

Con il patrocinio di:



**Università di Firenze
Dipartimento di Costruzioni
e Restauro**



**Federazione Regionale degli
Ordini degli Ingegneri della
Toscana**

Rinforzi FRCCM per strutture in muratura ed in C.A.

**Aula Magna, Università di Firenze
Piazza San Marco, 4
FIRENZE**

10 Giugno 2010

*Prove di caratterizzazione dei compositi
e dell'interfaccia*

Relatore: Prof. Ing. Paolo Spinelli

Firenze, 10 Giugno 2010

Normative

Normative di riferimento

Modalità di rottura

D.M. Infrastrutture del 14.01.2008 “Nuove norme tecniche per le costruzioni” e relative circolari integrative.

CNR-DT 200/2004 – rev.7, Ottobre 2008 "Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Collaudo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati“.

Prove in laboratorio

“Linee Guida per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Collaudo di Interventi di Rinforzo di strutture di c.a., c.a.p. e murarie mediante FRP” - Consiglio Superiore Lavori Pubblici 24 Luglio 2009.

Prove in sito semi-distruttive

Prove in sito non distruttive

Normative

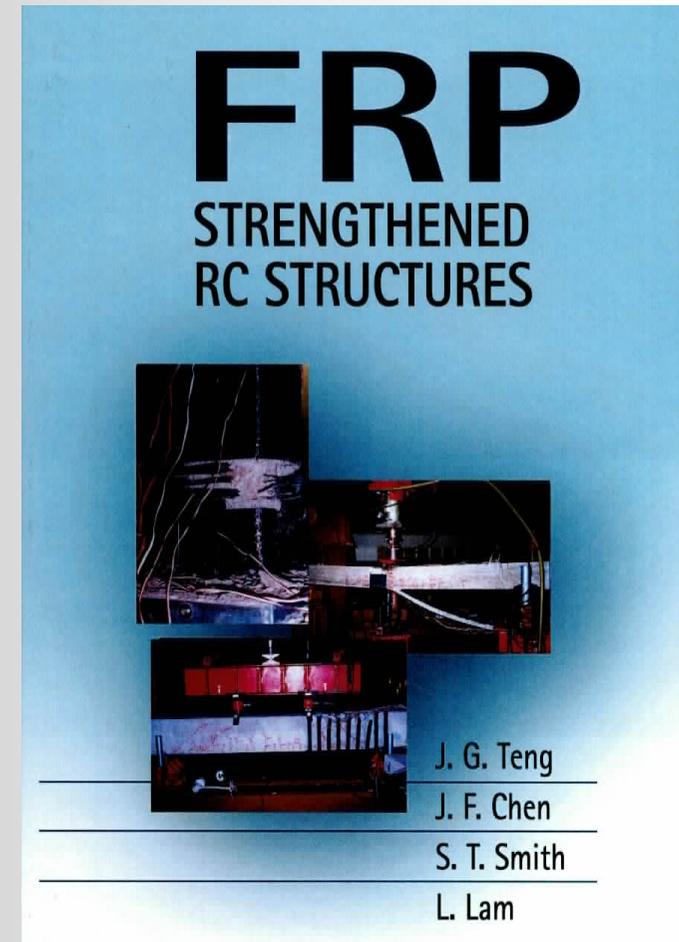
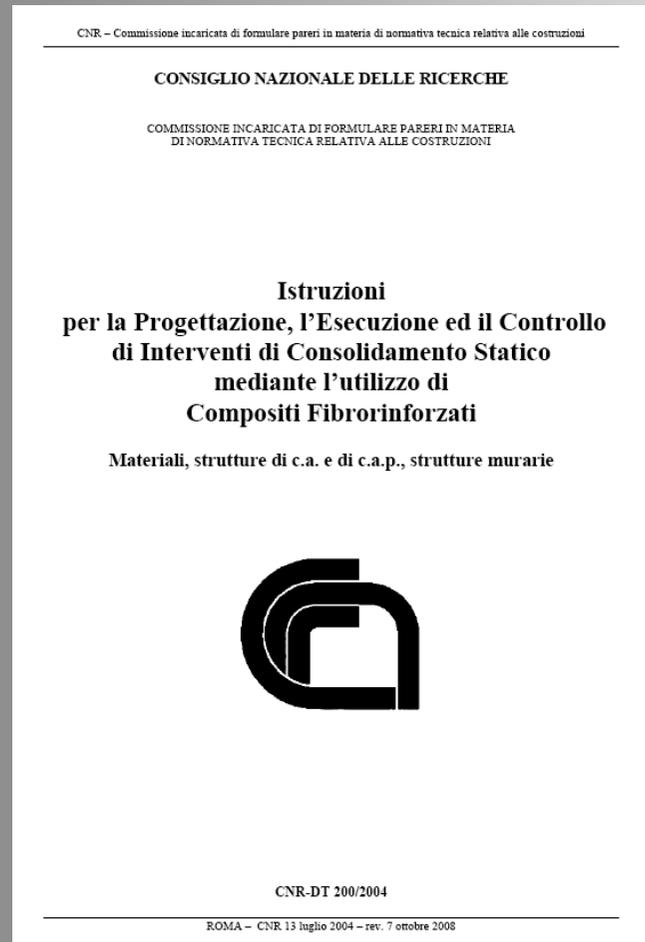
Modalità di rottura

Prove in laboratorio

Prove in sito semi-distruttive

Prove in sito non distruttive

Riferimenti bibliografici



Normative

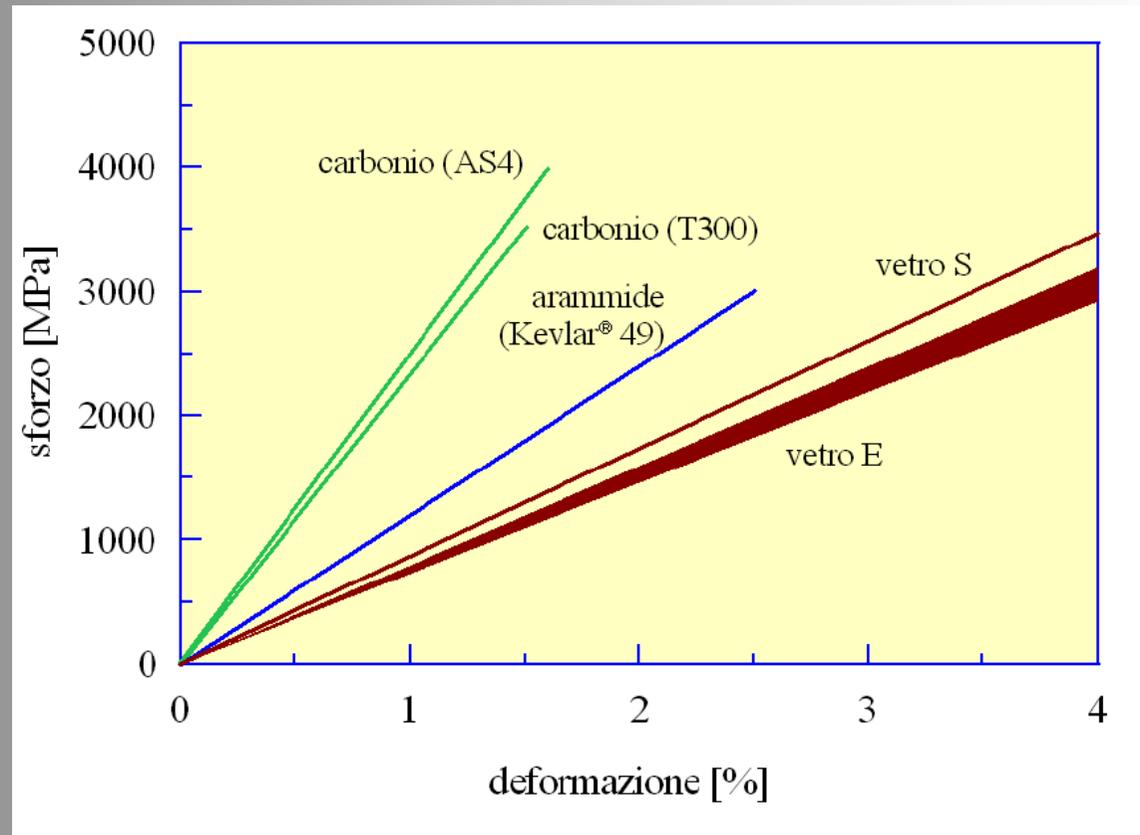
Modalità di rottura

Prove in laboratorio

Prove in sito semi-distruttive

Prove in sito non distruttive

Caratteristiche del materiale



Normative

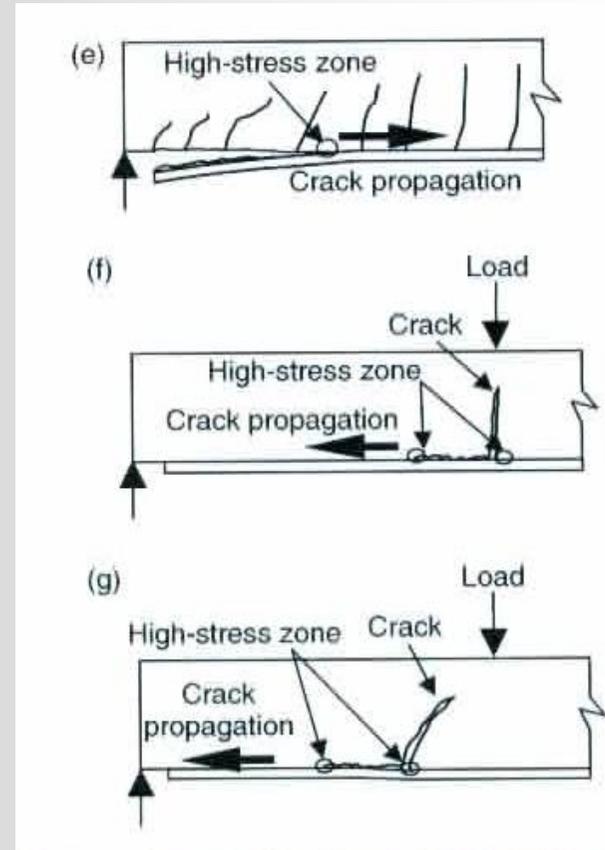
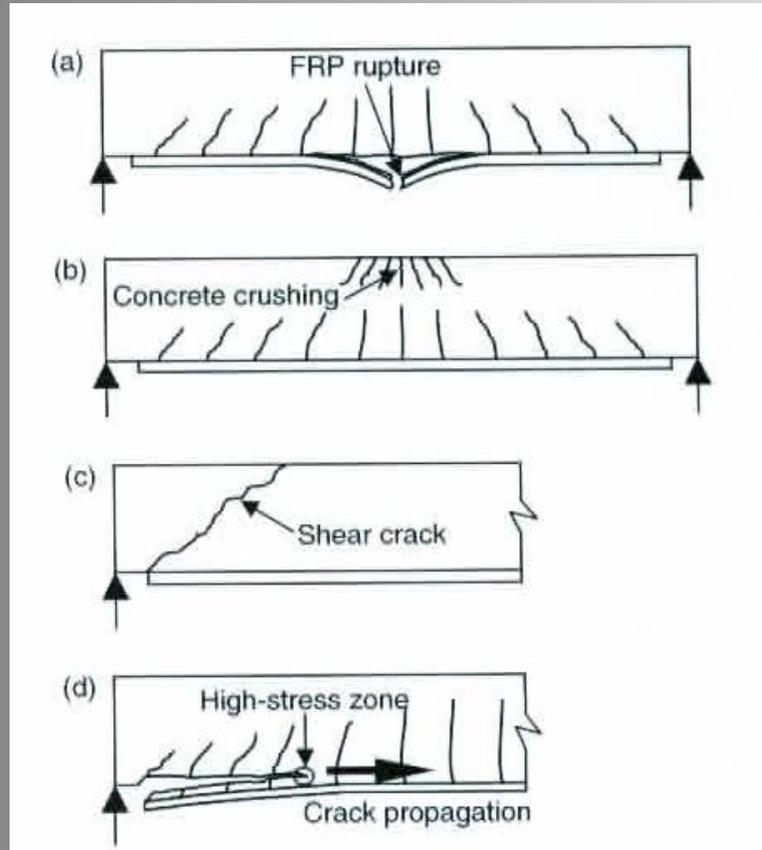
Modalità di rottura

Modalità di rottura

Prove in laboratorio

Prove in sito semi-distruttive

Prove in sito non distruttive



Normative

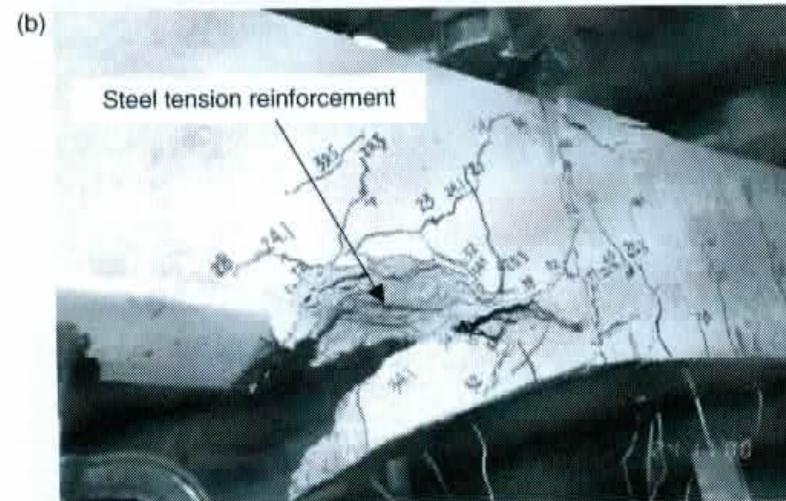
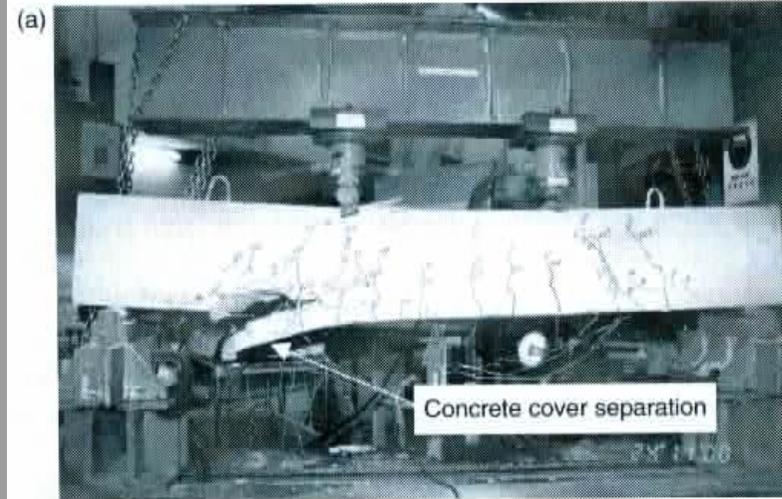
Modalità di rottura

Prove in laboratorio

Prove in sito
semi-distruttive

Prove in sito
non distruttive

Modalità di rottura



Normative

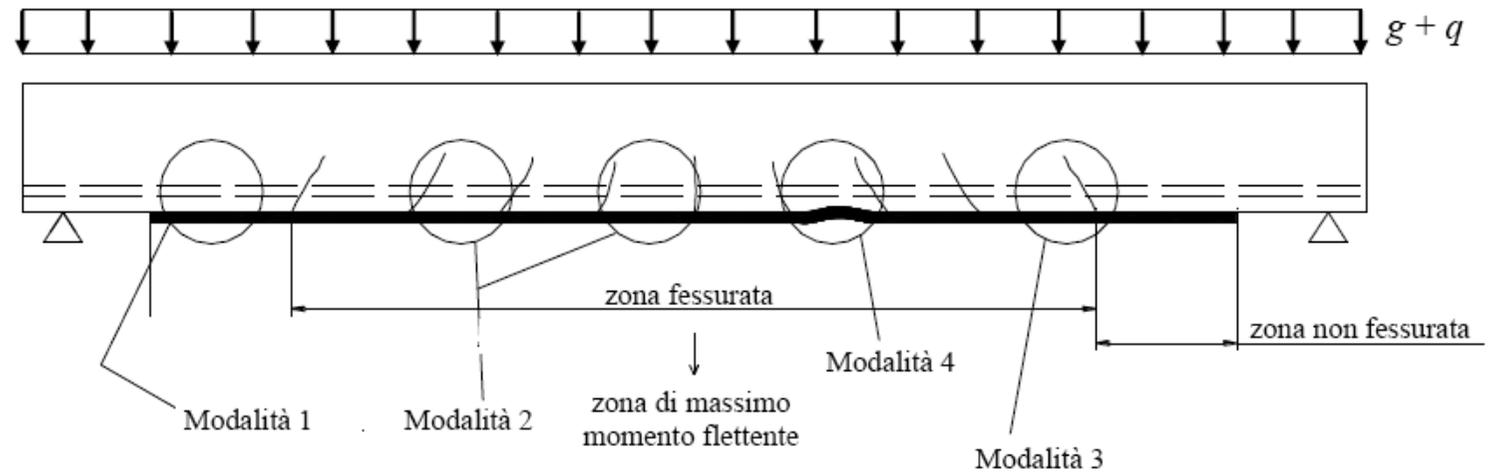
Modalità di rottura

Prove in laboratorio

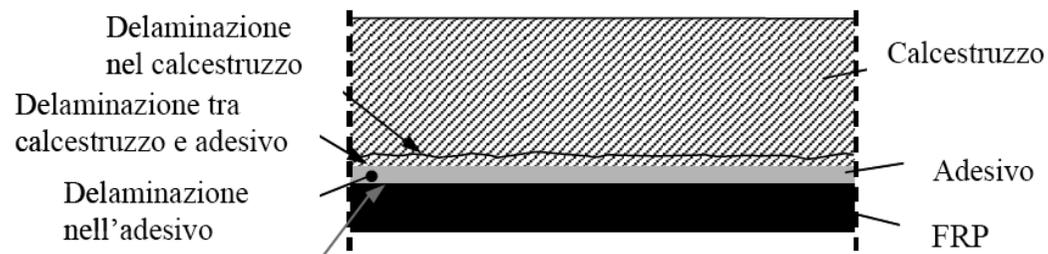
Prove in sito semi-distruttive

Prove in sito non distruttive

Modalità di rottura



- Modalità 1 (Delaminazione di estremità);
- Modalità 2 (Delaminazione intermedia, causata da fessure per flessione nella trave);
- Modalità 3 (Delaminazione causata da fessure diagonali da taglio);
- Modalità 4 (Delaminazione causata da irregolarità e rugosità della superficie di calcestruzzo).



Delaminazione nel rinforzo

Perdita di aderenza tra rinforzo e calcestruzzo

Normative

Modalità di rottura

Prove in laboratorio

Prove in sito semi-distruttive

Prove in sito non distruttive

Modalità di rottura 1 – Delaminazione di estremità

(2)P Con riferimento ad una tipica prova di aderenza, come quella rappresentata schematicamente in Figura 4-3, il valore ultimo della forza supportabile dal rinforzo di FRP, prima che subentri la delaminazione, dipende, a parità di tutte le altre condizioni, dalla lunghezza, l_b , della zona incollata. Tale valore cresce con l_b fino ad attingere un massimo corrispondente ad una ben definita lunghezza, l_e : ulteriori allungamenti della zona di incollaggio non comportano incrementi della forza trasmessa.

La lunghezza l_e viene definita lunghezza ottimale di ancoraggio e corrisponde quindi alla lunghezza minima di quest'ultimo che assicura la trasmissione del massimo sforzo di aderenza.

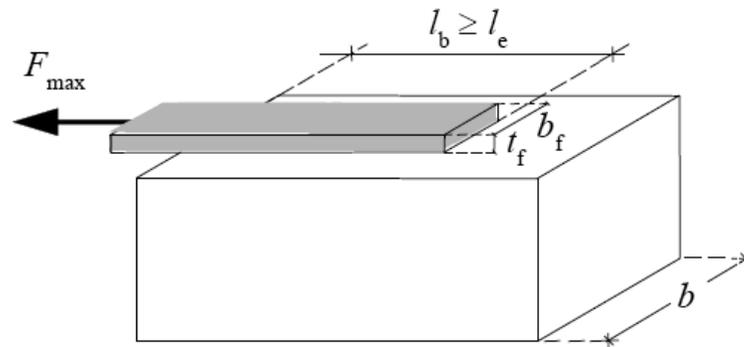


Figura 4-3 – Forza massima trasmissibile da un rinforzo di FRP.

$$F_{\max} = b_f \cdot \sqrt{2 \cdot E_f \cdot t_f \cdot \Gamma_F}$$

$$\Gamma_{Fk} = 0.03 \cdot k_b \cdot \sqrt{f_{ck} \cdot f_{ctm}} \quad [\text{forze in N, lunghezze in mm}]$$

$$l_e = \sqrt{\frac{E_f \cdot t_f}{2 \cdot f_{ctm}}}$$

$$k_b = \sqrt{\frac{2 - \frac{b_f}{b}}{1 + \frac{b_f}{400}}} \geq 1$$

Resistenza caratteristica del calcestruzzo

Resistenza media a trazione del calcestruzzo

Normative

Modalità di rottura 2 – Delaminazione intermedia

(2) In alternativa, è possibile ricorrere ad una procedura semplificata consistente nel verificare che allo SLU la tensione nel composito fibrorinforzato non ecceda un valore massimo, $f_{fdd,2}$, fornito dalla seguente relazione:

$$f_{fdd,2} = k_{cr} \cdot f_{fdd} = \frac{k_{cr}}{\gamma_{f,d} \cdot \sqrt{\gamma_c}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot E_f \cdot \Gamma_{Fk}}{t_f}}, \quad (4.6)$$

nella quale, in mancanza di dati specifici, il coefficiente k_{cr} può essere assunto pari a 3.0.

Il corrispondente valore della deformazione di progetto del composito fibrorinforzato, ε_{fdd} , vale:

$$\varepsilon_{fdd} = \frac{f_{fdd,2}}{E_f}. \quad (4.7)$$

Prove in laboratorio

Per un calcestruzzo C20/25 si ottiene $f_{dd,2} = 855 \text{ N/mm}^2$ e $\varepsilon_{fdd} = 0,0045$

Per un calcestruzzo C25/30 si ottiene $f_{dd,2} = 942 \text{ N/mm}^2$ e $\varepsilon_{fdd} = 0,0050$

Per un calcestruzzo C28/35 si ottiene $f_{dd,2} = 987 \text{ N/mm}^2$ e $\varepsilon_{fdd} = 0,0053$

Prove in sito semi-distruttive

Prove in sito non distruttive

Normative

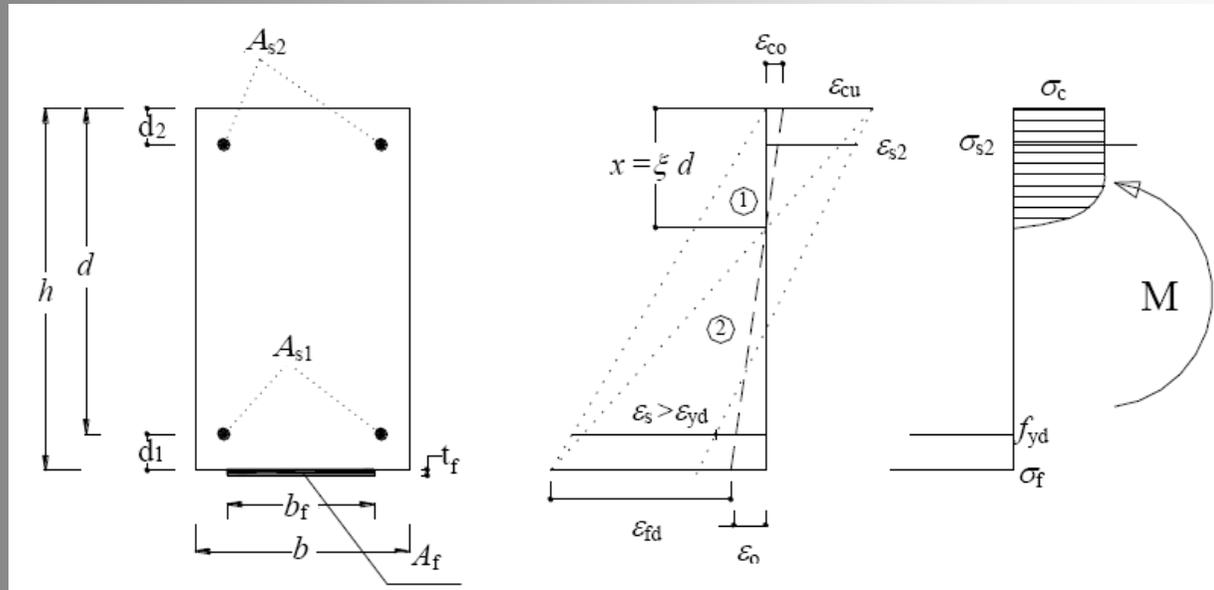
Modalità di rottura

Prove in laboratorio

Prove in sito semi-distruttive

Prove in sito non distruttive

Resistenza di progetto a flessione dell'elemento rinforzato



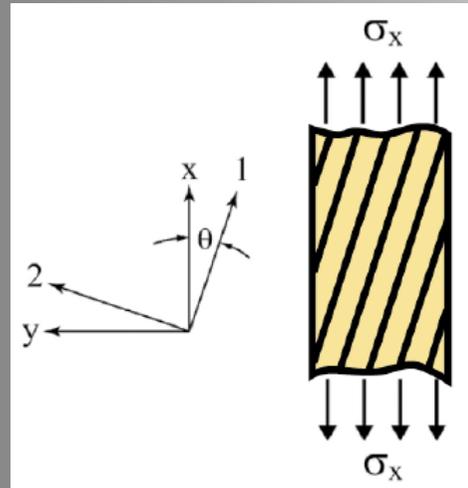
(4) Nella zona 1 la rottura si attinge per raggiungimento della deformazione (dilatazione) elastica limite di progetto nelle fibre: un qualunque diagramma delle deformazioni corrispondente a tale modalità di rottura ha come punto fisso il valore limite della deformazione delle fibre, ε_{fd} , definito dalla relazione (4.19).

- (FRP) $\varepsilon_f = \varepsilon_{fd}$,
- (calcestruzzo al lembo compresso) $\varepsilon_c = (\varepsilon_{fd} + \varepsilon_o) \cdot \frac{x}{(h-x)} \leq \varepsilon_{cu}$,
- (acciaio in compressione) $\varepsilon_{s2} = (\varepsilon_{fd} + \varepsilon_o) \cdot \frac{x-d_2}{(h-x)}$,
- (acciaio in trazione) $\varepsilon_{s1} = (\varepsilon_{fd} + \varepsilon_o) \cdot \frac{d-x}{(h-x)}$,

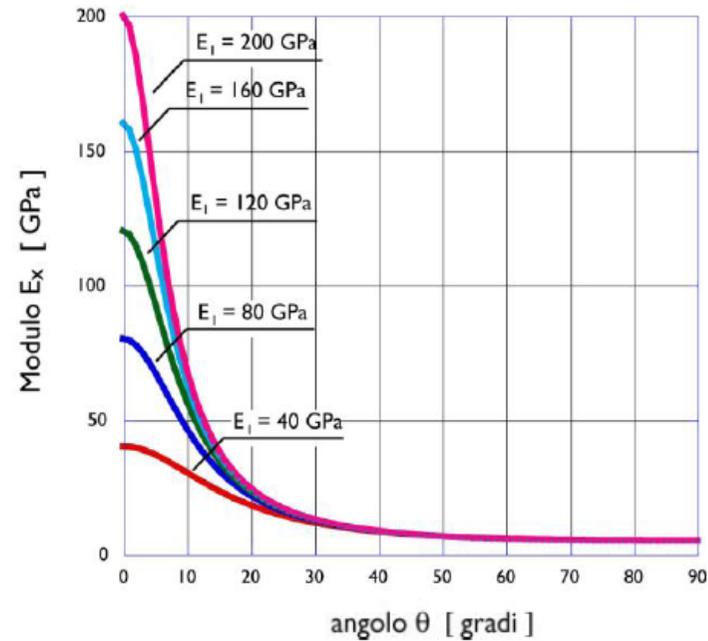
Normative

Effetto di carichi agenti in direzioni diverse dalle direzioni di simmetria del materiale

Modalità di rottura



Prove in laboratorio



Prove in sito semi-distruttive

Prove in sito non distruttive

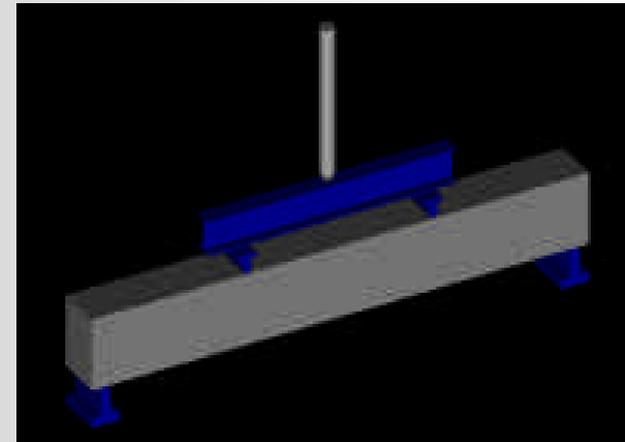
Figura 6-6 – Modulo di elasticità normale E_x al variare dell'angolo di rotazione θ per compositi fibrorinforzati con diverso valore del modulo di elasticità normale E_1 ($E_2 = 5$ GPa; $G_{12} = 3$ GPa; $\nu_{12} = 0.35$).

Normative

Prove di laboratorio

Modalità di rottura

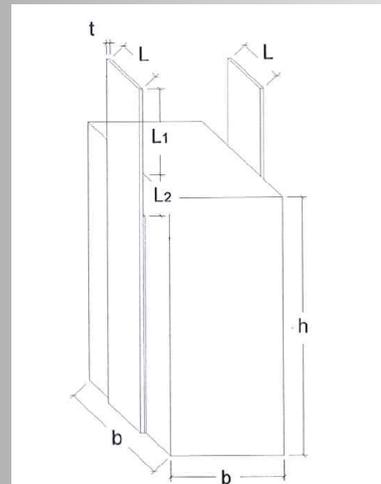
Prove in laboratorio



Prova a flessione su di una trave in cemento armato

Prove in sito
semi-distruttive

Prove in sito
non distruttive



Prova di strappo a taglio

Normative

Prove in sito semi-distruttive

Modalità di rottura

(1) Possono essere eseguite sia prove di strappo normale che prove di strappo a taglio. Le prove semi-distruttive vanno eseguite sui testimoni e, dove possibile, anche in zone del rinforzo non critiche in ragione di una prova per ogni 5 m² di applicazione, e comunque in numero totale non inferiore a 2 per tipo.

Prove in laboratorio

Prove in sito semi-distruttive

Prove in sito non distruttive

Normative

Modalità di rottura

Prove in laboratorio

*Prove in sito
semi-distruttive*

*Prove in sito
non distruttive*

Prove in sito semi-distruttive

(2) Prova di strappo normale. La prova, utile per il solo accertamento delle proprietà del substrato ripristinato, viene eseguita utilizzando piastre circolari di acciaio di spessore 20 mm e con diametro pari ad almeno 3 volte la dimensione caratteristica dell'inerte del calcestruzzo del substrato, e comunque non inferiore a 40 mm. Il rinforzo deve essere tagliato attorno al bordo della piastra, prima della prova, con una fresa cilindrica retta di diametro ≤ 3 mm, rotante ad almeno 2500 giri/min, avendo cura di non surriscaldare il composito e di ottenere l'incisione anche del substrato per uno spessore di 1-2 mm.

L'applicazione può ritenersi accettabile se almeno l'80% delle prove (entrambe nel caso di due sole prove) fornisce una tensione di picco allo strappo non inferiore a 0.9-1.2 MPa ed inoltre se, prevalentemente, la crisi è localizzata al di sotto della superficie di interfaccia composito/substrato.

Prove di strappo normale

Normative

Modalità di rottura

Prove in laboratorio



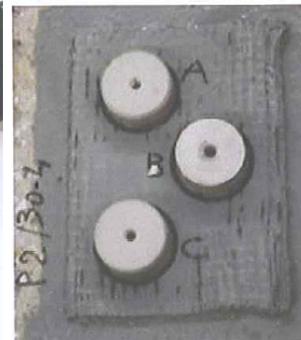
Parte di FRP provata



Elementi di prova estratti

Prove in sito
semi-distruttive

Prove in sito
non distruttive



Esecuzione della prova sul tessuto posato

Normative

Modalità di rottura

Prove in laboratorio

Prove in sito semi-distruttive

Prove in sito non distruttive

Prove di strappo normale

Politecnico di Milano – Dipartimento di Ingegneria Strutturale Cod. Cliente INSO01 Certificato di prova n° 2009/2840/1 pag. 16 di 47-

 POLITECNICO DI MILANO
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA STRUTTURALE
LABORATORIO PROVE MATERIALI
20133 MILANO – P.ZA LEONARDO DA VINCI, 32

Sede di Lecco
C.so Promessi Sposi, 29
23903 Lecco
Tel.: 0341-48.8793
Fax: 0341-48.8771

Sede di Milano
accettazione materiali: Via Coleria, 3 Tel.: 02 2399.4210 Fax : 02-2399.4211

Cod. Fiscale 80057930150
P. IVA 04376620151

Identificazione campioni : P1 – 30/3 , P2 – 30/4 , P3 – 30/5 , P4 – 15/3 , P5 – 15/4 , P6 – 15/5

Provino P1-30/3

Provino	Pu [kN]	yu [MPa]
P1 - 30/3 A	1.874	0.954
P1 - 30/3 B	3.443	1.754
P1 - 30/3 C	1.424	0.725
P1 - 30/3 D	2.004	1.021
P1 - 30/3 E	2.370	1.207
P1 - 30/3 F	3.272	1.666

Tabella 3 - Provino P1-30/3: Risultati sperimentali delle prove di pull-off



Figura 30 – Provino P1-30/3 A: Superficie di rottura



Figura 31 – Provino P1-30/3 B: Superficie di rottura

Lo Sperimentatore
Ing. Giulia Fava


Il Responsabile Tecnico
Prof. Ing. Carlo Poggi



Normative

Modalità di rottura

Prove in laboratorio

*Prove in sito
semi-distruttive*

*Prove in sito
non distruttive*

Prove di strappo a taglio

(3) Prova di strappo a taglio. La prova risulta particolarmente significativa per l'accertamento della qualità dell'incollaggio. È eseguibile solo se è possibile tirare una porzione di materiale composito nel proprio piano in corrispondenza di uno spigolo staccato dal substrato.

L'applicazione può ritenersi accettabile se almeno l'80% delle prove (entrambe nel caso di due sole prove) fornisce una forza di picco allo strappo non inferiore a 24 kN.

(4) In vista di prove di controllo semi-distruttive da eseguirsi successivamente, è buona norma prevedere zone aggiuntive ("testimoni") di rinforzo in parti della struttura opportunamente selezionate. Tali zone, suddivise in fazzoletti di dimensioni superiori a $500 \times 200 \text{ mm}^2$, devono presentare un'estensione totale minima di 0.1 m^2 e comunque non inferiore allo 0.5% dell'area totale del rinforzo. I fazzoletti vanno realizzati all'atto del rinforzo, con gli stessi materiali e con le medesime modalità previste per il rinforzo principale, in zone in cui la rimozione del rinforzo non comporti alterazione dei meccanismi di collasso. I fazzoletti devono inoltre essere esposti alle stesse condizioni ambientali del rinforzo principale e, se in numero maggiore di uno, devono essere distribuiti in maniera omogenea.

Normative

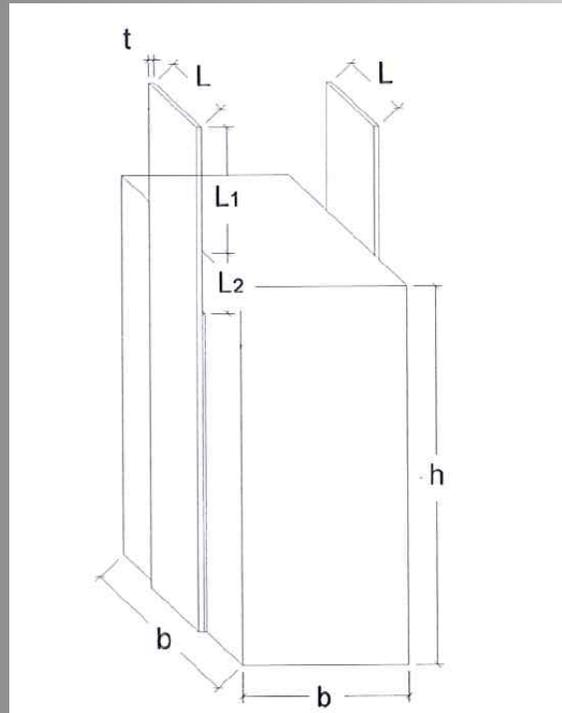
Modalità di rottura

Prove in laboratorio

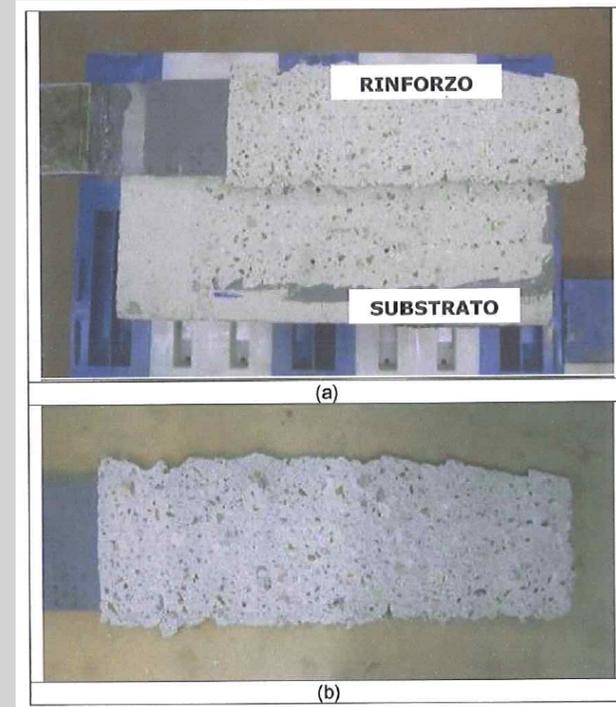
Prove in sito
semi-distruttive

Prove in sito
non distruttive

Prove di strappo a taglio



Geometria della prova



Elementi di prova

Questa prova può essere eseguita in sito sulla struttura esistente oppure in laboratorio su provini appositamente preparati in cantiere.

Normative

Modalità di rottura

Prove in laboratorio

Prove in sito semi-distruitive

Prove in sito non distruitive

Prove di strappo a taglio

Politecnico di Milano - Dipartimento di Ingegneria Strutturale Cod. Cliente INSO01 Certificato di prova n° 2009/2840/1 pag. 5 di 47-



POLITECNICO DI MILANO
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA STRUTTURALE
LABORATORIO PROVE MATERIALI
20133 MILANO - P.ZA LEONARDO DA VINCI, 32

Sede di Lecco
C.so Promessi Sposi, 29
23900 Lecco
Tel.: 0341-48.8793
Fax: 0341-48.8771

Sede di Milano
accettazione materiale: Via Celoria, 3 Tel.: 02-2399.4210 Fax: 02-2399.4211

Cod. Fiscale 80057930150
P. IVA 04376620151

Identificazione campioni : P1 - 30/3 , P2 - 30/4 , P3 - 30/5 , P4 - 15/3 , P5 - 15/4 , P6 - 15/5

Prove di strappo tangenziale e prove pull-off su prismi in calcestruzzo

Data delle prove: 16/11/2009 - 03/12/2009

Oggetto

Esecuzione di prove sperimentali di strappo tangenziale e di prove pull-off su prismi in calcestruzzo rinforzati con tessuti FRP.

Generalità

Le prove sono state eseguite presso il Laboratorio Prove Materiali del Dipartimento di Ingegneria Strutturale del Politecnico di Milano

a) Prove di strappo tangenziale

Descrizione dei campioni

I campioni da sottoporre a prova sono prismi di base quadrata di dimensioni nominali di 25 x 25 cm e di altezza pari a 50 cm realizzati in c.a.

Su due facce opposte (A e B) di ogni elemento in calcestruzzo è applicato un rinforzo in CFRP realizzato con diversi strati di tessuto in fibra di carbonio avente una grammatura nominale di 980 g/m². Nei provini ricavati dai prismi P1 e P2 il rinforzo è incollato sull'intera lunghezza del prisma, mentre negli altri provini è incollato su tutta la lunghezza del prisma fatta eccezione per gli ultimi 95 mm. Il rinforzo fuoriesce per un tratto di circa 20 cm per permettere l'afferraggio da parte della macchina di prova. La larghezza nominale del rinforzo è di 100 mm. Dettagli relativi alla geometria dei campioni sono forniti in Fig.1 e Tab.1.

Le caratteristiche meccaniche del composito sono state ricavate tramite prove sperimentali per il controllo di accettazione di materiali compositi prodotti in cantiere secondo quanto suggerito nel documento CNR-DT 200/2004 "Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati".



Il Responsabile Tecnico
Prof. Ing. Carlo Poggi

Lo Sperimentatore
Ing. Giulia Fava

Politecnico di Milano - Dipartimento di Ingegneria Strutturale Cod. Cliente INSO01 Certificato di prova n° 2009/2840/1 pag. 6 di 47-



POLITECNICO DI MILANO
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA STRUTTURALE
LABORATORIO PROVE MATERIALI
20133 MILANO - P.ZA LEONARDO DA VINCI, 32

Sede di Lecco
C.so Promessi Sposi, 29
23900 Lecco
Tel.: 0341-48.8793
Fax: 0341-48.8771

Sede di Milano
accettazione materiale: Via Celoria, 3 Tel.: 02-2399.4210 Fax: 02-2399.4211

Cod. Fiscale 80057930150
P. IVA 04376620151

Identificazione campioni : P1 - 30/3 , P2 - 30/4 , P3 - 30/5 , P4 - 15/3 , P5 - 15/4 , P6 - 15/5

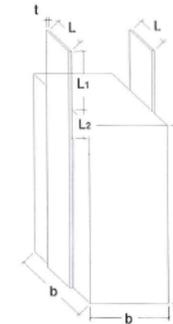


Figura 1 - Geometria del provino

Provino	No strati rinforzo	H [mm]	B [mm]	L [mm]	L1 [mm]	L2 [mm]
P1 - 30/3 A	3	500	250	112	200	0
P1 - 30/3 B	3	500	250	105	200	0
P2 - 30/4 A	4	500	250	110	200	0
P2 - 30/4 B	4	500	250	105	200	0
P3 - 30/5 A	5	500	250	115	200	95
P3 - 30/5 B	5	500	250	110	200	95
P4 - 15/3 A	3	500	250	110	200	95
P4 - 15/3 B	3	500	250	106	200	95
P5 - 15/4 A	4	500	250	105	200	95
P5 - 15/4 B	4	500	250	110	200	95
P6 - 15/5 A	5	500	250	113	200	95
P6 - 15/5 B	5	500	250	113	200	95

Tabella 1- Caratteristiche geometriche dei campioni



Il Responsabile Tecnico
Prof. Ing. Carlo Poggi

Lo Sperimentatore
Ing. Giulia Fava

Normative

Modalità di rottura

Prove in laboratorio

Prove in sito semi-distruttive

Prove in sito non distruttive

Prove di strappo a taglio

Politecnico di Milano - Dipartimento di Ingegneria Strutturale Cod. Cliente INSO01 Certificato di prova n° 2009/2840/1 pag. 7 di 47-



POLITECNICO DI MILANO
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA STRUTTURALE
LABORATORIO PROVE MATERIALI
20133 MILANO - P.ZA LEONARDO DA VINCI, 32

Sede di Lecco
C.so Promessi Sposi, 29
23900 Lecco
Tel.: 0341-48.8793
Fax: 0341-48.8771

Sede di Milano
accettazione materiale: Via Celoria, 3 Tel.: 02-2399.4210 Fax: 02-2399.4211

Cod. Fiscale 80057930150
P. IVA 04376620151

Identificazione campioni : P1 - 30/3 , P2 - 30/4 , P3 - 30/5 , P4 - 15/3 , P5 - 15/4 , P6 - 15/5

Procedura di prova

I provini sono stati sottoposti a prove di strappo al fine di determinare il valore del carico massimo. Le prove sperimentali sono state effettuate con una macchina di prova elettromeccanica (INSTRON) da 100 kN in modalità di controllo di spostamento (0.015 mm/sec).

Il provino è sistemato su un apposito banco di prova in grado di vincolare il prisma in calcestruzzo impedendone traslazioni o rotazioni, mentre il rinforzo viene tirato dalle ganasce della macchina (Fig.2). Il sistema di afferraggio realizzato per applicare la forza di trazione è costituito da due talloni in vetroresina incollati mediante una resina al tessuto stesso. La connessione tra campione e macchina di prova è realizzata mediante due piastre forate. Le due serie da tre fori di diametro 16 mm disposti lateralmente garantiscono, mediante il serraggio di viti eseguito con chiave dinamometrica, l'ammorsaggio del FRP. Il foro superiore centrale consente poi di agganciare i due piatti forati alla macchina. Il corretto allineamento del carico è garantito da uno snodo sferico.



Figura 2 - Setup di prova

Lo Sperimentatore
Ing. Giulia Fava

Il Responsabile Tecnico
Prof. Ing. Carlo Poggi



Politecnico di Milano - Dipartimento di Ingegneria Strutturale Cod. Cliente INSO01 Certificato di prova n° 2009/2840/1 pag. 8 di 47-



POLITECNICO DI MILANO
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA STRUTTURALE
LABORATORIO PROVE MATERIALI
20133 MILANO - P.ZA LEONARDO DA VINCI, 32

Sede di Lecco
C.so Promessi Sposi, 29
23900 Lecco
Tel.: 0341-48.8793
Fax: 0341-48.8771

Sede di Milano
accettazione materiale: Via Celoria, 3 Tel.: 02-2399.4210 Fax: 02-2399.4211

Cod. Fiscale 80057930150
P. IVA 04376620151

Identificazione campioni : P1 - 30/3 , P2 - 30/4 , P3 - 30/5 , P4 - 15/3 , P5 - 15/4 , P6 - 15/5

Risultati delle prove sperimentali

Si presentano di seguito i risultati delle prove sperimentali indicando i valori di forza massima ottenuta e riportando i diagrammi sperimentali di "Carico - Spostamento". Il carico e lo spostamento riportati nei diagrammi sono quelli registrati dalla macchina di prova.

Provino P1 - 30/3 A

Sulla faccia si osservano particolari imperfezioni salvo uno smussamento dello spigolo di sinistra ad una altezza intermedia. Il carico ultimo ottenuto durante la prova è pari a 42.10 kN. La frattura si è propagata all'interno del calcestruzzo, ad una profondità di circa due millimetri dalla superficie di adesione con l'adeseivo.

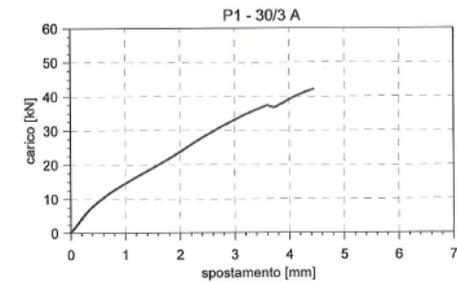


Figura 3 - Provino P1-30/3 A: Diagramma carico - spostamento

Lo Sperimentatore
Ing. Giulia Fava

Il Responsabile Tecnico
Prof. Ing. Carlo Poggi



Prove in sito non distruttive

Normative

(1) Le prove non distruttive possono essere utilizzate per caratterizzare l'omogeneità dell'applicazione a partire da adeguate mappature bidimensionali della superficie rinforzata aventi risoluzione spaziale differenziata in funzione della zona del rinforzo, secondo le indicazioni fornite in Tabella 4-1.

Modalità di rottura

(2) Prove di tipo acustico stimolato. Analoghe alla tipologia di prova “*impact-echo*”, tali prove si fondano sul diverso comportamento oscillatorio dello strato di composito in presenza o in assenza di coerenza con il substrato sottostante. Nella versione più elementare, una prova di questo tipo può essere eseguita da un tecnico esperto percuotendo la superficie del composito con una bacchetta rigida e ascoltando la sonorità che scaturisce dall'impatto. Risultati più oggettivi possono essere ottenuti con sistemi automatizzati.

Prove in laboratorio

(3) Prove ultrasoniche ad alta frequenza. Devono essere condotte impiegando metodologie in riflessione con frequenze non inferiori a 1.5 MHz e sonde con diametro non superiore a 25 mm, utilizzando la tecnica basata sulla variazione dell'ampiezza del primo picco per la localizzazione dei difetti.

Prove in sito semi-distruttive

(4) Prove termografiche. Risultano efficaci solamente in presenza di materiali di rinforzo caratterizzati da bassa conducibilità termica e non sono applicabili a rinforzi in carbonio o con fibre metalliche, a meno che non vengano utilizzati accorgimenti particolari che ne garantiscano una sensibilità adeguata. Occorre inoltre assicurare che il riscaldamento impartito nel corso della prova non danneggi il rinforzo con temperature troppo vicine a quella di transizione vetrosa.

Prove in sito non distruttive

(5) Prove in emissione acustica. La tecnica, basata sull'Emissione Acustica (EA), consente di cogliere e seguire il verificarsi e l'evolversi di un fenomeno di danno all'interno di un elemento strutturale soggetto a carico, “ascoltando” e registrando i “rumori” generati dalla formazione di *cracks* o fenomeni di distacco, che si propagano nel mezzo come onde elastiche. Rientra tra i metodi di controllo e monitoraggio passivi, i quali si attivano in funzione delle condizioni presenti negli elementi strutturali in fase di esercizio. Tale tecnica risulta particolarmente idonea per rilevare difetti dell'applicazione del composito alla struttura di c.a. e per rilevare l'inizio del distacco dalla struttura medesima.