



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE

Dipartimento di Architettura - DIDA
Sezione Materiali e Strutture

Dottorato di Ricerca in Architettura

curriculum

Strutture e Restauro dell'Architettura e del Patrimonio Culturale

CICLO XXX

Il comportamento di adesione dei compositi FRM: indagini sperimentali e modelli analitici

DOTTORANDA

Arch. Sara Barducci

TUTOR

Prof. Mario De Stefano

REVISORI

Prof. Francesco Focacci
Università telematica e-Campus, Novedrate

CO-TUTOR

Prof. Valerio Alecci

Prof. Paolo Foraboschi
Università Iuav, Venezia

Prof.ssa Luisa Rovero

COORDINATORE

Prof. Giuseppe De Luca

Anni 2014/2017

Indice

<i>Elenco dei simboli</i>	V
<i>Premessa</i>	1
Obiettivi della ricerca.....	2
Organizzazione della tesi.....	3
1. Introduzione	5
1.1. I materiali compositi.....	5
1.2. Classificazione dei compositi fibrorinforzati.....	6
1.3. FRCM vs FRP.....	9
1.4. I materiali componenti.....	10
1.4.1. Le matrici.....	10
1.4.2. I fillers e gli additivi.....	11
1.4.3. Le fibre.....	13
2. I compositi FRCM	17
2.1. Introduzione.....	17
2.2. Proprietà.....	18
2.2.1. Proprietà meccaniche a trazione.....	18
2.2.2. Interazione tra i materiali costituenti.....	19
2.3. Le tipologie di prove sperimentali.....	24
2.3.1. Prove di trazione diretta.....	24
2.3.1.1. Geometria dei provini.....	25
2.3.1.2. Metodo di applicazione del carico.....	26
2.3.1.3. Strumenti di acquisizione delle misure di spostamento e di deformazione..	28
2.3.1.4. Velocità di applicazione del carico durante l'esecuzione della prova.....	30
2.3.2. Prove di adesione.....	31
2.3.2.1. Single-Shear Test (SST).....	35
2.3.2.2. Double-Shear Test (DST).....	40
2.3.2.3. Strumentazione prove SST e DST.....	44
2.3.2.4. Pull-off test.....	45

2.4. Comportamento di adesione.....	47
2.5. Modellazione del comportamento di adesione.....	49
2.5.1. Approccio locale.....	51
2.5.2. Approccio energetico.....	53
2.5.3. Calibrazione legge locale di interfaccia.....	54
2.6. Criteri di accettazione.....	55
3. Programma sperimentale.....	57
3.1. Le tipologie di prove sperimentali.....	57
3.2. I mattoni.....	59
3.3. I compositi FRCM.....	59
3.3.1. Rete di fibra GeoSteel® Grid 200 – Kerakoll S.p.a.....	59
3.3.2. Malta GeoCalce® Fino – Kerakoll S.p.a.....	60
3.3.3. Malte di laboratorio.....	60
3.4. Strumentazione.....	61
4. Prove per la caratterizzazione meccanica dei materiali.....	63
4.1. Introduzione.....	63
4.2. I mattoni.....	65
4.2.1. Prove di compressione.....	65
4.2.2. Prove di flessione per tre punti.....	66
4.2.3. Prove di trazione indiretta.....	68
4.3. Le matrici.....	69
4.3.1. Prove di flessione per tre punti.....	69
4.3.2. Risultati.....	70
4.3.3. Osservazioni.....	72
4.3.4. Prove di compressione.....	73
4.3.5. Risultati.....	74
4.3.6. Osservazioni.....	77
4.4. La fibra.....	78
4.4.1. Prove di trazione diretta.....	78
4.4.2. Risultati.....	80
4.4.3. Osservazioni.....	82
4.5. I materiali compositi fibrorinforzati.....	85
4.5.1. Prove di trazione diretta.....	85
4.5.2. Risultati.....	87
4.5.3. Osservazioni.....	102

5. Prove di adesione.....	105
5.1. Introduzione.....	105
5.2. Single-Shear Test.....	108
5.2.1. Risultati.....	111
5.2.2. Osservazioni.....	129
5.3. Double-Shear Test-tipo A.....	131
5.3.1. Risultati.....	134
5.3.2. Osservazioni.....	166
5.4. Double-Shear Test-tipo B.....	168
5.4.1. Risultati.....	171
5.4.2. Osservazioni.....	190
5.5. Beam Test.....	192
5.5.1. Risultati.....	194
5.5.2. Osservazioni.....	212
6. Analisi dei risultati delle prove di adesione.....	215
6.1. Risultati prove di adesione.....	215
6.1.1. Comportamento di adesione.....	215
6.1.2. Modalità di crisi.....	218
6.2. Relazioni con le proprietà meccaniche dei materiali costituenti.....	219
6.2.1. Double-Shear Test-tipo B.....	221
6.2.2. Single-Shear Test.....	226
6.3. Conclusioni.....	229
6.3.1. Valutazioni sulle relazioni con le proprietà meccaniche dei materiali costituenti.....	229
6.3.2. Valutazioni sulle differenti tipologie di prova di adesione.....	229
7. Modellazioni analitiche del comportamento di adesione.....	233
7.1. Introduzione.....	233
7.2. Richiami del modello di Yuan et al. (2004).....	234
7.3. Modellazioni analitiche.....	238
7.3.1. I legami locali d'interfaccia ed il comportamento di adesione.....	238
7.3.2. Formulazione generale.....	241
7.3.3. Legame locale A.....	243
7.3.4. Legame locale B.....	246
7.3.5. Legame locale C.....	247
7.3.6. Legame locale D.....	249
7.3.7. Legame locale E.....	251

7.4. Risultati.....	253
7.4.1. Legame locale A.....	254
7.4.2. Legame locale B.....	256
7.4.3. Legame locale C.....	258
7.4.4. Legame locale D.....	260
7.4.5. Legame locale D.....	262
7.5. Osservazioni.....	269
8. Conclusioni.....	273
8.1. Risultati delle prove di adesione (§ 6).....	273
8.2. Risultati delle modellazioni analitiche (§ 7).....	276
8.3. Sviluppi futuri.....	277
<i>Bibliografia.....</i>	<i>279</i>
<i>Allegato.....</i>	<i>287</i>

Elenco dei simboli

δ	spostamento registrato dal LVDT integrato nella macchina di prova
$\delta_{1,2,\dots,n}$	spostamenti registrati dai trasduttori di spostamento 1,2,...,n
δ_e	spostamento registrato dall'estensimetro clip-on
$\delta^{I,II,III,IV}$	spostamento del provino sottoposto a prova di adesione: I=Single-Shear Test, II=Double-Shear Test-A, III=Double-Shear Test-B, IV=Beam Test
ε_f	deformazione della rete di fibra valutata mediante i dati registrati dal LVDT integrato nella macchina di prova
ε_{fe}	deformazione della rete di fibra valutata mediante i dati registrati dall'estensimetro clip-on
ε_r	deformazione del composito valutata mediante i dati registrati dal LVDT integrato nella macchina di prova
ε_{re}	deformazione del composito valutata mediante i dati registrati dall'estensimetro clip-on
$\varepsilon_r^{I,II,III,IV}$	deformazione del composito valutata mediante il carico F applicato ottenuto da prova di adesione: I=Single-Shear Test, II=Double-Shear Test-tipo A, III=Double-Shear Test-tipo B, IV=Beam Test
$\varepsilon_g^{I,II,III,IV}$	deformazione del composito valutata mediante lo scorrimento globale g ottenuto da prova di adesione: I=Single-Shear Test, II=Double-Shear Test-tipo A, III=Double-Shear Test-tipo B, IV=Beam Test
ε_{T1}	deformazione corrispondente al punto di transizione tra prima e seconda fase del comportamento a trazione del composito
ε_{T2}	deformazione corrispondente al punto di transizione tra seconda e terza fase del comportamento a trazione del composito
ε_U	deformazione corrispondente al punto massimo del comportamento a trazione del composito
μ_c	duttilità cinematica
μ_{cd}	duttilità cinematica disponibile
σ_{T1}^*	tensione del composito corrispondente al punto di transizione tra prima e seconda fase del comportamento a trazione, valutata dividendo il carico massimo per l'area trasversale del composito
σ_{T1}	tensione corrispondente al punto di transizione tra prima e seconda fase del comportamento a trazione del composito
σ_{T2}	tensione corrispondente al punto di transizione tra seconda e terza fase del comportamento a trazione del composito
$\tau_{1,2}$	tensioni tangenziali corrispondenti agli estremi dei primi due rami del legame locale d'interfaccia
A	superficie di applicazione del carico
A_f	area della sezione trasversale della rete di fibra
B	larghezza del composito

b	larghezza del provino
b_f	larghezza del multi-filamento della rete di fibra
b_f^*	larghezza della maglia della rete di fibra, come da scheda tecnica
E_1	modulo elastico della prima fase del comportamento del composito
E_3	modulo elastico della terza fase del comportamento del composito
E_3^*	modulo elastico della terza fase del comportamento del composito attraverso l'individuazione dei punti corrispondenti al 90% ed al 60%
E_b	modulo elastico del mattone ottenuto da prova di compressione
E_f	modulo elastico della rete di fibra ottenuto da prova a trazione diretta
E_m	modulo elastico della malta ottenuto da prova a compressione
E_r	modulo elastico del composito ottenuto da prova a trazione diretta
f_{cb}	resistenza a compressione del mattone ottenuta da prova di compressione
f_{cm}	resistenza a compressione della malta ottenuta da prova di compressione
f_f	resistenza a trazione della rete di fibra ottenuta da prova a trazione diretta
f_{fb}	resistenza a trazione del mattone ottenuta da prova a flessione per tre punti
f_{fm}	resistenza a trazione della malta ottenuta da prova a flessione per tre punti
$f_r^{I,II,III,IV}$	tensione massima del composito ottenuta da prova di adesione: I=Single-Shear Test, II=Double-Shear Test-tipo A, III=Double-Shear Test-tipo B, IV=Beam Test
f_r	resistenza a trazione del composito ottenuta da prova a trazione diretta
f_{rb}	resistenza a trazione del mattone ottenuta da prova a trazione indiretta (brasiliana)
$f_r^{I,II,III,IV} / f_f$	sfruttamento delle proprietà a trazione della rete di fibra ottenuto da prova di adesione: I=Single-Shear Test, II=Double-Shear Test-tipo A, III=Double-Shear Test-tipo B, IV=Beam Test
$f_r^{I,II,III,IV} / f_r$	sfruttamento delle proprietà a trazione del composito ottenuto da prova di adesione: I=Single-Shear Test, II=Double-Shear Test-tipo A, III=Double-Shear Test-tipo B, IV=Beam Test
F	carico applicato
$F_{db}^{I,II,III,IV}$	carico di debonding ottenuto da prova di adesione: I=Single-Shear Test, II=Double-Shear Test-tipo A, III=Double-Shear Test-tipo B, IV=Beam Test
$F_{max}^{I,II,III,IV}$	carico massimo ottenuto da prova di adesione: I=Single-Shear Test, II=Double-Shear Test-tipo A, III=Double-Shear Test-tipo B, IV=Beam Test
$F_{1,2,3}$	1-carico al limite della fase elastica lineare, 2-carico di debonding, 3-carico massimo
$g^{I,II,III,IV}$	scorrimento globale fibra-matrice ottenuto da prova di adesione: I=Single-Shear Test, II=Double-Shear Test-tipo A, III=Double-Shear Test-tipo B, IV=Beam Test
$g_{db}^{I,II,III,IV}$	scorrimento globale fibra-matrice di debonding ottenuto da prova di adesione: I=Single-Shear Test, II=Double-Shear Test-tipo A, III=Double-Shear Test-tipo B, IV=Beam Test
$g_{max}^{I,II,III,IV}$	scorrimento fibra-matrice globale Massimo ottenuto da prova di adesione: I=Single-Shear Test, II=Double-Shear Test-tipo A, III=Double-Shear Test-tipo B, IV=Beam Test
G_f	energia di frattura
h	altezza provino
$K_i^{I,II,III,IV}$	rigidezza del provino integro valutata mediante i risultati della prova di adesione: I=Single-Shear Test, II=Double-Shear Test-tipo A, III=Double-Shear Test-tipo B, IV=Beam Test

$K_I^{I,II,III,IV}$	rigidezza del provino lesionato valutata mediante i risultati della prova di adesione: I=Single-Shear Test, II=Double-Shear Test-A, III=Double-Shear Test-B, IV=Beam Test
l	distanza tra gli appoggi durante la prova a flessione per tre punti e la prova Beam Test
l_e	range di misura dell'estensimetro cli-on
l_f	lunghezza libera del provino di rete di fibra
l_r	lunghezza libera del provino di composito
L	lunghezza di adesione del composito
n	numero di multi-filamenti longitudinali
r_1	rapporto F_1/s_1
r_2	rapporto $(F_2-F_1)/(s_2-s_1)$
s	scorrimento locale d'interfaccia
$s_{1,2,3}$	scorrimenti locali d'interfaccia corrispondenti agli estremi dei tre rami del legame locale d'interfaccia
t_f^*	spessore equivalente, ovvero spessore di una lastra equivalente di rete di fibra, come da scheda tecnica
t_f	spessore nominale del multi-filamento di fibra
T_1	punto di transizione tra prima e seconda fase del comportamento a trazione del composito
T_2	punto di transizione tra seconda e terza fase del comportamento a trazione del composito
T	trazione nel composito ottenuta da prova Beam Test
T_{db}^{IV}	trazione di debonding nel composito ottenuta da prova Beam Test
T_{db}^{IV}	trazione massima nel composito ottenuta da prova Beam Test
u	abbassamento verticale in mezzeria (freccia) del provino sottoposto a prova Beam Test
U	punto massimo del comportamento a trazione del composito

Premessa

L'Italia è un Paese caratterizzato da un ricco patrimonio architettonico storico. Tale patrimonio, sia monumentale che nella sua forma più minuta, è il risultato di un'identificazione, associata ai diversi momenti storici ed ai vari contesti socio-culturali, che ha condotto nel tempo alla formazione di un tessuto descrittivo di altissimo valore storico-culturale ed identitario, da salvaguardare e tramandare nella sua integrità alle generazioni future. I recenti terremoti, che hanno colpito la nostra penisola, hanno però evidenziato un alto livello di vulnerabilità sismica del costruito storico, determinando la necessità di attuare interventi di consolidamento e rinforzo sulle strutture esistenti garantendo un loro adeguato livello di sicurezza sismica rispetto agli eventi futuri.

In tale ambito si è affermato a partire dagli anni Novanta l'uso dei materiali compositi fibrorinforzati a fibra lunga, i quali rappresentano una tecnologia ormai consolidata nelle applicazioni su strutture in cemento armato e in costante crescita anche nelle applicazioni su strutture in muratura. In Italia il loro impiego ha visto un rapido incremento negli ultimi anni, in particolare dopo il sisma che ha colpito l'Umbria e le Marche nel settembre del 1997 (Focacci 2008). Tali tecniche, derivate dal trasferimento nel mondo delle costruzioni delle conoscenze sviluppate in altri settori produttivi (in particolare quelli aerospaziale e navale), rappresentano un'evoluzione nel campo del rinforzo strutturale ed il loro impiego, in sostituzione delle tecniche tradizionali di consolidamento, è dettato da molteplici vantaggi.

I compositi fibrorinforzati permettono, grazie alle loro elevate caratteristiche meccaniche, di ottenere incrementi significativi delle prestazioni strutturali sia a trazione che a taglio mediante un provvedimento di facile esecuzione e con un impatto limitato in riferimento sia al peso sia all'ingombro dell'intervento.

I primi ad essere introdotti nel campo delle costruzioni sono stati i compositi fibrorinforzati a matrice polimerica FRP. Questi consistono nell'immersione di fibre lunghe in una matrice polimerica. La loro natura gli conferisce un peso ridotto, in confronto ad altre tipologie di intervento, nonché l'immunità alla corrosione, un alto valore di resistenza a trazione e un'ottima flessibilità applicativa, ovvero un'ottima adattabilità alla geometria del supporto. Di contro gli FRP presentano alcune problematiche relative in particolare alla durabilità della matrice, molto sensibile all'umidità e alle alte temperature, e alla non traspirabilità, che comporta l'impossibilità di applicare in modo estensivo il sistema di rinforzo sulla struttura. A ciò si aggiungono la limitata reversibilità, il forte impatto visivo, e l'irreversibilità a meno di danni permanenti al supporto, da cui consegue una scarsa compatibilità con la strutture oggetto dell'intervento.

Negli ultimi anni, i più sperimentati compositi FRP (Foraboschi 2004, Yao et al. 2005, Briccoli & Rovero 2007, Bellomo & D'Ambrosio 2009, Mazzotti et al. 2012, Rotunno et al. 2014) sono stati affiancati da nuovi materiali compositi caratterizzati dall'unione di reti di fibra secca con una matrice di tipo inorganico. Nel seguito tali compositi sono stati indicati con la dicitura FRCM – Fiber Reinforced Cementitious Matrix. Se da un lato la matrice inorganica risulta meno efficace nel garantire l'adesione con le fibre, dall'altro presenta alcuni vantaggi in termini di sostenibilità dei costi e di modalità applicative, non richiedendo una manodopera specializzata. Inoltre, gli FRCM presentano ulteriori aspetti vantaggiosi, tra cui la reversibilità dell'intervento, che ne consentirebbe la sostituzione qualora se ne riscontrasse la necessità, la compatibilità sia estetica che materica con la struttura da consolidare, tant'è che le caratteristiche della matrice sono assimilabili a quelle del supporto, la minima invasività dell'intervento. Inoltre, i compositi a matrice inorganica superano le problematiche insite nel sistema FRP, presentando un'ottima resistenza alle alte temperature e al fuoco, assimilabile a quella del supporto, una buona permeabilità, che consente di coprire con il rinforzo superfici maggiori, una buona capacità igrometrica, l'assenza di possibili esalazioni tossiche in fase di messa in opera ed il basso impatto ambientale, sia in termini di riciclabilità che di quantità e natura dei materiali utilizzati.

Dati gli aspetti positivi che li caratterizzano, gli FRCM si sono imposti come una valida alternativa ai sistemi compositi FRP soprattutto nel campo del rinforzo degli edifici storici in muratura (Prota et al. 2006, Carbone & de Felice 2009, Ascione et al. 2014, Garmendia et al. 2011), suscitando un crescente interesse nel mondo scientifico. Nonostante ciò, ad oggi la loro conoscenza risulta limitata ed incompleta, come dimostrato dall'assenza di raccomandazioni o linee guida relative ai metodi di prova ed ai criteri di progettazione, di installazione e di controllo. In particolare, in letteratura è stato dimostrato come il limite degli FRCM sia rappresentato dall'adesione tra i due materiali costituenti, la quale determina una crisi fragile per delaminazione all'interfaccia fibra-matrice. Inoltre, è stato appurato come il fenomeno sia influenzato da numerosi fattori, come le proprietà dei singoli materiali, la geometria della rete di fibra, la presenza di rivestimenti protettivi sui multi-filamenti, la compatibilità chimica tra fibra e matrice ecc.

Obiettivi della ricerca

Nel presente lavoro è stata indagata l'adesione interlaminare di compositi FRCM applicati su un supporto in laterizio mediante un approccio sia sperimentale sia analitico. A tal fine sono state condotte prove di adesione su quattro differenti compositi secondo quattro tipologie di prova con l'obiettivo di:

- studiare le proprietà di adesione dei compositi FRCM;
- individuare come le caratteristiche meccaniche dei singoli materiali che influiscano sul comportamento di adesione;
- valutare le differenti prove di adesione svolte, individuando tra di esse la più attendibile.

Infine, sulla base dei risultati sperimentali ottenuti, è stato applicato l'approccio della meccanica della frattura adottando cinque differenti legami locali del comportamento di interfaccia, al fine di individuare quello in

grado di descrivere il fenomeno della delaminazione interlaminare e di simulare il comportamento di adesione osservato sperimentalmente.

Organizzazione della tesi

La tesi si compone di sette capitoli.

Nel primo capitolo, dopo una breve descrizione dei compositi fibrorinforzati e dei più comuni metodi per la loro classificazione, vengono presentati i compositi FRCM individuandone i vantaggi e gli svantaggi in confronto ai più conosciuti FRP e descrivendo le principali tipologie di fibre, di matrici e di additivi utilizzate.

Nel secondo capitolo viene approfondito lo stato dell'arte relativo alla conoscenza delle proprietà fisico-meccaniche di tali materiali e ai più rilevanti contributi sperimentali, con particolare attenzione nei confronti delle prove a trazione diretta e delle prove di adesione presenti in letteratura. Infine vengono affrontati i principali approcci numerici attualmente utilizzati per l'analisi del comportamento di adesione.

La campagna sperimentale ed i materiali impiegati sono descritti all'interno del capitolo tre.

Il capitolo quattro è dedicato alle prove di caratterizzazione meccanica condotte sui singoli materiali ed ai risultati ottenuti:

- prove di flessione per tre punti e prove di compressione su provini di matrice;
- prove di trazione diretta su provini di rete di fibra;
- prove di trazione diretta su provini di composito.

Il quinto capitolo tratta le prove di adesione condotte. Le fasi di preparazione dei provini e di esecuzione della prova, il comportamento osservato durante i test ed i relativi risultati sono descritti per ogni tipologia di prova:

- Single-Shear Test;
- Double-Shear Test-A;
- Double-Shear Test-B;
- Beam Test.

Nel capitolo sei sono riportate le osservazioni scaturite dal confronto tra i risultati ottenuti da ogni tipologia di prova e dal confronto tra questi ultimi e le caratteristiche meccaniche dei singoli materiali costituenti. In particolare, sono descritti i singoli aspetti caratterizzanti le differenti prove di adesione che hanno permesso una loro valutazione in termini sia di procedura sia di risultati ottenuti.

L'analisi numerica condotta mediante l'approccio della meccanica della frattura è trattata all'interno del capitolo sette. Per ognuno dei cinque legami locali, calibrati sulla base dei dati sperimentali ottenuti dalle prove di adesione, vengono descritti i risultati ottenuti, dimostrando come il quinto legame (definito nel presente lavoro legame locale E) sia in grado di restituire, con una buona approssimazione, il comportamento di adesione osservato durante la sperimentazione. Inoltre, viene dimostrata la possibilità di individuare il legame locale più adatto a simulare il comportamento dei compositi FRCM attraverso la valutazione del rapporto tra le pendenze dei primi due tratti del comportamento di adesione sperimentale

ed il rapporto tra i carichi sperimentali corrispondenti al limite della fase elastica lineare e all'inizio del fenomeno della perdita di adesione.

Infine, nel capitolo otto sono contenute le conclusioni dell'intero lavoro.

1. Introduzione

1.1. I materiali compositi

Si definisce materiale composito una miscela o combinazione di due o più materiali, definiti fasi, che differiscono nella forma, nella composizione chimica e nelle proprietà fisiche e che sono insolubili l'uno nell'altro (Bellomo & D'Ambrosio 2009). Il materiale risultante si presenta come un sistema eterogeneo, le cui prestazioni finali dipendono proprio dalla natura delle componenti combinate.

I più primitivi materiali compositi artificiali utilizzati in architettura furono i mattoni, costituiti dall'unione di paglia e fango, dei quali si hanno notizie nel libro Biblico dell'Esodo e in dipinti tombali risalenti all'antico Egitto. In periodi più recenti altre tipologie di composito furono messe a punto, come il compensato, il calcestruzzo ed il calcestruzzo armato.

Tra i materiali compositi, quelli fibrorinforzati sono costituiti da una matrice, la quale agisce da legante e definisce il bulk, ovvero il volume finale del composito, e da un materiale di natura fibrosa in essa annegato, che funge da rinforzo. La sinergia tra i due componenti di base determina le proprietà del composito stesso, che risulteranno differenti da quelle iniziali dei materiali monofasici. Tale interazione si verifica nell'area di contatto tra matrice e rinforzo, generalmente definita interfaccia o interfase, le cui caratteristiche possono essere modificate attraverso l'utilizzo di agenti chimici (coupling agent) in grado di creare legami chimici che migliorano l'adesione interfacciale tra le due fasi, contribuendo ad un migliore trasferimento delle tensioni tra di esse. Le prestazioni finali possono essere incrementate tramite un ulteriore componente definito filler (un materiale in forma particellare che introdotto nella matrice ne modifica alcune proprietà, come la duttilità, la resistenza all'impatto e all'abrasione e la resistenza al fuoco), oppure mediante l'aggiunta di additivi o di fibre corte nell'impasto della matrice.

1.2. Classificazione dei compositi fibrorinforzati

In letteratura i materiali compositi fibrorinforzati vengono menzionati con diversi acronimi. Come specificato in Stipo (2013), Focacci (2008) e Bellomo & D'Ambrosio (2009), non esiste ancora una denominazione comune, anche se in molti hanno cercato nel corso del tempo di fare chiarezza nella terminologia sottolineando le differenze alla base delle diverse diciture.

Una classificazione comunemente utilizzata (Hegger 2006, Arboleda 2014, Carozzi & Poggi 2015, Donnini 2016) è basata sulla tipologia di matrice che costituisce il materiale composito e dipende dalla geometria e dalla disposizione della fibra di rinforzo. In figura 1.1 è riportata una schematizzazione di tale classificazione, utile per contestualizzare i materiali FRCM trattati in questo lavoro.

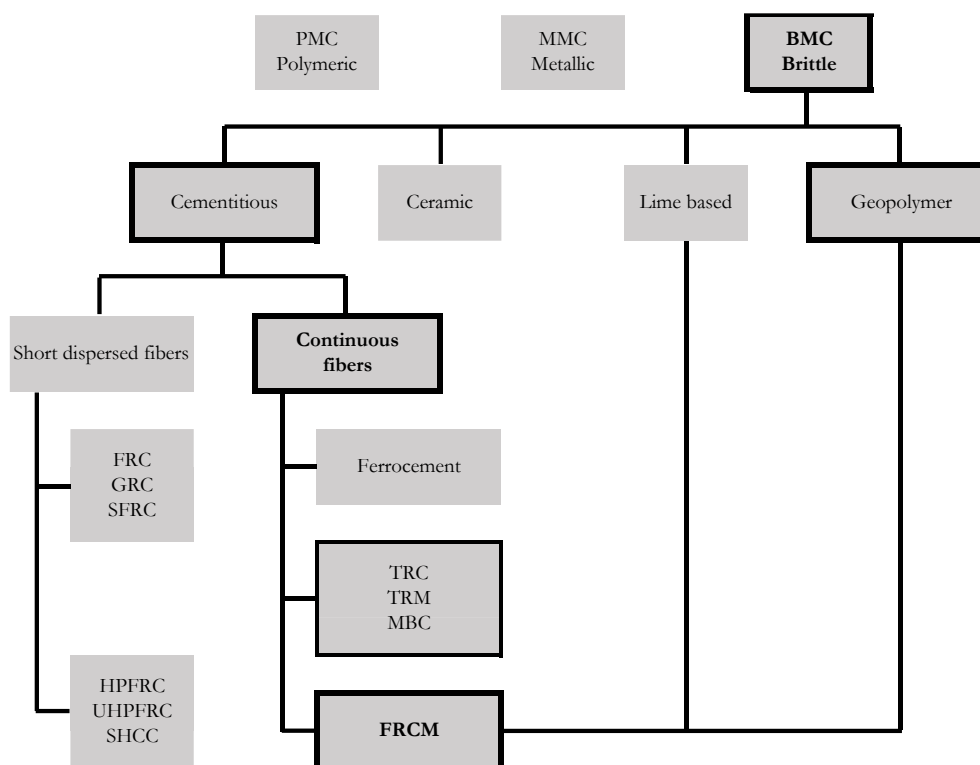


Fig. 1.1 Schematizzazione materiali compositi (Donnini 2016)

In base alla natura della matrice, i compositi fibrorinforzati si distinguono in:

- PMC (Polymer-Matrix Composite), o più comunemente FRP (Fiber Reinforced Polymer), nei quali la matrice è costituita da resine di varia natura, come ad esempio le resine termoplastiche (come nylon e ABS) o termoindurenti (come le resine epossidiche);
- MMC (Metallic-Matrix Composite), costituiti da una matrice metallica, comunemente di alluminio o titanio e suoi derivati;
- BMC (Brittle-Matrix Composite), essi si differenziano in:
 - Ceramic Matrix Composites, generalmente costituiti da carburo di silicio o allumina;
 - Cementitious Matrix Composites, facenti uso di malte cementizie;
 - Non-cementitious Matrix Composites, materiali compositi a base di calce o malte geopolimeriche.

All'interno della matrice il rinforzo si presenta come una fase dispersa e discontinua, responsabile delle caratteristiche di rigidità e resistenza meccanica del materiale composito. In base alla sua geometria e alla sua disposizione, si possono distinguere due diverse tipologie di rinforzo:

- le particelle, le quali si caratterizzano per un rapporto diametro-lunghezza spesso unitario;
- le fibre, che possono presentarsi in due forme:
 - fibre continue;
 - fibre discontinue (o corte).

Tra i materiali compositi BMC, quelli a matrice inorganica possono essere a loro volta raggruppati in due categorie in funzione della tipologia di fibra impiegata come rinforzo:

- Matrice inorganica rinforzata con fibre corte.

Generalmente questa tipologia di composito è indicata con l'acronimo FRC (Fibers Reinforced Concrete) ed include tutti i compositi nei quali la matrice è rinforzata con fibre corte disperse al suo interno. Naaman & Reinhardt (2006) hanno proposto una distinzione degli FRC in base alle caratteristiche meccaniche del materiale, che può esibire dopo il raggiungimento del picco di resistenza una risposta a trazione di tipo strain softening, caratterizzato da un decremento del carico con aumento della deformazione, oppure strain hardening, con aumento di carico contemporaneamente allo sviluppo di lesioni multiple (Fig. 1.2).

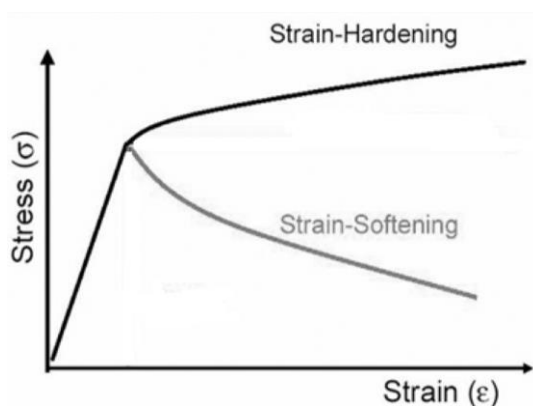


Fig. 1.2 Comportamento Strain Hardening e Strain Softening (Arboleda 2014)

Gli strain hardening FRC vengono chiamati High Performance Fiber Reinforced Cement Composites (HPFRCC), Ultra High Performance Fiber Reinforced Cement (UHPRFC), o Strain Hardening Cement Based Composites (SHCC).

Un'ulteriore distinzione comunemente utilizzata si basa sulla tipologia di fibra utilizzata (ad esempio vetro G-FRC, acciaio S-FRC, carbonio C-FRC, etc.). Gli FRC possono essere utilizzati per la realizzazione sia di elementi sottili che di elementi strutturali.

- Matrice inorganica rinforzata con fibre continue.

Comprende tutti quei prodotti in forma di laminati (cioè elementi sottili di rinforzo) costituiti da una matrice inorganica rinforzata con fibre lunghe continue disposte in modo tale da formare un tessuto o una rete. Si possono distinguere le seguenti due grandi categorie:

- Ferrocemento, ovvero elementi sottili in calcestruzzo costituiti comunemente da una malta cementizia idraulica rinforzata con una rete metallica continua a maglia stretta. Le caratteristiche di resistenza, la leggerezza e la possibilità di essere plasmato in forme complesse hanno permesso un ampio uso di questo materiale per la realizzazione di svariati elementi strutturali, come coperture, scafi di barche, cisterne per l'acqua, ecc.
- Textile Reinforced Concrete (TRC), rappresenta un'ampia categoria di compositi a matrice cementizia (costituita da malta o calcestruzzo) rinforzata con reti metalliche, tessuti secchi o tessuti impregnati a maglia larga in forma bi o tridimensionale. La fibra di rinforzo può essere costituita da materiale di diversa natura (polimerica, sintetica, metallica, organica, ecc.), mentre la composizione e la granulometria della matrice saranno funzione del sistema di rinforzo impiegato. Un altro termine comunemente usato per questo composito è Textile Reinforced Mortar (TRM) o Mineral Based Composite (MBC). I TRC sono stati utilizzati con successo per la produzione di elementi leggeri, come facciate ventilate e pannelli sottili, ottenendo ottimi livelli di performance rispetto ai compositi rinforzati con fibre corte, e confermandosi, come un'evoluzione del ferrocemento.

In questa categoria rientrano i Fabric Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) costituiti da uno strato di matrice inorganica, generalmente costituita da una malta per muratura con un basso dosaggio di polimeri organici (meno del 5% del peso) ed altri additivi (Nanni 2012), rinforzato con fibre secche sotto forma di tessuto a maglie larghe (rete di fibra). Se i TRC sono comunemente associati ai nuovi prodotti industriali, i FRCM rappresentano un sistema composito destinato alla riparazione e al rinforzo di strutture esistenti in muratura o in calcestruzzo armato, alternativo alle tecniche tradizionali ampiamente utilizzate in passato. Nelle ACI549 (2003) viene fornita la seguente definizione: "Gli FRCM rappresentano un materiale composito costituito da uno o più strati di matrice inorganica, con un contenuto organico massimo del 5%, e rinforzato con fibre secche in forma di rete a maglia aperta o tessuto. La matrice inorganica è tipicamente costituita da un legante frutto della combinazioni di cemento Portland, fumo di silice e ceneri volatili. Quando aderiscono all'elemento strutturale in calcestruzzo o in muratura, costituiscono un sistema FRCM che agisce da rinforzo supplementare, applicato esternamente all'elemento stesso".

Numerosi progetti in Europa e negli Stati Uniti hanno già dimostrato il potenziale delle applicazioni dei compositi FRCM per il rinforzo delle infrastrutture (Nanni 2012). In letteratura sono presenti differenti studi sperimentali che dimostrano il miglioramento delle prestazioni di elementi strutturali rinforzati con sistemi compositi FRCM (Prota et al. 2006, Briccoli & Rovero 2007, D'Ambrisi et al. 2011, Garmendia et al. 2011, Babaeidarabad et al. 2014, Loreto et al. 2015, Alecci et al. 2016a, 2016b).

1.3. FRCM vs FRP

Considerati come i successori dei compositi a matrice polimerica, i compositi FRCM sono in grado di superare alcuni degli aspetti negativi che caratterizzano gli FRP, quali la non traspirabilità e la vulnerabilità ad alcuni fattori ambientali (umidità, temperatura, raggi UV, attacchi chimici) ed al fuoco (che implicano la necessità di applicare dei rivestimenti protettivi), a cui si aggiungono i costi elevati e la possibilità di esalazioni tossiche durante la messa in opera (Tab. 1.1). Inoltre, tali compositi, seppure caratterizzati da prestazioni in termini di resistenza meccanica inferiori, dimostrano dei livelli di duttilità ben più elevati ed una maggiore compatibilità soprattutto con strutture storiche in muratura.

La differenza principale tra le due tipologie di composito, alla base del loro diverso comportamento e delle differenti modalità di crisi, risiede nella matrice utilizzata: negli FRP il rinforzo è annegato in una matrice organica (generalmente epossidica) capace di impregnare totalmente la fibra ed impedire eventuali scorrimenti tra le fasi, mentre per gli FRCM viene utilizzata una matrice inorganica la quale non è in grado di penetrare in modo completo ed omogeneo il rinforzo generando una minore adesione fibra-matrice.

Tab. 1.1 FRP vs FRCM (Donnini 2016)

FRCM		FRP	
VANTAGGI	SVANTAGGI	VANTAGGI	SVANTAGGI
Buona compatibilità chimica, fisica e meccanica con supporti in muratura e in c.a. e possibilità di applicazione su superficie di supporto umida	Comportamento fragile della matrice, che si lesiona in caso di azioni di trazione	Leggerezza e semplicità di applicazione	Non applicabile in presenza di umidità
Facilità di messa in opera con tecniche di tipo tradizionale	Scarsa resistenza a trazione della matrice	Resistenza meccanica e rigidità elevate	Possibili esalazioni tossiche durante la messa in opera
Traspirabilità	Necessità di rivestimenti protettivi (coupling agent) in caso di fibre sensibili ad ambienti alcalini	Resistenza alla corrosione ed agli agenti chimici	Bassa permeabilità al vapore
Buone prestazioni ad alte temperature e resistenza al fuoco e in caso di esposizione in ambienti aggressivi	Necessità di ulteriori studi per quanto riguarda le prestazioni meccaniche e i meccanismi di crisi	Possibilità di fornire le medesime caratteristiche meccaniche in varie direzioni attraverso l'uso di tessuti multidirezionali	Scarsa resistenza al fuoco e alle alte temperature
Possibile impiego di materiali naturali e riciclabili			Difficoltà di riciclo dei materiali
Reversibilità completa dell'intervento			Irreversibilità dell'intervento
Costi contenuti			Costi elevati

1.4. I materiali componenti

Le principali componenti, definite anche fasi, che costituiscono i compositi FRCM sono la matrice ed il rinforzo, dalla cui combinazione scaturiscono compositi che manifestano caratteristiche prestazionali differenti, funzione della natura delle singole fasi e della loro interazione.

1.4.1. Le matrici

La matrice rappresenta la fase continua del composito ed ha il compito di fissare il rinforzo fibroso, garantendo sia l'adesione al supporto che la stabilità geometrica del sistema composito. Oltre a ciò, la matrice ha il ruolo di distribuire lo sforzo tra le fibre per adesione e/o frizione e proteggere queste ultime sia dagli agenti atmosferici che da azioni meccaniche esterne, come abrasione ed impatti. Il materiale che costituisce la matrice è, quindi, determinante per le prestazioni finali e per la durabilità nel tempo del sistema di rinforzo. In generale, esistono diverse tipologie di matrice, come mostrato in figura 1.3 in cui sono riportate quelle più diffuse nel campo degli interventi sugli edifici.

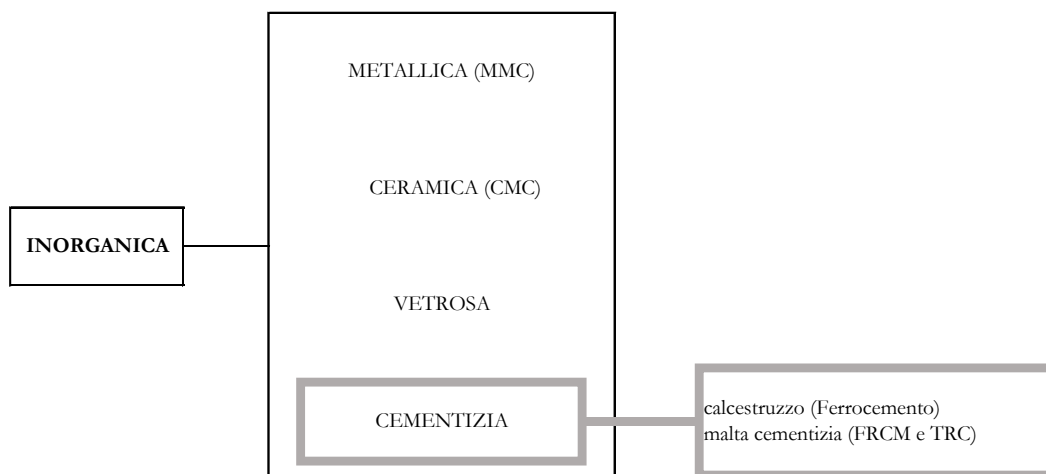


Fig. 1.3 Tipologie di matrice (Bellomo & D'Ambrosio 2009)

La matrice che costituisce i compositi FRCM è di tipo inorganico, ovvero una malta cementizia costituita da un legante idraulico. Il più diffuso legante idraulico utilizzato è il cemento Portland con un dosaggio di polimeri organici inferiore al 5 % in peso (Nanni 2012). Tali matrici sono state formulate, da un punto di vista chimico, in base alle conoscenze acquisite nell'ambito dei materiali ECC (Engineering Cementitious Composite). Oltre al legante idraulico, esse contengono additivi, filler e, soprattutto, fibre corte e lattici polimerici, al fine di migliorarne alcune proprietà, come la lavorabilità, la durabilità nel tempo, le proprietà meccaniche (comportamento di tipo strain-hardening con meccanismo di rottura quasi-duttile) e di adesione con il rinforzo e con il supporto, ecc. Nel caso di strutture storiche in muratura, è preferibile utilizzare come matrici malte non cementizie, quali malte di calce idraulica, per garantire la compatibilità con l'identità della struttura ed il rispetto dei principi di conservazione.

Il principale vantaggio nell'impiego delle malte inorganiche risiede nella buona resistenza alle alte temperature e al fuoco, a cui si affiancano la permeabilità al vapore e una serie di aspetti positivi legati alla realizzazione dell'intervento, come la possibilità di applicazione su superfici bagnate e in condizioni di bassa temperatura, la facilità di messa in opera, che non richiede manodopera specializzata, l'assenza di emissioni di sostanze nocive ed i costi ridotti. In Mantegazza & Gatti (2009) viene dimostrato come i compositi FRCM siano in grado di mantenere le proprie caratteristiche meccaniche a temperature superiori ai 500 °C.

L'impiego di matrici inorganiche presenta comunque dei problemi, di cui il principale è legato all'ambiente alcalino presente nell'impasto cementizio, che abbatte le proprietà meccaniche delle fibre e risulta scarsamente compatibile con i materiali fibrosi di tipo organico (fibre di vetro e di basalto), per i quali si rende necessario l'utilizzo di un coupling agent che generi una zona di interfase garantendo l'adesione tra matrice e rinforzo.

Un altro svantaggio è legato alla minore capacità delle malte cementizie, rispetto alle matrici organiche, di impregnare le fibre, determinando una potenziale riduzione dell'adesione fibra-matrice; per ovviare in parte a tale problema si fa ricorso all'uso di reti di fibra a maglia larga e di malte studiate ad hoc (malte additivate) per ogni tipologia di rinforzo.

Attualmente in commercio sono presenti differenti matrici inorganiche, in abbinamento a specifiche reti di fibra, formulate dalle aziende produttrici in modo da garantire migliori capacità resistenti e di adesione sia al materiale fibroso che al supporto, proprietà che, come si vedrà nel seguito, influenzano fortemente il comportamento del composito FRCM.

1.4.2. I fillers e gli additivi

Fillers e additivi vengono impiegati per modificare le proprietà delle matrici allo stato fluido e/o solido, riducendone la microporosità, e incrementandone la durabilità e la resistenza agli agenti atmosferici. I fillers, generalmente di natura organica, vengono disciolti nell'impasto cementizio agendo a livello molecolare, mentre gli additivi si presentano come particelle solide, generalmente di natura inorganica.

I principali fillers per matrici a legante inorganico sono le fly-ash e la fumo di silice (Bellomo & D'Ambrosio 2009).

Le fly-ash, o "ceneri volanti", sono il prodotto di scarto della combustione delle centrali termoelettriche, che manifestano un'azione pozzolanica a contatto con l'idrossido di calcio o la calce spenta. Grazie alla loro natura vengono impiegate al fine di conferire alla miscela basse temperature di indurimento, con benefici in termini di ritiro e crack termici, e buone caratteristiche di durabilità.

Il fumo di silice è un sottoprodotto del processo di produzione del silicio e delle leghe ferro-silicio e manifesta una elevata azione pozzolanica. Il suo impiego permette di ottenere benefici analoghi a quelli delle ceneri volanti, ai quali si somma il vantaggio di ottenere una matrice più compatta con proprietà meccaniche migliori grazie alla reazione all'ambiente alcalino. Inoltre, l'aggiunta di fumo di silice aumenta la viscosità della miscela allo stato liquido, ovvero il suo comportamento tixotropico.

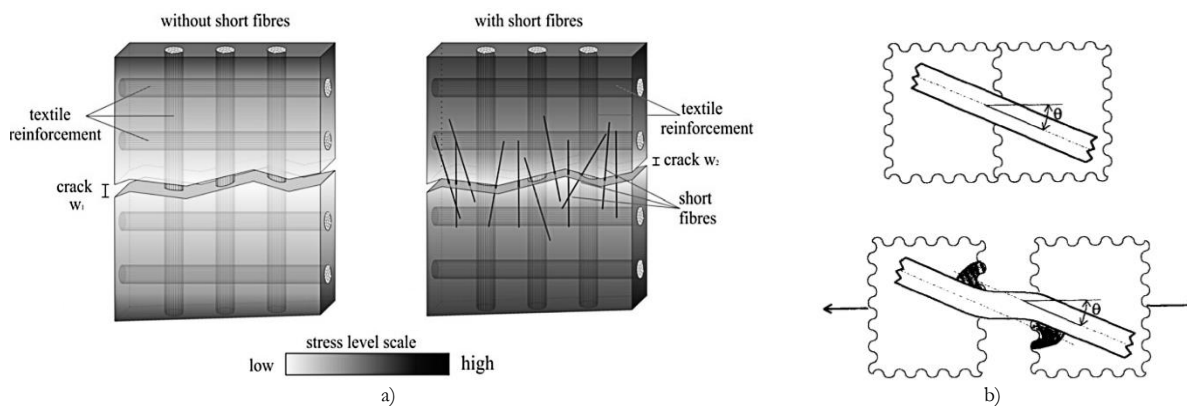


Fig. 1.4. Fessurazione matrice a) in assenza di fibre corte e in presenza di fibre corte (Barhum & Mechtcherine 2012); b) flessione delle fibre corte che esercitano un'azione attraverso la lesione (Katz 1996).

Per quanto riguarda gli additivi, quelli generalmente utilizzati nelle matrici inorganiche sono i fluidificanti, gli acceleranti, i ritardanti, gli aeranti, i tixotropanti e quelli che controllano il ritiro dell'impasto. Tuttavia, per incrementare le prestazioni della miscela, possono essere aggiunti ulteriori additivi, come i polimeri di natura organica. L'aggiunta di una fase organica (negli FRCM inferiore al 5% in peso) permette di ottenere un grado ben più elevato di duttilità e migliori caratteristiche di resistenza ed adesione. In Badanoiu & Holmgren (2003) le aggiunte di fumi di silice e di un fluidificante hanno reso la consistenza della malta più densa e meccanicamente più resistente, cambiandone la microstruttura; inoltre, un trattamento superficiale della rete di carbonio ha migliorato la connessione tra la fibra e la matrice inorganica.

Alti livelli prestazionali possono essere raggiunti attraverso l'aggiunta di fibre corte, che vanno a costituire all'interno della matrice una fase dispersa fibrosa. Queste, essendo distribuite in maniera stocastica, in parte si trovano a lavorare in modo efficace, essendo orientate nella direzione della sollecitazione, e in parte sono inclinate rispetto alle prime fessurazioni. A causa di tale inclinazione le fibre sono sottoposte a sforzi flessionali che ne causano la rottura (Fig. 1.4b), per cui la loro capacità deformativa, ovvero la capacità estensionale a flessione, incide sulle proprietà finali della matrice (Katz 1996). Test di trazione condotti da Barhum & Mechtcherine (2012) hanno evidenziato l'insorgere di tre meccanismi durante il processo di prima fessurazione di una lamina di composito, riconducibili alla presenza delle fibre corte in dispersione. Il primo è legato al fenomeno di crack bridging (Fig. 1.4a), per cui le fibre corte si oppongono lungo il proprio asse allo scorrimento della matrice ostacolando l'aumentare della fessura. Il secondo fenomeno è dato dall'inibizione da parte delle fibre corte del fenomeno di ritiro durante la fase di presa e, quindi, della conseguente formazione di micro-fessurazioni interne alla matrice. L'ultimo meccanismo è dato dal complessivo miglioramento delle proprietà meccaniche del composito, come conseguenza dell'incremento dell'adesione fibra-matrice attuato dall'aggiunta delle fibre corte.

In definitiva, le fibre corte disperse nella matrice permettono non solo un miglioramento delle prestazioni a trazione del composito, ma anche la manifestazione di un comportamento quasi duttile grazie sia ai fenomeni di crack bridging e di fessurazione multipla che dei piccoli scorrimenti fibra-matrice e filamento-filamento che si innescano.

1.4.3. Le fibre

Il rinforzo è costituito da fibre lunghe secche (ovvero non pre-impregnate) organizzate in un tessuto a maglia aperta quadrata o rettangolare, ovvero una rete di fibra, che conferisce al composito un comportamento anisotropo. Il rinforzo può essere uni o bidirezionale, caratterizzato da multi-filamenti di trama e di ordito, e, nel caso sia necessario per il suo dimensionamento, può essere impiegato in più strati sovrapposti. Nel caso di tessuti unidirezionali o bidirezionali non bilanciati (con una quantità di fibra inferiore in una direzione, che determina una maglia rettangolare), differentemente dai tessuti bidirezionali bilanciati, è possibile individuare una direzione principale lungo la quale si ha la massima risposta alle sollecitazioni. La fibra ha il compito di assorbire le tensioni di trazione lungo l'asse di sforzo, per cui è necessario disporre il rinforzo parallelamente alla direzione delle tensioni stesse.

Per garantire le prestazioni elevate del sistema composito, le fibre devono presentare caratteristiche prestazionali elevate, tra le quali un'alta tenacità, un ottimo allungamento a rottura ed un modulo elastico ben più elevato della matrice inorganica, oltre ad una buona capacità adesiva con la matrice, una ottima resistenza all'ambiente alcalino della malta, un costo contenuto e la possibilità di essere lavorate tramite macchine tessili.

I rinforzi si caratterizzano per alcuni aspetti fisici (la geometria, la forma, la dimensione, la massa e la densità del materiale, la frazione volumetrica, ovvero la concentrazione) che influenzano le caratteristiche ed il comportamento del sistema composito. Tra questi la modalità con cui i multi-filamenti di trama ed ordito sono assemblati influisce notevolmente sull'ancoraggio meccanico della rete di fibra alla matrice (Peled & Yankelevsky 1998, Peled et al. 2008b). In Peled & Yankelevsky (1998) viene condotto uno studio sull'influenza dei principali parametri geometrici dei tessuti di fibra sulle proprietà di adesione fibra-matrice. Gli autori hanno dimostrato come il meccanismo di ancoraggio, quindi l'adesione, tra le fasi dipenda dalla geometria ondulata dei singoli multi-filamenti, dalla presenza di multi-filamenti perpendicolari alla direzione di applicazione del carico e dall'attrito che si genera nei punti di contatto tra trama e ordito. In aggiunta è stato dimostrato come è possibile ottenere un incremento di capacità adesiva aumentando la densità di multi-filamenti di trama e/o di ordito.

La stabilità del tessuto e la sua capacità di essere impregnato dalla matrice sono due ulteriori fattori importanti da considerare. Il primo tiene conto della tendenza del tessuto a mantenere la sua configurazione iniziale, il secondo considera la facilità della matrice a penetrare la struttura del tessuto. In Peled et al. (2008a) viene dimostrato come l'impregnazione degli multi-filamento da parte della matrice sia fondamentale per una buona adesione fibra-matrice e dipende dal rapporto acqua-legante della malta e dalle caratteristiche superficiali della fibra, ovvero dal trattamento superficiale e dal tipo di fibra.

Le fibre possono essere differenziate in base alla loro natura in organiche e inorganiche, come mostrato in figura 1.5 in cui sono riportate le principali tipologie di rinforzo impiegate negli interventi sugli edifici.

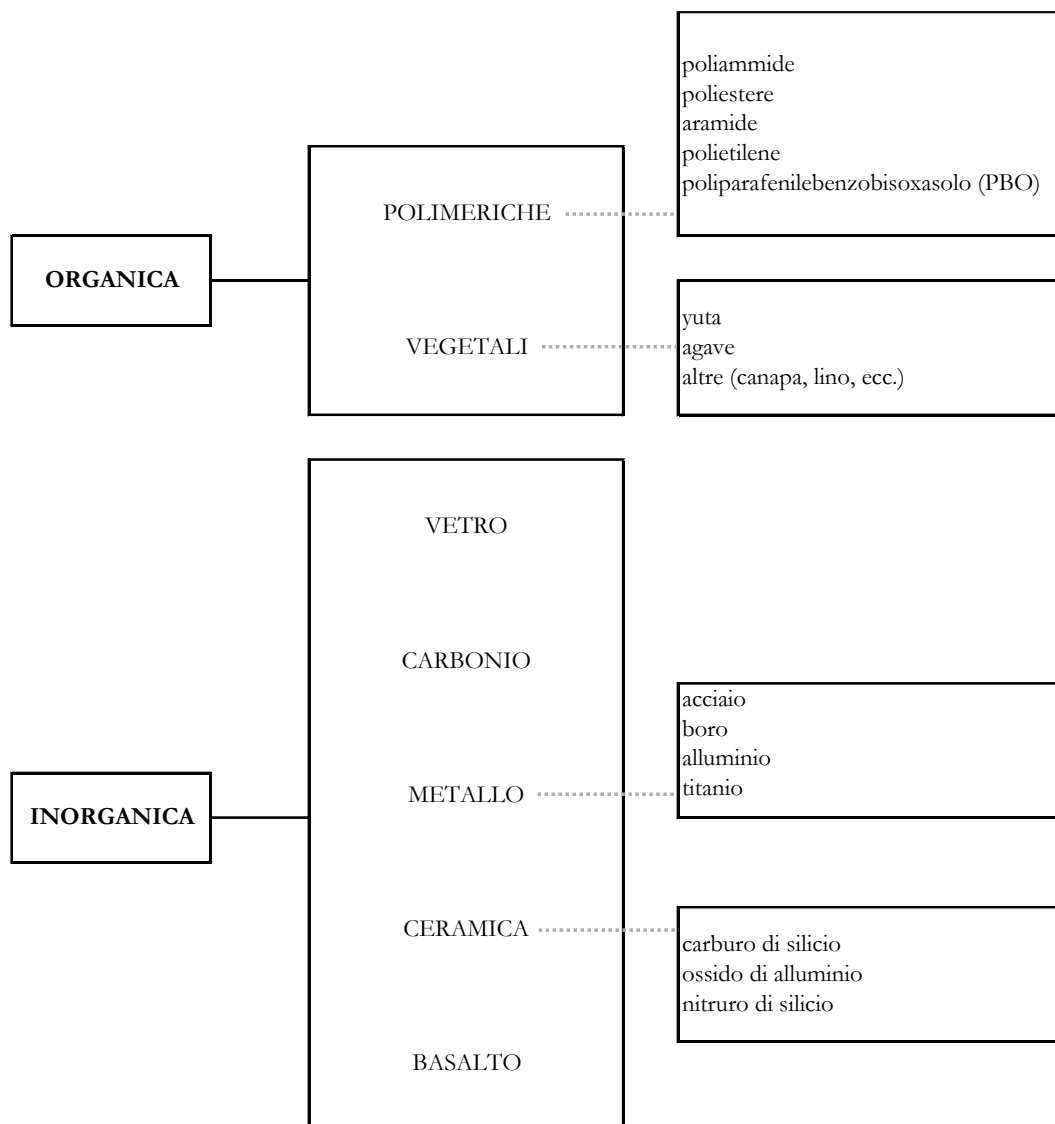


Fig. 1.5. Tipologie di fibra (Bellomo & D'Ambrosio 2009)

Nel corso degli anni sono stati studiati sperimentalmente compositi costituiti sia da reti bidirezionali (carbonio, vetro, PBO, basalto) sia da reti unidirezionali (in particolare in acciaio) al fine di indagarne le proprietà meccaniche e le modalità di crisi.

Attualmente i materiali maggiormente impiegati nei sistemi FRCM sono le fibre di carbonio, di vetro, di acciaio, di PBO e di basalto (Bellomo & D'Ambrosio 2009). Recentemente lo sviluppo sostenibile, il basso impatto ambientale e le tecnologie rinnovabili hanno indirizzato la ricerca verso lo studio di nuovi materiali eco-sostenibili. In quest'ottica in letteratura sono presenti numerosi studi sperimentali relativi all'impiego di fibre di derivazione naturale, soprattutto vegetale o vulcanica come il basalto (Garmendia et al. 2011, Donnini et al. 2017, Lignola et al. 2017, D'Antino & Papanicolaou 2017), il lino, la canapa, ecc. (Olivito et al. 2011, Olivito et al. 2014, Cevallos & Olivito 2015, Olivito et al. 2016), spesso in abbinamento a matrici a base di biocalce (malte a base di calce idraulica naturale che può essere riciclata come inerte). In particolare, le fibre di basalto, grazie alle proprietà meccaniche (elevata rigidità, limitati valori di deformazione a

rottura, elevata tenacità), alla possibilità di riciclo, ai bassi costi (a confronto con le fibre di carbonio), all'assenza di reazioni tossiche a contatto con aria, acqua e sostanze chimiche, si stanno rivelando una valida alternativa alle fibre di acciaio, di vetro e di carbonio.

Fibre di vetro

Le fibre di vetro sono ottenute per filatura a caldo di vetri di composizione opportuna. Le fibre pure presentano una scarsa resistenza all'abrasione e una notevole sensibilità all'ambiente alcalino della matrice, per cui il loro impiego in sistemi FRCM necessita l'applicazione superficiale di un rivestimento chimico protettivo (coupling agent), in grado di migliorare anche il trasferimento degli sforzi tra fibra e matrice (AR-glass). Nonostante ciò, grazie alle elevate proprietà di questo materiale (resistenza a trazione, modulo elastico, rapporto resistenza meccanica/peso, stabilità dimensionale, capacità di allungamento, resistenze al calore, all'umidità e alla corrosione) sono utilizzate già da molti anni come rinforzo per sistemi compositi.

Fibre di carbonio

Sono composte principalmente da carbonio amorfo e carbonio grafite cristallino. In base al rapporto tra le due componenti le proprietà della fibra possono variare in un ampio range. Le proprietà meccaniche risultano molto elevate nella direzione longitudinale della fibra e notevolmente inferiori in direzione trasversale, determinando un comportamento anisotropo. Di contro tali fibre presentano una bassa resistenza all'impatto, un'elevata conducibilità elettrica, un comportamento estremamente fragile, con modesto assorbimento di energia, ed una tendenza alla corrosione galvanica se accoppiate con metalli. Nonostante i costi elevati, legati alle difficoltà che si riscontrano nel processo produttivo del tessuto, le fibre di carbonio sono notevolmente diffuse nei sistemi compositi fibrorinforzati.

Fibre di PBO

La fibra di poliparafenilbenzobisoxasolo presenta un comportamento anisotropo ed una struttura disomogenea, con un *core* centrale ad elevato modulo elastico ed una zona esterna con proprietà meccaniche inferiori. Le fibre in PBO esibiscono proprietà meccaniche molto simili alle fibre di carbonio (elevate resistenza meccanica e rigidità) e grazie alla considerevole compatibilità con i leganti idraulici rappresentano una delle tipologie di rinforzo più adatte per i sistemi FRCM. Numerosi studi sperimentali hanno dimostrato l'alto grado di adesione fibra-matrice e le ottime prestazioni raggiunte nei sistemi PBO-FRCM se confrontati con sistemi compositi costituiti da fibre di carbonio o di vetro.

Il limite principale di questa fibra è rappresentato dalla loro considerevole sensibilità ai raggi UV, che comporta un'elevata riduzione della resistenza meccanica se esposte alle radiazioni solari.

Fibre di acciaio

Le fibre di acciaio presentano un comportamento isotropo ed un'elevata resistenza meccanica. Sono caratterizzate da un'elevata tenacità ed una cospicua resistenza a taglio. Grazie alla loro natura chimica, tali

fibre sono compatibili con qualsiasi tipo di matrice e consentono di realizzare sistemi compositi caratterizzati da spessori ridotti con conseguente maggiore leggerezza a parità di prestazioni (70% più sottile e 25% più leggero delle fibre di vetro). Di contro l'uso di sistemi compositi FRCM con fibra di acciaio viene spesso considerato incompatibile con la natura e l'identità delle strutture nel caso di interventi su edifici storici in muratura.

Fibre di basalto

Le fibre di basalto sono fibre inorganiche di origine naturale, in linea, quindi, con i principi di eco-sostenibilità ed eco-compatibilità.

Le fibre di basalto risultano molto simili alle fibre di carbonio e di vetro: presentano proprietà meccaniche e fisiche confrontabili con quelle della fibra di vetro ed un costo inferiore in confronto alla fibra di carbonio. Sono caratterizzate da una naturale resistenza ai raggi ultravioletti (UV) e alle radiazioni elettromagnetiche, mantengono le loro proprietà a basse temperature, presentano ottime qualità di isolamento acustico e termico, risultano molto resistenti alla corrosione e forniscono una ottima resistenza agli acidi.

Grazie alle loro proprietà e al costo contenuto, le fibre di basalto sono impiegate in numerosi settori (Singha 2012): dall'industria aerospaziale e automobilistica, alle centrali termiche e nucleari, alla produzione di isolanti termici ed acustici, di filtri resistenti agli agenti chimici ed alle alte temperature, ecc. Negli ultimi anni il basalto si è dimostrato un valido concorrente anche nel campo dei sistemi compositi fibrorinforzati, nonostante ad oggi sia presente un limitato numero di studi sperimentali relativo al suo impiego come materiale di rinforzo (Donnini et al. 2017, Lignola et al. 2017, D'Antino & Papanicolaou 2017).

Tab. 1.2. Proprietà delle fibre comunemente utilizzate nei compositi FRCM (Donnini 2016)

Materiale	Modulo elastico [GPa]	Resistenza a trazione [MPa]	Deformazione a rottura [%]	Densità [g/cm ³]
Glass E	72-80	3000	4,8	2,55
Glass S	84-88	4500	5,4	2,47
Aramid	130	3600	3,6	1,4
Carbon HM	390-760	2400-3400	0,5-0,8	1,85
Carbon HS	240-280	4100-5100	1,6-1,7	1,75
Basalt	89	3000-4840	3,15	2,7
PBO	270	5800	2,15	1,56
Steel	190-210	340-600	20-30	7,86

2. I compositi FRCM

2.1. Introduzione

Contemporaneamente alle numerose applicazioni dei compositi FRCM in interventi di rinforzo, numerose ricerche sia numeriche che sperimentali sono state condotte al fine di definirne le caratteristiche meccaniche ed il comportamento. Questi non sono funzione unicamente delle caratteristiche geometriche e meccaniche delle due fasi, ma anche dell'interazione che si crea tra di esse, dalla quale dipende la capacità di adesione fibra-matrice e matrice-substrato.

Nel seguito è stato affrontato lo stato dell'arte relativo alla conoscenza di tali materiali; in particolare sono stati affrontati i seguenti aspetti:

- 1) proprietà:
 - proprietà meccaniche a trazione;
 - interazione tra i materiali costituenti (fasi);
- 2) indagini sperimentali presenti in letteratura:
 - prove di trazione diretta;
 - prove di adesione;
- 3) comportamento di adesione:
 - schematizzazione del comportamento di adesione;
 - modellazione del comportamento di adesione;
- 4) criteri di accettazione.

2.2. Proprietà

2.2.1. Proprietà meccaniche a trazione

Il comportamento meccanico a trazione è generalmente caratterizzato dal susseguirsi di due o tre fasi di risposta ben distinguibili. In generale, nel caso di buone proprietà meccaniche e di adesione, il composito presenterà un comportamento in tutto simile a quello riportato in Mechtcherine (2013), dove viene illustrata la tipica risposta a trazione di un composito TRC nell'ipotesi di perfetta adesione tra rinforzo e matrice (Fig. 2.1). Essa può essere idealizzata come una curva tri-lineare (De Santis et al. 2017) in cui i punti di passaggio tra i tre segmenti sono definiti "punti di transizione".

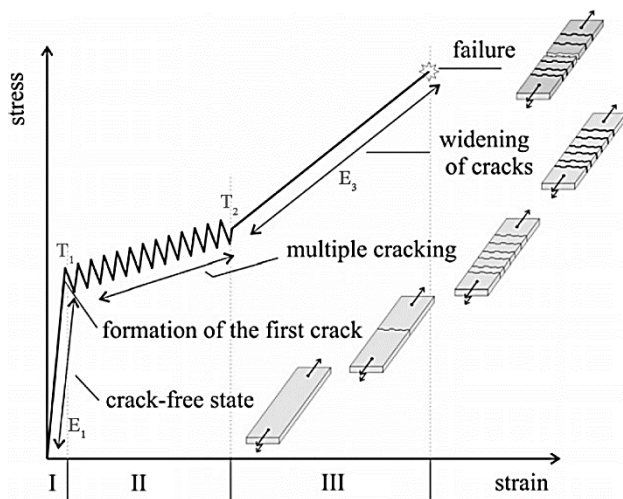


Fig. 2.1. Legame costitutivo ideale di compositi TRC nell'ipotesi di perfetta adesione (Mechtcherine 2013)

La prima fase elastica lineare rappresenta il comportamento del composito nel suo stato iniziale non fessurato ed è delimitata dal punto T_1 corrispondente alla formazione della prima lesione. In questa fase il modulo elastico E_1 e la tensione σ_{T1} riflettono le proprietà della matrice, migliorate dalla presenza della fibra. La valutazione dei parametri fa riferimento all'area trasversale del provino di composito. La seconda fase è caratterizzata dalla progressiva fessurazione della matrice accompagnata da un decremento della rigidezza (comportamento quasi duttile). La lunghezza e la pendenza di questa fase dipendono dalle caratteristiche dei due materiali costituenti il composito, dalla qualità della loro adesione, e dalla percentuale in volume di fibre attivate nel meccanismo di trasferimento delle tensioni. Tali parametri influiscono sulla distribuzione delle lesioni e sulle prestazioni a livello dell'interfaccia substrato-matrice e, quindi, sull'efficacia di quegli interventi di rinforzo strutturale in cui il carico è applicato all'interfaccia substrato-composito.

Il punto di transizione T_2 tra la seconda e la terza fase è stato definito da alcuni autori "punto di saturazione". Esso rappresenta la condizione oltre la quale non si ha la formazione di nuove lesioni, ma solo l'aumento in larghezza di quelle già formatesi nella seconda fase, fino al raggiungimento della crisi dovuta all'attingimento della resistenza a trazione della fibra, o allo scorrimento della fibra rispetto alla matrice, o ad una loro combinazione. Quando il punto di transizioni T_2 non è ben individuabile, si ha lo sviluppo di alcune fessure anche nella fase tre. In ogni caso, l'unico apporto in resistenza è fornito dalla fibra, per cui la pendenza del terzo segmento riflette il modulo elastico della fibra stessa E_3 e la crisi è, solitamente, di tipo fragile. Se ne deduce come i valori ultimi di deformazione e tensione di tale fase siano fondamentali per le applicazioni strutturali in cui alti livelli di tensione sono applicati direttamente alla fibra (De Santis & de Felice 2015).

La prima fase elastica lineare rappresenta il comportamento del composito nel suo stato iniziale non fessurato ed è delimitata dal punto T_1 corrispondente alla formazione della prima lesione. In questa fase il modulo elastico E_1 e la tensione σ_{T1} riflettono le proprietà della matrice, migliorate dalla presenza della fibra. La valutazione dei parametri fa riferimento all'area trasversale del provino di composito. La seconda fase è caratterizzata dalla progressiva fessurazione della matrice accompagnata da un decremento della rigidezza (comportamento

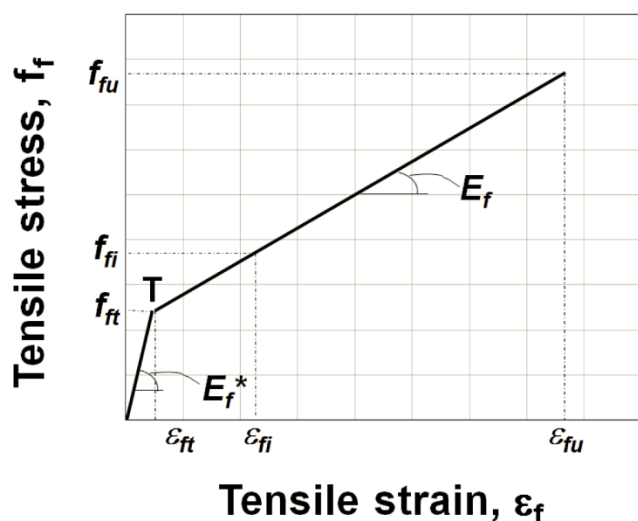


Fig. 2.2. Legame costitutivo ideale di compositi FRCM (Arboleda 2014)

determinando un comportamento di tipo bi-lineare. Inoltre, nelle applicazioni degli FRCM come sistemi di rinforzo per elementi strutturali, la resistenza massima a trazione della rete non viene mai attinta, in quanto prevalentemente si ha una modalità di crisi per scorrimento della fibra. Per cui, anche se la forma della curva tensione-deformazione attesa sarà quella di figura 2.1, essa presenterà nel tratto finale una pendenza ed un'estensione inferiori rispetto a quelle del materiale di rinforzo (Bianchi et al. 2013). Tale comportamento può essere, quindi, approssimato ad una bi-lineare caratterizzata da un primo tratto lineare elastico, rappresentativo del comportamento del composito non fessurato, fino alla formazione della prima frattura; successivamente la pendenza della curva diminuirà seguendo un secondo tratto lineare, rappresentativo del comportamento del composito fessurato, fino al raggiungimento della capacità ultima del provino (f_{fu} , ϵ_{fu}). Il punto di transizione T corrispondente all'intersezione che si ottiene prolungando i due segmenti lineari, come illustrato in figura 2.2.

Se ne deduce come le prestazioni del composito FRCM siano funzione proprio dell'accoppiamento fibra-matrice e dell'adesione che si sviluppa tra le due fasi, per cui per determinarne il comportamento globale è necessario considerare l'interazione tra i materiali costituenti.

2.2.2. Interazione tra i materiali costituenti

L'adesione dei tessuti di fibra alla matrice inorganica è totalmente diversa da quella di altri materiali di rinforzo come l'acciaio, a causa della sezione non omogenea dei multi-filamenti che costituiscono il tessuto stesso.

Prendendo in considerazione i singoli multi-filamenti, questi presentano una sezione non omogenea, composta da molteplici filamenti longitudinali. Quando la fibra è secca (come quella dei rinforzi FRCM), la malta non è in grado di impregnare in modo uniforme l'intero multi-filamento, a causa della sua viscosità: la polvere costituente la malta, presentando una dimensione dell'ordine di $10 \mu\text{m}$, difficilmente penetra

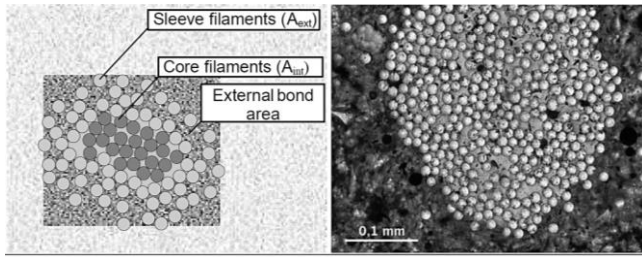


Fig. 2.3. Impregnazione multi-filamento (Bramshuber, 2006)

all'interno degli spazi presenti tra i filamenti, che nella loro forma compattata misurano circa $3 \mu\text{m}$ (Banholzer et al. 2006). Questo comporta la distinzione dei filamenti in due gruppi: quelli più esterni in diretto contatto con la matrice, con la quale presentano una buona adesione, e quelli interni che, non essendo impregnati dalla malta, possono

scorrere più facilmente all'interno del multi-filamento (Fig. 2.3).

Conseguentemente i filamenti esterni saranno i primi ad essere messi in tensione, mentre quelli interni saranno attivati grazie alle forze di attrito che si generano tra di essi o per azione indiretta (Jesse 2005). In altre parole si manifesterà una distribuzione non uniforme della tensione nel multi-filamento.

È necessario, quindi, considerare due tipologie di legame, che danno luogo a due diverse modalità di scorrimento: quello filamento-filamento e quello matrice-fibra (Häußler-Combe & Hartig 2007).

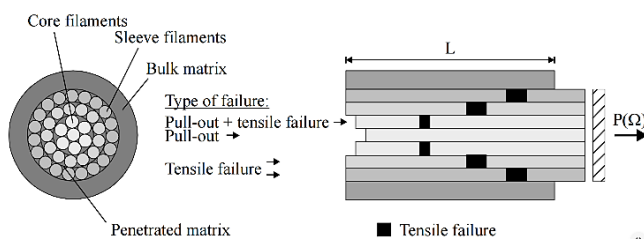


Fig. 2.4. Comportamento telescopico di un multi-filamento sottoposto a prova di pull-out (Banholzer, 2004)

Lo scorrimento relativo tra i filamenti comporta un particolare meccanismo definito “telescopic failure” (Banholzer 2004): sottoposti a trazione i filamenti giungono a rottura (per superamento della resistenza a trazione) in modo progressivo a partire da quelli più esterni; raggiunta la rottura i filamenti saranno soggetti all'estrazione dalla matrice inorganica (Fig. 2.4).

Tale modalità di crisi è influenzata da vari fattori: la capacità della malta di penetrare all'interno del multi-filamento, la geometria del rinforzo (cioè della maglia della rete di fibra), il livello di attrito che si genera tra i filamenti di ogni multi-filamento e l'eventuale presenza di un rivestimento protettivo o di un trattamento sulla fibra (Carozzi & Poggi 2015, D'Antino & Papanicolaou 2017, Donnini et al. 2016, 2017, De Santis et al. 2017).

I consistenti scorrimenti che possono generarsi comportano una perdita di efficacia del rinforzo, accompagnata da un incremento di dissipazione di energia e di duttilità, a confronto con le caratteristiche meccaniche dei singoli materiali costituenti il composito (Zastrau et al. 2008). Ciò non avviene nel caso di presenza di un legame adesivo interno al multi-filamento maggiore di quello esterno, come nei compositi facenti uso di fibre pre-impregnate con resine che impediscono lo scorrimento reciproco dei singoli filamenti (Fig. 2.5).

La curva B descrive il caso in cui l'adesione interna è minore di quella esterna, come avviene nei compositi FRCM con fibre non pre-impregnate. Lo scorrimento telescopico che si genera si traduce in una curva carico-scorrimento più schiacciata, caratterizzata da una certa duttilità.

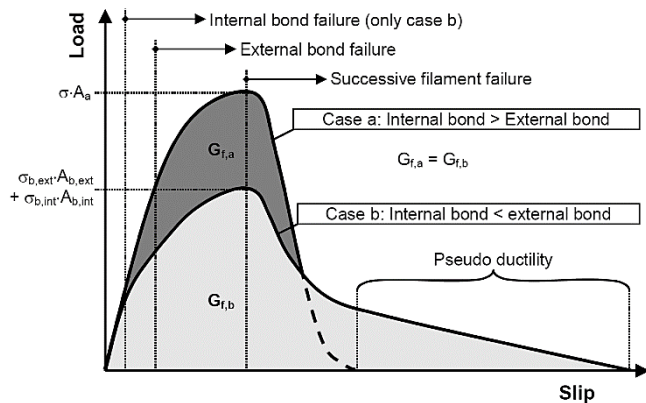


Fig. 2.5. Comportamento schematico di fibre con un diverso grado di adesione interna (Bramshuber, 2006)

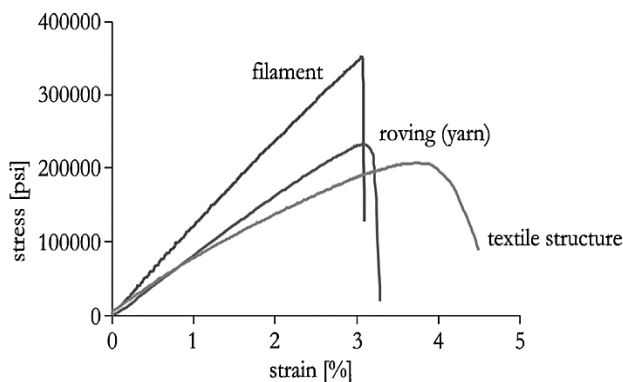


Fig. 2.6. Comportamento a trazione del filamento, del multi-filamento e del tessuto in fibra di vetro (Lepenes et al. 2007)

La curva A, al contrario, è rappresentativa dei multi-filamenti caratterizzati da una maggiore adesione interna, i quali manifestano un'elevata resistenza accompagnata da uno scorrimento ed una duttilità limitati, come avviene per i materiali compositi fibrorinforzati FRP caratterizzati da un comportamento fragile.

Sperimentalmente è stato dimostrato più volte in letteratura che, come conseguenza di tale comportamento, i materiali FRCM non raggiungono mai la loro resistenza massima a trazione, pari a quella della rete di fibra, come il tessuto ed il multi-filamento (Fig. 2.6) non attingono le capacità massime rispettivamente del multi-filamento e del singolo filamento che li costituiscono (Häußler-Combe et al. 2004, Bianchi et al. 2013, Olivito et al. 2014, Carozzi & Poggi 2015, Arboleda et al. 2015).

Per analizzare il meccanismo di crisi del singolo multi-filamento all'interno della matrice inorganica si può ricorrere a diversi approcci che fanno uso di differenti rappresentazioni del multi-filamento (Fig. 2.7).

La schematizzazione più semplice (tipo A), idealizzando il singolo multi-filamento come un materiale omogeneo elastico lineare a sezione circolare, non risulta idonea per analizzare il comportamento telescopico della fibra. La seconda tipologia (tipo B) è stata introdotta per la prima volta da Ohno & Hannant nel 1994 e successivamente utilizzata da svariati autori. Il multi-filamento viene schematizzato come costituito da anelli concentrici caratterizzati da un legame di adesione tra di essi costante, ma non considera la crisi a trazione dei singoli filamenti. Il terzo modello (tipo C) suddivide il multi-filamento in settori costituiti da un numero N di filamenti statisticamente equivalenti alla microstruttura originale. Il modello prevede un'adesione perfetta tra i filamenti e la matrice circostante, non considerando i vari meccanismi di crisi che occorrono (perdita di adesione e crisi a trazione dei singoli filamenti).

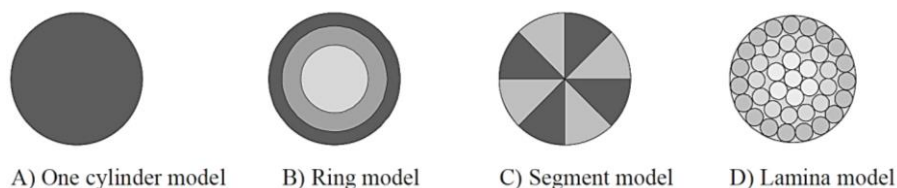


Fig. 2.7. Modelli di rappresentazione di un multi-filamento (Bramshuber, 2006)

In Häußler-Combe et al. (2004) e Zastrau et al. (2008) viene utilizzato un ulteriore modello, frutto dell'unione degli schemi di tipo B e C. L'ultima schematizzazione (tipo D) è stata proposta nel 1997 da Beyerlein e Phoenix, come affinamento di un modello precedente risalente al 1961. Il multi-filamento viene rappresentato come un fascio di filamenti paralleli sottoposti a carichi normali e incorporati in una matrice soggetta a sole tensioni tangenziali. Il modello tiene in considerazione sia la crisi a trazione dei filamenti che la perdita di adesione dei multi-filamenti dalla matrice, ma implica che il carico sia introdotto solamente dai filamenti.

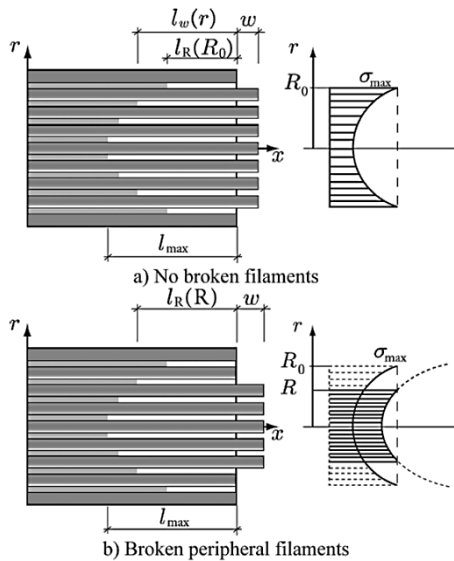


Fig. 2.8. Distribuzione della tensione all'interno di un multi-filamento (Lepenes et al. 2007)

Per la modellazione di un comportamento così complesso, in Lepenes et al. (2007) è stato introdotto un approccio che tiene conto dei vari aspetti che caratterizzano l'adesione. I multi-filamenti, agendo come dei filtri, non permettono una totale penetrazione della malta al loro interno, ovvero la costituzione di un legame adesivo continuo tra i filamenti; ne deriva una lunghezza libera dei filamenti non uniforme, schematizzabile come crescente dall'esterno verso l'interno del multi-filamento. Considerando la tensione direttamente proporzionale alla deformazione e, quindi, inversamente proporzionale alla lunghezza libera del

filamento, il multi-filamento sarà soggetto ad una distribuzione tensionale crescente dal centro verso il perimetro (Fig. 2.8). Data la non uniforme distribuzione della tensione, il multi-filamento risulterà meno rigido del singolo filamento, conferendo, così, al composito una maggiore duttilità.

Tale comportamento è stato analizzato in Zastrau et al. (2008) attraverso il Micro-Meso-Macro-Prediction-Model (MMM-PM) in cui il complesso meccanismo di danneggiamento e rottura viene spiegato attraverso un modello gerarchico articolato su tre livelli d'indagine. Alla micro-scala sono stati studiati i filamenti individuali sulla base di quanto già affermato in Lepenes et al. (2007); alla meso-scala è stato analizzato il comportamento effettivo dei multi-filamenti, attraverso i quali si giunge allo studio a scala macroscopica, nel quale il materiale composito, prima considerato nella sua forma eterogenea, viene idealizzato come omogeneo. Il modello predice il comportamento macroscopico del composito attraverso una simulazione del danno, ricorrendo all'omogeneizzazione e a metodi di localizzazione per la transizione e integrazione di scala. I risultati sperimentali delle prove di trazione sono stati utilizzati per la validazione del modello, mentre i parametri del modello sono determinati dai dati sperimentali.

Per quanto attiene lo scorrimento fibra-matrice, questo è influenzato da vari fattori e diviene, ovviamente, più consistente in presenza di una incompatibilità chimica tra le fasi. Campagne sperimentali condotte su elementi strutturali rinforzati con sistemi FRM hanno dimostrato come la crisi in travi in cemento armato

rinforzate venga raggiunta solamente dopo consistenti scorrimenti fibra-matrice e si manifesta come una frattura nello spessore del sistema di rinforzo (delaminazione), in corrispondenza dell'interfaccia fibra-matrice. In molti casi è stato osservato che, dopo la crisi, uno strato di matrice permane adeso al supporto. Il fenomeno è influenzato principalmente dal grado di impregnazione dei multi-filamenti da parte della malta, ma anche dai parametri geometrici del tessuto tra i quali la densità della rete di fibra. In Peled & Yankelevsky (1998) e Peled et al. (2008 a, 2008 b) viene dimostrato attraverso test di pull-out come l'aumento della densità della rete, sia in direzione parallela all'azione di pull-out che in direzione perpendicolare, comporta un miglioramento dell'ancoraggio tra il rinforzo e la matrice, quindi un aumento della resistenza della rete allo sfilamento dalla matrice. I multi-filamenti di trama, oltre a trattenere i multi-filamenti di ordito durante l'applicazione del carico opponendosi al loro scorrimento, generano assieme all'ordito un tessuto a maglia larga. La malta, penetrando nella maglia del tessuto, garantisce la continuità tra i due layer di matrice del composito, contribuendo a migliorare l'ancoraggio.

Altre caratteristiche della rete di fibra influiscono sull'adesione e sullo scorrimento fibra-matrice, tra cui: la geometria, la larghezza della maglia e la dimensione dei multi-filamenti e le loro caratteristiche superficiali (D'Antino & Papanicolau 2017).

In definitiva, nel meccanismo di rottura del sistema FRCM intervengono vari aspetti:

- sviluppo micro-fessure interne alla matrice;
- sviluppo di macro-fessure nella matrice;
- delaminazione della fibra dalla matrice per perdita di adesione;
- rottura della fibra;
- scorrimento fibra-matrice;
- scorrimento tra i filamenti del singolo multi-filamento.

Solitamente la crisi del sistema composito avviene come combinazione dei fenomeni elencati (Zastrau et al. 2003) ed è influenzata da vari fattori legati alle caratteristiche delle fasi del composito e alla loro interazione. Dal comportamento di interazione tra fibra e matrice fin qui descritto, si deduce, infatti, come un aspetto essenziale per ottenere buone prestazioni del composito FRCM sia proprio l'abbinamento ottimale fibra-matrice, ovvero la consistenza, la densità e la composizione della matrice in riferimento allo specifico tessuto di fibra: la capacità penetrativa della malta all'interno del multi-filamento e la capacità di adesione alle interfacce fibra-matrice e matrice-supporto dipendono dalle proprietà meccaniche e chimiche della fibra e della matrice e dalla geometria della rete. Ciò spiega l'esistenza in commercio di specifici abbinamenti rete di fibra-matrice, in relazione anche alle caratteristiche del materiale di supporto: rispetto alle malte ordinarie, quelle impiegate nei compositi FRCM sono differenziate nella formulazione chimica in base al materiale di supporto, al fine di garantire un'elevata affidabilità del rinforzo strutturale, ed in funzione della specifica rete di fibra, in modo da assicurare un'efficace adesione d'interfaccia; le fibre a loro volta sono sottoposte a processi di lavorazione e trattamenti chimici per migliorarne la compatibilità con la matrice.

Si rimanda ai paragrafi 2.3.2 e 2.4 per l'approfondimento dello stato dell'arte sul comportamento di adesione derivante da prove di adesione presenti in letteratura.

2.3. Le tipologie di prove sperimentali

Come descritto precedentemente, proprietà a trazione e di adesione svolgono un ruolo fondamentale nel comportamento dei compositi. Ad oggi risulta necessario non solo un approfondimento della conoscenza relativa al comportamento di tali materiali, bensì anche la definizione di criteri comuni per le prove sperimentali (de Felice et al. 2014, Carozzi et al. 2015, Arboleda et al. 2015, Ascione et al. 2015, De Santis et al. 2017). Queste possono essere distinte in due categorie:

- prove di trazione diretta;
- prove di adesione.

2.3.1. Prove di trazione diretta

Tra le indagini sperimentali per la caratterizzazione meccanica del materiale, le prove di trazione diretta forniscono i parametri fondamentali, quali il modulo di elasticità e la resistenza a trazione del composito e le proprietà di adesione matrice-fibra, che influiscono sul processo di cracking e sulla durabilità, per cui tali prove sono espressamente richieste dai codici standard esistenti (CNR-DT 200 R1/2013, AC434 2011) per la caratterizzazione meccanica dei compositi fibrorinforzati a matrice inorganica. Tuttavia, ad oggi risultano necessari sia un approfondimento della conoscenza sulla risposta a trazione degli FRCM, sia una standardizzazione della metodologia di prova, specificamente concepita per questo materiale. Comitati tecnici scientifici (come il Comitato Tecnico RILEM TC-250 CSM) e commissioni a livello nazionale ed europeo si sono attivati in questa direzione, coordinando ampi progetti di ricerca su tale argomento (De Santis & de Felice 2015).

Le caratteristiche meccaniche e le proprietà di adesione, risultanti dai test di trazione diretta, possono variare notevolmente non solo in funzione delle caratteristiche della rete di fibra e della matrice utilizzati, ma anche in base a diversi fattori relativi al set up di prova, tra cui il metodo di trasferimento del carico, la geometria del provino e le modalità di fabbricazione, nonché la tecnica di misurazione della deformazione. Dal momento che nessuno di questi fattori risulta ad oggi standardizzato, sono stati sviluppati in letteratura diversi set-up di prova. Questi si differenziano principalmente per tre variabili (Contamine et al. 2011, Hartig et al. 2012, Arboleda 2014, Arboleda et al. 2015):

- La geometria e le dimensioni del provino;
- Il metodo adottato per l'applicazione/trasmissione del carico al provino, cioè la configurazione del dispositivo di ancoraggio del provino alla macchina di prova;
- La metodologia adottata per la misurazione della deformazione/spostamento durante l'esecuzione della prova (range/lunghezza di misura e strumentazione impiegata).

In figura 2.9 sono illustrati i principali set-up rintracciabili in letteratura, differenziati in funzione di geometria e metodo di trasferimento del carico.

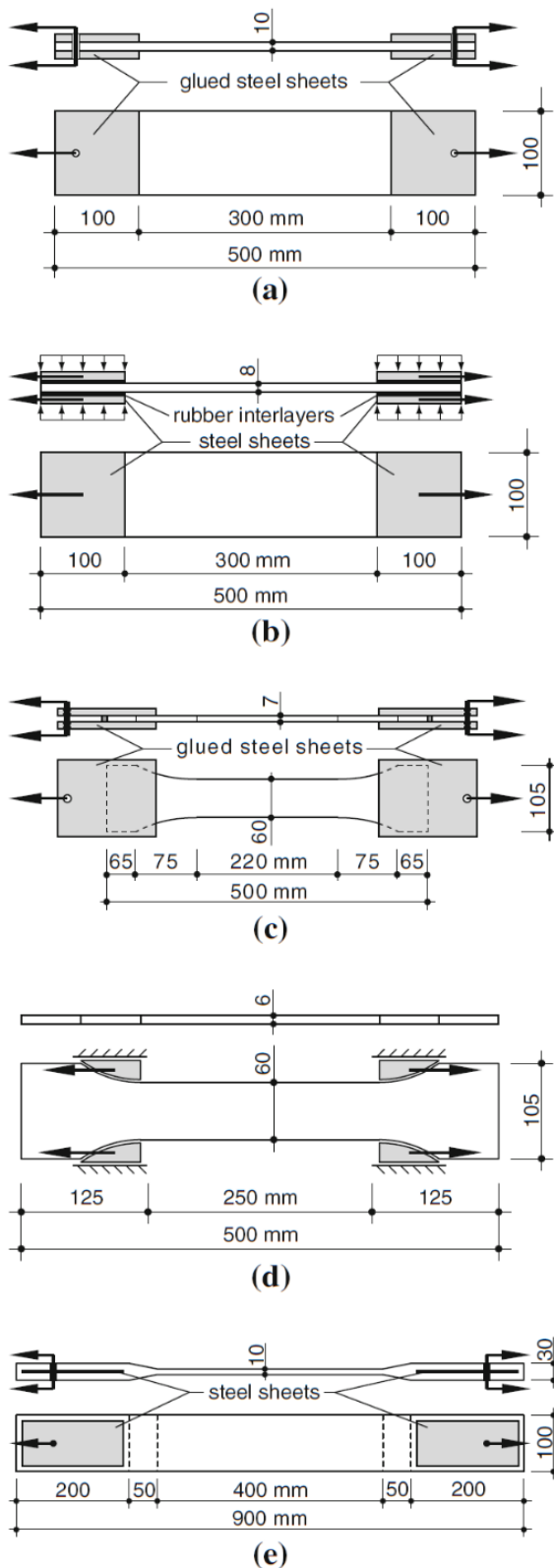


Fig. 2.9. Prove di trazione diretta su provini di composito fibrorinforzato a matrice inorganica (Hartig et al. 2012)

2.3.1.1. Geometria dei provini

In letteratura si possono individuare tre principali forme geometriche. Quella rettangolare con sezione trasversale piana e costante (Fig. 2.9a, b) è la più ricorrente e semplice da realizzare (Jesse 2004, Mobasher et al. 2006, Raupach et al. 2006, Donnini et al. 2016, 2017, D'Antino & Papanicolaou 2017, Lignola et al. 2017) e, pertanto, risulta la geometria suggerita sia dalle AC434 (2011) che dalle raccomandazioni RILEM TC 232-TDT (Bramschuber et al. 2016). Un processo maggiormente complesso e dispendioso è richiesto per la realizzazione dei provini a sezione non costante, ovvero sagomata, definiti per la loro configurazione “dog-shape specimens” o “dumbbell specimens” (Raupach et al. 2006, Orłowsky et al. 2005, Orłowsky & Raupach 2006, Papantoniou & Papanicolaou 2012), i quali presentano alle estremità un allargamento nel piano del rinforzo (Fig. 2.9c, d). Maggiormente complessi sono quelli impiegati in Hegger et al. (2006), nei quali l'incremento dimensionale delle sezioni di estremità in direzione trasversale permette l'inserimento di piastre metalliche perforate, per mezzo delle quali avviene il trasferimento del carico al provino (Fig. 2.9e).

Relativamente alle dimensioni, in letteratura la lunghezza dei provini varia mediamente tra i 50 e i 90 cm, con una larghezza di circa 10 cm. Nelle AC434 (2011) la lunghezza è data come somma della larghezza del provino e delle lunghezze di ancoraggio e di misura.

Per quanto attiene lo spessore, questo è determinato in base alla tipologia di matrice utilizzata e alla forma geometrica e al numero di strati di rinforzo inclusi nel provino.

2.3.1.2. Metodo di applicazione del carico

Riguardo la modalità di applicazione del carico, in Hartig et al. (2012) vengono identificate due principali tipologie: “rigid load application”, in cui il meccanismo di trasferimento del carico tra il dispositivo di ancoraggio ed il provino avviene mediante tensioni di adesione e taglio grazie all’impiego di piastre metalliche fissate alle estremità del provino o inserite all’interno di esse, e “soft clamping”, in cui il trasferimento del carico avviene mediante l’instaurarsi di forze di attrito (principio di Coulomb) grazie all’applicazione di forze di compressione alle estremità del provino.

Nel primo caso il dispositivo per il trasferimento del carico risulta più rigido del provino, prevenendo sia deformazioni e fenomeni di cracking della matrice, nella zona di ancoraggio, sia lo scorrimento tra il dispositivo ed il provino. Il metodo più comune per ottenere ciò consiste nell’uso di lamine metalliche forate (Fig. 2.9a, c), fissate mediante resine epossidiche alle estremità del provino (Jesse 2004, Contamine et al. 2011, 2014, Donnini et al. 2016, 2017). Una tecnica differente è quella mostrata in figura 2.9e, dove due piastre metalliche forate sono inserite all’interno del provino sagomato (Hegger 2006). In entrambe le modalità il carico è applicato per mezzo di un perno inserito attraverso i fori praticati nelle piastre e nel composito.

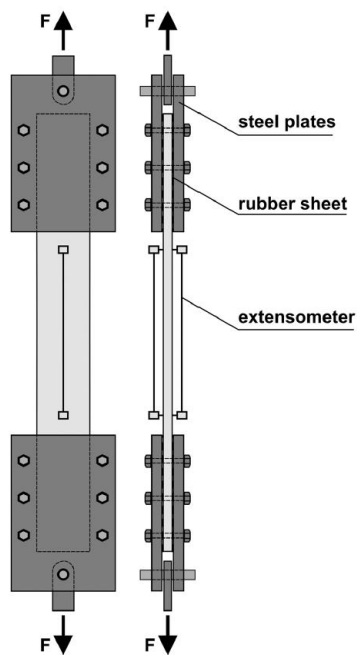


Fig. 2.10. Set-up prova a trazione diretta (Bramschuber et al. 2016)

sufficientemente rigide con interposto un foglio di gomma (neoprene o simili). Le piastre devono avere almeno una capacità rotazionale nel piano del provino. Il carico viene trasferito al provino per attrito. La pressione deve essere regolata in modo da impedire lo scorrimento tra il sistema di serraggio ed il provino” (Fig. 2.10).

In Ascione et al. (2014) viene presentato un dispositivo che permette di ottenere il trasferimento del carico per adesione ed il fallimento per scorrimento della fibra all’interno della matrice. Questo è costituito da due

Per quanto riguarda la tipologia “soft clamping”, il carico viene applicato mediante un sistema di serraggio (Fig. 2.9b). Per evitare concentrazioni di tensione dovute all’irregolarità della superficie della matrice inorganica e danneggiamenti del provino dovuti alle forze di compressione, tra la morsa ed il provino vengono interposti dei fogli di gomma, dei talloni in FRP (Carozzi et al. 2015, D’Antino & Papanicolau 2017) o delle lastre di alluminio (Mobasher et al. 2006, AC434 2011). In questo modo il carico è applicato principalmente per attrito. Nelle raccomandazioni RILEM 232-TDT (Bramshuber et al. 2016) si legge: “Il provino è fissato tra piastre in acciaio

piastre metalliche opportunamente distanziate in modo da permettere l'inserimento del composito, che verrà successivamente incollato all'interno della cavità.

Bertolesi et al. (2014) e Carozzi & Poggi (2015) propongono una variante: i provini sono serrati all'interno delle morse del macchinario di prova, ma la morsa inferiore consente la rotazione torsionale. Anche in questo caso i morsetti producono compressione alle estremità dei provini, per cui vengono applicati dei rinforzi mediante resina epossidica in modo da facilitare una distribuzione più omogenea delle sollecitazioni ed evitare danni locali nella matrice.

In Garmendia et al. (2011) la rete di fibra eccede in lunghezza ed in parte rimane non coperta dalla matrice. La fibra in eccesso viene ripiegata sul composito e serrata insieme a questo all'interno delle morse della macchina di prova.

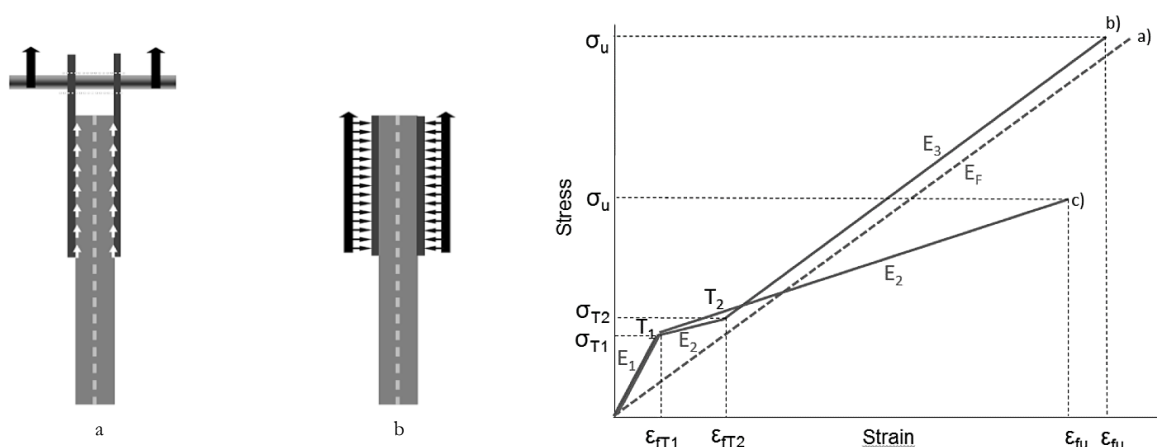


Fig. 2.11. Prova di trazione diretta a) clevis grip, b) clamping grip, c) legame costitutivo: fibra (curva a), FRCCM clamping grip (curva b), FRCCM clevis grip (curva c); (Arboleda 2014)

Un particolare sistema di trasferimento del carico, specifico per provini sagomati, è rappresentato in figura 2.9d (Orlowsky et al. 2005, Orlowsky & Raupach 2006, Raupach et al. 2006, Papantoniou & Papanicolaou 2012), dove due flange allocate nelle sagomature permettono il collegamento con la macchina di prova.

In Bianchi et al. (2013) e Arboleda et al. (2015) vengono sperimentati e confrontati due set-up di prova. Nel primo (clevis grip) il carico viene trasferito al provino mediante tensioni di taglio e di adesione attraverso due piastre metalliche fissate alle estremità del provino (Fig. 2.11a), mentre nel secondo (clamping grip con capacità torsionale ad un estremo) il trasferimento avviene per attrito grazie all'applicazione di tensioni di compressione perpendicolari al piano del provino (Fig. 2.11b). Se il primo dispositivo permette il raggiungimento della crisi per scorrimento della fibra riproducendo al meglio le condizioni reali dei rinforzi applicati alle strutture, in cui il rinforzo non è ancorato agli estremi (Fig. 2.11c, curva c), il secondo, limitando gli scorrimenti tra matrice e tessuto a livello della zona di serraggio, comporta il raggiungimento della crisi per trazione della fibra ed una completa caratterizzazione meccanica del composito (Fig. 2.11c, curva b).

Grazie alla pressione esercitata nel secondo set-up dal sistema di serraggio si ottiene un incremento dell'interazione fibra-matrice ed il raggiungimento di risultati in termini di carico ultimo maggiori. Pertanto

è possibile assumere l'ipotesi di perfetta adesione e i risultati dei test di trazione diretta restituiranno un legame tensione-deformazione di tipo tri-lineare.

È evidente, dagli studi presenti in letteratura, come i risultati ottenuti dalla prova di trazione diretta, dipendano dal set-up utilizzato, che sarà, quindi, scelto in funzione dell'obbiettivo della campagna sperimentale: capacità massima del sistema di rinforzo da applicare e parametri di design, oppure caratteristiche meccaniche massime e comportamento complessivo del composito (Contamine et al. 2011, Hartig et al. 2012, Bianchi et al. 2013, Arboleda 2014, Carozzi & Poggi 2015, De Santis & de Felice 2015, Arboleda et al. 2015).

2.3.1.3. Strumenti di acquisizione delle misure di spostamento e di deformazione

La metodologia per l'acquisizione dei valori di spostamento rappresenta la terza variabile delle prove di trazione diretta dei compositi FRCM.

Tra i metodi utilizzabili, gli strain gauges risultano inadeguati nel caso di comportamento multi-cracking in quanto forniscono solo informazioni locali (Carozzi & Poggi 2015); inoltre, tale strumento risulta utile solo fino alla formazione di una lesione all'interno della lunghezza di misura, la quale può disturbare i circuiti e, quindi, la registrazione dei dati (Arboleda 2014).

Una metodologia spesso utilizzata in letteratura è basata sulla misura dello spostamento delle ganasce della macchina di prova attraverso l'impiego di trasduttori di spostamento Linear Variable Differential Transformer (Hegger et al. 2006, Garmendia 2011, D'Antino & Papanicolaou 2017, Lignola et al. 2017, Donnini et al. 2016, 2017); ciò risulta certamente interessante, ma non è sufficiente a descrivere il comportamento a rottura del composito, a causa dell'integrazione nel dato misurato delle lesioni delle zone periferiche più sensibili all'effetto di pull-out (Hegger et al. 2006). Data la difficoltà di tenere conto di tale fenomeno, Jesse (2004) e Contamine et al. (2011) impostano la zona di misura lontano dalla piastra terminale, collocando due LVDT nella parte centrale del provino con una lunghezza di misura (200 mm) tale da registrare una quantità di lesioni rappresentativa del comportamento multi-cracking. In Arboleda (2014) un LVDT ad asse orizzontale, posto in corrispondenza della sezione centrale del provino, ha permesso la valutazione di un'eventuale curvatura fuori dal piano: l'inflessione del provino, generata da difetti occorsi in fase di produzione, viene annullata con l'incremento della tensione di trazione nella prima fase della prova, generando uno spostamento della sezione centrale del provino.

Le raccomandazioni RILEM TC 232-TDT (Brameshuber et al. 2016), come le AC434 (2011), prevedono l'uso di estensimetri con un range di misura minimo di 50 mm. Tale procedura è suggerita anche in Arboleda (2014) e Arboleda et al. (2015) dove, dopo uno studio basato sul confronto tra diversi dispositivi di misura (Digital Image Correlation "DIC", estensimetro clip-on, estensimetro laser, strain gauge, LVDT), si è rivelata la metodologia più adatta e conveniente, purché ricopra una lunghezza di misura adeguata (almeno 1/3 della lunghezza libera del provino di composito, Carozzi & Poggi 2015). De Santis & de Felice (2015) affermano, però, che anche in questo caso le letture che si ottengono sono affidabili solamente prima della

fessurazione, in particolare quando la distanza tra due lesioni consecutive risulta maggiore del range di misura dello strumento.

Per avere un quadro completo dell'avanzamento dello stato fessurativo durante la prova (larghezza e distribuzione lesioni e deformazione del provino), le immagini ottiche o digitali (metodo DIC) costituiscono uno strumento molto utile, dati i costi relativamente bassi e la facilità di utilizzo (Mobasher et al. 2006, Hegger et al. 2006, Arboleda 2014, Arboleda et al. 2015). Di contro, questo metodo prevede una fase analitica che può risultare complessa ed onerosa (in termini di time-consuming) e, relativamente alle immagini ottiche, si è dimostrato sensibile a possibili perdite di messa fuoco in caso di spostamenti fuori dal piano del provino (Arboleda 2014).

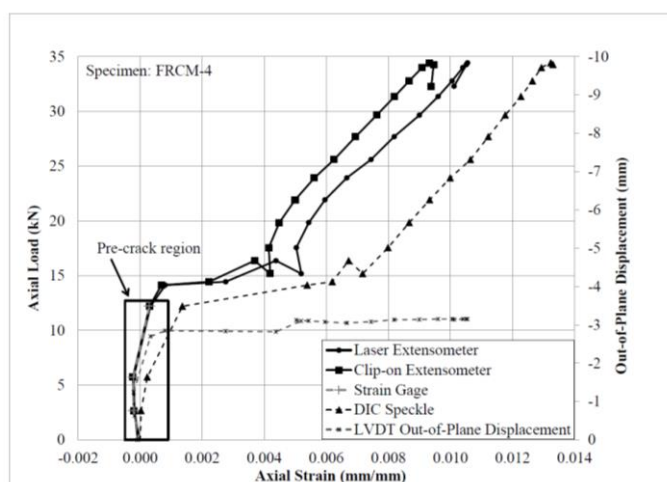


Fig. 2.12. Confronto tra i risultati ottenuti con diversi dispositivi di misura della deformazione (Arboleda 2014)

Molti autori ricorrono nei loro studi all'utilizzo contemporaneo di più metodologie di misura, garantendo in tal modo un controllo affidabile di eventuali disallineamenti, flessioni o slittamenti dei provini all'interno delle morse della macchina di prova (De Santis & de Felice 2015, Contamine et al. 2011, Arboleda 2014), ed evidenziando nel contempo le differenze tra i vari dispositivi. In particolare, in Arboleda (2014) si dimostra che gli estensimetri laser e "clip-on" e gli strain gauges restituiscono i medesimi risultati fino alla formazione della prima lesione. Successivamente tra le due tipologie di estensimetri si notano differenze minime, mentre gli strain gauges risultano non più utilizzabili. Il metodo DIC, con immagini sia ottiche che digitali, si discosta maggiormente, ma permette l'analisi dell'evoluzione del pattern fessurativo. Come si può notare in figura 2.12, nella prima fase della prova di trazione diretta (fase pre-crack) tutti gli strumenti di misura registrano uno spostamento negativo, definendo un grafico carico-spostamento con andamento curvilineo. Ciò è dovuto alla curvatura fuori dal piano introdotta nel provino durante la fase di realizzazione (causata ad esempio da: curvatura della cassaforma per la produzione, ritiro non omogeneo durante il processo di indurimento della malta, disallineamento del provino all'interno della macchina di prova). Valori negativi di spostamento (valori che indicano una contrazione del provino) restituiti da strumenti di misurazione puntuale, come gli estensimetri, possono essere dovuti anche alla formazione di lesioni al di fuori del range di misura (Arboleda et al. 2015). In generale, il comportamento deformativo del sistema FRCM è difficile da misurare in modo accurato, in quanto gli strumenti di misura sono progettati per essere applicati esternamente, registrando, così, solamente la deformazione media della matrice, senza nessuna informazione sui fenomeni di scorrimento fibra-matrice e di scorrimento telescopico. Inoltre, le misure registrate sono influenzate dal set-up di prova impiegato. Infatti, come mostrato in figura 2.13, nel caso di metodo che consente fenomeni di scorrimento della fibra,

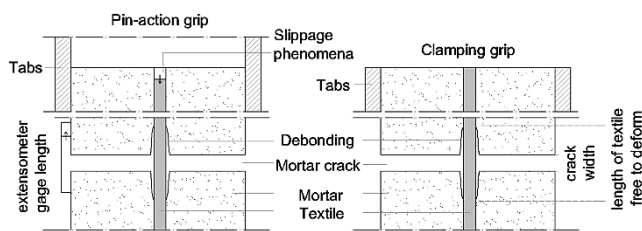


Fig. 2.13. Differenze nella misura della deformazione in base al metodo di ancoraggio (Arboleda et al. 2015)

lo strumento registrerà lo scorrimento che ha luogo al di fuori della lunghezza di misura; in caso contrario la deformazione della fibra sarà uguale a quella della matrice, fino a quando non si forma una lesione; a questo punto la fibra sarà libera di deformarsi in base alle proprie proprietà, per una lunghezza che in realtà sarà maggiore della larghezza della lesione registrata dallo strumento.

2.3.1.4. Velocità di applicazione del carico durante l'esecuzione della prova

Oltre alle tre variabili principali sopra descritte, vi è un ulteriore fattore di differenziazione. In letteratura gli autori concordano sull'eseguire la prova in regime di controllo di spostamento ad una velocità di spostamento costante, ma quest'ultima varia in un range tra gli 0,5 mm/min e i 10 mm/min. In Contamine et al. (2011) si legge che, tenendo conto che la velocità di spostamento dipende dalla lunghezza di misura, con un range di misura di 200 mm si consiglia una velocità di 1 mm/min per una caratterizzazione statica. Di seguito (Tab. 2.1) vengono riportati, a titolo di esempio, le velocità di spostamento utilizzate da vari autori, congiuntamente alla geometria, alle lunghezze totale e libera del provino ed al range di misura dello spostamento.

Tab. 2.1. Prove a trazione diretta eseguite su provini di composito riportate in letteratura: dati geometrici dei provini e velocità di spostamento della prova

Autore	Geometria	L_{tot} [mm]	L_{libera} [mm]	L_{misura} [mm]	Velocità prova
AC434 (2011)	Rettangolare	$L_{ancoraggio} + 2w + L_{misura}$	/	min. 50	0.2 mm/min
RILEM TC 232-TDT (2016)	Rettangolare	500	250	min. 200	2×10^{-3} /min
Hegger et al. (2006)	Bone-shape	900	400	500	1 mm/min
Raupach et al. (2006)	Rettangolare	500	/	/	0.1 mm/min
	Bone-shape	500	/	/	0.5 mm/min
Orlowsky & Raupach (2006)	Bone-shape	500	250	250	0.5 mm/min
Jesse (2004)	Rettangolare	500	300	200	0.015 mm/s
Garmendia et al. (2011)	Rettangolare	600	/	/	0.5 mm/min
Contamine et al. (2011, 2014)	Rettangolare	500	300	200	1 mm/min
Bianchi et al. (2013)	Rettangolare	400	/	100	0.5 mm/min
	Rettangolare	400	/	100	0.25 mm/min
Bertolesi et al. (2014)	Rettangolare	400	280	100	0.3-0.5 mm/min
Olivito et al. (2014)	Rettangolare	300	/	/	0.5 mm/min
Ascione et al. (2014)	Rettangolare	400	200	/	0.2 mm/min
Carozzi & Poggi (2015)	Rettangolare	400	280	100	0.1-0.5 mm/min
Arboleda et al. (2015)	Rettangolare	410	110	100	0.25 mm/min
	Rettangolare	400	280	100	0.1-0.3 mm/min

2.3.2. Prove di adesione

Il comportamento di elementi strutturali, in muratura o in cemento armato, rinforzati con materiali compositi fibrorinforzati è stato studiato a livello internazionale attraverso campagne sperimentali e studi teorici atti a determinare i meccanismi di crisi e le proprietà meccaniche e di adesione che vi influiscono.

L'efficacia dei materiali compositi fibrorinforzati è strettamente dipendente dalle modalità di trasferimento degli stati tensionali dal supporto alla fibra di rinforzo, ovvero dall'adesione tra il sistema di rinforzo ed il supporto.

Le numerose sperimentazioni presenti in letteratura hanno dimostrato come la modalità di crisi più frequente nei compositi fibrorinforzati avvenga per perdita di adesione seguita da fenomeni di delaminazione interlaminare, sia nei sistemi di rinforzo a taglio che a flessione.

Nel caso dei compositi a matrice organica, le Istruzioni CNR-DT 200 R1 (2013) individuano quattro modalità di crisi per delaminazione: distacco di estremità (Modo 1), distacco causato da fessure per flessione (Modo 2), distacco causato da fessure diagonali da taglio (Modo 3) e distacco causato da irregolarità e rugosità della superficie di calcestruzzo (Modo 4). La crisi, grazie alle elevate proprietà resistenti della matrice polimerica, raramente avviene per rottura di quest'ultima; in letteratura è ampiamente dimostrato (Valluzzi et al. 2012, Rotunno et al. 2015, de Felice et al. 2016) che, nella maggioranza dei casi, la superficie di distacco è parallela alla prima interfaccia (interfaccia supporto-matrice) ed è situata all'interno del supporto (Fig. 2.26 A). Se ne deduce come le proprietà meccaniche che influiscono sul fenomeno di crisi siano quelle relative al supporto. In particolare, le numerose sperimentazioni hanno dimostrato come la tensione di adesione massima risulti, con buona approssimazione, linearmente proporzionale alla resistenza a trazione del supporto e l'energia di frattura linearmente proporzionale alla radice quadrata della resistenza a trazione dello stesso supporto.

Contrariamente, nei compositi FRCC generalmente la crisi si manifesta come perdita di adesione a livello della seconda interfaccia (Carbone & de Felice 2009, Ascione et al. 2014, Carozzi et al. 2014, D'Antino et al. 2014, Ombres et al. 2016, Carozzi et al. 2016). La capacità di adesione dei compositi FRCC è un fenomeno complesso che coinvolge numerosi fattori: le proprietà meccaniche (e geometriche nel caso della fibra) dei materiali componenti e la loro compatibilità chimica, la capacità della matrice di penetrare la maglia della rete di fibra e la sezione dei multi-filamenti, da cui derivano il comportamento telescopico e lo stato tensionale non uniforme all'interno del multi-filamento, la presenza di multi-filamenti trasversali, la densità della rete di fibra nelle due direzioni (Banholzer 2004, Hartig et al. 2008, Hegger et al. 2006, Zastrau et al. 2008).

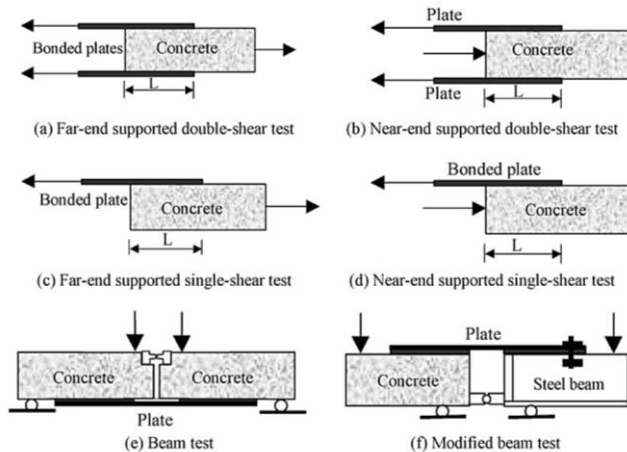


Fig. 2.14. Principali tipologie di test di adesione (Yao et al. 2005)

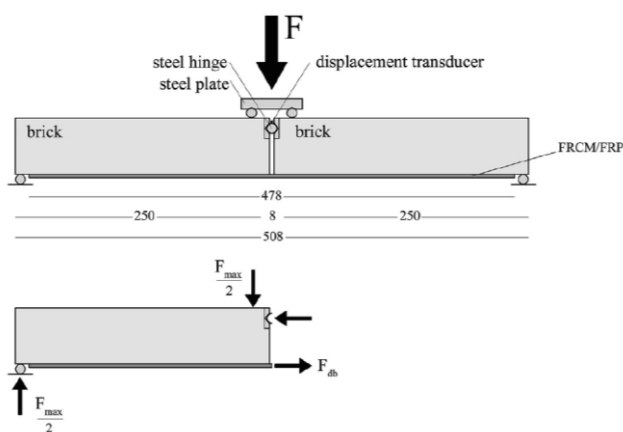


Fig. 2.15. Beam Test (Alecci et al. 2016a)

Per studiare le proprietà di adesione dei compositi fibrorinforzati, in letteratura sono presenti quattro principali modalità di prova sperimentale:

- Beam Test;
- Single-Shear Test;
- Double-Shear Test;
- Pull-Off Test.

I Single-Shear Test ed i Double-Shear Test sono le tipologie di prova più diffuse. La loro configurazione deriva da quella delle sperimentazioni condotte su materiali compositi FRP (Valluzzi et al. 2012, Mazzotti et al. 2012, Ascione 2013, Ceroni et al. 2014, de Felice et al. 2016, Carloni & Focacci 2016).

La tipologia Beam Test è stata impiegata principalmente per le indagini sul comportamento di compositi applicati ad elementi strutturali di tipo trave. In Alecci et al. (2016a, b) il comportamento di adesione di compositi FRCM applicati su elementi di laterizio è stato studiato attraverso l'esecuzione di una serie di Beam

Test. La capacità di adesione è stata ottenuta attraverso l'equilibrio tra il momento interno ed il momento nella sezione mediana funzione del carico massimo applicato (Fig. 2.15).

In base alle caratteristiche meccaniche del substrato, della matrice e della fibra ed alla capacità di adesione d'interfaccia, nelle prove di adesione si possono manifestare sei differenti modalità di crisi (Ascione et al. 2015) (Fig. 2.16):

- Perdita di adesione con crisi coesiva nel supporto (Fig. 2.16 A);
- Perdita di adesione all'interfaccia substrato-matrice (Fig. 2.16 B);
- Perdita di adesione all'interfaccia matrice-fibra (Fig. 2.16 C);
- Scorrimento della fibra all'interno della matrice (Fig. 2.16 D);
- Rottura a trazione della fibra esterna alla matrice (Fig. 2.16 E);
- Rottura a trazione della fibra all'interno della matrice e successivo scorrimento della fibra nella matrice con eventuale formazione di fessure nello strato esterno di matrice (Fig. 2.16 F).

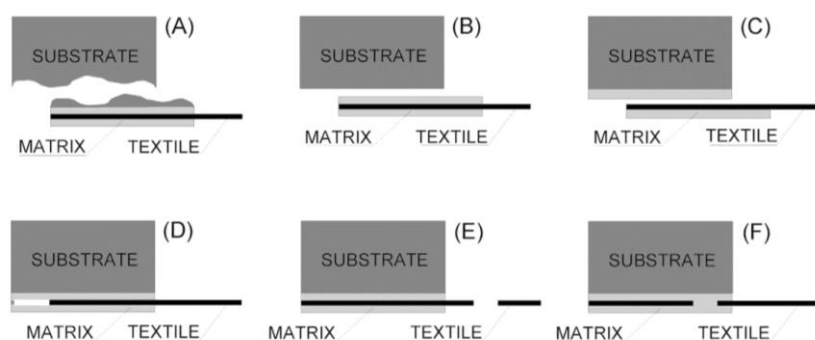


Fig. 2.16. Modalità crisi di adesione in compositi FRCM (Ascione et al. 2015)

L'insorgere di una modalità di crisi piuttosto di un'altra dipende dalle proprietà del supporto, dalla resistenza a taglio della matrice, dalla resistenza a trazione della rete di fibra, dall'adesione e dalla capacità dei due materiali costituenti di ingranarsi tra di loro. Generalmente, le modalità di crisi più frequenti negli FRCM sono legate al fenomeno dello scorrimento della fibra nella matrice (modalità D) o all'insorgere di fenomeni di delaminazione all'interfaccia fibra-matrice (modalità C), entrambi legati alla perdita di adesione tra i due materiali costituenti il composito. La matrice inorganica si caratterizza per valori di resistenza simili a quelli del substrato e, se correttamente applicata (de Felice et al. 2014, Donnini 2016), per un'ottima compatibilità ed una buona adesione con il materiale di supporto, fattori che escludono il manifestarsi di una crisi di tipo A a meno di presenza di una superficie di supporto degradata o di una matrice particolarmente rigida (De Santis et al. 2017). Una superficie di supporto eccessivamente liscia può condurre all'insorgere di una crisi di tipo B.

Le diverse modalità di crisi riscontrabili danno luogo a dei grafici carico-spostamento che si differenziano nell'andamento successivo al raggiungimento del carico di picco (Fig. 2.17): nelle prime tre modalità (A, B e C) generalmente si osserva un ramo a carico quasi costante, seguito da una crisi di tipo fragile (Fig. 2.17a); la modalità di crisi D presenta, invece, un ramo decrescente, dovuto allo scorrimento della fibra all'interno della matrice ed al comportamento telescopico della stessa, seguito da un ramo finale a carico costante (Fig. 2.17b). In letteratura tale comportamento è stato riscontrato in particolare nel caso di compositi costituiti da rete di fibra in carbonio, in PBO o in acciaio (de Felice et al. 2014, D'Antino et al. 2016, Caggeggi et al. 2017, Carozzi et al. 2017, De Santis et al. 2017). Nel caso di crisi di tipo E, la rottura della fibra esterna alla matrice determina un comportamento fragile del tipo rappresentato in figura 2.17c. La rottura dei multi-filamenti internamente alla matrice (modalità F) comporta una repentina perdita di carico; successivamente lo sfilamento dalla matrice di tali multi-filamenti ed il loro comportamento telescopico determinano un ramo finale a carico costante (Fig. 2.17d). Le crisi E ed F sono state riscontrate in compositi FRCM costituiti da una rete di fibra a maglia larga o con caratteristiche resistenti basse, come la rete di fibra di basalto e quella di vetro (de Felice et al. 2014, Carozzi et al. 2014, De Santis et al. 2017, Lignola et al. 2017, Leone et al. 2017, Donnini et al. 2016, 2017).

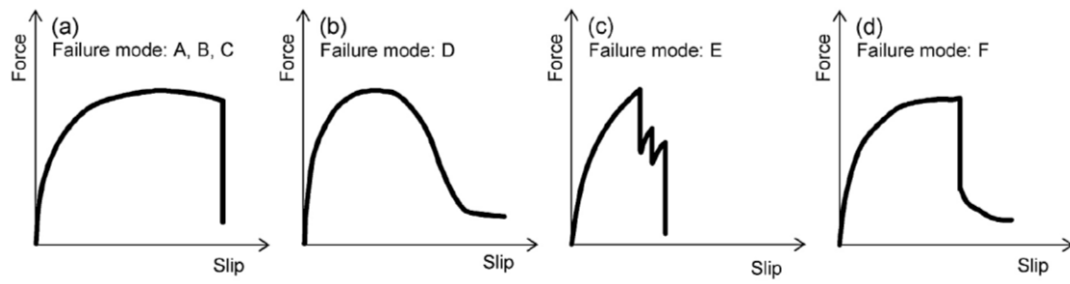


Fig. 2.17. Grafici forza-scorrimento globale in relazione alla modalità di crisi di adesione in compositi FRCM (Ascione et al. 2015)

2.3.2.1. Single-Shear Test (SST)

Nelle prove SST il provino è costituito da un elemento di supporto in laterizio, in muratura o in calcestruzzo sul quale è applicata una striscia di rinforzo FRCM. La rete di fibra, di lunghezza maggiore rispetto all'elemento di supporto, in parte è adesa ed impregnata dalla malta ed in parte è libera. All'estremo libero della rete di fibra è applicata la forza di trazione. La modalità con cui il provino è bloccato nella macchina di prova e la modalità con cui il carico è trasferito alla rete di fibra, possono variare. Come si vedrà nel seguito, le diverse configurazioni prevedono tutte un telaio rigido che permette di fissare il provino alla macchina garantendo l'assenza di spostamenti o rotazioni del provino durante il test e l'allineamento della rete di fibra con la macchina di prova. Tale configurazione permette l'applicazione diretta del carico al composito e, di conseguenza, la sua diretta valutazione. Inoltre la prova si caratterizza per la semplicità di allestimento e la possibilità di misurare lo scorrimento agli estremi della superficie di adesione del composito. Grazie a tali aspetti vantaggiosi la prova SST risulta quella maggiormente impiegata in letteratura (De Santis et al. 2017). In Carloni et al. (2013, 2014), Sneed et al. (2014), D'Antino et al. (2014, 2015a, 2015b, 2016) e Sabau et al. (2017) vengono eseguite prove SST su provini costituiti da prismi di calcestruzzo rinforzati mediante compositi FRCM. Questi sono costituiti da una striscia di rete di fibra di lunghezza maggiore rispetto all'altezza degli elementi di supporto in calcestruzzo, ai quali sono applicati tramite malta cementizia. All'estremità non adesa della rete è applicato il carico, in modo tale da sollecitare direttamente la fibra a trazione. Al fine di bloccare il prisma di calcestruzzo, è stato utilizzato un telaio metallico fissato con dei bulloni alla macchina di prova. Una piastra metallica è stata posta sulla sommità del blocco per distribuire uniformemente le pressione sviluppata dal telaio durante il test (Fig. 2.18). I diversi studi analizzano il comportamento di adesione dei compositi FRCM al variare di alcuni parametri, fornendo una descrizione dettagliata del legame carico-spostamento (§ 2.4).

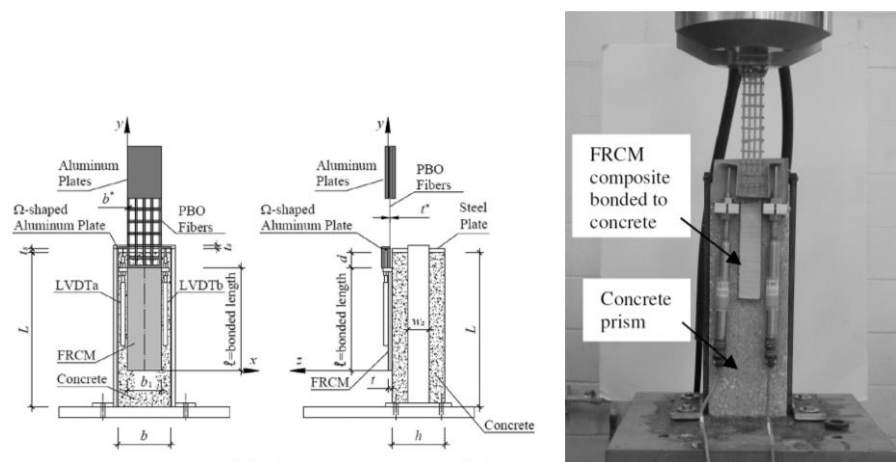


Fig. 2.18. Prova SST: schema configurazione tipo (Carloni et al. 2013)

In Carloni et al. (2013), per evitare danneggiamenti della rete di fibra a causa della pressione esercitata dalle ganasce della macchina di prova e garantire una distribuzione uniforme del carico, all'estremità della rete sono state fissate, mediante resina epossidica, delle piastre in alluminio. I blocchi in calcestruzzo sono stati

rinforzati con composito PBO-FRCM, variando la lunghezza e la larghezza di adesione e lo spessore dello strato superiore di matrice. I test hanno evidenziato che la perdita di adesione avviene lungo la seconda interfaccia (interfaccia matrice-fibra), dimostrando l'assenza di un ruolo da parte del substrato nel meccanismo di rottura. Dalle curve carico-spostamento è stato osservato che, dopo un primo tratto lineare, la risposta assume un andamento non lineare fino all'istaurarsi del fenomeno di debonding delle fibre dalla matrice; oltre questo tratto il carico applicato aumenta a causa dell'ingranamento fibra-matrice e dell'attrito filamento-filamento che si genera per effetto del comportamento telescopico dei multi-filamenti. Raggiunto il carico di picco il meccanismo resistente è completamente attivo. L'ultima parte della curva assume, quindi, un andamento decrescente fino al raggiungimento di un valore costante dovuto al solo attrito. Alcuni provini sono stati privati dello strato esterno di matrice; dai risultati è emersa una riduzione della fase non-lineare pre-carico di picco ed una maggiore riduzione del carico in fase di propagazione della frattura, mentre la forza massima media è risultata simile ai primi provini, suggerendo un apporto resistente ininfluente del secondo layer di malta. Nonostante i risultati ottenuti gli autori hanno osservato che lo strato superiore di matrice agisce come un vincolo generando un effetto di confinamento sulla rete di fibra, ed è, quindi, ragionevole supporre che il meccanismo di trasferimento delle tensioni e i meccanismi di crisi siano in qualche misura influenzati dalla presenza di tale strato.

Una configurazione di prova simile è presente in D'Antino et al. (2014, 2015a, 2016), dove l'estremità della rete di fibra è pressata tra due piastre fissate con dei bulloni ed inserite tra le ganasce della macchina di prova (Fig. 2.19).

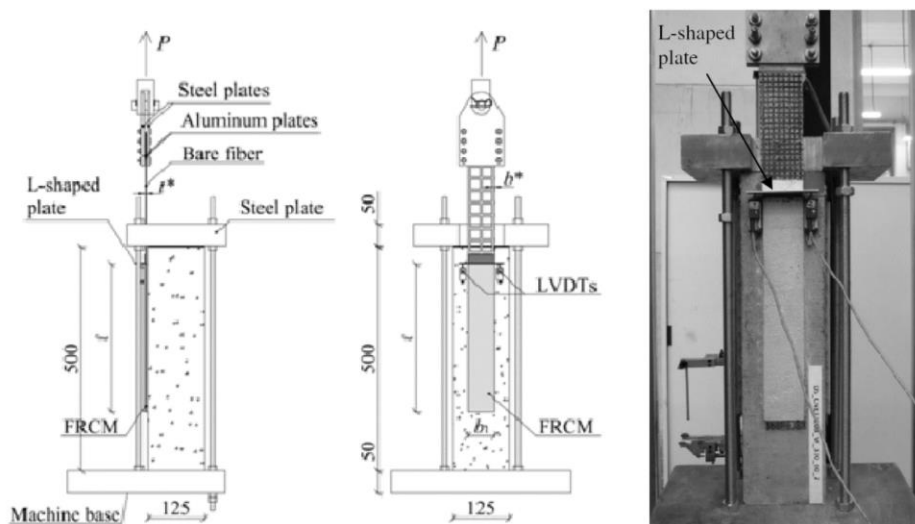


Fig. 2.19. Prova SST (D'Antino et al. 2015b)

I risultati ottenuti hanno confermato quelli presentati in Carloni et al. (2013) ed hanno permesso di dimostrare la presenza di una lunghezza efficace di adesione, ovvero di una lunghezza massima oltre la quale non si registra un incremento del carico di adesione. In relazione ai risultati ottenuti da provini con lunghezza di adesione maggiore di quella efficace, è stato appurato che (D'Antino et al. 2015b) il valore del carico di picco è maggiore all'aumentare della lunghezza di adesione grazie al contributo dell'ingranamento fibra-matrice e del comportamento telescopico, mentre il carico corrispondente alla perdita di adesione

rimane costante. Nonostante sia possibile presupporre un effetto larghezza del singolo multi-filamento a causa della distribuzione non uniforme delle tensioni al suo interno, gli autori non hanno osservato un effetto larghezza globale per compositi con larghezza maggiore di 34 mm. Inoltre, data la geometria discreta della rete di fibra e la distribuzione stocastica delle proprietà di adesione, i multi-filamenti hanno mostrato valori di scorrimento non uniformi tra di essi. Ciò comporta una distribuzione non uniforme del carico nella sezione del composito ed il raggiungimento della crisi in modo non simultaneo dei multi-filamenti (Carloni et al. 2014, Sabau et al. 2017).

Come precedentemente descritto, il comportamento di adesione è funzione di numerosi fattori. Tra questi, l'influenza delle caratteristiche meccaniche e del trattamento superficiale del supporto sono state studiate in D'Antino et al. (2015a). I risultati hanno mostrato un ruolo ininfluente del trattamento superficiale del supporto: la perdita di adesione si è localizzata all'interfaccia fibra-matrice, ad eccezione dei provini per i quali la presenza di una superficie del supporto particolarmente liscia, e priva di trattamento superficiale, ha indotto il distacco del composito dal supporto stesso.

Nei SST la necessità di bloccare il provino tramite un telaio rigido comporta l'insorgere di forze di compressione non allineate con la forza di trazione applicata alla rete di fibra. Tale eccentricità conduce a modalità di crisi miste che possono influire sui risultati della prova. L'effetto di tale eccentricità è stato studiato in D'Antino et al. (2016), in cui sono stati realizzati e testati alcuni provini privati dello strato esterno di matrice. Grazie a tale accorgimento è stato osservato che, dopo l'insorgere del fenomeno di debonding, all'aumentare dello scorrimento globale la rete di fibra tende a sollevarsi a causa della presenza di componenti di peeling ortogonali al piano del rinforzo (meccanismo di frattura di I modo). Tale componente può essere limitata aumentando la lunghezza della fibra non impregnata nella matrice ed è comunque trascurabile se si considera l'effetto di confinamento del layer esterno della matrice (assente in tali provini), nonostante questo non abbia un considerevole contributo nella capacità portante del composito.

Configurazioni simili alle precedenti sono impiegate in letteratura per lo studio di compositi FRM applicati su supporti in materiale lapideo, in laterizio o in muratura (Fig. 2.20). Gli studi sperimentali (de Felice et al. 2014, Ascione et al. 2015, Carozzi et al. 2016, Ombres et al. 2016, Caggegi et al. 2017, Lignola et al. 2017) hanno dimostrato che le performance e le modalità di crisi dipendono dalla combinazione fibra-matrice-supporto e dalle caratteristiche meccaniche dei materiali impiegati. In particolare, sono state riscontrate resistenze di adesione maggiori del caso di matrici più resistenti e tessuti più rigidi. Sono state osservate tre modalità di crisi predominanti: perdita di adesione all'interfaccia substrato-matrice nel caso di lunghezze di adesione limitate, perdita di adesione all'interfaccia matrice-fibra e scorrimento della fibra all'interno della matrice osservate nel caso di lunghezze di adesione adeguate. Nel caso in cui la crisi sia avvenuta per scorrimento della fibra all'interno della malta o per rottura telescopica senza un adeguato fenomeno di debonding, la resistenza massima registrata è risultata paragonabile a quella ottenuta dalle prove di trazione diretta su provini di composito. In questi casi il mancato sfruttamento delle proprietà meccaniche del tessuto è indice di uno scarso legame di adesione fibra-matrice.

In Ombres et al. (2016) all'aumentare della lunghezza di adesione (variabile tra i 150 e i 300 mm) non si è riscontrata un'apprezzabile variazione del carico massimo, per cui gli autori hanno potuto determinare una lunghezza effettiva di adesione di circa 150 mm.

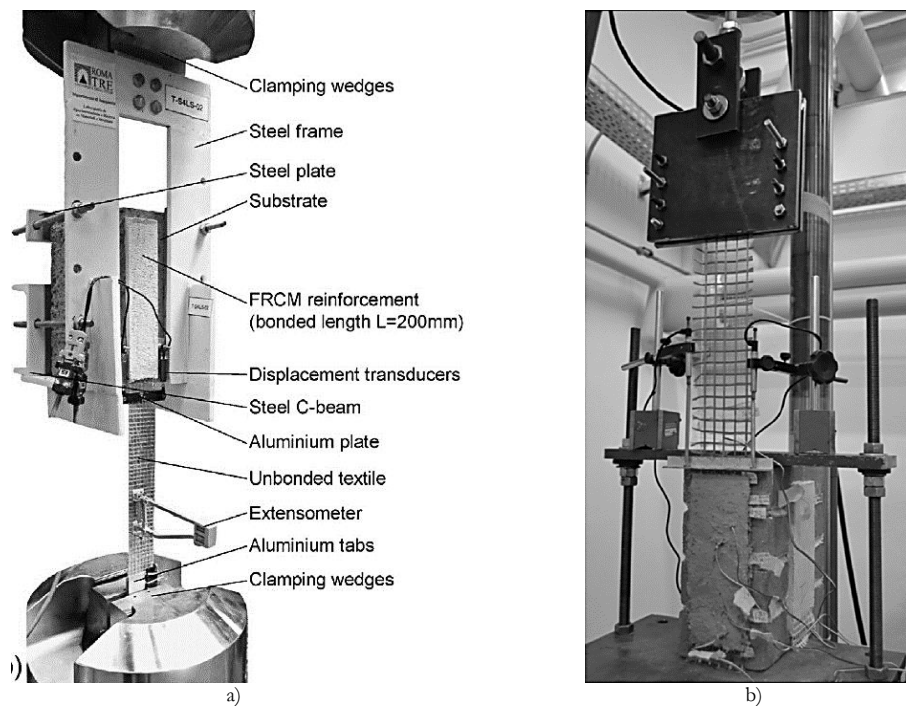


Fig. 2.20. Prova SST: a) Ascione et al. (2015); b) Carozzi et al. (2016)

Una configurazione differente prevede l'utilizzo di un martinetto meccanico (tipicamente impiegato per prove di adesione condotte in situ) per applicare la forza di trazione alla rete di fibra (Fig. 2.21). Data la configurazione dell'apparato, la prova viene definita "prova di strappo a taglio" (Olivito et al. 2012) ed è suggerita all'interno delle istruzioni CNR-DT 200 R1 (2013) tra le prove semi-distruttive da eseguire per il controllo delle caratteristiche meccaniche del sistema di rinforzo FRP in opera. Il set-up consiste nel montaggio di un elemento metallico di contrasto con il quale bloccare il provino, mentre il rinforzo viene ancorato mediante una coppia di piastre metalliche alle quali si collega il martinetto meccanico, che attraverso un cilindro di spinta applica la forza di trazione al tessuto. In Olivito et al. (2012) e Ombres (2015) vengono testati con tale apparato di prova compositi applicati su supporto in calcestruzzo. I risultati ottenuti sono risultati in accordo con quelli presentati da altri autori ed ottenuti con altri apparati di prova. In particolare, è stato dimostrato che la perdita di adesione avviene con modalità diverse al variare della lunghezza di adesione e del quantitativo di rete di fibra. La modalità più ricorrente è quella governata dallo scorrimento della fibra all'interno della matrice inorganica, mentre all'aumentare dei layers di fibra la crisi viene raggiunta per delaminazione alla seconda interfaccia. La lunghezza ottimale di adesione del rinforzo è compresa tra 150 e 200 mm ed il comportamento del sistema è influenzato dalla sua larghezza (quindi dal numero di multi-filamenti longitudinali).

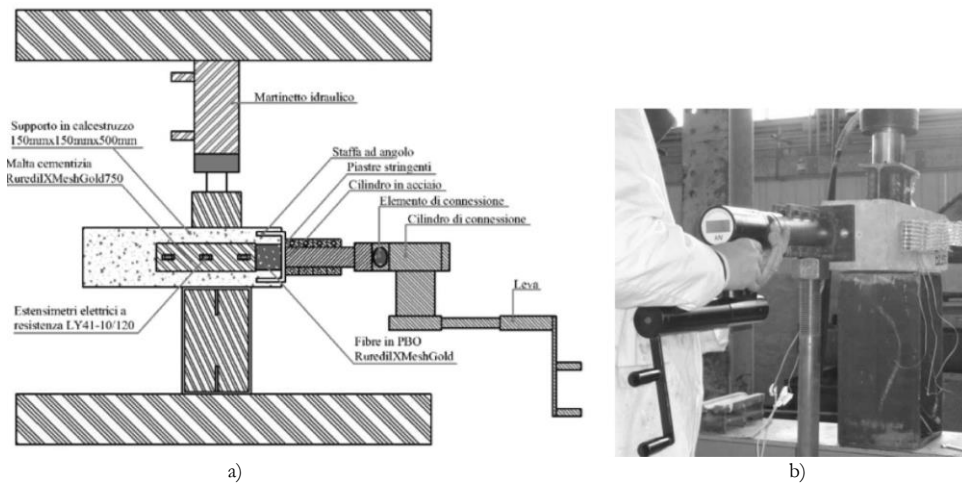


Fig. 2.21. Prova di strappo con martinetto meccanico (Olivito et al. 2012)

Ulteriori varianti di prova SST sono rintracciabili in letteratura in relazione agli studi sperimentali sui compositi FRP. In particolare, in Rotunno et al. (2015) i provini, costituiti da un unico mattone rinforzato mediante una striscia di composito FRP, presentano una delle due facce di dimensioni maggiori adesa ad un elemento metallico ad "L", a sua volta fissato alla macchina di prova. L'estremità libera della fibra è avvolta e fissata con resina epossidica ad un cilindro, tramite il quale viene applicata la forza di trazione al composito (Fig. 2.22).

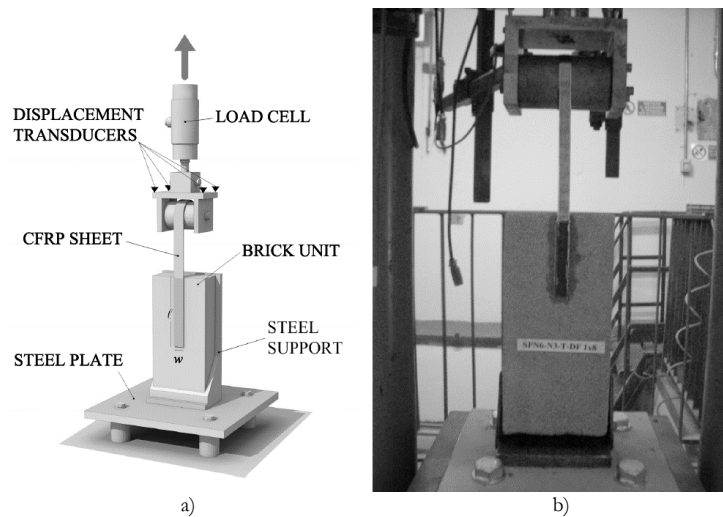


Fig. 2.22. Prova SST (Rotunno et al. 2015)

2.3.2.2. *Double-Shear Test (DST)*

Per quanto riguarda la tipologia DST, questa presenta una configurazione più complessa e variabile. Una variante prevede il rinforzo dell'elemento in laterizio, calcestruzzo o muratura attraverso una striscia di rete di fibra piegata ad "U", le cui estremità sono applicate, tramite la matrice, su due facce contrapposte dell'elemento di supporto. Alla porzione di rete di fibra non adesa viene applicato il carico tramite un cilindro in acciaio collegato, mediante una cerniera in acciaio, alla macchina di prova. Un telaio metallico rigido fissa l'elemento di supporto alla macchina di prova, evitando possibili spostamenti o rotazioni del provino durante il test. La possibilità del cilindro di ruotare permette l'assestamento del provino durante la prova ed una equa ripartizione del carico tra i due compositi.

Una seconda configurazione prevede la realizzazione di provini costituiti da due elementi di supporto accostati di testa ed uniti da due strisce continue di composito applicate sulle due facce contrapposte degli elementi stessi. Ne risultano quattro superfici di adesione. Gli elementi di supporto sono separati e mantenuti allineati durante la prova da un telaio rigido, fissato alla macchina di prova e tale da applicare il carico in modo da sollecitare i compositi a trazione. Tale variante presenta una maggiore complessità, nonché la difficoltà di misurare lo scorrimento agli estremi delle quattro superfici di adesione. A differenza dei SST, entrambe le varianti dei DST da un lato presentano una configurazione simmetrica che garantisce una distribuzione uniforme del carico nel provino, ma dall'altro non consentono una valutazione diretta delle tensioni. Inoltre, all'aumentare delle superfici di adesione corrisponde la valutazione di una capacità di adesione minore: la distribuzione stocastica delle proprietà di adesione nei compositi FRCM, a causa dei numerosi fattori che vi influiscono, comporta la registrazione del carico massimo nel composito caratterizzato dalle proprietà resistenti minori (D'Antino et al. 2014, Sabau et al. 2017, De Santis et al. 2017). Le prove di adesione DST risultano meno frequenti in letteratura a causa delle maggiori difficoltà sia per quanto riguarda la realizzazione dei provini e l'allestimento dell'apparato di prova, sia in relazione all'ottenimento di misurazioni indirette della tensione nel composito.

Tra le due varianti la prima risulta la più diffusa in letteratura. In Focacci & Mantegazza (2009), Faella et al. (2009a) e D'Ambrisi et al. (2013b) gli elementi di supporto sono costituiti da due pile di mattoni unite tramite due strisce di rinforzo C-FRCM. La trazione è indotta nei compositi o attraverso due piastre di acciaio interposte tra le due pile ed unite attraverso delle barre di acciaio filettate alla macchina di prova (Fig. 2.23a) o attraverso due telai in acciaio all'interno dei quali sono disposte le due pile (Fig. 2.23b). Il medesimo apparato di prova è stato impiegato in D'Ambrisi et al. (2012), D'Ambrisi et al. (2013a) e Sneed et al. (2015) per testare provini costituiti da due blocchi di calcestruzzo rinforzati con un composito PBO-FRCM. Indipendentemente dal materiale del supporto, in tutti i test è stato registrato un incremento dello scorrimento della fibra all'interno della matrice all'aumentare spostamento relativo tra le due pile, fino al raggiungimento della crisi. Questa viene raggiunta per delaminazione a livello della seconda interfaccia, successivamente al verificarsi di consistenti scorrimenti della rete di fibra. La resistenza ottenuta è risultata indipendente dalla lunghezza di adesione, pertanto sono state valutate lunghezze efficaci inferiori a 110 mm per i provini con supporto in muratura e compresa tra i 250 e i 300 mm nel caso di supporto in calcestruzzo.

Un apparato simile è presente in Olivito et al. (2016), dove gli elementi di supporto sono costituiti da due mattoni uniti da due strisce di composito di diversa natura (Flax-FRCM e PBO-FRCM). I mattoni di supporto sono compressi all'interno di piastre di acciaio unite mediante quattro barre filettate, in modo da costituire due telai rigidi indipendenti uniti alla macchina di prova (Fig. 2.23c)

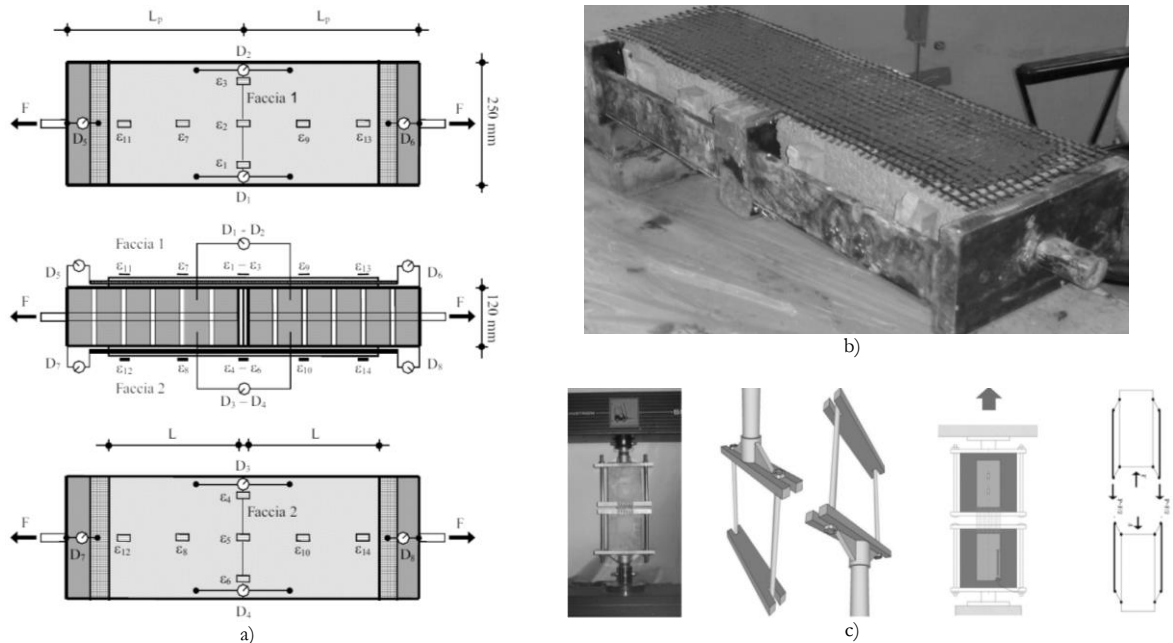


Fig. 2.23. Prova DST: a) Focacci & Mantegazza (2009), b) Faella et al. (2009a), c) Olivito et al. (2016)

L'influenza di fattori come la presenza di giunti di malta negli elementi di supporto in muratura, l'impiego di superfici di supporto ad andamento curvilineo, la quantità di rete di fibra e la lunghezza di adesione sul comportamento di adesione, sono stati studiati in Carbone (2010) attraverso un'ampia campagna sperimentale condotta mediante il ricorso a due differenti apparati DST. Seppure non sia stato osservato un comportamento sostanzialmente differente tra supporti in laterizio e supporti in muratura, la presenza del giunto di malta influenza l'evoluzione della delaminazione, rappresentando la zona in cui questa si innesca o in cui si localizza la fessurazione trasversale della lamina con lo scorrimento delle fibre, con conseguente riduzione della resistenza di adesione. Per i provini con elementi in laterizio è stato registrato un aumento del carico ultimo al crescere della lunghezza di adesione, fino ad un valore di 165 mm, ritenuto prossimo alla lunghezza di adesione efficace. Le modalità di crisi riscontrate sono quattro spesso combinate tra loro, ovvero, secondo la dicitura riportata in figura 2.16:

- B. delaminazione all'interfaccia supporto-matrice;
- C. delaminazione all'interfaccia matrice-fibra;
- D. sfilamento della fibra dalla matrice;
- E. rottura a trazione della fibra.

Nei provini in solo laterizio con una lunghezza di adesione di 55, 110 e 165 mm si è manifestata la modalità di rottura D con una lesione ortogonale alla direzione di applicazione del carico; per lunghezze di adesione

maggiori si sono ottenute le crisi di tipo B e C combinate con la modalità D; per i provini con una lunghezza di adesione di 220 mm è stata osservata una microfessurazione con crisi di tipo C. Per i provini in muratura la crisi è raggiunta per combinazione delle modalità B, C e D nonostante la lunghezza di adesione sia maggiore, a causa della discontinuità dei giunti di malta. Per i provini curvilinei il collasso è di tipo B e C con superficie di delaminazione che si sposta dal piano della fibra verso quello del substrato. In definitiva è stato appurato che lo sfilamento della rete di fibra dalla matrice può essere limitato aumentando la lunghezza di adesione e il numero dei layers di rinforzo, migliorando, così, le prestazioni di adesione e spostando la modalità di collasso dalla crisi dei multi-filamenti di fibra alla delaminazione interlaminare.

La seconda variante di prova DST (Fig. 2.24a) prevede l'impiego di una unica striscia di rete di fibra piegata ad "U"; le due estremità sono applicate sulle due facce contrapposte dell'elemento di supporto, il quale è bloccato e fissato alla macchina di prova tramite un telaio rigido. Il carico è applicato alla porzione non adesa di rete di fibra mediante un elemento cilindrico collegato alla cella di carico della macchina di prova (de Felice et al. 2014, Carozzi et al. 2014, 2015, Donnini et al. 2016, 2017).

In Carozzi et al. (2014) tale configurazione di prova è stata utilizzata per indagare l'influenza della matrice sul comportamento di adesione. I provini, costituiti da un unico mattone e da una pila di mattoni come supporti, sono stati rinforzati con compositi G-FRCM impiegando sia una matrice inorganica che una matrice di calce idraulica. I test hanno mostrato come il comportamento di adesione sia funzione del tipo di matrice.

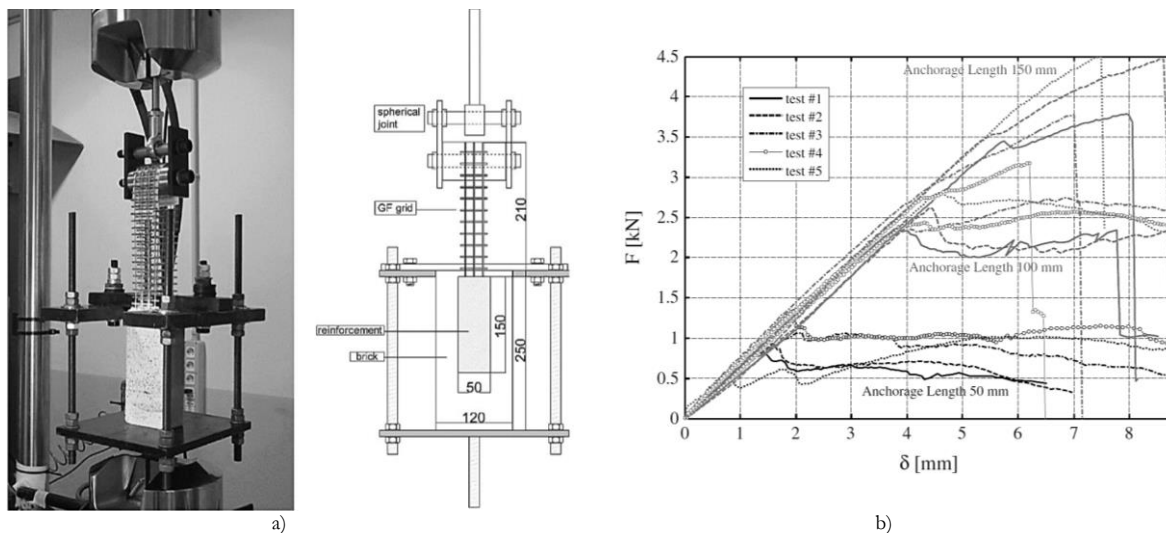


Fig. 2.24. Prova DST: a) configurazione della prova; b) grafici carico-spostamento al variare della lunghezza di adesione (Carozzi et al. 2014)

I provini caratterizzati dall'uso di malta di cemento, hanno esibito per lunghezze di adesione di 50 e 100 mm una crisi per scorrimento della fibra all'interno della matrice (Fig. 2.16 D); mentre per una lunghezza superiore e pari a 150 mm la crisi è sopraggiunta per rottura della fibra nella zona non adesa (Fig. 2.16 E). All'aumentare della lunghezza di adesione è stato, quindi, ottenuto un incremento del carico ultimo

accompagnato da un comportamento meno duttile (Fig. 2.24b). Per i provini con matrice di calce idraulica è stata osservata una crisi di adesione localizzata nella prima interfaccia (Fig. 2.16 B) nel caso di lunghezza di adesione pari a 100 mm, e nella seconda interfaccia (Fig. 2.16 C) con una lunghezza maggiore (150 mm). In entrambi i casi il carico ultimo è risultato molto inferiore rispetto a quello relativo al sistema di rinforzo con malta di cemento. Per i provini costituiti da pile di mattoni come supporto è stata ottenuta una crisi per rottura della matrice, seguita dalla crisi a trazione della fibra.

La medesima configurazione di prova DST è stata impiegata in Donnini et al. (2016) e Donnini et al. (2017) al fine di indagare l'influenza del grado di impregnazione della rete di fibra con resine organiche, del numero di layers di rinforzo, della temperatura di esposizione del sistema composito e del trattamento del substrato attraverso l'applicazione di primer sulla capacità di adesione di compositi C-FRCM su supporto in laterizio. È stato dimostrato un incremento delle performance nel caso di pre-impregnazione della rete di fibra attraverso sostanze organiche non eccessivamente rigide, con una riduzione del comportamento telescopico dei multi-filamenti di fibra. Dopo un'esposizione a 120 C° per più di 60 minuti il sistema C-FRCM con fibra secca ha mantenuto le sue caratteristiche e le sue proprietà, mentre nel caso di fibra pre-impregnata i risultati hanno mostrato una riduzione del 61% del carico di picco, nonché una sostanziale perdita di resistenza al fuoco. Il trattamento del substrato tramite l'utilizzo di primer permette di migliorare le proprietà di adesione, prevenendo crisi da distacco dal supporto.

La realizzazione sia di prove DST che di prove SST permette di evidenziare le differenze in termini di risultati tra le due tipologie di prova (de Felice et al. 2014, Sneed et al. 2015, D'Antino et al. 2016, De Santis et al. 2017). In letteratura è stato dimostrato come i risultati, sia in termini di carico che di modalità di crisi, siano simili. La prova SST permette una valutazione immediata del carico che, generalmente, risulta più elevato rispetto alle prove DST, suggerendo come l'eccentricità della prova non abbia effetti significativi sui risultati (D'Antino et al. 2016). Tale fatto è riconducibile alla modalità di crisi osservata nei DST, che viene raggiunta nel composito caratterizzato dalle proprietà di adesione inferiori. Dato il diverso comportamento dei due compositi, il provino subisce delle rotazioni e vede l'insorgere di componenti della forza fuori dal piano, che, sommandosi all'effetto dell'ingranamento della fibra con la matrice e del comportamento telescopico, possono condurre a valori di carico minori rispetto agli SST. Gli aspetti descritti hanno spinto gli autori a suggerire il ricorso alla tipologia di prova SST nonostante la sua intrinseca eccentricità.

Dai vari studi sperimentali descritti è evidente come il comportamento dei compositi FRCM applicati su supporti in laterizio, in muratura o in calcestruzzo dipenda dalle caratteristiche superficiali del supporto, della matrice e della rete di fibra e dalla loro interazione. Nel caso in cui le combinazioni matrice-fibra e matrice-supporto e le modalità di applicazione siano adeguate, il comportamento del sistema composito di rinforzo non risulta influenzato dalle caratteristiche meccaniche del substrato, ma solamente da quelle dei due materiali fibra e matrice. Sono state riscontrate più modalità di crisi, spesso combinate tra di loro, dipendenti dalle caratteristiche dei singoli materiali e dalla loro interazione. Nonostante ciò, date le caratteristiche meccaniche simili di matrice inorganica e supporto, la loro buona compatibilità e l'elevata

resistenza a trazione della rete di fibra, la modalità di crisi prevalente è risultata quella per perdita di adesione interlaminare localizzata all'interfaccia matrice-fibra, accompagnata da consistenti scorrimenti fibra- matrice e scorrimenti relativi tra i filamenti costituenti il singolo multi-filamento (comportamento telescopico). Tale comportamento è alla base della maggiore duttilità che caratterizza i compositi FRCM. La geometria discreta della rete di fibra e la distribuzione stocastica delle proprietà di adesione, comportano un differente comportamento dei multi-filamenti e dei compositi di rinforzo del provino nel caso di DST.

2.3.2.3. Strumentazione prove SST e DST

Per la valutazione del comportamento di adesione, la definizione dei parametri che influenzano il meccanismo di trasferimento delle tensioni e l'individuazione della relazione tra queste e lo scorrimento, risulta fondamentale disporre di un metodo efficace per la misurazione degli spostamenti lungo il composito. Per far ciò in letteratura è fatto largo uso dei tradizionali sensori utilizzati anche per le prove di trazione diretta su provini di composito (§ 2.3.1.3), come i trasduttori di spostamento LVDT e gli strain gauges. I primi permettono di valutare lo scorrimento globale all'estremità caricata del composito (Carloni et al. 2013, 2014, Sneed et al. 2014, D'Antino et al. 2014, D'Ambrisi et al. 2013b, Sabau et al. 2017, Lignola et al. 2017). I secondi, attraverso l'acquisizione di misurazioni locali di deformazione, consentono la determinazione del profilo di deformazione assiale e la determinazione della lunghezza efficace di adesione (D'Antino et al. 2014, D'Ambrisi et al. 2013a, Sabau et al. 2017). Tali misurazioni sono state impiegate in letteratura per la valutazione del comportamento di adesione mediante un approccio analitico nell'ambito dell'energia di frattura (D'Antino et al. 2014, Focacci et al. 2017). Se da una lato i trasduttori LVDT forniscono solamente misure globali di scorrimento, gli strain gauges, essendo applicati sulla superficie esterna del composito, non permettono la valutazione puntuale della deformazione dei multi-filamenti e, inoltre, risentono di alcuni fattori come il pattern fessurativo della matrice, la distribuzione non uniforme del carico tra i multi-filamenti (Carloni et al. 2014), l'eccentricità insita nell'apparato di prova (D'Antino et al. 2016). In Sabau et al. (2017) un metodo ICS (Image Correlation System) viene sperimentato e confrontato con i risultati ottenuti da strumenti di misura tradizionali, mediante una campagna sperimentale basata su prove SST. Il metodo implementa la tecnica "point tracking" e la tecnica DIC (Digital Image Correlation). La prima è stata utilizzata per valutare lo spostamento e la deformazione dei multi-filamenti attraverso LVDT e strain gauges virtuali. Per far ciò dei target con un diametro di 1.5 mm sono stati fissati sui multi-filamenti non impregnati dalla matrice. Spostamento e deformazione sono state computate valutando lo spostamento di tali target ai vari step di carico. La DIC ha permesso la valutazione dell'andamento del pattern fessurativo e della deformazione sulla superficie esterna della matrice. Per far ciò sul composito è stata applicata una base di vernice bianca e, successivamente spruzzata con una vernice nera in modo da creare un pattern di punti ad alto contrasto. I risultati ottenuti hanno mostrato una buona correlazione con i dati ricavati dagli strumenti tradizionali.

2.3.2.4. Pull-off test

Il test di Pull-off rappresenta una modalità semplice di prova di adesione di materiali compositi. Tale prova è regolata dalla normativa ASTM C1583 (2004) “*Standard Test Method for Tensile Strength of Concrete Surfaces and the Bond Strength or Tensile Strength of Concrete Repair and Overlay Materials by Direct Tension (Pull-off Method)*” a cui fanno riferimento le AC434 (2003).

Per eseguire il test è necessario applicare con una resina epossidica un disco circolare in acciaio sulla superficie esterna del rinforzo, previamente tagliata con una carotatrice avente il medesimo diametro del disco in acciaio. Tramite la macchina di prova, viene impressa al disco una forza verticale di trazione, di cui viene registrato il valore corrispondente al distacco del disco dal composito.

Oltre al carico, di estrema importanza risulta la modalità di crisi. Le AC434, in accordo con quanto prescritto dalle ASTM C1583, individuano 4 modalità di crisi (Fig. 2.25) in base all'interfaccia in cui essa si localizza:

- a) crisi di adesione localizzata nel substrato;
- b) crisi di adesione all'interfaccia supporto-matrice;
- c) crisi di adesione all'interfaccia fibra-matrice;
- d) distacco del disco dal composito.

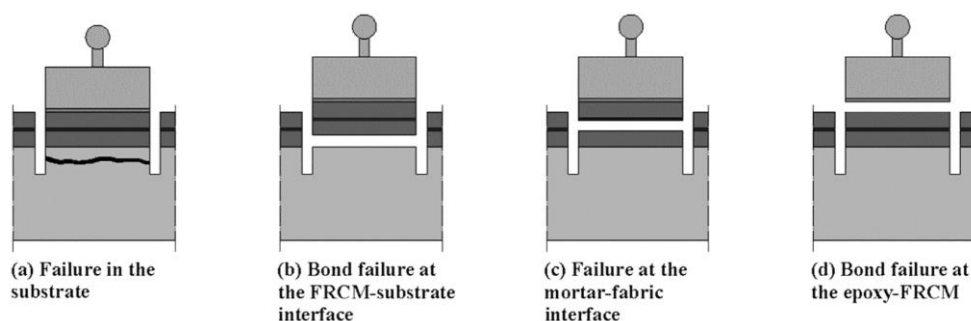


Fig. 2.25. Prova di Pull-off: modalità di rottura del provino (Donnini et al. 2016)

La prima versione delle AC434, sviluppata a partire dalle conoscenze relative ai compositi FRP, richiedevano come modalità di crisi predominante la crisi di tipo coesivo (a) con una tensione ultima di almeno 1.38 MPa, ottenuta dividendo il carico massimo per l'area totale del provino.

Successivamente, con il progredire delle conoscenze sui compositi FRCM, le AC434 furono modificate introducendo due differenti procedure in base alla modalità di crisi riscontrata: nel caso di crisi di tipo adesivo (b) o coesivo (a) il carico di rottura viene diviso per l'area di applicazione del carico stesso e la tensione ultima minima è fissata a 1.38 MPa; nel caso di crisi interlaminare di tipo (c) il carico viene suddiviso per l'area della rete, ossia l'area totale a meno della superficie coperta dalla rete di fibra, e la tensione ultima minima è pari a 2.76 MPa.

In Carozzi et al. (2015) sono state eseguite 23 prove di Pull-off su provini di composito FRCM applicati su un supporto in laterizio. Per l'esecuzione delle prove sono state impiegate diverse tipologie sia di rinforzo sia di supporto. Un primo gruppo di provini è costituito da una rete di fibra in vetro, applicata tramite matrice inorganica su mattoni in laterizio caratterizzati da una resistenza a compressione pari a 68.8 MPa ed

una resistenza a pull-off pari a 3.1 MPa. Tali provini, sottoposti a prova di Pull-off, hanno esibito una crisi localizzata o all'interfaccia matrice-fibra o all'interfaccia substrato-composito, rispettivamente con dei valori massimi di tensione di 1.48 MPa e 1.34 MPa inferiori a quelli ottenuti sui laterizi. Per i restanti provini sono state utilizzate tre tipologie di rete di fibra (PBO, carbonio e PBO, vetro), applicate su laterizi caratterizzati da una resistenza a compressione inferiore rispetto al primo gruppo di provini e pari a 20.8 MPa. In tutti i test è stata ottenuta una crisi localizzata nel substrato, con valori di tensione ultima pari a 1.08, 1.14 e 1.03 MPa, ovvero valori prossimi a quelli di resistenza a pull-off dei mattoni di supporto.

In Donnini et al. (2016) è stata indagata una serie di 28 provini costituiti da matrice inorganica abbinata a sette tipologie di fibra di carbonio, caratterizzate da differenti gradi di impregnazione. La modalità prevalente di crisi ottenuta è localizzata all'interfaccia fibra-matrice, dimostrando che il diverso trattamento della fibra non influisce sulla modalità di crisi a pull-off.

2.4. Comportamento di adesione

Per un sistema composito, si definisce lunghezza efficace di adesione L_{eff} la minima lunghezza di adesione necessaria per ottenere la massima forza di adesione F_{db} (Focacci 2008). Per lunghezze di adesione L maggiori di quella efficace L_{eff} il carico massimo trasferibile risulta pressoché costante nel caso di compositi FRP (Fig. 2.26b, linea tratteggiata), mentre per i compositi FRCM si registra un incremento di carico per effetto dell'ingranamento matrice-fibra e del comportamento telescopico (Fig. 2.26b, linea continua). Si deduce, quindi, come per ottenere la massima forza trasferibile sia necessario disporre di una lunghezza di adesione almeno pari alla lunghezza efficace del composito.

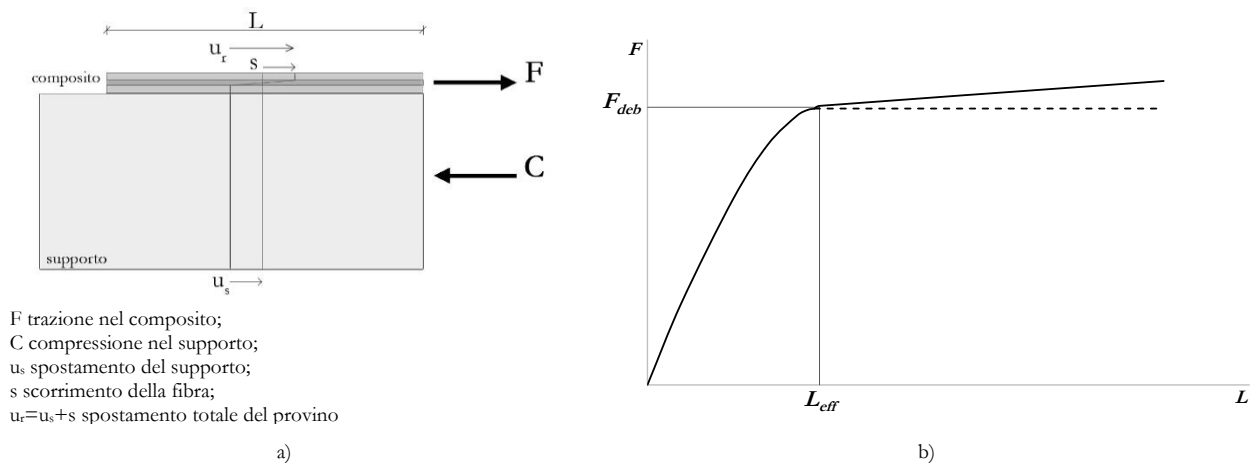


Fig. 2.26. a) Rappresentazione schematica di un composito FRCM sottoposto a trazione; b) rappresentazione schematica dell'andamento del carico applicato F in funzione della lunghezza di adesione del composito L

Si consideri lo schema riportato in figura 2.26a, nel quale la lunghezza di adesione L della striscia di composito FRCM risulta maggiore della sua lunghezza efficace L_{eff} . È possibile schematizzare la risposta ideale del composito in termini di carico-scorrimento globale in cinque fasi (Fig. 2.27):

- 1) Fase I – Fase di risposta elastica del composito, ovvero fase di risposta elastica dell'adesione fibra-matrice. La forza di trazione applicata provoca l'insorgere di tensioni tangenziali all'interfaccia fibra-matrice. Inizialmente la zona sollecitata risulta quella prossima all'estremo caricato del composito. Incrementando la forza applicata, tale zona si estende fino al raggiungimento, in corrispondenza dell'estremità del composito, della tensione tangenziale massima resistente.
- 2) Fase II – Fase crescente non lineare. L'incremento della forza applicata comporta una progressiva diminuzione delle tensioni tangenziali all'estremo caricato del composito, pertanto una porzione di composito più lontana risulterà sollecitata per sopperire a tale mancanza di resistenza. La zona di composito sollecitata risulta caratterizzata da un'estensione pari alla sua lunghezza efficace ed il valore di carico massimo attinto all'estremo caricato risulterà pari al carico di adesione (punto B). Ciò comporta l'innesco all'estremo caricato del processo di delaminazione con conseguente rilascio dell'energia di frattura immagazzinata.

- 3) Fase III – Ipotizzando una lunghezza della zona ancora adesa maggiore di quella efficace, aumentando ulteriormente il carico applicato il profilo delle tensioni tangenziali trasla verso l'estremo libero del composito al procedere della delaminazione. A differenza dei compositi FRP, superato il punto B si registra un incremento di carico dovuto all'ingranamento tra la rete di fibra e la matrice nella zona decoesa e al comportamento telescopico, fino al raggiungimento della crisi del composito (punto C) non appena la sollecitazione raggiunge l'estremità libera del composito.
- 4) Fase IV – Fase decrescente. La porzione di composito adesa risulta caratterizzata da una lunghezza inferiore a quella efficace, per cui il meccanismo di adesione non risulta totalmente stabilito con conseguente decremento del carico applicato.
- 5) Fase V – Nell'ultima fase la rete di fibra risulta oramai totalmente decoesa e la curva, sempre con andamento decrescente presenta un cambio di concavità fino al raggiungimento di un valore di carico costante associato all'effetto ingranamento tra rete di fibra e matrice.

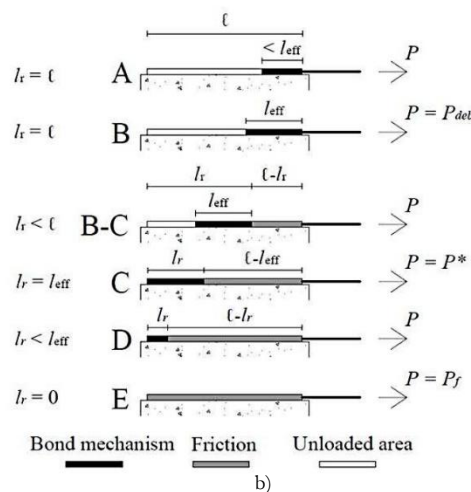
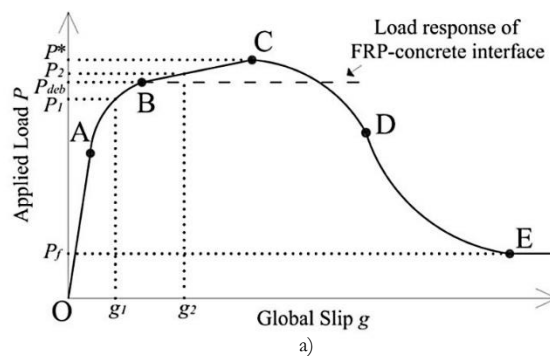


Fig. 2.27. Rappresentazione schematica a) della risposta carico-scorrimento globale e b) della traslazione del meccanismo di adesione in corrispondenza di differenti punti del grafico carico-scorrimento globale (D'Antino et al. 2014)

2.5. Modellazione del comportamento di adesione

La collaborazione tra il sistema composito di rinforzo e l'elemento di supporto avviene attraverso l'insorgere di tensioni tangenziali sulla superficie d'interfaccia. Il comportamento carico-scorrimento globale può essere descritto analiticamente a partire da una legge locale che correla in ogni punto della superficie di interfaccia la tensione tangenziale trasferita con lo scorrimento relativo fibra-matrice in quel punto:

$$\tau(x) = \tau[s(x)] \quad (2.1)$$

Tale legge ha un andamento tipico (Fig. 2.28), caratterizzato da un primo ramo crescente fino al raggiungimento della tensione tangenziale massima τ_m in corrispondenza di uno scorrimento s_m . In tale fase l'interfaccia soggetta agli scorrimenti $s(x) < s_m$ non risulta danneggiata. Segue un secondo ramo discendente. L'interfaccia è interessata dall'apertura di micro lesioni che permettono ancora il trasferimento delle tensioni tangenziali, fino ad una soglia massima di scorrimento s_u , in corrispondenza della quale si verifica l'apertura di una macro lesione. Questa genera il rilascio dell'energia immagazzinata, pari all'area sottesa al legame $\tau[s(x)]$. Pertanto tale energia, definita energia di frattura G_f , rappresenta il lavoro necessario per produrre la rottura di una superficie di interfaccia di area unitaria. Per scorrimenti $s(x) > s_u$, nonostante la matrice risulti lesionata l'ingranamento fibra-matrice e l'attrito tra i filamenti che costituiscono i multi-filamenti generano una tensione tangenziale residua costante e pari a τ_u .

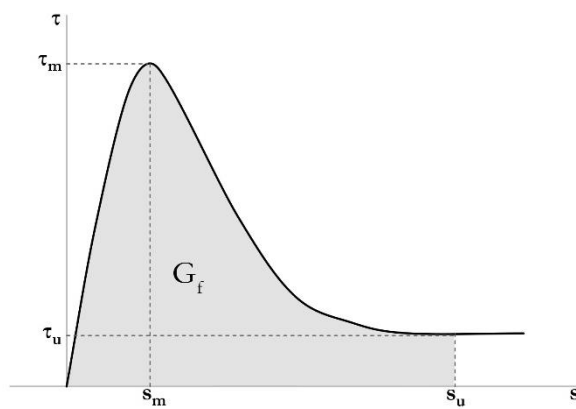


Fig. 2.28. Andamento tipico del legame locale di interfaccia

una legge locale $\tau[s(x)]$. A tal fine in letteratura sono state proposte diverse forme per la rappresentazione di quest'ultima (Fig. 2.29).

In letteratura sono presenti numerosi studi analitici relativi al fenomeno dell'adesione di compositi FRP (Focacci 2008, Focacci et al. 2017, Lu et al. 2005, Yuan et al. 2004, 2012, Carloni et al. 2014). Ben più limitati risultano invece le trattazioni relative all'adesione dei compositi FRCM (Zastrau et al. 2003, D'Ambrisi et al. 2012, 2013a, b, D'Antino et al. 2014, Carozzi et al. 2016, Focacci et al. 2017). L'approccio utilizzato risulta, comunque, simile a quello adottato per i compositi FRP e basato sull'assunzione di

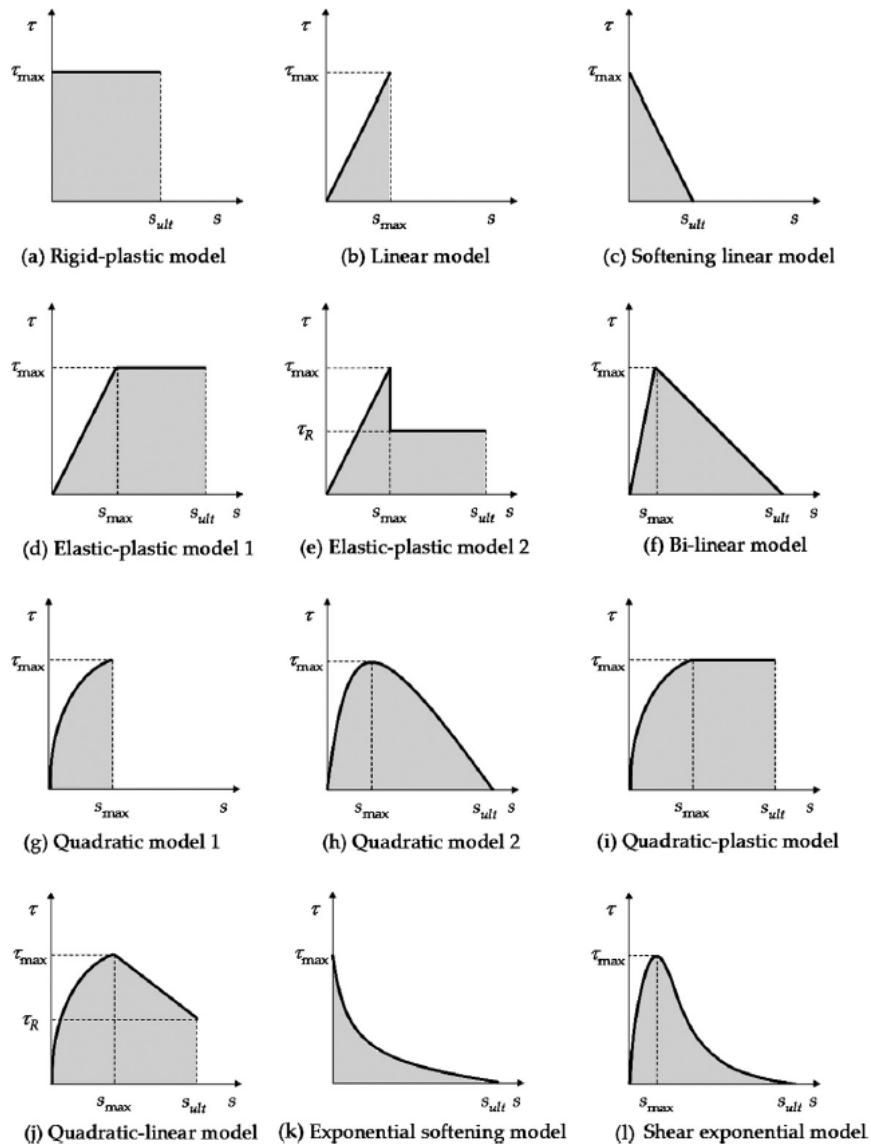


Fig. 2.29. Esempi di legami locali d'interfaccia presenti in letteratura (Biscaia et al. 2013)

In letteratura è stato dimostrato come il ricorso ad un modello semplificato (Yuan 2004, Di Tommaso et al. 2008, Carozzi et al. 2016) consenta di ottenere un'approssimazione accettabile delle relazioni globali forza-scorrimento.

2.5.1. Approccio locale

Si consideri una striscia di composito di lunghezza L maggiore della lunghezza efficace L_{eff} , soggetta ad una forza di trazione F (Fig. 2.30a) e siano t_f e b_f lo spessore e la larghezza del singolo multi-filamento.

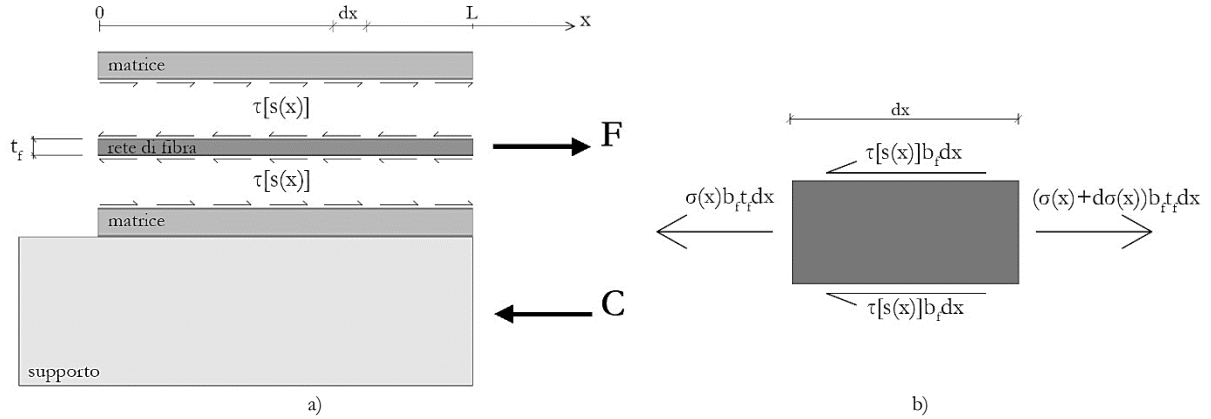


Fig. 2.30. Rappresentazione schematica a) della distribuzione delle tensioni tangenziali sulla seconda e sulla terza superficie di interfaccia; b) dello stato tensionale di un segmento infinitesimo dx di un multi-filamento di rete di fibra

Date le seguenti ipotesi:

- composito soggetto a solo sforzo assiale;
- fenomeni flessionali trascurabili;
- tensione normale $\sigma_f(x)$ in ogni punto del rinforzo di coordinata x uniformemente distribuita nella sezione trasversale del composito;
- interfaccia fibra-matrice soggetta a sole tensioni tangenziali;
- sezione trasversale del composito costante lungo la direzione delle sollecitazioni;

L'equilibrio di un segmento infinitesimo di un multi-filamento di rete di fibra di lunghezza dx (Fig. 2.30b) impone:

$$(\sigma_f(x) + d\sigma_f(x) - \sigma_f(x)) b_f t_f - 2 \tau(x) dx b_f = 0 \quad (2.2)$$

$$\frac{d\sigma_f(x)}{dx} = \frac{2}{t_f} \tau[s(x)] \quad (2.3)$$

Ipotizzando che la fibra abbia un comportamento lineare elastico a trazione, consideriamo l'equazione costitutiva:

$$\sigma_f(x) = E_f \varepsilon_f(x) \quad (2.4)$$

$$\frac{d\sigma_f(x)}{dx} = \frac{d\varepsilon_f(x)}{dx} E_f \quad (2.5)$$

La (2.3) può essere, quindi, espressa come segue:

$$\frac{d\varepsilon_f(x)}{dx} E_f = \frac{2}{t_f} \tau[s(x)] \quad (2.6)$$

Trascurando lo spostamento rigido del supporto si ha:

$$\frac{d\varepsilon_f(x)}{dx} = \frac{d^2s(x)}{dx^2} \quad (2.7)$$

Pertanto sostituendo la (2.7) nella (2.6) si ottiene:

$$\frac{d^2s(x)}{dx^2} = \frac{2}{t_f E_f} \tau[s(x)] \quad (2.8)$$

L'equazione differenziale del secondo ordine (2.8) nell'incognita $s(x)$ descrive il fenomeno di adesione in un composito FRCM. Assegnata la legge locale di adesione (2.1) ed imposte le condizioni al contorno del problema analizzato, la soluzione dell'equazione (2.8) permette la valutazione dell'andamento degli scorrimenti d'interfaccia $s(x)$. Noti gli scorrimenti $s(x)$, i corrispondenti andamenti delle tensioni tangenziali di interfaccia $\tau(x)$ e delle deformazioni nel rinforzo $\varepsilon_f(x)$ sono determinati rispettivamente attraverso la (2.1) e la (2.7). Infine, moltiplicando $\varepsilon_f(x)$ per E_f e per $E_f A_f$ si ricavano gli andamenti delle tensioni normali nel rinforzo $\sigma_f(x)$ e dello sforzo normale $N_f(x)$.

Dalla (2.6) è possibile ottenere il valore della forza applicata corrispondente alla perdita di adesione di un multi-filamento di rete di fibra:

$$F_{ab} = 2b_f \int_0^L \tau(x) dx \quad (2.9)$$

Moltiplicando tale forza per il numero di multi-filamenti longitudinali che compongono la striscia di composito, si ottiene il valore di carico corrispondente alla perdita di adesione del composito stesso.

La (2.9) evidenzia che la forza trasferibile per adesione è dipendente dall'ampiezza della superficie di interfaccia interessata dalle tensioni tangenziali ed il relativo valore massimo si ottiene quando tale superficie presenta un'ampiezza tale da far attingere il valore massimo s_2 dello scorrimento, ovvero quando essa presenta una lunghezza di adesione almeno pari a quella efficace L_{eff} .

2.5.2. *Approccio energetico*

Il valore del carico di debonding F_{db} può essere ottenuto in modo più immediato attraverso un approccio energetico (Focacci 2008, D'Antino 2014).

Sempre in riferimento allo schema riportato in figura 2.30a in cui $L \geq L_{eff}$, il lavoro compiuto dalle forze esterne, che generano le tensioni tangenziali di interfaccia, ed il lavoro interno, compiuto dalle tensioni normali che si generano nel composito, possono essere espressi come:

$$W_e = 2b_f \int_0^x \int_0^{s(x)} \tau[s(x)] ds \quad (2.10)$$

$$W_i = b_f t_f \int_0^x \left(\int_0^{s(x)} \sigma[\varepsilon(x)] d\varepsilon \right) dx = b_f t_f E_f \int_0^x \left(\int_0^{\varepsilon(x)} \varepsilon(x) d\varepsilon \right) dx = b_f t_f E_f \int_0^x \frac{\varepsilon^2(x)}{2} dx \quad (2.11)$$

Uguagliando lavoro interno e lavoro esterno si ottiene:

$$2b_f \int_0^x \int_0^{s(x)} \tau[s(x)] ds = b_f t_f E_f \int_0^x \frac{\varepsilon^2(x)}{2} dx \quad (2.12)$$

Dal momento che l'uguaglianza risulta soddisfatta per ogni $0 \leq x \leq L$, l'equazione (2.12) può essere riscritta nel modo seguente:

$$2b_f \int_0^{s(x)} \tau[s(x)] ds = b_f t_f E_f \frac{\varepsilon^2(x)}{2} \quad (2.13)$$

da cui si ricava:

$$\varepsilon[s(x)] = 2 \sqrt{\frac{\int_0^{s(x)} \tau[s(x)] ds}{t_f E_f}} \quad (2.14)$$

$$\sigma[s(x)] = 2 \sqrt{\frac{E_f \int_0^{s(x)} \tau[s(x)] ds}{t_f}} \quad (2.15)$$

$$N[s(x)] = b_f t_f \sigma[s(x)] = 2b_f \sqrt{t_f E_f \int_0^{s(x)} \tau[s(x)] ds} \quad (2.16)$$

Per $s(L)=s_2$ l'integrale della $\tau[s(x)]$ rappresenta l'area sottesa alla curva del legame locale assunto:

$$\int_0^{s_2} \tau[s(x)] ds = G_f \quad (2.17)$$

Nota la legge locale $\tau[s(x)]$, dalle (2.14, 2.15, 2.16) si ottengono facilmente i valori di deformazione, tensione e carico applicato in corrispondenza dell'innesco del fenomeno di debonding. In particolare, quest'ultimo risulterà:

$$F_{db} = 2b_f \sqrt{t_f E_f G_f} \quad (2.18)$$

2.5.3. Calibrazione legge locale di interfaccia

Entrambe gli approcci (locale ed energetico) descritti permettono, quindi, la modellazione del comportamento di adesione del materiale composito una volta fissata la legge locale di interfaccia.

Uno dei problemi principali è rappresentato dal criterio da adottare per calibrare la legge locale sulla base dei risultati sperimentali ottenuti in laboratorio.

In Faella et al. (2009b) vengono individuati due criteri principali:

- 1) metodo diretto: la legge locale viene calibrata mediante misure sperimentali locali di deformazione longitudinale, ottenute mediante apposita strumentazione;
- 2) metodo indiretto: i parametri della legge locale vengono determinati sulla base di misure sperimentali globali di carico e di scorrimento.

Nel caso dei compositi FRCM, il metodo diretto presenta delle difficoltà pratiche: dal momento che il fenomeno di debonding coinvolge l'interfaccia fibra-matrice, la misurazione diretta delle deformazioni locali è impedita dalla presenza dello strato esterno di matrice con uno spessore dell'ordine di alcuni millimetri.

In Focacci et al. (2017) è stato proposto un metodo indiretto. Nello studio sono stati adottati cinque legami locali, ognuno dei quali presenta un set di parametri incogniti. Questi sono stati determinati applicando il metodo dei minimi quadrati, ovvero minimizzando la differenza tra i risultati analitici, ottenuti con un predeterminato set, e quelli sperimentali riferiti a compositi con differenti lunghezze di adesione. Confrontando i risultati ottenuti con quelli derivati dall'applicazione di un metodo diretto, gli autori hanno dimostrato come il metodo proposto permetta una buona approssimazione del comportamento di adesione senza l'impiego di sofisticati strumenti di misurazione delle deformazioni.

In Yuan et al. (2004) viene presentato un metodo indiretto per la valutazione analitica del comportamento di adesione in compositi FRP, in cui la legge locale viene calibrata sulla base dei risultati sperimentali globali di carico e scorrimento globale all'estremo caricato. Dalla risoluzione dell'equazione differenziale di secondo grado (2.8), tramite l'imposizione di condizioni al contorno basate su osservazioni sperimentali, il modello ha permesso la definizione di una soluzione in forma chiusa in grado di descrivere l'intero processo di debonding (si rimanda al capitolo 7 per una trattazione estesa del metodo).

Un modello analogo viene proposto in Carozzi et al. (2016) per compositi FRCM.

2.6. Criteri di accettazione

L'applicazione sempre più diffusa dei materiali compositi fibrorinforzati a matrice inorganica (FRCC) ha evidenziato la necessità di definire una procedura standard per la determinazione delle proprietà meccaniche e della capacità di adesione del composito al substrato, necessarie ai fini della qualificazione, dell'accettazione in cantiere e della progettazione del rinforzo strutturale. Nonostante in letteratura siano presenti studi di ricerca relativi al comportamento, alla durabilità e alle proprietà di tali sistemi di rinforzo, ad oggi non sono disponibili dei codici che forniscano i criteri standard per l'esecuzione delle prove, la progettazione, l'installazione ed il controllo dei materiali FRCC.

Il primo documento relativo ai materiali compositi fibrorinforzati a matrice inorganica fu emanato dall'International Code Council Evaluation Services (ICC-ES) e approvato nel 2003: *“Acceptance Criteria for Cement-Based Matrix Fabric Composite Systems for reinforced and Unreinforced Masonry”*, con lo scopo di fornire delle linee guida relative ai criteri di accettazione di tali materiali. Il documento contiene i principi per l'esecuzione dei test per la valutazione delle proprietà e del comportamento dei compositi FRCC e per l'elaborazione dei relativi risultati.

Elaborato sulla base delle conoscenze inerenti i compositi fibrorinforzati a matrice organica, il documento fu modificato sulla base delle nuove conoscenze ed espanso nella versione rilasciata nel 2011: *“Acceptance Criteria for Masonry and Concrete Strengthening Using Fabric-Reinforced Cementitious Matrix (FRCC) Composite Systems”* (AC434 2011). La versione del 2011 fu superata da quella del 2013, fino a giungere all'ultima approvata nel giugno 2016: *“Acceptance criteria for masonry and concrete strengthening using fabric-reinforced cementitious matrix (FRCC) and steel reinforced grout (SRG) composite systems”*.

Un ulteriore documento fu elaborato dall'ACI Committee 549 nel 2013, il quale, armonizzandosi con le AC434, contiene le indicazioni per la realizzazione, il progetto e l'installazione dei compositi FRCC: *“Guide to Design and Construction of Externally Bonded Fabric-Reinforced Cementitious Matrix (FRCC) Systems for Repair and Strengthening Concrete and Masonry Structures”*. La normativa, entrata in vigore negli USA a partire da gennaio 2014, rappresenta la prima linea guida approvata a livello mondiale che tratta la caratterizzazione e l'utilizzo dei sistemi FRCC.

La RILEM nel 2002 ha costituito la Commissione Tecnica 201, la quale nel 2006 ha pubblicato il Report 36 (Bramshuber 2006) contenente uno stato dell'arte relativo ai materiali Textile Reinforced Concrete.

A livello europeo la necessità di disporre di linee guida o raccomandazioni che forniscano in modo dettagliato dei criteri standard ha spinto il CNR all'elaborazione di raccomandazioni in accordo con gli standard europei. La prima bozza delle Linee Guida per la qualificazione dei sistemi compositi FRCC è stata predisposta da funzionari del MIT in collaborazione con vari rappresentanti del mondo accademico e presentata ed approvata con alcune modifiche nel dicembre 2016 alla Prima Sezione del Consiglio Superiore dei LL.PP. (in CONCRETO, n. 143, dicembre 2016).

Un lavoro rilevante è stato fornito dalla Commissione Tecnica RILEM TC 232-TDT, in cooperazione con ACI549, che nel 2016 ha pubblicato il documento *“Recommendation of RILEM TC 232-TDT: test methods and design of textile reinforced concrete. Uniaxial tensile test: test method to determine the load bearing behavior of tensile specimens*

made of textile reinforced concrete” (Brameschuber et al. 2016), nel quale viene descritta una procedura standard per le prove di trazione diretta su provini di composito FRCM. Contemporaneamente anche il Comitato Tecnico RILEM TC 250 è stato attivato su tale argomento, coordinando un ampio progetto di ricerca inerente la caratterizzazione dei materiali compositi a matrice inorganica.

Attualmente l'unico documento presente in Europa è riferito ai compositi fibrorinforzati a matrice organica (FRP): “*Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati*” (CNR-DT 200 R1/2013).

3. Programma sperimentale

3.1. Le tipologie di prove sperimentali

La campagna sperimentale ha previsto la realizzazione di una serie di prove sperimentali con lo scopo di valutare il comportamento e le modalità di crisi, ovvero le proprietà meccaniche e di adesione, dei sistemi compositi fibrorinforzati a matrice inorganica applicati su supporto in laterizio. Oltre alle prove di caratterizzazione meccanica dei materiali che costituiscono il sistema di rinforzo, sono state eseguite prove di trazione su strisce di composito fibrorinforzato e prove di adesione. Data l'attuale mancanza di criteri standard per l'esecuzione di queste ultime, sono stati selezionati ed impiegati quattro differenti set-up di prova, in modo da valutarne le differenze e, quindi, limiti e vantaggi di ognuno di essi.

Come ampiamente dimostrato in letteratura, nei compositi FRCM la perdita di adesione si localizza all'interfaccia fibra-matrice. Se ne deduce come il fenomeno dipenda sia dalle caratteristiche fisiche e meccaniche della fibra e della matrice che dalla loro interazione. Per facilitare l'indagine dei fattori che influiscono sul fenomeno, è stato previsto l'impiego di quattro tipologie di composito FRCM, costituite dai seguenti materiali:

- 1) rete di fibra:
 - Kerakoll GeoSteel® Grid 200;
- 2) matrice:
 - malta di calce idraulica Kerakoll GeoCalce® Fino;
 - malta cementizia;
 - malta di calce idraulica;
 - malta bastarda.

Nello specifico il programma sperimentale ha previsto l'esecuzione di:

- 1) prove di caratterizzazione meccanica delle malte costituenti le matrici dei diversi sistemi di rinforzo previsti:
 - 24 prove di flessione per tre punti su provini di malta (160x40x40 mm³): 3 provini per ogni tipologia di malta;
 - 48 prove di compressione su provini di malta: 6 provini per ogni tipologia di malta;
- 2) prove di caratterizzazione meccanica della fibra di rinforzo:
 - 3 prove di trazione diretta su provini di fibra da un multi-filamento (620x17x0,032 mm³);
 - 3 prove di trazione diretta su provini di fibra da due multi-filamenti (620x34x0,032 mm³);
 - 3 prove di trazione diretta su provini di fibra da tre multi-filamenti (620x51x0,032 mm³);
 - 3 prove di trazione diretta su provini di fibra da quattro multi-filamenti (620x68x0,032 mm³);
- 3) prove di caratterizzazione meccanica del comportamento a trazione di materiali compositi FRCM:
 - 12 prove di trazione diretta su provini di materiale composito FRCM (620x65x10 mm³): 3 campioni per ogni tipologia di composito;
- 4) prove di adesione di materiali compositi FRCM al supporto in laterizio:
 - 27 Beam Test: 6 provini per ogni tipologia di composito FRCM realizzata in laboratorio e 9 provini per la tipologia di composito con matrice di malta di calce idraulica Kerakoll;
 - 24 Single Shear Test: 6 provini per ogni tipologia di composito FRCM;
 - 24 Double Shear Test tipo A: 6 provini per ogni tipologia di composito FRCM;
 - 24 Double Shear Test tipo B: 6 provini per ogni tipologia di composito FRCM.

3.2. I mattoni

Per la realizzazione dei provini sottoposti alle quattro tipologie di prove di adesione sono state applicate una o due strisce di materiale composito FRCM su un supporto in laterizio costituito da uno o due mattoni pieni. Questi ultimi, della dimensione nominale UNI 250x120x55 mm³, sono stati forniti dalla ditta “Laterizi San Marco S.r.l.” di Venezia. Si tratta di mattoni di pasta molle, confezionati secondo il metodo tradizionale e caratterizzati da due facce distinte, di cui una (nominata front) meglio rifinita e levigata rispetto all'altra.

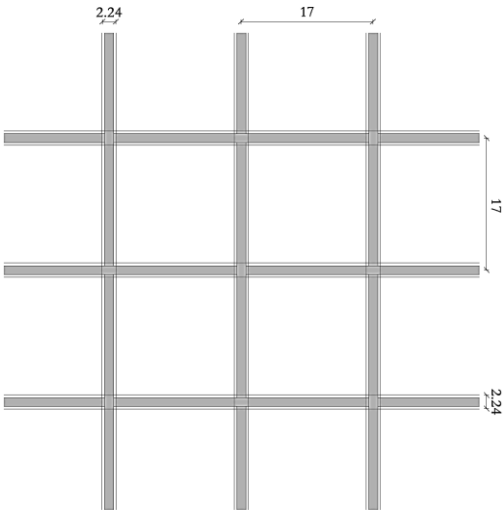
3.3. I compositi FRCM

3.3.1. Rete di fibra GeoSteel® Grid 200 – Kerakoll S.p.a.

Si tratta di una rete biassiale bilanciata in fibra di basalto e microfilati di acciaio Inox AISI 304 termofissati fra di loro, con trattamento protettivo alcali-resistente costituito da una resina all'acqua priva di solventi. La geometria e la costituzione permettono alla rete di fibra una buona aderenza alla matrice inorganica. La scheda tecnica fornita dal produttore descrive l'utilizzo di tale rete in abbinamento con una selezione di matrici inorganiche fornite dalla medesima ditta produttrice, tra le quali la matrice costituita da malta di calce idraulica GeoCalce® Fino.

Di seguito (Tab. 3.1) si riportano i dati tecnici della fibra di basalto, dell'acciaio Inox e della rete GeoSteel® Grid 200 forniti dalla ditta produttrice. Le grandezze geometriche e le proprietà meccaniche della rete di fibra sono riferite alla sola fibra di basalto, in quanto i microfilati di acciaio costituiscono solo un mezzo per dare stabilità geometrica alla rete in fase di realizzazione del composito.

Tab. 3.1. Rete di fibra di basalto Kerakoll GeoSteel® Grid 200: caratteristiche meccaniche e schema geometrico (Kerakoll 2016)

Basalto	tensione caratteristica a trazione	$\sigma_{\text{filo}} \geq 3000 \text{ MPa}$	
	modulo elastico	$E_{\text{filo}} \geq 87 \text{ GPa}$	
Acciaio Inox AISI 304	tensione caratteristica a trazione	$\sigma_{\text{filo}} > 750 \text{ MPa}$	
	modulo elastico	$E_{\text{filo}} > 200 \text{ GPa}$	
Rete GeoSteel Grid 200	spessore equivalente della rete	$t_r^* \approx 0,032 \text{ mm}$	
	carico a trazione per unità di larghezza	$F_{\text{rete}} \geq 55 \text{ kN/m}$	
	deformazione a rottura della rete	$\epsilon_r > 1,90\%$	
	resistenza a trazione	$\sigma_r \geq 1700 \text{ MPa}$	
	modulo elastico	$E_r > 70 \text{ GPa}$	

Nota: la larghezza del singolo multi-filamento $b_f=2.24 \text{ mm}$ è stata valutata sperimentalmente;

lo spessore nominale $t_f=0.247 \text{ mm}$ è stato ottenuto dividendo l'area della sezione del multi-filamento, valutata mediante t_f^* , per la larghezza b_f .

3.3.2. Malta GeoCalce® Fino – Kerakoll S.p.a.

GeoCalce® Fino è una malta naturale strutturale traspirante a granulometria fine, a base di pura calce idraulica naturale NHL 3.5 e legante minerale, con classe di resistenza a compressione M15 secondo EN 998-2, CS IV secondo EN 998-1 e R1 secondo EN 1504-3.

Tab. 3.2. Dati tecnici malta GeoCalce® Fino (Kerakoll 2016)

Caratteristica prestazionale	Metodo di prova	Requisiti richiesti EN 1504-3 classe R1	Prestazioni geocalce® fino
Resistenza a compressione	EN 12190	≥ 10 MPa (28 gg)	> 15 MPa (28 gg)
Resistenza a trazione per flessione	EN 196/1	nessuno	> 5 MPa (28 gg)
Legame di aderenza	EN 1542	≥ 0,8 MPa (28 gg)	> 0,8 MPa (28 gg)
Adesione su laterizio	EN 1015-1	nessuno	> 1 MPa (28 gg)
Modulo elastico a compressione	EN 13412	nessuno	9 GPa (28 gg)

La malta GeoCalce® Fino in abbinamento con la rete di fibra GeoSteel® Grid 200 permette di realizzare un sistema di rinforzo FRCM specifico per il rinforzo di edifici ed elementi in muratura, come il rinforzo diffuso o a fasce di murature portanti e gli interventi antiribaltamento delle tamponature.

3.3.3. Malte di laboratorio

Le malte realizzate in laboratorio sono state ottenute mescolando tra loro legante, inerte ed acqua secondo le proporzioni di seguito indicate:

- a) Malta di calce idraulica:
 - 2 parti di calce idraulica i.pro Plastocem® (Italcementi)
 - 8 parti di sabbia fine
 - 2 parti di acqua
- b) Malta cementizia:
 - 2 parti di cemento portland i.work Tecnocem® (Italcementi)
 - 8 parti di sabbia fine
 - 2 parti di acqua
- c) Malta bastarda:
 - 1 parte di cemento i.work Tecnocem® (Italcementi)
 - 0,5 parti di calce idraulica i.pro Plastocem® (Italcementi)
 - 8 parti di sabbia
 - 2 parti di acqua

L'impiego di tali malte, nelle composizioni sopra indicate, è stato dettato dalla volontà di ricreare in laboratorio dei materiali simili a quelli comunemente utilizzati negli edifici in muratura, ovvero delle matrici costituite da malte prive di additivi o filler, che presentino caratteristiche di perfetta compatibilità con le strutture da rinforzare.

3.4. Strumentazione

Le prove di caratterizzazione meccanica dei materiali e del comportamento a trazione dei compositi sono state eseguite mediante l'impiego della macchina di prova Instron SATEC™ 5592-135HVL, un sistema di prova ad orientamento verticale alimentato idraulicamente e caratterizzato da una capacità massima di 600 kN. Il sistema è dotato del pacchetto software Partner che permette il controllo delle prove, l'acquisizione dei dati e la generazione del report dei risultati. I trasduttori di carico e di spostamento (LVDT - Linear Variable Differential Trasformer – con risoluzione di 1 mm) sono integrati nella macchina e collegati ad una unità di comando, che condiziona e digitalizza i segnali trasferendoli al PC tramite porta digitale da 15 pin. Per le prove di adesione è stata utilizzata una pressa in cui le azioni di carico sono state applicate sui provini attraverso un martinetto a vite azionato manualmente per mezzo di un volano. L'acquisizione dei dati è avvenuta per mezzo di una centralina National Instruments NI cDAQ-9178. La centralina condiziona e digitalizza il segnale elettrico di input/output fornito dagli strumenti e lo trasferisce, tramite interfaccia USB, al PC. Il segnale viene successivamente elaborato e registrato attraverso il software LABVIEW della stessa National Instruments.

Per quanto riguarda la misura dei dati raccolti, questa è avvenuta tramite differenti strumenti:

- cella di carico;
- trasduttori di spostamento;
- estensimetri clip-on ad omega.

Dati i livelli di carico attesi, per le prove di adesione sono state utilizzate due celle di carico prodotte dalla Tokyo Sokki Kenkyujo Co. Ltd (TCLP-5B Tension/Compression Load Cell e TCLP-500KA Compression Load Cell, rispettivamente da 50 kN e da 5 kN) ed una prodotta dalla METIOR s.r.l. (TRZ500 Tension Load Cell da 5 kN), munite di uno strain gauge interno capace di trasformare la variazione della resistenza elettrica in deformazione, la quale viene successivamente tradotta in carico.

I trasduttori di spostamento, CE cantilever prodotti dalla Tokyo Sokki Kenkyujo Co. Ltd, sono di tipo estensimetrico con struttura a mensola. Due strain gauge posti alla base della mensola permettono la lettura della deformazione, la quale viene convertita in uno spostamento che spazia in un range massimo di 10 mm. Tale spostamento rappresenta la freccia della mensola.

I trasduttori di spostamento omega, del tipo PI - 2- 50/100 Pie Shape Displacement Transducer, prodotti dalla Tokyo Sokki Kenkyujo Co. Ltd, misurano le deformazioni che avvengono tra due punti posti a 50/100 mm di distanza mediante due strain gauge che rilevano la variazione della curvatura dell'omega.

La macchina di prova Instron, oltre agli LVDT integrati in essa, presenta la possibilità di utilizzare dei trasduttori di spostamento opzionali. Per alcune tipologie di prova è stato impiegato l'estensimetro clip-on ad omega 2630-112 della Instron, caratterizzato da un range di misura di 50 mm. Lo spostamento viene trasmesso da un telaio leggero rigido fissato al provino a degli strain gauges incollati ad un elemento flessibile e disposti in modo da costituire un circuito a ponte di Wheatstone a quattro rami. Il dispositivo, quindi, converte gli spostamenti meccanici del provino deformato in segnali elettrici trasmettendoli, tramite

connessione a 25 pin, alla scheda di condizionamento nell'unità di comando della macchina di prova Instron, la quale digitalizza il segnale trasferendolo al PC.

4. Prove per la caratterizzazione meccanica dei materiali

4.1. Introduzione

Al fine di valutare le caratteristiche meccaniche dei materiali costituenti le diverse tipologie di composito e dei compositi stessi, sono state eseguite prove di laboratorio su provini di materiale opportunamente preparati, come descritto nei paragrafi successivi. Dai test condotti sono stati ottenuti i grafici carico-spostamento e tensione-deformazione. Questi presentano un andamento contraddistinto da dei tratti caratteristici:

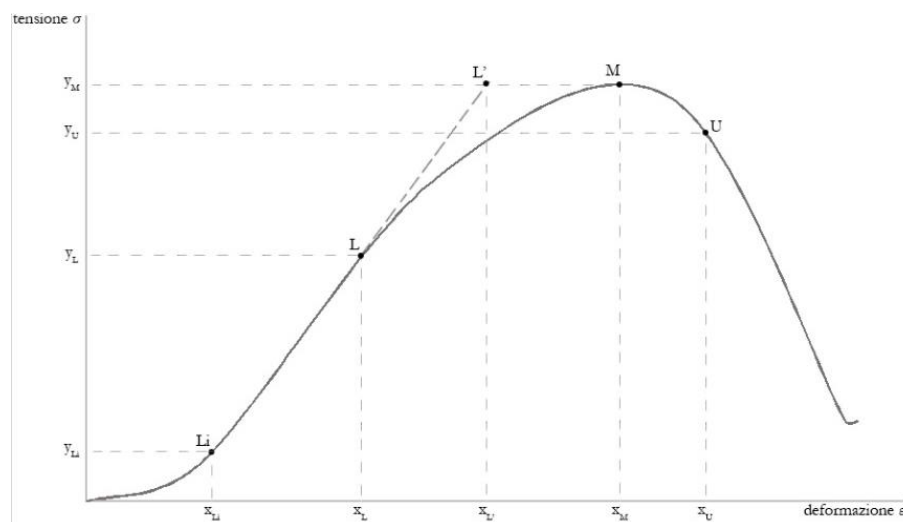


Fig. 4.1. Individuazione punti caratteristici del percorso di equilibrio

- 1) Il grafico è crescente e identifica una prima fase di assestamento del provino;
- 2) Il grafico è crescente con andamento elastico lineare. Alla fine di questo tratto si ha, solitamente, la comparsa delle prime lesioni del provino;
- 3) Il terzo tratto rappresenta la fase dopo i primi danneggiamenti. Le lesioni aumentano di ampiezza fino all'attingimento della resistenza ultima del materiale;
- 4) Il quarto tratto ha andamento decrescente. La prima parte di tale tratto rappresenta la duttilità residua del materiale una volta raggiunto il punto di collasso, individuato sulla curva come il punto corrispondente all'80% della tensione massima $\sigma_{max} = y_M$.

I tratti sono individuati da dei punti caratteristici, come illustrato in figura 4.1.

Attraverso tali punti sono stati valutati i seguenti parametri meccanici:

$$\sigma_{max} = \frac{y_M}{A} \quad \text{tensione massima di rottura} \quad (4.1)$$

$$E = \frac{y_L - y_{Li}}{x_L - x_{Li}} \quad \text{modulo elastico} \quad (4.2)$$

$$\mu_c = \frac{x_M}{x_{L'}} \quad \text{duttilità cinematica} \quad (4.3)$$

$$\mu_{cd} = \frac{x_U}{x_M} \quad \text{duttilità cinematica disponibile} \quad (4.4)$$

4.2. I mattoni

I mattoni sono stati caratterizzati nel corso di studi di ricerca condotti precedentemente all'interno del Laboratorio Ufficiale Prove Materiali e Strutture del DIDA dell'Università degli Studi di Firenze (Stipo 2013).

4.2.1. Prove di compressione

Preparazione dei provini

Le prove di compressione sono state eseguite su 8 campioni cubici di laterizio di dimensioni 50x50x50 mm³ ricavati da quattro mattoni di dimensioni 120x250x55 mm³. Il taglio del mattone è stato realizzato mediante sega circolare con disco diamantato da 3 mm. Il taglio è stato realizzato mantenendo l'orientamento originario del mattone. Da ogni mattone sono stati ricavati solamente due provini cubici in modo da sottoporre a test una maggiore variabilità di mattoni standard.

Apparato di prova

I test sono stati condotti utilizzando una cella di carico da 50 KN (TCLP-5B, Tokyo Sokki Kenkyujo Co. Ltd) e quattro trasduttori di spostamento (CE - 10) posizionati al di sopra della piastra posta tra il provino ed il piatto superiore della macchina di prova. La prova è stata condotta in controllo di spostamento. L'acquisizione dati è avvenuta attraverso la centralina elettronica della National Instruments.

Test

La prova è stata effettuata incrementando in maniera omogenea lo spostamento fino a rottura. Dai test di compressione sono stati determinati, oltre al carico massimo F_{max} e alla relativa tensione massima di compressione f_{cb} , la duttilità cinematica μ_s , la duttilità cinematica disponibile μ_{cd} ed il modulo elastico E_b . La resistenza a compressione è stata ricavata secondo la seguente relazione:

$$f_{cb} = \frac{F_{max}}{A} \left[\frac{N}{mm^2} \right] \quad (4.5)$$

F_{max} = carico massimo;

A = area su cui è applicato il carico.

Tab. 4.1. Risultati prove di compressione condotte su provini di laterizio

provino	A [mm ²]	F _{max} [N]	E _b [MPa]	f _{cb} [MPa]	μ _c	μ _{cd}
C-01	2525	55273	2141	22	1.09	1.49
C-02	2535	58026	2585	23	1.09	1.28
C-03	2520	68863	2779	27	1.01	1.19
C-04	2525	64964	3081	26	1.09	1.35
C-05	2540	53886	1672	21	1.10	1.14
C-06	2525	64923	3218	26	1.08	1.34
C-07	2520	68706	3470	27	1.15	1.23
C-08	2545	52456	2668	21	1.05	2.01
media		60887	2701	24	1,08	1,38
Dev. St.		6734	585	3	0,04	0,27
Co.V.		11%	22%	11%	4%	20%

A=area di applicazione del carico; F_{max}=carico massimo; E_b=modulo elastico (Eq. 4.4); f_{cb}=tensione massima a compressione (Eq. 4.5); μ_c=duttilità cinematica (Eq. 4.3); μ_{cd}=duttilità cinematica disponibile (Eq. 4.4)

4.2.2. Prove di flessione per tre punti

Preparazione dei provini

Otto mattoni di dimensione standard (250x120x55 mm³) sono stati sottoposti a prova di flessione per tre punti.

Apparato di prova

I test sono stati condotti utilizzando una cella di carico da 50 KN (TCLP-5B, Tokyo Sokki Kenkyujo Co. Ltd) e due trasduttori di spostamento (CE-10) posizionati al di sopra del cilindro in mezzeria. La prova è stata condotta in controllo di spostamento. L'acquisizione dati è avvenuta attraverso la centralina elettronica della National Instruments.

Test

Ogni provino è stato poggiato su due tondini metallici distanti tra loro 220 mm, mentre il carico è stato applicato in mezzeria, nella parte superiore del mattone, attraverso l'interposizione di un cilindro metallico tra il mattone e la cella di carico.

La resistenza a trazione per flessione è stata ricavata mediante la seguente relazione:

$$f_{fb} = \frac{3F_{max}l}{2bh^2} \left[\frac{N}{mm^2} \right] \quad (4.6)$$

F_{max} = carico massimo;

b = larghezza provino;

h = altezza provino;

l = distanza tra gli appoggi.

Tab. 4.2. Risultati prove di flessione per tre punti su mattoni di laterizio

provino	f_b [MPa]
F-01	5.31
F-02	6.14
F-03	5.65
F-04	5.25
F-05	6.64
F-06	5.00
F-07	5.87
F-08	4.97
media	5.60
Dev. St.	0.58
Co.V.	10%

4.2.3. Prove di trazione indiretta

Preparazione dei provini

La prova di trazione indiretta, detta anche "brasiliiana", è stata eseguita con lo scopo di valutare la resistenza a trazione del laterizio. Nell'indagine sono stati testati otto cubetti con dimensioni pari a circa 50 mm di lato. Il taglio del mattone è stato realizzato mediante sega circolare con disco diamantato da 3 mm.

Apparato di prova

I test sono stati condotti utilizzando una cella di carico da 50 KN (TCLP-5B, Tokyo Sokki Kenkyujo Co. Ltd) e due trasduttori di spostamento (CE - 10) posizionati al di sopra del cilindro superiore. La prova è stata condotta in controllo di spostamento. L'acquisizione dati è avvenuta attraverso la centralina elettronica della National Instruments.

Test

Ogni provino cubico è stato posizionato tra due tondini metallici, in modo da applicare due forze complanari concentrate per tutto lo spessore del provino stesso. La prova così eseguita permette al provino di lesionarsi in corrispondenza dei due tondini opposti a causa delle tensioni di trazione sviluppatesi nella zona mediana e perpendicolari allo sforzo applicato. La prova è stata eseguita con riferimento alla normativa UNI EN 12390-6:2002, incrementando in maniera omogenea lo spostamento fino a rottura.

La resistenza a trazione è stata ricavata mediante la seguente relazione:

$$f_{tb} = \frac{2F_{max}}{\pi A} \left[\frac{N}{mm^2} \right] \quad (4.7)$$

F_{max} = carico massimo;

A = area della sezione trasversale.

Tab. 4.3. Risultati prove di trazione indiretta condotte su provini di laterizio

provino	A [mm ²]	F _{max} [N]	f _{tb} [MPa]
B-01	2550	6001	1.50
B-02	2575	6254	1.55
B-03	2524	6608	1.67
B-04	2575	6523	1.61
B-05	2600	6886	1.69
B-06	2575	6595	1.63
B-07	2601	5246	1.28
media		6114	1.52
Dev. St.		733	0.17
Co.V.		12%	11%

4.3. Le matrici

La caratterizzazione meccanica delle malte, che costituiscono le matrici dei compositi FRCM (§ 3.3), è stata ottenuta eseguendo prove di flessione e di compressione, secondo la normativa UNI EN 1015-11:2007.

4.3.1. Prove di flessione per tre punti

Preparazione dei provini

I provini sono stati realizzati tramite l'impiego di opportune casseforme metalliche (Fig. 4.2). Per ogni tipologia di malta sono stati testati 6 provini di dimensioni 40x40x160 mm³. Le prove sono state condotte a maturazione avvenuta, ovvero dopo un periodo di 28 giorni.

Apparato di prova

È stata utilizzata la macchina di prova Instron SATEC™ 5592-315HVL, dotata di una cella di carico da 600 kN. La prova è stata condotta in controllo di spostamento. L'acquisizione delle misure di spostamento è avvenuta attraverso un LVDT (Linear Variable Differential Trasformer) integrato nella macchina di prova e caratterizzato da una risoluzione di 1 mm.

Test

Ogni provino è stato posizionato su due cilindri in acciaio (Ø 10 mm) situati ad una distanza di 50 mm dalla sua linea mediana. Il carico verticale è stato applicato in mezzeria mediante un ulteriore cilindro di acciaio (Ø 10 mm) interposto tra il provino e la cella di carico. La prova è stata condotta in regime di controllo di spostamento ad una velocità di 0.5 mm/min.

La resistenza a trazione f_{fm} è stata ricavata applicando la seguente relazione:

$$f_{fm} = \frac{3F_{max}l}{2bh^2} \quad \left[\frac{N}{mm^2} \right] \quad (4.8)$$

F_{max} = carico massimo; b = larghezza provino; h = altezza provino; l = distanza tra gli appoggi.

Provini e nomenclatura

6 provini di malta Kerakoll GeoCalce® Fino.....	BT.MKE-xx
6 provini di malta di cemento.....	BT.MCE-xx
6 provini di malta di calce idraulica.....	BT.MCA-xx
6 provini di malta bastarda.....	BT.MBA-xx

4.3.2. Risultati

I provini di malta bastarda 01, 02 e 03 hanno esibito un comportamento anomalo a causa di difetti riconducibili alle operazioni per il confezionamento dei provini stessi (presenza di una porosità eccessiva). Pertanto, i relativi risultati non sono stati riportati.

Tab. 4.4. Prove di flessione per tre punti su provini di malta Kerakoll GeoCalce® Fino

provino	l [mm]	h [mm]	b [mm]	F _{max} [N]	M _{max} [Nmm]	f _{fm} [MPa]
BT.MKE-01	100	40	40	1403	35070	3.29
BT.MKE-02	100	40	40	1344	33595	3.15
BT.MKE-03	100	40	40	1380	34493	3.23
BT.MKE-04	100	40	40	1988	49705	4.66
BT.MKE-05	100	40	40	1593	39823	3.73
BT.MKE-06	100	40	40	1822	45543	4.27
			Media	1588	39705	3.72
			Dev.St.	265	6634	0.62
			Co.V.	16%	16%	16%

Tab. 4.5. Prove di flessione per tre punti su provini di malta cementizia

provino	l [mm]	h [mm]	b [mm]	F _{max} [N]	M _{max} [Nmm]	f _{fm} [MPa]
BT.MCE-01	100	40	40	957	23932	2.24
BT.MCE-02	100	40	40	1660	41500	3.89
BT.MCE-03	100	40	40	1238	30955	2.90
BT.MCE-04	100	40	40	684	17110	1.60
BT.MCE-05	100	40	40	954	23856	2.24
BT.MCE-06	100	40	40	721	18027	1.69
			Media	1036	25897	2.43
			Dev.St.	365	9124	0.86
			Co.V.	35%	35%	35%

Tab. 4.6. Prove di flessione per tre punti su provini di malta di calce idraulica

provino	l [mm]	h [mm]	b [mm]	F _{max} [N]	M _{max} [Nmm]	f _{fm} [MPa]
BT.MCA-01	100	40	40	23	587	0.06
BT.MCA-02	100	40	40	116	2897	0.27
BT.MCA-03	100	40	40	111	2765	0.26
BT.MCA-04	100	40	40	106	2641	0.25
BT.MCA-05	100	40	40	167	4168	0.39
BT.MCA-06	100	40	40	162	4062	0.38
			Media	132	3307	0.31
			Dev.St.	30	744	0.07
			Co.V.	22%	22%	22%

Note: in grigio provino escluso dalla valutazione dei risultati medi per comportamento anomalo

Tab. 4.7. Prove di flessione per tre punti su provini di malta bastarda

provino	l [mm]	h [mm]	b [mm]	F _{max} [N]	M _{max} [Nmm]	f _{fm} [MPa]
BT.MBA-04	100	40	40	152	3804	0.36
BT.MBA-05	100	40	40	198	4944	0.46
BT.MBA-06	100	40	40	168	4202	0.39
			Media	173	4317	0.40
			Dev.St.	23	579	0.05
			Co.V.	13%	13%	13%

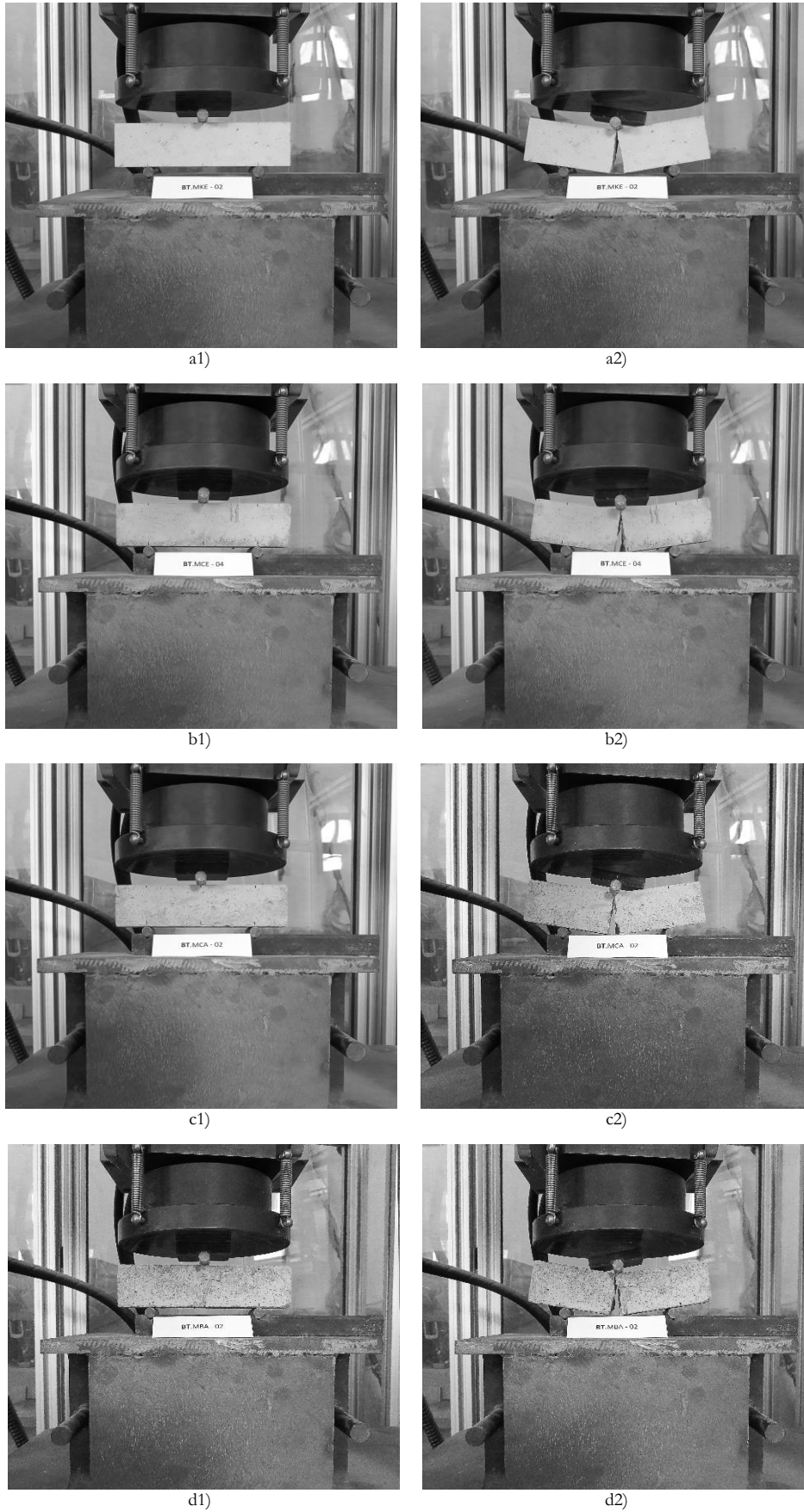


Fig 4.3. Prove di flessione per tre punti su provini di malta a) Kerakoll GeoCalce® Fino, b) cementizia, c) di calce idraulica, d) bastarda

4.3.3. Osservazioni

Dai risultati ottenuti dai provini di malta cementizia e dai provini di malta di calce idraulica è scaturita una variabilità consistente. Al contrario, i dati derivanti dalle prove condotte su provini di malta Kerakoll GeoCalce® Fino e di malta bastarda hanno restituito valori di Co.V. inferiori al 16%.

All'incremento di resistenza tra due differenti tipologie di malta è corrisposta una maggiore rigidezza (incremento della pendenza del primo tratto lineare del grafico carico-freccia) e, quindi, l'esibizione di un comportamento maggiormente fragile.

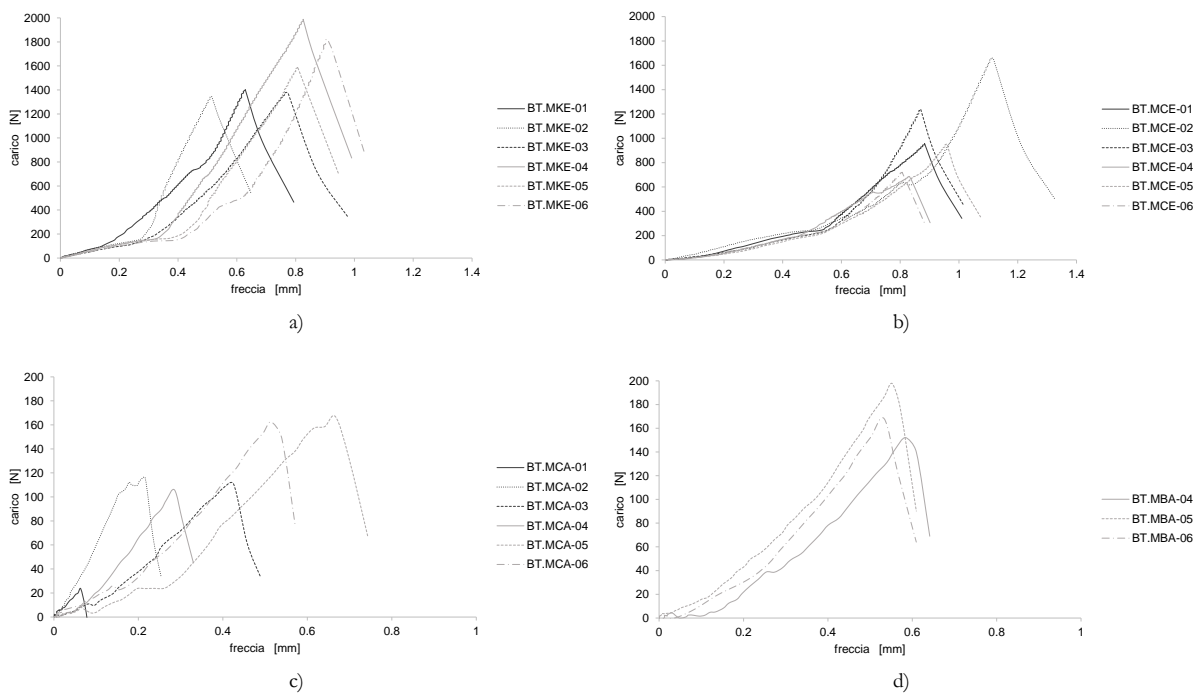


Fig. 4.4. Grafici carico-freccia derivanti da prove di flessione per tre punti su provini di malta: a) di calce idraulica Kerakoll GeoCalce® Fino, b) cementizia, c) di calce idraulica, d) bastarda

4.3.4. Prove di compressione

Preparazione dei provini

I due monconi ottenuti da ogni prova a flessione per tre punti sono stati sottoposti a prova di compressione monoassiale, al fine di determinare la resistenza a compressione f_{cm} di ogni tipologia di malta ed il relativo modulo elastico E_m .

Apparato di prova

È stata utilizzata la macchina di prova Instron SATEC™ 5592-315HVL, dotata di una cella di carico da 600 kN. La prova è stata condotta in controllo di spostamento. L'acquisizione delle misure di spostamento è avvenuta attraverso un LVDT (Linear Variable Differential Trasformer) integrato nella macchina di prova e caratterizzato da una risoluzione di 1 mm.

Test

Ogni provino è stato posizionato tra due piastre metalliche di ripartizione del carico reciprocamente allineate, aventi un'area di contatto con il provino di 1600 mm² (40x40 mm²). La prova è stata condotta in regime di controllo di spostamento ad una velocità di 0.5 mm/min.

La resistenza a compressione f_m è stata ricavata attraverso la seguente relazione:

$$f_{cm} = \frac{F_{max}}{A} \quad \left[\frac{N}{mm^2} \right] \quad (4.9)$$

F_{max} = carico massimo in [N];

A = area della superficie del provino sulla quale è stato applicato il carico.

4.3.5. Risultati

Malta Kerakoll GeoCalce® Fino

Dalla rottura per flessione di ognuno dei sei provini BT.MKE-xx sono stati ricavati e testati a compressione due monconi denominati rispettivamente CT.MKE-xxa e CT.MKE-xxb.

Tab. 4.8. Risultati prove di compressione su provini di malta di calce Kerakoll GeoCalce® Fino

provino	A [mm ²]	F _{max} [N]	f _{cm} [MPa]	E _m [MPa]	μ _c	μ _{cd}
CT.MCA-01a	1600	15177	9.49	908	1.13	1.39
CT.MCA-01b	1600	17692	11.06	988	1.03	1.29
CT.MCA-02a	1600	16709	10.44	1382	1.03	1.26
CT.MCA-02b	1600	19282	12.05	1403	1.04	1.30
CT.MCA-03a	1600	19312	12.07	1420	1.01	1.22
CT.MCA-03b	1600	19142	11.96	1397	1.06	1.26
CT.MCA-04a	1600	19642	12.28	1419	1.02	1.25
CT.MCA-04b	1600	17196	10.75	1411	1.05	1.32
CT.MCA-05a	1600	18184	11.37	1487	1.01	1.26
CT.MCA-05b	1600	16570	10.36	1288	1.01	1.25
CT.MCA-06a	1600	19532	12.21	1502	1.05	1.27
CT.MCA-06b	1600	17639	11.02	1516	1.03	1.37
media		18006	11.25	1344	1.04	1.29
Dev.St.		1424	0.89	195	0.03	0.05
Co.V.		8%	8%	14%	3%	4%

A=area di applicazione del carico; F_{max}=carico massimo; E_m=modulo elastico (Eq. 4.4); f_{cm}=tensione massima a compressione (Eq. 4.9); μ_c=duttilità cinematica (Eq. 4.3); μ_{cd}=duttilità cinematica disponibile (Eq. 4.4)

Malta cementizia

Dalla rottura per flessione di ognuno dei sei provini BT.MCE-xx sono stati ricavati e testati a compressione due monconi denominati rispettivamente CT.MCE-xxa e CT.MCE-xxb.

Tab. 4.9. Risultati prove di compressione su provini di malta cementizia

provino	A [mm ²]	F _{max} [N]	f _{cm} [MPa]	E _m [MPa]	μ _c	μ _{cd}
CT.MCE-01a	1600	9832	6.15	496	1.71	1.45
CT.MCE-01b	1600	13376	8.36	1018	1.09	1.37
CT.MCE-02a	1600	12511	7.82	1103	1.06	1.50
CT.MCE-02b	1600	12564	7.85	1031	1.05	1.50
CT.MCE-03a	1600	13404	8.38	1083	1.06	1.30
CT.MCE-03b	1600	14238	8.90	1116	1.07	1.51
CT.MCE-04a	1600	8278	5.17	759	1.22	1.77
CT.MCE-04b	1600	7873	4.92	786	1.11	1.60
CT.MCE-05a	1600	10372	6.48	829	1.26	1.53
CT.MCE-05b	1600	9575	5.98	882	1.13	1.80
CT.MCE-06a	1600	10672	6.67	883	1.21	1.54
CT.MCE-06b	1600	9385	5.87	725	1.28	1.69
media		11007	6.88	893	1.19	1.55
Dev.St.		2139	1.34	187	0.18	0.15
Co.V.		19%	19%	21%	15%	10%

A=area di applicazione del carico; F_{max}=carico massimo; E_m=modulo elastico (Eq. 4.4); f_{cm}=tensione massima a compressione (Eq. 4.9); μ_c=duttilità cinematica (Eq. 4.3); μ_{cd}=duttilità cinematica disponibile (Eq. 4.4)

Malta di calce idraulica

Dalla rottura per flessione di ognuno dei sei provini BT.MCA-xx sono stati ricavati e testati a compressione due monconi denominati rispettivamente CT.MCA-xxa e CT.MCA-xxb.

Tab. 4.10. Risultati prove di compressione su provini di malta di calce idraulica

provino	A [mm ²]	F _{max} [N]	f _{cm} [MPa]	E _m [MPa]	μ _c	μ _{cd}
CT.MCA-01a	1600	1067	0.67	66	1.23	1.63
CT.MCA-01b	1600	1143	0.71	302	1.23	1.79
CT.MCA-02a	1600	1053	0.66	152	1.39	1.46
CT.MCA-02b	1600	1098	0.69	130	1.35	1.55
CT.MCA-03a	1600	1069	0.67	81	1.32	1.40
CT.MCA-03b	1600	1049	0.66	49	1.35	1.42
CT.MCA-04a	1600	1462	0.91	143	1.27	2.13
CT.MCA-04b	1600	1270	0.79	65	1.50	1.53
CT.MCA-05a	1600	1274	0.80	50	1.57	1.52
CT.MCA-05b	1600	1514	0.95	209	1.21	1.81
CT.MCA-06a	1600	1457	0.91	72	1.55	1.57
CT.MCA-06b	1600	1573	0.98	92	1.74	1.49
media		1252	0.78	118	1.39	1.61
Dev.St.		201	0.13	76	0.16	0.21
Co.V.		16%	16%	64%	12%	13%

A=area di applicazione del carico; F_{max}=carico massimo; E_m=modulo elastico (Eq. 4.4); f_{cm}=tensione massima a compressione (Eq. 4.9); μ_c=duttilità cinematica (Eq. 4.3); μ_{cd}=duttilità cinematica disponibile (Eq. 4.4)

Malta bastarda

Dalla rottura per flessione di ognuno dei tre provini BT.MBA-xx sono stati ricavati e testati a compressione denominati rispettivamente CT.MBA-xxa e CT.MBA-xxb.

Tab. 4.11. Risultati prove di compressione su provini di malta bastarda

provino	A [mm ²]	F _{max} [N]	f _{cm} [MPa]	E _m [MPa]	μ _c	μ _{cd}
CT.MBA-04a	1600	1719	1.07	185	2.01	2.07
CT.MBA-04b	1600	2065	1.29	260	1.37	2.94
CT.MBA-05a	1600	2047	1.28	199	1.90	2.20
CT.MBA-05b	1600	2122	1.33	157	1.61	1.92
CT.MBA-06a	1600	1888	1.18	235	1.47	2.58
CT.MBA-06b	1600	1984	1.24	262	1.37	2.38
media		1971	1.23	216	1.62	2.35
Dev.St.		147	0.09	43	0.28	0.37
Co.V.		7%	7%	20%	17%	16%

A=area di applicazione del carico; F_{max}=carico massimo; E_m=modulo elastico (Eq. 4.4); f_{cm}=tensione massima a compressione (Eq. 4.9); μ_c=duttilità cinematica (Eq. 4.3); μ_{cd}=duttilità cinematica disponibile (Eq. 4.4)

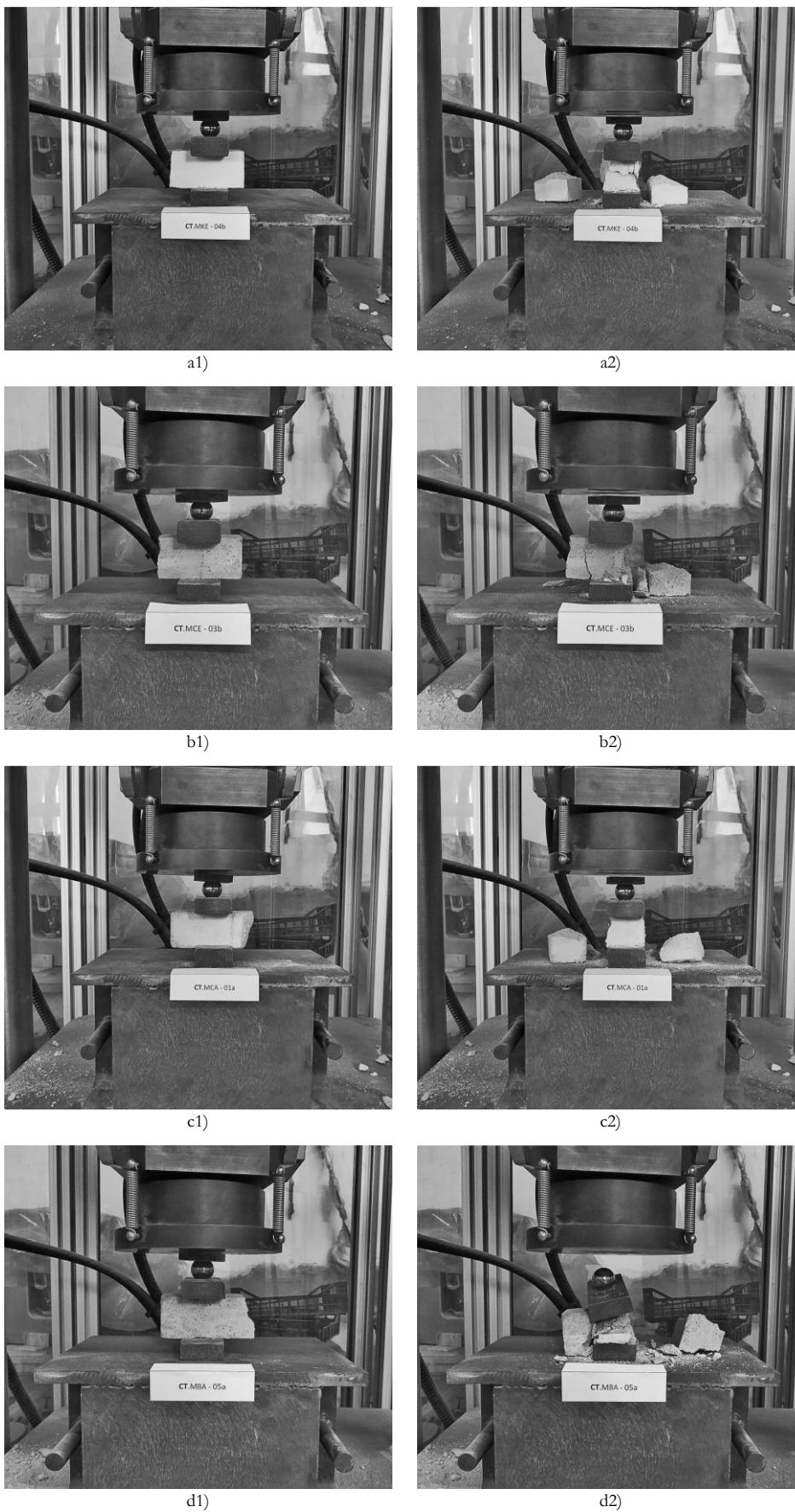


Fig 4.5. Prove di compressione su provini di malta a) Kerakoll GeoCalce® Fino, b) cementizia, c) di calce idraulica, d) bastarda

4.3.6. Osservazioni

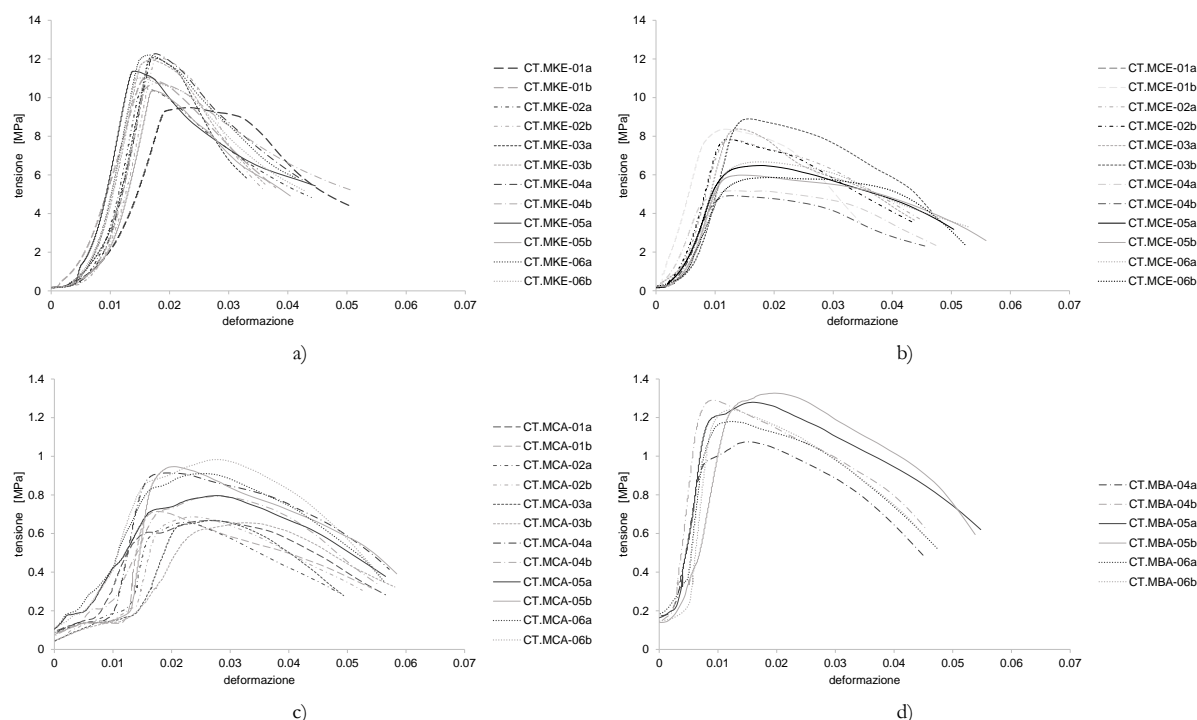


Fig. 4.6. Grafici tensione-deformazione risultanti da prove di compressione su provini di malta: a) di calce idraulica Kerakoll GeoCalce® Fino, b) cementizia, c) di calce idraulica, d) bastarda

I risultati in termini di carico massimo hanno esibito una dispersione minore del 20%. Come già emerso dalle prove di flessione per tre punti, all'aumentare della resistenza è corrisposto un aumento della rigidezza e del comportamento fragile della malta, con coefficienti di duttilità inferiori (Tab. 4.8, 4.9, 4.10, 4.11). Per le malte realizzate in laboratorio sono stati ottenuti Co.V. maggiori, pari al 16% e al 19% rispettivamente per la malta di calce idraulica e per la malta cementizia, denotando una minore omogeneità derivante proprio dalle modalità di realizzazione delle miscele. La malta di calce idraulica Kerakoll GeoCalce® Fino è, infatti, una malta premiscelata per la cui preparazione è necessaria la sola aggiunta di acqua nelle proporzioni indicate sulla confezione. In tabella 4.12 sono stati riportati i risultati medi per tipologia di malta ottenuti da prove di flessione per tre punti e prove di compressione.

Tab. 4.12. Risultati medi da prove di compressione e prove di flessione per tre punti con indicazione in parentesi dei valori di deviazione standard e coefficiente di variazione

malta	$F_{max,BT}$ [N]	f_{im} [MPa]	$F_{max,CT}$ [N]	f_{cm} [MPa]	E_m [MPa]	μ_c	μ_{cd}
GeoCalce® Fino	1588 (265;16)	3.72 (0.62;16)	18006 (1424;8)	11.25 (0.89;8)	1344 (195;14)	1.04 (0.03;3)	1.29 (0.05;4)
Cementizia	1036 (365;35)	2.43 (0.86;35)	11007 (2139;19)	6.88 (1.34;19)	893 (187;21)	1.19 (0.18;15)	1.55 (0.15;10)
Calce idraulica	132 (30;22)	0.31 (0.07;22)	1252 (201;16)	0.78 (0.13;16)	118 (76;64)	1.39 (0.16;12)	1.61 (0.21;13)
Bastarda	173 (23;13)	0.40 (0.05;13)	1971 (147;7)	1.23 (0.09;7)	216 (43;20)	1.62 (0.28;17)	2.35 (0.37;16)

$F_{max,BT}$ =carico massimo prova a flessione per tre punti; $F_{max,CT}$ =carico massimo prova a compressione; f_{im} =resistenza a trazione da prova a flessione (Eq. 4.8) f_{cm} =resistenza a compressione (Eq. 4.9); E_m =modulo elastico (Eq. 4.4); μ_c =duttilità cinematica (Eq. 4.3); μ_{cd} =duttilità cinematica disponibile (Eq. 4.4)

4.4. La fibra

Le proprietà meccaniche della rete di fibra sono state ottenute eseguendo prove di trazione diretta su provini costituiti da un numero n variabile di multi-filamenti. Le prove sono state condotte in accordo con la procedura descritta nella normativa ASTM D3039/D3039M (2004), nonostante i provini non siano impregnati con resina epossidica.

4.4.1. Prove di trazione diretta

Preparazione dei provini

Sono stati realizzati provini di dimensioni differenti: mantenendo costante la lunghezza L , pari a 625 mm, è stato variato il numero n di multi-filamenti longitudinali. Alle estremità sono state fissate, mediante adesivo bicomponente Sikadur 31-CF, delle piastre di alluminio di dimensioni 120x75x0.8 mm, al fine di evitare il danneggiamento della fibra ad opera delle ganasce della macchina di prova, nonché di ottenere una distribuzione uniforme del carico tra i multi-filamenti costituenti il provino (Fig. 4.7). La lunghezza libera l_f dei provini di rete di fibra è risultata, quindi, pari a 385 mm.

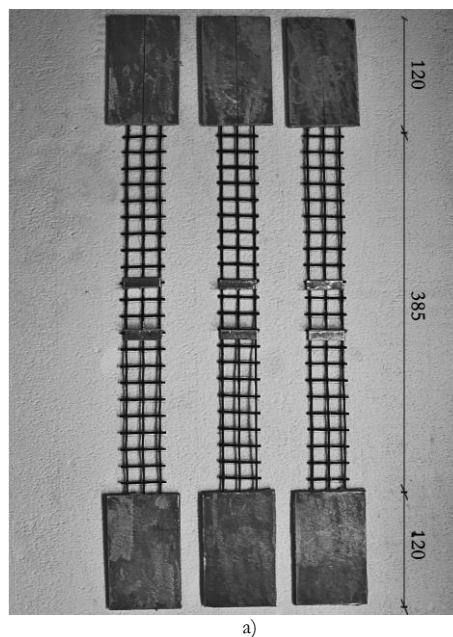


Fig. 4.7. Provini di rete di fibra costituiti da tre multi-filamenti

Apparato di prova

È stata utilizzata la macchina di prova Instron SATEC™ 5592-315HVL, dotata di una cella di carico da 600 kN. La prova è stata condotta in controllo di spostamento. L'acquisizione delle misure di spostamento è avvenuta attraverso un LVDT (Linear Variable Differential Trasformer) integrato nella macchina di prova, caratterizzato da una risoluzione di 1 mm. Un estensimetro clip-on ad omega 2630-112 della Instron, con un range di misura di 50 mm, è stato posizionato al centro del provino per ottenere misure locali di deformazione.

Test

Ogni provino è stato posizionato verticalmente nella macchina di prova. Dopo aver serrato le estremità nella ganasce inferiore e superiore, sono stati fissati due elementi ad “L” in alluminio ad una distanza di 25 mm dalla mezzeria del provino, necessari per il posizionamento dell’estensimetro (Fig. 4.7). La prova è stata condotta in regime di controllo di spostamento ad una velocità di 0.25 mm/min.

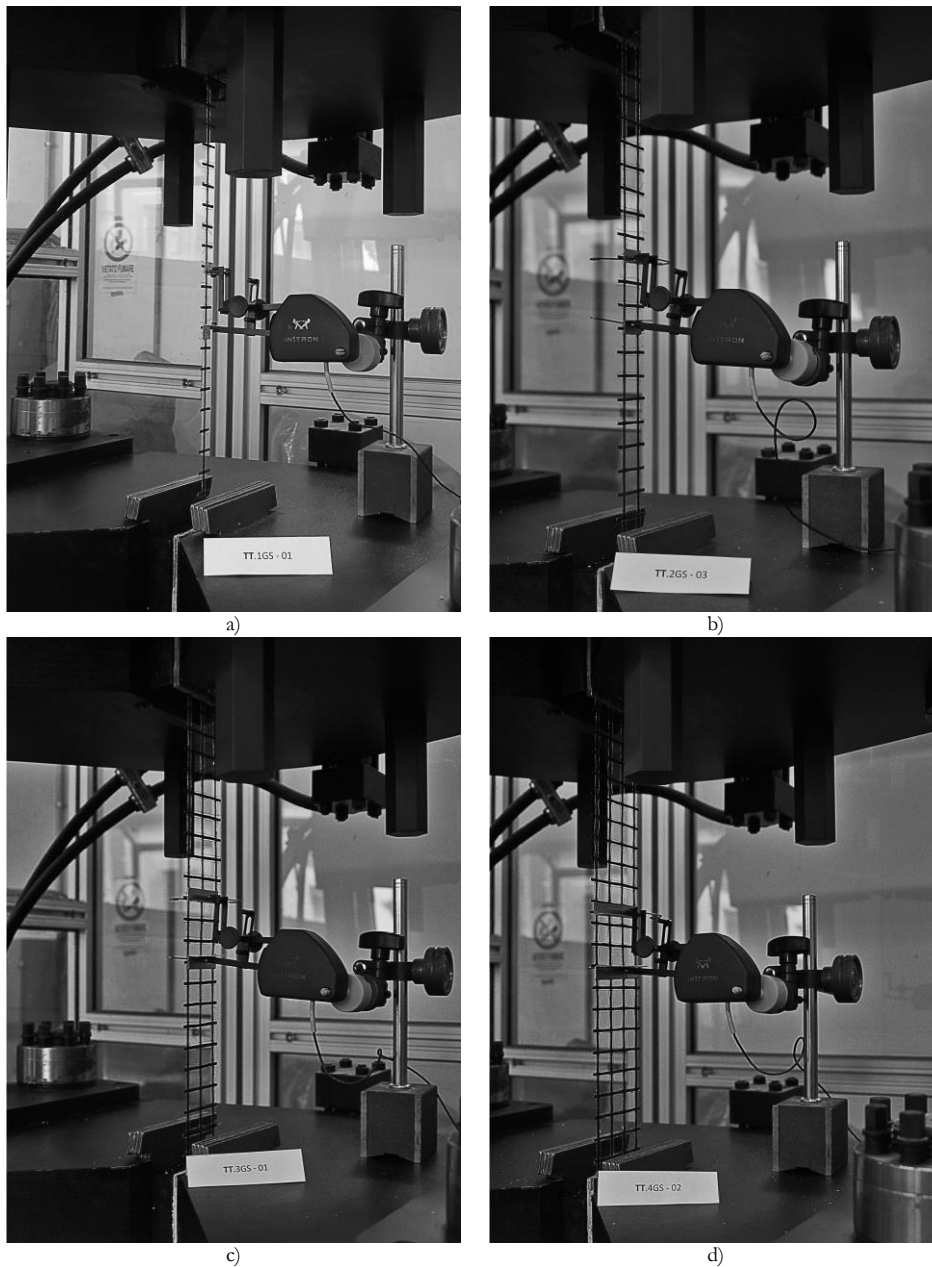


Fig. 4.8. Prova di trazione diretta su provini di rete di fibra costituiti da a) un multi-filamento, b) due multi-filamenti, c) tre multi-filamenti, d) quattro multi-filamenti

Provini e nomenclatura

3 provini da 1 multi-filamento longitudinale.....	TT.1GS-xx
3 provini da 2 multi-filamenti longitudinali.....	TT.2GS-xx
3 provini da 3 multi-filamenti longitudinali.....	TT.3GS-xx
3 provini da 4 multi-filamenti longitudinali.....	TT.4GS-xx

4.4.2. Risultati

In tabella 4.13 sono riportate le dimensioni geometriche dei provini ed i risultati ottenuti: carico massimo F_{max} e le corrispondenti tensione massima a trazione f_f e deformazione massima ε_f , il carico massimo F_{max} per numero n di multi-filamenti longitudinali, il modulo elastico E_f e la duttilità cinematica μ_c , valutati a partire dai grafici tensione-deformazione come descritto al paragrafo § 4.1.

La resistenza a trazione f_f è stata ricavata attraverso l'applicazione della seguente relazione:

$$f_f = \frac{F_{max}}{nb_f^*t_f^*} \left[\frac{N}{mm^2} \right] \quad (4.10)$$

F_{max} = carico massimo;

n = numero di multi-filamenti;

b_f^* = larghezza della maglia della rete di fibra, come da scheda tecnica;

t_f^* = spessore equivalente, ovvero spessore di una lastra equivalente di fibra (da scheda tecnica).

La corrispondente deformazione massima ε_f è stata valutata come rapporto tra le misure di spostamento δ_{max} , registrate dal LVDT integrato nella macchina di prova in corrispondenza del carico massimo F_{max} , e la lunghezza libera del provino di rete di fibra l_f :

$$\varepsilon_f = \frac{\delta_{max}}{l_f} \quad (4.11)$$

Dato il comportamento fragile esibito dai provini di rete di fibra non è stata valutata la duttilità cinematica disponibile μ_{cd} .

Tab. 4.13. Risultati prove di trazione diretta su provini di rete di fibra

provino	l_f [mm]	t_f^* [mm]	b_f^* [mm]	F_{max} [N]	F_{max}/n [N]	f_f [MPa]	ϵ_f	E_f [MPa]	μ_c
TT.1GS-01	380.0	0.032	17	340	340	625	0.010	59377	1.00
TT.1GS-02	386.0	0.032	17	173	173	318	0.005	67490	1.13
TT.1GS-03	383.0	0.032	17	547	547	1005	0.021	62133	1.28
			media	443	444	815	0.015	60755	1.14
			Dev.St.	146	146	269	0.008	1949	0.19
			Co.V.	33%	33%	33%	50%	3%	17%
TT.2GS-01	387.0	0.032	34	1015	508	933	0.020	68020	1.33
TT.2GS-02	389.5	0.032	34	892	446	820	0.015	61500	1.13
TT.2GS-03	387.0	0.032	34	944	472	868	0.018	57932	1.17
			media	950	475	874	0.018	62484	1.21
			Dev.St.	62	31	57	0.003	5115	0.11
			Co.V.	6%	6%	6%	15%	8%	9%
TT.3GS-01	388.0	0.032	51	1039	346	637	0.012	56807	1.09
TT.3GS-02	385.5	0.032	51	1660	553	1017	0.020	58138	1.12
TT.3GS-03	385.0	0.032	51	1433	478	878	0.017	60168	1.13
			media	1377	459	844	0.016	58371	1.11
			Dev.St.	314	105	192	0.004	1692	0.02
			Co.V.	23%	23%	23%	24%	3%	2%
TT.4GS-01	385.0	0.032	68	2053	513	943	0.019	57266	1.08
TT.4GS-02	384.5	0.032	68	1754	439	806	0.015	62468	1.13
TT.4GS-03	388.0	0.032	68	2237	559	1028	0.023	61278	1.25
			media	2015	504	926	0.019	60337	1.15
			Dev.St.	244	61	112	0.004	2726	0.09
			Co.V.	12%	12%	12%	20%	4%	8%

Note: in grigio è riportato il provino escluso dalla valutazione dei risultati medi per comportamento anomalo
 l_f =lunghezza libera del provino; t_f^* =spessore equivalente della rete di fibra; b_f^* =larghezza della maglia della rete di fibra; F_{max} =carico massimo;
 F_{max}/n =carico massimo a multi-filamento; f_f =resistenza a trazione (Eq. 4.10) ϵ_f =deformazione (Eq. 4.11); E_f =modulo elastico (Eq. 4.4);
 μ_c =duttilità cinematica (Eq. 4.3)

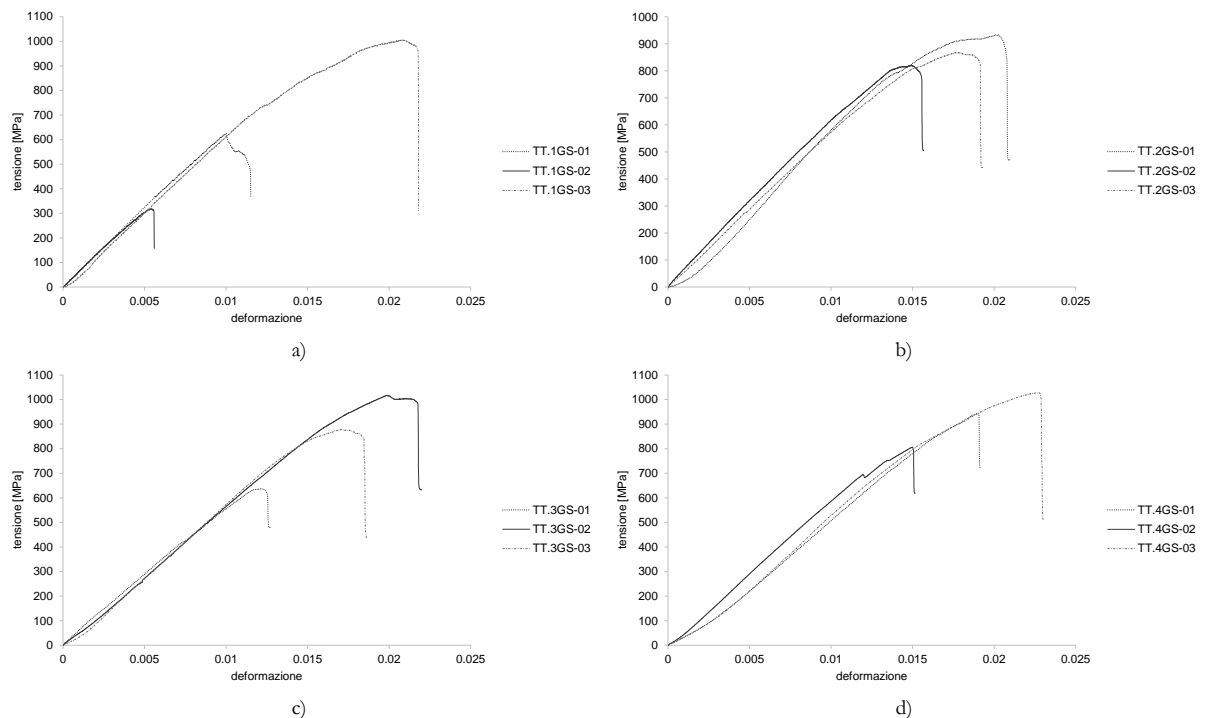


Fig. 4.9. Grafici tensione-deformazione derivanti da prove di trazione diretta su provini di rete di fibra GeoSteel® Grid 200 costituiti da a) 1 multi-filamento, b) 2 multi-filamenti, c) 3 multi-filamenti, d) 4 multi-filamenti

Tutti i grafici tensione-deformazione mostrano un andamento analogo, con un primo ramo quasi lineare elastico seguito da un breve tratto non lineare prima del raggiungimento della resistenza massima, ovvero della crisi a trazione di alcuni multi-filamenti longitudinali, dopo la quale la tensione diminuisce rapidamente evidenziando il comportamento fragile della rete di fibra.

4.4.3. Osservazioni

Tutti i provini hanno esibito una crisi localizzata in prossimità di una delle zone di ancoraggio, probabilmente a causa della concentrazione di tensione dovuta alla compressione esercitata dalle ganasce. La crisi è stata seguita dal parziale sfilamento dei multi-filamenti dalle piastre di alluminio. Dall'osservazione diretta (Fig. 4.10a) è stato notato che, concordemente con quanto descritto in letteratura (Larrinaga et al. 2013 e 2014, Carozzi & Poggi 2015), non si è mai verificata la rottura simultanea di tutti i multi-filamenti longitudinali. In particolare, nei provini costituiti da $n > 1$, la crisi ha riguardato per primo uno dei multi-filamenti esterni. Tale modalità di crisi è attribuibile alla difficoltà di ottenere inizialmente lunghezze ed aliquote di carico identiche in tutti i multi-filamenti (Garmendia et al. 2011, Larrinaga et al. 2013 e 2014).

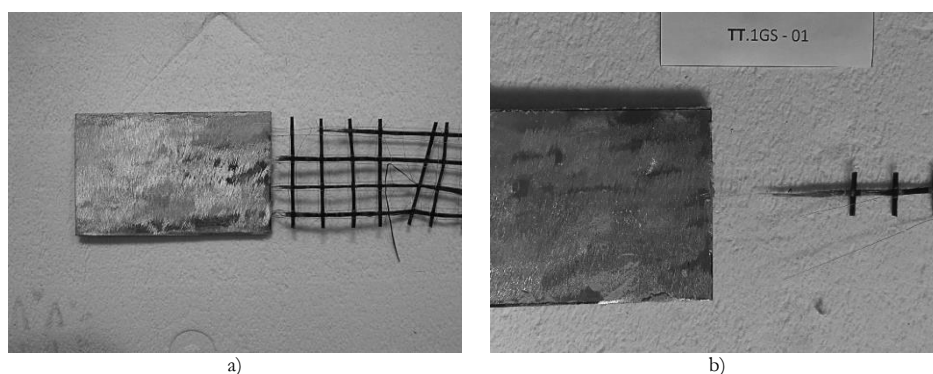


Fig. 4.10. a) Crisi a trazione non simultanea dei mutli-filamenti; b) comportamento telescopico

Tutti i provini hanno esibito un comportamento telescopico (Fig. 4.10b). I filamenti costituenti il singolo multi-filamento sono giunti a rottura per trazione in modo progressivo dall'esterno verso l'interno: quelli più esterni (o di manica) sono risultati i primi a raggiungere la tensione di rottura, mentre quelli interni hanno continuato a subire degli scorrimenti relativi a causa del basso attrito interno, fino a giungere essi stessi a rottura. Ne deriva una distribuzione non uniforme delle tensioni nella sezione trasversale del singolo multi-filamento. Data la crisi prossima alle zone di ancoraggio, la distribuzione non uniforme del carico, il comportamento telescopico e la possibile presenza di micro difetti della rete di fibra, dai test è risultata una tensione massima inferiore rispetto a quella riportata nella scheda tecnica fornita dal produttore (Larrinaga et al. 2014, Bertolesi et al. 2014).

Dividendo il valore medio del carico massimo per il numero di multi-filamenti costituenti i provini sono stati ottenuti dei valori prossimi tra loro (Garmendia et al. 2011); ciò evidenzia un incremento quasi costante della resistenza in funzione del numero di multi-filamenti longitudinali. Tracciando l'andamento del carico

massimo medio in funzione del corrispondente numero di multi-filamenti longitudinali è stata ottenuta una curva crescente con una pendenza dei singoli tratti che la compongono quasi costante (Fig. 4.11).

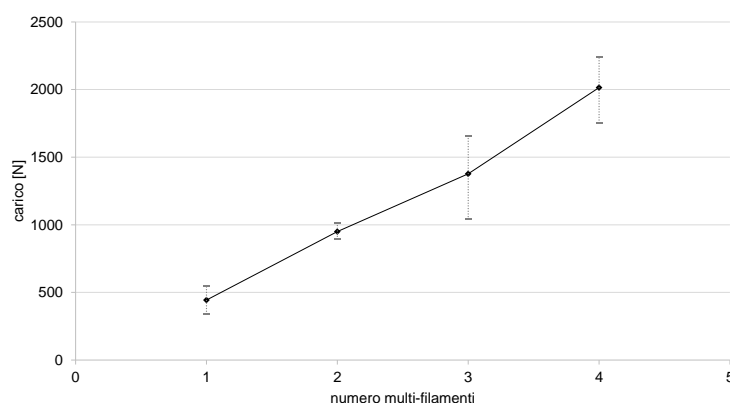


Fig. 4.11. Grafico carico massimo medio–numero di multi-filamenti con indicazione a tratteggio dei range di variazione dei risultati

Dall'applicazione dell'equazione 4.10 sono risultati valori di tensione inferiori e coefficienti di variazione maggiori per i provini costituiti da un unico multi-filamento (Tab. 4.13). Ciò è anche visibile dal grafico in figura 4.12 dove è stata riportata la tensione massima media in funzione di n . La curva presenta un primo tratto crescente e prosegue quasi costante nei tratti successivi. Tale fenomeno è probabilmente dovuto al contributo in resistenza dei multi-filamenti di trama.

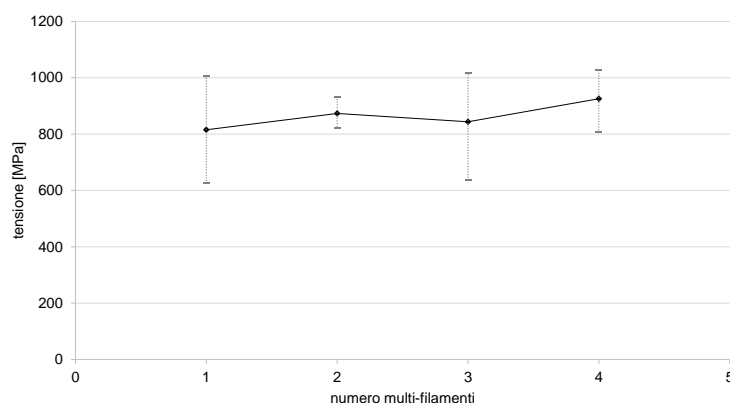


Fig. 4.12. Grafico tensione massima media–numero di multi-filamenti con indicazione a tratteggio dei range di variazione dei risultati

L'uniformità dei risultati ottenuti per i provini con $n > 1$ suggerisce l'assenza di effetti riconducibili alla loro larghezza, ovvero ad n , in accordo con Garmendia et al. (2011) e D'Antino (2014).

La deformazione è stata valutata utilizzando sia i dati di spostamento registrati dalla macchina di prova (spostamento delle ganasce), sia i valori registrati dall'estensimetro ad omega posizionato al centro del provino. In entrambe i casi, attraverso i grafici tensione-deformazione ottenuti, sono stati quantificati i moduli elastici seguendo il procedimento riportato al paragrafo § 4.1, i quali sono risultati inferiori al dato riportato nella scheda tecnica fornita dal produttore (Tab. 3.1). In particolare dai dati di spostamento è stato

ottenuto un modulo elastico E_f medio pari a 60487 MPa (Co.V.= 2.8%), mentre con i dati dell'estensimetro ad omega un modulo elastico E_{fe} medio pari a 66204 (Co.V.=10.9%). A differenza dei risultati in termini di tensione massima, il modulo elastico presenta valori che non risentono del numero di multi-filamenti longitudinali, come si può vedere dai grafici riportati in figura 4.13 nei quali E_f e E_{fe} sono stati riportati in funzione di n .

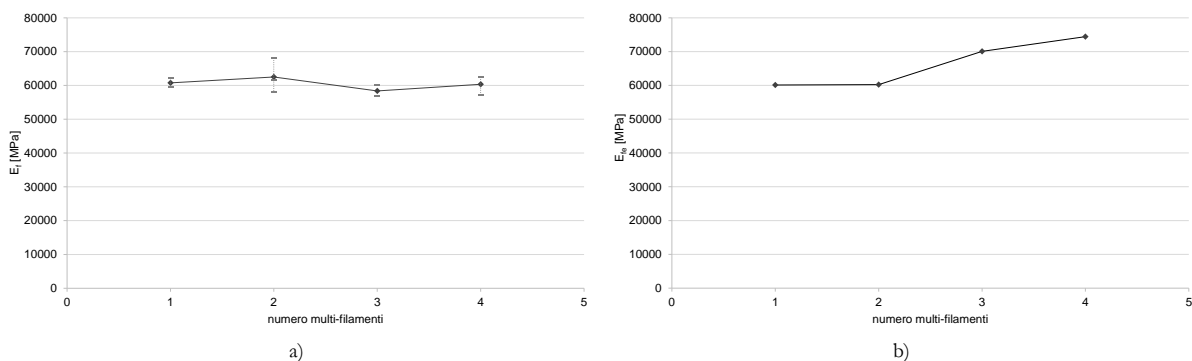


Fig. 4.13. a) Grafico modulo elastico medio da dati macchina di prova–numero di multi-filamenti del provino con indicazione a tratteggio dei range di variazione dei risultati; b) grafico modulo elastico medio da dati estensimetro–numero di multi-filamenti del provino

In tabella 4.14 sono state riportate le proprietà meccaniche medie della rete di fibra, ottenute dalla media dei risultati di ogni tipologia di provino, mentre in figura 4.14 è stato tracciato il relativo grafico medio tensione-deformazione linearizzato.

Tab. 4.14. Risultati medi prove di trazione diretta su provini di rete di fibra

provino	F_{max} [N]	F_{max}/n [N]	f_r [MPa]	ϵ_r	E_f [MPa]	E_{fe} [MPa]	μ_c
1GS	443	443	815	0.015	60755	60104	1.14
2GS	950	475	874	0.018	62484	60224	1.21
3GS	1377	459	844	0.016	58371	70061	1.11
4GS	2015	504	926	0.019	60337	74429	1.15
media		470	865	0.017	60487	66204	1.16
Dev.St.		26	47	0.001	1689	7200	0.04
Co.V.		5%	5%	9%	3%	11%	4%

F_{max} =carico massimo; F_{max}/n =carico massimo a multi-filamento; f_r =resistenza a trazione (Eq. 4.10) ϵ_r =deformazione (Eq. 4.11); E_f =modulo elastico (Eq. 4.4); E_{fe} =modulo elastico valutato con i dati dell'estensimetro clip-on (Eq. 4.4); μ_c =duttilità cinematica (Eq. 4.3)

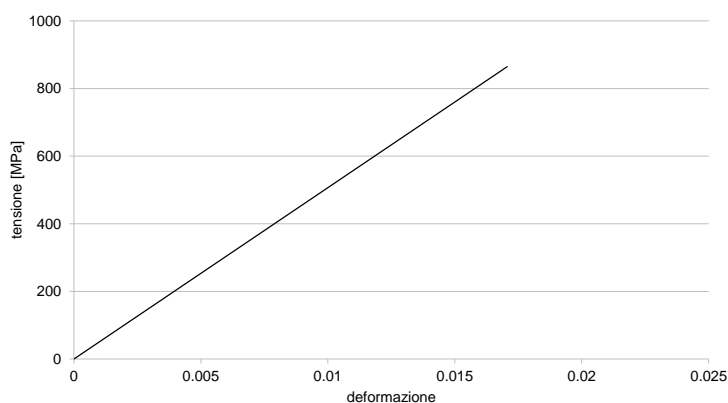


Fig. 4.14. Grafico medio linearizzato tensione-deformazione della rete di fibra

4.5. I materiali compositi fibrorinforzati

Al fine di determinare le proprietà ed il comportamento a trazione dei materiali compositi, sono state condotte prove di trazione diretta su provini costituiti dai quattro differenti compositi FRCM indagati nella presente campagna sperimentale.

4.5.1. Prove di trazione diretta

Preparazione dei provini

Per ogni tipologia di matrice sono stati realizzati tre provini di dimensioni $500 \times 65 \times 10$ mm³. Per garantire la planarità ed il mantenimento costante delle dimensioni dei provini, sono state impiegate delle casseforme lignee. Queste sono state posizionate e fissate su di una superficie piana; successivamente si è proceduto alla stesura al loro interno di un primo strato di matrice di spessore pari a 5 mm. Quindi, è stata posizionata la rete di fibra di basalto, costituita da quattro multi-filamenti longitudinali, pressandola delicatamente nel primo strato di malta in modo da assicurarne un appropriato impregnamento. Successivamente su di essa è stato realizzato un secondo strato di matrice di spessore pari a 5 mm. Per il dimensionamento dello spessore dei layer di matrice sono state seguite le indicazioni riportate nella scheda tecnica della malta GeoCalce® Fino della Kerakoll. I provini così realizzati sono stati lasciati maturare per 28 giorni in laboratorio.

Decorso il periodo necessario per la maturazione, i provini sono stati estratti dalle casseforme e alle loro estremità sono state applicate, mediante adesivo bicomponente Sikadur 31-CF, delle tabs di alluminio di dimensioni $120 \times 75 \times 0.8$ mm³, al fine di evitare danneggiamenti della matrice dovuti alla compressione esercitata dal sistema di ancoraggio con la macchina di prova e permettere una più uniforme distribuzione del carico.

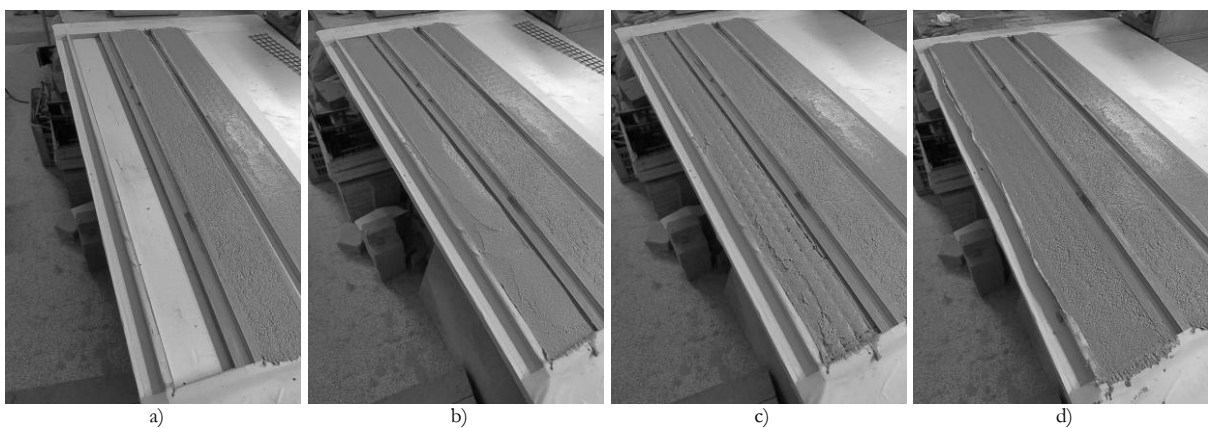


Fig. 4.15. Fasi di realizzazione dei provini di composito FRCM

Apparato di prova

Per l'esecuzione dei test è stata utilizzata la macchina di prova Instron SATEC™ 5592-315HVL, dotata di una cella di carico da 600 kN. L'acquisizione delle misure di spostamento è avvenuta attraverso un LVDT (Linear Variable Differential Trasformer) integrato nella macchina di prova, caratterizzato da una risoluzione di 1 mm. Un estensimetro clip-on ad omega 2630-112 della Instron, con un range di misura di 50 mm, è stato posizionato al centro del provino per ottenere misure locali di deformazioni.

Per l'ancoraggio dei provini alla macchina di prova è stato progettato e realizzato un apposito apparato (Fig. 4.16). Superiormente il carico di trazione viene trasmesso al provino mediante una cerniera metallica inserita in due piastre metalliche, di dimensioni 170x150x8 mm³, le quali serrano, tramite sei bulloni Ø8, l'estremità superiore del provino per una lunghezza di 120 mm; all'estremità inferiore un grillo metallico connette una cerniera metallica alle ganasce inferiori della macchina, in modo tale che non siano vincolate in maniera rigida le rotazioni sia nel piano che fuori dal piano del provino.

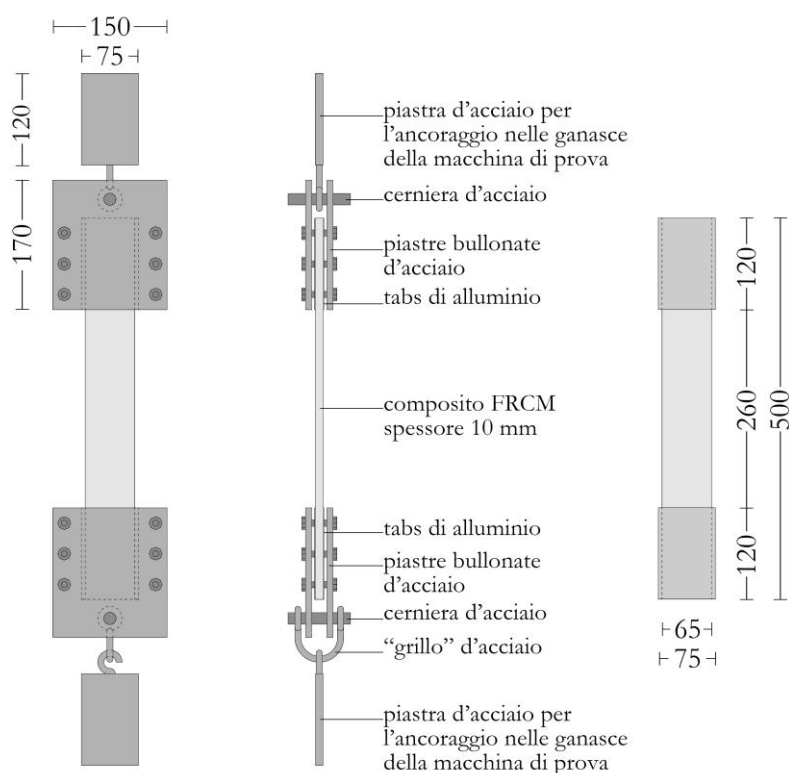


Fig. 4.16. Schema prova a trazione diretta (dimensioni in millimetri)

Test

Ogni provino è stato posizionato verticalmente nella macchina di prova, con le estremità fissate tra le piastre metalliche bullonate. Ad una distanza di 25 mm dalla mezzeria del provino sono stati fissati due elementi ad "L" in alluminio per il posizionamento dell'estensimetro clip-on ad omega. La prova è stata condotta in regime di controllo di spostamento ad una velocità di 0.25 mm/min.

Provini e nomenclatura

3 provini da 65 mm malta di calce idraulica + fibra GeoSteel® Grid 200.....	TT.MCA.GS-xxa
3 provini da 65 mm malta cementizia + fibra GeoSteel® Grid 200.....	TT.MCE.GS-xxa
3 provini da 65 mm malta bastarda + fibra GeoSteel® Grid 200.....	TT.MCE.GS-xxa
3 provini da 65 mm malta GeoCalce® Fino + fibra GeoSteel® Grid 200.....	TT.MKE.GS-xxa

4.5.2. Risultati

A partire dai dati ottenuti da ogni test sono state valutate la tensione massima a trazione nel composito f_r e le corrispondenti deformazioni massime ε_r ed ε_{re} ottenute dai dati registrati rispettivamente dal LVDT e dall'estensimetro ad omega:

$$f_r = \frac{F_{max}}{nb_f^*t_f^*} \left[\frac{N}{mm^2} \right] \quad (4.12)$$

$$\varepsilon_r = \frac{\delta_{max}}{l_r} \quad (4.13)$$

$$\varepsilon_{re} = \frac{\delta_{max,e}}{l_e} \quad (4.14)$$

F_{max} = carico massimo;

n = numero di multi-filamenti;

b_f^* = larghezza della maglia della rete di fibra, come da scheda tecnica;

t_f^* = spessore equivalente, ovvero spessore di una lastra equivalente costituita dal solo materiale delle fibre, come da scheda tecnica;

l_r = lunghezza libera del provino di composito;

l_e = range di misura dell'estensimetro clip-on ad omega, pari a 50 mm;

δ_{max} = spostamento massimo registrato dal LVDT;

$\delta_{max,e}$ = spostamento massimo registrato dall'estensimetro clip-on ad omega.

È da sottolineare che, dato il limitato range di misura, l'estensimetro clip-on ad omega non è in grado di cogliere una quantità rappresentativa di lesioni, per cui i dati registrati sono stati considerati limitatamente alla valutazione delle proprietà del provino integro ed utilizzati come dato di confronto per le misurazioni ottenute dalla macchina di prova (De Santis et al. 2017).

Si noti che tensione f_r e deformazione ε_r sono state calcolate assumendo distribuzioni uniformi del carico tra i multi-filamenti longitudinali e della tensione all'interno della sezione trasversale del singolo multi-filamento. Nonostante in letteratura sia stato ampiamente dimostrato come tali assunzioni si discostino dalla realtà (Banholzer 2004, Banholzer et al. 2006), equazioni simili alle 4.12 e 4.13 sono ampiamente utilizzate

(Garmendia et al. 2011, D'Antino et al. 2014, Sneed et al. 2015, Sabau et al. 2017) e proposte per le procedure di qualificazione di tali materiali (Ascione et al. 2015, AC434 2013).

La duttilità cinematica μ_s , la duttilità cinematica disponibile μ_{cd} ed il modulo elastico E_r sono stati valutati sulla base dei grafici tensione-deformazione secondo la procedura descritta al paragrafo § 4.1.

In particolare, come si vedrà nel seguito, sono stati calcolati due moduli elastici relativi alla risposta del provino integro E_1 e del provino lesionato E_3 ; per ogni provino sono state individuate sulle rispettive curve tensione-deformazione diverse fasi di risposta; successivamente sono stati individuati due punti (A e B) appartenenti al primo tratto lineare elastico della prima fase di risposta del provino integro, e due punti (C e D) appartenenti al primo tratto lineare della terza fase di risposta del provino lesionato (Arboleda 2014, Donnini 2016). Le pendenze delle due rette che collegano tali punti rappresentano i moduli elastici del provino nelle due fasi (Fig. 4.17), calcolati con le seguenti equazioni:

$$E_1 = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_{rB} - \sigma_{rA}}{\varepsilon_{\sigma_{rB}} - \varepsilon_{\sigma_{rA}}} \quad [\text{MPa}] \quad (4.15)$$

$$E_3 = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_{rD} - \sigma_{rC}}{\varepsilon_{\sigma_{rD}} - \varepsilon_{\sigma_{rC}}} \quad [\text{MPa}] \quad (4.16)$$

In aggiunta, è stato valutato un modulo elastico E_3^* attraverso l'individuazione dei punti corrispondenti al 90% ed al 60% (punti E ed F) della tensione massima f_r (Fig. 4.17), in accordo con la procedura indicata all'interno delle AC434 (2011):

$$E_3^* = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{90\%f_r - 60\%f_r}{\varepsilon_{90\%f_r} - \varepsilon_{60\%f_r}} \quad [\text{MPa}] \quad (4.17)$$

La seconda procedura si basa sulla scelta di due punti a quote predeterminate che, nella totalità delle prove condotte, ricadono nell'ultima parte non lineare del comportamento del composito lesionato.

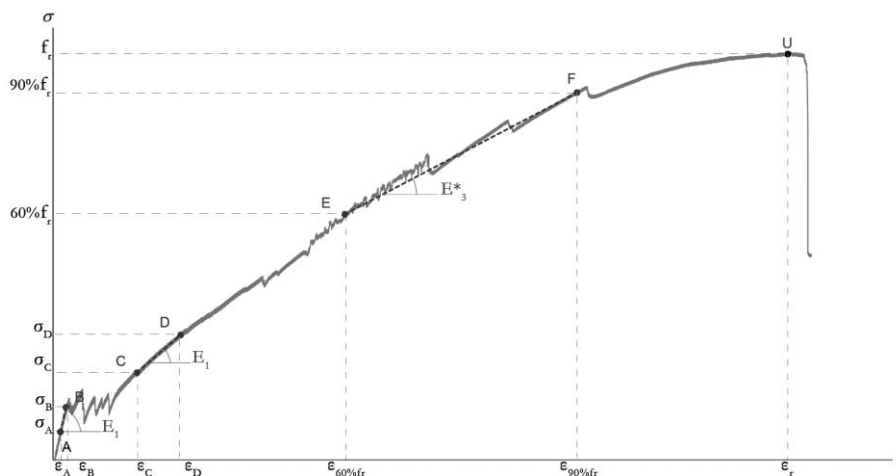


Fig. 4.17. Individuazione punti per la valutazione dei moduli elastici E_1, E_3, E_3^*

Infine, dividendo la tensione massima media f_r del composito per la tensione massima media f_f della rete di fibra (§ 4.4), è stato valutato il coefficiente di sfruttamento delle proprietà resistenti della rete di fibra per ogni tipologia di composito.

Schematizzazione comportamento a trazione compositi FRCM

Analogamente a quanto riportato in letteratura (Larrinaga et al. 2013 e 2014, Bertolesi et al. 2014, Carozzi & Poggi 2015, De Santis & de Felice 2015, Arboleda 2016, D’Antino & Papanicolaou 2017, De Santis et al. 2017, Lignola et al.2017), avendo utilizzato un apparato di prova simile a quelli classificati come “clamping grip” (Arboleda et al. 2015) tutti i provini hanno esibito una risposta a trazione suddivisibile in tre distinte fasi.

Dai risultati in termini di carico e di spostamento ottenuti, per ogni provino sono stati tracciati i grafici tensione-deformazione. Su ogni curva sono stati, quindi, individuati tre punti caratteristici: T_1 , T_2 , definiti punti di transizione, ed U (Fig. 4.18) corrispondente alla capacità massima esibita dal provino. Successivamente, per ogni tipologia di composito si è proceduto alla valutazione dei valori medi delle coordinate dei suddetti punti, mediante i quali è stata tracciata la curva media trilineare rappresentativa del comportamento a trazione del composito stesso.

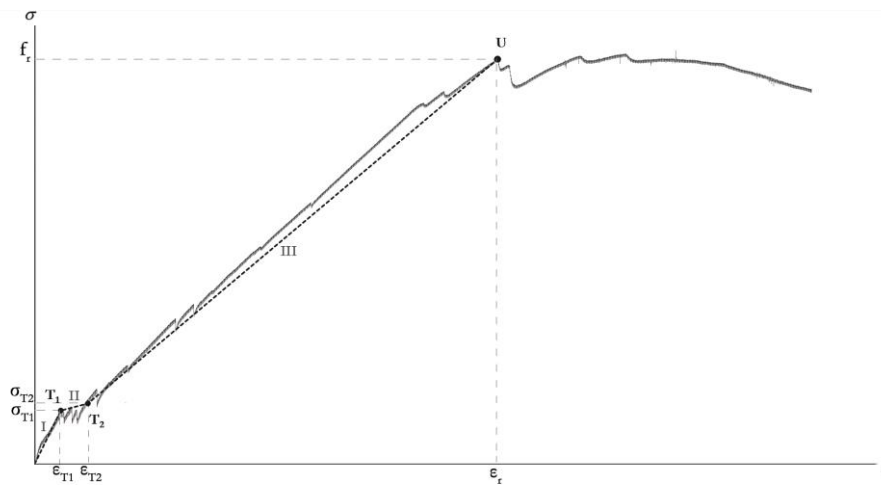


Fig. 4.18. Costruzione grafico medio tensione-deformazione tri-lineare

In tabella 4.14 e figura 4.19 sono stati riportati rispettivamente i risultati numerici e le curve tensione-deformazione.

Tab. 4.14. Risultati delle prove di trazione diretta su provini di composito costituiti da matrice di malta di calce Kerakoll

provino	F_{max} [N]	δ_{max} [mm]	f_r [MPa]	ϵ_r	E_1 [MPa]	E_3 [MPa]	E^*_3 [MPa]	μ_c	μ_{cd}	f_r / f_f	crisi
TT.MKE.GS-01A	1748	4.90	803	0.019	259069	54493	39080	5.71	1.00	0.98	S+R
TT.MKE.GS-02A	1549	3.87	712	0.015	239832	47101	38730	3.37	1.00	0.86	S+R
TT.MKE.GS-03A	1835	4.57	843	0.018	136391	55962	38034	3.00	1.01	1.02	S+R
media	1710	4.44	786	0.017	211764	52519	38614	4.03	1.00	0.95	
Dev.St.	146	0.53	67	0.002	65980	4749	532	1.47	0.00	0.08	
Co.V.	9%	12%	9%	12%	31%	9%	1%	36%	0%	9%	

F_{max} =carico massimo; δ_{max} =spostamento massimo; f_r =resistenza a trazione (Eq. 4.12); ϵ_r =deformazione (Eq. 4.13); E_1 =modulo elastico prima fase (Eq. 4.15); E_3 =modulo elastico terza fase (Eq. 4.16); E^*_3 = modulo elastico valutato con l'Eq. 4.17; μ_c =duttilità cinematica (Eq. 4.3); μ_{cd} =duttilità cinematica disponibile (Eq. 4.4); $crisi$ =per scorrimento fibra-matrice; R=rottura a trazione dei multi-filamenti longitudinali della rete di fibra

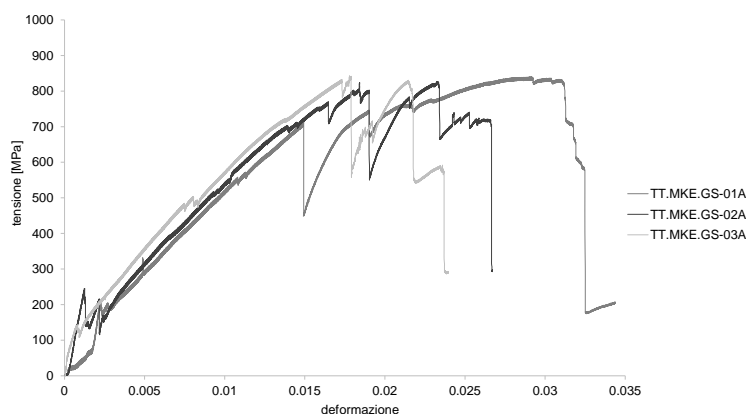


Fig. 4.19. Curve tensione-deformazione relative ai tre provini costituiti da matrice di malta di calce Kerakoll

In figura 4.20 sono state tracciate la curva media tri-lineare dei compositi con matrice di malta Kerakoll e la curva media relativa alla rete di fibra di basalto (§ 4.4.2). In tabella 4.15 sono stati riportati i risultati della tri-linearizzazione per ogni provino testato.

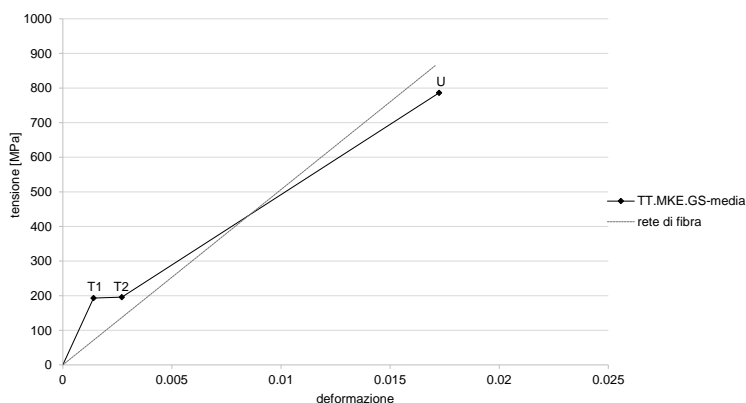


Fig. 4.20. Curva media tri-lineare tensione-deformazione relativa al composito con matrice di malta di calce Kerakoll e curva media tensione-deformazione della rete di fibra di basalto

Tab.4.15. Coordinate punti per la costruzione della curva media tri-lineare

provino	T ₁		T ₂		U	
	ε_{T1}	σ_{T1} [MPa]	ε_{T2}	σ_{T2} [MPa]	ε_U	$\sigma_U = f_r$ [MPa]
TT.MKE.GS-01A	0.001	241	0.003	220	0.019	803
TT.MKE.GS-02A	0.002	197	0.003	212	0.015	712
TT.MKE.GS-03A	0.001	1401	0.001	155	0.018	843.06
TRI-LINEARE	0.001	193	0.003	196	0.018	786

La fase I rappresenta la risposta a trazione del composito integro (Fig. 4.21a). La sua pendenza E_I è risultata maggiore rispetto alla risposta della rete di fibra, in quanto determinata dalle caratteristiche della fibra migliorate dalla presenza della matrice. La prima fase si è conclusa con il punto di transizione T_1 (σ_{T1} - ε_{T1}), corrispondente alla formazione di una prima lesione trasversale nella matrice, localizzata in prossimità di una delle zone di ancoraggio. Tale lesione ha causato un'improvvisa perdita di carico, denotando un comportamento fragile della matrice.

Segue la fase II di formazione di ulteriori lesioni nella matrice. Differentemente da quanto riportato in letteratura, nei compositi con matrice Kerakoll si è assistito alla formazione delle sole due lesioni trasversali in prossimità delle due zone di ancoraggio. All'apertura della seconda delle suddette lesioni è corrisposto il raggiungimento di un secondo stadio T_2 (σ_{T2} - ε_{T2}).

La fase III è determinata dall'evoluzione del quadro fessurativo. Durante tale fase è stato osservato un aumento di dimensioni delle due lesioni formatesi precedentemente per effetto dello scorrimento della fibra nella matrice. Inizialmente il comportamento è risultato lineare, con un modulo elastico E_3 prossimo a quello della rete di fibra e pari a 52519 MPa. Successivamente la rigidità del composito è diminuita ($E_3^*=38614$ MPa) a causa della perdita di adesione fibra-matrice che si è manifestata con l'apertura di una lesione longitudinale localizzata all'interfaccia fibra-matrice. In tutte le prove condotte tale lesione non si è estesa per tutta la lunghezza libera l_f del provino. L'improvvisa formazione di una terza lesione trasversale (σ_U - ε_U), localizzata nella zona centrale del provino, all'interno o in prossimità del range di misura dell'estensimetro ad omega (Fig. 4.21b), ha determinato una consistente ed improvvisa perdita di carico. Successivamente si è assistito ad una ripresa di carico, con valori di rigidità inferiori rispetto alla fase III, fino al raggiungimento della crisi a trazione della rete di fibra in corrispondenza della prima lesione trasversale formata. È da sottolineare come il formarsi della terza lesione trasversale, oltre a determinare una consistente perdita di carico, sia avvenuto per valori di tensione σ_U molto prossimi, ed in alcuni casi maggiori, ai valori corrispondenti alla crisi, sopraggiunta per rottura a trazione di alcuni multi-filamenti della rete di fibra. Dato il comportamento osservato, la tensione σ_U è stata considerata come tensione massima f_r e, quindi, come termine della tri-lineare del composito.

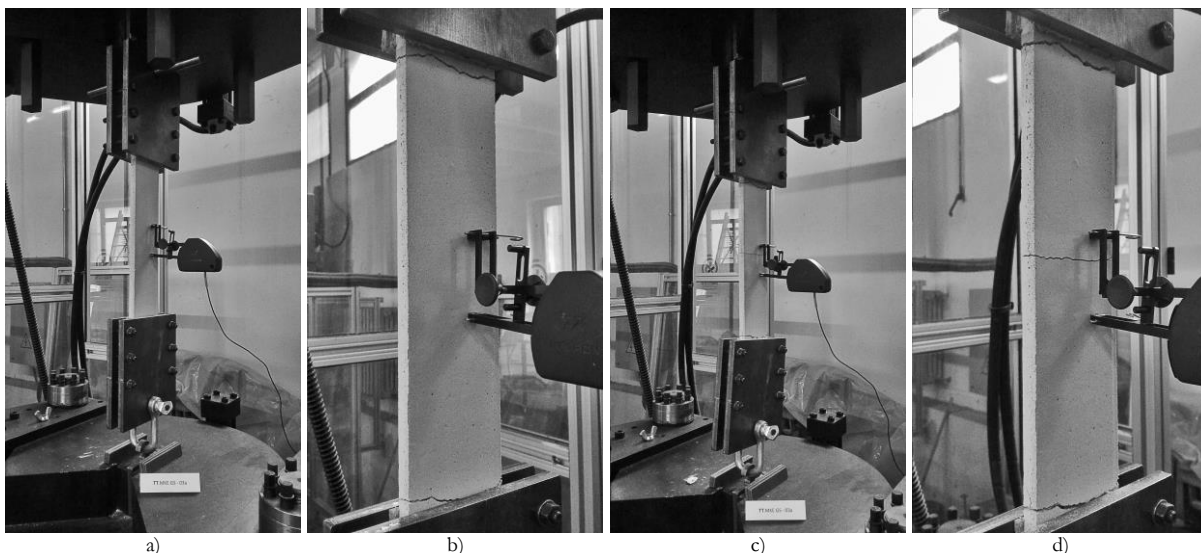


Fig. 4.21. Fasi della prova a trazione diretta sul provino TT.MKE.GS-03: a) composito integro, b) formazione delle prime due lesioni trasversali, c) formazione della terza lesione trasversale, d) accrescimento delle dimensioni delle tre lesioni trasversali

Al raggiungimento della crisi per rottura a trazione dei multi-filamenti è corrisposto uno sfruttamento della resistenza della rete di fibra pari a 0.95.

A prove ultimate, è stato possibile appurare che, prima della crisi, i multi-filamenti sono stati soggetti sia a scorrimenti fibra-matrice che a scorrimenti telescopici: dopo la rottura dei filamenti esterni adesi alla matrice, quelli più interni hanno registrato un ulteriore scorrimento fino a giungere in modo sequenziale a rottura.

In tutti i provini è stata osservata un distribuzione non uniforme del carico tra i 4 multi-filamenti longitudinali, come si evince dalla figura 4.22, in cui si può notare il maggiore scorrimento di uno dei multi-filamenti laterali. Ciò ha comportato la crisi non simultanea dei multi-filamenti.

Per nessun provino è stato registrato uno scorrimento del provino all'interno delle piastre bullonate.

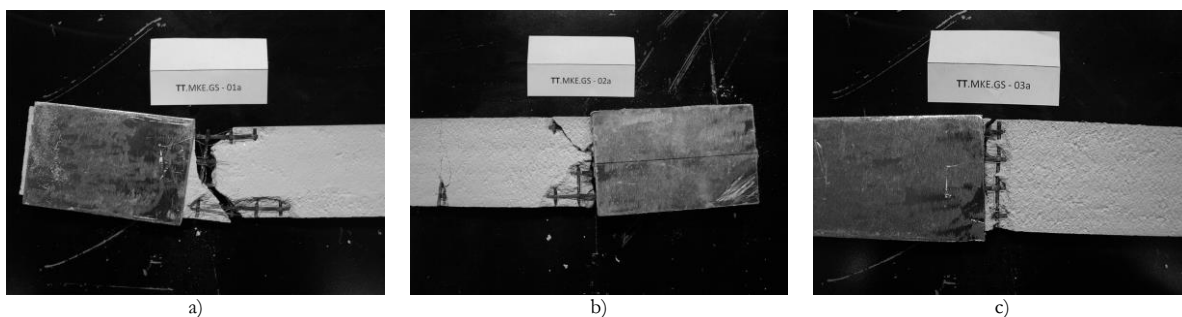


Fig. 4.22. Particolare della crisi nei provini a) TT.MKE.GS-01, b) TT.MKE.GS-02 e c) TT.MKE.GS-03

Malta cementizia + Kerakoll GeoSteel® Grid 200

In tabella 4.16 e figura 4.23 sono stati riportati rispettivamente i risultati numerici e le curve tensione-deformazione.

Tab. 4.16. Risultati delle prove di trazione diretta su provini di composito costituiti da matrice di malta cementizia

provino	F_{max} [N]	δ_{max} [mm]	f_r [MPa]	ϵ_r	E_1 [MPa]	E_3 [MPa]	E^*_3 [MPa]	μ_c	μ_{cd}	f_r / f_i	crisi
TT.MCE.GS-01A	1262	6.35	580	0.025	164039	42589	24229	6.56	-	0.70	S
TT.MCE.GS-02A	1378	7.05	625	0.030	52520	31989	27626	1.85	-	0.76	S
TT.MCE.GS-03A	1411	6.68	649	0.026	233256	44215	23380	9.10	1.03	0.79	S
media	1351	6.69	618	0.027	149938	39597	23382	5.84	1.03	0.75	
Dev.St.	78	0.35	35	0.003	91189	6639	4243	3.68	0	0.04	
Co.V.	6%	5%	6%	10%	61%	17%	18%	63%	0%	6%	

F_{max} =carico massimo; δ_{max} =spostamento massimo; f_r =resistenza a trazione (Eq. 4.12); ϵ_r =deformazione (Eq. 4.13); E_1 =modulo elastico prima fase (Eq. 4.15); E_3 =modulo elastico terza fase (Eq. 4.16); E^*_3 = modulo elastico valutato con l'Eq. 4.17; μ_c =duttilità cinematica (Eq. 4.3); μ_{cd} =duttilità cinematica disponibile (Eq. 4.4); $crisi$ =per scorrimento fibra-matrice; R=rottura a trazione dei multi-filamenti longitudinali della rete di fibra

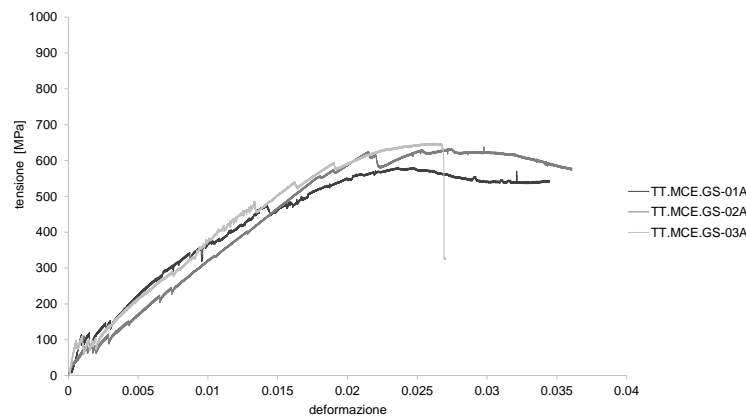


Fig. 4.23. Curve tensione-deformazione relative ai tre provini costituiti da matrice di malta cementizia

In figura 4.24 sono state tracciate la curva media tri-lineare dei compositi con matrice di malta cementizia e la curva media relativa alla rete di fibra di basalto (§ 4.4.2). In tabella 4.17 sono stati riportati i risultati della tri-linearizzazione per ogni provino testato.

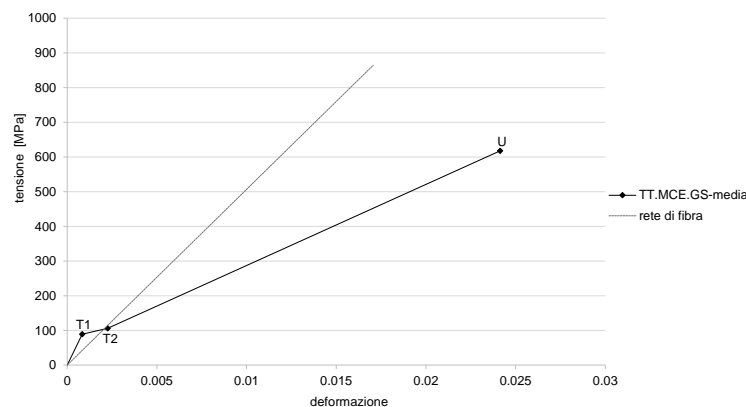


Fig. 4.24. Curva media tri-lineare tensione-deformazione relativa al composito con matrice di malta cementizia e curva media tensione-deformazione della rete di fibra di basalto

Tab. 4.17. Coordinate punti per la costruzione della curva media tri-lineare

provino	T ₁		T ₂		U	
	ϵ_{T1}	σ_{T1} [MPa]	ϵ_{T2}	σ_{T2} [MPa]	ϵ_U	$\sigma_U = f_r$ [MPa]
TT.MCE.GS-01A	0.001	110	0.003	123	0.025	580
TT.MCE.GS-02A	0.001	82	0.003	93	0.021	625
TT.MCE.GS-03A	0.001	101	0.002	106	0.026	649
TRI-LINEARE	0.001	98	0.002	108	0.023	618

La fase I rappresenta la risposta del composito integro. Conformemente a quanto osservato per i compositi con matrice Kerakoll, tale fase ha esibito una pendenza E_1 maggiore di quella della rete di fibra, grazie al contributo congiunto di fibra e matrice. La formazione di una prima lesione trasversale, in prossimità di una delle due zone di ancoraggio (superiore o inferiore), ha determinato il raggiungimento di un primo stadio T_1 ($\sigma_{T1}-\epsilon_{T1}$).

Segue la fase II di formazione delle lesioni nella matrice. Oltre alle prime due lesioni in prossimità delle zone di ancoraggio, ulteriori lesioni trasversali, parallele alle prime e localizzate nelle zone definite di transizione (Fig. 4.25c), hanno caratterizzato il pattern fessurativo del composito. Dall'osservazione dei provini è stato appurato che:

- tutte le lesioni (per un totale compreso tra 5 e 7) si sono formate superficialmente, per poi estendersi nello spessore del composito fino all'interfaccia con la fibra;
- le lesioni si sono formate in corrispondenza dei multi-filamenti trasversali, probabilmente a causa della concentrazione di tensioni nei nodi della rete di fibra e della riduzione di spessore della matrice (D'Antino & Papanicolaou 2017), ad eccezione delle prime due parallele e prossime alle zone di ancoraggio;
- la distanza tra due lesioni successive è risultata pari a circa due maglie della rete di fibra;
- l'ultima lesione trasversale si è formata nella zona centrale del provino, all'interno o in prossimità del range di misura dell'estensimetro clip-on ad omega.

La fase di formazione delle lesioni si è conclusa con il raggiungimento del punto T_2 ($\sigma_{T2}-\epsilon_{T2}$), corrispondente allo stato di saturazione della matrice (matrix crack saturation).

Segue la fase III. La pendenza E_3 è risultata inferiore al modulo elastico della rete di fibra. Per effetto dello scorrimento della fibra nella matrice, è stato osservato un aumento dimensionale delle lesioni precedentemente formatesi, con conseguenti perdita di rigidità e formazione di una lesione interlaminare. Tutti i provini hanno esibito una crisi per scorrimento della fibra all'interno della matrice in corrispondenza della lesione di ampiezza maggiore, ovvero della prima lesione trasversale formata, ad eccezione del provino TT.MCE.GS-03a per il quale è stata raggiunta la rottura a trazione di alcuni multi-filamenti delle rete di fibra (Fig. 4.26c) in modo analogo a quanto osservato nei provini con matrice Kerakoll. La crisi a trazione è stata ottenuta in corrispondenza di valori di tensione inferiori alla resistenza della rete di fibra, probabilmente a causa del danneggiamento dei multi-filamenti per effetto dello scorrimento lungo la superficie scabra della matrice.

Dopo il raggiungimento della tensione massima a trazione f_r , ovvero del punto terminale U della fase III, le curve tensione-deformazione presentano un quarto tratto decrescente (ad eccezione del provino

TT.MCE.GS-03a per il quale la crisi si è rivelata di tipo fragile): non appena la lesione longitudinale ha coinvolto tutta la lunghezza libera del provino, sono stati registrati incrementi di deformazione a tensione quasi costante. Dall'osservazione dei provini durante i test è stato appurato che il quarto ramo è derivato dallo sfilamento dei multi-filamenti longitudinali dalla matrice serrata nelle zone di ancoraggio, al quale si si è opposto il solo attrito fibra-matrice.

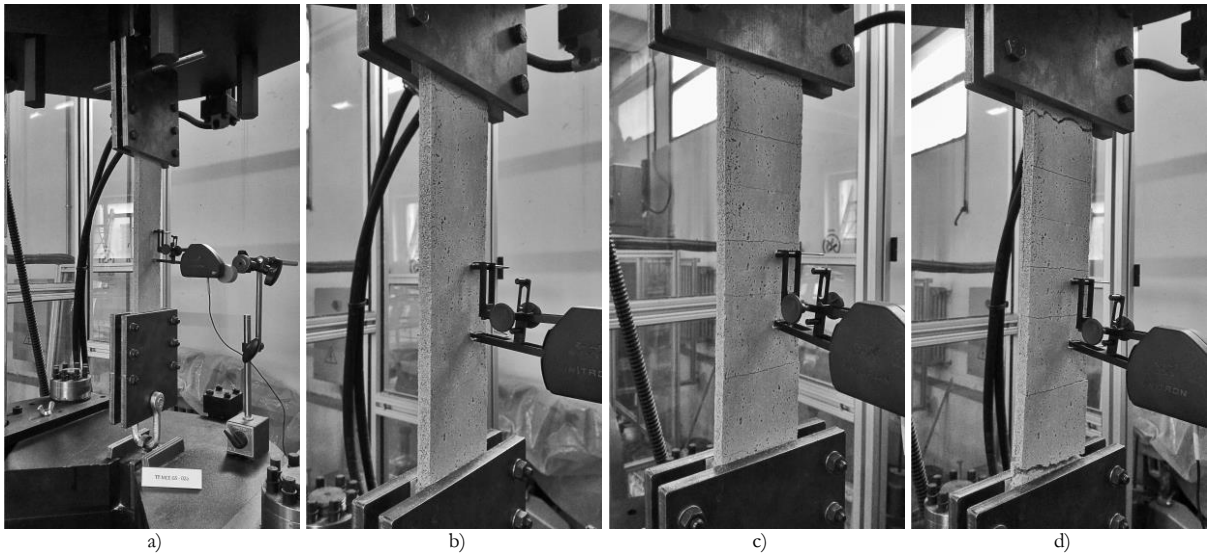


Fig. 4.25. Fasi della prova a trazione diretta sul provino TT.MCE.GS-02: a) composito integro, b) formazione della prima lesione trasversale, c) raggiungimento dello stadio "matrix crack saturation", d) accrescimento delle dimensioni delle lesioni trasversali ed evoluzione della lesione longitudinale interlaminare

In tutti i provini è stato osservato un maggiore scorrimento di uno dei multi-filamenti laterali che ha causato la rotazione delle piastre bullonate (Fig. 4.26). È, quindi, possibile supporre una distribuzione non omogenea del carico tra i quattro multi-filamenti.

Per nessun provino è stato registrato uno scorrimento del composito all'interno delle piastre bullonate.

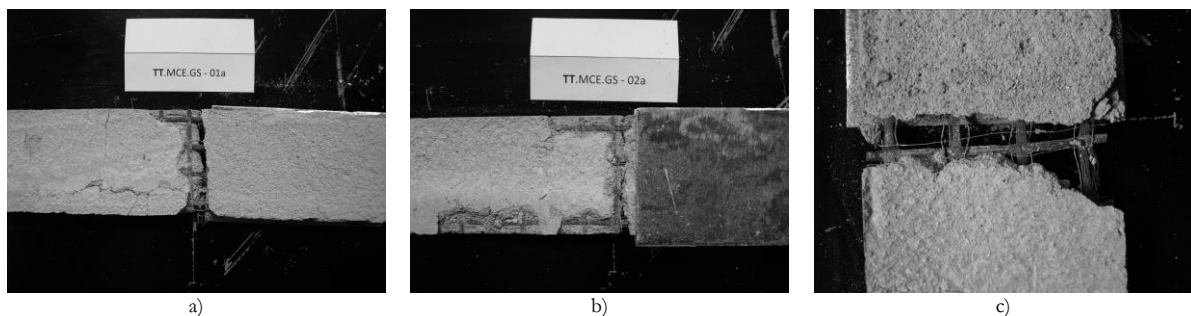


Fig. 4.26. Particolare della crisi nei provini a) TT.MCE.GS-01, b) TT.MCE.GS-02 e c) TT.MCE.GS-03

Malta di calce idraulica + Kerakoll GeoSteel® Grid 200

Due provini (TT.MCA.GS-01A e 02A) hanno subito dei danneggiamenti durante le operazioni di allestimento della prova: il posizionamento del provino all'interno della macchina di prova ed il serraggio tra le piastre bullonate, ha provocato l'apertura di alcune micro lesioni trasversali a causa delle basse caratteristiche meccaniche della malta di calce idraulica realizzata in laboratorio. I dati ottenuti sono stati, quindi, esclusi dalla valutazione dei risultati medi. In tabella 4.18 ed in figura 4.27 sono riportati rispettivamente i risultati numerici e la curva tensione-deformazione (§ 4.4.2).

Tab. 4.18. Risultati della prova di trazione diretta sul provino di composito costituito da matrice di malta di calce idraulica

provino	F_{max} [N]	δ_{max} [mm]	f_r [MPa]	ϵ_r	E_1 [MPa]	E_3 [MPa]	E^*_3 [MPa]	μ_c	μ_{cd}	f_r / f_t	crisi
TT.MCA.GS-03A	1250	6.0	574	0.023	54130	31549	28722	2.146	-	0.70	S

F_{max} =carico massimo; δ_{max} =spostamento massimo; f_r =resistenza a trazione (Eq. 4.12); ϵ_r =deformazione (Eq. 4.13); E_1 =modulo elastico prima fase (Eq. 4.15); E_3 =modulo elastico terza fase (Eq. 4.16); E^*_3 = modulo elastico valutato con l'Eq. 4.17; μ_c =duttilità cinematica (Eq. 4.3); μ_{cd} =duttilità cinematica disponibile (Eq. 4.4); $crisi$ =per scorrimento fibra-matrice

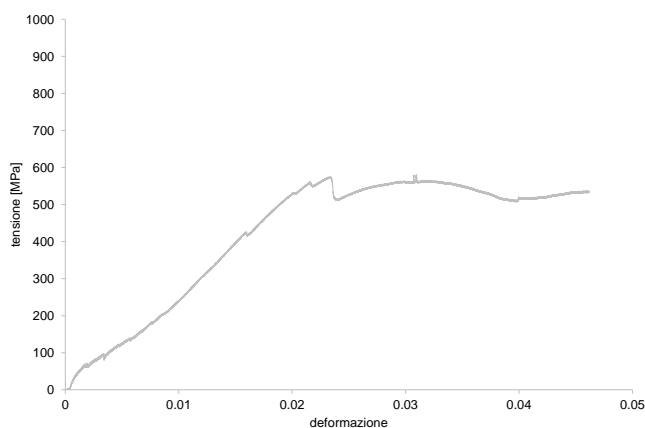


Fig. 4.27. Curva tensione-deformazione relativa al provino costituito da matrice di malta di calce idraulica

In figura 4.28 sono state tracciate la curva tri-lineare del composito con matrice di malta cementizia e la curva media relativa alla rete di fibra di basalto (§ 4.4.2). In tabella 4.19 sono stati riportati i risultati della tri-linearizzazione.

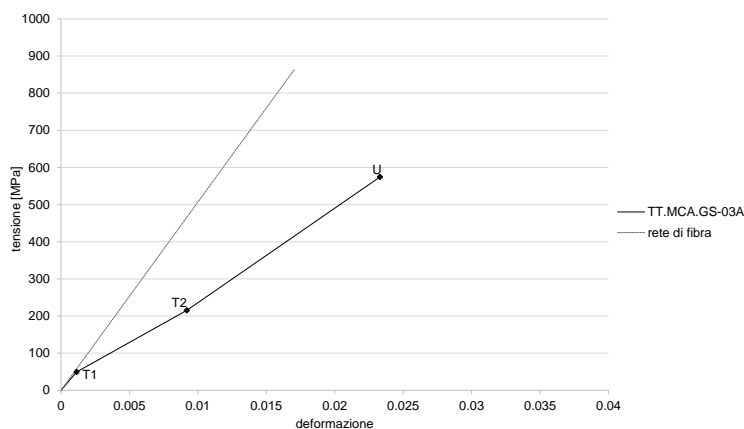


Fig. 4.28. Curva tri-lineare tensione-deformazione relativa al composito con matrice di malta di calce idraulica e curva media tensione-deformazione della rete di fibra di basalto

Tab. 4.19. Coordinate punti per la costruzione della curva tri-lineare

provino	T ₁		T ₂		U	
	ε _{T1}	σ _{T1} [MPa]	ε _{T2}	σ _{T2} [MPa]	ε _U	σ _U = f _r [MPa]
TF.MCA.GS-03A	0.001	49	0.009	215	0.023	574

Il percorso di equilibrio del provino è risultato simile a quello descritto per i compositi precedenti. Dopo una prima fase lineare di risposta del composito integro, caratterizzata da un modulo elastico E_1 prossimo a quello della rete di fibra e pari a 54130 MPa, l'apertura di una prima lesione in prossimità di una delle zone di ancoraggio ha determinato il raggiungimento del primo punto di transizione T_1 (σ_{T1} - ϵ_{T1}). Segue la fase II di formazione delle lesioni trasversali nella matrice. Dall'osservazione del provino durante il test è stato possibile appurare che:

- tutte le lesioni (per un totale di circa 8 lesioni) si sono formate superficialmente, per poi estendersi nello spessore del composito fino all'interfaccia con la fibra;
- le lesioni si sono formate in corrispondenza dei multi-filamenti trasversali, probabilmente a causa della concentrazione di tensioni nei nodi della rete di fibra e della riduzione di spessore della matrice (D'Antino & Papanicolaou 2017), ad eccezione delle prime due parallele e prossime alle zone di ancoraggio;
- la distanza tra due lesioni successive è risultata pari a circa due maglie della rete di fibra;
- l'ultima lesione trasversale si è formata nella zona centrale del provino, all'interno o in prossimità del range di misura dell'estensimetro clip-on ad omega.

Raggiunto lo stato di saturazione della matrice (matrix crack saturation), corrispondente al punto di transizione T_2 (σ_{T2} - ϵ_{T2}), è seguita una fase III, caratterizzata da un primo tratto lineare con modulo elastico E_3 pari a 31549 MPa. Al crescere del carico è stato osservato un aumento dimensionale delle lesioni precedentemente formatesi, nonché la formazione, a partire dalle prime lesioni trasversali, di una lesione longitudinale localizzata all'interfaccia fibra-matrice, conseguenza dello scorrimento della fibra nella matrice. Date le inferiori proprietà meccaniche a trazione della malta di calce idraulica rispetto alle malte cementizia e Kerakoll, l'apertura delle lesioni non ha provocato consistenti perdite di carico e la delaminazione si è innescata poco dopo l'inizio della fase III evolvendosi velocemente fino a raggiungere tutta l'estensione l_r del provino. Ne consegue una pendenza della fase II simile a quella della fase III. La terza fase si è conclusa con il raggiungimento della tensione massima a trazione del composito f_r . Come per i provini a base di malta cementizia, la crisi è sopraggiunta per scorrimento fibra-matrice in corrispondenza della lesione di ampiezza maggiore, ovvero della prima lesione trasversale formata. Proseguendo la prova sono stati ottenuti consistenti scorrimenti che denotano uno sfilamento dei multi-filamenti longitudinali dalla matrice serrata nelle piastre per l'ancoraggio; ciò si è tradotto in un quarto tratto di grafico decrescente, risultato dell'attrito tra i multi-filamenti longitudinali e la matrice.

In modo analogo ai compositi analizzati precedentemente, è stato osservato un maggiore scorrimento di uno dei multi-filamenti laterali che ha causato la rotazione delle piastre bullonate.

Non è stato registrato uno scorrimento del composito all'interno delle piastre bullonate.

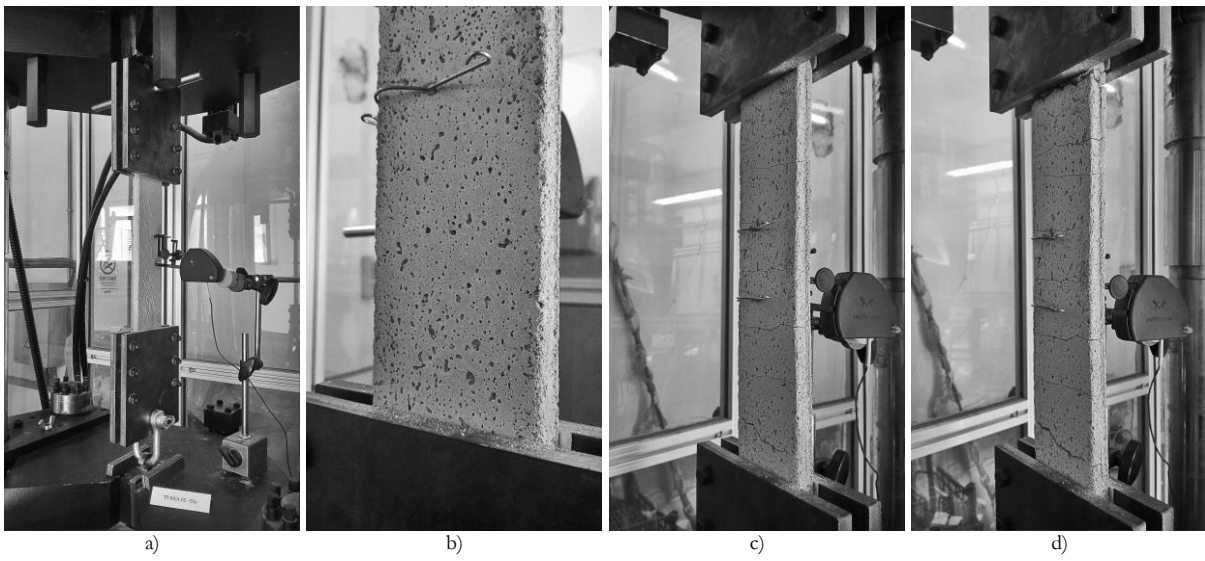


Fig. 4.29. Fasi della prova a trazione diretta sul provino TT.MCA.GS-03: a) composito integro, b) formazione della prima lesione trasversale, c) raggiungimento dello stadio “matrix crack saturation”, d) accrescimento delle dimensioni delle lesioni trasversali ed evoluzione della lesione longitudinale interlaminare

Malta bastarda + Kerakoll GeoSteel® Grid 200

Analogamente ai compositi con matrice di malta di calce idraulica, due provini si sono danneggiati durante le fasi di allestimento delle prove (posizionamento del provino tra le piastre bullonate, serraggio del provino tra le piastre bullonate, posizionamento di provino e piastre nella macchina di prova) a causa delle basse caratteristiche meccaniche della malta bastarda. Data la rilevanza dei danneggiamenti non è stato possibile sottoporre i due provini a prova di trazione diretta.

In tabella 4.20 ed in figura 4.30 sono stati riportati rispettivamente i risultati numerici e la curva tensione-deformazione.

Tab. 4.20. Risultati della prova di trazione diretta sul provino di composito costituito da matrice di malta bastarda

provino	F_{max} [N]	δ_{max} [mm]	f_r [MPa]	ϵ_r	E_1 [MPa]	E_3 [MPa]	E^*_3 [MPa]	μ_c	μ_{cd}	f_r / f_f	crisi
TT.MBA.GS-01A	175	2.13	80	0.008	49523	37038	16061	5.17	1.44	0.09	S

F_{max} =carico massimo; δ_{max} =spostamento massimo; f_r =resistenza a trazione (Eq. 4.12); ϵ_r =deformazione (Eq. 4.13); E_1 =modulo elastico prima fase (Eq. 4.15); E_3 =modulo elastico terza fase (Eq. 4.16); E^*_3 = modulo elastico valutato con l'Eq. 4.17; μ_c =duttilità cinematica (Eq. 4.3); μ_{cd} =duttilità cinematica disponibile (Eq. 4.4); *crisi*=per scorrimento fibra-matrice

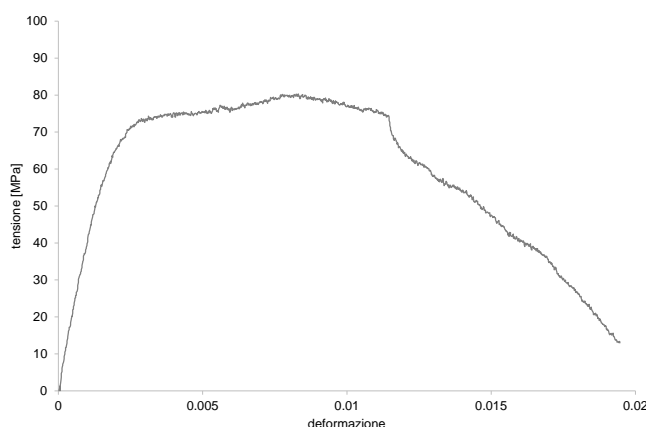


Fig. 4.30. Curva tensione-deformazione relativa al provino costituito da matrice di malta bastarda

In figura 4.31 sono state tracciate la curva tri-lineare ottenuta dal provino testato e la curva media relativa alla rete di fibra di basalto (§ 4.4.2). In tabella 4.21 sono stati riportati i risultati della linearizzazione.

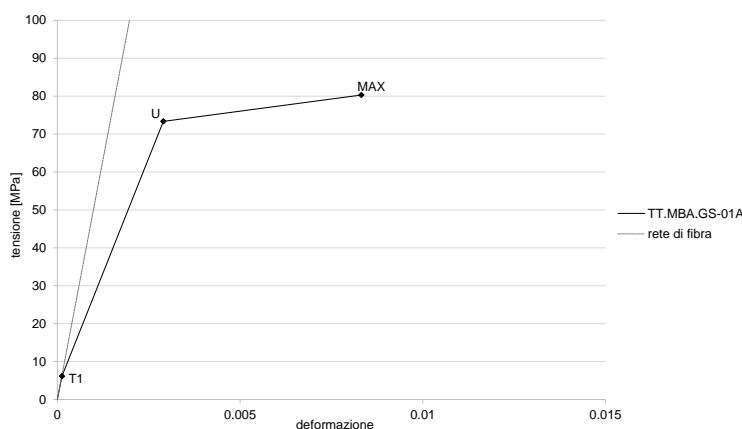


Fig. 4.31. Curva media tensione deformazione relativa al composito con matrice di malta bastarda

Tab. 4.21. Coordinate punti per la costruzione della curva media tri-lineare

provino	T ₁		U		massimo	
	ε _{T1}	σ _{T1} [MPa]	ε _U	σ _U [MPa]	ε _r	f _r [MPa]
TT.MBA.GS-01A	0.000124	6	0.003	73	0.008	80

Differentemente dai compositi analizzati precedentemente, il primo tratto lineare elastico non è risultato facilmente individuabile sia a causa della sua limitata estensione (apertura della prima lesione a circa 10 N) sia per l'assenza di una fase di formazione delle lesioni trasversali. Dopo la prima fase lineare, caratterizzata da un modulo elastico E_1 pari a 49523 MPa ed inferiore rispetto a quello della rete di fibra, l'apertura di una prima lesione in prossimità di una delle zone di ancoraggio ha evidenziato il raggiungimento di un primo stadio T_1 (σ_{T1} - ϵ_{T1}). Segue una seconda fase caratterizzata da una pendenza inferiore ($E_2=37038$ MPa) durante la quale è stata osservata la formazione delle lesioni trasversali e della lesione interlaminare. Al formarsi di ogni lesione non è corrisposta una evidente caduta di carico. Dall'osservazione è stato riscontrato che:

- tutte le lesioni (per un totale di circa 8 lesioni) si sono formate superficialmente, per poi estendersi nello spessore del composito fino all'interfaccia con la fibra;
- le lesioni si sono formate in corrispondenza dei multi-filamenti trasversali, probabilmente a causa della concentrazione di tensioni nei nodi della rete di fibra e della riduzione di spessore della matrice (D'Antino & Papanicolaou 2017), ad eccezione delle prime due parallele e prossime alle zone di ancoraggio;
- la distanza tra due lesioni successive è risultata pari a circa due maglie della rete di fibra;
- l'ultima lesione trasversale si è formata nella zona centrale del provino, all'interno o in prossimità del range di misura dell'estensimetro clip-on ad omega.

Tale seconda fase è terminata con il raggiungimento della tensione σ_U di poco inferiore alla tensione massima f_r . Successivamente, per effetto dello sfilamento della rete di fibra dalla matrice in una delle zone di ancoraggio è stato registrato un incremento degli spostamenti a tensione quasi costante. In questa fase il crescere della tensione fino al valore massimo f_r , pari a 80 MPa, è riconducibile all'attrito che si è generato tra la rete di fibra e la malta nelle suddette zone.

È stato osservato un maggiore scorrimento di uno dei multi-filamenti laterali che ha causato la rotazione delle piastre bullonate.

Dati i bassi risultati in termini di tensione massima e di corrispondente sfruttamento delle proprietà resistenti della rete di fibra (Tab. 4.20) i risultati ottenuti non verranno inclusi nel confronto tra le diverse tipologie di composito testate (§ 4.5.3).

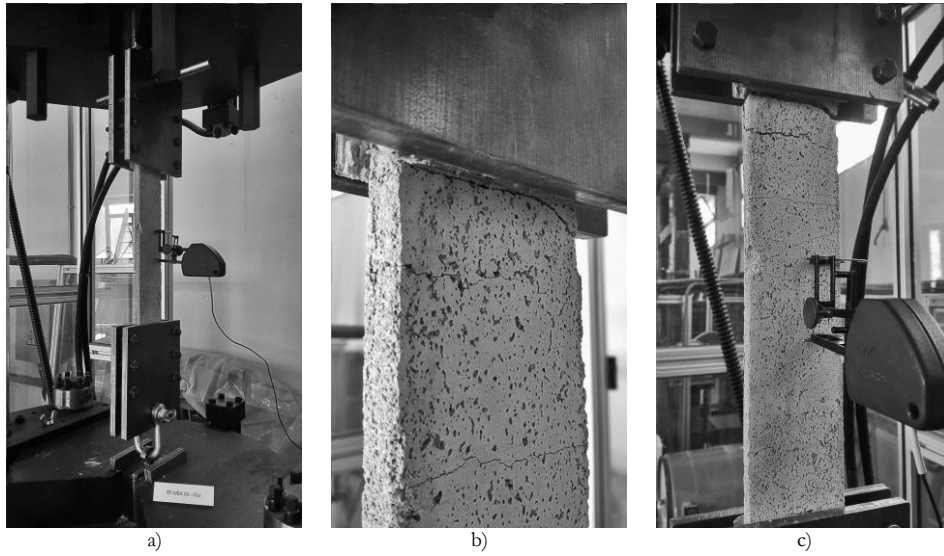


Fig. 4.32. Fasi della prova a trazione diretta sul provino TT.MBA.GS-01: a) composito integro, b) formazione della prima lesione trasversale, c) accrescimento delle dimensioni delle lesioni trasversali

4.5.3. Osservazioni

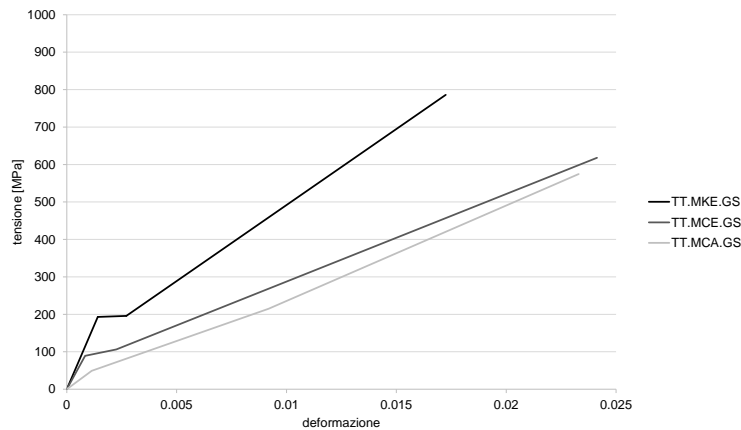


Fig. 4.33. Curve tri-lineari tensione-deformazione relative ai compositi costituiti da malta di calce idraulica Kerakoll (MKE), malta cementizia (MCE), malta di calce idraulica (MCA)

Tab. 4.22. Risultati medi derivanti da prove di trazione diretta su provini di composito costituiti da malta di calce idraulica Kerakoll (MKE), malta cementizia (MCE) e malta di calce idraulica (MCA) con indicazione in parentesi dei valori di deviazione standard e coefficiente di variazione

provino	F_{\max} [N]	δ_{\max} [mm]	f_f [MPa]	ε_r	E_1 [MPa]	E_3 [MPa]	μ_c	μ_{cd}	f_r / f_f	crisi
TT.MKE.GS	1710 (146;9)	4.44 (0.53;12)	786 (67;9)	0.017 (0.002;12)	211764 (65980;31)	52519 (4749;9)	4.03 (1.47;36)	1.00 (0;0)	0.95 (0.08;9)	R+S
TT.MCE.GS	1351 (78;6)	6.69 (0.35;5)	618 (35;6)	0.027 (0.003;10)	149938 (91189;61)	39597 (6639;17)	5.84 (3.68;63)	1.03 (0;0)	0.75 (0.04;6)	S
TT.MCA.GS	1250 (-)	6.0 (-)	574 (-)	0.023 (-)	54130 (-)	31549 (-)	2.15 (-)	- (-)	0.70 (-)	S

F_{\max} =carico massimo; δ_{\max} =spostamento massimo; f_f =resistenza a trazione (Eq. 4.12); ε_r =deformazione (Eq. 4.13); E_1 =modulo elastico prima fase (Eq. 4.15); E_3 =modulo elastico terza fase (Eq. 4.16); E^* = modulo elastico valutato con l'Eq. 4.17; μ_c =duttilità cinematica (Eq. 4.3); μ_{cd} =duttilità cinematica disponibile (Eq. 4.4); *crisi*=per scorrimento fibra-matrice; R=rottura a trazione dei multi-filamenti longitudinali della rete di fibra

I risultati ottenuti hanno esibito una limitata dispersione con coefficienti di variazione inferiori al 13%, ad eccezione del modulo elastico E_1 del provino integro, il quale dipende da proprietà che non vengono tenute in considerazione dividendo il carico per l'area della sola rete di fibra (D'Antino & Papanicolaou 2017). La prima fase di risposta del provino integro è, infatti, influenzata dalle proprietà della matrice, le quali di per sé sono affette da un'alta variabilità che si riflette sulla risposta del composito.

Come descritto precedentemente e analogamente a quanto riportato in letteratura, avendo utilizzato un apparato di prova simile a quelli classificati come “clamping grip” (Arboleda et al. 2015), tutti i provini hanno esibito una risposta a trazione suddivisibile in tre distinte fasi. Durante la prima fase il composito risulta integro, per cui è presumibili che le caratteristiche esibite rispecchino quelle della malta che ne costituisce la matrice migliorate dalla presenza della rete di fibra. Il raggiungimento del punto di transizione T_2 è determinato dalla formazione della prima lesione trasversale nella matrice, ovvero dal raggiungimento della resistenza a trazione della malta. Per ogni tipologia di composito è stata, quindi, valutata la tensione σ_{TI}^* , dividendo il carico per l'area trasversale del composito. Difformemente da quanto riportato in letteratura (Carozzi & Poggi 2015, Arboleda 2014), tali tensioni sono risultate inferiori alle resistenze delle corrispondenti malte (§ 4.3.2), probabilmente a causa della concentrazione di tensioni di compressione

dovute all'ancoraggio, le quali hanno causato una prematura formazione delle prime due lesioni (D'Antino & Papanicolaou 2017).

Tab. 4.23. Tensione corrispondente alla formazione della prima lesione valutata sulla base delle dimensioni geometriche della rete di fibra f_{fm} e della matrice σ_{Tf}

Tipologia malta	σ_{Tf} [MPa]	f_{fm} [MPa]
CALCE IDRAULICA	0.08	0.27
CEMENTIZIA	0.33	2.43
KERAKOLL	0.65	3.72

Il modulo elastico E_f dei compositi con matrici di malta Kerakoll e di malta cementizia è risultato maggiore rispetto alla rete di fibra, dimostrando come nella fase I tale proprietà sia il prodotto della combinazione delle caratteristiche delle due componenti. Al contrario, dalle curve relative ai compositi con matrice di calce idraulica è scaturita una pendenza simile a quella della rete di fibra. Inoltre, al diminuire del valore di E_f è stata notata una riduzione di estensione della fase I. Dato l'apparato di prova, tale comportamento ha dimostrato come le caratteristiche del provino integro (fase I) siano influenzate principalmente dalle proprietà meccaniche della matrice: al diminuire della resistenza a trazione della malta, si è assistito alla riduzione del modulo elastico E_f e della tensione σ_{Tf} in corrispondenza della quale si è formata la prima lesione.

L'apertura delle prime due lesioni in prossimità delle zone di ancoraggio è riconducibile alla concentrazione di tensioni dovuta al serraggio esercitato dall'apparato di prova.

In corrispondenza di una lesione il carico viene trasmesso mediante i soli multi-filamenti, che ne connettono i lembi fungendo da ponti. Le buone proprietà meccaniche e di adesione del composito con matrice Kerakoll hanno consentito a tali tensioni di raggiungere la capacità resistente della rete di fibra ed una crisi a trazione dei multi-filamenti stessi, con un coefficiente medio di sfruttamento pari a 0.95. Il comportamento differente dei compositi costituiti da malte realizzate in laboratorio, con coefficienti di sfruttamento inferiori, è attribuibile a due differenti ragioni (D'Antino & Papanicolaou 2017):

1. Una capacità di adesione fibra-matrice inferiore rispetto ai provini con matrice di malta Kerakoll, che ha provocato maggiori scorrimenti (localizzati nelle zone di ancoraggio) ed ha impedito il completo sfruttamento delle proprietà meccaniche della rete di fibra, con conseguenti coefficienti di sfruttamento minori;
2. Una insufficiente compressione nelle zone di ancoraggio per impedire lo scorrimento fibra-matrice e raggiungere una crisi per rottura a trazione della rete di fibra. È da sottolineare che, data la bassa capacità a compressione delle malte realizzate in laboratorio, una pressione maggiore avrebbe richiesto il rinforzo delle estremità dei provini per evitarne il danneggiamento.

Le due modalità di crisi riscontrate sono, comunque, concordi con quanto riportato in letteratura per compositi realizzati con fibra di basalto (D'Antino & Papanicolaou 2017, Lignola 2017).

Nel caso di compositi costituiti da malta bastarda, le inferiori caratteristiche meccaniche e di adesione hanno determinato notevoli difficoltà durante le fasi di allestimento della prova. Come conseguenza è stato

possibile testare un unico provino. Al termine della prova, dopo aver rimosso il provino dalle piastre bullonate, è stato appurato che il sistema di ancoraggio ha danneggiato la matrice, permettendo lo sfilamento della rete di fibra e limitando le proprietà meccaniche del composito (coefficiente di sfruttamento della resistenza della rete di fibra pari al 6%). Per cui i risultati ottenuti non possono essere considerati rappresentativi del comportamento di tale composito e, nel caso di matrici particolarmente deboli, sarà necessario in futuro una revisione dell'apparato di prova.

In generale i risultati hanno evidenziato che la variazione dei parametri meccanici e del pattern fessurativo dipendono dalle proprietà meccaniche della matrice, dall'abbinamento fibra-matrice, ovvero dalle proprietà di adesione fibra-matrice, che all'aumentare della resistenza della malta corrispondono un incremento di rigidità ed una riduzione sia di deformabilità che di duttilità del composito e che a buone proprietà di adesione corrispondono minori scorrimenti ed un maggiore sfruttamento delle proprietà della rete di fibra, da cui deriva una crisi per rottura a trazione della rete stessa.

5. Prove di adesione

5.1. Introduzione

Il comportamento di adesione è stato indagato attraverso l'esecuzione di quattro differenti tipologie di prova:

- Single-Shear Test;
- Double-Shear Test-tipo A;
- Double-Shear Test-tipo B;
- Beam Test.

Sono state condotte due differenti tipologie di Double-Shear Test: Double-Shear Test-tipo A e Double-Shear Test-tipo B. Per la prima sono stati utilizzati dei provini costituiti da un unico elemento di supporto rinforzato su due facce contrapposte mediante l'applicazione di due strisce di composito, per un totale di due superfici di adesione; la presenza di una porzione di rete di fibra non impregnata nella matrice ha permesso l'applicazione del carico di trazione direttamente alla rete di fibra. Per la seconda sono stati realizzati dei provini costituiti da due elementi di supporto rinforzati tramite due strisce di composito, per un totale di quattro superfici di adesione; il carico viene applicato agli elementi di supporto i quali allontanandosi sottopongono le strisce di composito a trazione. Per una descrizione più dettagliata si rimanda ai paragrafi 5.3 e 5.4.

I test sono stati eseguiti su provini rinforzati con compositi costituiti dall'abbinamento della rete di fibra di basalto Kerakoll GeoSteel® Grid 200 con quattro differenti tipologie di matrice (come descritto al § 3):

- Malta Kerakoll GeoCalce® Fino;
- Malta cementizia;
- Malta di calce idraulica;
- Malta bastarda.

Per tutti i provini la larghezza delle strisce di composito è stata mantenuta costante e pari a 95 mm, ovvero le strisce di rete di fibra immerse nelle matrici sono costituite da 6 multi-filamenti longitudinali. In tabella 5.1 sono riportate le grandezze geometriche delle strisce di rete di fibra impiegate nei provini.

Tab. 5.1. Grandezze geometriche rete di fibra di basalto Kerakoll GeoSteel® Grid 200

materiale fibroso	n	t_f^* [mm]	b_f^* [mm]	A_f [mm ²]
GeoSteel® Grid 200	6	0.032	17	3.264

n = numero di multi-filamenti; b_f^* = larghezza maglia rete di fibra, come da scheda tecnica; t_f^* = spessore equivalente, ovvero spessore di una lastra equivalente costituita dal solo materiale delle fibre, come da scheda tecnica; B = larghezza del composito; A_f = area equivalente della sezione trasversale della rete di fibra.

Sommario prove effettuate e nomenclatura

Per identificare i provini sono stati utilizzati i seguenti codici identificativi, dove la prima sigla indica la tipologia di prova di adesione (SST=Single Shear Test, DST-A=Double Shear Test set-up A, DST-B=Double Shear Test set-up B, BT=Beam Test), *MXX* indica la tipologia di matrice (MCA= malta di calce idraulica; MCE=malta cementizia; MBA=malta bastarda; MKE= malta Kerakoll GeoCalce® Fino), *GS* indica la rete di fibra (GeoSteel® Grid 200) ed *nn* indica il numero del provino testato:

SST.MXX.GS-*nn*.....Single-Shear Test
DST-A.MXX.GS-*nn*.....Double-Shear Test-tipo A
DST-B.MXX.GS-*nn*.....Double-Shear Test-tipo B
BT.MXX.GS-*nn*.....Beam Test

Valutazione parametri meccanici

Dalle prove condotte sono stati ottenuti i grafici carico-spostamento e/o carico-scorrimento globale, i quali presentano un andamento contraddistinto da dei tratti caratteristici.

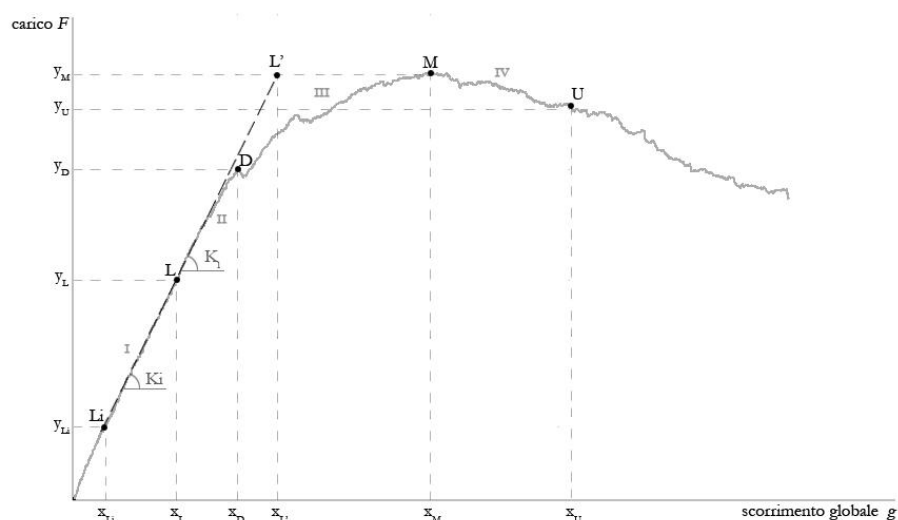


Fig. 5.1. Individuazione punti caratteristici dal grafico carico-scorrimento

- 1) Il grafico è crescente con andamento elastico lineare. Alla fine di questo tratto (punto L) si ha, solitamente, la comparsa delle prime lesioni nella matrice del provino. Tale fase può risultare preceduta da una fase di assestamento della prova (prove SST e DST-A);
- 2) Il secondo tratto rappresenta la fase dopo i primi danneggiamenti ed è caratterizzata da una rigidità inferiore rispetto al tratto precedente. Tale fase non è sempre facilmente distinguibile da quella precedente (come nella schematizzazione riportata in figura 5.1) e può risultare suddivisibile in due parti a causa della formazione di una lesione interlaminare che provoca una variazione di pendenza. Tale fase termina con il raggiungimento del carico di debonding $F_{deb}=y_D$ (punto D). Questo rappresenta la capacità di adesione d'interfaccia del composito, ovvero il carico massimo

trasmissibile per adesione. Il punto D è individuato sul grafico da un ulteriore e visibile cambio di pendenza, accompagnato spesso da una perdita di carico dovuta alla decoesione fibra-matrice;

- 3) Il tratto successivo ha ancora andamento crescente. La fibra scorre nella matrice, con conseguente propagazione della delaminazione dall'estremo caricato verso l'estremo libero del composito, e l'unico apporto in resistenza è dovuto all'ingranamento che si genera tra i due materiali costituenti il composito durante lo scorrimento, fino al raggiungimento della massima resistenza del provino $F_{max} = y_M$;
- 4) Il grafico ha andamento decrescente. La prima parte di questo tratto del grafico rappresenta la duttilità residua del materiale una volta raggiunto il punto di collasso U, individuato sulla curva come il punto corrispondente all'80% della carico massimo $F_{max} = y_M$. In base alla modalità di crisi manifestata dal provino, tale tratto può non essere presente.

I tratti sono individuati da dei punti caratteristici, come illustrato in figura 5.1.

Attraverso i punti così individuati sono stati valutati i seguenti parametri meccanici:

$$\sigma_{max} = \frac{y_M}{A_f} \quad \text{tensione massima di rottura} \quad (5.1)$$

$$K_i = \frac{y_L - y_{Li}}{x_L - x_{Li}} \quad \text{rigidezza del provino integro} \quad (5.2)$$

$$K_l = \frac{y_D - y_L}{x_D - x_L} \quad \text{rigidezza del provino lesionato} \quad (5.3)$$

$$\mu_c = \frac{x_M}{x_{Li}} \quad \text{duttilità cinematica} \quad (5.4)$$

$$\mu_{cd} = \frac{x_U}{x_M} \quad \text{duttilità cinematica disponibile} \quad (5.5)$$

Nelle analisi riportate nei paragrafi che seguono, le differenti modalità di crisi sono state classificate facendo riferimento alla schematizzazione (Fig. 5.2) riportata in Ascione et al. (2015).

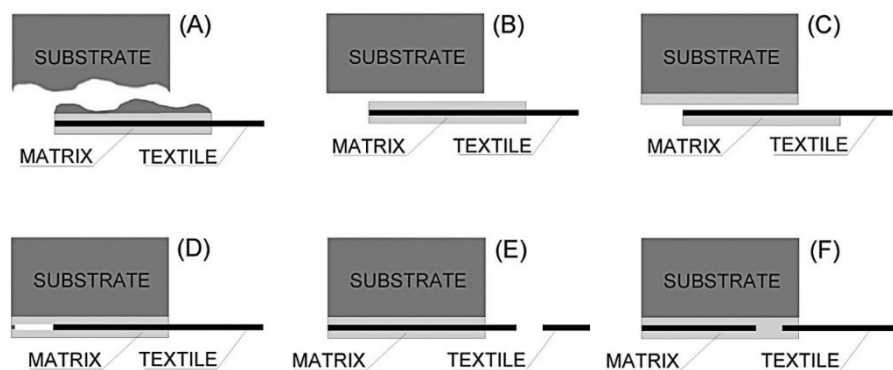


Fig. 5.2. Modalità di crisi relative a materiali compositi FRCM sottoposti a prova di adesione (Ascione et al. 2015)

5.2. Single-Shear Test

Per ogni tipologia di rinforzo sono stati testati 6 provini, per un totale di 24 Single-Shear Tests.

Preparazione dei provini

Per ogni provino è stato utilizzato un supporto in laterizio, costituito da un mattone in pasta molle di dimensioni 250x120x55 mm³. Dopo aver opportunamente rettificato una delle facce minori, mediante taglio effettuato con sega circolare con disco diamantato da 3 mm, ogni mattone è stato rinforzato attraverso l'applicazione su una delle facce maggiori di una striscia di composito FRCM di dimensioni 220x95x10 mm³. Le strisce di fibra utilizzate per i compositi sono state tagliate in modo da ottenere una lunghezza maggiore del composito e pari a 750 mm. Ne sono risultati 530 mm non immersi nella matrice.

Per la realizzazione dei provini, sulle facce destinate ai rinforzi sono stati segnati i bordi dei compositi e sono state fissate delle casseforme lignee (Fig. 5.3a). Dopo aver debitamente inumidito il laterizio, si è proceduto alla stesura di un primo strato di malta di spessore pari a 5 mm (Fig. 5.3b); successivamente è stata disposta la rete di fibra, pressandola delicatamente nel primo strato di matrice in modo da assicurarne un appropriato impregnamento (Fig. 5.3c), ed è stato applicato il secondo ed esterno layer di matrice ottenendo uno spessore finale di 10 mm (Fig. 5.3c). Per il dimensionamento dello spessore degli strati di matrice sono state seguite le indicazioni riportate nella scheda tecnica della malta GeoCalce® Fino della Kerakoll. Come mostrato in figura 5.3 e 5.4, il composito non è stato applicato su tutta la lunghezza del mattone, bensì è stato interrotto a 30 mm dal limite superiore del mattone per evitare effetti di bordo durante l'esecuzione della prova (D'Antino et al. 2015a, b, Donnini et al. 2016, 2017, De Santis et al. 2017, Lignola et al. 2017). La striscia di composito è stata realizzata in modo che il lato rettificato costituisse l'estremità superiore del provino, ovvero fosse rivolto verso la porzione di rete di fibra non immersa nella matrice. I provini così realizzati sono stati lasciati maturare in laboratorio per 28 giorni.

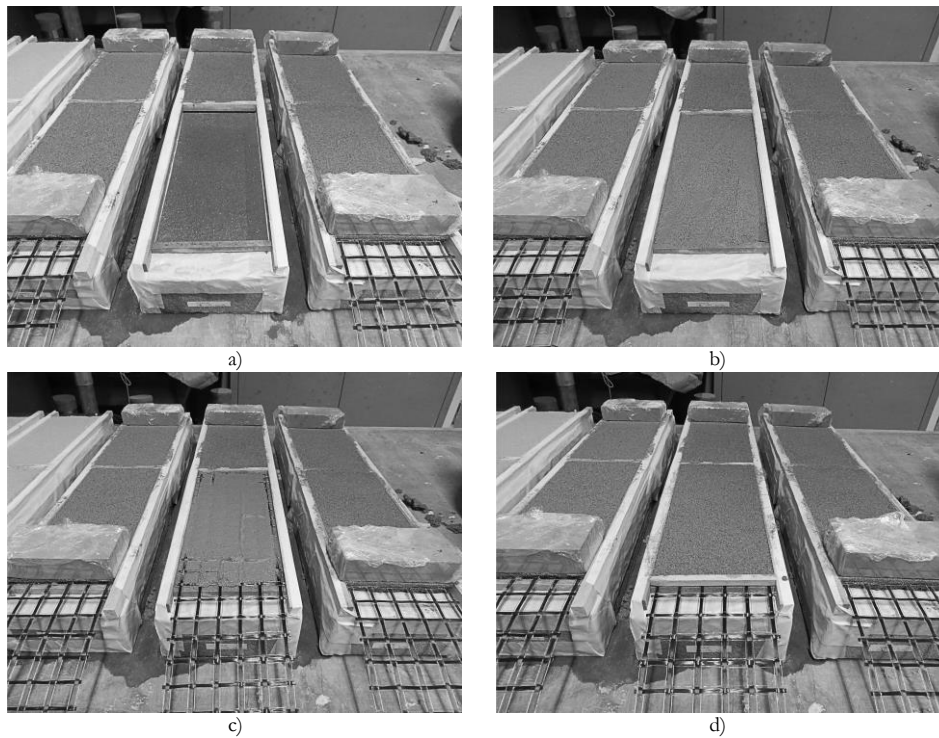


Fig. 5.3. Fasi di preparazione dei provini SST

Apparato di prova

I test sono stati condotti in regime di controllo di spostamento ad una velocità di 0.5 mm/min, utilizzando una cella di carico da 5 KN del tipo TRZ500, METIOR s.r.l. Il carico verticale è stato applicato in modo monotonicamente tramite un martinetto a vite, azionato da un volano a mano. La lettura dello spostamento è stata ricavata attraverso 5 trasduttori di spostamento del tipo CE a mensola, disposti come illustrato in figura 5.4. L'acquisizione dei dati è avvenuta per mezzo della centralina elettronica della National Instruments.

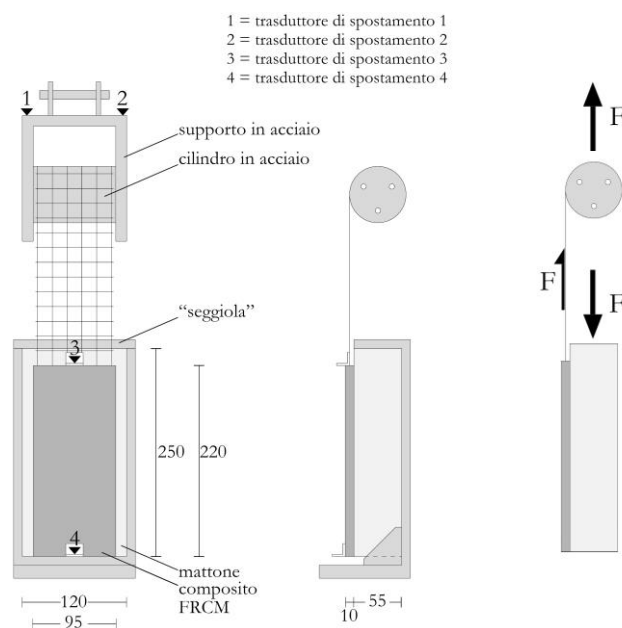


Fig. 5.4. Schematizzazione prova SST (dimensioni in millimetri)

Test

Lasciati decorrere i 28 giorni di maturazione della malta, la parte posteriore di ogni provino è stata fissata mediante adesivo bicomponente Sikadur 31-CF ad un supporto metallico definito “seggiola”, mentre l'estremità della rete di fibra non adesiva è stata girata due volte attorno ad un cilindro metallico al quale è stata fissata per mezzo di resina epossidica. In tale modo, dall'estremità del composito all'asse del cilindro metallico sono risultati 190 mm di rete di fibra libera (Fig. 5.5a). Il provino così costituito è stato posizionato verticalmente nella macchina di prova fissando la seggiola alla base inferiore della macchina ed il cilindro ad un supporto collegato con la cella di carico (Fig. 5.5b). Al fine di garantire una più uniforme distribuzione del carico ed evitare una crisi a trazione prematura della rete di fibra non immersa nella matrice, questa è stata impregnata con della resina epossidica (De Santis et al. 2017).

La lettura dello spostamento verticale è stata ricavata per mezzo di 5 trasduttori. In particolare, i due trasduttori contrassegnati con i numeri 1 e 2 in figura 5.4 sono stati posizionati al di sopra del supporto del cilindro metallico, in modo da ottenere delle letture di spostamento δ totale ($\delta = (\delta_1 + \delta_2)/2$). I trasduttori contrassegnati con i numeri 3 e 4 sono stati posizionati in corrispondenza rispettivamente dell'estremità inferiore (estremo libero) e dell'estremità superiore (estremo caricato) del composito. Dalla differenza delle letture di spostamento, ottenute da questi ultimi mediante l'ausilio di due elementi metallici ad “L” di supporto applicati il primo sulla matrice ed il secondo sulla fibra non adesiva, è stato valutato lo scorrimento globale g fibra-matrice ($g = \delta_3 - \delta_4$). Sul mattone è stato fissato un ulteriore elemento ad “L” su cui è stato applicato il trasduttore 5, le cui letture sono state utilizzate per il controllo degli spostamenti del mattone.

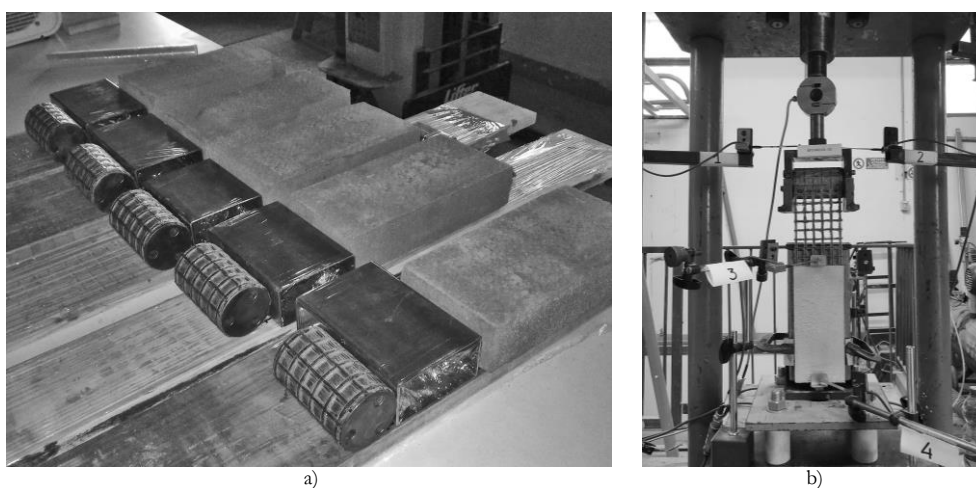


Fig. 5.5. Allestimento prova SST: a) impregnamento con resina epossidica della porzione di rete di fibra libera; b) posizionamento del provino nella macchina di prova

Provini e nomenclatura

6 provini rinforzati con malta di calce idraulica + GeoSteel® Grid 200.....	SST.MCA.GS-xx
6 provini rinforzati con malta di cemento + GeoSteel® Grid 200.....	SST.MCE.GS-xx
6 provini rinforzati con malta bastarda + GeoSteel® Grid 200.....	SST.MBA.GS-xx
6 provini rinforzati con GeoCalce® Fino + GeoSteel® Grid 200.....	SST.MKE.GS-xx

5.2.1. Risultati

Attraverso i risultati in termini di carico massimo F_{max}^I e di corrispondenti spostamenti massimi δ_{max}^I , per ogni provino sono stati ricavati lo scorrimento globale massimo g_{max}^I fibra-matrice, la tensione massima nel composito f_r^I e le deformazioni valutate sulla base dello scorrimento ε_{rg}^I e del carico massimo ε_r^I :

$$g_{max}^I = \delta_{4,max}^I - \delta_{3,max}^I \quad (5.6)$$

$$f_r^I = \frac{F_{max}^I}{A_f} \quad (5.7)$$

$$\varepsilon_{rg}^I = \frac{g_{max}^I}{l_e} \quad (5.8)$$

$$\varepsilon_r^I = \frac{F_{max}^I}{E_f A_f} \quad (5.9)$$

Inoltre sono stati valutati i coefficienti di sfruttamento delle proprietà a trazione della fibra (f_r^I/f_f) e del composito (f_r^I/f_r). Duttilità cinematica μ_o , duttilità cinematica disponibile μ_{ed} e rigidezze del provino integro K^I e lesionato K^I sono state ricavate sulla base dei grafici carico-scorrimento globale ottenuti, secondo quanto descritto al paragrafo § 5.1.

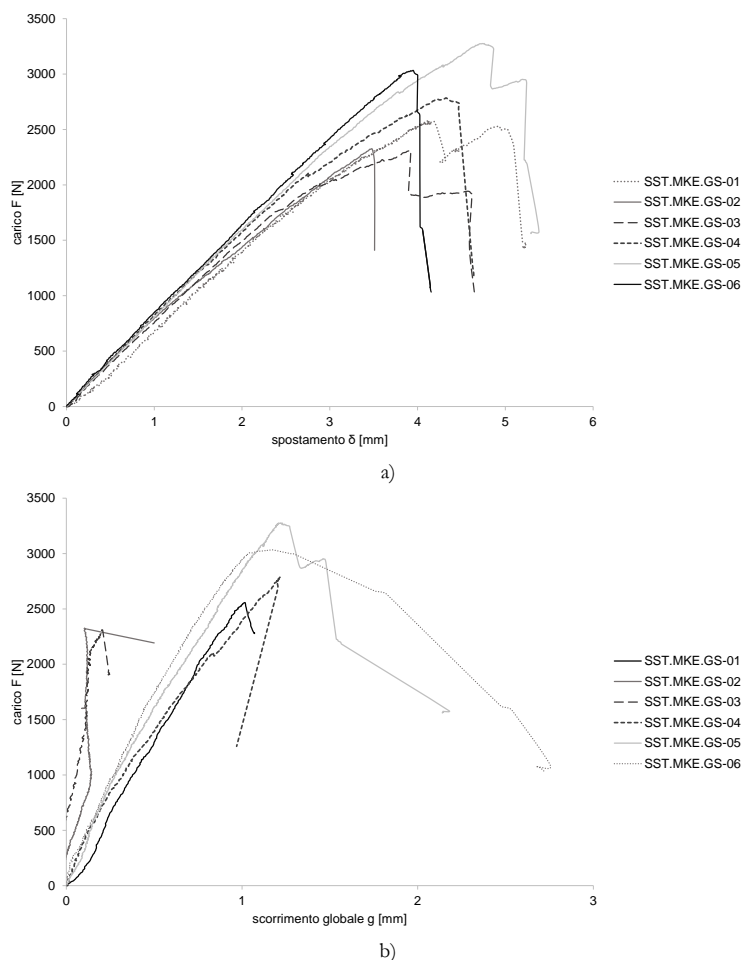


Fig. 5.6. Curve a) carico-spostamento (F- δ) e b) carico-scorrimento globale (F-g) relative ai sei provini costituiti da matrice di malta di calce idraulica Kerakoll

Dai trasduttori di spostamento per ogni provino sono stati costruiti i grafici carico-spostamento (Fig. 5.6a) ed i grafici carico-scorrimento globale (Fig. 5.6b). Su di essi è stato possibile individuare quattro fasi, contraddistinte da quattro punti caratterizzanti il percorso di equilibrio. Ciò ha permesso di costruire un diagramma medio carico-scorrimento globale in cui i quattro tratti del grafico medio sono stati linearizzati per una lettura più agevole (Fig. 5.7 e Tab. 5.2). Due provini (SST.MKE.GS-02 e 03), avendo mostrato un comportamento anomalo a causa di difetti riconducibili alle operazioni di realizzazione, sono stati esclusi dalle valutazioni che seguono.

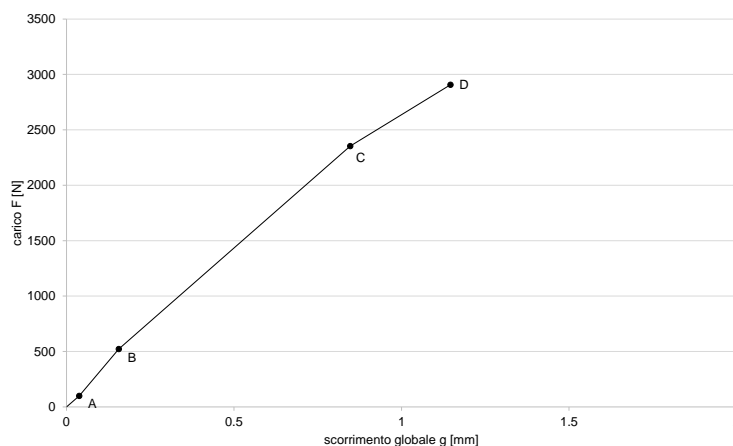


Fig. 5.7. Curva media carico-scorrimento globale (F-g) relativa ai sei provini costituiti da matrice di malta di calce idraulica Kerakoll

Tab. 5.2. Punti caratterizzanti il percorso di equilibrio

punti	F [N]	g [mm]
A	99	0.04
B	523	0.16
C (debonding)	2353	0.85
D (massimo)	2907	1.15

- Fase I: assestamento del provino. Data la configurazione della prova e le caratteristiche della rete di fibra, per alcuni provini non è stato possibile avere inizialmente un allineamento perfetto dei multi-filamenti longitudinali.
- Fase II: fase lineare elastica. In tale fase il provino risulta integro. Il principio di una lesione interlaminare all'estremo caricato, inducendo un cambio di pendenza, segnala il passaggio ad una terza fase (F_b ; g_b).
- Fase III: fase intermedia. Il composito si comporta ancora come tale fino al perseguimento di un quarto stadio (F_c ; g_c), individuato sul grafico da un'ulteriore perdita di rigidità dovuta al propagarsi della lesione interlaminare.
- Fase IV: fase di propagazione del fenomeno di debonding. La fibra scorre nella matrice, ma si registra un'ulteriore incremento di carico grazie all'ingranamento che si genera in corrispondenza della seconda e della terza interfaccia tra i multi-filamenti longitudinali e la superficie della matrice ed al comportamento telescopico, fino al raggiungimento del carico massimo (F_d ; g_d).

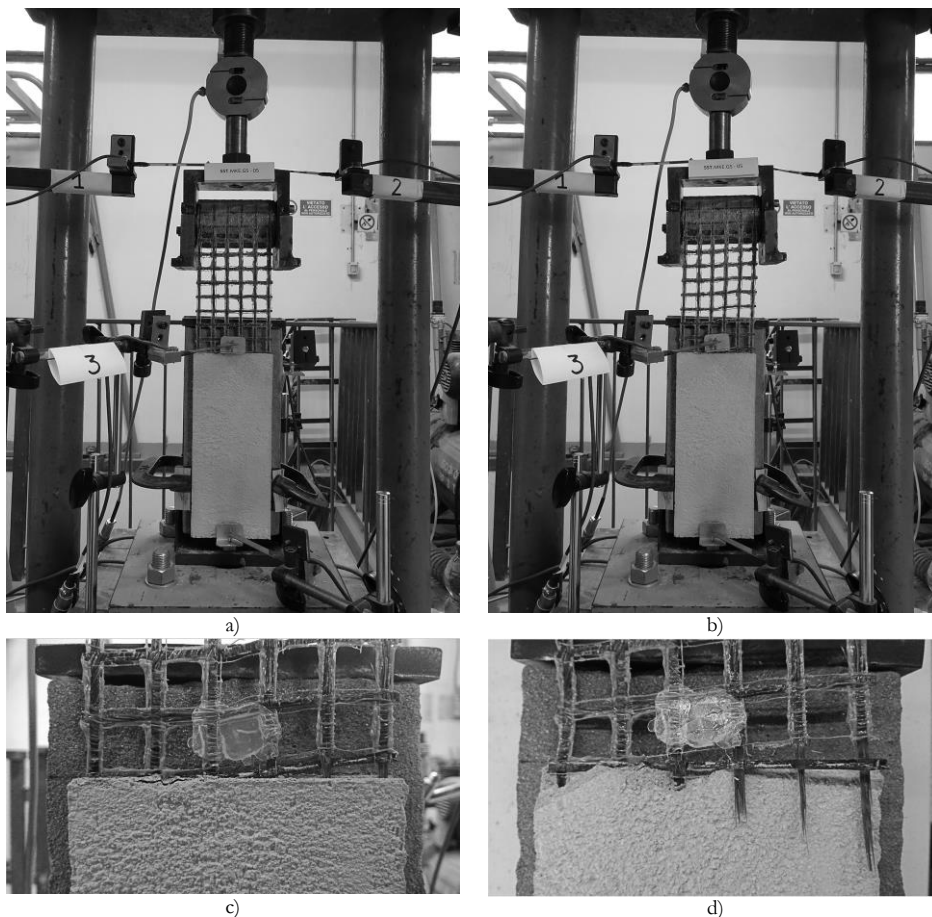


Fig. 5.8. Provino SST.MKE.GS-05: a) inizio della prova; b) termine della prova; c) particolare dello scorrimento differenziale dei multi-filamenti longitudinali; d) particolare della crisi di tre multi-filamenti di fibra

La maggioranza dei provini ha mostrato una crisi fragile caratterizzata dalla rottura di alcuni multi-filamenti all'interno della matrice in prossimità dell'estremo caricato (Fig. 5.8d), con conseguente assenza di una duttilità cinematica disponibile μ_{cd} . I multi-filamenti hanno esibito un comportamento telescopico: dato l'impregnamento incompleto dei multi-filamenti, i filamenti di manica sono stati i primi a raggiungere la crisi a trazione, mentre quelli più interni hanno subito degli ulteriori scorrimenti (§ 2.2.2).

La matrice si è mantenuta integra ed ha mantenuto, a test ultimati, una perfetta adesione con il substrato in laterizio.

I provini SST.MKE.GS-02 e 03, esclusi dalla valutazione dei risultati medi, hanno mostrato un comportamento anomalo a causa di difetti riconducibili alle operazioni di preparazione del provino e di allestimento della prova: nel primo caso il provino, fissato in modo inadeguato, si è distaccato dalla "seggiola", mentre per il secondo provino è stata raggiunta la rottura di alcuni multi-filamenti al di sopra del cilindro d'acciaio, probabilmente a causa di un insufficiente impregnamento con la resina epossidica.

Tab. 5.3. Risultati prove Single-Shear Test condotte su provini costituiti da composito con matrice di malta di calce Kerakoll

provino	F_{max}^I [N]	F_{db}^I [N]	f_r [MPa]	δ_{max}^I [mm]	g_{max}^I [mm]	g_{db}^I [mm]	ϵ_{rg}^I	ϵ_r^I	K^I [MPa]	K^I [MPa]	μ_c	μ_{cd}	f_r/f_r	f_r/f_r	crisi
SST.MKE.GS-01	2576	2375	789	4.11	0.99	0.93	0.004	0.013	2478	2832	0.96	-	0.91	1.00	F
SST.MKE.GS-02	2326	1674	713	3.47	0.10	0.11	0.001	0.012	-	-	-	-	0.82	0.91	-
SST.MKE.GS-03	2309	2019	707	3.92	0.21	0.13	0.001	0.012	-	-	-	-	0.82	0.90	E
SST.MKE.GS-04	2785	2105	853	4.33	1.22	0.84	0.006	0.014	3890	2151	1.70	-	0.99	1.09	F
SST.MKE.GS-05	3276	2501	1004	4.76	1.23	0.86	0.006	0.017	3839	2481	1.44	-	1.16	1.28	F
SST.MKE.GS-06	3034	2432	929	3.95	1.17	0.76	0.005	0.015	4558	2518	1.76	-	1.07	1.18	F
media	2918	2353	894	4.29	1.15	0.85	0.005	0.015	3691	2495	1.46	-	1.03	1.14	
Dev.St.	303	173	93	0.35	0.11	0.07	0.001	0.002	873	278	0.36	-	0.11	0.12	
Co.V.	10%	7%	10%	8%	10%	8%	10%	10%	24%	11%	25%	-	10%	10%	

Note: in grigio sono riportati i risultati relativi ai provini esclusi dalla valutazione dei risultati medi
 F_{max}^I =carico massimo; F_{db}^I =carico corrispondente alla perdita di adesione all'estremo caricato del composito; f_r =tensione massima nella rete di fibra; δ_{max}^I =spostamento massimo valutato mediante i trasduttori 1 e 2 (Fig. 5.4); g_{db}^I =scorrimento globale massimo di debonding;
 g_{max}^I =scorrimento globale massimo (Eq. 5.6); ϵ_{rg}^I =deformazione massima (Eq. 5.8); ϵ_r^I =deformazione massima (Eq. 5.9); K^I =rigidezza del provino integro (Eq. 5.2); K^I =rigidezza del provino lesionato (Eq. 5.3); μ_c =duttilità cinematica (Eq. 5.4); μ_{cd} =duttilità cinematica disponibile (Eq. 5.4);
 f_r/f_r =sfruttamento delle proprietà a trazione della rete di fibra; f_r/f_r =sfruttamento delle proprietà a trazione del composito; f_r =resistenza a trazione della rete di fibra (§ 4.4); f_r =resistenza a trazione del composito (§ 4.5); *crisi*=modalità di crisi: F crisi per rottura a trazione della rete di fibra interna alla matrice, E crisi per rottura a trazione della rete di fibra esterna alla matrice (Fig. 5.2)

Tutti i risultati hanno esibito una variabilità limitata (Tab. 5.3), ad eccezione di rigidità iniziale del provino integro K^I e di duttilità cinematica μ_c . Il composito ha dimostrato una buona capacità di sfruttamento delle proprietà di fibra e composito, come deducibile dai valori superiori ad 1 assunti dai coefficienti di sfruttamento a cui è corrisposta una crisi per rottura a trazione di alcuni multi-filamenti. Ciò ha confermato come, nel caso di buona capacità di adesione e conseguente buona capacità di sfruttamento della resistenza della fibra, i risultati, in particolare in termini di carico e corrispondente tensione, si caratterizzano per valori di Co.V. contenuti (Lignola et al. 2017).

Lo spostamento del provino considerato nella sua integrità δ_{max}^I , includendo anche la deformazione della parte di fibra libera e non immersa nella matrice, è risultato maggiore e pari a circa quattro volte lo scorrimento della fibra nella matrice g_{max}^I , a cui è corrisposta una deformazione del composito ϵ_{rg}^I pari a 0.005. Dato il basso valore di deformazione ed il mantenimento dell'integrità della matrice, la perdita di rigidità tra le due fasi successive AB e BC è risultata minima, con una duttilità cinematica μ_c pari a 1.46.

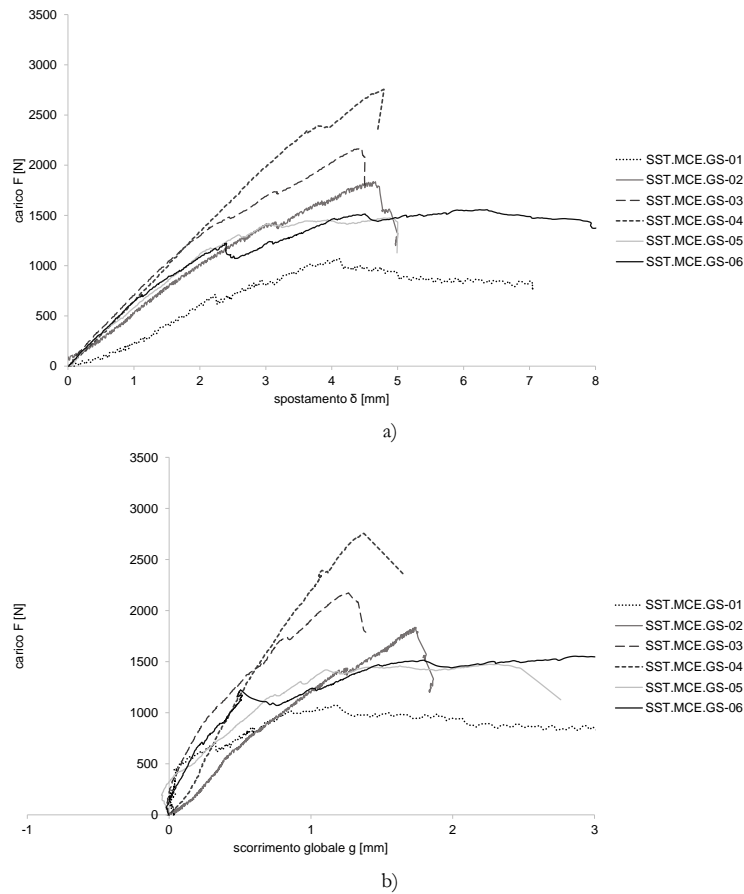


Fig. 5.9. Curve a) carico-spostamento (F- δ) e b) carico-scorrimento globale (F-g) relative ai sei provini costituiti da matrice di malta cementizia

Analogamente alla tipologia di composito analizzata precedentemente, dai trasduttori di spostamento, per ogni provino sono stati costruiti i grafici carico-spostamento (Fig. 5.9a) e carico-scorrimento globale (Fig. 5.9b). Su ogni grafico sono state individuate quattro fasi, contraddistinte da quattro punti caratterizzanti il percorso di equilibrio. Mediante questi ultimi è stato costruito il diagramma medio carico-scorrimento in cui i quattro tratti del grafico medio sono stati linearizzati per una lettura più agevole (Fig. 5.10 e Tab. 5.4). Tre provini, avendo mostrato un comportamento anomalo (SST.MCE.GS-01, 05 e 06), sono stati esclusi dalle successive valutazioni.

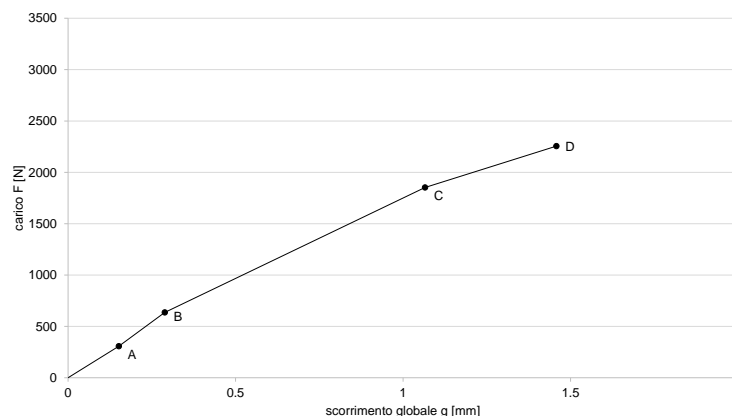


Fig. 5.10. Curva media carico-scorrimento globale (F-g) relativa ai sei provini costituiti da matrice di malta cementizia

Tab. 5.4 Punti caratterizzanti il percorso di equilibrio

punti	F [N]	g [mm]
A	307	0.15
B	636	0.29
C (debonding)	1853	1.07
D (massimo)	2255	1.46

- Fase I: assestamento del provino. Data la configurazione della prova e le caratteristiche della rete di fibra, per alcuni provini non è stato possibile avere inizialmente un allineamento perfetto dei multi-filamenti longitudinali.
- Fase II: fase lineare elastica. In tale fase il provino risulta integro. Il principio di una lesione interlaminare all'estremo caricato, inducendo un cambio di pendenza, segnala il passaggio ad una terza fase (F_b ; g_b).
- Fase III: fase intermedia. Il composito si comporta ancora come tale fino al perseguimento di un quarto stadio (F_c ; g_c), individuato sul grafico da un'ulteriore perdita di rigidità e, in alcuni casi, da una perdita di carico dovuti al propagarsi della lesione interlaminare.
- Fase IV: fase di propagazione del fenomeno di debonding. La fibra scorre nella matrice, ma si registra un'ulteriore incremento di carico grazie all'ingranamento che si genera in corrispondenza della seconda e della terza interfaccia tra i multi-filamenti longitudinali e la superficie della matrice ed al comportamento telescopico, fino al raggiungimento del carico massimo (F_d ; g_d).

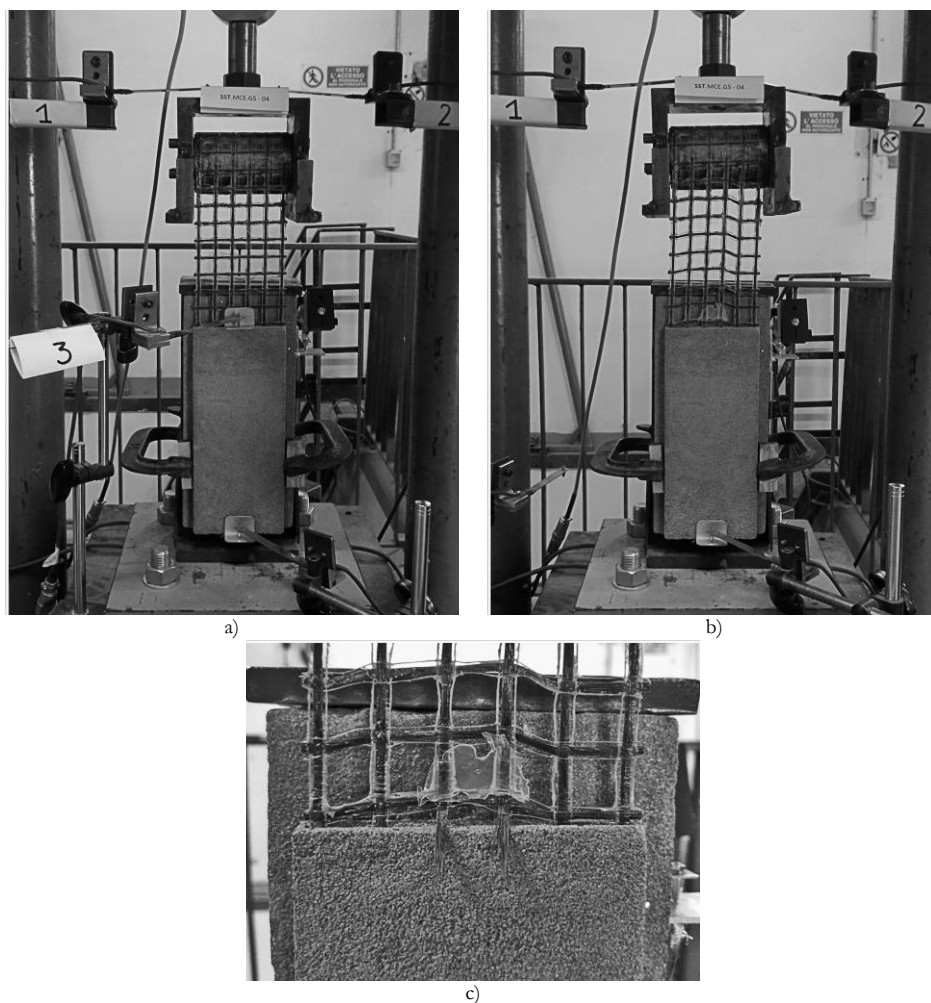


Fig. 5.11. Provino SST.MCE.GS-04: a) inizio della prova; b) termine della prova; c) particolare della crisi a trazione di due multi-filamenti di fibra

La maggioranza dei provini ha mostrato una crisi fragile caratterizzata dalla rottura di alcuni multi-filamenti all'interno della matrice, in prossimità dell'estremo caricato (Fig. 5.11c), con conseguente assenza di una duttilità cinematica disponibile μ_{ed} . Tutti i provini hanno manifestato un comportamento telescopico: dato l'impregnamento incompleto dei multi-filamenti, i filamenti di manica sono stati i primi a raggiungere la crisi a trazione, mentre quelli più interni hanno subito degli ulteriori scorrimenti (§ 2.2.2).

La matrice si è mantenuta integra ed ha mantenuto, a test ultimati, una perfetta adesione con il substrato in laterizio.

Il comportamento dei provini SST.MCE.GS-01 e 06 si è differenziato da quello appena descritto. Ciò è attribuibile a difetti riconducibili alle operazioni di realizzazione. Infatti, ad un livello di carico compreso tra 800 e 1000 N i provini sono stati oggetto di una precoce perdita di adesione con delaminazione all'interfaccia fibra-matrice che si è propagata fino ad una distanza dall'estremo caricato di circa 150 mm per il provino 01 e 100 mm per il provino 06. Ciò ha comportato maggiori scorrimenti della fibra nella matrice. Dopo il raggiungimento del carico massimo lo scorrimento è proseguito, dando luogo ad una quinta fase ad andamento decrescente. Il distacco di una porzione consistente del layer esterno di matrice, ha permesso a test ultimati l'osservazione della rete di fibra immersa nel composito (Fig. 5.12). In entrambe i casi i multi-

filamenti longitudinali laterali hanno registrato un maggiore scorrimento ed una maggiore deformazione rispetto a quelli centrali, dimostrando una distribuzione non uniforme del carico tra i sei multi-filamenti.

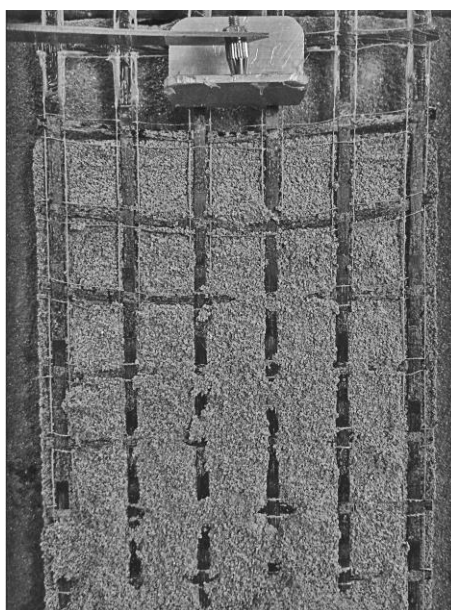


Fig. 5.12. Provino SST.MCE.GS-06

La rete è risultata decoesa da entrambe i layer di matrice per una profondità di circa 30 mm, a cui è corrisposta una deformazione parabolica dei multi-filamenti trasversali. Dato il minore effetto confinamento generato dalla matrice nelle zone laterali della striscia del composito, i multi-filamenti trasversali hanno subito i medesimi scorrimenti di quelli longitudinali, fino a quando i nodi risultano efficaci. Al contrario, centralmente tali multi-filamenti sono stati trattenuti dalla matrice, fino a quando la lesione interlaminare non si è propagata per tutta la larghezza del composito. Oltre i suddetti 30 mm la rete è risultata parzialmente adesa al layer interno di matrice che ha esercitato un'azione di confinamento efficace fino al termine del test. Nel caso del provino 01, nonostante i bassi livelli di carico, la prova si è conclusa con la crisi a trazione di un multi-filamento in corrispondenza del cilindro d'acciaio a causa di una irregolarità nell'avvolgimento della rete attorno al cilindro stesso. Il provino SST.MCE.GS-05, nonostante abbia registrato dei livelli di carico simili ai due provini appena citati, ha raggiunto una crisi per rottura dei multi-filamenti all'interno della matrice, probabilmente a causa di difetti intrinseci del materiale. Tali provini sono stati esclusi dalla valutazione dei risultati medi riportati in tabella 5.5.

Tab. 5.5. Risultati prove Single-Shear Test condotte su provini costituiti da composito con matrice di malta cementizia

provino	F_{max}^I [N]	F_{db}^I [N]	f_r [MPa]	δ_{max}^I [mm]	g_{max}^I [mm]	g_{db}^I [mm]	ε_{rg}^I	ε_r^I	K_I^I [MPa]	K_f^I [MPa]	μ_c	μ_{cd}	f_r/f_f	f_r/f_r	crisi
SST.MCE.GS-01	1071	858	328	4.09	1.16	0.58	0.005	0.005	1585	997	2.09	1.21	0.38	0.53	D
SST.MCE.GS-02	1837	1436	563	4.63	1.73	1.26	0.008	0.009	1686	1042	1.49	-	0.65	0.91	E+F
SST.MCE.GS-03	2174	1732	666	4.44	1.26	0.86	0.006	0.011	2584	1331	1.72	-	0.77	1.07	F
SST.MCE.GS-04	2754	2391	844	4.79	1.38	1.07	0.006	0.014	2815	2263	1.33	-	0.98	1.36	F
SST.MCE.GS-05	1475	1174	452	4.88	2.32	0.75	0.010	0.007	1711	1111	1.42	3.72	0.52	0.73	D+F
SST.MCE.GS-06	1557	1220	477	6.24	3.14	0.50	0.014	0.008	2285	1639	5.06	1.53	0.55	0.77	D
media	2255	1853	691	4.62	1.46	1.07	0.007	0.011	2362	1545	1.51	-	0.80	1.11	
Dev.St.	464	489	142	0.18	0.24	0.20	0.001	0.002	596	638	0.20	-	0.16	0.23	
Co.V.	21%	26%	21%	4%	17%	18%	17%	21%	25%	41%	13%	-	21%	21%	

Note: in grigio sono riportati i risultati relativi ai provini esclusi dalla valutazione dei risultati medi

F_{max}^I =carico massimo; F_{db}^I =carico corrispondente alla perdita di adesione all'estremo caricato del composito; f_r =tensione massima nella rete di fibra; δ_{max}^I =spostamento massimo valutato mediante i trasduttori 1 e 2 (Fig. 5.4); g_{max}^I =scorrimento globale massimo (Eq. 5.6); ε_{rg}^I =deformazione massima (Eq. 5.8); g_{db}^I =scorrimento globale massimo di debonding; ε_r^I =deformazione massima (Eq. 5.9); K_I^I =rigidezza del provino integro (Eq. 5.2); K_f^I =rigidezza del provino lesionato (Eq. 5.3); μ_c =duttilità cinematica (Eq. 5.4); μ_{cd} =duttilità cinematica disponibile (Eq. 5.4); f_r/f_f =sfruttamento delle proprietà a trazione della rete di fibra; f_r/f_r =sfruttamento delle proprietà a trazione del composito; f_f =resistenza a trazione della rete di fibra (§ 4.4); f_r =resistenza a trazione del composito (§ 4.5); *crisi*=modalità di crisi: F crisi per rottura a trazione della rete di fibra interna alla matrice, E crisi per rottura a trazione della rete di fibra esterna alla matrice, D crisi per scorrimento fibra-matrice (Fig. 5.2)

Co.V. pari al 21% sono stati ottenuti per i risultati in termini di carico e tensione, mentre il coefficiente medio di sfruttamento delle proprietà resistenti della fibra è risultato prossimo, ma inferiore ad 1. Nonostante ciò, la maggioranza dei provini ha raggiunto la crisi per rottura della fibra all'interno della matrice in prossimità dell'estremo caricato, ovvero nella zona di composito decoesa. Valori inferiori di Co.V. sono stati ottenuti per le proprietà legate alle letture dei trasduttori di spostamento.

Analogamente ai provini con matrice Kerakoll, lo spostamento totale del provino δ_{max}^I , includendo anche la deformazione della parte di fibra libera e non immersa nella matrice, è risultato pari a circa quattro volte lo scorrimento della fibra nella matrice g_{max}^I , a cui è corrisposta una deformazione del composito ε_{rg}^I pari a 0.007. Tra le due fasi successive AB e BC è stata registrata una perdita di rigidezza di circa il 35% con una duttilità cinematica μ_c pari ad 1.51. Data la modalità di crisi esibita, la duttilità cinematica disponibile μ_{cd} dei provini inclusi nelle valutazioni è risultata pressoché nulla.

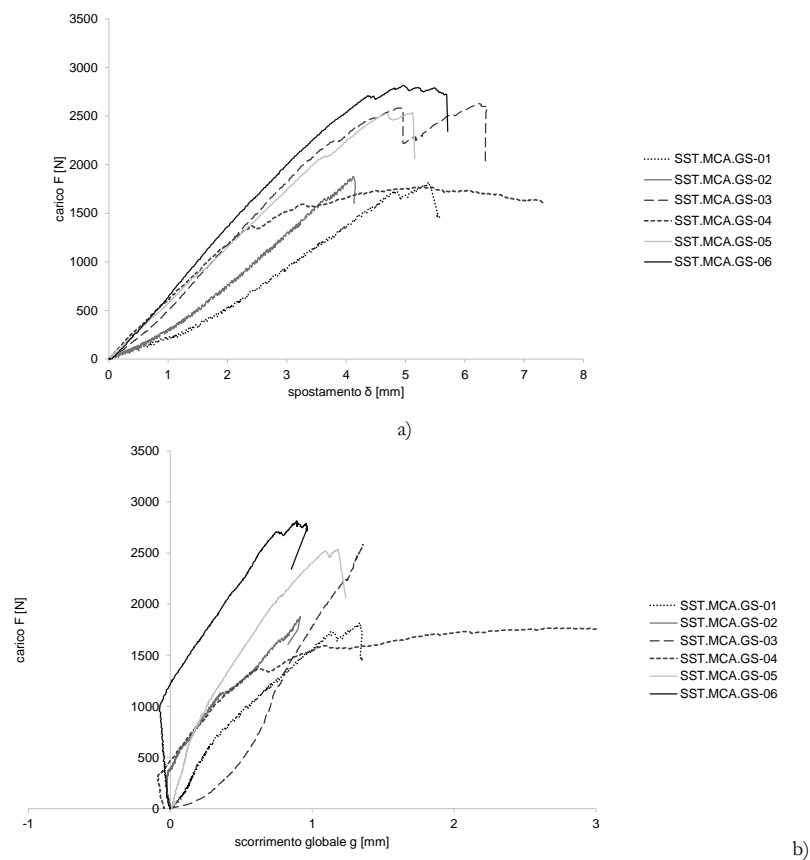
Malta di calce idraulica + Kerakoll GeoSteel® Grid 200

Fig. 5.13. Curve a) carico-spostamento (F - δ) e b) carico-scorrimento globale (F - g) relative ai sei provini costituiti da matrice di malta di calce idraulica

I provini con matrice di malta di calce idraulica sono stati analizzati secondo i criteri descritti precedentemente per i compositi con matrici di malta cementizia e Kerakoll. Dai trasduttori di spostamento sono stati costruiti i grafici carico-spostamento (Fig. 5.13a) ed i grafici carico-scorrimento globale (Fig. 5.13b). Tre provini (SST.MCA.GS-01, 02 e 04) hanno mostrato un comportamento differente a causa probabilmente di difetti di produzione, per cui è stato ritenuto opportuno non includerli nell'analisi descritta nel seguito. Sui restanti tre grafici sono state individuate quattro fasi, contraddistinte da quattro punti caratterizzanti il percorso di equilibrio. Ciò ha permesso di costruire un diagramma medio carico-scorrimento globale in cui i quattro tratti del grafico medio sono stati linearizzati per una lettura più agevole (Fig. 5.14 e Tab. 5.6).

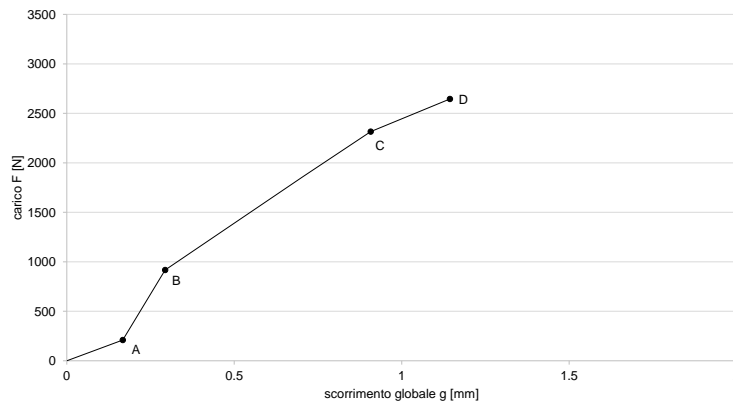


Fig. 5.14. Curva media carico-scorrimento globale (F-g) relativa ai sei provini costituiti da matrice di malta di calce idraulica

Tab. 5.6. Punti caratterizzanti il percorso di equilibrio

punti	F [N]	g [mm]
A	209	0.17
B	918	0.29
C (debonding)	2316	0.91
D (massimo)	2645	1.14

- Fase I: assestamento del provino. Data la configurazione della prova e le caratteristiche della rete di fibra, per alcuni provini non è stato possibile avere inizialmente un allineamento perfetto dei multi-filamenti longitudinali.
- Fase II: fase lineare elastica. In tale fase il provino risulta integro. Il principio di una lesione interlaminare all'estremo caricato, inducendo un cambio di pendenza, segnala il passaggio ad una terza fase (F_b ; g_b).
- Fase III: fase intermedia. Il composito si comporta ancora come tale fino al perseguimento di un quarto stadio (F_c ; g_c), individuato sul grafico da un'ulteriore perdita di rigidità e da una perdita di carico dovuti al propagarsi della lesione interlaminare.
- Fase IV: fase di propagazione del fenomeno di debonding. La fibra scorre nella matrice, ma si registra un'ulteriore incremento di carico grazie all'ingranamento che si genera in corrispondenza della seconda e della terza interfaccia tra i multi-filamenti longitudinali e la superficie della matrice ed al comportamento telescopico, fino al raggiungimento del carico massimo (F_d ; g_d).

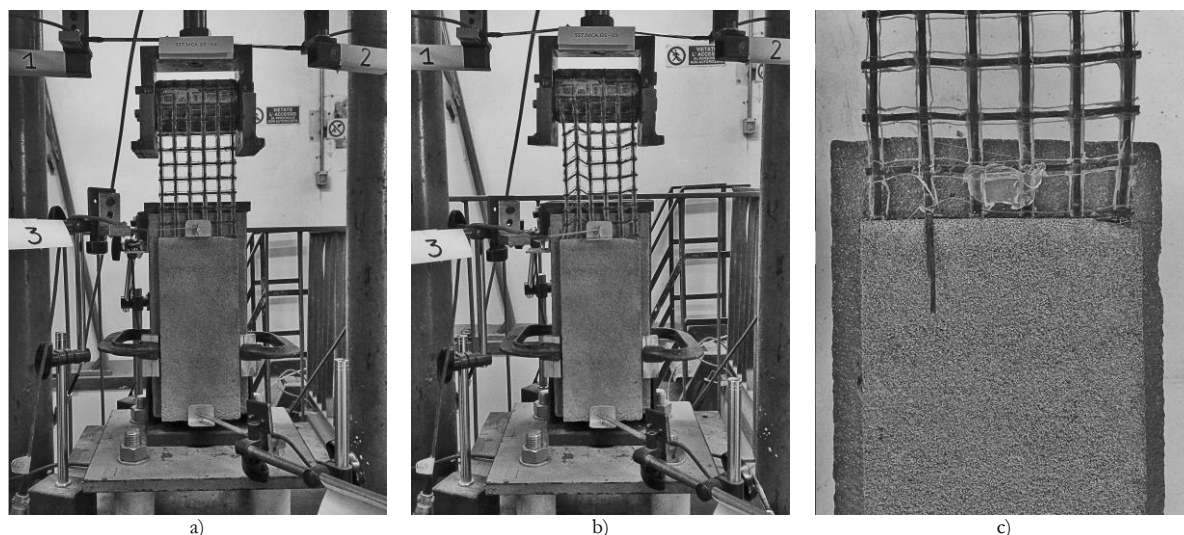


Fig. 5.15. Provino SST.MCA.GS-03: a) inizio della prova; b) termine della prova; c) particolare della crisi a trazione di un multi-filamento di fibra

Dall'osservazione dei provini è stato riscontrato uno scorrimento differenziale dei multi-filamenti longitudinali. In particolare, il maggiore scorrimento e il minore effetto di confinamento da parte della matrice sui multi-filamenti laterali ha spesso indotto la formazione di lesioni longitudinali in corrispondenza di tali multi-filamenti. Tre provini (SST.MCA.GS-03, 05, 06) hanno mostrato una crisi fragile caratterizzata dalla rottura di alcuni multi-filamenti all'interno della matrice in prossimità dell'estremo caricato (Fig. 5.15c). È risultato evidente il comportamento telescopico dei multi-filamenti: dato l'impregnamento incompleto dei multi-filamenti, i filamenti di manica sono giunti per primi ad una crisi a trazione, mentre quelli più interni hanno continuato a registrare degli ulteriori scorrimenti (§ 2.2.2).

La matrice a test ultimati ha mantenuto una perfetta adesione con il substrato in laterizio.

Il comportamento dei provini SST.MCA.GS-01, 02 e 04 è differito rispetto a quello appena descritto a causa di difetti riconducibili alle operazioni di realizzazione del provino e di allestimento della prova: a causa di un incompleto impregnamento della parte di fibra libera con la resina epossidica la crisi è sopraggiunta per rottura di alcuni multi-filamenti in corrispondenza dei nodi di rete di fibra in prossimità del cilindro d'acciaio, dove si genera una concentrazione di tensioni. Nel caso del provino 02, alla crisi a trazione della rete di fibra si è aggiunto il distacco del composito dal supporto. Solo il provino SST.MCA.GS-04 ha manifestato una crisi per scorrimento fibra-matrice. I risultati ottenuti da tali provini sono stati esclusi dalla valutazione del comportamento e delle proprietà medie (Tab. 5.7) del composito.

Tab. 5.7 Risultati prove Single-Shear Test condotte su provini costituiti da composito con matrice di malta di calce idraulica

provino	F_{max}^I [N]	F_{db}^I [N]	f_r [MPa]	δ_{max}^I [mm]	g_{max}^I [mm]	g_{db}^I [mm]	ε_{rg}^I	ε_r^I	K^I [MPa]	K^I [MPa]	μ_c	μ_{cd}	f_r/f_t	f_r/f_r	crisi
SST.MCA.GS-01	1813	1725	555	5.38	1.33	1.15	0.006	0.009	1486	1218	1.86	-	0.64	0.97	E
SST.MCA.GS-02	1876	1653	575	4.12	0.91	0.80	0.004	0.010	2108	1179	1.45	-	0.66	1.00	E+B
SST.MCA.GS-03	2584	2241	792	4.89	1.36	1.23	0.006	0.013	2698	2268	1.06	-	0.92	1.38	F
SST.MCA.GS-04	1769	1364	542	5.27	2.82	2.81	0.013	0.009	3218	1233	9.64	1.77	0.63	0.94	D
SST.MCA.GS-05	2536	2006	777	5.12	1.18	0.74	0.005	0.013	4151	2080	1.99	-	0.90	1.35	F
SST.MCA.GS-06	2815	2702	862	4.96	0.89	0.75	0.004	0.014	8420	2097	2.66	-	1.00	1.50	F
media	2645	2316	810	4.99	1.14	0.91	0.005	0.013	5130	2148	1.91	-	0.94	1.41	
Dev.St.	149	354	46	0.12	0.24	0.28	0.001	0.001	2956	104	0.80	-	0.05	0.08	
Co.V.	6%	15%	6%	2%	21%	31%	21%	6%	58%	5%	42%	-	6%	6%	

Note: in grigio sono riportati i risultati relativi ai provini esclusi dalla valutazione dei risultati medi

F_{max}^I =carico massimo; F_{db}^I =carico corrispondente alla perdita di adesione all'estremo caricato del composito; f_r =tensione massima nella rete di fibra; δ_{max}^I =spostamento massimo valutato mediante i trasduttori 1 e 2 (Fig. 5.4); g_{max}^I =scorrimento globale massimo (Eq. 5.6); g_{db}^I =scorrimento globale massimo di debonding; ε_{rg}^I =deformazione massima (Eq. 5.8); ε_r^I =deformazione massima (Eq. 5.9); K^I =rigidezza del provino integro (Eq. 5.2); K^I =rigidezza del provino lesionato (Eq. 5.3); μ_c =duttilità cinematica (Eq. 5.4); μ_{cd} =duttilità cinematica disponibile (Eq. 5.4); f_r/f_t =sfruttamento delle proprietà a trazione della rete di fibra; f_r/f_r =sfruttamento delle proprietà a trazione del composito; f_r =resistenza a trazione della rete di fibra (§ 4.4); f_r =resistenza a trazione del composito (§ 4.5); *crisi*=modalità di crisi: F crisi per rottura a trazione della rete di fibra interna alla matrice, E crisi per rottura a trazione della rete di fibra esterna alla matrice, D crisi per scorrimento fibra-matrice, B distacco del composito dal supporto (Fig. 5.2)

La rigidezza iniziale K^I del provino è risultata affetta da un'alta dispersione. È da ricordare che nella valutazione delle proprietà legate alla prima fase del comportamento del composito non vengono tenute in considerazione le proprietà della matrice, le quali incidono sul comportamento generale del provino integro. La variabilità che caratterizza tali proprietà, che è legata alla natura della malta stessa, si riflette inevitabilmente sui risultati iniziali delle prove di adesione.

Co.V. pari al 6% sono stati ottenuti per i risultati in termini di carico e tensione. Scorrimento g_{max}^I e corrispondente deformazione ε_{rg}^I sono invece caratterizzati da un Co.V. pari al 21%.

Il coefficiente medio di sfruttamento delle proprietà resistenti della fibra è risultato prossimo all'unità e pari a 0.94, in linea con la modalità di crisi riscontrata.

Analogamente alle tipologie di provino precedenti, lo spostamento totale δ_{max}^I , includendo anche la deformazione della parte di fibra libera e non immersa nella matrice, è risultato pari a circa quattro volte lo scorrimento della fibra nella matrice g_{max}^I , a cui è corrisposta una deformazione del composito ε_{rg}^I pari a 0.005.

Tra le due fasi successive AB e BC è stata registrata una consistente perdita di rigidità, da cui è derivata una duttilità cinematica μ_c pari a 1.91, dovuta in particolare al provino SST.MCA.GS-06 caratterizzato da un'elevata rigidità iniziale K^I . A ciò è corrisposta una tensione massima f_r maggiore ed una deformazione massima ε_{rg}^I minore rispetto ai risultati dei restanti provini.

Data la modalità di crisi esibita, la duttilità cinematica disponibile μ_{cd} di cinque provini è risultata pressoché nulla.

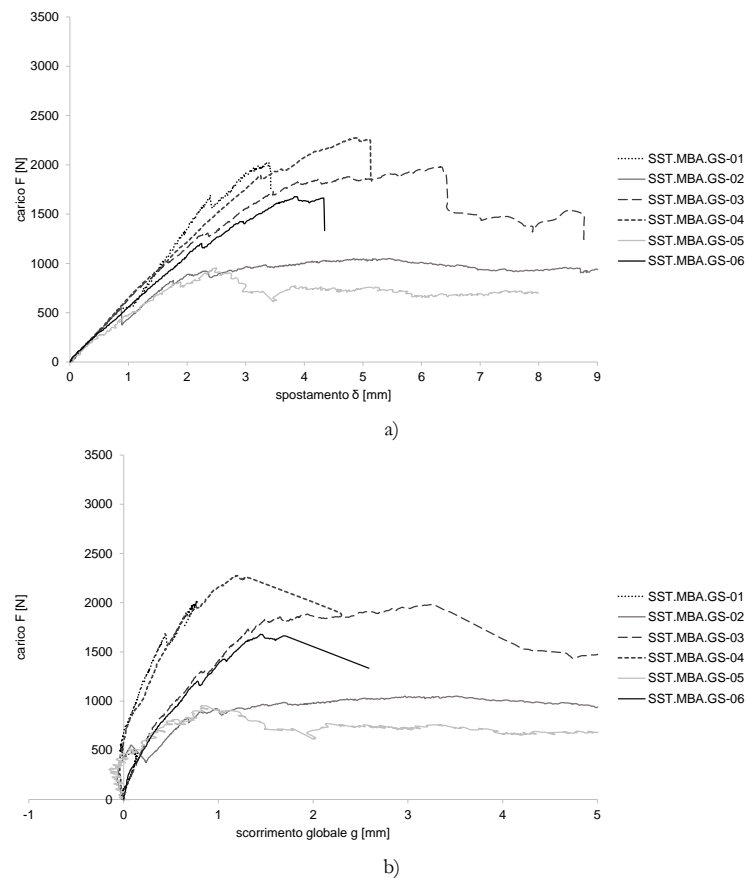
Malta bastarda + Kerakoll GeoSteel® Grid 200

Fig. 5.16. Curve a) carico-spostamento (F- δ) e b) carico-scorrimento globale (F-g) relative ai sei provini costituiti da matrice di malta bastarda

Dai trasduttori di spostamento per ogni provino sono stati costruiti i grafici carico-spostamento (Fig. 5.16a) e carico-scorrimento globale (Fig. 5.16b). Anche in questo caso, per tre provini (SST.MBA.GS-02, 03 e 05) sono stati ottenuti dei risultati che evidenziano un comportamento differente e riconducibile a difetti di produzione dei provini stessi. Pertanto è stato valutato opportuno escluderli dall'analisi del comportamento medio. Su ognuno dei restanti tre grafici sono state individuate quattro fasi, contraddistinte da quattro punti caratterizzanti il percorso di equilibrio. Ciò ha permesso di costruire un diagramma medio carico-scorrimento globale in cui i quattro tratti del grafico medio sono stati linearizzati per una lettura più agevole (Fig. 5.17 e Tab. 5.8).

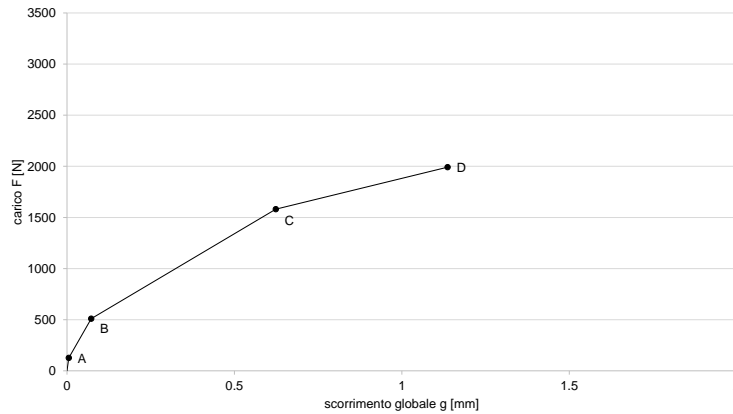


Fig. 5.17. Curva media carico-scorrimento globale (F-g) relativa ai sei provini costituiti da matrice di malta bastarda

Tab. 5.8. Punti caratterizzanti il percorso di equilibrio

punti	F [N]	g [mm]
A	126	0.01
B	509	0.07
C (debonding)	1581	0.62
D (massimo)	1992	1.14

- Fase I: assestamento del provino. Data la configurazione della prova e le caratteristiche della rete di fibra, per alcuni provini non è stato possibile avere inizialmente un allineamento perfetto dei multi-filamenti longitudinali.
- Fase II: fase lineare elastica. In tale fase il composito risulta integro. Il principio di una lesione interlaminare all'estremo caricato, inducendo un cambio di pendenza, segnala il passaggio ad una terza fase (F_b ; g_b).
- Fase III: fase intermedia. Il composito si comporta ancora come tale fino al perseguimento di un quarto stadio (F_c ; g_c), individuato sul grafico da un'ulteriore perdita di rigidità e da una perdita di carico dovuti al propagarsi della lesione interlaminare.
- Fase IV: fase di propagazione del fenomeno di debonding. La fibra scorre nella matrice, ma si registra un'ulteriore incremento di carico grazie all'ingranamento che si genera in corrispondenza della seconda e della terza interfaccia tra i multi-filamenti longitudinali e la superficie della matrice ed al comportamento telescopico, fino al raggiungimento del carico massimo (F_d ; g_d).

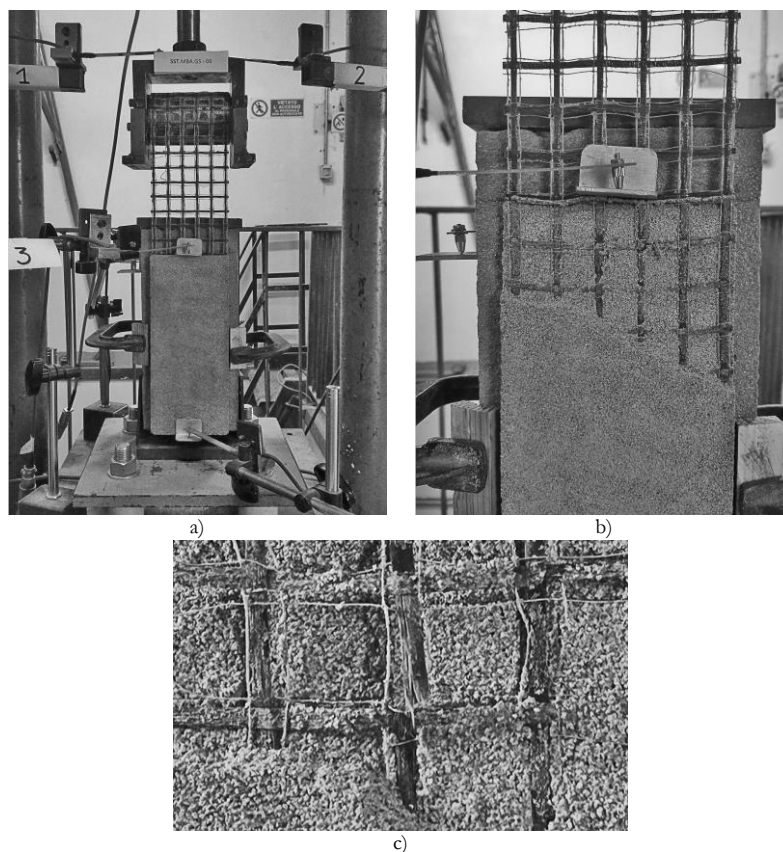


Fig. 5.18. Provino SST.MBA.GS-06: a) inizio della prova; b) distacco porzione di matrice conseguente la propagazione della delaminazione; c) particolare della crisi a trazione di un multi-filamento di fibra

Tre provini hanno raggiunto una crisi fragile per rottura di alcuni multi-filamenti longitudinali all'interno della matrice in prossimità dell'estremo caricato del composito. È stato riscontrato un comportamento telescopico in tutti i provini: dato l'impregnamento incompleto dei multi-filamenti, i filamenti di manica sono stati i primi a raggiungere la crisi a trazione, mentre quelli più interni hanno registrato degli ulteriori scorrimenti (§ 2.2.2).

I provini SST.MBA.GS-02, 03 e 05 si sono distinti per una crisi per scorrimento, nel primo caso seguita dalla rottura di alcuni multi-filamenti in prossimità del cilindro d'acciaio. Tale comportamento è riconducibile a difetti di realizzazione di tali provini, i quali sono stati esclusi dalla valutazione del comportamento e dei risultati medi.

In provini, ad eccezione del SST.MBA.GS-03, si sono formate delle lesioni interlaminari (con un'estensione massima di 160 mm circa), seguite dal distacco di porzioni di matrice. Dalle osservazioni effettuate a test ultimati, è stato appurato che agli estremi laterali del composito i multi-filamenti longitudinali hanno registrato degli scorrimenti maggiori. I multi-filamenti trasversali prossimi al limite tra la porzione delaminata e la porzione ancora adesa del composito hanno assunto una deformata parabolica. Entrambe i fenomeni sono attribuibili al minore effetto di confinamento esercitato dalla matrice in prossimità dei bordi laterali. Se ne deduce una distribuzione non uniforme del carico tra i sei multi-filamenti.

La matrice a test ultimati ha mantenuto una perfetta adesione con il substrato in laterizio.

Tab. 5.9. Risultati prove Single-Shear Test condotte su provini costituiti da composito con matrice di malta bastarda

provino	F_{max}^I [N]	F_{db}^I [N]	f_r [MPa]	δ_{max}^I [mm]	g_{max}^I [mm]	g_{db}^I [mm]	ϵ_{rg}^I	ϵ_r^I	K_i^I [MPa]	K_l^I [MPa]	μ_c	μ_{cd}	f_r/f_t	f_r/f_r	crisi
SST.MBA.GS-01	2022	1647	619	3.39	0.77	0.44	0.003	0.010	4488	1142	1.69	-	0.72	-	F
SST.MBA.GS-02	1050	827	322	5.46	3.53	0.67	0.016	0.005	5004	1039	19.83	1.39	0.37	-	D+E
SST.MBA.GS-03	1980	1300	607	6.32	3.23	0.82	0.027	0.010	2097	1142	3.57	-	0.70	-	D
SST.MBA.GS-04	2274	1894	697	4.88	1.19	0.66	0.005	0.012	6894	1853	4.44	-	0.81	-	F
SST.MBA.GS-05	952	812	292	2.51	0.87	0.54	0.004	0.005	5480	994	5.01	1.43	0.34	-	D
SST.MBA.GS-06	1679	1202	514	3.83	1.45	0.78	0.007	0.009	5383	1320	4.64	-	0.59	-	F
media	1992	1581	610	4.03	1.14	0.62	0.005	0.010	5588	1438	3.59	-	0.71	-	
Dev.St.	299	351	92	0.76	0.34	0.17	0.002	0.002	1216	370	1.65	-	0.11	-	
Co.V.	15%	22%	15%	19%	30%	28%	31%	15%	22%	26%	46%	-	15%	-	

Note: in grigio sono riportati i risultati relativi ai provini esclusi dalla valutazione dei risultati medi

F_{max}^I =carico massimo; F_{db}^I =carico corrispondente alla perdita di adesione all'estremo caricato del composito; f_r =tensione massima nella rete di fibra; δ_{max}^I =spostamento massimo valutato mediante i trasduttori 1 e 2 (Fig. 5.4); g_{max}^I =scorrimento globale massimo (Eq. 5.6); g_{db}^I =scorrimento globale massimo di debonding; ϵ_{rg}^I =deformazione massima (Eq. 5.8); ϵ_r^I =deformazione massima (Eq. 5.9); K_i^I =rigidezza del provino integro (Eq. 5.2); K_l^I =rigidezza del provino lesionato (Eq. 5.3); μ_c =duttilità cinematica (Eq. 5.4); μ_{cd} =duttilità cinematica disponibile (Eq. 5.4); f_r/f_t =sfruttamento delle proprietà a trazione della rete di fibra; f_r/f_r =sfruttamento delle proprietà a trazione del composito; f_r =resistenza a trazione della rete di fibra (§ 4.4); f_r =resistenza a trazione del composito (§ 4.5); *crisi*= modalità di crisi: F crisi per rottura a trazione della rete di fibra interna alla matrice, E crisi per rottura a trazione della rete di fibra esterna alla matrice, D crisi per scorrimento fibra-matrice (Fig. 5.2)

Un Co.V. contenuto e pari al 15% è stato ottenuto per le proprietà legate al carico massimo F_{max} , valutate sulla base dei dati ottenuti dai provini 01, 04 e 06, mentre Co.V. elevati hanno caratterizzato le proprietà legate allo scorrimento fibra-matrice g_{max}^I . Il coefficiente di sfruttamento medio, pari a 0.71, ha evidenziato un'incapacità da parte del composito di sfruttare pienamente le capacità resistenti della rete di fibra.

5.2.2. Osservazioni

I risultati hanno evidenziato una consistente variabilità di comportamento e di modalità di crisi, ad eccezione del composito con matrice Kerakoll caratterizzato da proprietà di adesione superiori. Ciò ha reso necessaria l'esclusione dalle valutazioni finale dei provini che hanno mostrato un comportamento anomalo, caratterizzato da carichi nettamente inferiori e crisi premature generalmente per scorrimento fibra-matrice. I risultati medi così ottenuti si sono caratterizzati, in riferimento ai dati in termini di carico massimo e tensione massima, per una dispersione limitata, ad eccezione dei provini con matrice di malta cementizia. Valori maggiori di Co.V. sono stati ottenuti in riferimento alla deformazione ϵ_{gs}^I , alla duttilità cinematica μ_c e alla rigidezza iniziale del provino integro K^I . Quest'ultima, come le altre proprietà del provino integro, sono strettamente dipendenti da vari parametri, tra i quali le proprietà della malta (meccaniche e geometriche) nonché il metodo di realizzazione del provino, fattori che giustificano la variabilità di tali risultati (Lignola et al. 2017). D'altra parte, in letteratura è stato più volte dimostrato come i risultati ottenuti da prove di adesione su compositi FRCM siano affetti da una consistente variazione in quanto dipendenti da numerosi fattori (capacità della matrice di impregnare i multi-filamenti, caratteristiche geometriche e meccaniche delle due fasi e loro imperfezioni, compatibilità tra i materiali costituenti, difetti derivanti dalle operazioni di realizzazione dei provini e del set-up di prova).

La comparsa di un principio di lesione interlaminare prima del raggiungimento del punto C, in corrispondenza del quale è stata individuata la perdita di adesione fibra-matrice, è riconducibile all'asimmetria intrinseca dell'apparato di prova, la quale generando delle tensioni di peeling (Modo I di frattura) normali all'interfaccia fibra-matrice (D'Antino et al. 2016) ne ha determinato il distacco.

Per un confronto più agevole, in figura 5.19 e tabella 5.10 sono stati riportati i risultati medi delle quattro tipologie di provino.

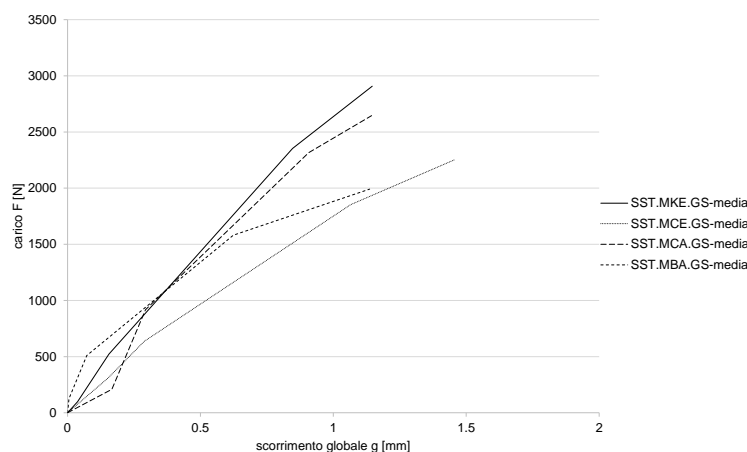


Fig. 5.19. Curve medie carico-scorrimento globale (F-g) relative alle quattro tipologie di provini

Tab. 5.10. Risultati medi Single-Shear Test

provino	F_{max}^I [N]	F_{db}^I [N]	f_r [MPa]	δ_{max}^I [mm]	g_{max}^I [mm]	g_{db}^I [mm]	ϵ_{rg}^I	ϵ_r^I	K_I^I [MPa]	K_{II}^I [MPa]	μ_c	μ_{cd}	f_r/f_r	f_r/f_r	crisi
MKE	2918	2353	894	4.29	1.15	0.85	0.005	0.015	3691	2543	1.46	-	1.03	1.14	F
MCE	2255	1853	691	4.62	1.46	1.07	0.007	0.011	2362	1545	1.51	-	0.80	1.11	F
MCA	2645	2316	810	4.99	1.14	0.91	0.005	0.013	5130	2186	1.91	-	0.94	1.41	F
MBA	1992	1581	610	4.03	1.14	0.62	0.005	0.010	5588	1438	3.59	-	0.71	-	F

F_{max}^I =carico massimo; F_{db}^I =carico corrispondente alla perdita di adesione all'estremo caricato del composito; f_r =tensione massima nella rete di fibra; δ_{max}^I =spostamento massimo valutato mediante i trasduttori 1 e 2 (Fig. 5.4); g_{max}^I =scorrimento globale massimo (Eq. 5.6); g_{db}^I =scorrimento globale massimo di debonding; ϵ_{rg}^I =deformazione massima (Eq. 5.8); ϵ_r^I =deformazione massima (Eq. 5.9); K_I^I =rigidezza del provino integro (Eq. 5.2); K_{II}^I =rigidezza del provino lesionato (Eq. 5.3); μ_c =duttilità cinematica (Eq. 5.4); μ_{cd} =duttilità cinematica disponibile (Eq. 5.4); f_r/f_r =sfruttamento delle proprietà a trazione della rete di fibra; f_r/f_r =sfruttamento delle proprietà a trazione del composito; f_r =resistenza a trazione della rete di fibra (§ 4.4); f_r =resistenza a trazione del composito (§ 4.5); *crisi*= modalità di crisi: F crisi per rottura a trazione della rete di fibra interna alla matrice (Fig. 5.2)

La deformazione ϵ_{rg}^I valutata mediante lo scorrimento globale g_{max}^I è risultata sempre minore rispetto a quella valutata mediante l'applicazione dell'equazione 5.9. Ciò è stato osservato in Sabau et al. (2017) e Carloni et al. (2015) ed attribuito alla non uniforme distribuzione del carico sia tra i multi-filamenti longitudinali sia all'interno del singolo multi-filamento e della conseguente distribuzione aleatoria delle proprietà di adesione (D'Antino et al. 2014, Carloni et al. 2015). Solamente nel caso dei provini caratterizzati da una crisi per scorrimento (modalità D) si è verificato il contrario. La crisi per scorrimento fibra-matrice ha permesso il raggiungimento di scorrimenti e, quindi, deformazioni ϵ_{rg}^I maggiori in corrispondenza di un carico massimo F_{max}^I e di una deformazione ϵ_r^I (Eq. 5.9) confrontabili con quelle degli altri provini.

Per quanto riguarda la perdita di rigidezza tra le fasi II e III, questa è risultata minore nel caso dei provini con matrici di malta Kerakoll e di malta cementizia, i quali hanno mantenuto l'integrità della matrice per tutta la durata delle prove. L'opposto è stato osservato con i provini con malta di calce idraulica e con i provini con malta bastarda.

Le inferiori caratteristiche di adesione dei provini costituiti dalle matrici cementizia e bastarda hanno indotto una perdita di adesione per livelli di carico inferiori.

Con tutte le tipologie di composito, per le quali risultava disponibile la tensione massima f_r (§ 4.5), sono stati raggiunti coefficienti di sfruttamento medi della resistenza del composito superiori all'unità.

Il confronto tra i risultati ha messo in luce una corrispondenza tra le matrici di calce idraulica Kerakoll e di calce idraulica di laboratorio (Fig. 5.19), con risultati caratterizzati dai Co.V. contenuti. Ciò ha suggerito la presenza di una maggiore compatibilità tra la rete di fibra di basalto e le matrici a base calce idraulica rispetto alle matrici caratterizzate dalla presenza del cemento, che si è tradotta in un comportamento più stabile.

Infine, è stato appurato come, ad eccezione del composito con matrice di malta bastarda, i comportamenti dei diversi compositi siano simili (Fig. 5.19, Tab. 5.10) con una modalità di crisi prevalente per rottura a trazione della rete di fibra all'interno della matrice. Tale crisi si è localizzata in tutti i casi in corrispondenza della porzione di composito delaminata, ovvero dove il trasferimento del carico risultava demandato interamente ai soli multi-filamenti di fibra.

Il comportamento del composito con malta bastarda, caratterizzato da valori maggiori di scorrimento fibra-matrice, è stato attribuito alle inferiori caratteristiche meccaniche e di adesione della malta stessa, mentre il comportamento degli altri compositi è risultato in linea con quello osservato in letteratura per compositi costituiti da una rete di fibra relativamente debole (De Santis et al. 2017, Lignola et al. 2017).

5.3. Double-Shear Test-tipo A

Per ogni tipologia di composito sono stati testati 9 provini, per un totale di 36 prove Double-Shear Test di tipo A (DST-A).

Preparazione dei provini

Per ogni provino è stato utilizzato un supporto in laterizio costituito da un mattone di dimensioni 250x120x55 mm³ rinforzato sulle due facce contrapposte di dimensioni maggiori attraverso l'applicazione di due strisce di composito FRCM di dimensioni 220x95x10 mm³. Una delle facce minori del mattone è stata rettificata mediante taglio effettuato con sega circolare con disco diamantato da 3 mm. Per la realizzazione dei compositi è stata impiegata una striscia di rete di fibra di dimensioni 1000x95 mm², costituita da sei multi-filamenti longitudinali.

Su ogni mattone sono stati tracciati i bordi del rinforzo. Dopo aver fissato su uno dei fronti da rinforzare la cassaforma lignea e aver debitamente inumidito il laterizio, si è proceduto all'applicazione del primo strato di malta di spessore pari a 5 mm; successivamente è stata posizionata un'estremità della striscia di fibra pressandola delicatamente nel primo strato di matrice in modo da assicurarne un appropriato impregnamento. Sulla fibra così disposta è stato applicato il secondo strato di malta di spessore pari a 5 mm. Il provino è stato lasciato riposare per 3 giorni, decorsi i quali è stato ruotato per procedere all'applicazione del rinforzo sulla faccia contrapposta. Analogamente a quanto fatto precedentemente, è stato applicato un primo strato di malta di spessore pari a 5 mm con l'ausilio di una cassaforma lignea (Fig.5.20b); quindi è stata girata la striscia di fibra in modo da posizionarne l'estremità libera, pressandola delicatamente nella malta in modo da assicurarne un adeguato impregnamento (Fig. 5.20c), ed è stato applicato il secondo strato di matrice di spessore pari a 5 mm (Fig. 5.20d). Il provino è stato, quindi, lasciato maturare per 28 giorni. Le due strisce di composito sono state realizzate in modo che il lato rettificato del laterizio costituisse l'estremità superiore del provino, ovvero fosse rivolto verso la rete di fibra non immersa nella matrice. Per il dimensionamento dello spessore degli strati delle matrici sono state seguite le indicazioni riportate nella scheda tecnica della malta GeoCalce® Fino della Kerakoll. I compositi sono stati interrotti a 3 centimetri dal bordo superiore per evitare effetti di bordo durante l'esecuzione della prova (analogamente a quanto riportato in letteratura in Carozzi et al. 2015, Donnini 2016, Donnini et al. 2017, De Santis et al. 2017).

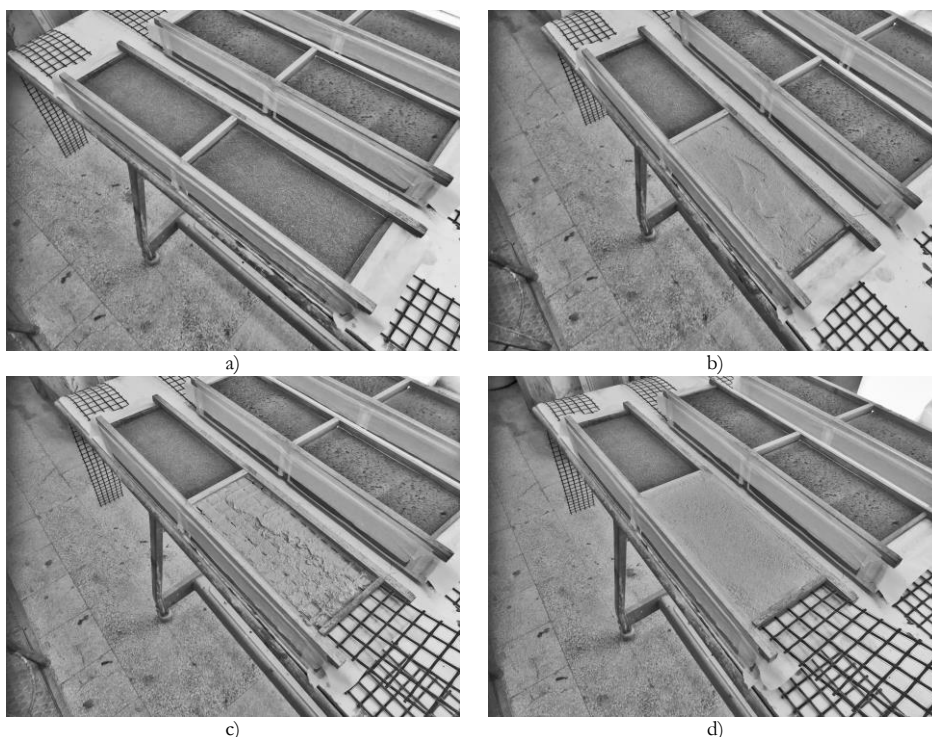


Fig. 5.20. Fasi di preparazione del secondo composito dei provini DST-A

Apparato di prova

I test sono stati condotti in regime di controllo di spostamento ad una velocità di 0.5 mm/min. dato il livello di carico atteso è stata utilizzata una cella di carico da 50 KN del tipo TCLP-5B, Tokyo Sokki Kenkyujo Co. Ltd. Il carico verticale è stato applicato in modo monotonicamente tramite un martinetto a vite, azionato da un volano a mano. La lettura dello spostamento è stata ricavata attraverso 5 trasduttori di spostamento del tipo CE a mensola. L'acquisizione dei dati è avvenuta per mezzo della centralina elettronica della National Instruments.

Test

Lasciato decorrere il tempo di maturazione, i provini sono stati testati. Ogni provino è stato posizionato verticalmente nella macchina di prova, in modo che risultasse in asse con la cella di carico. Il mattone è stato fissato alla base della macchina mediante due telai rigidi in acciaio, in modo da evitare spostamenti del provino durante il test. Tra la faccia superiore del mattone ed i telai è stata interposta una barra di acciaio al fine di assicurare un'uniforme distribuzione della compressione esercitata dai telai sul mattone. Il carico è stato applicato direttamente alla fibra del composito, ancorandone la parte non adesiva per mezzo di un cilindro collegato tramite una cerniera alla cella di carico. È stato utilizzato un cilindro caratterizzato da un diametro pari allo spessore del mattone più due volte lo spessore del primo layer di matrice, in modo che il carico trasmesso ad ognuno dei due rinforzi risultasse parallelo all'asse del provino. La possibilità del cilindro di ruotare ha permesso di ottenere una ripartizione simmetrica del carico tra i due compositi (Carozzi & Poggi 2015, De Santis et al. 2017).

La lettura dello spostamento è stata ricavata per mezzo di 5 trasduttori. In particolare, i due trasduttori contrassegnati con i numeri 1 e 2 in figura 5.21 sono stati posizionati al di sopra del supporto del cilindro, in modo da ottenere delle letture totali di spostamento ($\delta = (\delta_1 + \delta_2)/2$). I trasduttori contrassegnati con i numeri 3 e 4 sono stati posizionati in corrispondenza rispettivamente dell'estremità inferiore e dell'estremità superiore del rinforzo, mediante l'ausilio di due elementi metallici ad "L" applicati il primo sulla matrice ed il secondo sulla fibra non adesiva. Dalla differenza tra gli spostamenti registrati da questi ultimi è stato ottenuto lo scorrimento globale della fibra all'interno della matrice ($g = \delta_4 - \delta_3$). Un quinto trasduttore è stato impiegato al fine di valutare eventuali spostamenti del laterizio.

Per ogni tipologia di matrice, sei provini (contrassegnati con la lettera *a* nei rispettivi codici identificativi) sono stati testati seguendo la configurazione di prova appena descritta. Come verrà esposto nel seguito, tali provini hanno esibito una modalità di crisi fragile, ovvero per rottura a trazione della fibra libera al di sopra del cilindro, in corrispondenza di livelli di carico particolarmente bassi. Al fine di evitare ciò e di garantire una più uniforme distribuzione del carico tra i sei multi-filamenti, la rete di fibra libera dei restanti provini (contrassegnati con la lettera *b* nei rispettivi codici identificativi) è stata impregnata con della resina epossidica (De Santis et al. 2017).

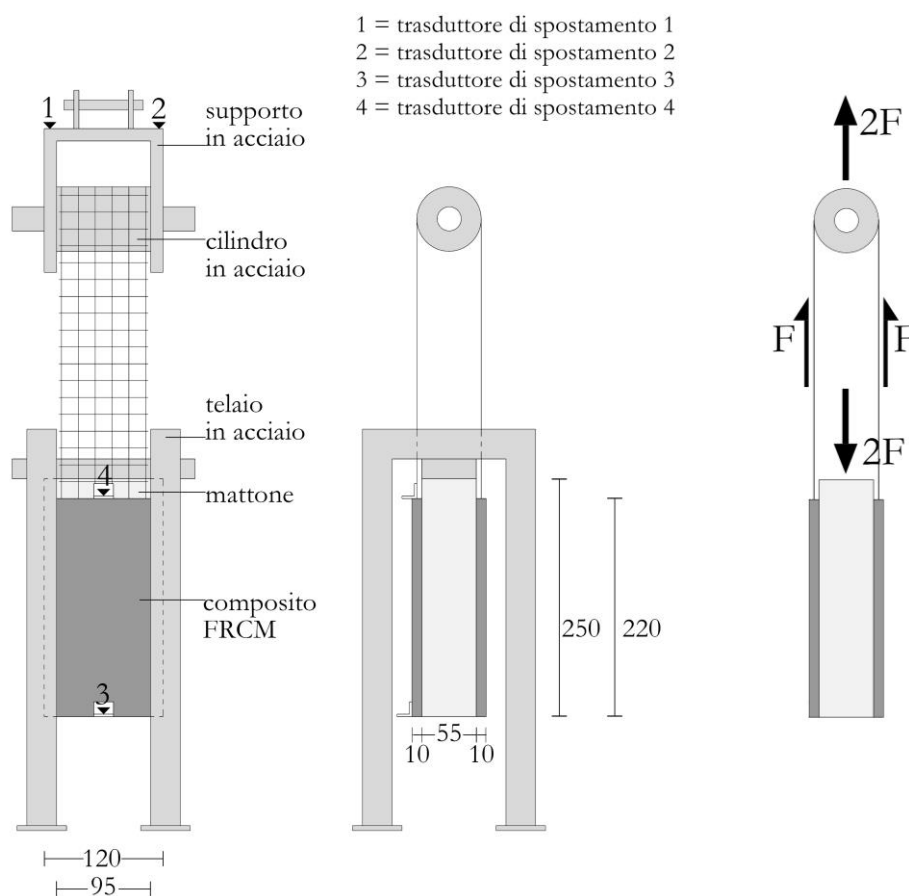


Fig. 5.21. Schematizzazione prova DST-A (dimensioni in millimetri)

Provini e nomenclatura - rete di fibra libera non impregnata:

6 provini rinforzati con malta di calce idraulica + GeoSteel® Grid 200.....	DST-A.MCA.GS-xxa
6 provini rinforzati con malta di cemento + GeoSteel® Grid 200.....	DST-A.MCE.GS-xxa
6 provini rinforzati con malta bastarda + GeoSteel® Grid 200.....	DST-A.MBA.GS-xxa
6 provini rinforzati con GeoCalce® Fino + GeoSteel® Grid 200.....	DST-A.MKE.GS-xxa

Provini e nomenclatura - rete di fibra libera impregnata con resina epossidica:

6 provini rinforzati con GeoCalce® Fino + GeoSteel® Grid 200.....	DST-A.MKE.GS-xxb
3 provini rinforzati con malta di cemento + GeoSteel® Grid 200.....	DST-A.MCE.GS-xxb
3 provini rinforzati con malta di calce idraulica + GeoSteel® Grid 200.....	DST-A.MCA.GS-xxb
3 provini rinforzati con malta bastarda + GeoSteel® Grid 200.....	DST-A.MBA.GS-xxb

5.3.1. Risultati

Data la configurazione dell'apparato di prova, la singola striscia di composito è sottoposta ad una forza di trazione F pari alla metà del carico applicato dalla macchina di prova, secondo lo schema riportato in figura 5.21.

Attraverso i risultati in termini di carico massimo F_{max}^{II} e di corrispondenti spostamenti massimi δ_{max}^{II} , per ogni provino sono stati ricavati lo scorrimento massimo g_{max}^{II} fibra-matrice, la tensione massima nel composito f_r^{II} , e le deformazioni ε_{rg}^{II} e ε_r^{II} valutate sulla base rispettivamente dello scorrimento globale e del carico massimo:

$$g_{max}^{II} = \delta_{4,max}^{II} - \delta_{3,max}^{II} \quad (5.10)$$

$$f_r^{II} = \frac{F_{max}^{II}}{A_f} \quad (5.11)$$

$$\varepsilon_{rg}^{II} = \frac{g_{max}^{II}}{l_a} \quad (5.12)$$

$$\varepsilon_r^{II} = \frac{F_{max}^{II}}{E_f A_f} \quad (5.13)$$

dove δ_3 e δ_4 rappresentano gli spostamenti registrati rispettivamente dai trasduttori di spostamento 3 e 4 (Fig. 5.21).

Inoltre sono stati valutati i coefficienti di sfruttamento delle proprietà a trazione della fibra (f_r^{II}/f_f) e del composito (f_r^{II}/f_c). Duttilità cinematica μ_c , duttilità cinematica disponibile μ_{cd} e rigidzze del provino integro K_r^{II} e lesionato K_r^I sono state ricavate sulla base dei grafici carico-scorrimento globale ($F-g$), secondo quanto descritto al paragrafo § 5.1.

Kerakoll GeoCalce® Fino + Kerakoll GeoSteel® Grid 200 - Rete di fibra libera non impregnata

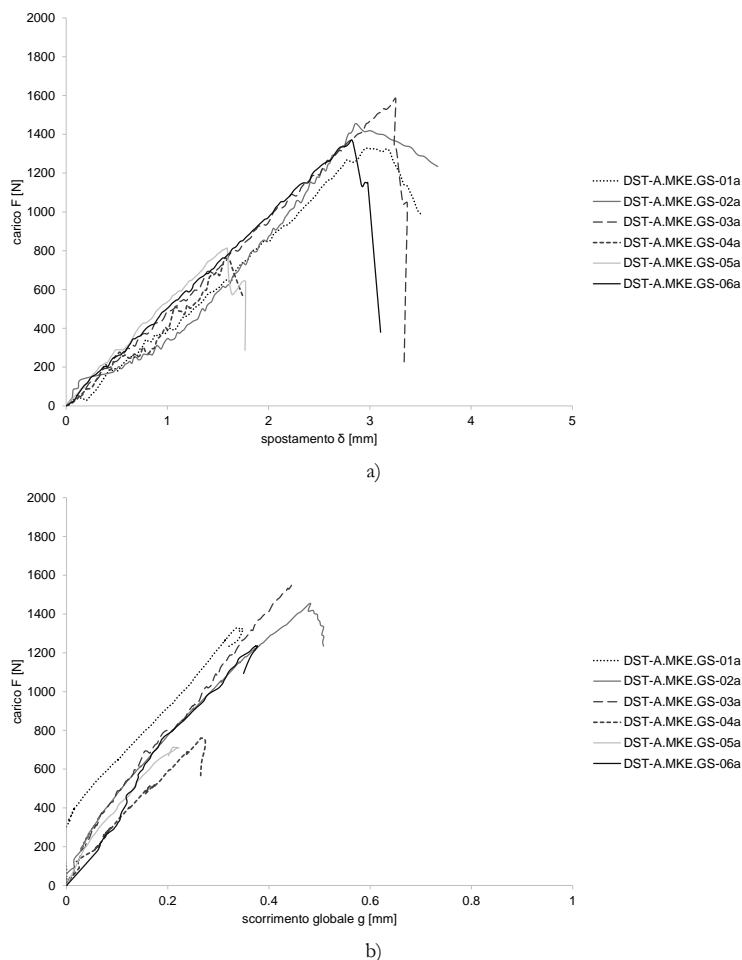


Fig. 5.22. Curve a) carico-spostamento (F- δ) e b) carico-scorrimento globale (F-g) relative ai sei provini costituiti da matrice di malta di calce idraulica Kerakoll

Dai trasduttori di spostamento per ogni provino sono stati costruiti i grafici carico-spostamento (Fig. 5.22a) ed i grafici carico-scorrimento globale (Fig. 5.22b). Su di essi è stato possibile individuare due fasi, contraddistinte da due punti caratterizzanti il percorso di equilibrio. Ciò ha permesso di tracciare un diagramma medio carico-scorrimento globale in cui i due tratti del grafico sono stati linearizzati per una lettura più agevole (Fig. 5.23 e Tab. 5.11).

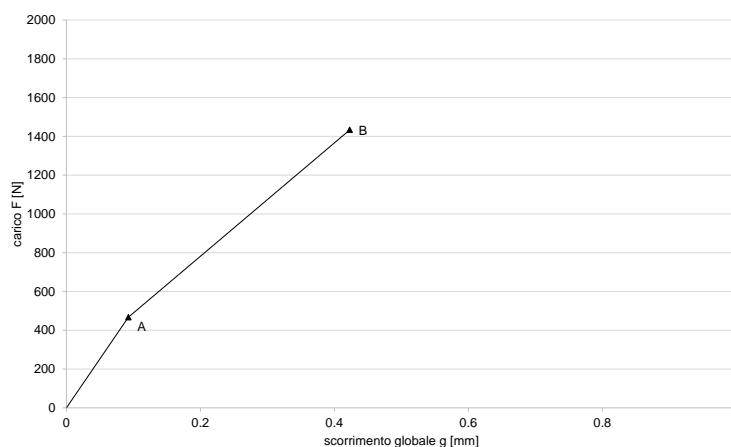


Fig. 5.23. Curva media carico-scorrimento globale (F-g) relativa ai sei provini costituiti da matrice di malta di calce idraulica Kerakoll

Tab. 5.11. Punti caratterizzanti il percorso di equilibrio

punti	F [N]	g [mm]
A	467	0.09
B	1434	0.42

- Fase I: fase di assestamento della prova. Data la configurazione della prova e le caratteristiche della rete di fibra, è impossibile ottenere un allineamento perfetto dei multi-filamenti longitudinali: inizialmente solo alcuni multi-filamenti risultano in tensione. Tale fase termina con il raggiungimento di un primo stadio ($F_a; g_a$), in corrispondenza del quale tutta la rete di fibra non impregnata nella matrice risulta tesa.
- Fase II: fase lineare elastica. Il provino risulta integro. La fase si conclude con il raggiungimento del carico massimo, ovvero della crisi fragile per rottura a trazione della rete di fibra libera.

La crisi si è verificata in modo improvviso come una rottura netta di alcuni multi-filamenti in corrispondenza dei nodi situati al di sopra o in prossimità del cilindro di acciaio (Fig. 5.24c) ed ha sempre riguardato per primo un multi-filamento laterale, il quale durante la prova ha evidenziato uno scorrimento fibra-matrice maggiore (Fig. 5.24b): i multi-filamenti laterali ricevono un contributo in resistenza allo scorrimento inferiore da parte sia della matrice che dei multi-filamenti adiacenti, sviluppando, così, una capacità di adesione inferiore rispetto ai multi-filamenti interni (D'Antino et al. 2014).

La matrice si è mantenuta integra per tutta la durata del test.

Il composito ha dimostrato una buona capacità di adesione con il supporto in laterizio.

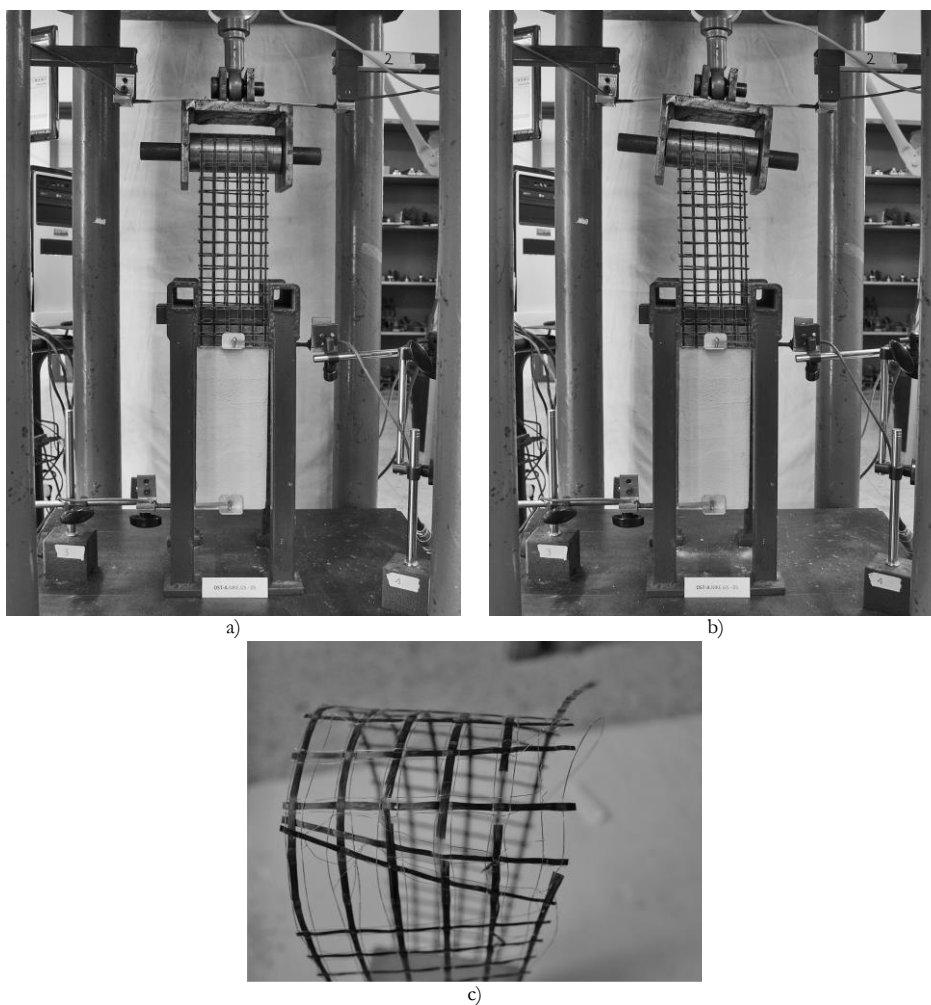


Fig. 5.24. Provino DST-A.MKE.GS-05a: a) inizio della prova; b) termine della prova; c) particolare crisi a trazione di alcuni multifilamenti al di sopra del cilindro di trasmissione del carico

In tabella 5.12 sono stati riportati i risultati per ogni provino testato ed i risultati medi con i rispettivi valori di deviazione standard e coefficiente di variazione. Dalla valutazione di questi ultimi sono stati esclusi i provini DST-A.MKE.GS-04 e 05 a causa di difetti riconducibili alla loro realizzazione.

Tab. 5.12. Risultati prove Double-Shear Test-tipo A condotte su provini costituiti da composito con matrice di malta di calce Kerakoll

provino	F_{max}^{II} [N]	f_r^{II} [MPa]	δ_{max}^{II} [mm]	g_{max}^{II} [mm]	ε_{rg}^{II}	ε_r^{II}	K_r^{II} [MPa]	μ_c	μ_{cd}	f_r^{II}/f_f	f_r^{II}/f_r	crisi
DST-A.MKE.GS-01a	1328	407	2.96	0.34	0.002	0.007	2650	0.94	-	0.47	0.52	E
DST-A.MKE.GS-02a	1453	445	2.87	0.48	0.002	0.007	2729	1.06	-	0.51	0.57	E
DST-A.MKE.GS-03a	1585	486	3.26	0.45	0.002	0.008	3337	1.03	-	0.56	0.62	E
DST-A.MKE.GS-04a	760	233	1.59	0.27	0.001	0.004	2767	1.02	-	0.27	0.30	E
DST-A.MKE.GS-05a	813	249	1.59	0.30	0.001	0.004	3588	1.41	-	0.29	0.32	E
DST-A.MKE.GS-06a	1369	419	2.83	0.42	0.002	0.007	3386	1.05	-	0.49	0.53	E
media	1434	439	2.98	0.42	0.002	0.007	3026	1.02	-	0.51	0.56	
Dev.St.	114	35	0.19	0.06	0.000	0.001	390	0.05	-	0.04	0.04	
Co.V.	8%	8%	6%	15%	15%	8%	13%	5%	-	8%	8%	

Note: in grigio sono riportati i risultati relativi ai provini esclusi dalla valutazione dei risultati medi

F_{max}^{II} =carico massimo; f_r^{II} =tensione massima nella rete di fibra; δ_{max}^{II} =spostamento massimo valutato mediante i trasduttori 1 e 2 (Fig. 5.21); g_{max}^{II} =scorrimento globale massimo (Eq. 5.10); ε_{rg}^{II} =deformazione massima (Eq. 5.12); ε_r^{II} =deformazione massima (Eq. 5.13); K_r^{II} =rigidezza del provino integro (Eq. 5.2); μ_c =duttilità cinematica (Eq. 5.4); μ_{cd} =duttilità cinematica disponibile (Eq. 5.4); f_r^{II}/f_f =sfruttamento delle proprietà a trazione della rete di fibra; f_r^{II}/f_r =sfruttamento delle proprietà a trazione del composito; f_r =resistenza a trazione della rete di fibra (§ 4.4); f_c =resistenza a trazione del composito (§ 4.5); *crisi*=E crisi per rottura a trazione della rete di fibra esterna alla matrice supporto (Fig. 5.2)

I coefficienti di variazione sono risultati contenuti.

I coefficienti di sfruttamento, pari a 0.51 e 0.56, hanno dimostrato una capacità di sfruttamento delle proprietà della fibra e del composito limitate a causa della crisi prematura della rete di fibra libera. Dividendo il carico massimo totale applicato $2F_{max}$ per l'area della rete di fibra A_f è stata ottenuta una tensione pari a 878 MPa, ovvero pari ad una tensione prossima alla resistenza a trazione della rete stessa (§ 4.4). Ciò è attribuibile all'apparato di prova: il carico di trazione $2F$ è stato applicato al provino mediante il cilindro di acciaio, il quale lo ripartisce in modo da trasmettere una quota pari ad $F/2$ ad ognuno dei due compositi; la tensione sollecitante la fibra in testa al cilindro è risultata, quindi, pari a $\sigma_f=2F/A_f$, la quale raggiunto il valore di resistenza della fibra ne ha provocato la crisi. Per cui nella singola striscia di composito è stata attinta una tensione massima di trazione di poco superiore alla metà della resistenza della fibra.

Kerakoll GeoCalce® Fino + Kerakoll GeoSteel® Grid 200 - Rete di fibra libera impregnata con resina epossidica

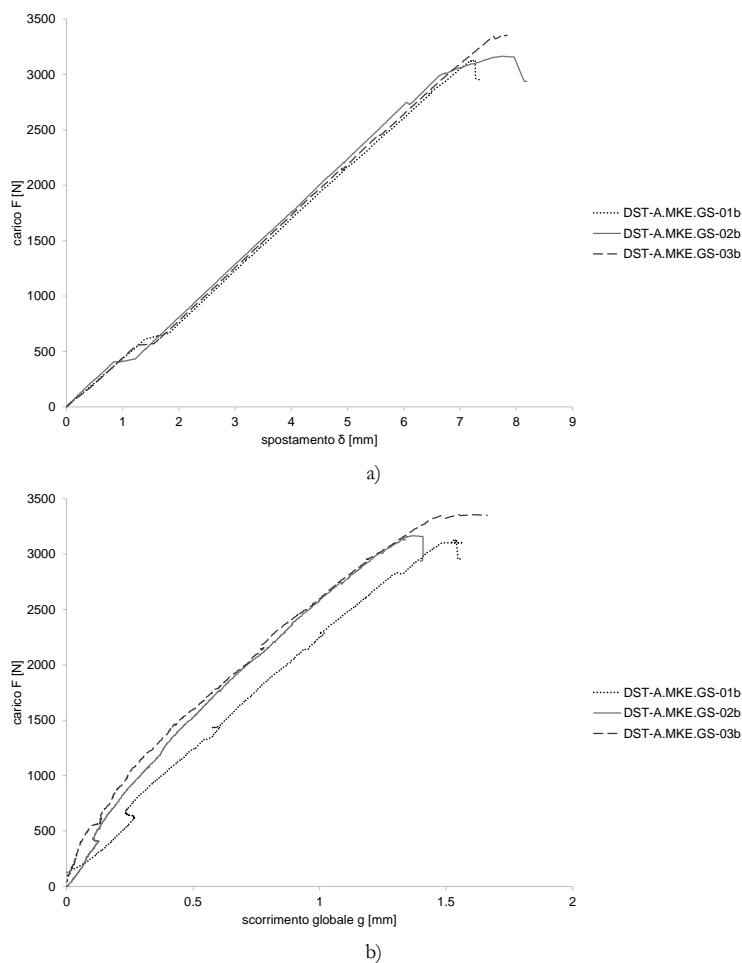


Fig. 5.25. Curve a) carico-spostamento (F- δ) e b) carico-scorrimento globale (F-g) relative ai sei provini costituiti da matrice di malta di calce idraulica Kerakoll con rete di fibra libera impregnata con resina epossidica

Dai trasduttori di spostamento per ogni provino sono stati costruiti i grafici carico-spostamento (Fig. 5.25a) ed i grafici carico-scorrimento globale (Fig. 5.25b). Su di essi è stato possibile individuare quattro fasi, contraddistinte da quattro punti caratterizzanti il percorso di equilibrio. Ciò ha permesso di costruire un diagramma medio carico-scorrimento globale in cui i quattro tratti del grafico sono stati linearizzati per una lettura più agevole (Fig. 5.26 e Tab. 5.13).

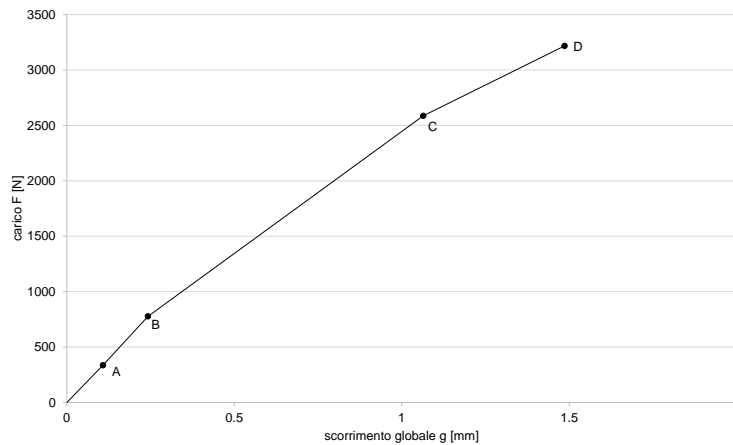


Fig. 5.26. Curva media carico-scorrimento globale (F-g) relativa ai sei provini costituiti da matrice di malta di calce idraulica Kerakoll con rete di fibra libera impregnata con resina epossidica

Tab. 5.13. Punti caratterizzanti il percorso di equilibrio

punti	F [N]	g [mm]
A	335	0.11
B	776	0.24
C (debonding)	2586	1.06
D (massimo)	3217	1.49

- Fase I: fase di assestamento del provino fino al raggiungimento di un primo stadio (F_a ; g_a).
- Fase II: fase lineare elastica. Il provino risulta integro fino al raggiungimento dello stadio indicato con la lettera B (F_b ; g_b).
- Fase III: fase intermedia. In tale fase si assiste alla formazione di una lesione interlaminare all'estremo caricato del composito che comporta una leggera perdita di rigidità.
- Fase IV: fase di propagazione del fenomeno di debonding. La perdita di adesione fibra-matrice comporta un cambio di pendenza della curva (F_c ; g_c); la fibra scorre nella matrice con conseguente propagazione del fenomeno di debonding su uno dei due placcaggi di composito. L'incremento di carico è attribuibile all'effetto ingranamento tra fibra e matrice e al comportamento telescopico, fino al raggiungimento del carico massimo (F_d ; g_d).

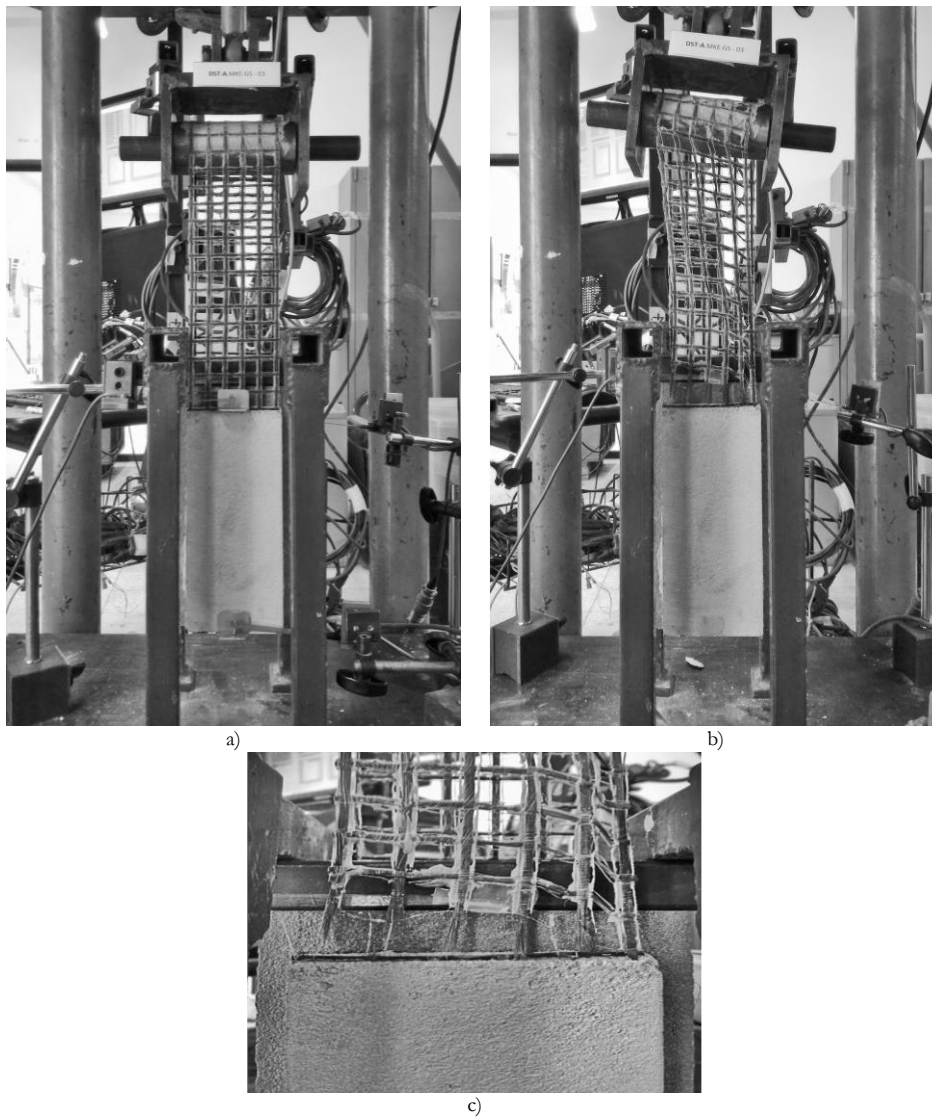


Fig. 5.27. Provino DST-A.MKE.GS-03b: a) inizio della prova; b) termine della prova; c) particolare della crisi a trazione di alcuni multi-filamenti

Dall'osservazione dei provini è stato appurato che lo scorrimento maggiore ha riguardato sempre un multi-filamento laterale, in corrispondenza del quale si ha la formazione di una lesione longitudinale con conseguente distacco di una striscia di layer esterno di matrice.

Tutti i provini hanno mostrato una crisi per rottura a trazione di alcuni multi-filamenti all'interno della matrice, in prossimità dell'estremo caricato del composito (Fig. 5.27c). La crisi è risultata governata dal comportamento telescopico, attribuibile al differente grado di impregnazione dei filamenti di manica rispetto a quelli interni al multi-filamento. Ne consegue una crisi sequenziale dai filamenti più esterni, ed in contatto con la matrice, verso quelli più interni (§ 2.2.2).

La crisi, come la delaminazione, ha interessato uno dei due placcaggi di rinforzo, dimostrando una asimmetria nel comportamento del provino.

Gli spostamenti δ^{II}_3 e δ^{II}_5 , rispettivamente dell'estremo libero del composito e del mattone, sono risultati minimi e pressoché identici. Non sono state registrate rotazioni nel piano dei provini, avendo ottenuto dai trasduttori 1 e 2 dati di spostamento pressoché identici.

Il composito ha dimostrato buone proprietà di adesione con il supporto in laterizio.

Tab. 5.14. Risultati prove Double-Shear Test-tipo A condotte su provini costituiti da composito con matrice di malta di calce Kerakoll con rete di fibra libera impregnata con resina epossidica

provino	F^{II}_{max} [N]	F^{II}_{db} [N]	f^{II}_r [MPa]	δ^{II}_{max} [mm]	g^{II}_{max} [mm]	g^{II}_{db} [mm]	ϵ^{II}_{rg}	ϵ^{II}_r	K^{II} [MPa]	K^{II}_l [MPa]	μ_c	μ_{ed}	f^{II}_t/f_r	f^{II}_r/f_r	crisi
DST-A.MKE.GS-01b	3130	2098	959	7.26	1.54	0.92	0.009	0.016	2222	2114	1.10	-	1.11	1.22	F
DST-A.MKE.GS-02b	3165	2731	970	7.74	1.37	1.09	0.006	0.016	4129	2300	1.74	-	1.12	1.23	F
DST-A.MKE.GS-03b	3356	2929	1028	7.76	1.55	1.18	0.007	0.017	5039	2014	2.37	-	1.19	1.31	F
media	3217	2586	986	7.58	1.49	1.06	0.007	0.016	3797	2143	1.74	-	1.14	1.25	
Dev.St.	122	434	37	0.28	0.10	0.13	0.001	0.001	1438	145	0.64	-	0.04	0.05	
Co.V.	4%	17%	4%	4%	7%	12%	17%	4%	38%	7%	37%	-	4%	4%	

F^{II}_{max} =carico massimo; F^{II}_{db} =carico di debonding; f^{II}_r =tensione massima nella rete di fibra; δ^{II}_{max} =spostamento massimo valutato mediante i trasduttori 1 e 2 (Fig. 5.21); g^{II}_{max} =scorrimento globale massimo (Eq. 5.10); g^{II}_{db} =scorrimento globale di debonding; ϵ^{II}_{rg} =deformazione massima (Eq. 5.12); ϵ^{II}_r =deformazione massima (Eq. 5.13); K^{II} =rigidezza del provino integro (Eq. 5.2); K^{II}_l =rigidezza del provino lesionato (Eq. 5.3); μ_c =duttilità cinematica (Eq. 5.4); μ_{ed} =duttilità cinematica disponibile (Eq. 5.4); f^{II}_t/f_r =sfruttamento delle proprietà a trazione della rete di fibra; f^{II}_r/f_r =sfruttamento delle proprietà a trazione del composito; f_r =resistenza a trazione della rete di fibra (§ 4.4); f_c =resistenza a trazione del composito (§ 4.5); *crisi*=modalità di crisi: F crisi per rottura a trazione della rete di fibra interna alla matrice (Fig. 5.2)

Dai risultati sono stati ottenuti coefficienti di variazione contenuti, ad eccezione di rigidezza iniziale K^{II}_l e duttilità cinematica μ_c .

È stata registrata una minima perdita di rigidezza tra la seconda e la terza fase ed un coefficiente di duttilità basso e pari ad 1.40.

Data la tensione massima raggiunta f^{II}_r , il composito ha esibito una buona capacità di sfruttamento delle proprietà a trazione della rete di fibra e del composito stesso, con coefficienti di sfruttamento pari rispettivamente a 1.14 ed 1.25.

Nonostante la presenza della resina epossidica, lo spostamento totale δ^{II}_{max} , includendo anche l'elongazione della parte di rete di fibra libera, è risultato quasi cinque volte lo scorrimento g^{II}_{max} .

Malta cementizia + Kerakoll GeoSteel® Grid 200 - Rete di fibra libera non impregnata

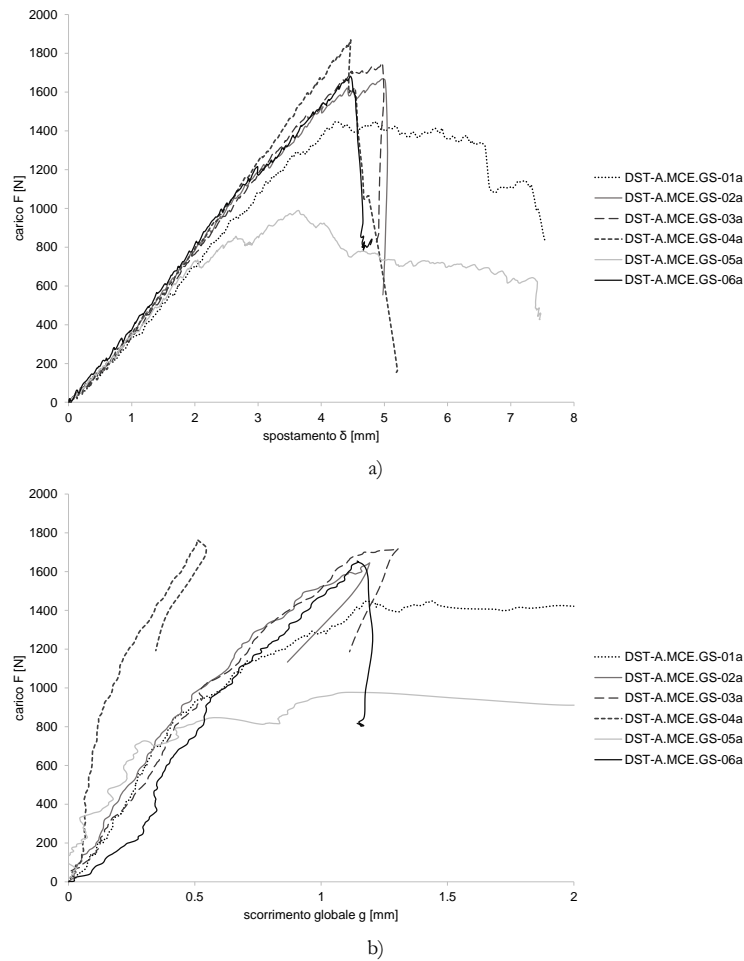


Fig. 5.28. Curve a) carico-spostamento (F- δ) e b) carico-scorrimento globale (F-g) relative ai sei provini costituiti da matrice di malta cementizia

Dai trasduttori di spostamento per ogni provino sono stati costruiti i grafici carico-spostamento (Fig. 5.28a) ed i grafici carico-scorrimento globale (Fig. 5.28b). Su di essi è stato possibile individuare tre fasi, contraddistinte da tre punti caratterizzanti il percorso di equilibrio. Ciò ha permesso di tracciare un diagramma medio carico-scorrimento globale in cui i tre tratti del grafico sono stati linearizzati per una lettura più agevole (Fig. 5.29 e Tab. 5.15). Dalla valutazione del comportamento medio è stato escluso il provino DST-A.MCE.GS-05a, il quale a causa di difetti riconducibili alle operazioni di realizzazione, ha mostrato un comportamento anomalo rispetto a quello esibito dagli altri provini.

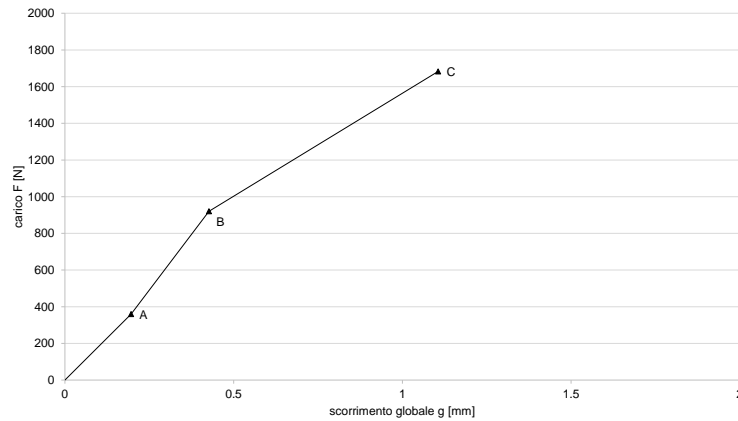


Fig. 5.29. Curva media carico-scorrimento globale (F-g) relativa ai sei provini costituiti da matrice di malta cementizia

Tab. 5.15. Punti caratterizzanti il percorso di equilibrio

punti	F [N]	g [mm]
A	360	0.20
B	921	0.43
C	1683	1.11

- Fase I: fase di assestamento della prova. Data la configurazione della prova e le caratteristiche della rete di fibra, è impossibile ottenere un allineamento perfetto dei multi-filamenti longitudinali: inizialmente solo alcuni multi-filamenti risultano in tensione. Tale fase termina con il raggiungimento di un primo stadio (F_a ; g_a), in corrispondenza del quale tutta la rete di fibra non impregnata nella matrice risulta tesa.
- Fase II: fase lineare elastica. Il provino in tale fase risulta integro.
- Fase III: fase intermedia. Il principio della terza fase (F_b ; g_b) è individuato graficamente da un cambio di pendenza, a cui corrisponde l'innescarsi di una lesione interlaminare alla seconda interfaccia. Tale fase termina con il raggiungimento del carico massimo (F_c ; g_c).

In tutti i test la delaminazione ha interessato uno dei due compositi, suggerendo proprietà differenti di adesione di questi ed una distribuzione asimmetrica del carico.

In cinque test in corrispondenza del valore massimo di carico è stata raggiunta la crisi a trazione di uno o più multi-filamenti. La crisi si è verificata in modo improvviso come una rottura netta di alcuni multi-filamenti in corrispondenza dei nodi situati al di sopra o in prossimità del cilindro di acciaio (Fig. 5.30c).

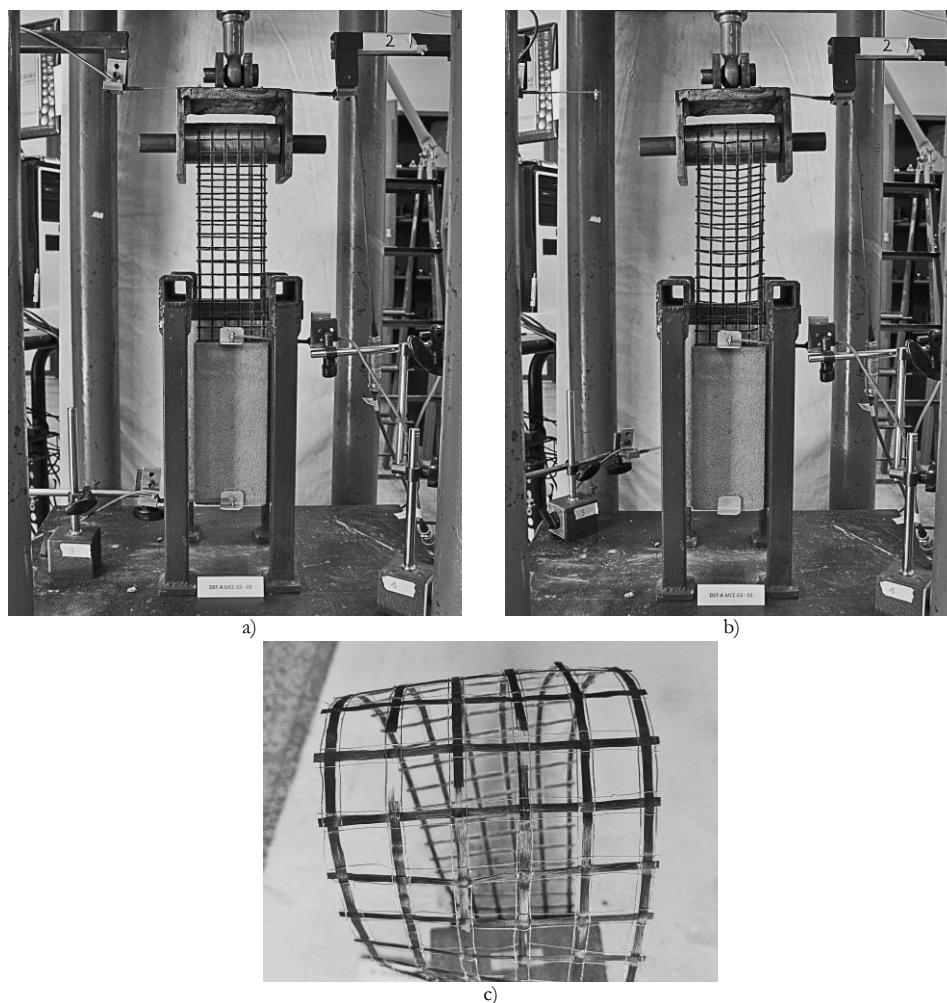


Fig. 5.30. Provino DST-A.MCE.GS-03a: a) inizio della prova; b) termine della prova; c) particolare crisi a trazione di alcuni multi-filamenti al di sopra del cilindro di trasmissione del carico

Dall'osservazione dei provini è risultato evidente che i multi-filamenti laterali hanno registrato gli scorrimenti maggiori (Fig. 5.30b). Data la loro posizione, essi hanno ricevuto un contributo in resistenza allo scorrimento inferiore da parte sia della matrice che dei multi-filamenti adiacenti. I multi-filamenti trasversali hanno assunto una deformata parabolica. In alcuni provini, per i quali è stato possibile rimuovere lo strato esterno di matrice senza danneggiare la rete fibra, è stato osservato uno spostamento relativo tra i multi-filamenti di trama ed ordito, essendo visibile sui multi-filamenti longitudinali l'originaria sede del nodo (luogo di sovrapposizione dei multi-filamenti trasversale e longitudinale): i multi-filamenti trasversali hanno seguito gli scorrimenti di quelli longitudinali, fino a quando il nodo è risultato efficace, dopodiché lo scorrimento ha interessato solamente i multi-filamenti di ordito, mentre quelli di trama sono stati trattenuti dalla matrice e dagli altri multi-filamenti longitudinali i cui nodi hanno conservato la loro efficacia. Gli scorrimenti differenziali e la crisi non simultanea dei multi-filamenti longitudinali suggerisce una distribuzione non uniforme del carico sulla rete di fibra durante i test a causa della stocasticità che caratterizza la distribuzione delle proprietà di adesione nei compositi FRCM (D'Antino et al. 2014, Carloni et al. 2015, Sabau et al. 2017).

Il provino DST-A.MCE.GS-05 è stato caratterizzato da un comportamento differente, una consistente perdita di rigidità, a causa della formazione di alcune lesioni nella matrice, e con una crisi per scorrimento fibra-matrice.

Tutti i test hanno dimostrato un'ottima capacità di adesione del composito con il supporto in laterizio.

Tab. 5.16. Risultati prove Double-Shear Test-tipo A condotte su provini costituiti da composito con matrice di malta cementizia

provino	F_{max}^{II} [N]	f_{fr}^{II} [MPa]	δ_{max}^{II} [mm]	g_{max}^{II} [mm]	ε_{rg}^{II}	ε_{fr}^{II}	K_r^{II} [MPa]	μ_c	μ_{cd}	f_{fr}^{II}/f_r	f_{fr}^{II}/f_c	crisi
DST-A.MCE.GS-01a	1446	443	4.26	1.19	0.005	0.007	2356	1.78	-	0.51	0.71	E
DST-A.MCE.GS-02a	1669	511	4.98	1.25	0.006	0.008	1781	1.39	-	0.59	0.82	E
DST-A.MCE.GS-03a	1749	536	4.97	1.35	0.006	0.009	1881	1.44	-	0.62	0.86	E
DST-A.MCE.GS-04a	1869	573	4.47	0.61	0.003	0.009	10031	2.75	-	0.66	0.92	E
DST-A.MCE.GS-05a	989	303	3.64	1.12	0.005	0.005	2057	2.67	-	0.35	0.49	D
DST-A.MCE.GS-06a	1682	515	4.46	1.13	0.005	0.009	2065	1.23	-	0.60	0.83	E
media	1683	516	4.63	1.11	0.005	0.009	3623	1.72	-	0.60	0.83	
Dev.St.	155	47	0.33	0.29	0.001	0.001	3589	0.61	-	0.05	0.08	
Co.V.	9%	9%	7%	26%	26%	9%	99%	35%	-	9%	9%	

Note: in grigio sono riportati i risultati relativi ai provini esclusi dalla valutazione dei risultati medi

F_{max}^{II} =carico massimo; f_{fr}^{II} =tensione massima nella rete di fibra; δ_{max}^{II} =spostamento massimo valutato mediante i trasduttori 1 e 2 (Fig. 5.21); g_{max}^{II} =scorrimento globale massimo (Eq. 5.10); ε_{rg}^{II} =deformazione massima (Eq. 5.12); ε_{fr}^{II} =deformazione massima (Eq. 5.13); K_r^{II} =rigidezza del provino integro (Eq. 5.2); μ_c =duttilità cinematica (Eq. 5.4); μ_{cd} =duttilità cinematica disponibile (Eq. 5.4); f_{fr}^{II}/f_r =sfruttamento delle proprietà a trazione della rete di fibra; f_{fr}^{II}/f_c =sfruttamento delle proprietà a trazione del composito; f_r =resistenza a trazione della rete di fibra (§ 4.4); f_c =resistenza a trazione del composito (§ 4.5); *crisi*=modalità di crisi: E crisi per rottura a trazione della rete di fibra esterna alla matrice, D crisi per scorrimento fibra-matrice (Fig. 5.2)

I risultati hanno evidenziato una variazione limitata, ad eccezione degli scorrimenti g_{max}^{II} , della deformazione ε_{rg}^{II} , della rigidità K_r^{II} e della duttilità cinematica μ_c .

Dai test è risultata una capacità di sfruttamento delle proprietà della fibra e del composito limitate a causa della crisi prematura della rete di fibra libera. Dato l'apparato di prova, la tensione massima sollecitante la fibra in testa al cilindro è risultata ($\sigma_f=2F_{max}/A_f$) pari a 1031 MPa, ovvero ad una tensione prossima alla resistenza a trazione della rete di fibra (§ 4.4). Ciò giustifica la rottura a trazione dei multi-filamenti al di sopra del cilindro ed un coefficiente di sfruttamento delle proprietà della fibra del singolo composito pari a 0.60.

Malta cementizia + Kerakoll GeoSteel® Grid 200 - Rete di fibra libera impregnata con resina epossidica

Il provino DST-A.MCE.GS-03b ha mostrato una crisi di adesione improvvisa per livelli di carico particolarmente bassi. La crisi si è localizzata alla prima interfaccia, ovvero uno dei placcaggi di rinforzo si è distaccato in modo improvviso dal laterizio di supporto (modalità di crisi B). Tale modalità di crisi è dovuta ad una impropria realizzazione del composito stesso, per cui i relativi risultati sperimentali non sono stati riportati.

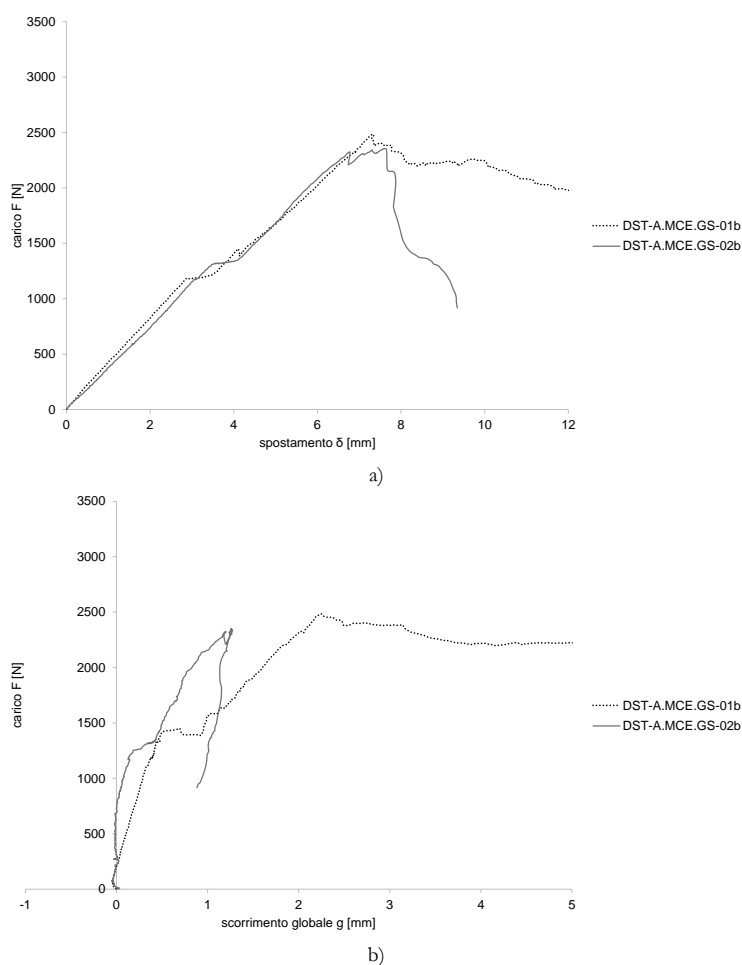


Fig. 5.31. Curve a) carico-spostamento (F- δ) e b) carico-scorrimento globale (F-g) relative ai sei provini costituiti da matrice di malta cementizia con rete di fibra libera impregnata con resina epossidica

Dai trasduttori di spostamento per ogni provino sono stati costruiti i grafici carico-spostamento (Fig. 5.31a) ed i grafici carico-scorrimento globale (Fig. 5.31b). Su di essi è stato possibile individuare quattro fasi, contraddistinte da quattro punti caratterizzanti il percorso di equilibrio. Ciò ha permesso di costruire un diagramma medio carico-scorrimento globale in cui i quattro tratti del grafico sono stati linearizzati per una lettura più agevole (Fig. 5.32 e Tab. 5.16).

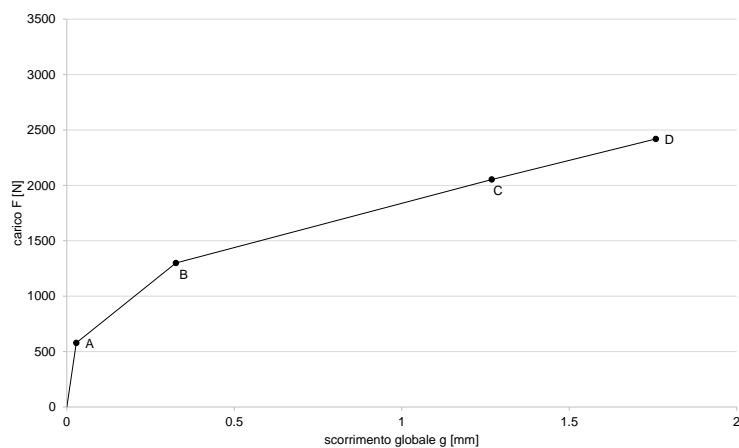


Fig. 5.32. Curva media carico-scorrimento globale (F-g) relativa ai sei provini costituiti da matrice di malta cementizia con rete di fibra libera impregnata con resina epossidica

Tab. 5.16. Punti caratterizzanti il percorso di equilibrio

punti	F [N]	g [mm]
A	579	0.03
B	1299	0.33
C (debonding)	2053	1.27
D (massimo)	2419	1.76

- Fase I: fase di assestamento del provino fino al raggiungimento di un primo stadio (F_a ; g_a).
- Fase II: fase lineare elastica. Il provino risulta integro fino al raggiungimento dello stadio indicato con la lettera B (F_b ; g_b).
- Fase III: fase intermedia. In tale fase si assiste alla formazione di una lesione interlaminare all'estremo caricato del composito che comporta una leggera perdita di rigidità.
- Fase IV: fase di propagazione del fenomeno di debonding. La perdita di adesione fibra-matrice alla seconda interfaccia comporta un cambio di pendenza della curva (F_c ; g_c); la fibra scorre nella matrice con conseguente propagazione della delaminazione su uno dei due placcaggi di composito. L'incremento di carico è attribuibile all'effetto ingranamento tra fibra e matrice e al comportamento telescopico, fino al raggiungimento del carico massimo (F_d ; g_d).

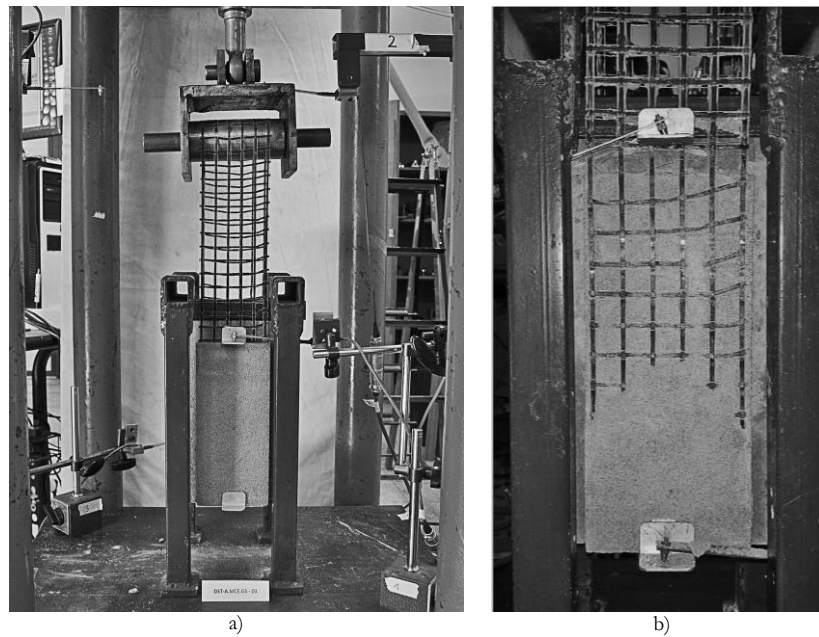


Fig. 5.33. Provino DST-A.MCE.GS-03b: a) prova; b) crisi per scorrimento fibra-matrice

Dall'osservazione dei provini è stato constatato che i multi-filamenti laterali sono stati soggetti a scorrimenti maggiori.

Entrambe i provini hanno mostrato una crisi per scorrimento fibra-matrice preceduta dalla propagazione di una lesione interlaminare fino ad un massimo di circa 145 mm (provino DST-A.MCE.GS-01b) con conseguente espulsione di una porzione di layer esterno di matrice (Fig. 5.33b). La crisi, come la delaminazione, ha interessato uno dei due placcaggi di rinforzo, dimostrando una asimmetria nel comportamento del provino.

Una quarta fase decrescente è stata registrata per un solo provino, per cui è stato ritenuto opportuno non includerla nella valutazione del comportamento medio.

Gli spostamenti δ^{II}_3 e δ^{II}_5 , rispettivamente dell'estremo libero del composito e del mattone, sono risultati minimi e pressoché identici. Non sono state registrate rotazioni nel piano dei provini, avendo ottenuto dai trasduttori 1 e 2 dati di spostamento pressoché identici.

Il composito ha dimostrato una buona adesione con il supporto in laterizio.

Tab. 5.17. Risultati prove Double-Shear Test-tipo A condotte su provini costituiti da composito con matrice di malta cementizia con rete di fibra libera impregnata con resina epossidica

provino	F^{II}_{max} [N]	F^{II}_{db} [N]	f^{II}_r [MPa]	δ^{II}_{max} [mm]	g^{II}_{max} [mm]	g^{II}_{db} [mm]	ϵ^{II}_{rg}	ϵ^{II}_r	K^{II} [MPa]	K^{II}_l [MPa]	μ_c	μ_{cd}	f^{II}_r/f_r	f^{II}_r/f_r	crisi
DST-A.MCE.GS-01b	2484	2147	761	7.34	2.26	1.77	0.010	0.013	2578	875	2.59	4.74	0.88	1.23	D
DST-A.MCE.GS-02b	2354	1959	721	7.59	1.26	0.77	0.006	0.012	3322	1795	2.64	-	0.83	1.16	D
media	2419	2053	741	7.46	1.76	1.27	0.008	0.012	2950	1335	2.61	4.74	0.86	1.19	
Dev.St.	92	133	28	0.18	0.71	0.71	0.003	0.000	526	650	0.03	-	0.03	0.05	
Co.V.	4%	6%	4%	2%	40%	56%	39%	4%	18%	49%	1%	-	4%	4%	

F^{II}_{max} =carico massimo; F^{II}_{db} =carico di debonding; f^{II}_r =tensione massima nella rete di fibra; δ^{II}_{max} =spostamento massimo valutato mediante i trasduttori 1 e 2 (Fig. 5.21); g^{II}_{max} =scorrimento globale massimo (Eq. 5.10); g^{II}_{db} =scorrimento globale di debonding; ϵ^{II}_{rg} =deformazione massima (Eq. 5.12); ϵ^{II}_r =deformazione massima (Eq. 5.13); K^{II} =rigidezza del provino integro (Eq. 5.2); K^{II}_l =rigidezza del provino lesionato (Eq. 5.3); μ_c =duttilità cinematica (Eq. 5.4); μ_{cd} =duttilità cinematica disponibile (Eq. 5.4); f^{II}_r/f_r =sfruttamento delle proprietà a trazione della rete di fibra; f^{II}_r/f_r =sfruttamento delle proprietà a trazione del composito; f_r =resistenza a trazione della rete di fibra (§ 4.4); f_r =resistenza a trazione del composito (§ 4.5); *crisi*=modalità di crisi: D crisi per scorrimento fibra-matrice (Fig. 5.2)

I coefficienti di variazione sono risultati contenuti, eccetto per lo scorrimento g_{max}^I , la deformazione ε_{rg}^I e le rigidzze del provino integro K_i^I e lesionato K^I .

Dai risultati medi è emersa una consistente perdita di rigidzza tra la seconda e la terza fase da cui deriva un coefficiente di duttilità pari a 2.61.

Data la tensione massima raggiunta f_r^I , i hanno dimostrato una buona capacità di sfruttamento delle proprietà a trazione del composito, raggiungendo un coefficiente di sfruttamento pari ad 1.19, ed una capacità di sfruttamento delle proprietà a trazione della fibra pari a 0.86.

Nonostante la presenza della resina epossidica, lo spostamento totale δ_{max}^I , includendo anche l'elongazione della parte di rete di fibra libera, è risultato circa quattro volte lo scorrimento g_{max}^I .

Malta di calce idraulica + Kerakoll GeoSteel® Grid 200 - Rete di fibra libera non impregnata

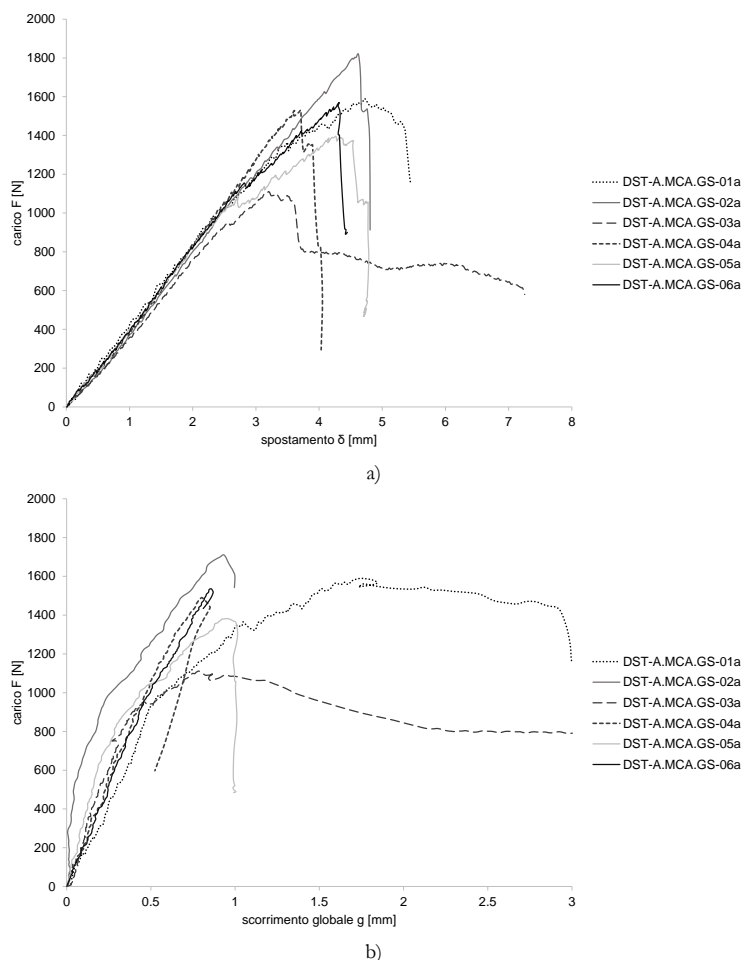


Fig. 5.34. Curve a) carico-spostamento ($F-\delta$) e b) carico-scorrimento globale ($F-g$) relative ai sei provini costituiti da matrice di malta di calce idraulica

Dai trasduttori di spostamento per ogni provino sono stati costruiti i grafici carico-spostamento (Fig. 5.34a) ed i grafici carico-scorrimento globale (Fig. 5.34b). Su di essi è stato possibile individuare tre fasi, contraddistinte da tre punti caratterizzanti il percorso di equilibrio. Ciò ha permesso di tracciare un diagramma medio carico-scorrimento globale in cui i tre tratti del grafico sono stati linearizzati per una lettura più agevole (Fig. 5.35 e Tab. 5.18). Dalla valutazione del comportamento medio è stato escluso il provino DST-A.MCA.GS-03a, il quale a causa di difetti riconducibili alle operazioni di realizzazione, ha mostrato un comportamento differente da quello esibito dagli altri provini.

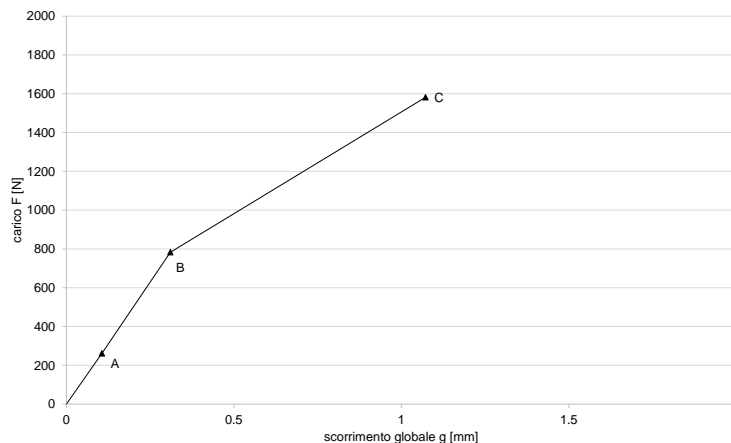


Fig. 5.35. Curva media carico-scorrimento globale (F-g) relativa ai sei provini costituiti da matrice di malta di calce idraulica

Tab. 5.18. Punti caratterizzanti il percorso di equilibrio

punti	F [N]	g [mm]
A	261	0.11
B	783	0.31
C	1581	1.07

- Fase I: fase di assestamento della prova. Data la configurazione della prova e le caratteristiche della rete di fibra, è impossibile ottenere un allineamento perfetto dei multi-filamenti longitudinali: inizialmente solo alcuni multi-filamenti risultano in tensione. Tale fase termina con il raggiungimento di un primo stadio ($F_a; g_a$), in corrispondenza del quale tutta la rete di fibra non impregnata nella matrice risulta tesa.
- Fase II: fase lineare elastica. In tale fase il provino risulta integro.
- Fase III: fase intermedia. Il principio della terza fase ($F_b; g_b$) è individuato graficamente da un cambio di pendenza, a cui corrisponde l'innescarsi di una lesione interlaminare alla seconda interfaccia. Tale fase termina con il raggiungimento del carico massimo ($F_c; g_c$).

In tutti i test la delaminazione ha interessato uno dei due compositi, suggerendo proprietà differenti di adesione di questi ed una distribuzione asimmetrica del carico.

In cinque test in corrispondenza del valore massimo di carico è stata raggiunta la crisi a trazione di uno o più multi-filamenti. La crisi si è verificata in modo improvviso come una rottura netta di alcuni multi-filamenti in corrispondenza dei nodi situati al di sopra o in prossimità del cilindro di acciaio (Fig. 5.36c).

Terminati i test, dall'osservazione dei provini è risultato evidente uno scorrimento maggiore dei multi-filamenti laterali (Fig. 5.36d). Data la loro posizione, essi hanno ricevuto un contributo in resistenza allo scorrimento inferiore da parte sia della matrice che dei multi-filamenti adiacenti (Fig. 5.36b). I multi-filamenti trasversali hanno assunto una deformazione parabolica. In alcuni provini, per i quali è stato possibile rimuovere lo strato esterno di matrice senza danneggiare la rete fibra, è stato osservato uno spostamento relativo tra i multi-filamenti di trama ed ordito, essendo visibile sui multi-filamenti longitudinali l'originaria sede del nodo (luogo di sovrapposizione dei multi-filamenti trasversale e longitudinale): i multi-filamenti

trasversali hanno seguito gli scorrimenti di quelli longitudinali, fino a quando il nodo è risultato efficace, dopodiché lo scorrimento ha interessato solamente i multi-filamenti di ordito, mentre quelli di trama sono stati trattenuti dalla matrice e dagli altri multi-filamenti longitudinali i cui nodi hanno conservato la loro efficacia. Gli scorrimenti differenziali e la crisi non simultanea dei multi-filamenti longitudinali suggerisce una distribuzione non uniforme del carico sulla rete di fibra durante i test a causa della stocasticità che caratterizza la distribuzione delle proprietà di adesione nei compositi FRCM (D'Antino et al. 2014, Carloni et al. 2015, Sabau et al. 2017).

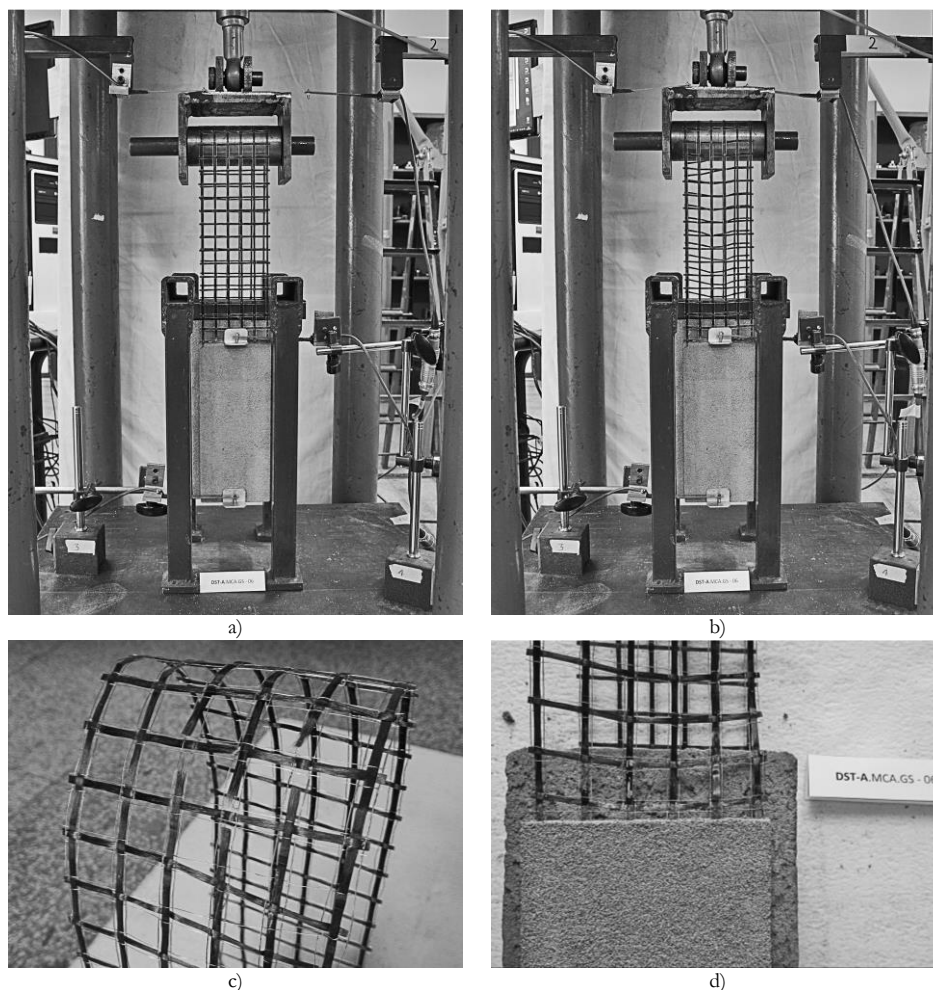


Fig. 5.36. Provino DST-A.MCA.GS-06a: a) inizio della prova; b) termine della prova; c) particolare crisi a trazione di alcuni multi-filamenti; d) differenziale dei multi-filamenti longitudinali

Il provino DST-A.MCA.GS-03 ha mostrato un comportamento differente, con una crisi per scorrimento della fibra all'interno della matrice. Dopo una prima fase pressoché lineare elastica, all'aumentare del carico è stato registrato un aumento dello scorrimento dei multi-filamenti longitudinali in una delle due strisce di composito, mentre i multi-filamenti trasversali sono stati trattenuti dalla matrice al proprio interno. La delaminazione, come per gli altri provini, non si è propagata oltre 80-90 mm dall'estremo caricato del composito. Tale provino è stato escluso dalla valutazione dei risultati medi riportati in tabella 5.19.

Il composito ha dimostrato una buona capacità di adesione con il supporto in laterizio.

Tab. 5.19. Risultati prove Double-Shear Test-tipo A condotte su provini costituiti da composito con matrice di malta di calce idraulica

provino	F_{max}^{II} [N]	f_t^I [MPa]	δ_{max}^{II} [mm]	g_{max}^{II} [mm]	ε_{rg}^{II}	ε_t^{II}	K_r^{II} [MPa]	μ_c	μ_{cd}	f_t^I/f_t	f_t^I/f_t	crisi
DST-A.MCA.GS-01a	1589	487	4.72	1.74	0.008	0.008	2206	2.19	-	0.56	0.85	E
DST-A.MCA.GS-02a	1820	558	4.62	1.05	0.005	0.009	4764	3.19	-	0.64	0.97	E
DST-A.MCA.GS-03a	1111	340	3.20	0.78	0.004	0.006	3905	2.40	2.24	0.39	0.59	D
DST-A.MCA.GS-04a	1531	469	3.70	0.82	0.004	0.008	2380	1.25	-	0.54	0.82	E
DST-A.MCA.GS-05a	1396	428	4.26	0.92	0.005	0.007	3244	2.13	-	0.49	0.74	E
DST-A.MCA.GS-06a	1570	481	4.32	0.83	0.004	0.008	2203	1.15	-	0.56	0.84	E
media	1581	484	4.33	1.07	0.005	0.008	2959	1.98	-	0.56	0.84	
Dev.St.	153	47	0.40	0.38	0.002	0.001	1097	0.83	-	0.05	0.08	
Co.V.	10%	10%	9%	36%	35%	10%	37%	42%	-	10%	10%	

Note: in grigio sono riportati i risultati relativi ai provini esclusi dalla valutazione dei risultati medi

F_{max}^{II} =carico massimo; f_t^I =tensione massima nella rete di fibra; δ_{max}^{II} =spostamento massimo valutato mediante i trasduttori 1 e 2 (Fig. 5.21); g_{max}^{II} =scorrimento globale massimo (Eq. 5.10); ε_{rg}^{II} =deformazione massima (Eq. 5.12); ε_t^{II} =deformazione massima (Eq. 5.13); K_r^{II} =rigidezza del provino integro (Eq. 5.2); μ_c =duttilità cinematica (Eq. 5.4); μ_{cd} =duttilità cinematica disponibile (Eq. 5.4); f_t^I/f_t =sfruttamento delle proprietà a trazione della rete di fibra; f_t^I/f_t =sfruttamento delle proprietà a trazione del composito; f_t =resistenza a trazione della rete di fibra (§ 4.4); f_t =resistenza a trazione del composito (§ 4.5); *crisi*=modalità di crisi: E crisi per rottura a trazione della rete di fibra esterna alla matrice, D crisi per scorrimento fibra-matrice (Fig. 5.2)

I risultati hanno esibito Co.V. contenuti, ad eccezione degli scorrimenti g_{max}^{II} , della deformazione ε_{rg}^{II} , della rigidezza K_r^{II} e della duttilità cinematica μ_c .

Dai coefficienti di sfruttamento ottenuti sono emerse limitate capacità di sfruttamento delle proprietà della fibra e del composito a causa della crisi prematura della rete di fibra libera. Analogamente ai compositi precedenti, dato l'apparato di prova la tensione massima sollecitante la fibra in testa al cilindro è risultata ($\sigma_f=2F_{max}/A$) pari a 969 MPa, ovvero ad una tensione prossima alla resistenza a trazione della rete stessa (§ 4.4), causando la crisi prematura della rete stessa. La tensione nel singolo composito è, quindi, risultata pari a circa la metà della resistenza della rete di fibra, da cui è derivato un coefficiente di sfruttamento di tali proprietà pari a 0.56.

Malta di calce idraulica + Kerakoll GeoSteel® Grid 200 - Rete di fibra libera impregnata con resina epossidica

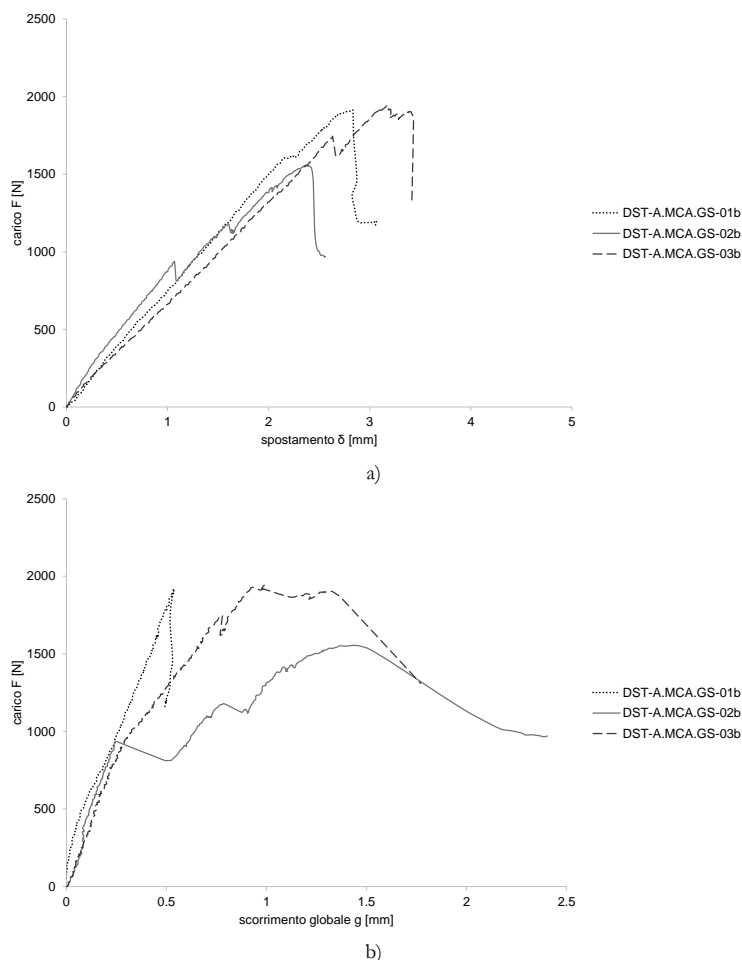


Fig. 5.37. Curve a) carico-spostamento (F- δ) e b) carico-scorrimento globale (F-g) relative ai sei provini costituiti da matrice di malta calce idraulica con rete di fibra libera impregnata con resina epossidica

Dai trasduttori di spostamento per ogni provino sono stati costruiti i grafici carico-spostamento (Fig. 5.37a) ed i grafici carico-scorrimento globale (Fig. 5.37b). Su di essi è stato possibile individuare tre fasi, contraddistinte da tre punti caratterizzanti il percorso di equilibrio. Ciò ha permesso di costruire un diagramma medio carico-scorrimento globale in cui i tre tratti del grafico sono stati linearizzati per una lettura più agevole (Fig. 5.38 e Tab. 5.20).

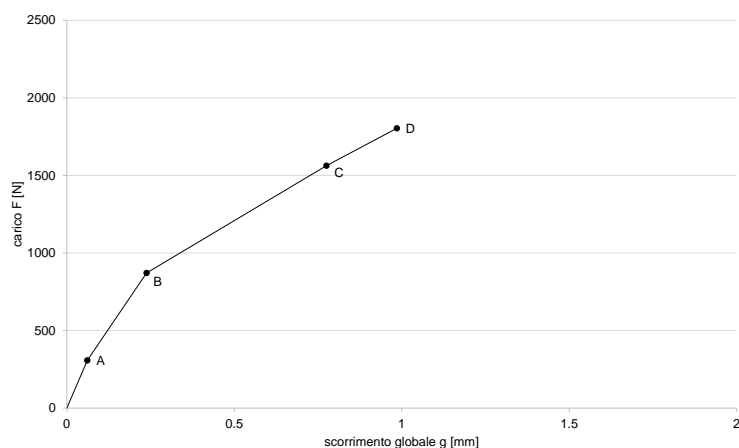


Fig. 5.38. Curva media carico-scorrimento globale (F-g) relativa ai sei provini costituiti da matrice di malta di calce idraulica con rete di fibra libera impregnata con resina epossidica

Tab. 5.20. Punti caratterizzanti il percorso di equilibrio

punti	F [N]	g [mm]
A	308	0.06
B	872	0.24
C (debonding)	1563	0.78
D (massimo)	1804	0.99

- Fase I: fase di assestamento del provino fino al raggiungimento di un primo stadio (F_a ; g_a).
- Fase II: fase lineare elastica. Il provino risulta integro fino al raggiungimento dello stadio indicato con la lettera B (F_b ; g_b).
- Fase III: fase intermedia. In tale fase si assiste alla formazione di una lesione interlaminare all'estremo caricato del composito che comporta una leggera perdita di rigidità.
- Fase IV: fase di propagazione del fenomeno di debonding. La perdita di adesione fibra-matrice alla seconda interfaccia comporta un cambio di pendenza della curva (F_c ; g_c); la fibra scorre nella matrice con conseguente propagazione della delaminazione su uno dei due placcaggi di composito. L'incremento di carico è attribuibile all'effetto ingranamento tra fibra e matrice e al comportamento telescopico, fino al raggiungimento del carico massimo (F_d ; g_d).

Gli scorrimenti maggiori hanno riguardato sempre uno dei multi-filamenti laterali.

Tutti i provini hanno mostrato una crisi per scorrimento fibra-matrice preceduta dalla propagazione della lesione interlaminare, la quale ha riguardato l'intera estensione del composito dei provini DST-A.MCA.GS-01b e 03b (Fig. 5.39b). La crisi, come la delaminazione, ha interessato uno dei due placcaggi di rinforzo, dimostrando una asimmetria nel comportamento del provino. Dopo il raggiungimento del valore massimo di carico si è manifestata un'improvvisa e consistente perdita di carico, seguita da una breve fase decrescente. Tale fase non è stata inclusa nella valutazione del comportamento medio di adesione del composito.

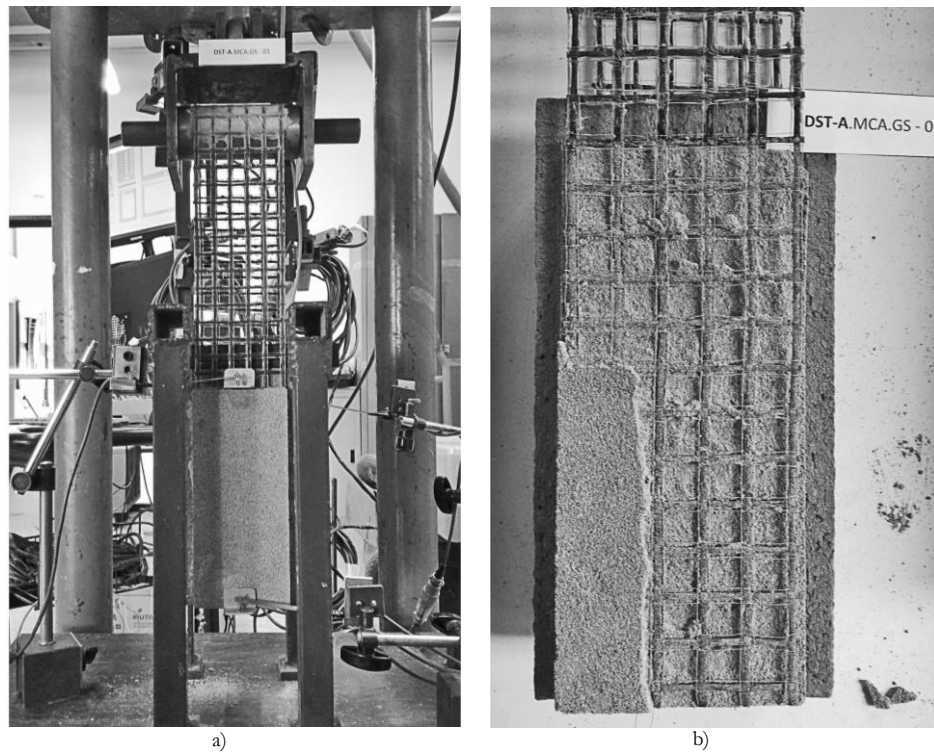


Fig. 5.39. Provino DST-A.MCA.GS-01b: a) prova; b) particolare della crisi per scorrimento fibra-matrice

Gli spostamenti δ^{II}_3 e δ^{II}_5 , rispettivamente dell'estremo libero del composito e del mattone, sono risultati minimi e pressoché identici. Non sono state registrate rotazioni nel piano dei provini, avendo ottenuto dai trasduttori 1 e 2 dati di spostamento pressoché identici.

Il composito ha dimostrato buone proprietà di adesione con il supporto in laterizio.

Tab. 5.21. Risultati prove Double-Shear Test-tipo A condotte su provini costituiti da composito con matrice di malta di calce idraulica con rete di fibra libera impregnata con resina epossidica

provino	F^{II}_{max} [N]	F^{II}_{db} [N]	f^{II}_r [MPa]	δ^{II}_{max} [mm]	g^{II}_{max} [mm]	g^{II}_{db} [mm]	ϵ^{II}_{rg}	ϵ^{II}_r	K^{II}_i [MPa]	K^{II}_l [MPa]	μ_c	μ_{cd}	f^{II}_r/f_t	f^{II}_r/f_r	crisi
DST-A.MCA.GS-01b	1913	1567	586	2.83	0.53	0.44	0.002	0.010	3471	3058	1.09	-	0.68	1.02	D+C
DST-A.MCA.GS-02b	1554	1387	476	2.40	1.43	1.11	0.007	0.008	3394	1843	3.36	1.30	0.55	0.83	D
DST-A.MCA.GS-03b	1944	1735	596	3.18	0.99	0.78	0.005	0.010	3549	1668	1.78	1.60	0.69	1.04	D+C
media	1804	1477	553	2.80	0.99	0.77	0.005	0.009	3471	2190	2.07	1.45	0.61	0.92	
Dev.St.	217	127	66	0.39	0.45	0.47	0.002	0.001	78	757	1.16	0.21	0.09	0.14	
Co.V.	12%	9%	12%	14%	45%	61%	46%	12%	2%	35%	56%	15%	15%		

F^{II}_{max} =carico massimo; F^{II}_{db} =carico di debonding; f^{II}_r =tensione massima nella rete di fibra; δ^{II}_{max} =spostamento massimo valutato mediante i trasduttori 1 e 2 (Fig. 5.21); g^{II}_{max} =scorrimento globale massimo (Eq. 5.10); g^{II}_{db} =scorrimento globale di debonding; ϵ^{II}_{rg} =deformazione massima (Eq. 5.12); ϵ^{II}_r =deformazione massima (Eq. 5.13); K^{II}_i =rigidezza del provino integro (Eq. 5.2); K^{II}_l =rigidezza del provino lesionato (Eq. 5.3); μ_c =duttilità cinematica (Eq. 5.4); μ_{cd} =duttilità cinematica disponibile (Eq. 5.4); f^{II}_r/f_t =sfruttamento delle proprietà a trazione della rete di fibra; f^{II}_r/f_r =sfruttamento delle proprietà a trazione del composito; f_r =resistenza a trazione della rete di fibra (§ 4.4); f_t =resistenza a trazione del composito (§ 4.5); *crisi*=modalità di crisi: D crisi per scorrimento fibra-matrice, C delaminazione all'interfaccia fibra-matrice (Fig. 5.2)

I coefficienti di variazione sono risultati contenuti, eccetto per lo scorrimento g^{II}_{max} , la deformazione ϵ^{II}_{rg} , la duttilità cinematica μ_c e la rigidezza del provino lesionato K^{II}_l .

Dai risultati medi è emersa una perdita di rigidezza tra la seconda e la terza fase da cui è derivato un coefficiente di duttilità pari a 2.07. Data la tensione massima raggiunta f^{II}_r , il composito ha dimostrato una

capacità di sfruttamento delle proprietà a trazione sia della rete di fibra che del composito non ottimali. Nonostante ciò, per due provini è stata raggiunta una delaminazione completa, con distacco completo della rete di fibra alla quale è permastato adeso il layer esterno di matrice.

La particolare modalità di crisi riscontrata in abbinamento al livello di carico massimo medio F_{max}^{II} perseguito e dai bassi valori di spostamento δ_{max}^{II} e di scorrimento g_{max}^{II} , hanno fatto presupporre la presenza di proprietà meccaniche e di adesione del composito particolarmente limitate probabilmente dovute a condizioni di maturazione dei provini non ottimali.

Nonostante la presenza della resina epossidica, lo spostamento totale δ_{max}^{II} , includendo anche l'elongazione della parte di rete di fibra libera, risulta sempre maggiore dello scorrimento g_{max}^{II} .

Malta bastarda + Kerakoll GeoSteel® Grid 200 - Rete di fibra libera non impregnata

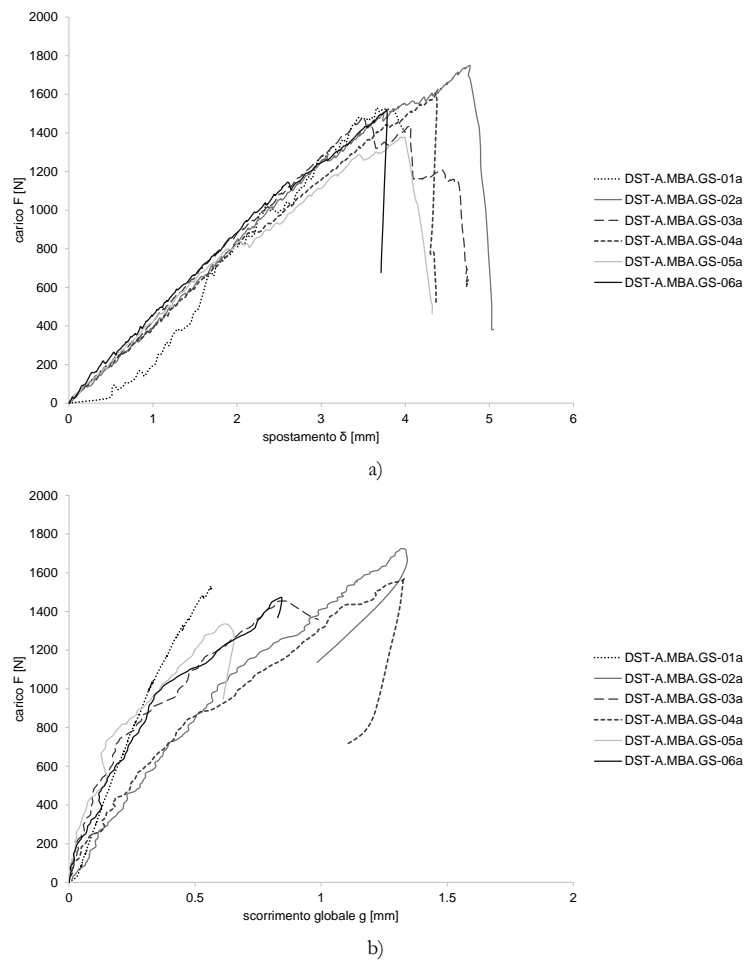


Fig. 5.40. Curve a) carico-spostamento (F- δ) e b) carico-scorrimento globale (F-g) relative ai sei provini costituiti da matrice di malta bastarda

Dai trasduttori di spostamento per ogni provino sono stati costruiti i grafici carico-spostamento (Fig. 5.40a) ed i grafici carico-scorrimento globale (Fig. 5.40b). Su di essi è stato possibile individuare tre fasi, contraddistinte da tre punti caratterizzanti il percorso di equilibrio. Ciò ha permesso di tracciare un diagramma medio carico-scorrimento globale in cui i tre tratti del grafico sono stati linearizzati per una lettura più agevole (Fig. 5.41 e Tab. 5.22).

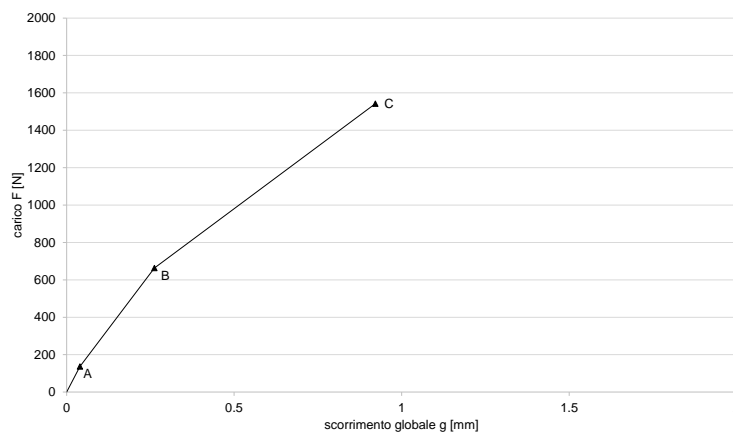


Fig. 5.41. Curva media carico-scorrimento globale (F-g) relativa ai sei provini costituiti da matrice di malta bastarda

Tab. 5.22. Punti caratterizzanti il percorso di equilibrio

punti	F [N]	g [mm]
A	137	0.04
B	663	0.26
C	1542	0.92

- Fase I: fase di assestamento della prova. Data la configurazione della prova e le caratteristiche della rete di fibra, è impossibile ottenere un allineamento perfetto dei multi-filamenti longitudinali: inizialmente solo alcuni multi-filamenti risultano in tensione. Tale fase termina con il raggiungimento di un primo stadio (F_a ; g_a), in corrispondenza del quale tutta la rete di fibra non impregnata nella matrice risulta tesa.
- Fase II: fase lineare elastica. In tale fase il provino risulta integro.
- Fase III: fase intermedia. Il principio della terza fase (F_b ; g_b) è individuato graficamente da un cambio di pendenza, a cui corrisponde l'innescarsi di una lesione interlaminare alla seconda interfaccia. Tale fase termina con il raggiungimento del carico massimo (F_c ; g_c).

In tutti i test la delaminazione ha interessato uno dei due compositi, suggerendo proprietà differenti di adesione di questi ed una distribuzione asimmetrica del carico.

Al raggiungimento del carico massimo è corrisposta la crisi a trazione di uno o più multi-filamenti. Questa si è verificata in modo improvviso come una rottura netta dei multi-filamenti in corrispondenza dei nodi situati al di sopra o in prossimità del cilindro di acciaio (Fig. 5.42c).

Terminati i test, dall'osservazione dei provini è risultato evidente che i multi-filamenti laterali hanno registrato gli scorrimenti maggiori (Fig. 5.42d). Data la loro posizione, essi hanno ricevuto un contributo in resistenza allo scorrimento inferiore da parte sia della matrice che dei multi-filamenti adiacenti. I multi-filamenti trasversali hanno esibito una deformazione parabolica. In alcuni provini, per i quali è stato possibile rimuovere lo strato esterno di matrice senza danneggiare la rete fibra, è stato osservato uno spostamento relativo tra i multi-filamenti di trama ed ordito, essendo visibile sui alcuni multi-filamenti longitudinali l'originaria sede del nodo (luogo di sovrapposizione dei multi-filamenti trasversale e longitudinale): i multi-

filamenti trasversali hanno seguito gli scorrimenti di quelli longitudinali, fino a quando il nodo è risultato efficace, dopodiché lo scorrimento ha interessato solamente i multi-filamenti di ordito, mentre quelli di trama sono stati trattenuti dalla matrice e dagli altri multi-filamenti longitudinali i cui nodi hanno conservato la loro efficacia.

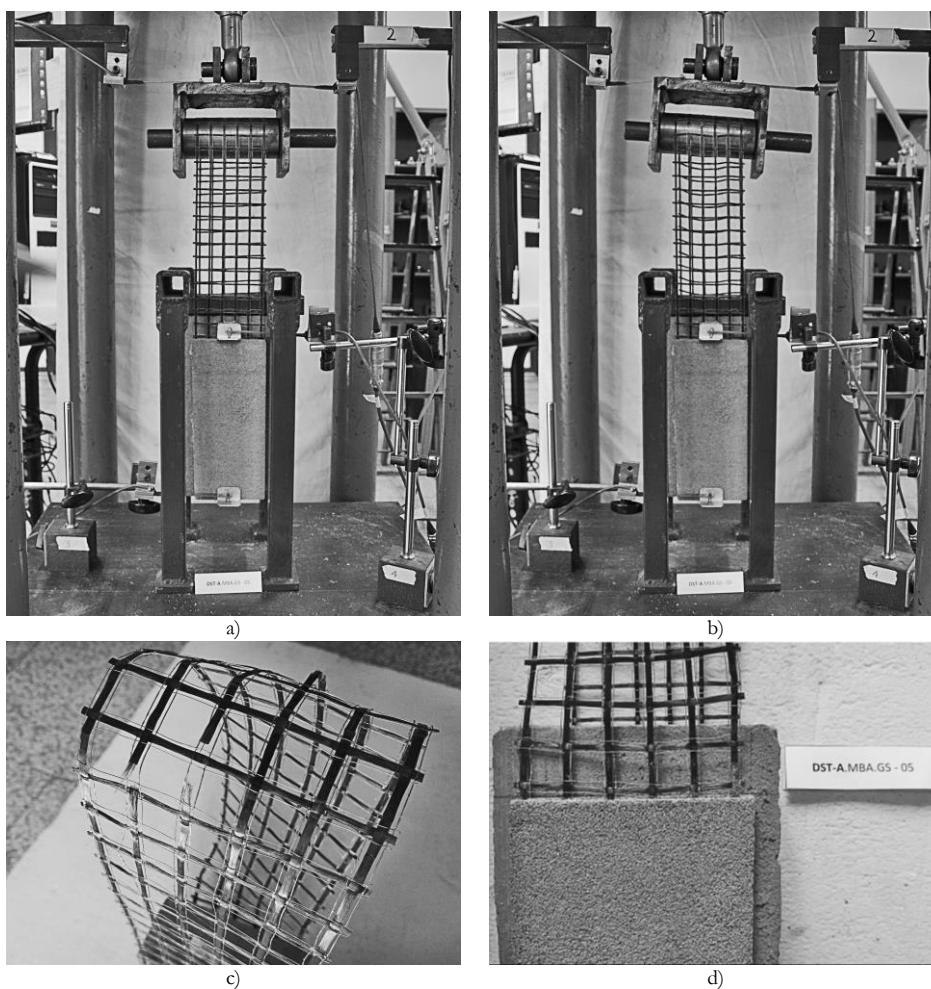


Fig. 5.42. Provino DST-A.MBA.GS-05a: a) inizio della prova; b) termine della prova; c) particolare crisi a trazione di alcuni multi-filamenti; d) scorrimento differenziale dei multi-filamenti longitudinali

Gli scorrimenti differenziali e la crisi non simultanea dei multi-filamenti longitudinali suggerisce una distribuzione non uniforme del carico sulla rete di fibra durante i test a causa della stocasticità che caratterizza la distribuzione delle proprietà di adesione nei compositi FRCM (D'Antino et al. 2014, Carloni et al. 2015, Sabau et al. 2017).

Il composito ha dimostrato un'ottima capacità di adesione con il supporto in laterizio.

Tab. 5.23. Risultati prove Double-Shear Test-tipo A condotte su provini costituiti da composito con matrice di malta bastarda

provino	F_{max}^{II} [N]	f_r^{II} [MPa]	δ_{max}^{II} [mm]	g_{max}^{II} [mm]	ε_{rg}^{II}	ε_r^{II}	K_r^{II} [MPa]	μ_c	μ_{cd}	f_r^{II}/f_r	f_r^{II}/f_r	crisi
DST-A.MBA.GS-01a	1530	469	3.66	0.56	0.003	0.008	3529	1.23	-	0.54	-	E
DST-A.MBA.GS-02a	1749	536	4.77	1.31	0.006	0.009	1888	1.39	-	0.62	-	E
DST-A.MBA.GS-03a	1478	453	3.51	0.85	0.004	0.007	3183	1.95	-	0.52	-	E
DST-A.MBA.GS-04a	1600	490	4.37	1.29	0.006	0.008	1665	1.40	-	0.57	-	E
DST-A.MBA.GS-05a	1379	423	3.95	0.63	0.003	0.007	4736	2.24	-	0.49	-	E
DST-A.MBA.GS-06a	1519	465	3.78	0.88	0.004	0.008	2510	1.56	-	0.54	-	E
media	1542	473	4.01	0.92	0.004	0.008	2918	1.63	-	0.55	-	
Dev.St.	124	38	0.48	0.32	0.001	0.001	1144	0.39	-	0.04	-	
Co.V.	8%	8%	12%	35%	34%	8%	39%	24%	-	8%	-	

F_{max}^{II} =carico massimo; f_r^{II} =tensione massima nella rete di fibra; δ_{max}^{II} =spostamento massimo valutato mediante i trasduttori 1 e 2 (Fig. 5.21); g_{max}^{II} =scorrimento globale massimo (Eq. 5.10); ε_{rg}^{II} =deformazione massima (Eq. 5.12); ε_r^{II} =deformazione massima (Eq. 5.13); K_r^{II} =rigidezza del provino integro (Eq. 5.2); μ_c =duttilità cinematica (Eq. 5.4); μ_{cd} =duttilità cinematica disponibile (Eq. 5.4); f_r^{II}/f_r =sfruttamento delle proprietà a trazione della rete di fibra; f_r^{II}/f_r =sfruttamento delle proprietà a trazione del composito; f_r =resistenza a trazione della rete di fibra (§ 4.4); f_c =resistenza a trazione del composito (§ 4.5); *crisi*=modalità di crisi: E crisi per rottura a trazione della rete di fibra esterna alla matrice (Fig. 5.2)

I risultati hanno si sono caratterizzati per coefficienti di variazione limitati, ad eccezione degli scorrimenti g_{max}^{II} , della deformazione ε_{rg}^{II} , della rigidezza K_r^{II} e della duttilità cinematica μ_c .

Il coefficiente di sfruttamento delle proprietà a trazione della rete di fibra si è attestato su un valore pari a 0.55 a causa della crisi prematura della rete di fibra libera.

Dato l'apparato di prova, la tensione massima sollecitante la fibra in testa al cilindro ($\sigma_f=2F_{max}^{II}/A_f$) è risultata pari a 945 MPa, ovvero ad una tensione prossima alla resistenza a trazione della rete stessa (§ 4.4), la quale ha indotto la crisi prematura sopra descritta. Da ciò è derivata una tensione nel singolo composito pari a circa la metà della resistenza della rete di fibra.

Malta bastarda + Kerakoll GeoSteel® Grid 200 - Rete di fibra libera impregnata con resina epossidica

Il provino DST-A.MBA.GS-01b ha mostrato una crisi improvvisa per livelli di carico particolarmente bassi. La crisi si è localizzata alla prima interfaccia, ovvero uno dei placcaggi di rinforzo si è distaccato in modo improvviso dal laterizio di supporto (modalità di crisi B). Tale modalità di crisi è dovuta ad una impropria realizzazione del placcaggio stesso, per cui i relativi risultati sperimentali non sono stati riportati.

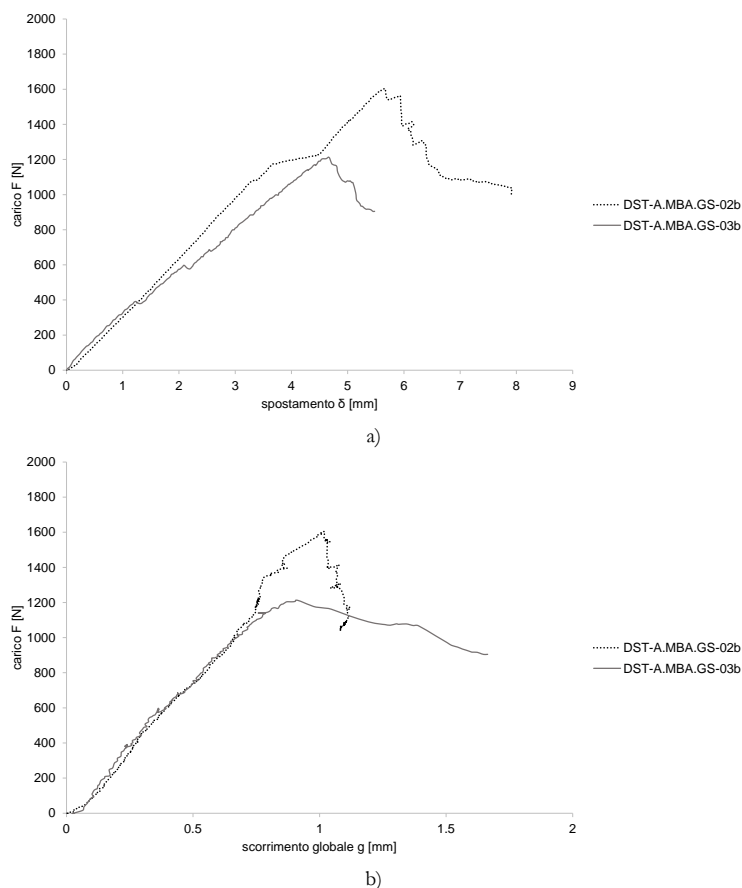


Fig. 5.43. Curve a) carico-spostamento (F - δ) e b) carico-scorrimento globale (F - g) relative ai sei provini costituiti da matrice di malta bastarda con rete di fibra libera impregnata con resina epossidica

Dai trasduttori di spostamento per ogni provino sono stati costruiti i grafici carico-spostamento (Fig. 5.43a) ed i grafici carico-scorrimento globale (Fig. 5.43b). Su di essi è stato possibile individuare quattro fasi, contraddistinte da quattro punti caratterizzanti il percorso di equilibrio. Ciò ha permesso di costruire un diagramma medio carico-scorrimento globale in cui i quattro tratti del grafico sono stati linearizzati per una lettura più agevole (Fig. 5.44 e Tab. 5.24).

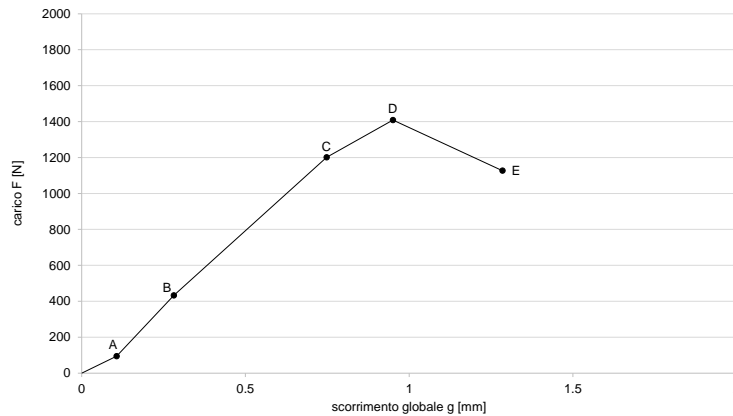


Fig. 5.44. Curva media carico-scorrimento globale (F-g) relativa ai sei provini costituiti da matrice di malta bastarda con rete di fibra libera impregnata con resina epossidica

Tab. 5.24 Punti caratterizzanti il percorso di equilibrio

punti	F [N]	g [mm]
A	94	0.11
B	432	0.28
C (debonding)	1201	0.75
D (massimo)	1409	1.48
E	1127	1.29

- Fase I: fase di assestamento del provino fino al raggiungimento di un primo stadio (F_a ; g_a).
- Fase II: fase lineare elastica. In tale fase il provino risulta integro fino al raggiungimento dello stadio indicato con la lettera B (F_b ; g_b).
- Fase III: fase intermedia. In tale fase si assiste alla formazione di una lesione interlaminare all'estremo caricato del composito che comporta una leggera perdita di rigidità.
- Fase IV: fase di propagazione del fenomeno di debonding. La perdita di adesione fibra-matrice alla seconda interfaccia comporta un cambio di pendenza della curva (F_c ; g_c); la fibra scorre nella matrice con conseguente propagazione della delaminazione su uno dei due placcaggi di composito. L'incremento di carico è attribuibile all'effetto ingranamento tra fibra e matrice e al comportamento telescopico, fino al raggiungimento del carico massimo (F_d ; g_d).

Gli scorrimenti maggiori hanno riguardato sempre uno dei multi-filamenti laterali.

I provini DST-A.MBA.GS-02b e 03b hanno mostrato una crisi per scorrimento fibra-matrice, preceduta dalla propagazione della lesione interlaminare fino ad un massimo rispettivamente di 150 mm e 180 mm (Fig. 5.45b). Successivamente è stata registrata una quinta fase decrescente. La crisi, come la delaminazione, ha interessato uno dei due placcaggi di rinforzo, dimostrando una asimmetria nel comportamento del provino.

Il composito ha dimostrato buone capacità di adesione al supporto in laterizio.

Gli spostamenti $\delta_{II,3}^H$ e $\delta_{II,5}^H$, rispettivamente dell'estremo libero del composito e del mattone, sono risultati minimi e pressoché identici. Non sono state registrate rotazioni nel piano dei provini, avendo ottenuto dai trasduttori 1 e 2 dati di spostamento pressoché identici.

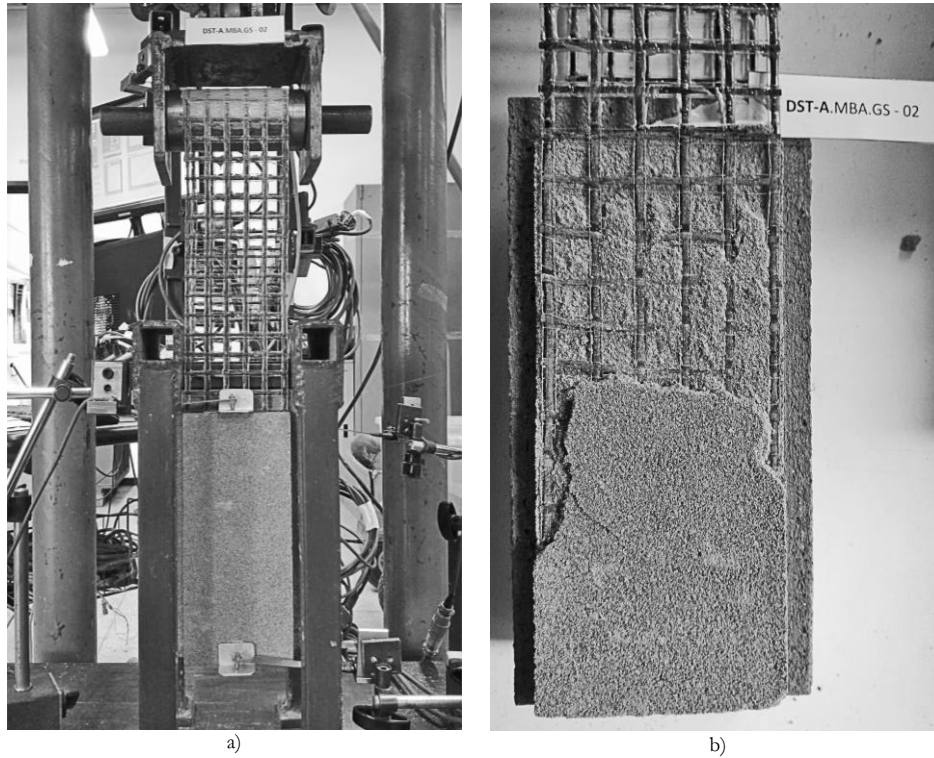


Fig. 5.45. Provino DST-A.MBA.GS-02b: a) inizio della prova; b) crisi per scorrimento fibra-matrice

Tab. 5.25. Risultati prove Double-Shear Test-tipo A condotte su provini costituiti da composito con matrice di malta bastarda con rete di fibra libera impregnata con resina epossidica

provino	F_{max}^{II} [N]	F_{db}^{II} [N]	f_r^{II} [MPa]	δ_{max}^{II} [mm]	g_{max}^{II} [mm]	g_{db}^{II} [mm]	ϵ_{rg}^{II}	ϵ_r^{II}	K^I [MPa]	K^II [MPa]	μ_c	μ_{cd}	f_r^I/f_r	f_r^{II}/f_r	crisi
DST-A.MBA.GS-02b	1604	1344	491	5.65	0.99	0.78	0.004	0.008	1866	1490	1.08	1.08	0.57	-	D
DST-A.MBA.GS-03b	1214	1059	372	4.66	0.91	0.71	0.009	0.006	2013	1751	1.39	1.65	0.43	-	D
media	1409	1201	432	5.16	0.95	0.75	0.007	0.007	1939	1621	1.23	1.37	0.50	-	
Dev.St.	276	202	85	0.71	0.06	0.05	0.003	0.001	103	185	0.22	0.41	0.10	-	
Co.V.	20%	17%	20%	14%	6%	6%	50%	20%	5%	11%	18%	30%	20%	-	

F_{max}^{II} =carico massimo; F_{db}^{II} =carico di debonding; f_r^{II} =tensione massima nella rete di fibra; δ_{max}^{II} =spostamento massimo valutato mediante i trasduttori 1 e 2 (Fig. 5.21); g_{max}^{II} =scorrimento globale massimo (Eq. 5.10); g_{db}^{II} =scorrimento globale di debonding; ϵ_{rg}^{II} =deformazione massima (Eq. 5.12); ϵ_r^{II} =deformazione massima (Eq. 5.13); K^I =rigidezza del provino integro (Eq. 5.2); K^II =rigidezza del provino lesionato (Eq. 5.3); μ_c =duttilità cinematica (Eq. 5.4); μ_{cd} =duttilità cinematica disponibile (Eq. 5.4); f_r^I/f_r =sfruttamento delle proprietà a trazione della rete di fibra; f_r^{II}/f_r =sfruttamento delle proprietà a trazione del composito; f_r =resistenza a trazione della rete di fibra (§ 4.4); f_c =resistenza a trazione del composito (§ 4.5); *crisi*=modalità di crisi: D crisi per scorrimento fibra-matrice (Fig. 5.2)

La quasi totalità ha esibito dei coefficienti di variazione elevati.

Dai risultati medi è emersa una minima perdita di rigidezza tra la seconda e la terza fase da cui deriva una duttilità cinematica μ_c pari a 1.23. È stata riscontrata la presenza di una quinta fase decrescente che ha permesso la valutazione di una duttilità cinematica disponibile media μ_{cd} di 1.37.

Data la tensione massima raggiunta f_r^{II} , tale composito ha mostrato una capacità di sfruttamento delle proprietà a trazione della rete di fibra minima e pari a 0.50. La contemporanea presenza di Co.V. elevati e coefficienti di sfruttamento bassi ha suggerito la presenza di proprietà meccaniche e di adesione del composito limitate (Lignola et al. 2017).

Nonostante la presenza della resina epossidica, lo spostamento totale δ_{max}^{II} , includendo anche l'elongazione della parte di rete di fibra libera, è risultato sempre maggiore dello scorrimento g_{max}^{II} .

5.3.2. Osservazioni

Dal confronto dei risultati ottenuti dai 24 provini con rete di fibra libera non impregnata con resina epossidica si è potuto dedurre che, nel caso di composito caratterizzato da proprietà resistenti e di adesione migliori, la crisi della fibra libera ha determinato valori di tensione e di scorrimento inferiori a quelli degli altri compositi, con conseguenti indici di sfruttamento minori. Tale crisi si è manifestata prematuramente, ovvero prima dell'attingimento del carico massimo di adesione (carico di debonding). Non è stato, quindi, possibile raggiungere il pieno sfruttamento delle proprietà di adesione dei compositi testati. Pertanto l'impiego di tale apparato di prova non si è dimostrato idoneo alle tipologie di composito impiegate in questa sede.

Per ovviare al problema, sono stati realizzati 12 ulteriori provini, tre per ogni tipologia di composito, nei quali la porzione di rete di fibra libera è stata impregnata con della resina epossidica. Ciò ha permesso di sfruttare maggiormente le proprietà di adesione dei compositi ed evitare la crisi prematura della rete di fibra libera. I risultati ottenuti in termini di carico e di spostamento sono risultati maggiori (ad eccezione dei compositi con matrice di malta bastarda per i quali si sono ottenuti risultati simili a quelli derivati dai provini privi di resina epossidica), nonostante solo nel caso di composito con matrice di malta di calce idraulica Kerakoll si siano raggiunti dei coefficienti di sfruttamento delle proprietà della fibra superiori all'unità, con conseguente crisi per rottura a trazione di alcuni multi-filamenti internamente alla matrice in prossimità dell'estremo caricato del composito, ovvero nella porzione di composito in cui, data la perdita di adesione fibra-matrice, il trasferimento del carico risultava affidato interamente al materiale fibroso. Le tre tipologie di composito costituite da matrici a base di malte realizzate in laboratorio hanno esibito prevalentemente una crisi per scorrimento con valori del coefficiente di sfruttamento prossimi, ma inferiori, all'unità.

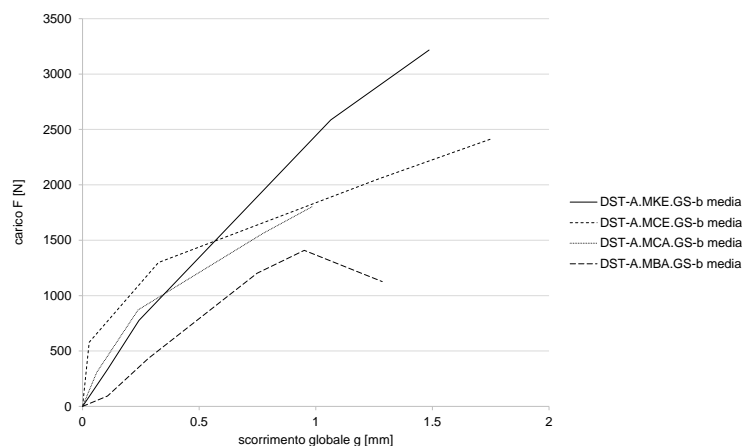


Fig. 5.46. Curve medie carico-scorrimento globale (F-g) relative alle quattro tipologie di composito

Tab. 5.26. Risultati medi Double-Shear Test-tipo A con fibra libera impregnata con resina epossidica

provino	F_{max}^{II} [N]	F_{db}^{II} [N]	f_r^{II} [MPa]	δ_{max}^{II} [mm]	g_{max}^{II} [mm]	g_{db}^{II} [mm]	ε_{rg}^{II}	ε_r^{II}	K^{II} [MPa]	K_{db}^{II} [MPa]	μ_c	μ_{cd}	f_t^I/f_r	f_t^II/f_r	crisi
MKE	3217	2586	986	7.58	1.49	1.06	0.007	0.016	3797	2201	1.74	-	1.14	1.25	F
MCE	2419	2053	741	7.46	1.76	1.27	0.008	0.012	2950	1335	2.61	4.74	0.86	1.19	D
MCA	1804	1477	553	2.80	0.99	0.77	0.005	0.009	3471	2190	2.07	1.45	0.61	0.92	D+C
MBA	1409	1201	432	5.16	0.95	0.75	0.007	0.007	1939	1621	1.23	1.37	0.50	-	D

F_{max}^{II} =carico massimo; F_{db}^{II} =carico di debonding; f_r^{II} =tensione massima nella rete di fibra; δ_{max}^{II} =spostamento massimo valutato mediante i trasduttori 1 e 2 (Fig. 5.21); g_{max}^{II} =scorrimento globale massimo (Eq. 5.10); g_{db}^{II} =scorrimento globale di debonding; ε_{rg}^{II} =deformazione massima (Eq. 5.12); ε_r^{II} =deformazione massima (Eq. 5.13); K^{II} =rigidezza del provino integro (Eq. 5.2); K_{db}^{II} =rigidezza del provino lesionato (Eq. 5.3); μ_c =duttilità cinematica (Eq. 5.4); μ_{cd} =duttilità cinematica disponibile (Eq. 5.4); f_t^I/f_r =sfruttamento delle proprietà a trazione della rete di fibra; f_t^II/f_r =sfruttamento delle proprietà a trazione del composito; f_r =resistenza a trazione della rete di fibra (§ 4.4); f_c =resistenza a trazione del composito (§ 4.5); *crisi*=modalità di crisi: F crisi per rottura a trazione della rete di fibra interna alla matrice, D crisi per scorrimento fibra-matrice, C delaminazione all'interfaccia fibra-matrice (Fig. 5.2)

La deformazione valutata mediante lo scorrimento globale ε_{rg}^{II} è risultata minore rispetto a quella valutata mediante l'applicazione dell'equazione 5.13. Tale risultato è stato osservato in Sabau et al. (2017) e Carloni et al. (2015) ed attribuito alla non uniforme distribuzione del carico sia tra i multi-filamenti longitudinali sia all'interno del singolo multi-filamento, la quale dipende a sua volta da una distribuzione stocastica delle proprietà di adesione fibra-matrice e da un incompleto impregnamento della sezione del multi-filamento da parte della matrice (D'Antino et al. 2014, Carloni et al. 2015).

Nonostante la simmetria geometrica dell'apparato di prova, in tutti i test condotti si è manifestato un comportamento differente tra i due placcaggi di rinforzo. Come ribadito in letteratura (De Santis et al. 2017), nonostante l'accuratezza nella realizzazione dei provini e nell'esecuzione della prova e nonostante la simmetria della configurazione della prova stessa, questa risulta affetta da inevitabili fattori di asimmetria. Inoltre, gli autori hanno osservato che il diverso grado di impregnazione dei multi-filamenti determina una distribuzione stocastica delle proprietà di adesione, che a sua volta comporta la possibilità di ottenere un comportamento di adesione differente tra i due placcaggi di rinforzo. L'influenza di tali fattori tende ad aumentare durante l'esecuzione dei test, inducendo l'insorgere di tensioni normali all'interfaccia fibra-matrice. Queste possono determinare una delaminazione prematura e l'espulsione di porzioni del layer esterno di matrice, come è stato osservato in alcuni casi per le matrici costituite da malte di laboratorio caratterizzate da proprietà meccaniche inferiori rispetto alla malta di calce Kerakoll. Data la natura stocastica delle proprietà di adesione dei compositi FRCM, l'incremento del numero delle superfici di adesione può influire sui risultati della prova. Infatti, è stato dimostrato in letteratura (Sneed et al. 2014, De Santis et al. 2017) come ciò comporti l'ottenimento di risultati in termini di carico inferiori rispetto ad apparati di prova più semplici come il Single Shear Test (§ 5.2). La perdita di adesione, infatti, si registrerà nel placcaggio di rinforzo caratterizzato da proprietà di adesione inferiori.

I test condotti non hanno mostrato l'insorgere di rotazioni nel piano dei provini prima del carico di debonding, raggiunto il quale i singoli multi-filamenti longitudinali hanno manifestato scorrimenti differenti a causa della distribuzione stocastica delle proprietà di adesione. Ciò ha comportato la rotazione del cilindro metallico con cui è stato applicato il carico e, quindi, la registrazione di valori di spostamento δ_1 e δ_2 differenti.

5.4. Double-Shear Test-tipo B

Per ogni tipologia di rinforzo sono stati testati 6 provini, per un totale di 24 Double-Shear Test di tipo B.

Preparazione dei provini

Per ogni provino è stato utilizzato un supporto in laterizio costituito da due mattoni in pasta molle di dimensioni 250x120x55 mm³ collegati da due strisce simmetriche di composito di dimensioni 530x95x10 mm³ applicate sulle facce maggiori. Ne risultano quattro superfici di adesione. I due elementi di supporto sono stati distanziati di 30 mm, in modo da ottenere per ogni striscia di rinforzo una zona centrale libera, ovvero non ancorata al supporto.

Su entrambe le superfici piane di ogni mattone sono stati tracciati i bordi dei placcaggi da realizzare. I mattoni sono stati, quindi, allineati e distanziati di 30 mm mediante l'interposizione di elementi lignei. Dopo aver posizionato e bloccato la cassaforma lignea (Fig. 5.47a), i due laterizi sono stati debitamente inumiditi ed è stato applicato un primo strato di matrice pari a 5 mm di spessore (Fig. 5.47b). Quindi, si è proceduto con l'applicazione della rete di fibra, pressandola delicatamente nel primo strato di matrice in modo da assicurarne un appropriato impregnamento (Fig. 5.47c), e del secondo ed esterno strato di matrice, raggiungendo uno spessore finale di circa 10 mm (Fig. 5.47d). Il provino è stato lasciato riposare per tre giorni, decorsi i quali è stato ruotato per procedere al rinforzo del secondo lato, seguendo la medesima procedura. Successivamente il provino è stato lasciato maturare per 28 giorni.

Per il dimensionamento dello spessore degli strati delle matrici sono state seguite le indicazioni riportate nella scheda tecnica della malta GeoCalce® Fino della Kerakoll.

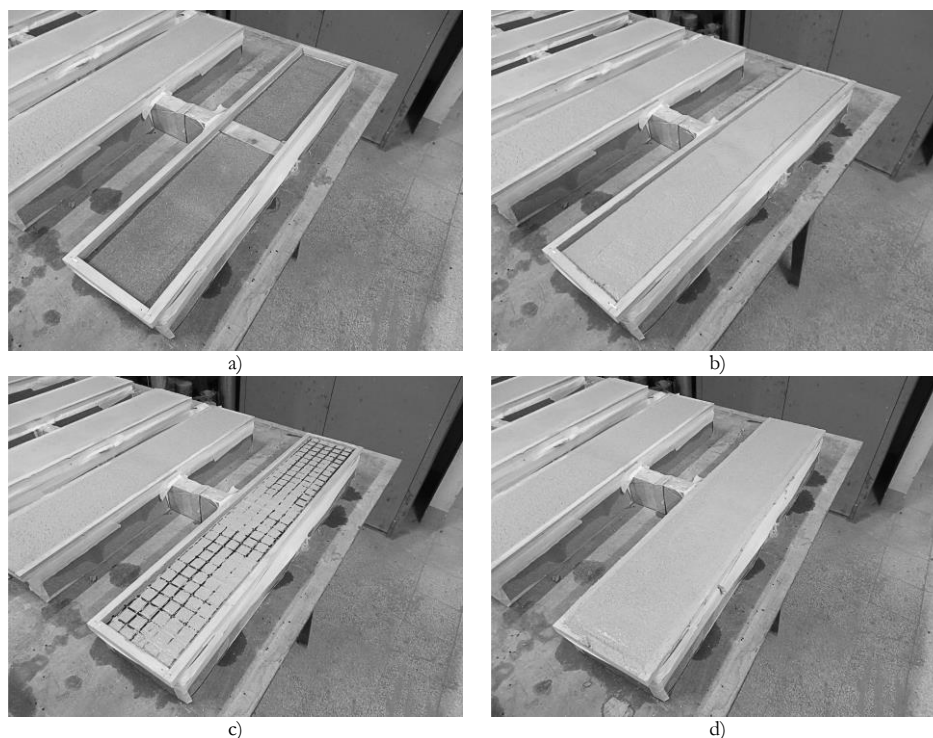


Fig. 5.47. Fasi di preparazione del primo composto dei provini DST-B

Apparato di prova

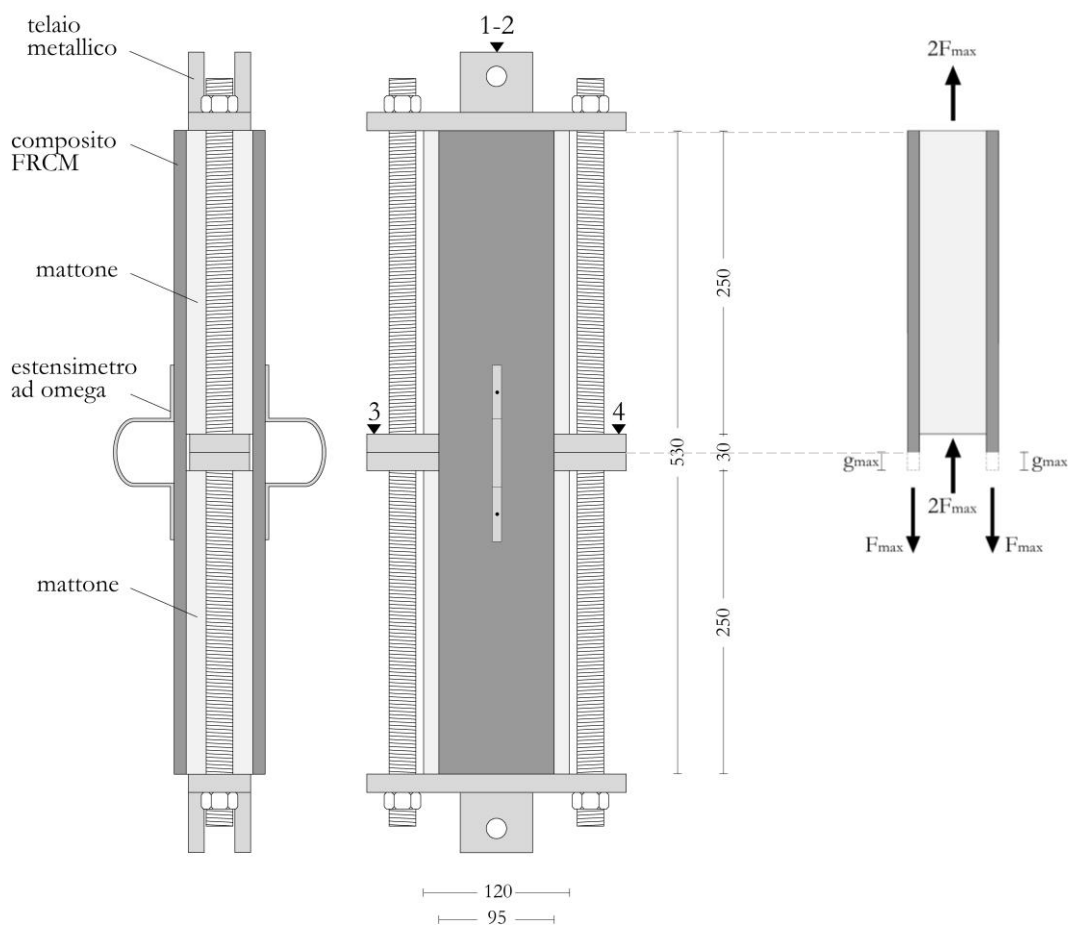
I test sono stati condotti in regime di controllo di spostamento ad una velocità di 0.5 mm/min, utilizzando una cella di carico da 50 KN del tipo TCLP-5B, Tokyo Sokki Kenkyujo Co. Ltd. Il carico verticale è stato applicato in modo monotonicamente, tramite un martinetto a vite azionato da un volano a mano. La lettura dello spostamento è stata ricavata attraverso 4 trasduttori di spostamento del tipo CE a mensola e due estensimetri clip-on del tipo ad omega con un range di misura di 100 mm, disposti come illustrato in figura 5.48. L'acquisizione dei dati è avvenuta per mezzo della centralina elettronica della National Instruments.

Test

Lasciato decorrere il tempo di maturazione dei provini, sono state eseguite le prove di adesione con l'apparato di prova mostrato in figura 5.48. Il provino è stato posizionato all'interno di due telai costituiti da due piastre di acciaio dello spessore di 15 mm collegate tra loro per mezzo di due barre filettate ($\varnothing 20$ mm) regolabili in altezza. Tramite due cerniere metalliche l'apparato è stato collegato inferiormente e superiormente alla macchina di prova. Questa, applicando una trazione monoassiale ai telai, ha sottoposto a trazione le strisce di composito e a compressione i mattoni.

La lettura dello spostamento è stata ricavata per mezzo di 4 trasduttori e due estensimetri ad omega. In particolare, i due trasduttori contrassegnati con i numeri 1 e 2 (Fig. 5.48) sono stati posizionati centralmente al di sopra del telaio superiore, in modo da ottenere delle letture di spostamento totale, mentre i trasduttori contrassegnati con i numeri 3 e 4 sono stati posizionati all'estremità destra e sinistra del traverso inferiore del telaio superiore. Gli estensimetri ad omega sono stati posizionati centralmente sulle superfici esterne

delle due strisce di rinforzo, in modo da restituire letture di deformazione localizzate dove era attesa la formazione della lesione principale.



- 1-2 = trasduttori di spostamento 1 e 2
- 3 = trasduttore di spostamento 3
- 4 = trasduttore di spostamento 4

Fig. 5.48. Schematizzazione prova DST-B (dimensioni in millimetri)

Provini e nomenclatura

- 6 provini rinforzati con GeoCalce® Fino + GeoSteel® Grid 200.....DST-B.MKE.GS-xx
- 6 provini rinforzati con malta di cemento + GeoSteel® Grid 200.....DST-B.MCE.GS-xx
- 6 provini rinforzati con malta di calce idraulica + GeoSteel® Grid 200.....DST-B.MCA.GS-xx
- 6 provini rinforzati con malta bastarda + GeoSteel® Grid 200.....DST-B.MBA.GS-xx

5.4.1. Risultati

Data la configurazione dell'apparato di prova, la singola striscia di composito è risultata sottoposta ad una forza di trazione F pari alla metà del carico applicato dalla macchina di prova, e gli spostamenti relativi al rinforzo applicato sul singolo mattone sono risultati pari alla metà degli spostamenti registrati dai dispositivi di misurazione, secondo lo schema riportato in figura 5.48.

L'elongazione misurata dall'estensimetro omega, in quanto rappresentativa dello scorrimento fibra-matrice all'estremo caricato del composito, è stata nel seguito indicata g .

Attraverso i risultati in termini di carico massimo F_{max}^{III} e corrispondente elongazione g_{max}^{III} registrata dall'estensimetro ad omega, per ogni provino sono stati ricavati la tensione massima f_r^{III} , e la deformazione ε_{rg}^{III} :

$$f_r^{III} = \frac{F_{max}^{III}}{A_f} \quad (5.14)$$

$$\varepsilon_{rg}^{III} = \frac{g_{max}^{III}}{l_e} \quad (5.15)$$

In aggiunta è stata valutata la deformazione ε_r^{III} , con la seguente relazione:

$$\varepsilon_r^{III} = \frac{F_{max}^{III}}{E_f A_f} \quad (5.16)$$

Oltre ciò sono stati valutati i coefficienti di sfruttamento delle proprietà a trazione della rete di fibra (f_r^{III}/f_f) e del composito (f_r^{III}/f_r). Duttilità cinematica μ_c , duttilità cinematica disponibile μ_{cd} e rigidezza del provino integro K_r^{III} e lesionato K_r^{III} sono state ricavate secondo quanto descritto al paragrafo § 5.1, considerando il punto di collasso corrispondente al 90% del carico massimo.

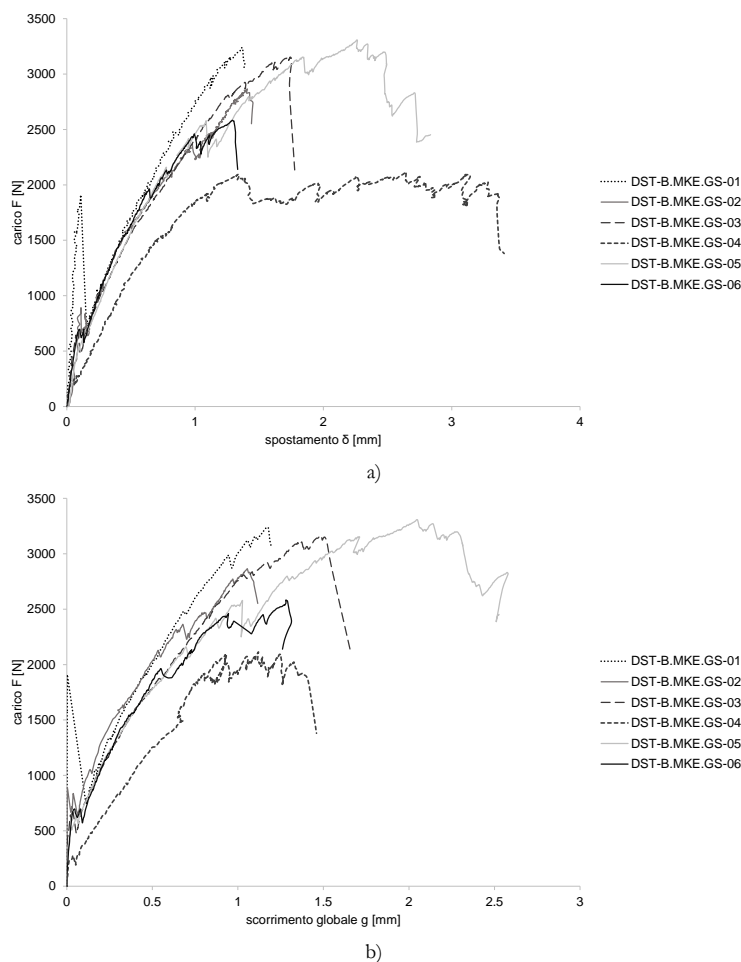


Fig. 5.49. Curve a) carico-spostamento ($F-\delta$) e b) carico-scorrimento globale ($F-g$) relative ai sei provini costituiti da matrice di malta di calce idraulica Kerakoll

Dai trasduttori di spostamento per ogni provino sono stati costruiti i grafici carico-spostamento (Fig. 5.49a) ed i grafici carico-scorrimento globale (Fig. 5.49b). Su ogni grafico è stato possibile individuare quattro fasi, di cui le prime separate da una perdita di carico, contraddistinte da cinque punti significativi che caratterizzano il comportamento del rinforzo. Ciò ha permesso di costruire un diagramma medio carico-scorrimento globale in grado di facilitare la descrizione del comportamento abbinato a questa tipologia di composito. I tratti del grafico medio sono stati linearizzati per una lettura più agevole (Fig. 5.50 e Tab. 5.27).

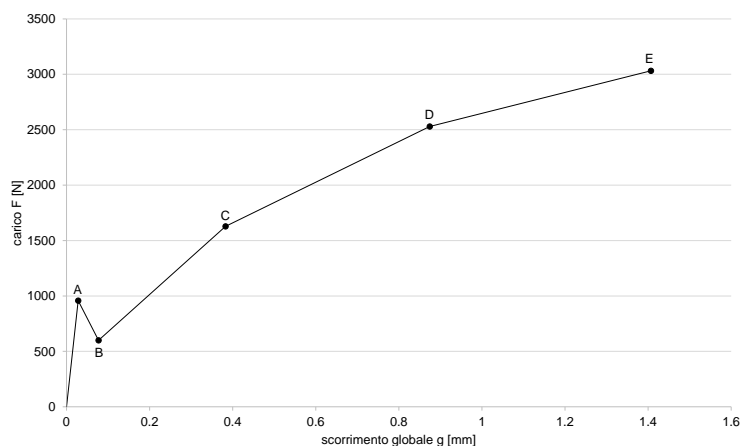


Fig. 5.50. Curva media carico-scorrimento globale (F-g) relativa ai sei provini costituiti da matrice di malta di calce idraulica Kerakoll

Tab. 5.27. Punti caratterizzanti il percorso di equilibrio

punti	F [N]	g [mm]
A	958	0.028
B	600	0.077
C	1628	0.383
D (debonding)	2529	0.874
E (massimo)	3031	1.407

- Fase I: fase lineare elastica. Tale fase si conclude con la formazione della prima lesione trasversale nella matrice (F_a ; g_a) localizzata nella zona centrale del provino (Fig. 5.51b) in prossimità del bordo di uno dei due laterizi. Il fenomeno causa una perdita di carico (F_b ; g_b).
- Fase II: fase di formazione delle lesioni. La pendenza della curva diminuisce progressivamente, evidenziando una perdita di rigidità del composito a causa della formazione di ulteriori lesioni trasversali, localizzate nella zona centrale del composito, ovvero nella zona non adesiva al supporto.
- Fase III: fase intermedia. Il principio della terza fase (F_c ; g_c) è determinato dalla formazione di una lesione interlaminare alla seconda interfaccia, che a partire da una delle lesioni trasversali, si propaga verso uno degli estremi liberi del composito. Tale fase è caratterizzata dalla formazione di nuove lesioni sia trasversali che longitudinali e dalla progressiva crescita in ampiezza di quelle formatesi precedentemente.
- Fase IV: fase di propagazione del fenomeno di debonding. Un'ulteriore perdita di rigidità segna il principio della quarta fase in cui si assiste alla crescita di dimensioni delle lesioni presenti ed allo scorrimento fibra-matrice. Nonostante ciò, si registra un incremento di carico dato dall'ingranamento che si genera tra la fibra e la matrice e dal comportamento telescopico, fino all'attingimento del carico massimo (F_e ; g_e).

Nella maggioranza dei test eseguiti è stata raggiunta una crisi per scorrimento fibra-matrice, accompagnata in alcuni casi dalla rottura di alcuni filamenti esterni dei multi-filamenti di rete di fibra.

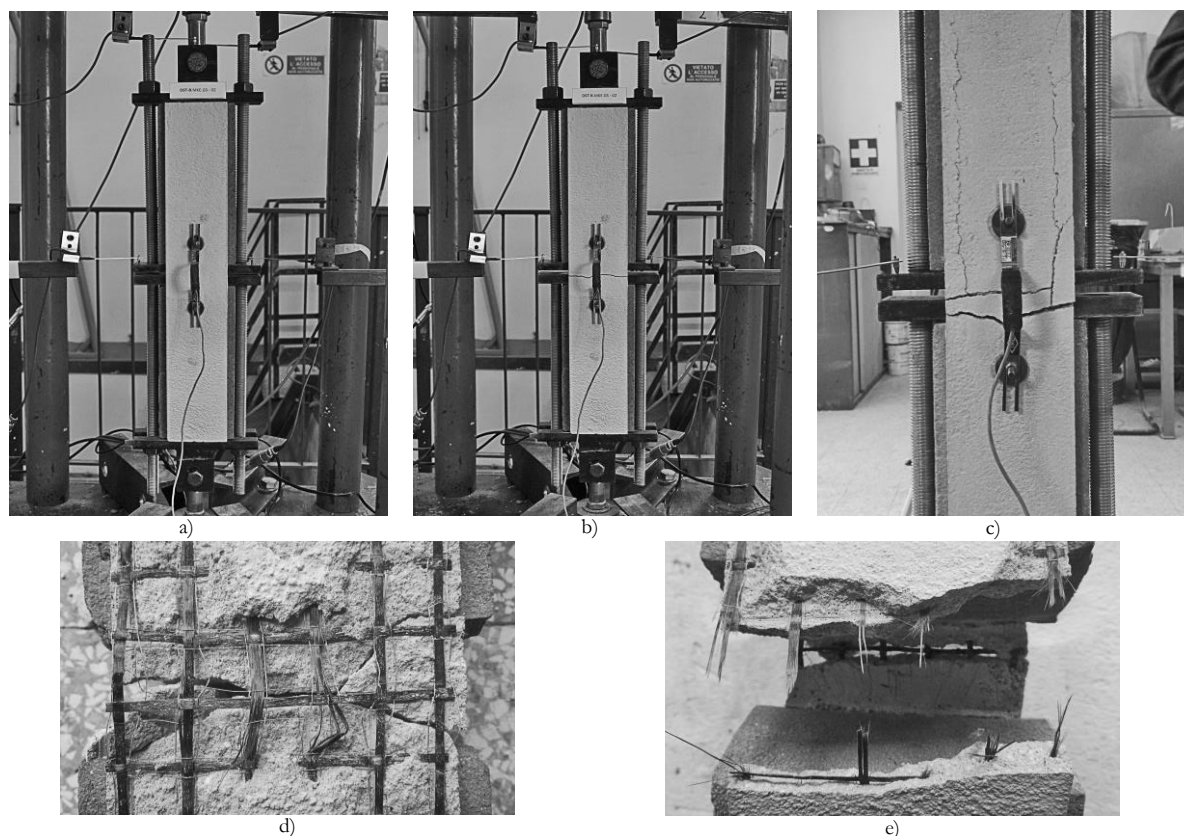


Fig. 5.51. Prova DST-B: a) inizio prova, b) formazione prima lesione trasversale e c) pattern fessurativo a termine prova del provino DST-B.MKE.GS-02; d) crisi per scorrimento con rottura a trazione di alcuni filamenti di fibra del provino DST-B.MKE.GS-05; e) crisi a trazione dei multi-filamenti della rete di fibra del provino DST-B.MKE.GS-01

In tutti i test condotti durante la quarta fase si è assistito alla perdita di assialità del provino, causata dal diverso comportamento (evoluzione del quadro fessurativo e del fenomeno di debonding) dei due placcaggi di rinforzo, ad eccezione del provino DST-B.MKE.GS-01 il quale ha esibito un'improvvisa crisi a trazione dei multi-filamenti longitudinali in corrispondenza della lesione trasversale maggiore (Fig. 5.51e).

Nel caso del provino DST-B.MKE.GS-06 è stato possibile a prova ultimata rimuovere parte del layer esterno di matrice ed osservare la rete di fibra: nei multi-filamenti longitudinali lo scorrimento è risultato non uniforme a causa della distribuzione non uniforme del carico, mentre quelli trasversali hanno esibito una deformata parabolica analogamente a quanto osservato nelle precedenti prove di adesione. Tale deformata oltre ad essere conseguenza del maggiore scorrimento dei multi-filamenti longitudinali laterali, deriva dall'effetto combinato di un minor apporto in resistenza allo scorrimento da parte della matrice in prossimità dei bordi del composito e dell'iniziale efficacia dei nodi di rete.

In generale, è stato appurato che i provini, per i quali l'allineamento verticale è stato mantenuto fino alla quarta fase (DST-B.MKE.GS-01, 03 e 05), hanno raggiunto valori del coefficiente di sfruttamento delle proprietà resistenti della fibra maggiori di uno, ovvero una tensione prossima a quella ottenuta dalle prove di trazione diretta su provini di rete di fibra (§ 4.4).

Il composito ha mostrato a test ultimati una perfetta adesione al supporto in laterizio.

Per quanto riguarda la delaminazione, oltre a non aver interessato entrambe i placcaggi in modo simmetrico, si è propagata per una lunghezza differente sui due mattoni raggiungendo un'estensione massima di circa 160 mm dalla mezzeria del provino.

In tabella 5.28 sono riportati i risultati per ogni provino testato e i risultati medi con i rispettivi valori della deviazione standard e del coefficiente di variazione. Dalle valutazioni è stato escluso il provino DST-B.MKE.GS-04 il quale, probabilmente a causa di difetti riconducibili alla sua realizzazione, ha mostrato un comportamento differente, con risultati in termini di carico inferiori ed una perdita di assialità durante la seconda fase. La crisi a trazione dei multi-filamenti longitudinali, quando presente, si è localizzata in corrispondenza della lesione trasversale maggiore.

Tab. 5.28. Risultati prove Double-Shear Test-tipo B condotte su provini costituiti da composito con matrice di malta di calce idraulica Kerakoll

provino	F_{max}^{III} [N]	F_{db}^{III} [N]	f_r^{III} [MPa]	δ_{max}^{III} [mm]	g_{max}^{III} [mm]	g_{db}^{III} [mm]	ϵ_{rg}^{III}	ϵ_r^{III}	K_i^{III} [MPa]	K_r^{III} [MPa]	μ_c	μ_{cd}	$f_{II_r}^{III}/f_r$	$f_{II_r}^{III}/f_r$	crisi
DST-B.MKE.GS-01	3236	2451	991	1.36	1.17	0.70	0.023	0.016	17387	2869	7.30	-	1.15	1.26	F
DST-B.MKE.GS-02	2865	2357	878	1.41	1.06	0.68	0.021	0.015	8013	3243	3.94	-	1.01	1.12	D
DST-B.MKE.GS-03	3164	2799	969	1.73	1.48	1.03	0.030	0.016	7434	2665	4.07	-	1.12	1.23	D+F
DST-B.MKE.GS-04	2115	1917	648	2.65	1.12	0.79	0.022	0.011	3503	2177	4.38	1.16	0.75	0.82	D+F
DST-B.MKE.GS-05	3308	2579	1014	2.26	2.05	1.03	0.041	0.017	4922	2693	3.36	1.09	1.17	1.29	D+F
DST-B.MKE.GS-06	2584	2460	791	1.29	1.28	0.94	0.026	0.013	7044	3091	3.51	-	0.92	1.01	D
media	3031	2529	929	1.61	1.41	0.87	0.028	0.015	8960	2912	4.44	1.09	1.07	1.18	
Dev.St.	302	170	92	0.40	0.39	0.18	0.008	0.002	4853	251	1.63	0	0.11	0.12	
Co.V.	10%	7%	10%	25%	28%	20%	28%	10%	54%	9%	37%	0%	10%	10%	

Note: in grigio sono riportati i risultati relativi ai provini esclusi dalla valutazione dei risultati medi
 F_{max}^{III} =carico massimo; F_{db}^{III} =carico di debonding; f_r^{III} =tensione massima nella rete di fibra; δ_{max}^{III} =spostamento massimo valutato come media delle misurazioni dei trasduttori 1 e 2 (Fig. 5.48); g_{max}^{III} =scorrimento globale massimo valutato come media delle misurazioni degli estensimetri ad omega (Fig. 5.48); g_{db}^{III} =scorrimento globale di debonding valutato come media delle misurazioni degli estensimetri ad omega (Fig. 5.48); ϵ_{rg}^{III} =deformazione massima (Eq. 5.15); ϵ_r^{III} =deformazione massima (Eq. 5.16); K_i^{III} =rigidezza del provino integro (Eq. 5.2); K_r^{III} =rigidezza del provino lesionato (Eq. 5.3); μ_c =duttilità cinematica (Eq. 5.4); μ_{cd} =duttilità cinematica disponibile (Eq. 5.4); $f_{II_r}^{III}/f_r$ =sfruttamento delle proprietà a trazione della rete di fibra; $f_{II_r}^{III}/f_r$ =sfruttamento delle proprietà a trazione del composito; f_r =resistenza a trazione della rete di fibra (§ 4.4); f_r =resistenza a trazione del composito (§ 4.5); *crisi*=modalità di crisi: F crisi per rottura a trazione della rete di fibra interna alla matrice, D crisi per scorrimento fibra-matrice (Fig. 5.2)

Bassi valori del coefficiente di variazione sono stati ottenuti per i risultati medi in termini di carico massimo e tensione massima. I coefficienti di sfruttamento delle proprietà della fibra e del composito medi sono risultati maggiori di 1.

La consistente perdita di rigidezza con la formazione della prima lesione trasversale ha determinato una duttilità cinematica μ_c elevata e pari a 4.439. Solo per il quinto provino, caratterizzato per un, seppur breve, ramo discendente dopo l'attingimento del carico massimo, è stato possibile valutare una duttilità cinematica disponibile μ_{cd} , essendosi. I restanti provini hanno esibito una crisi di tipo fragile di uno dei due placcaggi di rinforzo.

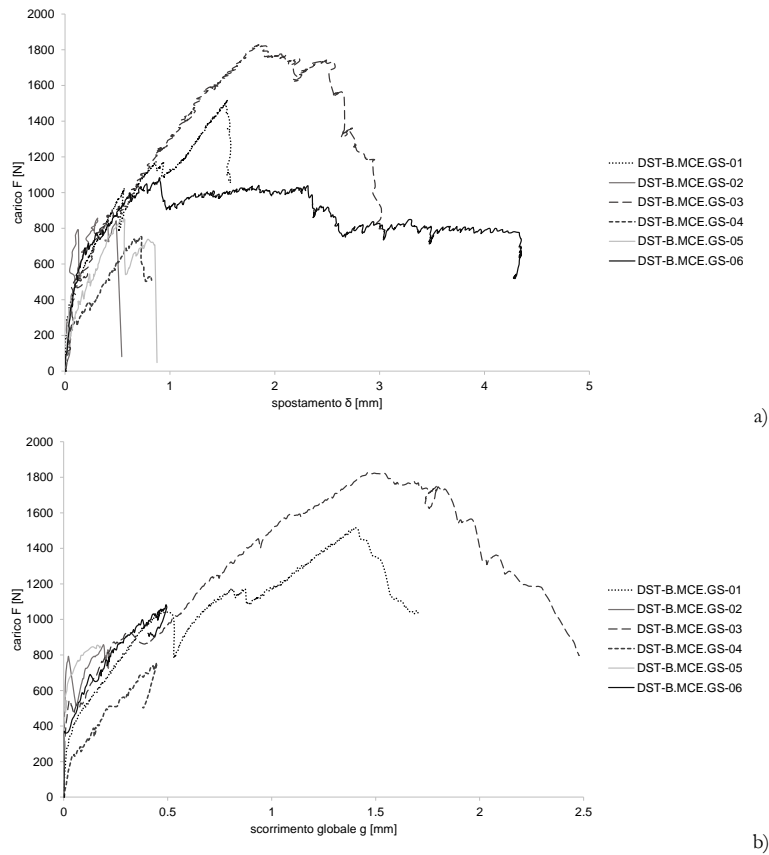


Fig. 5.52. Curve a) carico-spostamento (F- δ) e b) carico-scorrimento globale (F-g) relative ai sei provini costituiti da matrice di malta cementizia

Dai trasduttori di spostamento per ogni provino sono stati costruiti i grafici carico-spostamento (Fig. 5.52a) ed i grafici carico-scorrimento globale (Fig. 5.52b). Su ogni grafico è stato possibile individuare quattro fasi, di cui le prime separate da una perdita di carico, contraddistinte da cinque punti significativi che caratterizzano il comportamento del rinforzo. Ciò ha permesso la costruzione di un grafico medio carico-scorrimento globale. I tratti del grafico suddetto sono stati linearizzati per una lettura più agevole (Fig. 5.53 e Tab. 5.29).

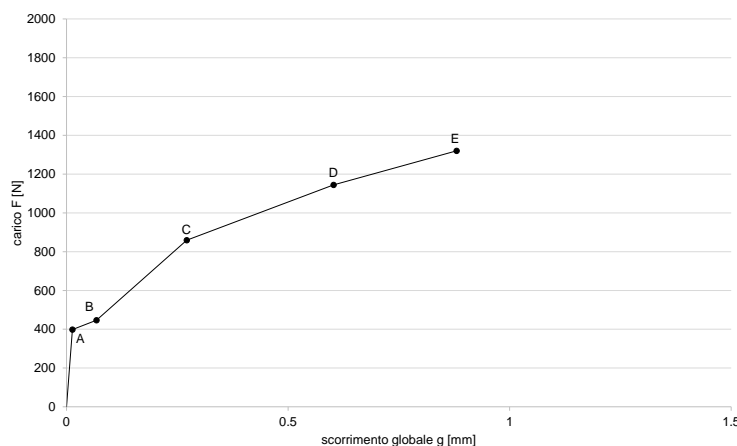


Fig. 5.53. Curva media carico-scorrimento globale (F-g) relativa ai sei provini costituiti da matrice di malta cementizia

Tab. 5.29. Punti caratterizzanti il percorso di equilibrio

punti	F [N]	g [mm]
A	398	0.013
B	446	0.068
C	859	0.271
D	1144	0.603
E (massimo)	1321	0.880

- Fase I: fase lineare elastica. Tale fase si conclude con la formazione della prima lesione trasversale nella matrice (F_a ; g_a) localizzata nella zona centrale del provino in prossimità del bordo di uno dei due laterizi. Non tutti i test hanno evidenziato una improvvisa perdita di carico in corrispondenza del raggiungimento di tale fenomeno (F_b ; g_b). Infatti, se per la matrice Kerakoll la formazione completa della prima lesione è avvenuta in modo fragile, per la malta cementizia il processo è stato spesso graduale.
- Fase II: fase di formazione delle lesioni. La pendenza della curva diminuisce progressivamente, evidenziando una perdita di rigidità del composito a causa della formazione di ulteriori lesioni trasversali, localizzate nella zona centrale del composito, ovvero nella zona non adesa al supporto (Fig. 5.54b).
- Fase III: fase intermedia. Il principio della terza fase (F_c ; g_c) è determinato dalla formazione di una lesione interlaminare alla seconda interfaccia, che a partire da una delle lesioni trasversali, si propaga verso uno degli estremi liberi del composito. Il fenomeno è individuato sul grafico da una perdita di carico. Tale fase è caratterizzata dalla formazione di nuove lesioni sia trasversali che longitudinali e dalla progressiva crescita in ampiezza di quelle formatesi precedentemente.
- Fase IV: fase di propagazione del fenomeno di debonding. Un'ulteriore perdita di rigidità segna il principio della quarta fase in cui si assiste alla crescita di dimensioni delle lesioni presenti ed allo scorrimento fibra-matrice. Nonostante ciò, si registra un incremento di carico dato

dall'ingranamento che si genera tra la fibra e la matrice e dal comportamento telescopico, fino all'attingimento del carico massimo (F_c ; g_c). Tale fase presenta una pendenza simile alla precedente.

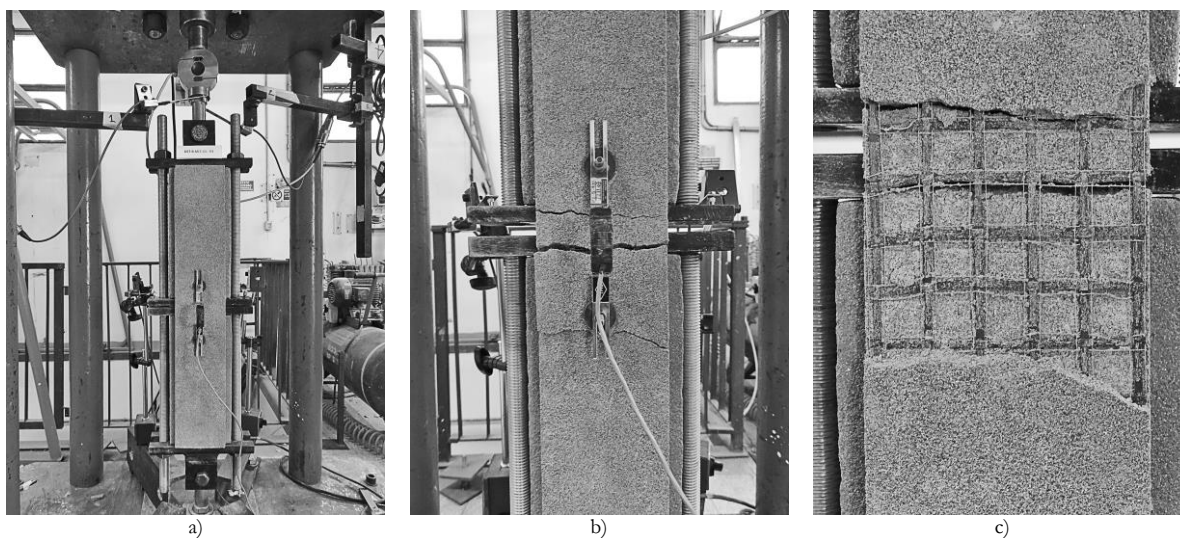


Fig. 5.54. Provino DST-B.MCE.GS-03: a) inizio prova; b) pattern fessurativo; c) particolare della deformazione della rete di fibra a test ultimato

Per i provini DST-B.MCE.GS-03 e 06 dopo il raggiungimento del carico massimo è stato possibile proseguire la prova ottenendo una fase di softening, fino al raggiungimento della crisi per scorrimento fibra-matrice.

Rispetto ai provini con matrice Kerakoll, la delaminazione ha raggiunto un'estensione maggiore. Questa, oltre a non aver interessato entrambe i placcaggi in modo simmetrico, si è propagata per una lunghezza differente sui due mattoni, raggiungendo un massimo di circa 180 mm a partire dalla mezzeria del provino. In quest'ultima fase i provini hanno mostrato una evidente perdita di assialità a causa del diverso comportamento dei due placcaggi.

A prova ultimata, è stato possibile rimuovere delle porzioni consistenti (160 mm e 260 mm) del layer più esterno di matrice dei provini DST-B.MCE.GS-05 e 06. I primi 4 multi-filamenti di trama, a partire dalla lesione trasversale centrale, hanno esibito la tipica deformata parabolica, nonché gli effetti di uno scorrimento all'interno della matrice. I multi-filamenti risultano, infatti, dislocato rispetto alla loro sede originaria. Oltre i 60-70 mm i multi-filamenti di trama sono risultati ancora adesi alla matrice. I multi-filamenti longitudinali hanno subito degli scorrimenti differenziali (Fig. 5.54d) come già osservato per i compositi con matrice Kerakoll, causati da una distribuzione non uniforme del carico tra di essi.

In generale i test condotti hanno dimostrato una buona adesione del composito al supporto in laterizio. Solo un provino (DST-B.MCE.GS-02) ha raggiunto una crisi per improvvisa delaminazione alla prima interfaccia, ovvero per distacco totale di uno dei due placcaggi da un laterizio di supporto (Fig. ...). Dato il basso valore massimo di carico e l'assenza, a crisi avvenuta, di lesioni nella matrice, si può ricondurre tale crisi a difetti di preparazione del provino. Una parziale perdita di adesione alla prima interfaccia è stata osservata anche per il provino DST-B.MCE.GS-04.

In tabella 5.30 sono stati riportati i risultati per ogni provino testato e i risultati medi con i rispettivi valori della deviazione standard e del coefficiente di variazione. Da questi ultimi sono stati esclusi i provino DST-B.MKE.GS-02 e 04, i quali, come illustrato precedentemente, hanno mostrato una perdita di adesione alla prima interfaccia e proprietà meccaniche inferiori a causa di difetti riconducibili alle fasi di realizzazione del provino ed allestimento della prova.

Tab. 5.30. Risultati prove Double-Shear Test-tipo B condotte su provini costituiti da composito con matrice di malta cementizia

provino	F_{max}^{III} [N]	F_{ab}^{III} [N]	f_r^{III} [MPa]	δ_{max}^{III} [mm]	g_{max}^{III} [mm]	g_{ab}^{III} [mm]	ϵ_{rg}^{III}	ϵ_r^{III}	K_i^{III} [MPa]	K_r^{III} [MPa]	μ_c	μ_{cd}	$f_{II_r}^{III}/f_r$	$f_{II_r}^{III}/f_r$	crisi
DST-B.MCE.GS-01	1517	1169	465	1.55	1.40	0.80	0.028	0.008	8419	1172	8.64	-	0.54	0.75	D
DST-B.MCE.GS-02	857	793	263	0.67	0.19	0.15	0.004	0.004	6266	2014	2.27	1.32	0.30	0.43	D+B
DST-B.MCE.GS-03	1827	1588	560	3.77	1.47	1.08	0.029	0.009	2308	698	4.76	1.23	0.65	0.91	D
DST-B.MCE.GS-04	756	689	232	0.72	0.45	0.37	0.009	0.003	4904	4904	4.66	-	0.27	0.38	D+B
DST-B.MCE.GS-05	855	770	262	0.56	0.16	0.07	0.003	0.004	8815	1893	5.78	-	0.30	0.42	D
DST-B.MCE.GS-06	1083	1050	332	1.76	0.49	0.46	0.010	0.005	3382	412	5.51	1.06	0.38	0.54	D
media	1321	1144	405	1.91	0.88	0.60	0.018	0.007	5731	1044	6.17	1.15	0.47	0.66	
Dev.St.	435	340	133	1.35	0.65	0.44	0.013	0.002	3365	647	1.70	0.12	0.15	0.21	
Co.V.	33%	30%	33%	70%	74%	73%	74%	33%	59%	62%	28%	10%	33%	33%	

Note: in grigio sono riportati i risultati relativi ai provini esclusi dalla valutazione dei risultati medi

F_{max}^{III} =carico massimo; F_{ab}^{III} =carico di debonding; f_r^{III} =tensione massima nella rete di fibra; δ_{max}^{III} =spostamento massimo valutato come media delle misurazioni dei trasduttori 1 e 2 (Fig. 5.48); g_{max}^{III} =scorrimento globale massimo valutato come media delle misurazioni degli estensimetri ad omega (Fig. 5.48); g_{ab}^{III} =scorrimento globale di debonding valutato come media delle misurazioni degli estensimetri ad omega (Fig. 5.48); ϵ_{rg}^{III} =deformazione massima (Eq. 5.15); ϵ_r^{III} =deformazione massima (Eq. 5.16); K_i^{III} =rigidezza del provino integro (Eq. 5.2); K_r^{III} =rigidezza del provino lesionato (Eq. 5.3); μ_c =duttilità cinematica (Eq. 5.4); μ_{cd} =duttilità cinematica disponibile (Eq. 5.4); $f_{II_r}^{III}/f_r$ =sfruttamento delle proprietà a trazione della rete di fibra; $f_{II_r}^{III}/f_r$ =sfruttamento delle proprietà a trazione del composito; f_r =resistenza a trazione della rete di fibra (§ 4.4); f_r =resistenza a trazione del composito (§ 4.5); *crisi*= modalità di crisi: D crisi per scorrimento fibra-matrice, B delaminazione all'interfaccia fibra-matrice (Fig. 5.2)

Dai risultati ottenuti è scaturita una consistente variabilità, che si è tradotta in $Co.V. \geq 33\%$. I coefficienti di sfruttamento delle proprietà di fibra e composito si sono attestati su valori minori di 1.

Data la consistente perdita di rigidezza con la formazione della prima lesione trasversale, la duttilità cinematica μ_c è risulta pari a 4.439. Due provini hanno esibito un'ultima fase discendente, con una duttilità cinematica disponibile μ_{cd} media pari a 1.147. I restanti provini hanno raggiunto una crisi per scorrimento di tipo fragile di uno dei due placcaggi di rinforzo.

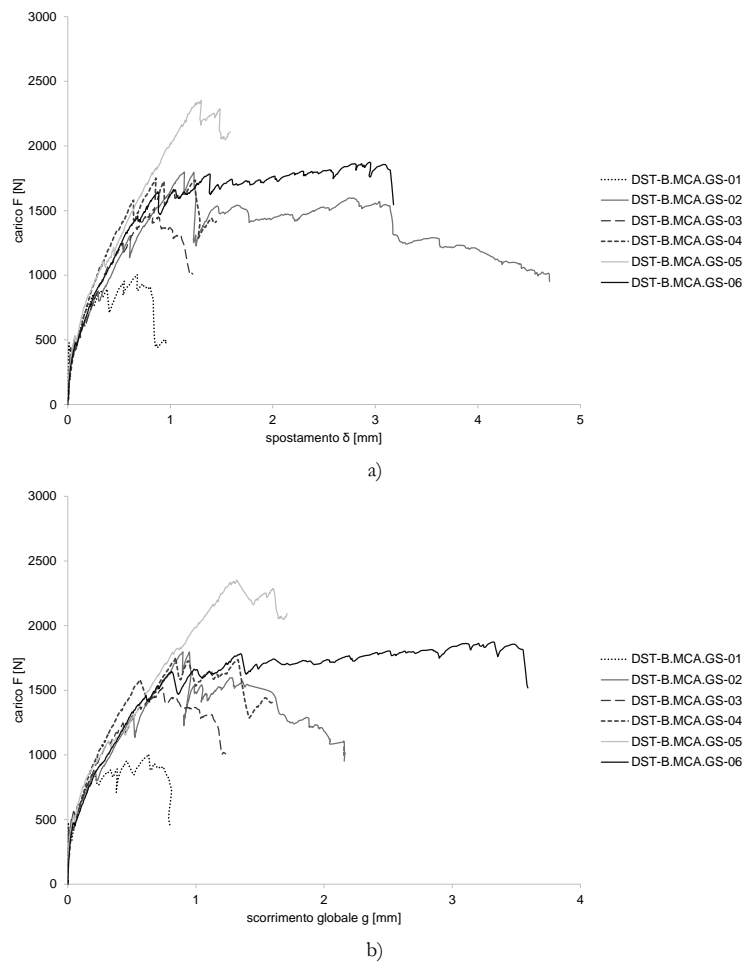


Fig. 5.55. Curve a) carico-spostamento ($F-\delta$) e b) carico-scorrimento globale ($F-g$) relative ai sei provini costituiti da matrice di malta di calce idraulica

Dai trasduttori di spostamento per ogni provino sono stati costruiti i grafici carico-spostamento (Fig. 5.55a) ed i grafici carico-scorrimento globale (Fig. 5.55b). Su ogni grafico è stato possibile individuare quattro fasi, di cui le prime separate da una perdita di carico, contraddistinte da cinque punti significativi che caratterizzano il comportamento del rinforzo. Ciò ha permesso la costruzione di un grafico medio carico-scorrimento globale. I tratti del grafico suddetto sono stati linearizzati per una lettura più agevole (Fig. 5.56 e Tab. 5.31).

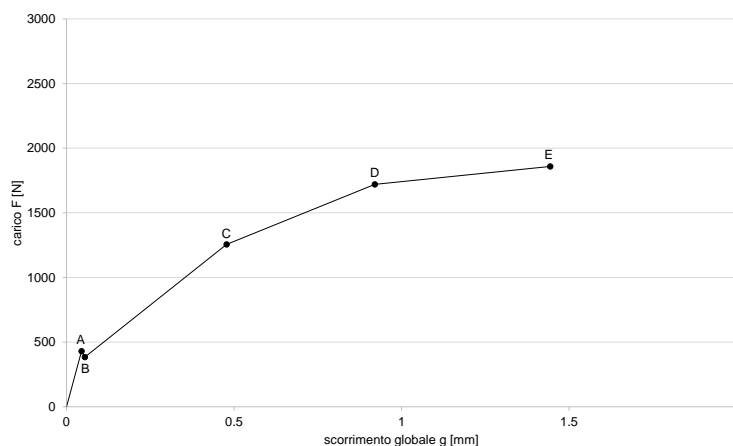


Fig. 5.56 Curva media carico-scorrimento globale (F-g) relativa ai sei provini costituiti da matrice di malta di calce idraulica

Tab. 5.31. Punti caratterizzanti il percorso di equilibrio

punti	F [N]	g [mm]
A	430	0.044
B	384	0.054
C	1256	0.478
D (debonding)	1720	0.920
E (massimo)	1859	1.444

- Fase I: fase lineare elastica. Tale fase si conclude con la formazione della prima lesione trasversale nella matrice (F_a ; g_a) localizzata nella mezzeria di uno dei due compositi. Il fenomeno causa una perdita di carico (F_b ; g_b) meno consistente rispetto alle matrici precedenti, caratterizzate da proprietà meccaniche superiori.
- Fase II: fase di formazione delle lesioni. La pendenza della curva diminuisce progressivamente, evidenziando una perdita di rigidità del composito a causa della formazione di ulteriori lesioni trasversali, localizzate nella zona centrale del composito, ovvero nella zona non adesa al supporto (Fig. 5.27b).
- Fase III: fase intermedia. Il principio della terza fase (F_c ; g_c) è determinato dalla formazione di una lesione interlaminare alla seconda interfaccia, che a partire da una delle lesioni trasversali, si propaga verso uno degli estremi liberi del composito. Il fenomeno è individuato sul grafico da una perdita di carico. Tale fase è caratterizzata dalla formazione di nuove lesioni sia trasversali che longitudinali e dalla progressiva crescita in ampiezza di quelle formatesi precedentemente.
- Fase IV: fase di propagazione del fenomeno di debonding. Un'ulteriore perdita di rigidità segna il principio della quarta fase in cui si assiste alla crescita di dimensioni delle lesioni presenti ed allo scorrimento fibra-matrice. Nonostante ciò, si registra un incremento di carico dato dall'ingranamento che si genera tra la fibra e la matrice e dal comportamento telescopico, fino all'attingimento del carico massimo (F_e ; g_e). A differenza dei compositi con matrice Kerakoll e cementizia, nel caso dei provini con matrice di calce idraulica la quarta fase presenta un'estensione

limitata. Tra i punti di inizio (F_d ; g_d) e di fine (F_e ; g_e), infatti, intercorrono scorrimenti ed incrementi di carico minimi.

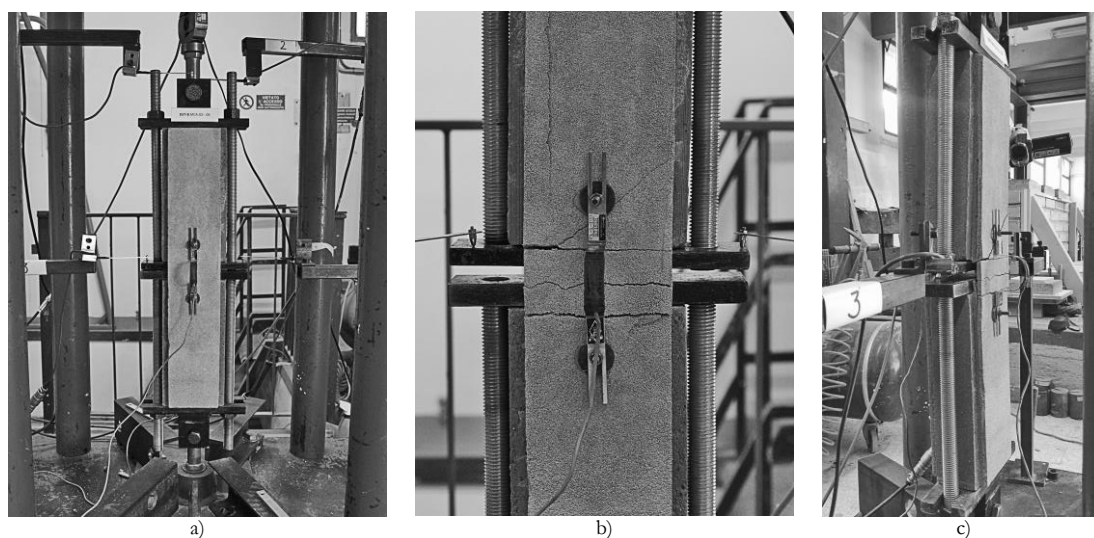


Fig. 5.57. Provino DST-B.MCA.GS-06: a) inizio prova; b) pattern fessurativo; c) vista laterale a test ultimato

In modo simile ai provini con matrice cementizia, dopo il raggiungimento del carico massimo tre provini sono stati caratterizzati da una fase di softening: al crescere dello scorrimento della fibra nella matrice è corrisposta una graduale perdita di carico, fino al raggiungimento della crisi per scorrimento fibra-matrice. La delaminazione interlaminare ha raggiunto estensioni consistenti: in alcuni casi (DST-B.MCA.GS-03 e 04) ha interessato quasi interamente (200-260 mm dalla lesione trasversale centrale) la lunghezza di uno dei mattoni di supporto (Fig. 5.58). Ciò ha permesso, a test ultimati, l'osservazione del provino privo dello strato esterno di matrice. I multi-filamenti longitudinali e trasversali hanno subito i medesimi scorrimenti fino a quando i nodi hanno mantenuto la loro efficacia. Nel caso di provino DST-B.MCA.GS-04 i multi-filamenti trasversali hanno esibito una deformazione parabolica fino ad una distanza dalla lesione trasversale centrale di circa 200 mm. È stato inoltre appurato che i multi-filamenti trasversali scorrendo hanno “tagliato” i ponti di matrice causando una parziale perdita di adesione della rete di fibra da entrambe gli strati di matrice.

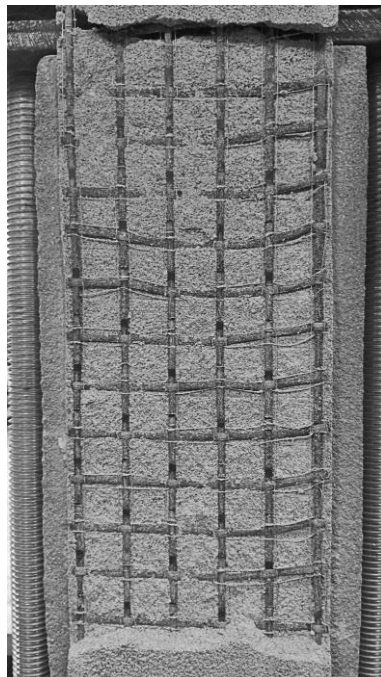


Fig. 5.58. Particolare della rete di fibra a test ultimato: provino DST-B.MCA.GS-04

La delaminazione, oltre a non aver interessato entrambe i placcaggi in modo simmetrico, si è propagata per una lunghezza differente sui due mattoni dimostrando a un comportamento differente dei due compositi di rinforzo, che ha causato la perdita di assialità del provino durante la fase di softening.

In generale i test condotti hanno dimostrato una buona adesione del composito al supporto in laterizio.

In tabella 5.32 sono stati riportati i risultati per ogni provino testato e i risultati medi con i rispettivi valori della deviazione standard e del coefficiente di variazione. Da questi ultimi è stato escluso il provino DST-B.MCA.GS-01, il quale ha mostrato una perdita di adesione interlaminare con uno dei laterizi di supporto, riconducibile a difetti di preparazione dei provini stessi e comporta risultati in termini di carico-spostamento inferiori.

Tab. 5.32. Risultati prove Double-Shear Test-tipo B condotte su provini costituiti da composito con matrice di malta di calce idraulica

provino	F_{max}^{III} [N]	F_{db}^{III} [N]	f_r^{III} [MPa]	δ_{max}^{III} [mm]	g_{max}^{III} [mm]	g_{db}^{III} [mm]	ϵ_{rg}^{III}	ϵ_r^{III}	K_i^{III} [MPa]	K_l^{III} [MPa]	μ_c	μ_{cd}	$f_{III,r}^{III}/f_r$	$f_{III,t}^{III}/f_t$	crisi
DST-B.MCA.GS-01	1003	954	307	0.68	0.63	0.46	0.013	0.005	36223	2442	24.57	1.10	0.36	0.53	D+B
DST-B.MCA.GS-02	1798	1625	551	1.14	0.90	0.79	0.018	0.009	7949	1656	5.03	-	0.64	0.96	D
DST-B.MCA.GS-03	1522	1453	466	0.85	0.84	0.75	0.013	0.008	15055	1789	8.39	1.06	0.54	0.81	D
DST-B.MCA.GS-04	1751	1580	536	0.86	0.84	0.56	0.017	0.009	12745	3088	6.27	-	0.62	0.93	D
DST-B.MCA.GS-05	2351	2159	720	1.30	1.32	1.45	0.026	0.012	7578	2387	4.19	1.14	0.83	1.25	D
DST-B.MCA.GS-06	1873	1782	574	3.28	3.31	1.35	0.066	0.009	6295	1512	9.88	-	0.66	1.00	D
media	1859	1720	569	1.49	1.44	0.92	0.028	0.009	9925	2086	6.75	1.10	0.66	0.99	
Dev.St.	305	272	93	1.02	1.06	0.32	0.022	0.002	3770	651	2.36	0.05	0.11	0.16	
Co.V.	16%	16%	16%	69%	74%	35%	78%	16%	38%	31%	35%	5%	16%	16%	

Note: in grigio sono riportati i risultati relativi ai provini esclusi dalla valutazione dei risultati medi

F_{max}^{III} =carico massimo; F_{db}^{III} =carico di debonding; f_r^{III} =tensione massima nella rete di fibra; δ_{max}^{III} =spostamento massimo valutato come media delle misurazioni dei trasduttori 1 e 2 (Fig. 5.48); g_{max}^{III} =scorrimento globale massimo valutato come media delle misurazioni degli estensimetri ad omega (Fig. 5.48); g_{db}^{III} =scorrimento globale di debonding valutato come media delle misurazioni degli estensimetri ad omega (Fig. 5.48); ϵ_{rg}^{III} =deformazione massima (Eq. 5.15); ϵ_r^{III} =deformazione massima (Eq. 5.16); K_i^{III} =rigidezza del provino integro (Eq. 5.2); K_l^{III} =rigidezza del provino lesionato (Eq. 5.3); μ_c =duttilità cinematica (Eq. 5.4); μ_{cd} =duttilità cinematica disponibile (Eq. 5.4); $f_{III,r}^{III}/f_r$ =sfruttamento delle proprietà a trazione della rete di fibra; $f_{III,t}^{III}/f_t$ =sfruttamento delle proprietà a trazione del composito; f_r =resistenza a trazione della rete di fibra (§ 4.4); f_t =resistenza a trazione del composito (§ 4.5); *crisi*= modalità di crisi: D crisi per scorrimento fibra-matrice, B delaminazione all'interfaccia fibra-matrice (Fig. 5.2)

Il presente composito ha restituito $Co.V. \geq 16\%$. I coefficienti di sfruttamento delle proprietà di fibra e composito sono risultati di poco superiori a quelli dei provini con matrice cementizia.

Data la consistente perdita di rigidezza con la formazione della prima lesione trasversale, è scaturita una duttilità cinematica μ_c pari a 6.755. Due provini si sono caratterizzati per la presenza di un'ultima fase discendente, con una duttilità cinematica disponibile μ_{cd} media pari a 1.099. I restanti provini hanno esibito una crisi di tipo fragile per scorrimento fibra-matrice di uno dei due placcaggi di rinforzo.

Malta di calce bastarda + GeoSteel® Grid 200

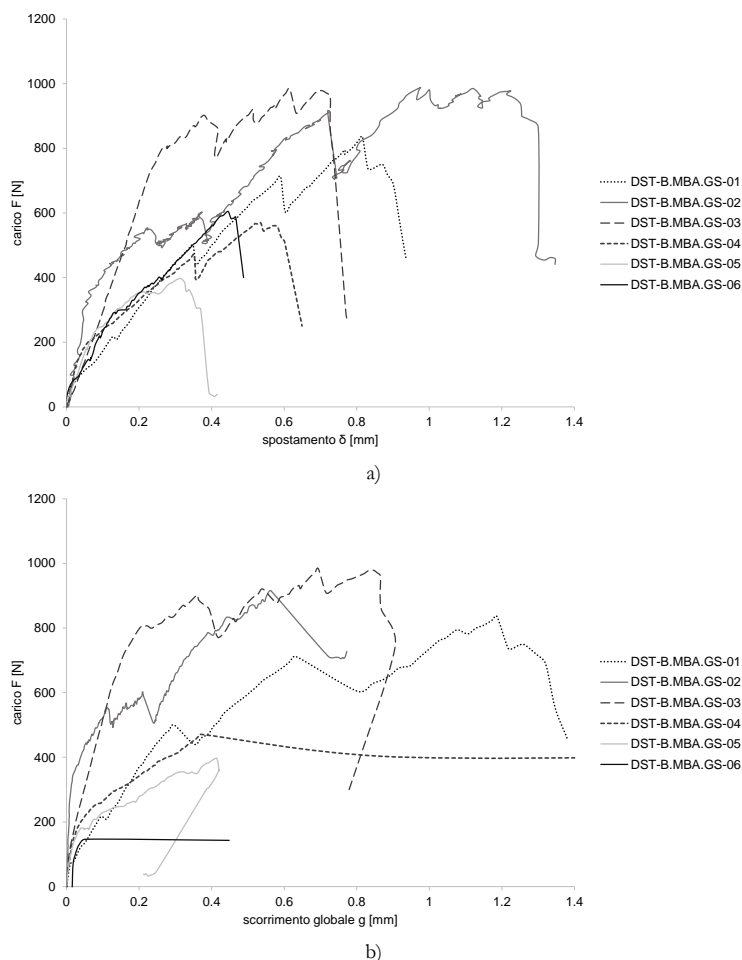


Fig. 5.59. Curve a) carico-spostamento (F- δ) e b) carico-scorrimento globale (F-g) relative ai sei provini costituiti da matrice di malta bastarda

L'analisi del comportamento dei provini con matrice di malta bastarda ha presentato maggiori difficoltà: i test hanno dimostrato un comportamento non omogeneo di tali compositi (Fig. 5.59), con risultati affetti da un'elevata variabilità. È stato, comunque, possibile individuare quattro distinte fasi ed ottenere, dai sei grafici carico-scorrimento globale (Fig. 5.59b), una curva media attraverso l'individuazione di quattro punti caratteristici. I quattro tratti del grafico suddetto sono stati linearizzati per una lettura più agevole (Fig. 5.60 e Tab. 5.33).

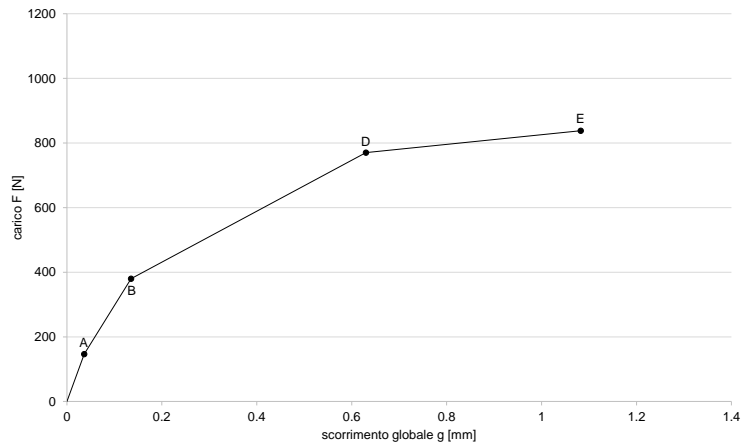


Fig. 5.60. Curva media carico-scorrimento globale (F-g) relativa ai sei provini costituiti da matrice di malta bastarda

Tab. 5.33. Punti caratterizzanti il percorso di equilibrio

punti	F [N]	g [mm]
A	147	0.036
B	380	0.135
D (debonding)	770	0.630
E (massimo)	844	1.025

- Fase I: fase lineare elastica. Tale fase si conclude con la formazione della prima lesione trasversale nella matrice (F_a ; g_a). Tale lesione si è formata nella zona centrale e non adesa al supporto del composito, in corrispondenza del bordo di uno dei due mattoni. Il principio di tale lesione è individuato sul grafico da un cambio di pendenza della curva.
- Fase II: fase di propagazione della lesione trasversale. In tale fase la prima lesione trasversale si propaga in modo graduale andando ad interessare tutto lo spessore del composito. Contemporaneamente si ha la formazione di una lesione parallela sul composito opposto.
- Fase III: fase di formazione delle lesioni (Fig. 5.61b). La pendenza della curva diminuisce progressivamente, evidenziando una perdita di rigidità del composito a causa della formazione di ulteriori lesioni trasversali, localizzate nella zona centrale del composito, ovvero nella zona non adesa al supporto. Contemporaneamente due lesioni interlaminari alla seconda interfaccia hanno interessato i due compositi. A differenza dei compositi analizzati precedentemente, la formazione di tali lesioni non comporta un cambio di pendenza (risulta assente lo stadio denominato nei casi precedenti con la lettera C). Tale fase termina con il raggiungimento dello stadio indicato sul grafico con la lettera D (F_d ; g_d).
- Fase IV: fase di propagazione del fenomeno di debonding. In tale fase la fibra scorre all'interno della matrice, causando spesso l'espulsione di alcuni frammenti del layer esterno di matrice. La rigidità del provino diminuisce ulteriormente e l'incremento di carico è riconducibile all'ingranamento fibra-matrice ed al comportamento telescopico, fino al raggiungimento del carico massimo (F_e ; g_e).



Fig. 5.61. Provino DST-B.MBA.GS-02: a) inizio prova; b) pattern fessurativo; c) propagazione lesione interlaminare

Cinque provini hanno esibito un'ulteriore fase nella quale è stato registrato un aumento di scorrimento per valori di carico man mano decrescenti, fino al raggiungimento di una crisi per scorrimento fibra-matrice (F_u ; δ_u). Per i provini DST-B.MBA.GS-02, 03, 05 e 06 dopo l'attingimento del valore massimo di carico la lesione interlaminare si è propagata per tutta la lunghezza di uno dei mattoni di supporto, ovvero per una lunghezza di circa 265 mm con distacco totale o parziale del layer esterno di matrice (Fig. 5.61c).

Dall'osservazione a prova ultimata dei provini (Fig. 5.62a) è stato appurato che i multi-filamenti longitudinali hanno registrato degli scorrimenti maggiori rispetto a quelli trasversali, i quali in un primo momento sono stati trattenuti dalla matrice. Questi non hanno esibito una deformata parabolica accentuata come nei casi precedenti, a dimostrazione di una minore coesione fibra-matrice e, quindi, di un apporto in resistenza allo scorrimento da parte della matrice minore. Ciò ha permesso una veloce propagazione della delaminazione rendendo impossibile di distinguere quattro fasi come nel caso dei provini analizzati precedentemente.

I test condotti hanno dimostrato una buona adesione del composito al supporto in laterizio.

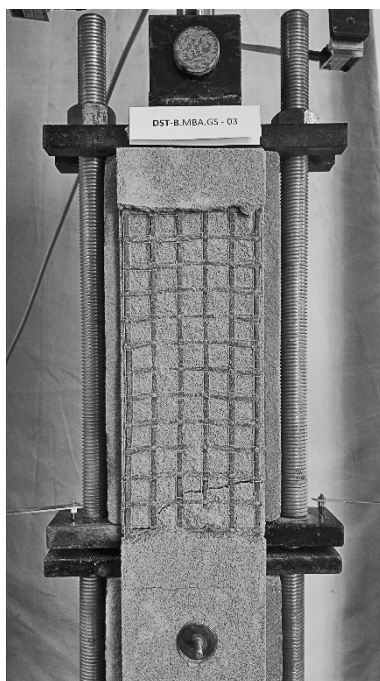


Fig. 5.61. Provino DST-B.MBA.GS-03: particolare della rete di fibra a test ultimato

In tabella 5.34 sono stati riportati i risultati per ogni provino testato e i risultati medi con i rispettivi valori della deviazione standard e del coefficiente di variazione. Da questi ultimi sono stati esclusi i provini DST-B.MBA.GS-05 e 06, caratterizzati da una parziale perdita di adesione alla prima interfaccia dovuta a difetti riconducibili alla realizzazione dei provini stessi e all'allestimento della prova e comporta risultati in termini di carico-spostamento inferiori.

Tab. 5.34. Risultati prove Double-Shear Test-tipo B condotte su provini costituiti da composito con matrice di malta bastarda

provino	F_{max}^{III} [N]	F_{db}^{III} [N]	f_r^{III} [MPa]	δ_{max}^{III} [mm]	g_{max}^{III} [mm]	g_{db}^{III} [mm]	ϵ_{rg}^{III}	ϵ_r^{III}	K_i^{III} [MPa]	K_l^{III} [MPa]	μ_c	μ_{cd}	f_r^{III}/f_r	f_r^{III}/f_r	crisi
DST-B.MBA.GS-01	836	712	256	0.82	1.19	0.63	0.024	0.004	5121	1069	5.00	1.01	0.30	-	D
DST-B.MBA.GS-02	988	915	303	0.98	1.20	0.56	0.024	0.005	9551	915	9.44	1.30	0.35	-	D
DST-B.MBA.GS-03	984	984	301	0.62	0.69	0.69	0.014	0.005	3076	2966	1.92	1.18	0.35	-	D
DST-B.MBA.GS-04	569	471	174	0.54	-	-	-	0.003	4917	927	4.63	1.12	0.20	-	D
DST-B.MBA.GS-05	397	353	122	0.32	1.69	0.31	0.008	0.002	3358	1016	2.66	1.05	0.14	-	D+B
DST-B.MBA.GS-06	604	561	185	0.45	-	-	-	0.003	7919	993	5.85	-	0.21	-	D+B
media	844	770	259	0.74	1.02	0.63	0.021	0.004	5666	1469	5.25	1.15	0.30	-	
Dev.St.	197	230	60	0.20	0.29	0.06	0.006	0.001	2748	1000	3.11	0.12	0.07	-	
Co.V.	23%	30%	23%	27%	28%	10%	28%	23%	49%	68%	59%	11%	23%	-	

Note: in grigio sono riportati i risultati relativi ai provini esclusi dalla valutazione dei risultati medi

F_{max}^{III} =carico massimo; F_{db}^{III} =carico di debonding; f_r^{III} =tensione massima nella rete di fibra; δ_{max}^{III} =spostamento massimo valutato come media delle misurazioni dei trasduttori 1 e 2 (Fig. 5.48); g_{max}^{III} =scorrimento globale massimo valutato come media delle misurazioni degli estensimetri ad omega (Fig. 5.48); g_{db}^{III} =scorrimento globale di debonding valutato come media delle misurazioni degli estensimetri ad omega (Fig. 5.48); ϵ_{rg}^{III} =deformazione massima (Eq. 5.15); ϵ_r^{III} =deformazione massima (Eq. 5.16); K_i^{III} =rigidezza del provino integro (Eq. 5.2); K_l^{III} =rigidezza del provino lesionato (Eq. 5.3); μ_c =duttilità cinematica (Eq. 5.4); μ_{cd} =duttilità cinematica disponibile (Eq. 5.4); f_r^{III}/f_r =sfruttamento delle proprietà a trazione della rete di fibra; f_r^{III}/f_r =sfruttamento delle proprietà a trazione del composito; f_r =resistenza a trazione della rete di fibra (§ 4.4); f =resistenza a trazione del composito (§ 4.5); *crisi*= modalità di crisi: D crisi per scorrimento fibra-matrice, B delaminazione all'interfaccia fibra-matrice (Fig. 5.2)

Coefficienti di variazione consistenti (Co.V.≥23%) e coefficienti di sfruttamento delle proprietà della fibra bassi hanno caratterizzato i compositi di malta bastarda.

Data la perdita di rigidità con la formazione della prima lesione trasversale, la duttilità cinematica μ_c è risultata pari a 3.332. Quattro provini si sono caratterizzati per la presenza di un'ulteriore fase discendente, da cui è derivata una duttilità cinematica disponibile μ_{cd} media pari a 1.153.

Date le basse prestazioni della malta bastarda, in due casi (provini DST-B.MBA.GS-04 e 06) uno dei due estensimetri ad omega si è distaccato dal composito, asportando un sottile strato superficiale di matrice. Il distacco, essendo avvenuto all'inizio della fase II di formazione delle lesioni trasversali, ha reso impossibile l'utilizzo dei dati per la valutazione della deformazione locale ε_g^{III} .

5.4.2. Osservazioni

Limitatamente ai compositi con malta di calce idraulica di laboratorio e Kerakoll, sono stati ottenuti risultati in termini di carico massimo e corrispondente tensione massima con coefficienti di variazione al di sotto del 20%. Inoltre, tali compositi si sono caratterizzati per il raggiungimento di valori elevati di sfruttamento della resistenza sia della fibra che del composito e per valori simili in termini di rigidità iniziale K_r^{III} e di deformazione ε_{rg}^{III} . Se ne deduce una maggiore compatibilità chimica, quindi migliori proprietà di adesione, tra le matrici a base di calce idraulica e la rete di fibra di basalto.

Concordemente a quanto osservato in Lignola et al. (2017), nel caso di buone proprietà di adesione la dispersione dei risultati in termini di resistenza è risultata contenuta ed il composito ha dimostrato una maggiore capacità di sfruttamento delle proprietà della rete di fibra.

La deformazione valutata mediante la media delle letture degli estensimetri clip-on ad omega ε_{rg}^{III} è risultata maggiore rispetto a quella valutata mediante l'applicazione dell'equazione 5.16. Tale risultato è stato osservato in Sabau et al. (2017) ed in Carloni et al. (2015) ed attribuito alla non uniforme distribuzione del carico sia tra i multi-filamenti longitudinali sia all'interno del singolo multi-filamento, la quale dipende a sua volta da una distribuzione stocastica delle proprietà di adesione fibra-matrice e da un incompleto impregnamento della sezione del multi-filamento da parte della matrice (D'Antino et al. 2014).

In figura 5.62 e tabella 5.35 sono stati riportati i risultati medi relativi alle quattro tipologie di provino.

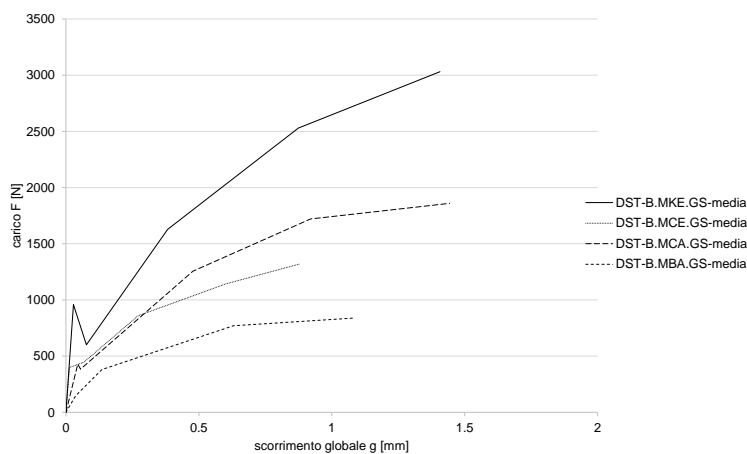


Fig. 5.62. Curve medie carico-scorrimento globale (F-g) relative alle quattro tipologie di provini

Tab. 5.35. Risultati medi Double-Shear Test-tipo B

provino	F_{max}^{III} [N]	F_{db}^{III} [N]	f_r^{III} [MPa]	δ_{max}^{III} [mm]	g_{max}^{III} [mm]	g_{db}^{III} [mm]	ε_{rg}^{III}	ε_r^{III}	K_r^{III} [MPa]	K_r^{III} [MPa]	μ_c	μ_{cd}	f_r^{III}/f_r	f_r^{III}/f_r	crisi
MKE	3031	2529	929	1.61	1.41	0.87	0.028	0.015	8960	2912	4.44	1.09	1.07	1.18	D+F
MCE	1321	1144	405	1.91	0.88	0.60	0.018	0.007	5731	1044	6.17	1.15	0.47	0.66	D
MCA	1859	1720	569	1.49	1.44	0.92	0.028	0.009	9925	2086	6.75	1.10	0.66	0.99	D
MBA	844	770	259	0.74	1.02	0.63	0.024	0.004	5666	1469	5.25	1.15	0.30	-	D

F_{max}^{III} =carico massimo; F_{db}^{III} =carico di debonding; f_r^{III} =tensione massima nella rete di fibra; δ_{max}^{III} =spostamento massimo valutato come media delle misurazioni dei trasduttori 1 e 2 (Fig. 5.48); g_{max}^{III} =scorrimento globale massimo valutato come media delle misurazioni degli estensimetri ad omega (Fig. 5.48); g_{db}^{III} =scorrimento globale di debonding valutato come media delle misurazioni degli estensimetri ad omega (Fig. 5.48); ε_{rg}^{III} =deformazione massima (Eq. 5.15); ε_r^{III} =deformazione massima (Eq. 5.16); K_r^{III} =rigidezza del provino integro (Eq. 5.2); K_r^{III} =rigidezza del provino lesionato (Eq. 5.3); μ_c =duttilità cinematica (Eq. 5.4); μ_{cd} =duttilità cinematica disponibile (Eq. 5.4); f_r^{III}/f_r =sfruttamento delle proprietà a trazione della rete di fibra; f_r^{III}/f_r =sfruttamento delle proprietà a trazione del composito; f_r =resistenza a trazione della rete di fibra (§ 4.4); f_r =resistenza a trazione del composito (§ 4.5); crisi= modalità di crisi: F crisi per rottura a trazione della rete di fibra interna alla matrice, D crisi per scorrimento fibra-matrice (Fig. 5.2)

Tutte le tipologie di provino hanno restituito valori di duttilità cinematica μ_c significativi, conseguenza dell'elevata perdita di rigidità successiva alla formazione della prima lesione trasversale nella matrice.

Solo il composito Kerakoll è stato in grado di sfruttare pienamente le proprietà a trazione della fibra, e del composito stesso, raggiungendo in alcuni casi una crisi per scorrimento con rottura parziale a trazione della rete di fibra in corrispondenza della lesione trasversale maggiore.

La variabilità dei risultati e del comportamento osservato (soprattutto in relazione alle modalità di crisi) è stata attribuita all'apparato di prova DST-B. Rispetto ad altre prove di adesione, questa ha presentato una maggiore complessità, relativa alle operazioni di preparazione dei provini e di allestimento della prova, ed un numero di superfici di adesione maggiore. Ne è derivata una probabilità più alta di incorrere in asimmetrie che hanno influito inevitabilmente sui risultati dei test. Ciò ha indotto anche l'insorgere di delaminazioni parziali alla prima interfaccia: il diverso comportamento delle quattro superfici di adesione ha determinato delle perdite di assialità del provino che, seppur minime, hanno provocato la flessione del provino e l'insorgere di tensioni normali al piano del composito, causandone il parziale distacco dal supporto (Fig. 5.63).

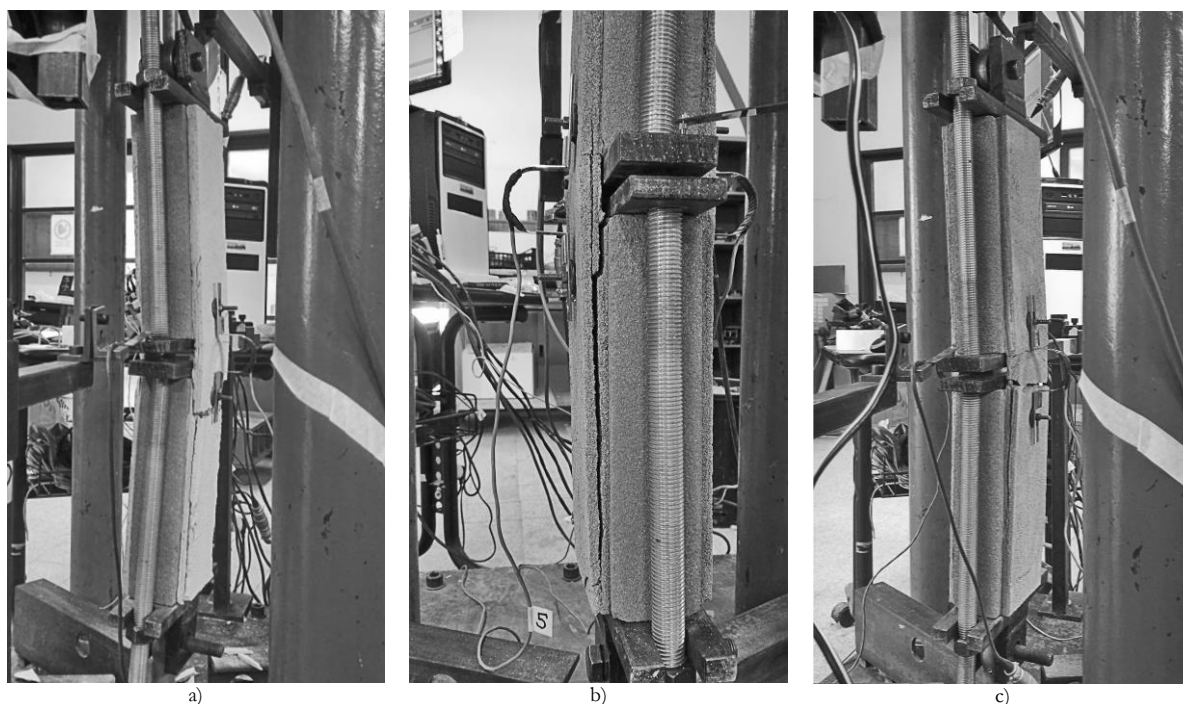


Fig. 5.63. Perdita di assialità dei provini a) DST-B.MKE.GS-04, b) DST-B.MCE.GS-04 e c) DST-B.MCA.GS-04

5.5. Beam Test

Per ogni tipologia di composito sono stati realizzati 6 provini, a cui si aggiungono ulteriori 3 provini per il composito con matrice Kerakoll, per un totale di 27 Beam Tests.

Preparazione dei provini

Per la realizzazione di ogni provino è stato impiegato un supporto in laterizio costituito da due mattoni di dimensioni $250 \times 120 \times 55 \text{ mm}^3$, connessi da una striscia di composito di dimensioni $455 \times 95 \times 10 \text{ mm}^3$ sul lato teso ed incernierati in testa (mediante una cerniera metallica) in corrispondenza del lato compresso. Per l'inserimento della cerniera, è stato tagliato lo spigolo superiore interno di ognuno dei due mattoni, i quali sono stati successivamente posizionati ad una distanza di 10 mm l'uno dall'altro mediante l'interposizione di un listello ligneo, creando così un alloggiamento di $20 \times 20 \text{ mm}$ per l'inserimento del vincolo metallico. Dopo aver segnato i bordi del rinforzo ed aver debitamente inumidito il laterizio, è stato applicato un primo strato di malta di spessore pari a 5 mm con l'ausilio di una cassaforma lignea (Fig. 5.64a, b). Una striscia di rete di fibra di lunghezza pari a 455 mm è stata posizionata sul primo strato di malta, pressandola delicatamente all'interno di questo in modo da garantire un adeguato impregnamento (Fig. 5.64c). Successivamente è stato apposto il secondo strato di malta di spessore pari a 5 mm (Fig. 5.64d). I provini così confezionati sono stati lasciati maturare per 28 giorni.



Fig. 5.64. Preparazione dei provini

Apparato di prova

I test sono stati condotti in regime di controllo di spostamento ad una velocità di 0.5 mm/min, utilizzando una cella di carico da 5 kN del tipo TRZ500, METIOR s.r.l. Il carico verticale è stato applicato in modo monotono tramite un martinetto a vite, azionato da un volano a mano. La lettura dello spostamento è stata ricavata attraverso 4 trasduttori di spostamento del tipo CE a mensola ed un estensimetro clip-on del tipo ad omega con un range di misura di 50 mm, disposti come illustrato in figura 5.65. L'acquisizione dei dati è avvenuta per mezzo della centralina elettronica della National Instruments.

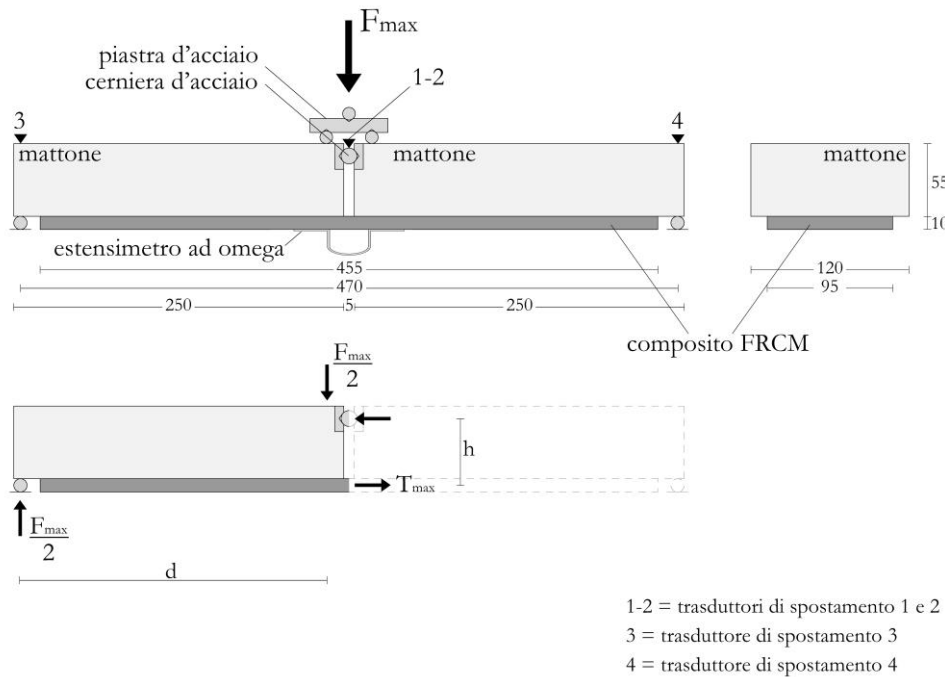


Fig. 5.65. Schematizzazione prova Beam Test (dimensioni in millimetri)

Test

Lasciati decorrere i 28 giorni necessari per la stagionatura della malta, i provini sono stati testati.

Ogni provino è stato posizionato nella macchina di prova, al di sotto della cella di carico, su due appoggi costituiti da due cilindri metallici posti ad una distanza reciproca di 470 mm. Il carico è stato trasferito al provino per mezzo di una cerniera cilindrica poggiante su una piastra metallica. Quest'ultima ha permesso di ripartire il carico in modo equo tra i due mattoni attraverso due cilindri metallici distanziati di 60 mm.

La lettura dello spostamento è stata ricavata per mezzo di 4 trasduttori, due posizionati al di sopra degli elementi in laterizio agli estremi destro e sinistro del provino per controllare lo spostamento verticale dei supporti, due posizionati centralmente al di sopra della cerniera sui lati anteriore e posteriore del provino per valutare lo spostamento verticale della sezione di mezzeria del provino stesso. Tre provini sono stati dotati di un estensimetro ad omega posizionato centralmente sulla superficie esterna del composito, in modo da restituire letture di deformazione localizzate dove era attesa la formazione della lesione principale.

Provini e nomenclatura

9 provini rinforzati con GeoCalce® Fino + GeoSteel® Grid 200.....	BT.MKE.GS-xx
6 provini rinforzati con malta di cemento + GeoSteel® Grid 200.....	BT.MCE.GS-xx
6 provini rinforzati con malta di calce idraulica + GeoSteel® Grid 200.....	BT.MCA.GS-xx
6 provini rinforzati con malta bastarda + GeoSteel® Grid 200.....	BT.MBA.GS-xx

5.5.1. Risultati

Dai dati registrati durante le prove sono stati ricavati i grafici carico-freccia (spostamento massimo in mezzeria). La freccia è stata valutata come media degli spostamenti registrati dai due trasduttori centrali.

Data la forza F , applicata dalla macchina di prova, la trazione massima T_{max}^{IV} nel rinforzo è stata ottenuta in modo indiretto attraverso l'equilibrio tra il momento interno ed il momento in mezzeria (Fig. 5.65):

$$T_{max}^{IV} = \frac{F_{max}^{IV} d}{2h} \quad (5.17)$$

Conoscendo la forza di trazione nel rinforzo e disponendo delle letture dell'estensimetro omega, sono state valutate la tensione massima f_r^{IV} , la massima deformazione locale ε_{rg}^{IV} e la massima deformazione ε_r^{IV} attraverso l'applicazione delle seguenti relazioni:

$$f_r^{IV} = \frac{T_{max}^{IV}}{A_f} \quad (5.18)$$

$$\varepsilon_{rg}^{IV} = \frac{g_{max}^{IV}}{l_e} \quad (5.19)$$

$$\varepsilon_r^{IV} = \frac{T_{max}^{IV}}{A_f E_f} \quad (5.20)$$

Dove g_{max}^{IV} è pari alla metà dello scorrimento totale registrato dall'estensimetro omega (Fig. 5.65).

In aggiunta, sono stati valutati i coefficienti di sfruttamento delle proprietà a trazione della rete di fibra (f_r^{IV}/f_f) e del composito (f_r^{IV}/f_r). Duttilità cinematica μ_c , duttilità cinematica disponibile μ_{cd} e rigidità flessionale del provino integro K_f^{IV} e del provino lesionato K_f^{IV} sono state ricavate secondo quanto descritto al paragrafo §5.1 sulla base dei grafici carico- freccia (F-u).

Kerakoll Geocalce® Fino + Kerakoll GeoSteel® Grid 200

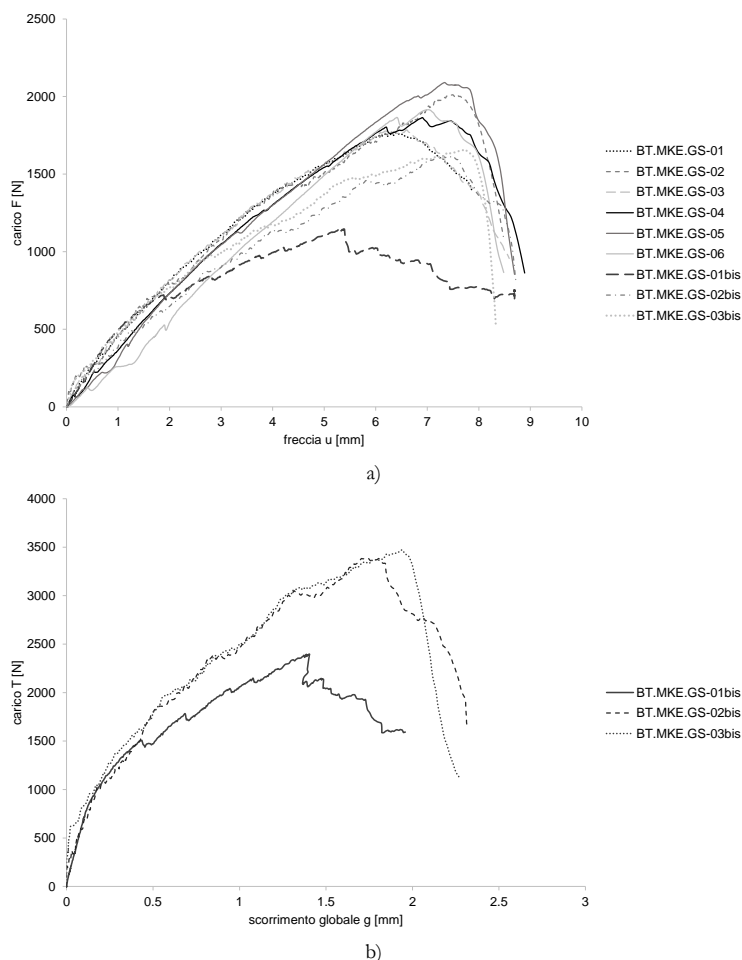


Fig. 5.66. Curve a) carico-freccia (F-u) e b) trazione-scorrimento globale (T-g) relative ai nove provini costituiti da matrice di malta di calce idraulica Kerakoll

Dai dati ottenuti dai test condotti, per ogni provino sono stati costruiti il grafico carico-freccia (Fig. 5.66a); in aggiunta per i tre provini muniti di estensimetro omega sono stati costruiti i grafici carico-scorrimento globale (Fig. 5.66b). Su ogni grafico è stato possibile individuare cinque fasi, contraddistinte da cinque punti significativi, che caratterizzano il comportamento del rinforzo. Ciò ha permesso di costruire un grafico medio carico-freccia ed un grafico medio trazione-scorrimento globale relativo ai tre provini muniti di estensimetro omega. I cinque tratti dei grafici medi sono stati linearizzati per una lettura più agevole (Fig. 5.67 e Tab. 5.36).

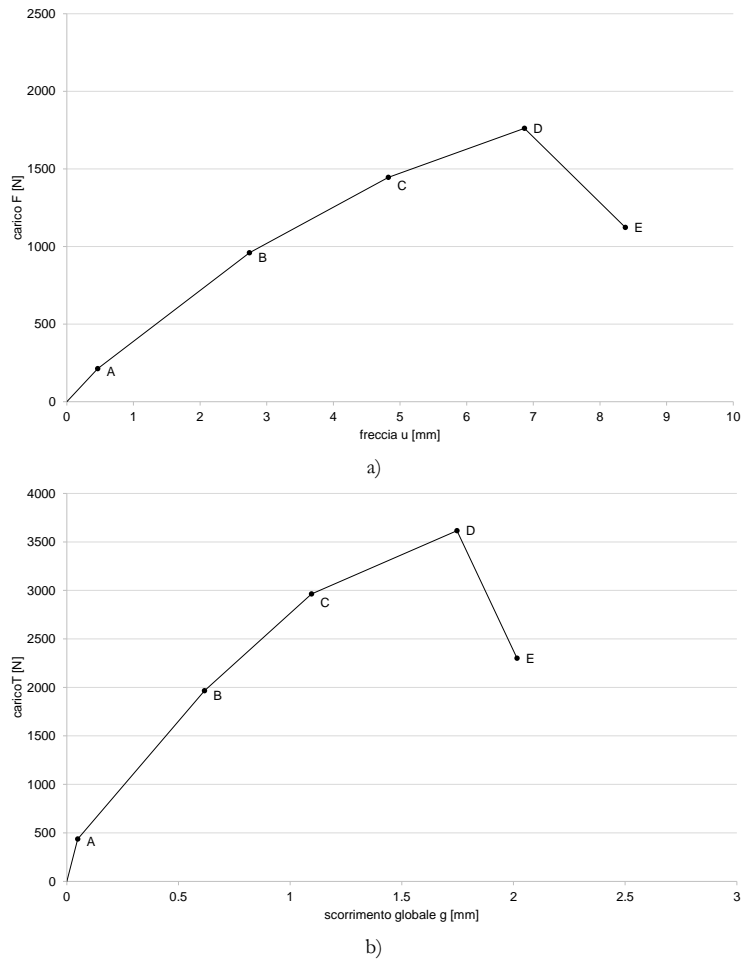


Fig. 5.67. Curve medie a) carico-freccia (F-u) e b) trazione-scorrimento globale (T-g) relative ai provini costituiti da matrice di malta di calce idraulica Kerakoll

Tab. 5.36. Punti caratterizzanti il percorso di equilibrio

punti	F [N]	T [N]	u [mm]	g [mm]
A	213	436	0.46	0.05
B	959	1966	2.74	0.62
C (debonding)	1445	2963	4.82	1.10
D (massimo)	1762	3616	6.87	1.75
E	1123	2301	8.38	2.02

Nota: lo scorrimento globale g è stato valutato come media dei valori ottenuti dai i tre provini dotati di estensimetro omega

- Fase I: fase lineare elastica. Tale fase si conclude con il raggiungimento di un primo stadio (F_a ; u_a), in corrispondenza del quale si apre una lesione trasversale nella mezzeria del provino a partire dalla superficie esterna del composito.
- Fase II: fase di propagazione della prima lesione nello spessore del composito. Al termine di tale fase (F_b ; u_b) la lesione risulta passante il composito.
- Fase III: fase di accrescimento della lesione. All'aumentare dell'abbassamento in mezzeria si assiste all'accrescimento della lesione trasversale e alla formazione di una lesione interlaminare alla terza interfaccia, con conseguente perdita di rigidità del composito. La terza fase termina con il raggiungimento del carico di debonding (F_c ; u_c).

- Fase IV: fase di propagazione del fenomeno di debonding. I multi-filamenti longitudinali scorrono all'interno della matrice, comportando un'ulteriore perdita di rigidità, fino al raggiungimento del valore massimo di carico (F_d ; u_d). L'incremento di carico è dovuto all'effetto ingranamento che si genera tra la superficie scabra della malta e i multi-filamenti durante lo scorrimento di questi ultimi.
- Fase V: fase decrescente. Dopo l'attingimento del carico massimo, si assiste ad una repentina perdita di carico all'aumentare dello scorrimento.

Il termine della prova è stato determinato dalla capacità massima della strumentazione per la misurazione degli spostamenti.

Dall'osservazione dei provini a test ultimati è stato verificato che per i provini BT.KE.GS-01bis, 02bis e 03bis, contraddistinti da una maggiore perdita di rigidità durante la terza e la quarta fase ed un carico di picco inferiore, la delaminazione ha raggiunto un'estensione massima maggiore (155 mm circa) rispetto agli altri provini (100 mm circa).

Tutti i provini si sono caratterizzati per il raggiungimento della rottura di alcuni filamenti esterni dei multi-filamenti, con un coefficiente di sfruttamento della resistenza della fibra pari ad 1.28. Tale crisi si è localizzata in corrispondenza della lesione trasversale di mezzeria dove il carico è stato trasferito dai soli multi-filamenti di fibra.

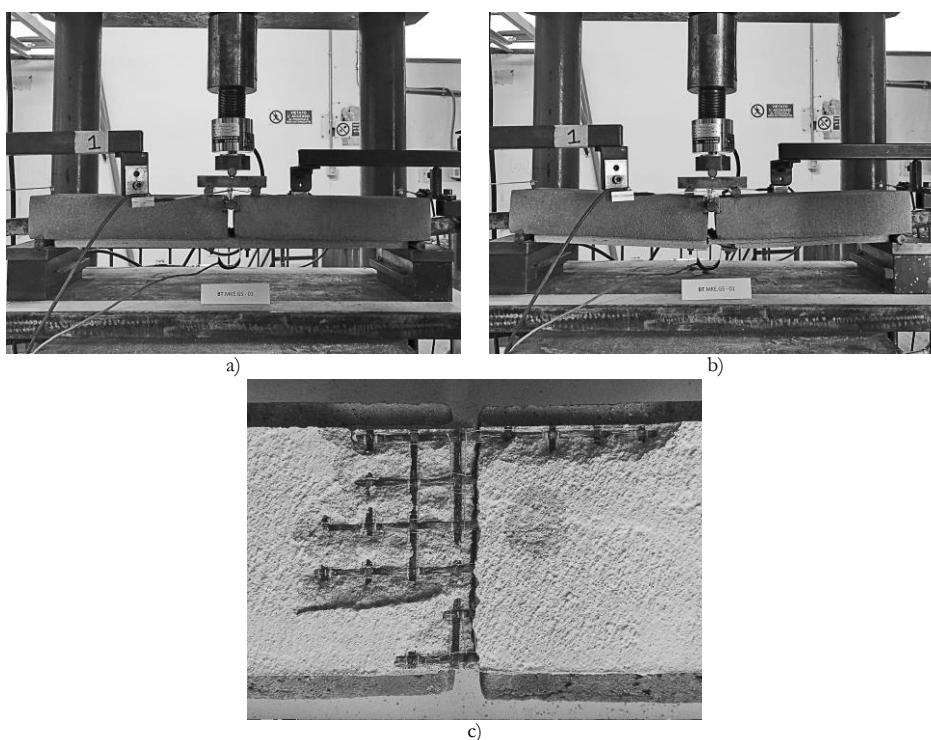


Fig. 5.68. Provino BT.MKE.GS-01bis: a) inizio della prova; b) termine della prova; c) particolare

In alcuni casi è stato possibile rimuovere parte del layer esterno di matrice, permettendo di appurare che i multi-filamenti longitudinali hanno subito degli scorrimenti relativi rispetto a quelli trasversali, i quali sono permasti adesi al primo strato di matrice nella loro posizione originale.

Al termine dei test la matrice ha mantenuto una perfetta adesione con il supporto in laterizio.

In tabella 5.37 sono stati riportati i risultati per ogni provino testato e i risultati medi con i rispettivi valori della deviazione standard e del coefficiente di variazione.

Tab. 5.37. Risultati prove Beam Test condotte su provini costituiti da composito con matrice di calce idraulica Kerakoll

provino	F_{max}^{IV} [N]	T_{max}^{IV} [N]	T_{db}^{IV} [N]	f_r^{IV} [MPa]	u_{max} [mm]	g_{max}^{IV} [mm]	g_{db}^{IV} [mm]	ε_{rg}^{IV}	ε_r^{IV}	K_i^{IV} [MPa]	K_l^{IV} [MPa]	μ_c	μ_{cd}	f_t^V/f_r	f_t^V/f_r	crisi
BT.MKE.GS-01	1768	3553	2660	1089	6.40	-	-	-	0.018	558	367	2.02	1.14	1.26	1.38	D+F
BT.MKE.GS-02	2011	3984	2952	1221	7.50	-	-	-	0.020	1012	368	3.77	1.07	1.41	1.55	D+F
BT.MKE.GS-03	1781	3725	2804	1141	6.27	-	-	-	0.019	694	372	2.44	1.16	1.32	1.45	D+F
BT.MKE.GS-01bis	1146	2397	2104	734	5.39	1.41	1.08	0.056	0.012	523	305	2.46	1.01	0.85	0.93	D+F
BT.MKE.GS-02bis	1620	3389	2340	1038	7.28	1.84	0.85	0.074	0.017	550	263	2.47	1.07	1.20	1.32	D+F
BT.MKE.GS-03bis	1660	3472	3012	1064	7.72	2.00	1.36	0.080	0.018	1182	307	5.50	1.04	1.23	1.35	D+F
BT.MKE.GS-04	1865	3891	3690	1192	6.91	-	-	-	0.020	371	344	1.38	1.14	1.38	1.52	D+F
BT.MKE.GS-05	2090	4285	3713	1313	7.33	-	-	-	0.022	300	351	1.05	1.08	1.52	1.67	D+F
BT.MKE.GS-06	1915	3849	3393	1179	7.01	-	-	-	0.019	261	316	0.96	1.10	1.36	1.50	D+F
media	1762	3616	2963	1108	6.87	1.75	1.10	0.070	0.018	606	333	2.45	1.09	1.28	1.41	
Dev.St.	277	535	561	164	0.73	0.31	0.25	0.012	0.003	313	37	1.44	0.05	0.19	0.21	
Co.V.	16%	15%	19%	15%	1%	18%	23%	18%	15%	52%	11%	59%	5%	15%	15%	

F_{max}^{IV} =carico massimo; T_{max}^{IV} =trazione massima nel composito (Eq. 5.17); T_{db}^{IV} =trazione di debonding nel composito; f_r^V =tensione massima nella rete di fibra; u_{max} =abbassamento massimo in mezzeria; g_{max}^{IV} =scorrimento globale massimo valutato mediante le letture dell'estensimetro ad omega (Fig. 5.65); g_{db}^{IV} =scorrimento globale di debonding valutato mediante le letture dell'estensimetro ad omega (Fig. 5.65); ε_{rg}^{IV} =deformazione massima (Eq. 5.19); ε_r^{IV} =deformazione massima (Eq. 5.20); K_i^{IV} =rigidezza del provino integro (Eq. 5.2); K_l^{IV} =rigidezza del provino lesionato (Eq. 5.3); μ_c =duttilità cinematica (Eq. 5.4); μ_{cd} =duttilità cinematica disponibile (Eq. 5.4); f_t^V/f_r =sfruttamento delle proprietà a trazione della rete di fibra; f_t^V/f_r =sfruttamento delle proprietà a trazione del composito; f_r =resistenza a trazione della rete di fibra (§ 4.4); f_t =resistenza a trazione del composito (§ 4.5); *crisi*=modalità di crisi: F rottura a trazione della rete di fibra interna alla matrice, D scorrimento fibra-matrice (Fig. 5.2)

I coefficienti di variazione sono risultati contenuti, ad eccezione della rigidezza del provino integro K_i^{IV} e della duttilità cinematica μ_c . La formazione della lesione trasversale ha indotto un dimezzamento della rigidezza dei provini, da cui è derivata una duttilità cinematica μ_c pari a 2.55. La crisi è stata raggiunta per rottura di alcuni filamenti esterni dei multi-filamenti, successivamente ad uno scorrimento globale medio g_{max} di 1.75 mm ed un abbassamento medio in mezzeria di 6.87 mm. La modalità di crisi ha provocato una repentina perdita di carico da cui è conseguita una duttilità cinematica disponibile μ_{cd} pressoché nulla (pari a 1.09).

Malta di cemento + GeoSteel® Grid 200

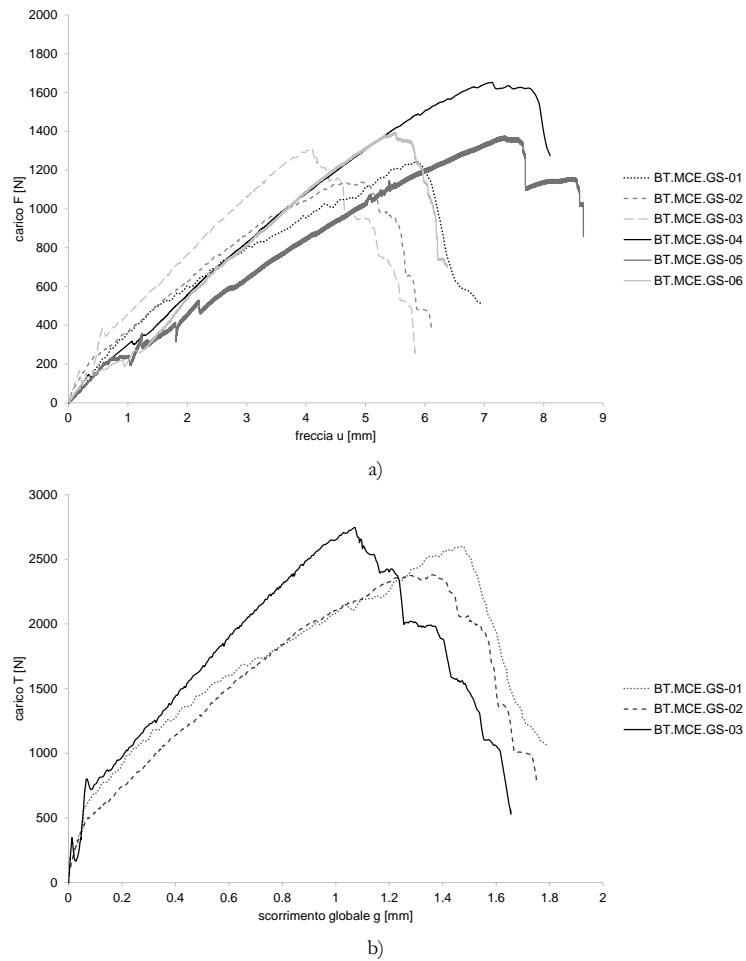


Fig. 5.69. Curve a) carico-freccia ($F-u$) e b) trazione-scorrimento globale ($T-g$) relative ai nove provini costituiti da matrice di malta cementizia

Analogamente a quanto effettuato con i provini con matrice Kerakoll, dai dati sperimentali ottenuti per ogni provino sono stati costruiti il grafico carico-freccia (Fig. 5.69a); in aggiunta per i tre provini muniti di estensimetro omega sono stati costruiti i grafici trazione-scorrimento globale (Fig. 5.69b). Su ogni grafico sono stati individuati cinque punti significativi, che individuano le cinque fasi del percorso di equilibrio descritto dal provino. Ciò ha permesso di costruire un grafico medio carico-freccia ($F-u$) ed un grafico medio trazione nel composito-scorrimento globale ($T-g$). I cinque tratti dei grafici medi sono stati linearizzati per una lettura più agevole (Fig. 5.70 e Tab. 5.38).

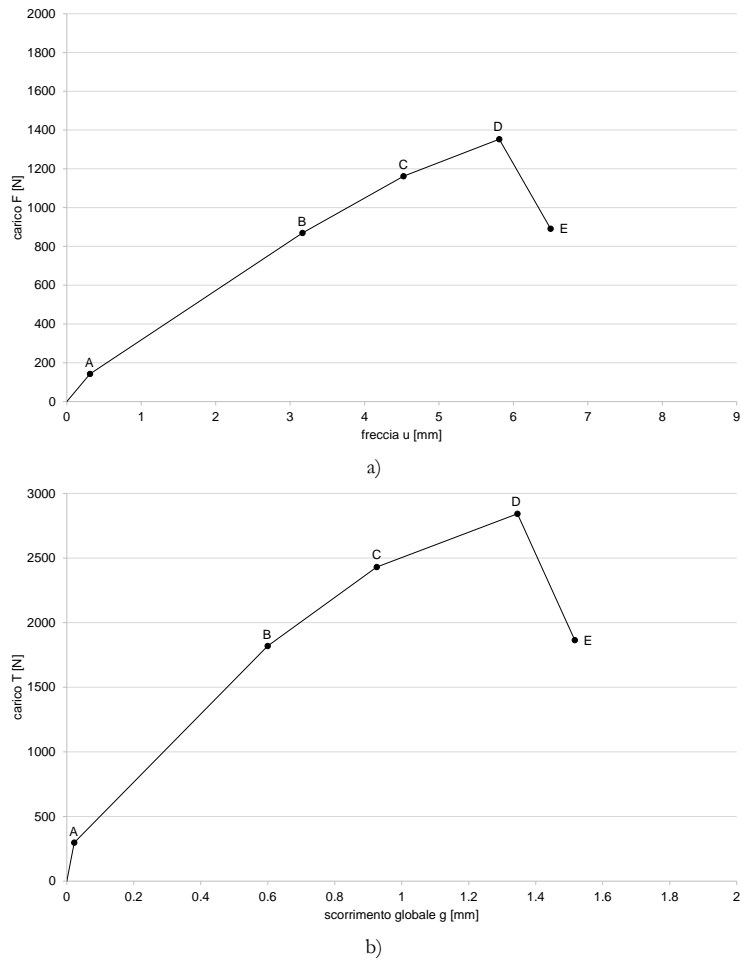


Fig. 5.70. Curve medie a) carico-freccia (F-u) e b) trazione-scorrimento globale (T-g) relative ai provini costituiti da matrice di malta cementizia

Tab. 5.38. Punti caratterizzanti il percorso di equilibrio

punti	F [N]	T [N]	u [mm]	g [mm]
A	143	298	0.31	0.02
B	870	1819	3.17	0.60
C (debonding)	1162	2430	4.52	0.93
D (massimo)	1353	2842	5.81	1.35
E	892	1865	6.50	1.52

Nota: lo scorrimento globale g è stato valutato come media dei valori ottenuti dai tre provini dotati di estensimetro omega

- Fase I: fase lineare elastica. Tale fase si conclude con il raggiungimento di un primo stadio (F_a ; u_a), in corrispondenza del quale si apre una lesione trasversale nella mezzeria del provino a partire dalla superficie esterna del composito.
- Fase II: fase di propagazione della prima lesione nello spessore del composito. Al termine di tale fase (F_b ; u_b) la lesione risulta passante il composito.
- Fase III: fase di accrescimento della prima lesione. All'aumentare dell'abbassamento in mezzeria si assiste all'accrescimento della lesione trasversale con conseguente perdita di rigidità del composito. La terza fase termina con il raggiungimento del carico di debonding (F_c ; u_c). A differenza del caso di matrice Kerakoll, solo tre provini (BT.MCE.GS-04, 05 e 06) sono stati

caratterizzati dalla formazione di una lesione interlaminare in corrispondenza della terza interfaccia, la quale si è propagata dalla mezzeria verso gli estremi destro e sinistro del composito, fino al raggiungimento di un'estensione massima di circa 70 mm.

- Fase IV: fase di propagazione del fenomeno di debonding. I multi-filamenti longitudinali scorrono all'interno della matrice, comportando un'ulteriore perdita di rigidità, fino al raggiungimento del valore massimo di carico (F_d ; u_d). L'incremento di carico è dovuto all'effetto ingranamento che si genera tra la superficie scabra della malta e i multi-filamenti durante lo scorrimento di questi ultimi.
- Fase V: fase decrescente.

Il termine della prova è stato determinato dalla capacità massima della strumentazione per la misurazione degli spostamenti.

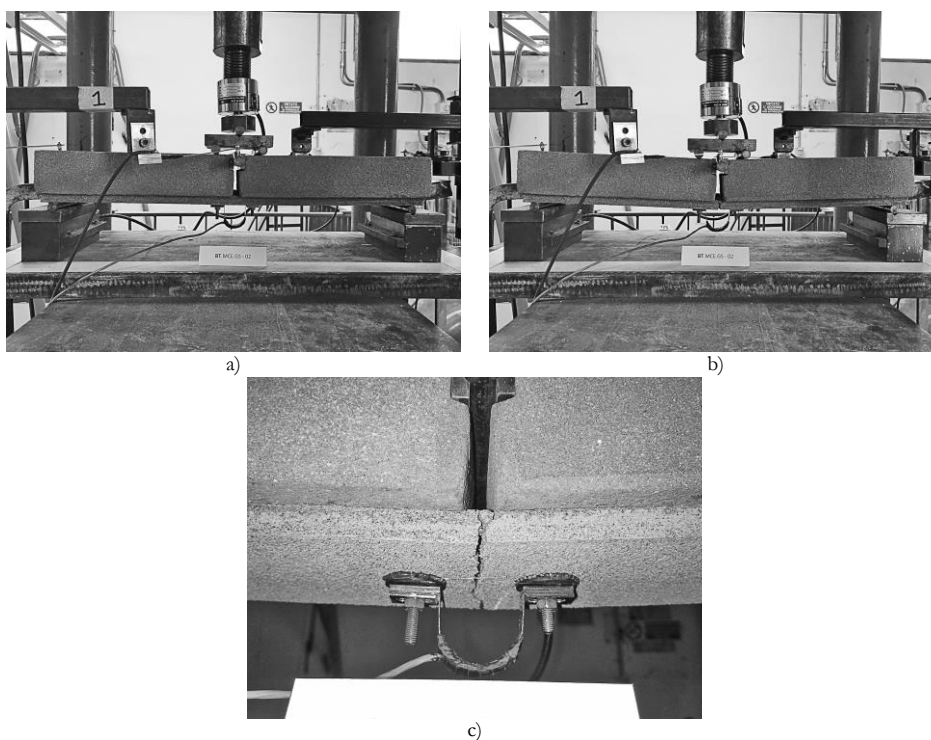


Fig. 5.71. Provino BT.MCE.GS-02: a) inizio della prova; b) termine della prova; c) particolare della lesione trasversale

A prove ultimate non è stato possibile asportare lo strato esterno di matrice senza danneggiare la rete di fibra. Nonostante ciò è stato constatato che non è stata raggiunta la crisi a trazione della rete di fibra.

Al termine dei test la matrice ha mantenuto una perfetta adesione con il substrato in laterizio.

In tabella 5.39 sono stati riportati i risultati per ogni provino testato e i risultati medi con i rispettivi valori della deviazione standard e del coefficiente di variazione.

Tab. 5.39. Risultati prove Beam Test condotte su provini costituiti da composito con matrice di malta cementizia

provino	F_{max}^{IV} [N]	T_{max}^{IV} [N]	T_{db}^{IV} [N]	f_r^{IV} [MPa]	u_{max} [mm]	g_{max}^{IV} [mm]	g_{db}^{IV} [mm]	ε_{ig}^{IV}	ε_r^{IV}	K_i^{IV} [MPa]	K_l^{IV} [MPa]	μ_c	μ_{cd}	f^V/f_r	f^V/f_r	crisi
BT.MCE.GS-01	1242	2599	2139	796	5.88	1.61	1.02	0.064	0.013	346	231	1.64	1.04	0.92	1.29	D
BT.MCE.GS-02	1140	2384	2012	730	4.90	1.35	0.91	0.054	0.012	675	256	2.90	1.06	0.84	1.18	D
BT.MCE.GS-03	1312	2744	2370	841	4.11	1.07	0.84	0.043	0.014	885	306	2.77	1.07	0.97	1.36	D
BT.MCE.GS-04	1652	3528	3100	1081	7.12	-	-	-	0.018	427	266	2.77	1.12	1.25	1.75	D
BT.MCE.GS-05	1376	2879	2381	882	7.34	-	-	-	0.015	322	209	1.84	1.04	1.02	1.43	D
BT.MCE.GS-06	1396	2920	2578	894	5.51	-	-	-	0.015	436	306	1.72	1.06	1.03	1.45	D
media	1353	2842	2430	871	5.81	1.35	0.93	0.054	0.014	515	262	2.27	1.07	1.01	1.41	
Dev.St.	174	389	384	119	1.25	0.27	0.09	0.011	0.002	220	39	0.60	0.03	0.14	0.19	
Co.V.	13%	14%	16%	14%	22%	20%	10%	20%	14%	43%	15%	26%	3%	14%	14%	

F_{max}^{IV} =carico massimo; T_{max}^{IV} =trazione massima nel composito (Eq. 5.17); T_{db}^{IV} =trazione di debonding nel composito; f_r^{IV} =tensione massima nella rete di fibra; u_{max} =abbassamento massimo in mezzzeria; g_{max}^{IV} =scorrimento globale massimo valutato mediante le letture dell'estensimetro ad omega (Fig. 5.65); g_{db}^{IV} =scorrimento globale di debonding valutato mediante le letture dell'estensimetro ad omega (Fig. 5.65); ε_{ig}^{IV} =deformazione massima (Eq. 5.19); ε_r^{IV} =deformazione massima (Eq. 5.20); K_i^{IV} =rigidezza del provino integro (Eq. 5.2); K_l^{IV} =rigidezza del provino lesionato (Eq. 5.3); μ_c =duttilità cinematica (Eq. 5.4); μ_{cd} =duttilità cinematica disponibile (Eq. 5.4); f^V/f_r =sfruttamento delle proprietà a trazione della rete di fibra; f^V/f_r =sfruttamento delle proprietà a trazione del composito; f_r =resistenza a trazione della rete di fibra (§ 4.4); f_r =resistenza a trazione del composito (§ 4.5); *crisi*=modalità di crisi: D crisi per scorrimento fibra-matrice (Fig. 5.2)

I coefficienti di variazione hanno assunto valori contenuti, ad eccezione dell'abbassamento u_{max} e della duttilità cinematica μ_c . Il dimezzamento della rigidezza dovuto alla fessurazione del provino ha permesso il raggiungimento di una duttilità cinematica μ_c pari a 2.27, mentre la repentina perdita di carico post picco ha determinato una duttilità cinematica disponibile μ_{cd} pressoché nulla ($\mu_{cd}=1.07$). Nonostante il perseguimento di un coefficiente medio di sfruttamento della resistenza della fibra pari a 1.01, non è stata raggiunta una crisi per rottura della rete di fibra.

Malta di calce idraulica + GeoSteel® Grid 200

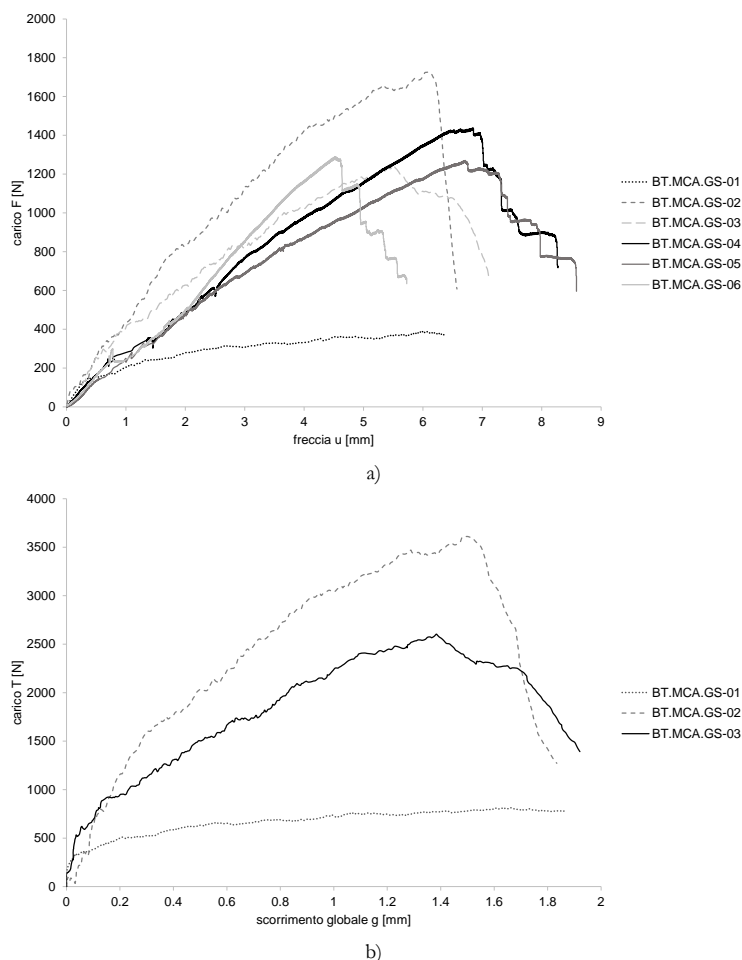


Fig. 5.72. Curve a) carico-freccia (F-u) e b) trazione nel rinforzo-scorrimento globale (T-g) relative ai nove provini costituiti da matrice di malta di calce idraulica

Per ogni provino sono stati costruiti il grafico carico-freccia (Fig. 5.72a); in aggiunta per i tre provini muniti di estensimetro omega sono stati costruiti i grafici trazione nel rinforzo-scorrimento globale (Fig. 5.72b). Su ogni grafico sono stati individuati cinque punti significativi, che individuano le cinque fasi del percorso di equilibrio descritto da ogni provino. Ciò ha permesso di costruire un grafico medio carico-freccia (F-u) ed un grafico medio trazione-scorrimento globale (T-g). I cinque tratti del grafico medio sono stati linearizzati per una lettura più agevole (Fig. 5.73 e Tab. 5.40).

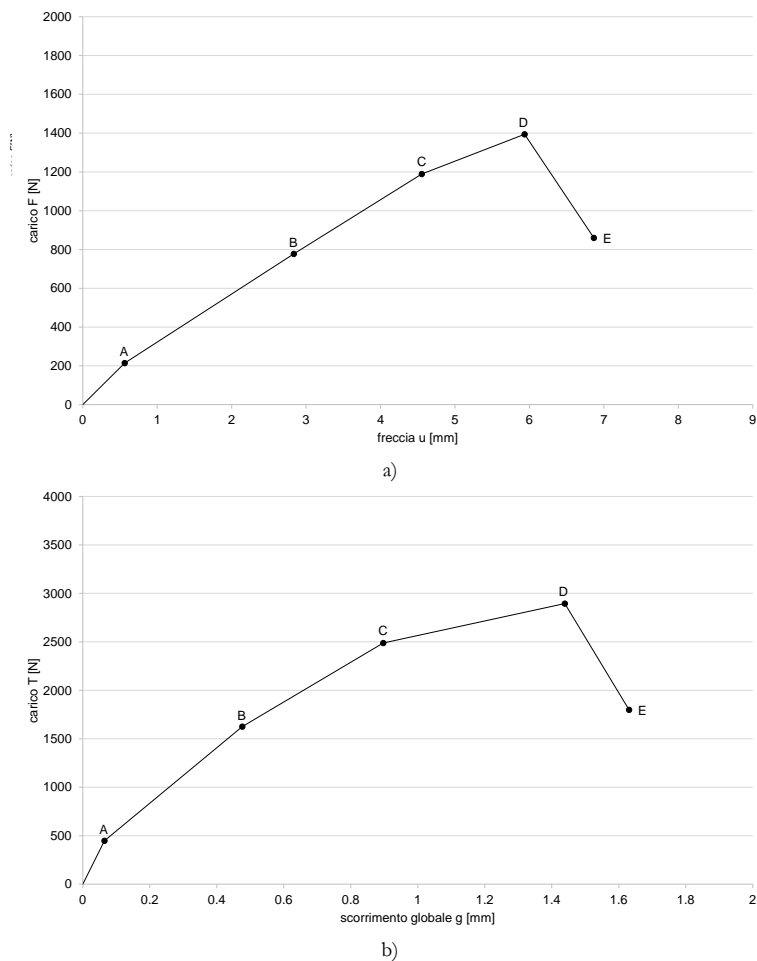


Fig. 5.73. Curve medie a) carico-freccia (F-u) e b) trazione nel rinforzo-scorrimento globale (T-g) relative ai provini costituiti da matrice di malta di calce idraulica

Tab. 5.40. Punti caratterizzanti il percorso di equilibrio

punti	F [N]	T [N]	u [mm]	g [mm]
A	214	448	0.56	0.06
B	777	1626	2.84	0.48
C (debonding)	1189	2488	4.55	0.90
D (massimo)	1394	2894	5.94	1.44
E	860	1798	6.87	1.63

Nota: lo scorrimento globale g è stato valutato come media dei valori ottenuti dai tre provini dotati di estensimetro omega

- Fase I: fase lineare elastica. Tale fase si conclude con il raggiungimento di un primo stadio (F_a ; u_a), in corrispondenza del quale si apre una lesione trasversale nella mezzeria del provino a partire dalla superficie esterna del composito.
- Fase II: fase di propagazione della prima lesione nello spessore del composito. Al termine di tale fase (F_b ; u_b) la lesione risulta passante il composito.
- Fase III: fase di accrescimento della prima lesione. All'aumentare dell'abbassamento in mezzeria si assiste all'accrescimento della lesione trasversale con conseguente perdita di rigidità del composito. La terza fase termina con il raggiungimento del carico di debonding (F_c ; u_c). Due provini (BT.MCA.GS-02 e 04) hanno manifestato la formazione di una lesione longitudinale in

corrispondenza della terza interfaccia, la quale si è propaga dalla mezzeria verso gli estremi destro e sinistro del composito.

- Fase IV: fase di propagazione del fenomeno di debonding. I multi-filamenti longitudinali scorrono all'interno della matrice, comportando un'ulteriore perdita di rigidità, fino al raggiungimento del valore massimo di carico (F_d ; u_d). L'incremento di carico è dovuto all'effetto ingranamento che si genera tra la superficie scabrosa della malta e i multi-filamenti durante lo scorrimento di questi ultimi.
- Fase V: fase decrescente.

Il termine della prova è stato determinato dalla capacità massima della strumentazione per la misurazione degli spostamenti.

A prove ultimate non è stato possibile asportare lo strato esterno di matrice senza danneggiare la rete di fibra. Nonostante ciò è stato constatato che non è stata raggiunta la crisi a trazione della rete di fibra.

Al termine dei test la matrice ha mantenuto una perfetta adesione con il substrato in laterizio.

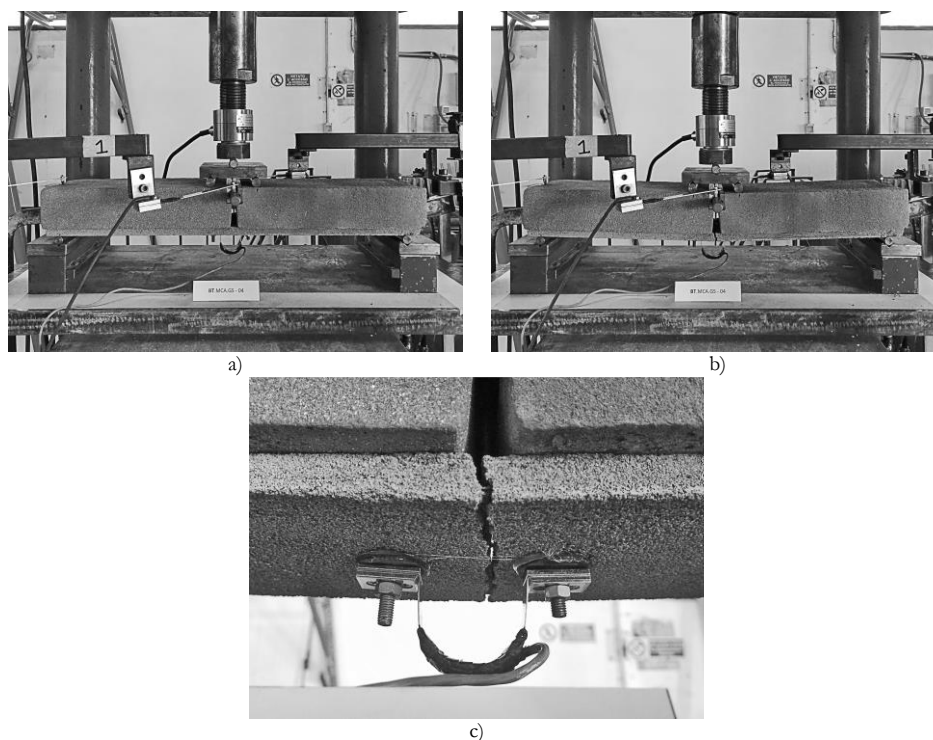


Fig. 5.74. Provino BT.MCA.GS-04: a) inizio della prova; b) termine della prova; c) particolare della lesione trasversale

Il provino BT.MCA.GS-01 ha mostrato un comportamento diverso rispetto agli altri provini, suddivisibile in sole due fasi: dopo la formazione della lesione trasversale, ovvero al termine della prima fase lineare, sono stati registrati incrementi di scorrimento dei multi-filamenti longitudinali seguiti da un esiguo incremento di carico, con propagazione di una lesione interfacciale fino ad un'estensione di 250 mm. La crisi sopraggiunta per scorrimento fibra-matrice con completa delaminazione alla terza interfaccia, non ha permesso la registrazione di una fase terminale discendente. Dato il comportamento differente e gli esigui valori di carico

raggiunti, riconducibili a difetti di produzione del provino, quest'ultimo è stato escluso dalla valutazione dei risultati medi.

In tabella 5.41 sono stati riportati i risultati per ognuno dei 6 provini testati.

Tab. 5.41. Risultati prove Beam Test condotte su provini costituiti da composito con matrice di malta di calce idraulica

provino	F_{max}^{IV} [N]	T_{max}^{IV} [N]	T_{db}^{IV} [N]	f_r^{IV} [MPa]	u_{max} [mm]	g_{max}^{IV} [mm]	g_{db}^{IV} [mm]	ϵ_{rg}^{IV}	ϵ_r^{IV}	K_i^{IV} [MPa]	K_l^{IV} [MPa]	μ_c	μ_{cd}	f_r^{IV}/f_r	f_r^{IV}/f_r	crisi
BT.MCA.GS-01	388	812	647	249	6.07	1.41	0.54	0.057	0.004	449	125	7.01	-	0.29	0.43	D
BT.MCA.GS-02	1726	3610	2998	553	6.10	1.51	0.94	0.063	0.018	520	494	1.84	1.03	1.28	1.93	D
BT.MCA.GS-03	1245	2604	2079	399	5.50	1.37	0.86	0.060	0.013	500	246	2.21	1.06	0.92	1.39	D
BT.MCA.GS-04	1438	3009	2560	461	6.85	-	-	-	0.015	332	245	1.58	1.02	1.07	1.60	D
BT.MCA.GS-05	1271	2605	2433	399	6.71	-	-	-	0.013	258	213	1.36	1.09	0.92	1.39	D
BT.MCA.GS-06	1290	2644	2369	405	4.53	-	-	-	0.013	319	267	1.12	1.03	0.94	1.41	D
media	1394	2894	2488	443	5.94	1.44	0.90	0.061	0.015	386	293	1.62	1.05	1.03	1.54	
Dev.St.	200	435	335	67	0.95	0.10	0.05	0.002	0.002	117	114	0.42	0.03	0.15	0.23	
Co.V.	14%	15%	13%	15%	16%	7%	6%	3%	15%	30%	39%	26%	2%	15%	15%	

Note: in grigio sono riportati i risultati relativi ai provini esclusi dalla valutazione dei risultati medi

F_{max}^{IV} =carico massimo; T_{max}^{IV} =trazione massima nel composito (Eq. 5.17); T_{db}^{IV} =trazione di debonding nel composito; f_r^{IV} =tensione massima nella rete di fibra; u_{max} =abbassamento massimo in mezzzeria; g_{max}^{IV} =scorrimento globale massimo valutato mediante le letture dell'estensimetro ad omega (Fig. 5.65); g_{db}^{IV} =scorrimento globale di debonding valutato mediante le letture dell'estensimetro ad omega (Fig. 5.65); ϵ_{rg}^{IV} =deformazione massima (Eq. 5.19); ϵ_r^{IV} =deformazione massima (Eq. 5.20); K_i^{IV} =rigidezza del provino integro (Eq. 5.2); K_l^{IV} =rigidezza del provino lesionato (Eq. 5.3); μ_c =duttilità cinematica (Eq. 5.4); μ_{cd} =duttilità cinematica disponibile (Eq. 5.4); f_r^{IV}/f_r =sfruttamento delle proprietà a trazione della rete di fibra; f_r^{IV}/f_r =sfruttamento delle proprietà a trazione del composito; f_r =resistenza a trazione della rete di fibra (§ 4.4); f_r =resistenza a trazione del composito (§ 4.5); *crisi*=modalità di crisi: D crisi per scorrimento fibra-matrice (Fig. 5.2)

Anche in questo caso sono stati ottenuti coefficienti di variazione contenuti, ad eccezione delle rigidezze K_i^{IV} e K_l^{IV} e della duttilità cinematica μ_c . A differenza delle due tipologie di provini analizzate in precedenza, i provini con malta di calce idraulica si sono caratterizzati per una riduzione di rigidezza inferiore, passando dai 386 MPa del provino integro ai 293 MPa del provino lesionato. Ciò ha determinato il raggiungimento di una duttilità cinematica μ_c minore, e pari a 1.62. Data la repentina perdita di carico post picco, la duttilità cinematica disponibile μ_{cd} è risultata pressoché nulla, attestandosi su un valore medio di 1.05. Il carico massimo di trazione, così come la tensione di trazione massima nel composito, ha raggiunto un valore medio di poco superiore a quello dei provini con malta cementizia. Da ciò è derivata una capacità di sfruttamento della resistenza della fibra simile e pari ad 1.03.

Malta bastarda + GeoSteel® Grid 200

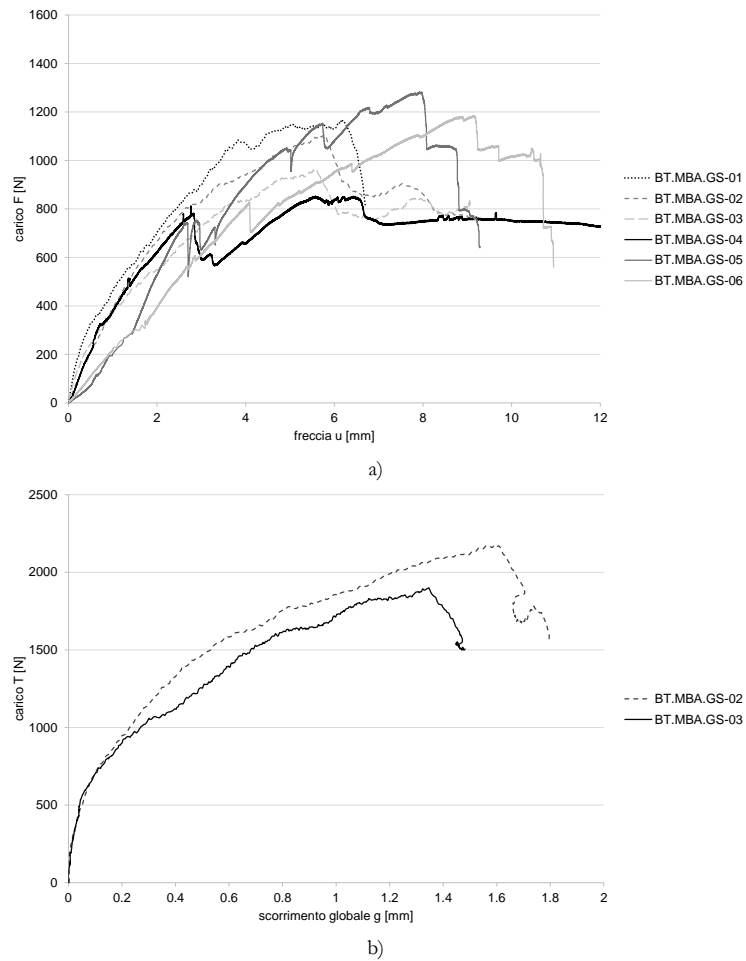


Fig. 5.75. Curve a) carico-freccia (F-u) e b) trazione nel composito-scorrimento globale (T-g) relative ai nove provini costituiti da matrice di malta bastarda

Per ogni provino sono stati tracciati il grafico carico-freccia (Fig. 5.75a); in aggiunta per i due provini muniti di estensimetro omega sono stati costruiti i grafici trazione nel rinforzo-scorrimento globale (Fig. 5.75b). Su ogni grafico sono stati individuati cinque punti significativi, che individuano le cinque fasi del percorso di equilibrio descritto da ogni provino. Ciò ha permesso di costruire un grafico medio carico-freccia (F-u) ed un grafico medio trazione-scorrimento globale (T-g). I cinque tratti dei grafici medi sono stati linearizzati per una lettura più agevole (Fig. 5.76 e Tab. 5.42).

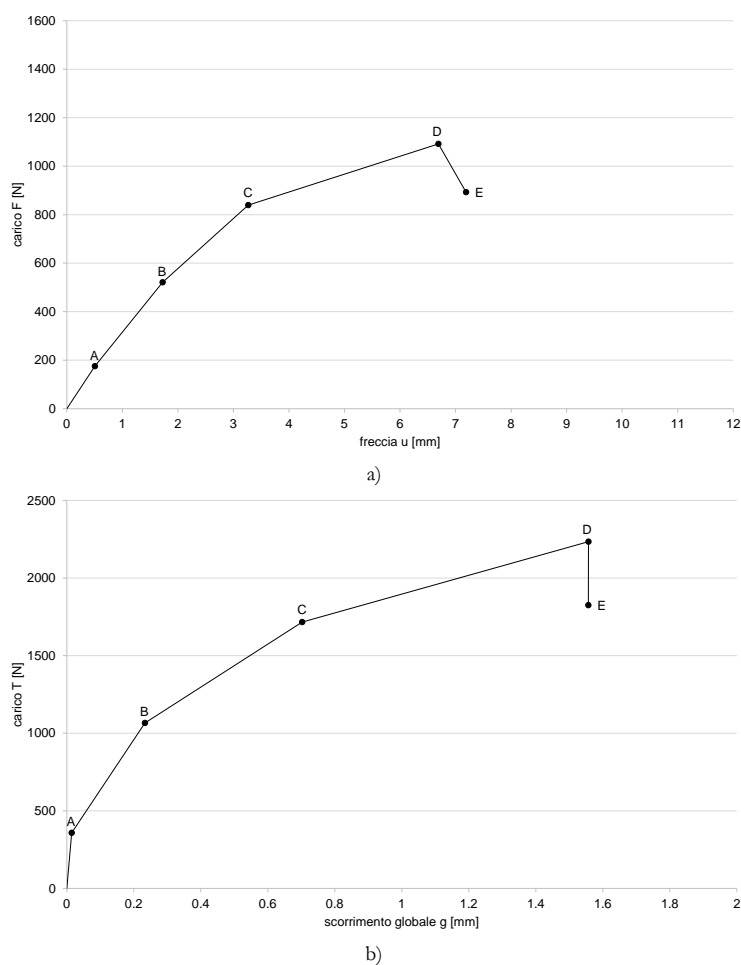


Fig. 5.76. Curve medie a) carico-freccia (F-u) e b) trazione nel rinforzo-freccia (T-g) relative ai provini costituiti da matrice di malta bastarda

Tab. 5.42. Punti caratterizzanti il percorso di equilibrio

punti	F [N]	T [N]	u [mm]	g [mm]
A	175	358	0.51	0.01
B	521	1065	1.73	0.23
C (debonding)	839	1716	3.27	0.70
D (massimo)	1092	2235	6.69	1.56
E	893	1825	7.19	1.56

Nota: lo scorrimento globale g è stato valutato come media dei valori ottenuti dai due provini dotati di estensimetro omega

- Fase I: fase lineare elastica. Tale fase si conclude con il raggiungimento di un primo stadio (F_a ; u_a), in corrispondenza del quale si apre una lesione trasversale nella mezzeria del provino a partire dalla superficie esterna del composito.
- Fase II: fase di propagazione della prima lesione nello spessore del composito. Al termine di tale fase (F_b ; u_b) la lesione risulta passante il composito.
- Fase III: fase di accrescimento della prima lesione. All'aumentare dell'abbassamento in mezzeria si assiste all'accrescimento della lesione trasversale con conseguente perdita di rigidità del composito. La terza fase termina con il raggiungimento del carico di debonding (F_c ; u_c). I provini BT.MBA.GS-03, 04, 05 e 06 durante la quarta fase hanno manifestato la formazione di una lesione

interlaminare in corrispondenza della terza interfaccia, la quale si è propagata dalla mezzeria verso gli estremi destro e/o sinistro del composito (Fig. 5.74c).

- Fase IV: fase di propagazione del fenomeno di debonding. I multi-filamenti longitudinali scorrono all'interno della matrice, comportando un'ulteriore perdita di rigidità, fino al raggiungimento del valore massimo di carico (F_d ; u_d). L'incremento di carico è dovuto all'effetto ingranamento che si genera tra la superficie scabra della malta e i multi-filamenti durante lo scorrimento di questi ultimi.
- Fase V: fase decrescente.

Il termine della prova è stato determinato dalla capacità massima della strumentazione per la misurazione degli spostamenti.

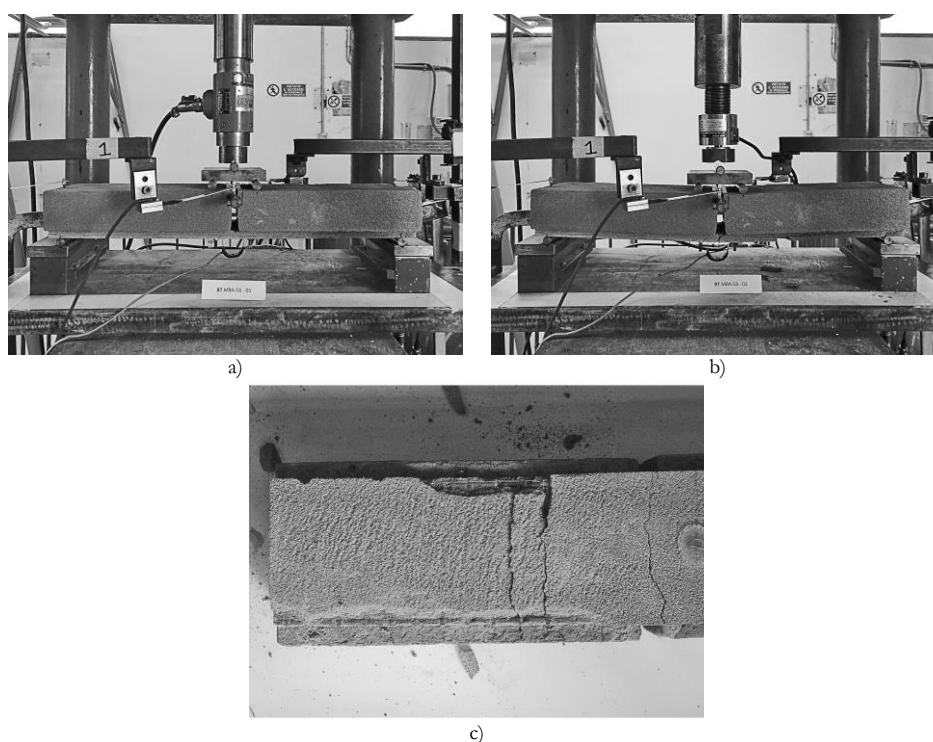


Fig. 5.74. Provino BT.MBA.GS-03: a) inizio della prova; b) termine della prova; c) particolare del provino a prova ultimata

I provini BT.MBA.GS-04, 05 e 06, a causa della propagazione della delaminazione (fino ad un massimo di 160 mm dalla lesione trasversale in mezzeria) e delle proprietà sia meccaniche sia di adesione inferiori della malta bastarda, si sono contraddistinti per il distacco parziale del layer esterno di matrice senza danneggiamento della rete di fibra. Dall'osservazione di quest'ultima è risultato uno scorrimento differenziale dei sei multi-filamenti longitudinali, mentre quelli trasversali hanno assunto una deformazione parabolica: la maglia centrale della rete di fibra ha mantenuto pressoché invariate le dimensioni originali con i multi-filamenti trasversali adesi al primo layer di matrice (Fig. 5.75). Il fenomeno si è propagato per una lunghezza massima di circa 35 mm dalla lesione trasversale. È stato, quindi, dedotto che la deformata dei multi-filamenti di trama è stata la conseguenza di un minore contributo in resistenza allo scorrimento alle

estremità del composito da parte della matrice, la quale è risultata soggetta ad una delaminazione che si è propagata da tali estremità verso la zona centrale.



Fig. 5.75. Provino BT.MBA.GS-04: particolare della rete di fibra a prova ultimata

Al termine dei test la matrice ha mantenuto una perfetta adesione con il supporto in laterizio, ad eccezione del provino BT.MBA.GS-03 il quale ha manifestato una delaminazione alla prima interfaccia, propagatasi fino ad una distanza di circa 80 mm dalla lesione trasversale, nonché una delaminazione alla terza interfaccia, sviluppatasi per tutta la lunghezza di uno dei mattoni di supporto (250 mm).

In tabella 5.43 sono stati riportati i risultati per ogni provino testato e i risultati medi con i rispettivi valori della deviazione standard e del coefficiente di variazione.

Tab. 5.43. Risultati prove Beam Test condotte su provini costituiti da composito con matrice di malta bastarda

provino	F_{max}^{IV} [N]	T_{max}^{IV} [N]	T_{db}^{IV} [N]	f_r^{IV} [MPa]	u_{max} [mm]	g_{max}^{IV} [mm]	g_{db}^{IV} [mm]	ϵ_{rg}^{IV}	ϵ_r^{IV}	K_i^{IV} [MPa]	K_l^{IV} [MPa]	μ_c	μ_{cd}	f^{IV}/f_r	f^{IV}/f_r	crisi
BT.MBA.GS-01	1165	2388	2213	732	6.19	-	-	0.062	0.012	841	280	4.47	1.05	0.85	-	D
BT.MBA.GS-02	1104	2177	1642	667	5.75	1.66	0.60	0.067	0.011	430	321	2.24	1.04	0.77	-	D
BT.MBA.GS-03	964	1900	1679	582	5.60	1.45	0.80	0.058	0.010	698	309	4.05	1.04	0.67	-	D
BT.MBA.GS-04	853	1784	1596	547	5.58	-	-	-	0.009	455	267	2.97	1.20	0.63	-	D
BT.MBA.GS-05	1283	2683	1515	822	7.92	-	-	-	0.014	214	439	1.32	1.02	0.95	-	D
BT.MBA.GS-06	1184	2476	1651	759	9.12	-	-	-	0.013	219	257	1.69	1.01	0.88	-	D
media	1092	2235	1716	685	6.69	1.56	0.70	0.062	0.011	476	312	2.79	1.06	0.79	-	
Dev.St.	157	347	250	106	1.48	0.15	0.14	0.004	0.002	253	67	1.28	0.07	0.12	-	
Co.V.	14%	15%	15%	15%	22%	10%	20%	7%	17%	53%	21%	46%	7%	15%	-	

F_{max}^{IV} =carico massimo; T_{max}^{IV} =trazione massima nel composito (Eq. 5.17); T_{db}^{IV} =trazione di debonding nel composito; f_r^{IV} =tensione massima nella rete di fibra; u_{max} =abbassamento massimo in mezzeria; g_{max}^{IV} =scorrimento globale massimo valutato mediante le letture dell'estensimetro ad omega (Fig. 5.65); g_{db}^{IV} =scorrimento globale di debonding valutato mediante le letture dell'estensimetro ad omega (Fig. 5.65); ϵ_{rg}^{IV} =deformazione massima (Eq. 5.19); ϵ_r^{IV} =deformazione massima (Eq. 5.20); K_i^{IV} =rigidezza del provino integro (Eq. 5.2); K_l^{IV} =rigidezza del provino lesionato (Eq. 5.3); μ_c =duttilità cinematica (Eq. 5.4); μ_{cd} =duttilità cinematica disponibile (Eq. 5.4); f^{IV}/f_r =sfruttamento delle proprietà a trazione della rete di fibra; f^{IV}/f =sfruttamento delle proprietà a trazione del composito; f_r =resistenza a trazione della rete di fibra (§ 4.4); f =resistenza a trazione del composito (§ 4.5); *crisi*=modalità di crisi: D crisi per scorrimento fibra-matrice (Fig. 5.2)

I risultati hanno manifestato una dispersione contenuta, ad eccezione dell'abbassamento u_{max} , delle rigidezze K_i^{IV} e K_l^{IV} e della duttilità cinematica μ_c , la quale si attesta su un valore di 2.79 a seguito della consistente riduzione di rigidezza dovuta alla formazione della lesione trasversale. Analogamente ai casi precedenti la repentina perdita di carico post picco si è tradotta in una duttilità cinematica pressoché nulla (pari a 1.06). In corrispondenza di un abbassamento di 6.69 mm ed uno scorrimento totale di 1.56 mm, è stato ottenuto

un carico di trazione massimo medio di 2235 N, ovvero una tensione di trazione media di 685 MPa, corrispondente ad uno sfruttamento delle proprietà resistenti della fibra di 0.79.

5.5.2. Osservazioni

I risultati hanno evidenziato una dispersione limitata con Co.V.<20%, ad eccezione dei valori di rigidità K_{IV} e K_{IV} e della duttilità cinematica μ_c . Le proprietà relative al provino integro, come la rigidità iniziale K_{IV} , sono strettamente dipendenti da vari parametri, tra i quali le proprietà della malta (meccaniche e geometriche) nonché il metodo di realizzazione del provino stesso, fattori che giustificano la variabilità di tali risultati (Lignola et al. 2017). Rigidità del provino lesionato K_{IV} e duttilità cinematica μ_c , invece, dipendono principalmente dallo scorrimento fibra-matrice, ovvero dalle proprietà di adesione tra i due materiali costituenti, la quale per compositi fibrorinforzati a matrice inorganica presenta numerosi elementi di variabilità (capacità della matrice di impregnare i multi-filamenti, caratteristiche geometriche e meccaniche delle due fasi e loro imperfezioni, compatibilità tra i materiali costituenti, difetti derivanti dalle operazioni di realizzazione dei provini e del set-up di prova).

La deformazione valutata mediante la media delle letture degli estensimetri clip-on ad omega ε_{rg}^{IV} è risultata maggiore rispetto a quella valutata mediante l'applicazione dell'equazione 5.20. Tale risultato è stato osservato in Sabau et al. (2017) e Carloni et al. (2015) ed attribuito alla non uniforme distribuzione del carico, sia tra i multi-filamenti longitudinali sia all'interno del singolo multi-filamento, a sua volta dipendente da una distribuzione aleatoria delle proprietà di adesione fibra-matrice, ovvero del diverso impregnamento dei singoli multi-filamenti longitudinali (D'Antino et al. 2014, Carloni et al. 2015).

Per un confronto più agevole, in figura 5.76 sono state riportate le curve medie carico-freccia (F-u) e trazione nel rinforzo-scorrimento globale (T-g).

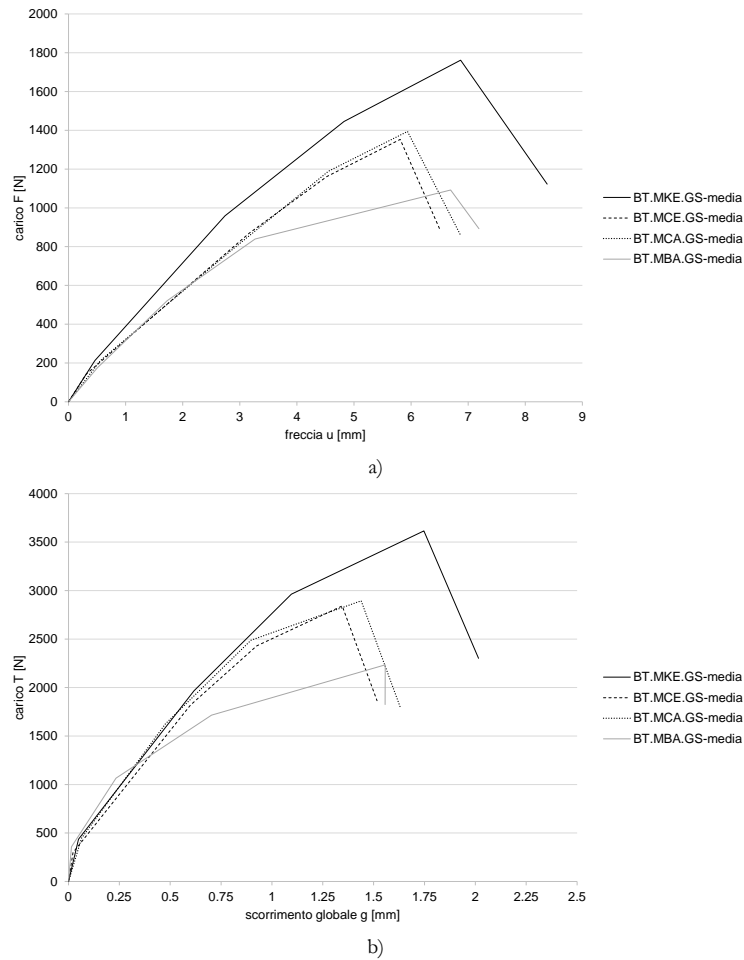


Fig. 5.76. Curve medie a) carico-freccia (F-u) e b) trazione nel rinforzo-scorrimento globale (T-g) relative alle quattro tipologie di provini

Tab. 5.44. Risultati medi Beam Test

provino	F_{max}^{IV} [N]	T_{max}^{IV} [N]	T_{db}^{IV} [N]	f_r^{IV} [MPa]	u_{max} [mm]	g_{max}^{IV} [mm]	g_{db}^{IV} [mm]	ϵ_{rg}^{IV}	ϵ_r^{IV}	K_i^{IV} [MPa]	K_l^{IV} [MPa]	μ_c	μ_{cd}	f_r^V/f_r	f_r^{IV}/f_r	crisi
MKE	1762	3616	2963	1108	6.87	1.75	1.10	0.070	0.018	635	322	2.55	1.09	1.28	1.41	D+F
MCE	1353	2842	2430	871	5.81	1.35	0.93	0.054	0.014	515	262	2.27	1.07	1.01	1.41	D
MCA	1394	2894	2488	443	5.94	1.44	0.90	0.061	0.015	386	293	1.62	1.05	1.03	1.54	D
MBA	1092	2235	1716	685	6.69	1.56	0.70	0.062	0.011	476	312	2.79	1.06	0.79	-	D

F_{max}^{IV} =carico massimo; T_{max}^{IV} =trazione massima nel composito (Eq. 5.17); T_{db}^{IV} =trazione di debonding nel composito; f_r^V =tensione massima nella rete di fibra; u_{max} =abbassamento massimo in mezzeria; g_{max}^{IV} =scorrimento globale massimo valutato mediante le letture dell'estensimetro ad omega (Fig. 5.65); g_{db}^{IV} =scorrimento globale di debonding valutato mediante le letture dell'estensimetro ad omega (Fig. 5.65); ϵ_{rg}^{IV} =deformazione massima (Eq. 5.19); ϵ_r^{IV} =deformazione massima (Eq. 5.20); K_i^{IV} =rigidezza del provino integro (Eq. 5.2); K_l^{IV} =rigidezza del provino lesionato (Eq. 5.3); μ_c =duttilità cinematica (Eq. 5.4); μ_{cd} =duttilità cinematica disponibile (Eq. 5.4); f_r^V/f_r =sfruttamento delle proprietà a trazione della rete di fibra; f_r^{IV}/f_r =sfruttamento delle proprietà a trazione del composito; f_r =resistenza a trazione della rete di fibra (§ 4.4); f =resistenza a trazione del composito (§ 4.5); crisi=modalità di crisi: F rottura a trazione della rete di fibra interna alla matrice, D scorrimento fibra-matrice (Fig. 5.2)

I quattro compositi hanno mostrato un comportamento analogo tra loro. La formazione della prima lesione trasversale, essendo avvenuta in modo graduale, non ha indotto una perdita di carico, come osservato nelle prove DST-B (§ 5.4), ed ha interessato le prime due fasi del comportamento di adesione. Successivamente, la fase III di ampliamento della lesione trasversale in alcuni casi è stata interessata dalla formazione di una lesione interlaminare alla terza interfaccia (Fig. 5.77). Tale lesione è il risultato non solo dello scorrimento fibra-matrice, ma anche della tensione ortogonale al piano del composito indotta dall'abbassamento in mezzeria del provino (similmente a quanto già osservato per i DST-B, § 5.4).

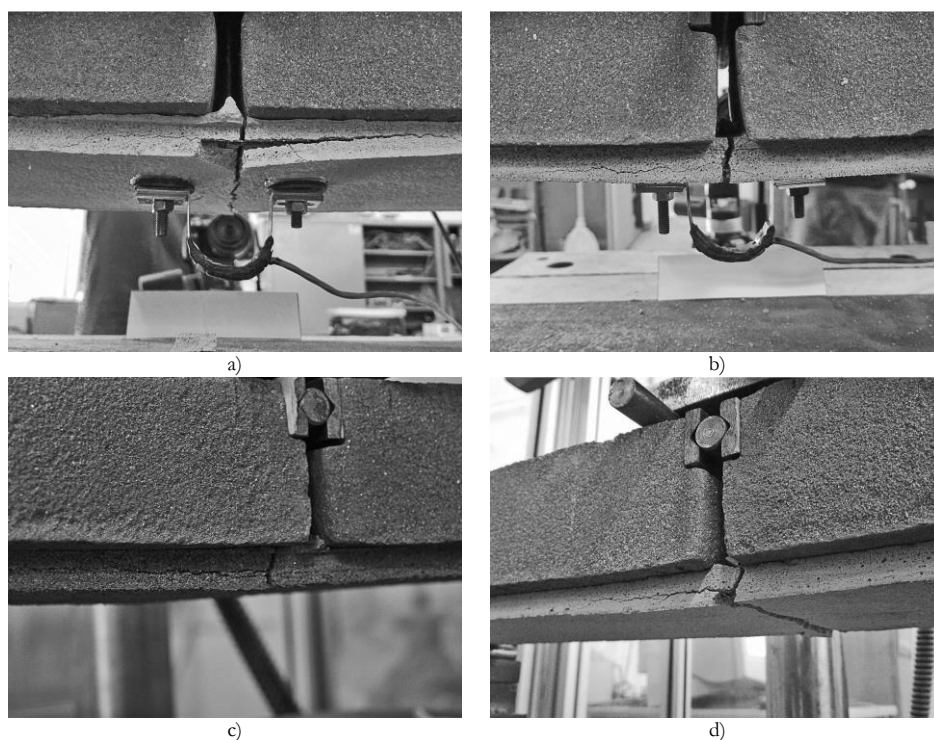


Fig. 5.77. Esempi di lesione interlaminare: provini a) BT.MKE.GS.01bis, b) BT.MCA.GS-05, c) BT.MCE.GS-05, d) BT.MKE.GS-04

Dal confronto dei risultati medi relativi alle quattro tipologie di composito, si nota come tutti i compositi abbiano perseguito coefficienti di sfruttamento delle proprietà della fibra elevati e coefficienti di sfruttamento medi della resistenza del composito superiori all'unità. Nonostante ciò, solo nel caso di provini con matrice Kerakoll è stata raggiunta una crisi per scorrimento fibra-matrice con rottura di alcuni filamenti esterni dei multi-filamenti longitudinali. Valori così elevati dei coefficienti di sfruttamento sono diretta conseguenza della tipologia di prova: la prova Beam Test, in quanto prova a flessione, permette la valutazione della trazione nel composito in modo indiretto, considerando la rete di fibra soggetta a trazione e trascurando l'apporto in resistenza della porzione di matrice soggetta a compressione e la presenza di sollecitazioni a taglio.

6. Analisi dei risultati delle prove di adesione

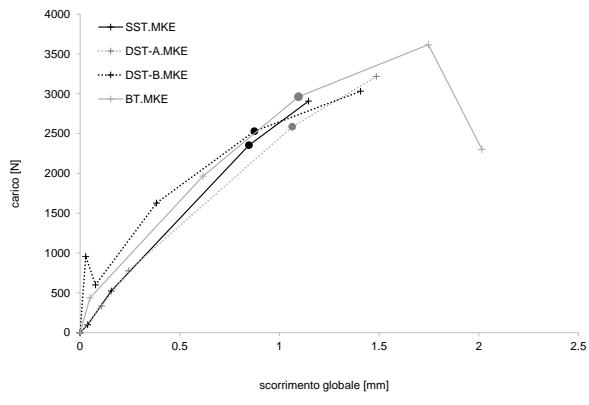
6.1. Risultati prove di adesione

L'analisi dei risultati ottenuti ha permesso di studiare il comportamento di adesione dei quattro compositi testati e di individuare le caratteristiche delle quattro differenti prove di adesione e come queste hanno influito sui risultati stessi.

6.1.1. *Comportamento di adesione*

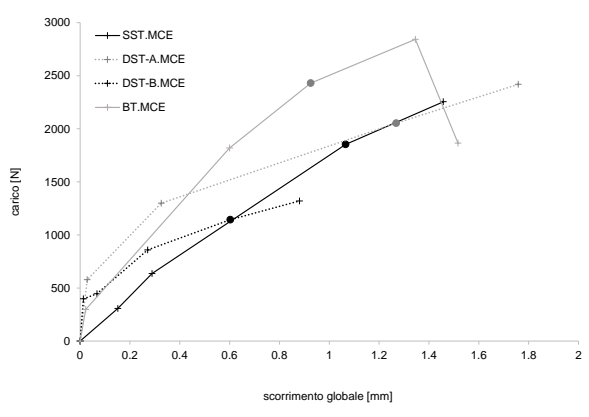
Per ogni prova di adesione, sono state individuate diverse fasi del comportamento di adesione dei compositi FRCM. Se si esclude la fase di assestamento del provino tipica delle prove in cui il carico è applicato direttamente alla rete di fibra (SST e DST-A), sono scaturite cinque fasi (Fig. 6.1):

- fase I: fase elastica lineare;
- fase II: fase di formazione delle prime lesioni nella matrice. Queste determinano una perdita di rigidità del composito. Nel caso di SST e DST-A non si manifestano lesioni, se non in presenza di una matrice meno resistente; la perdita di rigidità è attribuibile a lesioni a livello di micro scala. Nel caso dei BT si manifesta un'unica lesione trasversale, la cui propagazione nello spessore del composito, avvenendo in modo graduale, individua due successive fasi;
- fase III: fase intermedia. Un decremento della rigidità individua il principio di una terza fase, durante la quale si forma in molti casi una lesione interlaminare all'estremo caricato del composito;
- fase IV: fase di propagazione del fenomeno di debonding. La perdita di adesione fibra-matrice determina un'ulteriore diminuzione della rigidità del provino. Il fenomeno spesso comporta una improvvisa perdita di carico e il propagarsi della lesione interlaminare. L'incremento di carico a cui si assiste è dato dall'ingranamento fibra-matrice e dal comportamento telescopico. Con composito costituito da matrice Kerakoll, ovvero nel caso di buone proprietà di adesione, si raggiunge la crisi a trazione della rete di fibra in tutte le prove. Con matrici di laboratorio si ottiene prevalentemente una crisi per scorrimento, ad eccezione dei SST nei quali i coefficienti di sfruttamento delle proprietà della fibra risultano prossimi all'unità con tutte le tipologie di composito;
- fase V: fase decrescente. Tale fase è presente nel caso di prova BT e con i compositi costituiti da matrice di malta bastarda.



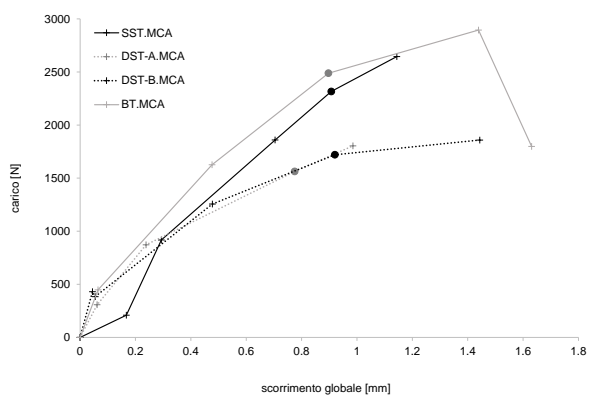
	F_{db} [N]	F_{max} [N]	g_{db} [mm]	g_{max} [mm]	perdita rigidezza [%]	crisi
SST	2353 (173;7)	2918 (303;10)	0.85 (0.07;8)	1.15 (0.11;10)	31	F
DST-A	2586 (434;17)	3217 (122;4)	1.49 (0.13;12)	1.49 (0.10;7)	42	F
DST-B	2529 (170;7)	3031 (302;10)	0.87 (0.18;20)	1.41 (0.39;28)	67	F-D
BT	2963 (561;19)	3616 (535;15)	1.10 (0.25;23)	1.75 (0.31;18)	55	F-D

Nota: i valori di deviazione standard e coefficiente di variazione sono riportati in parentesi



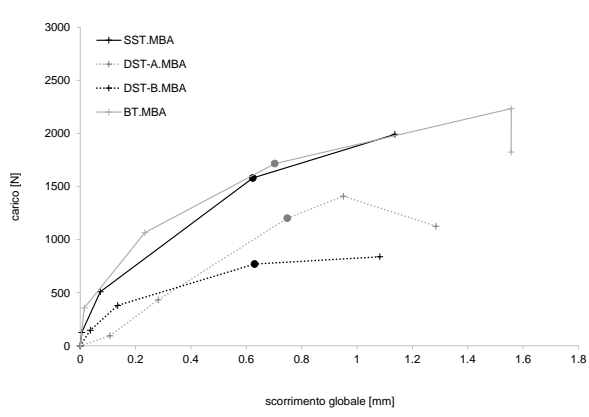
	F_{db} [N]	F_{max} [N]	g_{db} [mm]	g_{max} [mm]	perdita rigidezza [%]	crisi
SST	1853 (489;26)	2255 (464;21)	1.07 (0.20;18)	1.46 (0.24;17)	35	F
DST-A	2053 (133;6)	2419 (92;4)	1.27 (0.71;56)	1.76 (0.71;40)	55	D
DST-B	1144 (340;30)	1321 (435;33)	0.60 (0.44;73)	0.88 (0.65;74)	82	D
BT	2430 (384;16)	2842 (389;14)	0.93 (0.09;10)	1.35 (0.27;20)	51	D

Nota: i valori di deviazione standard e coefficiente di variazione sono riportati in parentesi



	F_{db} [N]	F_{max} [N]	g_{db} [mm]	g_{max} [mm]	perdita rigidezza [%]	crisi
SST	2316 (354;15)	2645 (149;6)	0.91 (0.28;31)	1.14 (0.24;21)	57	F
DST-A	1477 (127;9)	1804 (217;12)	0.77 (0.47;61)	0.99 (1.45;45)	37	D-C
DST-B	1720 (272;16)	1859 (305;16)	0.92 (0.32;35)	1.44 (1.06;74)	79	D
BT	2181 (809;37)	2894 (435;15)	0.90 (0.05;6)	1.44 (0.10;7)	76	D

Nota: i valori di deviazione standard e coefficiente di variazione sono riportati in parentesi



	F_{db} [N]	F_{max} [N]	g_{db} [mm]	g_{max} [mm]	perdita rigidezza [%]	crisi
SST	1581 (351;22)	1992 (299;15)	0.62 (0.17;28)	1.14 (0.34;30)	74	F
DST-A	1201 (202;17)	1409 (276;20)	0.75 (0.05;6)	0.95 (0.06;6)	16	D
DST-B	770 (230;30)	844 (197;23)	0.63 (0.06;10)	1.02 (0.29;28)	74	D
BT	1716 (250;15)	2235 (347;15)	0.70 (0.14;20)	1.56 (0.15;10)	65	D

Nota: i valori di deviazione standard e coefficiente di variazione sono riportati in parentesi

Fig. 6.1. Grafici (sulla destra) e relativi risultati numerici (a sinistra) ottenuti con le quattro tipologie di prova di adesione per i compositi costituiti da matrici di malta: a) Kerakoll; b) cementizia; c) di calce idraulica; d) bastarda. Nelle tabelle sono riportati: F_{db} =carico di debonding; F_{max} =carico massimo; g_{db} =scorrimento globale di debonding; g_{max} =scorrimento globale massimo; *perdita di rigidezza*=variazione percentuale di rigidezza tra la prima fase lineare elastica e la fase successiva valutata come $(K_1-K_2)/K_1$ (Eq. 5.2, 5.3); *crisi*=modalità prevalente di crisi: F rottura a trazione della rete di fibra interna alla matrice, D scorrimento fibra-matrice, C delaminazione all'interfaccia fibra-matrice (Fig. 5.2).

I grafici hanno evidenziato come per tutti i compositi con l'apparato di prova BT siano stati ottenuti i valori di carico massimo, di carico di debonding e di scorrimento maggiori (ad eccezione del composito con matrice di malta cementizia). La trazione nel composito è stata ottenuta attraverso l'equilibrio tra momento esterno ed interno generati dal carico applicato, essendo il provino sottoposto a flessione. Con tale prova l'adesione del composito può essere, quindi, valutata solo indirettamente.

Il SST ed il DST-A sono prove di tipo diretto, in cui il carico è applicato alla fibra e da questa trasferito alla matrice. Data la loro configurazione il comportamento manifestato dai compositi si è caratterizzato per una rigidità iniziale del provino integro di poco superiore rispetto a quella valutata sul tratto successivo del grafico. All'aumentare del carico, la fibra ha registrato degli incrementi sempre maggiori di scorrimento fino al raggiungimento del debonding. Perduta l'adesione con la matrice, i multi-filamenti hanno manifestato dei consistenti scorrimenti rispetto alla matrice senza determinarne la rottura.

Al contrario, sia nei BT che nei DST-B il carico viene trasferito dal supporto alla matrice e da questa alla rete di fibra. Durante tali prove la prima fase (di risposta del provino integro) del comportamento di adesione è stata caratterizzata da una rigidità elevata, derivante dalle proprietà della matrice migliorate dalla presenza della fibra; raggiunta la resistenza a trazione della malta, una prima lesione trasversale nella matrice si è aperta in corrispondenza della zona centrale non adesa del composito. La formazione della lesione ha determinato una consistente diminuzione di rigidità, come si nota dai valori percentuali riportati in figura 6.2, nonché una visibile ed improvvisa perdita di carico nei DST-B, ed una fase di "transizione" in cui tale lesione si è propagata nello spessore del composito nel caso dei BT. Incrementando ulteriormente il carico, nei DST-B si sono aperte ulteriori lesioni nella matrice fino al raggiungimento del debonding.

Data la stocasticità che caratterizza la distribuzione delle proprietà nei compositi FRCM, nelle prove DST-B, caratterizzate da un numero maggiore di superfici di adesione, la perdita di adesione e la crisi sono state raggiunte nel composito contraddistinto dalle proprietà di adesione inferiori. Ciò ha comportato l'ottenimento di valori di carico generalmente minori rispetto ai SST e la perdita di assialità del provino, la quale ha indotto l'insorgere di momenti secondari (modo I e II). Ciò ha determinato la comparsa di ulteriori lesioni nella matrice, una estensione maggiore della delaminazione fibra-matrice con espulsione di porzioni del layer esterno di matrice a causa dell'insorgere di tensioni normali al piano del composito, nonché, in alcuni casi, la comparsa di fenomeni di delaminazione alla prima interfaccia.

Inoltre, all'aumentare della complessità dell'apparato di prova è stato osservato un incremento di dispersione dei risultati ed una maggiore variabilità nel comportamento. Ciò è attribuibile all'incremento della probabilità di incorrere in difetti di realizzazione ed asimmetrie (seppur minime) dei provini, o in loro disallineamenti rispetto alla direzione di applicazione del carico. Inoltre, è stata appurata un'influenza maggiore di tali aspetti, presenti in ogni tipologia di prova, in presenza di un composito caratterizzato da proprietà di adesione minori, come nel caso dei provini costituiti da matrice di malta cementizia e da matrice di malta bastarda. I grafici riportati in figura 6.1 mostrano, infatti, come limitatamente al caso di composito con matrice Kerakoll le curve medie relative alle quattro tipologie di prova risultino quasi parallele e prossime tra loro.

Per quanto riguarda la prova DST-A, questa ha dimostrato un comportamento intermedio tra le prove DST-B e SST: se da un lato il comportamento di adesione si è presentato simile a quello dei SST grazie alla analoga modalità di applicazione del carico, dall'altra il debonding è stato raggiunto su uno dei due compositi che costituiscono il provino. La simmetria dell'apparato di prova e la presenza del cilindro-cerniera per l'applicazione del carico alla rete di fibra hanno permesso di ipotizzare una equa distribuzione del carico tra i due compositi. Nonostante ciò, anche in questo caso non è da escludere la presenza di possibili disallineamenti o imperfezioni, che possono incidere sui risultati finali.

6.1.2. Modalità di crisi

Come già accennato la modalità di crisi è risultata variabile da composito a composito in funzione delle relative proprietà di adesione e in relazione alla modalità di prova di adesione.

Compositi caratterizzati da proprietà di adesione inferiori hanno mostrato prevalentemente una crisi per scorrimento (tipo D) per valori di carico massimo inferiori. Il composito costituito da matrice Kerakoll, date le performanti proprietà di adesione, ha raggiunto una crisi per rottura a trazione della rete di fibra (tipo F o E) in tutte le prove, con valori di carico massimo maggiori rispetto agli altri compositi ed uno sfruttamento delle proprietà della fibra superiori all'unità.

Differentemente, con la prova SST è stata ottenuta una modalità prevalente di crisi di tipo F con tutte le tipologie di composito, con coefficienti di sfruttamento prossimi all'unità. Inoltre, i risultati dei quattro compositi in termini di carico massimo e di debonding sono risultati affetti da una variabilità inferiore. L'osservazione di tale fenomeno ha permesso di ipotizzare che aumentando il volume di fibra del composito, ovvero la sezione resistente a trazione A_f , con tale tipologia di prova è possibile evitare tale crisi e sfruttare pienamente le proprietà di adesione del composito, ovvero percorrerne tutto il potenziale comportamento di adesione.

La crisi a trazione della rete di fibra è risultata governata dal comportamento telescopico, tipico dei compositi FRCM. La rottura dei multi-filamenti (parziale o totale) si è sempre localizzata in corrispondenza della zona in cui il carico risultava trasmesso dalla sola rete di fibra, ovvero dove, a causa della perdita di adesione o della formazione di una lesione trasversale, il contributo in resistenza della matrice risultava assente.

6.2. Relazioni con le proprietà meccaniche dei materiali costituenti

In figura 6.2 carico di debonding e carico massimo sperimentali sono stati messi in relazione con le proprietà meccaniche della matrice per ogni tipologia di composito e per le differenti prove di adesione condotte. Avendo appurato la presenza di meccanismi differenti nel comportamento dei compositi costituiti da matrice di malta bastarda, questi sono stati esclusi da tali valutazioni. Le inferiori proprietà di adesione dimostrate sono attribuibili alle proporzioni della miscela con cui è stata realizzata la malta stessa: a parità di sabbia è presente una percentuale di legante inferiore, che si riflette sulla consistenza di tale malta.

I grafici hanno confermato quanto già descritto all'interno del paragrafo precedente.

Dati i risultati e le modalità di crisi osservate, le curve relative alla prova SST hanno assunto un andamento caratterizzato da una variazione minore dei valori di carico tra i tre compositi.

In aggiunta è stato notato come, relativamente alle matrici a base di calce Kerakoll e di calce di laboratorio, al crescere delle proprietà meccaniche della matrice (resistenza a trazione f_{tm} e modulo elastico E_m) è corrisposto un incremento del carico di debonding F_{db} e del carico massimo F_{max} ottenuti dalle quattro tipologie di prova.

I risultati relativi al composito con matrice di malta di calce, nonostante le inferiori proprietà meccaniche della malta, si sono attestati su valori prossimi ed in alcuni casi maggiori rispetto al composito con matrice di malta cementizia. Da ciò è stata dedotta la presenza di una compatibilità chimica tra malta di calce e rete di fibra di basalto GeoSteel® Grid 200 maggiore, che si è tradotta in proprietà di adesione superiori.

Infine, è stato osservato che al crescere delle proprietà di adesione è corrisposta una diminuzione della dispersione dei risultati ottenuti dalle quattro prove di adesione. Da ciò è stato dedotto come le caratteristiche delle singole prove abbiano inciso in modo maggiore al diminuire delle proprietà di adesione.

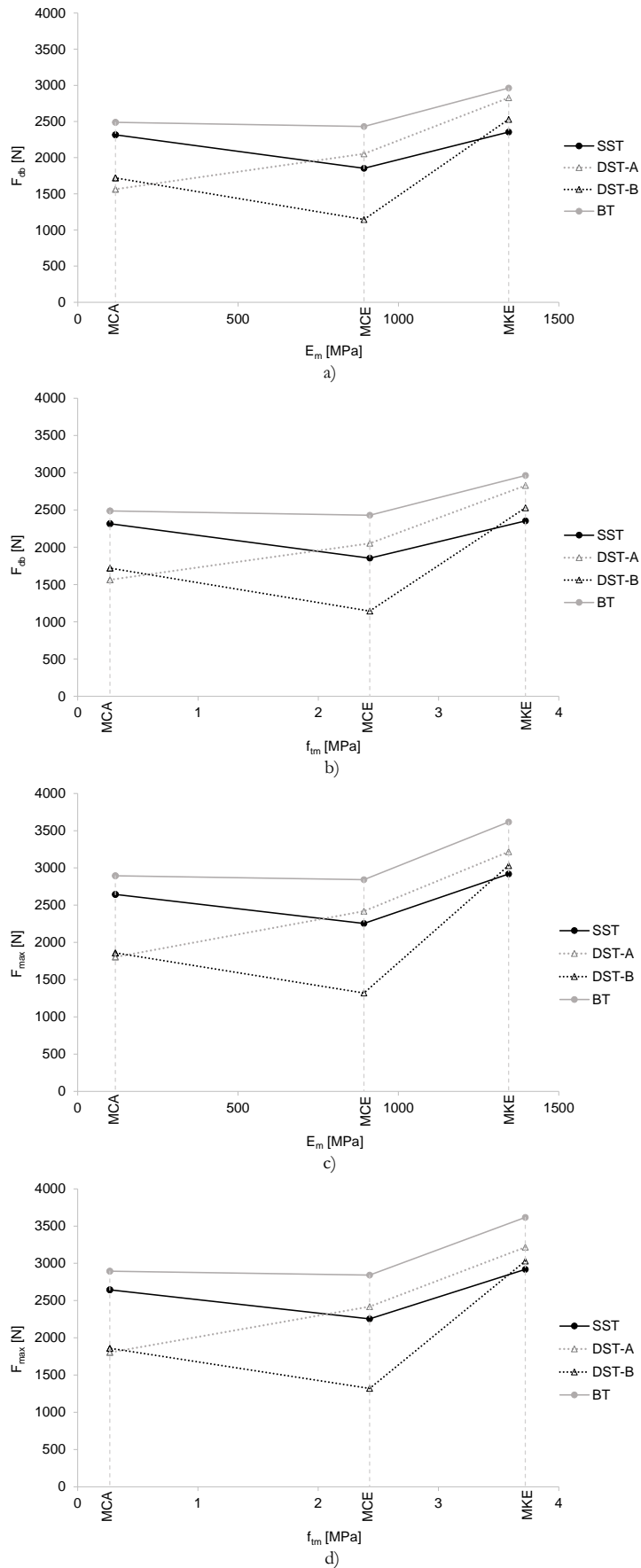


Fig. 6.2. Relazione tra il carico di debonding F_{db} e: a) il modulo elastico della matrice E_m ; b) la resistenza a trazione della matrice f_{tm} ; e tra il carico massimo F_{max} : c) il modulo elastico della matrice E_m ; d) la resistenza a trazione della matrice f_{tm}

6.2.1. Double-Shear Test-tipo B

I risultati ottenuti dalle prove DST-B sono stati confrontati con i dati riportati in Stipo (2013) ed ottenuti attraverso l'impiego del medesimo apparato di prova. I compositi presentano dimensioni analoghe sia in lunghezza che in larghezza, nonché lo stesso materiale di supporto.

Tab. 6.2. Dati sperimentali medi ottenuti da prove DST-B

provino	L [mm]	B [mm]	n	b _f [mm]	t _f [mm]	b _f * [mm]	E _m [MPa]	E _f [MPa]	f _f [MPa]	f _m [MPa]	f _m [MPa]	F _{max} [N]	F _{db} [N]	G _f [N/mm]
DST-B.MKE.GS	250	95	6	2.24	0.25	17	1344	60487	865	3.7	11.2	3031	2529	0.588
DST-B.MCE.GS	250	95	6	2.24	0.25	17	893	60487	865	2.4	6.9	1321	1144	0.102
DST-B.MCA.GS	250	95	6	2.24	0.25	17	118	60487	865	0.3	0.8	1859	1720	0.276
DST-B.MBA.GS	250	95	6	2.24	0.25	17	216	60487	865	0.4	1.2	844	726	0.051
C-FRCM Stipo 2013	250	95	10	3.00	0.14	9	1020	244000	1350	5.9	14.3	3920	2990	0.073
PBO-FRCM Stipo 2013	250	95	7	3.00	0.07	14	2870	223000	3330	6.2	20.2	3152	2177	0.185
G-FRCM Stipo 2013	250	95	6	1.80	0.51	17.5	1260	70800	1370	5.5	15.8	3937	3013	0.549

L=lunghezza di adesione; B=larghezza della striscia di composito; n=numero di multi-filamenti longitudinali della rete di fibra; b_f=larghezza di un multi-filamento; t_f=spessore nominale di un multi-filamento; b_f*=larghezza della maglia della rete di fibra; f^V_f=tensione massima nella rete di fibra; E_m=modulo elastico della matrice; E_f=modulo elastico della rete di fibra; f_f=resistenza a trazione della rete di fibra (§ 4.4); f_m=resistenza a trazione della matrice; f_m=resistenza a compressione della matrice; F_{max}=carico massimo; F_{db}=carico di debonding; G_f=energia di frattura (Eq. 5.1)

Dato l'impiego sia di matrici che di reti di fibra differenti, i risultati in termini di carico massimo F_{max} e carico di debonding F_{db} sono stati suddivisi per il numero n di multi-filamenti costituenti i provini. Il carico a multi-filamento così ottenuto trascura il contributo dei ponti di matrice, ovvero l'influenza della larghezza della maglia della rete di fibra, analogamente a quanto effettuato nei modelli analitici presenti in letteratura (§ 2.5). I dati sono stati messi in relazione con la resistenza a trazione della matrice f_{tm} , il rapporto tra i moduli elastici di fibra e di matrice E_f/E_m ed il rapporto tra le resistenze a trazione di matrice e fibra f_{tm}/f_f . I confronti hanno evidenziato la presenza di relazioni simili per F_{max}/n e per F_{db}/n .

In figura 6.1 sono riportati i grafici ottenuti per il carico di debonding a multi-filamento F_{db}/n .

Non sono emersi risultati significativi mettendo in relazione F_{max}/n e F_{db}/n con le proprietà della rete di fibra, per cui i relativi grafici non sono stati riportati.

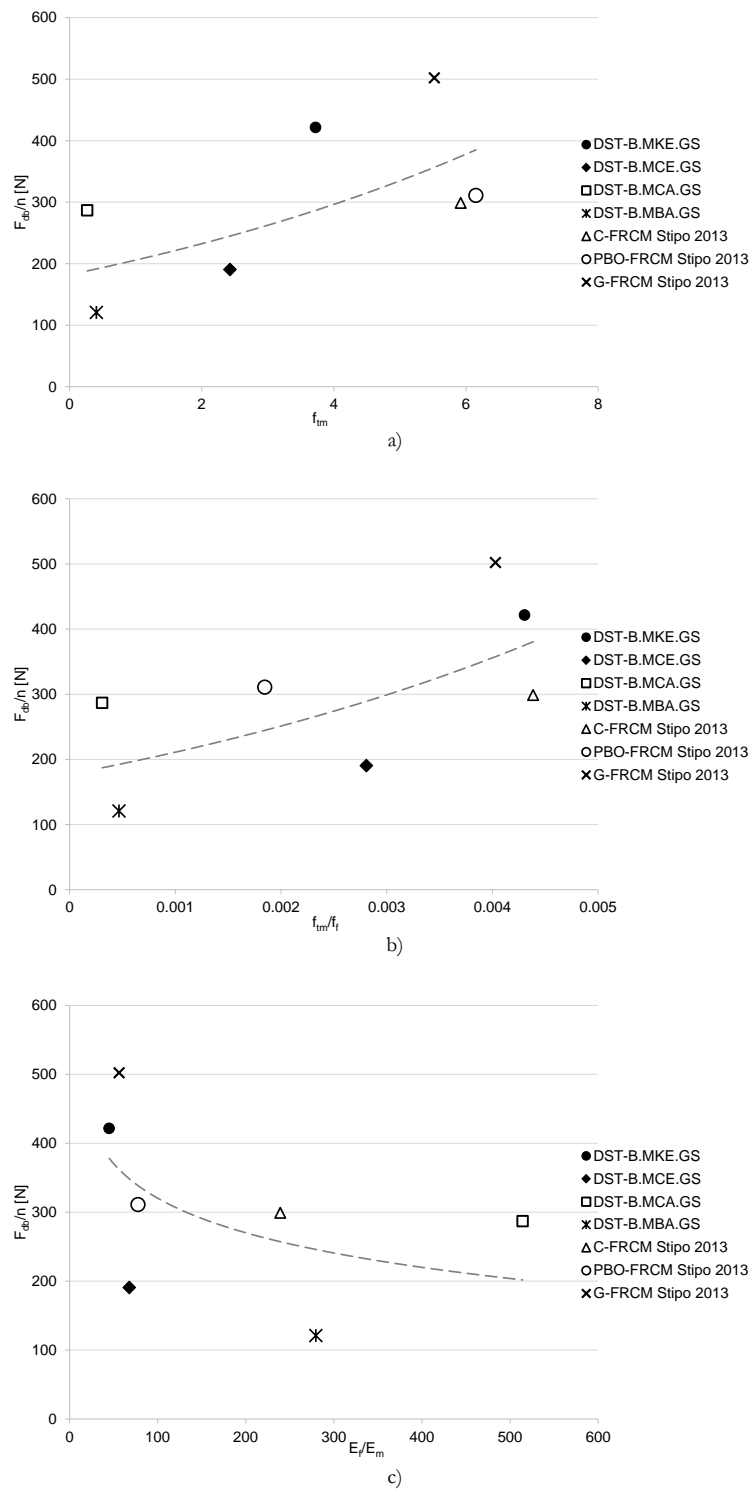


Fig. 6.3. Relazione tra il carico di debonding a multi-filamento e a) la resistenza a trazione della matrice; b) il rapporto tra resistenza a trazione di matrice e fibra; c) il rapporto tra i moduli elastici di fibra e matrice

I grafici hanno evidenziato come all'aumentare delle caratteristiche meccaniche della matrice siano corrisposti carichi maggiori.

Disponendo per ogni tipologia di composito del valore medio del carico di debonding F_{db} , dall'equazione (5.1) è stata valutata l'energia di frattura G_f :

$$F_{db} = 2nb_f \sqrt{E_f t_f G_f} \quad (5.1)$$

in cui b_f e t_f rappresentano rispettivamente la larghezza e lo spessore nominale di un multi-filamento.

Quest'ultima, suddivisa per il numero di multi-filamenti n del composito, ha mostrato una relazione decrescente con il rapporto tra i moduli elastici di fibra e matrice (Fig. 6.4), ovvero all'aumentare di tale rapporto è corrisposto un lavoro minore necessario per ottenere la perdita di adesione di una superficie interlaminare unitaria.

Nella valutazione sono stati considerati i soli compositi presenti in commercio, escludendo i compositi a base di malte realizzate in laboratorio (provini DST-B.MCE.GS, DST-B.MCA.GS, DST-B.MBA.GS in tabella 6.2).

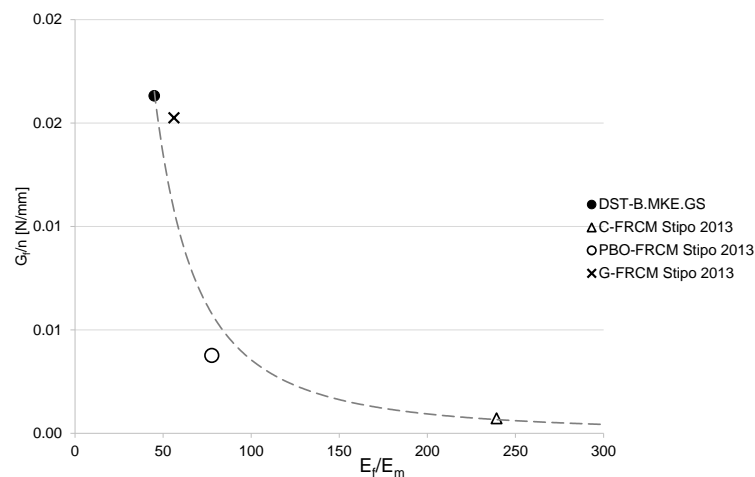


Fig. 6.4. Relazione tra l'energia di frattura a multi-filamento ed il rapporto tra i moduli elastici di fibra e matrice

Al fine di escludere l'influenza della larghezza della maglia della rete di fibra b_f^* , ovvero delle differenti dimensioni dei ponti di matrice dei compositi, il carico di debonding per multi-filamento F_{db}/n è stato suddiviso per la larghezza della maglia di fibra b_f^* .

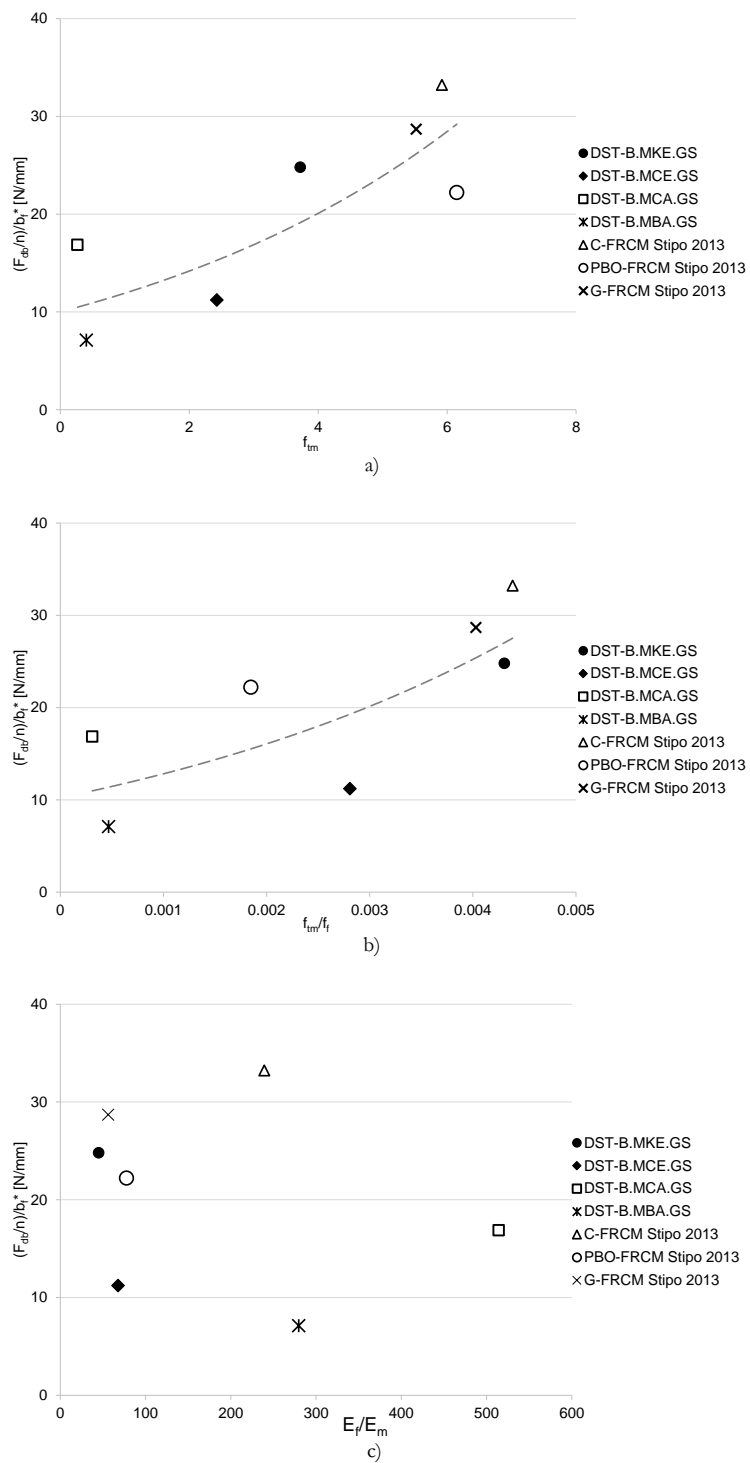


Fig. 6.5. Relazione tra il carico di debonding a multi-filamento per unità di larghezza ed il rapporto tra le resistenze a trazione di matrice e fibra

Le relazioni ottenute sono risultate in linea con quelle descritte precedentemente, ad eccezione del grafico in figura 6.5c dal quale non è scaturita una relazione con il rapporto tra i moduli elastici di fibra e matrice. In figura 6.6 è stata posta la dimensione della maglia di fibra b_f^* in funzione del rapporto dei moduli elastici dei materiali costituenti i compositi.

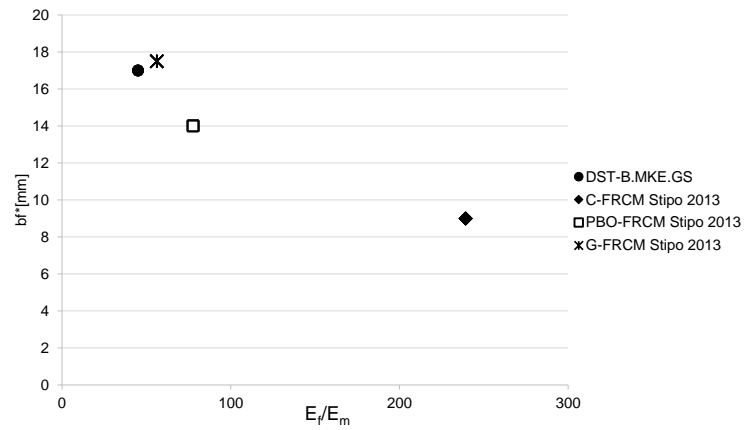


Fig. 6.6. Relazione tra la larghezza maglia della rete di fibra-rapporto ed i moduli elastici di fibra e matrice

Il grafico ha evidenziato come per i prodotti commerciali al diminuire del rapporto tra i moduli elastici di fibra e matrice siano corrisposti minori dimensioni della maglia della rete di fibra, ovvero un incremento del numero di multi-filamenti.

6.2.2. Single-Shear Test

I risultati ottenuti dalle prove SST sono stati confrontati con i dati riportati in D'Antino (2014), Carozzi et al. (2017), Lignola et al. (2017) e Caggegi et al. (2017).

In tabella 6.3 sono stati riportati i dati medi dei provini. I dati tratti dalla letteratura sono stati identificati mediante dei codici in cui la prima lettera indica il materiale fibroso utilizzato. Per quanto riguarda i dati tratti da D'Antino (2014) sono stati utilizzati quelli relativi a lunghezze di adesione prossime a 220 mm.

Nelle valutazioni sono stati inclusi i risultati medi relativi ai soli compositi commerciali, escludendo quindi i compositi testati nel presente lavoro costituiti da matrici di malte realizzate in laboratorio.

Tab. 6.3. Dati sperimentali medi ottenuti da prove SST

	composito	L [mm]	B [mm]	n	b _f [mm]	t _f [mm]	b _f * [mm]	A _f [mm ²]	E _m [MPa]	E _f [MPa]	f _f [MPa]	f _m [MPa]	f _m [MPa]	F _{max} [N]
Provino Kerakoll	DST-B.MKE.GS	220	95	6	2.24	0.25	17	0.56	1344	60487	865	3.7	11.2	3031
D'Antino (2014)	PBO-FRCM-01	200	34	4	5	0.092	10	0.46	7000	206000	3014	4	28	3185
	PBO-FRCM-02	250	34	4	5	0.092	10	0.46	7000	206000	3014	4	28	2875
Carozzi et al. (2017)	C-FRCM_1A	250	90	3	-	-	30	1.89	10000	227000	1800	5	10	2727
	C-FRCM_2A	260	54	6	-	-	10	0.47	-	240000	3400	4	10	3696
	C-FRCM_3A	260	96	3	-	-	30	1.89	-	227000	1800	6	15	2797
	C-FRCM_4A	260	100	10	-	-	10	0.47	7000	200000	1917	-	20	5045
	C-FRCM_5A	260	38	4	-	-	-	0.58	16000	230000	2500	7	38	2310
	C-FRCM_6A	260	50	2	-	-	20	1.18	15000	203000	1883	7	16	3065
Lignola et al. (2017)	B-FRCM-01A	260	90	4	-	-	-	0.83	-	111500	2169	4	16	3100
	B-FRCM-01B	260	90	3	-	-	-	0.83	-	111500	2169	4	16	3518
	B-FRCM-01C	260	75	3	-	-	-	0.83	-	111500	2169	4	16	3942
	B-FRCM-03A	260	75	3	-	-	-	1.45	6300	76150	1201	3	11	4794
	B-FRCM-03B	260	50	2	-	-	-	1.45	6300	76150	1201	3	11	3240
	B-FRCM-04A	260	80	13	-	-	-	0.23	8000	48150	871	6	12	2490
	B-FRCM-04B	260	100	17	-	-	-	0.23	8000	48150	871	6	12	2700
	B-FRCM-04C	260	125	17	-	-	-	0.23	8000	48150	871	6	12	1615
Caggegi et al. (2017)	PBO-FRCM-01	260	75	5	3	0.07	15	0.21	7500	191600	3356	8	40	2107

L=lunghezza di adesione; B=larghezza della striscia di composito; n=numero di multi-filamenti longitudinali della rete di fibra; b_f=larghezza di un multi-filamento; t_f=spessore nominale di un multi-filamento; b_f*=larghezza della maglia della rete di fibra; f^V_f=tensione massima nella rete di fibra; E_m=modulo elastico della matrice; E_f=modulo elastico della rete di fibra; f_f=resistenza a trazione della rete di fibra (§ 4.4); f_m=resistenza a trazione della matrice; f_m=resistenza a compressione della matrice; F_{max}=carico massimo

Per ogni tipologia di composito il carico massimo medio F_{max} è stato suddiviso per il numero di multi-filamenti n costituenti il provino. Il carico a multi-filamento F_{max}/n così ottenuto trascura il contributo dei ponti di matrice, ovvero l'influenza della larghezza della maglia della rete di fibra, analogamente a quanto effettuato nei modelli analitici presenti in letteratura (§ 2.5).

I risultati ottenuti sono stati messi in relazione con le caratteristiche meccaniche dei materiali costituenti i compositi (Fig. 6.7).

Dalle valutazioni sono stati esclusi i risultati dei compositi B-FRCM-01B, B-FRCM-01C, B-FRCM-03A, B-FRCM-03B (Lignola et al. 2017) ed il risultato del composito C-FRCM_6A (Carozzi et al. 2017), i quali, a fronte di caratteristiche meccaniche dei materiali costituenti intermedie rispetto agli altri compositi, si sono

caratterizzati per il raggiungimento di valori massimi di carico a multi-filamento elevati, discostandosi dalle relazioni individuate per gli altri compositi.

Si noti che i risultati esclusi sono relativi ai compositi costituiti da un numero di multi-filamenti inferiore a 3, per i quali è stato ottenuto un carico massimo F_{max} paragonabile ai compositi con un numero maggiore di multi-filamenti.

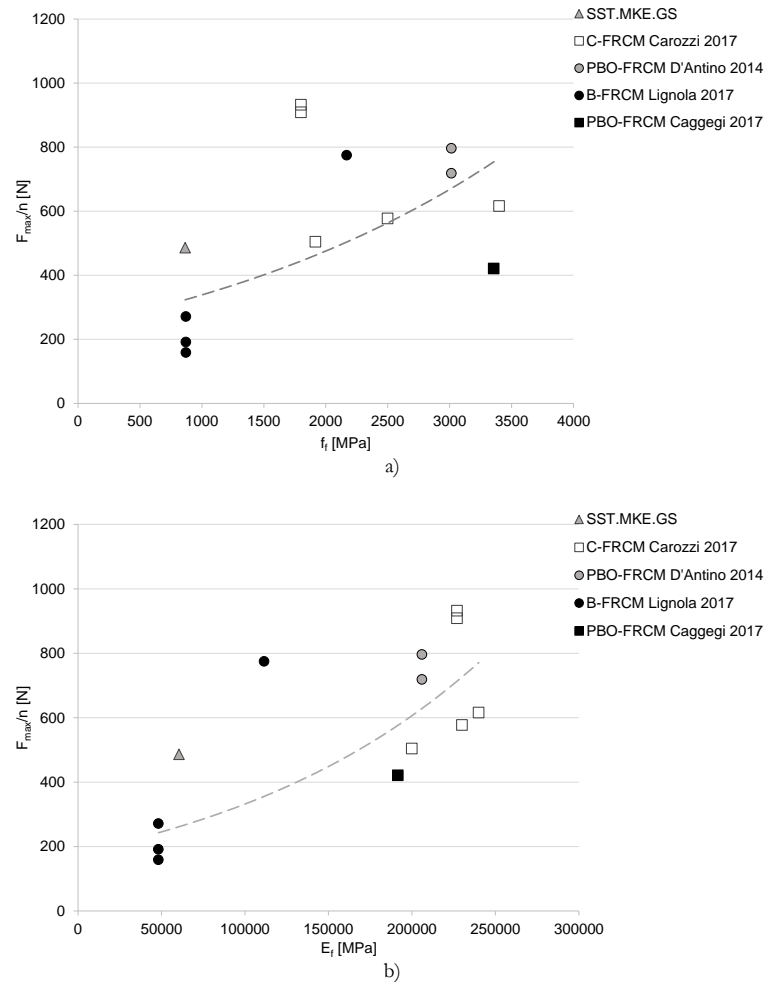


Fig. 6.7. Relazione tra il carico massimo a multi-filamento e: a) la resistenza a trazione della rete di fibra; b) il modulo elastico della rete di fibra

I grafici mostrano un incremento del carico massimo a multi-filamento in funzione delle proprietà meccaniche della fibra.

Dai confronti con la resistenza a trazione della matrice (Fig. 6.8a) e con il rapporto tra resistenze a trazione di matrice e fibra (Fig. 6.8b) sono scaturiti dei rapporti decrescenti. Differentemente, il carico massimo a multi-filamento è risultato crescente al crescere del rapporto tra i moduli elastici di fibra e matrice (Fig. 6.8c)

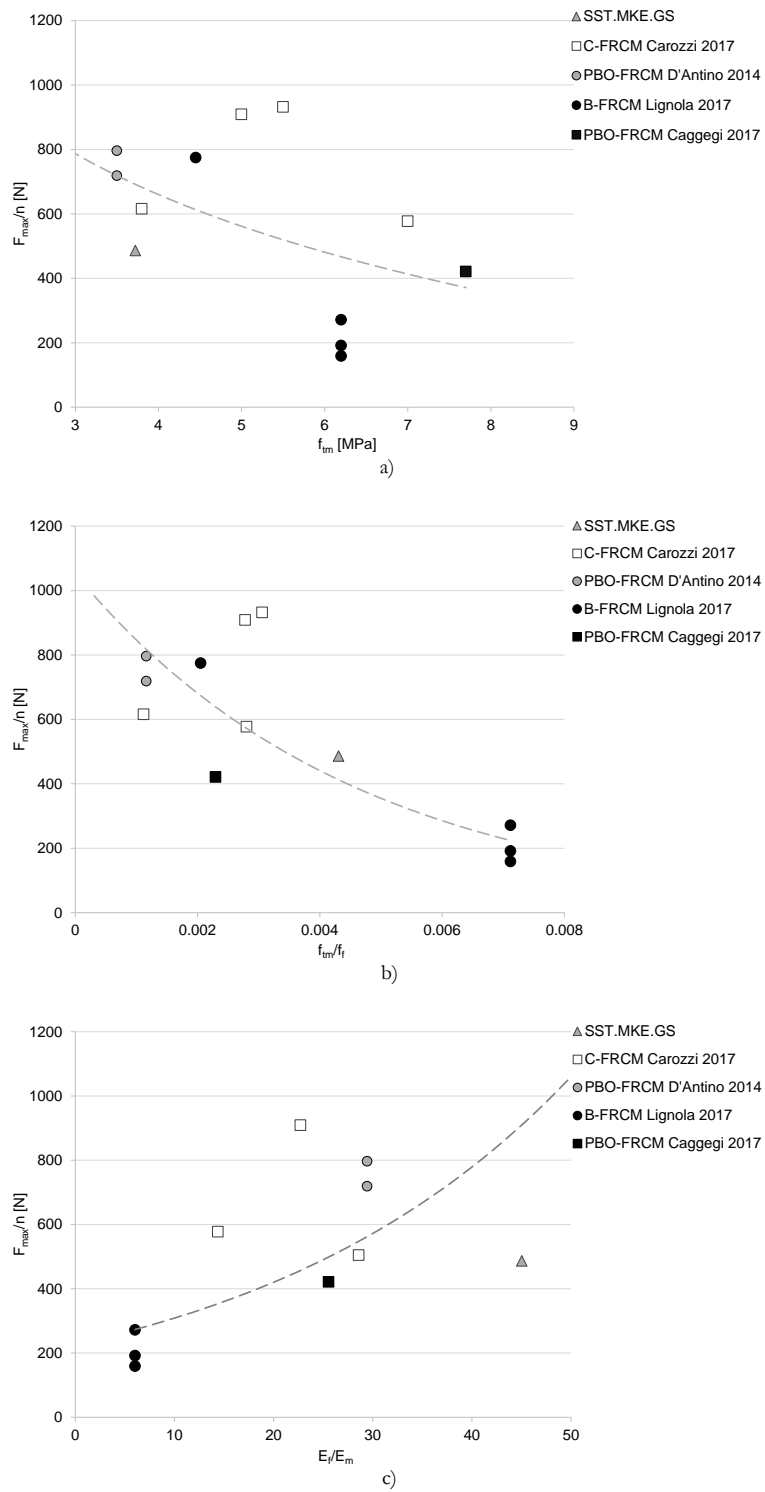


Fig. 6.8. Relazione tra il carico massimo a multi-filamento e: a) la resistenza a trazione della matrice; b) il rapporto tra le resistenze a trazione della matrice e della fibra; c) il rapporto tra i moduli elastici della fibra e della matrice

6.3. Conclusioni

6.3.1. *Valutazioni sulle relazioni con le proprietà meccaniche dei materiali costituenti*

Ponendo i risultati ottenuti dalla campagna sperimentale in funzione delle proprietà meccaniche delle matrici costituenti le quattro tipologie di composito, è scaturita una relazione crescente tra queste ultime ed il carico di debonding.

I compositi costituiti da matrice di malta bastarda, date le caratteristiche di quest'ultima, hanno mostrato un comportamento in cui si attivano meccanismi differenti, con proprietà di adesione inferiori.

La minore dispersione dei risultati, la minore variabilità del comportamento ed i valori di carico raggiunti a fronte di proprietà della matrice inferiori, hanno evidenziato la presenza di una compatibilità chimica tra la malta di calce e la fibra di basalto GeoSteel® Grid 200 maggiore rispetto alla malta cementizia.

Il confronto con i dati riportati in letteratura e relativi alla prova DST-B ha permesso di individuare un rapporto tra le proprietà di adesione e le caratteristiche meccaniche di matrice e fibra: al crescere della resistenza della fibra e del rapporto tra le resistenze di matrice e fibra ed al diminuire del rapporto tra i moduli elastici di fibra e matrice è stato ottenuto un incremento del carico di debonding, mentre l'energia di frattura ha mostrato una tendenza a diminuire incrementando il rapporto tra i moduli elastici. È stato individuato altresì un rapporto decrescente tra la larghezza della maglia della rete di fibra ed il rapporto tra i moduli elastici della fibra e della matrice. Dal confronto con i risultati di prove SST presenti in letteratura sono scaturite relazioni opposte a quelle ottenute con i risultati di prove DST-B.

Data la limitata varietà di tipologie di composito valutate, si rimanda l'approfondimento di tali aspetti a studi futuri.

6.3.2. *Valutazioni sulle differenti tipologie di prove di adesione*

La campagna sperimentale condotta ha permesso di individuare gli aspetti negativi e positivi che caratterizzano le quattro tipologie di prove di adesione studiate e come tali aspetti influiscono sul comportamento di adesione manifestato dai compositi.

È stato appurato come semplicità, ottenimento immediato dei risultati, minore influenza delle caratteristiche dell'apparato di prova, assenza di problemi di perdita di assialità del provino caratterizzino la tipologia di prova Single-Shear Test. D'altro canto, la modalità di applicazione del carico risulta differente da quelle riscontrabili nei casi applicativi. Se da un lato ciò permette di valutare le proprietà massime del composito, dall'altro consente l'osservazione di un comportamento e di performance sicuramente differenti da quelle che si manifesterebbero nelle applicazioni dei compositi come sistemi di rinforzo degli edifici.

Una maggiore complessità caratterizza la prova Double-Shear Test-B, dal punto di vista delle operazioni sia di preparazione dei provini sia di allestimento della prova. Inoltre, i risultati non sono ottenibili in modo diretto (il carico e gli scorrimenti afferenti il singolo composito sono pari alla metà del carico e degli

spostamenti registrati dalla strumentazione) e difetti o disallineamenti del provino inducono precoci crisi e fenomeni di delaminazione, nonché una maggiore variabilità del comportamento osservato.

Inoltre, è stato dedotto quanto segue:

- All'aumentare della capacità di adesione del composito la dispersione dei risultati delle differenti tipologie di prova di adesione risulta minore, indicando una minore sensibilità nei confronti delle differenti caratteristiche di ogni prova;
- nel caso di SST e DST-A in cui il carico è applicato alla fibra tra la prima e la seconda fase del comportamento di adesione risulta una minore perdita di rigidità; contrariamente, nel caso di DST-B e BT in cui il carico è applicato al supporto e da questo trasferito al composito, le proprietà del provino integro sono frutto delle proprietà a trazione della matrice migliorate dalla presenza della fibra, fino alla formazione della prima lesione trasversale che determina una elevata perdita di rigidità.
- nel caso di apparato di prova in cui il carico è direttamente applicato alla rete di fibra, si raggiungono tendenzialmente carichi e coefficienti di sfruttamento maggiori con la formazione di un numero limitato di lesioni trasversali nella matrice. Nel caso di apparato di prova in cui il carico è trasmesso dal supporto al composito, lo scorrimento della fibra necessita la rottura a trazione della matrice con conseguente consistente perdita di rigidità; alla formazione di un pattern fessurativo più diffuso corrispondono valori di scorrimento maggiori e carichi massimi e di debonding inferiori;
- a causa della stocasticità della distribuzione delle proprietà di adesione tipica dei compositi FRCM, aumentando il numero di superfici di adesione: a) i risultati registrati sono inferiori in quanto relativi al composito caratterizzato dalle proprietà inferiori; b) la perdita di adesione di un composito determina il disallineamento del provino che ha indotto l'insorgere di momenti secondari e tensioni normali al piano del composito a causa delle quali si possono osservare fenomeni di delaminazione alla prima interfaccia, un pattern fessurativo più consistente, l'espulsione di porzioni di layer esterno di matrice, ecc. All'aumentare delle superfici di adesione corrisponde, inoltre, una maggiore variabilità del comportamento osservato e della modalità di crisi raggiunta.

Una valutazione qualitativa delle diverse prove in funzione degli aspetti individuati è riportata in modo schematico in tabella 6.1. Attraverso una scala di grigi tali aspetti sono stati valutati come positivi o negativi per ogni tipologia di prova. Il giudizio "medio" indica un aspetto che è risultato a metà tra quelli negativo e positivo; ad esempio, il numero di superfici di adesione della prova DST-A (due superfici di adesione) è risultato intermedio tra quelli delle prove SST (una superficie di adesione – aspetto positivo) e DST-B (quattro superfici di adesione – aspetto negativo).

Tab. 6.1. Aspetti intrinseci relativi alle prove di adesione

ASPETTI	SST	DST-A	DST-B	BT
Numero superfici di adesione	Positivo	Medio	Negativo	Positivo
Complessità operazioni di preparazione ed allestimento	Positivo	Positivo	Negativo	Medio
Perdita allineamento provino	Positivo	Medio	Negativo	Positivo
Insorgere di momenti secondari e tensioni di peeling (modo I e II)	Positivo	Medio	Negativo	Positivo
Variabilità del comportamento e della modalità di crisi	Positivo	Medio	Negativo	Positivo
Modalità di applicazione del carico: prova vs realtà	Negativo	Negativo	Positivo	Positivo
Lettura immediata dei risultati	Positivo	Medio	Medio	Negativo
Semplicità nell'osservazione del comportamento (durante l'esecuzione del test)	Positivo	Medio	Negativo	Medio

Negativo
 Medio
 Positivo

7. Modellazioni analitiche del comportamento di adesione

7.1. Introduzione

Come descritto nel capitolo 2, la perdita di adesione nei compositi FRCM si manifesta all'interfaccia fibra-matrice. Sottoponendo il composito a trazione, si generano delle deformazioni estensionali nel rinforzo che comportano l'insorgere di tensione tangenziali alla suddetta interfaccia. Localmente il trasferimento di tali tensioni dipende dallo scorrimento locale attraverso un legame $\tau(s)=\tau[s(x)]$ definito legame locale d'interfaccia. L'andamento tipico di quest'ultimo è stato spesso schematizzato in letteratura attraverso forme semplificate (Fig. 2.29, § 2.5), che consentono una più agevole modellazione del comportamento di adesione. Nei compositi FRCM, la calibrazione del legame locale attraverso delle misurazioni sperimentali locali (metodo diretto) comporta diverse difficoltà a causa della presenza di uno strato esterno di matrice con uno spessore di alcuni millimetri.

Nel presente capitolo viene proposta una procedura indiretta basata sull'approccio della meccanica della frattura (§ 2.5). In particolare, è stata sviluppata ed estesa al caso dei compositi FRCM la formulazione descritta in Yuan et al. (2004) per i compositi FRP (§ 7.2). La procedura è stata estesa al caso del composito costituito da matrice di malta Kerakoll. Sono stati, quindi, selezionati tra i provini precedentemente testati (§ 5) quelli che hanno mostrato la medesima modalità di crisi, ovvero perdita di adesione all'interfaccia fibra-matrice in alcuni casi seguita dalla rottura a trazione di alcuni filamenti di fibra. Quindi, attraverso l'integrazione di cinque differenti legami locali calibrati sulla base dei risultati di carico e scorrimento globale ottenuti sperimentalmente, sono state ottenute le curve analitiche del comportamento di adesione per ogni provino e per ognuna delle quattro tipologie di prova di adesione. Le curve analitiche carico-scorrimento globale sono state, infine, confrontate con quelle sperimentali al fine di individuare il legame locale in grado di descrivere il comportamento di adesione del composito con matrice Kerakoll per ogni tipologia di prova di adesione.

Le cinque modellazioni sono state implementate nel programma di calcolo Mathematica.

7.2. Richiami del modello di Yuan et al. (2004)

In Yuan et al. (2004) è presentato un metodo indiretto per la valutazione analitica del comportamento di adesione in compositi FRP, in cui la legge locale è calibrata sulla base dei risultati sperimentali globali di carico e scorrimento all'estremo caricato del composito.

In figura 7.1 è riportato un diagramma schematizzato che rappresenta il comportamento di adesione di un composito FRP derivante dalla modellazione analitica, nel quale i punti A, B e C, definendo i primi tre tratti della curva, assumono particolare rilevanza.

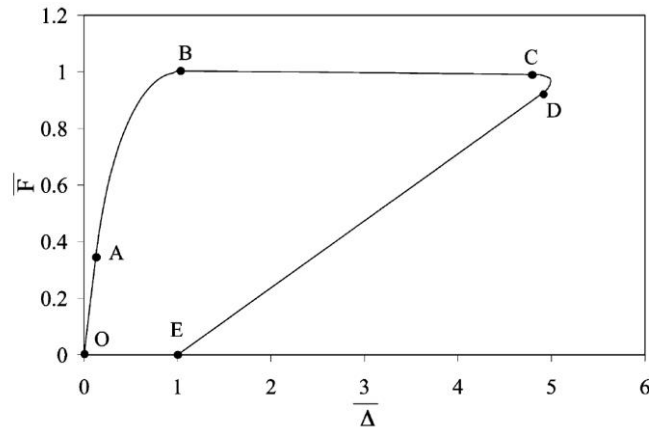


Fig. 7.1. Comportamento di adesione di un composito FRP (Yuan et al. 2004)

Si consideri lo schema riportato in figura 7.2 a e b, dove con il pedice p vengono indicate le caratteristiche del composito e con il pedice c le caratteristiche del supporto in calcestruzzo.

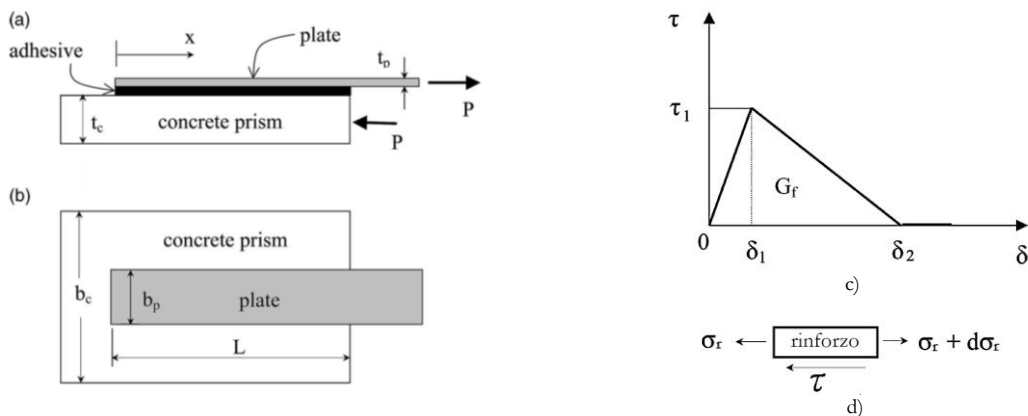


Fig. 7.2. a), b) Schematizzazione provino sottoposto a Single-Shear Test; c) legge locale bilineare; d) equilibrio di un coniglio infinitesimo di composito (Yuan et al. 2004)

Si ipotizzi non trascurabile la deformabilità del supporto e si ponga lo scorrimento totale $\delta(x)$ come somma degli scorrimenti di supporto $u_c(x)$ e composito $u_p(x)$:

$$\delta(x) = u_c(x) + u_p(x) \quad (7.1)$$

Si assuma un comportamento lineare elastico sia per il composito che per il supporto:

$$\sigma_p t_p b_p = \sigma_c t_c b_c = 0 \quad (7.2)$$

$$\sigma_p[\delta(x)] = E_p \frac{du_p[\delta(x)]}{ds} \quad (7.3)$$

$$\sigma_c[\delta(x)] = E_c \frac{du_c[\delta(x)]}{d\delta} \quad (7.4)$$

Dall'equazione di equilibrio di un concio infinitesimo di rinforzo (Fig. 7.2d):

$$\frac{d\sigma_c(x)}{dx} - \frac{\tau[\delta(x)]}{t_c} = 0 \quad (7.5)$$

si ottiene un'equazione differenziale di secondo ordine nella variabile scorrimento:

$$\frac{d^2\delta(x)}{dx^2} - \frac{2G_f}{\tau_1^2} \lambda^2 \tau[\delta(x)] = 0 \quad (7.6)$$

in cui τ_1 rappresenta la tensione tangenziale massima in corrispondenza della quale viene raggiunto uno scorrimento δ_1 all'estremo caricato del composito, G_f rappresenta l'energia di frattura, ovvero l'area sottesa al legame locale assunto trilineare (Fig. 7.2c) e:

$$\lambda^2 = \frac{\tau_1^2}{G_f} \left(\frac{1}{E_p t_p} + \frac{1}{b_c E_c t_c} \right) \quad (7.7)$$

Il legame locale è espresso dalla funzione:

$$\tau[\delta(x)] = \begin{cases} \frac{\tau_1}{\delta_1} \delta(x) & 0 \leq \delta(x) \leq \delta_1 \\ \frac{\tau_1}{\delta_2 - \delta_1} (\delta_2 - \delta(x)) & \delta_1 < \delta(x) \leq \delta_2 \\ 0 & \delta(x) > \delta_2 \end{cases} \quad (7.8)$$

Il problema è risolto in tre fasi, corrispondenti ai tre rami del legame locale di interfaccia.

Durante la fase I (Fig. 7.1, tratto OA) definita elastica, il legame locale è descritto dal primo ramo della curva trilineare. L'estremo caricato del composito è soggetto a scorrimenti minori di δ_1 . Sostituendo nella (7.7) la prima equazione della (7.8) e ponendo:

$$\lambda_1^2 = \lambda^2 \frac{2G_f}{\delta_1 \tau_1} \quad (7.9)$$

si ottiene una equazione differenziale di secondo grado:

$$\frac{d^2\delta(x)}{dx^2} - \lambda_1^2 \tau[\delta(x)] = 0 \quad (7.10)$$

da risolvere imponendo le seguenti condizioni al contorno:

$$\sigma_p(0) = 0 \quad (7.11)$$

$$\sigma_p(L) = \frac{F}{b_p t_p} \quad (7.12)$$

Risolta l'equazione differenziale, definendo lo scorrimento all'estremo caricato $\delta(L)=\Delta$ è possibile ricavare il carico applicato in funzione dello scorrimento Δ :

$$F(\Delta) = \frac{\tau_1 b_p \Delta}{\lambda_1 \delta_1} \tanh(\lambda_1 L) \quad (7.13)$$

Nella fase II (Fig. 7.1, tratto AB) il composito risulta caratterizzato dalla presenza di due zone: una prossima all'estremo caricato in cui il legame di interfaccia è rappresentato dal secondo ramo della curva trilineare, ovvero localmente gli scorrimenti registrati saranno compresi tra δ_1 e δ_2 , ed una zona ancora in fase elastica e soggetta a scorrimenti minori di δ_1 .

Sostituendo le corrispondenti equazioni (7.8) nella (7.6) e ponendo:

$$\lambda_2^2 = \lambda^2 \frac{2G_f}{(\delta_2 - \delta_1)\tau_1} \quad (7.14)$$

si ottengono le due equazioni differenziali di secondo grado:

$$\frac{d^2 \delta(x)}{dx^2} - \lambda_1^2 \tau[\delta(x)] = 0 \quad 0 \leq \delta(x) \leq \delta_1 \quad (7.15)$$

$$\frac{d^2 \delta(x)}{dx^2} + \lambda_2^2 \tau[\delta(x)] = \lambda_2^2 \delta_2 \quad \delta_1 < \delta(x) \leq \delta_2 \quad (7.16)$$

da risolvere imponendo le seguenti condizioni al contorno:

$$\sigma_p(0) = 0 \quad (7.17)$$

$$\sigma_p^+(L-a) = \sigma_p^-(L-a) \quad (7.18)$$

$$\delta(L-a) = \delta_1 \quad \text{o} \quad \tau(L-a) = \tau_1 \quad (7.19)$$

$$\sigma_p(L) = \frac{F}{b_p t_p} \quad (7.20)$$

In tale fase, all'estremo caricato del composito viene raggiunto il carico di debonding F_{db} . Il carico in $x=L$ può, quindi, essere espresso in funzione dello scorrimento tramite il parametro a , che rappresenta la lunghezza del tratto coinvolto nella seconda fase. È possibile determinare a imponendo:

$$\frac{dF(a)}{da} = 0 \quad (7.21)$$

La terza fase è caratterizzata dalla propagazione della delaminazione verso l'estremo libero del composito on conseguente traslazione della distribuzione delle tensioni tangenziali (Fig. 7.3e), fino a quando in $x=0$ non verrà raggiunto uno scorrimento pari ad δ_1 . Tale fase, corrispondente al ramo discendente della curva carico-scorrimento globale (Fig. 7.1), è governata dall'equazione (7.15) da risolvere con le seguenti condizioni al contorno:

$$\sigma_p(0) = 0 \quad (7.22)$$

$$\delta(a) = \delta_1 \quad (7.23)$$

$$\sigma_p(a) = \frac{F}{b_p t_p} \quad (7.24)$$

L'andamento delle tensioni tangenziali lungo l'interfaccia composito-supporto è rappresentato per ognuna delle suddette fasi in figura 7.3.

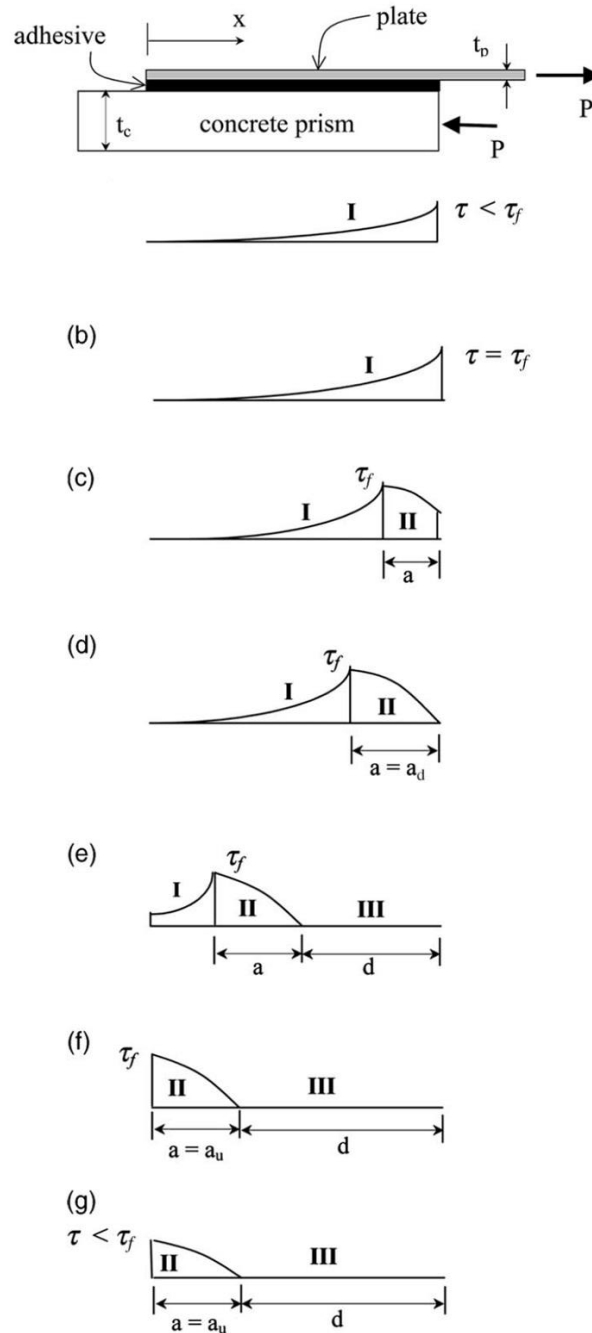


Fig. 7.3. Distribuzione delle tensioni tangenziali lungo l'interfaccia composito supporto (Yuan et al. 2004): a) fase I elastica; b) raggiungimento della tensione tangenziale massima all'estremo caricato; c) propagazione della fase II; d) perdita di adesione all'estremo caricato; e) propagazione della fase III, ovvero del fenomeno di debonding; f) raggiungimento della tensione tangenziale massima all'estremo libero; g) fase corrispondente al tratto DE in figura 7.1

7.3. Modellazioni analitiche

7.3.1. I legami locali d'interfaccia ed il comportamento di adesione

Nel seguito sono stati assunti cinque differenti legami locali d'interfaccia, ognuno dei quali è descritto dalle equazioni riportate in figura 7.4.

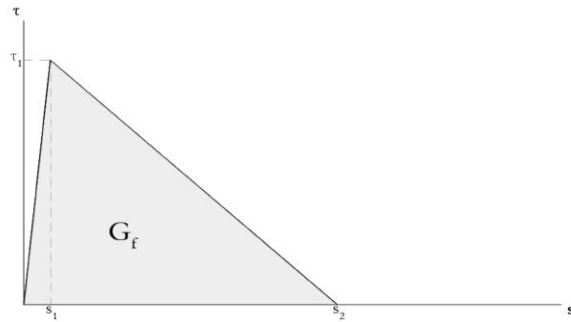
Il primo (legame locale A) rappresenta una delle forme più semplici ampiamente utilizzata in letteratura per lo studio dell'adesione nei compositi FRP. Tale legame è costituito da un primo ramo crescente, fino al raggiungimento della tensione tangenziale massima, a cui segue un secondo ramo decrescente, fino al raggiungimento di una tensione tangenziale nulla, per concludersi con un terzo tratto a tensione tangenziale costante e nulla.

L'osservazione durante le prove sperimentali di un comportamento di adesione particolarmente rigido (soprattutto nelle prove SST) ha suggerito l'adozione del legame B, costituito da un primo ramo crescente con pendenza costante, fino al raggiungimento della tensione tangenziale massima, e da un secondo tratto a tensione tangenziale costante e nulla.

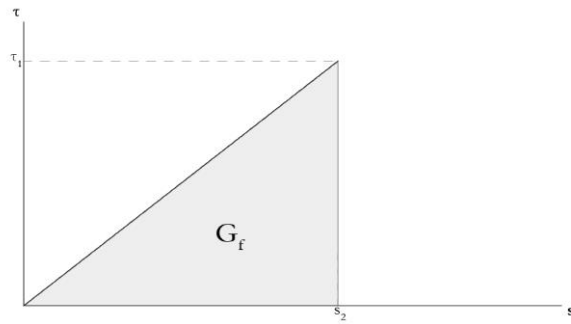
Il terzo legame presenta tre fasi, di cui la prima e la terza analoghe al primo legame, mentre la seconda è costituita da tratto costante e pari al valore della tensione tangenziale massima.

Analogamente al primo, il quarto ed il quinto legame prevedono un secondo ramo decrescente. Questo si interrompe raggiunta una tensione tangenziale non nulla. Il quinto si differenzia dal quarto per la presenza di un terzo ramo a tensione tangenziale costante e non nulla, analogo a quelli adottati in Carozzi et al. (2016) e D'Antino (2014).

Si noti che ad eccezione del legame B che ipotizza un comportamento lineare fino al raggiungimento della tensione tangenziale massima, i restanti legami si differenziano per l'andamento decrescente o costante della seconda fase e per la presenza o meno di una tensione tangenziale finale non nulla.



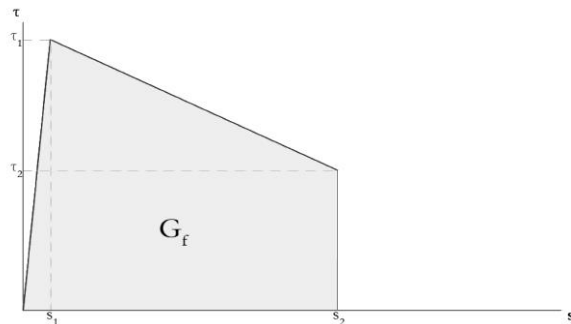
$$\tau[s(x)] = \begin{cases} \frac{\tau_1}{s_1} s(x) & 0 \leq s(x) \leq s_1 \\ \frac{\tau_1}{s_2 - s_1} (s_2 - s(x)) & s_1 < s(x) \leq s_2 \\ 0 & s(x) > s_2 \end{cases}$$



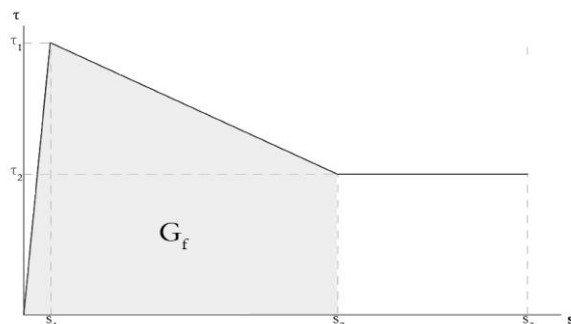
$$\tau[s(x)] = \begin{cases} \frac{\tau_1}{s_2} s(x) & 0 \leq s(x) \leq s_2 \\ 0 & s(x) > s_2 \end{cases}$$



$$\tau[s(x)] = \begin{cases} \frac{\tau_1}{s_1} s(x) & 0 \leq s(x) \leq s_1 \\ \tau_1 & s_1 < s(x) \leq s_2 \\ 0 & s(x) > s_2 \end{cases}$$



$$\tau[s(x)] = \begin{cases} \frac{\tau_1}{s_1} s(x) & 0 \leq s(x) \leq s_1 \\ \frac{\tau_1 - \tau_2}{s_1 - s_2} (s(x) - s_2) + \tau_2 & s_1 < s(x) \leq s_2 \\ 0 & s(x) > s_2 \end{cases}$$



$$\tau[s(x)] = \begin{cases} \frac{\tau_1}{s_1} s(x) & 0 \leq s(x) \leq s_1 \\ \frac{\tau_1 - \tau_2}{s_1 - s_2} (s(x) - s_2) + \tau_2 & s_1 < s(x) \leq s_2 \\ \tau_2 & s(x) > s_2 \end{cases}$$

Fig. 7.4. Legami locali d'interfaccia

Si definisca lunghezza efficace L_{eff} di adesione la minima lunghezza di incollaggio di un composito necessaria per sviluppare la massima capacità di adesione d'interfaccia (ovvero per raggiungere il carico di debonding). In letteratura è dimostrato come il comportamento di adesione di un composito FRCM con lunghezza di adesione $L > L_{eff}$ possa essere schematizzato come illustrato in figura 7.5. Nella schematizzazione i punti indicati con le lettere A, B e C assumono particolare rilievo, individuando le prime tre fasi di risposta del composito.

Lo scorrimento globale g altro non è che lo scorrimento locale s all'estremo caricato del composito, pertanto è possibile descrivere le suddette fasi in funzione delle corrispondenti fasi dei legami locali. Carico al limite della fase elastica, di debonding e carico massimo sono stati indicati nelle successive analisi come F_1 , F_2 ed F_3 , mentre i corrispondenti scorrimenti come s_1 , s_2 ed s_3 (Fig. 7.6).

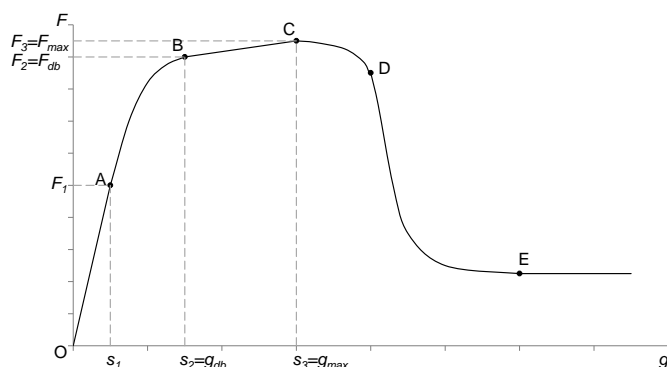


Fig. 7.5. Comportamento di adesione teorico di un composito FRCM

- Fase O-A: fase lineare elastica. Gli scorrimenti di interfaccia all'estremo caricato assumono valori crescenti tra 0 ed s_1 . Le tensioni tangenziali assumono (in tutti i legami locali) valori crescenti. In corrispondenza del punto A all'estremo caricato del composito viene raggiunto lo scorrimento s_1 e la tensione tangenziale massima τ_1 in corrispondenza di un carico applicato pari ad F_1 ; fa eccezione il legame locale B per il quale allo scorrimento s_1 corrisponde una tensione $\tau < \tau_1$.
- Fase A-B: fase intermedia. Rappresenta la fase crescente fino al raggiungimento del punto B, corrispondente al principio della perdita di adesione fibra-matrice, ovvero all'attingimento all'estremo caricato del carico di debonding F_2 e di uno scorrimento s_2 . La tensione tangenziale diminuisce fino ad un valore minimo pari a τ_2 con i legami locali D ed E, e nullo con il legame locale A. Il legame locale C ipotizza, invece, un andamento costante e pari a τ_1 , mentre il legame B un andamento crescente delle tensioni tangenziali con pendenza analoga a quella della prima fase, fino al raggiungimento all'estremo caricato della tensione tangenziale massima τ_1 .
- Fase B-C: fase di propagazione del fenomeno di debonding. Nonostante l'avvenuta perdita di adesione si registra un incremento di carico al crescere dello scorrimento fino al raggiungimento del valore massimo F_3 in corrispondenza del punto C. L'apporto in resistenza in tale fase è imputabile a tensioni tangenziali d'interfaccia "residue", conseguenti i fenomeni di ingranamento tra la rete di fibra e la matrice ed al comportamento telescopico (attrito interno al multi-filamento). I legami A, C e D, prevedendo in tale fase una tensione tangenziale nulla, approssimano il comportamento di

adesione del composito FRCM a quello di un composito FRP in cui tra i punti B e C non si registrano variazioni del valore di carico, per cui il carico di debonding corrisponde al valore massimo di carico. Contrariamente, i legami D ed E prendono in considerazione la presenza di tali tensioni residue τ_2 (Fig. 7.4E), per effetto delle quali si assiste ad un incremento del carico fino ad un valore massimo superiore a quello di debonding.

7.3.2. Formulazione generale

Si consideri lo schema di una generica prova di adesione di un composito FRCM riportato in figura 7.6a, in cui la variabile x , che individua la posizione sul composito adesivo, è posta nulla all'estremo libero e pari ad L all'estremo caricato del composito.

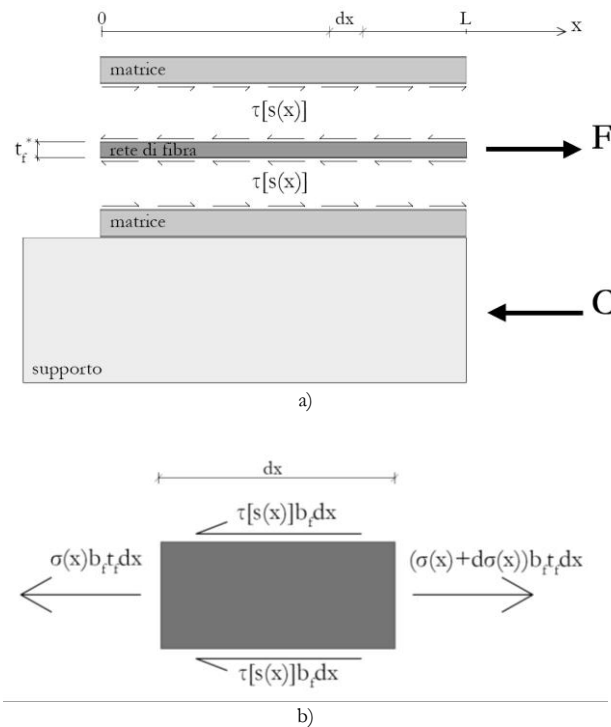


Fig.7.6. Schematizzazione a) prova di adesione, b) equilibrio di un conio infinitesimo di un multi-filamento di rete di fibra

Date le seguenti ipotesi:

- composito soggetto a solo sforzo assiale;
- fenomeni flessionali trascurabili;
- tensione normale $\sigma(x)$ in ogni punto del rinforzo di coordinata x uniformemente distribuita nella sezione trasversale del composito;
- interfaccia fibra-matrice soggetta a sole tensioni tangenziali;
- sezione trasversale del composito costante lungo la direzione delle sollecitazioni;

ed indicando con b_f e t_f la larghezza e lo spessore nominale del singolo multi-filamento (Tab. 3.1) e con s lo scorrimento locale, dall'equilibrio di un segmento infinitesimo di rete di fibra (Fig. 7.6b) si ottiene:

$$\frac{d\sigma(x)}{dx} = \frac{2}{t_f} \tau[s(x)] \quad (7.25)$$

Ipotizzando un comportamento lineare elastico a trazione della fibra, consideriamo l'equazione costitutiva:

$$\sigma(x) = E_f \varepsilon(x) \quad (7.26)$$

$$\frac{d\sigma(x)}{dx} = \frac{d\varepsilon(x)}{dx} E_f \quad (7.27)$$

Trascurando lo spostamento rigido del supporto, la (7.25) può essere riscritta come:

$$\frac{d^2 s(x)}{dx^2} = \frac{2}{t_f E_f} \tau[s(x)] \quad (7.28)$$

L'equazione differenziale del secondo ordine (7.28) nell'incognita $s(x)$ descrive il fenomeno di adesione in un composito FRCM. All'interno di essa la funzione:

$$\tau(s) = \tau[s(x)] \quad (7.29)$$

esprime il legame d'interfaccia, definito il quale è possibile risolvere la (7.28) e determinare l'andamento $s(x)$ degli scorrimenti lungo il composito. Le tensioni tangenziali $\tau(x)$ sono, quindi, determinate attraverso la (7.29), mentre la deformazione è definita come:

$$\varepsilon(x) = \frac{ds(x)}{dx} \quad (7.30)$$

Avendo assunto un comportamento lineare elastico della fibra si ha:

$$\frac{F}{A_f} = \varepsilon E_f \quad (7.31)$$

dalla quale è possibile ricavare la funzione $F(x)$ come:

$$F(x) = \varepsilon(x) A_f E_f \quad (7.32)$$

In cui A_f rappresenta la sezione trasversale della rete di fibra e $\varepsilon(x) = d's(x)/dx$.

Disponendo dei valori sperimentali del carico e del corrispondente scorrimento globale all'estremo caricato del composito in corrispondenza del limite elastico ($F_1; s_1$) e del punto di debonding ($F_2; s_2$), i parametri incogniti τ_1 e τ_2 dei legami locali d'interfaccia sono calibrati mediante la formulazione (§ 2.5.2):

$$F_2 = 2nb_f \sqrt{E_f t_f G_f} \quad (7.33)$$

nella quale l'energia di frattura G_f è definita come l'area sottesa al legame locale di interfaccia:

$$G_f = \int_0^\infty \tau[s(x)] ds \quad (7.34)$$

7.3.3. Legame locale A

Il legame locale bilineare è descritto dalle seguenti equazioni:

$$\tau[s(x)] = \begin{cases} \frac{\tau_1}{s_1} s(x) & 0 \leq s(x) \leq s_1 \\ \frac{\tau_1}{s_2 - s_1} (s_2 - s(x)) & s_1 < s(x) \leq s_2 \\ 0 & s(x) > s_2 \end{cases} \quad (7.35a,b,c)$$

L'energia di frattura, pari all'area sottesa al legame locale, risulta:

$$G_f = \frac{\tau_1 s_2}{2} \quad (7.36)$$

che sostituita nell'equazione (7.33) permette la valutazione di τ_f :

$$F_2 = 2nb_f \sqrt{E_f t_f \frac{\tau_1 s_2}{2}} \quad (7.37)$$

Note le equazioni che descrivono il legame locale di interfaccia, il problema viene risolto in due fasi, trascurando il terzo ramo a tensione tangenziale costante e nulla in quanto di poco interesse nel presente studio.

Nella prima fase lineare elastica il composito è soggetto a carichi inferiori a F_f e gli scorrimenti in $x=L$ risultano minori di s_f .

L'andamento delle tensioni tangenziali lungo il composito è mostrato in figura 7.7.

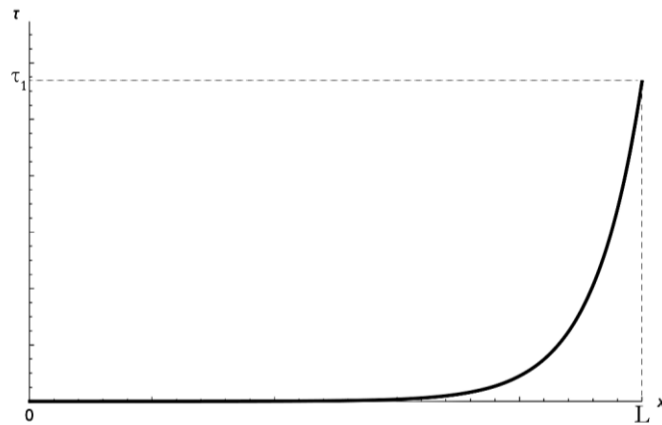


Fig. 7.7. Andamento delle tensioni tangenziali lungo la superficie d'interfaccia raggiunto il punto A del comportamento di adesione di figura 7.5

L'equazione differenziale di secondo grado risulta:

$$\frac{d^2 s(x)}{dx^2} = \frac{2\tau_1}{t_f E_f s_1} s(x) \quad (7.38)$$

ed è risolta imponendo le seguenti condizioni al contorno:

$$s(x) = 0 \quad \text{in } x=0 \quad (7.39)$$

$$N(x) = F_1 \quad \text{in } x=L \quad (7.40)$$

Durante la seconda fase la tensione tangenziale all'estremo caricato diminuisce, fino a raggiungere il valore nullo in corrispondenza di uno scorrimento s_2 . Una zona del composito risulta nel tratto decrescente del legame locale, mentre la zona più lontana dall'estremo caricato si trova ancora nel primo tratto crescente. L'andamento teorico delle tensioni tangenziali lungo il composito è illustrato in figura 7.8.

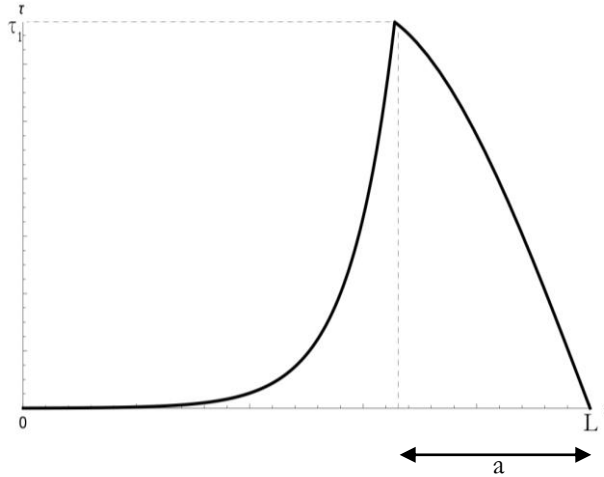


Fig. 7.8. Andamento teorico delle tensioni tangenziali lungo la superficie d'interfaccia raggiunto il punto B del comportamento di adesione di figura 7.5

Le equazioni che governano questa seconda fase sono due:

$$\frac{d^2s(x)}{dx^2} = \frac{2\tau_1}{t_f E_f s_1} s(x) \quad \text{per } 0 \leq x \leq (L-a) \quad (7.41)$$

$$\frac{d^2s(x)}{dx^2} = \frac{2}{t_f E_f s_2 - s_1} \tau_1 (s_2 - s(x)) \quad \text{per } (L-a) \leq x \leq L \quad (7.42)$$

dove a rappresenta l'estensione massima della zona interessata dal ramo decrescente del legame locale (Fig. 7.8).

Le equazioni sono risolte con le seguenti condizioni al contorno:

$$s(x) = 0 \quad \text{in } x=0 \quad (7.43)$$

$$s^-(x) = s_1 \quad \text{in } x=(L-a) \quad (7.44)$$

$$\varepsilon^-(x) = \varepsilon^+(x) \quad \text{in } x=(L-a) \quad (7.45)$$

$$s^-(x) = s^+(x) \quad \text{in } x=(L-a) \quad (7.46)$$

Il parametro a è ricavato imponendo $s(x)=s_2$ in $x=L$.

Ottenute le funzioni $s(x)$ che descrivono l'andamento degli scorrimenti lungo il composito, le funzioni delle tensioni tangenziali sono derivate dalle (7.35) e le funzioni $\varepsilon(x)$ e $F(x)$ sono definite come descritto precedentemente dalle equazioni (7.30) e (7.32).

Il carico di debonding analitico è, quindi, valutato come:

$$F(x) = \frac{ds(x)}{dx} nb_f t_f E_f \quad \text{con } x=L \quad (7.47)$$

Definito Δ lo scorrimento in $x=L$, i primi due tratti del comportamento carico-scorrimento globale vengono determinati dalle equazioni (7.46) e (7.47):

$$F_{OA}(\Delta) = 2nb_f \sqrt{E_f t_f G_f} \quad \text{per } 0 \leq \Delta \leq s_1 \quad (7.48)$$

$$F_{AB}(\Delta) = 2nb_f \sqrt{E_f t_f G_f} \quad \text{per } s_1 \leq \Delta \leq s_2 \quad (7.49)$$

7.3.4. Legame locale B

Il legame locale B (Fig. 7.4) è costituito da un unico tratto lineare crescente fino al raggiungimento della tensione tangenziale massima τ_f . Scorrimenti e tensioni risultano, quindi, crescenti fino al perseguimento del punto B ($F_2; s_2$) del comportamento di adesione (Fig. 7.5).

Le equazioni che descrivono il legame locale sono le seguenti:

$$\tau[s(x)] = \begin{cases} \frac{\tau_f}{s_2} s(x) & 0 \leq s(x) \leq s_2 \\ 0 & s(x) > s_2 \end{cases} \quad (7.50a,b)$$

L'energia di frattura, pari all'area sottesa al legame locale, risulta:

$$G_f = \frac{\tau_f s_2}{2} \quad (7.51)$$

che sostituita nell'equazione (7.33) permette la valutazione di τ_f :

$$F_2 = 2nb_f \sqrt{E_f t_f \frac{\tau_f s_2}{2}} \quad (7.52)$$

Il problema è risolto in unica fase, trascurando il secondo ramo a tensione tangenziale nulla del legame locale in quanto di scarso interesse nel presente studio.

Il problema è governato dalla seguente equazione differenziale di secondo grado:

$$\frac{d^2 s(x)}{dx^2} = \frac{2\tau_f}{t_f E_f s_2} s(x) \quad (7.53)$$

Da risolvere imponendo le seguenti condizioni al contorno:

$$s(x) = 0 \quad \text{in } x=0 \quad (7.54)$$

$$N(x) = F_2 \quad \text{in } x=L \quad (7.55)$$

Come descritto per il caso precedente, ottenuta la funzione $s(x)$ degli scorrimenti lungo il composito, l'andamento delle tensioni tangenziali è derivato dalle (7.50) e le funzioni $\varepsilon(x)$ e $F(x)$ sono definite dalle equazioni (7.30) e (7.32).

Il carico di debonding analitico viene, quindi, valutato attraverso la (7.47).

Definito Δ lo scorrimento in $x=L$, la curva analitica del comportamento carico-scorrimento globale è determinata attraverso l'equazione (7.56):

$$F_{OB}(\Delta) = 2nb_f \sqrt{E_f t_f G_f} \quad \text{per } 0 \leq \Delta \leq s_2 \quad (7.56)$$

7.3.5. Legame locale C

Il legame locale C è descritto dalle seguenti equazioni:

$$\tau[s(x)] = \begin{cases} \frac{\tau_1}{s_1} s(x) & 0 \leq s(x) \leq s_1 \\ \tau_1 & s_1 < s(x) \leq s_2 \\ 0 & s(x) > s_2 \end{cases} \quad (7.57a,b,c)$$

L'energia di frattura risulta:

$$G_f = \tau_1 \left(s_2 - \frac{s_1}{2} \right) \quad (7.58)$$

che sostituita nell'equazione (7.33) permette la valutazione di τ_f :

$$F_2 = 2nb_f \sqrt{E_f t_f \tau_1 \left(s_2 - \frac{s_1}{2} \right)} \quad (7.59)$$

Il problema è risolto in due fasi, la prima delle quali risulta analoga a quella descritta per il legame locale A. Si trascura il terzo ramo a tensione tangenziale nulla in quanto di scarso interesse nel presente studio.

Durante la seconda fase la tensione tangenziale all'estremo caricato si mantiene costante e pari a τ_1 , fino al raggiungimento dello scorrimento s_2 . Una zona del composito risulta nel tratto costante del legame locale, mentre la zona più lontana dall'estremo caricato si trova ancora nel primo tratto crescente.

L'andamento teorico delle tensioni tangenziali lungo il composito è illustrato in figura 7.9.

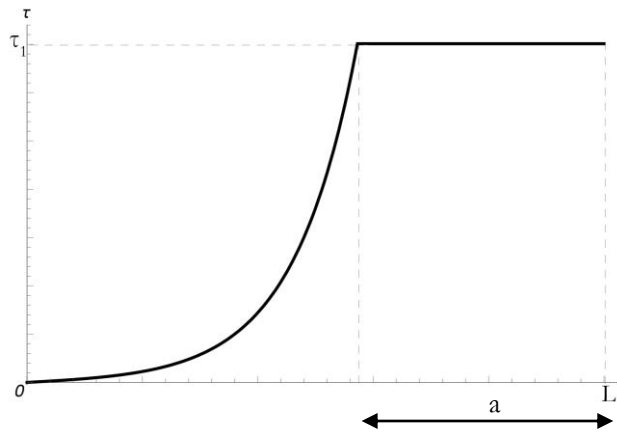


Fig. 7.9. Andamento teorico delle tensioni tangenziali lungo la superficie d'interfaccia raggiunto il punto B del comportamento di adesione di figura 7.5

Le equazioni che governano questa seconda fase sono le seguenti:

$$\frac{d^2 s(x)}{dx^2} = \frac{2\tau_1}{t_f E_f s_1} s(x) \quad \text{per } 0 \leq x \leq (L-a) \quad (7.60)$$

$$\frac{d^2 s(x)}{dx^2} = \frac{2}{t_f E_f} \tau_1 \quad \text{per } (L-a) \leq x \leq L \quad (7.61)$$

dove a rappresenta l'estensione massima della zona interessata dal ramo a tensione tangenziale costante del legame locale. Le equazioni sono risolte con le seguenti condizioni al contorno:

$$s(x) = 0 \quad \text{in } x=0 \quad (7.62)$$

$$s^-(x) = s_1 \quad \text{in } x=(L-a) \quad (7.63)$$

$$\varepsilon^+(x) = \varepsilon^-(x) \quad \text{in } x=(L-a) \quad (7.64)$$

$$s^+(x) = s_2 \quad \text{in } x=L \quad (7.65)$$

Il parametro a viene ricavato imponendo $s^+(x)=s_1$ in $x=(L-a)$.

Ottenute le funzioni $s(x)$ degli scorrimenti lungo il composito, l'andamento delle tensioni tangenziali è derivato dalle (7.57) e le funzioni $\varepsilon(x)$ e $F(x)$ sono definite dalle equazioni (7.30) e (7.32).

Il carico di debonding analitico è, quindi, valutato attraverso la (7.47).

I primi due tratti del comportamento di adesione sono determinati analogamente al caso del legame locale A (Eq. 7.48 e 7.49)

7.3.6. Legame locale D

Il legame D è definito dalle seguenti equazioni:

$$\tau[s(x)] = \begin{cases} \frac{\tau_1}{s_1} s(x) & 0 \leq s(x) \leq s_1 \\ \frac{\tau_1 - \tau_2}{s_1 - s_2} (s(x) - s_2) + \tau_2 & s_1 < s(x) \leq s_2 \\ 0 & s(x) > s_2 \end{cases} \quad (7.66)$$

In corrispondenza del punto A del comportamento di adesione (Fig. 7.5) all'estremo caricato è applicato il carico F_1 e scorrimento locale e tensione tangenziale risultano pari a s_1 e τ_1 .

Il lavoro compiuto è dato dall'area sottesa al primo ramo del legame locale e pari a $\frac{\tau_1 s_1}{2}$, che sostituito nell'equazione (7.33) permette la valutazione di τ_1 :

$$F_1 = 2nb_f \sqrt{E_f t_f \frac{\tau_1 s_1}{2}} \quad (7.67)$$

In corrispondenza del punto B del comportamento di adesione all'estremo caricato viene raggiunto il carico di debonding F_2 e scorrimento locale e tensione tangenziale risultano pari a s_2 e τ_2 .

L'energia di frattura data dall'area sottesa al legame locale è pari a $\frac{\tau_2(s_2 - s_1)}{2} + \frac{\tau_1 s_2}{2}$, che sostituita nell'equazione (7.33) permette la valutazione di τ_2 :

$$F_1 = 2nb_f \sqrt{E_f t_f \left(\frac{\tau_2(s_2 - s_1)}{2} + \frac{\tau_1 s_2}{2} \right)} \quad (7.68)$$

Il problema è risolto in due fasi, la prima delle quali risulta analoga a quella descritta per il legame locale A. Durante la seconda fase una zona del composito risulta nel secondo tratto del legame locale, mentre la zona più lontana dall'estremo caricato si trova ancora nel primo tratto crescente. L'andamento teorico delle tensioni tangenziali lungo il composito è illustrato in figura 7.10.

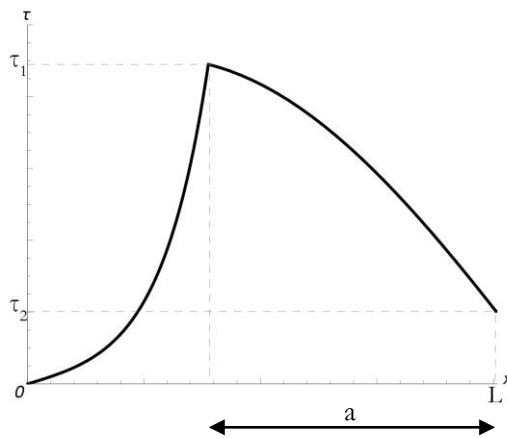


Fig.7.10. Andamento teorico delle tensioni tangenziali lungo la superficie d'interfaccia raggiunto il punto B del comportamento di adesione di figura 7.5

Le equazioni che governano questa seconda fase sono le seguenti:

$$\frac{d^2s(x)}{dx^2} = \frac{2\tau_1}{t_f E_f s_1} s(x) \quad \text{per } 0 \leq x \leq (L-a) \quad (7.69)$$

$$\frac{d^2s(x)}{dx^2} = \frac{2}{t_f E_f} \left[\frac{\tau_1 - \tau_2}{s_1 - s_2} (s(x) - s_2) + \tau_2 \right] \quad \text{per } (L-a) \leq x \leq L \quad (7.70)$$

dove a rappresenta l'estensione massima della zona interessata dal secondo ramo del legame locale (Fig. 7.10).

Le equazioni sono risolte con le seguenti condizioni al contorno:

$$s(x) = 0 \quad \text{in } x=0 \quad (7.71)$$

$$s^-(x) = s_1 \quad \text{in } x=(L-a) \quad (7.72)$$

$$\varepsilon^+(x) = \varepsilon^-(x) \quad \text{in } x=(L-a) \quad (7.73)$$

$$s^+(x) = s_2 \quad \text{in } x=L \quad (7.74)$$

Il parametro a è ricavato imponendo $s^+(x)=s_1$ in $x=(L-a)$.

Ottenute le funzioni $s(x)$ degli scorrimenti lungo il composito, l'andamento delle tensioni tangenziali è derivato dalle (7.66) e le funzioni $\varepsilon(x)$ e $F(x)$ sono definite attraverso le equazioni (7.30) e (7.32).

Il carico di debonding analitico è, quindi, valutato attraverso la (7.47).

I primi due tratti del comportamento di adesione sono determinati analogamente al caso del legame locale A (Eq. 7.48 e 7.49).

7.3.7. Legame locale E

Il legame D è definito dalle seguenti equazioni:

$$\tau[s(x)] = \begin{cases} \frac{\tau_1}{s_1} s(x) & 0 \leq s(x) \leq s_1 \\ \frac{\tau_1 - \tau_2}{s_1 - s_2} (s(x) - s_2) + \tau_2 & s_1 < s(x) \leq s_2 \\ \tau_2 & s(x) > s_2 \end{cases} \quad (7.75a,b,c)$$

Tale legame si presenta analogo a quello adottato precedentemente (legame D) con l'aggiunta di un terzo ramo a tensione tangenziale costante e pari a τ_2 . Tali tensioni “residue” sono indotte, superato il punto B (debonding), dall'ingranamento che si genera tra fibra e matrice e dall'attrito interno ai multi-filamenti generato dal comportamento telescopico, fino al raggiungimento del carico massimo F_3 in corrispondenza dell'estremo caricato (D'Antino 2014, Carozzi et al. 2016).

Il problema viene qui risolto attraverso tre fasi, di cui le prime due analoghe al caso del legame locale D.

Nella terza fase il composito risulta suddiviso in tre zone: una zona prossima all'estremo libero in cui gli scorrimenti sono inferiori a s_1 ed il corrispondente legame locale è il tratto lineare crescente, una zona in cui il legame locale è rappresentato dal secondo tratto con scorrimenti compresi tra s_1 e s_2 , ed una terza zona prossima all'estremo caricato dove gli scorrimenti locali sono compresi tra s_2 e s_3 ed il corrispondente tratto del legame locale risulta essere il terzo. L'andamento teorico delle tensioni tangenziali lungo il rinforzo è mostrato in figura 7.11.

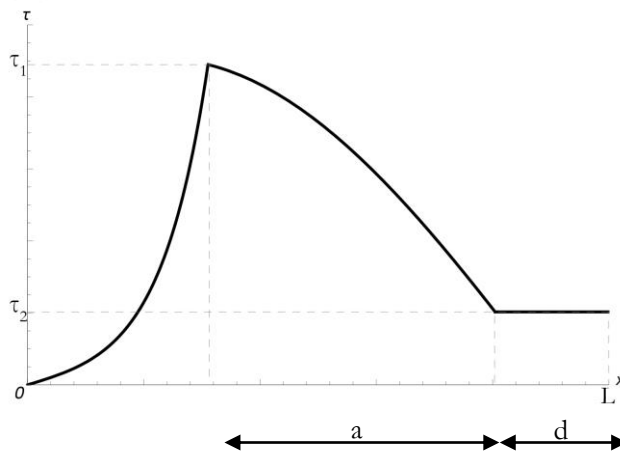


Fig. 7.11. Andamento teorico delle tensioni tangenziali lungo la superficie d'interfaccia raggiunto il punto C del comportamento di adesione di figura 7.5

La terza fase è, quindi, governata dalle seguenti equazioni differenziali:

$$\frac{d^2 s(x)}{dx^2} = \frac{2\tau_1}{t_f E_f s_1} s(x) \quad \text{per } 0 \leq x \leq (L-a-d) \quad (7.76)$$

$$\frac{d^2 s(x)}{dx^2} = \frac{2}{t_f E_f} \left[\frac{\tau_1 - \tau_2}{s_1 - s_2} (s(x) - s_2) + \tau_2 \right] \quad \text{per } (L-a-d) \leq x \leq L \quad (7.77)$$

$$\frac{d^2 s(x)}{dx^2} = \frac{2}{t_f E_f} \tau_2 \quad \text{per } 0 \leq x \leq (L-a-d) \quad (7.78)$$

dove a rappresenta l'estensione della zona interessata dal secondo ramo del legame locale e d l'estensione massima della zona interessata dal terzo ramo del legame locale (Fig. 7.11).

Le equazioni sono risolte con le seguenti condizioni al contorno:

$$s(x) = 0 \quad \text{in } x=0 \quad (7.79)$$

$$\varepsilon^-(x) = \varepsilon^+(x) \quad \text{in } x=(L-a-d) \quad (7.80)$$

$$s(x) = s_1 \quad \text{in } x=(L-a-d) \quad (7.81)$$

$$s(x) = s_2 \quad \text{in } x=(L-d) \quad (7.82)$$

$$s^-(x) = s^+(x) \quad \text{in } x=(L-d) \quad (7.83)$$

$$s(x) = s_3 \quad \text{in } x=L \quad (7.84)$$

Il parametro d viene ricavato imponendo $s(x)=s_2$ in $x=(L-d)$.

Ottenute le funzioni $s(x)$ degli scorrimenti lungo il composito, l'andamento delle tensioni tangenziali è derivato dalle (7.75) e le funzioni $\varepsilon(x)$ e $F(x)$ sono definite attraverso le equazioni (7.30) e (7.32).

Il carico di debonding analitico è, quindi, valutato attraverso la (7.47).

I primi due tratti del comportamento di adesione sono determinati analogamente ai casi precedenti (Eq. 7.48 e 7.49), mentre il terzo tratto è definito sostituendo nella (7.32) l'inversa della $s(x)$ del terzo tratto valutata in $x=L$, in modo tale da esprimere il carico in funzione dello scorrimento.

7.4. Risultati

Per ogni tipologia di prova sono stati selezionati i provini di composito con matrice Kerakoll che hanno mostrato comportamenti e modalità di crisi analoghe (perdita di adesione all'interfaccia fibra-matrice in alcuni casi seguita dalla rottura a trazione di alcuni filamenti di fibra). Successivamente, sono state applicate, sulla base dei risultati sperimentali di ogni provino e sulla base dei risultati medi per ogni tipologia di prova (SST, DST-A, DST-B, BT, descritte nel capitolo 5), i cinque modelli precedentemente descritti. Dall'integrazione dei legami locali sono stati, quindi, ottenute le curve carico-scorrimento globale per ogni provino e quelle medie per ogni tipologia di prova.

Nel seguito sono stati riportati i dati sperimentali utilizzati ed i risultati analitici ottenuti, per ognuna delle cinque modellazioni. Inoltre, i comportamenti di adesione medi analitici sono stati confrontati con quelli sperimentali per valutarne il livello di correlazione.

In allegato sono stati riportati i grafici di confronto tra le curve analitica e sperimentale del comportamento di adesione di ogni provino.

7.4.1. Legame locale A

Tab. 7.1. Provini Single-Shear Test

provino	Dati sperimentali						Risultati analitici		
	s ₁ [mm]	s ₂ [mm]	s ₃ [mm]	F ₁ [N]	F ₂ [N]	F ₃ [N]	τ ₁ [MPa]	τ ₂ [MPa]	G _f [N/mm]
SST.MKE.GS-01	0.28	0.93	0.99	723	2375	2576	1.124	0	0.523
SST.MKE.GS-04	0.12	0.84	1.22	473	2105	2785	0.977	0	0.410
SST.MKE.GS-05	0.14	0.86	1.23	544	2501	3276	1.348	0	0.579
SST.MKE.GS-06	0.08	0.76	1.17	351	2432	3034	1.442	0	0.548
media	0.16	0.85	1.15	523	2353	2918	1.207	0	0.513

Tab. 7.2. Provini Double-Shear Test-tipo A

provino	Dati sperimentali						Risultati analitici		
	s ₁ [mm]	s ₂ [mm]	s ₃ [mm]	F ₁ [N]	F ₂ [N]	F ₃ [N]	τ ₁ [MPa]	τ ₂ [MPa]	G _f [N/mm]
DST-A.MKE.GS-01b	0.23	0.92	1.54	671	2098	3130	0.886	0	0.408
DST-A.MKE.GS-02b	0.36	1.09	1.37	1164	2731	3165	1.268	0	0.691
DST-A.MKE.GS-03b	0.27	1.18	1.55	1204	2929	3356	1.347	0	0.795
media	0.29	1.06	1.49	1013	2586	3217	1.169	0	0.619

Tab. 7.3. Provini Double-Shear Test-tipo B

provino	Dati sperimentali						Risultati analitici		
	s ₁ [mm]	s ₂ [mm]	s ₃ [mm]	F ₁ [N]	F ₂ [N]	F ₃ [N]	τ ₁ [MPa]	τ ₂ [MPa]	G _f [N/mm]
DST-B.MKE.GS-01	0.11	0.70	1.17	745	2451	3236	1.590	0	0.557
DST-B.MKE.GS-02	0.06	0.68	1.05	642	2357	2865	1.514	0	0.515
DST-B.MKE.GS-03	0.05	1.03	1.48	474	2799	3164	1.409	0	0.726
DST-B.MKE.GS-05	0.06	1.03	2.05	566	2579	3308	1.196	0	0.616
DST-B.MKE.GS-06	0.09	0.94	1.28	574	2460	2584	1.193	0	0.561
media	0.07	0.88	1.41	600	2529	3031	1.347	0	0.592

Tab. 7.4. Provini Beam Test

provino	Dati sperimentali						Risultati analitici		
	s ₁ [mm]	s ₂ [mm]	s ₃ [mm]	F ₁ [N]	F ₂ [N]	F ₃ [N]	τ ₁ [MPa]	τ ₂ [MPa]	G _f [N/mm]
BT.MKE.GS-01bis	0.11	1.08	1.40	745	2147	2397	0.791	0	0.427
BT.MKE.GS-02bis	0.03	0.85	1.84	356	2387	3389	1.242	0	0.528
BT.MKE.GS-03bis	0.01	1.36	2.00	370	3073	3471	1.286	0	0.875
media	0.05	1.10	1.75	490	2536	3086	1.093	0	0.596

F₁ e s₁ rappresentano il carico e lo scorrimento all'estremo caricato del composito al termine della fase elastica del comportamento di adesione;
 F₂ e s₂ rappresentano il carico di debonding ed il corrispondente scorrimento all'estremo caricato del composito;
 F₃ e s₃ rappresentano il carico massimo ed il corrispondente scorrimento all'estremo caricato del composito;
 τ₁ e τ₂ rappresentano le tensioni tangenziali in corrispondenza degli scorrimenti s₁ e s₂;
 G_f rappresenta l'energia di frattura.

In figura 7.12 sono stati riportati per ogni tipologia di prova i comportamenti analitici medi ed i comportamenti sperimentali di ogni provino.

Dal confronto è emersa una buona approssimazione della prima fase lineare elastica, mentre la seconda fase del comportamento analitico tende a sovrastimare il valore del carico, in particolare per le tipologie di prova SST e DST-A.

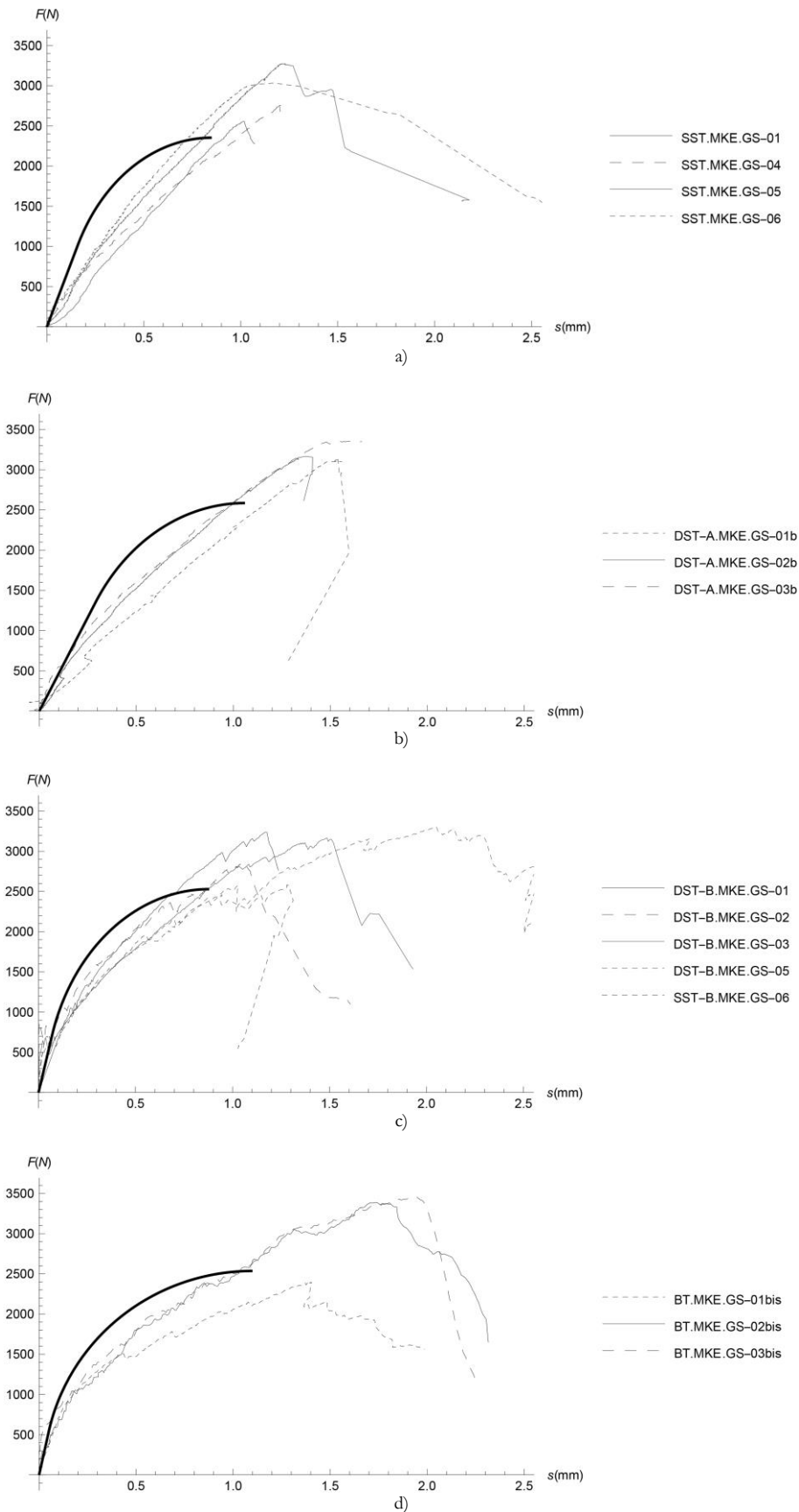


Fig. 7.12. Confronto curve carico-scorrimento globale analitiche (linea continua nera) e sperimentali: a) Single-Shear Test; b) Double-Shear test-tipo A; c) Double-Shear Test-tipo B; d) Beam Test

7.4.2. Legame locale B

Tab. 7.5. Provini Single-Shear Test

provino	Dati sperimentali						Risultati analitici		
	s ₁ [mm]	s ₂ [mm]	s ₃ [mm]	F ₁ [N]	F ₂ [N]	F ₃ [N]	τ ₁ [MPa]	τ ₂ [MPa]	G _f [N/mm]
SST.MKE.GS-01	0.28	0.93	0.99	723	2375	2576	1.124	-	0.523
SST.MKE.GS-04	0.12	0.84	1.22	473	2105	2785	0.977	-	0.410
SST.MKE.GS-05	0.14	0.86	1.23	544	2501	3276	1.348	-	0.579
SST.MKE.GS-06	0.08	0.76	1.17	351	2432	3034	1.442	-	0.548
media	0.16	0.85	1.15	523	2353	2918	1.207	-	0.513

Tab. 7.6. Provini Double-Shear Test-tipo A

provino	Dati sperimentali						Risultati analitici		
	s ₁ [mm]	s ₂ [mm]	s ₃ [mm]	F ₁ [N]	F ₂ [N]	F ₃ [N]	τ ₁ [MPa]	τ ₂ [MPa]	G _f [N/mm]
DST-A.MKE.GS-01b	0.23	0.92	1.54	671	2098	3130	0.886	-	0.408
DST-A.MKE.GS-02b	0.36	1.09	1.37	1164	2731	3165	1.268	-	0.691
DST-A.MKE.GS-03b	0.27	1.18	1.55	1204	2929	3356	1.347	-	0.795
media	0.29	1.06	1.49	1013	2586	3217	1.169	-	0.619

Tab. 7.7. Provini Double-Shear Test-tipo B

provino	Dati sperimentali						Risultati analitici		
	s ₁ [mm]	s ₂ [mm]	s ₃ [mm]	F ₁ [N]	F ₂ [N]	F ₃ [N]	τ ₁ [MPa]	τ ₂ [MPa]	G _f [N/mm]
DST-B.MKE.GS-01	0.11	0.70	1.17	745	2451	3236	1.590	-	0.557
DST-B.MKE.GS-02	0.06	0.68	1.05	642	2357	2865	1.514	-	0.515
DST-B.MKE.GS-03	0.05	1.03	1.48	474	2799	3164	1.409	-	0.726
DST-B.MKE.GS-05	0.06	1.03	2.05	566	2579	3308	1.196	-	0.616
DST-B.MKE.GS-06	0.09	0.94	1.28	574	2460	2584	1.193	-	0.561
media	0.07	0.88	1.41	600	2529	3031	1.347	-	0.592

Tab. 7.8. Provini Beam Test

provino	Dati sperimentali						Risultati analitici		
	s ₁ [mm]	s ₂ [mm]	s ₃ [mm]	F ₁ [N]	F ₂ [N]	F ₃ [N]	τ ₁ [MPa]	τ ₂ [MPa]	G _f [N/mm]
BT.MKE.GS-01bis	0.11	1.08	1.40	745	2147	2397	0.791	-	0.427
BT.MKE.GS-02bis	0.03	0.85	1.84	356	2387	3389	1.242	-	0.528
BT.MKE.GS-03bis	0.01	1.36	2.00	370	3073	3471	1.286	-	0.875
media	0.05	1.10	1.75	490	2536	3086	1.093	-	0.596

F₁ e s₁ rappresentano il carico e lo scorrimento all'estremo caricato del composito al termine della fase elastica del comportamento di adesione;

F₂ e s₂ rappresentano il carico di debonding ed il corrispondente scorrimento all'estremo caricato del composito;

F₃ e s₃ rappresentano il carico massimo ed il corrispondente scorrimento all'estremo caricato del composito;

τ₁ e τ₂ rappresentano le tensioni tangenziali in corrispondenza degli scorrimenti s₁ e s₂;

G_f rappresenta l'energia di frattura.

Dato il legame locale utilizzato, il comportamento di adesione analitico presenta un unico tratto elastico lineare fino al raggiungimento del carico di debonding.

È evidente come tale modello non sia adatto a fornire una relazione carico-scorrimento globale attendibile, come evidenziato dai confronti tra i comportamenti globali medi analitici ed i comportamenti sperimentali riportati in figura 7.13 per ogni tipologia di prova.

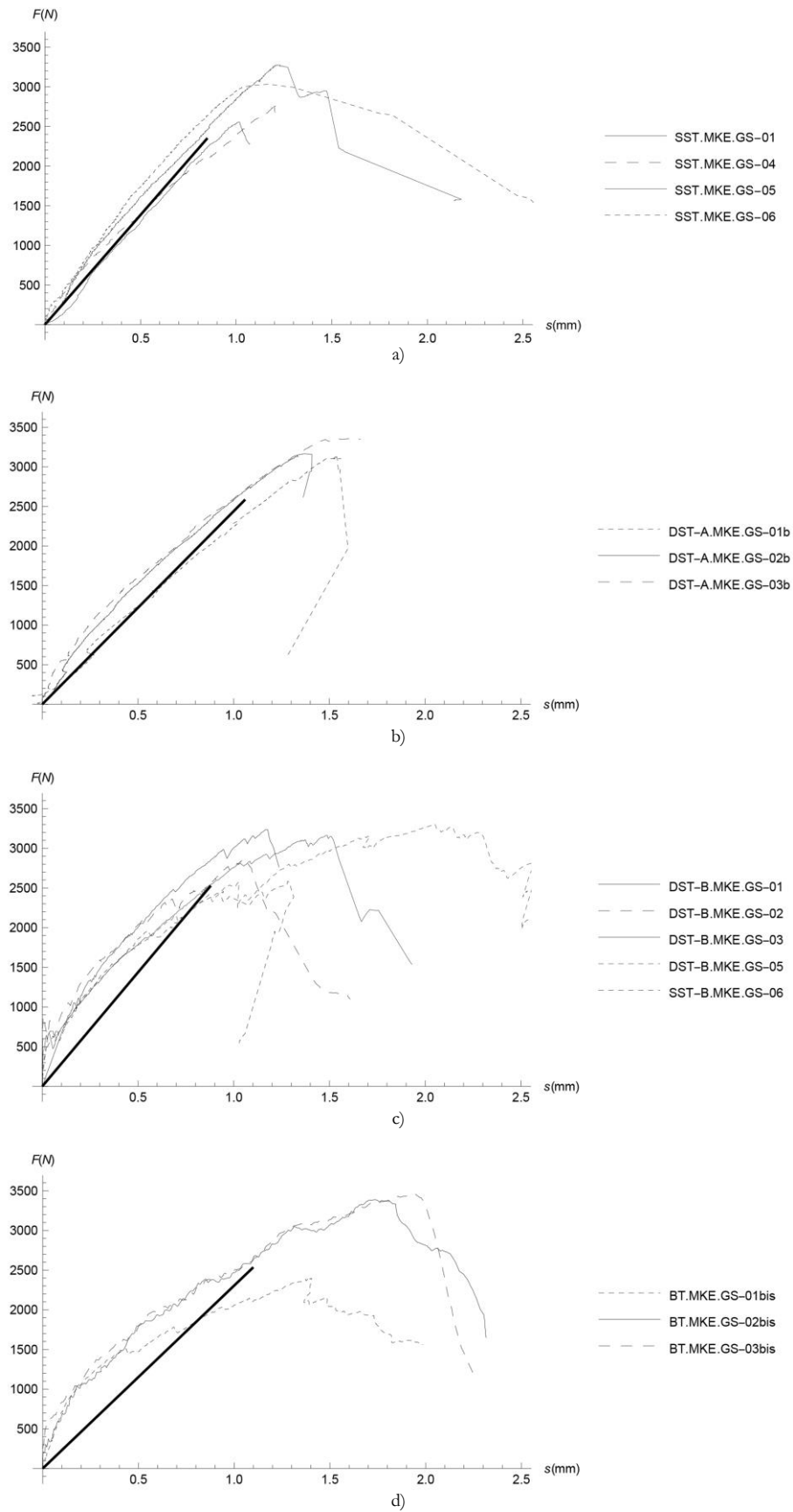


Fig. 7.13. Confronto curve carico-scorrimento globale analitiche (linea continua nera) e sperimentali: a) Single-Shear Test; b) Double-Shear test-tipo A; c) Double-Shear Test-tipo B; d) Beam Test

7.4.3. Legame locale C

Tab. 7.9. Provini Single-Shear Test

provino	Dati sperimentali						Risultati analitici		
	s ₁ [mm]	s ₂ [mm]	s ₃ [mm]	F ₁ [N]	F ₂ [N]	F ₃ [N]	τ ₁ [MPa]	τ ₂ [MPa]	G _f [N/mm]
SST.MKE.GS-01	0.28	0.93	0.99	723	2375	2576	0.661	0.661	0.523
SST.MKE.GS-04	0.12	0.84	1.22	473	2105	2785	0.526	0.526	0.410
SST.MKE.GS-05	0.14	0.86	1.23	544	2501	3276	0.733	0.733	0.579
SST.MKE.GS-06	0.08	0.76	1.17	351	2432	3034	0.761	0.761	0.548
media	0.16	0.85	1.15	523	2353	2918	0.666	0.666	0.513

Tab. 7.10. Provini Double-Shear Test-tipo A

provino	Dati sperimentali						Risultati analitici		
	s ₁ [mm]	s ₂ [mm]	s ₃ [mm]	F ₁ [N]	F ₂ [N]	F ₃ [N]	τ ₁ [MPa]	τ ₂ [MPa]	G _f [N/mm]
DST-A.MKE.GS-01b	0.23	0.92	1.54	671	2098	3130	0.507	0.507	0.408
DST-A.MKE.GS-02b	0.36	1.09	1.37	1164	2731	3165	0.759	0.759	0.691
DST-A.MKE.GS-03b	0.27	1.18	1.55	1204	2929	3356	0.761	0.761	0.795
media	0.29	1.06	1.49	1013	2586	3217	0.677	0.677	0.619

Tab. 7.11. Provini Double-Shear Test-tipo B

provino	Dati sperimentali						Risultati analitici		
	s ₁ [mm]	s ₂ [mm]	s ₃ [mm]	F ₁ [N]	F ₂ [N]	F ₃ [N]	τ ₁ [MPa]	τ ₂ [MPa]	G _f [N/mm]
DST-B.MKE.GS-01	0.11	0.70	1.17	745	2451	3236	0.863	0.863	0.557
DST-B.MKE.GS-02	0.06	0.68	1.05	642	2357	2865	0.792	0.792	0.515
DST-B.MKE.GS-03	0.05	1.03	1.48	474	2799	3164	0.722	0.722	0.726
DST-B.MKE.GS-05	0.06	1.03	2.05	566	2579	3308	0.616	0.616	0.616
DST-B.MKE.GS-06	0.09	0.94	1.28	574	2460	2584	0.626	0.626	0.561
media	0.07	0.88	1.41	600	2529	3031	0.701	0.701	0.592

Tab. 7.12 Provini Beam Test

provino	Dati sperimentali						Risultati analitici		
	s ₁ [mm]	s ₂ [mm]	s ₃ [mm]	F ₁ [N]	F ₂ [N]	F ₃ [N]	τ ₁ [MPa]	τ ₂ [MPa]	G _f [N/mm]
BT.MKE.GS-01bis	0.11	1.08	1.40	745	2147	2397	0.417	0.417	0.427
BT.MKE.GS-02bis	0.03	0.85	1.84	356	2387	3389	0.632	0.632	0.528
BT.MKE.GS-03bis	0.01	1.36	2.00	370	3073	3471	0.645	0.645	0.875
media	0.05	1.10	1.75	490	2536	3086	0.554	0.554	0.596

F₁ e s₁ rappresentano il carico e lo scorrimento all'estremo caricato del composito al termine della fase elastica del comportamento di adesione;

F₂ e s₂ rappresentano il carico di debonding ed il corrispondente scorrimento all'estremo caricato del composito;

F₃ e s₃ rappresentano il carico massimo ed il corrispondente scorrimento all'estremo caricato del composito;

τ₁ e τ₂ rappresentano le tensioni tangenziali in corrispondenza degli scorrimenti s₁ e s₂;

G_f rappresenta l'energia di frattura.

In figura 7.14 sono stati riportati per ogni tipologia di prova i comportamenti analitici medi ed i comportamenti sperimentali di ogni provino.

Il presente modello mostra una buona stima del comportamento di adesione, in particolare nel caso delle prove di adesione DST-B e BT per le quali la curva media analitica risulta perfettamente contenuta tra quelle sperimentali.

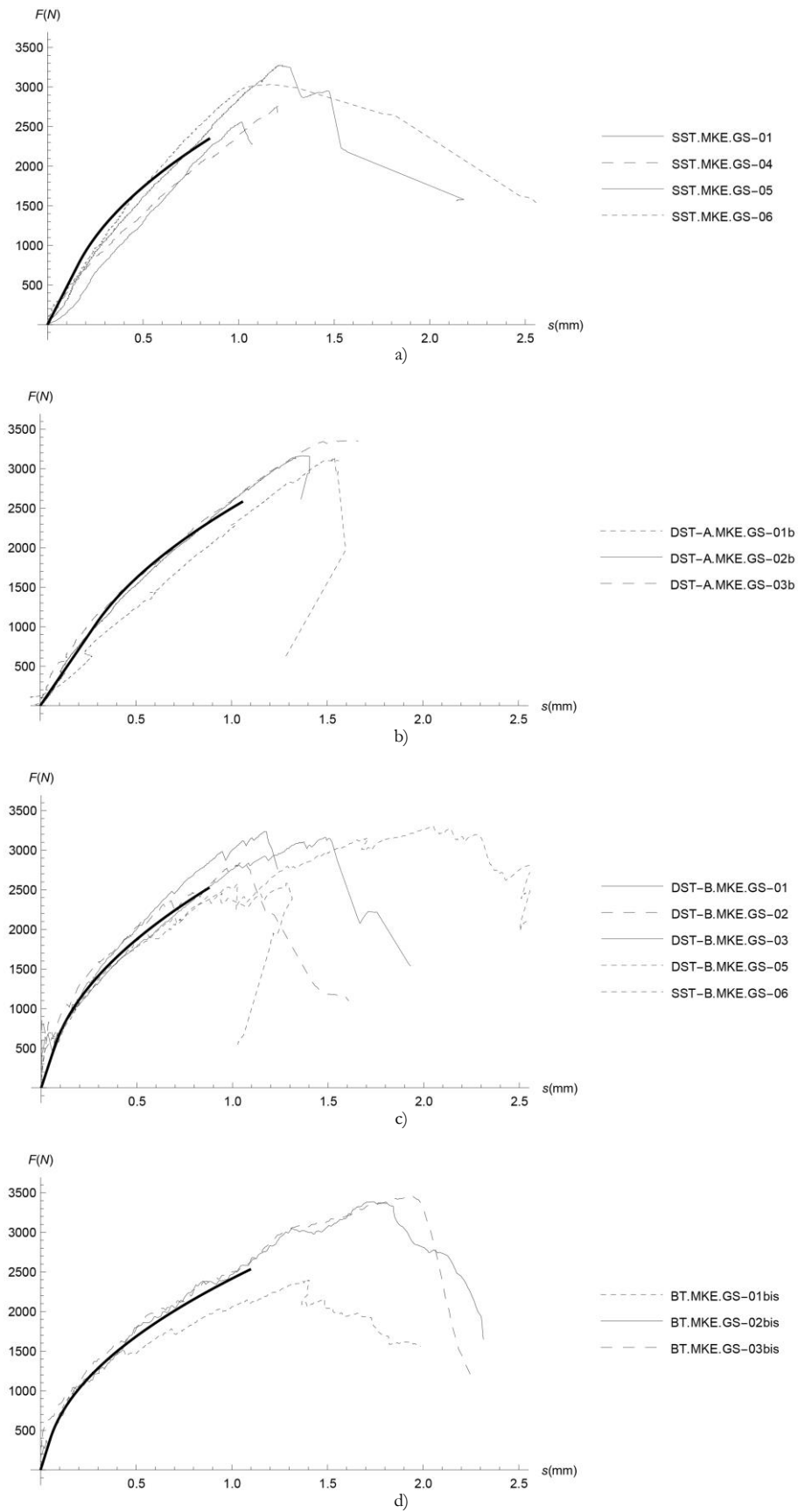


Fig. 7.14. Confronto curve carico-scorrimento globale analitiche (linea continua nera) e sperimentali: a) Single-Shear Test; b) Double-Shear test-tipo A; c) Double-Shear Test-tipo B; d) Beam Test

Tab. 7.13. Provini Single-Shear Test

provino	Dati sperimentali						Risultati analitici		
	s ₁ [mm]	s ₂ [mm]	s ₃ [mm]	F ₁ [N]	F ₂ [N]	F ₃ [N]	τ ₁ [MPa]	τ ₂ [MPa]	G _f [N/mm]
SST.MKE.GS-01	0.28	0.93	0.99	723	2375	2576	0.346	1.113	0.523
SST.MKE.GS-04	0.12	0.84	1.22	473	2105	2785	0.345	0.737	0.410
SST.MKE.GS-05	0.14	0.86	1.23	544	2501	3276	0.392	1.142	0.579
SST.MKE.GS-06	0.08	0.76	1.17	351	2432	3034	0.285	1.293	0.548
media	0.16	0.85	1.15	523	2353	2918	0.317	1.096	0.513

Tab. 7.14. Provini Double-Shear Test-tipo A

provino	Dati sperimentali						Risultati analitici		
	s ₁ [mm]	s ₂ [mm]	s ₃ [mm]	F ₁ [N]	F ₂ [N]	F ₃ [N]	τ ₁ [MPa]	τ ₂ [MPa]	G _f [N/mm]
DST-A.MKE.GS-01b	0.23	0.92	1.54	671	2098	3130	0.363	0.698	0.408
DST-A.MKE.GS-02b	0.36	1.09	1.37	1164	2731	3165	0.697	0.852	0.691
DST-A.MKE.GS-03b	0.27	1.18	1.55	1204	2929	3356	0.995	0.457	0.795
media	0.29	1.06	1.49	1013	2586	3217	0.656	0.707	0.619

Tab. 7.15. Provini Double-Shear Test-tipo B

provino	Dati sperimentali						Risultati analitici		
	s ₁ [mm]	s ₂ [mm]	s ₃ [mm]	F ₁ [N]	F ₂ [N]	F ₃ [N]	τ ₁ [MPa]	τ ₂ [MPa]	G _f [N/mm]
DST-B.MKE.GS-01	0.11	0.70	1.17	745	2451	3236	0.935	0.777	0.557
DST-B.MKE.GS-02	0.06	0.68	1.05	642	2357	2865	1.273	0.264	0.515
DST-B.MKE.GS-03	0.05	1.03	1.48	474	2799	3164	0.833	0.606	0.726
DST-B.MKE.GS-05	0.06	1.03	2.05	566	2579	3308	0.989	0.220	0.616
DST-B.MKE.GS-06	0.09	0.94	1.28	574	2460	2584	0.678	0.569	0.561
media	0.07	0.88	1.41	600	2529	3031	0.953	0.428	0.592

Tab. 7.16. Provini Beam Test

provino	Dati sperimentali						Risultati analitici		
	s ₁ [mm]	s ₂ [mm]	s ₃ [mm]	F ₁ [N]	F ₂ [N]	F ₃ [N]	τ ₁ [MPa]	τ ₂ [MPa]	G _f [N/mm]
BT.MKE.GS-01bis	0.11	1.08	1.40	745	2147	2397	-	-	-
BT.MKE.GS-02bis	0.03	0.85	1.84	356	2387	3389	0.783	0.476	0.528
BT.MKE.GS-03bis	0.01	1.36	2.00	370	3073	3471	-	-	-
media	0.05	1.10	1.75	490	2536	3086	0.890	0.203	0.596

F₁ e s₁ rappresentano il carico e lo scorrimento all'estremo caricato del composito al termine della fase elastica del comportamento di adesione;

F₂ e s₂ rappresentano il carico di debonding ed il corrispondente scorrimento all'estremo caricato del composito;

F₃ e s₃ rappresentano il carico massimo ed il corrispondente scorrimento all'estremo caricato del composito;

τ₁ e τ₂ rappresentano le tensioni tangenziali in corrispondenza degli scorrimenti s₁ e s₂;

G_f rappresenta l'energia di frattura.

In figura 7.15 sono stati riportati per ogni tipologia di prova i comportamenti analitici medi ed i comportamenti sperimentali di ogni provino. Le curve analitiche dimostrano una buona correlazione con quelle sperimentali. In particolare, si osserva che rispetto al modello con legame locale C la correlazione risulta migliore nel caso di prove SST e DST-A e simile nel caso di prove DST-B, mentre per la prova BT il modello approssima peggio il comportamento di adesione sperimentale. È da sottolineare che in quest'ultimo caso la curva analitica è stata costruita mediante i dati sperimentali di un unico provino, non avendo ottenuto risultati attendibili dall'integrazione del legame locale per i provini BT.MKE.GS-01bis e 02bis.

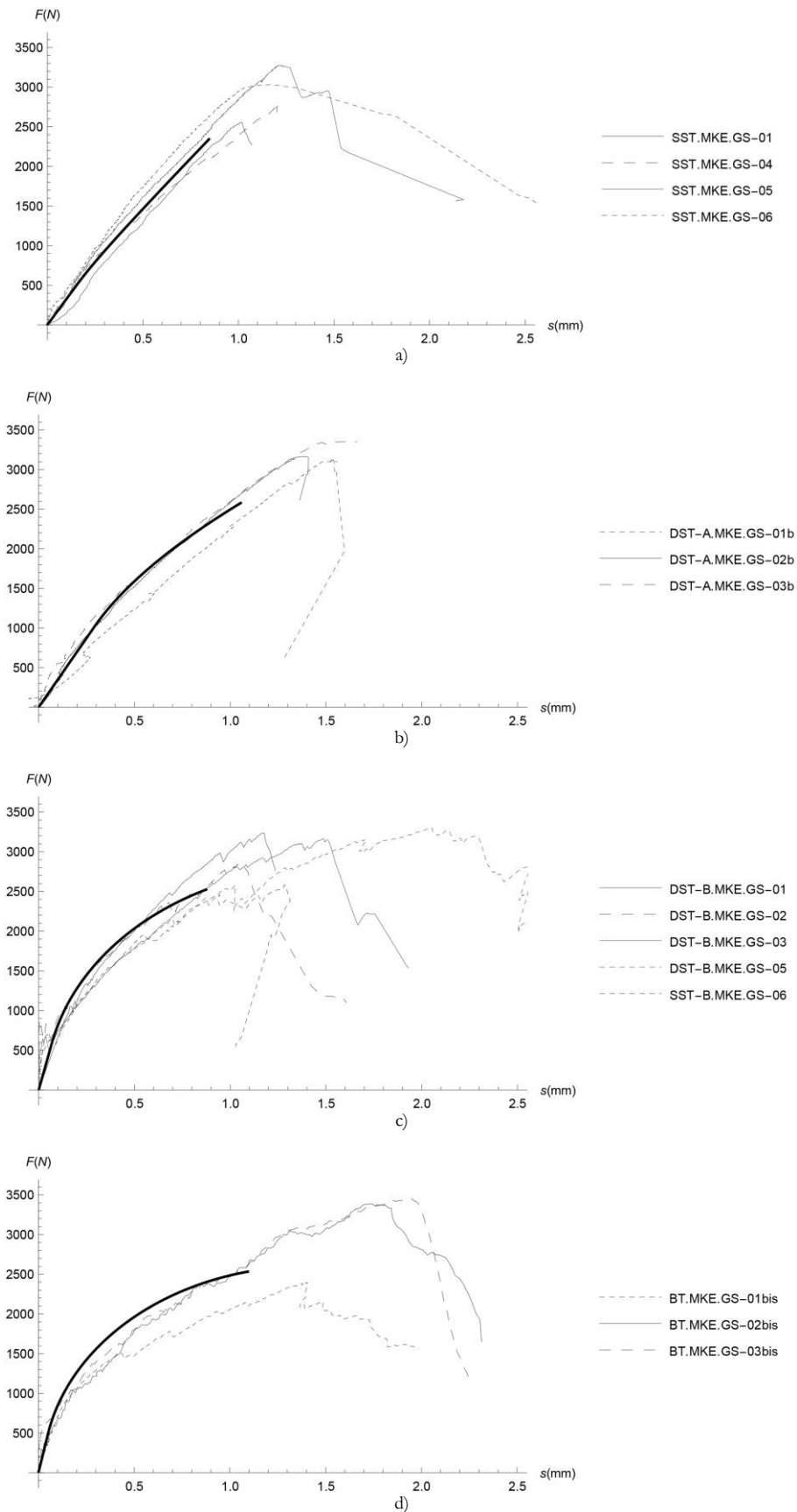


Fig. 7.15. Confronto curve carico-scorrimento globale analitiche (linea continua nera) e sperimentali: a) Single-Shear Test; b) Double-Shear test-tipo A; c) Double-Shear Test-tipo B; d) Beam Test

Tab. 7.17. Provini Single-Shear Test

provino	Dati sperimentali						Risultati analitici		
	s ₁ [mm]	s ₂ [mm]	s ₃ [mm]	F ₁ [N]	F ₂ [N]	F ₃ [N]	τ ₁ [MPa]	τ ₂ [MPa]	G _f [N/mm]
SST.MKE.GS-01	0.28	0.93	0.99	723	2375	2576	0.346	1.113	0.523
SST.MKE.GS-04	0.12	0.84	1.22	473	2105	2785	0.345	0.737	0.410
SST.MKE.GS-05	0.14	0.86	1.23	544	2501	3276	0.392	1.142	0.579
SST.MKE.GS-06	0.08	0.76	1.17	351	2432	3034	0.285	1.293	0.548
media	0.16	0.85	1.15	523	2353	2918	0.317	1.096	0.513

Tab. 7.18. Provini Double-Shear Test-tipo A

provino	Dati sperimentali						Risultati analitici		
	s ₁ [mm]	s ₂ [mm]	s ₃ [mm]	F ₁ [N]	F ₂ [N]	F ₃ [N]	τ ₁ [MPa]	τ ₂ [MPa]	G _f [N/mm]
DST-A.MKE.GS-01b	0.23	0.92	1.54	671	2098	3130	0.363	0.698	0.408
DST-A.MKE.GS-02b	0.36	1.09	1.37	1164	2731	3165	0.697	0.852	0.691
DST-A.MKE.GS-03b	0.27	1.18	1.55	1204	2929	3356	0.995	0.457	0.795
media	0.29	1.06	1.49	1013	2586	3217	0.656	0.707	0.619

Tab. 7.19. Provini Double-Shear Test-tipo B

provino	Dati sperimentali						Risultati analitici		
	s ₁ [mm]	s ₂ [mm]	s ₃ [mm]	F ₁ [N]	F ₂ [N]	F ₃ [N]	τ ₁ [MPa]	τ ₂ [MPa]	G _f [N/mm]
DST-B.MKE.GS-01	0.11	0.70	1.17	745	2451	3236	0.935	0.777	0.557
DST-B.MKE.GS-02	0.06	0.68	1.05	642	2357	2865	1.273	0.264	0.515
DST-B.MKE.GS-03	0.05	1.03	1.48	474	2799	3164	0.833	0.606	0.726
DST-B.MKE.GS-05	0.06	1.03	2.05	566	2579	3308	0.989	0.220	0.616
DST-B.MKE.GS-06	0.09	0.94	1.28	574	2460	2584	0.678	0.569	0.561
media	0.07	0.88	1.41	600	2529	3031	0.953	0.428	0.592

Tab. 7.20. Provini Beam Test

provino	Dati sperimentali						Risultati analitici		
	s ₁ [mm]	s ₂ [mm]	s ₃ [mm]	F ₁ [N]	F ₂ [N]	F ₃ [N]	τ ₁ [MPa]	τ ₂ [MPa]	G _f [N/mm]
BT.MKE.GS-01bis	0.11	1.08	1.40	745	2147	2397	-	-	-
BT.MKE.GS-02bis	0.03	0.85	1.84	356	2387	3389	0.783	0.476	0.528
BT.MKE.GS-03bis	0.01	1.36	2.00	370	3073	3471	-	-	-
media	0.05	1.10	1.75	490	2536	3086	0.890	0.203	0.596

F₁ e s₁ rappresentano il carico e lo scorrimento all'estremo caricato del composito al termine della fase elastica del comportamento di adesione;

F₂ e s₂ rappresentano il carico di debonding ed il corrispondente scorrimento all'estremo caricato del composito;

F₃ e s₃ rappresentano il carico massimo ed il corrispondente scorrimento all'estremo caricato del composito;

τ₁ e τ₂ rappresentano le tensioni tangenziali in corrispondenza degli scorrimenti s₁ e s₂;

G_f rappresenta l'energia di frattura.

In figura 7.16 sono stati riportati per ogni tipologia di prova i comportamenti analitici medi ed i comportamenti sperimentali di ogni provino. L'aggiunta del terzo tratto a tensione tangenziale costante non nulla, rispetto al modello precedente, ha permesso di ottenere delle curve analitiche che stimano il comportamento di adesione del composito fino al raggiungimento dello scorrimento massimo s₃.

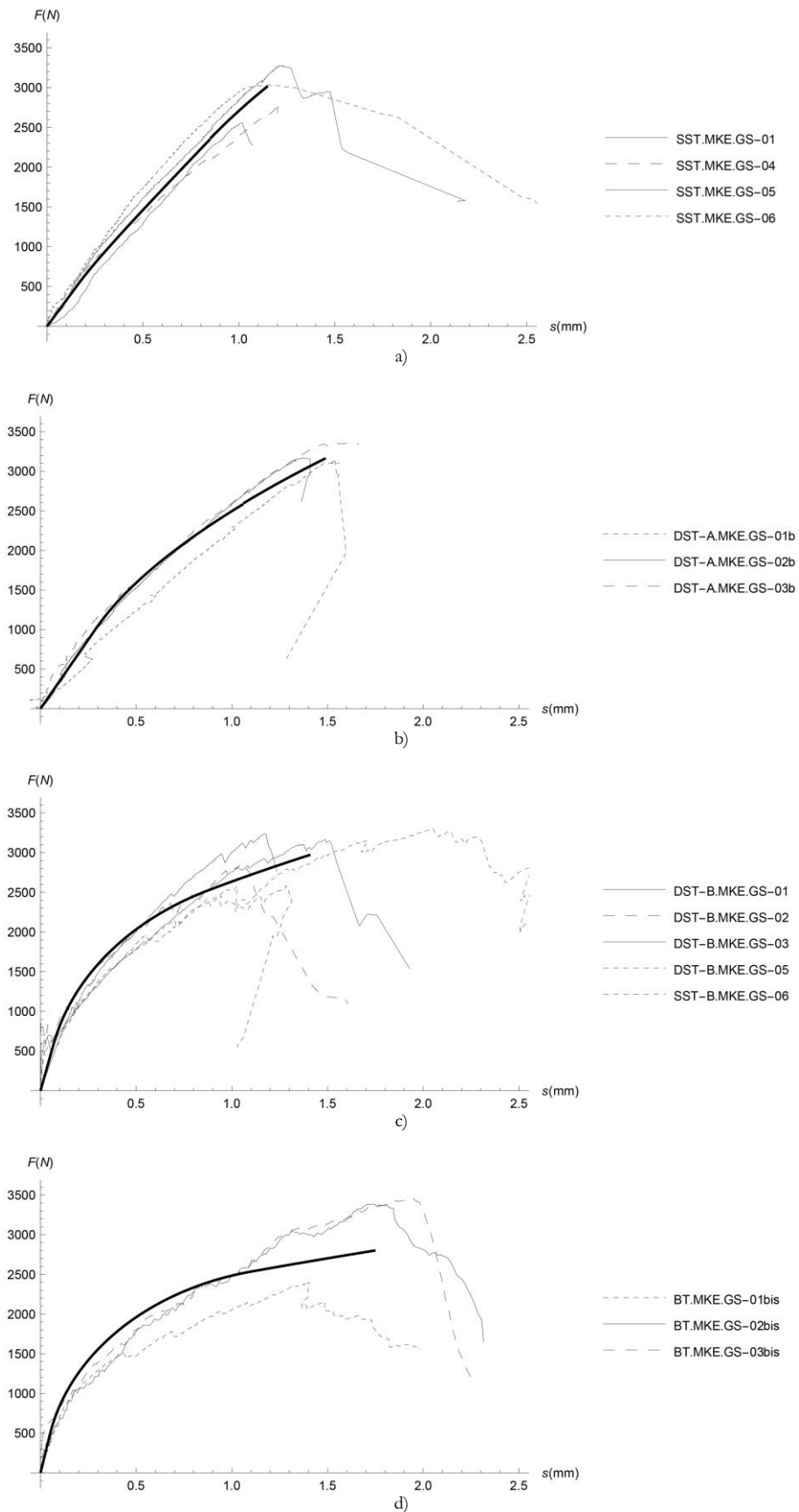


Fig. 7.16. Confronto curve carico-scorrimento globale analitiche (linea continua nera) e sperimentali: a) Single-Shear Test; b) Double-Shear test-tipo A; c) Double-Shear Test-tipo B; d) Beam Test

In figura 7.17, 7.18, 7.19 e 7.20 sono stati riportati gli andamenti $s(x)$, $\varepsilon(x)$, $\tau(x)$ e $F(x)$ per ognuna delle tre fasi del ottenuti dall'integrazione del legame locale E per ogni tipologia di prova.

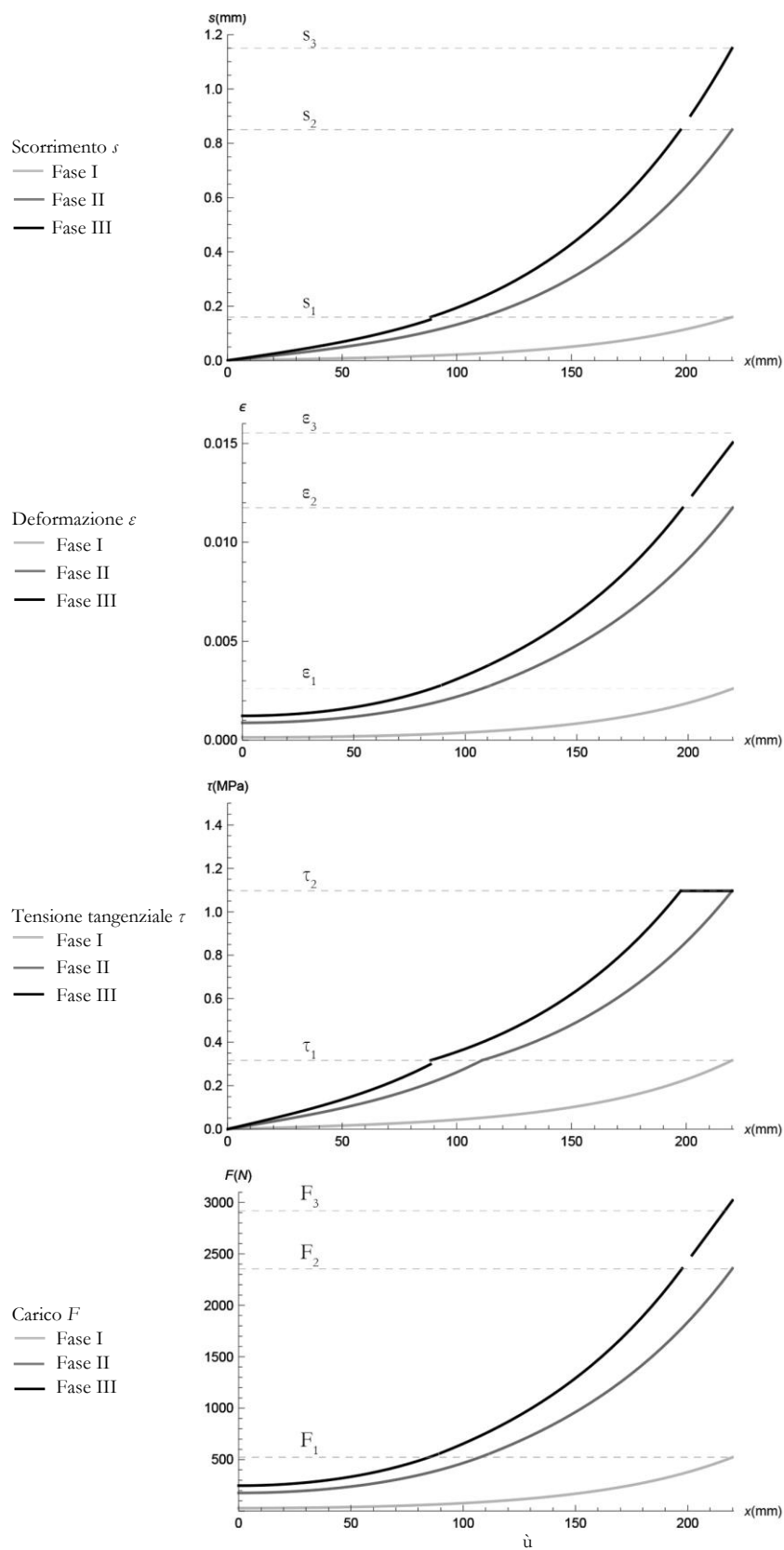


Fig. 7.17. Risultati analitici con legame locale di tipo E: andamento medio di scorrimento, deformazione, tensione tangenziale e carico lungo la striscia di composito sottoposta a prova Single-Shear Test

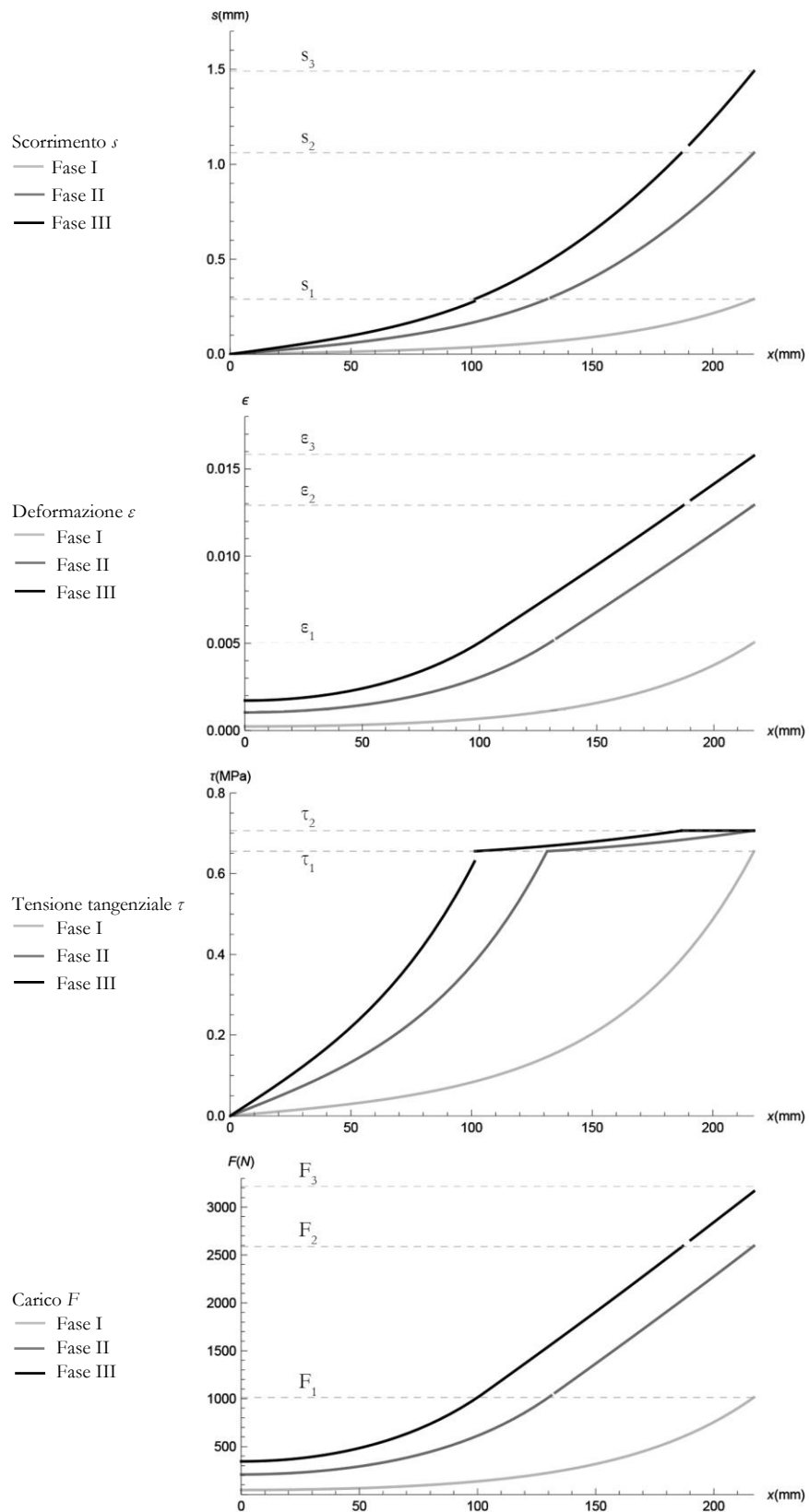


Fig. 7.18. Risultati analitici con legame locale di tipo E: andamento medio di scorrimento, deformazione, tensione tangenziale e carico lungo la striscia di composito sottoposta a prova Double-Shear Test- tipo A

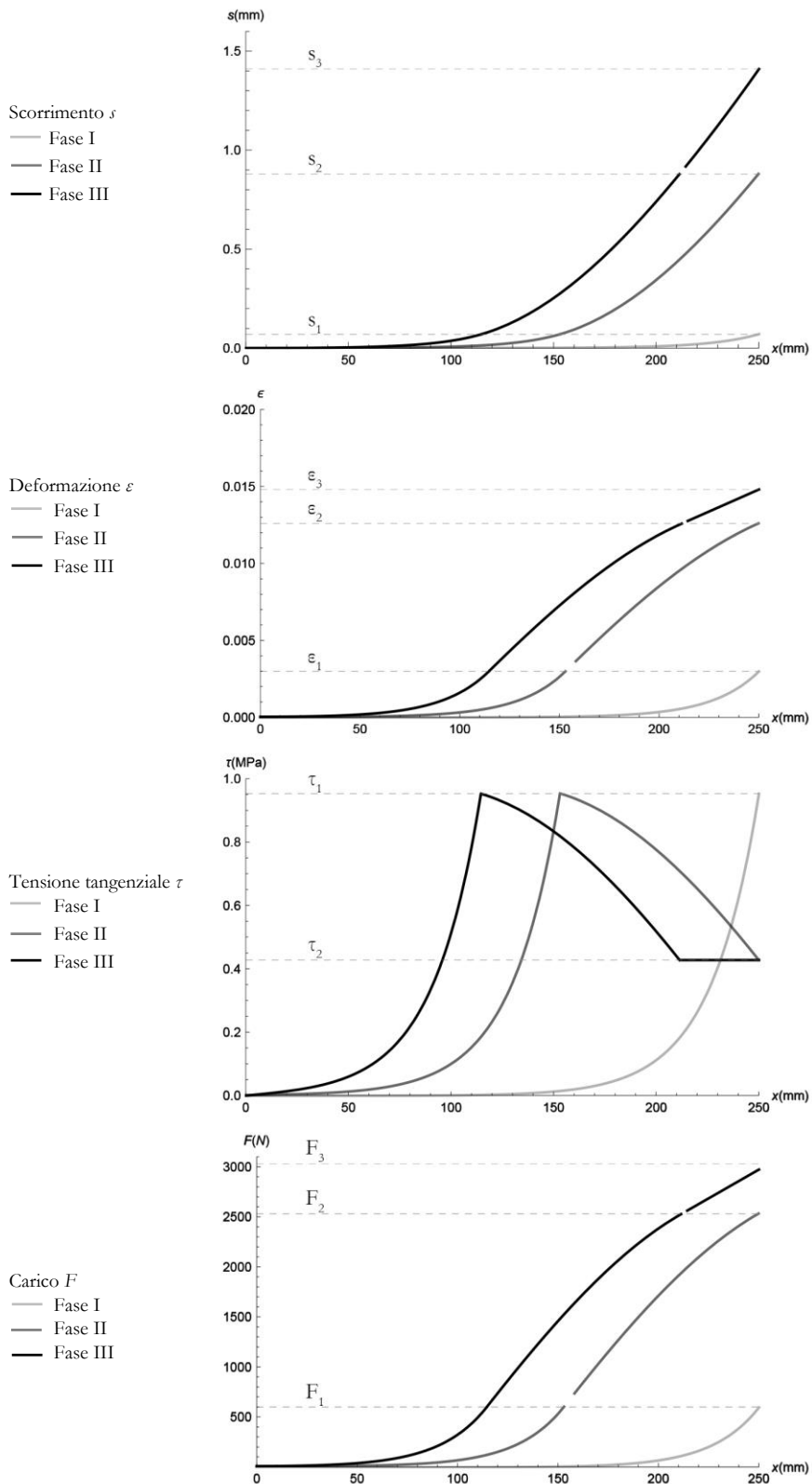


Fig. 7.19. Risultati analitici con legame locale di tipo E: andamento medio di scorrimento, deformazione, tensione tangenziale e carico lungo la striscia di composito sottoposta a prova Double-Shear Test-tipo B

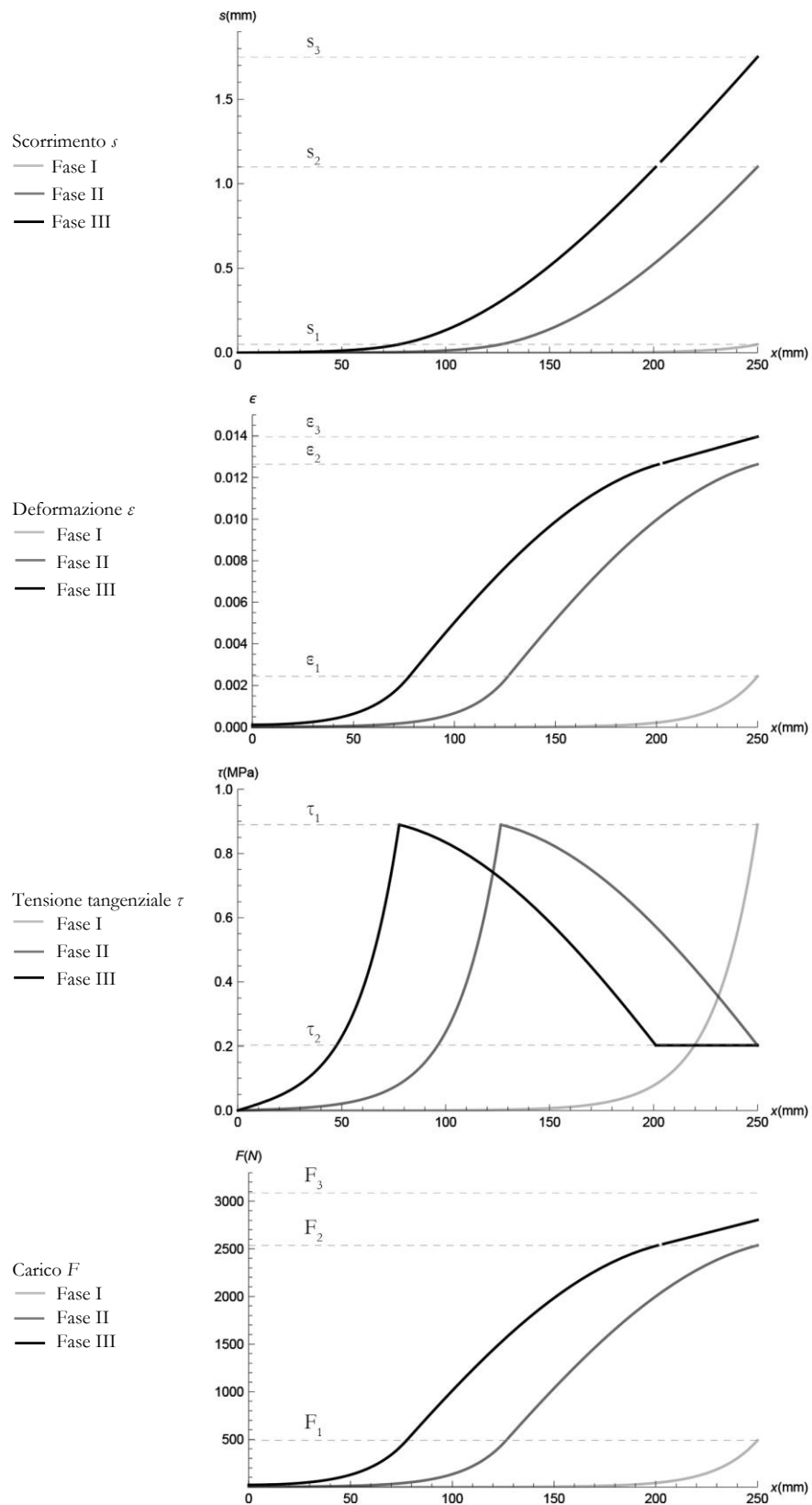


Fig. 7.20. Risultati analitici con legame locale di tipo E: andamento medio di scorrimento, deformazione, tensione tangenziale e carico lungo la striscia di composito sottoposta a prova Beam Test

In figura 7.21 sono stati messi in relazione i valori di carico massimo $F_{max,num}$ ottenuti con il legame locale E con i carichi massimi sperimentali $F_{max,exp}$.

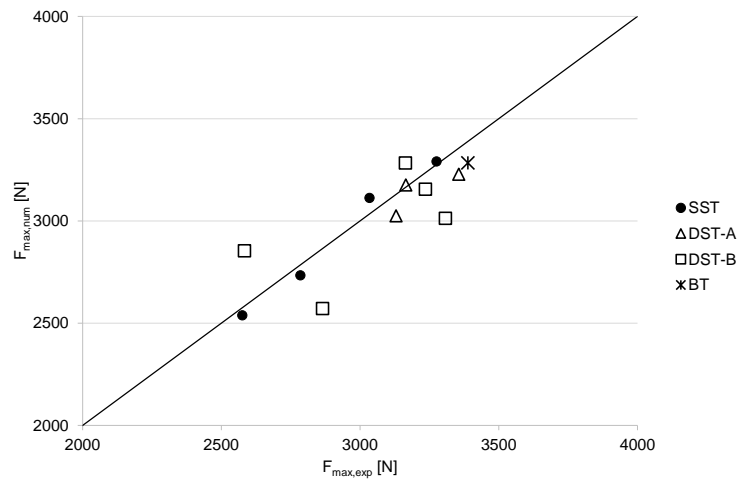


Fig. 7.21. Carico massimo sperimentale VS carico massimo analitico ottenuto con il legame locale E

7.5. Osservazioni

Nel presente capitolo, sulla base dei risultati ottenuti dalle prove sperimentali (§ 5), è stato applicato l'approccio della meccanica della frattura adottando cinque differenti legami locali d'interfaccia, al fine di individuare quello in grado di descrivere il fenomeno della delaminazione interlaminare e di simulare il comportamento di adesione osservato sperimentalmente.

I provini oggetto delle analisi sono stati selezionati tra quelli costituiti da matrice di malta Kerakoll.

Dal confronto tra i comportamenti globali analitici medi ed i comportamenti globali sperimentali è emerso quanto segue:

- il primo modello, basato sull'integrazione del legame locale A ampiamente utilizzato per i compositi FRP, è risultato in grado di simulare il comportamento di adesione del composito FRCM limitatamente alla prima fase elastica; successivamente la curva analitica si è discostata dall'andamento di quelle sperimentali registrando carichi superiori;
- il modello basato sull'adozione del legame locale B non è risultato adatto ai fini delle presenti analisi, in quanto presuppone la presenza di un comportamento di adesione lineare elastico fino all'attingimento del carico di debonding. Nonostante ciò, per alcuni provini SST e DST-A è scaturita una buona approssimazione del comportamento sperimentale. Tale risultato è in linea con quanto osservato precedentemente dai risultati delle prove sperimentali (§ 5.2 e 5.3): nel caso di prova di adesione in cui il carico è applicato direttamente alla fibra, i tratti della curva del comportamento di adesione che precedono il fenomeno di debonding hanno mostrato una variazione di rigidità graduale ed inferiore rispetto alle altre tipologie di prova;
- il modello con legame locale C ha restituito delle curve di comportamento di adesione caratterizzate da una buona correlazione con quelle sperimentali, in particolare nel caso di prove di adesione DST-B e BT. Dalla presenza di un secondo ramo del legame locale a tensione tangenziale costante e non nulla, è derivata l'assenza di una fase di softening, ovvero un andamento delle tensioni tangenziali lungo la superficie di interfaccia costante e pari alla tensione tangenziale massima fino al raggiungimento del debonding all'estremo caricato;
- il quarto ed il quinto modello presentano i primi due tratti del legame locale identici. Il secondo modello si differenzia per l'aggiunta di un terzo tratto a tensione tangenziale costante e non nulla. Con tali modelli sono state ottenute le migliori correlazioni con i comportamenti globali sperimentali relativi alle prove SST, mentre per le altre tipologie di prova i risultati sono risultati prossimi, seppur inferiori come grado di correlazione, a quelli del legame locale C. Inoltre, dal confronto tra i carichi massimi sperimentali ed i carichi massimi analitici ottenuti con il legame locale E è emersa una buona correlazione (Fig. 7.21).

Per quanto riguarda il legame locale E, dall'osservazione degli andamenti delle tensioni tangenziali relativi alla terza fase del comportamento di adesione, riportati in figura 7.17, 7.18, 7.19 e 7.19, è stato appurato quanto segue:

- nel caso di prova SST è scaturito un andamento crescente delle τ fino al raggiungimento della tensione tangenziale massima, similmente a quanto ottenuto con il legame locale B. I comportamenti globali scaturiti dai due modelli sono risultati, infatti, analoghi;
- nel caso di prova DST-A l'andamento delle tensioni tangenziali è risultato simile a quello del terzo modello facente uso del legame locale C;
- nel caso di prove di adesione DST-B e BT le tensioni tangenziali hanno dimostrato un andamento analogo a quello del primo modello (legame locale A) ad eccezione della presenza di una tensione tangenziale non nulla nel tratto prossimo all'estremo caricato del composito.

Per ogni provino e per i risultati medi di ogni tipologia di prova, è stato valutato il rapporto tra i parametri r_1 ed r_2 ottenuti come:

$$r_1 = \frac{F_1}{s_1} \quad (7.85)$$

$$r_2 = \frac{F_2 - F_1}{s_2 - s_1} \quad (7.86)$$

Dal confronto tra i rapporti r_2/r_1 e F_1/F_2 è stata individuata una relazione tra i dati sperimentali e i risultati dell'integrazione del legame locale E. Dalle valutazioni descritte nel seguito sono stati esclusi i risultati ottenuti con il legame locale D, in quanto identico nei primi due tratti al legame locale E.

In tabella 7.21 sono stati riportati i dati sperimentali medi per ogni tipologia di prova di adesione, i suddetti rapporti ed i risultati analitici delle tensioni tangenziali τ_1 e τ_2 . Le osservazioni elencate precedentemente sono state inserite nelle ultime due colonne della tabella. In particolare, nella penultima è stato riportato il legame locale con andamento simile a quello ottenuto dalla calibrazione del legame E, mentre nell'ultima colonna è stato riportato il legame locale (C o E) che ha mostrato la migliore correlazione con le curve sperimentali carico-scorrimento globale.

Tab. 7.21. Risultati sperimentali e analitici ottenuti con il legame locale E

Provino	s_1 [mm]	s_2 [mm]	F_1 [N]	F_2 [N]	r_1 [MPa]	r_2 [MPa]	r_2/r_1	F_1/F_2	τ_1 [MPa]	τ_2 [MPa]	τ_1/τ_2	Legame locale simile	Correlazione migliore tra C ed E
SST.MKE.GS-01	0.28	0.93	723	2375	2582	2542	0.98	0.30	0.346	1.113	0.31	B	E
SST.MKE.GS-04	0.12	0.84	473	2105	3942	2267	0.58	0.22	0.345	0.737	0.47	B	E
SST.MKE.GS-05	0.14	0.86	544	2501	3886	2718	0.70	0.22	0.392	1.142	0.34	B	E
SST.MKE.GS-06	0.08	0.76	351	2432	4388	3060	0.70	0.14	0.285	1.293	0.22	B	E
media	0.16	0.85	523	2353	3269	2652	0.81	0.22	0.317	1.096	0.29	B	E
DST-A.MKE.GS-01b	0.23	0.92	671	2098	2917	2068	0.71	0.32	0.363	0.698	0.52	B	E
DST-A.MKE.GS-02b	0.36	1.09	1164	2731	3233	2147	0.66	0.43	0.697	0.852	0.82	C	C≈E
DST-A.MKE.GS-03b	0.27	1.18	1204	2929	4459	1896	0.43	0.41	0.995	0.457	2.18	A	C
media	0.29	1.06	1013	2586	3493	2043	0.58	0.39	0.656	0.707	0.93	C	C≈E
DST-B.MKE.GS-01	0.11	0.70	745	2451	6773	2892	0.43	0.30	0.935	0.777	1.20	C	C≈E
DST-B.MKE.GS-01	0.06	0.68	642	2357	10700	2766	0.26	0.27	1.273	0.264	4.82	A	C
DST-B.MKE.GS-01	0.05	1.03	474	2799	9480	2372	0.25	0.17	0.833	0.606	1.37	C	C≈E
DST-B.MKE.GS-01	0.06	1.03	566	2579	9433	2075	0.22	0.22	0.989	0.22	4.50	A	C
DST-B.MKE.GS-01	0.09	0.94	574	2460	6378	2219	0.35	0.23	0.678	0.569	1.19	C	C≈E
media	0.07	0.88	600	2529	8571	2381	0.28	0.24	0.953	0.428	2.23	A	C
BT.MKE.GS-02bis	0.03	0.85	356	2387	11867	2477	0.21	0.15	0.783	0.476	1.64	A	C≈E

La tabella ha messo in evidenza come nel caso in cui $\tau_1 < \tau_2$ la correlazione migliore è stata ottenuta con il legame locale E, mentre nel caso in cui la τ_1 è risultata prossima alla τ_2 il legame C è in grado di simulare meglio il comportamento sperimentale osservato. Infine, quando dalla calibrazione del legame E è stato ottenuto $\tau_1 > \tau_2$ i legami C ed E hanno restituito risultati prossimi tra loro.

Inoltre, il legame locale E è risultato in grado di simulare meglio il comportamento osservato sperimentalmente con la prova SST.

Nel grafico in figura 7.22 sono stati riportati sull'asse delle ascisse il rapporto F_1/F_2 e sull'asse delle ordinate il rapporto r_2/r_1 . All'interno del grafico sono stati inseriti sia i risultati dei singoli provini che i risultati medi per ogni tipologia di prova.

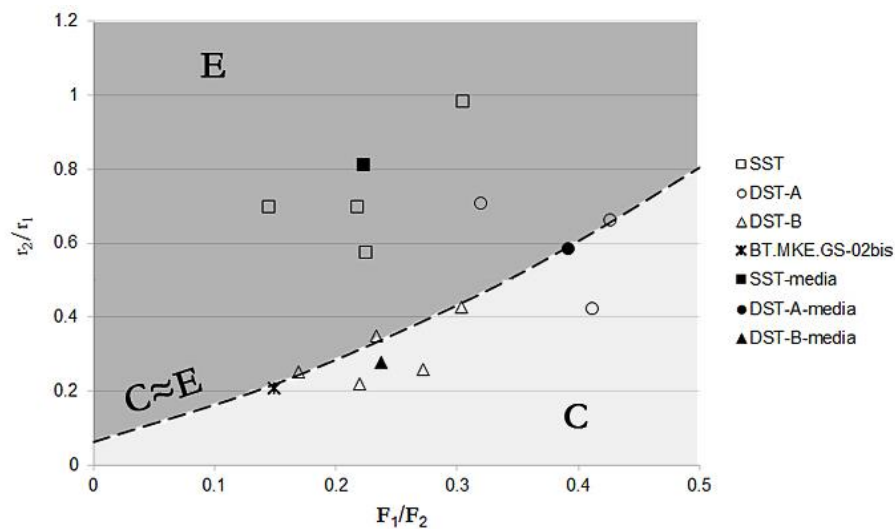


Fig. 7.22. Relazione tra i rapporti F_1/F_2 e r_2/r_1 di ogni provino e della loro media per ogni tipologia di prova, con individuazione dei due settori in cui è risultata una correlazione migliore rispettivamente con il legame locale E (settore superiore) e con il legame locale C (settore inferiore) e della curva (curva tratteggiata) lungo la quale i due legami locali C ed E restituiscono risultati analoghi.

Le casistiche in cui τ_1 è risultata prossima a τ_2 , ovvero per le quali i legami locali C ed E hanno restituito curve di comportamento di adesione simili, sono allineate lungo una curva (curva tratteggiata) che divide il grafico in due settori: nel settore superiore ricadono i casi in cui è stata ottenuta una correlazione migliore con il legame locale E, quello inferiore i casi per i quali la correlazione migliore è stata ottenuta con il legame locale C. Ciò dimostra come, disponendo dei risultati globali delle prove di adesione, sia possibile valutare a priori il legame locale in grado di descrivere il comportamento di adesione del composito FRCM esaminato. Inoltre, dal grafico risulta evidente la presenza di una correlazione tra tipologia di prova e legame locale d'interfaccia. In particolare, con la prova SST è presente una buona correlazione con il legame locale E, mentre la prova DST-B dimostra la tendenza ad una correlazione migliore con il legame C.

8. Conclusioni

Nel presente lavoro è stata indagato il comportamento di adesione dei compositi FRCM su un supporto in laterizio mediante un approccio sperimentale ed analitico.

A tal fine quattro differenti compositi FRCM sono stati testati sperimentalmente utilizzando quattro tipologie di prova di adesione con l'obiettivo di:

- studiare le proprietà di adesione dei compositi FRCM;
- individuare come le caratteristiche meccaniche dei singoli materiali influiscano sul comportamento di adesione;
- valutare le differenti prove di adesione svolte in termini di procedura e di risultati ottenuti.

Successivamente, è stato applicato un approccio analitico basato sulla meccanica della frattura in modo II adottando cinque differenti legami locali d'interfaccia calibrati sulla base dei risultati sperimentali. Tale analisi è stata svolta al fine di individuare il legame locale d'interfaccia capace di simulare il comportamento di adesione osservato sperimentalmente.

Nel seguito sono illustrati i principali risultati sperimentali (§ 8.1) ed analitici (§ 8.2) ottenuti. Infine, sono riportate le osservazioni da considerare come spunti per studi futuri (§ 8.3).

8.1. Risultati delle prove di adesione (§ 6)

I quattro compositi sono costituiti dalla medesima rete di fibra di basalto (GeoSteel® Grid 200 della Kerakoll S.p.a.) e da quattro tipologie di matrice:

- Matrice di malta di calce idraulica naturale prodotta dalla Kerakoll S.p.a. (MKE);
- Matrice di malta di calce idraulica realizzata in laboratorio (MCE);
- Matrice di malta cementizia realizzata in laboratorio (MCA);
- Matrice di malta bastarda realizzata in laboratorio (MBA).

I complessivi 111 provini realizzati, costituiti da un supporto in laterizio rinforzato con i compositi appena descritti, sono stati sottoposti a quattro tipologie di prova di adesione:

- Single-Shear Test (SST);
- Double-Shear Test-tipo A (DST-A);
- Double-Shear Test-tipo B (DST-B);
- Beam Test (BT).

Per quanto riguarda il confronto dei risultati dei test sui quattro compositi, è stato ottenuto quanto segue:

- il composito MKE ha evidenziato proprietà di adesione superiori rispetto agli altri compositi, avendo raggiunto valori di carico di debonding maggiori e coefficienti di variazione inferiori. Inoltre, ha perseguito una modalità prevalente di crisi per rottura a trazione della rete di fibra e coefficienti di sfruttamento delle proprietà della fibra superiori all'unità con tutte le tipologie di prova;
- i compositi MCA e MKE si sono caratterizzati per carichi massimi e di debonding maggiori, coefficienti di variazione inferiori ed una minore variabilità nel comportamento di adesione, evidenziando una maggiore compatibilità della malta di calce idraulica con la fibra di basalto GeoSteel® Grid 200. In particolare, dalle quattro tipologie di prova è stato ottenuto un carico medio di debonding pari a 2608 N (Co.V.=10%) per il composito MKE, pari a 2000 N (Co.V.=24%) per il composito MCA e pari a 1870 N (Co.V.=30%) per il composito MCE;
- il composito MBA ha evidenziato performance più scadenti; in particolare ha mostrato i valori di carico più bassi ed i coefficienti di variazione più elevati. Inoltre, è stata osservata una maggiore variabilità del comportamento di adesione, con fenomeni di delaminazione all'interfaccia fibra-matrice estesi in alcuni casi a lunghezze di circa 200 mm;
- i compositi MCA e MKE hanno evidenziato la presenza di una influenza delle proprietà meccaniche della matrice sulle proprietà di adesione: all'aumentare delle proprietà della malta è corrisposto un incremento del carico di debonding;
- la variabilità dei risultati ottenuti dalle quattro tipologie di prova è risultata meno accentuata nel caso di compositi con migliori proprietà di adesione. In particolare, in relazione al valore del carico di debonding medio, sono risultati Co.V. pari al 10%, al 24% ed al 30% rispettivamente per i compositi MKE, MCA e MCE.

Per quanto riguarda il confronto tra le differenti tipologie di prova di adesione, è emerso che:

- la tipologia di prova BT ha restituito i valori maggiori di carico, ma la trazione nel composito è ricavata in modo indiretto;
- con la prova SST sono stati ottenuti valori di carico più elevati rispetto alla tipologia di prova DST-B, mentre non è stato individuato un preciso rapporto con la prova DST-A. Tale regola non è stata riscontrata con il composito MKE per il quale sono stati ottenuti risultati prossimi tra loro (carichi di debonding pari a 2353 N, 2586 N e 2529 N rispettivamente con le prove SST, DST-A e DST-B);
- con le prove SST e DST-A la perdita media di rigidità tra prima e seconda fase del comportamento di adesione è stata minore rispetto a quanto scaturito dalla prova DST-B (con composito MKE sono stati ottenuti rispettivamente valori pari a 31%, 42% e 67%, Fig. 6.1, § 6). Dalla stessa prova DST-B sono emersi coefficienti di duttilità maggiori (sempre per il composito MKE sono stati ottenuti valori medi pari a 4.44 e 1.46 rispettivamente con le prove DST-B e SST);

- con la prova SST sono scaturiti coefficienti di variazione dei risultati minori rispetto alla prova DST-B (per il composito MKE sono risultati Co.V. pari a 8% e 20% rispettivamente per le prove SST e DST-B). Tale aspetto è meno evidente per i risultati in termini di carico del composito con matrice Kerakoll caratterizzato da performance di adesione migliori.

Relativamente ad aspetti legati alla preparazione del set-up di prova e all'esecuzione della prova è stato osservato quanto segue:

- la tipologia di prova DST-B si è caratterizzata per una maggiore onerosità, mentre la prova SST si è dimostrata maggiormente semplice e veloce da eseguire;
- nelle prove DST-B è stata osservata una perdita di allineamento di molti provini durante l'esecuzione del test che ha indotto l'insorgere di momenti secondari e tensioni di peeling. Tale fenomeno ha causato una maggiore variabilità del comportamento di adesione. In particolare, per i compositi MKE è stata ottenuta una crisi per rottura a trazione della fibra in tutti i provini SST, mentre con la prova DST-B un provino ha manifestato una crisi a trazione della rete di fibra, due provini una crisi per scorrimento fibra-matrice e tre provini una crisi mista per scorrimento e rottura a trazione di alcuni filamenti di fibra.

Date le osservazioni riportate ai punti precedenti, è possibile concludere come la tipologia di prova SST sia quella maggiormente affidabile per lo studio del comportamento di adesione dei compositi FRCM.

Una valutazione qualitativa delle diverse prove in funzione degli aspetti individuati è riportata in modo schematico in tabella 8.1. Attraverso una scala di grigi tali aspetti sono stati valutati come positivi o negativi per ogni tipologia di prova. Il giudizio "medio" indica un aspetto che è risultato a metà tra quello negativo e positivo; ad esempio, il numero di superfici di adesione della prova DST-A (due superfici di adesione) è risultato intermedio tra quelli delle prove SST (una superficie di adesione – aspetto positivo) e DST-B (quattro superfici di adesione – aspetto negativo).

Tab. 8.1. Aspetti intrinseci relativi alle prove di adesione

ASPETTI	SST	DST-A	DST-B	BT
Numero superfici di adesione	Positivo	Medio	Negativo	Positivo
Complessità operazioni di preparazione ed allestimento	Positivo	Medio	Negativo	Medio
Perdita allineamento provino	Positivo	Medio	Negativo	Positivo
Insorgere di momenti secondari e tensioni di peeling (modo I e II)	Positivo	Medio	Negativo	Positivo
Variabilità del comportamento e della modalità di crisi	Positivo	Medio	Negativo	Positivo
Modalità di applicazione del carico: prova vs realtà	Negativo	Negativo	Positivo	Positivo
Lettura immediata dei risultati	Positivo	Medio	Medio	Negativo
Semplicità nell'osservazione del comportamento (durante l'esecuzione del test)	Positivo	Medio	Negativo	Medio

Negativo
 Medio
 Positivo

8.2. Risultati delle modellazioni analitiche (§ 7)

Nel capitolo 7 è descritta una procedura analitica indiretta, basata sull'approccio della meccanica della frattura, per la valutazione del comportamento di adesione dei compositi FRCM. In particolare, per ogni tipologia di prova sono stati selezionati i provini di composito con matrice Kerakoll che hanno mostrato comportamenti e modalità di crisi analoghe. Sulla base dei risultati sperimentali di carico e scorrimento globale di tali provini, sono stati calibrati cinque differenti legami locali d'interfaccia (legami locali A, B, C, D ed E, Fig. 7.4, § 7). Dall'integrazione di questi ultimi, sono stati ottenuti per ogni provino, gli andamenti lungo l'interfaccia fibra-matrice dello scorrimento $s(x)$, della deformazione $\varepsilon(x)$, del carico $F(x)$ e delle tensioni tangenziali $\tau(x)$. Esprimendo il carico in funzione dello scorrimento in $x=L$ (ovvero in corrispondenza dell'estremo caricato), sono state ottenute le curve analitiche carico-scorrimento globale per ogni provino. Dalla media di queste ultime è stato, infine, ottenuto il comportamento di adesione analitico medio per ogni tipologia di prova.

Il confronto tra i risultati analitici e sperimentali ha permesso di osservare quanto segue:

- il legame locale A è in grado di simulare il comportamento di adesione del composito FRCM limitatamente alla prima fase elastica;
- il legame locale B non risulta adatto ai fini delle presenti analisi, in quanto presuppone la presenza di un comportamento di adesione lineare elastico fino all'attingimento del carico di debonding;
- l'integrazione del legame locale C restituisce una buona previsione del comportamento di adesione sperimentale dei compositi FRCM in relazione alle tipologie di prova DST-B e BT;
- con il modello basato sull'integrazione del legame locale D o E si ottengono buone correlazioni con i comportamenti globali sperimentali relativi alle prove SST e DST-A, e risultati simili a quelli ottenuti con il legame locale C relativamente alle tipologie di prova DST-B e BT;
- è presente una relazione tra i risultati sperimentali carico e scorrimento globale ed il legame locale capace di descrivere il comportamento di adesione. Dal grafico riportato in figura 7.22 (§ 7), che mette in relazione il rapporto tra le pendenze dei primi due tratti delle curve sperimentali ed il rapporto tra i carichi corrispondenti al limite della fase elastica ed al debonding, è emersa la presenza di una curva limite che divide il suddetto grafico in due settori, rappresentativi del legame locale risultato più attendibile tra i modelli C ed E. Pertanto, disponendo dei risultati della prova di adesione di un composito, è possibile individuare a priori il modello più affidabile a descriverne il comportamento.

8.3. Sviluppi futuri

I risultati ottenuti hanno permesso di individuare una serie di aspetti da considerare come spunti per studi futuri. In particolare:

- lo studio della relazione tra le proprietà di adesione di un composito FRCM e le proprietà meccaniche dei materiali costituenti dovrebbe essere esteso ad ulteriori tipologie di compositi;
- occorrerebbe condurre dei test con rinforzi dotati di una maggiore area resistente al fine di superare la crisi a trazione della rete di fibra e leggere l'intero comportamento di adesione del composito;
- si rende necessaria la validazione dei modelli analitici che hanno restituito i risultati migliori attraverso la loro applicazione ad altre tipologie di composito.

Bibliografia

1. AC434 (2011). Acceptance criteria for masonry and concrete strengthening using fabric-reinforced cementitious matrix (FRCM) composite systems, *ICC-Evaluation Service, Whittier, CA*.
2. Alecci, V., De Stefano, M., Luciano, R., Rovero, L., & Stipo, G. (2015). Experimental investigation on bond behavior of cement-matrix-based composites for strengthening of masonry structures. *Journal of Composites for Construction*, 20(1), 04015041.
3. Alecci, V., Focacci, F., Rovero, L., Stipo, G., & De Stefano, M. (2016a). Extrados strengthening of brick masonry arches with PBO-FRCM composites: Experimental and analytical investigations. *Composite Structures*, 149, 184-196.
4. Alecci, V., Misseri, G., Rovero, L., Stipo, G., De Stefano, M., Feo, L., & Luciano, R. (2016b). Experimental investigation on masonry arches strengthened with PBO-FRCM composite. *Composites Part B: Engineering*, 100, 228-239.
5. Arboleda, D. (2014). Fabric reinforced cementitious matrix (FRCM) composites for infrastructure strengthening and rehabilitation: Characterization methods (Doctoral dissertation, University of Miami).
6. Arboleda, D., Carozzi, F. G., Nanni, A., & Poggi, C. (2015). Testing procedures for the uniaxial tensile characterization of fabric-reinforced cementitious matrix composites. *Journal of Composites for Construction*, 20(3), 04015063.
7. Ascione, L., D'Aponte, A., & Mancusi, G. (2014). Fabric-reinforced cementitious matrix (FRCM): A new Italian guideline under development. *in depth*, 12, 16.
8. Ascione, L., de Felice, G., & De Santis, S. (2015). A qualification method for externally bonded Fibre Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) strengthening systems. *Composites Part B: Engineering*, 78, 497-506.
9. ASTM C1583 (2004). Standard Test Method for Tensile Strength of Concrete Surfaces and the Bond Strength or Tensile Strength of Concrete Repair and Overlay Materials by Direct Tension (Pull-off Method). *American Society for Testing and Materials*.
10. ASTM D3039/D3039M-00 (2004). Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials. *USA: American Society for Testing Materials*.
11. Babaeidarabad, S., Arboleda, D., Loreto, G., & Nanni, A. (2014). Shear strengthening of unreinforced concrete masonry walls with fabric-reinforced-cementitious-matrix. *Construction and Building Materials*, 65, 243-253.
12. Badanoiu, A., & Holmgren, J. (2003). Cementitious composites reinforced with continuous carbon fibres for strengthening of concrete structures. *Cement and Concrete Composites*, 25(3), 387-394.
13. Banholzer, B. (2004). Bond behaviour of a multi-filament yarn embedded in a cementitious matrix (Doctoral dissertation, Bibliothek der RWTH Aachen).

-
14. Banholzer, B., Brockmann, T., & Brameshuber, W. (2006). Material and bonding characteristics for dimensioning and modelling of textile reinforced concrete (TRC) elements. *Materials and structures*, 39(8), 749-763.
 15. Barhum, R., & Mechtcherine, V. (2012). Effect of short, dispersed glass and carbon fibres on the behaviour of textile-reinforced concrete under tensile loading. *Engineering Fracture Mechanics*, 92, 56-71.
 16. Barhum, R., & Mechtcherine, V. (2013). Influence of short dispersed and short integral glass fibres on the mechanical behaviour of textile-reinforced concrete. *Materials and structures*, 46(4), 557-572.
 17. Bellomo, M., & D'Ambrosio, V. (2009). Fibrorinforzati in architettura: le tecnologie FRP e FRCM nel recupero delle strutture in ca.
 18. Bertolesi, E., Carozzi, F. G., Milani, G., & Poggi, C. (2014). Numerical modeling of Fabric Reinforce Cementitious Matrix composites (FRCM) in tension. *Construction and Building Materials*, 70, 531-548.
 19. Bianchi, G., Arboleda, D., Carozzi, F. G., Poggi, C., & Nanni, A. (2013). Fabric reinforced cementitious matrix (FRCM) materials for structural rehabilitation. In *Changing Needs, Adaptive Buildings, Smart Cities, Proc., Book of the 39th Int. Association for Housing Science (LAHS) World Congress, O. Ural, E. Pişçi, and S. Croce, eds., Politecnico di Milano, Milan, Italy*.
 20. Biscaia, H. C., Chastre, C., & Silva, M. A. (2013). Linear and nonlinear analysis of bond-slip models for interfaces between FRP composites and concrete. *Composites Part B: Engineering*, 45(1), 1554-1568.
 21. Brameshuber, W. (Ed.). (2006). Report 36: textile reinforced concrete-state-of-the-art report of RILEM TC 201-TRC (Vol. 36). RILEM publications.
 22. Brameshuber, W., Hinzen, M., Dubey, A., Peled, A., Mobasher, B., Bentur, A., ... & Malaga, K. (2016). Recommendation of RILEM TC 232-TDT: test methods and design of textile reinforced concrete. *Materials and Structures*, 49(12), 4923-4927.
 23. Briccolli, S. B., & Rovero, L. (2007). Modelli di arco rinforzati con materiali compositi.
 24. Caggegi, C., Carozzi, F. G., De Santis, S., Fabbrocino, F., Focacci, F., Lanoye, E., & Zuccarino, L. (2017). Experimental analysis on tensile and bond properties of PBO and aramid fabric reinforced cementitious matrix for strengthening masonry structures. *COMPOSITES. PART B, ENGINEERING*, 127, 175-195.
 25. Carbone, I. (2010). Delaminazione di compositi a matrice cementizia su supporti murari (Doctoral dissertation, Università degli studi ROMA TRE).
 26. Carbone, I., & De Felice, G. (2009). Debonding of C_FRCM composite on masonry support. In *Probitec 09-Protection of Historical Buildings*. Taylor & Francis Group.
 27. Carloni, C., & Focacci, F. (2016). FRP-masonry interfacial debonding: An energy balance approach to determine the influence of the mortar joints. *European Journal of Mechanics-A/Solids*, 55, 122-133.
 28. Carloni, C., Bournas, D. A., Carozzi, F. G., D'Antino, T., Fava, G., Focacci, F., ... & Poggi, C. (2016). Fiber reinforced composites with cementitious (inorganic) matrix. In *Design Procedures for the Use of Composites in Strengthening of Reinforced Concrete Structures* (pp. 349-392). Springer Netherlands.
 29. Carloni, C., D'Antino, T., Sneed, L. H., & Pellegrino, C. (2014). Role of the matrix layers in the stress-transfer mechanism of FRCM composites bonded to a concrete substrate. *Journal of Engineering Mechanics*, 141(6), 04014165.
 30. Carloni, C., Sneed, L., & D'Antino, T. (2013). Interfacial bond characteristics of fiber reinforced cementitious matrix for external strengthening of reinforced concrete members.

31. Carozzi, F. G., & Poggi, C. (2015). Mechanical properties and debonding strength of Fabric Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) systems for masonry strengthening. *Composites Part B: Engineering*, *70*, 215-230.
32. Carozzi, F. G., Bellini, A., D'Antino, T., de Felice, G., Focacci, F., Hojdys, L., ... & Poggi, C. (2017). Experimental investigation of tensile and bond properties of Carbon-FRCM composites for strengthening masonry elements. *Composites Part B: Engineering*.
33. Carozzi, F. G., Colombi, P., Fava, G., & Poggi, C. (2016). A cohesive interface crack model for the matrix–textile debonding in FRCM composites. *Composite Structures*, *143*, 230-241.
34. Carozzi, F. G., de Felice, G., De Santis, S., & Poggi, C. (2015). Materiali compositi a matrice inorganica (FRCM) per il rinforzo di strutture in muratura. Round Robin Test per la caratterizzazione meccanica. *COMPOSITI MAGAZINE*, *37*, 23-26.
35. Carozzi, F. G., Milani, G., & Poggi, C. (2014). Mechanical properties and numerical modeling of Fabric Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) systems for strengthening of masonry structures. *Composite Structures*, *107*, 711-725.
36. Ceroni, F., de Felice, G., Grande, E., Malena, M., Mazzotti, C., Murgo, F., ... & Valluzzi, M. R. (2014). Analytical and numerical modeling of composite-to-brick bond. *Materials and structures*, *47*(12), 1987-2003.
37. Cevallos, O. A., & Olivito, R. S. (2015). Effects of fabric parameters on the tensile behaviour of sustainable cementitious composites. *Composites Part B: Engineering*, *69*, 256-266.
38. CNR-DT 200 R1/2013. Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione ed il controllo di interventi di consolidamento statico mediante l'utilizzo di compositi fibrorinforzati-Materiali, strutture in c.a. e in c.a.p., strutture murarie, Roma-CNR, 10 ottobre 2013.
39. Contamine, R., Junes, A., & Larbi, A. S. (2014). Tensile and in-plane shear behaviour of textile reinforced concrete: Analysis of a new multiscale reinforcement. *Construction and Building Materials*, *51*, 405-413.
40. Contamine, R., Larbi, A. S., & Hamelin, P. (2011). Contribution to direct tensile testing of textile reinforced concrete (TRC) composites. *Materials Science and Engineering: A*, *528*(29), 8589-8598.
41. D'Ambrisi, A., & Focacci, F. (2011). Flexural strengthening of RC beams with cement-based composites. *Journal of Composites for Construction*, *15*(5), 707-720.
42. D'Ambrisi, A., Feo, L., & Focacci, F. (2012). Bond-slip relations for PBO-FRCM materials externally bonded to concrete. *Composites Part B: Engineering*, *43*(8), 2938-2949.
43. D'Ambrisi, A., Feo, L., & Focacci, F. (2013a). Experimental analysis on bond between PBO-FRCM strengthening materials and concrete. *Composites Part B: Engineering*, *44*(1), 524-532.
44. D'Ambrisi, A., Feo, L., & Focacci, F. (2013b). Experimental and analytical investigation on bond between Carbon-FRCM materials and masonry. *Composites Part B: Engineering*, *46*, 15-20.
45. D'Ambrisi, A., Focacci, F., Luciano, R., Alecci, V., & De Stefano, M. (2015). Carbon-FRCM materials for structural upgrade of masonry arch road bridges. *Composites Part B: Engineering*, *75*, 355-366.
46. D'Antino, T., Carloni, C., Sneed, L. H., & Pellegrino, C. (2014). Matrix–fiber bond behavior in PBO FRCM composites: A fracture mechanics approach. *Engineering Fracture Mechanics*, *117*, 94-111.
47. D'Antino, T., Sneed, L. H., Carloni, C., & Pellegrino, C. (2015a). Influence of the substrate characteristics on the bond behavior of PBO FRCM-concrete joints. *Construction and Building Materials*, *101*, 838-850.

-
48. D'Antino, T., Sneed, L. H., Carloni, C., & Pellegrino, C. (2016). Effect of the inherent eccentricity in single-lap direct-shear tests of PBO FRCM-concrete joints. *Composite Structures*, *142*, 117-129.
 49. D'Antino, T., & Papanicolaou, C. (2017). Mechanical characterization of textile reinforced inorganic-matrix composites. *Composites Part B: Engineering*.
 50. D'Antino, T., Pellegrino, C., Carloni, C., Sneed, L. H., & Giacomini, G. (2015b). Experimental analysis of the bond behavior of glass, carbon, and steel FRCM composites. In *Key Engineering Materials* (Vol. 624, pp. 371-378). Trans Tech Publications.
 51. Dari, A., (2016). Qualificazione dei compositi FRCM: approvate dal Consiglio Superiore dei LLPP le Linea Guida. Rivista online: <http://www.inconcreto.net/Notizia/8374/Inconcreto.html>.
 52. De Felice, G., Aiello, M. A., Bellini, A., Ceroni, F., De Santis, S., Garbin, E., ... & Panizza, M. (2016). Experimental characterization of composite-to-brick masonry shear bond. *Materials and Structures*, *49*(7), 2581-2596.
 53. De Felice, G., De Santis, S., Garmendia, L., Ghiassi, B., Larrinaga, P., Lourenço, P. B., ... & Papanicolaou, C. G. (2014). Mortar-based systems for externally bonded strengthening of masonry. *Materials and structures*, *47*(12), 2021-2037.
 54. De Santis, S., & de Felice, G. (2015). Tensile behaviour of mortar-based composites for externally bonded reinforcement systems. *Composites Part B: Engineering*, *68*, 401-413.
 55. De Santis, S., Carozzi, F. G., de Felice, G., & Poggi, C. (2017). Test methods for Textile Reinforced Mortar systems. *Composites Part B: Engineering*, *127*, 121-132.
 56. Di Tommaso, A., Focacci, F., & Mantegazza, G. (2008). PBO-FRCM composites to strengthen RC beams: mechanics of adhesion and efficiency. In *Proceedings of the international conference on FRP composites in civil engineering, Zurich, Switzerland*.
 57. Donnini, J. (2016). Study of enhanced fiber reinforced cementitious matrix (FRCM) systems for structural rehabilitation (Doctoral dissertation, Università Politecnica delle Marche).
 58. Donnini, J., & Corinaldesi, V. (2017). Mechanical characterization of different FRCM systems for structural reinforcement. *Construction and Building Materials*, *145*, 565-575.
 59. Donnini, J., Corinaldesi, V., & Nanni, A. (2016). Mechanical properties of FRCM using carbon fabrics with different coating treatments. *Composites Part B: Engineering*, *88*, 220-228.
 60. Faella, C., Martinelli, E., & Nigro, E. (2009b). Direct versus indirect method for identifying FRP-to-concrete interface relationships. *Journal of Composites for Construction*, *13*(3), 226-233.
 61. Faella, C., Martinelli, E., Paciello, S., & Perri, F. (2009a). Composite materials for masonry structures: the adhesion issue. In *Proceedings of the 3rd conference on mechanics of masonry structures strengthened with composite materials: modeling, testing, design, control—MuRiCo3, Venice (Italy)* (pp. 266-273).
 62. Focacci, F. (2008). Rinforzo delle murature con materiali compositi. *Progettazione, calcolo, esempi applicativi*. Dario Flaccovio Editore, Palermo.
 63. Focacci, F., D'Antino, T., Carloni, C., Sneed, L. H., & Pellegrino, C. (2017). An indirect method to calibrate the interfacial cohesive material law for FRCM-concrete joints. *Materials & Design*, *128*, 206-217.
 64. Focacci, F., Mantegazza, G., (2009). Compositi a matrice cementizia per il rinforzo delle murature: aderenza con il supporto. In *Proceedings of the 3rd conference on mechanics of masonry structures strengthened with composite materials: modeling, testing, design, control—MuRiCo3, Venice (Italy)* (pp. 274-281).
 65. Foraboschi, P. (2004). Strengthening of masonry arches with fiber-reinforced polymer strips. *Journal of composites for construction*, *8*(3), 191-202.

-
66. Garmendia, L., San-José, J. T., García, D., & Larrinaga, P. (2011). Rehabilitation of masonry arches with compatible advanced composite material. *Construction and Building Materials*, 25(12), 4374-4385.
 67. Hartig, J., Häußler-Combe, U., & Schicktanz, K. (2008). Influence of bond properties on the tensile behaviour of textile reinforced concrete. *Cement and concrete composites*, 30(10), 898-906.
 68. Hartig, J., Jesse, F., Schicktanz, K., & Häußler-Combe, U. (2012). Influence of experimental setups on the apparent uniaxial tensile load-bearing capacity of textile reinforced concrete specimens. *Materials and structures*, 45(3), 433-446.
 69. Häußler-Combe, U., & Hartig, J. (2007). Bond and failure mechanisms of textile reinforced concrete (TRC) under uniaxial tensile loading. *Cement and concrete composites*, 29(4), 279-289.
 70. Häußler-Combe, U., Jesse, F., & Curbach, M. (2004, April). Textile reinforced concrete-overview, experimental and theoretical investigations. In *Fracture mechanics of concrete structures. Proceedings of the fifth international conference on fracture mechanics of concrete and concrete structures, Ia-FraMCos, Vail, CO, USA* (Vol. 204, pp. 12-16).
 71. Hegger, J., Will, N., Bruckermann, O., & Voss, S. (2006). Load-bearing behaviour and simulation of textile reinforced concrete. *Materials and structures*, 39(8), 765-776.
 72. Jesse, F. (2004). Tragverhalten von Filamentgarnen in zementgebundener Matrix (Doctoral dissertation, University of Dresden).
 73. Katz, A. (1996). Effect of fiber modulus of elasticity on the long term properties of micro-fiber reinforced cementitious composites. *Cement and Concrete Composites*, 18(6), 389-399.
 74. Kerakoll (2016). Catalogo prodotti ECO - Linea edilizia. *Kerakoll S.p.A.*, Sassuolo (MO). <http://products.kerakoll.com/catalogo.asp>
 75. Larrinaga, P., Chastre, C., Biscaia, H. C., & San-José, J. T. (2014). Experimental and numerical modeling of basalt textile reinforced mortar behavior under uniaxial tensile stress. *Materials & Design*, 55, 66-74.
 76. Larrinaga, P., Chastre, C., San-José, J. T., & Garmendia, L. (2013). Non-linear analytical model of composites based on basalt textile reinforced mortar under uniaxial tension. *Composites Part B: Engineering*, 55, 518-527.
 77. Leone, M., Aiello, M. A., Balsamo, A., Carozzi, F. G., Ceroni, F., & Corradi, M. Experimental study of glass fibre reinforced mortar system on masonry substrate. *Submitted to Composites Part B-Eng.*
 78. Lepenies, I., Meyer, C., Schorn, H., & Zastrau, B. (2007). Modeling of Load Transfer Behavior of AR-Glass-Rovings in Textile Reinforced Concrete. *Special Publication*, 244, 109-124.
 79. Lignola, G. P., Caggegi, C., Ceroni, F., De Santis, S., Krajewski, P., Lourenço, P. B., ... & Zuccarino, L. (2017). Performance assessment of basalt FRCM for retrofit applications on masonry. *Composites Part B: Engineering*, 128, 1-18.
 80. Loreto, G., Babaeidarabad, S., Leardini, L., & Nanni, A. (2015). RC beams shear-strengthened with fabric-reinforced-cementitious-matrix (FRCM) composite. *International Journal of Advanced Structural Engineering (IJASE)*, 7(4), 341-352.
 81. Lu, X. Z., Teng, J. G., Ye, L. P., & Jiang, J. J. (2005). Bond-slip models for FRP sheets/plates bonded to concrete. *Engineering structures*, 27(6), 920-937.
 82. Mantegazza, G., Gatti, A. (2009). Conservazione delle proprietà strutturali dei rinforzi FRP e FRCM in funzione della temperatura di esercizio.
-

-
83. Mazzotti, C., Ferracuti, B., & Bellini, A. (2012). Experimental bond tests on masonry panels strengthening by FRP. In *Proceedings of 6th international conference on FRP composites in civil engineering (CICE 2012)* (Vol. 1315).
 84. Mechtcherine, V. (2013). Novel cement-based composites for the strengthening and repair of concrete structures. *Construction and Building Materials*, *41*, 365-373.
 85. Mobasher, B., Peled, A., & Pahilajani, J. (2006). Distributed cracking and stiffness degradation in fabric-cement composites. *Materials and structures*, *39*(3), 317-331.
 86. Naaman, A. E., & Reinhardt, H. W. (2006). Proposed classification of HPFRC composites based on their tensile response. *Materials and structures*, *39*(5), 547-555.
 87. Nanni, A. (2012). A new tool for concrete and masonry repair: strengthening with fiber-reinforced cementitious matrix composites. *Concrete international*, *34*(4), 43-49.
 88. Olivito, R. S., Cevallos, O. A., & Carrozzini, A. (2014). Development of durable cementitious composites using sisal and flax fabrics for reinforcement of masonry structures. *Materials & Design*, *57*, 258-268.
 89. Olivito, R. S., Codispoti, R., & Cevallos, O. A. (2016). Bond behavior of Flax-FRCM and PBO-FRCM composites applied on clay bricks: Experimental and theoretical study. *Composite Structures*, *146*, 221-231.
 90. Olivito, R. S., Codispoti, R., & Zuccarello, F. A. (2011). Applicazione di materiali compositi in fibre naturali e malta cementizia a strutture murarie. In *Atti del XX Congresso Nazionale Associazione Italiana di Meccanica Teorica ed Applicata (AIMETA'11)*.
 91. Olivito, R.S., Ombres, L., Venneri, A., Cevallos, O., (2012). Analisi Sperimentale della Resistenza per Aderenza dei Sistemi di Rinforzo in Materiale Compositi a Matrice Cementizia e Calcestruzzo. *ALAS-Convegno Nazionale dell'Associazione Italiana per l'Analisi delle Sollecitazioni*, Vol 41, 564-573.
 92. Ombres, L. (2015). Analysis of the bond between fabric reinforced cementitious mortar (FRCM) strengthening systems and concrete. *Composites Part B: Engineering*, *69*, 418-426.
 93. Ombres, L., Mazzuca, S., Verre, S. (2016). Analysis of the bond between fabric reinforced cementitious mortar (FRCM) strengthening systems and masonry. *Proceedings of the REHABEND, Burgos, Spain*.
 94. Orłowski, J., & Raupach, M. (2006). Modelling the loss in strength of AR-glass fibres in textile-reinforced concrete. *Materials and structures*, *39*(6), 635-643.
 95. Orłowski, J., Raupach, M., Cuyper, H., & Wastiels, J. (2005). Durability modelling of glass fibre reinforcement in cementitious environment. *Materials and Structures*, *38*(2), 155-162.
 96. Papantoniou, I. C., & Papanicolaou, C. G. (2012, June). Flexural behavior of one-way textile reinforced concrete (TRC)/reinforced concrete (RC) composite slabs. In *Proc., 15th European Conf. on Composite Materials—ECCM15, European Conference on Composite Materials, Venice, Italy*.
 97. Peled, A., Bentur, A., & Yankelevsky, D. (1998). Effects of woven fabric geometry on the bonding performance of cementitious composites: mechanical performance. *Advanced Cement Based Materials*, *7*(1), 20-27.
 98. Peled, A., Cohen, Z., Pasder, Y., Roye, A., & Gries, T. (2008b). Influences of textile characteristics on the tensile properties of warp knitted cement based composites. *Cement and concrete composites*, *30*(3), 174-183.
 99. Peled, A., Zaguri, E., & Marom, G. (2008a). Bonding characteristics of multifilament polymer yarns and cement matrices. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, *39*(6), 930-939.

100. Prota, A., Marcari, G., Fabbrocino, G., Manfredi, G., & Aldea, C. (2006). Experimental in-plane behavior of tuff masonry strengthened with cementitious matrix-grid composites. *Journal of Composites for Construction*, 10(3), 223-233.
101. Raupach, M., Orlovsky, J., Büttner, T., Dilthey, U., & Schleser, M. (2006, September). Epoxy-impregnated textiles in concrete-load bearing capacity and durability. In *Proceedings of the 1st International RILEM Conference* (pp. 77-88).
102. Rotunno, T., Rovero, L., Tonietti, U., & Bati, S. B. (2014). Experimental study of bond behavior of CFRP-to-brick joints. *Journal of Composites for Construction*, 19(3), 04014063.
103. Sabau, C., Gonzalez-Libreros, J. H., Sneed, L. H., Sas, G., Pellegrino, C., & Täljsten, B. (2017). Use of image correlation system to study the bond behavior of FRCM-concrete joints. *Materials and Structures*, 50(3), 172.
104. Singha, K. (2012). A short review on basalt fiber. *International Journal of Textile Science*, 1(4), 19-28.
105. Sneed, L. H., D'Antino, T., & Carloni, C. (2014). Investigation of bond behavior of PBO fiber-reinforced cementitious matrix composite-concrete interface. *ACI Mater J*, 111(5), 569-580.
106. Sneed, L. H., D'Antino, T., Carloni, C., & Pellegrino, C. (2015). A comparison of the bond behavior of PBO-FRCM composites determined by double-lap and single-lap shear tests. *Cement and Concrete Composites*, 64, 37-48.
107. Stipo, G., (2013). Analisi del comportamento meccanico dei materiali composite a matrice cementizia nel rinforzo delle strutture murarie (Doctoral dissertation, Università degli studi di Firenze).
108. UNI EN 1015-11 (2007). Methods of test for mortar for masonry—Part, 11.
109. UNI EN 12390-6 (2002). Prova sul calcestruzzo indurito. Resistenza a trazione indiretta dei provini.
110. Valluzzi, M. R., Oliveira, D. V., Caratelli, A., Castori, G., Corradi, M., De Felice, G., ... & Ianniruberto, U. (2012). Round robin test for composite-to-brick shear bond characterization. *Materials and Structures*, 45(12), 1761-1791.
111. Yao, J., Teng, J. G., & Chen, J. F. (2005). Experimental study on FRP-to-concrete bonded joints. *Composites Part B: Engineering*, 36(2), 99-113.
112. Yuan, H., Lu, X., Hui, D., & Feo, L. (2012). Studies on FRP-concrete interface with hardening and softening bond-slip law. *Composite Structures*, 94(12), 3781-3792.
113. Yuan, H., Teng, J. G., Seracino, R., Wu, Z. S., & Yao, J. (2004). Full-range behavior of FRP-to-concrete bonded joints. *Engineering structures*, 26(5), 553-565.
114. Zastrau, B., Lepenies, I., & Richter, M. (2008). On the multi scale modeling of textile reinforced concrete. *Technische Mechanik*, 28(1), 53-63.
115. Zastrau, B., Richter, M., & Lepenies, I. (2003). On the analytical solution of pullout phenomena in textile reinforced concrete. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 125(1), 38-43.

Allegato A

Comportamento di adesione

Nel seguito, per ognuno dei cinque legami locali adottati, sono riportati i grafici carico-scorrimento globale dei singoli provini analizzati mediante le procedure descritte al capitolo 6.

Ogni grafico riporta il comportamento di adesione sperimentale (curva continua grigia) ed il comportamento di adesione analitico (curva continua nera), con indicazione con linea tratteggiata del livello del carico sperimentale corrispondente alla perdita di adesione.

Accanto ad ogni grafico sono indicati i valori analitici delle tensioni tangenziali τ_1 e τ_2 , corrispondenti ai diversi stadi che caratterizzano i cinque legami locali (secondo gli schemi riportati in Fig. A1), e dell'energia di frattura G_f .

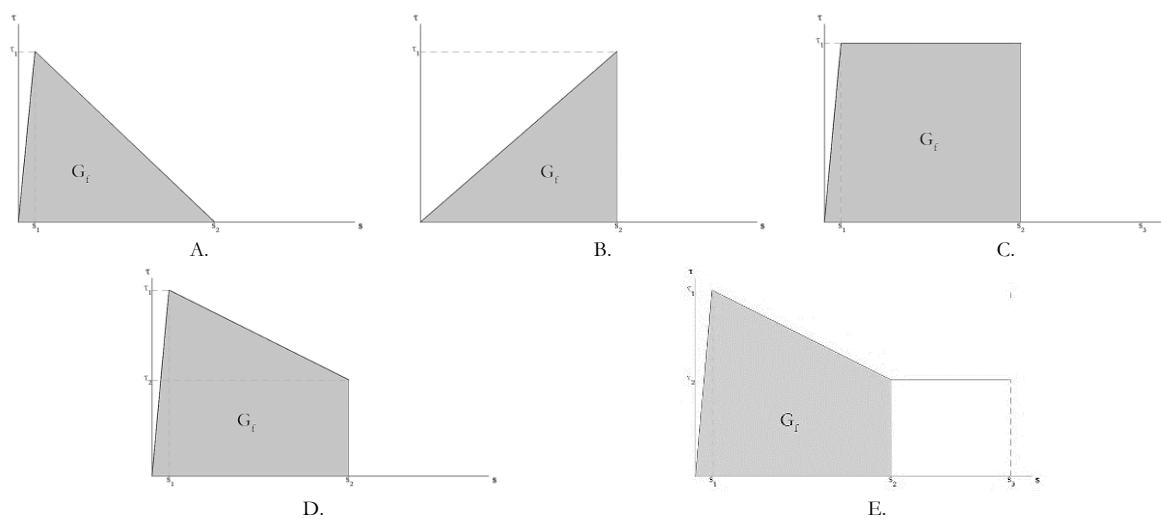
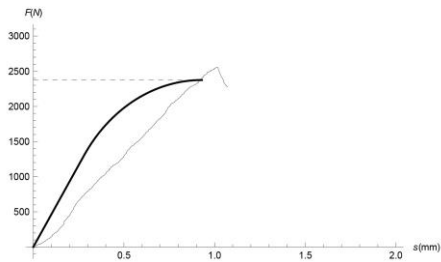


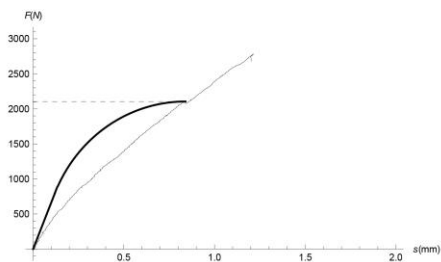
Fig. A1. Legami locali

1) Legame locale A

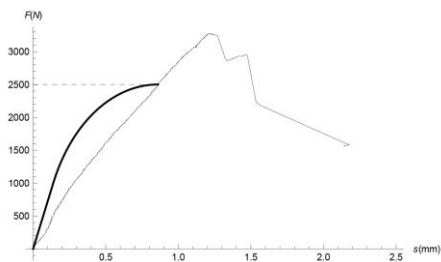
Single Shear Test



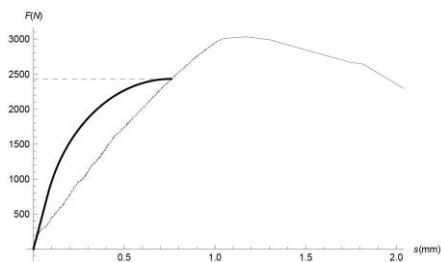
Provino SST.MKE.GS-01
 $\tau_1=1.124$ [MPa]
 $G_f=0.523$ [N/mm]



Provino SST.MKE.GS-04
 $\tau_1=0.977$ [MPa]
 $G_f=0.410$ [N/mm]

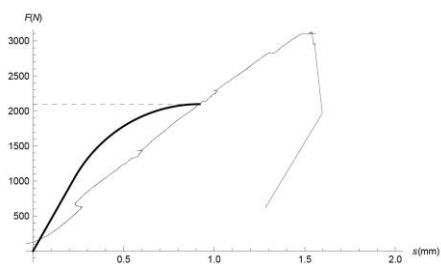


Provino SST.MKE.GS-05
 $\tau_1=1.348$ [MPa]
 $G_f=0.579$ [N/mm]

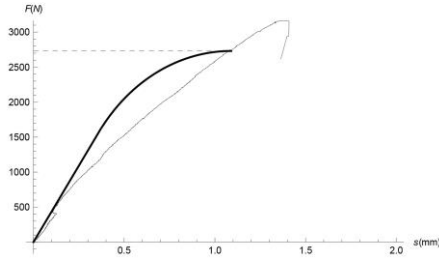


Provino SST.MKE.GS-06
 $\tau_1=1.442$ [MPa]
 $G_f=0.548$ [N/mm]

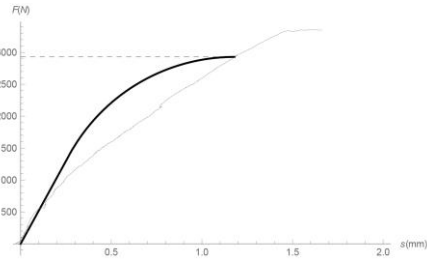
Double Shear Test - tipo A



Provino DST-A.MKE.GS-01b
 $\tau_1=0.886$ [MPa]
 $G_f=0.408$ [N/mm]

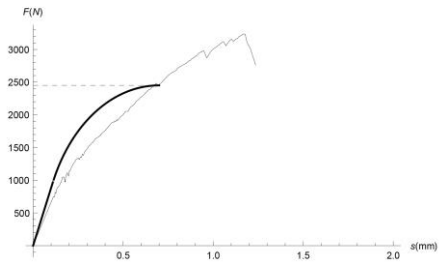


Provino DST-A.MKE.GS-02b
 $\tau_1=1.268$ [MPa]
 $G_r=0.691$ [N/mm]

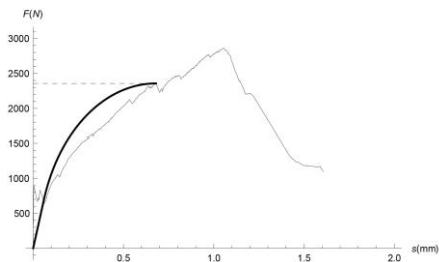


Provino DST-A.MKE.GS-03b
 $\tau_1=1.347$ [MPa]
 $G_r=0.795$ [N/mm]

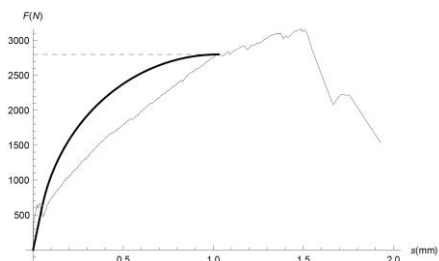
Double Shear Test - tipo B



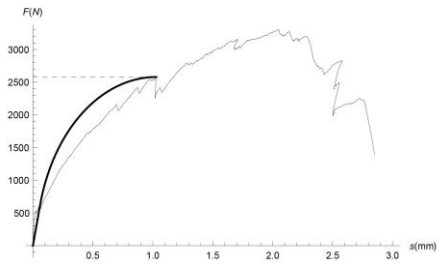
Provino DST-B.MKE.GS-01
 $\tau_1=1.590$ [MPa]
 $G_r=0.557$ [N/mm]



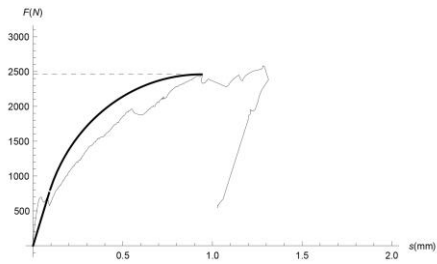
Provino DST-B.MKE.GS-02
 $\tau_1=1.514$ [MPa]
 $G_r=0.515$ [N/mm]



Provino DST-B.MKE.GS-03
 $\tau_1=1.409$ [MPa]
 $G_r=0.726$ [N/mm]

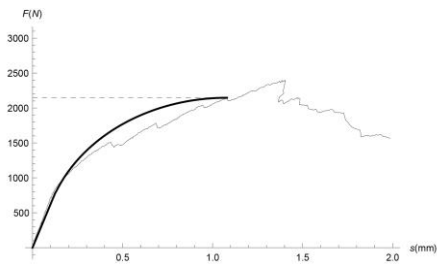


Provino DST-B.MKE.GS-05
 $\tau_1=1.196$ [MPa]
 $G_r=0.616$ [N/mm]

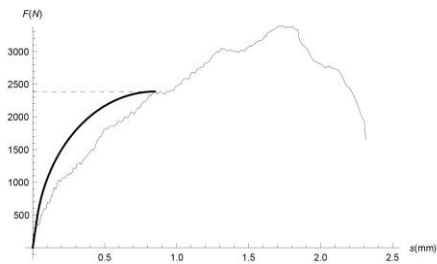


Provino DST-B.MKE.GS-06
 $\tau_1=1.193$ [MPa]
 $G_r=0.561$ [N/mm]

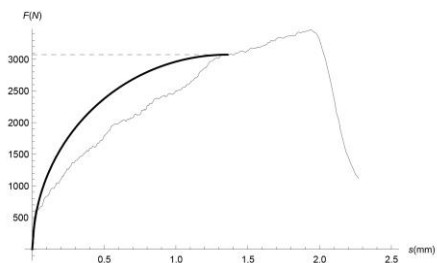
Beam Test



Provino BT.MKE.GS-01bis
 $\tau_1=1.791$ [MPa]
 $G_r=0.427$ [N/mm]



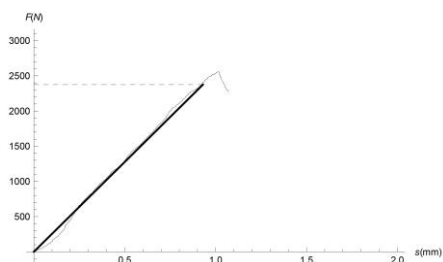
Provino BT.MKE.GS-02bis
 $\tau_1=1.242$ [MPa]
 $G_r=0.528$ [N/mm]



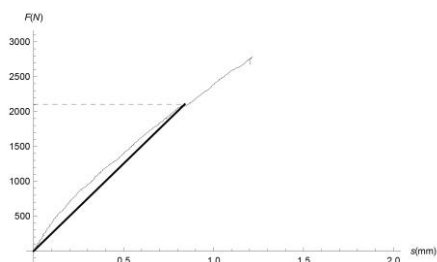
Provino BT.MKE.GS-03bis
 $\tau_1=1.286$ [MPa]
 $G_r=0.875$ [N/mm]

2) Legame locale B

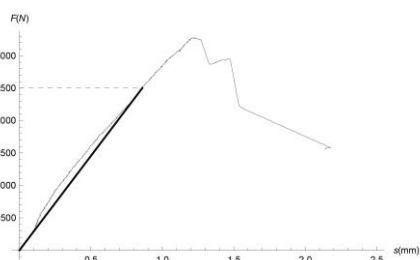
Single Shear Test



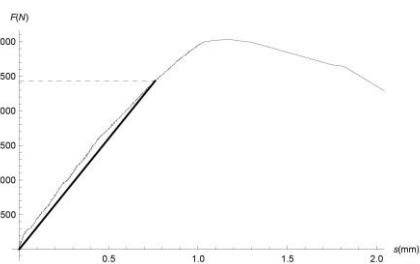
Provino SST.MKE.GS-01
 $\tau_1=1.124$ [MPa]
 $G_r=0.523$ [N/mm]



Provino SST.MKE.GS-04
 $\tau_1=0.977$ [MPa]
 $G_r=0.410$ [N/mm]

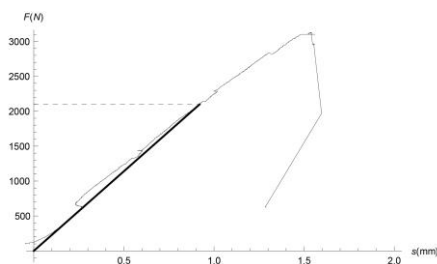


Provino SST.MKE.GS-05
 $\tau_1=1.348$ [MPa]
 $G_r=0.579$ [N/mm]

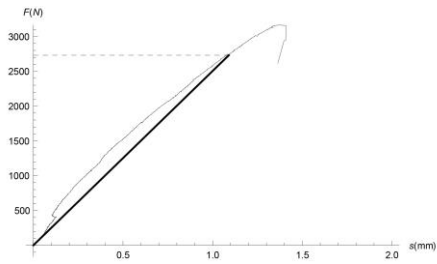


Provino SST.MKE.GS-06
 $\tau_1=1.442$ [MPa]
 $G_r=0.548$ [N/mm]

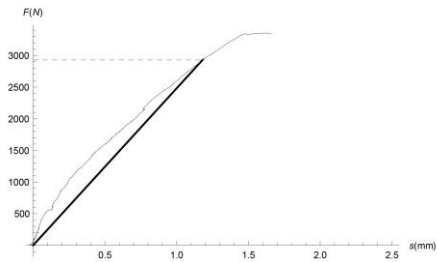
Double Shear Test – tipo A



Provino DST-A.MKE.GS-01b
 $\tau_1=0.886$ [MPa]
 $G_r=0.408$ [N/mm]

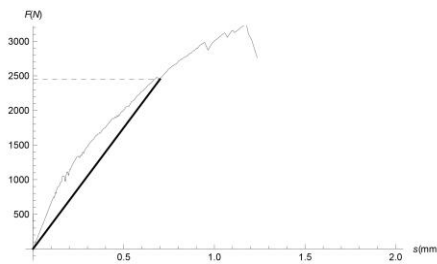


Provino DST-A.MKE.GS-02b
 $\tau_1=1.268$ [MPa]
 $G_t=0.691$ [N/mm]

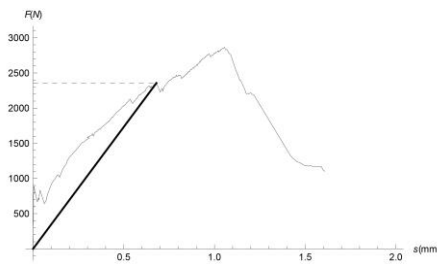


Provino DST-A.MKE.GS-03b
 $\tau_1=1.347$ [MPa]
 $G_t=0.795$ [N/mm]

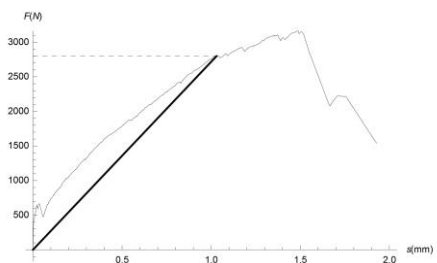
Double Shear Test – tipo B



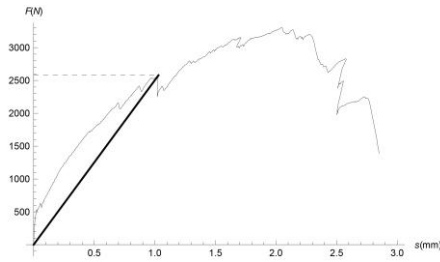
Provino DST-B.MKE.GS-01
 $\tau_1=1.590$ [MPa]
 $G_t=0.557$ [N/mm]



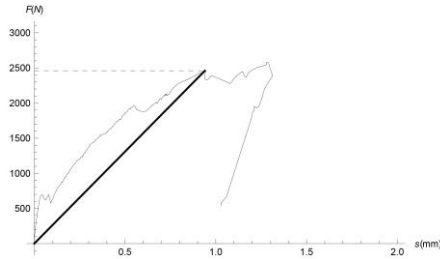
Provino DST-B.MKE.GS-02
 $\tau_1=1.514$ [MPa]
 $G_t=0.515$ [N/mm]



Provino DST-B.MKE.GS-03
 $\tau_1=1.409$ [MPa]
 $G_t=0.726$ [N/mm]

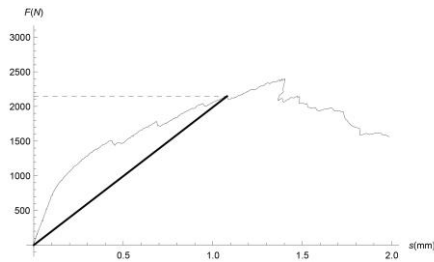


Provino DST-B.MKE.GS-05
 $\tau_1=1.196$ [MPa]
 $G_r=0.616$ [N/mm]

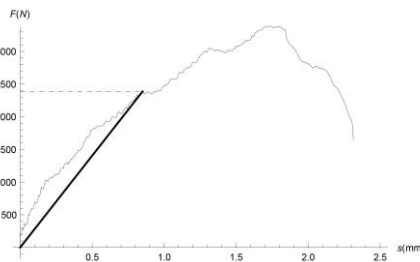


Provino DST-B.MKE.GS-06
 $\tau_1=1.193$ [MPa]
 $G_r=0.561$ [N/mm]

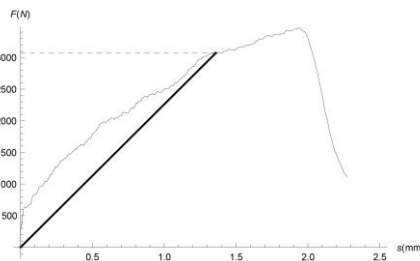
Beam Test



Provino BT.MKE.GS-01bis
 $\tau_1=1.791$ [MPa]
 $G_r=0.427$ [N/mm]



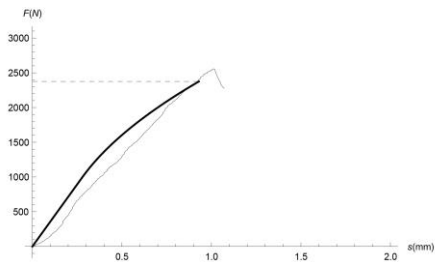
Provino BT.MKE.GS-02bis
 $\tau_1=1.242$ [MPa]
 $G_r=0.528$ [N/mm]



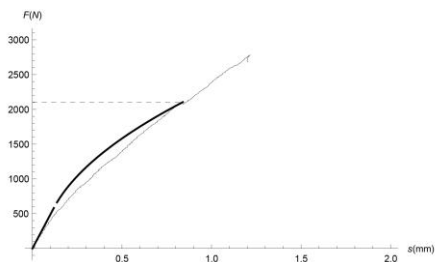
Provino BT.MKE.GS-03bis
 $\tau_1=1.286$ [MPa]
 $G_r=0.875$ [N/mm]

3) Legame locale C

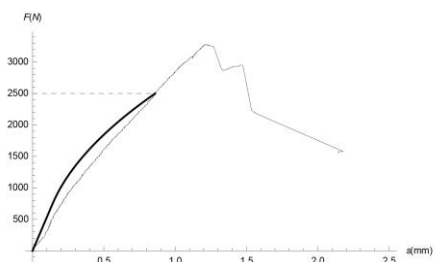
Single Shear Test



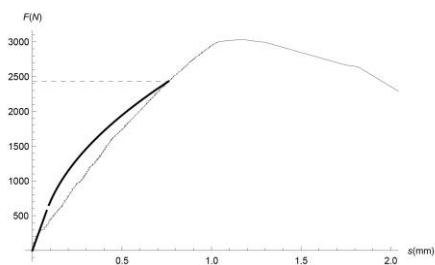
Provino SST.MKE.GS-01
 $\tau_1=0.661$ [MPa]
 $\tau_2=0.661$ [MPa]
 $G_r=0.523$ [N/mm]



Provino SST.MKE.GS-04
 $\tau_1=0.526$ [MPa]
 $\tau_2=0.526$ [MPa]
 $G_r=0.410$ [N/mm]

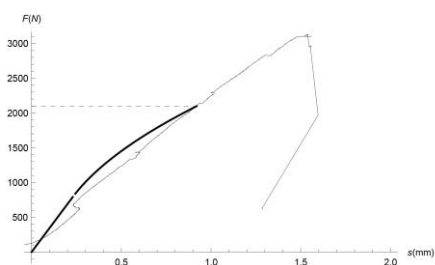


Provino SST.MKE.GS-05
 $\tau_1=0.733$ [MPa]
 $\tau_2=0.733$ [MPa]
 $G_r=0.579$ [N/mm]

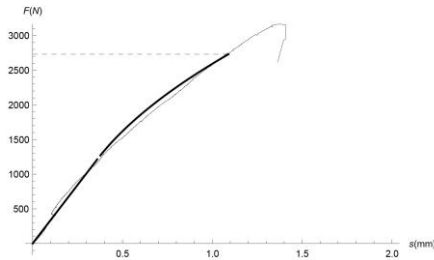


Provino SST.MKE.GS-06
 $\tau_1=0.761$ [MPa]
 $\tau_2=0.761$ [MPa]
 $G_r=0.548$ [N/mm]

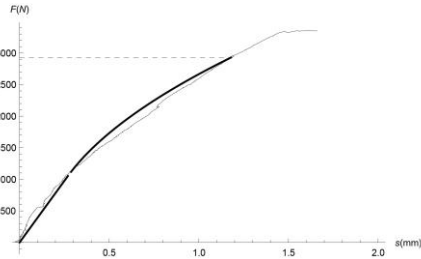
Double Shear Test – tipo A



Provino DST-A.MKE.GS-01b
 $\tau_1=0.507$ [MPa]
 $\tau_2=0.507$ [MPa]
 $G_r=0.408$ [N/mm]

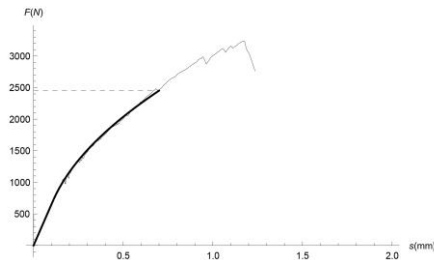


Provino DST-A.MKE.GS-02b
 $\tau_1=0.759$ [MPa]
 $\tau_2=0.759$ [MPa]
 $G_r=0.691$ [N/mm]

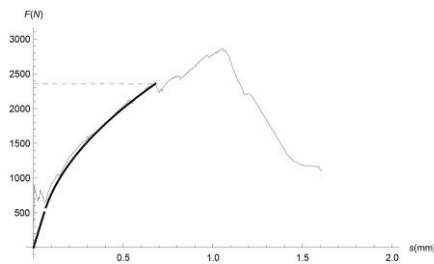


Provino DST-A.MKE.GS-03b
 $\tau_1=0.761$ [MPa]
 $\tau_2=0.761$ [MPa]
 $G_r=0.795$ [N/mm]

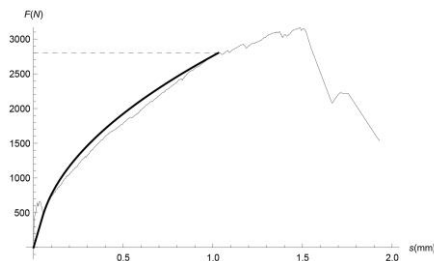
Double Shear Test - tipo B



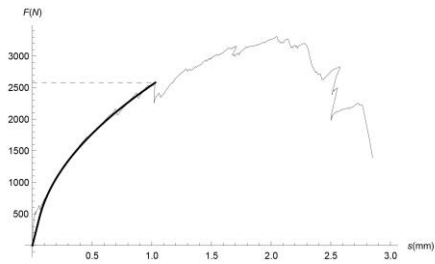
Provino DST-B.MKE.GS-01
 $\tau_1=0.863$ [MPa]
 $\tau_2=0.863$ [MPa]
 $G_r=0.557$ [N/mm]



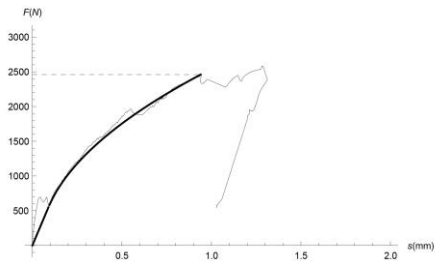
Provino DST-B.MKE.GS-02
 $\tau_1=0.792$ [MPa]
 $\tau_2=0.792$ [MPa]
 $G_r=0.515$ [N/mm]



Provino DST-B.MKE.GS-03
 $\tau_1=0.722$ [MPa]
 $\tau_2=0.722$ [MPa]
 $G_r=0.726$ [N/mm]

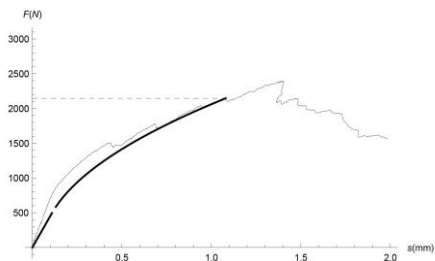


Provino DST-B.MKE.GS-05
 $\tau_1=0.616$ [MPa]
 $\tau_2=0.616$ [MPa]
 $G_r=0.616$ [N/mm]

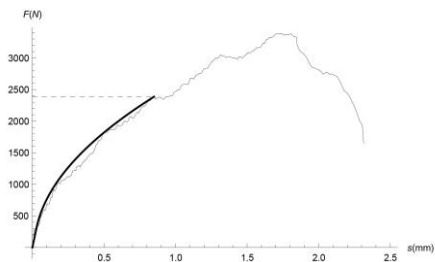


Provino DST-B.MKE.GS-06
 $\tau_1=0.626$ [MPa]
 $\tau_2=0.626$ [MPa]
 $G_r=0.561$ [N/mm]

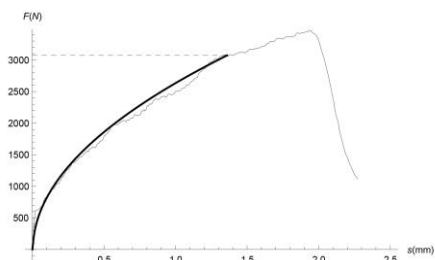
Beam Test



Provino BT.MKE.GS-01bis
 $\tau_1=0.417$ [MPa]
 $\tau_2=0.417$ [MPa]
 $G_r=0.427$ [N/mm]



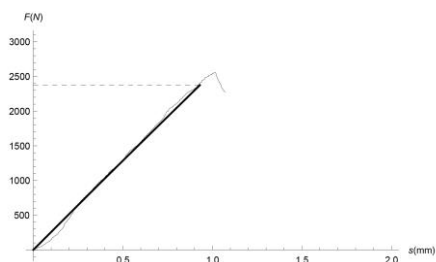
Provino BT.MKE.GS-02bis
 $\tau_1=0.632$ [MPa]
 $\tau_2=0.632$ [MPa]
 $G_r=0.528$ [N/mm]



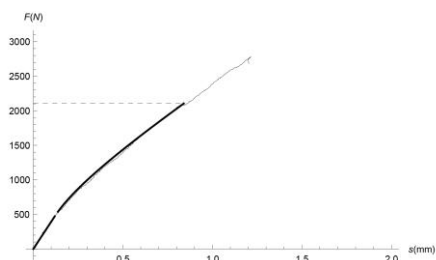
Provino BT.MKE.GS-03bis
 $\tau_1=0.645$ [MPa]
 $\tau_2=0.645$ [MPa]
 $G_r=0.875$ [N/mm]

4) Legame locale D

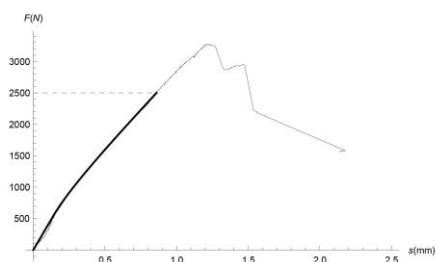
Single Shear Test



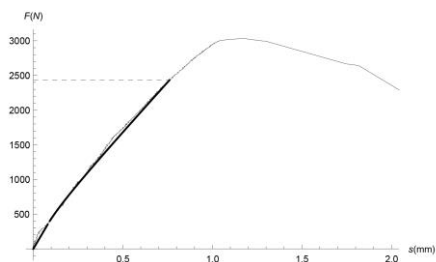
Provino SST.MKE.GS-01
 $\tau_1=0.346$ [MPa]
 $\tau_2=0.1113$ [MPa]
 $G_f=0.523$ [N/mm]



Provino SST.MKE.GS-04
 $\tau_1=0.345$ [MPa]
 $\tau_2=0.737$ [MPa]
 $G_f=0.410$ [N/mm]

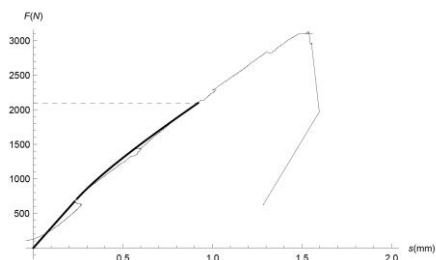


Provino SST.MKE.GS-05
 $\tau_1=0.392$ [MPa]
 $\tau_2=1.142$ [MPa]
 $G_f=0.579$ [N/mm]

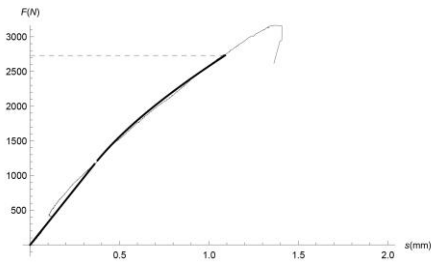


Provino SST.MKE.GS-06
 $\tau_1=0.285$ [MPa]
 $\tau_2=1.293$ [MPa]
 $G_f=0.548$ [N/mm]

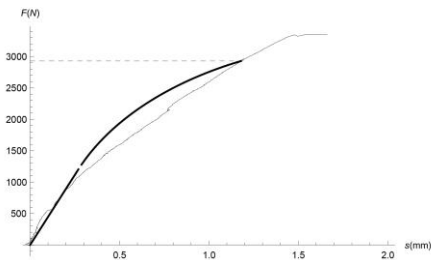
Double Shear Test – tipo A



Provino DST-A.MKE.GS-01b
 $\tau_1=0.363$ [MPa]
 $\tau_2=0.698$ [MPa]
 $G_f=0.408$ [N/mm]

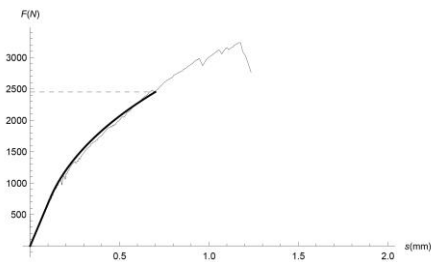


Provino DST-A.MKE.GS-02b
 $\tau_1=0.697$ [MPa]
 $\tau_2=0.852$ [MPa]
 $G_f=0.691$ [N/mm]

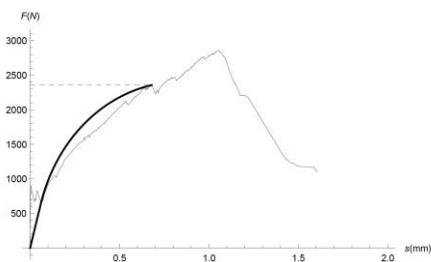


Provino DST-A.MKE.GS-03b
 $\tau_1=0.995$ [MPa]
 $\tau_2=0.457$ [MPa]
 $G_f=0.795$ [N/mm]

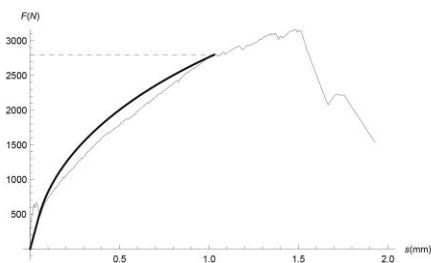
Double Shear Test - tipo B



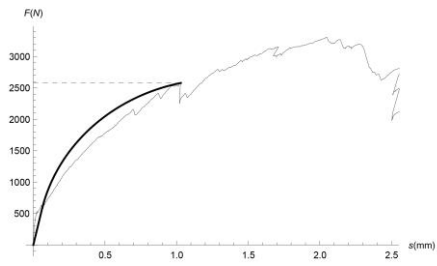
Provino DST-B.MKE.GS-01
 $\tau_1=0.935$ [MPa]
 $\tau_2=0.777$ [MPa]
 $G_f=0.557$ [N/mm]



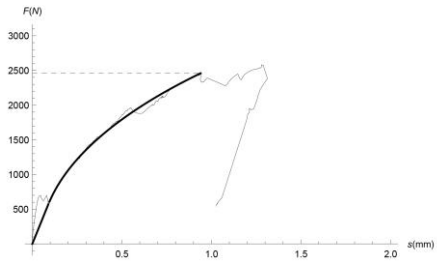
Provino DST-B.MKE.GS-02
 $\tau_1=1.273$ [MPa]
 $\tau_2=0.264$ [MPa]
 $G_f=0.515$ [N/mm]



Provino DST-B.MKE.GS-03
 $\tau_1=0.833$ [MPa]
 $\tau_2=0.606$ [MPa]
 $G_f=0.726$ [N/mm]

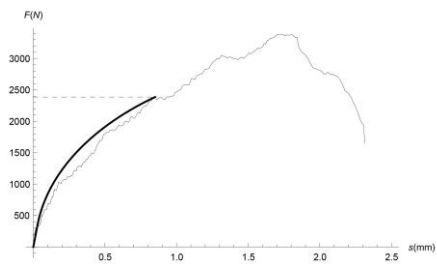


Provino DST-B.MKE.GS-05
 $\tau_1=0.989$ [MPa]
 $\tau_2=0.220$ [MPa]
 $G_r=0.616$ [N/mm]



Provino DST-B.MKE.GS-06
 $\tau_1=0.678$ [MPa]
 $\tau_2=0.569$ [MPa]
 $G_r=0.561$ [N/mm]

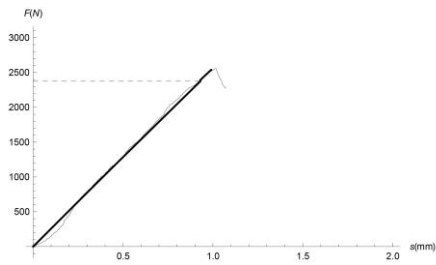
Beam Test



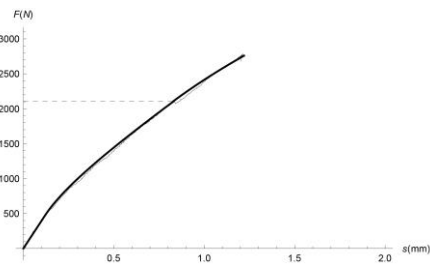
Provino BT.MKE.GS-02bis
 $\tau_1=0.783$ [MPa]
 $\tau_2=0.476$ [MPa]
 $G_r=0.528$ [N/mm]

5) Legame locale E

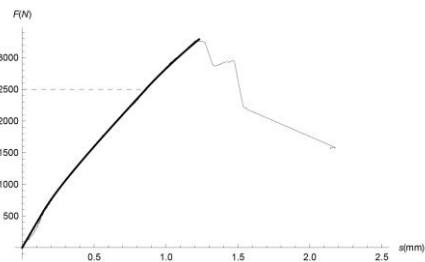
Single Shear Test



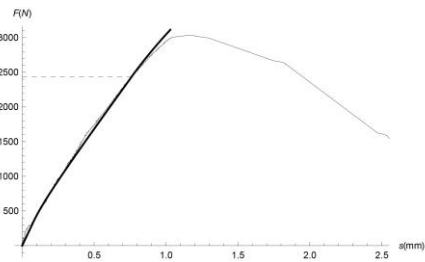
Provino SST.MKE.GS-01
 $\tau_1=0.346$ [MPa]
 $\tau_2=1.113$ [MPa]
 $G_f=0.523$ [N/mm]



Provino SST.MKE.GS-04
 $\tau_1=0.345$ [MPa]
 $\tau_2=0.737$ [MPa]
 $G_f=0.410$ [N/mm]

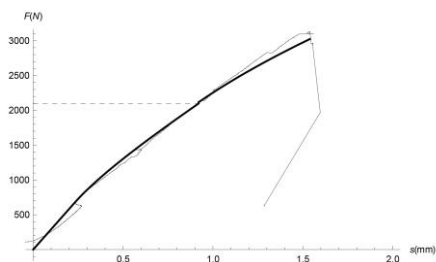


Provino SST.MKE.GS-05
 $\tau_1=0.392$ [MPa]
 $\tau_2=1.142$ [MPa]
 $G_f=0.579$ [N/mm]

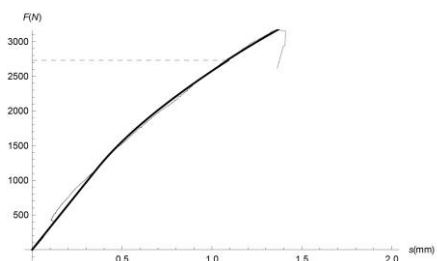


Provino SST.MKE.GS-06
 $\tau_1=0.285$ [MPa]
 $\tau_2=1.293$ [MPa]
 $G_f=0.548$ [N/mm]

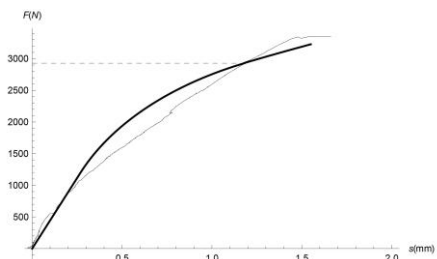
Double Shear Test – tipo A



Provino DST-A.MKE.GS-01b
 $\tau_1=0.363$ [MPa]
 $\tau_2=0.698$ [MPa]
 $G_f=0.408$ [N/mm]

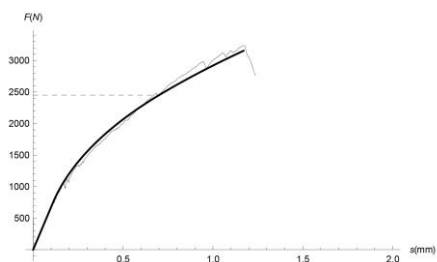


Provino DST-A.MKE.GS-02b
 $\tau_1=0.697$ [MPa]
 $\tau_2=0.852$ [MPa]
 $G_r=0.691$ [N/mm]

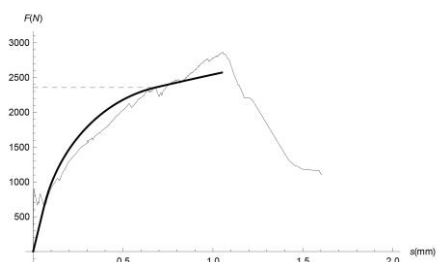


Provino DST-A.MKE.GS-03b
 $\tau_1=0.995$ [MPa]
 $\tau_2=0.457$ [MPa]
 $G_r=0.795$ [N/mm]

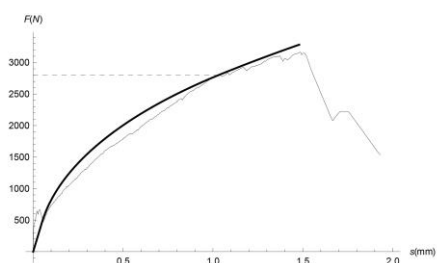
Double Shear Test – tipo B



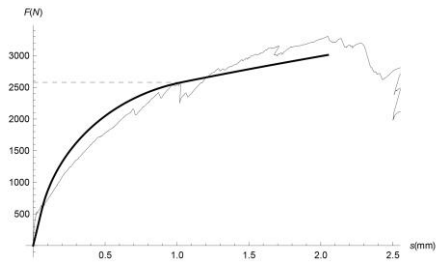
Provino DST-B.MKE.GS-01
 $\tau_1=0.935$ [MPa]
 $\tau_2=0.777$ [MPa]
 $G_r=0.557$ [N/mm]



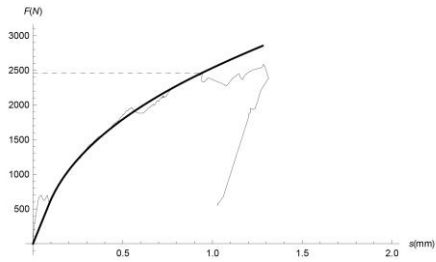
Provino DST-B.MKE.GS-02
 $\tau_1=1.273$ [MPa]
 $\tau_2=0.264$ [MPa]
 $G_r=0.515$ [N/mm]



Provino DST-B.MKE.GS-03
 $\tau_1=0.833$ [MPa]
 $\tau_2=0.606$ [MPa]
 $G_r=0.726$ [N/mm]

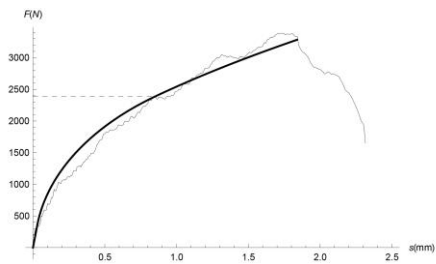


Provino DST-B.MKE.GS-05
 $\tau_1=0.989$ [MPa]
 $\tau_2=0.220$ [MPa]
 $G_f=0.616$ [N/mm]



Provino DST-B.MKE.GS-06
 $\tau_1=0.678$ [MPa]
 $\tau_2=0.569$ [MPa]
 $G_f=0.561$ [N/mm]

Beam Test



Provino BT.MKE.GS-02bis
 $\tau_1=0.783$ [MPa]
 $\tau_2=0.476$ [MPa]
 $G_f=0.528$ [N/mm]