003 mm/s per le prove di delaminazione.

In questo setup di prova, la forza viene registrata direttamente dal sistema di controllo della macchina MTS che fornisce il valore della forza totale trasmessa alle fibre del tessuto.

Il carico è stato applicato attraverso una macchina di prova universale MTS (*Material Testing System*) dotata di una servo valvola da 500kN. La prova si può effettuare sia in controllo di forza, ovvero si applica un carico e si va ad individuare lo spostamento associato, oppure in controllo di spostamento, cioè si applica uno spostamento e si va ad individuare il carico associato. La forza applicata viene misurata da una cella di carico integrata nella macchina di prova.

Il controllo di spostamento è in generale preferibile poiché permette di valutare meglio il ramo decrescente della curva legato alla perdita di tensione dopo il raggiungimento della resistenza massima del materiale. Per questo le prove sono state eseguite in regime monotono, in controllo di spostamento.

Il carico applicato è stato registrato da una cella di carico integrata nella macchina di prova. Dai valori di carico sono stati poi ricavati quelli di tensione nella sezione trasversale del rinforzo riferita alla sezione di tessuto secco, cioè valutata come il prodotto della larghezza del campione nella direzione di applicazione del carico per lo spessore equivalente.

Il livello di spostamento durante le prove è stato misurato tramite il trasduttore di spostamento integrato nella macchina di prova, il quale misura lo spostamento relativo tra le 2 morse della macchina; lo spostamento

relativo permette di calcolare poi la deformazione subita dal provino, andando a dividerlo per il valore del modulo elastico del tessuto suggerito dalla scheda tecnica.

Per ogni prova poi vengono utilizzati altri misuratori di spostamento e deformazione, in modo tale poi da permettere un confronto con i dati della cella di carico.

2.6.4 Trasduttore di spostamento induttivo (LVDT)

Il trasduttore di spostamento induttivo, noto anche come LVDT, è un dispositivo elettromagnetico usato per la misura di piccoli spostamenti.

Il trasduttore è realizzato mediante un tubo composto da tre avvolgimenti disposti con assi paralleli e con all'interno un nucleo cilindrico ferromagnetico mobile, normalmente caratterizzato da un'alta permeabilità magnetica. L'avvolgimento centrale è detto primario e gli altri due secondari: quello primario è collegato ad un generatore di tensione AC, ai capi dei secondari invece si misura la tensione d'uscita.

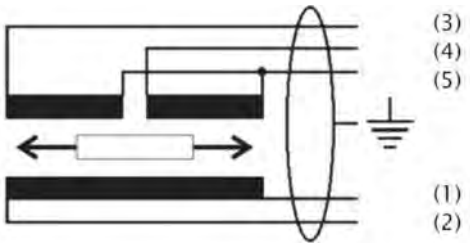


Figura 3.14 Schema elettrico del trasduttore di spostamento: (1) e (2) sono i collegamenti all'avvolgimento primario; (3),(4) e (5) sono i collegamenti agli avvolgimenti secondari.

Quando il nucleo è al centro, la tensione indotta sugli avvolgimenti secondari, essendo questi avvolti in senso discorde è uguale ma opposta, di modo che il segnale di tensione misurato sia praticamente nullo. Allo spostarsi del nucleo, invece, le mutue induttanze cambiano, e a seconda che si sposti a sinistra o a destra risulterà maggiore l'accoppiamento induttivo con il secondario rispettivamente di sinistra o destra. Di conseguenza il segnale in uscita varierà proporzionalmente allo spostamento del nucleo.

L'LVDT è un trasduttore molto sensibile in grado di misurare spostamenti dell'ordine delle frazioni di micromètro. A seconda della frequenza di alimentazione del primario e della massa del nucleo si hanno frequenze di taglio di alcune centinaia di hertz e quindi buone risposte dinamiche a spostamenti velocemente variabili nel tempo.

I trasduttori utilizzati sono prodotti dalla Inelta ed hanno una corsa massima di ±5mm. Di seguito si riportano le specifiche tecniche e le dimensioni degli LVDT utilizzati:

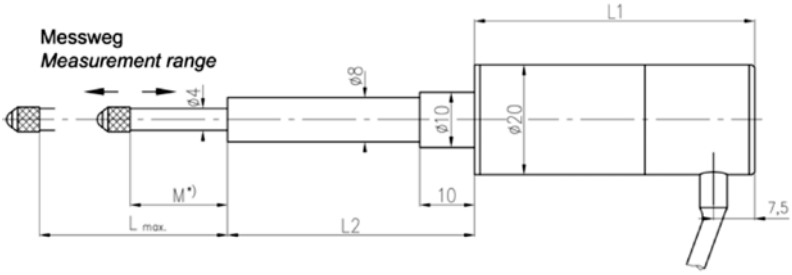


Figura 3.15 Specifiche tecniche dei trasduttori di spostamento

I trasduttori sono stati applicati in corrispondenza del tessuto libero non adeso alla matrice; le punte degli LVDT vengono appoggiate a dei piastrini incollati a caldo al di sotto del supporto in muratura, in modo da misurare lo spostamento relativo tra il materiale non adeso al di sotto del rinforzo applicato e il supporto in muratura. Per definire poi precisamente lo slip, dovrà essere decurtata dai dati di registrazione, la deformazione subita dal tessuto libero presente tra il punto di applicazione degli LVDT e la zona di ancoraggio alla matrice.

3 Programma sperimentale

Il programma sperimentale svolto si articola in diverse fasi che vanno dal confezionamento dei provini fino all'esecuzione e all'elaborazione delle prove.

Il programma sperimentale ha riguardato prove di delaminazione su FRCM e FRP.

Sono state effettuate in totale 52 prove: 35 prove di delaminazione sugli FRCM e 17 prove sugli FRP. Nelle pagine seguenti viene riportato un quadro riassuntivo dei provini testati confezionati in laboratorio e dal committente.

FRCM				
Producer	***Substrate***	***Reinforcement textile***	***Mortar matrix***	***Specimen name***
Kerakoll	Brick Masonry	Glass ARV100	GeoCalce Fino(Lime)	K-GL-BMAS-01
Kerakoll	Brick Masonry	Glass ARV100	GeoCalce Fino(Lime)	K-GL-BMAS-02
Kerakoll	Brick Masonry	Glass ARV100	GeoCalce Fino(Lime)	K-GL-BMAS-03
Kerakoll	Brick Masonry	Glass ARV100	GeoCalce Fino(Lime)	K-GL-BMAS-04
Kerakoll	Brick Masonry	Glass ARV100	GeoCalce Fino(Lime)	K-GL-BMAS-05
Kerakoll	Brick Masonry	Glass ARV100	GeoCalce Fino(Lime)	K-GL-BMAS-06
G&P Intech	Brick Masonry	Basalt B-NET 350 BA	Limecrete(Lime)	G-BL-BMAS-01
G&P Intech	Brick Masonry	Basalt B-NET 350 BA	Limecrete(Lime)	G-BL-BMAS-02
G&P Intech	Brick Masonry	Basalt B-NET 350 BA	Limecrete(Lime)	G-BL-BMAS-03
G&P Intech	Brick Masonry	Basalt B-NET 350 BA	Limecrete(Lime)	G-BL-BMAS-04
G&P Intech	Brick Masonry	Basalt B-NET 350 BA	Limecrete(Lime)	G-BL-BMAS-05
G&P Intech	Brick Masonry	Basalt B-NET 350 BA	Limecrete(Lime)	G-BL-BMAS-06
G&P Intech	Brick Masonry	Carbon C-NET 170BS	Concrete Rock S(Cement)	G-CC-BMAS-01
G&P Intech	Brick Masonry	Carbon C-NET 170BS	Concrete Rock S(Cement)	G-CC-BMAS-02
G&P Intech	Brick Masonry	Carbon C-NET 170BS	Concrete Rock S(Cement)	G-CC-BMAS-03
G&P Intech	Brick Masonry	Carbon C-NET 170BS	Concrete Rock S(Cement)	G-CC-BMAS-04
G&P Intech	Brick Masonry	Carbon C-NET 170BS	Concrete Rock S(Cement)	G-CC-BMAS-05
G&P Intech	Brick Masonry	Carbon C-NET 170BS	Concrete Rock S(Cement)	G-CC-BMAS-06
G&P Intech	Brick Masonry	Glass G-NET 251 BA	Limecrete(Lime)	G-GL-BMAS-01
G&P Intech	Brick Masonry	Glass G-NET 251 BA	Limecrete(Lime)	G-GL-BMAS-02
G&P Intech	Brick Masonry	Glass G-NET 251 BA	Limecrete(Lime)	G-GL-BMAS-03
G&P Intech	Brick Masonry	Glass G-NET 251 BA	Limecrete(Lime)	G-GL-BMAS-04
G&P Intech	Brick Masonry	Glass G-NET 251 BA	Limecrete(Lime)	G-GL-BMAS-05
Ruredil	Brick Masonry	Carbon Xmesh C10	XMesh M25 (Cement)	R-CC-BMAS-01
Ruredil	Brick Masonry	Carbon Xmesh C10	XMesh M25 (Cement)	R-CC-BMAS-02
Ruredil	Brick Masonry	Carbon Xmesh C10	XMesh M25 (Cement)	R-CC-BMAS-03
Ruredil	Brick Masonry	Carbon Xmesh C10	XMesh M25 (Cement)	R-CC-BMAS-04
Ruredil	Brick Masonry	Carbon Xmesh C10	XMesh M25 (Cement)	R-CC-BMAS-05
Ruredil	Brick Masonry	Carbon Xmesh C10	XMesh M25 (Cement)	R-CC-BMAS-06
Ruredil	Brick Masonry	PBO XR	Ruregold MX (Cement)	R-PC-BMAS-01
Ruredil	Brick Masonry	PBO XR	Ruregold MX (Cement)	R-PC-BMAS-02
Ruredil	Brick Masonry	PBO XR	Ruregold MX (Cement)	R-PC-BMAS-03
Ruredil	Brick Masonry	PBO XR	Ruregold MX (Cement)	R-PC-BMAS-04

Ruredil	Brick Masonry	PBO XR	Ruregold MX (Cement)	R-PC-BMAS-05
Ruredil	Brick Masonry	PBO XR	Ruregold MX (Cement)	R-PC-BMAS-06
FRP				
Producer	***Substrate***	***Reinforcement textile***	***Mortar matrix***	***Specimen name***
Kerakoll	Brick Masonry	GeoSteel G2000	Polymer PS	K-ST26-BMAS-01
Kerakoll	Brick Masonry	GeoSteel G2000	Polymer PS	K-ST26-BMAS-02
Kerakoll	Brick Masonry	GeoSteel G2000	Polymer PS	K-ST26-BMAS-03
Kerakoll	Brick Masonry	GeoSteel G2000	Polymer PS	K-ST26-BMAS-04
Kerakoll	Brick Masonry	GeoSteel G2000	Polymer PS	K-ST26-BMAS-05
Kerakoll	Brick Masonry	GeoSteel G2000	Polymer PS	K-ST26-BMAS-06
Kerakoll	Brick Masonry	GeoSteel G2000	Polymer PS	K-ST20-BMAS-01
Kerakoll	Brick Masonry	GeoSteel G2000	Polymer PS	K-ST20-BMAS-02
Kerakoll	Brick Masonry	GeoSteel G2000	Polymer PS	K-ST20-BMAS-03
Kerakoll	Brick Masonry	GeoSteel G2000	Polymer PS	K-ST20-BMAS-04
Kerakoll	Brick Masonry	GeoSteel G2000	Polymer PS	K-ST20-BMAS-05
Kerakoll	Brick Masonry	GeoSteel G2000	Polymer PS	K-ST20-BMAS-06
Kerakoll	Brick	GeoSteel G2000	Polymer PS	K-ST20-BRICK-01
Kerakoll	Brick	GeoSteel G2000	Polymer PS	K-ST20-BRICK-02
Kerakoll	Brick	GeoSteel G2000	Polymer PS	K-ST20-BRICK-03
Kerakoll	Brick	GeoSteel G2000	Polymer PS	K-ST20-BRICK-04
Kerakoll	Brick	GeoSteel G2000	Polymer PS	K-ST20-BRICK-05

3.1 Confezionamento dei provini

Quella del confezionamento è evidentemente una fase molto delicata ed eventuali errori commessi potrebbero riflettersi sull'esito della prova alterando i risultati. Il processo di confezionamento è diverso a seconda della tipologia dei provini da testare. Verranno illustrate dettagliatamente tutte le varie fasi che hanno preceduto il set-up e l'esecuzione della prova per ognuna delle seguenti tipologie di prova:

- Prove di delaminazione su supporto in muratura con gli FRCM
- Prove di delaminazione su supporto in muratura con gli FRP

Secondo quanto descritto dalle linee guida americane nell'allegato A delle AC434 - A3.0-: "Un sistema non appropriato di ancoraggio può causare rotture dei provini in prossimità degli afferraggi e conseguentemente una forte dispersione dei risultati".

Vengono inoltre fornite agli stessi punti importanti informazioni relative alle dimensioni del provino e dei sistemi di ancoraggio:

"La larghezza del provino non deve essere maggiore di quella degli afferraggi della macchina di trazione. In caso contrario, non sarebbe assicurata nel provino una distribuzione uniforme delle tensioni normali di trazione.

La lunghezza minima del provino deve essere maggiore della somma della lunghezza degli afferraggi più due volte la larghezza del provino, più ancora la lunghezza della base di misura dell'estensometro.

E’ comunque preferibile avere campioni più lunghi della suddetta lunghezza per minimizzare gli effetti degli ancoraggi.

I campioni devono essere provvisti di talloni alle estremità, nelle zone di afferraggio, per evitare rotture dei campioni localizzate in tali zone.

I talloni possono essere metallici (alluminio o acciaio) o di materiale polimerico anche fibrorinforzato (es. GFRP). I talloni, due per ogni estremità, devono avere la stessa larghezza del campione e sono fissati a quest’ultimo utilizzando adesivi indicati per l’uso specifico.

La lunghezza dei talloni può essere calcolata sulla base del carico massimo previsto, della resistenza dell’adesivo tra tallone e campione e della lunghezza di ancoraggio delle fibre della rete nella matrice. Si raccomanda una lunghezza minima dei talloni di 80 mm. Lo spessore dei talloni deve essere adeguato a distribuire uniformemente la forza di afferraggio a tutta la larghezza del campione. Si suggerisce uno spessore minimo di 2 mm”.

I provini Kerakoll sono stati confezionati dall’impresa stessa; per effettuare poi un confronto, sono stati confezionati 6 provini K-SL-BMAS nel laboratorio Prove e Ricerca su Strutture e Materiali “Roma Tre”. Tutta la restante parte è stata confezionata nel laboratorio. Per i provini confezionati da Kerakoll, in laboratorio si è provveduto all’applicazione dei rinforzi di estremità per l’afferraggio alla macchina MTS.

3.1.1 Fasi di confezionamento dei provini utilizzati per le prove di delaminazione con gli FRCM

Le fasi di confezionamento sono state le seguenti:

1. Sono stati recuperati in laboratorio 36 muretti già utilizzati per le prove di round robin, che avessero almeno una faccia pulita e disponibile per l’applicazione della fibra. Le dimensioni sono 12,5x12x5,5 per un totale di 5 mattoni piu 4 giunti di malta da 1 cm.

2. I prismi vengono prillati: il prillamento consiste nell'applicazione di un cordino che circonda il prisma e alle cui estremità vengono fatti due cappi che vengono legati tramite delle fascette. Lo scopo è quello di imprimere una forza di compressione agente su ambo le basi per evitare che i mattoni costituenti i prismi, se stesi orizzontalmente, possano staccarsi gli uni dagli altri;

3. La faccia verticale che verrà rinforzata viene il più possibile appianata usando una spatola prima ed una spazzola poi. La polvere formatasi viene poi allontanata facendo uso di aria compressa;

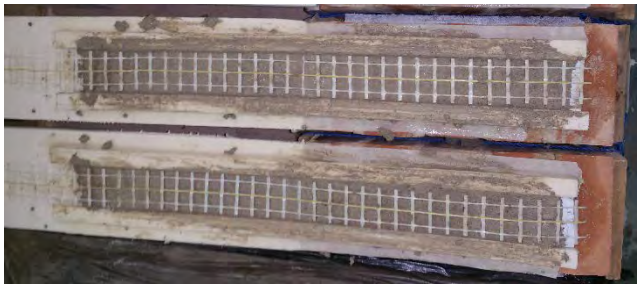
4. Si ritagliano le strisce di tessuto. La loro lunghezza è di 70 cm e la larghezza è di 50 mm circa.

5. Viene preparata la malta rispettando le proporzioni indicate dal fornitore;

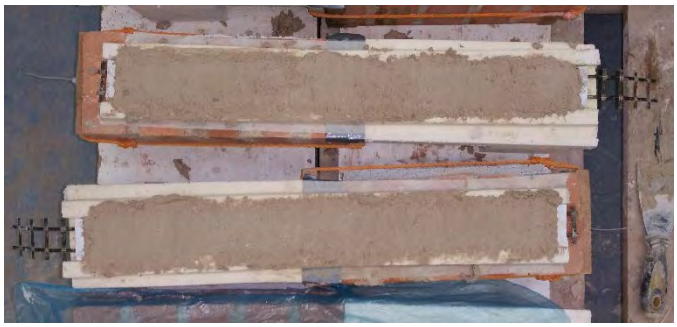
6. Sono stati realizzati dei supporti in polisirolo da posizionare di fronte al provino che svolgano il ruolo di sostegno per la gettata di malta sulla parte di tessuto non adeso.

7. La faccia da rinforzare viene bagnata con acqua; sulla stessa faccia vengono posizionati i casseri in polistirolo in modo tale che il rinforzo sia centrato rispetto al supporto; il rinforzo ha una larghezza pari a 5 cm ed è lungo 26 cm nella parte adesa e 30 nella restante. I casseri sono alti 1 cm e vengono fissati al supporto con dello scotch boadesivo;

8. Un primo strato di malta, alto 5 mm, viene posato facendo uso di un regolo che scorrendo sui casseri lunghi assicura l'altezza desiderata, si posiziona il tessuto facendo toccare un'estremità con il cassero e facendo una leggera pressione, così da far passare la malta tra le maglie del tessuto;

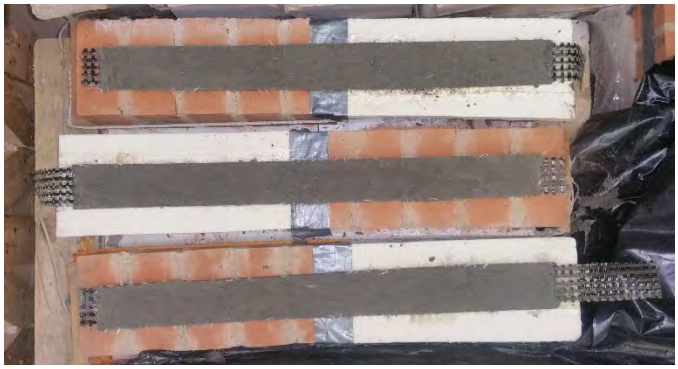


9. Si posa il secondo strato di malta usando alla fine la spatola americana e sfruttando il limite imposto dai casseri come regolo per raggiungere l'altezza desiderata;



10. Si mettono a bagno una federa ed uno straccio per poi posizionarli sul rinforzo. Dopo, il prisma e il supporto in polistirolo viengono avvolti da un sacchetto per garantire livelli di U.R. pari al 100%;

11. Dopo 48 ore il provini viene scasserato;



12. La federa e lo straccio vengono messi a bagno e riposizionati sul rinforzo una volta al giorno per due settimane.

13. Il provini può essere sottoposto alla prova dopo la fase di maturazione che dura 28 giorni; prima di poterla effettuare si procede con il rinforzo.

Di seguito si riportano le fasi di applicazione dei rinforzi delle estremità del provino:

1. Il primo passo per la realizzazione del rinforzo dei provini è quello di ritagliare dal rotolo la fibra di vetro necessaria di larghezza 10 cm e lunghezza di circa 25cm (per evitare che le morse della macchina MTS stringano troppo le estremità del provino rompendolo);

2. Dopodiché si è proceduto accuratamente a rimuovere le parti di tessuto in eccesso nelle estremità dei campioni;

3. Si traccia un segno sul provino con una matita in corrispondenza di dove è prevista la fine del rinforzo (10cm dall'estremità);

4. Sul tavolo da lavoro viene posizionato un rettangolo di pellicola trasparente. Sopra di esso si posiziona la fibra di vetro precedentemente preparata;

5. Viene preparata la resina epossidica Geolite Gel rispettando il dosaggio del fornitore (tre parti del componente A ed una del componente B in peso);
6. A questo punto si spalma con una spatola da lavoro la resina epossidica Geolite Gel sul tessuto in fibra di vetro;

7. Si posiziona il provino sulla fibra di vetro facendo attenzione al segno in matita fatto precedentemente. Si esercita con i palmo della mano una leggera pressione sulla superficie superiore in modo da far passare la resina attraverso il tessuto della fibra di vetro.
8. Si ruota il provino faccia per faccia attorno alla striscia in fibra di vetro, facendo attenzione a garantire la perfetta ortogonalità del tessuto ed esercitando di volta in volta, su ogni faccia, una pressione con il palmo della mano.
9. Una volta terminata l'applicazione rinforzo in fibra di vetro si procede ad avvolgere l'estremità del provino con della pellicola trasparente.
10. Infine si lascia riposare il provino per 24/48 ore con una massa sopra il rinforzo avente una superficie liscia

Il provino a questo punto, è pronto per essere sottoposto a delaminazione.

3.1.2 Fasi di confezionamento dei provini utilizzati per le prove di delaminazione con gli FRP

Le fasi di confezionamento sono state le seguenti:

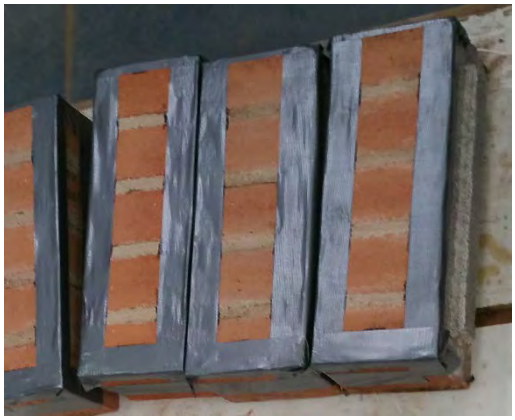
1. Sono stati recuperati in laboratorio altri 12 muretti uguali ai precedenti, e 5 mattoni dello stesso tipo ripetto a quelli usati per realizzare i muretti, con dimensioni 25x12,5x5.

2. La faccia verticale che verrà rinforzata viene il più possibile appianata usando una spatola prima ed una spazzola poi. La polvere formatasi viene poi allontanata facendo uso di aria compressa;

3. La zona da rinforzare viene disegnata dalle stisce di scotch che vengono applicae proprio per non far attaccare il polimero nelle parti non interessate.

4. Si ritagliano le strisce di tessuto. La loro lunghezza è di 70 cm e la larghezza è di 50 mm circa.

5. La zona su cui dovrà essere applicator il polimero, viene applicao un primer con la funzione di omogenizzare la superficie.

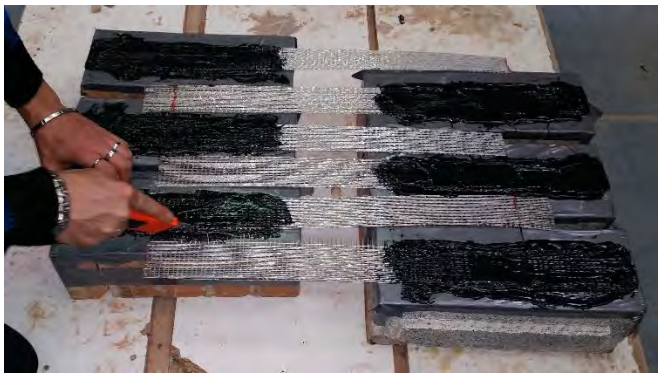


6. Successivamente viene preparato il polimero, cercando di realizzarne poco per volta, per evitare di farlo indurire. Vengono unite le due parti, come indicato in precedenza, dentro un fondo di bottiglia e mescolate con l'ausilio del mixer del trapano.

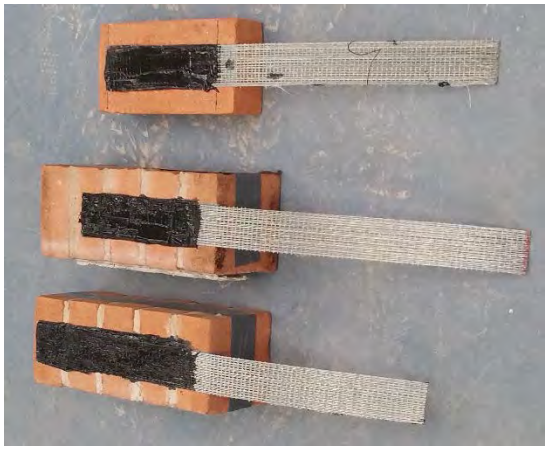
7. Dopo viene versato il polimero ancora in forma liquida sul provino per poi adagiare subito la stiscia sopra. Con pressione viene fatta attaccare la striscia perfettamente, facendo passare il polimero tra le fissure. Quando il polimero diventa pastoso si rifinisce.

14. Viene fatto indurire il polimero per 48 ore.

15. Passate le 48 ore si toglie lo scotch e con l'ausilio di un taglierino si tolgono le parti di polimero in esubero.

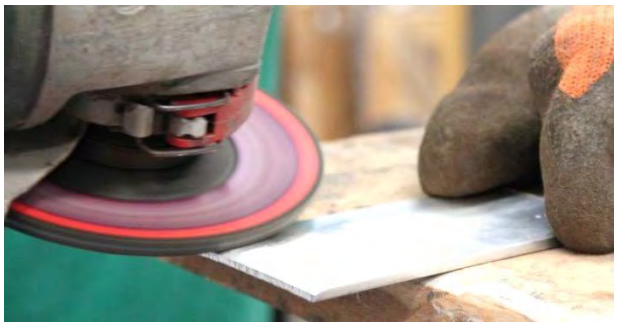


16. I provini sono ora pronti per effettuare l'afferragio sulle strisce di tessuto.



Vengono ora illustrate le varie fasi di applicazione dei talloni alle estremità:

1. I talloni vengono ritagliati da strisce di alluminio utilizzando un frullino oppure vengono riciclati quelli già utilizzati per altre prove usando il forno (a 200°C l'araldite perde le proprie caratteristiche).Se i talloni sono costruiti "ex novo" è necessario smerigliarli per evitare che il tallone possa tagliare il tessuto. Anche per questa procedura si fa uso del frullino.



2. Viene preparata l'araldite rispettando le proporzioni in peso dei due componenti che vanno mischiati. Le dosi delle due componenti sono le seguenti:
   - Parte A → 100g (di colore trasparente tendente al bianco)
   - Parte B → 80g (di colore simile al miele)

3. Su una tavola vengono infissi due chiodi, si posiziona un pezzo di pellicola trasparente e su di essa viene posizionato un tallone facendo sì che la sua base non smerigliata tocchi i chiodi.

4. Si vincola il tessuto ai chiodi e lo si posiziona sul tallone.

5. Si posiziona su un altro tallone uno strato di araldite e lo si posiziona sempre su di un pezzo di pellicola trasparente e con la base smerigliata rivolta verso il primo tallone.

6. Si posiziona l’estremità del tessuto non vincolata sul tallone ricoperto d’araldite facendo in modo che il tessuto sia teso.

7. Si posa uno strato di araldite su un terzo tallone che viene posizionato su quello dove è già stata posata l’araldite.

8. Si avvolge la coppia di talloni con la pellicola trasparente.

9. La stessa operazione viene effettuata anche sull’altra estremità del tessuto.

10. Si posizionano delle masse sopra i talloni per 48h circa, e cioè per il tempo necessario all’araldite perché essicchi. Fatto ciò, è possibile rimuovere la pellicola trasparente.

Il provino a questo punto è pronto per essese sottoposto alla prova di trazione.

3.2 Set-up di prova

Di seguito si riportano le fasi di set-up delle diverse prove effettuate durante il programma sperimentale.

La macchina utilizzata per l'esecuzione delle prove viene raffigurata di seguito:

Figura 4.1 Macchina universale MTS

Per l'esecuzione dei test di delaminazione è stato utilizzato un telaio metallico realizzato ad hoc nel Laboratorio di Prova. Il telaio è afferrato superiormente nelle ganasce della macchina di prova ed è opportunamente irrigidito per ridurre al minimo deformazioni e distorsioni. Il pacchetto di rinforzo è alloggiato in una apposita apertura che consente l'afferraggio del tessuto libero nelle ganasce inferiori. La piastra superiore ed il tessuto libero sono allineati, al fine di applicare uno sforzo di taglio puro sul rinforzo. Due elementi metallici sono collegati al telaio mediante barre filettate, e vengono serrati per garantire l'equilibrio e la stabilità, impedendo che il provino ruoti o si sposti durante l'esecuzione del test. Il serraggio induce la nascita di uno sforzo normale all'interfaccia tra supporto e superficie verticale del telaio metallico, la cui superficie è resa scabra per consentire la nascita di una forza di attrito, la quale partecipa all'equilibrio dell'intero sistema.

Di seguito si riportano le fasi di set-up delle prove di delaminazione:

1. Rilievo fotografico del provino;

2. Il provino viene posizionato sulla macchina; inizialmente si controlla la verticalità della matrice e del tessuto libero in modo tale che una volta chiusa la ganascia inferiore, venga applicato uno sforzo di taglio puro sul rinforzo;

3. Una volta verificata la verticalità, si posizionano i due elementi metallici, che vengono serrati al telaio mediante barre filettate, in modo tale che il provino non subisca movimenti o rotazioni durante la prova; a questo punto si guarda se il supporto appoggia perfettamente al telaio; se ciò non avviene, si posizionano dei piastrini negli spazi presenti, dovuti principalmente ad imperfezioni nella costruzioni dei supporti stessi;

4. Vengono posizionati gli LVDT, i quali permettono la misura dello slip tra il tessuto libero e il supporto; la punta dell'LVDT viene posizionata su un piastrino che viene incollato a caldo al di sotto del supporto e durante la prova di trazione, grazie alla centralina Lab View, si può determinare in tempo reale lo scorrimento. Una volta che vengono posizionati è importante effettuare anche una prova con la centralina per verificare che gli LVDT funzionino adeguatamente;

5. Viene posizionato l'estensometro al centro del provino;

6. Si prendono le misure del provino: si calcola l'area del tessuto, come nel caso dei tessuti secchi. Vengono misurate la larghezza e lo spessore del provino in composito, ed inoltre si misura la lunghezza della matrice e quella del tessuto libero; un' ulteriore misura da prendere è quella tra l'inizio del tessuto libero e il punto di serraggio degli LVDT sul tessuto, in quanto servirà nella fase successiva di elaborazione per il calcolo dello slip. A questo punto tutte le misure vengono inserite nel file Excel "RRT Quadro Generale":

7. L'ultima fase prima dell'inizio della prova è quella dell'azzeramento della forza della macchina, del suo spostamento e della deformazione dell'estensometro, per evitare grafici con ascisse iniziali diverse da zero.

3.3 Esecuzione dei test

Il carico viene applicato attraverso una macchina di prova universale MTS (*Material Testing System*) dotata di una servo valvola da 500kN. La prova si può effettuare sia in controllo di forza, ovvero si applica un carico e si va ad individuare lo spostamento associato, oppure in controllo di spostamento, cioè si applica uno spostamento e si va ad individuare il carico associato. La forza applicata viene misurata da una cella di carico integrata nella macchina di prova.

Il controllo di spostamento è in generale preferibile poiché permette di valutare meglio il ramo decrescente della curva legato alla perdita di tensione dopo il raggiungimento della resistenza massima del materiale. Per questo le prove sono state eseguite in regime monotono, in controllo di spostamento, ad una velocità costante pari a:

- 0.003mm/sec per le prove di delaminazione.

Tutte le prove sono state condotte fino alla delaminazione, essendo prove di distacco dal supporto.

Il carico applicato è stato registrato da una cella di carico integrata nella macchina di prova, dotata di precisione <0.25% e risoluzione <1N. In tempo reale è possibile vedere il grafico della prova in termini di forza e spostamento:

Figura 4.2 Lettura MTS in tempo reale

In questa fase è importante attivare in contemporanea all'avvio della macchina MTS anche le misure dei potenziometri e degli LVDT, per ottenere dati quasi perfettamente in parallelo.

Le misurazioni dei potenziometri e degli LVDT sono condotte dalla centralina LabView che è collegata alla macchina MTS. Come già detto in precedenza è importante effettuare una prova di questo strumenti prima dell'esecuzione del test per controllarne il corretto funzionamento.

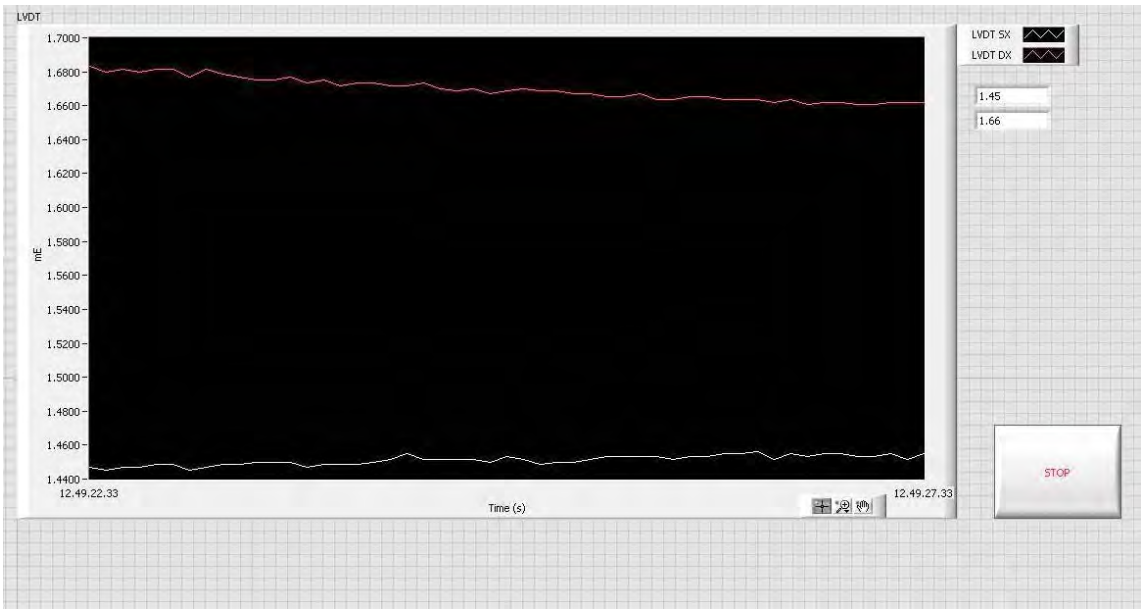


Figura 4.3 Lettura degli LVDT in tempo reale

Ciascun potenziometro ed LVDT è contraddistinto con un numero. È molto importante tenere conto di ciò perché ogni trasduttore deve essere opportunamente tarato prima di essere utilizzato nelle prove.

Durante lo svolgimento della prova ci si è preoccupati di documentare fotograficamente le fasi e gli eventi più significativi e di monitorare le misurazioni dei vari strumenti in tempo reale per essere sicuri che la prova si stesse svolgendo nel modo previsto.

Non sono state eseguite pause per ottimizzare l'assetto dei potenziometri e degli estensometri laddove opportuno, in modo da avere la corsa di lettura dei dispositivi per ottenere così risultati puliti e rapidamente interpretabili.

La fine della prova si determina in corrispondenza della rottura del provino, ovvero nel momento in cui sostanzialmente la forza applicata si azzera vista la completa perdita di resistenza del materiale; fanno eccezione le prove in cui a seguito della rottura di uno o più yarn, si è sviluppato uno scorrimento del tessuto all'interno del pacchetto di malta e quindi dopo il picco la forza è pressoché costante a spostamento praticamente infinito. In questi casi è stato deciso di interrompere la prova solo dopo che si ha una coda abbastanza importante.

Dopo l'esecuzione del test il provino viene posizionato nuovamente sul tavolo e viene fotografata la modalità di rottura.

3.4 *Elaborazione dei dati*

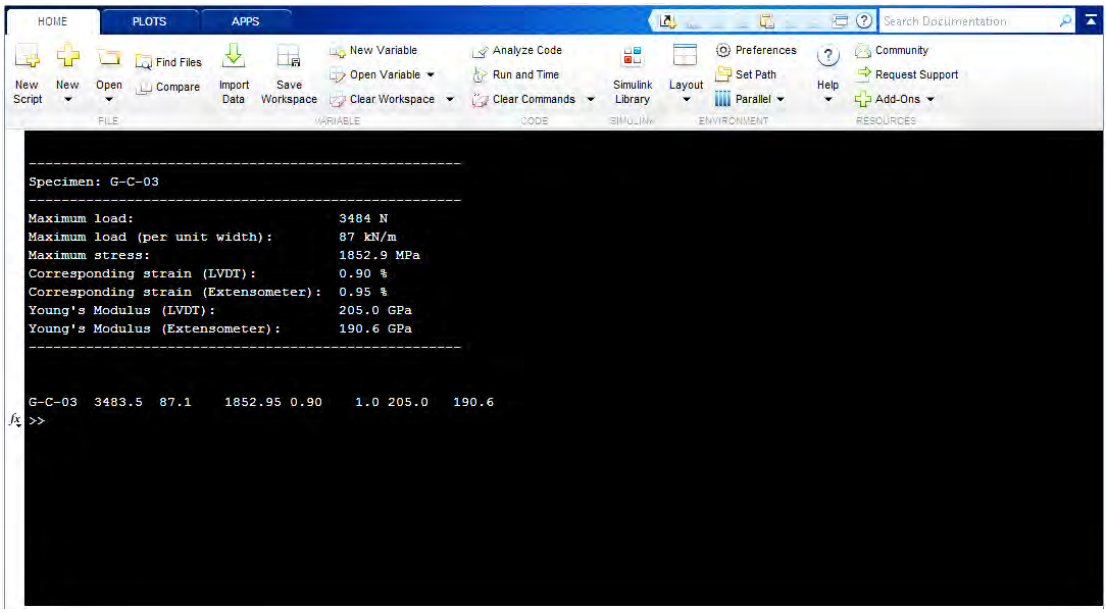
In questo paragrafo si andranno ad analizzare tutti i passaggi del post-processing delle singole prove; l'elaborazione dei dati è una fase molto importante e bisogna procedure con molta attenzione per evitare errori. Essa permette di capire se ci sono stati eventuali errori durante l'esecuzione delle prove ed inoltre permette di confrontare i risultati delle diverse prove.

L'elaborazione avviene attraverso l'uso del programma Matlab (abbreviazione di Matrix Laboratory), il quale viene utilizzato per il calcolo numerico e l'analisi statistica scritto in C che comprende anche l'omonimo linguaggio di programmazione creato dalla MathWorks.

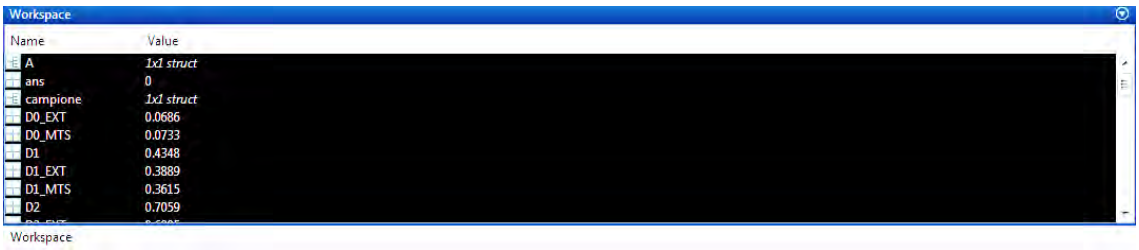
Matlab consente di manipolare matrici, visualizzare funzioni e dati, implementare algoritmi, creare interfacce utente, e interfacciarsi con altri programmi. Matlab è usato da milioni di persone nell'industria e nelle università per via dei suoi numerosi strumenti a supporto dei più disparati campi di studio applicati.

L'interfaccia principale di Matlab è composta da diverse finestre che è possibile affiancare, spostare, ridurre a icona, ridimensionare e così via. Le finestre principali, più usate, sono 2:

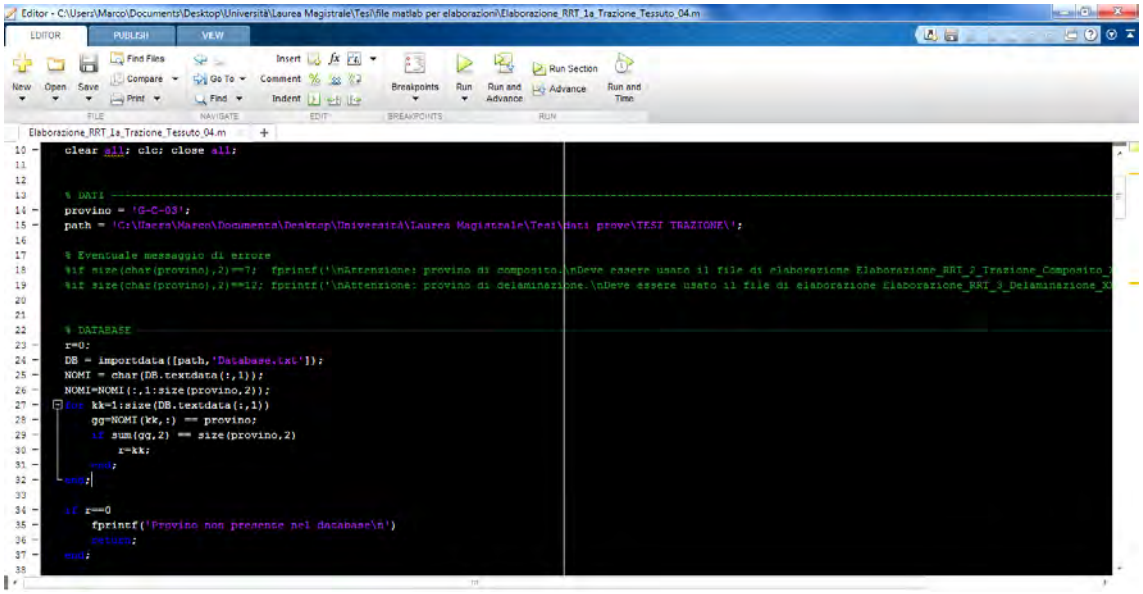
- *Command Window*, che è una finestra dell'interfaccia principale di Matlab, nella quale è possibile digitare comandi supportati, e visualizzare a video in tempo reale i risultati:



- *Workspace* che è lo spazio di lavoro (o spazio di memoria) contenente le variabili dichiarate*:*



- *Editor* che è lo spazio di lavoro in cui viene scritto il programma:



Per tutte e tre le tipologie di prove effettuate, la parte iniziale dell'elaborazione dati è sempre la stessa: i file di registrazione della cella di carico MTS e della centralina LabView, vengono posizionati in un'apposita cartella che ha il nome del provino testato. Prima di poter procedere con l'analisi però c'è bisogno di aprire i file e salvarli come file di testo altrimenti Matlab non riesce a leggerli.

Un altro passo importante consiste nell'aggiornare il file di testo "DATABASE", in cui vengono inseriti a partire dal file Excel "RRT Quadro Generale", tutti i dati riguardanti le prove, che come detto nei paragrafi precedenti, vengono presi prima di eseguire i test.

Le tensioni calcolata nelle diverse tipologie di prova sono sempre riferite per convenzione all'area equivalente di tessuto secco presente nell'unità di lunghezza del composito, prescindendo cioè dalla presenza della matrice. La larghezza di ogni provino è calcolata come il prodotto del numero di yarn presenti nella direzione del carico per l'interasse tra gli yarn, anche quando per imperfezioni di confezionamento del provino la larghezza della matrice non è esattamente pari alla larghezza del tessuto.

Nelle pagine seguenti si andranno a studiare le diverse elaborazioni effettuate per ogni tipologia di prova.

Il primo passo consiste nel definire il nome del provino.

La prima lettera rappresenta l'impresa che ha prodotto il tessuto, la seconda lettera rappresentano le caratteristiche del rinforzo, BMAS sta a rappresentare che la prova di delaminazione viene effettuata su supporti costituiti da prismi in muratura, mentre il numero rappresenta il numero di prove testate su questa tipologia di provini.

- provino = 'G-CC-BMAS-03';

Si inserisce inoltre il percorso della cartella in cui il programma andrà successivamente a cercare i file dei dati di prova:

- path='C:\Users\Università\LaureaMagistrale\Tesi\datiprove\TEST DELAMINAZIONE\';

Nella fase successiva si va ad importare il file Database.txt da cui è possibile prendere tutti i dati del provino.

Ogni colonna rappresenta una misura diversa del provino, mentre ad ogni riga sarà presente un provino differente; a questo punto si da un nome ad ogni misura effettuata:

- campione.nome (Nome del provino)
- campione.La (Lunghezza di ancoraggio [mm])
- campione.bf (Larghezza Rinforzo [mm])
- campione.tf (Spessore Rinforzo [mm])
- campione.w (Larghezza Tessuto [mm])
- campione.t (Spessore equivalente Tessuto [mm])
- campione.Af=campione.w*campione.t (Area Tessuto [mm2])
- campione.D1 (Base di misura LVDT sinistro)
- campione.D2 (Base di misura LVDT destro)
- campione.L (Lunghezza del tessuto non adeso [mm])
- campione.D0 (Traslazione del diagramma [mm])
- campione.step1 (Primo punto da plottare)
- campione.coda (Coda)
- campione.DIC (Secondi tra una foto e l'altra per DIC)

Questo processo permette di effettuare un'analisi delle prove molto più veloce, in quanto ogni volta non c'è bisogno di andare a cambiare i dati dentro il file Matlab, ma basta solamente aggiornare il Database.

L'area di tessuto viene calcolata direttamente in questa fase e poi dopo viene ricavata nel calcolo della tensione a partire dalla forza registrata dalla cella di carico.

Nella fase successiva avviene l'importazione dei dati di prova della cella di carico MTS:

```
Acquisizione dati prova

Numero di canali :
7
Frequenza di campionamento [Hz]:
Variabile
22/04/2015 15.19.52
Tecnico:
Cliente:
Ricerca:
Commento:  Cambio Mod. Ctrl: Spostamento

Tempo [s]       ACIn1:  Spostamento [ mm ]      DCIn2:  Forza_500 [ kN ]        DCIn3:  Estensometro [ % ]

0.196500        -0.000858       0.020118        -0.000680       6.864209        0.000784        -0.471793
0.296500        0.002611        0.034346        0.002710        6.863843        0.002784        -0.585371
0.396500        0.004720        -0.030818       0.006298        6.865128        0.004784        -0.593351
0.496500        0.005825        0.004612        0.003948        6.864599        0.006784        -0.523763
0.596500        0.009977        -0.003776       0.004346        6.863540        0.008784        -0.690189
0.696500        0.010082        0.034966        0.009053        6.865144        0.010784        -0.543178
0.796500        0.012845        0.014633        0.006831        6.865810        0.012784        -0.601870
0.896500        0.013931        -0.002353       0.006432        6.865024        0.014784        -0.530942
0.996500        0.017233        0.051022        0.003446        6.866010        0.016784        -0.631482
1.096500        0.020092        0.049146        0.009520        6.865746        0.018784        -0.697879
1.196500        0.018800        0.020999        0.007238        6.867806        0.020784        -0.442691
```

Viene definita una matrice Dati in cui si assegna ad ogni colonna un dato di prova diverso registrato dalla cella di carico:

- 1° colonna: Spostamento MTS [mm]
- 2° colonna: Forza MTS [N]
- 5° colonna: Deformazione Estensometro MTS [%]

A questo punto si vanno a calcolare anche i valori della deformazione e della tensione a partire dai dati importati dalla cella di carico MTS, i quali vengono inseriti nella matrice dati come 3° e 4° colonna:

- 4° colonna: Tensione calcolata dalla forza MTS [MPa]

$$\sigma_{MTS} = \frac{F_{MTS}}{A_{fib}}$$

Dove A_{fib} rappresenta l'area della sezione equivalente del tessuto calcolata nel seguente modo:

$$A_{fib} = n°yarns * i * t_w$$

Per le prove di delaminazione si utilizza un'ulteriore strumentazione per la misura dello slip tra il tessuto ed il supporto: gli LVDT. Lo scorrimento viene registrato dalla centralina LabView, quindi nella fase di elaborazione dovranno essere importati anche i dati della centralina:

Data	Time	LVDT SX	LVDT DX
22/06/2015	14:40:05.756250	-3.172924E-3	-1.629476E-3
22/06/2015	14:40:05.856250	0.000000E+0	-1.629476E-3
22/06/2015	14:40:05.956250	0.000000E+0	-3.258953E-3
22/06/2015	14:40:06.056250	0.000000E+0	-1.629476E-3
22/06/2015	14:40:06.156250	1.586462E-3	-1.629476E-3
22/06/2015	14:40:06.256250	1.586462E-3	-3.258953E-3
22/06/2015	14:40:06.356250	-1.586462E-3	-1.629476E-3

Una volta importati i dati, si calcolano lo slip definito a partire dai dati registrati dai due LVDT, decurtando però lo spostamento dovuto alla deformazione del tessuto, e ne si effettua la media:

- 6° colonna: Slip dell'LVDT sinistro [mm]

$$\gamma_{sx} = LVDT_{sx,} - \frac{\sigma_{MTS}}{E_t} * \text{campione. D1}$$

dove γ_{sx} rappresenta lo slip calcolato a partire dai dati dell'LVDT sinistro, E_t è invece il modulo elastico a trazione del tessuto secco costituente il sistema di rinforzo che si sta provando;

- 7° colonna: Slip dell'LVDT destro [mm]

$$\gamma_{dx} = LVDT_{dx,} - \frac{\sigma_{MTS}}{E_t} * \text{campione. D1}$$

dove γ_{dx} rappresenta lo slip calcolato a partire dai dati dell'LVDT destro, E_t è invece il modulo elastico a trazione del tessuto secco costituente il sistema di rinforzo che si sta provando;

- 8° colonna: Valore medio dello slip [mm]

$$\gamma_m = (\gamma_{sx} + \gamma_{dx})/2$$

dove γ_m rappresenta lo slip medio calcolato dalle letture dei due LVDT.

Dopo aver definito la matrice Dati, si effettua una pulizia con media mobile di tutti i dati presenti che consiste nel rappresentare un dato puntuale come una media di valori nell'intorno del valore considerato.

Questo passaggio risulta fondamentale per mitigare il disturbo sulla lettura dei dati costituito dal rumore dell'apparecchiatura; i dati in uscita sono infatti trasmessi come impulsi elettrici che come tali sono molto sensibili ad un effetto di questo genere.

Dopo la fase di pulizia dei dati, si passa alla sistemazione delle curve, attraverso una traslazione del grafico nel caso in cui si nota una cattiva registrazione da parte degli LVDT; questa azione consiste solitamente con l'eliminazione del primo tratto della curva, attraverso la definizione di un valore step1, che si può variare di volta in volta in base al numero di dati che si vuole cancellare.

Questa operazione dovrà essere effettuata con ragionevolezza, andando ad esempio a garantire che la pendenza del primo tratto lineare rimanga la stessa.

Inizialmente si va a traslare la curva andando a sommare allo slip medio un valore D0 che viene inserito nella fase iniziale nel file di testo Database; in questo modo è possibile traslare la curva:

$$\gamma_m = \gamma_m + \text{campione.D0}$$

Poi viene anche eliminata la coda dai dati elaborati e dai grafici; questa parte serve ad eliminare la parte finale della prova, dopo la rottura del provino, che in molti casi non interessa ai fini del programma sperimentale. Ciò lo si effettua andando a definire una nuova matrice in cui si vanno a togliere un numero di righe pari al valore di coda inserito nel file Database.txt.

Dopo la fase di pulizia dei dati, si vanno a definire i dati numerici significativi della prova:

- MaxF (Forza di distacco [N])
- S_maxF (Spostamento medio al distacco [mm])
- D_maxF (Deformazione al distacco nel rinforzo [%])

Nella parte finale dell'elaborazione si passa a definire i grafici e salvarli nell'apposita cartella con il nome del provino testato. Per questo tipo di prove vengono in genere stampati 2 grafici che interessano ai fini della caratterizzazione e della qualificazione del materiale: un grafico è caratterizzato dalla curva Stress-Slip, in cui viene riportate le curve calcolate a partire dai dati dell'MTS, e degli LVDT:

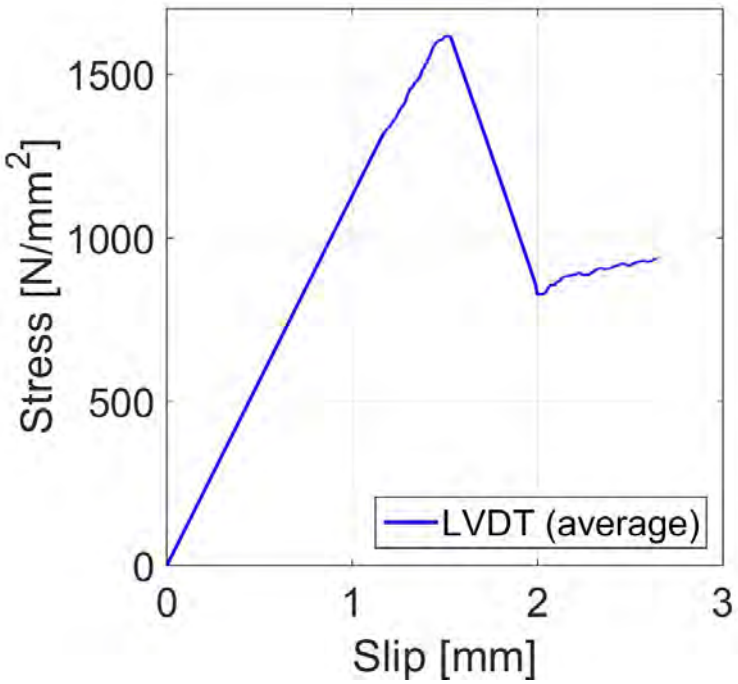


Figura 4.4 Curva Stress-Slip del provino G-CC-BMAS-01

L'altro grafico invece permette di capire l'evoluzione dei dati registrati nel tempo:

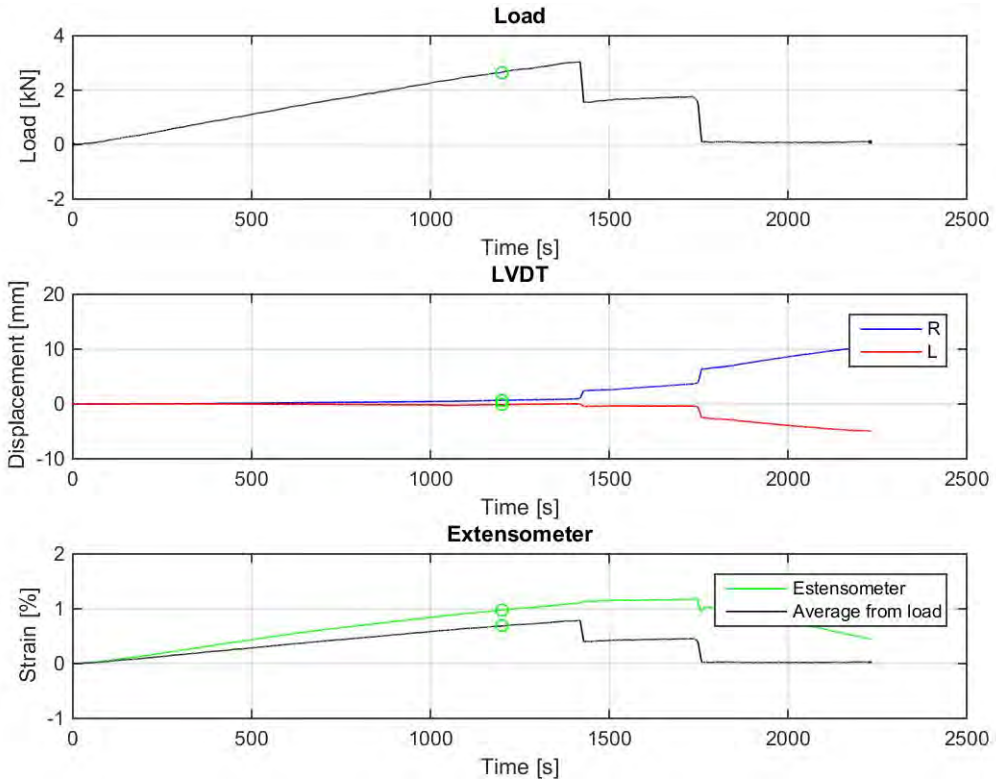


Figura 4.5 Curve Time Histories del provino G-CC-BMAS-01

Infine si vanno a salvare sempre nella stessa cartella, i valori significativi alla caratterizzazione del rinforzo all'interno del file "Elaborato.txt":

- Maximum load;
- Maximum load (per unit width);

- Corresponding slip (LVDT)
- Maximum stress in the textile;
- Corresponding strain (Extensometer);
- Fattore di lavoro (Tensione max. delaminazione/ Tensione max. composito)
- Fattore di lavoro (Tensione max. delaminazione/ Tensione max. tessuto secco)

L'ultima fase dell'elaborazione consiste nell'andare ad aggiornare il file Excel "Risultati prove", in cui si vanno a riportare i valori significativi appena descritti delle singole prove e in questo modo si possono confrontare i vari provini testati, calcolare dei valori medi, la deviazione standard ed il coefficiente di variazione. In questo modo è possibile capire se le prove hanno dei risultati simili, oppure se alcune prove siano affette da errori.

nome provino	forza di distacco		slip di picco	tens. tessuto	Def. Corrisp.	Fattore di lavoro		modalità di rottura
	F_d [kN]	f_d [kN/m]	s [mm]	σ_b[MPa]	ε_t [%]	σ_b/σ_c	σ_b/σ_t	
G-CC-BMAS-01	3.04	76.1	1.50	1618.2	1.10	0.64	0.86	F-E
G-CC-BMAS-02	2.86	71.6	1.12	1522.4	0.84	0.60	0.81	F-E
G-CC-BMAS-03	2.97	74.2	1.23	1577.8	0.92	0.62	0.84	E
G-CC-BMAS-04	2.88	71.9	1.57	1530.0	0.88	0.61	0.82	F-E
G-CC-BMAS-05	2.90	72.6	1.04	1544.1	0.77	0.61	0.82	E
G-CC-BMAS-06	3.14	78.4	1.71	1667.8	1.45	0.66	0.89	E
media	**2.97**	**74.1**	**1.36**	**1576.7**	**0.99**	**0.62**	**0.84**	
dev. st.	0.1	2.7	0.3	56.9	0.2	0.02	0.03	
co. v. [%]	3.6	3.6	19.8	3.6	25.2	3.6	3.6	

Una parte importante dell'elaborazione delle prove di delaminazione consiste infine nell'andare a definire la modalità di rottura del provino:

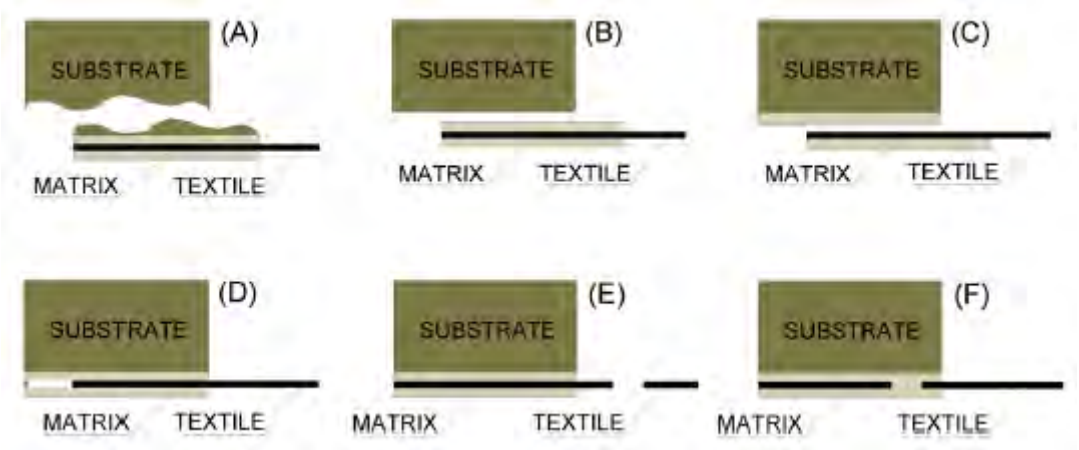


Figura 4.6 Modalità di rottura dei provini nei test di delaminazione: debonding con rottura coesiva nel substrato (A), all'interfaccio substrato-matrice di rinforzo (B), e all'interfaccia tessuto-matrice (C), scorrimento del tessuto all'interno dello spessore di rinforzo (D), rottura a trazione del tessuto nella porzione non adesa (E) e all'interno della matrice (F).