

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA CIVILE
Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile ed Ambientale



*Caratterizzazione meccanica e modellazione
numerica di materiali compositi a matrice
cementizia per mezzo di prove di taglio diretto.*

*“Mechanical characterization and numerical modeling of
cementitious matrix composite materials by means of direct-
shear tests”*

Relatore: Prof. Ing. Carlo Pellegrino

Correlatore: Ing. Tommaso D'Antino

Candidato: Devis Lucatello

Matricola: 1036057

Anno Accademico 2013/2014

INDICE

PREFAZIONE	1
1 I MATERIALI FIBRORINFORZATI	1
1.1 Introduzione	1
1.2 Sistemi disponibili in commercio	2
1.3 Proprietà dei compositi e delle diverse fasi	2
1.3.1 Tipi di fibre impiegate	3
1.3.1.1 Fibre di vetro.....	4
1.3.1.2 Fibre di carbonio.....	6
1.3.1.3 Fibre aramidiche	7
1.3.1.4 Fibre in PBO (parafenilenbenzobisoxazolo)	8
1.3.1.5 Fibre in acciaio	9
1.3.2 Matrici	10
1.3.3 Principali tipologie di matrici polimeriche.....	10
1.3.4 Matrici cementizie	12
1.4 FRCM: caratteristiche generali	14
1.4.1 Requisiti di compatibilità matrice-supporto	14
1.4.2 Adattabilità alle variazioni di volume	14
1.4.3 Traspirazione del getto	15
1.4.4 Compatibilità dal punto di vista chimico	15
1.4.5 Prestazioni attese	15
1.4.6 La matrice cementizia	16
1.4.6.1 I PMC (Polymern Modiefied Concrete)	16
1.4.6.2 Matrici fibrorinforzate	17
1.4.7 Interazione Matrice - fase resistente all'interno degli FRCM.	18

1.4.8	Meccanismi di crisi.....	19
2	PROVE SPERIMENTALI.....	21
2.1	Introduzione.....	21
2.2	Sperimentazioni precedenti.....	22
2.3	Campagna sperimentale.....	26
2.3.1	Obiettivi.....	26
2.3.2	Test setup.....	26
2.3.3	Preparazione dei provini.....	30
2.4	Prove sui materiali.....	33
2.4.1	Calcestruzzo per il supporto.....	33
2.4.2	Matrici cementizie.....	35
2.4.2.1	Concrete Rock W.....	36
2.4.2.2	Concrete Rock S.....	37
2.4.2.3	Limecrete.....	38
2.4.3	Fibre da rinforzo.....	40
2.4.3.1	Trefoli in acciaio STEEL NET 190.....	42
2.4.3.2	Rete in fibra di vetro G-NET 221 B.....	44
2.4.3.3	Rete in fibra di vetro G-NET 251 BA.....	48
2.4.3.4	Rete in carbonio C-NET 220 B.....	52
2.5	Risultati attesi.....	55
2.6	Risultati sperimentali.....	57
2.6.1	Prove a trazione diretta su provini con vetro G-NET 251BA.....	57
2.6.2	Prove a trazione diretta su provini G-NET 221 B.....	61
2.6.3	Prove a trazione diretta su provini STEEL-NET 190.....	64
2.6.4	Prove a trazione diretta su provini C-NET 220 B.....	67
2.6.4.1	Matrice cementizia "ROCK W".....	68
2.6.4.2	Matrice cementizia "ROCK S".....	71

2.7	Conclusioni.....	80
3	MODELLAZIONE NUMERICA.....	83
3.1	Introduzione.....	83
3.2	Sperimentazione di riferimento	84
3.2.1	Setup.....	84
3.2.2	Caratterizzazione del materiale	85
3.2.2.1	Fibre in PBO	85
3.2.2.2	Calcestruzzo per supporto e Matrice cementizia	86
3.2.3	Risultati	87
3.2.3.1	Curva carico-spostamento	87
3.2.3.2	Influenza della larghezza di incollaggio	88
3.2.3.3	Andamento delle deformazioni.....	89
3.2.3.4	Tensioni tangenziali: approccio basato sull'energia di frattura.....	91
3.3	Studi numerici precedenti	95
3.3.1	Descrizione del modello	95
3.3.2	Metodo di analisi	97
3.3.3	Legge costitutiva τ -slip.....	98
3.3.3.1	Tangential behaviour	99
3.3.3.2	Legge coesiva e danno.....	99
3.3.3.3	Influenza delle "interaction properties"	101
3.3.4	Risultati e commenti.....	102
3.4	Modellazione numerica degli FRCM: approccio tridimensionale.....	106
3.4.1	Prove di taglio diretto usate per la calibrazione dei modelli.	106
3.4.2	Strategia di modellazione proposta	110
3.4.3	Materiali	111
3.4.4	Legge costitutiva dell'interfaccia.....	111
3.4.4.1	Normal behaviour	112
3.4.4.2	Comportamento coesivo (surface-based cohesive behaviour)	112
3.4.4.3	Definizione del danno.....	114

3.4.4.4	Applicazione del contatto.....	116
3.4.4.5	Parametri introdotti nei modelli	118
3.4.5	Metodologia di analisi	122
3.4.6	Modellazione di un fascio in PBO e di un solo strato di matrice.	123
3.4.6.1	Geometria del modello, mesh e condizioni al contorno.....	123
3.4.6.2	Risultati	124
3.4.7	Modellazione di un fascio in PBO compreso tra due strati di matrice.	130
3.4.7.1	Geometria del modello, mesh e condizioni al contorno.....	130
3.4.7.2	Risultati	132
3.4.8	Modellazione dell'intero sistema FRCM	136
3.4.8.1	Geometria del modello, mesh e condizioni al contorno.....	136
3.4.8.2	Risultati	137
3.4.9	Influenza delle fibre trasversali.	138
3.4.9.1	Geometria del modello, mesh e condizioni al contorno.....	139
3.4.9.2	Risultati	140
3.5	Conclusioni.....	142
	BIBLIOGRAFIA	145
	APPENDICE	149
A1.	Tabella D - scorrimento plastico (modello Gaelle [23]).....	149
A2.	Dati test DS_330_43_L_S_2.....	151
A3.	Tabella D - scorrimento plastico (DS_330_43_S_5)	152
A4.	Tabella D - scorrimento plastico (DS_330_43_L_S_2).....	156

Prefazione

Durante gli ultimi decenni, l'ingegneria civile ha visto un rapido sviluppo di nuove tecnologie finalizzate al recupero del patrimonio edilizio esistente. In tale ambito si inseriscono i materiali compositi, ovvero delle soluzioni basate sull'utilizzo di materiali innovativi come fibre e polimeri, le quali sono caratterizzate da un'elevata efficacia in campo strutturale e da un costo relativamente contenuto: tra questi, si inquadrano gli FRP (*Fiber Reinforced Polymer*), tecnica che prevede l'applicazione esterna agli elementi portanti di tessuto da rinforzo (composto da fibre in vetro, acciaio, carbonio ecc) mediante resine polimeriche. Vista l'ottima efficacia riscontrata da questi compositi, si sono studiate nuove soluzioni volte a migliorare alcuni aspetti degli FRP, quali compatibilità con le superfici in calcestruzzo, resistenza al fuoco, durabilità. Il risultato di questa ricerca sono gli FRCM (acronimo di *Fiber Reinforced Cementitious Matrix*), i quali sostituiscono l'utilizzo delle resine polimeriche come fase legante a favore di matrici cementizie opportunamente addizionate con sostanze volte a migliorarne l'interazione con la fase resistente e il supporto.

Vista la recentissima introduzione in ambito edilizio dei compositi a matrice inorganica, ad oggi non si dispone di una vasta letteratura in tale ambito; per questo motivo si sono promosse una serie di ricerche sperimentali, volte ad approfondire il comportamento di questa nuova tecnologia.

Una possibilità per indagare il trasferimento degli sforzi all'interno del rinforzo è rappresentata dalle prove di taglio diretto: esse consistono nella pura trazione di reti fibrorinforzate che presentano un'estremità vincolata ad un supporto in calcestruzzo mediante matrice cementizia. Il profilo del carico ottenuto durante i test permette di individuare alcune peculiarità nella risposta a trazione di questi compositi, come il meccanismo di distacco delle fibre dalla matrice o il contributo dell'attrito conferito dalla frizione tra il tessuto e la malta durante lo scorrimento.

Il presente elaborato analizza il comportamento degli FRCM in due parti.

Nella prima si riportano i risultati relativi ad alcune serie di prove di taglio diretto condotte sugli FRCM, con la quale si intende investigare l'interazione di diverse tipologie di fasi resistenti (fibre in vetro, carbonio e trefoli in acciaio) con alcuni tipi di matrici cementizie (tre miscele, due delle quali a base di cemento Portland e una di tipo

pozzolanico, tutte modificate mediante l'impiego di polimeri). Tali sperimentazioni si ricollegano al lavoro curato da T. D'Antino, C. Carloni, L.H. Sneed e C. Pellegrino, i quali hanno approfondito la risposta a trazione di FRCM caratterizzati dall'uso di una rete con fibre in PBO (*parafenilenbenzobisoxazolo*).

La seconda parte della tesi si focalizza sulla riproduzione a livello numerico del meccanismo di trasferimento degli sforzi all'interno dei compositi a matrice cementizia. Si è scelto di calibrare la modellazione fem sulla base delle precedenti sperimentazioni riguardanti l'impiego di fibre in PBO: tali test, oltre ad essere caratterizzati da una risposta congruente a quella ideale degli FRCM, sono stati presi come riferimento in passato per altri tentativi di analisi numerica, che però non hanno saputo riprodurre in modo fedele il comportamento di questo sistema di rinforzo. Si intende perciò considerare gli stessi dati iniziali, in modo da poter confrontare in modo diretto l'approfondimento numerico presentato nella tesi con quelli proposti precedentemente.

Si auspica che il lavoro qui proposto possa dare un contributo a chiarire il comportamento di questa nuova tecnologia, la quale, visti i vantaggi in termini di durabilità e facilità di applicazione, potrebbe rappresentare un'ottima alternativa alle tecnologie tradizionali nel campo del recupero di strutture ammalorate o per l'adeguamento sismico delle costruzioni più vulnerabili.

Lucatello Devis

Ai miei genitori

1 I materiali fibrorinforzati

1.1 Introduzione

Negli ultimi decenni il settore edile ha visto lo sviluppo di numerose tecniche di intervento innovative, soprattutto per quanto riguarda il recupero di strutture esistenti. I materiali fibrorinforzati rappresentano una tra le più recenti innovazioni in questo settore. Le ottime caratteristiche meccaniche, unite all'ottima capacità di adattarsi ad ogni superficie e al limitato tempo di applicazione sulle strutture, hanno fatto sì che questa soluzione riscuotesse un discreto successo in diversi ambiti come:

- Rinforzo di strutture in c.a. e c.a.p. ;
- Rinforzo di strutture in legno;
- Rinforzo di strutture murarie;
- Rinforzo di strutture in acciaio;
- Nuove costruzioni.

La grande versatilità di questi nuovi materiali sono oggi di grande aiuto soprattutto nell'ambito degli adeguamenti sismici. I recenti terremoti che hanno afflitto la nostra penisola, hanno evidenziato la necessità di salvaguardare il patrimonio edilizio italiano, il quale è risultato particolarmente vulnerabile. Queste recenti tipologie d'intervento si sono rivelate un ottimo strumento con il quale salvaguardare le costruzioni e la cittadinanza, grazie ai risultati incoraggianti ottenuti con costi relativamente ridotti.

In commercio si può individuare un'ampia gamma di soluzioni che prevedono l'impiego di queste nuove tecnologie. Pertanto, si vuole ora fornire al lettore una panoramica generale prima di entrare nel vivo di questo elaborato.

1.2 Sistemi disponibili in commercio

Fra i sistemi di rinforzo più diffusi in ingegneria civile si distinguono due principali categorie: i sistemi preformati e quelli impregnati in situ. I primi riguardano lamine o barre realizzate in stabilimento mediante la tecnica della pultrusione. Nel caso delle lamine, si provvede all'incollaggio del rinforzo direttamente sul substrato preventivamente preparato mentre, nel caso in cui si impiegassero barre a sezione rettangolare o circolare, il consolidamento è ideato mediante scanalature ricavate sulla costruzione (quest'ultima tecnica è particolarmente adatta per zone calpestabili in cui un'applicabilità delle fibre sulla superficie comporterebbe un degrado del rinforzo).

Il sistema più diffuso è invece quello delle fibre direttamente impregnate in situ, ovvero fibre o reti incollate direttamente all'interfaccia dell'elemento.

I materiali compositi più diffusi oggi in edilizia sono i materiali fibrorinforzati a matrice polimerica, indicati con l'acronimo di *FRP (Fiber Reinforced Polymers)*. Viste alcune lacune in merito alla durabilità, resistenza al fuoco e applicabilità su superfici umide, il settore civile ha sviluppato altre tipi di fase matrice basate su materiali di origine inorganica, prevalentemente costituite da malte arricchite da fibre e fumi di silice: in tal caso si parla di *FRCM (Fiber Reinforced Cementitious Matrix)*. Dato il loro recente impiego nel settore delle costruzioni, quest'ultimi sono ancora oggetto di studi sperimentali per meglio capire l'interazione tra supporto-matrice e matrice-fibre: è proprio il comportamento degli FRCM applicati su supporti in calcestruzzo lo scopo delle indagini esposte in questo elaborato. Prima di iniziare con la descrizione delle prove eseguite e i risultati ottenuti, si vuole ora fornire qualche informazione di carattere generale in merito questo tipo di prodotti.

1.3 Proprietà dei compositi e delle diverse fasi

Negli FRP e FRCM si possono distinguere a livello macroscopico due fasi principali:

- fase diffusa (fibre composte da diversi materiali) che conferisce resistenza al composito grazie alla resistenza assiale molto elevata;
- Fase matrice che permette il trasferimento degli sforzi dalle fibre al supporto di applicazione.

L'unione delle due fasi con caratteristiche diverse genera un materiale con notevoli prestazioni in termini di resistenza e tenacità conferite dalle fibre e ottimi riscontri in

termini di durabilità e applicabilità trasmesse dalla malta cementizia. In modo particolare, le fibre hanno un comportamento anisotropo e contribuiscono a definire le proprietà del composito attraverso:

- forma e dimensioni delle fibre;
- concentrazione;
- orientazione.

La matrice, invece, può esser definita come un continuo omogeneo in quanto non si riscontrano variazioni delle sue proprietà considerando direzioni diverse.

1.3.1 Tipi di fibre impiegate

Esistono numerose tipologie di fibre in commercio corrispondentemente ai diversi obbiettivi che si vogliono perseguire con l'applicazione del composito. Le più utilizzate sono le fibre di vetro e carbonio, ma vengono prodotte anche fibre in acciaio, kevlar (fibre aramidiche) e in PBO (*parafenilenbenzobisoxazolo*).

Le fibre sono composte affiancando filamenti molto sottili aventi diametro all'incirca di 10 μ . La configurazione monodimensionale comporta numerosi vantaggi quali:

- leggerezza;
- ottima capacità di adattarsi alla forma del supporto;
- dimensioni ridotte che permettono un intervento non invasivo sulle strutture (aspetto particolarmente apprezzato dalla sovrintendenza nel caso di restauri di costruzioni vincolate);
- elevata resistenza e rigidità che assumono valori superiori rispetto all'impiego degli stessi materiali con dimensioni maggiori.

Il processo di produzione delle fibre ricorda molto quello dei tessuti tradizionali ed è per tal motivo che anche la classificazione delle diverse componenti è stato ispirato dal settore tessile. Per comporre il prodotto finale, si parte inizialmente dalla formatura dei *filamenti*, i quali uniti assieme danno il *tow*. Dall'intreccio di più tows si ottiene lo *spun yarn*. Si finisce poi per ottenere il *roving*, ovvero l'insieme di più yarn assemblati parallelamente. Oltre alle sigole fibre, in commercio è possibile trovare una grande quantità di tessuti i quali sono orditi a seconda di come si vogliono influenzare le caratteristiche meccaniche di una direzione rispetto all'altra. L'intreccio è una parte

fondamentale per la produzione dei compositi e uno sbaglio durante questo processo può portare ad un materiale con caratteristiche molto diverse da quelle volute.

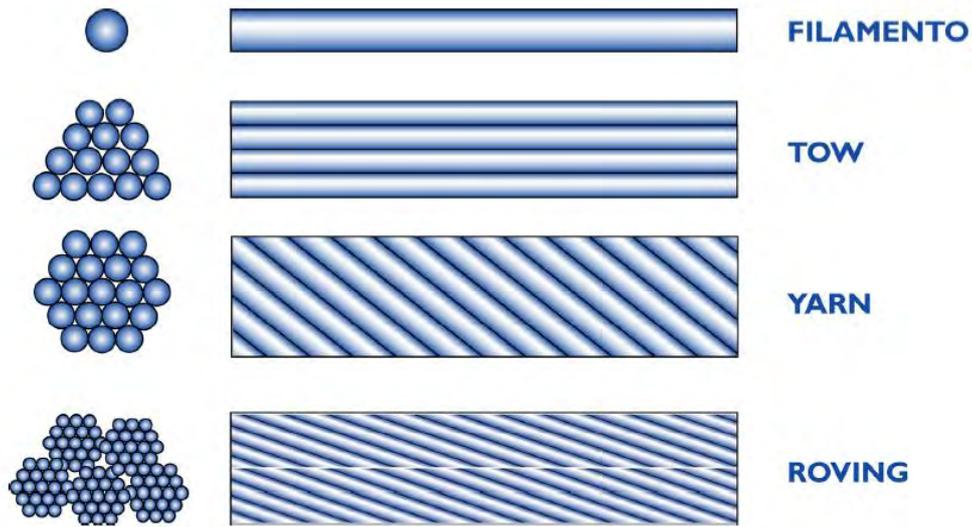


Figura 1-1 Classificazione delle fibre (CNR-DT 200/2004).

I tessuti vengono classificati in base alla loro densità lineare misurando il loro peso per km di lunghezza (definito anche come "titolo" e misurato in tex, corrispondente ad 1g/1km).

Vengono ora descritti brevemente i principali tipi di fibre disponibili.

1.3.1.1 Fibre di vetro

L'esempio principe che fa intuire come l'impiego di un dato materiale sottoforma di filamenti aumenti le proprie caratteristiche rispetto allo stadio monolitico è rappresentato dalla fibra di vetro. Nella sua configurazione tradizionale, il vetro è fragile e pertanto inadatto al campo delle costruzioni. Con dimensioni inferiori al decimo di millimetro, il vetro perde la sua fragilità e diventa un materiale con elevate prestazioni meccaniche.

Le fibre di vetro si ottengono dalla fusione di diversi ossidi (calcio, magnesio, boro, alluminio e silicio) e dalle proporzioni con i quali vengono miscelati si ottengono diverse tipologie di rinforzo. Le più diffuse sono le fibre di vetro di tipo E ed S, in quanto risultano essere molto versatili grazie alla loro alta resistenza meccanica e inattaccabilità alle sostanze corrosive.

Materiale	Densità (kg/m ³)	Modulo elastico (Mpa)	Resistenza a trazione (Mpa)	Deformazione a rottura (%)
Fibre di vetro E	2550	70000	3500	3,8
Fibre di vetro S	2500	90000	4700	5,5

Tabella 1-1 Caratteristiche delle fibre di vetro più diffuse in commercio.

La designazione tecnica delle fibre di vetro è regolamentata in base alle norme ISO 1139:1973(E) e ISO 2078:1993(E) secondo i seguenti elementi:

- una lettera che identifica il tipo di vetro utilizzato;
- una seconda lettera che indica il tipo di fibra impiegato:
 - C (iniziale di “Continuo”, per i filamenti);
 - D (iniziale di “Discontinuo”, per le fibre discontinue);
- un numero che indica il diametro nominale (in μ m) del filamento;
- un numero, separato da uno spazio, che indica la massa lineare della fibra in Tex;
- il senso e il valore di torsione, espresso in giri/m (opzionale);
- il numero di fili costituenti i ritorti (opzionale);
- un codice del produttore contenente tutte quelle informazioni, non codificate, ritenute indispensabili per caratterizzare il prodotto (opzionale).

Le fibre impiegate nel settore civile presentano buone resistenze a trazione (tensione variabile tra 2500-3500 MPa), modulo di elasticità nell'ordine di 50-85 Gpa, discreto mantenimento delle proprie caratteristiche a temperature elevate e un ottimo rapporto prestazione-costo.

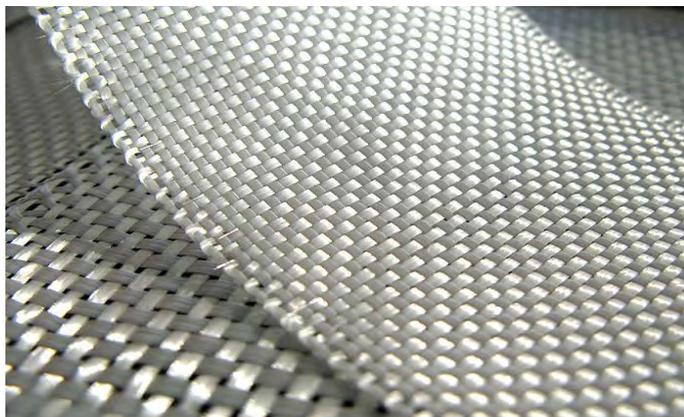


Figura 1-2 Esempio di rete bidirezionale in vetro

1.3.1.2 Fibre di carbonio

Come la fibra di vetro, quella di carbonio è ottenuta da un materiale di origine minerale. Le fibre si ottengono dall'ossidazione e pirolisi termica di un polimero a base di acrilonitrile (poliacrilonitrile, conosciuto con l'acronimo PAN). Il polimero è riscaldato preliminarmente in presenza di aria alla temperatura di 300 °C favorendo l'ossidazione del materiale. Si procede successivamente alla cottura in altiforni fino alla temperatura di 200 °C introducendo gas inerte (come argon), con lo scopo di trasformare il polimero plastico in fogli di grafite. Durante la fase di riscaldamento, i fogli di grafite si uniscono in un unico filamento, l'unione dei quali porterà alla formazione delle fibre di carbonio. Il carbonio ha un comportamento essenzialmente anisotropo e per tal ragione è utilizzata sottoforma di fibra monodirezionale. Tale comportamento è dovuta alla struttura cristallina degli atomi di grafite, i quali sono piani di forma esagonale e ciò fa sì che le proprietà migliori di questo tipo di materiali si esplicano lungo una sola direzione. In base ai trattamenti termici scelti in fase di produzione, si ottengono filamenti di carbonio con proprietà differenti in base alle esigenze di applicazione

Materiale	Densità (kg/m ³)	Modulo elastico (MPa)	Resistenza a trazione (MPa)	Deformazione a rottura (%)
Carbonio	1780	240000	3400	0,1
Carbonio H-M (High-Module)	1830	640000	1900	0,1

Tabella 1-2 Caratteristiche generali dei tessuti in carbonio.



Figura 1-3 Esempio di tessuto in carbonio.

Tra i pregi che si possono individuare in questo materiale, spiccano:

- alta resistenza a torsione;
- assorbimento modesto di energia a rottura;
- elevato modulo di elasticità (tipicamente dai 150 agli 850 Gpa);
- alta resistenza a trazione (fino a 3600 MPa);
- bassa densità e leggerezza;
- coefficiente di dilatazione nullo e bassa suscettibilità termica;
- ottima resistenza all'umidità e agli agenti corrosivi.

1.3.1.3 Fibre aramidiche

Le **fibre in Aramide** o Aramidiche sono fibre polimeriche ad altissime prestazioni meccaniche ottenute per lavorazione di *Poliammidi*, ottenuti per *policondensazione di diammine e acido dicarbossilico*. Le prime fibre ottenute da questi polimeri sono state quelle in Nylon e Nomex, le quali però non trovano impiego in campo strutturale a causa dei moduli di rigidità e valori di resistenza abbastanza limitati. Nel 1970 fu sintetizzato il Kevlar, il quale permise a questo tipo di fibre di esser impiegato anche nel settore civile.

Esistono in commercio vari tipi di Kevlar che si differenziano tra loro sia per la struttura chimica (in particolare per la lunghezza delle diammine aramidiche utilizzate nei monomeri) che per le prestazioni meccaniche. I più comuni sono il Kevlar 29 e il Kevlar 39. Più recentemente è stata introdotta una nuova formulazione denominata Kevlar149.

Rispetto alle fibre di carbonio, le fibre aramidiche presentano valori del modulo elastico e peso specifico più ridotti. Altre peculiarità di questo tipo di materiale sono:

- elevata resistenza a trazione (paragonabile a quella delle fibre in carbonio);
- ottima resistenza agli agenti chimici;
- buona resistenza all'impatto.

D'altro canto si possono individuare alcuni svantaggi quali:

- limitata resistenza alle alte temperature (500 °C);
- scarsa resistenza a taglio e compressione;
- sensibilità ai raggi UV.

L'impiego delle fibre in aramide è, per lo più, indicato nel rinforzo delle strutture in muratura dove un elevato modulo elastico non è necessario e, spesso, può costituire un problema.

Materiale	Densità (kg/m ³)	Modulo elastico (MPa)	Resistenza a trazione (MPa)	Deformazione a rottura (%)
Aramide	1440	80000	2800	4,5
Aramide H-M (High-Module)	1445	125	2800	2,5

Tabella 1-3 Caratteristiche generali delle fibre in Aramide.



Figura 1-4 Rotolo di tessuto in Aramide (kevral).

1.3.1.4 Fibre in PBO (parafenilenbenzobisoxazolo)

Di recente sviluppo, le fibre in PBO presentano caratteristiche confrontabili a quelle delle fibre di carbonio ma con valori di resistenza più elevati (attorno i 5800 MPa) e peso limitato. La loro diffusione è limitata a causa del prezzo elevato rispetto alle fibre tradizionali. Tra i vantaggi si può individuare anche una buona resistenza a taglio e ottima protezione contro i raggi UV e al calore.



Figura 1-5 Fibre in PBO.

Materiale	Densità (kg/m ³)	Modulo elastico (MPa)	Resistenza a trazione (MPa)	Deformazione a rottura (%)
PBO	1560	270	5800	2,15

Tabella 1-4 Caratteristiche fibre in PBO.

1.3.1.5 Fibre in acciaio

L'impiego dell'acciaio come materiale di rinforzo negli FRP avviene sotto forma di trefoli prodotti con acciaio ad altissima resistenza (indicato con l'acronimo UHTSS, ovvero *Ultra High Tensile Strength Steel*). Ciò nasce dall'esigenza di permettere una maggiore aderenza tra fase di rinforzo e matrice: se le fibre fossero rettilinee, la bassa rugosità dei filamenti porterebbe ad uno sfilamento delle stesse dal supporto, portando quindi ad un collasso prima che il materiale abbia esplicito la sua reale resistenza. Un classico esempio può essere il trefolo 3x2, ovvero tre trefoli rettilinei attorno ai quali sono avvolti due fili d'acciaio.

Per quanto concerne le sue proprietà meccaniche, le reti in fibra di acciaio presentano valori di tensione della resistenza a trazione dell'ordine di 300-600 MPa e un modulo di deformazione assiale che si aggira nell'ordine di 200 Gpa. La deformabilità ultima delle fibre in acciaio è invece molto elevata con valori vicini al 25% prima di arrivare a rottura.

Materiale	Densità (kg/m ³)	Modulo elastico (MPa)	Resistenza a trazione (MPa)	Deformazione a rottura (%)
Acciaio	7850	200000	300-600	25

Tabella 1-5 Caratteristiche tessuto in acciaio.

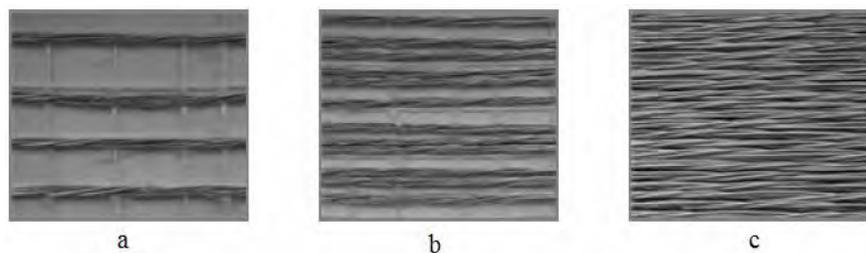


Figura 1-6 Diverse tipologie di tessuto in acciaio a bassa (a), media (b) ed alta densità (c).

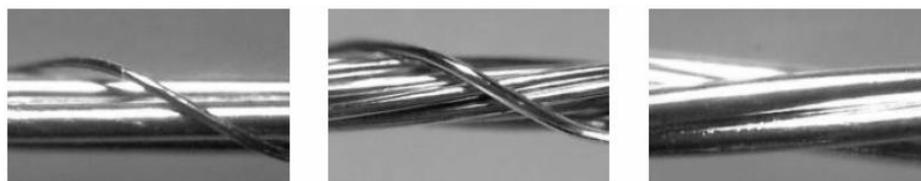


Figura 1-7 Varie tipologie di trefoli in acciaio.

1.3.2 Matrici

La matrice è essenziale nei confronti della durabilità e della trasmissione degli sforzi dalla fibra al supporto. I materiali fibrorinforzati tradizionali si basano sull'incollaggio mediante resine polimeriche di origine organica. Prima dell'applicazione della fase di rinforzo, le resine sono allo stato liquido vengono attivate tramite un reagente, il quale ne permette l'indurimento fino ad ottenere un composto solido vetroso. Essendo molto fluide durante l'applicazione, le resine permettono un'ottima impregnazione delle fibre e anche una soddisfacente adesione all'interfaccia del corpo da rinforzare. Tale aspetto è di fondamentale importanza in quanto esclude possibili effetti di delaminazione al di sotto dei carichi di progetto previsti per l'intervento. Nell'utilizzo delle resine si evidenziano tuttavia alcune limitazioni e difetti:

- cattiva resistenza al fuoco;
- impossibilità di applicare le fibre in ambienti umidi e/o a basse temperature;
- pessima capacità traspirante e permeabilità.

Questi fattori hanno portato i ricercatori a sperimentare altri materiali capaci di conferire ai compositi le ottime caratteristiche meccaniche delle resine e, allo stesso tempo, sopperire ai deficit che si potevano riscontrare seguendo un'applicazione classica secondo una matrice polimerica. In tal modo si sono introdotti in ingegneria civile delle matrici cementizie di origine inorganica opportunamente modificate secondo le diverse esigenze.

Di seguito verranno espone brevemente le caratteristiche dei leganti, sia per l'impiego degli FRP, quanto degli FRCM.

1.3.3 Principali tipologie di matrici polimeriche

Le matrici polimeriche, più comunemente definite resine, si dividono in due categorie principali:

- Resine termoindurenti;
- Resine termoplastiche.

La distinzione va fatta in base al modo con cui solidificano e alla loro reazione una volta sottoposte ad una fonte di calore.

Le resine termoindurenti sono sostanze che induriscono grazie alla somministrazione di calore. L'indurimento segue una fase iniziale di rammollimento del materiale, denominata fase termoplastica. Con la trasmissione di energia sottoforma di calore, le

lunghe catene lineari che costituiscono il materiale a livello molecolare reticolano creando dei legami covalenti trasversali molto forti. Una volta solidificate, il materiale non può essere riportato alla fase modellabile iniziale: se riscaldate, le lunghe catene polimeriche degradano e non consentono quindi una riforgiatura del legante. I polimeri appartenenti a questa tipologia sono quelli più diffusi nel campo dei materiali compositi. Il motivo del successo delle resine termoindurenti è da ricercare nelle loro ottime capacità adesive, elevata resistenza a trazione e alle sostanze corrosive. La bassa viscosità delle resine allo prima dell'applicazione dà invece la possibilità di avere una buona applicabilità su ogni superficie e un'ottima impregnazione delle fibre o del tessuto, scongiurando quindi eventuali scorrimenti della fase resistente nella matrice durante l'applicazione del carico.

A sfavore gioca invece la suscettibilità dei polimeri termoindurenti al calore e all'umidità. Il primo aspetto è legato alla cosiddetta temperatura di transizione vetrosa (T_g), ovvero il limite superiore oltre in quale il materiale degrada e perde le caratteristiche meccaniche che ha alla temperatura ambiente. Il secondo aspetto invece collegato all'applicazione in ambienti esterni e alla durabilità: le resine termoindurenti (ma anche quelle termoplastiche) non possono essere applicate su supporti bagnati e a causa della loro bassa permeabilità, non consentono al calcestruzzo di espellere l'acqua intergranulare, portando col tempo al distacco della matrice dalla superficie di applicazione.

Tra le resine termoindurenti più diffuse si incontrano quelle:

- Ammidiche;
- Epossidiche;
- Fenoliche;
- Poliestere insature;
- Poliuretaniche;
- Siliconiche;
- Vinilestere.

L'altra tipologia è rappresentata dai polimeri termoplastici. Qui non si riscontra l'irreversibilità del processo di solidificazione che caratterizzava quelle termoindurenti: con l'applicazione del calore si ottiene la rottura dei deboli legami secondari formati tra le catene di polimeri durante la solidificazione, senza però riscontrare diminuzioni delle prestazioni della matrice una volta solidificata. Rispetto a quelle termoindurenti, questo tipo di matrici presenta una maggiore tenacità ma d'altro canto sono caratterizzate da temperature di esercizio più basse e minore potere adesivo.

I principali tipi di resine termoplastiche sono:

- resine acriliche
- policarbonati
- poliestere

Le matrici di natura polimerica più utilizzate in ambito civile sono quelle epossidiche. Questo tipo di resine appartengono, come già menzionato precedentemente, alla famiglia delle resine termoindurenti e il loro nome deriva dalla struttura molecolare caratterizzata allo stato liquido dall'anello epossidico triatomico ($\text{CH}_2\text{-O-CH}$). Per favorire l'applicabilità e ritardare la presa, al composto vengono aggiunti dei diluenti che favoriscono l'impregnazione dei tessuti e delle fibre grazie alla diminuzione della viscosità. Allo stato solido si presenta come un materiale duro e vetroso, caratterizzato dall'elevata resistenza a trazione e una temperatura di transizione vetrosa più elevata rispetto alle altre resine termoindurenti.

Tipo di resina	Densità (kg/dm ³)	Tensione di rottura (MPa)	Modulo elastico (Gpa)	Allungamento a rottura(%)	Ritiro (%)	Massima temp. (°C)
Epossidiche	1,1-1,3	40-130	2-4,5	2,1-9	0,1-5	125-175
Fenoliche	1,2-1,3	35-70	3-5,1	1,5-2	0,04-1,1	120-200
Poliestere	1-1,4	20-75	2,8-3,5	1,4-3,3	0,25-7	60-200
Siliconiche	1-2,5	21-70	2,2	20-700	0-0,6	100-350
Vinilestere	1,2	70-90	3,3-5,2	3-9,9	6,9-9,9	125

Tabella 1-6 Caratteristiche generali delle matrici organiche reperibili in commercio.

1.3.4 Matrici cementizie

Negli ultimi anni, l'impiego di matrici inorganiche nei materiali da rinforzo ha avuto un notevole sviluppo nel settore delle costruzioni. Il motivo del loro successo è dovuto ai numerosi vantaggi che l'utilizzo delle matrici cementizie comporta rispetto all'impiego delle resine:

- elevata resistenza al fuoco comparabile a quella del supporto in calcestruzzo, la quale permette di proteggere le fibre di rinforzo dall'azione diretta delle fiamme. Negli FRP le resine, invece, degradano già a temperature basse che si aggirano tra i 60 e 80 °C;
- non teme le temperature basse;
- consente uno scambio termo-ignometrico del supporto con l'esterno, permettendo una certa traspirabilità della struttura. Questo aspetto è

fondamentali in termini di durabilità ed uno degli aspetti negativi dell'impiego degli FRP, in quanto le resine, essendo impermeabili, con tempo si distaccano dal supporto a causa dell'accumulo di umidità all'interfaccia tra resina e CA;

- applicabilità delle matrici cementizie anche su supporti umidi;
- non è tossica e non crea complicazioni in termini di sicurezza del cantiere come invece si riscontra per le resine, per le quali si devono adoperare particolari misure precauzionali;
- è una soluzione di incollaggio molto economica se paragonata alle resine.

Tuttavia sono presenti alcuni svantaggi riguardanti l'impregnazione della fase resistente: essendo un materiale molto meno malleabile rispetto ai polimeri, le fibre non vengono interamente avvolte dal legante. Questo si traduce in una maggiore lunghezza di incollaggio delle fibre su un supporto, in modo da avere la certezza di disporre di una sufficiente zona di trasferimento del carico dalle fibre alla struttura. Il comportamento delle malte cementizie verrà meglio trattato nei prossimi paragrafi, esponendo i meccanismi interni alla matrice che permettono il bloccaggio della fibra e i meccanismi di rottura che possono insorgere qualora sottoposta a carichi elevati.

1.4 FRCM: caratteristiche generali

1.4.1 Requisiti di compatibilità matrice-supporto

L'aspetto fondamentale che assicura una buona riuscita del rinforzo è senz'ombra di dubbio l'assoluta compatibilità del legante con il materiale da rinforzare: ciò determina sia le prestazioni dell'intervento, sia il mantenimento delle proprie caratteristiche di resistenza nel tempo. Il materiale applicato al supporto deve adattarsi il più possibile sia sotto il punto di vista meccanico, sia sotto quello fisico-chimico per assicurare un legame solido tra le due interfacce. L'affiancare due materiali non perfettamente compatibili potrebbe infatti portare all'insorgere di fessure capaci di deteriorare la fase resistente del rinforzo o anche, nei casi più gravi, portare alla delaminazione dei compositi. Di seguito si espongono i principali aspetti da considerare nella scelta dei materiali da impiegare.

1.4.2 Adattabilità alle variazioni di volume

Il calcestruzzo è un materiale soggetto a espansione o ritiro connesso alle variazioni del contenuto d'acqua nella propria struttura molecolare. Tali cambiamenti nelle dimensioni geometriche del getto possono portare all'insorgere di tensioni interne e fessure se non opportunamente contrastate. I principali fattori che contribuiscono a tali variazioni nella geometria del getto sono:

- variazioni di temperatura;
- cicli gelo-disgelo;
- essiccamento;
- creep.

In merito alla maturazione del getto, è importante sottolineare che gli interventi di rinforzo con materiali compositi sono perlopiù circoscritti al recupero di costruzioni esistenti in cui il getto ha già subito un lungo processo di maturazione. Da considerare è invece il ritiro che la matrice cementizia può subire: un essiccamento molto rapido porta inevitabilmente alla formazione di crepe nel rinforzo, con profonde conseguenze nel processo di trasferimento degli sforzi tra fibre e struttura esistente. Per tali motivi l'applicazione del rinforzo deve seguire delle ben precise prescrizioni in termini di temperatura di maturazione e umidità.

1.4.3 Traspirazione del getto

La permeabilità del supporto deve essere assicurata per permettere il regolare scambio di vapore del getto verso l'esterno. Inoltre una buona traspirazione permette il passaggio dei sali contenenti nel calcestruzzo. Diversamente, un materiale che non permetta questi scambi tra struttura e ambiente porta alla formazione di una barriera all'interfaccia, contribuendo nel tempo al distacco del legante dal supporto.

1.4.4 Compatibilità dal punto di vista chimico

LA presenza di alcali nei cementi può portare alla formazione di un gel espansivo qual'ora messo a contatto con un composto cementizio contenete sostanze che possono reagire con gli aggregati del getto. Per tal motivo è importante accostare malte cementizie dal basso contenuti di reagenti con gli alcali quando questi sono presenti in grande quantità negli aggregati delle strutture da rinforzare.

Un altro aspetto importante riguarda il livello di acidità del composto cementizio: solitamente il livello del PH nel calcestruzzo si aggira attorno ai 13-13,5 gradi, range che assicura una buona protezione delle armature contro la corrosivo. Impiegando composti cementizi molto con PH basso può portare al calo di acidità nel getto fino ad interessare una zona vicina alle armature, favorendo la corrosione delle stesse.

1.4.5 Prestazioni attese

I composti fibrorinforzati devono sufficientemente rigidi per far sì che le sollecitazioni indotte dai carichi vengano sopportati dalla nuova fase resistente, introdotta con l'intervento di rinforzo. Per consentire che ciò avvenga, i materiali applicati devono avere una rigidezza maggiore rispetto a quella dell'elemento da rinforzare.

D'altro canto, adottare soluzioni molto più rigide del supporto, potrebbe essere improduttivo dal lato economico.

Per aver un buon rapporto prestazioni-prezzo è perciò sensato introdurre materiali compositi in modo che gli FRCM abbiano rigidezza tale da aumentare o ripristinare il carico di progetto sfruttando però, dove possibile, le eventuali riserve di resistenza date dalla struttura esistente.

Altro aspetto fondamentale legato alla rigidezza riguarda il meccanismo di collasso. In particolare, come mostrato in figura 1-8, l'impiego di fibre con un elevato modulo

elastico può conferire una rottura fragile. Per evitare che ciò avvenga, si preferisce che prima del collasso la matrice presenti fessurazioni consentendo di prevenire il crollo (deformazione a rottura minore rispetto a quella delle fibre).

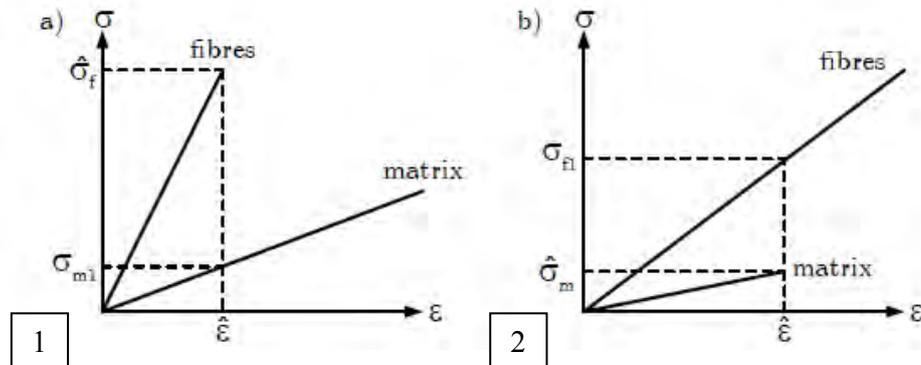


Figura 1-8 Meccanismi di cedimento. 1) rottura fragile lato fibre; 2) rottura anticipata dalla comparsa di fessure nella matrice cementizia [4].

1.4.6 La matrice cementizia

L'applicazione della fase resistente prevede l'impiego di matrici che abbiano i seguenti requisiti:

- buona lavorabilità;
- sufficiente resistenza per il trasferimento degli sforzi al supporto;
- buona impregnazione delle fibre;
- resistenza al fuoco in base alle prescrizioni;
- compatibilità chimica e col supporto;
- discreta permeabilità.

Per ottenere una pasta cementizia che rispetti queste qualità, sono state ideate miscele per migliorare le prestazioni dei cementi tradizionali. A tal scopo sono stati introdotti gli *FRC* (fiber reinforced concrete) e gli *PMC* (polymer modified concrete), ovvero cementi addizionati con polimeri o fibre disperse atte a rendere il composto più adatto al rinforzo strutturale.

1.4.6.1 I PMC (Polymern Modified Concrete)

Esistono 3 principali tipologie di malte cementizie modificate con polimeri:

1. **PIC** (polymer impregnated concrete): una volta lasciato essicare il getto, l'impasto viene imbibito da monomeri che penetrano nelle porosità ostruendole. E' una tecnica molto costosa e per questo è poco diffusa.

2. **PC** (polymer concrete): è ottenuto dalla miscelazione di polimeri e aggregati senza l'aggiunta di cemento tradizionale.
3. **PMC** (polymer modified concrete): consiste nell'introdurre all'impasto tradizionale, composto da aggregati e cemento Portland, una data quantità di polimeri. E' la tecnica più diffusa in quanto risulta una scelta economica capace di migliorare sostanzialmente le proprietà dei composti tradizionali.

Recenti studi [5] hanno dimostrato come l'impiego di polimeri influenzi profondamente le prestazioni della miscela. In modo particolare, addizionando del lattice si ottiene un composto dalla spiccata duttilità, buona resistenza e buone caratteristiche adesive. Le caratteristiche dei composti sono inoltre correlate alle proporzioni di cemento-monomero, dal rapporto acqua-cemento e dalle procedure di maturazione.

1.4.6.2 Matrici fibrorinforzate

Questa tipologia di matrici prevede l'impiego di fibre disperse nell'impasto per migliorarne le prestazioni. Le fibre comunemente impiegate per questo scopo sono in vetro, carbonio, acciaio, PET e kevlar.

A seconda della dimensione delle fibre immerse, si possono riconoscere tre categorie:

1. malta rinforzata con micro fibre (da 5 a 20 μm);
2. malta rinforzata con macro fibre (fino a 0,1 mm)
3. malta rinforzata con fasci di fibre ottenute affiancando dei filamenti più piccoli.

La dimensione dei filamenti utilizzati incide notevolmente sulla cosiddetta ITZ (Interfacial Transfer Zone) [22], ovvero l'interfaccia che viene a crearsi durante l'indurimento dell'impasto tra aggregati e cemento nei confronti delle fibre in esso annegate. Tale aspetto è fondamentale per permettere una corretta collaborazione tra le diverse fasi dell'impasto e ne determina profondamente la resistenza finale. Da numerosi studi sull'argomento è emerso che l'ITZ consiste in uno spessore infinitesimo (10-50 μm) che circonda fibre ed aggregati che si forma attraverso il "wall effect", ovvero la formazione di legami tra le particelle di cemento con le altre componenti della miscela. Più piccole sono le fibre introdotte e meno pronunciato sarà la presenza del wall effect attorno alle fibre. Per modificare la formazione dell'ITZ si può inoltre agire su altri parametri, come quantità dell'acqua nell'impasto (un rapporto acqua cemento più alto comporta la presenza porosità durante l'affiancamento dei granuli di cemento, con

conseguente riduzione della resistenza), quantità di cemento, trattamento superficiale delle fibre.

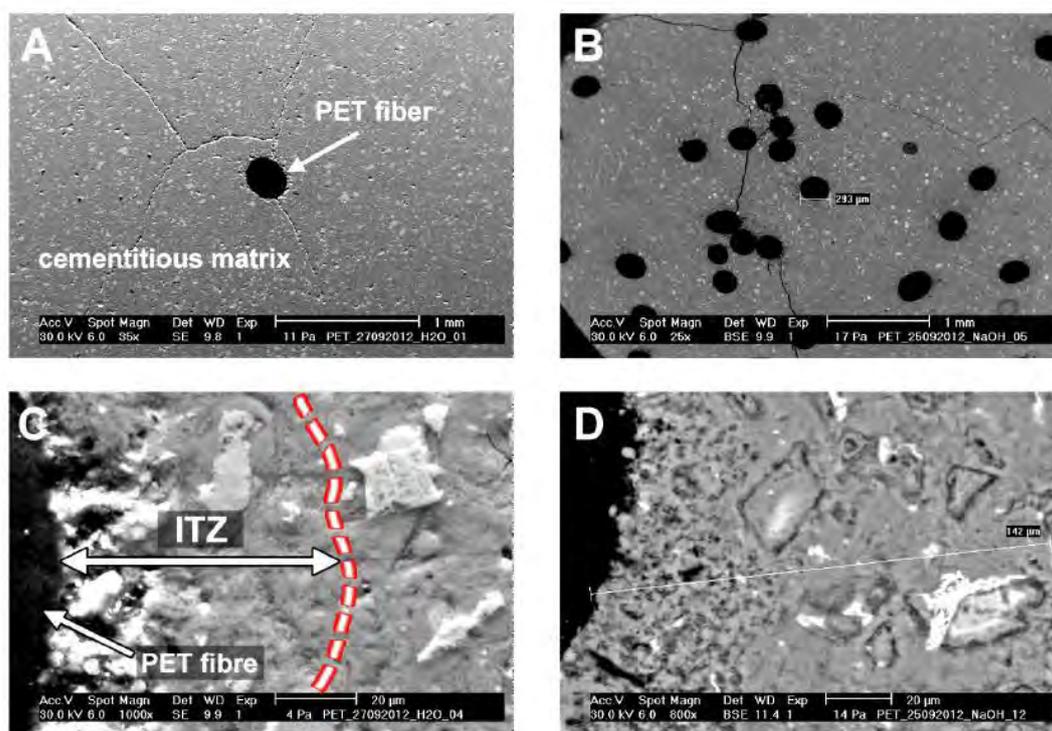


Figura 1-9 Ingrandimento al microscopio elettronico della malta cementizia rinforzata con fibre in PET per evidenziare la presenza dell'ITZ [22].

1.4.7 Interazione Matrice - fase resistente all'interno degli FRCM.

Il trasferimento degli sforzi tra tessuto e matrice è un fenomeno molto complesso che interessa sia il comportamento micromeccanico degli elementi applicati, sia l'interazione tra le diverse fasi del rinforzo. Uno di questi aspetti è già stato trattato descrivendo l'importanza dell'ITZ all'interno della miscela cementizia, la quale permette la collaborazione tra fibre disperse, aggregati e le molecole di cemento.

Un altro fattore che influisce marcatamente sulla risposta di questi compositi è il cosiddetto "comportamento telescopico" (Bartos, 1987-[6]), fenomeno che può essere notato ogni qualvolta si utilizzano fasci di filamenti immerse in una matrice (organica e non). Nel caso specifico degli FRCM, tale aspetto è collegato sia alle fibre disperse della matrice cementizia (qualora quest'ultima sia fibrorinforzata), sia alla fase di rinforzo in essa annegata. Il comportamento telescopico è strettamente connesso al grado d'impregnazione dei fasci: essendo costituiti da numerosi filamenti collegati tra loro, i

fasci non permettono alla fase legante di penetrare all'interno di essi e vincolare in maniera uniforme tutte le fibre.

Quando il composto è soggetto a trazione, inizialmente reagiscono solo le fibre più superficiali attaccate alla matrice. Dopo una parziale delaminazione, le fibre esterne supportano il carico fino al punto in cui esse raggiungono il valore massimo a trazione. Oltre tale valore, i filamenti si rompono e le sollecitazioni si trasferiscono a quelli più interni e così via, come rappresentato efficacemente dalla figura 1-10.

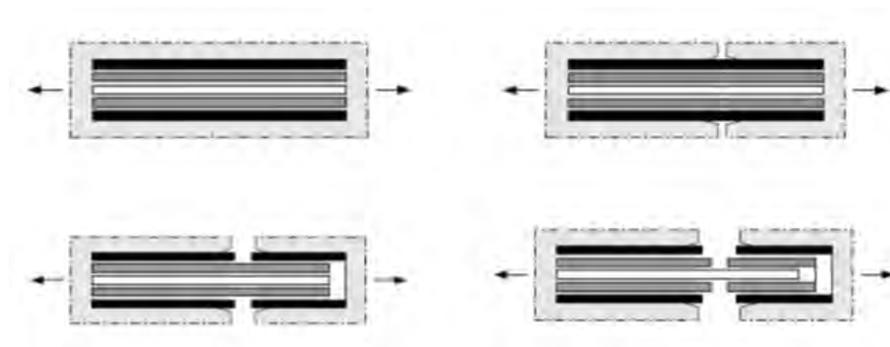


Figura 1-10 Comportamento telescopico di un fascio di fibre sottoposto a trazione e immerso in una matrice[6].

Nel caso in cui si inseriscano delle fibre disperse all'interno della matrice, tale fenomeno conferisce all'impasto caratteristiche di duttilità migliori rispetto alle soluzioni tradizionali. Nel caso dell'accoppiamento tra tessuti fibrorinforzati e matrici, la progressiva rottura e scorrimento dei filamenti evita di ottenere una rottura improvvisa della fase resistente, sempre se la malta è sufficientemente resistente da permettere un meccanismo di questo tipo.

1.4.8 Meccanismi di crisi

I meccanismi di rottura che contraddistinguono i compositi a matrice inorganica sono differenti rispetto a quelli che interessano gli FRP, a causa della profonda differenza in termini di caratteristiche meccaniche delle matrici applicate.

A rigore, sono possibili quattro tipi di rottura all'interno dei compositi:

- la frattura avviene all'interno della matrice cementizia;
- la rottura interessa l'interfaccia fibre-matrice.
- frattura mista: in certe zone la rottura avviene per mezzo del distacco delle fibre dalla matrice, mentre in altre la rottura avviene all'interno del giunto.

Nella maggior parte dei casi, la crisi avviene per mezzo di una progressiva delaminazione ("debonding") della rete di rinforzo dallo strato di matrice. Totalmente diversa si presenta invece la crisi all'interno degli FRP, nei quali la rottura si localizza all'interno del supporto in calcestruzzo grazie all'ottima resistenza a trazione tipica degli adesivi polimerici.

Un'altra peculiarità che contraddistingue gli FRCM è la comparsa di fessurazioni che preannunciano lo scorrimento interno della fase resistente all'interno del composito. Fondamentale durante la propagazione della delaminazione lungo la lunghezza di incollaggio è l'intervento dell'attrito, aspetto che caratterizza profondamente l'andamento del carico massimo come sarà esposto nei precedenti capitoli. La comparsa dell'attrito è una peculiarità di questo tipo di rinforzi ed è imputabile alla frizione sviluppata tra matrice e fibre e al comportamento telescopico all'interno dei fasci durante lo scorrimento.

2 Prove sperimentali

2.1 Introduzione

I materiali fibrorinforzati a matrice cementizia applicati esternamente al calcestruzzo sono oggi oggetto di numerose ricerche sperimentali data la loro recente introduzione nel settore edile.

Alcuni studi hanno dimostrato che l'accoppiamento FRCM-calcestruzzo è caratterizzato da differenti peculiarità se comparati agli FRP. Il trasferimento degli sforzi nei componenti a matrice cementizia è un aspetto molto difficile da comprendere in quanto coinvolge numerosi fattori tra cui:

- incollaggio tra fasci di fibre e malta con differenti comportamenti delle fibre interne rispetto a quelle direttamente in contatto con la matrice;
- penetrazione della matrice all'interno della trama del tessuto;
- influenza dei collegamenti tra le fibre trasversali e quelle sottoposte a carico;
- compatibilità della matrice con il supporto in calcestruzzo;
- resistenza della malta a trazione;
- caratteristiche del supporto.

La maggior parte delle sperimentazioni è volta a capire in modo generale i meccanismi di crisi, le modalità di rottura e di trasferimento delle sollecitazioni in questo tipo di rinforzi, aspetti che permetteranno in futuro di elaborare delle linee guida per l'utilizzo di queste nuove tecnologie.

In modo particolare, in questo elaborato si vuole studiare la risposta a trazione dei compositi al variare della tipologia di tessuto da rinforzo e della fase matrice applicata.

2.2 Sperimentazioni precedenti

Prima di proseguire con la descrizione delle prove eseguite, si vuole fare il punto della situazione esponendo brevemente quanto ricavato dalle ricerche precedenti.

Per investigare l'effettiva resistenza del collegamento tra FRCM e calcestruzzo, D'Ambrisi [12][13][14] ha sottoposto a delle prove di taglio diretto 20 provini, ognuno dei quali composti da due parallelepipedi in C.A. collegati assieme tramite a delle fibre bidirezionali in PBO applicate su due facce opposte. In figura 2-1 si illustra il setup della prova ("double shear test", ovvero trazione di due pacchetti di rinforzo nello stesso momento). Sono state tenute in considerazione diverse lunghezze di incollaggio delle fibre per valutare la comparsa o meno di una lunghezza efficace come nei compositi a matrice polimerica. Oltre a ciò, si sono variati anche gli strati di PBO applicati in modo da investigare i possibili cambiamenti apportati al carico. All'interfaccia delle fibre sono stati applicati anche degli estensimetri per ricavare l'andamento delle deformazioni.

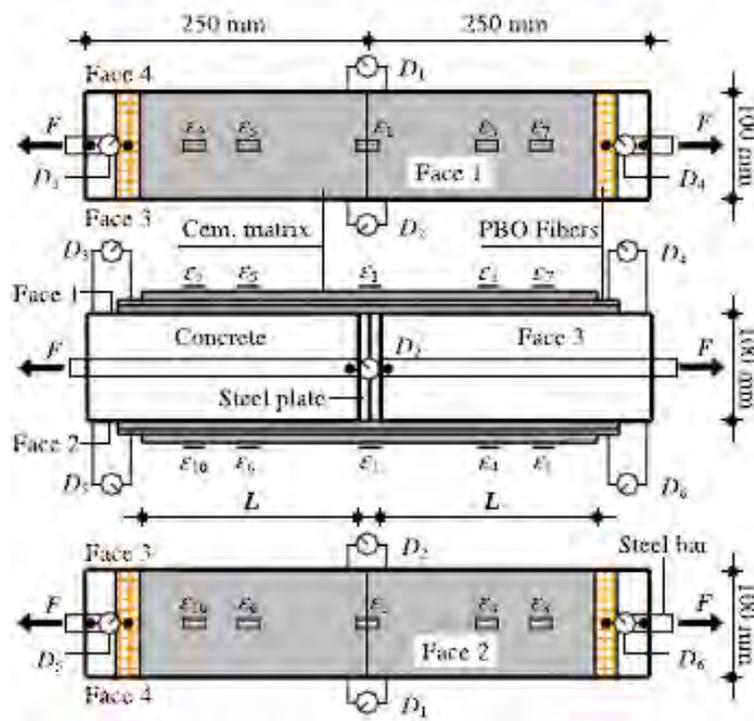


Figura 2-1 Metodo di prova applicato da D'Ambrisi[13].

Dalle prove si sono ricavati gli andamenti carico - scorrimento globale (inteso come scorrimento relativo tra fibra e matrice): analizzando i dati ottenuti si è potuto così individuare una lunghezza di ancoraggio minima che permette il completo esplicarsi

della forza data dall'accoppiamento fibre-matrice prima che si innesti il processo di distacco (processo di delaminazione o "debonding"). Tale carico è denominata "forza di delaminazione" e può essere considerata come il limite superiore della forza esplicabile dal solo legame della matrice con la fase resistente: rimane perciò inalterata per lunghezze di ancoraggio maggiori a quella efficace, mentre, per lunghezze di incollaggio minori, il carico è tendenzialmente più basso.

Per quanto riguarda la rottura del pacchetto di rinforzo, il processo di delaminazione ha interessato l'interfaccia fibra-matrice e si è manifestata per carichi notevolmente più bassi rispetto alla forza massima di rottura delle fibre.

Applicando un procedimento analogo a quello impiegato negli FRP, l'accoppiamento PBO e matrice è stato descritto analiticamente introducendo una relazione $\tau = \tau(s)$ tale che in ogni punto dell'interfaccia fibre-matrice si possa ricavare lo sforzo tangenziale trasmesso durante il carico [14].

$$\frac{d^2s}{dx^2} = \frac{p_f}{E_f A_f} \tau(s)$$

dove $s(x)$ è lo scorrimento all'interfaccia fibra - matrice, p_f è il perimetro del fascio di fibre, E_f è il modulo elastico delle fibre e A_f l'area della sezione del fascio. Il parametro p_f è direttamente connesso al numero di strati di matrice e di tessuto introdotti. Ipotizzando quindi che lo spostamento del supporto sia uguale a quello del rinforzo, consegue che:

$$\varepsilon(x) = \frac{d}{dx} s(x)$$

Questa semplificazione permette quindi di calibrare l'andamento degli sforzi tangenziali a partire dalle deformazioni registrate dagli estensimetri durante le prove. L'area sottesa a tale curva permette inoltre di ricavare il carico di debonding attraverso:

- energia di frattura: $G_f = \int_0^{\infty} \tau(s) ds$
- forza di delaminazione: $P_{deb} = \sqrt{2 p_f E_f A_f G_f}$

Christian Carloni, Lesley H. Sneed, Tommaso D'Antino e Carlo Pellegrino[18][19][20] hanno intrapreso un'altra serie di prove volta ad approfondire il trasferimento degli sforzi dagli FRCM al supporto. Nello specifico sono stati condotti delle prove a taglio diretto su tessuti bidirezionali in PBO applicati esternamente a dei parallelepipedi di calcestruzzo tramite matrice cementizia. La configurazione tipica delle prove condotte è mostrata in figura 2-2: si tratta di una prova a taglio diretto in cui una estremità della fibra in PBO viene tesa mentre il supporto in calcestruzzo è vincolato per evitare scorrimenti.

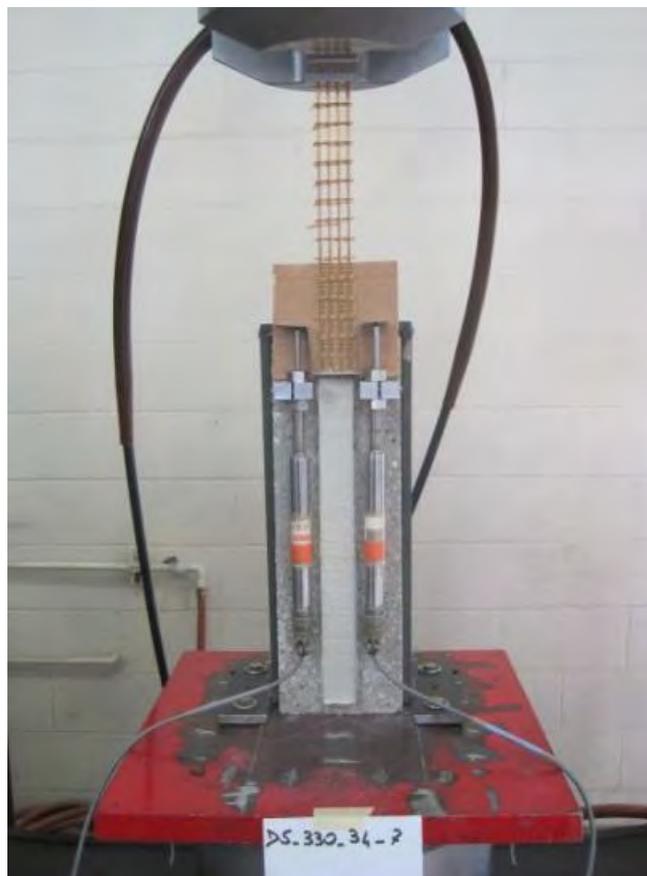


Figura 2-2 Foto di una prova a taglio diretto rappresentativa delle prove effettuate [19].

Anche in questo caso son state prese in considerazione diverse lunghezze di incollaggio con l'obiettivo di individuare l'esistenza di una lunghezza efficace come condizione minima per ottenere il carico di delaminazione. Altri fattori, quali presenza o meno di un secondo strato di malta applicata esternamente alle fibre o larghezze di incollaggio diverse, sono stati analizzati per approfondire le conseguenze sui meccanismi di trasferimento delle sollecitazioni all'interno del composito. Come visto nelle

precedenti sperimentazioni, la crisi nella maggior parte degli shear test è sopraggiunta per distacco all'interfaccia tra il tessuto e matrice. E' stato inoltre osservato che modificando la larghezza del rinforzo non si presentavano deformazioni disomogenee tra le fibre, a differenza di quanto osservato negli FRP, nei quali si assiste ad un trasferimento degli sforzi disomogeneo in direzione trasversale alle fibre [7]. Un'altra sostanziale differenza con i compositi a matrice polimerica è l'intervento dell'attrito: analizzando la curva carico spostamento si è notato un aumento lineare del carico a delaminazione avvenuta, dovuto alla frizione delle fibre con la matrice durante lo scorrimento.

Lo studio ha riguardato anche la trasmissione degli sforzi all'interfaccia: sfruttando le deformazioni ottenuti dagli estensimetri, si sono applicate le relazioni precedentemente riportate per il calcolo degli sforzi tangenziali. Anche in questo caso si è osservato l'importante apporto dell'attrito in questa tipologia di rinforzo, individuabile in un andamento costante della tensione tangenziale per grandi carichi che si manifesta per grandi scorrimenti della fibra rispetto alla matrice.

Questi sono solamente gli aspetti generali emersi da questi studi. I risultati di tali prove [18][19][20] verranno ripresi successivamente nel prossimo capitolo, dedicato allo studio numerico degli FRCM.

2.3 Campagna sperimentale

2.3.1 Obbiettivi

Le prove sperimentali oggetto del presente elaborato sono una prosecuzione del lavoro iniziato presso la Missouri University of Science and Technology (Missouri S&T) [19]. I provini hanno una configurazione simile a quanto già visto e trattano la resistenza degli FRCM applicati esternamente ad un supporto un calcestruzzo.

Questo studio vuole approfondire il meccanismo di trasferimento degli sforzi in modo da elaborare dei modelli utili per la determinazione della lunghezza di ancoraggio efficace e della capacità di carico per diverse soluzioni di FRCM. In particolare si sono considerate diverse tipologie di matrici cementizie e di fibre in modo da indagare come diversi materiali possono influenzare il trasferimento degli sforzi e le modalità di rottura del rinforzo.

2.3.2 Test setup

Si sono condotte delle prove a trazione diretta eseguite su vari tipi di tessuti da rinforzo applicati esternamente a dei supporti in calcestruzzo mediante matrici cementizie di diversa tipologia (FRCM).

Di seguito si riporta schematicamente la geometria caratterizzante i provini confezionati per i test.

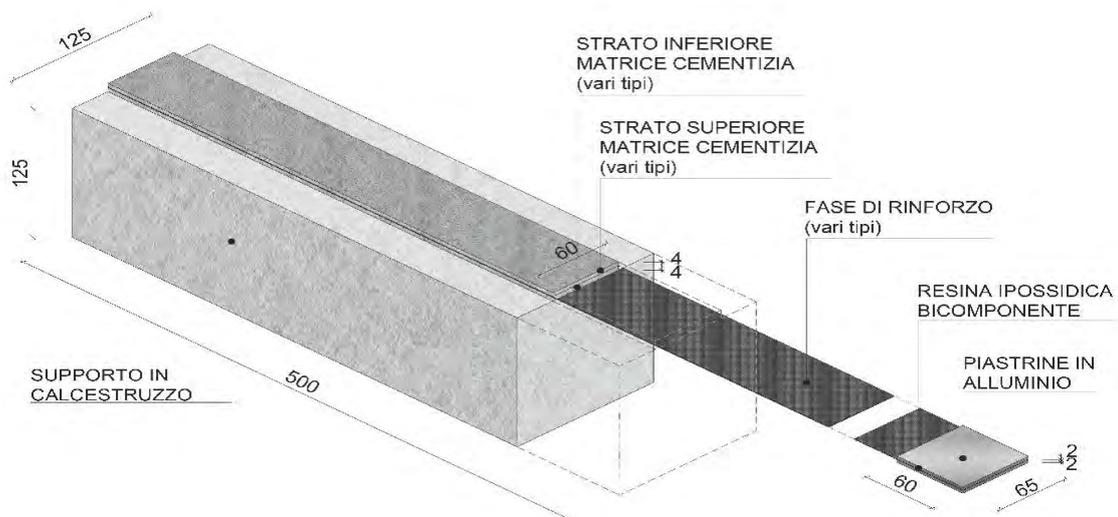


Figura 2-3 Disegno schematico dei provini testati.

Facendo riferimento alla figura 2-3, la fase resistente è incollata alla superficie del parallelepipedo in calcestruzzo (550 x 125x125 mm) attraverso uno strato di matrice cementizia spesso 4 mm. Un secondo strato dello stesso spessore è poi applicato esternamente alle fibre. Avendo smentito la presenza di una possibile influenza dei risultati determinata dalla larghezza di incollaggio, il pacchetto di rinforzo è caratterizzato dalla stessa larghezza (60 mm) in tutte le prove condotte. Si è deciso invece di considerare due lunghezze di incollaggio diverse per ogni declinazione malta-fibra indagata: 330 e 450 mm.

Alla fine dell'estremità libera della rete di rinforzo sono state incollate due piastrelle in alluminio per favorire l'ancoraggio delle fibre all'apparecchiatura di prova.

Complessivamente, si sono considerati 36 provini, suddivisi come sotto riportato:

- 6 provini con fibre bidirezionali in carbonio (C-NET 220 B) applicati con malta cementizia "rock W R4", tre dei quali con lunghezza di incollaggio pari a 330 mm e i rimanenti con lunghezza di 450 mm;
- 6 provini con fibre bidirezionali in carbonio (C-NET 220 B) applicati con malta cementizia "rock S R2", con tre aventi lunghezze di incollaggio di 330 mm e tre con lunghezza pari a 450 mm;
- 6 provini con fibre bidirezionali in vetro (G-NET 251 BA) incollati con malta "rock S R2", suddivisi in tre con L=330 mm e tre con L=450mm;
- 6 provini con fibre bidirezionali in vetro (G-NET 251 BA) incollati con malta "Limecrete", tre dei quali con lunghezza di incollaggio pari a 330 mm e tre con L=450mm;
- 6 provini con fibre bidirezionali in vetro (G-NET 221 B) incollati con malta "rock S R2", suddivisi in tre con $L_{inc}=330$ mm e tre con $L_{inc}=450$ mm;
- 6 provini con fibre unidirezionali in acciaio (STEEL-NET 190) applicati con malta cementizia "rock W R4", tre dei quali con lunghezza di incollaggio pari a 330 mm e i rimanenti con lunghezza di 450 mm;

Sotto si riporta una tabella riassuntiva delle tipologie di provini testati.

Tipologie fase di rinforzo	Tipologia di matrice	$L_{inc}=330$	$L_{inc}=450$	Larghezza [mm]	Num di fasci
Carbonio C-NET 220 B	Rock W	3	3	60	8
Carbonio C-NET 220 B	Rock S	3	3	60	8
Vetro G-NET 251 BA	Rock S	3	3	60	3

Vetro G-NET 251 BA	Limecrete	3	3	60	3
Vetro G-NET 221 B	Rock S	3	3	60	5
Acciaio STEEL-NET 190	Rock W	3	3	60	33

Tabella 2-1 Tipologie di provini testati

Il setup di sperimentazione è illustrato in figura 2-4.

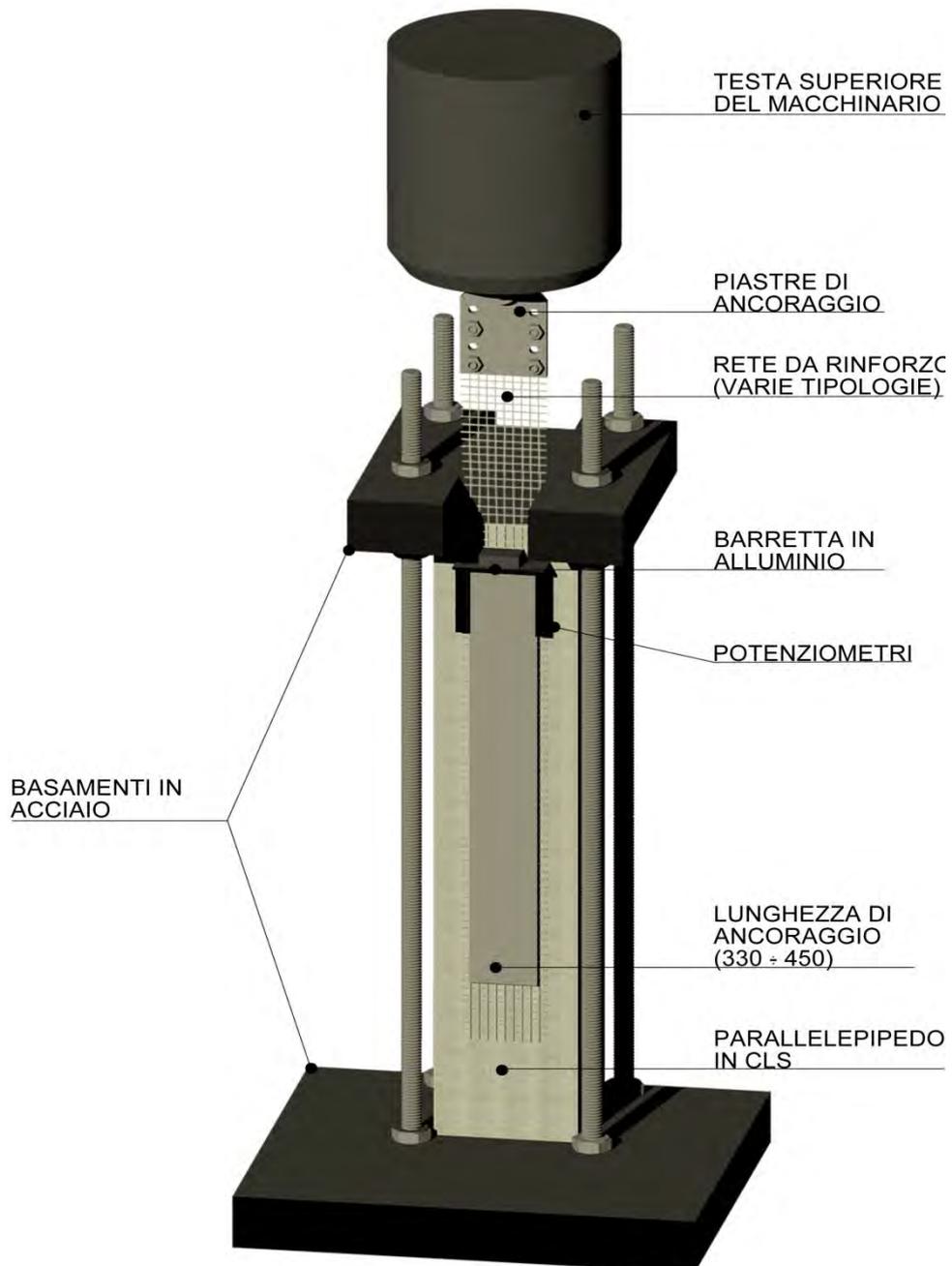


Figura 2-4 Disegno renderizzato della configurazione assunta durante le prove di taglio diretto.

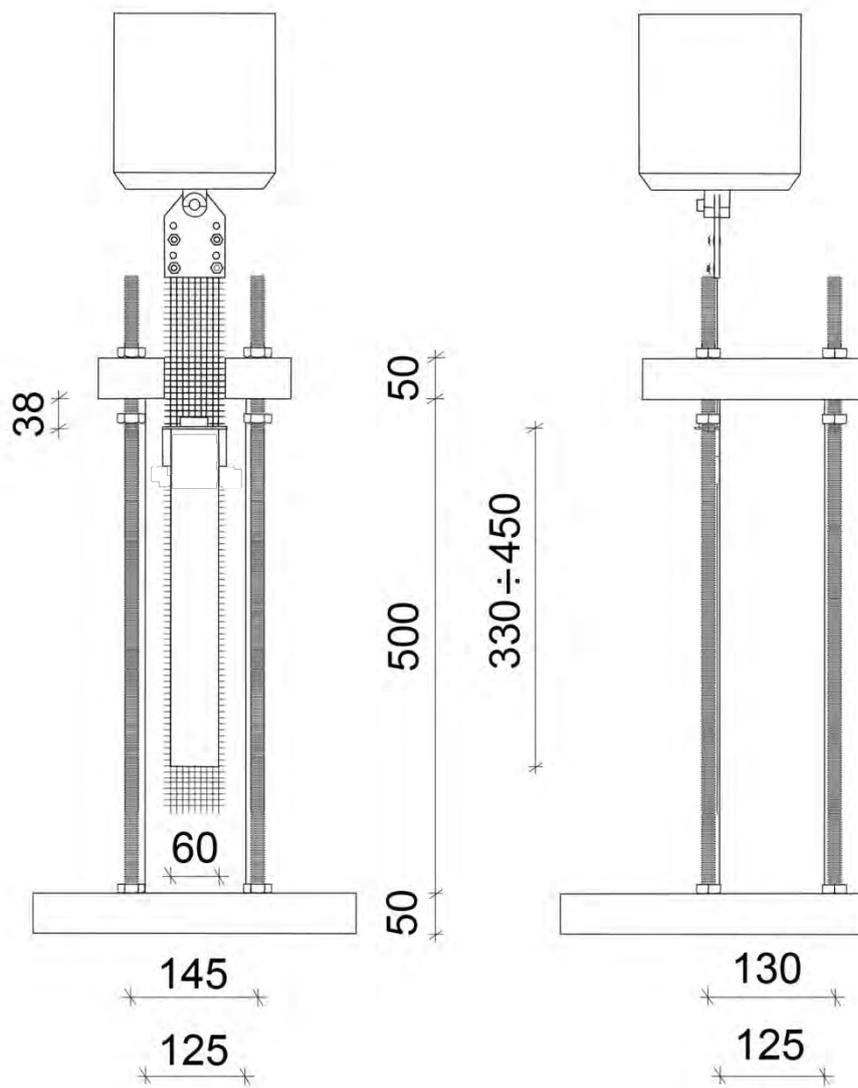


Figura 2-5 Misure del setup di prova.

Il parallelepipedo in calcestruzzo è compreso tra due piastre in acciaio collegate mediante quattro barre filettate imbullonate alle stesse, in modo da evitare spostamenti del supporto durante l'esecuzione della prova. Tra la piastra superiore e il supporto si interpone un foglio sottile di piombo per distribuire in maniera uniforme le pressioni tra i due elementi ed evitare la rottura del campione.

Per sincronizzare il carico con lo spostamento subito dalla fibra durante l'esecuzione della prova, si sono applicati due potenziometri ai lati della fibra e aderenti ad una piastrina in alluminio direttamente incollata alle fibre.

Il macchinario utilizzato per l'esecuzione delle prove di taglio diretto è una Galdabini Sun 60.

2.3.3 Preparazione dei provini

Son stati gettati 12 parallelepipedi in calcestruzzo (500x125x125mm) seguendo le indicazioni di miscelazione ed impasto del produttore.

Evitando di applicare il pacchetto di rinforzo sulla faccia esposta all'aria durante la maturazione del calcestruzzo, si è deciso di sfruttare le rimanenti facce incollando le fibre seguendo la disposizione presentata in figura 2-6.

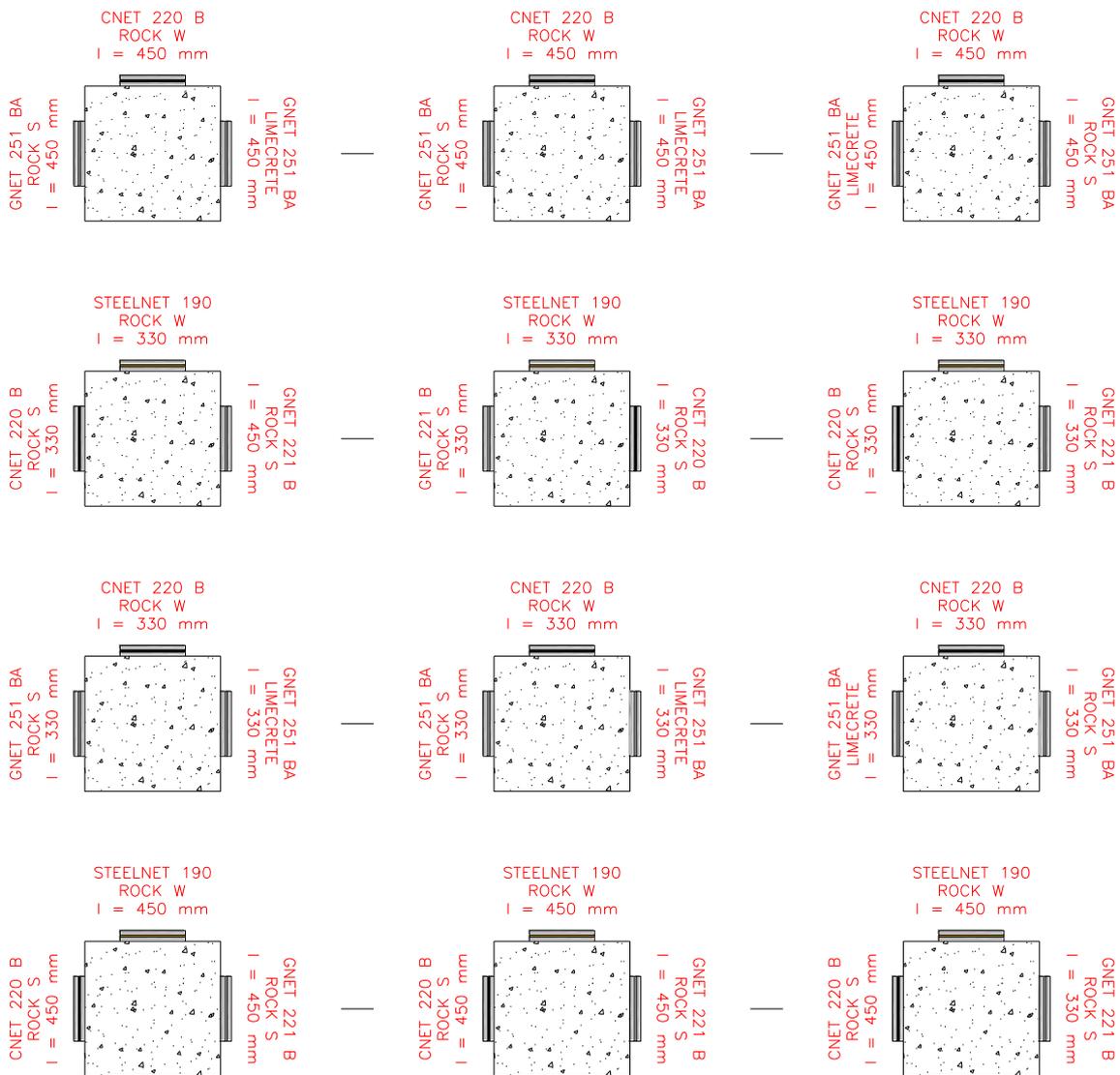


Figura 2-6 Disposizione delle fibre su ogni parallelepipedo in calcestruzzo

Aspettati 28 giorni per la stagionatura del calcestruzzo, la fase di rinforzo è stata applicata alla superficie dei parallelepipedi attraverso l'ausilio di stampi con spessore pari a 4mm e geometria variabile in base alla tipologia di provino.



Figura 2-7 Applicazione dello strato inferiore di matrice tramite l'ausilio della sagoma in cartone.



Figura 2-8 A destra: applicazione della rete di rinforzo sopra allo strato di matrice. A sinistra: secondo layer di malta cementizia.

Una volta stesi i due strati di matrice, i provini sono stati ricoperti da dei panni bagnati in modo da scongiurare un'asciugatura troppo veloce della malta e la formazione di crepe che avrebbero potuto causare un distacco prematuro della fibra prima del carico previsto.

La rete in carbonio (C-NET 220 B) è stata impregnata con un composto a base di colla acrilica per migliorare l'aderenza con gli strati di matrice (figura 2-9).



Figura 2-9 Impregnazione delle fibre di carbonio mediante colla a base acrilica.

I fasci sporgono dalla parte inferiore dello strato di matrice cementizia in modo da rendere visibile un eventuale scorrimento delle fibre durante la prova a trazione (figura 2-10).



Figura 2-10 Particolare del provino.

Ogni provino è stato contrassegnato una sigla del tipo:

DS_X_Y_W_K_Z

dove:

- X indica la tipologia di fibre applicata;
- Y contraddistingue il tipo di matrice (S per la malta Rock S, W per la malta Rock W e L per la malta Limecrete);
- W è la lunghezza del provino (330 o 450 mm);
- K la larghezza del composito (60 mm);
- Z il numero del provino testato.

In appendice al numero di provino è aggiunta anche una "t" nel caso in cui i fasci trasversali sono applicati a diretto contatto con lo strato inferiore di matrice.

2.4 Prove sui materiali

Vengono ora descritte le prove effettuate per testare le prestazioni dei materiali impiegati per formare i provini. Ogni singola componente (calcestruzzo, matrici cementizie e fibre) è stata verificata in modo che corrispondesse alle schede tecniche del produttore.

2.4.1 Calcestruzzo per il supporto

E' stato impiegato del calcestruzzo preconfezionato in sacchi da 25 kg composta da cemento Portland unito ad aggregati di granulometrica variabile dai 0 ai 10mm. La classe di resistenza indicata è $R_{ck} 30 \text{ N/mm}^2$. Per ottenere una consistenza S4 fluida, il rapporto d'acqua previsto è di 1-2 lt/ sacco. In tabella 2-2 si riportano brevemente le caratteristiche del produttore.

Betoncino "Unico"	
Nome commerciale	Betoncino
Denominazione	calcestruzzo tradizionale predosato per impiego strutturale ($R_{ck} 30 \text{ N/mm}^2$)
Composizione	cemento Portland/aggregati con granulometrica 0-10 mm
Resistenza media a compressione a 28 gg (UNI 6132)	34 N/mm^2
Resistenza a compressione (UNI 6132)	con 1,5 lt/sacco $R_{ck} 30 \text{ Mpa}$
Classe d'esposizione EN 206-UNI 9858)	5° (XC1)
Consistenza (EN 206-UNI 9858)	S4 fluida
Rese volumetrica allo stato fresco	2000 Kg/m^3
Ritiro idraulico	c.a. 800 micron
Reazione al fuoco (EN 13501)	classe A1
Contenuto di cloruro idrosolubile in acqua (UNI EN 1015-17)	inferiore al 3%

Tabella 2-2 Specifiche tecniche del produttore (betoncino "Unico")

I parallelepipedi son stati ottenuti unendo al composto 2 percentuali diverse d'acqua: seguendo le indicazioni riportate, si è prima usato un rapporto 1,6 lt/sacco con il quale son stati confezionati 4 provini. Volendo però ottenere un composto dalla consistenza più plastica si è deciso di unire una quantità minore di acqua (1,4 lt / sacco) e con tale rapporto si son costruiti altri 8 parallelepipedi. Per ogni impasto son stati confezionati tre provini per tipo e, una volta trascorsi i 28 giorni di maturazione, son stati sottoposti alla prova di compressione .



Figura 2-11 A sinistra: parallelepipedi e provini in calcestruzzo. A destra: esecuzione di una prova a compressione.

In tabella 2-3 e tabella 2-4 si riportano le caratteristiche del calcestruzzo.

Campione (1,6lt/25kg)	Data di getto	Data di prova	a	b	h	sez.	Peso	F_u	R_{ck}
			mm	mm	mm	mm ²	Kg	Kgf	MPa
CLS - A1	12/06/13	10/07/13	150	149	150	22350	7,97	117500	51,6
CLS - A2	12/06/13	10/07/13	150	152	150	22800	8,11	127000	54,6
CLS - A3	12/06/13	10/07/13	150	150	150	22500	8,09	127000	55,4
resistenza cubica media a compressione a 28 giorni:								misurata	53,9
								dichiarata	30,0
deviazione standard:									1,6

Tabella 2-3 Risultati della prova a compressione del calcestruzzo con quantità di acqua pari a 1,6 lt/25kg

Campione (1,4lt/25kg)	Data di getto	Data di prova	a	b	h	sez.	Peso	F_u	R_{ck}
			mm	mm	mm	mm	Kg	Kgf	MPa
CLS - B1	12/06/13	10/07/13	150	150	150	22500	8,04	148000	64,5
CLS - B2	12/06/13	10/07/13	150	150	150	22500	8,21	153000	66,7
CLS - B3	12/06/13	10/07/13	150	151	150	22650	8,20	146000	63,2
resistenza cubica media a compressione a 28 giorni:								misurata	64,8
								dichiarata	30,0
deviazione standard:									1,4

Tabella 2-4 Risultati della prova a compressione del calcestruzzo con quantità di acqua pari a 1,4 lt/25kg

Come si può notare da un rapido confronto tra i dati raccolti dalle prove di compressione sui cubetti e quelli del produttore, si nota subito una discrepanza profonda in termini di resistenza a compressione, la quale risulta molto superiore rispetto alla classe di resistenza indicata (R_{ck} 30).

2.4.2 Matrici cementizie

Son state applicati tre diversi tipi di matrici cementizie per valutare la loro influenza sul meccanismo di trasferimento degli sforzi e sul meccanismo di rottura. Le malte usate, distribuite dalla ditta G&P Intech, sono addizionate con fibre e polimeri volti ad aumentarne le prestazioni e la compatibilità con il supporto in calcestruzzo e con le reti da rinforzo in esse annegate.

Per ogni tipologia si son costruiti tre parallelepipedi di lunghezza 160 mm e sezione 40x40 mm. Una volta aspettati i 28 gg di maturazione, i provini son stati sottoposti alla prova di flessione (figura 2-12). Le due parti dei parallelepipedi formatesi dalla rottura per flessione son stati poi inseriti in una pressa per valutarne le caratteristiche a compressione (figura 2-12).



Figura 2-12 Particolare delle prove effettuate sui campioni di malta. 1) Prova a flessione; 2) test a compressione.

Si riportano di seguito una breve descrizione per ogni tipologia di matrice e i risultati delle prove eseguite.

2.4.2.1 Concrete Rock W

E' una malta monocomponente a base di nano composti, leganti inorganici, fibre ed inerti selezionati a ritiro compensato. Presenta una buona lavorabilità e capacità di adattarsi al sottofondo. La miscela deve essere conforme alla norma UNI EN 1504-3 Classe R4. La quantità d'acqua impiegata corrisponde a quella prevista dai capitolati (17 % del peso).

Rock W	
Aspetto	polvere
Colore	grigio
PH	12
Densità dell'impasto	2,05 g/cm ³
Acqua d'impasto	17% del peso in polvere
Temperatura di applicazione	+5 / +35 °C
Tempo di lavorabilità a 20 °C	30 min
Resistenza a compressione a 28 gg (UNI EN 12190)	> 50 Mpa
Resistenza a flessione a 28 gg (UNI EN 12190)	> 7 MPa
Modulo elastico	>28 GPa
Adesione al calcestruzzo (UNI EN 1542)	>2 MPa
Adesione al cls dopo cicli gelo/disgelo (UNI EN 13687-1)	>2 MPa
Adesione al cls dopo shock termico (UNI EN 13687-2)	>2 MPa
Assorbimento capillare (UNI EN 13057)	< 0,2 kg m ⁻² h ^{-0,5}
Classe di resistenza al fuoco	A1
Spessore di applicazione	5 - 50 mm

Tabella 2-5 Specifiche tecniche del produttore

Flessione								
Campione	Data di getto	Data di prova	a	b	h	sez.	f _{flex}	f _{flex}
			mm	mm	mm	mm ²	Kg _f /cm ²	MPa
W - A	30/07/13	02/09/13	40	40	160	1600	66,4	6,5
W - B	30/07/13	02/09/13	40	40	160	1600	65,0	6,4
W - C	30/07/13	02/09/13	40	40	160	1600	65,5	6,4
Media sperimentale:							65,6	6,4
Deviazione standard:								0,06

Tabella 2-6 Prova a flessione malta Rock W

Paragonando i dati raccolti dalle prove a flessione con la resistenza dichiarata dall'azienda (tabella 2-6) si notano valori leggermente inferiori (< a 7 MPa indicati).

Compressione		
Campione	Fu [Kg _f]	fc [MPa]
W - A - 1	7850	48,1
W - A - 2	8300	50,9
W - B - 1	7320	44,9
W - B - 2	7550	46,3
W - C - 1	7700	47,2
W - C - 2	7820	47,9
Media sperimentale:	7756,7	47,6
Deviazione standard		1,8

Tabella 2-7 Prova a compressione malta Rock W

Anche nel caso della resistenza a compressione i valori risultano leggermente inferiori (47,6 MPa ottenuti contro i 50 MPa minimi dichiarati).

2.4.2.2 Concrete Rock S

E' una malta monocomponente tixotropica premiscelata a ritiro compensato e in classe R2. Nell'impasto son presenti fibre e leganti polimerici. La quantità d'acqua prevista per la miscelazione del composto è il 19 % del peso in polvere.

Rock S	
Resa	ca. 1500 Kg/m ³
Acqua d'impasto	19 % del peso in polvere
Tempo di lavorabilità a 20 °C	>60 min
Contenuto ioni cloruro	< 0,05 %
Resistenza a compressione a 28 gg (UNI EN 12190)	25 N/mm ² (classe R3)
Modulo elastico	15000 N/mm ² (classe R3)
Adesione al mattone a 28 gg	> 0,6 N/mm ²
Permeabilità al vapore acqueo	20
Assorbimento capillare (UNI EN 13057)	< 0,5 kg m ⁻² h ^{-0,5}
Classe di resistenza al fuoco	classe A1
Resistenza ai cicli di gelo e disgelo	resistente
Resistenza ai solfati	nessun degrado dopo attacco in solfato di magnesio
Resistenza all'attacco degli olii lubrificanti	nessun degrado dopo immersione in olio a 40 °C per 60 gg
Essudamento d'acqua (bleeding)	assenza d'acqua essudata
Temperatura di applicazione	da +5 °C a +40 °C

Tabella 2-8 Specifiche tecniche del produttore

Flessione								
Campione	Data di getto	Data di prova	a	b	h	sez.	f_{flex}	f_{flex}
			mm	mm	mm	mm ²	Kg _f /cm ²	MPa
S - A	01/08/13	02/09/13	40	40	160	64,8	64,8	6,4
S - B	01/08/13	02/09/13	40	40	160	55,5	55,5	5,4
S - C	01/08/13	02/09/13	40	40	160	66,3	66,3	6,5
Media sperimentale:							62,2	6,1
Deviazione standard:								0,47

Tabella 2-9 Prova a flessione malta Rock S

Compressione		
Campione	Fu [Kg _f]	fc [MPa]
S - A - 1	5680	34,8
S - A - 2	5830	35,7
S - B - 1	5770	35,4
S - B - 2	5860	35,9
S - C - 1	5760	35,3
S - C - 2	5850	35,9
Media sperimentale:	5791,7	35,5
Deviazione standard		0,4

Tabella 2-10 Prova a compressione malta Rock S

La resistenza a compressione in questo caso risulta molto superiore rispetto ai 25 MPa dichiarati dal distributore.

2.4.2.3 Limecrete

Limecrete è una malta premiscelata da muratura in calce e pozzolana naturale contenente inerti silicei, fibre e priva di cemento. E' classificata come malta da murature tipo M15 strutturale secondo la norma UNI EN 998/2.

Durante la miscelazione del composto con la percentuale di acqua indicata dall'azienda, si è notato che la malta assumeva una consistenza molto liquida e non adatta all'uso. Dopo numerosi tentativi si è arrivati alla conclusione che una percentuale di acqua pari al 13% in polvere del composto potesse fornire una lavorabilità tale da consentire l'applicazione sui supporti in calcestruzzo. Son comunque stati prodotti dei

provini con percentuale di acqua pari al 22% per testare se le caratteristiche meccaniche corrispondessero a quelle dei capitolati.

Limecrete	
Densità della malta fresca	2,05 g/cm ³
Resa	17-18 Kg/m ² per cm spessore
Acqua d'impasto	22-24 %
Resistenza a compressione a 28 gg (UNI EN 12190)	>15 MPa
Coefficiente di assorbimento capillare	0,2 Kg per m ⁻² min ^{-0,5}
Resistenza allo sfilamento (barre d'acciaio e barre M Bar)	6,5 N/mm ²
Adesione al supporto (UNI 1015/12) (trazione diretta)	0,6 N/mm ² (rottura interfaccia malta/supporto)
Classe di resistenza al fuoco	A1
Temperatura di applicazione	da +5 a 35 °C

Tabella 2-11 Specifiche tecniche del produttore

Sotto si riportano le caratteristiche a flessione e compressione della malta Limecrete con la percentuale di acqua pari a 13% che corrisponde alla miscela utilizzata per confezionare i provini destinati agli shear test.

Flessione								
Campione (13% acqua)	Data di getto	Data di prova	a	b	h	sez.	f _{flex}	f _{flex}
			mm	mm	mm	mm ²	Kg _f /cm ²	MPa
Lime - A	26/08/13	08/10/13	40	40	160	1600	43,0	4,2
Lime - B	26/08/13	08/10/13	40	40	160	1600	44,0	4,3
Lime - C	26/08/13	08/10/13	40	40	160	1600	43,0	4,2
Media sperimentale:							43,3	4,3
Deviazione standard:								0,05

Tabella 2-12 Prova a flessione malta Limecrete.

Compressione		
Campione (13% acqua)	Fu [Kg _f]	fc [MPa]
Lime - A - 1	2330	14,3
Lime - A - 2	2420	14,8
Lime - B - 1	2370	14,5

Lime - B - 2	2380	14,6
Lime - C - 1	2400	14,7
Lime - C - 2	2370	14,5
Media sperimentale:	2378,3	14,6
Deviazione standard		0,2

Tabella 2-13 Prova a compressione malta Limecrete

I valori della resistenza a compressione risultano leggermente inferiori rispetto a quelli dichiarati pur impiegando una percentuale d'acqua minore di quella consigliata. Seguendo la percentuale prescritta (22%, risultati omessi) si ottiene invece una resistenza a compressione pari ad un terzo di quella dichiarata.

2.4.3 Fibre da rinforzo

Come in precedenza introdotto, son quattro le tipologie di fibre applicate ai supporti in calcestruzzo. Il materiale è distribuito dalla G&P Intech con i seguenti nomi commerciali:

- fibre in acciaio: STEEL NET 190;
- fibre in vetro: G-NET 221 B;
- fibre in vetro : G-NET 251 BA;
- fibre in carbonio: C-NET 220 B.

Ogni gamma di fibre è stata testata per valutare le caratteristiche meccaniche e confrontarle rispetto a quanto dichiarato nelle specifiche del produttore. Si sono eseguiti così un numero considerevole di prove a trazione su ogni tipologia di materiale, durante le quali si è variato il numero di bundle longitudinali da testare, in modo da assicurarsi che ogni fibra raggiunga la stessa tensione di rottura al variare della larghezza applicata (tranne per il tessuto in acciaio, per il quale è stata presa in considerazione solo una larghezza pari a 6 cm).

Per contraddistinguere i provini, si è introdotta la dicitura MAT_X_Z, dove MAT indica il nome commerciale delle fibre, X la larghezza e Z il numero del provino. L'aggiunta di un asterisco in appendice al numero provino (Z*) indica che il test è stato eseguito impiegando gli estensimetri.

I macchinari utilizzati per la prova a trazione sono due, una Galdabini Sun 2500 (figura 2-13) e la Galdabini Sun 60. La prima è stata impiegata per le prove a trazione di

provini con larghezza fino a 40 mm, mentre i rimanenti son stati testati nella stessa apparecchiatura con cui si sono condotti gli shear test.

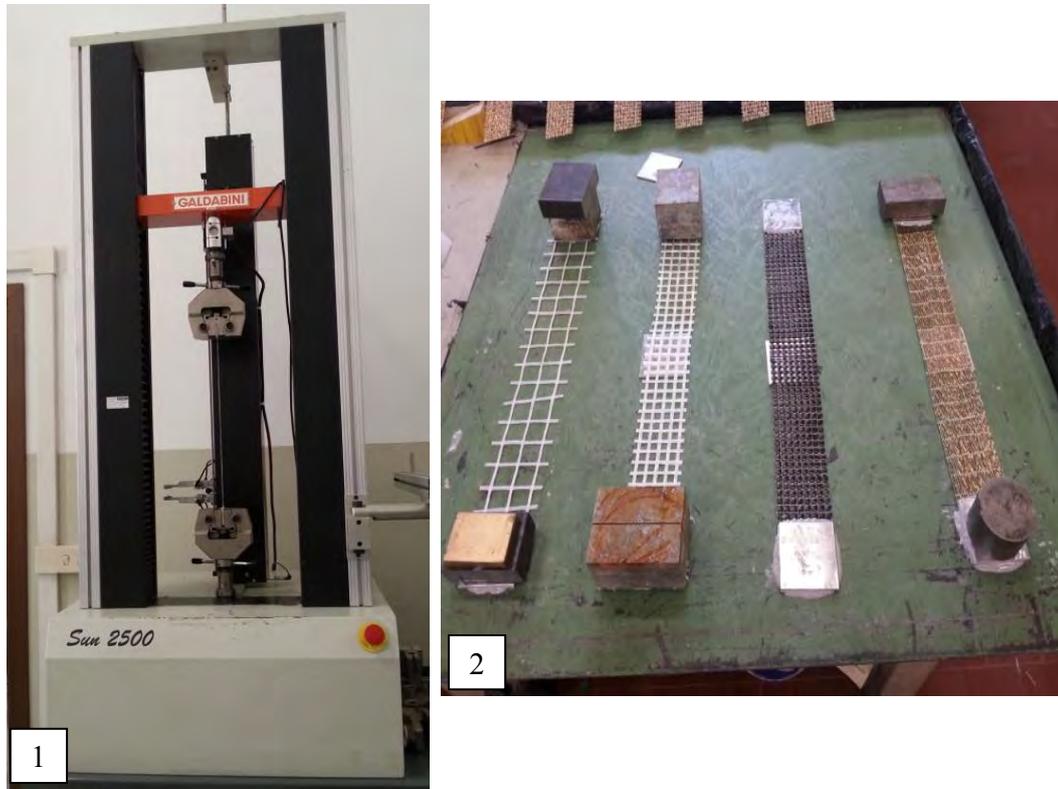


Figura 2-13: 1)apparecchiatura utilizzata durante la prova a trazione (Galdabini Sun 2500).

2) esempio di applicazione delle piastrine in alluminio ai provini da sottoporre a trazione.

Per fissare i provini ai dispositivi, si è deciso di adottare un collegamento a puro attrito simile a quanto si è deciso di impiegare durante le prove a taglio diretto: delle piastrine in alluminio di larghezza variabile (dipendente dal numero di bundle testati) sono state incollate alle due estremità dei fasci mediante resina epossidica bicomponente (sikadur 32), in modo da rendere più efficace l'aggrappo delle ganasce al provino.

Le prove sono state eseguite a controllo di spostamento, con una velocità pari a 2 mm al min come indicato dalla ASTM D3039 [24].

Nei prossimi paragrafi si riportano i risultati di suddette prove divisi per tipologia di materiale.

2.4.3.1 Trefoli in acciaio STEEL NET 190

Il tessuto è composto da trefoli in acciaio ad altissima resistenza (UHTSS ottonato) disposti parallelamente fino ad ottenere una densità medio-alta. Il trefolo impiegato è un classico 3x2, ovvero tre trefoli rettilinei attorno ai quali sono avvolti due fili d'acciaio.

In tabella 2-14 si riportano le specifiche dell'azienda.

Acciaio STEEL NET 190	
Grammatura tessuto acciaio UHTSS ottonato	1910 g/m ²
Area effettiva nastro	2,4 mm ² /cm
Spessore equivalente di calcolo del nastro	0,24 mm
Tensione media a rottura nastro (EN 2561)	3345 MPa
Carico caratteristico a trazione nastro	7320 N/cm
Carico ultimo a trazione nastro	8028 N/cm
Modulo elastico a trazione nastro	190 Gpa
Deformazione caratteristica a trazione	2,20%

Tabella 2-14 Specifiche del produttore (STEEL NET 190).

Per la caratterizzazione meccanica del materiale, sono stati testati tre provini di larghezza pari a 60 mm contenenti 33 trefoli ciascuno (figura 2-15). Dei tre preparati, solo due prove sono state strumentate con gli estensimetri (figura 2-16).

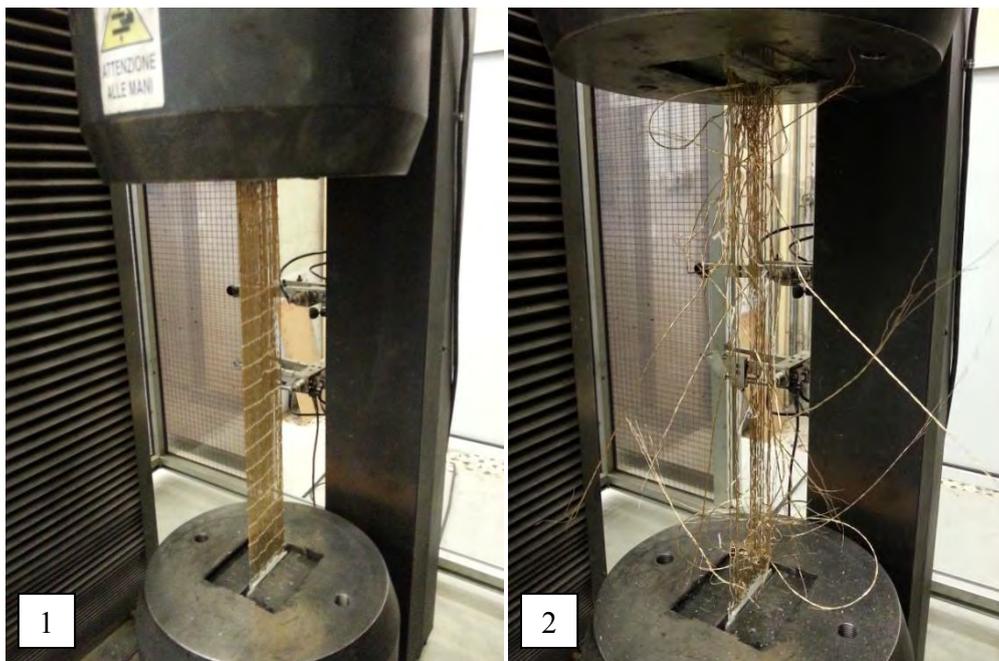


Figura 2-14 : 1) esecuzione della prova STEELNET190_2*. 2) rottura del provino.

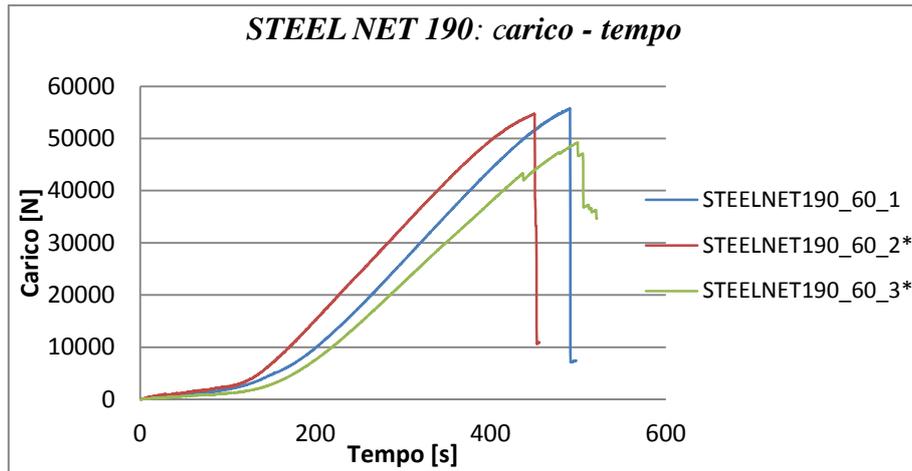


Figura 2-15 Andamento carico-tempo delle tre prove a trazione (STEEL NET 190).

Pur avendo condotto solo due prove con gli estensimetri, si riportano i risultati ricavati. A causa del limitato numero di test effettuati, le considerazioni ottenuti in merito alle deformazioni e modulo elastico sono solamente di carattere orientativo.

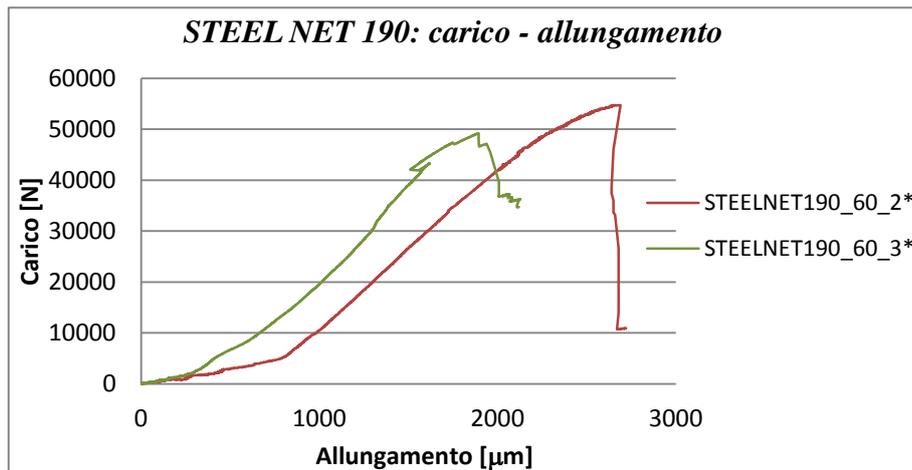


Figura 2-16 Risultati delle due prove strumentalizzate con gli estensimetri (STEEL NET 190).

Codice provino	Allungamento (mm)	ϵ	modulo elastico E (MPa)
STEELNET190_60_2*	2,69	0,0269	141302,66
STEELNET190_60_3*	1,893	0,01893	180639,93
Media			160971,29

Tabella 2-15 Deformazioni e modulo elastico ricavate dalle prove strumentate con gli estensimetri (STEEL NET 190_*series)

Codice provino	Carico di rottura (N)	Tensione di rottura (MPa)
STEELNET190_60_1	55740	3870,83
STEELNET190_60_2*	54735	3801,04

STEELNET190_60_3	49241	3419,51
Media		3697,13

Tabella 2-16 Tabella riassuntiva e calcolo delle tensioni di rottura dei trefoli (STEEL NET 190).

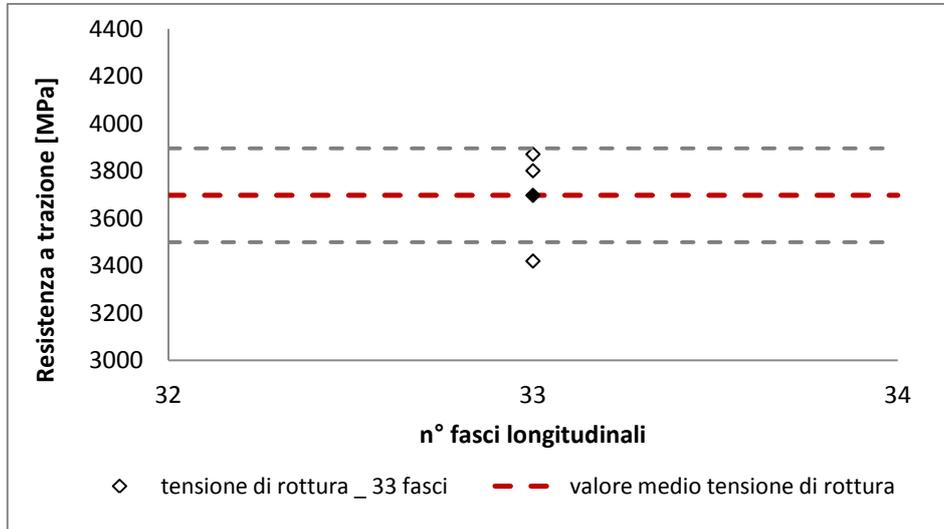


Figura 2-17 Tensione media dei raggiunta dai trefoli durante le prove a trazione (STEEL NET)

Come dimostrano i grafici sopra riportati, i trefoli presentano tensioni di rottura superiori rispetto a quelle dichiarate dalla scheda tecnica. Visti i risultati soddisfacenti ottenuti dalle tre prove, si è deciso di non testare provini con larghezze minori.

2.4.3.2 Rete in fibra di vetro G-NET 221 B

Si tratta di un tessuto bidirezionale in vetro AR (classificato ai sensi della Norma UNI EN 15422), con fasci di sezione 5x0.05 mm, distanziati per una larghezza pari a 5.8 mm nelle due direzioni (figura 2-18).

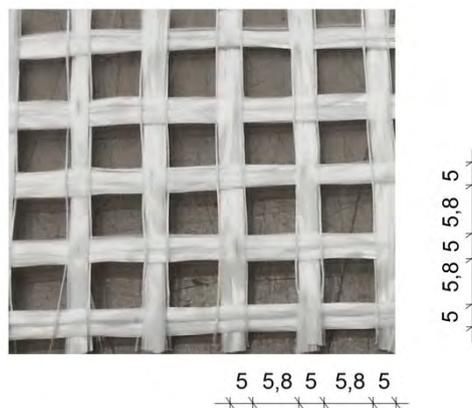


Figura 2-18 Particolare della rete in vetro G-NET 221 B

I bundle presentano un trattamento superficiale (appretto) che ne migliora la compatibilità e l'adesione con i supporti in calcestruzzo. Grazie al suo elevato contenuto in ossido di zirconio > 16%, il tessuto è caratterizzato da un'elevata resistenza agli ambienti alcalini.

In tabella 2-17 si riportano le caratteristiche riportate nella scheda tecnica.

G-NET 221 B	
Grammatura	220 g/m ²
Dmensione maglia	12 mm
Spessore fibra per direzione 0-90°	0,048 mm
Resistenza a trazione filamento	>3000 MPa
Carico di rottura per direzione 0-90°	70 KN/m
Modulo elastico a trazione filamento	74 Gpa
Allungamento a rottura filamento	>3 %

Tabella 2-17 Specifiche tecniche del produttore (G-NET 221 B).

Per questa tipologia di materiale è stato scelto di eseguire le seguenti prove di trazione:

- 3 test a trazione di un solo bundle (GNET221B_5_1);
- 3 test a trazione di 3 bundle (GNET221B_20_1);
- 3 test a trazione di 5 bundle (GNET221B_60_1), dei quali due sono stati eseguiti impiegando gli estensimetri.

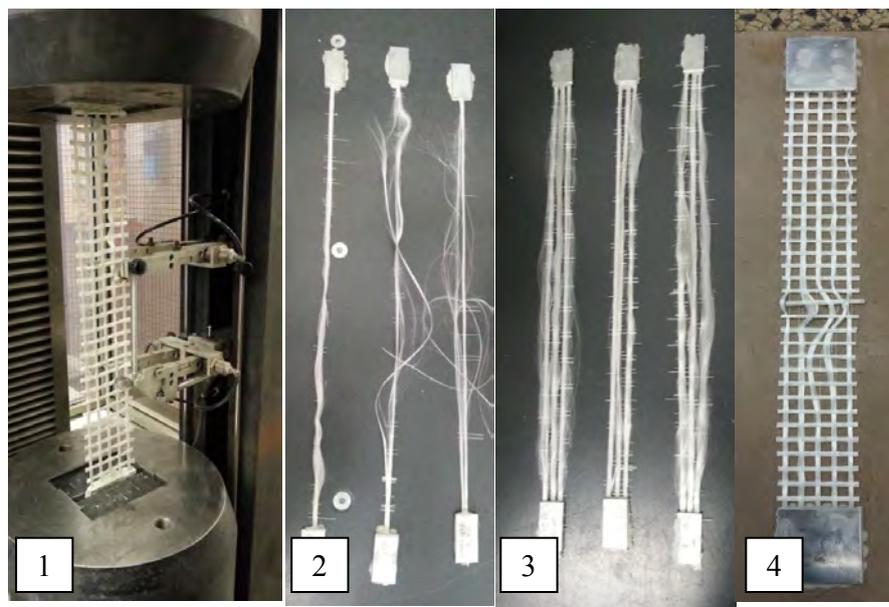


Figura 2-19: 1) esecuzione della prova GNET221B_60_2*. 2-3-4) provini con numero di fasci variabile portati a rottura.

Sotto si riportano i risultati delle varie prove.

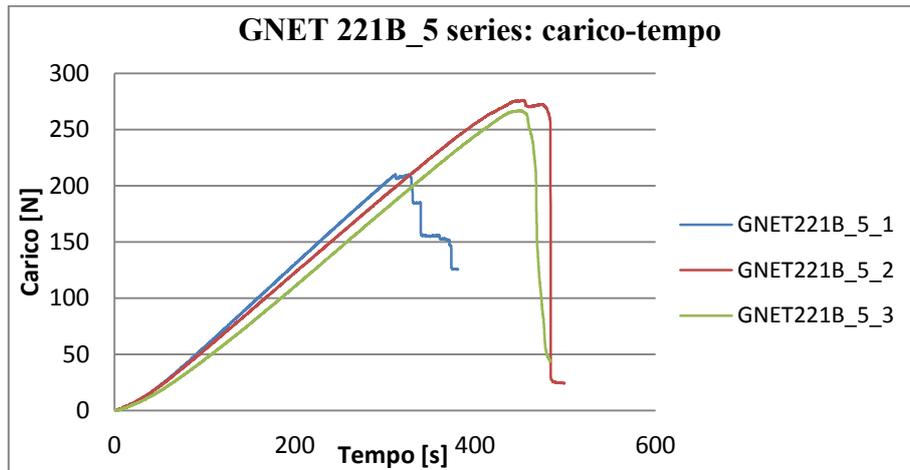


Figura 2-20 Andamento carico-tempo delle tre prove a trazione (GNET221B_5 series).

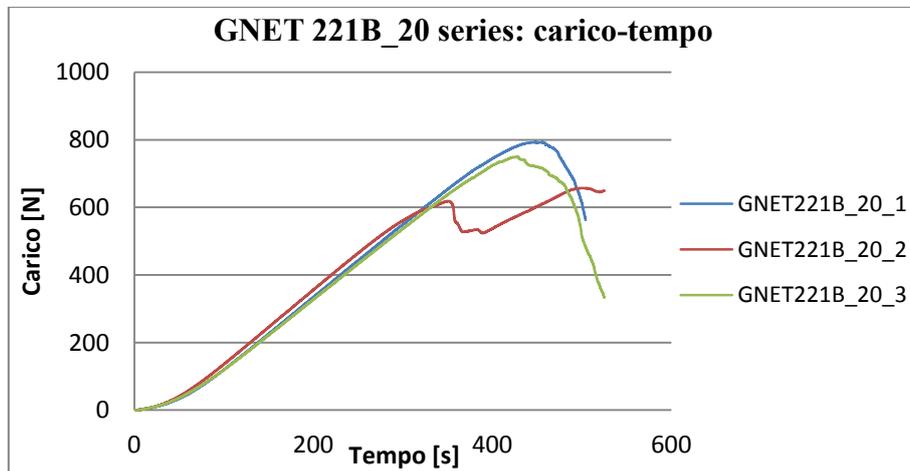


Figura 2-21 Andamento carico-tempo delle tre prove a trazione (GNET221B_20 series).

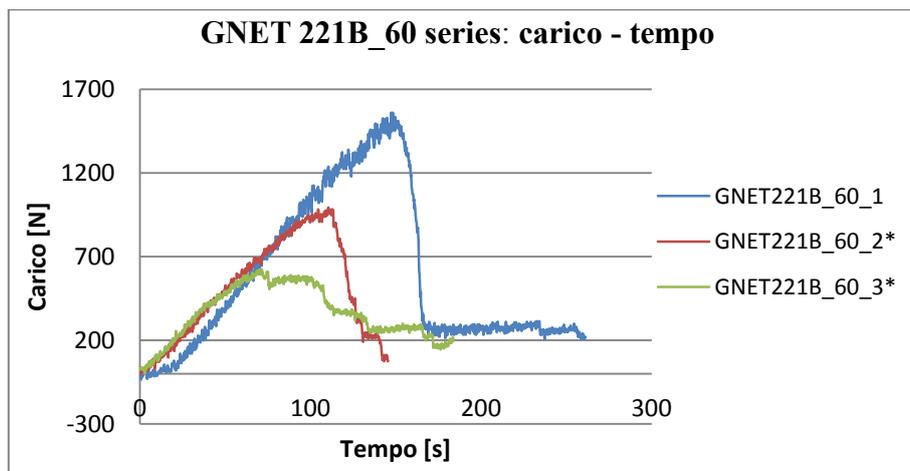


Figura 2-22 Andamento carico-tempo delle tre prove a trazione (GNET221B_60 series).

Come illustrato dai grafici in figura 2-20 e figura 2-21, non vengono registrati particolari scostamenti tra i diversi andamenti dei carichi. Solamente i provini contenenti 5 fasci mostrano risultati sensibilmente distanti tra loro in termini di forza ultima raggiunta (figura 2-22): si pensa che ciò possa essere imputato ad un allineamento imperfetto tra i fasci in vetro durante l'incollaggio delle piastrine, il quale ha comportato una tesatura non uniforme delle fibre all'interno del provino. Infatti, durante l'esecuzione della prova, si sono osservate rotture premature di alcuni bundle prima del raggiungimento del carico previsto.

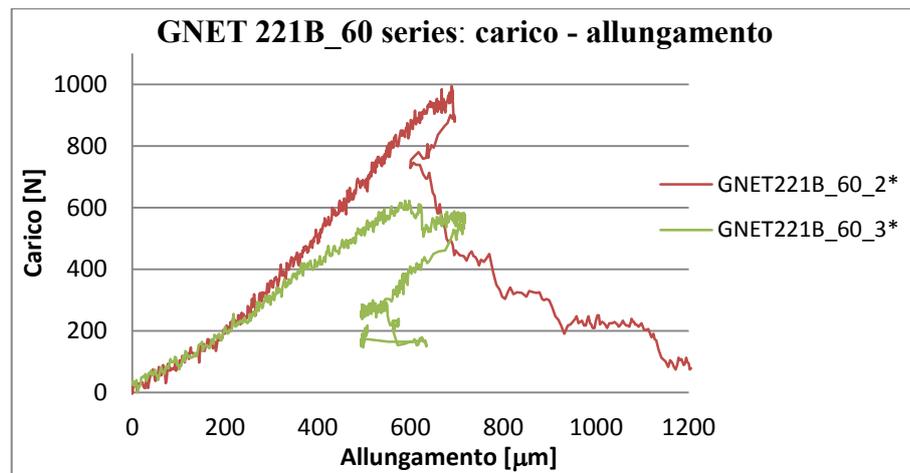


Figura 2-23 Andamento carico-allungamento delle due prove a trazione (GNET221B_60* series).

Codice provino	Allungamento (mm)	ϵ	modulo elastico E (MPa)
GNET221B_60_2*	0,689	0,00689	144267,05
GNET221B_60_3*	0,597	0,00597	173925,18
Media			159096,11

Tabella 2-18 Deformazioni e modulo elastico (GNET221B_60* series).

Codice provino	Carico di rottura (N)	Tensione di rottura (MPa)
GNET221B_5_1	210,1	1050,5
GNET221B_5_2	276,1	1380,5
GNET221B_5_3	266,9	1334,5
GNET221B_20_1	793,6	1322,66
GNET221B_20_2	661,9	1103,16
GNET221B_20_3	749,8	1249,66
GNET221B_60_1	1560	1560
GNET221B_60_2*	994	994
GNET221B_60_3*	623	1038,33
Media		1225,93

Tabella 2-19 Tabella riassuntiva e calcolo delle tensioni di rottura (GNET221B).

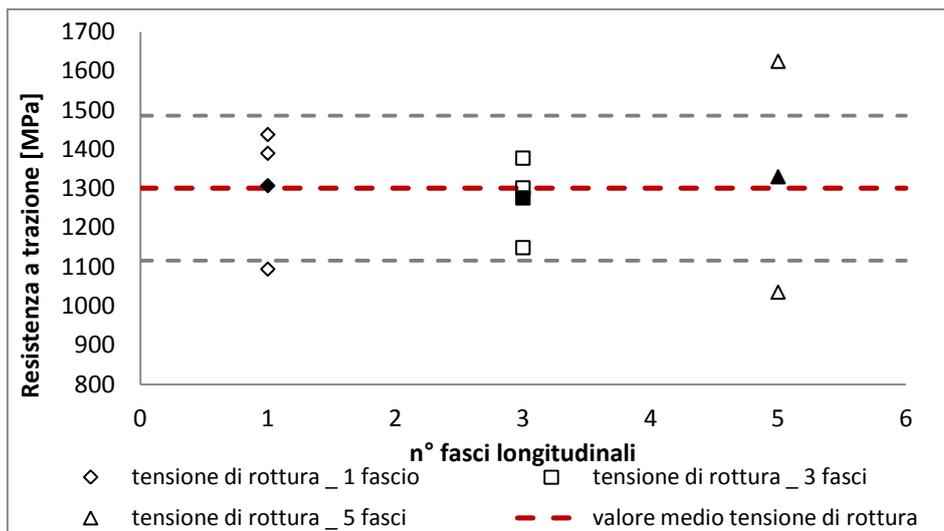


Figura 2-24 Tensione media dei raggiunti dai bundle durante le prove a trazione (GNET221B).

Il grafico in figura 2-24 mostra il valore medio della tensione di rottura raggiunta nelle diverse prove. Nonostante i risultati anomali conferiti da alcuni test e al di là delle incongruenze con le specifiche riportate dal produttore, si può concludere che la tensione rimane all'incirca costante al variare del numero di fasci considerati.

2.4.3.3 Rete in fibra di vetro G-NET 251 BA

Si tratta di un tessuto bidirezionale in vetro AR (classificato ai sensi della Norma UNI EN 15422), con fasci di sezione 4x0.05 mm, distanziati per una larghezza pari a 15 mm nelle due direzioni.

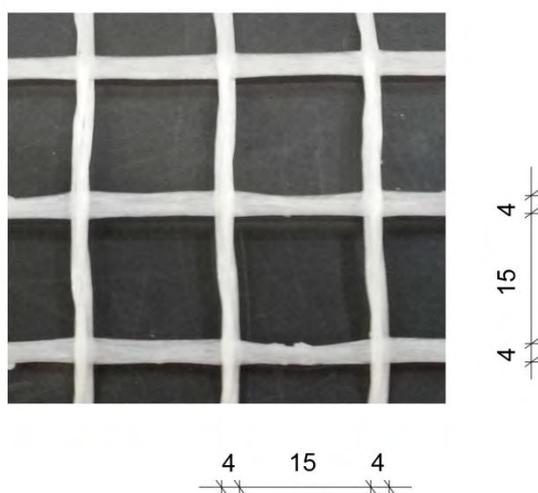


Figura 2-25 Particolare della rete in vetro G.NET 251 BA

Le fibre sono trattate superficialmente per migliorare l'applicabilità al supporto e contengono un elevato tasso di ossido di zirconio che conferisce una elevata resistenza agli ambienti alcalini, tipici delle malte cementizie e calci.

G-NET 251 BA	
Grammatura	250 g/m ²
Dimensione maglia	25 mm
Spessore fibra per direzione 0-90°	0,05 mm
Resistenza a trazione filamento	>2000 MPa
Carico di rottura per direzione 0-90°	46/50 KN/m
Modulo elastico a trazione filamento	70 Gpa
Allungamento a rottura filamento	>3 %

Figura 2-26 Specifiche tecniche del produttore (G-NET 251 BA).

Per determinarne le caratteristiche meccaniche e verificare la costanza della tensione di rottura al variare del numero dei fasci longitudinali applicati, si è scelto di testare a trazione le seguenti prove:

- 3 provini contenenti un solo fascio (GNET251BA_5);
- 3 provini contenenti due fasci (GNET251BA_20);
- 3 provini contenenti tre fasci (GNET251BA_60), dei quali due sono stati eseguiti impiegando gli estensimetri.

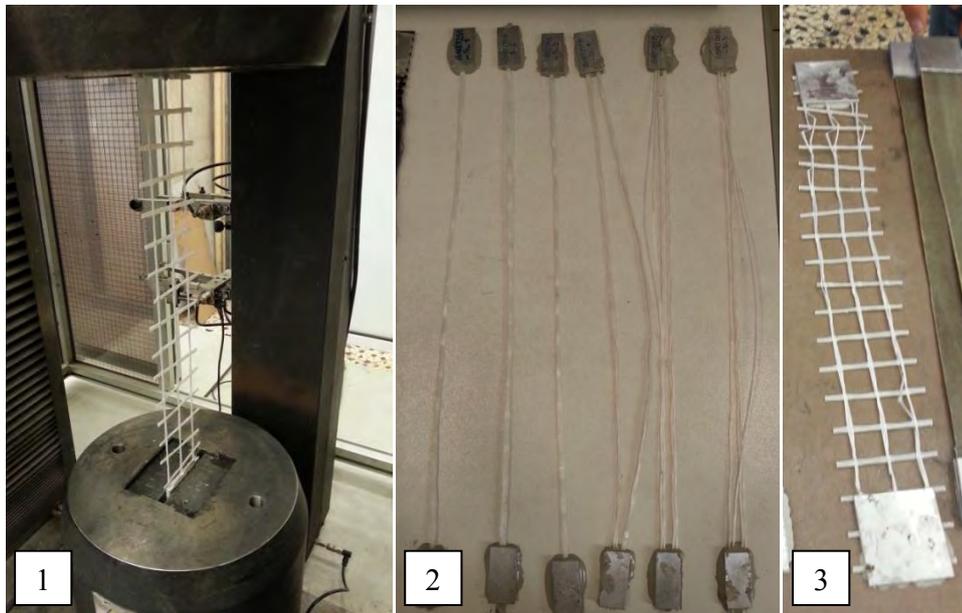


Figura 2-27: 1) esecuzione della prova GNET251BA_60_3*. 2-3) provini con numero di fasci variabile portati a rottura.

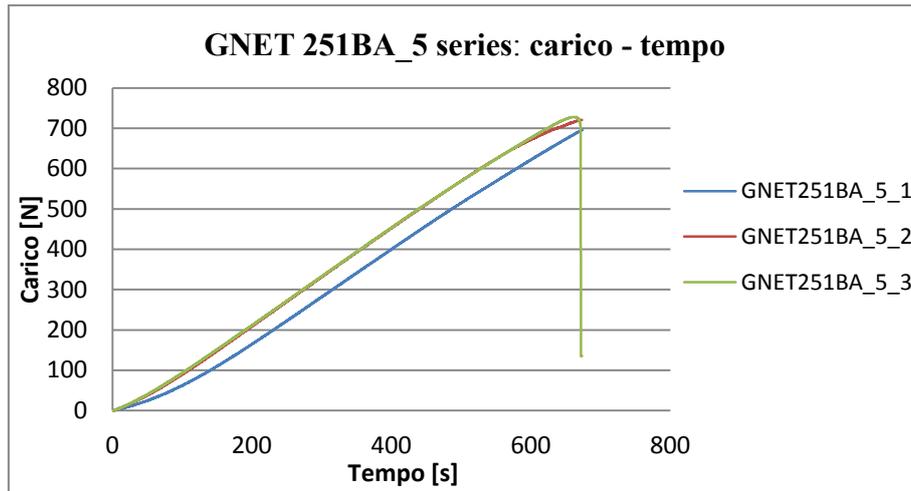


Figura 2-28 Andamento carico-tempo delle tre prove a trazione (GNET251BA_5 series).

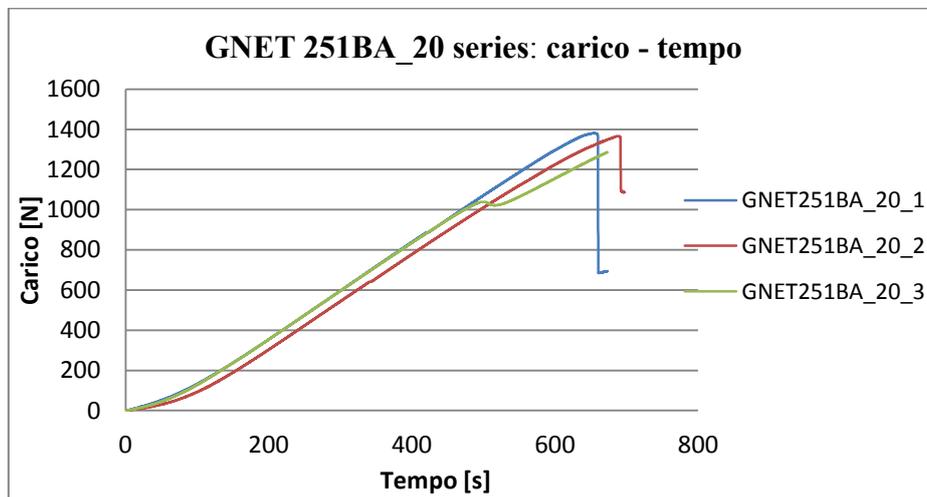


Figura 2-29 Andamento carico-tempo delle tre prove a trazione (GNET251BA_20 series).

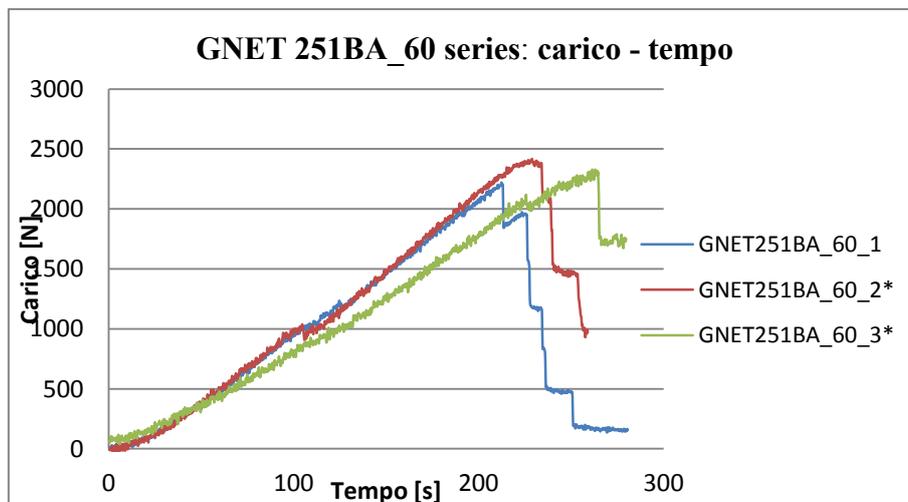


Figura 2-30 Andamento carico-tempo delle tre prove a trazione (GNET251BA_60 series).

Da un primo confronto con i dati riportati nelle specifiche tecniche, si nota un carico raggiunto delle fibre all'incirca concorde a quanto dichiarato: prendendo come esempio i provini contenenti tre fas, il carico raggiunto (mediamente pari a 2300 N), si avvicina a quello previsto di 2,5 KN (considerando un carico di 46 KN/m e 55 mm di larghezza).

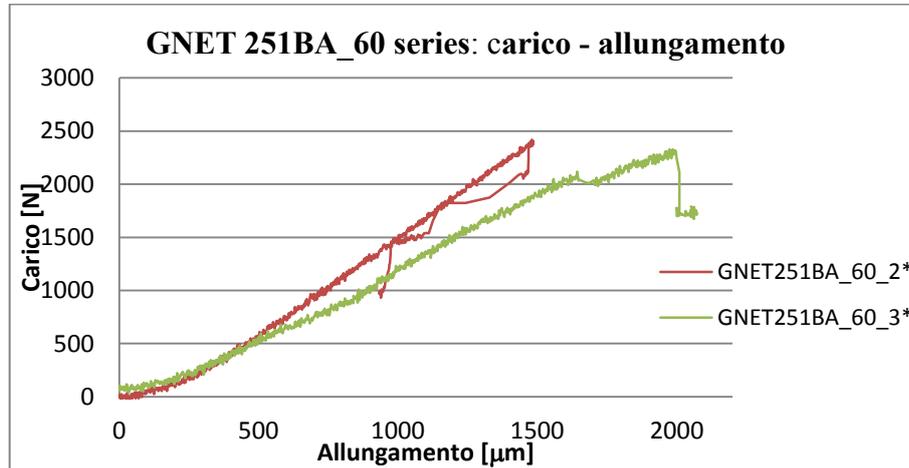


Figura 2-31 Andamento carico-allungamento delle due prove a trazione (GNET251BA_60*series).

Codice provino	Allungamento (mm)	ϵ	modulo elastico E (MPa)
GNET251BA_60_2*	1,48	0,0148	272409,90
GNET251BA_60_3*	1,974	0,01974	196639,64
Media			234524,77

Tabella 2-20 Deformazioni e modulo elastico ricavate dalle prove strumentate con gli estensimetri (GNET251BA_60* series).

Codice provino	Carico di rottura (N)	Tensione di rottura (MPa)
GNET251BA_5_1	771,9	3859,5
GNET251BA_5_2	724,1	3620,5
GNET251BA_5_3	728	3640
GNET251BA_20_1	1381,3	3453,25
GNET251BA_20_2	1366,4	3416
GNET251BA_20_3	1414,3	3535,75
GNET251BA_60_1	2220	3700
GNET251BA_60_2*	2419	4031,66
GNET251BA_60_3*	2329	3881,66
Media		3682,04

Tabella 2-21 Tabella riassuntiva e calcolo delle tensioni di rottura (GNET251BA).

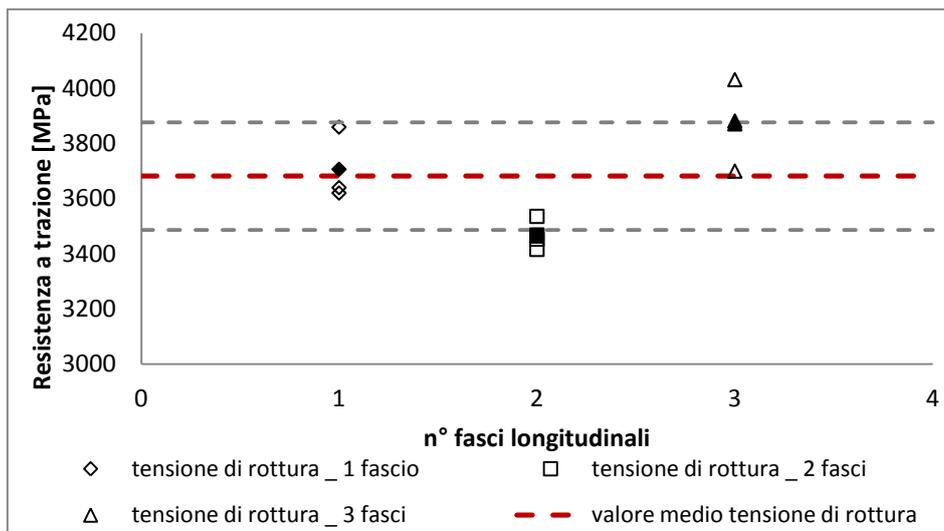


Figura 2-32 Tensione media dei raggiunta dai bundle durante le prove a trazione (GNET251B).

Anche in questo caso si nota un andamento delle tensioni all'incirca costante al variare della larghezza considerata nei test a trazione, risultato che porta quindi a smentire la presenza di un possibile effetto introdotto dalla larghezza delle reti di rinforzo durante le prove degli FRCM.

2.4.3.4 Rete in carbonio C-NET 220 B

Si tratta di una rete bidirezionale tessuta con fibre in carbonio, in cui i fasci presentano sezione rettangolare 0,05 x 3,5 mm, la cui trama è caratterizzata dalla geometria riportata in figura 2-33.

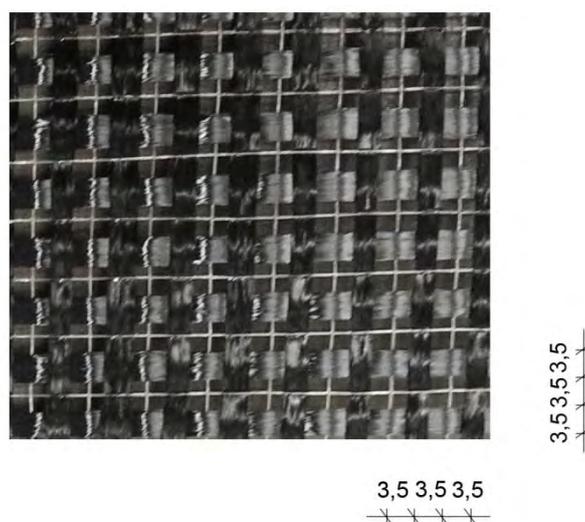


Figura 2-33 Particolare del tessuto in carbonio.

Le specifiche tecniche del produttore sono riportate in tabella 2-22.

C-NET 220 B	
Grammatura	220 g/m ²
Resistenza a trazione filamento	>4500 MPa
Modulo elastico a trazione filamento	240 Gpa
Allungamento a rottura filamento	>1,5 %

Tabella 2-22 Specifiche tecniche del produttore (C-NET 220 B).

Per determinarne le caratteristiche meccaniche e verificare la costanza della tensione di rottura al variare del numero dei fasci longitudinali applicati, si è scelto di testare a trazione le seguenti prove:

- 3 provini contenenti un solo fascio (CNET220B_4);
- 3 provini contenenti tre fasci (CNET220B_20);
- 6 provini contenenti cinque fasci (CNET220B_40), strumentate con estensimetri;
- 5 provini contenenti otto fasci (CNET220B_60), delle quali 4 strumentate con estensimetri;

Generalmente, le prove non hanno fornito tensioni di rottura costanti al variare del numero dei fasci: tali considerazioni valgono in particolare per i test condotti su i provini contenenti cinque e otto fasci, per i quali i risultati hanno evidenziato del carico a rottura non in linea con quelli attesi.

Data la grande variabilità per le prove e il gran numero di test a trazione condotte per questa tipologia di materiale, si preferisce riportare solamente la tabella riassuntiva dei carichi ottenuti e il grafico che espone le tensioni di rottura in base al numero di fasci contenuti nei provini.

Codice provino	Carico di rottura [N]	Tensione di rottura [MPa]
CNET220B_4_1	729,1	4166,29
CNET220B_4_2	809,9	4628,00
CNET220B_4_3	791,8	4524,57
CNET220B_20_1	2375,8	4525,33
CNET220B_20_2	2117,6	4033,52
CNET220B_20_3	2542,6	4843,05
CNET220B_40_1*	3600,0	4114,29
CNET220B_40_2*	3401,0	3886,86
CNET220B_40_3*	2625,0	3000,00
CNET220B_40_4*	2385,0	2725,71
CNET220B_40_5*	1969,0	2250,29
CNET220B_40_6*	2816,0	3218,29

CNET220B_60_1	5303,0	3787,86
CNET220B_60_2*	6690,0	4778,57
CNET220B_60_3*	4279,0	3056,43
CNET220B_60_4*	2558,0	1827,14
CNET220B_60_5*	3731,0	2665,00
Tensione di rottura media [MPa]		4328,83
Deviazione standard		357,88

Tabella 2-23 Tabella riassuntiva e calcolo delle tensioni di rottura (CNET220B)

Come visibile in tabella 2-23, alcune prove non sono state prese in considerazione in quanto hanno manifestato dei carichi di rottura di gran lunga inferiori rispetto all'andamento medio fornito dalle altre prove. Si presume che tali risultati possano essere imputabili ad un cattivo allineamento dei fasci all'atto del tiro, suggerito dal fatto che la rottura è intervenuta per cedimento localizzato in prossimità di alcuni fasci.

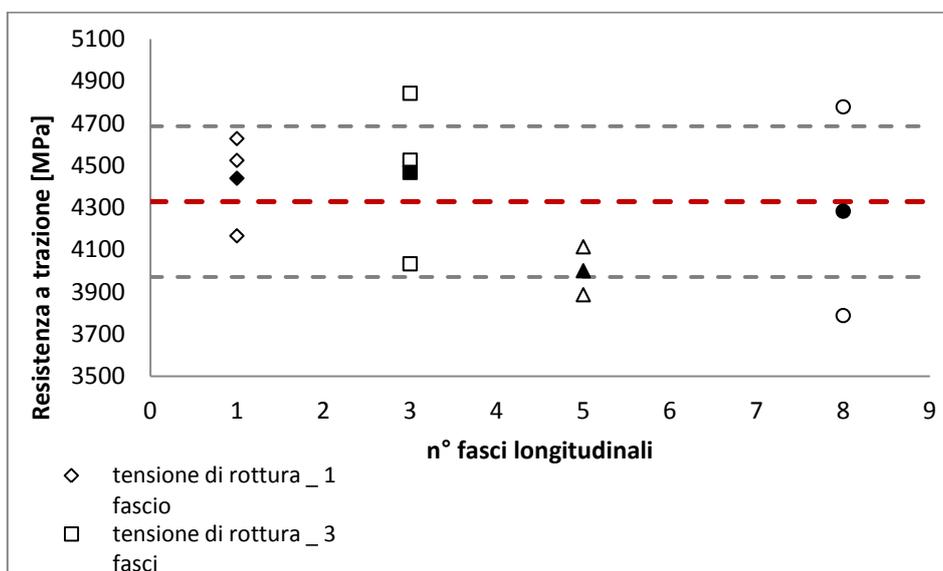


Figura 2-34 Tensione media dei raggiunta dai bundle durante le prove a trazione (CNET220B).

Trascurando quindi i test che hanno manifestato dei criteri di rottura anomali da quelli previsti, si ottiene un andamento all'incirca costante della tensione di rottura al variare del numero di fasci considerati. Nulla si può dire in merito ai valori del modulo elastico e deformazione a rottura, a causa dell'esiguo numero di prove strumentate con estensimetri che hanno dato un riscontro attendibile.

Inoltre, non è possibile alcuna considerazione con in merito al confronto con i valori presentati dal produttore, in quanto i dati forniti non riportano nessuna indicazione riguardante i fasci o il carico di rottura per metro lineare di tessuto.

2.5 Risultati attesi

Come evidenziato dalle numerose prove di taglio diretto condotte su reti in PBO annegate in una matrice cementizia, si presume che la rottura si manifesti all'interno del pacchetto di rinforzo, con uno scorrimento della fibra tra i due strati di malta applicati. Per quanto riguarda il carico, la figura 2-35 riporta l'andamento ideale proposto dai risultati delle precedenti prove sperimentali e studi analitici concernenti gli FRCM [20].

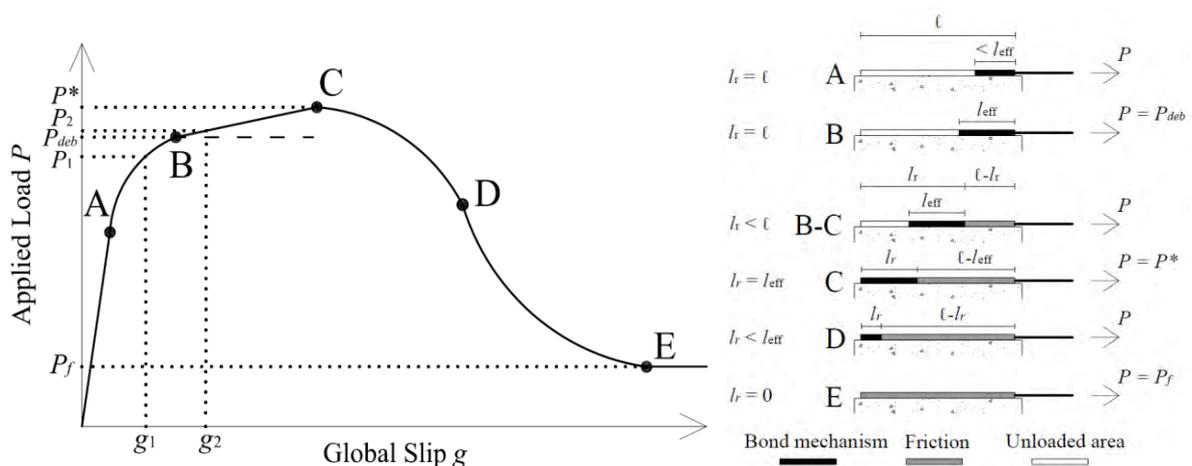


Figura 2-35 Andamento ideale carico - scorrimento globale [20].

La prima parte della curva è caratterizzata da un tratto lineare, associabile alla risposta elastica del composito. Una volta raggiunto il *punto A*, la risposta del carico diventa non lineare: l'interfaccia tra fibre e legante comincia a degradarsi attraverso la comparsa di microfessure che si propagano lungo la lunghezza di incollaggio (indicata con " l "). In corrispondenza a questa zona avviene il mutuo trasferimento degli sforzi tangenziali tra fibre e matrice. Tale regione è indicata con l'acronimo di STZ (Stress Transfer Zone) e la sua importanza sarà chiarita in maniera approfondita al capitolo successivo. All'aumentare del carico, il danno interessa porzioni di interfaccia sempre maggiori fino a quando si raggiunge la cosiddetta "lunghezza efficace" (l_{eff}), ovvero la lunghezza di ancoraggio minima che assicura al composito di realizzare il carico massimo associato alla sola adesione tra rete di rinforzo e matrice (P_{deb} , ovvero carico di delaminazione o di "debonding"; *punto B*).

Raggiunto tale carico, ha inizio il distacco progressivo delle fibre dalla matrice cementizia, al quale è associata una traslazione della lunghezza efficace lungo la zona

incollata del pacchetto di rinforzo: durante questa fase, il carico subisce un incremento lineare a causa dell'attrito che si sviluppa lungo la zona interessata dal processo di delaminazione (indicata nello schema come $l-l_r$). L'attrito è, come si ha già avuto occasione di evidenziare, l'aspetto fondamentale che contraddistingue il comportamento degli FRCM rispetto ai compositi a matrice polimerica. Questa caratteristica permette di ottenere valori del carico massimo maggiori rispetto a quello ottenibile contando esclusivamente sull'adesione delle fibre alla malta. In particolare, l'andamento sale fino a registrare il suo picco in C (P^*), punto in cui la lunghezza efficace è traslata all'interfaccia fino a raggiungere la fine della lunghezza di incollaggio ($l_r=l_{eff}$).

Una volta raggiunto P^* , il carico diminuisce progressivamente a causa della diminuzione della lunghezza di incollaggio efficace ($l_r < l_{eff}$). In D la curva cambia concavità, accentuando la sua fase discendente fino a quando la fibra si distacca completamente dal supporto ($l_{eff}=0$, punto E). Oltre tale limite, la curva assume un andamento costante con valore pari a P_f , ovvero il carico dovuto esclusivamente alla sola presenza dell'attrito. Nel caso in cui le prove a taglio forniscano il tratto finale a carico costante, si consentirebbe anche di valutare la tensione tangenziale all'interfaccia tra le due fasi durante lo scorrimento:

$$\tau_f = \frac{P_f}{2nb^*l}$$

dove n è il numero dei fasci della rete applicata al supporto e $2b^*l$ è la superficie di un singolo fascio a contatto con i due strati di malta. Così facendo si può quindi calcolare il contributo dell'attrito al carico di delaminazione attraverso la relazione:

$$P^* - P_{deb} = \tau_f nb^* (l - l_{eff})$$

2.6 Risultati sperimentali

In questo paragrafo si descrivono i risultati delle prove di taglio diretto: per facilitare la consultazione, sono state suddivise in base alla tipologia della rete di rinforzo applicata all'interno dell'FRCM.

2.6.1 Prove a trazione diretta su provini con vetro G-NET 251BA.

Le prove a taglio diretto condotte sui provini con rete GNET221BA hanno fornito risultati molto lontani da quelli attesi. In tutti i casi esaminati, la rottura non è avvenuta all'interno del pacchetto di rinforzo come auspicato, ma ha coinvolto i fasci non impregnati al di fuori dell'FRCM. Tale comportamento è stato osservato non solo per questa serie di test, ma anche per altri provini con fibre di tipologia diversa come vetro G-NET 221B o carbonio C-NET 220B.

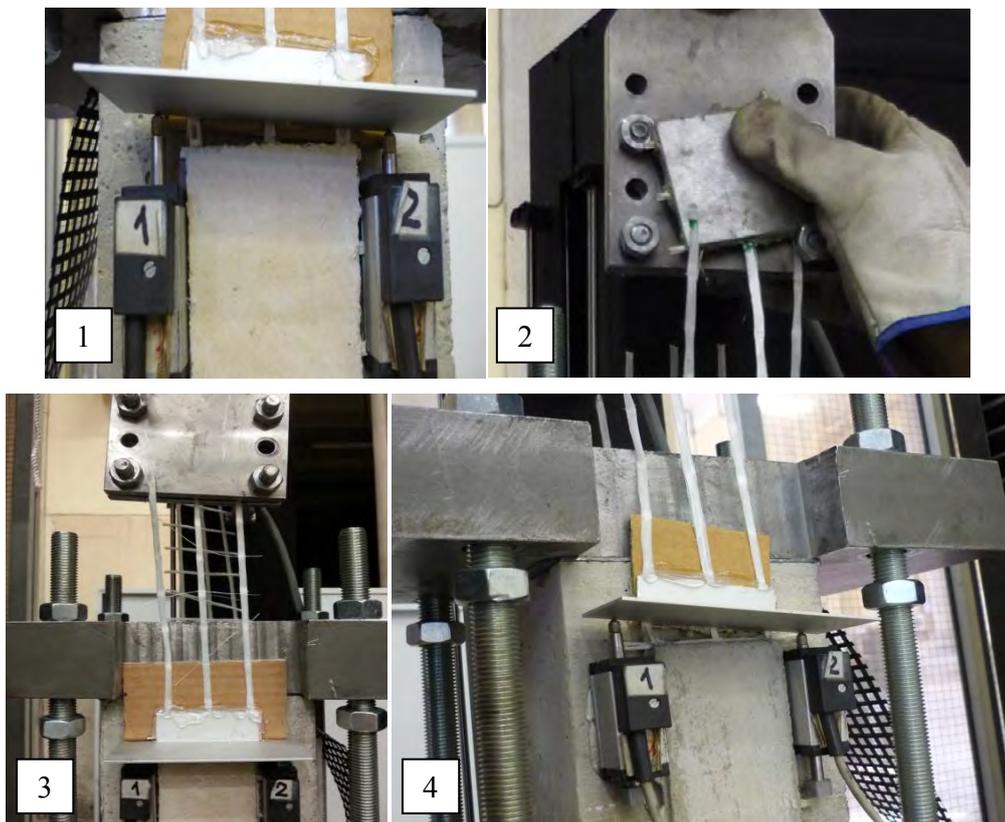


Figura 2-36 Alcuni esempi di rottura riscontrati nelle prove eseguite: 1) rottura in corrispondenza all'inizio della zona di incollaggio (DS_GNET251BA_L_330_60_1); 2) cedimento di un fascio in prossimità delle piastrine di ancoraggio (DS_GNET251BA_S_450_60_3); 3) altro esempio di cedimento in corrispondenza alle piastre (DS_GNET251BA_L_450_60_2); 4) cedimento vicino al pacchetto di rinforzo evidenziato dalla rotazione della piastrina in alluminio (DS_GNET251BA_L_330_60_2).

Come evidenziato dalle foto, in alcuni casi la crisi si è manifestata con la rottura di fasci in prossimità alla ganascia superiore del macchinario; in altri, invece, è avvenuta subito prima dell'inizio della zona inglobata nella matrice. Particolare da evidenziare è che la rottura non è sopraggiunta in maniera omogenea, bensì alcuni fasci si sono lacerati prima di altri, suggerendo quindi una tesatura non uniforme della rete all'atto del tiro. Si presume, che ad avere contribuito all'incremento localizzato degli sforzi, potrebbe essere stato il disassamento involontario dei fasci durante l'applicazione delle piastrine in alluminio. Si presentano ora i risultati delle prove suddivise per tipologia di matrice.

- **Limecrete**

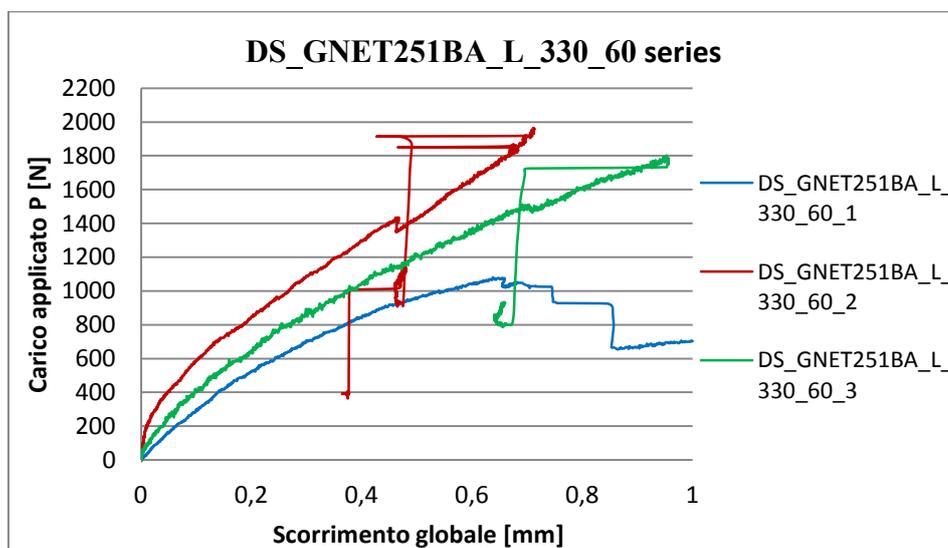


Figura 2-37 Carico-scorrimento globale dei provini DS_GNET251BA_L_330 series.

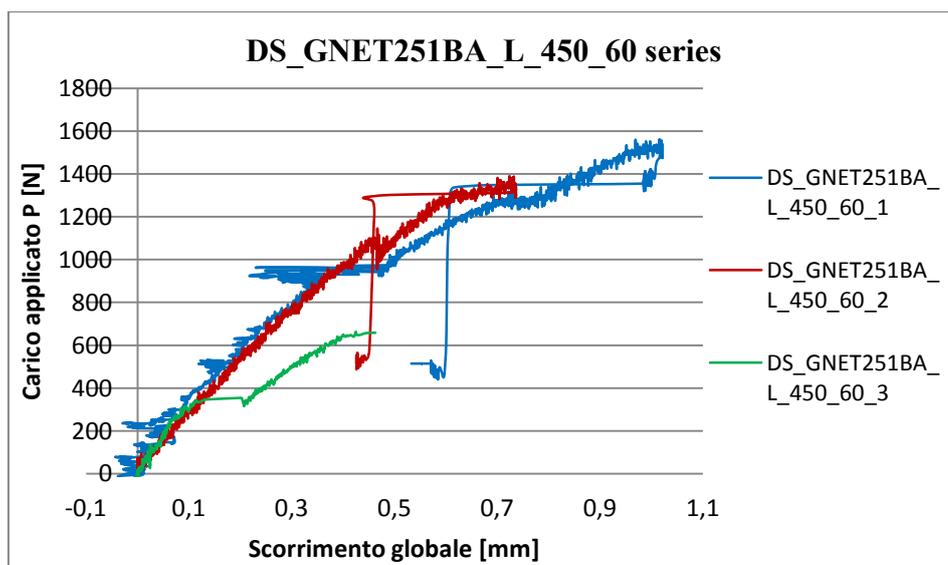


Figura 2-38 Carico-scorrimento globale dei provini DS_GNET251BA_L_450 series.

- **Rock S**

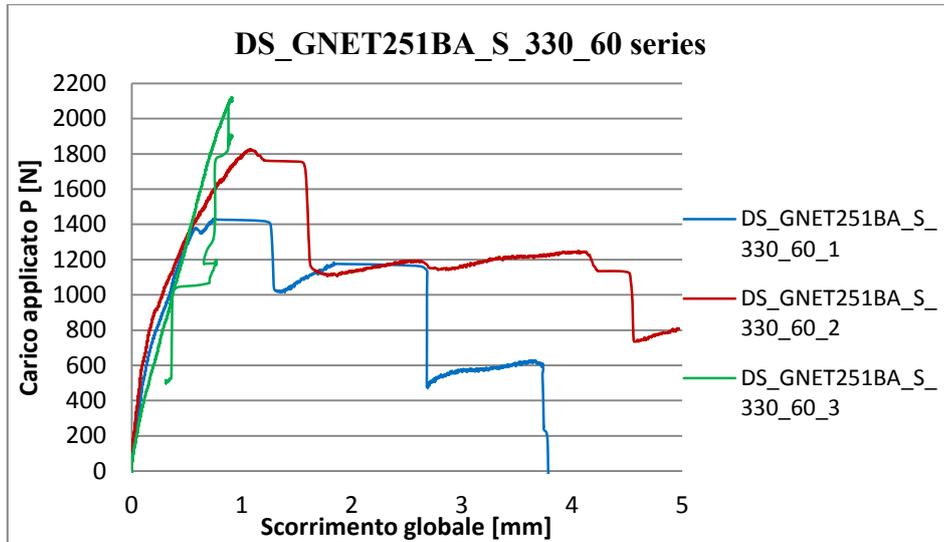


Figura 2-39 Carico-scorrimento globale dei provini DS_GNET251BA_S_330 series.

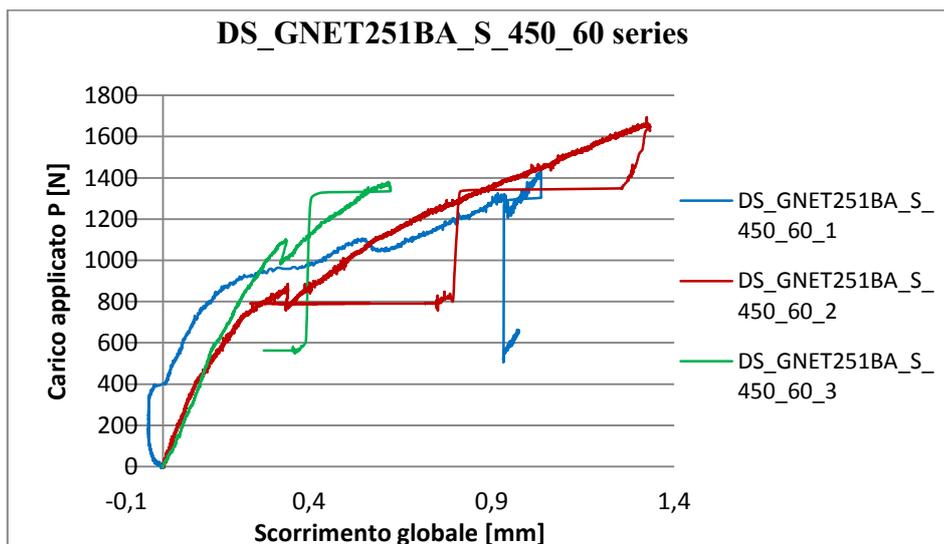


Figura 2-40 Carico- scorrimento globale dei provini DS_GNET251BA_S_450 series.

La rottura dei fasci fuori dalla zona di incollaggio non permette di indagare le caratteristiche di resistenza del pacchetto di rinforzo: in tutte le prove condotte, lo strato esterno di malta non è stato danneggiato in modo visibile e neppure sono stati individuati scorrimenti evidenti delle fibre all'interno della matrice.

I grafici delle 12 prove condotte confermano l'impossibilità di ricavare qualche informazione utile per approfondire l'interazione di questa tipologia di vetro con le varie matrici applicate. L'andamento del carico è molto distante da quello ideale degli FRCM (§2.5): non si riesce ad individuare l'inizio del processo di delaminazione, l'apporto di

resistenza dato dall'attrito e il ramo di softening. Nei casi in esame, la rottura è infatti di tipo fragile. Eccezione fatta per alcuni casi, nelle quattro serie di test presentati si raggiungono valori del carico di picco abbastanza simili tra loro. Tale aspetto è collegato alla rottura dei fasci, i quali hanno ceduto una volta raggiunta la tensione di rottura del materiale. Paragonando invece i valori di rottura delle prove di taglio diretto con quelli ricavati dalle prove a trazione del vetro GNET251, si può constatare un raggiungimento di carichi di rottura più contenuti nel primo caso: questo sembra quindi confermare l'ipotesi di un disassamento dei fasci nei provini. Se il tiro fosse stato ripartito in modo costante e se la rottura avesse caratterizzato ancora i fasci fuori dalla lunghezza di incollaggio, si sarebbero infatti raggiunti carichi di picco simili a quelli ottenuti durante la caratterizzazione del materiale.

Concludendo, si può infine dedurre che la configurazione di prova impiegata nei test appena presentati non è la soluzione adatta per analizzare questo tipo di compositi. Si deve perciò studiare una soluzione che permetta di distribuire in modo omogeneo la forza di tiro alle fibre fuori dalla zona impregnata, con lo scopo di sollecitare esclusivamente quelle inglobate della matrice e scongiurare così una rottura prematura della fase resistente a causa dell'incremento localizzato della tensione di trazione.

2.6.2 Prove a trazione diretta su provini G-NET 221 B

I provini con vetro G-NET 221 B sono stati confezionati esclusivamente applicando la matrice "ROCK S" , caratterizzati da lunghezze di incollaggio di 330 mm e 450 mm.

Le prove a taglio diretto hanno fornito dei risultati deludenti come riscontrato per le prove con la rete in vetro G-NET 251 BA. In modo analogo, la crisi è sopraggiunta per rottura dei fasci nella zona esterna alla lunghezza incollata al calcestruzzo, in particolare localizzata in prossimità delle piastrine in alluminio o in corrispondenza dell'inizio del pacchetto di rinforzo. Inoltre, in un provino (DS_GNET221B_S_450_60_1) non è stato possibile condurre la prova di trazione, in quanto i fasci si sono sfibrati prima di potere procedere con la tesatura degli stessi.

In seguito a tale episodio e ad una prova di trazione condotta sul provino DS_GNET221B_S_330_60_1 con esiti negativi (risultati omessi), si è pensato di modificare leggermente la configurazione di prova applicando una resina epossidica alla rete fuori dal rinforzo. Oltre ad un fine protettivo per le fibre che si sono rivelate molto delicate da maneggiare, tale soluzione è stata introdotta pensando che la resina avrebbe aiutato a distribuire la forza di trazione in modo omogeneo a tutti i fasci, evitando quindi incrementi localizzati della tensione con il conseguente cedimento delle fibre fuori dal rinforzo. Una volta constatato una tendenza dei fasci a lacerarsi in prossimità alle piastrine in alluminio, alcuni provini sono stati privati delle stesse e il collegamento alla strumentazione di prova è stato realizzato imbullonando le piastre di ancoraggio direttamente alla zona trattata con la resina; per identificare i test condotti secondo questa modalità, è stata introdotta la lettera "b" affiancata al numero del provino considerato.

Tuttavia questi accorgimenti non sono stati sufficienti per evitare una rottura secondo le modalità precedentemente descritte (figure 2-41).





Figure 2-41 Particolari delle rotture nei provini testati. 1) rottura vicino alle piastrine in alluminio (DS_GNET221B_S_330_60_1 rete non trattata); 2)-3) rottura del DS_GNET221B_S_450_60_2 in sempre in corrispondenza alla ganascia superiore; 4) cedimento delle fibre al secondo tentativo di tiro del provino DS_GNET221B_S_450_60_2; 5) rottura dei fasci all'inizio della zona incollata (DS_GNET221B_S_330_60_3).

Dei quattro provini trattati con la resina, uno (DS_GNET221B_S_450_60_3) è stato interessato dalla rottura delle fibre fuori dal pacchetto per un carico molto limitato (215,63 N), risultato lontano rispetto ai carichi evidenziati dalla resistenza della rete durante le prove a trazione. I test rimanenti, pur sempre manifestando una crisi diversa da quella attesa per l'FRCM, hanno dato carichi al picco vicini a quelli di rottura delle fibre in vetro: si preferisce pertanto riportare solamente i risultati relativi a queste tre prove (grafico in figura 2-42).

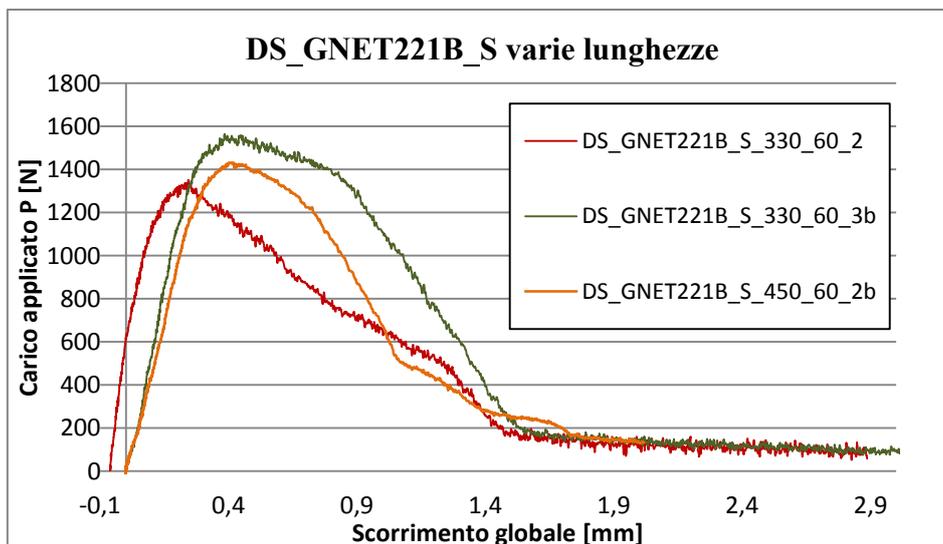


Figura 2-42 Risultati dei test di taglio diretto sui provini DS_GNET221B.

Come visibile dal grafico sopra riportato, due provini hanno una lunghezza di incollaggio par a 330 mm mentre uno solo è caratterizzato da un rinforzo lungo 450 mm.

Si nota che i carichi raggiunti al picco sono all'incirca confrontabili con i carichi di rottura delle fibre in vetro.

Sulla base degli accorgimenti adottati e dei dati raccolti, si presume quindi che il fallimento delle prove non sia imputabile al solo disallineamento tra i fasci, ma è da associare anche ad altri fattori, come le caratteristiche intrinseche della fase di rinforzo, la cui resistenza non si è dimostrata sufficiente per indagare l'interazione delle fibre con la matrice cementizia.

2.6.3 Prove a trazione diretta su provini STEEL-NET 190

Si presentano ora i risultati dei test condotti sui provini con trefoli in acciaio “STEEL-NET 190” e matrice cementizia tipo “ROCK W”.

A differenza di quanto riscontrato nel caso delle fibre in vetro, la crisi ha interessato il sistema di rinforzo: in particolare, per un solo provino (DS_STEELNET190_W_330_60_1) la rottura si è manifestata attraverso l'espulsione dello strato esterno di matrice (splitting) mentre, nei casi rimanenti, si è riscontrato un distacco improvviso dell'intero pacchetto dal supporto in calcestruzzo.

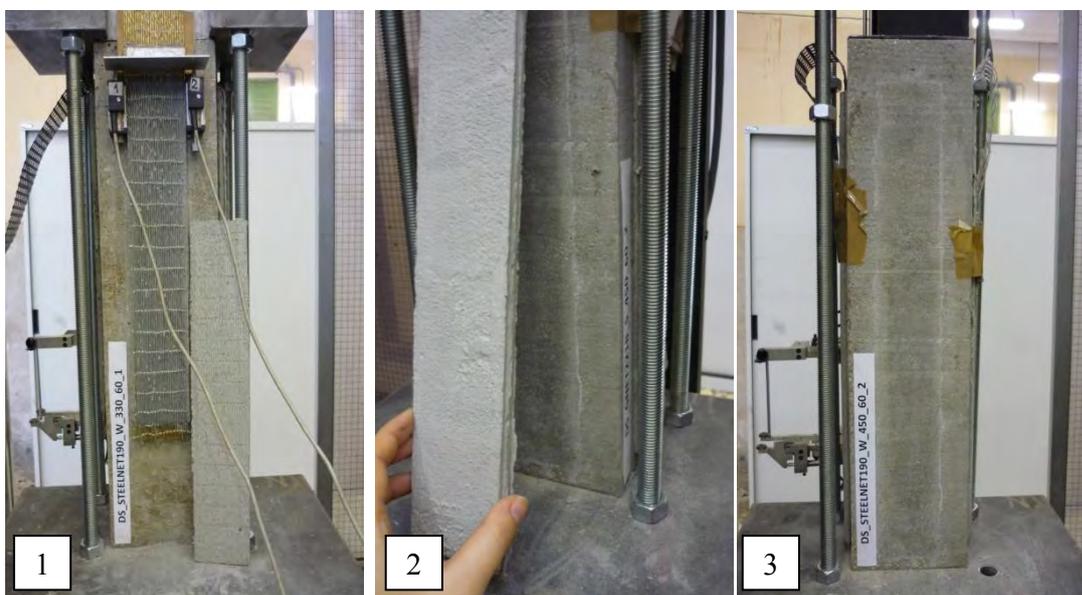


Figura 2-43 Particolari delle rotture dei provini con rete in acciaio STEEL NET 190: 1)

La superficie dei parallelepipedi non è stata sottoposta ad alcun trattamento superficiale, in modo da simulare l'applicazione del sistema di rinforzo secondo una modalità simile a quella prevista in cantiere. I numerosi casi che hanno visto un distacco completo del composito dal supporto e l'assenza di residui di matrice sulla faccia del parallelepipedo, hanno messo in evidenza la necessità di rendere la superficie del calcestruzzo più scabra al fine di migliorare l'aderenza della matrice al supporto. Così facendo, si riuscirebbe con molta probabilità ad evitare sì il distacco dell'intero composito, ma potrebbero innescarsi altri meccanismi di crisi molto pericolosi, come quello di splitting: a tal proposito, l'applicazione di tessuti in acciaio con una densità minore dei trefoli potrebbe risultare una buona soluzione per migliorare la penetrazione della matrice e favorire l'adesione tra i due strati.

Si discutono ora i risultati delle prove di taglio diretto, distinti in base alla lunghezza di incollaggio.

Come visibile dal grafico figura 2-44, le curve sono caratterizzate da un tratto lineare, al quale segue un andamento costante che termina con una repentina caduta. Tuttavia si presume che il tratto costante non sia rappresentativo del reale comportamento del rinforzo, bensì sia conseguenza dell'incapacità della strumentazione di prova di cogliere il distacco totale del pacchetto, imputabile alla bassa frequenza di aggiornamento dei dati campionati.

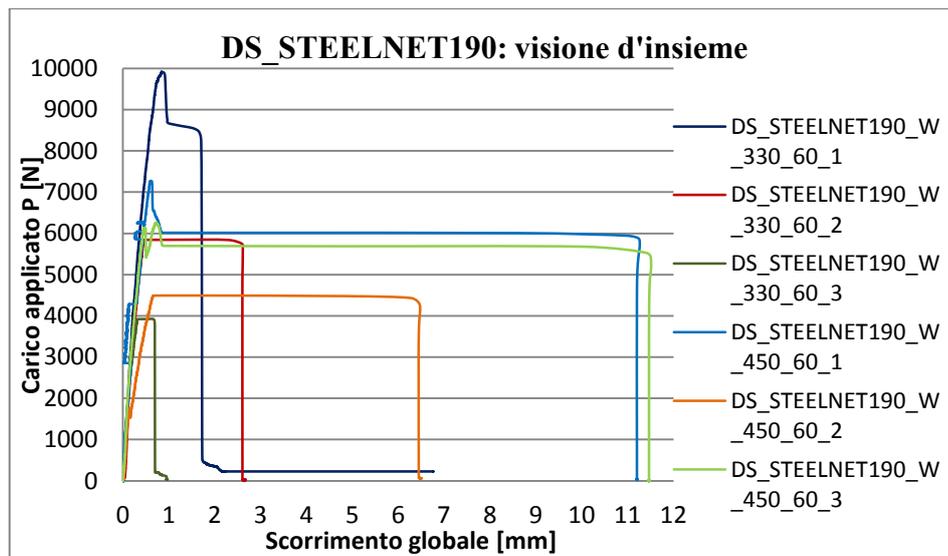


Figura 2-44 Grafico riassuntivo delle prove eseguite sui provini DS_STEELNET190.

- **Lunghezza di incollaggio pari a 450 mm.**

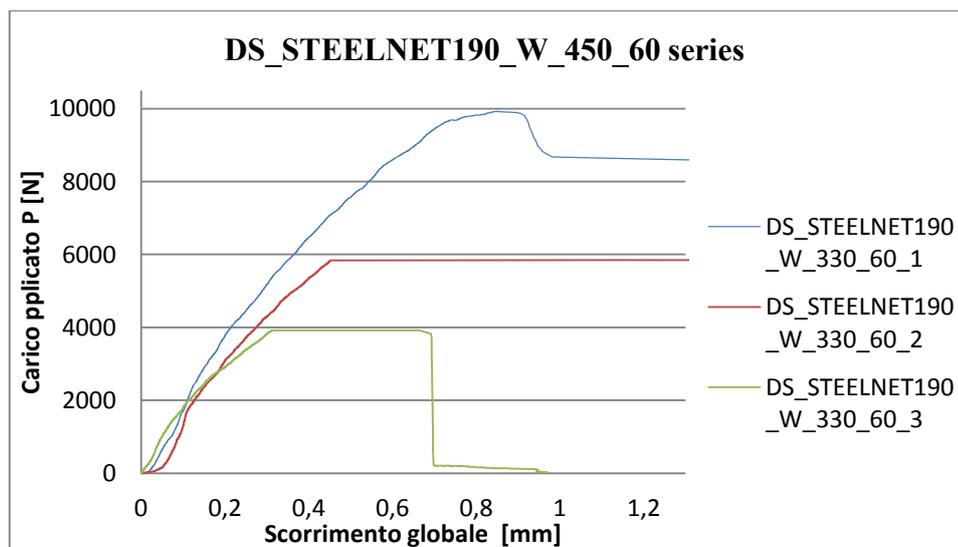


Figura 2-45 Risultati dei test di taglio diretto sui provini DS_STEELNET_W_450_60.

- **Lunghezza di incollaggio pari a 330 mm.**

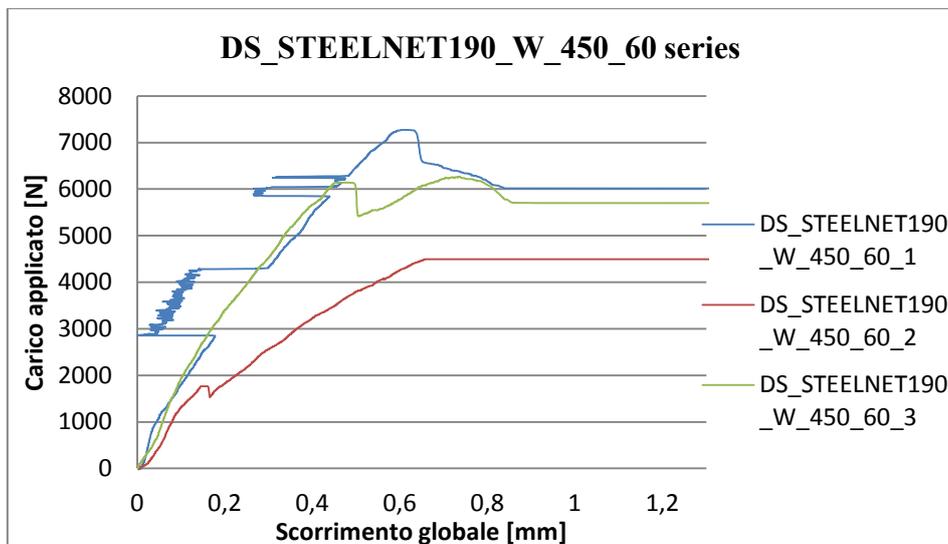


Figura 2-46 Risultati dei test di taglio diretto sui provini DS_STEELNET_W_330_60.

Dal grafico in figura 2-46, si osserva che la curva, relativa al provino DS_STEELNET190_W_450_60_1, presenta alcune deviazioni del carico lungo tratto lineare: tali discrepanze sono dovute ad una lettura sbagliata da parte di un potenziometro, il quale ha registrato dati relativi ad uno spostamento non congruente con quello reale a causa del mal posizionamento dei fili sul pannello della strumentazione di prova.

Da un primo confronto tra i due grafici (figura 2-45 e figura 2-46), si nota che la media dei valori al picco, raggiunti dai test nelle due lunghezze di incollaggio considerate, sono all'incirca confrontabili tra loro: l'unica eccezione è rappresentata dal campione DS_STEELNET190_W_330_60_1, ovvero il caso in cui si è manifesta la rottura secondo splitting, nel quale il carico al picco è sensibilmente più alto rispetto a quelli raggiunti durante gli altri test.

Focalizzando quindi l'attenzione sulle prove che hanno evidenziato una rottura per distacco totale dell'intero rinforzo, una variabilità minore dei carichi al picco permetterebbe di fare qualche considerazione in merito alla lunghezza di incollaggio minima efficace. Un carico simile con $l_{inc}=330$ e $l_{inc}=450$ suggerirebbe il fatto che la lunghezza di ancoraggio efficace possa essere minore rispetto a quella di incollaggio dei rinforzi testati. In particolare, si presume che il carico al picco dei vari test coincida con l'inizio del processo di delaminazione, in contemporanea all'istaurarsi in corrispondenza

all'interfaccia della lunghezza efficace (in questo caso, non tra fibra e matrice, bensì tra matrice e supporto). Una volta raggiunto tale limite, a causa della cattiva aderenza tra le due fasi, il rinforzo non supporta ulteriori incrementi di carico, comportando così una propagazione improvvisa della frattura e il distacco dell'intero pacchetto. Se la lunghezza di incollaggio fosse stata maggiore rispetto ai 330 o 450 mm applicati al cls, si avrebbero ottenuto carichi al picco diversi, in quanto ciò avrebbe portato tutta l'interfaccia a partecipare al trasferimento degli sforzi dai trefoli al supporto. Tuttavia, per avere una conferma di quanto supposto, si dovrebbe analizzare il profilo delle deformazioni, il quale rappresenta l'unica possibilità per determinare l'effettiva zona di trasferimento degli sforzi all'interno del composito.

Nulla si può dire, invece, in merito all'interazione matrice - fase di rinforzo a causa del meccanismo di rottura intervenuto.

Concludendo, il comportamento di questo tipo di compositi si è dimostrato anche in questo caso non congruente a quanto previsto al §2.5.

2.6.4 Prove a trazione diretta su provini C-NET 220 B

L'ultima serie di prove indaga il comportamento dei composti aventi come fase resistente la rete in carbonio "C NET 220 B", applicata mediante due tipologie di malta differente, la "ROCK W" e la "ROCK S". Come per le altre prove descritte in precedenza, per ogni tipologia si sono considerate due lunghezze di incollaggio, pari a 330 e 450 mm.

Contrariamente a quanto riscontrato con le altre tipologie di fibre, generalmente la rottura non ha interessato la fibra nuda, bensì, nella maggior parte dei casi, la crisi è intervenuta per scorrimento della fibra all'interno del pacchetto di rinforzo. Tuttavia è da evidenziare che, nel caso della matrice Rock W, alcune prove si sono rotte in modo non conforme, dando quindi un andamento del carico non congruente a quello ideale degli FRCM. D'altra parte, nel caso dei test con matrice Rock S, i sei test condotti hanno fornito risultati soddisfacenti e, pertanto, è stato possibile quindi indagare le caratteristiche del rinforzo ed avanzare qualche considerazione in merito all'interazione delle fibre in carbonio con la malta applicata.

Per descrivere in maniera puntuale i risultati ottenuti dalle prove, si riportano ora i risultati divisi in base alla tipologia di matrice cementizia applicata.

2.6.4.1 Matrice cementizia "ROCK W"

Per ottenere un tiro uniforme di tutti i fasci inglobati nella matrice e impedire una rottura degli stessi fuori dal rinforzo, le fibre escluse dalla lunghezza di incollaggio sono state impregnate con uno strato di resina epossidica. Tuttavia, pensando che tale soluzione non fosse sufficiente nell'impiego di fibre in carbonio a causa dell'elevata resistenza a trazione delle stesse, si sono condotte due prove senza che le fibre fossero trattate: i risultati delle due prove testate (DS_CNET220B_W_450_60_2 e DS_CNET220B_W_450_60_3) hanno però smentito tale possibilità, manifestando una rottura dei fasci in prossimità all'inizio della zona incollata. Pertanto, si è deciso di non riportare nell'elaborato l'analisi delle suddette prove.

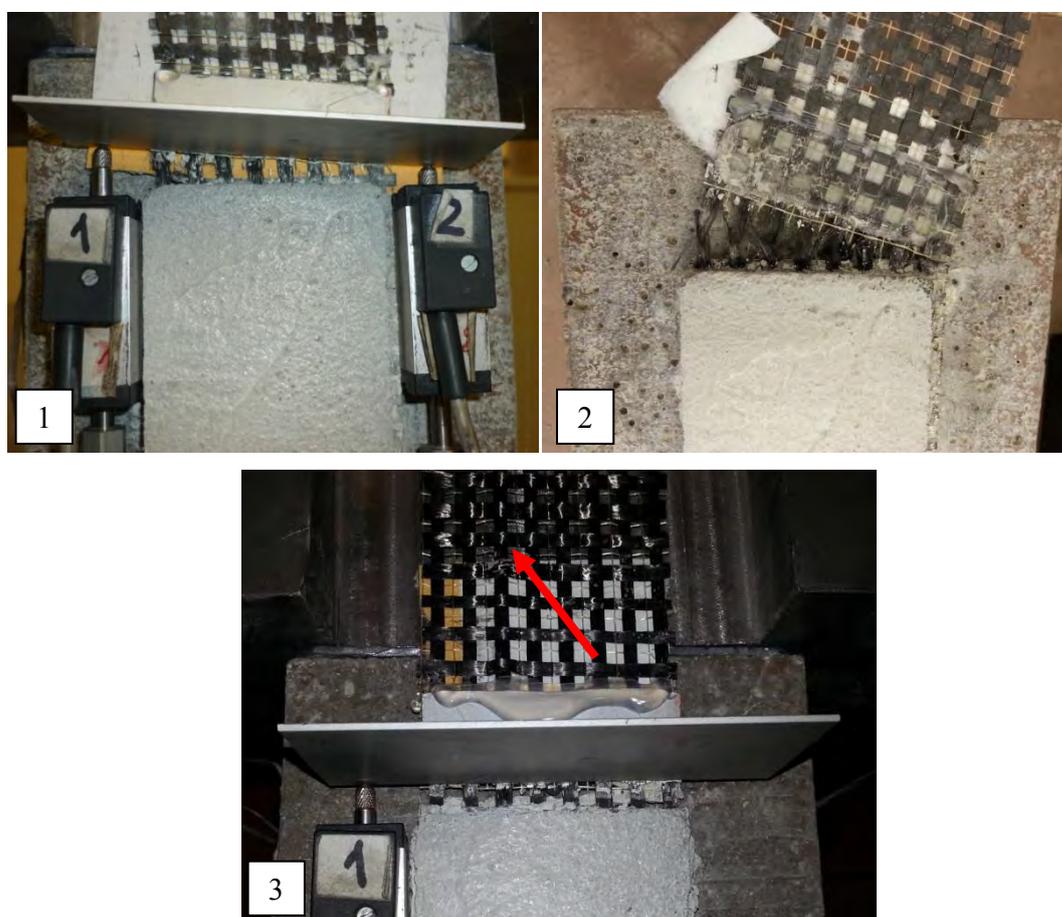


Figura 2-47 Particolare delle rotture delle prove con fibre non trattate: 1-2) test ; 3) test DS_CNET220B_W_450_60_3 con cedimento di un fascio (evidenziato dalla freccia rossa).

Per quanto riguarda gli altri provini trattati preliminarmente con la resina, la rottura è avvenuta per scorrimento della rete all'interno del composito, ben evidenziata dalla salita dei fasci visibile nel prolungamento alla fine della lunghezza di incollaggio.

Nella maggior parte dei casi, la salita non è avvenuta in maniera uniforme, imputabile ad una possibile rottura dei fasci all'interno del pacchetto (figura 2-48).

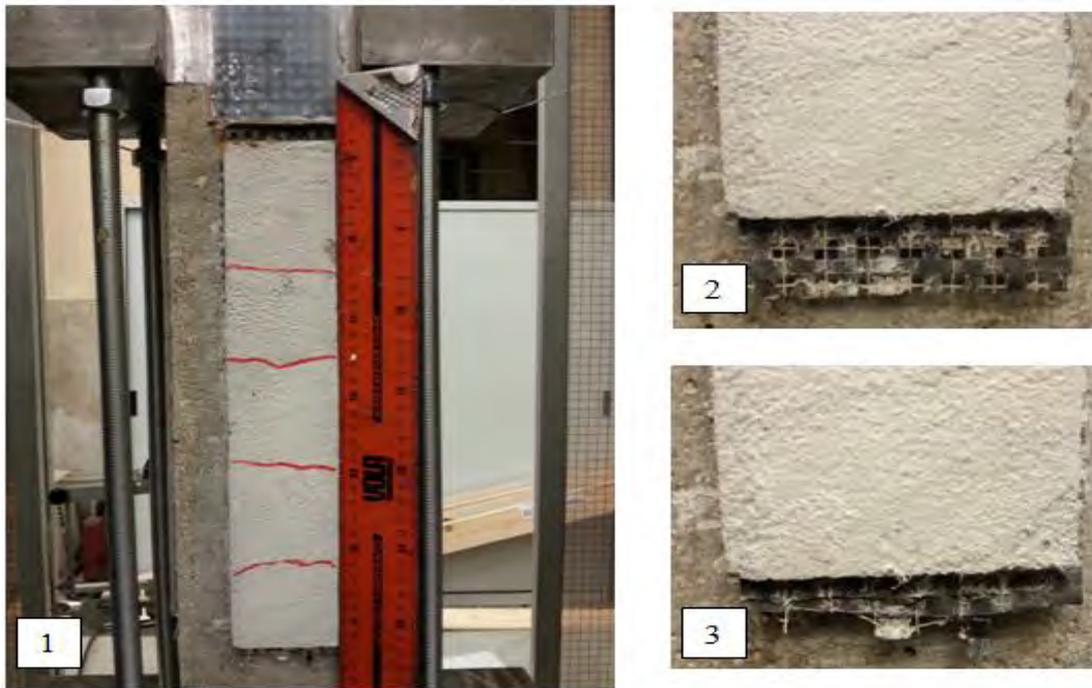


Figura 2-48 Particolari della rottura del provino DS_CNET220B_W_330_60_3. 1) trattamento superficiale della rete con resina. 2-3) scorrimento dei fasci all'interno tra i due strati di matrice.

Sono da segnalare 2 rotture anomale: nel caso del test DS_CNET220B_W_330_60_1T, la rottura è intervenuta poco all'interno della lunghezza di incollaggio, mentre nel caso della prova DS_CNET220B_W_330_60_2, una parte dello strato esterno di matrice si è staccata dal supporto (si pensa causata dal non perfetto allineamento tra provino e ganascia, causando quindi un leggero momento agente sulle fibre all'atto del tiro).



Figura 2-49 1) particolare della rottura del test DS_CNET220B_W_330_60_1T. 2-3) rottura per distacco dello strato esterno di matrice durante la prova DS_CNET220B_W_330_60_2.

I risultati delle prove sono riportati nel grafico in figura 2-50.

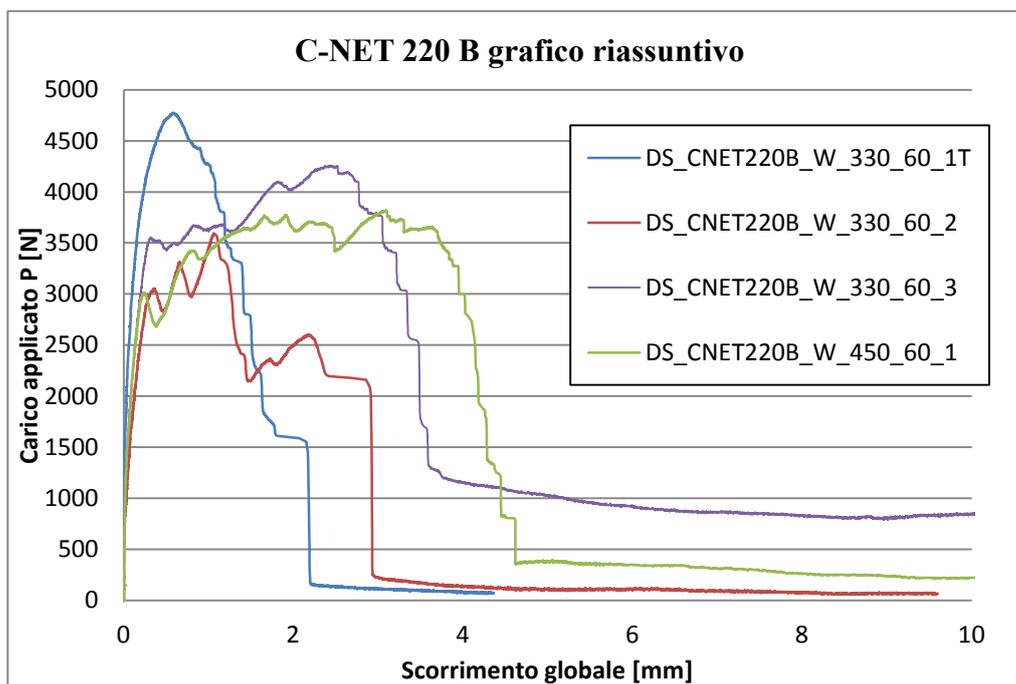


Figura 2-50 Grafico riassuntivo delle prove eseguite sui provini DS_CENT220B (varie misure della lunghezza di incollaggio).

Analizzando i profili del carico, subito si nota una incongruenza della prova DS_CNET220B_W_330_60_1T rispetto agli altri casi presentati: in particolare, si individua un carico al picco molto elevato, raggiunto in maniera pressoché lineare. Tale andamento, unita alla rottura non conforme del provino rispetto al comportamento tipico degli FRCM, non permette un confronto con le altre prove di taglio diretto. Pertanto, esclusa tale prova e non potendo analizzare i risultati degli altri campioni testati senza che la rete fosse stata in precedenza impregnata con la resina, non è possibile indagare l'effetto di lunghezze di incollaggio differenti a causa del limitato numero di test per tipologia di composito. Pertanto, sono solamente possibili alcune osservazioni di carattere generale.

Solo due prove (DS_CNET220B_W_330_60_3 e DS_CNET220B_W_450_60_1) mostrano andamenti simili a quelli attesi, nei quali però non è possibile distinguere con esattezza l'inizio del possibile punto di delaminazione e la componente imputabile all'attrito.

Per quanto riguarda i tratti finali delle curve, si evidenziano valori molto discordanti nei vari casi: essendo caratterizzati dalla sola componente d'attrito che si sviluppa tra rete e matrice durante lo scorrimento, si pensa che questi risultati siano dovuti dal diverso

numero di fasci longitudinali che hanno effettivamente manifestato uno scorrimento all'interno del sistema di rinforzo. In particolare, analizzando le foto relative al prolungamento della rete alla fine della lunghezza di incollaggio, si sono contati 7 fasci saliti nel caso della prova DS_CNET220B_W_330_60_3, mentre nella DS_CNET220B_W_330_60_2 si presume che la componente d'attrito sia imputabile solamente al tratto del pacchetto rimasto integro in seguito al distacco dello strato esterno. Nel caso della DS_CNET220B_W_450_60_1, non avendo evidenziato particolari salite delle fibre nel tratto monitorato, si presume che alcuni fasci si siano rotti all'interno della lunghezza incollata e che quindi l'attrito sia collegabile all'interazione di queste porzioni con la matrice.

Di seguito, sono ora proposti i risultati riguardanti le prove effettuate sui compositi con matrice cementizia Rock S.

2.6.4.2 Matrice cementizia "ROCK S".

Contrariamente a quanto accaduto per i compositi con matrice Rock W, in questa serie di prove non sono state riscontrate rotture anomale della fase resistente e la crisi è intervenuta all'interfaccia tra la rete in carbonio e la matrice, causando uno scorrimento dei fasci all'interno del pacchetto. Per tutte e sei le prove di taglio diretto (suddivisi anche in questo caso in tre prove aventi lunghezza di incollaggio pari a 330 mm e altre tre con lunghezza pari a 450 mm), le fibre esterne al rinforzo sono state trattate con resina epossidica in modo da favorire una ripartizione costante del tiro all'interno della rete.

Come accaduto nei casi precedenti, in alcuni test si è notato che lo scorrimento della fase resistente non coinvolgeva tutti e 8 i fasci longitudinali applicati al supporto: dopo l'esecuzione delle prove, avendo osservato l'assenza della salita da parte di alcuni fasci alla fine del rinforzo ma riscontrando invece uno spostamento degli stessi in sommità (riscontrabile grazie alla progressiva salita della piastrina in alluminio applicata per la lettura dei potenziometri), si è rimosso lo strato esterno di matrice cementizia consentendo di individuare delle rotture subite dalle fibre all'interno del rinforzo (figura 2-51/6). Ciò non può essere dimostrato con assoluta certezza, in quanto il distacco della malta superiore potrebbe avere favorito la lacerazione di tali fasci, suggerendo quindi un meccanismo di rottura diverso da quello verificatosi durante la prova. Tuttavia, procedendo alla rottura dei pacchetti anche nei casi in cui la rete aveva presentato uno

scorrimento omogeneo nel suo tratto finale, non si sono riscontrate fibre danneggiate, rafforzando quindi quanto affermato in precedenza (figura 2-51/3).



Figura 2-51 1-2) Salita omogenea di tutte i fasci durante il test DS_CNET220B_S_330_60_1 .3) Rottura del pacchetto che non ha evidenziato cedimenti dei fasci. 4-5) Salta disomogenea della rete durante la prova DS_CNET220B_S_450_60_3 . 6) Rottura del pacchetto che ha evidenziato una lacerazione subita dai fasci che non avevano presentato scorrimento in fig.4 (freccia rossa).

Per quanto riguarda i profili del carico ricavati dalle suddette prove di taglio diretto, si riescono ad individuare i tratti tipici del comportamento caratterizzante i compositi a matrice cementizia.

Si riporta ora una breve descrizione dei risultati in base alla lunghezza di incollaggio considerata.

- **Lunghezza di incollaggio: 330 mm**

Le tre curve mostrano andamenti e valori del carico all'incirca confrontabili tra loro. In modo particolare, si riesce a distinguere abbastanza chiaramente il tratto lineare elastico,

l'inizio del processo di delaminazione e l'incremento lineare conferito dall'attrito sviluppato tra fasci e matrice durante lo scorrimento. Una volta raggiunto il valore di picco P^* , il carico subisce una caduta più marcata rispetto all'andamento ideale degli FRCM (§2.5). Focalizzando invece l'attenzione nei tratti caratterizzati dalla sola influenza dell'attrito, i tre casi esaminati mostrano valori diversi, imputabili, si presume, al diverso numero di fasci che hanno partecipato allo scorrimento della fase resistente all'interno del pacchetto.

In figura 2-52 si riportano le tre curve carico-scorrimento globale, mentre in tabella 2-24 sono trascritti i carichi al picco individuate nelle prove.

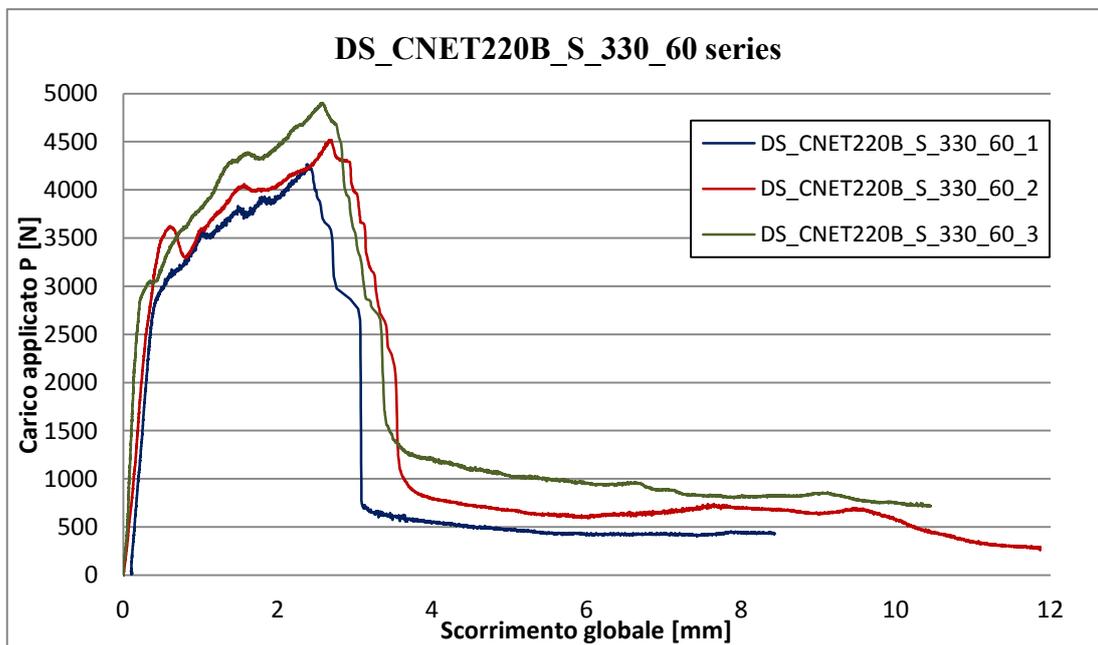


Figura 2-52 Risultati dei test di taglio diretto sui provini DS_CNET220B_S_330_60.

prova	P^* [N]
DS_CNET220B_S_330_60_1	4262
DS_CNET220B_S_330_60_2	4514
DS_CNET220B_S_330_60_3	4903

Tabella 2-24 Carichi al picco per le tre prove di taglio diretto DS_CNET220B_S_330_60.

- **Lunghezza di incollaggio: 450 mm**

Le stesse considerazioni fatte per le prove condotte sui provini con lunghezza di incollaggio di 330 mm possono essere estese anche a quelle caratterizzate da un rinforzo pari a 450 mm.

Rispetto alle prove precedentemente analizzate, i carichi al picco risultano maggiori, mentre l'inizio del possibile punto di delaminazione (suggerito dal cambiamento di pendenza delle curve) si aggira pressappoco attorno agli stessi valori in entrambi i casi.

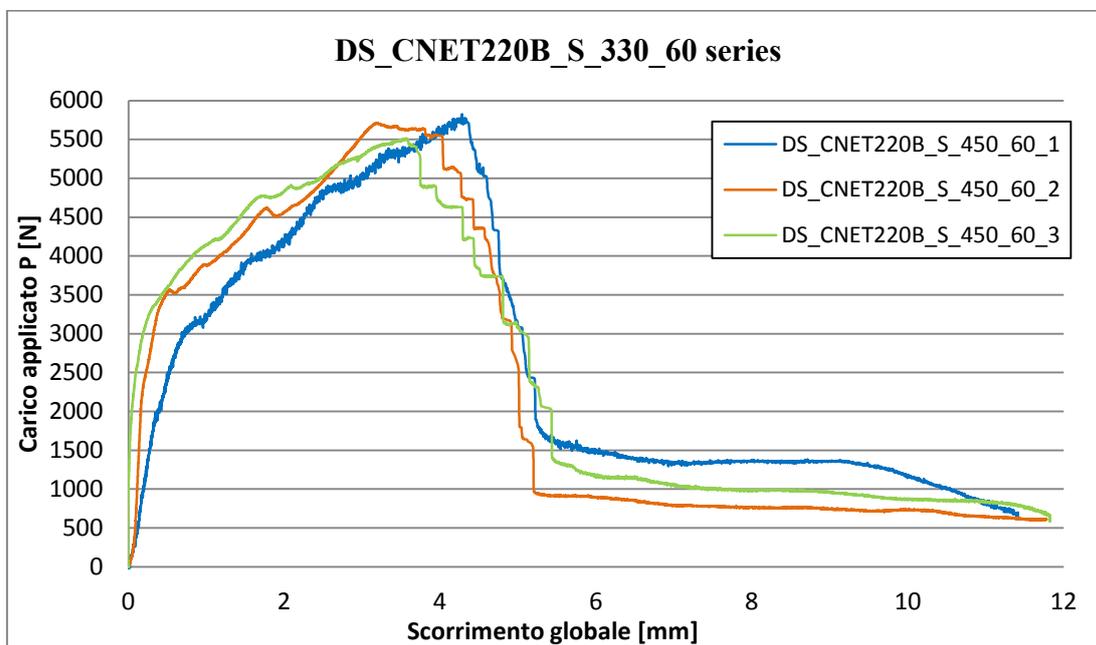


Figura 2-53 Risultati dei test di taglio diretto sui provini DS_CNET220B_S_450_60.

prova	P* [N]
DS_CNET220B_S_450_60_1	5824
DS_CNET220B_S_450_60_2	5716
DS_CNET220B_S_450_60_3	5513

Tabella 2-25 Carichi al picco per le tre prove di taglio diretto DS_CNET220B_S_450_60.

- **Effetto della diversa lunghezza di incollaggio**

Mettendo a confronto tutte le prove in un unico grafico (figura 2-54), è evidente la sovrapposizione tra i due casi esaminati riscontrabili nella prima parte del profilo del carico: in particolare, il tratto non lineare, corrispondente all'istaurarsi della lunghezza di incollaggio efficace all'interno del composito, interessa valori del carico compresi tra i 2800 e i 3500 N in entrambe le varianti testate.

Come annunciato in precedenza, la risposta del carico non è la medesima in termini di contributo d'attrito: infatti, congruentemente a quanto atteso, l'incremento del carico è maggiore nel caso del composito avente lunghezza di 450 mm. Questa differenza trova spiegazione analizzando il trasferimento degli sforzi all'interno dei compositi a matrice cementizia: riprendendo i concetti espressi al §2.5, tale tratto è imputabile alla

traslazione della lunghezza efficace lungo l'interfaccia fibre-matrici e allo sviluppo di tensioni tangenziali in corrispondenza alle zone in cui si è verificato il distacco tra le due fasi del rinforzo. Essendo la lunghezza efficace presumibilmente la stessa nei due casi analizzati, più lunga è la lunghezza di incollaggio, e maggiore sarà il tratto in cui l'attrito può manifestarsi, traducendosi così un incremento del carico maggiore nel caso con $l_{inc}=450$ mm.

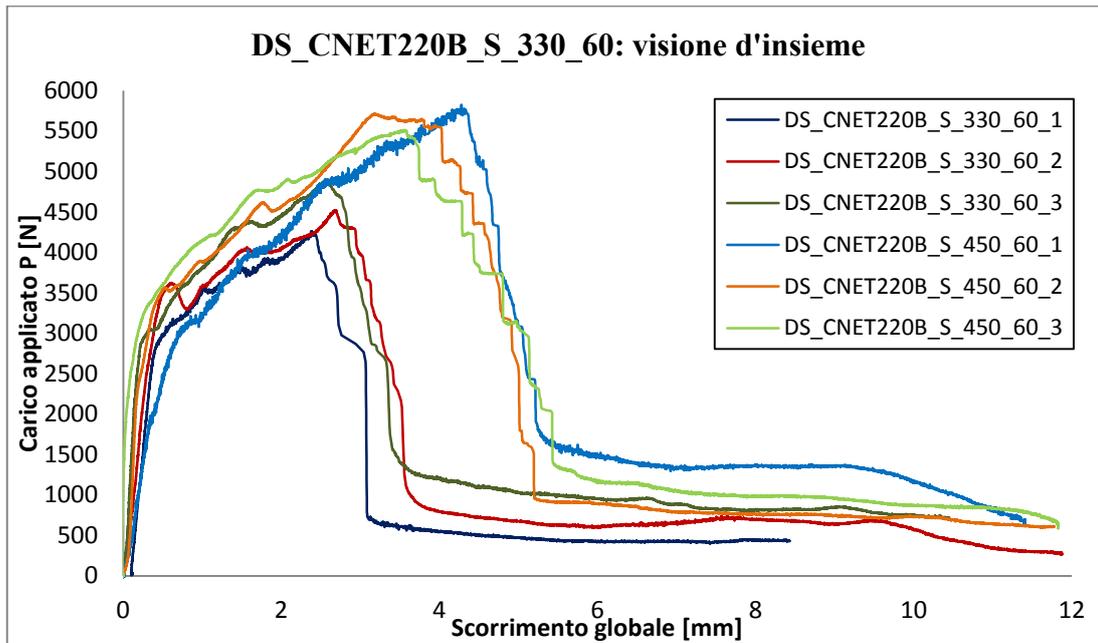


Figura 2-54 Grafico riassuntivo delle prove eseguite sui provini DS_CNET220B_S

Sulla base dei valori del carico al picco registrati nelle varie prove, è possibile quindi ricavare la tensione massima agente sui fasci della rete (tabella 2-26).

prova	P* [N]	t* [mm]	b* [mm]	num. fasci	σ^* [MPa]
DS_CNET220B_S_330_60_1	4262	0,05	3,5	8	3044,09
DS_CNET220B_S_330_60_2	4514	0,05	3,5	8	3224,40
DS_CNET220B_S_330_60_3	4903	0,05	3,5	8	3502,19
DS_CNET220B_S_450_60_1	5824	0,05	3,5	8	4159,99
DS_CNET220B_S_450_60_2	5716	0,05	3,5	8	4082,82
DS_CNET220B_S_450_60_3	5513	0,05	3,5	8	3937,47

Tabella 2-26 Valori delle tensioni ai fasci ricavate in base al P*.

Per indagare le tensioni all'interno della rete di rinforzo, il carico al picco P^* è stato normalizzato in funzione dell'area nominale dei fasci forniti dal produttore.

L'effetto di lunghezze di incollaggio differenti è pertanto visibile anche in termini di tensioni, come mostra la figura 2-55: si nota infatti un aumento della tensione all'interno dei fasci con lunghezza di incollaggio pari a 450 mm rispetto al primo caso.

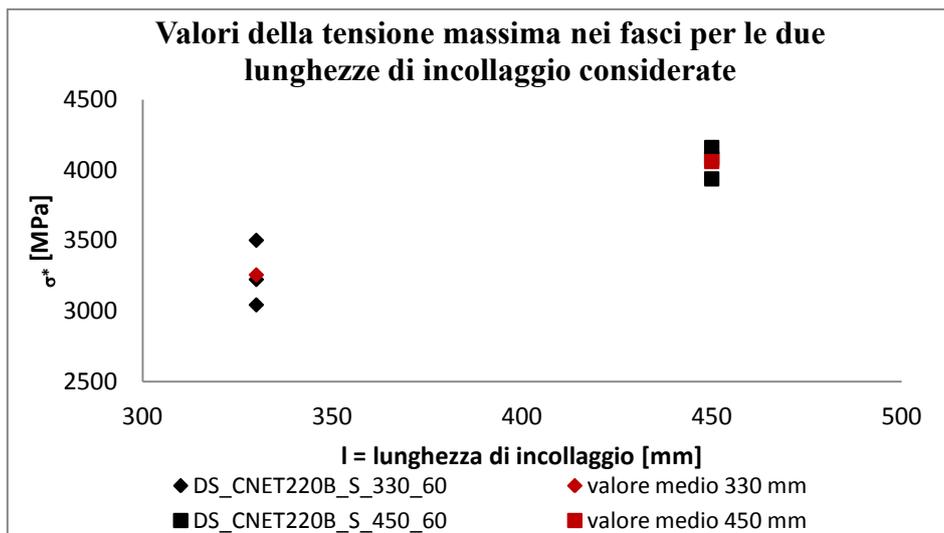


Figura 2-55 Valori delle tensioni massime corrispondenti ai carichi al picco P^* al variare delle lunghezze di incollaggio considerate.

Facendo sempre riferimento alla figura 2-54 e spostando il paragone nel tratto a carico costante, in due delle tre prove considerate con $l_{inc}=330\text{mm}$ si possono riscontrare carichi leggermente inferiori rispetto all'altra tipologia di provini testata. Tale differenza è ancora una volta collegata alla superficie di contatto tra fibre e matrice, la quale è maggiore nel caso dei compositi lunghi 450 mm.

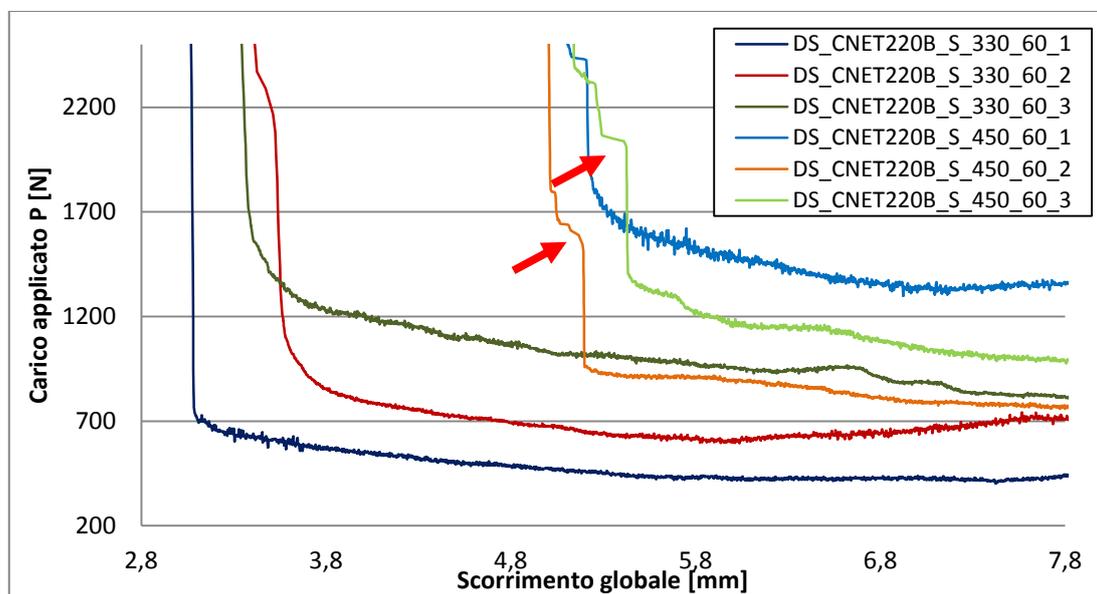


Figura 2-56 Particolare del grafico in figura 2-57.

Ingrandendo la parte in cui i carichi tendono a stabilizzarsi assumendo un valore all'incirca costante (figura 2-56), si possono tuttavia condurre alcune osservazioni in merito al comportamento riscontrato nei due casi.

La fase di decadimento del carico, relativa ai campioni DS_CNET220B_S_450_60_2 e DS_CNET220B_S_450_60_3, mostra dei piccoli tratti orizzontali seguiti da repentine cadute (evidenziate dalle frecce rosse). Avendo riscontrato una salita disomogenea dei fasci longitudinali durante la fase a scorrimento costante, si pensa che tali tratti siano imputabili alla rottura interna dei fasci all'interno del pacchetto (in modo analogo a quanto accaduto nelle prove con i trefoli STEEL NET 190, in cui il distacco del pacchetto era tradotto dai potenziometri con un tratto a carico costante). Sulla base di queste supposizioni, è possibile dedurre che, per i test sopra discussi, con ogni probabilità si sarebbero registrati dei carichi maggiori per la fase a scorrimento costante, determinando quindi una differenza più marcata tra le due lunghezze di incollaggio.

Individuando un valore rappresentativo del carico per il tratto costante in ogni prova, è stato possibile ricavare la tensione tangenziale manifestata all'interfaccia fibre-matrice durante lo scorrimento. Per tale scopo, si è utilizzata la relazione:

$$\tau_f = \frac{P_f}{2nb^*l}$$

dove $2nb^*l$ è la superficie dei fasci longitudinali a contatto con la fase matrice, in cui n è il numero dei fasci, b^* la larghezza e l la lunghezza di incollaggio.

prova	P_f [N]	L [mm]	b^* [mm]	num. fasci	τ_f [MPa]
DS_CNET220B_S_330_60_1	427	330	3,5	8	0,0231
DS_CNET220B_S_330_60_2	658	330	3,5	8	0,0357
DS_CNET220B_S_330_60_3	825	330	3,5	8	0,0447
DS_CNET220B_S_450_60_1	1351	450	3,5	8	0,0536
DS_CNET220B_S_450_60_2	752	450	3,5	3	0,0796
DS_CNET220B_S_450_60_3	982	450	3,5	5	0,0624
Valore medio τ_f					0,0498
Dev. standard					0,0183

Tabella 2-27 Valori delle tensioni tangenziali durante lo scorrimento.

Come evidenziato dalla tabella 2-27, in alcune prove si è tenuto conto solo dei fasci che hanno mostrato uno scorrimento visibile all'interno del pacchetto (tre nel caso della DS_CNET220B_S_450_60_2 e 5 per il test DS_CNET220B_S_450_60_3). Riportando tali risultati in un grafico che relaziona le tensioni alla lunghezza di incollaggio (figura 2-57), si riscontrano valori leggermente superiori per i compositi lunghi 450mm. Approfondendo tale aspetto, si scopre che tali valori sono imputabili proprio alle prove

in cui si sono considerati esclusivamente i fasci che hanno manifestato una salita evidente all'interno del rinforzo.

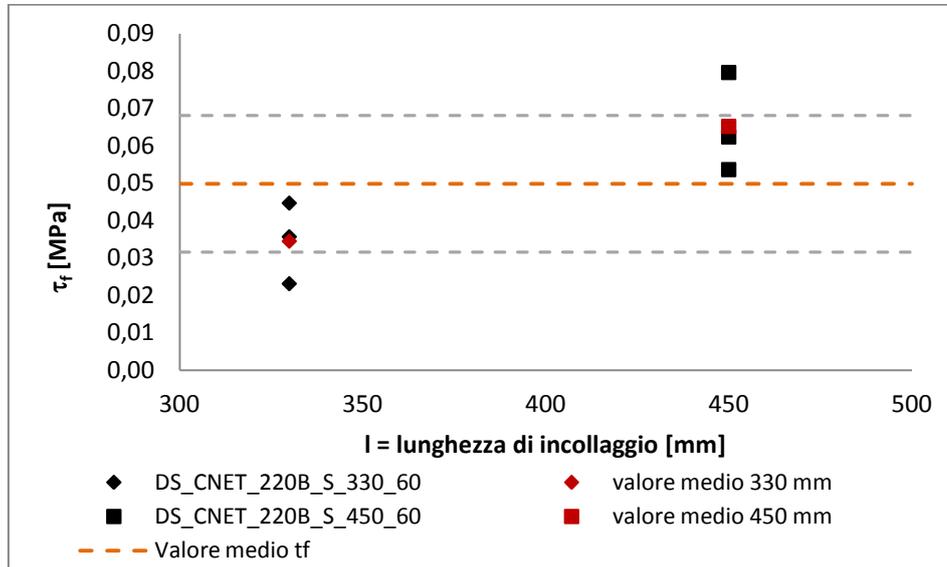


Figura 2-57 Valutazione della tensione tangenziale all'interfaccia durante la fase ad attrito costante.

Avendo osservato delle rotture all'interno del composito da parte di alcuni fasci, si è pensato quindi di considerare un ipotetico apporto allo scorrimento dei tratti rimasti integri durante lo scorrimento: supponendo una rottura localizzata all'incirca a metà del pacchetto, si sono ottenuti così i risultati illustrati di seguito.

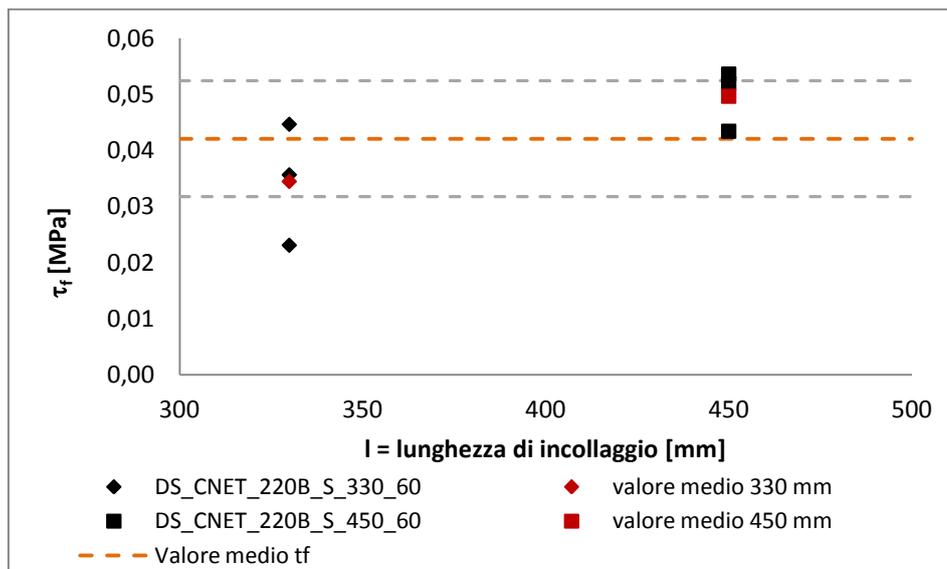


Figura 2-58 Tensioni tangenziali all'interfaccia durante la fase ad attrito costante al variare della lunghezza di incollaggio, valutate ipotizzando una rottura di alcuni fasci a metà del composito.

prova	P_f [N]	L [mm]	b^* [mm]	num. fasci	τ_f [MPa]
DS_CNET220B_S_450_60_1	1351	450	3,5	8	0,0536
DS_CNET220B_S_450_60_2	752	450	3,5	5,5	0,0434
DS_CNET220B_S_450_60_3	982	450	3,5	6,5	0,0520
Valore medio (330 e 450 mm) τ_f					0,0421
Dev. standard					0,0103

Tabella 2-28 Valori delle tensioni tangenziali durante lo scorrimento valutati con possibili rotture dei fasci a metà della lunghezza di incollaggio.

Le tensioni tangenziali relative alla lunghezza di incollaggio pari a 450 mm hanno subito un ridimensionamento, contribuendo a registrare una minore variabilità nei dati raccolti. Così facendo, è stato possibile ricavare una tensione media tipica per il composito, la quale è quantificata in $\tau_f=0,042$ MPa: tale valore esprime così l'interazione che sussiste tra fibre in carbonio e matrice cementizia "Rock S" durante lo scorrimento.

2.7 Conclusioni

Vista la recente introduzione degli FRCM nell'ingegneria civile, ad oggi non si dispone di sufficiente conoscenza per poter determinare con esattezza il comportamento di tali compositi. Perciò, negli ultimi anni sono state intraprese delle campagne sperimentali volte ad approfondire tale argomento: tra queste, si inseriscono le prove di taglio diretto oggetto della presente tesi, con le quali si intende studiare la risposta a trazione di questi sistemi di rinforzo. In particolare, la configurazione adottata prevede l'applicazione di quattro tipologie di fase resistenti (due composte da fibre in vetro, una costituita da trefoli in acciaio e un'altra da fibre in carbonio) associate a tre matrici cementizie. Lo scopo è quindi quello di analizzare l'interazione tra diverse tipologie di materiali, focalizzando l'attenzione sulla risposta in termini di carico e sul meccanismo di rottura del composito.

Di tutte le prove condotte, solo quelle che prevedevano l'accoppiamento tra fibre in carbonio "C NET 220 B" e matrice cementizia "ROCK S" hanno dato dei risultati confrontabili con le precedenti sperimentazioni [13][18][19][20]. Per quanto riguarda i compositi basati sull'utilizzo di fibre in vetro (test con rete "G NET 251 BA" e "G NET 221 B"), si sono registrate delle rotture anomale localizzate fuori dal pacchetto di rinforzo. Alcuni episodi di questo genere hanno interessato anche alcune prove contenenti fibre in carbonio (serie "C NEET 220 B"- "ROCK W"), mentre i provini con fase resistenze in acciaio ("STEEL NET 190"- "ROCK S") hanno manifestato una rottura di tutto il pacchetto, senza il distacco progressivo della rete come invece era previsto in accordo al comportamento ideale degli FRCM.

L'esito negativo di queste serie di test è da ricercare in diverse cause, collegate ognuna al tipo di materiale impiegato: nel caso delle fibre in vetro, la rottura è intervenuta a causa del cedimento da parte di alcuni fasci della rete, i quali suggeriscono un tiro distribuito in maniera non uniforme tra le fibre; tuttavia, dopo aver introdotto un accorgimento in tal senso (applicazione di resina epossidica sulle fibre fuori dalla lunghezza di incollaggio), la rottura ha interessato ancora i fasci fuori dal sistema di rinforzo, mettendo in luce la possibilità di imputare il fallimento o alla configurazione di prova (non adatta per indagare questo materiale), o alle caratteristiche di resistenza della rete stessa. Nel caso dell'acciaio, la rottura ha invece evidenziato la necessità di sottoporre la superficie del calcestruzzo ad un trattamento, in modo da migliorare

l'aderenza della matrice e scongiurare distacchi improvvisi del pacchetto come manifestato durante le prove.

Solamente nel caso dei test con fibre C NET 220 B e matrice ROCK S si è riscontrato un comportamento congruente ai risultati attesi: in particolare, nel profilo del carico si riescono ad individuare i principali tratti caratteristici dei compositi a matrice cementizia, quali il tratto iniziale elastico, l'inizio del processo di delaminazione, l'incremento lineare dato dall'attrito e l'andamento costante causato dalla frizione tra le fibre e la fase matrice. Inoltre, indagando lunghezze di ancoraggio diverse (330 e 450mm), è stato possibile riscontrare una effettiva influenza della lunghezza di ancoraggio sulla risposta del carico, riscontrabile in valori al picco maggiori nel caso in cui $l_{inc}=450mm$.

Concludendo, la configurazione di prova si è rivelata non ottimale per l'analisi di alcune tipologie di fibre, mentre nel caso delle fibre carbonio è stato possibile analizzare il comportamento del composito, riscontrando un andamento del carico confrontabile con quello tipico già evidenziato in altre tipologie di FRCM [20].

3 Modellazione numerica

3.1 Introduzione

Il secondo modulo del presente elaborato si basa sulla ricerca di metodi numerici capaci di simulare il comportamento degli FRCM. Come base di partenza, si sono tenuti in considerazione i risultati delle prove sperimentali e l'elaborazione analitica costruita attraverso l'analisi dei dati raccolti. In modo particolare si è applicato un approccio già collaudato per i composti a matrice polimerica definito come "Fracture Mechanics", ovvero una metodologia di studio basata sul controllo dell'energia di frattura e sulla trasmissione degli sforzi dalla fibra alla matrice.

Prendendo spunto dalle precedenti ricerche effettuate nel campo degli FRP [7][8], si è deciso di utilizzare un programma agli elementi finiti con il quale si potesse implementare l'interazione tra rete fibrorinforzata e supporto. In tal caso è stato scelto il programma fem "Abaqus". Il modello è stato calibrato sulla base dei dati raccolti da D'Antino [18][19][20] essenzialmente per due motivi:

- In passato, a questo tentativo di modellazione se ne era proposto un altro [23], costruito sulla base dei dati forniti da D'Antino, che però non ha saputo pienamente descrivere il comportamento degli FRCM indagati. Prendendo in considerazione i medesimi dati e analizzandoli con altre strategie, si vuole mettere in evidenza i deficit della precedente modellazione;
- I dati sperimentali descritti in questa tesi non forniscono risultati in termini di deformazioni delle fibre. Come verrà chiarito successivamente, ciò non consente una calibrazione di un diagramma sforzo tangenziale - slip fondamentale per il funzionamento del modello. L'unica soluzione è quindi fare riferimento a sperimentazioni che abbiano impiegato degli estensimetri per monitorare tali grandezze.

Prima di descrivere il modello implementato, si riassumono i risultati della sperimentazione di riferimento e il precedente tentativo di studio agli elementi finiti.

3.2 Sperimentazione di riferimento

3.2.1 Setup

I test presi in considerazione sono quelli condotti dal gruppo di ricerca costituito da T. D'Antino, C. Carloni, L.H. Sneed, C. Pellegrino [19][20], il cui studio è già stato citato al §2.2. Avendo calibrato il modello numerico esclusivamente sulla base di questi risultati, si vuole ora descrivere più in dettaglio quanto fatto.

Il setup di prova è molto simile a quello adottato per i shear test già presentati. Si tratta infatti di test di trazione di una rete fibrorinforzata in PBO applicata esternamente ad un supporto in calcestruzzo (lungo 375mm e sezione di 125x125 mm) tramite matrice cementizia stesa con uno spessore pari a 4mm. Per indagare l'effettiva presenza di una lunghezza di ancoraggio efficace e l'influenza della larghezza sul trasferimento degli sforzi, si sono applicate reti di lunghezza e larghezza differenti. Inoltre su alcuni provini si è deciso di non applicare il secondo strato di malta cementizia esternamente alle fibre, in modo da indagare gli sforzi trasmessi in un solo strato di matrice e confrontarli così con i risultati ottenuti incollando la rete tra due strati aventi 4 mm ciascuno.

La configurazione di prova è presentata in figura 3-1.

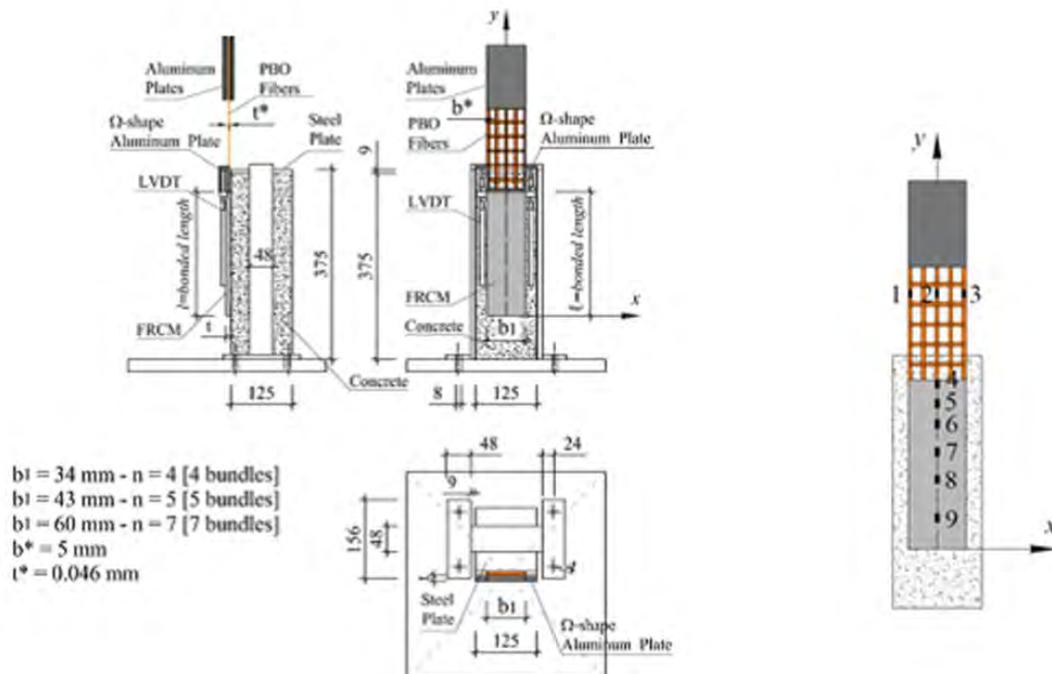


Figura 3-1 configurazione delle prove di taglio diretto [19].

Il parallelepipedo in calcestruzzo è vincolato attraverso una barra ancorata alla base del macchinario. Per evitare l'applicazione di sforzi concentrati, capaci di lesionare il supporto e influenzare i risultati dei test, tra la barra e il parallelepipedo è stata interposta una piastra per uniformare le tensioni sulla superficie. Sono stati montati due trasduttori di spostamento (LVDTs nello schema) ancorati sul supporto e vicini alla zona di incollaggio. L'estremità dei misuratori è a contatto con una piastrina ad omega in alluminio incollata alla rete: in questo modo, il carico è sincronizzato con lo spostamento relativo delle fibre rispetto al supporto (global slip), misurato in base allo spostamento della piastrina in alluminio vincolata alle stesse.

Per permettere un corretto tiro delle fibre, all'estremità libera della rete sono state incollate due piastrine in alluminio con della resina epossidica per agevolare l'ancoraggio dei morsetti del macchinario. Alcuni provini sono stati dotati di estensimetri, disposti come in figura 3-1.

I test di tiro sono stati condotti a spostamento costante pari a 0.00084 mm/s.

3.2.2 Caratterizzazione del materiale

3.2.2.1 Fibre in PBO

Come fase resistente si è scelta una rete bidirezionale in PBO distribuita dalla ditta "Ruredil" e commercializzata con il nome "X Mesh Gold", avente bundle con larghezza di 5 mm e 0,092 mm di spessore. Sono stati condotti numerose prove di trazione sulle fibre in modo da confrontare le prestazioni reali del materiale con quelle fornite dal produttore. In si riporta la disposizione dei bundle nella rete. Lungo la direzione 1, i bundle sono disposti con interasse pari a 20mm, mentre nella direzione ortogonale i fasci presentano spaziatura maggiore (interasse di 25 mm). La rete è stata applicata al supporto in modo che fosse la direzione 1 quella strutturale (figura 3-2).

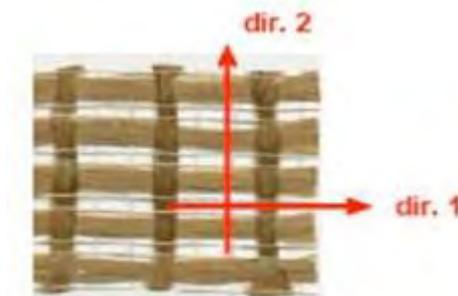


Figura 3-2 Rete in PBO e direzioni principali considerate

In tabella 3-1 si riportano i risultati delle prove a trazione (test a trazione a controllo di spostamento di 1,25 mm/min conforme alla norma ASTM D3039 [24]) di strisce di tessuto in PBO di larghezza differente. Dai test non emergono particolari variazioni di tensione sulle fibre al variare del numero di fasci considerati.

PBO fiber grid		
Manufacturer Tests	Manufacturer	Tests
Young's Modulus [GPa]	270	206
Ultimate strength [GPa]	5,8	6
Ultimate strain [-]	0,019	0,0145

Tabella 3-1 Valori medi dei test di trazione delle fibre in PBO

3.2.2.2 Calcestruzzo per supporto e Matrice cementizia

I supporti son stati confezionati con del comune cemento Portland e aggregati con granulometria compresa dai 0 ai 9,5 mm di diametro. I risultati delle prove a compressione dei cilindri (6 provini 100 mm × 200 mm) sono descritti in tabella 3-2.

Concret prism	
Compressive strength (MPa)	42,5
Cov	0,013
Splitting tensile Strength (MPa)	3,4
Cov	0,0113

Tabella 3-2 Risultati delle prove a compressione dei provini in calcestruzzo[20].

Similmente a quanto fatto per il calcestruzzo, anche per la malta son stati prodotti 10 cilindretti (50 mm × 100 mm) per testare le prestazioni della matrice (tabella 3-3).

FRCM matrix	
Compressive strength (MPa)	27,9
Cov	0,009
Splitting tensile Strength (MPa)	3,6
Cov	0,072

Tabella 3-3 Risultati delle prove a compressione della matrice cementizia[20].

3.2.3 Risultati

3.2.3.1 Curva carico-spostamento

I test vengono contraddistinti dalla dicitura DS_X_Y_(S e/o D e/o L)_Z, dove X è la lunghezza di incollaggio in mm, Y la larghezza di incollaggio in mm, S se il provino è strumentato con gli estensimetri, D indica se il provino è stato testato fino ad ottenere un carico costante alla fine del test, L indica l'assenza dello strato esterno di matrice e Z il numero del provino. Una "T" viene aggiunta al codice del provino se le fibre trasversali son state disposte in modo da essere a diretto contatto con lo strato di malta inferiore.

Nella maggior parte dei casi la rottura dei provini è stata caratterizzata da uno scorrimento tra fibre e matrice cementizia a seguito di una delaminazione localizzata all'interfaccia tra la rete e la malta.

Un esempio dei risultati ottenuti è visibile in figura 3-3. Dopo una prima fase in cui il carico assume un incremento lineare (inizio delaminazione), il grafico mostra un andamento non lineare prima di raggiungere il carico massimo a trazione (dovuto al debonding e contributo dell'attrito). Una volta raggiunto il picco, il carico diminuisce progressivamente (diminuzione lunghezza efficace mentre perdura il contributo dovuto all'attrito) e, per grandi spostamenti, si può notare un valore all'incirca costante del carico.

L'andamento rispecchia perciò quello teorico previsto presentato al §2.5.

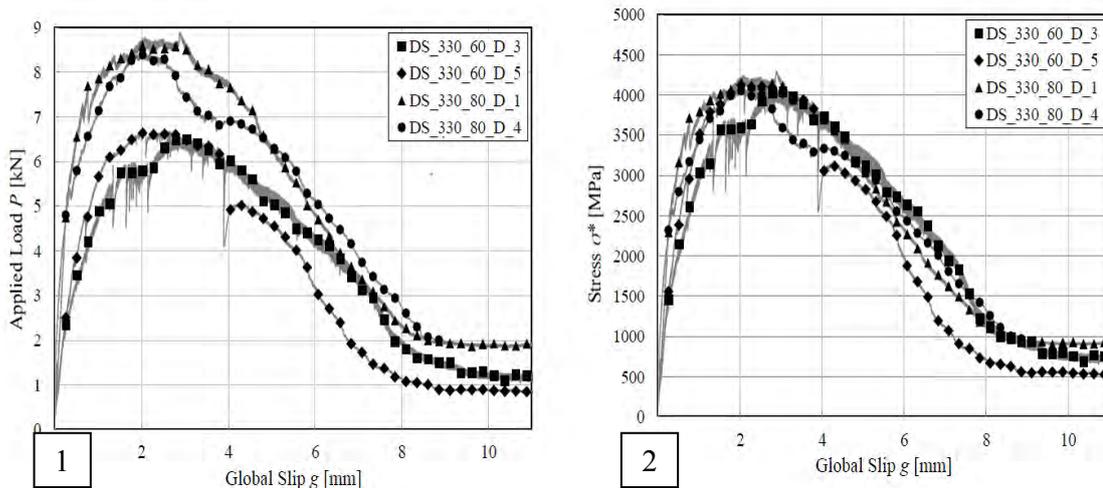


Figura 3-3 Risultati sperimentali tratti da [20]. 1) alcuni andamenti P vs spostamento (g).

2) andamenti delle tensioni al variare dello spostamento

La parte a carico costante consente di valutare la parte di sforzo tangenziale imputabile all'attrito applicando la:

$$\tau_f = \frac{P_{\text{cost}}}{2nb^*l}$$

in cui 2 è un fattore che tiene conto dei due strati di malta che avvolgono le fibre, n il numero di bundle applicati, b^* la larghezza e l la lunghezza di incollaggio. In tal modo, la tensione tangenziale media che si manifesta per grandi spostamenti della rete rispetto al supporto è stata quantificata in un valore vicino ai 0,06 MPa [20].

3.2.3.2 Influenza della larghezza di incollaggio

Per indagare la presenza di una possibile perturbazione nel trasferimento degli sforzi causata dalla larghezza della fase resistente, si sono ricavate le tensioni sulle fibre in corrispondenza del carico massimo raggiunto nei test (P^*):

$$\sigma^* = \frac{P^*}{nt^*b^*}$$

dove t^* rappresenta lo spessore, b^* la larghezza della fibra ed n il numero di fasci.

Le larghezze indagate sono pari a 34, 43, 60 e 80 mm. Si sono poi raccolti i vari dati sulle tensioni in un grafico per evidenziare eventuali discrepanze nei risultati (figura 3-4), riportando anche i valori delle tensioni ricavate da D'Ambrisi [13] durante l'esecuzione dei double shear test e i risultati delle prove di tensione sui fasci in PBO.

Come si può riscontrare dal grafico, le tensioni presentano valori confrontabili tra loro sia per gli shear test degli FRCM (circa 4000 MPa), sia per le prove a trazione della rete in PBO (6000 MPa).

Un'altra importante considerazione riguarda i valori delle tensioni di rottura registrate negli FRCM, in quanto risultano inferiori rispetto a quelle osservate per i singoli fasci non impregnati: tale risultato conferma infatti che il meccanismo di rottura interessa principalmente l'interazione della fase resistente con la rete e non avviene per raggiungimento della massima tensione di trazione delle fibre.

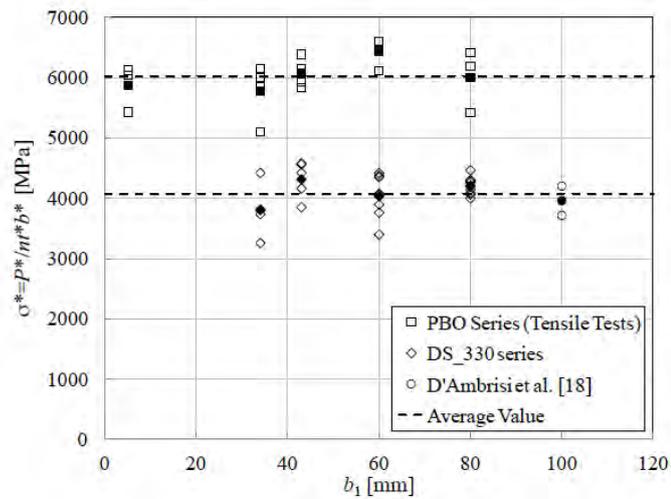


Figura 3-4 Valori medi delle tensioni di rottura per diverse larghezze considerate nelle prove sperimentali [20].

3.2.3.3 Andamento delle deformazioni

Gli estensimetri applicati su alcuni provini permettono di ricavare l'andamento delle deformazioni lungo la lunghezza di incollaggio. In figura 3-5 vengono riportate le deformazioni del provino DS_330_43_S_5 per valori diversi della curva carico - spostamento.

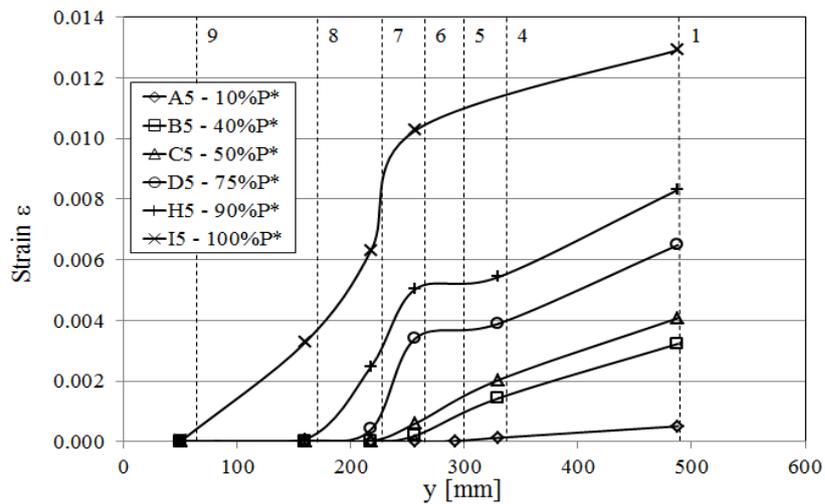


Figura 3-5 Andamenti delle deformazioni per diversi punto della curva carico vs spostamento [20]

Confrontando i risultati raccolti con quelli osservati negli FRP, si possono individuare alcune peculiarità che contraddistinguono i due sistemi di rinforzo. In particolare, in entrambi i casi si è osservato che le deformazioni non si manifestano interamente lungo

la lunghezza di incollaggio, bensì interessano solamente una parte limitata di essa, la quale tende a propagarsi durante l'applicazione del carico. Tale aspetto suggerisce quindi che la reazione non è omogenea lungo tutta l'interfaccia, ma interessa una determinata lunghezza in base alla forza richiesta: essa è indicata con l'acronimo STZ (Stress Transfer Zone), ovvero la zona attraverso la quale gli sforzi si trasferiscono dalla fase resistente alla matrice. Qualora la lunghezza di incollaggio è sufficiente per permettere al composito di raggiungere il carico di delaminazione, L'STZ che si individua in corrispondenza al punto di debonding coincide con la lunghezza efficace.

Una differenza sostanziale nel caso degli FRCM è dovuta alla presenza dell'attrito, il quale conferisce un incremento lineare delle deformazioni per lunghezze di incollaggio maggiori a quella efficace.

Tenendo in considerazione aspetti comuni e differenze, per proporre un andamento analitico delle deformazioni valido per gli FRCM [9] [13] [14], si è modificato quello calibrato per i composti a matrice polimerica:

$$\varepsilon_{yy} = \varepsilon_0 + \frac{\alpha + ky}{1 + e^{\frac{y-y_0}{\beta}}}$$

dove ε_0 , α , β , y_0 sono parametri ottenuti dalla regressione non lineare delle deformazioni ricavate dai test, mentre K è il rapporto tra sforzo tangenziale a carico costante, τ_f , e il prodotto tra spessore e il modulo elastico della fibra. In tal modo è possibile ottenere l'andamento continuo delle deformazioni lungo la lunghezza di incollaggio partendo da alcune informazioni puntuali come quelle ottenute dagli estensimetri (figura 3-6).

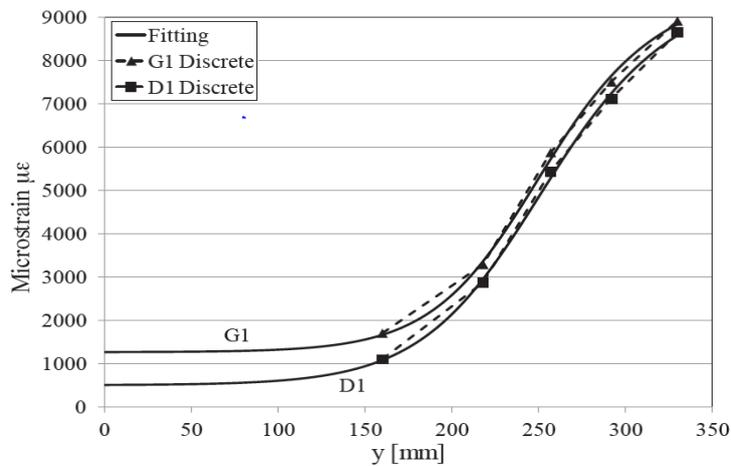


Figura 3-6 Fitting delle deformazioni relative al provino DS_330_43_S_1 [20].

L'andamento delle deformazioni si può riassumere come illustrato in figura 3-7.

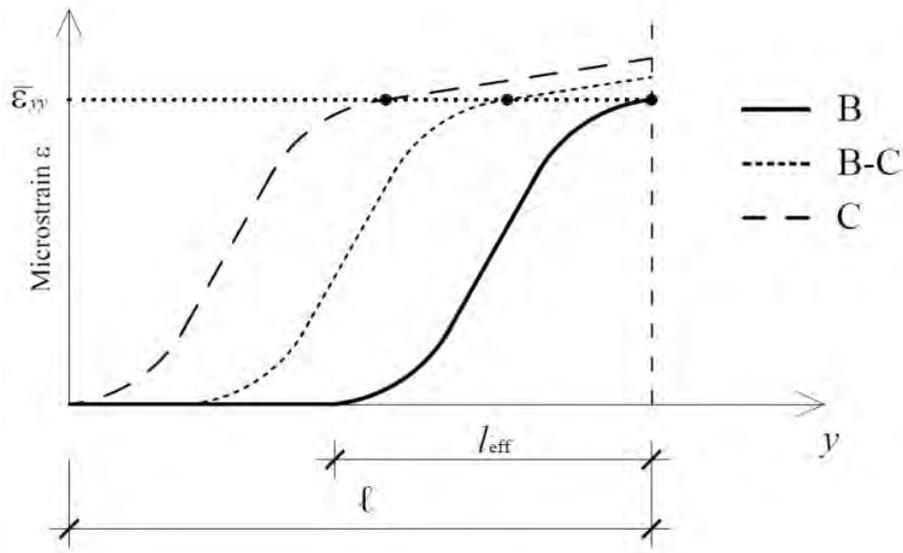


Figura 3-7 Andamento ideale delle deformazioni lungo la lunghezza di incollaggio [20].

Si indichi con il punto B l'inizio della delaminazione nella curva carico spostamento e con C il punto nella quale si raggiunge il carico massimo (§2.5). Per lunghezze di incollaggio maggiori rispetto a quella minima efficace, l'andamento è caratterizzato dalla classica forma ad "S". Aumentando progressivamente il carico, si assiste ad una traslazione della curva verso sinistra, in accordo con una propagazione dell'STZ lungo l'interfaccia del composito. La presenza dell'attrito è riscontrabile nei tratti lineari delle curve che interessano una STZ maggiore di quella minima efficace. Se questo contributo non fosse stato presente, il valore massimo ideale raggiungibile sarebbe ε_{yy} , ovvero quello raggiunto in corrispondenza al punto di delaminazione e collegato alle sole capacità della fibra di adattarsi alla fase legante.

3.2.3.4 Tensioni tangenziali: approccio basato sull'energia di frattura

In analogia con quanto sviluppato nel campo degli FRP [17], è stata sviluppata una legge costitutiva tale da riprodurre l'andamento dello sforzo tangenziale che caratterizza l'interfaccia fibre-matrice cementizia durante il test a trazione.

Sono state prese in considerazione le seguenti ipotesi semplificative:

- Le fibre presentano un andamento sforzo-deformazione elastico lineare e il materiale è omogeneo;
- la lunghezza e lo spessore dei fasci sono costanti per tutta la fase resistente;

- l'interfaccia tra fibra e matrice è di spessore infinitesimo.

Queste assunzioni sono le stesse applicate ai compositi con matrice polimerica. Tuttavia, la presenza di un meccanismo di rottura che interviene tra fibre e due strati di matrice, invece che uno strato di legante e calcestruzzo, hanno portato i ricercatori a modificare la teoria presentata per i compositi a matrice polimerica [20].

L'andamento analitico degli sforzi tangenziali è ricavato da una semplice relazione di equilibrio di un elemento infinitesimo di fibra. Si immagina che la fibra, qui assunta inglobata da due strati di matrice cementizia, sia sottoposta a due sforzi tangenziali (τ_{zy}^1 relativo alla prima interfaccia e τ_{zy}^2 alla seconda). In figura 3-8 si riporta lo schema considerato.

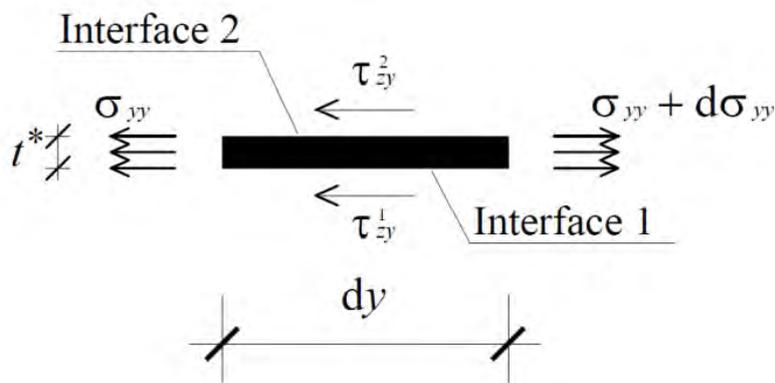


Figura 3-8 Equilibrio alla traslazione di un elemento infinitesimo di fibra compresa tra due strati di malta [20].

Eseguendo un equilibrio alla traslazione degli sforzi agenti sull'elemento considerato, si ottiene:

$$\tau_{zy}^1 + \tau_{zy}^2 = t^* \frac{d\sigma_{yy}}{dy}$$

Ipotizzando che il contributo dei due strati di malta sia il medesimo ($\tau_{zy}^1 = \tau_{zy}^2$) e sfruttando l'ipotesi di elasticità lineare del materiale assunta per le fibre, la relazione di cui sopra si semplifica e risulta:

$$\tau_{zy}^1 = \tau_{zy}^2 = \frac{1}{2} E t^* \frac{d\varepsilon_{yy}}{dy}$$

dove E e t^* sono il modulo elastico delle fibre e lo spessore. E' importante sottolineare che, oltre alle semplificazioni precedentemente elencate, deve essere verificato che la rottura si localizzi tra fibre e matrice senza alcun scorrimento relativo tra malta e supporto. Assumendo inoltre che la malta e il calcestruzzo siano rigidi, l'andamento dello

scorrimento tra fibre e matrice $[s(y)]$ può essere ricavato integrando le deformazioni lungo la lunghezza della fibra. L'andamento ideale delle tensioni tangenziali relazionato allo scorrimento è rappresentato in figura 3-9.

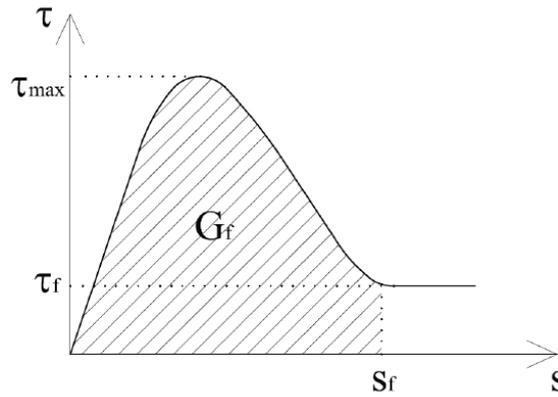


Figura 3-9 Andamento τ -slip ideale

Il contributo dell'attrito che contraddistingue gli FRCM è ben visibile dopo il ramo discendente, in cui le tensioni tangenziali assumono valore costante pari a τ_f .

L'area sottesa alla curva τ -slip (evidenziata dalla parte tratteggiata in figura 3-9) corrisponde alla cosiddetta "energia di frattura", ovvero il lavoro compiuto dalle fibre durante il processo di delaminazione. Il termine "frattura" è associato proprio alla traslazione della lunghezza efficace causato dal distacco dei bundle dalla matrice.

Nello specifico, l'energia di frattura (G_F) è definita come segue:

$$G_F = \int_0^{s_f} \tau(s) ds$$

Essa permette di quantificare la forza associata all'inizio della delaminazione (punto B nella curva carico-spostamento) tramite la relazione:

$$P_{deb} = nb^* \sqrt{4G_F Et^*}$$

Affinché tale relazione dia esattamente il carico P_{deb} , è necessario che le deformazioni utilizzate per ricavare l'andamento τ -slip siano valutate in corrispondenza al debonding prima che intervenga l'attrito. In caso contrario si potrebbero considerare andamenti dello sforzo tangenziale erronei che porterebbero ad una sovrastima della G_F e, di conseguenza, ad una errata valutazione del P_{deb} . Essendo molto difficile indicare con esattezza il momento in cui la delaminazione ha inizio, sono state considerate le

deformazioni relative a più punti della curva carico spostamento per riprodurre l'andamento dello sforzo tangenziale.

Sono possibili due procedure per ottenere un andamento τ -slip il più fedele possibile all'effettiva trasmissione degli sforzi all'interfaccia. La prima consiste nel derivare l'andamento continuo delle deformazioni come presentato in precedenza; la seconda, invece, è un approccio alle differenze finite che si basa direttamente sui dati ricavati dagli estensimetri. Nel secondo caso, le relazioni usate per costruire l'andamento τ -slip sono:

$$\tau_{zy}(y_i) = \frac{1}{4} t^* E [(\varepsilon_i - \varepsilon_{i-1}) / (y_i - y_{i-1}) + (\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i) / (y_{i+1} - y_i)]$$

$$s(y_i) = s_0 + \sum_i \frac{1}{2} (\varepsilon_i - \varepsilon_{i-1}) / (y_i - y_{i-1})$$

dove le ε_i sono le deformazioni lette all'iesimo estensimetro, mentre y_i è la distanza dell'estensimetro prendendo come riferimento l'inizio della lunghezza di incollaggio (figura 3-1).

Un esempio del lavoro eseguito è riportato in figura 3-10.

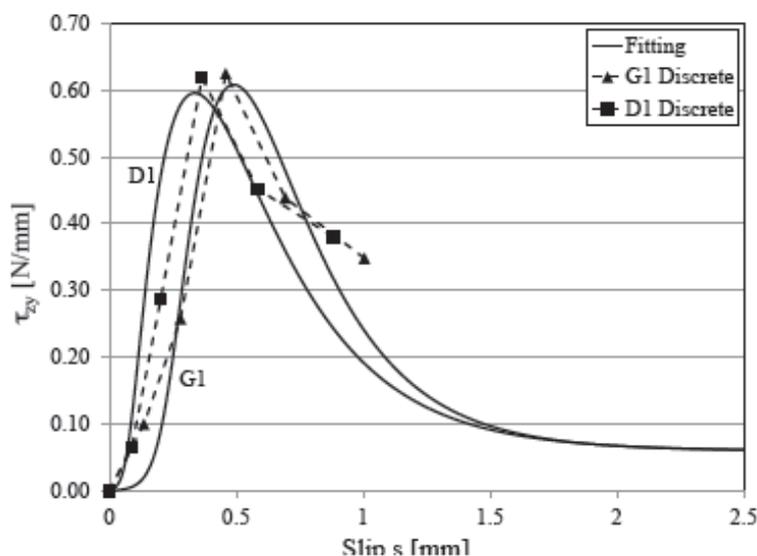


Figura 3-10 Andamento τ -slip discreto e continuo per il provino DS_330_43_S_1 [20].

In figura 3-10 si nota che l'andamento discreto delle deformazioni si interrompe prima che esso possa raggiungere valori dello slip tali da evidenziare l'andamento costante. Questo è conferma del fatto che i dati registrati dagli estensimetri e utilizzati per descrivere l'andamento dello sforzo tangenziale, sono presi vicino al punto di

delaminazione nella curva carico-spostamento. Diversamente accade invece per l'approccio continuo, poiché l'andamento delle deformazioni è frutto di un fitting della curva sperimentale, permettendo quindi di graficare l'andamento senza limiti di spostamento. Ciò, si avrà modo di analizzare in seguito, è di fondamentale importanza per l'implementazione del tratto discendente della legge costitutiva da associare all'interfaccia fibra-matrice nel modello numerico.

3.3 Studi numerici precedenti

3.3.1 Descrizione del modello

Un primo tentativo di modellazione numerica del comportamento degli FRCM è stato svolto da G. Lobelle [23], la quale si era proposta di riproporre il meccanismo di trasferimento degli sforzi dalla fibra al supporto secondo le modalità esposte nei paragrafi precedenti.

Per l'implementazione tramite codice agli elementi finiti si è usato il programma fem Abaqus.

Nello specifico, per la calibrazione del modello son stati analizzati i risultati ottenuti dal test DS_330_43_S_5 . Questi saranno presi come riferimento anche per la modellazione presentata in questa tesi e pertanto verranno illustrati in un secondo momento.

Grazie all'assenza di un effetto della larghezza di incollaggio sulla trasmissione degli sforzi, si è pensato di adottare una configurazione 2D con la quale è stato rappresentato solo un fascio, contro i cinque compresi nella rete in PBO applicata al provino considerato.

Il singolo fascio di fibre è stato modellato con un elemento beam (wire), mentre il supporto e il primo strato di matrice son stati rappresentati come un unico elemento infinitamente rigido (analytical rigid). Queste decisioni sono state rese possibili assumendo le seguenti ipotesi:

- fibre composte da un materiale omogeneo ed isotropo che hanno suggerito l'impiego di un elemento monodimensionale;
- deformazioni della matrice cementizia e del supporto trascurabili rispetto a quelle della fibra (da qui la scelta di impiegare un supporto con mezzo rigido);

- assenza di scorrimento tra matrice e calcestruzzo (che hanno permesso di modellare supporto e matrice in un unico elemento);
- assenza di effetti sul carico e sulla trasmissione degli sforzi dovuti alla presenza delle fibre trasversali.

In figura 3-11 si riporta la geometria del modello.



Figura 3-11 Geometria del modello numerico[23].

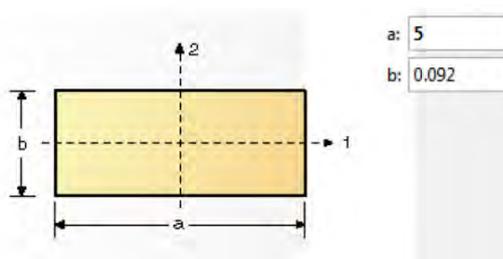


Figura 3-12 Sezione del beam che rappresenta la fibra in PBO[23].

Il beam (elemento rosso in figura 3-11) presenta la sezione del singolo bundle in PBO (figura 3-12) con sezione 5 mm x 0,092 mm e lunghezza pari a 335 mm, dei quali 5 mm son stati modellati come prolungamento dei 330 accoppiati al supporto per facilitare la lettura delle reazioni ed applicazione degli spostamenti all'estremità della fibra.

Il beam è stato modellato assumendo un materiale elastico lineare [21], attribuendo le proprietà meccaniche ricavate dalla caratterizzazione del materiale condotta da D'Antino [14] (tabella 3-4).

Proprietà	Tests
Modulo di Young [GPa]	206
Modulo di Poisson [-]	0.3

Tabella 3-4 Proprietà (PBO) assunte per il beam

Il beam è stato poi discretizzato in elementi con lunghezza pari a 0,034 mm.

Il supporto invece presenta le dimensioni del parallelepipedo in calcestruzzo più i 4 mm dati dallo strato di matrice cementizia (complessivamente pari a 375 mm di lunghezza e 129 di altezza).

Come evidenziato dallo schema sopra descritto, lo strato esterno di matrice cementizia non è modellato e l'intero meccanismo di trasferimento degli sforzi è stato affidato allo strato inferiore di malta (inglobato al supporto in questo caso). Tale approccio è stato giustificato dal modo con il quale si è ricavato l'andamento degli sforzi tangenziali, ritenendo che i due strati di malta avessero un'influenza simile in merito allo sviluppo delle tensioni tangenziali all'interfaccia. Secondo un'ottica che privilegia soluzioni il più semplici possibili, si supponeva quindi che, raddoppiando le reazioni ottenute dal beam secondo il modello così costruito, si potessero ottenere all'incirca le stesse forze alla quale è sottoposto un singolo fascio durante la prova di taglio diretto.

3.3.2 Metodo di analisi

Il supporto infinitamente rigido è stato incastrato in corrispondenza ad un nodo alla base del rettangolo in modo da evitare traslazioni lungo x, y e rotazione attorno l'asse z.

L'analisi numerica è stata condotta a controllo di spostamento, poiché l'applicazione di una forza variabile all'estremità della fibra non avrebbe portato l'analisi a convergenza a causa dell'impossibilità del metodo di Newton Rapson di rappresentare il ramo discendente della curva carico-spostamento. Per tale ragione, al nodo estremo del beam fuori dalla lunghezza di incollaggio è stato applicato uno spostamento finale di 2 mm suddiviso in diversi step (tabella 3-5).

Step di analisi	Spostamento alla fine del step (mm)	Tipo di analisi
Initial	-	<i>Applicazioni dei vincoli</i>
Frictionless slip	0,015	<i>General static</i>
Load	-	<i>General static</i>
Disp_linear_softening	0,53	<i>General static</i>
Disp_transition	0,6	<i>General static</i>
Disp_constant_friction	2	<i>General static Riks</i>

Tabella 3-5 Step di analisi (spostamenti e tipo di analisi considerata).

Lo spostamento è incrementato linearmente fino al valore massimo riportato nella seconda colonna. L'analisi è stata suddivisa come illustrato per facilitare la convergenza del modello e per riprodurre il più fedelmente possibile l'andamento τ -slip ottenuto dal DS_330_43_S_5.

In particolare, il primo passo è fissato automaticamente dal preprocessore e consente l'applicazione dell'incastro al supporto rigido. Il secondo step è introdotto invece per riprodurre lo scorrimento iniziale fino ad uno spostamento pari a 0,015mm durante il quale non si sviluppa alcun sforzo tangenziale (in accordo con quanto analizzato sperimentalmente per questo particolare shear test). Il terzo passo (load) è, come suggerisce il nome, creato per applicare una pressione unitaria al beam con la quale riprodurre l'attrito alla coulomb, come verrà chiarito nel paragrafo successivo. Per finire, gli ultimi passi sono stati introdotti esclusivamente per migliorare la convergenza del modello.

Tutti i passi sono di tipo statico, eccetto l'ultimo (static riks) poiché si è notato che questa tipologia di analisi consentiva un'analisi più facile del software della parte a scorrimento rispetto ad un passo di tipo statico standard.

3.3.3 Legge costitutiva τ -slip

L'implementazione della legge τ -slip all'interfaccia tra fibre e matrice cementizia è stata riprodotta nel modello sfruttando le subroutine contenute nel software.

Il nodo cruciale della modellazione riguarda le proprietà di interazione tra il beam e il supporto. A tal proposito, sono stati presi in considerazione i seguenti aspetti:

- interazione tra i due elementi lungo la direzione verticale (normal behaviour);
- interazione tra i due elementi lungo la direzione orizzontale (tangential behaviour);
- modellazione del distacco tra beam e supporto secondo una legge coesiva associata ad un processo di danno.

Per quanto riguarda il primo punto, si è fatto in modo che non ci fosse penetrazione tra beam e supporto. In merito agli altri due aspetti indicati, è doveroso trattarli separatamente in quanto costituiscono una parte cruciale per la modellazione dell'interfaccia tra i due elementi.

3.3.3.1 Tangential behaviour

Per riprodurre la comparsa dell'attrito durante lo scorrimento relativo tra il fascio in PBO e il supporto, si è deciso di utilizzare un attrito alla coulomb:

$$\tau = \mu \cdot p$$

usando $\mu=100$ e $p=0,0006 \text{ MPa}$ applicata come pressione distribuita sul beam (figura 3-13).



Figura 3-13 Carico distribuito applicato sul beam [23].

In tal modo si ottiene uno sforzo tangenziale dovuto all'attrito pari a 0,06 MPa, ovvero corrispondente a quanto ricavato dall'analisi del carico derivante dagli shaer test [20].

3.3.3.2 Legge coesiva e danno

La parte iniziale della curva τ -slip è caratterizzata da un primo tratto a pendenza costante, al quale segue un andamento non lineare e un progressivo decremento della tensione.. Questo andamento è implementabile in Abaqus grazie alla possibilità di attribuire agli elementi o alle proprietà di contatto tra due superfici delle leggi di carattere coesivo e di danno. Un procedimento simile è stato adottato anche per la costruzione del modello numerico presentato in seguito e pertanto, in questa fase preliminare, si preferisce solamente fornire i dati di massima attribuiti a questo primo tentativo numerico.

Per regolare la distribuzione degli sforzi all'interfaccia durante la deformazione del beam, il preprocessore consente di introdurre una matrice che lega le tensioni allo scorrimento tra i nodi appartenenti alle due interfacce (nel caso in esame, tra i nodi del beam e quelli di controllo proiettati sulla superficie rigida assunta come riferimento).

In tabella 3-6 sono elencati i parametri con i quali è stato modellato il comportamento coesivo del contatto.

knn	kss	ktt	kns	knt	ksn
0	21,94	0	0	0	0

Tabella 3-6 Parametri per il comportamento coesivo

Poiché le proprietà del contatto interessano un elemento monodimensionale come il beam, il legame costitutivo tensione-spostamento è stato specificato solo lungo la direzione dell'elemento (ovvero lungo la prima direzione principale del beam) indicando solamente il valore " K_{ss} ". Tale valore è stato ricavato direttamente dalla curva τ -slip (figura 3-14).

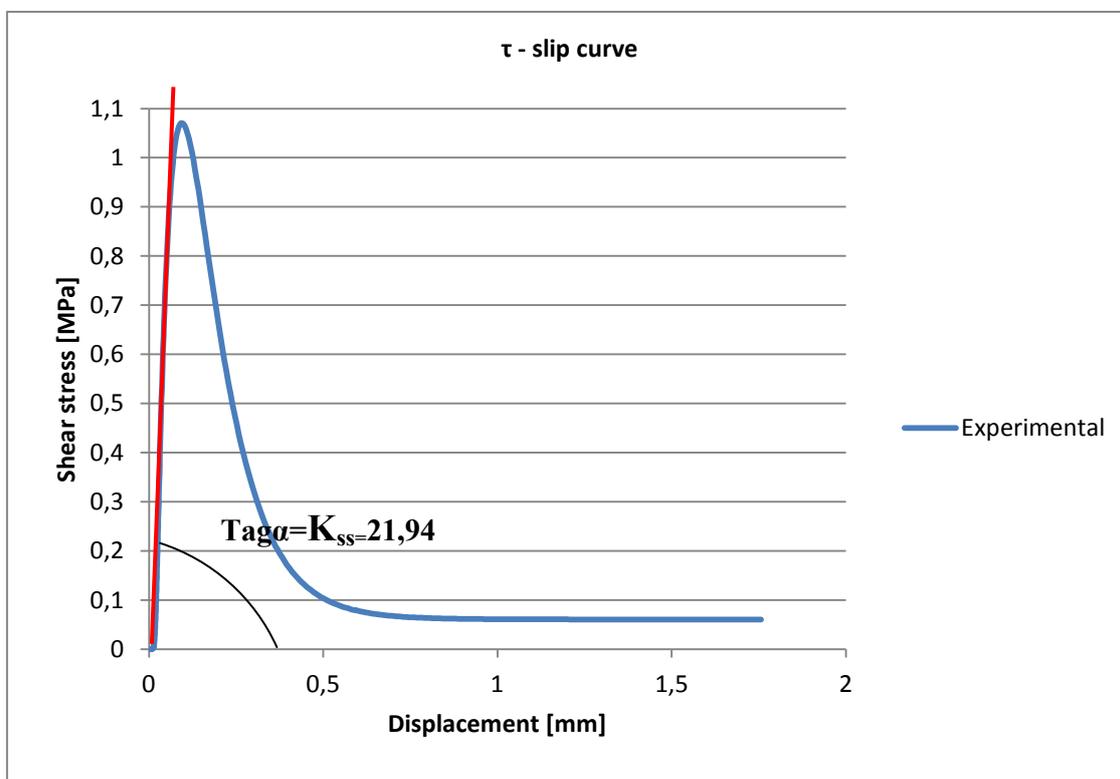


Figura 3-14 Andamento analitico delle τ considerato per le legge costitutiva dell'interfaccia

Altro aspetto fondamentale è la definizione del danno da attribuire al legame coesivo appena definito: se ciò non fosse specificato, non sarebbe infatti possibile definire il ramo "softening" della curva τ analitica.

Il danno ha bisogno di due componenti per essere attivato:

- tensione che determina l'inizio del degrado;
- legge evolutiva.

Prendendo sempre come riferimento l'andamento in figura 3-14, il degrado è stato attivato dal raggiungimento della tensione pari a 0,8 MPa (lungo la prima direzione principale, denominata "CSHEAR1"), sforzo oltre il quale non è stato più osservato un andamento τ -slip lineare (parametri riassunti in tabella 3-7). Oltre tale valore, subentra la legge di danno: essa è stata introdotta nel modello attraverso una tabella che mette in relazione un parametro di danno "D" e lo scorrimento plastico. I parametri sono stati ricavati secondo le modalità descritte al § 3.4.4.3. A causa dell'elevato numero di dati introdotti, la tabella "D-scorrimento plastico" è riportata in appendice.

Criterio di inizio del danno			
	Normal only (MPa)	Cshear1 (MPa)	Cshear2 (MPa)
τ	Arbitrario	0,8	Arbitrario

Tabella 3-7 Tensioni che determinano l'inizio del degrado

3.3.3.3 Influenza delle "interaction properties"

Le proprietà all'interfaccia beam - supporto rigido sono state attribuite in modo che agissero secondo lo schema presentato in Figura 3-15.

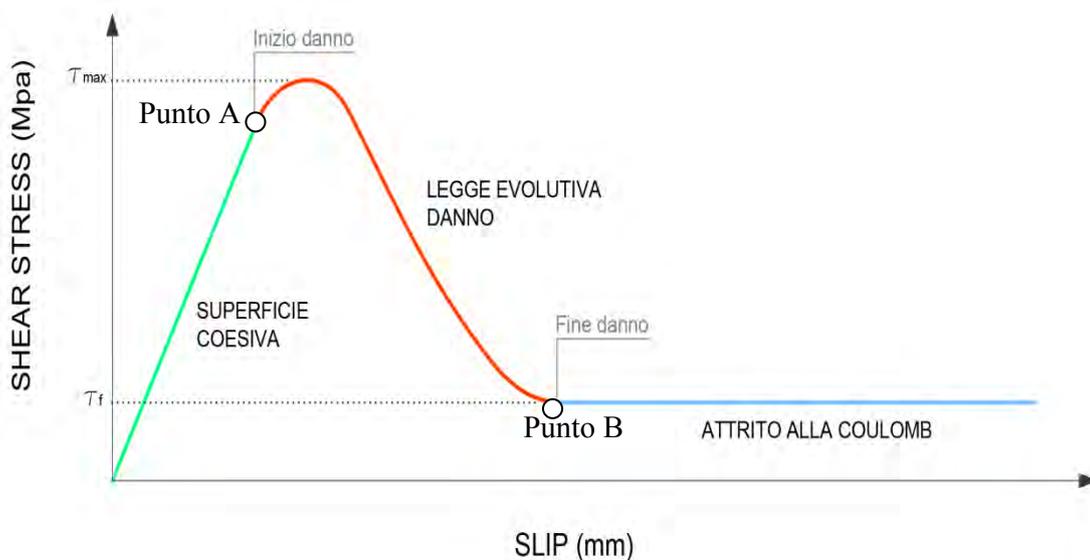


Figura 3-15 Interazione delle proprietà di contatto all'interfaccia beam-supporto rigido.

La prima proprietà che interviene è la legge coesiva, la quale, una volta raggiunto il valore $\tau=0,8$ MPa , comincia a degradare (punto A). In questo modo avviene il distacco controllato del beam dal supporto (attraverso la legge evolutiva del danno) e la delaminazione comincia a propagarsi lungo l'elemento, simulando quindi la traslazione della lunghezza di incollaggio all'interno dell'FRCM. Una volta raggiunto il completo degrado dell'interfaccia (punto B), interviene l'attrito alla coulomb, il quale consente di ottenere un andamento costante delle tensioni tangenziali lungo l'interfaccia PBO-supporto.

3.3.4 Risultati e commenti

Vengono ora esposti i risultati dello studio numerico appena descritto, mettendo in evidenza pregi e deficit dell'approccio affrontato.

Tramite le proprietà di interazione applicate all'interfaccia tra i due elementi modellati, si è riuscito ad ottenere esattamente l'andamento τ -slip elaborato analiticamente. In figura 3-16 si osserva la perfetta sovrapposizione tra il caso numerico e quello sperimentale.

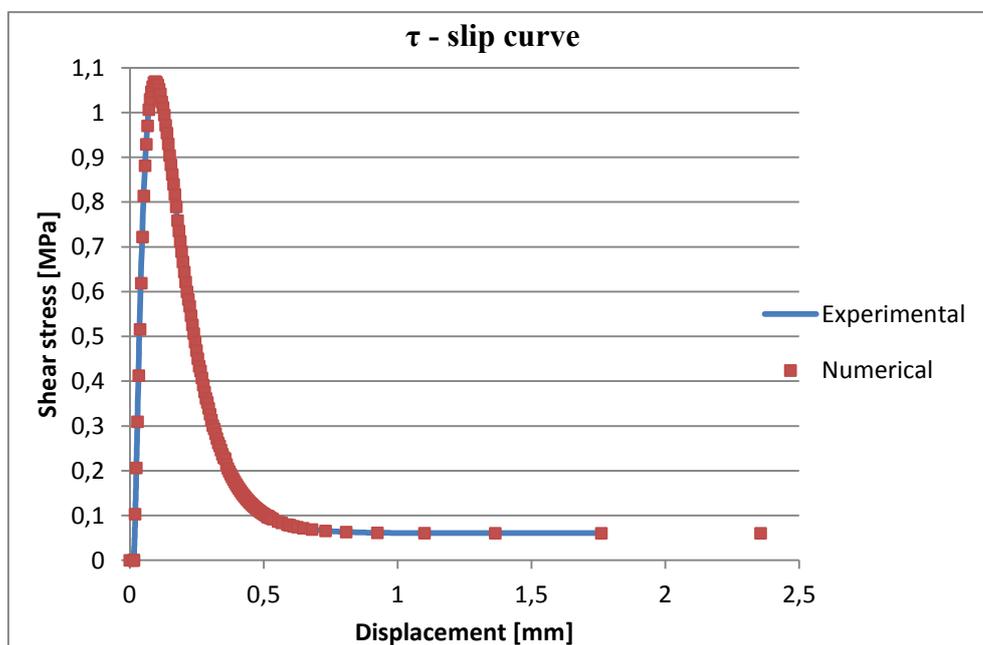


Figura 3-16 Confronto tra andamento sperimentale e numerico della curva τ -slip [23].

Per quanto riguarda il meccanismo di distacco del fascio dal supporto, analizzando le animazioni elaborate dal postprocessore si è potuta notare una certa somiglianza con quanto osservato sperimentalmente.

Le prime incongruenze con i risultati sperimentali emergono analizzando le deformazioni della fase resistente lungo la lunghezza di incollaggio del rinforzo.

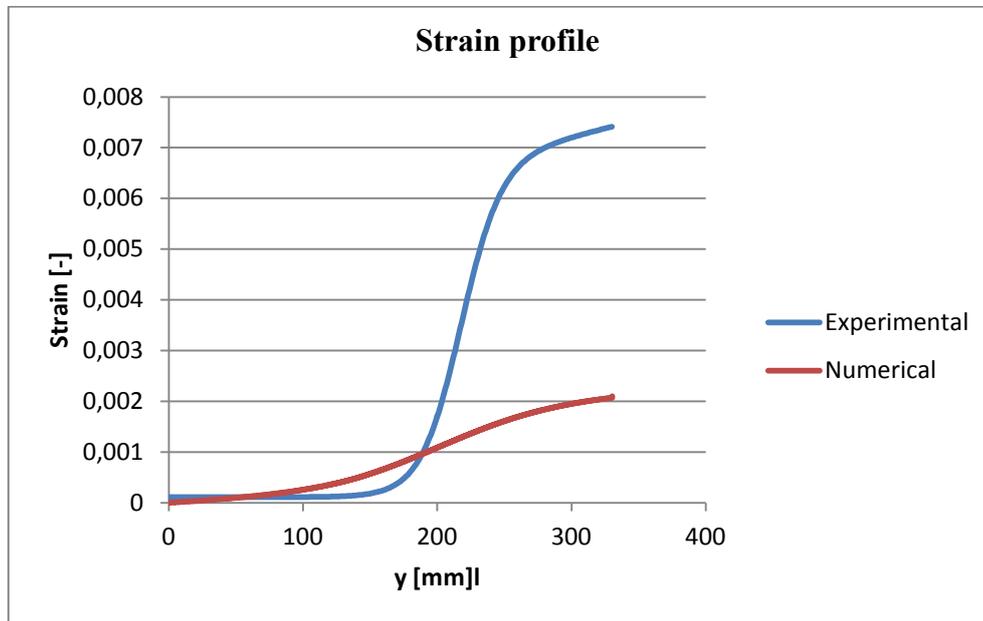


Figura 3-17 Confronto tra andamento delle deformazioni sperimentali e quelle numeriche [23].

In figura 3-17 sono messe a confronto le deformazioni ricavate dal modello (frame 60 del passo "Displ_linear_softening") con quelle approssimate utilizzando i dati ricavati dal test DS_330_43_S_5 e lette in corrispondenza all'inizio del processo di delaminazione. Osservando il grafico, è abbastanza evidente la profonda differenza tra i due casi: oltre ad essere caratterizzato da deformazioni più ridotte, il modello numerico non riesce a rappresentare la zona di trasferimento degli sforzi del caso reale. In particolare, essa risulta più estesa rispetto al caso sperimentale (le deformazioni iniziano a manifestarsi attorno ai 70 mm rispetto ai 180 circa della curva analitica) e questo comporta importanti conseguenze nella rappresentazione della lunghezza di incollaggio efficace, la quale verrà inevitabilmente sovrastimata nel modello.

Analizzando le deformazioni per diversi spostamenti imposti all'estremità della fibra (figura 3-18), si nota che gli andamenti ricavati sono leggermente diversi rispetto a quelli ideali (figura 3-7). In modo particolare, il ramo lineare imputabile all'attrito non è facilmente riscontrabile nel caso numerico e, alla fine del processo di carico (frame 100 con spostamento all'estremità pari a 2 mm), non si riscontrano deformazioni costanti come previsto.

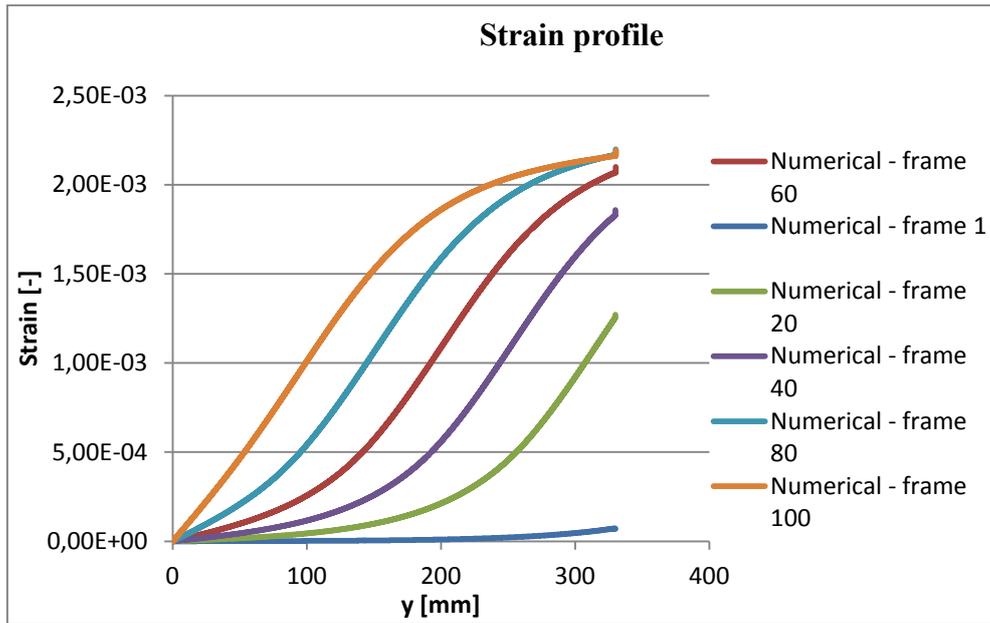


Figura 3-18 Diversi andamenti delle deformazioni a seconda dello spostamento imposto [23].

Un'attenzione particolare merita l'andamento della curva carico - spostamento (figura 3-19).

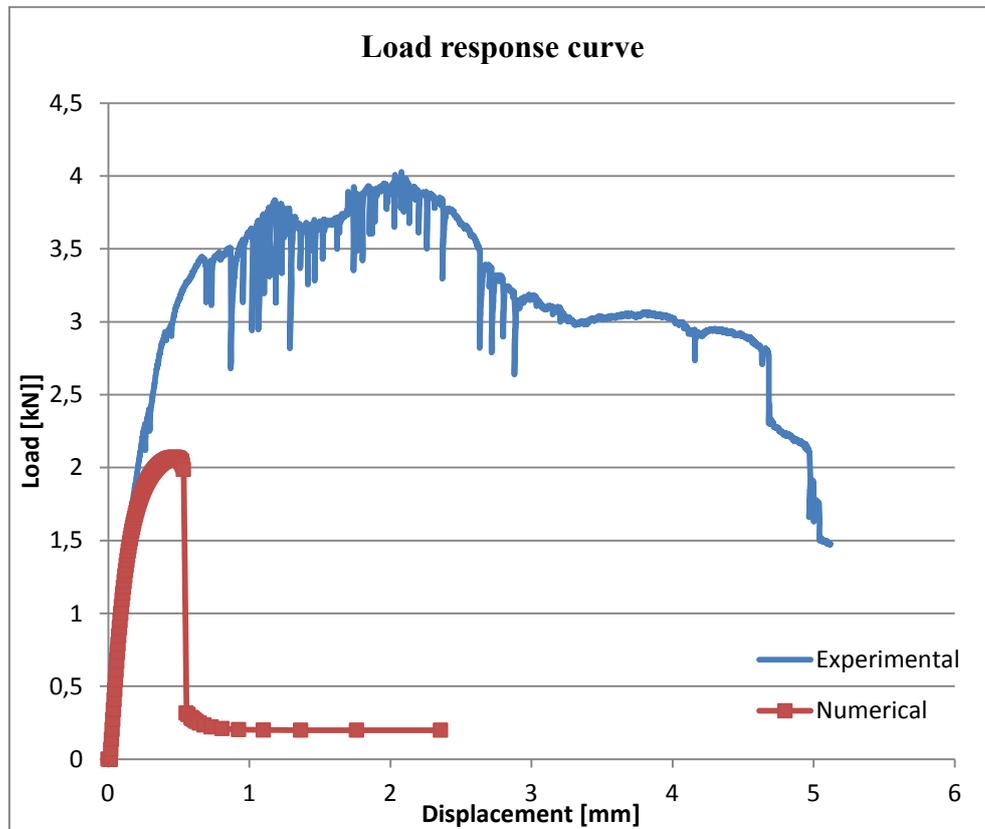


Figura 3-19 Confronto andamento sperimentale e numerico relativo alla curva carico-spostamento [23].

Le forze misurate all'estremità del beam, in corrispondenza alla quale si è imposto lo spostamento, sono state moltiplicate per un fattore pari a 2: ipotizzando infatti che gli sforzi tangenziali trasmessi dalle due interfacce fossero uguali, per ottenere l'effetto di una fibra vincolata da due strati di matrice si pensava che fosse sufficiente raddoppiare le reazioni lette al nodo di controllo. Inoltre, facendo affidamento sull'assenza di effetti imputabili alla larghezza della rete in PBO, per ricavare il carico massimo a trazione dell'FRCM si è moltiplicato il tutto per 5, parametro con il quale si è tenuto conto del numero di fasci longitudinali applicati al DS_330_43_S_5.

Com'è evidente, il carico simulato dal modello numerico raggiunge valori che sono circa la metà di quelli ottenuti nel caso sperimentale. Focalizzando inoltre l'attenzione sulla parte successiva a quella lineare elastica, nell'andamento numerico sembra che l'attrito non apporti un incremento del carico come previsto; inoltre il ramo di softening è caratterizzato da un decremento molto più accentuato rispetto a quanto accertato durante le prove di taglio diretto.

In base ai risultati ottenuti, questo modello numerico, pur avendo implementato ottimamente la legge costitutiva dell'interfaccia, sembra non costituire una buona soluzione per poter descrivere il comportamento degli FRCM.

3.4 Modellazione numerica degli FRCM: approccio tridimensionale

I risultati ricavati dalla precedente analisi numerica hanno messo in luce la necessità di proporre altre strategie di modellazione al fine di ottenere una migliore rappresentazione degli sforzi trasmessi dalla fase resistente al supporto.

Visti i buoni risultati ottenuti in termini di approssimazione della curva τ -slip, si è scelto ancora una volta di utilizzare il software fem Abaqus (release 6.12).

Dopo aver accertato che il modello bidimensionale non era sufficiente per descrivere il reale comportamento del composito, si è optato per una rappresentazione tridimensionale. Seguendo un'ottica volta a prendere in considerazione modelli semplici per poi arricchirli in modo da rappresentare il più fedelmente possibile la situazione reale, si è operato nel seguente modo:

1. modellazione di un solo bundle in PBO e del solo strato inferiore di matrice vincolata al supporto;
2. modellazione di un solo bundle in PBO e inserimento di entrambi gli strati di matrice cementizia;
3. rappresentazione dell'intero composito, in cui sono modellate solamente le fibre longitudinali;
4. modello totale del rinforzo, volto ad indagare l'influenza data dalle fibre trasversali.

Prima di procedere con la discussione dei risultati derivanti dalle analisi numeriche eseguite, si intende ora riportare i dati sperimentali utilizzati per la calibrazione dei modelli.

3.4.1 Prove di taglio diretto usate per la calibrazione dei modelli.

Come già accennato, si è scelto costruire il comportamento del composito sulla base dei risultati del test DS_330_43_S_5. Il provino è caratterizzato da una rete in PBO incollata con due strati di matrice cementizia di spessore 4mm, dei quali uno applicato al parallelepipedo in calcestruzzo, mentre l'altro steso sul lato esterno per avvolgere le fibre. Il composito è caratterizzato da una lunghezza di incollaggio pari a 330 mm, con

un'interfaccia larga 43 mm e costituita da 5 fasci in PBO. In tabella 3-8 sono riassunte le caratteristiche geometriche e i valori del carico e tensione ricavate dalla prova di taglio.

	largh. di incollaggi o (mm)	numero di bundle	lungh. di incollaggio (mm)	spessore (mm)	massimo carico P* (KN)	Tensione massima σ^* (MPa)
DS_330_43_S_5	43	5	330	8	4,03	3500

Tabella 3-8 Dati caratterizzanti il test DS_330_43_S_5

Questo test è stato preso come riferimento in quanto presenta un comportamento conforme a quello ideale manifestato dagli FRCM: il meccanismo di rottura si è sviluppato all'interfaccia tra fibre e matrice; non sono stati valutati effetti imputabili alla larghezza; l'andamento del carico rispecchia quello ideale; le deformazioni seguono un andamento ragionevole.

Di seguito sono illustrati i risultati della prova di taglio diretto DS_330_43_S_5.

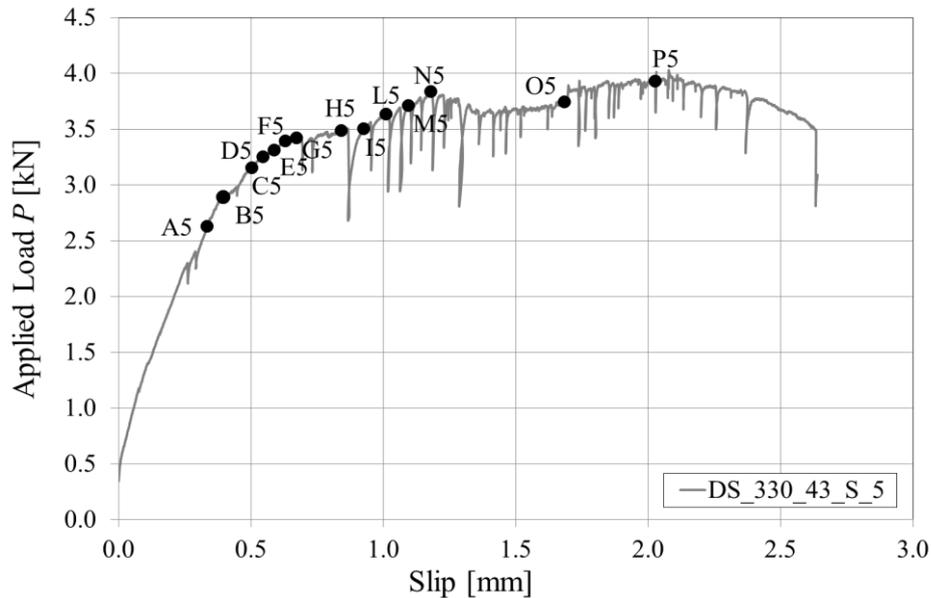


Figura 3-20 Andamento del carico vs spostamento (DS_330_43_S_5)[20].

Nella curva del carico sono raffigurati i punti in corrispondenza ai quali sono state misurate le deformazioni tramite gli estensimetri.

Di seguito si riporta l'andamento analitico delle deformazioni relative al punto B della curva carico-spostamento.

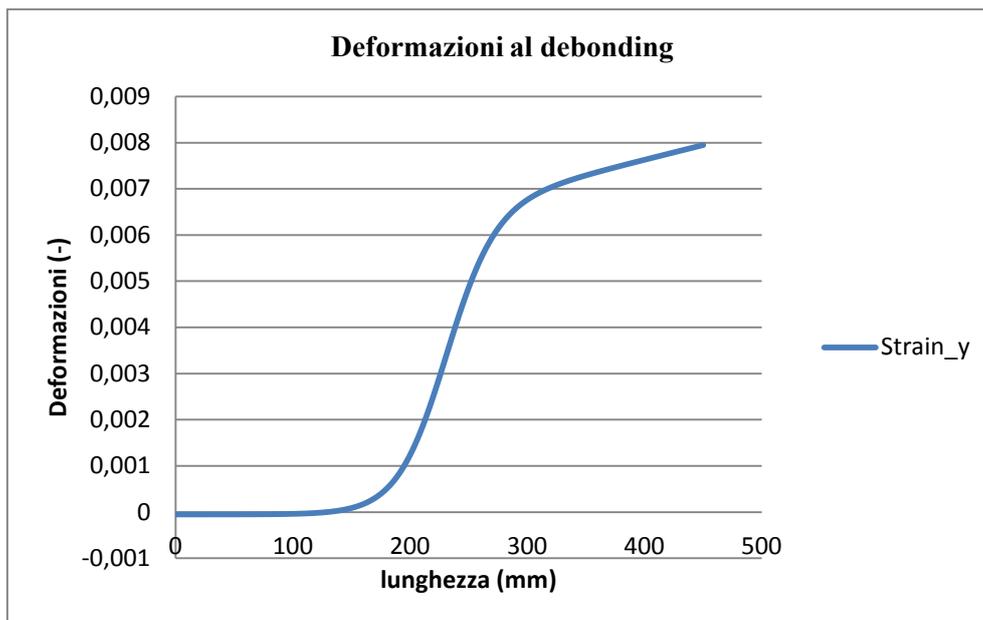


Figura 3-21 Approssimazione delle deformazioni considerate in corrispondenza al carico di delaminazione, punto B nella curva P-disp (DS_330_43_S_5) [20].

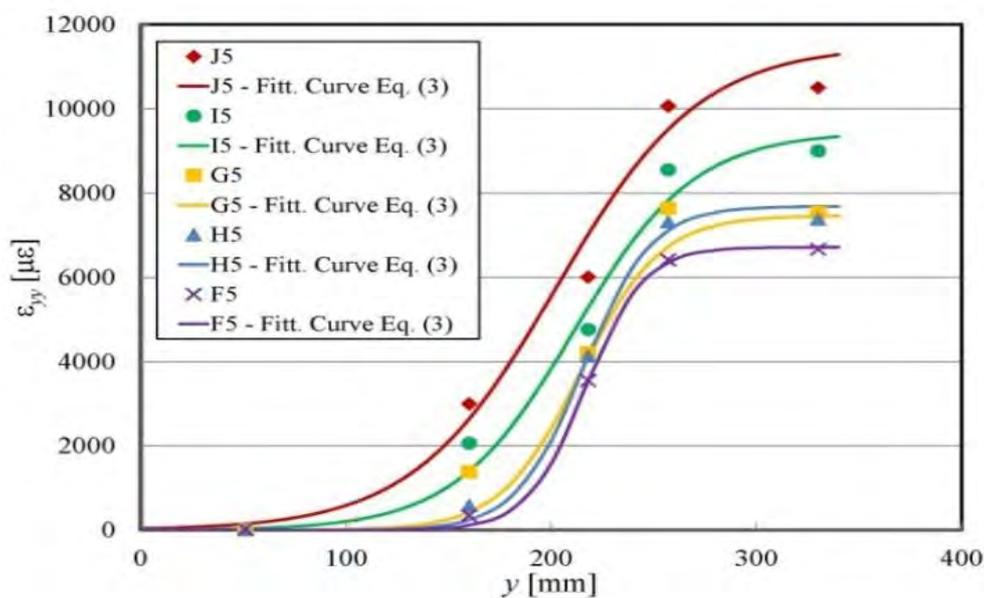


Figura 3-22 Altri andamenti delle deformazioni per punti diversi della curva carico-spostamento (DS_330_43_S_5) [20].

Come già più volte richiamato nei precedenti paragrafi, le deformazioni sono collegate agli sforzi tangenziali attraverso la relazione:

$$\tau_{zy}^1 = \tau_{zy}^2 = \frac{1}{2} Et^* \frac{d\varepsilon_{yy}}{dy}$$

Ne consegue quindi che, per deformazioni lette in punti diversi della curva P-disp, si ottengono andamenti differenti dello sforzo tangenziale. A tal proposito, in figura 3-23 e figura 3-24 si riportano curve τ -slip distinte: la prima è quella implementata nel precedente modello [23], mentre la seconda è valutata derivando il profilo delle deformazioni in figura 3-21. Nei modelli illustrati in seguito, si è scelto di prendere come riferimento il secondo andamento (figura 3-24) per implementare la legge costitutiva dell'interfaccia.

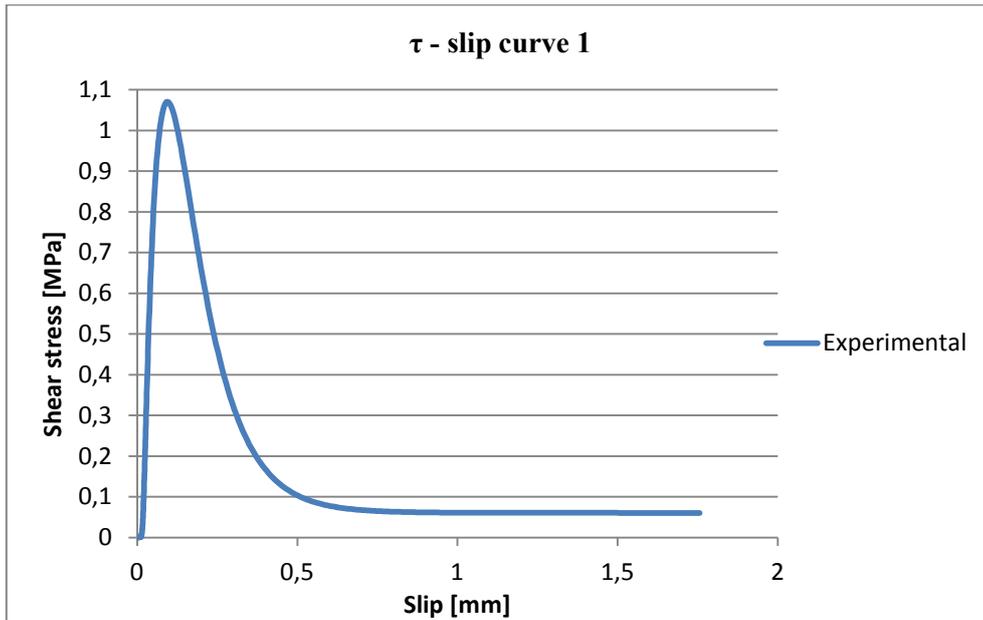


Figura 3-23 Andamento τ -slip utilizzato per calibrare i dati del modello numerico 2D [23].

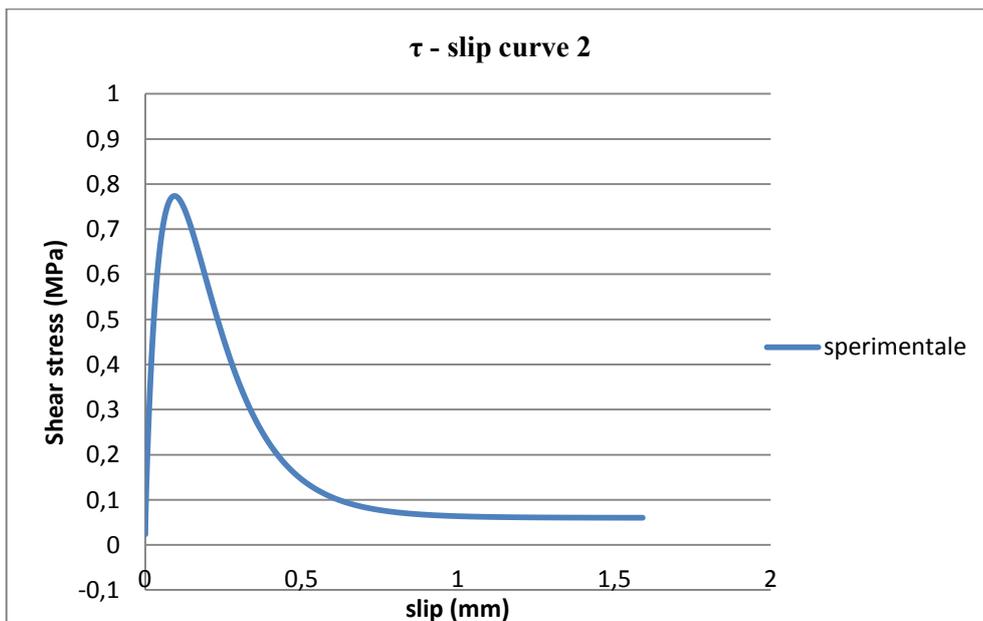


Figura 3-24 Andamento τ -slip relativo alle deformazioni lette nel punto B della curva P-disp

Pur appartenendo alla stessa prova di taglio, si nota che i due profili degli sforzi tangenziali presentano peculiarità diverse, come valori al picco, tratto iniziale e ramo discendente differenti. Affinché le due curve siano rappresentative del medesimo test, si deve perciò verificare che l'area sottesa ai due grafici sia uguale: se ciò non fosse rispettato, si avrebbero energie di frattura diverse e, secondo la relazione $P_{deb} = nb^* \sqrt{4G_F Et^*}$, anche carichi di delaminazione differenti, cosa inaccettabile visto che l'andamento del carico (e quindi il valore di P_{deb}) è unico. Si è pertanto calcolato il valore di G_F e si è dimostrato, come previsto, che le due funzioni presentano all'incirca lo stesso valore. Si intende precisare, comunque, che la scelta di una curva τ -slip rispetto ad un'altra non dovrebbe apportare grandi modifiche in termini di rappresentazione del comportamento del composito. In questo caso, si è presa in considerazione quella derivante da un profilo delle deformazioni differente in quanto si ipotizzava che quest'ultimo fosse quello più vicino all'inizio del processo di delaminazione.

Durante l'approfondimento numerico si è considerata anche un'altra prova sperimentale, la DS_330_43_L_S_2, caratterizzata dalla stessa geometria di quella presentata, ma con la sostanziale differenza che i fasci in PBO sono stati applicati al supporto in calcestruzzo mediante un solo strato di matrice cementizia. Come fatto per il DS_330_43_S_5, anche in questo caso sono stati analizzati gli andamenti delle deformazioni registrate durante la delaminazione, la curva τ - slip e quella carico-spostamento. Per evitare di appesantire la trattazione, i risultati di suddetta prova sono riportati in appendice.

3.4.2 Strategia di modellazione proposta

Si è optato per riprodurre il modello in 3 dimensioni utilizzando elementi brick a 8 nodi. La configurazione del precedente modello [23] è stata rivista, decidendo di modellare gli strati di malta (solo quello inferiore o entrambi in base al modello considerato) con elementi deformabili.

Le ipotesi di base dell'approccio numerico affrontato sono:

- fibra in PBO composta da materiale omogeneo ed isotropo con comportamento elastico-lineare;
- matrice cementizia costituita da materiale omogeneo ed isotropo anch'essa con legge costitutiva elastica-lineare;

- trasmissione delle tensioni in modo omogeneo in senso trasversale alle fibre e assenza di un effetto imputabile alla larghezza di incollaggio.
- deformazioni del supporto rigido trascurabili rispetto a quelle della matrice e delle fibre (condizione che ha consentito di tralasciare la presenza del parallelepipedo in calcestruzzo nei modelli);
- contributo del contatto delle zone laterali delle fibre trascurabile.

3.4.3 Materiali

Le proprietà con cui sono state modellate le fibre e gli strati di malta sono le stesse ricavate dalla caratterizzazione del materiale condotta preliminarmente agli shear test (tabella 3-9 e tabella 3-10).

Proprietà PBO	
Modulo di Young [GPa]	206
Modulo di Poisson [-]	0.3

Tabella 3-9 Proprietà PBO

Proprietà matrice cementizia	
Modulo di Young [GPa]	30
Modulo di Poisson [-]	0.15

Tabella 3-10 Proprietà matrice

3.4.4 Legge costitutiva dell'interfaccia

L'associazione di una legge all'interfaccia tra fascio in PBO e matrice cementizia è stata applicata in modo analogo a quanto operato da Lobelle [23].

L'interazione tra PBO e matrice è data dall'unione dei seguenti aspetti:

- contatto in direzione normale alle due superfici;
- separazione tra fascio e matrice regolamentata da:
 - (1) legge coesiva;
 - (2) propagazione del danno.

Prima di elencare le proprietà con le quali si è riprodotta la legge τ -slip, si intende ora introdurre brevemente le possibilità di programmazione fornite dal programma [25] e utilizzate in questo caso, in modo da chiarirne l'applicazione e giustificarne l'utilizzo.

3.4.4.1 Normal behaviour

Per minimizzare la compenetrazione tra le due superfici è applicata la proprietà "hard contact", basata sul controllo degli sforzi che avvengono durante lo scorrimento.

In particolare, come evidenzia la figura 3-25, quando c'è distacco tra le due superfici la pressione di contatto risulta nulla mentre è diversa da zero quando le due interfacce sono tra loro collegate.

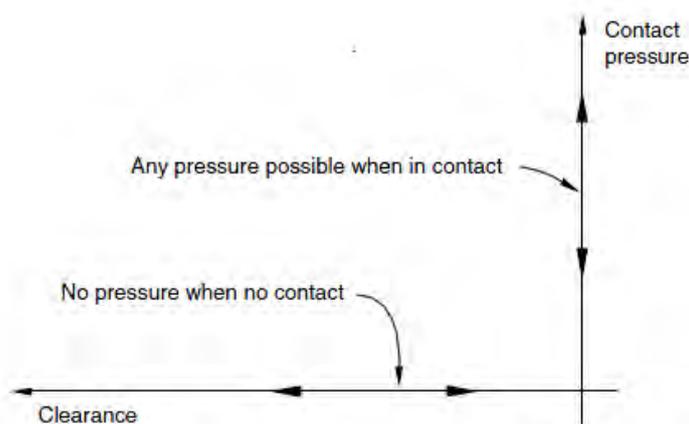


Figura 3-25 Andamento standard della pressione durante il contatto [25].

3.4.4.2 Comportamento coesivo (surface-based cohesive behaviour)

Particolarmente adatta a questo caso di studio, si è rivelata l'opportunità in Abaqus di controllare lo sforzo tangenziale all'interfaccia attribuendo alle superfici una legge di tipo coesivo.

Come riporta il manuale [25], questa soluzione è adatta per modellare il comportamento di regioni con spessore infinitesimo, come rappresenta appunto il caso di delaminazione esaminato, in cui l'andamento coesivo non è conferito dalla sola matrice, bensì dall'interazione tra PBO e malta cementizia.

L'andamento coesivo è strettamente legato al comportamento normale descritto nel paragrafo precedente: quando un nodo della superficie slave è unito alla superficie master, l'unica proprietà attiva risulta la pressione di contatto definita nel "normal behaviour". La legge coesiva rimane latente fino a quando non avviene il distacco del

nodo di controllo dalla superficie: da questo momento in poi, solamente il "cohesive behaviour" regola il contatto, mentre il comportamento normale si disattiva ($P_{contatto}=0$).

Il "surface-based cohesive behaviour" si basa sul controllo degli spostamenti trasversali tra i nodi appartenenti alle superfici tra le quale avviene lo sfregamento ("traction-separation behaviour"). Similmente a quanto specificato per i materiali, la legge coesiva è definita attraverso una matrice di rigidità che permette di collegare le tensioni allo spostamento, inteso come separazione tra le due superfici.

Chiamato \mathbf{t} il vettore delle tensioni (costituito in generale da tre componenti, t_n, t_s, t_t) e δ quello degli spostamenti (anch'esso formato da tre componenti corrispondenti alle tre direzioni in cui può avvenire lo slip), l'andamento degli sforzi all'interfaccia si scrive:

$$\bar{\mathbf{t}} = \begin{Bmatrix} K_{nn} & K_{ns} & K_{nt} \\ K_{ns} & K_{nt} & K_{st} \\ K_{nt} & K_{st} & K_{tt} \end{Bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \delta_n \\ \delta_s \\ \delta_t \end{Bmatrix} = \mathbf{K}\delta$$

dove K_{ij} rappresenta la tensione che si registra lungo la direzione i a seguito di uno spostamento unitario in direzione j . L'andamento che ne consegue è di tipo elastico lineare (figura 3-26).

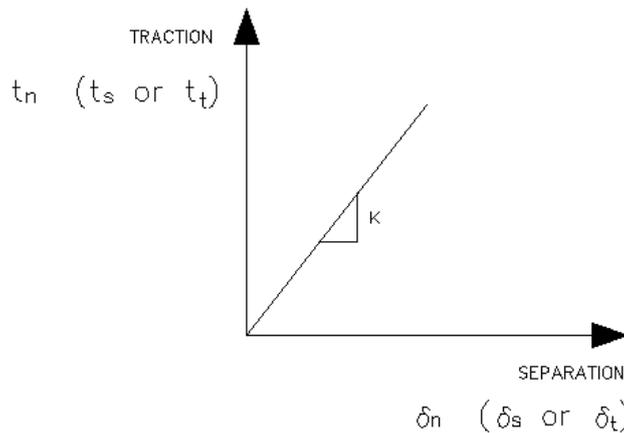


Figura 3-26 "Traction separation behaviour" nella legge coesiva [25].

Ci sono due possibilità per definire il legame tensioni-spostamento:

- "coupled", in cui uno spostamento in una direzione comporta una variazione di tensione non solo nella direzione dello spostamento ma anche lungo le altre direzioni;

- "uncoupled", dove un incremento dello scorrimento in un senso non determina una variazione degli sforzi lungo altre direzioni.

Nel caso di studio riportato, si è scelto di utilizzare la seconda possibilità. Ciò per minimizzare l'effetto degli spostamenti lungo le direzioni trasversali al fascio sugli sforzi in senso parallelo alla lunghezza di incollaggio. Le tensioni seguono un andamento lineare fino a quando non subentra una legge che degrada la rigidità del legame costitutivo inserito.

3.4.4.3 Definizione del danno

È una proprietà che interagisce con la legge coesiva precedentemente illustrata. Interviene nel contatto riducendo le tensioni del legame costitutivo elastico lineare all'interfaccia attraverso un fattore D , definito parametro di danno. In particolare, il danno permette la corretta definizione del ramo discendente della curva τ -slip.

Gli aspetti fondamentali, da determinare per introdurre il degrado della legge coesiva nel modello, sono due:

- A. tensione di inizio del danno;
- B. legge evolutiva.

Per capire meglio gli effetti del danno nella legge coesiva applicata tra due superfici in contatto, si può far riferimento alla Figura 3-27.

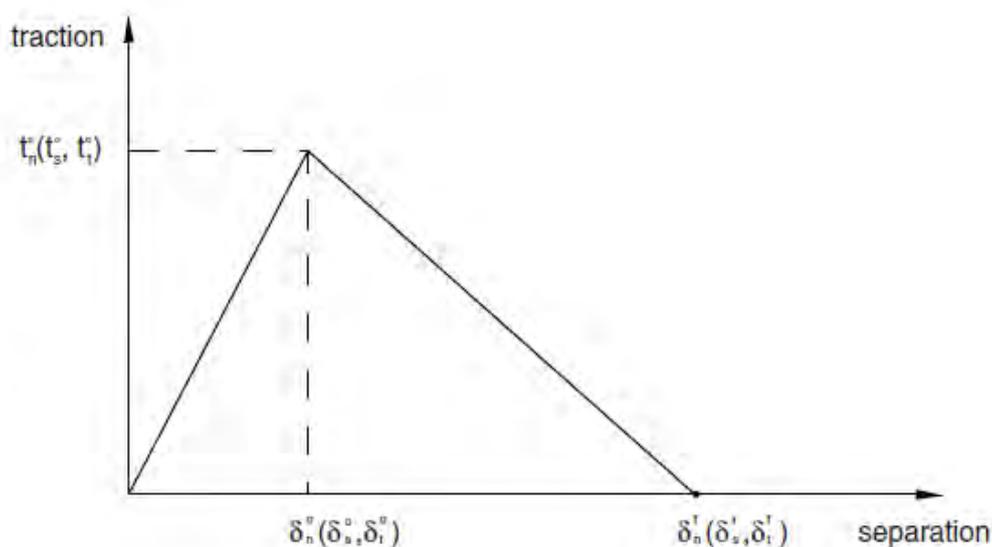


Figura 3-27 Intervento nel danno nella risposta coesiva all'interfaccia tra due superfici [25].

La risposta coesiva del materiale rimane imperturbata fino al raggiungimento della tensione t^0 (alla quale è associato uno spostamento pari a δ^0 misurato tra i nodi delle superfici in contatto). Oltre tale limite, gli sforzi diminuiscono progressivamente all'aumentare dello scorrimento ad opera della legge evolutiva (in figura definita in modo tale da conferire un decadimento lineare), fino ad annullarsi in corrispondenza al valore δ^f . Per valori dello scorrimento superiori a δ^f , c'è completa separazione tra i due elementi e non si registrano più trasferimenti di sforzi tra le due entità.

A. Criterio di inizio del danno

Abaqus ha la possibilità di implementare diversi modi con cui determinare l'introduzione del danno nella legge coesiva all'interfaccia tra due superfici in contatto: maximum stress criterium (basato sulla massima tensione raggiunta), quadratic stress criterion (basato sul quadrato delle tensioni raggiunte), maximum separation criterion (danno subentrato dopo il raggiungimento di un determinato scorrimento), quadratic separation criterion (basato sul quadrato degli spostamenti).

Il criterio scelto per l'approccio numerico proposto è quello che prende in considerazione il raggiungimento di una tensione massima. Definito t_i^0 il limite della tensione di contatto nella direzione i e t_i la tensione trasmessa all'interfaccia, il danno comincia a ledere la legge coesiva una volta che il valore dello sforzo raggiunge quello limite, ovvero:

$$\max \left\{ \frac{t_n}{t_n^0}, \frac{t_s}{t_s^0}, \frac{t_t}{t_t^0} \right\} = 1$$

Nei modelli implementati, si è scelto di imporre una tensione massima trasferibile secondo la legge elastica lineare (vettore t^0), identica nelle tre direzioni.

B. Legge evolutiva

Una volta raggiunto il criterio entro il quale subentra il degrado del contatto, il danno è definito secondo la relazione:

$$t_i = \begin{cases} (1-D)\bar{t}_i & \text{se } \bar{t}_i > t_i^0 \\ \bar{t}_i & \text{se } \bar{t}_i \leq t_i^0 \end{cases}$$

dove:

- D è uno scalare variabile da 0 (assenza di danno) a 1 (completo distacco tra le due superfici);

- \bar{t}_i la tensione in direzione i , ottenuta seguendo il legame elastico-lineare della legge coesiva.

Sapendo quindi lo sforzo effettivamente trasmesso all'interfaccia (t_i) e quello corrispondente seguendo un andamento elastico (\bar{t}_i), è possibile introdurre i valori del parametro D in modo da riprodurre fedelmente il ramo softening della curva sforzo-scorrimento (sfruttando il comando "tabular evolution").

Il parametro di danno è inoltre funzione dello scorrimento plastico che avviene tra gli elementi in contatto, ovvero $\delta_m^f - \delta_m^0$, in cui con δ_m^f si indica lo scorrimento in corrispondenza del quale si ottiene il distacco delle due superfici, mentre δ_m^0 è lo spostamento registrato al raggiungimento della tensione di inizio del danno. Abaqus prevede la possibilità di associare il parametro D anche all'evoluzione dell'energia di frattura G_f .

Nei modelli studiati si è preferita la possibilità basata sullo scorrimento plastico, introducendo una quindi tabella " $D; \delta_m^f - \delta_m^0$ ".

3.4.4.4 Applicazione del contatto

La mutua trasmissione di sforzi tra fibra e matrice è resa possibile in Abaqus sfruttando il modulo di interazione, nel quale è possibile scegliere diversi tipi di contatto a seconda del caso che si vuole rappresentare.

Il contatto scelto in questo caso è del tipo "surface-to-surface", modalità che consente all'utente di definire cosa accade quando due elementi si sfregano. L'applicazione al modello avviene attraverso la definizione di 3 aspetti fondamentali:

- A. definizione delle superfici alla quale associare le proprietà del contatto ("contact pairs definition / master-slave surfaces");
- B. tipo di discretizzazione da considerare ("contact discretization");
- C. scegliere che monitoraggio utilizzare per supervisionare il contatto ("tracking approach").

A. Definizione delle superfici

L'associazione del contatto avviene per mezzo della definizione di coppie di superfici, tra le quali si instaura un legame di tipo master-slave. Il software prevede delle precise regole con cui scegliere quale fra le due superfici sia debba essere la master e quale la slave.

B. Controllo del contatto (contact discretization)

Una volta definita la coppia di superfici alle quali affidare le proprietà di interazione, Abaqus impone dei vincoli alle superfici per simulare il contatto. Tali costrizioni sono imposte in modo differente a seconda dell'opzione che si sceglie:

- Node-to-surface;
- Surface-to-surface.

La prima possibilità prevede il controllo dello spostamento tra i nodi della superficie slave e le relative proiezioni degli stessi sulla superficie master. I vincoli sono attivi solo in direzione normale alla superficie master. Inoltre, tale metodo permette ai nodi di questa superficie di penetrare all'interno della slave, ma non viceversa.

Nel secondo criterio, i nodi della superficie slave diventano il centro di piccole regioni costruite attorno agli stessi: in tal modo il controllo del contatto è affidato non più alle proiezioni dei nodi sulla master, bensì alle regioni stesse. Inoltre i vincoli non sono disposti solamente lungo la proiezione dei nodi, bensì riguardano più direzioni. Ciò si traduce in un miglior controllo della penetrazione tra le due interfacce, permettendo di minimizzare l'accesso dei nodi master sulla superficie slave (figura 3-28).

Confrontando le due modalità descritte, in generale l'approccio surface-to-surface fornisce risultati migliori in termini di pressione e sforzi tangenziali trasmessi con contatto. Ciò è giustificabile dal fatto che, con la modellazione node-to-surface, la resistenza al contatto è fornita esclusivamente dai singoli nodi della superficie slave nei confronti della master; nel caso surface-to-surface, invece, la resistenza è data da regioni di piano finite e non da singoli nodi.

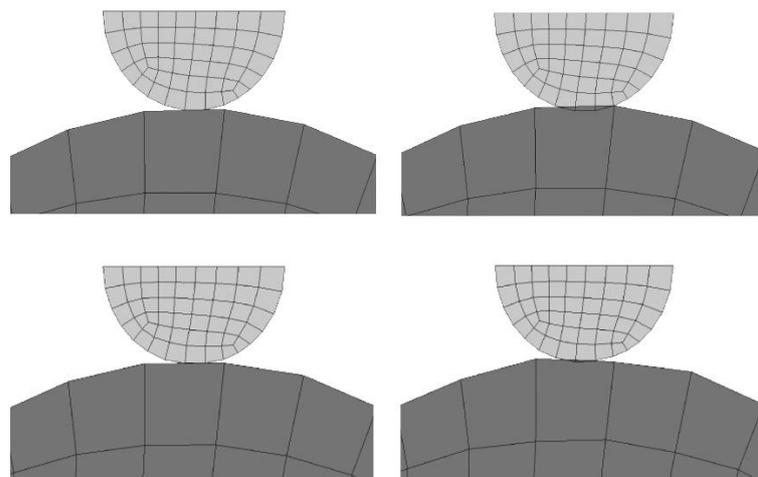


Figura 3-28 Penetrazione della superficie master nei confronti della slave: metodologia node-to-surface (prime due figure in alto) e surface-to-surface (due figure in basso)[25].

C. Tracking approach

In base agli scorrimenti relativi tra le due superfici, si deve scegliere tra due possibilità di analisi:

- finite-sliding tracking approach;
- small-sliding tracking approach.

La prima possibilità prevede spostamenti rilevanti tra la superficie slave e la master, costringendo al codice di ricalcolare, di volta in volta, i vincoli di contatto sussistenti tra le due interfacce.

La seconda procedura di analisi prevede uno spostamento limitato tra le due superfici in modo tale che il nodo (Node-to-surface) o una regione (Surface-to-surface) interagisca con la stessa porzione della superficie master durante tutta l'analisi. Utilizzando questo tipo di approccio, la superficie master viene sostituita localmente da un piano. Di conseguenza, il vincolo alla penetrazione non è più fornito dalla superficie master stessa, ma dal piano tangente introdotto.

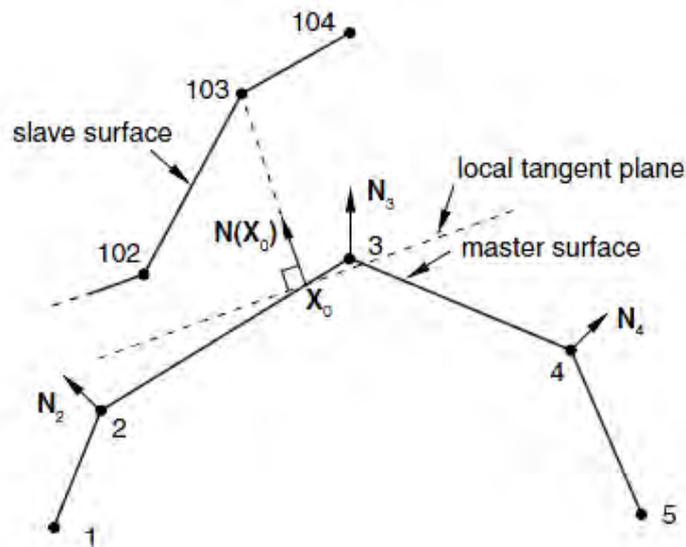


Figura 3-29 Small sliding tracking approach nel caso della formulazione node-to-surface [25].

3.4.4.5 Parametri introdotti nei modelli

Le proprietà del contatto nei vari modelli sono state implementate tutte in modo analogo, introducendo diversi parametri a seconda delle prove usate per la calibrazione dei modelli. Di seguito si descrive in modo dettagliato la procedura con la quale si sono determinati i parametri utili ad implementare la legge costitutiva rappresentativa del test

DS_330_43_S_5, mentre ci si limita semplicemente a riportarli nel caso in cui si sia considerata la prova DS_330_43_L_S_2.

E' stato scelto un contatto del tipo "surface-to-surface" considerando piccoli spostamenti tra le due interfacce (small-sliding tracking approach). Il contatto è associato alle superfici in maniera tale che quelle appartenenti alla matrice cementizia siano sempre le superfici master, mentre quelle appartenenti alle fibre siano le slave.

Per quanto riguarda le proprietà con cui è stato implementato il contatto, si sono considerati i tre aspetti in precedenza descritti:

- A. Normal behaviour;
- B. comportamento coesivo;
- C. danno.

Di seguito si riportano i dati introdotti nel software.

A. Normal behaviour

Si è optato per l'opzione "hard contact" in modo da minimizzare le compenetrazioni tra le due superfici.

B. Legge coesiva

Le rigidezze da inserire nelle tre direzioni sono state valutate in base alla prima parte lineare elastica della curva τ -slip come in figura 3-30, ricavandone la pendenza della retta tangente a tale tratto. Per svincolare l'andamento degli sforzi tangenziali dagli spostamenti lungo le tre direzioni, si è usato un legame di tipo "uncoupled".

In tabella 3-11 e tabella 3-12 si riportando le rigidezze introdotte.

knn	kss	ktt	kns	knt	ksn
17,463	17,463	17,463	0	0	0

Tabella 3-11 Rigidezze del tratto coesivo (DS_330_43_S_5).

knn	kss	ktt	kns	knt	ksn
15,7	15,7	15,7	0	0	0

Tabella 3-12 Rigidezze del tratto coesivo (DS_330_43_L_S_2).

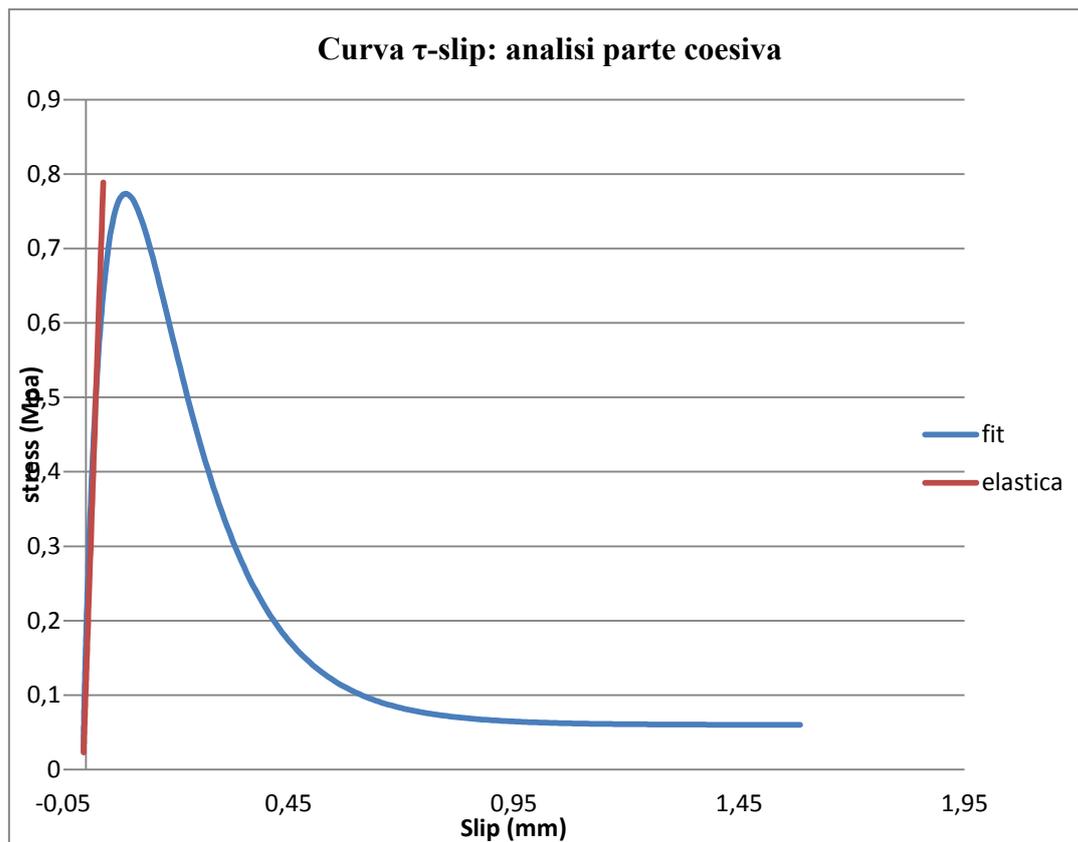


Figura 3-30 Esempio di come si è valutazione la pendenza elastica della curva τ -slip (DS_330_43_S_5).

C. Danno

Come criterio iniziale del danno, si è scelto quello basato sulla massima tensione sviluppata seguendo il legame elastico lineare. Per ricavare la tensione da inserire nel software, si è individuato il punto della curva τ -slip oltre il quale il legame sforzo-slip non è più descrivibile secondo la legge coesiva, quantificato in corrispondenza al raggiungimento di una tensione pari a 0,5039 MPa, alla quale corrisponde uno spostamento di 0.0001435 mm. Il criterio di inizio del degrado è stato inserito come riportato in tabella 3-13.

Criterio di inizio del danno			
	Normal only (MPa)	Cshear1 (MPa)	Cshear2 (MPa)
τ	Arbitrario	0,5039	Arbitrario

Tabella 3-13 Criterio di inizio del danno (DS_330_43_S_5).

In maniera analoga è stato fatto per il test DS_330_43_L_S_2 (tabella 3-14).

Criterio di inizio del danno			
	Normal only (MPa)	Cshear1 (MPa)	Cshear2 (MPa)
τ	Arbitrario	0,9018	Arbitrario

Tabella 3-14 Criterio di inizio del danno (DS_330_43_L_S_2).

Raggiunto lo stress limite, subentra la legge evolutiva del danno: essa è stata introdotta attraverso una tabella in cui al parametro D si associa l'evoluzione dello scorrimento plastico tra le due superfici ($\delta_m^f - \delta_m^0$). I dati inseriti sono riportati in appendice per entrambi i casi.

Contrariamente a quanto fatto in [23], non è stato applicato un attrito alla coulomb per simulare la parte a sforzo tangenziale costante, bensì si è sfruttata la stessa legge evolutiva. Si è notato, infatti, che quest'ultima soluzione migliorava la convergenza dell'analisi numerica. In figura 3-31 si riporta uno schema con il quale si illustra l'interazione tra le diverse proprietà nella costruzione della legge all'interfaccia tra fibra e supporto.

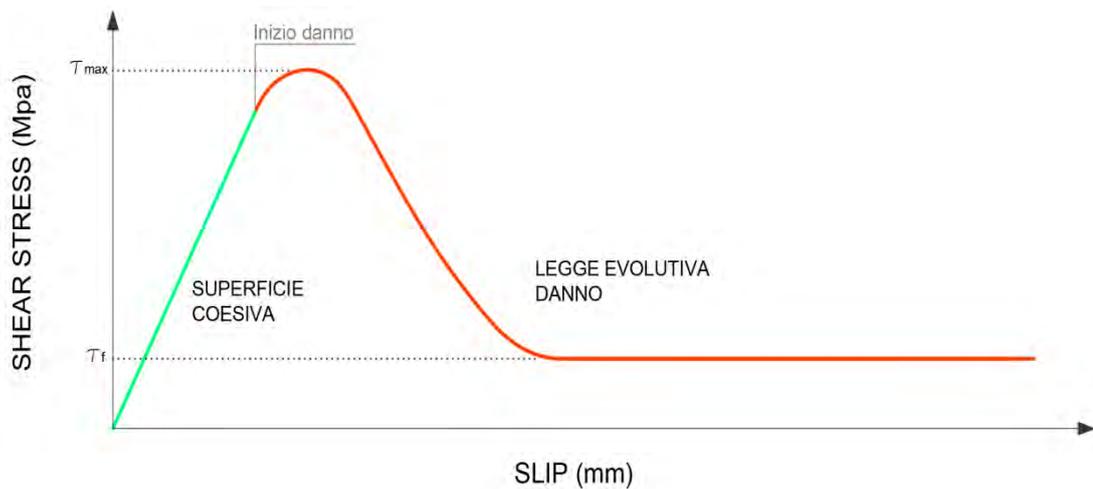


Figura 3-31 Modalità di interazione delle proprietà di contatto associate all'interfaccia per modellare la legge costitutiva.

3.4.5 Metodologia di analisi

La tecnica di analisi applicata ai modelli implementati è basata sul controllo degli spostamenti. In particolare, si è scelto di utilizzare un'analisi statica durante la quale si incrementa linearmente lo spostamento imposto all'estremità della fibra.

Contrariamente a quanto eseguito nel modello 2D, in questo caso si è visto che considerare un solo step di analisi era sufficiente per ottenere una buona convergenza dei risultati. A questo passo introdotto dall'utente, si deve sempre aggiungere quello standard imposto dal software, durante il quale sono applicati i vincoli agli elementi.

Lo spostamento massimo raggiunto a fine step è pari a 4 mm, valore col quale si riteneva di poter cogliere l'intera evoluzione del carico nell'FRCM.

Nello specifico, lo step viene automaticamente suddiviso in incrementi (definiti "frame") da un valore minimo pari a 0,01 fino ad un massimo di 0,02, ovvero corrispondente ad uno spostamento applicato variabile da 0,04 mm a 0,08 mm. La grandezza degli incrementi dipende dalle caratteristiche di convergenza del modello: nel caso in cui lo spostamento applicato fosse troppo elevato, l'ampiezza è automaticamente ridotta fino ad un minimo impostato dall'utente in $1E-5$.

La tabella 3-15 riassume i passi considerati e le loro caratteristiche.

Passi	incremento	spostamento (mm)	proprietà
Initial (standard)	-	-	vincoli (di incastro)
Disp	automatico da 0,01 fino a 0,02 (min $1E-5$)	variazione lineare da 0 a 4	applicazione spostamento/ interazione superfici

Tabella 3-15 Riassunto step di analisi.

3.4.6 Modellazione di un fascio in PBO e di un solo strato di matrice.

Come primo approccio, si è scelto di modellare un solo fascio in PBO a contatto con lo strato inferiore di matrice cementizia. Si suppone quindi di riprodurre i risultati del DS_330_43_S_5 semplicemente raddoppiando le reazioni ricavate dall'analisi fem e moltiplicandole per un numero equivalente ai fasci longitudinali applicati al supporto.

3.4.6.1 Geometria del modello, mesh e condizioni al contorno.

La geometria è molto semplice: il modello comprende due elementi deformabili ed omogenei, dei quali uno rappresenta lo strato inferiore della matrice cementizia applicato al supporto in calcestruzzo, mentre l'altro è il fascio in PBO.

Per quanto concerne in supporto, si è costruito un parallelepipedo 330mm di lunghezza, 4 mm di altezza per 10 mm di profondità; sono stati impiegati degli elementi finiti tridimensionali a 8 nodi con funzioni di forma lineari (figura 3-32).

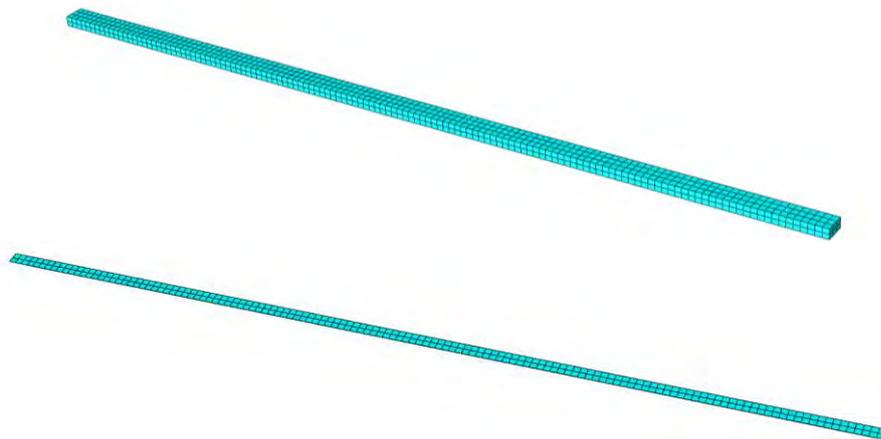


Figura 3-32 Particolare dei due elementi del modello . Sopra: strato di matrice inferiore. Sotto: fascio in PBO.

Il fascio è stato riprodotto attraverso un parallelepipedo lungo 330 mm con sezione 5x0,092 mm. Anch'esso è stato discretizzato con elementi brick ad 8 nodi aventi lunghezza massima pari a 2,5 mm per lato. Lo strato inferiore di matrice è stato poi vincolato nelle tre direzioni per simulare l'applicazione dello stesso al supporto. Il contatto è stato implementato applicando le proprietà di interazione alla faccia superiore della matrice e a quella inferiore del fascio.

In figura 3-33 è riportato il modello finale considerato.

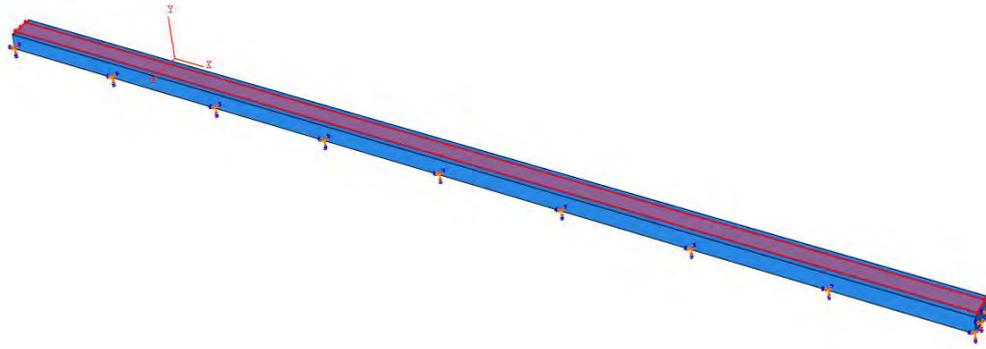


Figura 3-33 Modello finale (modellazione di un solo fascio a contatto con uno strato di matrice).

3.4.6.2 Risultati

Le proprietà di interazione associate all'interfaccia PBO-matrice hanno permesso di ottenere una perfetta riproduzione dell'andamento degli sforzi tangenziali (figura 3-34).

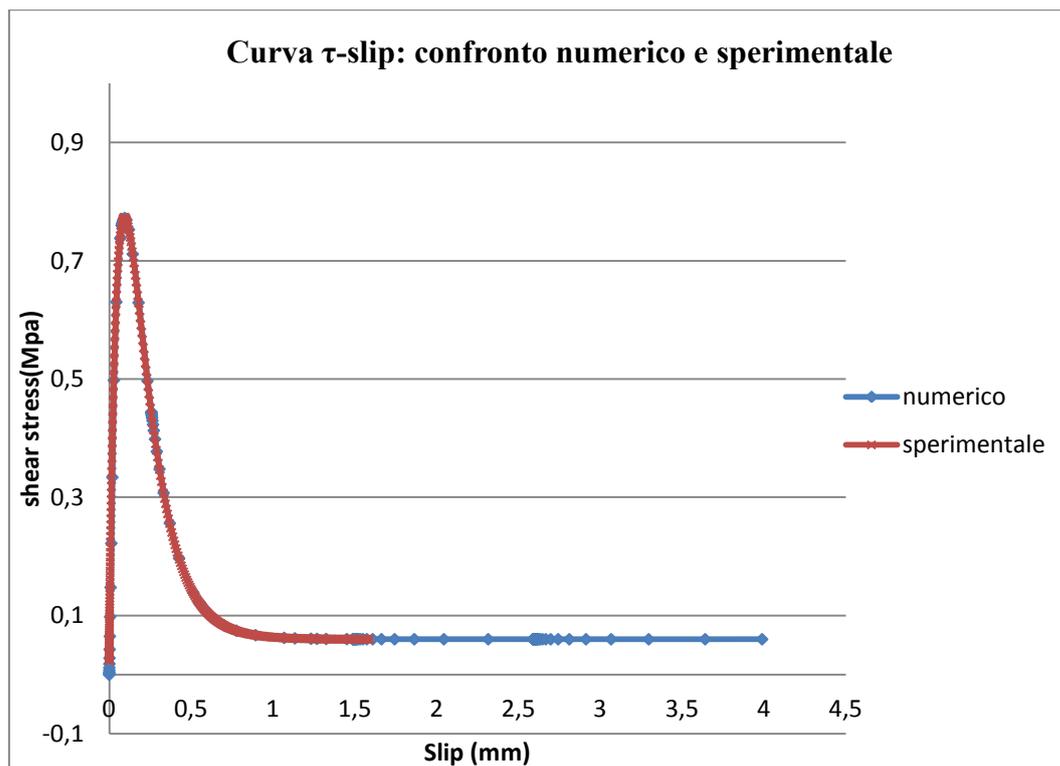


Figura 3-34 Confronto tra risultati numerici e analitici relativi alla curva τ -slip (caso: uno strato di matrice- DS_330_43_S_5).

L'evoluzione del processo di delaminazione è ben rappresentata dal modello, come testimoniano i frame elaborati dal postprocessore: si nota infatti uno scorrimento progressivo della lunghezza efficace fino al completo distacco del fascio dalla matrice .

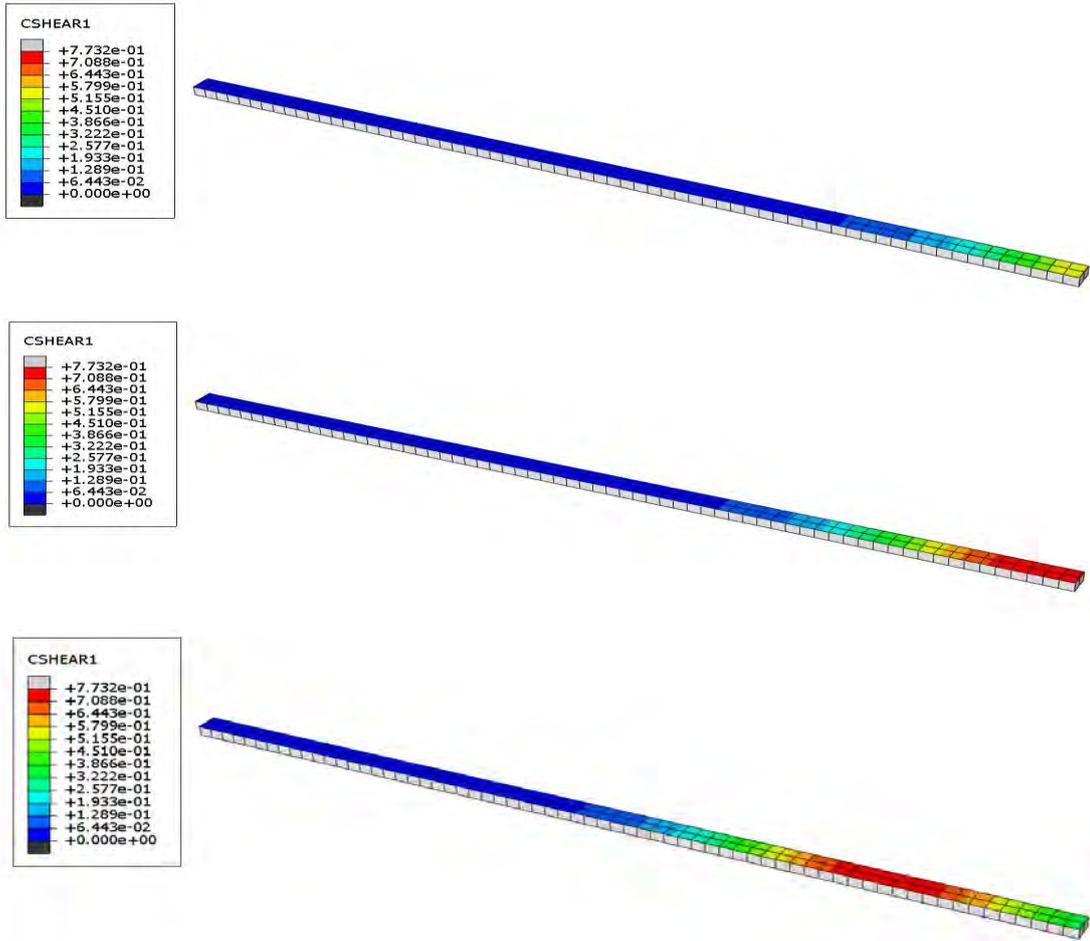


Figura 3-35 Propagazione della delaminazione lungo la lunghezza di incollaggio.

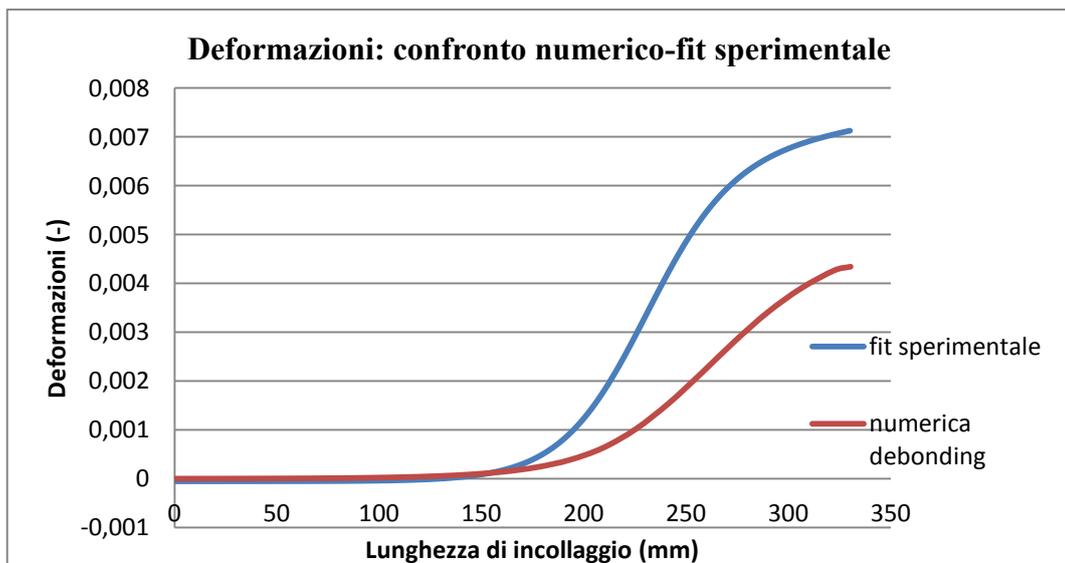


Figura 3-36 Confronto tra risultati numerici e analitici relativi alle deformazioni (caso: uno strato di matrice- DS_330_43_S_5).

In figura 3-36 si riportano le deformazioni del fascio del caso sperimentale rapportate a quelle ottenute con modello fem. Si evidenzia una profonda incongruenza tra i due andamenti: sebbene la forma della curva numerica assomigli a quella dello shear test, i valori di deformazioni sono poco più della metà rispetto a quelli riscontrati nel caso sperimentale.

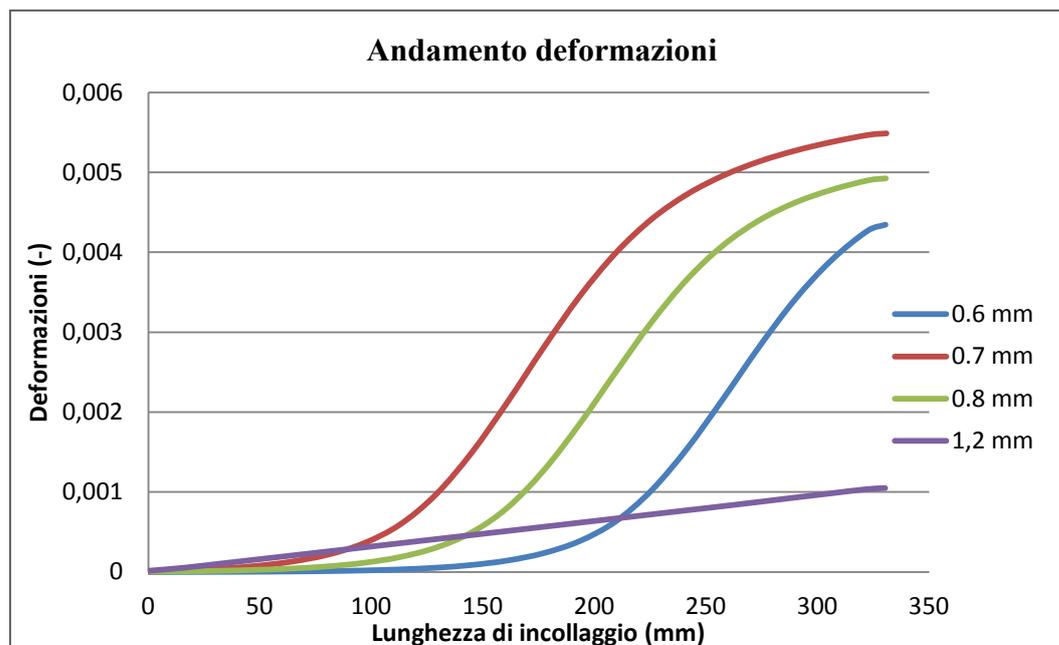


Figura 3-37 Evoluzione delle deformazioni a variare dello spostamento imposto.

Al variare dello spostamento applicato, si nota un incremento delle deformazioni lungo la zona fissata al supporto, simulando quindi la propagazione della zona di trasferimento degli sforzi come previsto a livello teorico (figura 3-37). L'unica incongruenza si riscontra per uno spostamento pari a 1,2 mm, ovvero quando la delaminazione ha interessato tutto il provino e lo sforzo tangenziale è regolato dalla presenza del solo attrito tra le fibre e la matrice. In questo caso particolare, le deformazioni calano bruscamente e l'andamento non è più quello previsto a distacco avvenuto, ma assume un incremento lineare. Si ipotizza che questo comportamento sia dato da un recupero improvviso della deformazione elastica da parte del fascio una volta che la frattura si è propagata lungo tutta l'interfaccia.

Avendo assunto le ipotesi semplificative elencate al §3.4.2, la curva carico-spostamento è stata ricavata dalle reazioni nodali dell'elemento fibra moltiplicate per 10 (parametro introdotto per considerare la presenza di due strati di matrice e dei cinque fasci che costituiscono l'interfaccia dell'FRM applicato al DS_330_43_S_5).

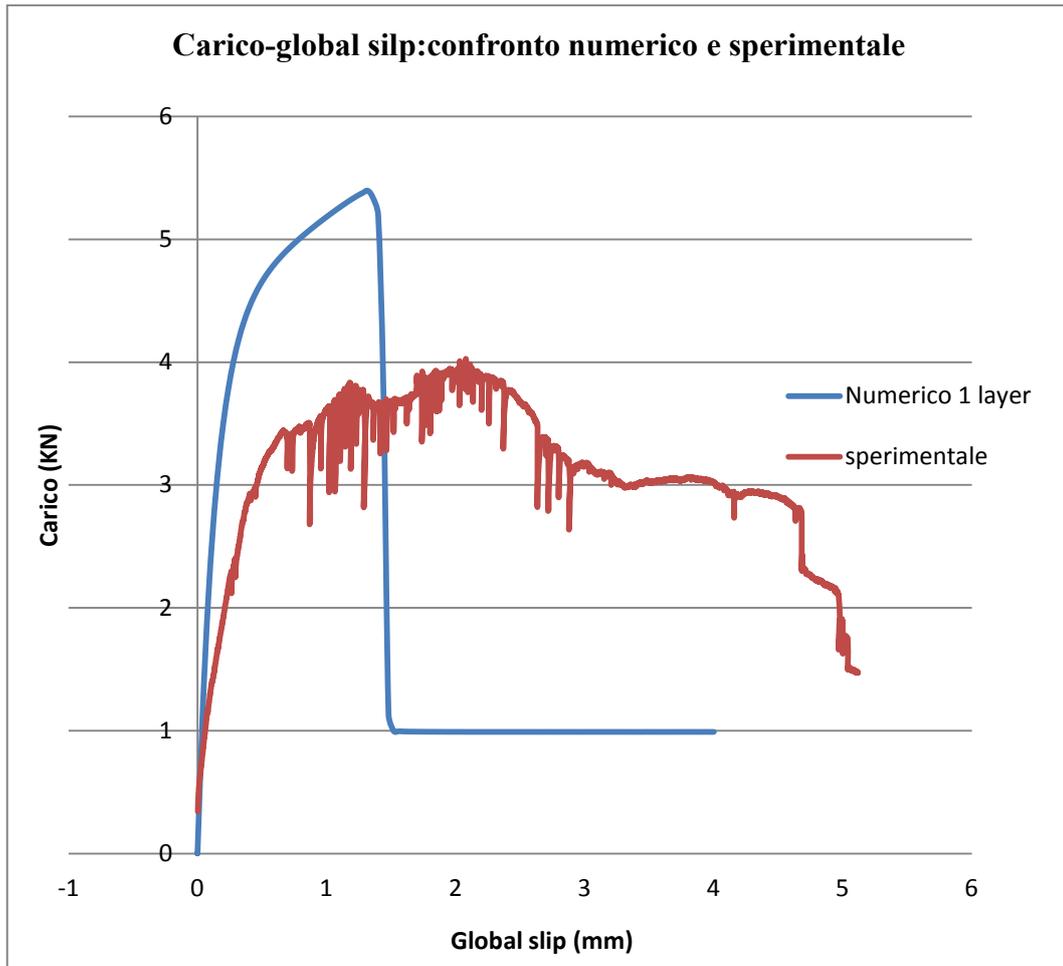


Figura 3-38 Confronto tra risultati numerici e analitici relativi alla curva carico-spostamento (caso: uno strato di matrice- DS_330_43_S_5).

Come chiaramente riportato in Figura 3-38, il carico supera abbondantemente i valori raggiunti dallo shear test. Questo risultato potrebbe essere conseguenza di una sovrastima dell'influenza dello strato inferiore della matrice. In realtà, i due strati sono vincolati esternamente in modo differente (quello sotto è incastrato mentre quello esterno è libero): diverse condizioni al contorno portano inevitabilmente a deformazioni diverse dei due strati e quindi a reazioni differenti. Moltiplicando più volte le forze ricavate considerando il solo strato inferiore, non si coglierebbero tali differenze, ottenendo quindi un carico maggiore rispetto alla condizione reale.

Volendo approfondire tale aspetto, si è utilizzato lo stesso approccio numerico utilizzando come modello il test DS_330_43_L_S_2.

Per settare il modello sulla base dei risultati ottenuti dal nuovo test di riferimento, si è dovuta elaborare una nuova legge costitutiva per l'interfaccia modificando le proprietà di

interazione. Per completezza, in figura 3-39 si riporta la nuova curva τ -slip implementata.

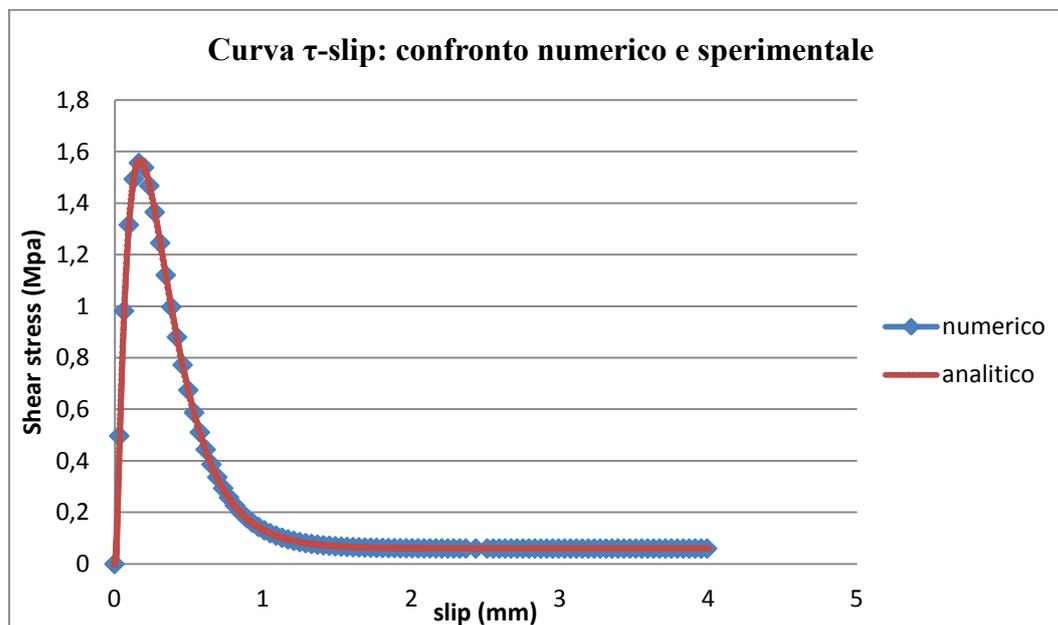


Figura 3-39 Confronto tra risultati numerici e analitici relativi alla curva τ -slip (caso: uno strati di matrice- DS_330_43_L_S_2).

In questo caso le deformazioni ricavate dal modello numerico sembrano rappresentare in maniera ottimale quelle del caso sperimentale (figura 3-40). L'STZ assume valori all'incirca uguali nei due casi, prova che il modello riesce ad esprimere in modo soddisfacente il trasferimento degli sforzi tra fibre e matrice.

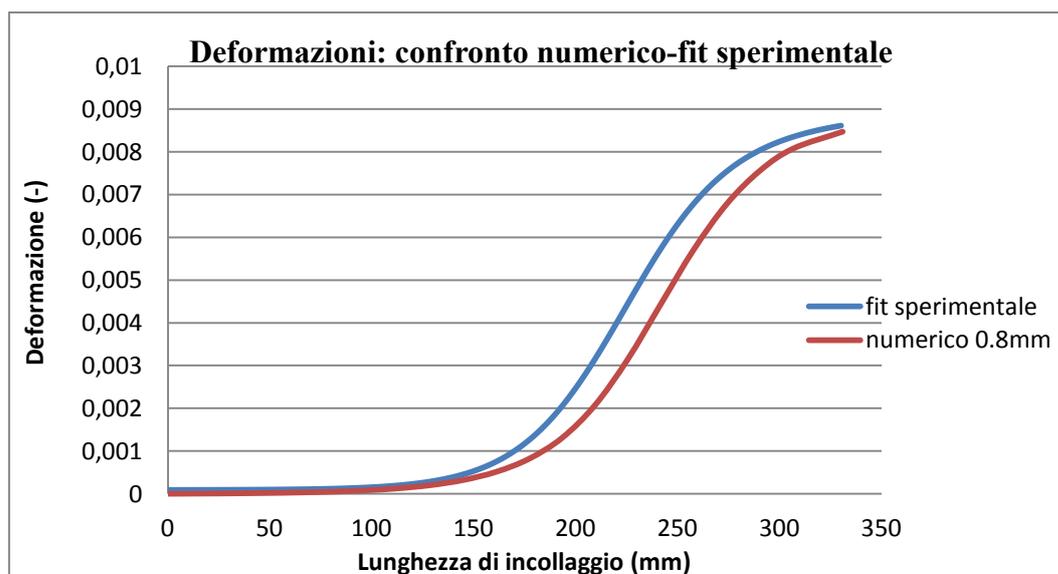


Figura 3-40 Confronto tra risultati numerici e analitici relativi alle deformazioni (caso: uno strati di matrice- DS_330_43_L_S_2).

Arrivando infine ad analizzare l'andamento del carico, si può notare in figura 3-41 una certa somiglianza nella prima parte della curva tra i risultati del fem e quelli della prova a taglio diretto. Nello specifico, si individua un leggero scostamento tra i due andamenti nella zona in cui inizia il processo di delaminazione, dove il trend sperimentale assume un andamento meno pronunciato rispetto al relativo caso numerico. L'ultima parte della curva numerica è ancora caratterizzata da un brusco calo del livello del carico che porta ad una profonda differenza nel comportamento a distacco nei due casi. Tuttavia, tali differenze non pregiudicano l'effettiva capacità del modello numerico di rappresentare esaurientemente il trasferimento degli sforzi, il processo di delaminazione e il carico massimo raggiunto dagli FRCM.

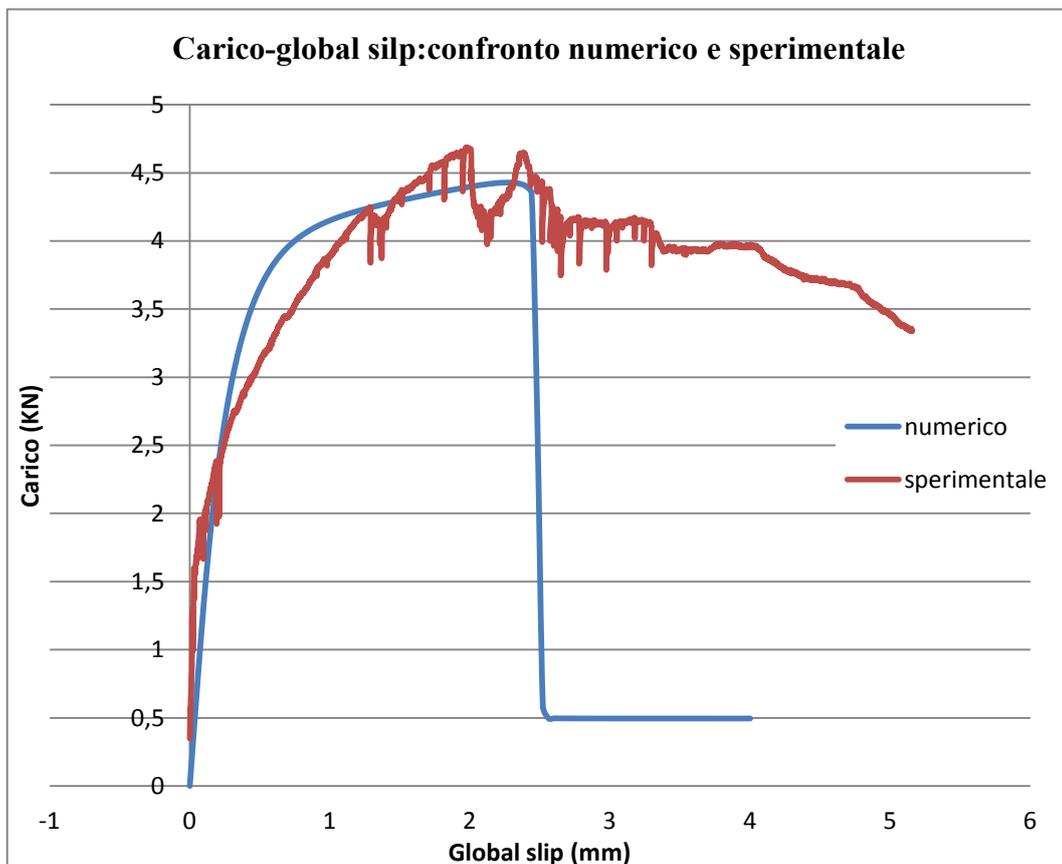


Figura 3-41 Confronto tra risultati numerici e analitici relativi alla curva carico-spostamento(caso: uno strato di matrice- DS_330_43_L_S_2).

In base alla risposta dello studio numerico calibrato con i dati del test DS_330_43_L_S_2, si può concludere affermando che la scelta di modellare un solo strato di matrice è una assunzione non accettabile per poter descrivere una

configurazione di prova caratterizzata dalla presenza di un secondo strato esterno di malta, in quanto i risultati che ne conseguono sono di gran lunga superiori rispetto a quelli effettivi. Tuttavia, una configurazione basata su un solo strato descrive ottimamente gli FRCM corrispondente a tale configurazione, dimostrano quindi che la strategia di modellazione tridimensionale può essere la strada giusta da intraprendere per riprodurre esattamente il comportamento di questi materiali compositi.

A questo punto, si intende approfondire il test DS_330_43_S_5, proponendo un modello più elaborato rispetto a quello appena descritto.

3.4.7 Modellazione di un fascio in PBO compresso tra due strati di matrice.

Dopo aver indagato l'interazione tra un solo strato di matrice e un fascio, si vuole ora indagare cosa varia considerando la presenza di due livelli di matrice, come appunto contraddistingue il provino DS_330_43_S_5.

3.4.7.1 Geometria del modello, mesh e condizioni al contorno

I due strati di malta sono stati modellati in un unico blocco lungo 330 mm, con sezione avente base 10 mm e altezza 8,082 mm.

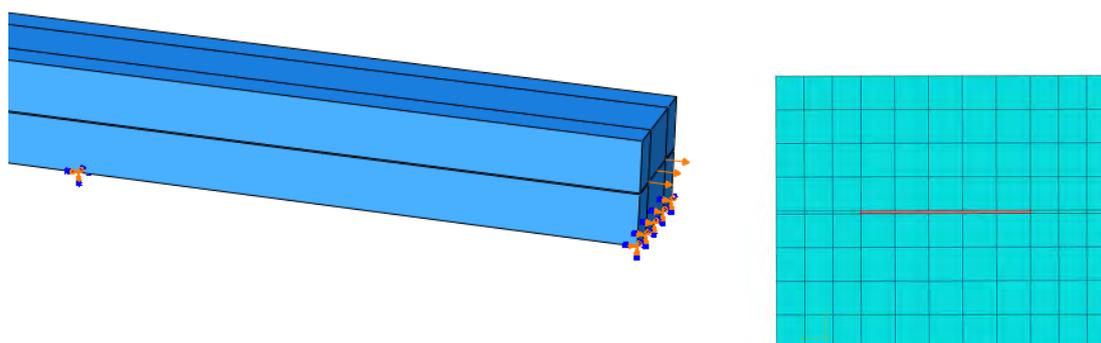


Figura 3-42 A sinistra: particolare del supporto. A destra: mesh e particolare del foro.

Come visibile in figura 3-42, al centro è stato modellato un foro (5x0,092x330 mm) per il posizionamento del fascio: è stato modellato con elementi brick ad 8 nodi (funzioni di forma lineari); la mesh è stata inserita manualmente per evitare la formazione di

elementi finiti troppo distorti. Il fascio in PBO ha lunghezza pari a 330 mm e sezione avente 5 mm di larghezza per 0,092 di altezza. Gli elementi utilizzati sono ancora una volta brick a 8 nodi. Per la geometria si veda quanto riportato nel paragrafo precedente.

Le proprietà di interazione descritte al §3.4.4.5 sono applicate alle superfici interne al foro (superfici master) e sulla fibra stessa (figura 3-43). La componente d'attrito data dal contatto delle zone laterali della fibra è stata trascurata.

Una faccia dell'elemento matrice è stata vincolata per simularne l'aderenza al supporto. In corrispondenza della faccia della fibra è stato applicato lo spostamento.

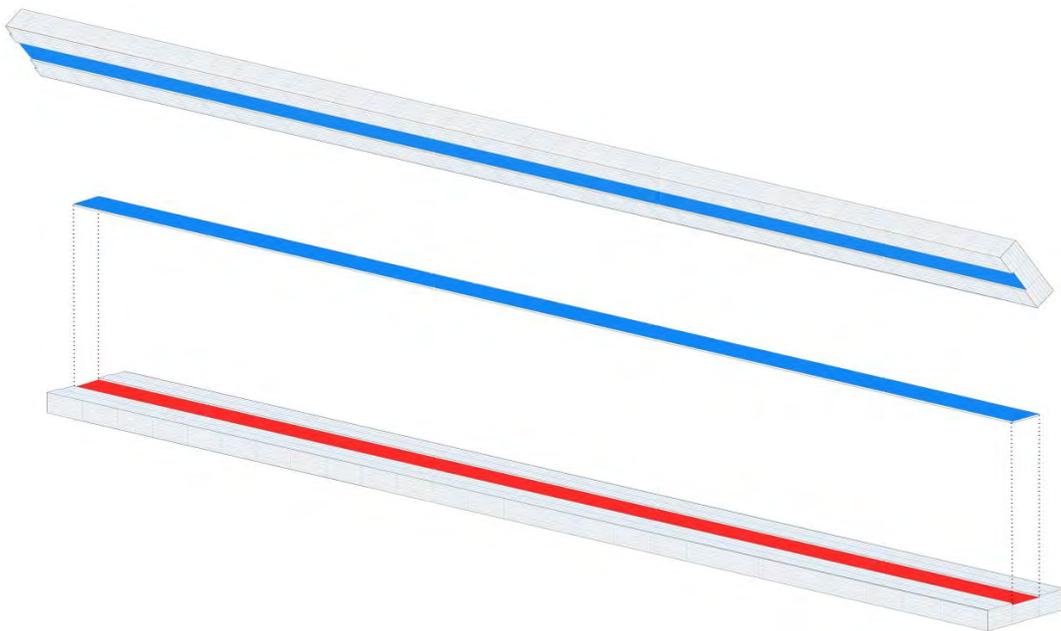


Figura 3-43 Schematizzazione del modello e modalità dell'applicazione delle proprietà di contatto alle superfici.

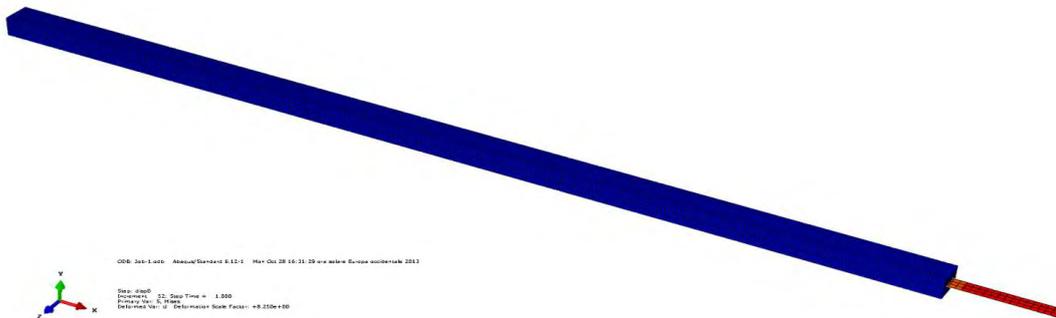


Figura 3-44 Modello totale considerato (configurazione deformata).

3.4.7.2 Risultati

Prima di passare al confronto tra i risultati sperimentali e quelli numerici, anche in questo caso si è verificata l'effettiva capacità delle proprietà di interazione di simulare la trasmissione degli sforzi in maniera analoga a quanto osservato sperimentalmente (figura 3-45). Ciò è stato accertato su entrambe le interfacce.

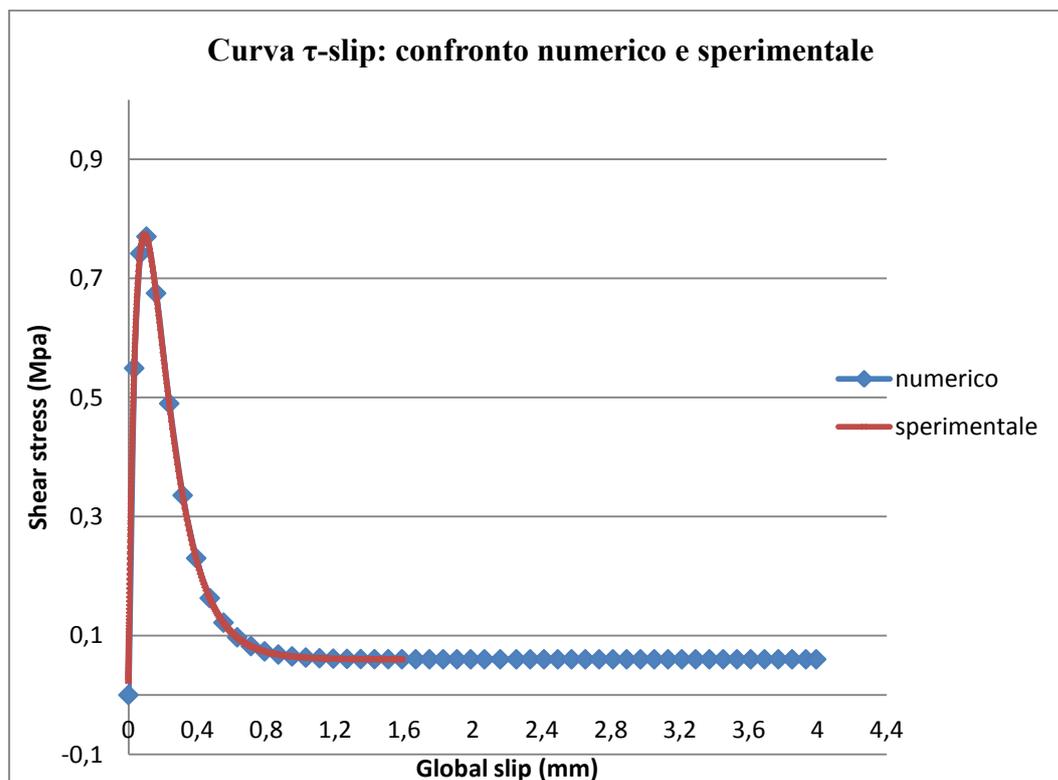


Figura 3-45 Confronto tra risultati numerici e analitici relativi alla curva τ -slip (caso: due strati di matrice- DS_330_43_S_5).

La trasmissione degli sforzi tangenziali all'interfaccia sembra rispecchiare quanto osservato sperimentalmente, con un processo di degrado che inizia in corrispondenza della parte tesa per poi propagarsi lungo tutta la lunghezza di incollaggio.

L'efficacia di questo modello si riscontra soprattutto nella rappresentazione delle deformazioni. La figura 3-46 espone le deformazioni numeriche, ottenute imponendo uno spostamento pari a 0,66 mm, e quelle osservate in corrispondenza al punto di delaminazione (punto B, figura 3-20): come si può osservare, l'andamento è molto simile sia in termini di forma, quanto in termini di valori raggiunti. In particolare, si riesce a distinguere nel modello una lunghezza di ancoraggio efficace confrontabile con quanto riportato dai dati sperimentali.

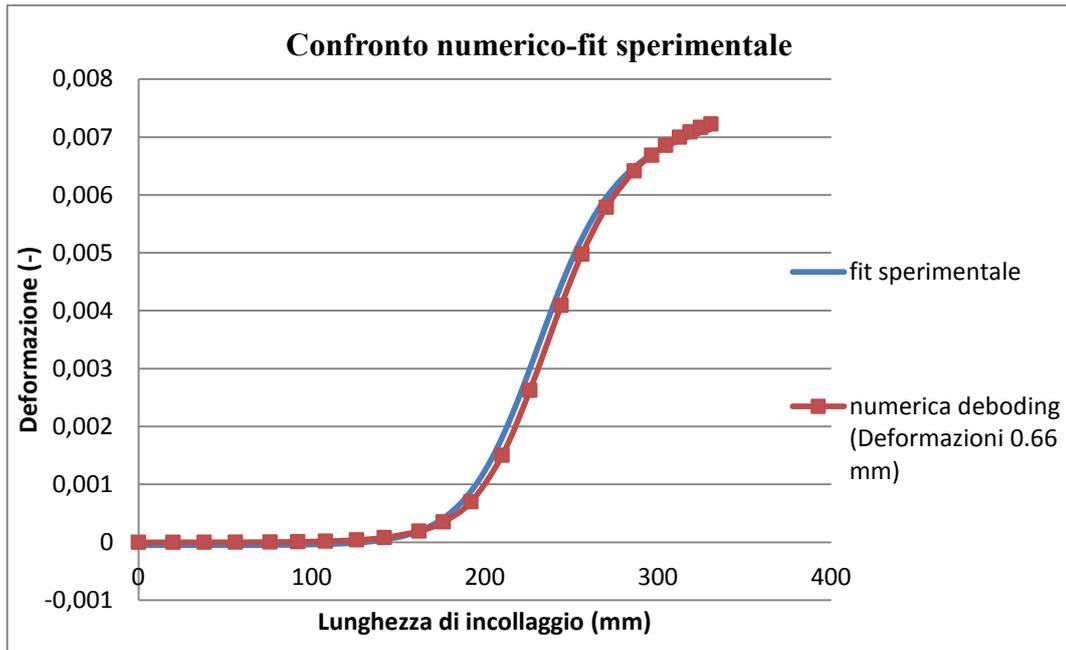


Figura 3-46 Confronto tra risultati numerici e analitici relativi alle deformazioni (caso: due strati di matrice- DS_330_43_S_5).

Risultati interessanti si sono ottenuti anche in termini di evoluzione delle deformazioni (figura 3-47).

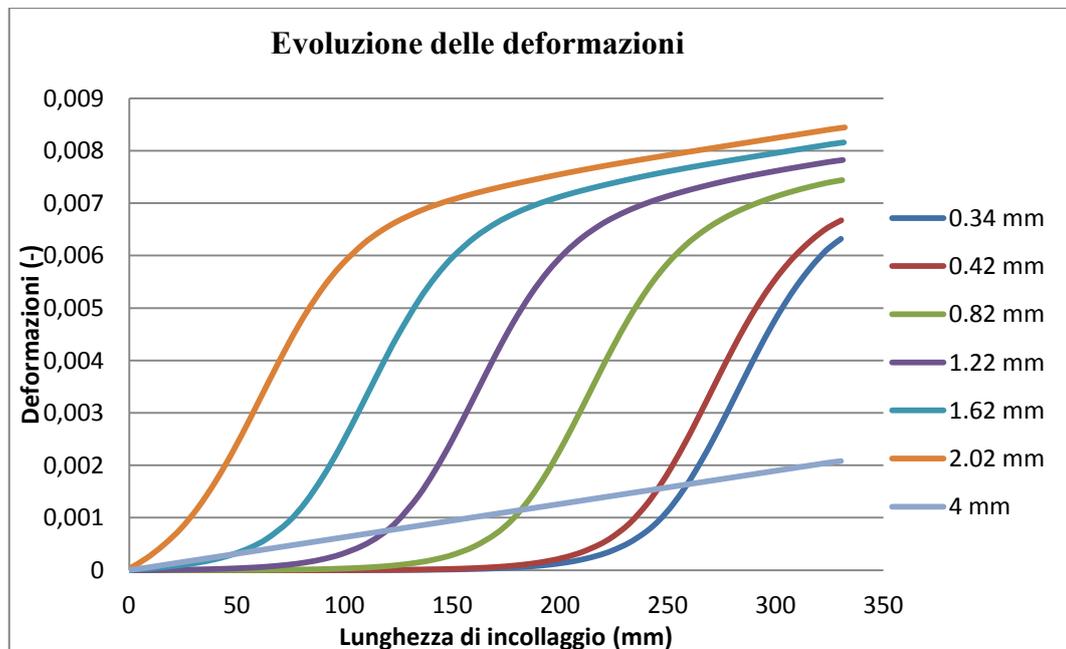


Figura 3-47 Evoluzione delle deformazioni a variare dello spostamento imposto (caso: due layer di matrice).

La forma delle varie curve rispecchia quella ideale prevista: si assiste ad una traslazione della zona di trasferimento delle tensioni (STZ) da destra verso sinistra e si distingue in maniera chiara il contributo dell'attrito che conferisce un andamento lineare alle deformazioni. Come riscontrato per il caso con il quale si analizza il contributo di un solo strato di matrice, si nota un andamento anomalo delle deformazioni quando l'interazione tra fascio e matrice è caratterizzata dal solo tratto τ -slip costante (caso 4 mm).

In figura 3-48 si mostra un particolare delle deformazioni dei due strati alla fine dell'analisi (spostamenti amplificati di 30000 volte rispetto a quelli effettivi). Si nota una deformazione diversa delle due interfacce, la quale suggerisce che i due strati di matrici non contribuiscono in maniera identica alla trasmissione degli sforzi del bundle in PBO.

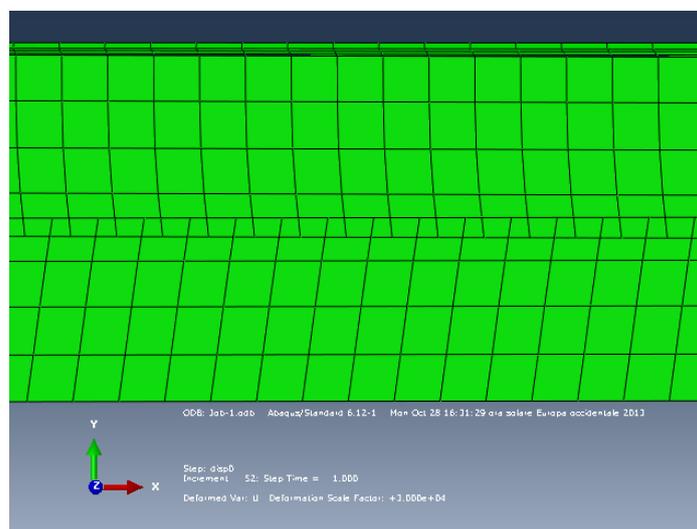


Figura 3-48 Particolare della deformazione dei due layer di matrice durante lo scorrimento della fibra.

Il carico totale risultante dalla trazione delle fibre in PBO (figura 3-49) è stato ottenuto quintuplicando le reazioni vincolari ricavate all'estremità del fascio.

Il modello riproduce in maniera soddisfacente l'incremento lineare, il debonding e la componente aggiuntiva conferita dall'attrito; altrettanto non si può dire tuttavia del ramo di softening. Invece che ottenere un decremento progressivo come ricavato sperimentalmente, nel caso numerico si assiste ad un calo repentino del carico. Questo potrebbe essere conseguenza del ritorno elastico osservato durante il distacco della fibra dal supporto.

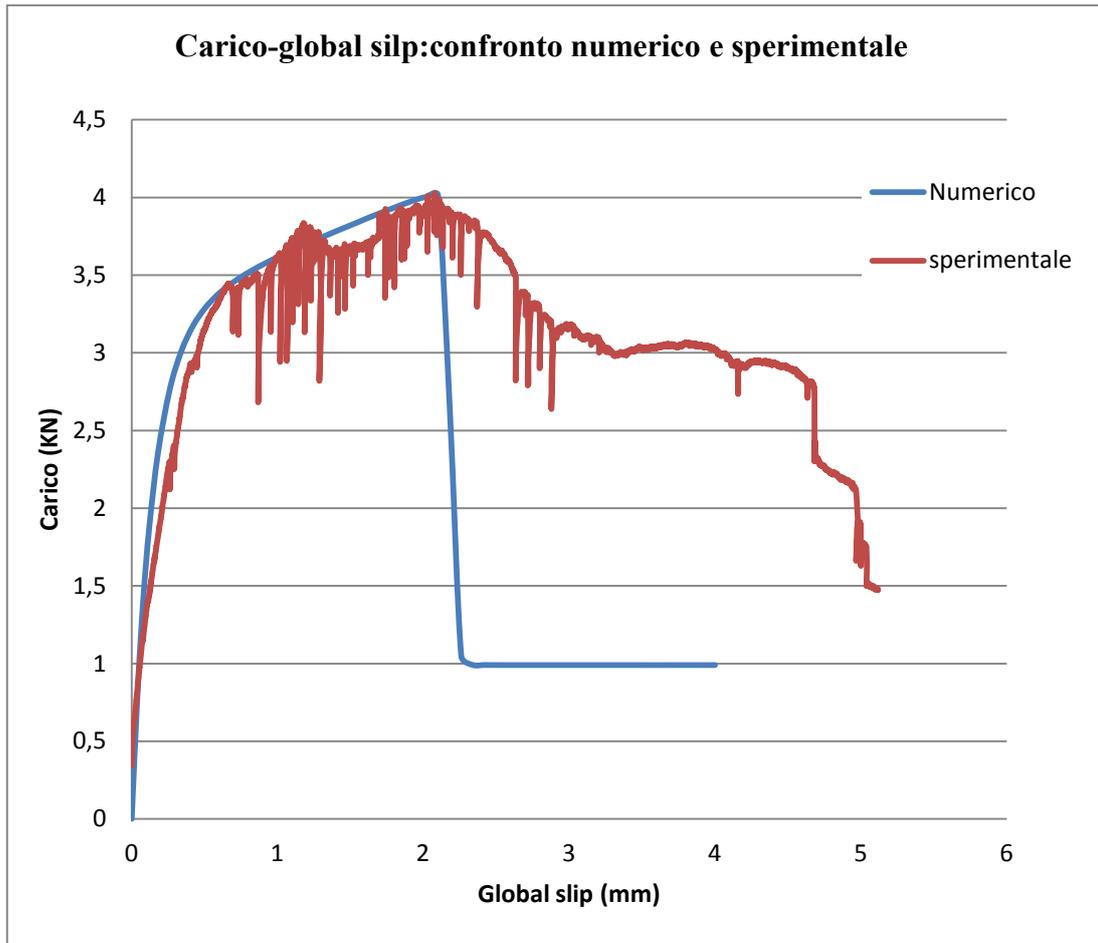


Figura 3-49 Confronto tra risultati numerici e analitici relativi alla curva carico-spostamento(caso: due strati di matrice- DS_330_43_S_5).

Pertanto, da quanto emerge analizzando i risultati appena ricavati, si confermano le supposizioni avanzate nel precedente paragrafo: per ottenerne l'effetto di una fibra vincolata tra due strati, è necessaria una rappresentazione di entrambi i livelli di matrice, a causa delle diverse condizioni al contorno li caratterizzano.

3.4.8 Modellazione dell'intero sistema FRCM

Visti i risultati ottenuti modellando un solo fascio di fibre in PBO, si è deciso rappresentare l'intera interfaccia rete-matrice del provino DS_330_43_S_5. Pertanto sono stati modellati interamente i cinque fasci in PBO, trascurando tuttavia la presenza di quelli trasversali, i quali verranno considerati in un secondo momento.

3.4.8.1 Geometria del modello, mesh e condizioni al contorno

La componente di matrice cementizia è stata riprodotta come un blocco unico di materiale omogeneo deformabile di 330 mm di lunghezza, 8.092 mm di altezza e 45 mm di profondità. Le fibre sono disposte all'interno dei fori ricavati direttamente nei supporti in modo da essere distanziate 5 mm una dall'altra.

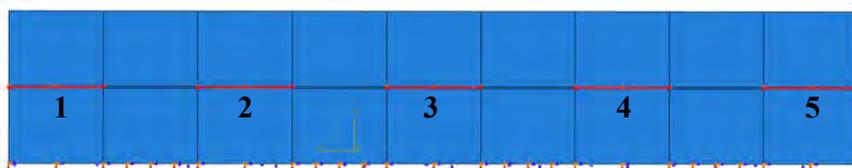


Figura 3-50 Particolare del supporto e della collocazione dei fasci.

Si sono utilizzati elementi brick ad 8 nodi (funzione di forma lineari) aventi lati pari a 2,5 mm (tranne per quelli in corrispondenza alla regione vicino ai fori per l'alloggiamento delle fibre, in cui si è dovuto scegliere necessariamente una discretizzazione minore).

Per quanto riguarda le fibre, la geometria è simile a quanto già presentato per i precedenti esempi. Ciò vale anche per l'imposizione dei vincoli e per l'imposizione dello spostamento alle fibre. Le proprietà di interazione sono state applicate alle superfici della matrice e del fascio come illustrato nel caso precedente.

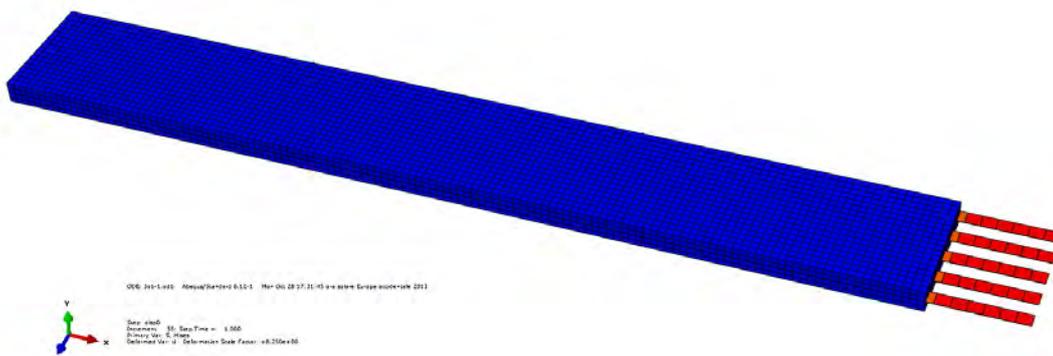


Figura 3-51 Modello totale (configurazione deformata).

3.4.8.2 Risultati

Avendo implementato l'andamento dello sforzo tangenziale alle interfacce in maniera analoga a quanto eseguito nelle esperienze numeriche precedenti, il contatto segue esattamente la curva sperimentale (si veda l'andamento in figura 3-45).

Le deformazioni e la loro evoluzione nel tempo è del tutto analoga al caso esposto al §3.4.7.

In particolare si è studiato il loro andamento (lungo la lunghezza di incollaggio e in corrispondenza di ogni fascio) per cogliere eventuali differenze dovute alla presenza di più bundle e mancanza del supporto nelle zone laterali, nelle quali i fasci sono parzialmente scoperti.

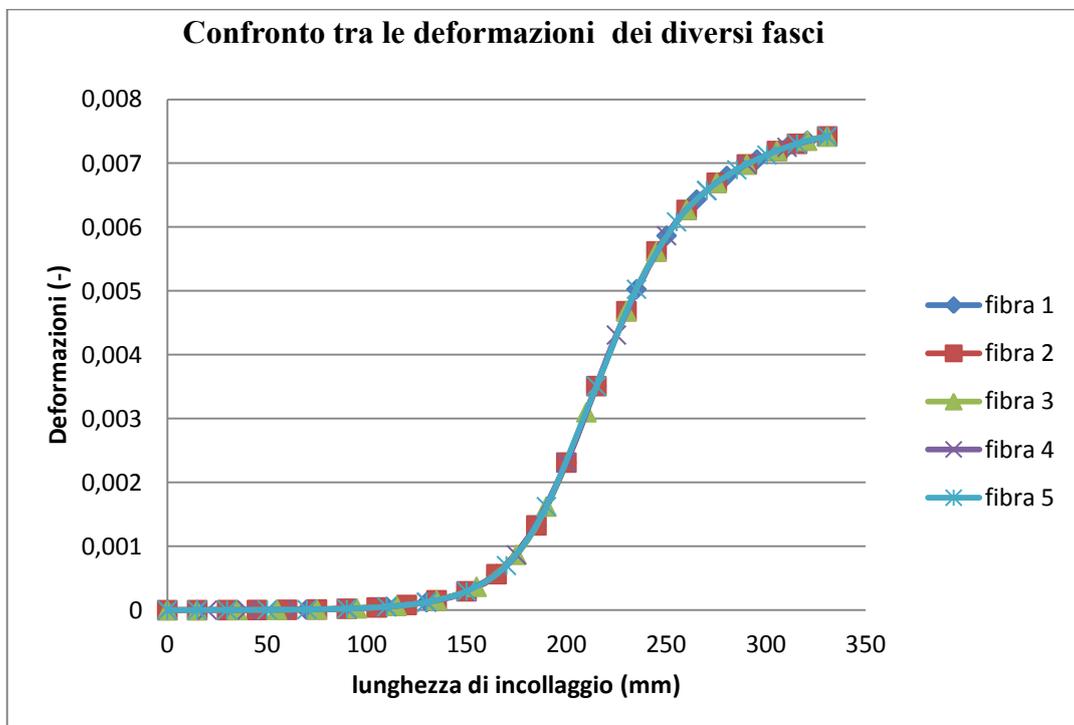


Figura 3-52 Confronto tra le deformazioni dei diversi fasci, con spostamento imposto di 0.82 mm.

Come chiaramente illustrato in figura 3-52, non si riscontrano differenze in termini di deformazioni tra i diversi bundle. Ciò può essere dovuto all'assenza dell'implementazione del contatto tra le zone laterali delle fibre e la matrice, la quale porta inevitabilmente a trascurare la mancanza della matrice nelle zone marginali e, di conseguenza, l'effetto sulla deformazione dei fasci.

In figura 3-53 si confrontano diversi andamenti del carico per il caso sperimentale e per due modelli numerici (modello di un fascio con due strati di matrice e modello globale). L'andamento rispecchia quello ottenuto dalla modellazione di un solo fascio.

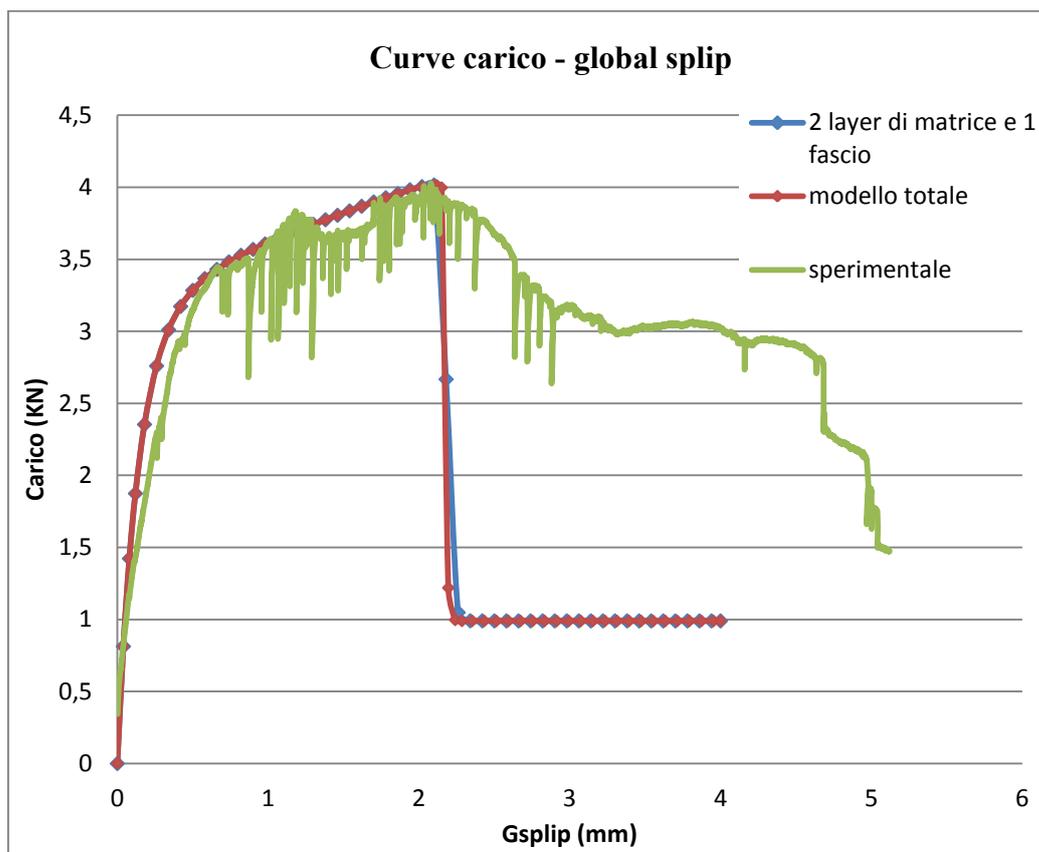


Figura 3-53 Confronto curve carico-spostamento: caso sperimentale e numerico (vari modelli).

Risultati così vicini tra loro suggeriscono che l'influenza di più fasci affiancati non apporta grandi differenze rispetto ai modelli numerici più semplici, i quali si basano sull'assenza di possibili effetti imputabili alla larghezza della fase resistente del composito. In particolare, l'assenza di una perturbazione tra gli elementi in PBO potrebbe essere mitigata dall'altissima rigidità della matrice: si è osservato, infatti, che la deformazione della matrice è all'incirca tre ordini di grandezza inferiore rispetto a quella registrata in corrispondenza alle fibre.

3.4.9 Influenza delle fibre trasversali.

Tra le assunzioni riportate al §3.4.2, si ipotizzava che le fibre trasversali non influenzassero il comportamento degli FRCM e si supponeva che solamente le fibre disposte lungo la direzione del carico contribuissero alla resistenza del composito. In realtà questo è vero solo in parte, poiché la loro presenza comporta una diminuzione della superficie di contatto tra fibre longitudinali e matrice nelle zone in cui i fasci si

sovrappongono. Prendendo ancora una volta come riferimento i risultati del test DS_330_43_S_5, si vuole studiare numericamente questo aspetto, introducendo al modello presentato nel paragrafo precedente l'influenza della seconda orditura della rete in PBO.

3.4.9.1 Geometria del modello, mesh e condizioni al contorno

La geometria è la medesima descritta al §0. Considerando che il provino è caratterizzato dai fasci trasversali a contatto con lo strato superiore di malta, la presenza dell'orditura secondaria è simulata in maniera banale riducendo la superficie di interazione tra elementi fibra e strato superiore della matrice seguendo una geometria che rispecchia quella reale della rete di rinforzo. A livello pratico, questo si è tradotto in una discretizzazione della superficie superiore dei fasci e della corrispondente faccia opposta della matrice, specificando individualmente le zone caratterizzate dal trasferimento degli sforzi di contatto. In tal modo non si modella la presenza delle fibre trasversali, ma se ne contempla solamente l'effetto sul comportamento dei fasci longitudinali.

In figura 3-54 si illustra schematicamente la strategia di modellazione adottata.

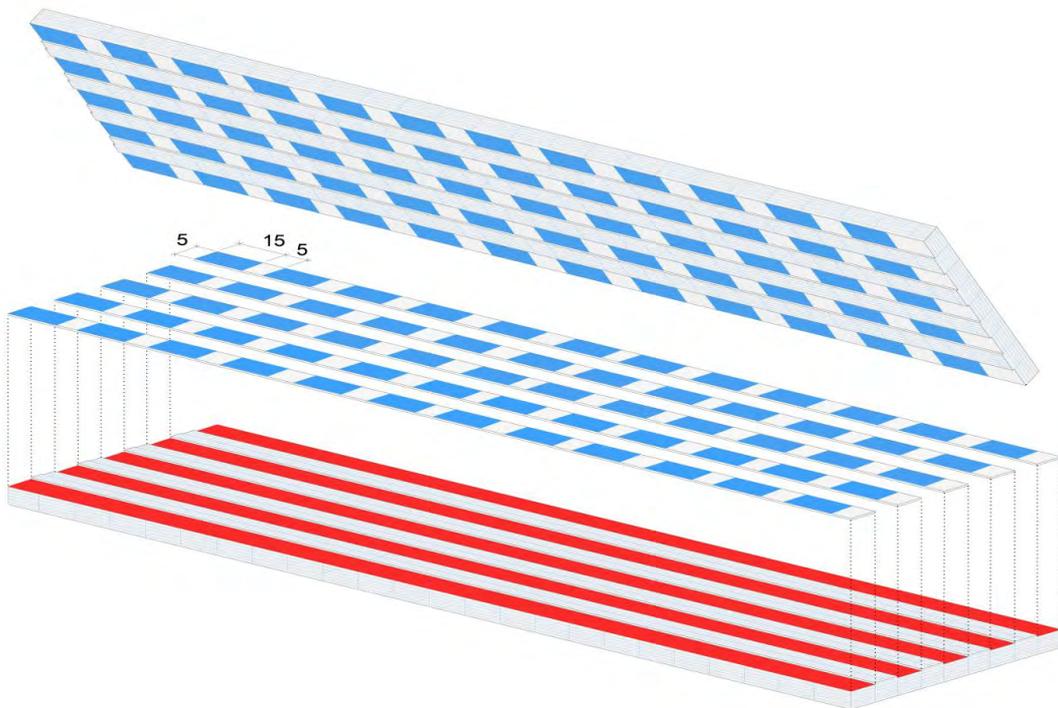


Figura 3-54 Applicazione delle proprietà di contatto per simulare la presenza della seconda orditura della rete di rinforzo.

3.4.9.2 Risultati

Una volta verificato che la legge costitutiva dell'interfaccia fosse effettivamente riprodotta in corrispondenza alle superfici in contatto, si sono confrontate le deformazioni nel caso reale e numerico. Come illustrato in figura 3-55, il modello fem rispecchia il fitting sperimentale e diverge nell'ultima parte della curva, assumendo dei valori leggermente inferiori. Raffrontandoli inoltre con quelli del caso numerico senza la presenza dei fasci trasversali, si può constatare anche in questo caso un leggero calo delle deformazioni, confermando quindi una influenza imputabile all'orditura secondaria della rete.

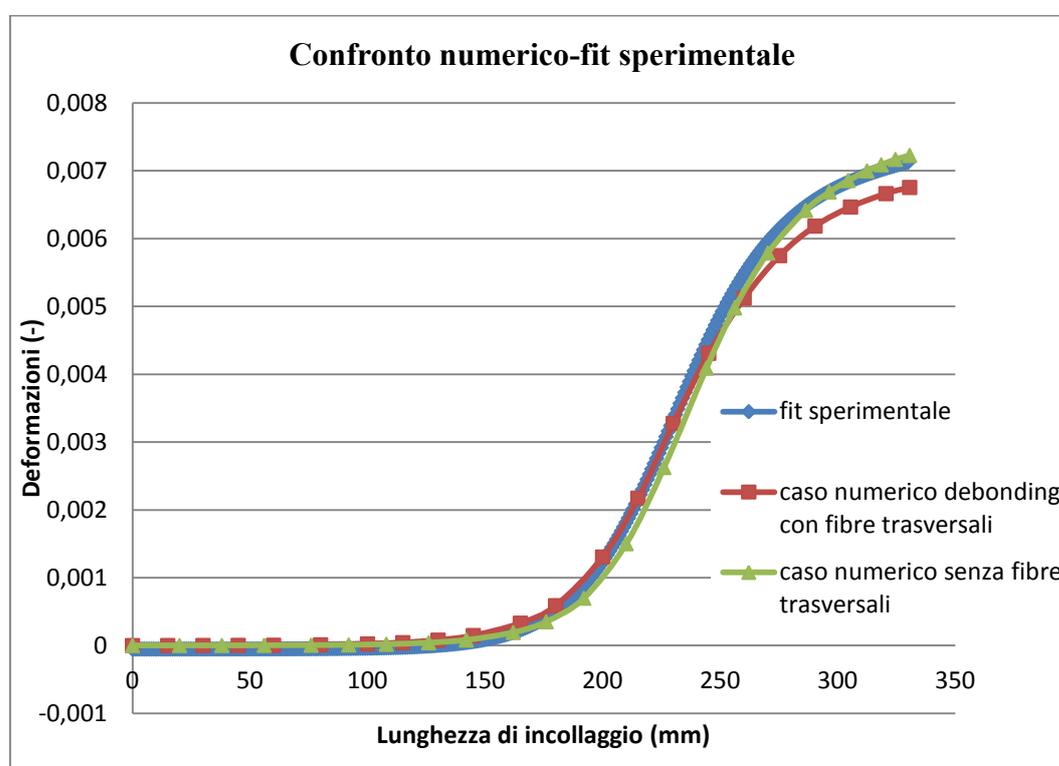


Figura 3-55 Confronto tra risultati numerici e analitici relativi alle deformazioni.

L'influenza della riduzione della superficie di contatto si riscontra anche in termini di resistenza a trazione, riguardo la quale si registrano valori del carico lievemente inferiori rispetto ai casi numerici precedenti. In particolare, la riduzione con il corrispondente caso numerico senza fibre trasversali è quantificabile in un -7,88% per la resistenza al picco e un -12,12% per il tratto costante.

Per quanto riguarda il paragone con i dati sperimentali, sembra che l'ultimo modello presentato dia risultati peggiori rispetto ai precedenti tentativi di modellazione: la prova a trazione diretta introdotta per caratterizzare gli FRCM deve essere vista come un punto

di riferimento in termini di andamento e range delle grandezze ottenute, e pertanto la buona riuscita della modellazione non può essere decretata solo sulla base della perfetta riproduzione dei valori ottenuti da un solo test. Attraverso le modellazioni con e senza fibre trasversali si è potuto dimostrare come si riesca a riprodurre abbastanza fedelmente il comportamento a trazione degli FRCM: in particolare, i risultati del DS_330_43_S_5 sono compresi tra i due casi numerici, i quali possono essere visti come limite superiore ed inferiore del comportamento di questi materiali compositi.

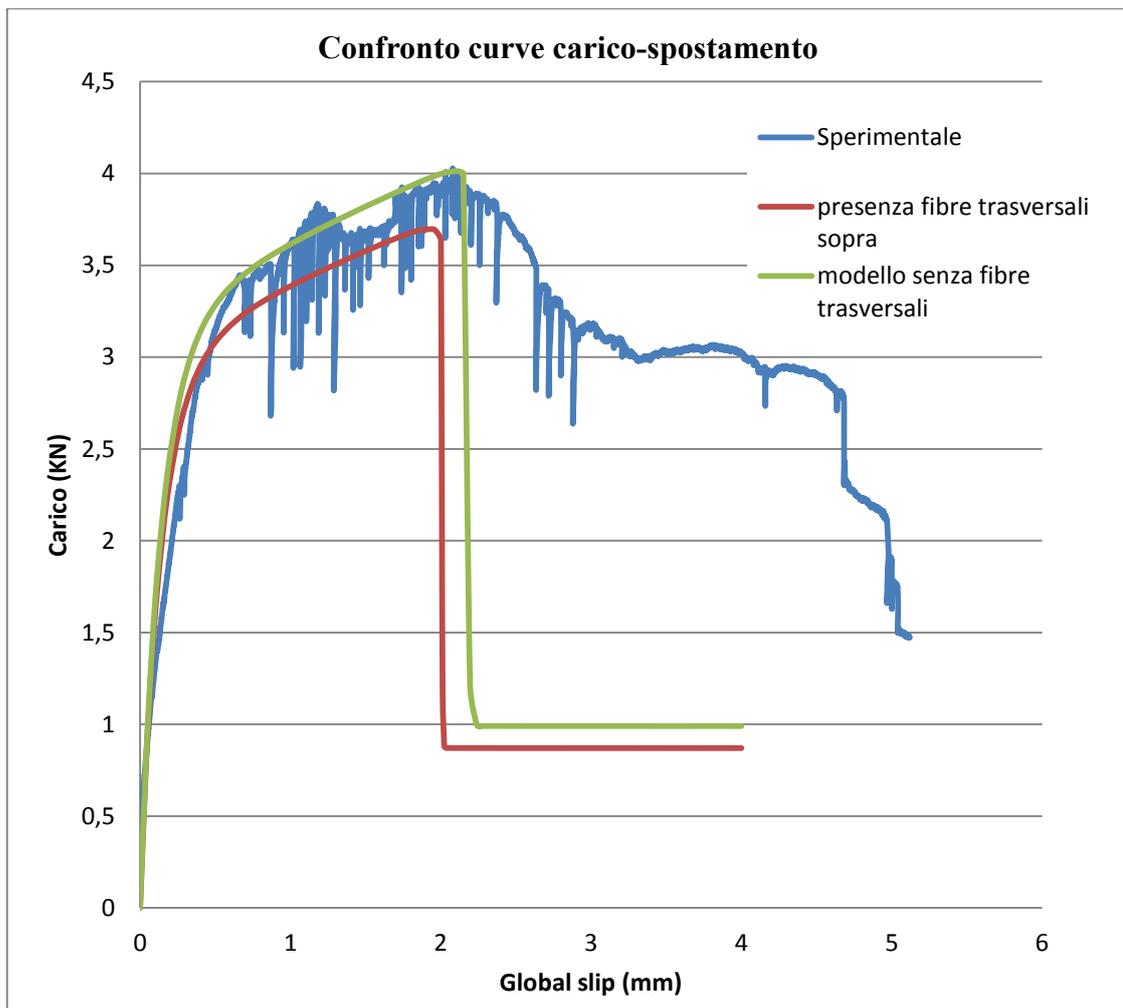


Figura 3-56 Confronto curve carico-spostamento (vari modelli).

3.5 Conclusioni

Osservando i risultati ottenuti, si può affermare che la modellazione tridimensionale ha permesso di riprodurre in maniera soddisfacente il comportamento degli FRCM osservato durante l'esecuzione dei test condotti da D'Antino [18][19][20].

Le proprietà di interazione associate all'interfaccia hanno consentito, come già confermato da precedenti studi numerici [23], di ottenere delle leggi costitutive τ -slip conformi a quelle elaborate analiticamente, ma con la sostanziale differenza che, nei casi illustrati, si sono ricavati andamenti e valori delle deformazioni simili a quelli registrati durante le prove di taglio diretto. Un'osservazione particolare va fatta in merito all'andamento del carico: sebbene si riesca a riprodurre fedelmente la fase elastica, il processo di delaminazione e il contributo dell'attrito, la parte discendente del carico del caso numerico non segue l'andamento softening manifestato nelle sperimentazioni. Si pensa che tale comportamento sia dovuto all'impossibilità di tale approccio di controllare il recupero della deformazione elastica del fascio quando l'interfaccia fascio e matrice è interessata completamente dal processo di delaminazione.

Oltre a queste considerazioni generali, se ne possono trarre delle altre, inerenti ai singoli modelli presentati:

- Il modello basato sulla rappresentazione di un solo fascio a contatto con uno strato di matrice non è in grado di riprodurre il comportamento di provini caratterizzati da due strati di matrice cementizia; a contrario, sono una buona soluzione per studiare la configurazione degli FRCM caratterizzata da un solo strato di malta.
- Il modello numerico di un fascio inglobato da due strati di matrice rappresenta con buona approssimazione il comportamento delle soluzioni che prevedono una rete applicata tra due strati di malta cementizia. Questo conferma quindi la diversa influenza dello strato inferiore da quello superiore, a causa della diversa configurazione di vincolo che li caratterizza.
- la modellazione totale del pacchetto di rinforzo fornisce risultati simili a quella di un solo fascio a contatto con due strati di matrice; in questo modo si è potuto evincere che non sono individuabili influenze reciproche tra i fasci all'interno del modello. Perciò è ammissibile considerare solo un elemento qualora la fase resistente sia costituita da più fasci.

- L'influenza delle fibre trasversali è effettivamente riscontrabile in una diminuzione del carico a trazione del rinforzo.

Dalle considerazioni riportate si può quindi ritenere che l'approccio numerico presentato nel seguente elaborato abbia dato dei risultati incoraggianti per la modellazione di questo tipo di compositi. Tuttavia, l'analisi fem in oggetto necessita di uno studio approfondito per sopperire ad alcune mancanze che la contraddistingue come, ad esempio, l'implementazione di una subroutine che permetta di riprodurre in maniera corretta il ramo discendente della curva carico-spostamento.

Bibliografia

- [1] CNR, " Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione ed il controllo di interventi di consolidamenti statico mediante l'utilizzo di compositi fibrorinforzati", CNR-DT 200/2004, 2004.

- [2] A. Vincenzo, "Materiali compositi a matrice cementizia per i rinforzi strutturali", tesi di laurea, Università di Bologna.

- [3] L. Sgarito, "Analisi sperimentale di temperature elevate sul comportamento strutturale dei rinforzi in FRP", tesi di laurea, Università di Bologna.

- [4] A. Wieber, " Strengthening of Concrete Beams Using Cementitious Carbon Fibre Composites", tesi di dottorato, Royal Institut of Technology, Stoccolma.

- [5] Y. Ohama, "Polymer-based admixtures. Cement and Concrete Composites", 2/3 (1998), pp 189-212.

- [6] P. Bartos, "Brittle matrix composites reinforced with bundles of fibres". In From Material Science to Construction Materials Engineering (1987), J. Maso, Ed., Chapman and Hall, pp. 539-546.

- [7] Mazzucco G., Salomoni V., Majorana C.E., "Three-dimensional contact-damage coupled modeling of FRP reinforcements - simulation of delamination and long-term processes", Comp. and Struct., 2012, vol. 110, pp 15-31.

- [8] Salomoni V., Mazzucco G., Pellegrino C, Majorana C., "Three-dimensional modeling of bond behaviour between concrete and FRP reinforcement", Eng. Comp., 2011, 28(1), pp 5-29.

- [9] Subramaiam K.V., Carloni C., Nobile L., "Width effect in the interface fracture during shear debonding of FRP sheets from concrete", *Eng. Fract. Mech.*, 2007, vol. 74(4), pp 578-594.
- [10] L. Ombres, "Debonding analysis of reinforced concrete beams strengthened with fibre reinforced cementitious mortar", *Eng. Fract. Mech.*, 2012, vol. 81, pp 4-109.
- [11] H. Toutanji, and Y. Deng, "Comparison between organic and inorganic matrices for RC beams strengthened with carbon fiber sheets", *J. Compos. Constr., ASCE*, 2007, vol. 11(5), pp 507-513.
- [12] A. D'Ambrisi, and F. Focacci, "Flexural Strengthening of RC beams with Cement Based Composites", *J. Compos. Constr., ASCE*, 2011, vol. 15(2), pp 707-20.
- [13] A. D'Ambrisi, L. Feo, and F. Focacci, "Experimental analysis on bond between PBO-FRCM strengthening materials and concrete", *Composites: Part B*, 2013, vol. 44(1), pp 524-532.
- [14] A. D'Ambrisi, L. Feo, and F. Focacci, "Bond-slip relations for PBO-FRCM materials externally bonded to concrete", *Composites Part B: Engineering*, 2012, vol. 43(8), pp 2938-2949.
- [15] B. Banholzer, "Bond behaviour of a multi-filament yarn embedded in a cementitious matrix", tesi di dottorato. RWTH Aachen University, 2004.
- [16] C. Grace, Y. Yang, and L.H. Sneed, "Fracture mechanics approach to predicting the behavior of reinforced concrete members with externally-bonded fiber reinforced polymer laminates," *A Fracture Approach for FRP-Concrete Structures*, SP-286, ACI, 2012, pp 7-1-7-20.

- [17] C. Carloni and K.V. Subramaniam, "Application of fracture mechanics to debonding of FRP from RC members, SP-286, ACI, 2012, pp 10-1-10-14.
- [18] T. D'Antino, LH. Sneed, C. Carloni, " Interfacial bond characteristics of fiber reinforced cementitious matrix for external strengthening of reinforced concrete members", VIII International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures.
- [19] T. D'Antino, LH. Sneed, C. Carloni, C. Pellegrino, "Bond behavior of the FRCM concrete Interface", FRPRCS11, 2013.
- [20] T. D'Antino, LH. Sneed, C. Carloni, C. Pellegrino, "Matrix-fiber bond characteristics in FRCM composites: a fracture mechanics approach", Under review.
- [21] Y. Yamashita , S. Kawabata ,S. Okada , A. Tanaka, "Mechanical Characteristics of PBO Single Fiber".,The University of Shiga Prefecture 2500 Hassaka, Hikone 522-8533, Japan.
- [22] V. MACHOVIČ, L. LAPČÁK, L. BORECKÁ, M. LHOTKA, J. ANDERTOVÁ, L. KOPECKÝ, L. MIŠKOVÁ, "Microstructure of interfacial transition zone between PET fibres and cement paste", Acta Geodyn, Geomater, 2013, vol. 10, pp 121-127.
- [23] G. Lobelle, "The use of cementitious composites in strengthening of reinforced concrete structures", advance masters in structural analysis of monuments and historical constructions, Erasmus Mundus Programme, 2013.
- [24] ASTM, "Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials." ASTM D3039/D3039M-08, West Conshohocken, PA, 2008.
- [25] Dassault Systèmes Simulia Corp., " Abaqus 6.12 Analysis User's Manual", 2012

Appendice

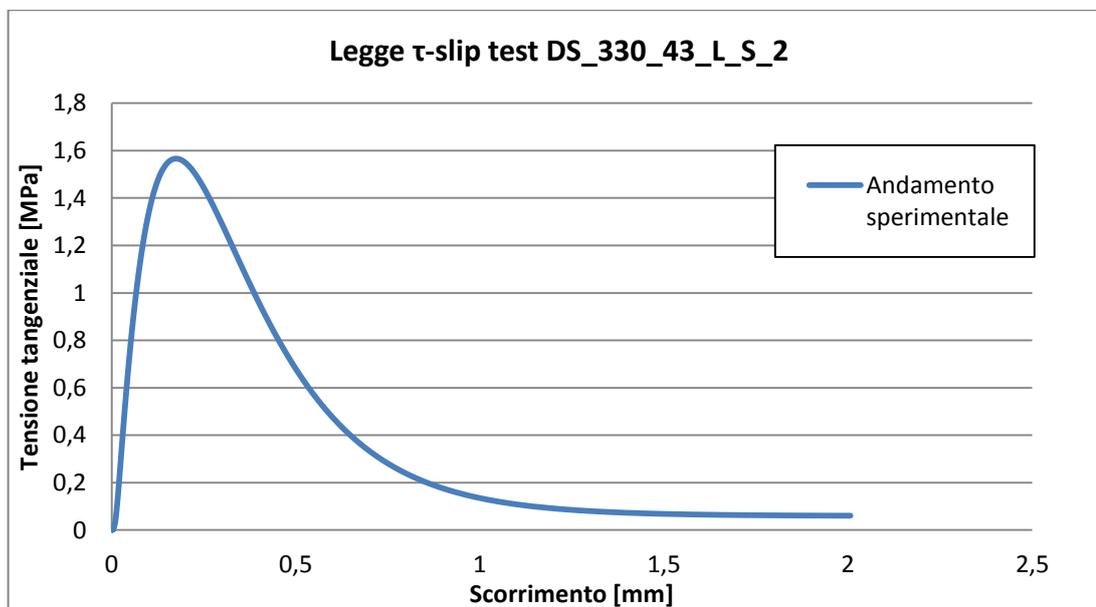
A1. Tabella D - scorrimento plastico (modello Gaelle [23])

D	δf-δ0	D	δf-δ0	D	δf-δ0
0	0	0,933355756	0,213502549	0,998766395	0,557401826
0,023145776	0,001830054	0,938689223	0,219805144	0,998858224	0,56461118
0,032042108	0,003747404	0,943631106	0,22614975	0,998943113	0,571828504
0,052241503	0,005754788	0,948204287	0,232534481	0,999021595	0,579053698
0,080572358	0,007854862	0,951330352	0,238957533	0,99909416	0,586286668
0,100223122	0,010050189	0,955320785	0,245417177	0,999161262	0,593527324
0,120554404	0,012343215	0,959002523	0,251911762	0,999223319	0,600775586
0,147029194	0,014736258	0,962402914	0,258439709	0,999280717	0,608031373
0,172936442	0,017231491	0,964708608	0,264999515	0,99933381	0,615294615
0,194892269	0,019830921	0,96765335	0,271589748	0,999382927	0,622565244
0,221200094	0,022536382	0,970362138	0,278209045	0,999428371	0,629843194
0,250071909	0,025349514	0,972201152	0,284856111	0,99947042	0,637128407
0,276179032	0,028271754	0,974542621	0,291529715	0,999509331	0,644420827
0,306708552	0,031304325	0,976693245	0,298228692	0,999545344	0,651720401
0,332320569	0,034448226	0,977619224	0,304951935	0,999578677	0,65902708
0,358457948	0,03770422	0,980353564	0,311698397	0,999609532	0,666340818
0,385122079	0,041072835	0,981868851	0,318467085	0,999638097	0,673661572
0,41253757	0,044554357	0,983267107	0,325257064	0,999664544	0,680989302
0,439096424	0,048148828	0,984557229	0,332067445	0,999689033	0,688323969
0,465965245	0,051856047	0,985747473	0,338897391	0,999711711	0,695665539
0,49099737	0,055675573	0,986845491	0,345746112	0,999732713	0,703013978
0,517531976	0,059606729	0,987858374	0,352612862	0,999752166	0,710369255
0,541096419	0,063648611	0,988792685	0,359496938	0,999770184	0,71773134
0,567123264	0,067800094	0,989654498	0,366397674	0,999786877	0,725100208
0,589303146	0,072059842	0,990449427	0,373314447	0,999802342	0,732475832
0,610680677	0,076426325	0,991182665	0,380246668	0,999816671	0,739858187
0,635298236	0,080897825	0,991859005	0,387193781	0,999829949	0,747247253
0,655403025	0,085472456	0,992482877	0,394155266	0,999842254	0,754643008
0,674738847	0,090148174	0,993058368	0,401130631	0,999853657	0,762045432

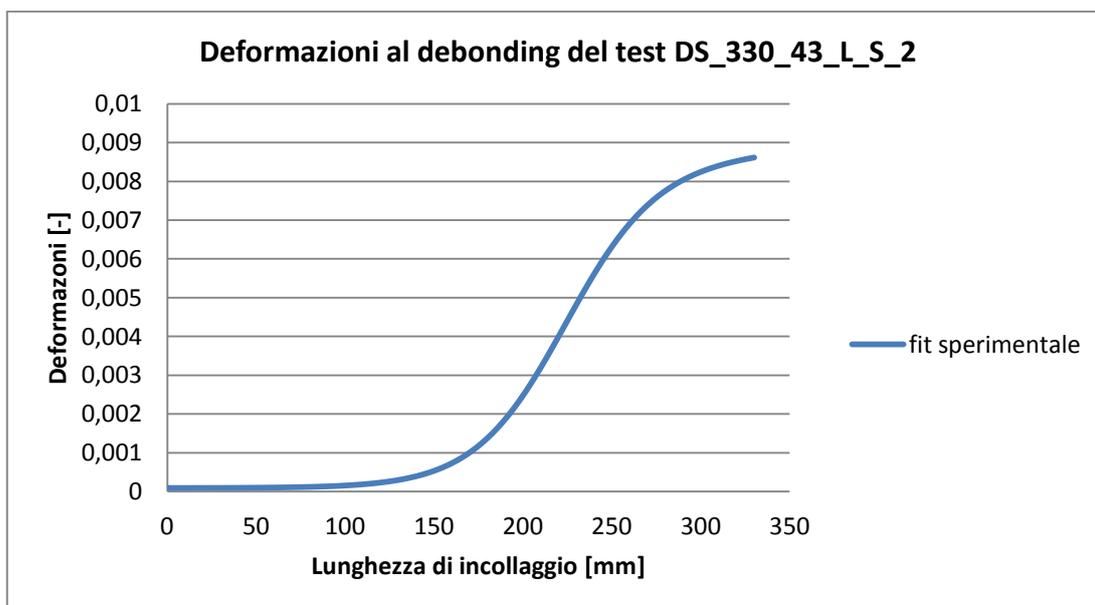
Appendice

0,69745878	0,094922799	0,993589252	0,408119414	0,999864227	0,769454507
0,715373068	0,099794026	0,99407901	0,41512118	0,999874025	0,776870215
0,732591603	0,104759443	0,994530852	0,422135522	0,999883108	0,784292541
0,749088707	0,109816547	0,994947739	0,429162055	0,999891529	0,791721469
0,764870874	0,114962761	0,995332402	0,436200418	0,999899336	0,799156986
0,779950521	0,120195451	0,995687357	0,443250274	0,999906576	0,806599077
0,797887439	0,125511935	0,996014924	0,450311303	0,999913289	0,814047731
0,811421306	0,130909506	0,996317241	0,457383206	0,999919515	0,821502937
0,824271874	0,13638544	0,996596278	0,464465704	0,999925289	0,828964682
0,836454369	0,141937008	0,996853852	0,471558532	0,999930645	0,836432957
0,847976834	0,147561492	0,997091635	0,478661443	0,999935613	0,843907752
0,858856782	0,153256195	0,997311169	0,485774206	0,999940221	0,851389059
0,869108052	0,159018447	0,997513874	0,492896603	0,999944497	0,858876869
0,878750666	0,164845619	0,997701059	0,500028429	0,999948464	0,866371175
0,885414717	0,170735127	0,99787393	0,507169492	1	0,873871968
0,894015995	0,176684441	0,998033599	0,514319614		
0,902063248	0,182691089	0,998181088	0,521478625		
0,909579099	0,188752664	0,998317342	0,528646368		
0,916587732	0,194866828	0,998443229	0,535822694		
0,923113218	0,201031312	0,998559551	0,543007465		
0,929205574	0,207243925	0,998667046	0,550200549		

A2. Dati test DS_330_43_L_S_2.



Andamento τ -slip del test DS_330_43_L_S_2.



Andamento delle deformazioni al debonding del test DS_330_43_L_S_2.

A3. Tabella D - scorrimento plastico (DS_330_43_S_5)

D	$\delta f\text{-}\delta 0$	D	$\delta f\text{-}\delta 0$	D	$\delta f\text{-}\delta 0$	D	$\delta f\text{-}\delta 0$
0	0	0.630693	0.0886452	0.92864	0.266712	0.985386	0.49496
0.0184019	0.00136827	0.645187	0.0925776	0.932125	0.27276	0.98592	0.501838
0.0369003	0.00279122	0.659318	0.0965895	0.935433	0.278846	0.986427	0.50873
0.0554916	0.00427034	0.673078	0.10068	0.938574	0.284968	0.986908	0.515636
0.0741711	0.00580712	0.686463	0.104849	0.941555	0.291126	0.987364	0.522554
0.0929332	0.00740303	0.699468	0.109095	0.944383	0.297318	0.987798	0.529486
0.111771	0.00905956	0.712091	0.113417	0.947065	0.303544	0.988209	0.53643
0.130677	0.0107781	0.724329	0.117815	0.949609	0.309803	0.9886	0.543386
0.149641	0.0125602	0.736181	0.122287	0.952021	0.316092	0.988972	0.550354
0.168654	0.0144072	0.747649	0.126833	0.954308	0.322413	0.989325	0.557335
0.187705	0.0163204	0.758734	0.131451	0.956475	0.328763	0.98966	0.564326
0.206781	0.0183013	0.769437	0.13614	0.958529	0.335141	0.989979	0.571329
0.225869	0.0203511	0.779761	0.1409	0.960475	0.341548	0.990283	0.578343
0.244956	0.0224711	0.789712	0.145728	0.962319	0.347981	0.990572	0.585368
0.264027	0.0246625	0.799293	0.150624	0.964066	0.35444	0.990847	0.592404
0.283066	0.0269265	0.80851	0.155587	0.96572	0.360925	0.991108	0.59945
0.302057	0.0292642	0.817369	0.160614	0.967288	0.367435	0.991358	0.606506
0.320983	0.0316766	0.825877	0.165706	0.968772	0.373968	0.991595	0.613573
0.339827	0.0341647	0.834041	0.170859	0.970178	0.380525	0.991821	0.620649
0.358571	0.0367296	0.84187	0.176074	0.97151	0.387104	0.992037	0.627735
0.377197	0.0393719	0.84937	0.181349	0.972771	0.393705	0.992243	0.634831
0.395688	0.0420925	0.85655	0.186681	0.973966	0.400327	0.992439	0.641937
0.414025	0.0448921	0.86342	0.192071	0.975097	0.40697	0.992626	0.649051
0.43219	0.0477714	0.869988	0.197517	0.976169	0.413633	0.992805	0.656175
0.450164	0.0507308	0.876263	0.203016	0.977184	0.420315	0.992976	0.663308
0.467931	0.0537709	0.882255	0.208569	0.978146	0.427016	0.993139	0.67045
0.485473	0.0568919	0.887973	0.214173	0.979057	0.433736	0.993295	0.677601
0.502773	0.0600943	0.893427	0.219827	0.97992	0.440473	0.993444	0.684761
0.519815	0.0633781	0.898625	0.22553	0.980738	0.447228	0.993587	0.691929
0.536584	0.0667436	0.903577	0.231281	0.981513	0.453999	0.993723	0.699106
0.553065	0.0701906	0.908293	0.237078	0.982248	0.460787	0.993854	0.706291
0.569243	0.0737193	0.912781	0.24292	0.982944	0.467591	0.993979	0.713484
0.585107	0.0773293	0.917052	0.248805	0.983604	0.474411	0.994099	0.720686
0.600643	0.0810206	0.921112	0.254733	0.98423	0.481246	0.994214	0.727896
0.615842	0.0847926	0.924972	0.260702	0.984823	0.488096	0.994324	0.735114

D	$\delta f\text{-}\delta 0$						
0.99443	0.742339	0.996591	1.02233	0.997419	1.31198	0.997902	1.61085
0.994532	0.749573	0.996622	1.02984	0.997435	1.31973	0.997912	1.61884
0.994629	0.756815	0.996652	1.03735	0.99745	1.32748	0.997923	1.62684
0.994723	0.764064	0.996681	1.04486	0.997465	1.33524	0.997933	1.63484
0.994813	0.771321	0.996709	1.05238	0.99748	1.34301	0.997943	1.64284
0.9949	0.778586	0.996737	1.05991	0.997495	1.35078	0.997953	1.65086
0.994983	0.785859	0.996764	1.06745	0.99751	1.35856	0.997962	1.65888
0.995063	0.793139	0.996791	1.07499	0.997524	1.36634	0.997972	1.66691
0.995141	0.800426	0.996817	1.08254	0.997539	1.37414	0.997982	1.67494
0.995215	0.807721	0.996843	1.09009	0.997553	1.38193	0.997991	1.68298
0.995287	0.815023	0.996868	1.09765	0.997567	1.38974	0.998001	1.69102
0.995356	0.822333	0.996893	1.10522	0.997581	1.39755	0.99801	1.69908
0.995423	0.829649	0.996917	1.11279	0.997594	1.40537	0.998019	1.70714
0.995488	0.836973	0.99694	1.12037	0.997608	1.41319	0.998029	1.7152
0.99555	0.844305	0.996964	1.12796	0.997621	1.42102	0.998038	1.72327
0.99561	0.851643	0.996986	1.13555	0.997634	1.42886	0.998047	1.73135
0.995668	0.858989	0.997009	1.14315	0.997648	1.4367	0.998056	1.73943
0.995725	0.866341	0.997031	1.15076	0.99766	1.44455	0.998065	1.74752
0.995779	0.873701	0.997052	1.15837	0.997673	1.45241	0.998074	1.75562
0.995832	0.881068	0.997074	1.16599	0.997686	1.46027	0.998082	1.76372
0.995883	0.888441	0.997094	1.17362	0.997698	1.46814	0.998091	1.77183
0.995933	0.895822	0.997115	1.18125	0.997711	1.47601	0.9981	1.77995
0.995981	0.90321	0.997135	1.18889	0.997723	1.48389	0.998108	1.78807
0.996028	0.910604	0.997155	1.19653	0.997735	1.49178	0.998117	1.7962
0.996073	0.918005	0.997174	1.20419	0.997747	1.49967	0.998125	1.80433
0.996117	0.925414	0.997194	1.21184	0.997759	1.50757	0.998133	1.81247
0.996159	0.932829	0.997213	1.21951	0.99777	1.51548	0.998142	1.82062
0.996201	0.940251	0.997231	1.22718	0.997782	1.52339	0.99815	1.82877
0.996241	0.947679	0.99725	1.23486	0.997793	1.53131	0.998158	1.83693
0.996281	0.955115	0.997268	1.24254	0.997805	1.53924	0.998166	1.8451
0.996319	0.962557	0.997285	1.25023	0.997816	1.54717	0.998174	1.85327
0.996356	0.970006	0.997303	1.25792	0.997827	1.55511	0.998182	1.86145
0.996392	0.977461	0.99732	1.26563	0.997838	1.56305	0.99819	1.86964
0.996427	0.984923	0.997337	1.27334	0.997849	1.571	0.998198	1.87783
0.996462	0.992392	0.997354	1.28105	0.99786	1.57896	0.998205	1.88603
0.996495	0.999868	0.997371	1.28877	0.997871	1.58692	0.998213	1.89423
0.996528	1.00735	0.997387	1.2965	0.997881	1.59489	0.998221	1.90244
0.99656	1.01484	0.997403	1.30424	0.997892	1.60287	0.998228	1.91066

D	$\delta f\text{-}\delta 0$						
0.998236	1.91888	0.998483	2.23606	0.998674	2.56238	0.998826	2.89784
0.998243	1.92711	0.998489	2.24453	0.998679	2.57109	0.99883	2.90679
0.99825	1.93535	0.998494	2.253	0.998683	2.57981	0.998833	2.91575
0.998258	1.94359	0.9985	2.26149	0.998687	2.58853	0.998837	2.92471
0.998265	1.95184	0.998505	2.26998	0.998692	2.59726	0.99884	2.93368
0.998272	1.96009	0.998511	2.27847	0.998696	2.606	0.998844	2.94266
0.998279	1.96835	0.998516	2.28697	0.9987	2.61474	0.998847	2.95164
0.998287	1.97662	0.998522	2.29548	0.998705	2.62349	0.998851	2.96063
0.998294	1.9849	0.998527	2.304	0.998709	2.63224	0.998854	2.96963
0.998301	1.99318	0.998533	2.31252	0.998713	2.641	0.998858	2.97863
0.998308	2.00146	0.998538	2.32105	0.998717	2.64977	0.998861	2.98764
0.998314	2.00976	0.998543	2.32958	0.998722	2.65855	0.998864	2.99665
0.998321	2.01805	0.998548	2.33812	0.998726	2.66733	0.998868	3.00568
0.998328	2.02636	0.998554	2.34666	0.99873	2.67611	0.998871	3.0147
0.998335	2.03467	0.998559	2.35522	0.998734	2.68491	0.998874	3.02374
0.998341	2.04299	0.998564	2.36378	0.998738	2.69371	0.998878	3.03278
0.998348	2.05132	0.998569	2.37234	0.998742	2.70251	0.998881	3.04182
0.998355	2.05965	0.998574	2.38091	0.998746	2.71132	0.998884	3.05088
0.998361	2.06798	0.998579	2.38949	0.99875	2.72014	0.998888	3.05994
0.998368	2.07633	0.998584	2.39807	0.998754	2.72897	0.998891	3.069
0.998374	2.08468	0.998589	2.40667	0.998758	2.7378	0.998894	3.07807
0.998381	2.09303	0.998594	2.41526	0.998762	2.74663	0.998897	3.08715
0.998387	2.1014	0.998599	2.42387	0.998766	2.75548	0.998901	3.09624
0.998393	2.10976	0.998604	2.43248	0.99877	2.76433	0.998904	3.10533
0.9984	2.11814	0.998609	2.44109	0.998774	2.77319	0.998907	3.11442
0.998406	2.12652	0.998614	2.44971	0.998778	2.78205	0.99891	3.12353
0.998412	2.13491	0.998619	2.45834	0.998782	2.79092	0.998913	3.13264
0.998418	2.1433	0.998623	2.46698	0.998785	2.79979	0.998916	3.14175
0.998424	2.1517	0.998628	2.47562	0.998789	2.80867	0.998919	3.15087
0.99843	2.16011	0.998633	2.48427	0.998793	2.81756	0.998923	3.16
0.998436	2.16852	0.998638	2.49292	0.998797	2.82646	0.998926	3.16914
0.998442	2.17694	0.998642	2.50158	0.9988	2.83536	0.998929	3.17828
0.998448	2.18537	0.998647	2.51025	0.998804	2.84427	0.998932	3.18743
0.998454	2.1938	0.998651	2.51892	0.998808	2.85318	0.998935	3.19658
0.99846	2.20224	0.998656	2.5276	0.998812	2.8621	0.998938	3.20574
0.998466	2.21069	0.998661	2.53628	0.998815	2.87102	0.998941	3.21491
0.998472	2.21914	0.998665	2.54498	0.998819	2.87996	0.998944	3.22408
0.998477	2.22759	0.99867	2.55367	0.998822	2.8889	0.998947	3.23326

D	$\delta f\text{-}\delta 0$	D	$\delta f\text{-}\delta 0$	D	$\delta f\text{-}\delta 0$
0.99895	3.24245	0.999032	3.52096	0.999104	3.80518
0.998953	3.25164	0.999035	3.53034	0.999106	3.81475
0.998956	3.26084	0.999037	3.53973	0.999108	3.82433
0.998959	3.27004	0.99904	3.54913	0.999111	3.83391
0.998961	3.27925	0.999042	3.55853	0.999113	3.8435
0.998964	3.28847	0.999045	3.56794	0.999115	3.8531
0.998967	3.29769	0.999047	3.57735	0.999117	3.8627
0.99897	3.30692	0.99905	3.58677	0.999119	3.87231
0.998973	3.31616	0.999052	3.5962	0.999121	3.88193
0.998976	3.3254	0.999055	3.60563	0.999124	3.89155
0.998979	3.33465	0.999057	3.61507	0.999126	3.90118
0.998981	3.34391	0.99906	3.62451	0.999128	3.91082
0.998984	3.35317	0.999062	3.63396	0.99913	3.92046
0.998987	3.36244	0.999064	3.64342	0.999132	3.93011
0.99899	3.37171	0.999067	3.65289	0.999134	3.93976
0.998992	3.38099	0.999069	3.66236	0.999136	3.94942
0.998995	3.39028	0.999072	3.67183	0.999138	3.95909
0.998998	3.39957	0.999074	3.68132	0.999141	3.96876
0.999001	3.40887	0.999076	3.69081	0.999143	3.97844
0.999003	3.41818	0.999079	3.7003		
0.999006	3.42749	0.999081	3.70981		
0.999009	3.43681	0.999083	3.71931		
0.999011	3.44613	0.999086	3.72883		
0.999014	3.45547	0.999088	3.73835		
0.999017	3.4648	0.99909	3.74788		
0.999019	3.47415	0.999093	3.75741		
0.999022	3.4835	0.999095	3.76695		
0.999024	3.49285	0.999097	3.7765		
0.999027	3.50222	0.999099	3.78605		
0.99903	3.51159	0.999102	3.79561		

A4. Tabella D - scorrimento plastico (DS_330_43_L_S_2)

D	$\delta f - \delta 0$						
0	0	0,384635	0,104311	0,828583	0,318404	0,965348	0,609694
0,001999	0,001584	0,399559	0,108516	0,835415	0,325339	0,966742	0,617909
0,004531	0,003216	0,414464	0,112804	0,842007	0,332325	0,968076	0,626142
0,007598	0,004899	0,429332	0,117174	0,848364	0,339363	0,96935	0,634393
0,011197	0,006633	0,444143	0,121627	0,854492	0,346451	0,970567	0,642661
0,015329	0,008419	0,458879	0,126163	0,860397	0,353587	0,971731	0,650947
0,01999	0,010259	0,473522	0,13078	0,866083	0,360771	0,972843	0,659249
0,025177	0,012154	0,488054	0,13548	0,871557	0,368001	0,973906	0,667568
0,030885	0,014105	0,502459	0,140262	0,876824	0,375277	0,974922	0,675902
0,03711	0,016114	0,516722	0,145125	0,88189	0,382596	0,975893	0,684251
0,043844	0,018181	0,530828	0,150069	0,886761	0,389959	0,97682	0,692616
0,051081	0,020308	0,544762	0,155094	0,891442	0,397364	0,977707	0,700994
0,058811	0,022496	0,558512	0,160199	0,89594	0,40481	0,978554	0,709387
0,067025	0,024747	0,572065	0,165384	0,900259	0,412295	0,979364	0,717793
0,075713	0,027061	0,58541	0,170648	0,904406	0,41982	0,980137	0,726213
0,084863	0,02944	0,598536	0,17599	0,908386	0,427382	0,980877	0,734645
0,094462	0,031885	0,611435	0,18141	0,912205	0,434981	0,981584	0,74309
0,104498	0,034397	0,624096	0,186906	0,915868	0,442616	0,982259	0,751547
0,114956	0,036977	0,636513	0,192479	0,91938	0,450286	0,982905	0,760016
0,125821	0,039626	0,648679	0,198127	0,922748	0,457989	0,983522	0,768497
0,137076	0,042345	0,660587	0,20385	0,925976	0,465726	0,984112	0,776989
0,148706	0,045136	0,672233	0,209646	0,929068	0,473495	0,984676	0,785492
0,160692	0,047999	0,683612	0,215514	0,932031	0,481295	0,985215	0,794006
0,173017	0,050936	0,69472	0,221454	0,934869	0,489125	0,985731	0,80253
0,185661	0,053946	0,705555	0,227465	0,937587	0,496985	0,986224	0,811064
0,198605	0,057032	0,716115	0,233545	0,940188	0,504873	0,986696	0,819608
0,211829	0,060194	0,726399	0,239693	0,942679	0,51279	0,987146	0,828162
0,225312	0,063433	0,736405	0,245909	0,945063	0,520733	0,987578	0,836725
0,239034	0,066749	0,746135	0,252191	0,947344	0,528703	0,98799	0,845298
0,252973	0,070144	0,755587	0,258539	0,949526	0,536698	0,988385	0,853879
0,267109	0,073617	0,764765	0,26495	0,951614	0,544718	0,988762	0,862469
0,281418	0,07717	0,773669	0,271424	0,953611	0,552763	0,989124	0,871068
0,295881	0,080804	0,782302	0,27796	0,955522	0,560831	0,989469	0,879675
0,310473	0,084518	0,790666	0,284556	0,957348	0,568921	0,9898	0,888291
0,325175	0,088313	0,798765	0,291212	0,959095	0,577034	0,990117	0,896914
0,339963	0,092189	0,806603	0,297926	0,960765	0,585168	0,99042	0,905545
0,354817	0,096148	0,814182	0,304696	0,962362	0,593324	0,99071	0,914184
0,369715	0,100188	0,821507	0,311523	0,963889	0,601499	0,990988	0,92283

D	$\delta f\text{-}\delta 0$						
0,991254	0,931484	0,996252	1,264632	0,997542	1,603967	0,998065	1,948248
0,991509	0,940145	0,996309	1,273492	0,997562	1,612966	0,998075	1,957371
0,991753	0,948813	0,996364	1,282356	0,99758	1,621968	0,998085	1,966498
0,991987	0,957487	0,996417	1,291225	0,997599	1,630973	0,998094	1,975628
0,992211	0,966169	0,996469	1,300097	0,997617	1,639982	0,998104	1,984761
0,992426	0,974857	0,996518	1,308973	0,997634	1,648995	0,998113	1,993897
0,992631	0,983551	0,996567	1,317853	0,997651	1,65801	0,998123	2,003037
0,992829	0,992252	0,996613	1,326737	0,997668	1,667029	0,998132	2,01218
0,993018	1,000959	0,996658	1,335625	0,997685	1,676052	0,998141	2,021325
0,993199	1,009673	0,996702	1,344517	0,997701	1,685077	0,99815	2,030475
0,993373	1,018392	0,996744	1,353413	0,997717	1,694106	0,998159	2,039627
0,99354	1,027117	0,996785	1,362312	0,997732	1,703139	0,998167	2,048782
0,9937	1,035848	0,996825	1,371216	0,997748	1,712174	0,998176	2,057941
0,993854	1,044585	0,996863	1,380123	0,997763	1,721213	0,998185	2,067103
0,994002	1,053327	0,996901	1,389033	0,997777	1,730256	0,998193	2,076268
0,994143	1,062075	0,996937	1,397948	0,997792	1,739301	0,998201	2,085437
0,994279	1,070828	0,996972	1,406866	0,997806	1,74835	0,99821	2,094608
0,99441	1,079587	0,997006	1,415788	0,99782	1,757402	0,998218	2,103783
0,994536	1,088351	0,997039	1,424713	0,997833	1,766457	0,998226	2,112961
0,994656	1,09712	0,997071	1,433642	0,997847	1,775516	0,998234	2,122142
0,994772	1,105894	0,997102	1,442575	0,99786	1,784578	0,998242	2,131326
0,994884	1,114673	0,997133	1,451511	0,997873	1,793643	0,99825	2,140513
0,994991	1,123457	0,997162	1,460451	0,997886	1,802712	0,998257	2,149704
0,995094	1,132246	0,997191	1,469395	0,997898	1,811783	0,998265	2,158898
0,995193	1,14104	0,997219	1,478342	0,997911	1,820858	0,998273	2,168095
0,995288	1,149839	0,997246	1,487293	0,997923	1,829936	0,99828	2,177295
0,99538	1,158642	0,997272	1,496247	0,997935	1,839018	0,998288	2,186499
0,995468	1,167451	0,997298	1,505204	0,997947	1,848103	0,998295	2,195705
0,995553	1,176263	0,997323	1,514165	0,997958	1,857191	0,998302	2,204915
0,995635	1,18508	0,997348	1,52313	0,99797	1,866282	0,99831	2,214128
0,995714	1,193902	0,997371	1,532098	0,997981	1,875376	0,998317	2,223344
0,99579	1,202728	0,997395	1,54107	0,997992	1,884474	0,998324	2,232563
0,995863	1,211559	0,997417	1,550045	0,998003	1,893575	0,998331	2,241786
0,995934	1,220394	0,997439	1,559023	0,998014	1,902679	0,998338	2,251011
0,996002	1,229233	0,997461	1,568005	0,998024	1,911786	0,998345	2,26024
0,996068	1,238077	0,997482	1,57699	0,998035	1,920897	0,998352	2,269472
0,996131	1,246924	0,997503	1,585979	0,998045	1,930011	0,998358	2,278708
0,996192	1,255776	0,997523	1,594971	0,998055	1,939128	0,998365	2,287946

D	$\delta f\text{-}\delta 0$						
0,998372	2,297187	0,998588	2,650719	0,998754	3,008826	0,998886	3,371506
0,998378	2,306432	0,998593	2,660084	0,998758	3,018311	0,998889	3,381112
0,998385	2,31568	0,998598	2,669452	0,998762	3,0278	0,998892	3,390721
0,998391	2,324931	0,998603	2,678824	0,998765	3,037292	0,998895	3,400333
0,998398	2,334185	0,998608	2,688199	0,998769	3,046787	0,998898	3,409948
0,998404	2,343443	0,998612	2,697577	0,998773	3,056286	0,998901	3,419567
0,99841	2,352704	0,998617	2,706958	0,998777	3,065787	0,998904	3,429189
0,998417	2,361967	0,998622	2,716342	0,99878	3,075292	0,998907	3,438814
0,998423	2,371234	0,998627	2,725729	0,998784	3,0848	0,99891	3,448442
0,998429	2,380504	0,998631	2,73512	0,998788	3,09431	0,998913	3,458073
0,998435	2,389778	0,998636	2,744514	0,998791	3,103825	0,998916	3,467708
0,998441	2,399054	0,99864	2,753911	0,998795	3,113342	0,998919	3,477345
0,998447	2,408334	0,998645	2,763311	0,998799	3,122862	0,998922	3,486986
0,998453	2,417617	0,99865	2,772714	0,998802	3,132386	0,998925	3,49663
0,998459	2,426903	0,998654	2,782121	0,998806	3,141913	0,998928	3,506277
0,998465	2,436192	0,998659	2,79153	0,998809	3,151443	0,998931	3,515927
0,998471	2,445484	0,998663	2,800943	0,998813	3,160976	0,998934	3,525581
0,998477	2,45478	0,998667	2,810359	0,998816	3,170512	0,998937	3,535237
0,998482	2,464079	0,998672	2,819778	0,99882	3,180052	0,99894	3,544897
0,998488	2,473381	0,998676	2,8292	0,998823	3,189594	0,998942	3,55456
0,998494	2,482686	0,99868	2,838626	0,998827	3,19914	0,998945	3,564226
0,998499	2,491994	0,998685	2,848055	0,99883	3,208689	0,998948	3,573895
0,998505	2,501305	0,998689	2,857486	0,998834	3,218241	0,998951	3,583568
0,99851	2,51062	0,998693	2,866921	0,998837	3,227796	0,998954	3,593243
0,998516	2,519937	0,998697	2,876359	0,99884	3,237355	0,998956	3,602922
0,998521	2,529258	0,998702	2,885801	0,998844	3,246916	0,998959	3,612604
0,998527	2,538582	0,998706	2,895245	0,998847	3,256481	0,998962	3,622289
0,998532	2,54791	0,99871	2,904693	0,998851	3,266049	0,998965	3,631978
0,998537	2,55724	0,998714	2,914144	0,998854	3,27562	0,998967	3,641669
0,998542	2,566574	0,998718	2,923598	0,998857	3,285195	0,99897	3,651364
0,998548	2,57591	0,998722	2,933055	0,99886	3,294772	0,998973	3,661061
0,998553	2,58525	0,998726	2,942515	0,998864	3,304353	0,998975	3,670762
0,998558	2,594593	0,99873	2,951979	0,998867	3,313936	0,998978	3,680466
0,998563	2,60394	0,998734	2,961445	0,99887	3,323523	0,998981	3,690174
0,998568	2,613289	0,998738	2,970915	0,998873	3,333114	0,998983	3,699884
0,998573	2,622642	0,998742	2,980388	0,998876	3,342707	0,998986	3,709598
0,998578	2,631998	0,998746	2,989864	0,99888	3,352303	0,998989	3,719314
0,998583	2,641356	0,99875	2,999343	0,998883	3,361903	0,998991	3,729034

D	$\delta f\text{-}\delta 0$						
0,998994	3,738757	0,999006	3,78742	0,999019	3,836162	0,999036	3,904534
0,998996	3,748484	0,999009	3,797162	0,999021	3,84592	0,999038	3,914314
0,998999	3,758213	0,999011	3,806908	0,999024	3,855681	0,999041	3,924098
0,999001	3,767946	0,999014	3,816656	0,999026	3,865446	0,999043	3,933884
0,999004	3,777681	0,999016	3,826408	0,999029	3,875213	0,999045	3,943674