

RINFORZI FRCC PER STRUTTURE IN MURATURA ED IN C.A.

Firenze 10 giugno 2010

**SPERIMENTAZIONE SU ELEMENTI IN CALCESTRUZZO ARMATO
RINFORZATI CON COMPOSITI A MATRICE CEMENTIZIA**

Luciano Ombres

Dipartimento di Strutture-Università della Calabria

RINFORZI FRCM PER STRUTTURE IN MURATURA ED IN C.A.

Firenze 10 giugno 2010

■ Sperimentazione su elementi inflessi in c.a.

- Modalità di collasso
- Capacità resistente
- Fessurazione, deformazione, duttilità



■ Sperimentazione su elementi compressi e pressoinflessi

- Capacità portante
- Grado di confinamento
- Modalità di collasso



RINFORZI FRCM PER STRUTTURE IN MURATURA ED IN C.A.

Firenze 10 giugno 2010

■ **SISTEMI DI RINFORZO CON COMPOSITI A MATRICE CEMENTIZIA**

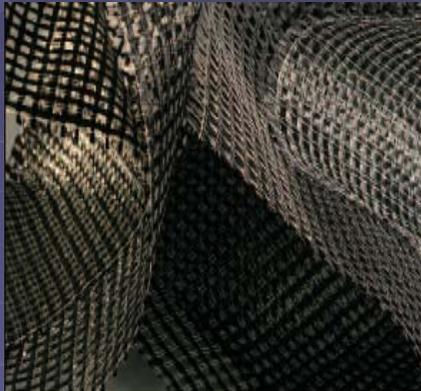
- TRC (Textile Reinforced Concrete)
 - Multiaxial textile fabrics bonded to concrete surfaces with a fine grained, high strength concrete
- TRM (Textile Reinforced Mortar)
 - Textile fabrics and polymer modified mortar
- FRC (Fiber Reinforced Concrete)
 - Thin composite sheets made by fibres impregnated with a cement matrix
- MBC (Mineral Based Composites)
 - Fibre composite grid bonded to concrete surface by a cementitious binder and a concrete surface primer
- **FRCM** (Fiber Reinforced Cementitious Matrix)
 - Fabric meshes with fibres disposed along two orthogonal directions bonded to concrete surface with a cement based mortar

RINFORZI FRCM PER STRUTTURE IN MURATURA ED IN C.A.

Firenze 10 giugno 2010

■ FRCM (Fiber Reinforced Cementitious Matrix)

Rete di fibra immersa in matrice a base cementizia



Rete in fibra di carbonio



Rete in fibra di PBO (Poliparafenilenbenzobisoxazolo)

Sistema XMesh C10/M50

Rete di fibre con maglia 10 mm	
Peso	214 g/m ²
Spessore (nelle due direzioni)	t=0.047 mm
Resistenza a rottura fibre	3500 MPa
Modulo elasticoc	240 GPa
Deformazione a rottura	18 %

Matra M50

Resistenza a compressione	28 MPa
Modulo di elasticità	7,500 GPa

Sistema XMesh Gold

Rete di fibre con maglia 10 mm	
Peso	144 g/m ²
Spessore (direzione longitudinale)	t=0.045 mm
Resistenza a rottura fibre	5800 MPa
Modulo elasticoc	270 GPa
Deformazione a rottura	21 %

Matra M750

Resistenza a compressione	29 MPa
Modulo di elasticità	6,000 GPa

RINFORZI FRM PER STRUTTURE IN MURATURA ED IN C.A.

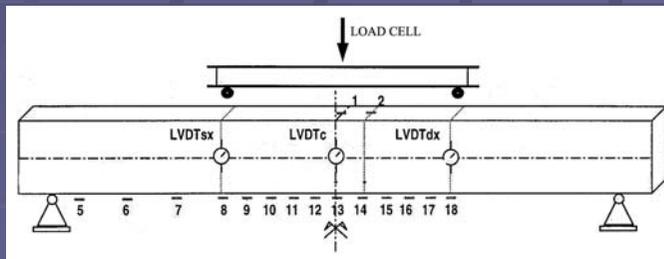
Firenze 10 giugno 2010

■ **COMPORTAMENTO FLESSIONALE DI TRAVI IN C.A. RINFORZATE CON FRM**

■ SPERIMENTAZIONE SU TRAVI IN C.A. *

- Travi rinforzate con nastri unidirezionali in CFRP e resina epossidica (UCFS)
- Travi rinforzate con nastri bidirezionali in CFRP e resina epossidica (CFMRP)
- Travi rinforzate con rete in CFRP e matrice cementizia (CFMRM)

■ Set-up prove



Lunghezza travi: 2960 mm

Sezione trasversale: 145 x 250 mm

Armatura metallica in trazione: 2 Φ 16

Armatura metallica in compressione : 2 Φ 8

Armatura trasversale: staffe F8 ad interasse 140 mm

Caratteristiche meccaniche dei materiali

Resistenza a compressione del calcestruzzo:

$f_c = 22,30$ MPa (UCFS, CFMRP)

$f_c = 50,59$ MPa (CFMRM)

Resistenza a trazione del calcestruzzo:

$f_{ct} = 2,58$ MPa (UCFS, CFMRP)

$f_{ct} = 5090$ MPa (CFMRM)

Resistenza a flessione della malta (sistema CFMRM)

$f_m = 5,05$ MPa

Resistenza a trazione CFRP:

$f_r = 2800$ MPa (UCFS)

$f_r = 2546$ MPa (CFMRP)

Modulo elastico CFRP:

$E_r = 162$ GPa (UCFS)

$E_r = 227$ GPa (CFMRP)

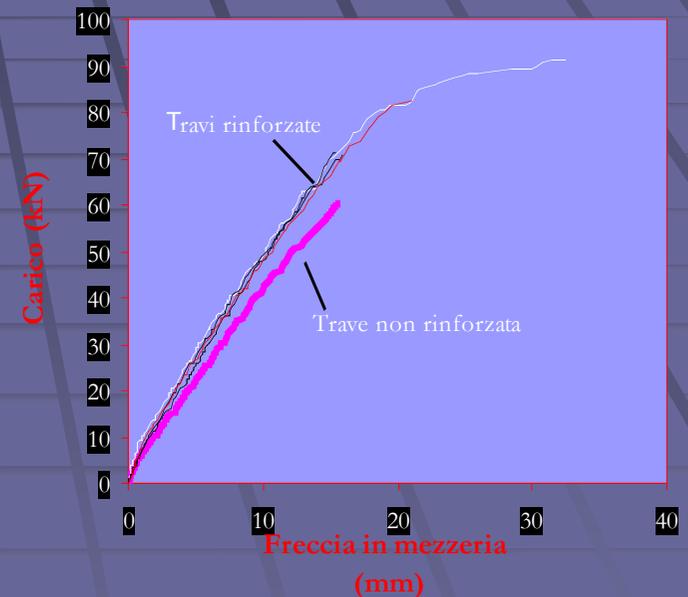
* Aiello MA, Leone M, Ombres L: **Influenza del sistema di rinforzo sul comportamento meccanico di travi in c.a. rinforzate con nastri in FRP (Fiber Reinforced Polymers)**. Atti del XV Congresso CTE, Bari, 4-6 novembre 2004, pp. 273-281

RINFORZI FRCM PER STRUTTURE IN MURATURA ED IN C.A.

Firenze 10 giugno 2010

RINFORZO CON MATRICE ORGANICA (resina epossidica)

Collasso prematuro per peeling del nastro con successivo distacco del ricoprimento



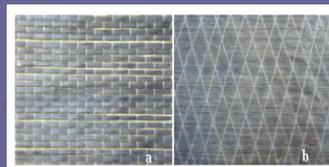
Rottura travi BCFM

(rinforzo mediante uno strato di rete di fibra di Carbonio, $t = 0.047$ mm; $E_t = 10.70$ GPa mm)



Rottura travi BUCFS

(rinforzo mediante uno strato di fibra unidirezionale di Carbonio, $t = 2$ mm; $E_t = 324$ GPa mm)



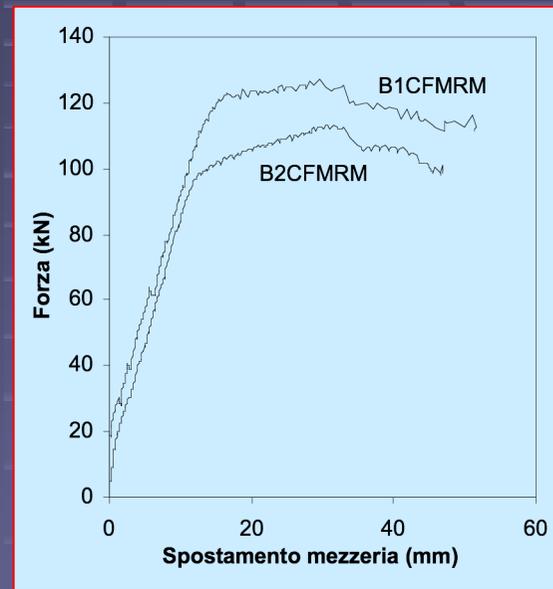
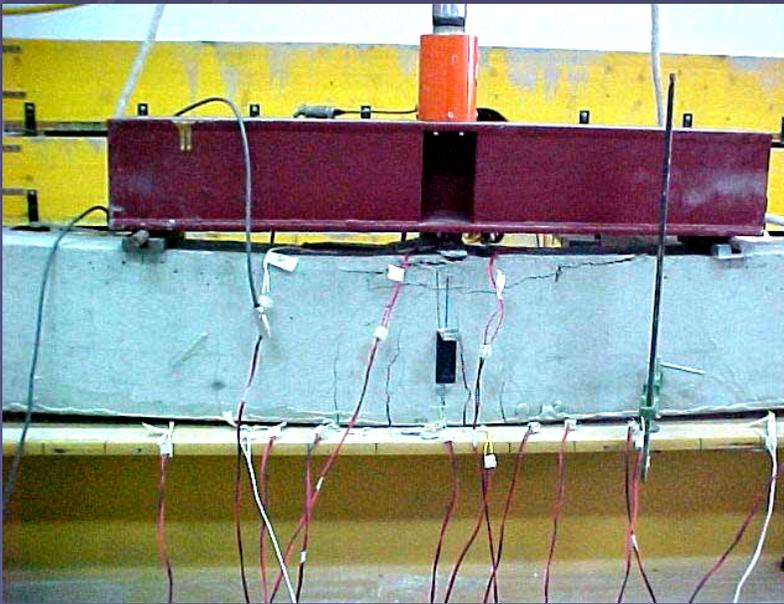
Travi	Carico ultimo (kN)	Incremento di capacità (%)
CB	86	---
BCFM	94	8
BUCFS	105	19

RINFORZI FRCM PER STRUTTURE IN MURATURA ED IN C.A.

Firenze 10 giugno 2010

RINFORZO CON FRCM

COLLASSO PER CEDIMENTO DEL CALCESTRUZZO COMPRESSO



Modalità di rottura per la trave B1CFMRM

L'utilizzazione di un sistema di rinforzo con matrice cementizia e fibra di rinforzo, garantisce modalità di collasso simili a quelle delle travi in calcestruzzo armato non rinforzate anche se l'incremento in termini di capacità resistente è meno rilevante di quello ottenuto con il sistema di incollaggio resina -FRP.

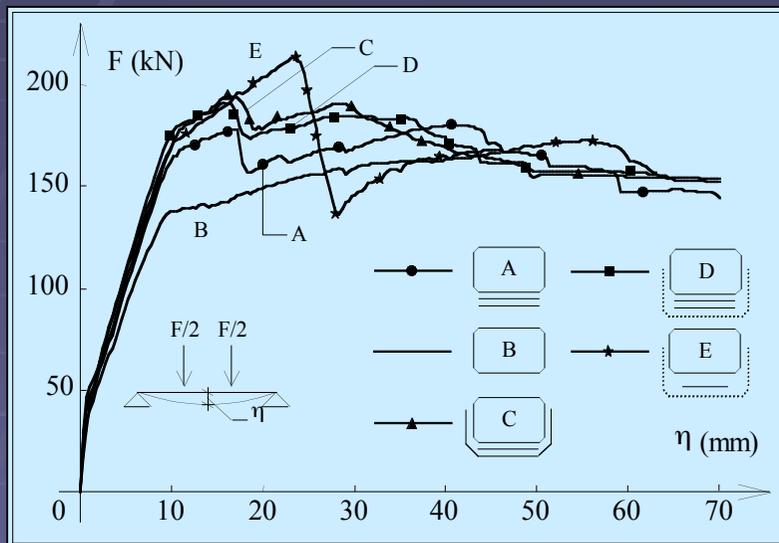
RINFORZI FRCM PER STRUTTURE IN MURATURA ED IN C.A.

Firenze 10 giugno 2010

■ **COMPORTAMENTO FLESSIONALE DI TRAVI IN C.A. RINFORZATE CON FRCM**

■ TRAVI IN C.A. RINFORZATE CON FRCM E TRAVI IN C.A. RINFORZATE CON FRP: CONFRONTO SPERIMENTALE

- Di Tommaso A., Focacci F., Mantegazza G.: **Rinforzo a flessione di travi in calcestruzzo armato con rete di carbonio e matrice cementizia**- Atti Convegno AICAP, 2004



Provino	Tipo di matrice	Rc (MPa)	fy (MPa)	ft (MPa)	Af (mm ²)
A	cementizia	47.68	523.15	619.84	31.96
B	--				--
C	cementizia				49.82
D	cementizia				31.96
E	epossidica				42.50

1. Efficacia del rinforzo a flessione di una trave di calcestruzzo armato realizzato con una rete di carbonio immersa in una matrice cementizia (FRCM).
2. Miglioramento delle prestazioni flessionali rispetto ai provini di riferimento non rinforzati (aumento del carico di collasso è risultato compreso tra il 9% e il 18% a seconda della configurazione di rinforzo).
3. L'incremento di carico di collasso ottenuto con rete e malta cementizia (FRCM) è risultato inferiore a quello ottenuto con foglio a fibre unidirezionali di carbonio e resina epossidica (FRP), che è stato del 29%. Questo sia per la maggiore sezione di fibre di carbonio presenti (circa il 30% in più), sia per un limite di aderenza superiore (il distacco è avvenuto alla dilatazione del 12%).
4. la crisi dei provini con resina epossidica è risultata più fragile in quanto il rinforzo si è staccato istantaneamente dal supporto facendo repentinamente mancare il suo contributo, mentre, nel caso della malta cementizia, la crisi è stata più duttile in quanto il contributo del rinforzo è venuto a mancare gradualmente a causa di scorrimenti delle fibre all'interno della matrice

RINFORZI FRCM PER STRUTTURE IN MURATURA ED IN C.A.

Firenze 10 giugno 2010



COMPORTAMENTO FLESSIONALE DI TRAVI IN C.A. RINFORZATE CON PBO-FRCM*

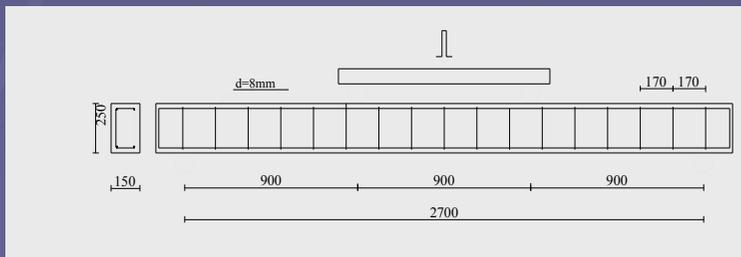
Obiettivi

- verifica dell'efficacia del sistema di rinforzo;
- analisi delle modalità di collasso con particolare riferimento ai meccanismi di collasso prematuro;
- valutazione della capacità resistente e della duttilità delle travi rinforzate;
- definizione di opportuni modelli per la progettazione e la verifica delle strutture rinforzate.

Parametri variabili

- a- numero di strati di rinforzo;
- b- lunghezza del rinforzo;
- c- percentuale geometrica di armatura interna;
- d- resistenza meccanica del calcestruzzo e dell'acciaio.

Schema di prova



Sigla trave	A_s (mm ²)	A'_s (mm ²)	A_f (mm ²)	ρ_s (%)	ρ_f (%)	f_{ck} (N/mm ²)
S1-T1-0	339.30	157.00	-	0.905	-	22.77
S1-T1-P1-1	339.30	157.00	6.75	0.905	0,018	22.77
S1-T1-P1-2	339.30	157.00	6.75	0.905	0,018	22.77
S1-T1-C1	339.30	157.00	6.75	0.905	0,018	22.77
S2-T1-0	157.00	100.53	-	0.419	-	23.02
S2-T1-P1	157.00	100.53	6.75	0.419	0,018	23.02
S2-T1-P2-1	157.00	100.53	13.50	0.419	0,036	23.02
S2-T1-P2-2	157.00	100.53	13.50	0.419	0,036	23.02
S2-T1-P3-1	157.00	100.53	20.25	0.419	0,054	23.02
S2-T1-P3-2	157.00	100.53	20.25	0.419	0,054	23.02
S2-T2-0	157.00	100.53	-	0.419	-	18.58
S2-T2-P2	157.00	100.53	13.50	0.419	0,036	18.58
S2-T2-P3	157.00	100.53	20.25	0.419	0,054	18.58

L. Ombres: Structural performance of reinforced concrete beams strengthened with PBO Fiber Reinforced Cementitious Mortars (FRCM). Concrete Solutions, Ed. Grantham, Majorana & Solomoni, 363-368, 2009, Taylor & Francis Group.

RINFORZI FRCM PER STRUTTURE IN MURATURA ED IN C.A.

Firenze 10 giugno 2010

Sigla trave	Carico di snervamento (kN)	Carico di rottura (kN)	δ_y (mm)	δ_u (mm)	δ_u / δ_y	Modo di rottura
S1-T1-0	74.85	75.78	18.15	28.50	1.57	Schiacciamento del calcestruzzo compresso
S1-T1-P1-1	80.10	87.42	17.34	35.50	2.05	Schiacciamento del calcestruzzo compresso e IC debonding
S1-T1-P1-2	80.04	87.60	17.72	42.31	2.39	Schiacciamento del calcestruzzo compresso
S1-T1-C1	77.88	81.30	15.91	27.31	1.72	Schiacciamento del calcestruzzo compresso
S2-T1-0	41.83	49.65	11.60	51.80	4.46	Schiacciamento del calcestruzzo compresso
S2-T1-P1	45.03	54.24	14.65	60.44	4.12	Schiacciamento del calcestruzzo compresso
S2-T1-P2-1	50.40	64.06	15.28	44.62	2.92	IC debonding
S2-T1-P2-2	50.01	66.00	=	=	=	IC debonding
S2-T1-P3-1	52.74	71.39	15.81	47.46	3.00	IC debonding
S2-T1-P3-2	46.10	61.44	21.16	47.46	2.24	IC debonding
S2-T2-0	39.84	43.02	12.53	43.78	3.49	Schiacciamento del calcestruzzo compresso
S2-T2-P2	44.94	52.86	12.47	28.53	2.29	IC debonding
S2-T2-P3	49.77	55.71	12.31	20.19	1.64	IC debonding

L. Ombres: **Failure modes in reinforced concrete beams strengthened with PBO Fiber Reinforced Cementitious Mortars (FRCM)**. Proceedings of the FRCPRCS-9 International Conference, Sidney, Australia, 13-15 July 2009

RINFORZI FRCM PER STRUTTURE IN MURATURA ED IN C.A.

Firenze 10 giugno 2010

■ **RISULTATI SPERIMENTALI (serie S1-T1)**

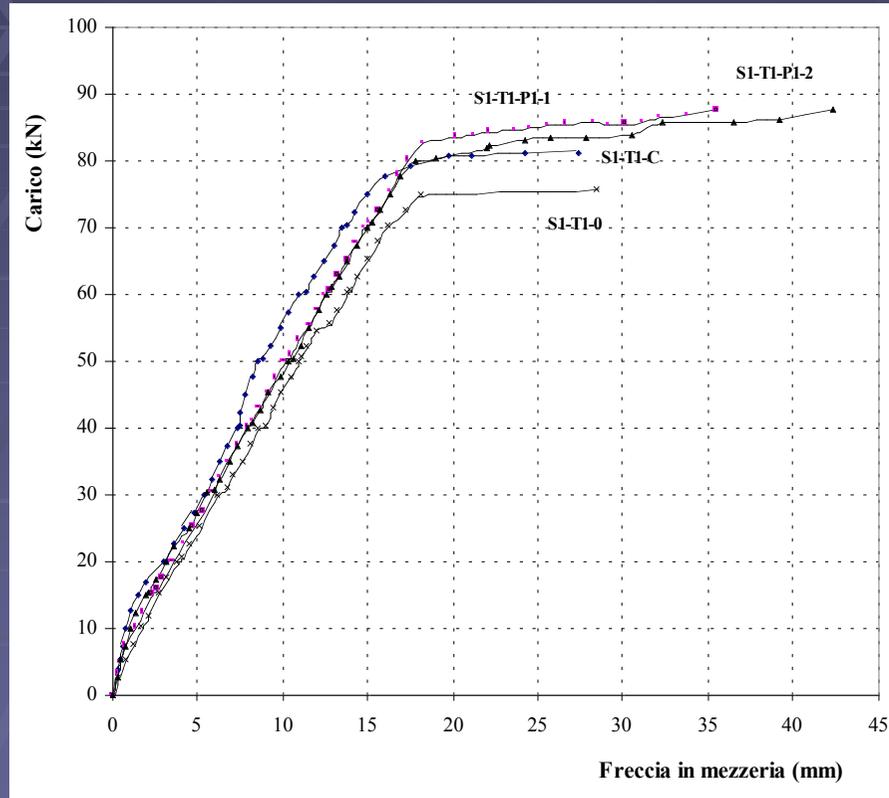
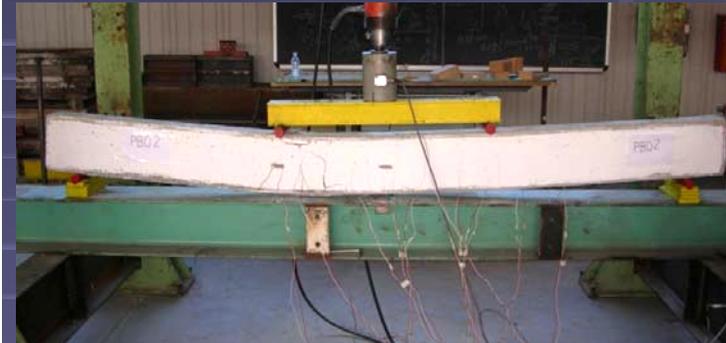


Diagramma carico-freccia in mezzeria



Trave S1-T1-P1-2



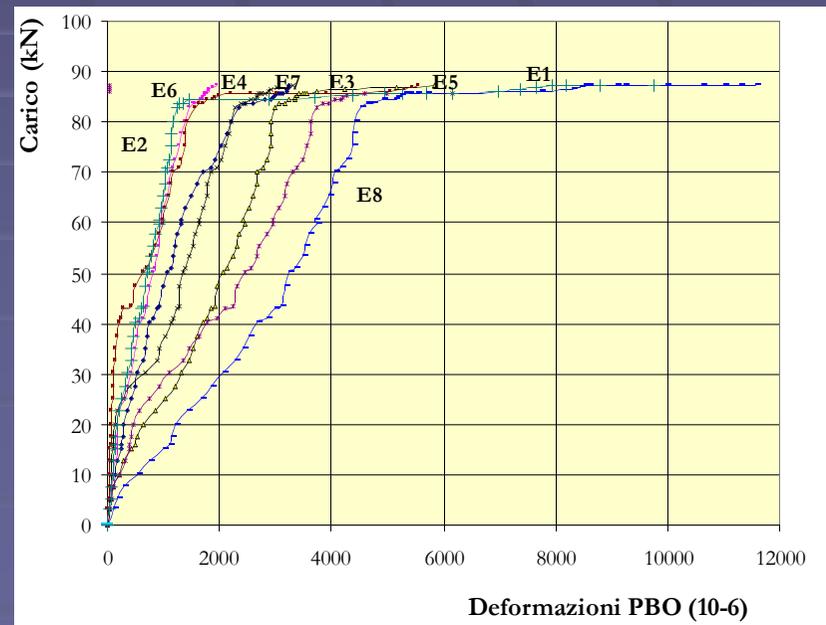
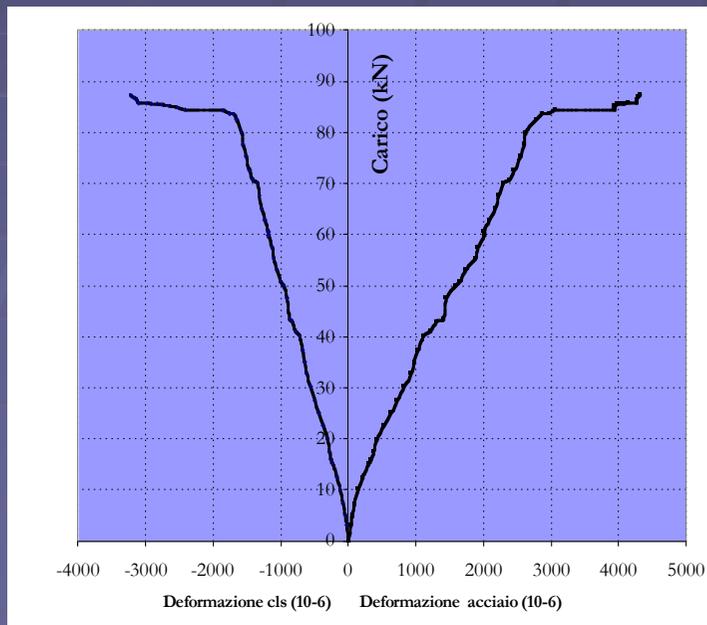
Particolare rottura S1-T1-C

RINFORZI FRM PER STRUTTURE IN MURATURA ED IN C.A.

Firenze 10 giugno 2010



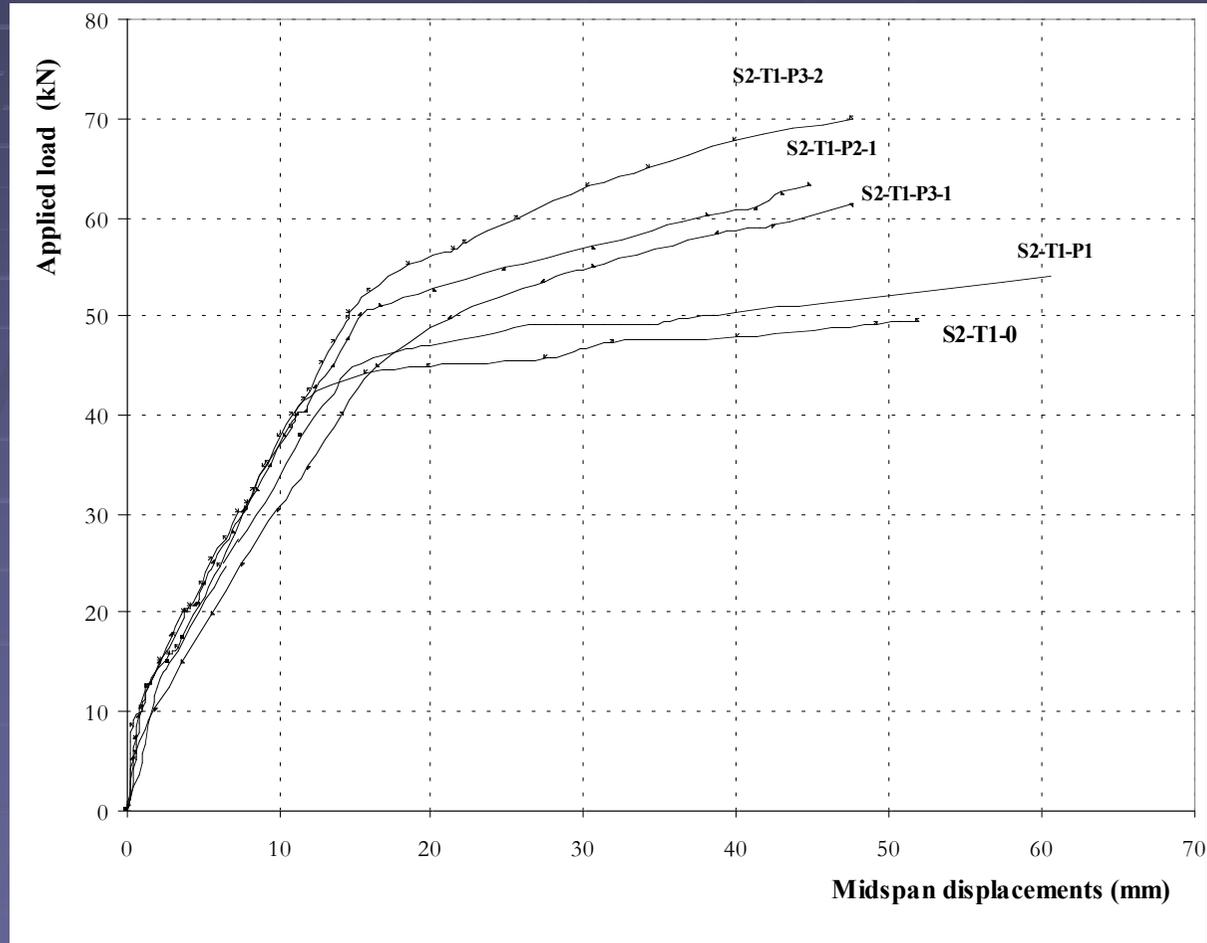
Trave S1-T1-P1-1



RINFORZI FRCM PER STRUTTURE IN MURATURA ED IN C.A.

Firenze 10 giugno 2010

■ **RISULTATI SPERIMENTALI (serie S2-T1)**



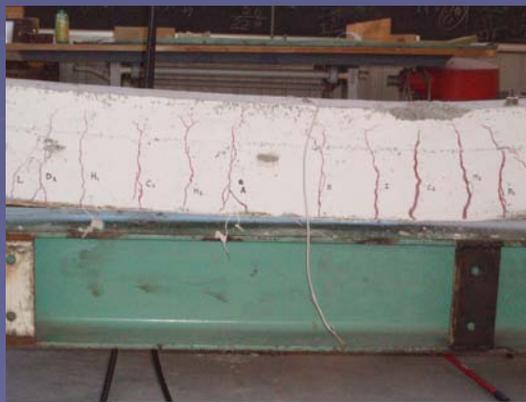
RINFORZI FRM PER STRUTTURE IN MURATURA ED IN C.A.

Firenze 10 giugno 2010

RISULTATI SPERIMENTALI (serie S2-T1)



Trave S2-T1-P1 rottura di tipo flessionale (cedimento del calcestruzzo compresso)



Carico di collasso 54.24 kN

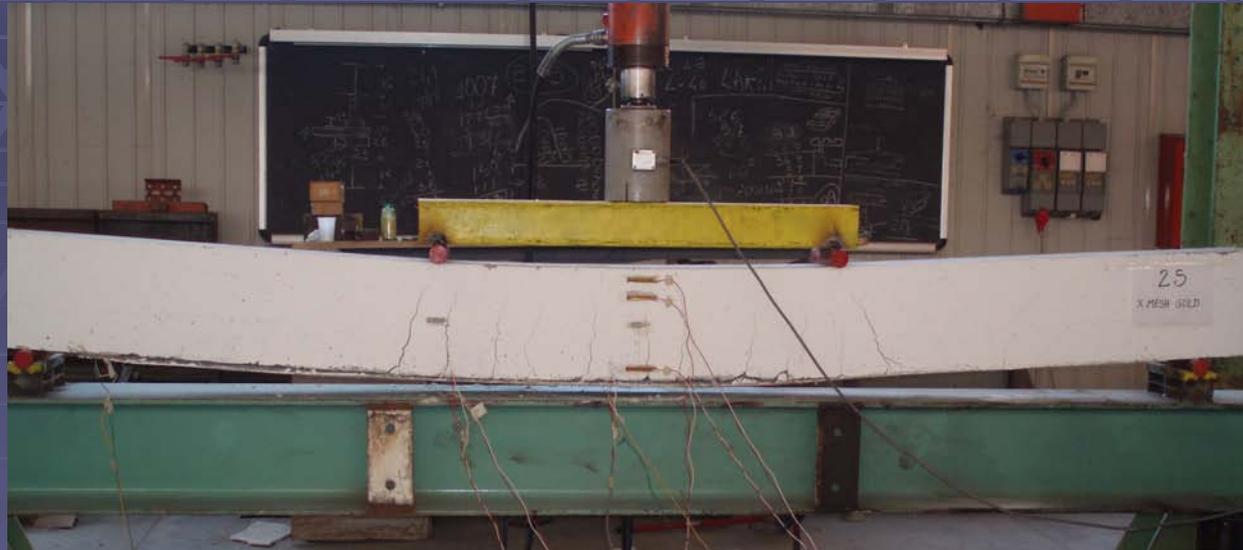
Carico di snervamento 45.03 kN

Incremento di resistenza: 9.2%

Deformazione nella fibra in PBO al collasso: 0.007 mm/mm

RINFORZI FRCM PER STRUTTURE IN MURATURA ED IN C.A.

Firenze, 10 giugno 2010



Carico di collasso	64.06 kN
Carico di snervamento	50.40 kN
Inizio debonding	51.50 kN

Incremento di resistenza: 29 %

Trave S2-T1-P2-1 collasso per delaminazione da fessurazione intermedia



Particolare delaminazione



Inizio debonding

- Debonding iniziale nella parte centrale della trave e successiva graduale propagazione verso le estremità;
- Al collasso non si manifesta alcun distacco tra il rinforzo FRCM e la trave nelle zone di estremità

Deformazione PBO ad inizio debonding: 0.010 mm/mm
Deformazione PBO al collasso : 0.0142 mm/mm

RINFORZI FRCM PER STRUTTURE IN MURATURA ED IN C.A.

Firenze, 10 giugno 2010

Trave S2-T1-P2-2



- Collasso per delaminazione da fessurazione intermedia
- Propagazione graduale del distacco dalla zona centrale all'estremità della trave

Carico di collasso	66.00 kN
Carico di snervamento	46.10 kN
Inizio debonding	54.30 kN

Incremento di resistenza: 32.9 %

RINFORZI FRM PER STRUTTURE IN MURATURA ED IN C.A.

Firenze, 10 giugno 2010



Trave S2-T1-P3-2

Collasso per delaminazione da fessurazione intermedia

Propagazione improvvisa del distacco dalla zona centrale all'estremità della trave (probabilmente imputabile a difetti locali)

Carico di collasso	61,44 kN
Carico di snervamento	50.01 kN
Inizio debonding	61.00 kN

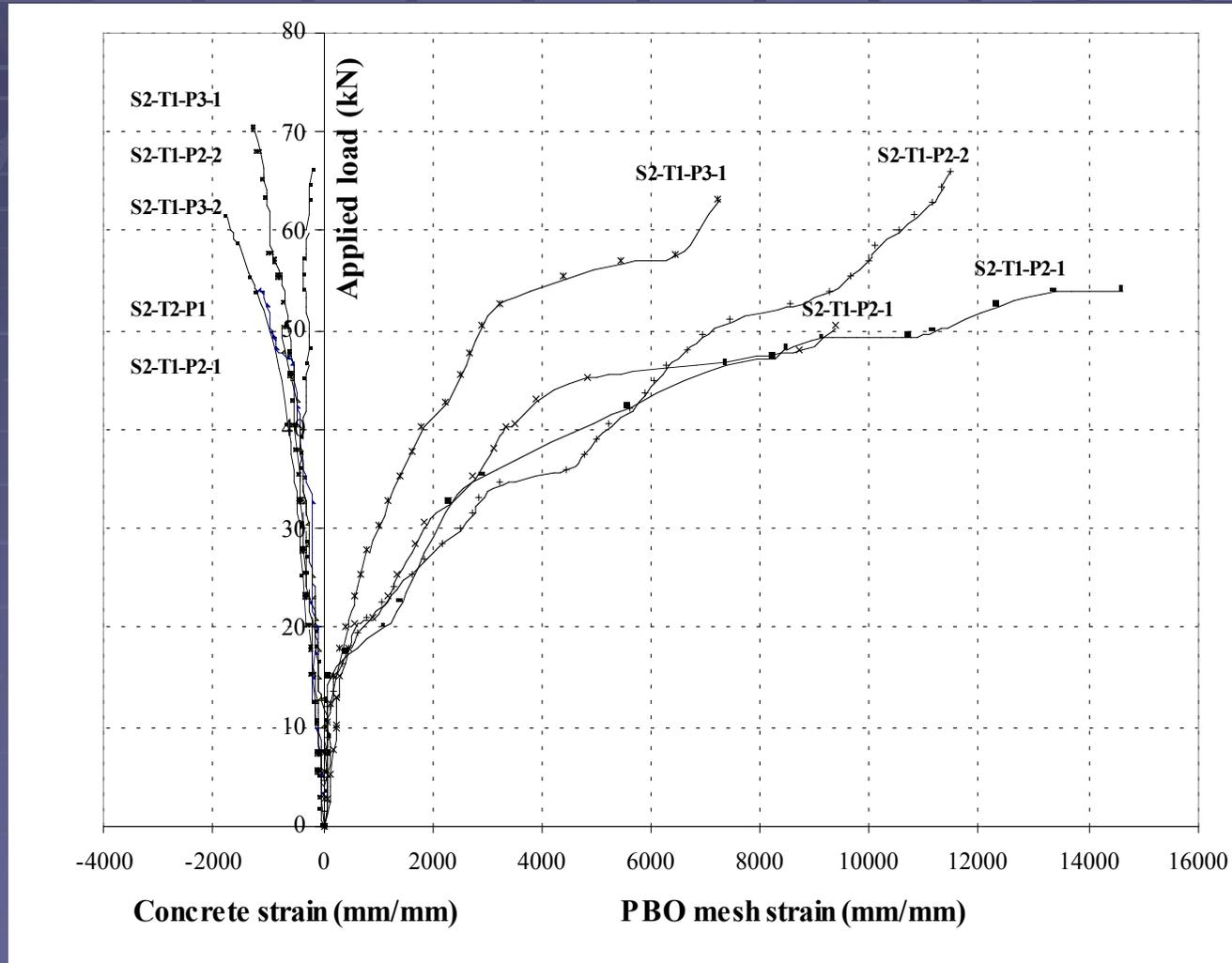


Particolare debonding

Incremento di resistenza: 23.75 %

RINFORZI FRM PER STRUTTURE IN MURATURA ED IN C.A.

Firenze, 10 giugno 2010



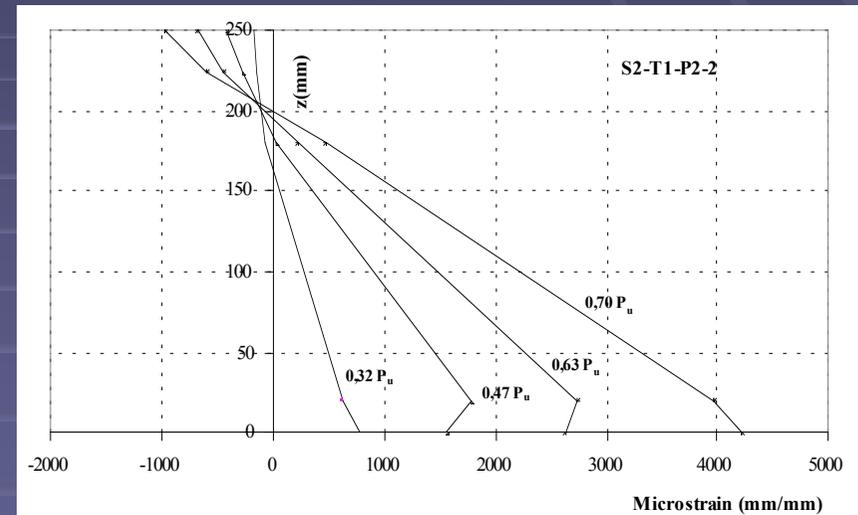
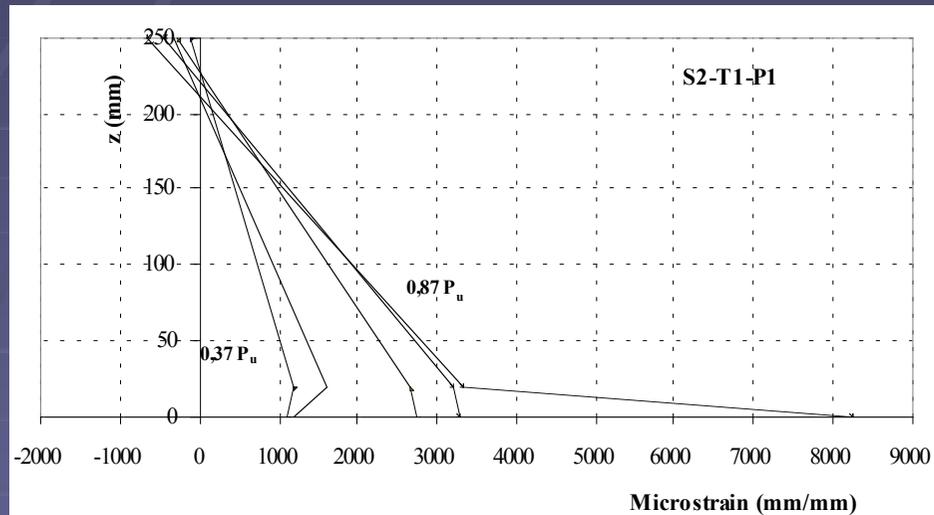
Travi S2-T1: diagrammi carico-deformazione ($\times 10^6$)

RINFORZI FRCM PER STRUTTURE IN MURATURA ED IN C.A.

Firenze, 10 giugno 2010

■ DISTRIBUZIONE DELLE DEFORMAZIONI LUNGO L'ALTEZZA DELLA SEZIONE

(sezione di mezzera travi S2-T1-P1 ed S2-T1-P2-2)



Presenza di scorrimenti tra fibra e matrice cementizia

RINFORZI FRCM PER STRUTTURE IN MURATURA ED IN C.A.

Firenze, 10 giugno 2010

■ **RISULTATI SPERIMENTALI (serie S2-T2)**

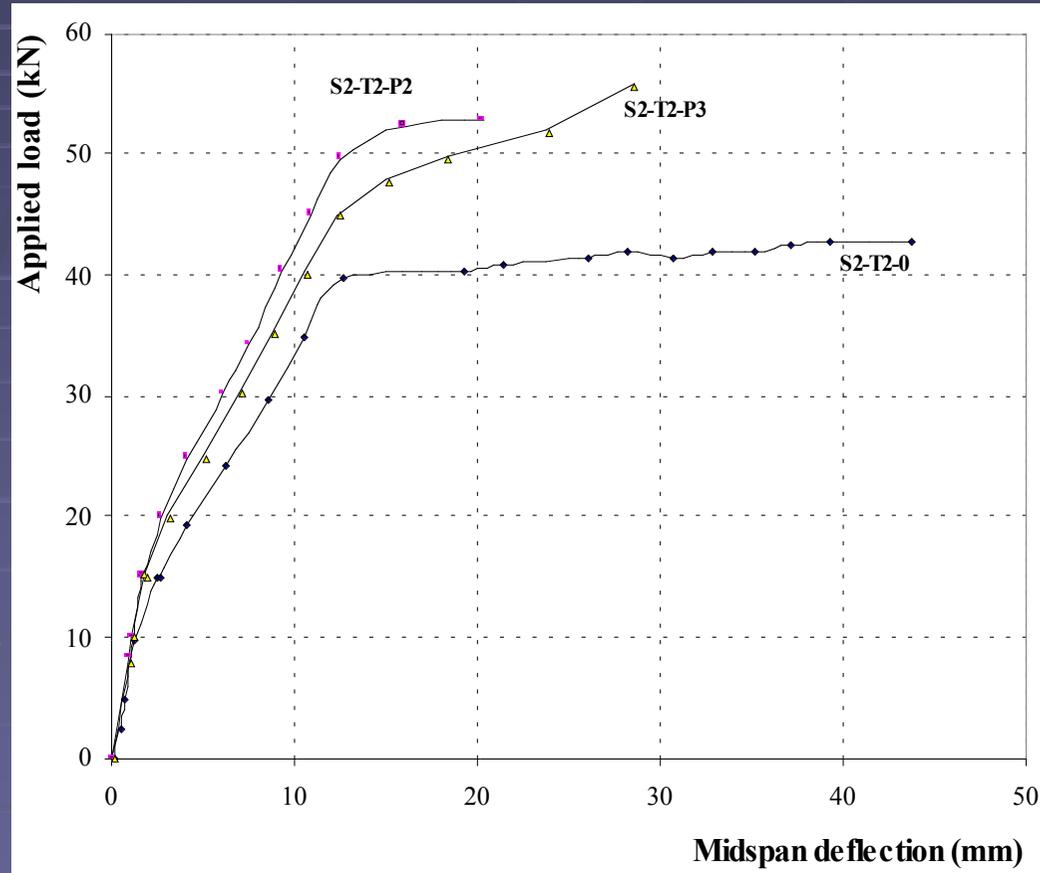
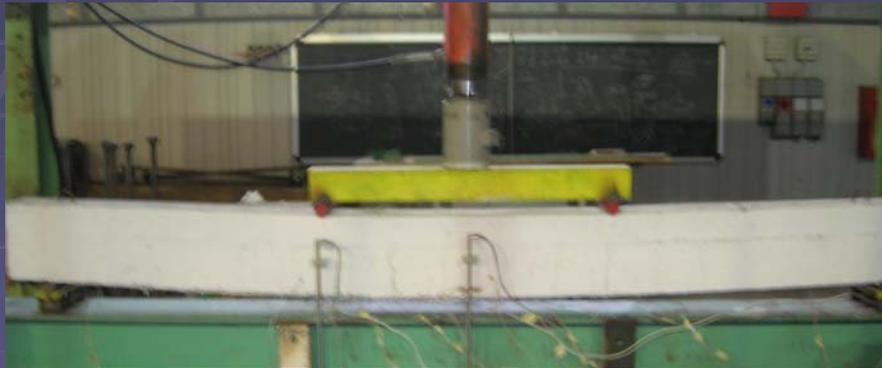


Diagramma carico-freccia in mezzeria

RINFORZI FRM PER STRUTTURE IN MURATURA ED IN C.A.

Firenze, 10 giugno 2010

Trave S2-T2-P2



Collasso per delaminazione da
fessurazione intermedia

Carico di collasso	52.86 kN
Carico di snervamento	44.94 kN
Inizio debonding	46.30 kN



Particolari fessurazione e debonding

Incremento di resistenza: 22.87 %

RINFORZI FRCM PER STRUTTURE IN MURATURA ED IN C.A.

Firenze, 10 giugno 2010

■ DUTTILITA' STRUTTURALE

Misurata attraverso gli indici di duttilità:

$$\mu_{\delta} = \delta_u / \delta_y \quad \text{Deflection ductility}$$

$$\mu_E = E_{\text{tot}} / E_y \quad \text{Energy ductility}$$

δ_u e δ_y spostamenti in mezzeria al collasso ed allo snervamento dell'acciaio teso

E_{tot} ed E_y aree sottese dalla curva carico-spostamento in mezzeria al collasso ed allo snervamento dell'acciaio teso

Trave	μ_{δ}	μ_E
S1-T1-0	1,57	3,58
S1-T1-P1-1	3,77	6,56
S1-T1-P1-2	2,50	3,87
S2-T1-0	3,31	5,45
S2-T1-P1	4,12	6,94
S2-T1-P2	2,92	5,08
S2-T1-P3	3,00	5,75

La duttilità delle travi S2-T1 è più elevata di quella delle travi S1-T1 a causa dell'incremento del rapporto $u = A's / A_s$ che passa da 46 % nelle travi S1-T1 a 64% per le travi S2-T1

RINFORZI FRCM PER STRUTTURE IN MURATURA ED IN C.A.

Firenze, 10 giugno 2010

FESSURAZIONE

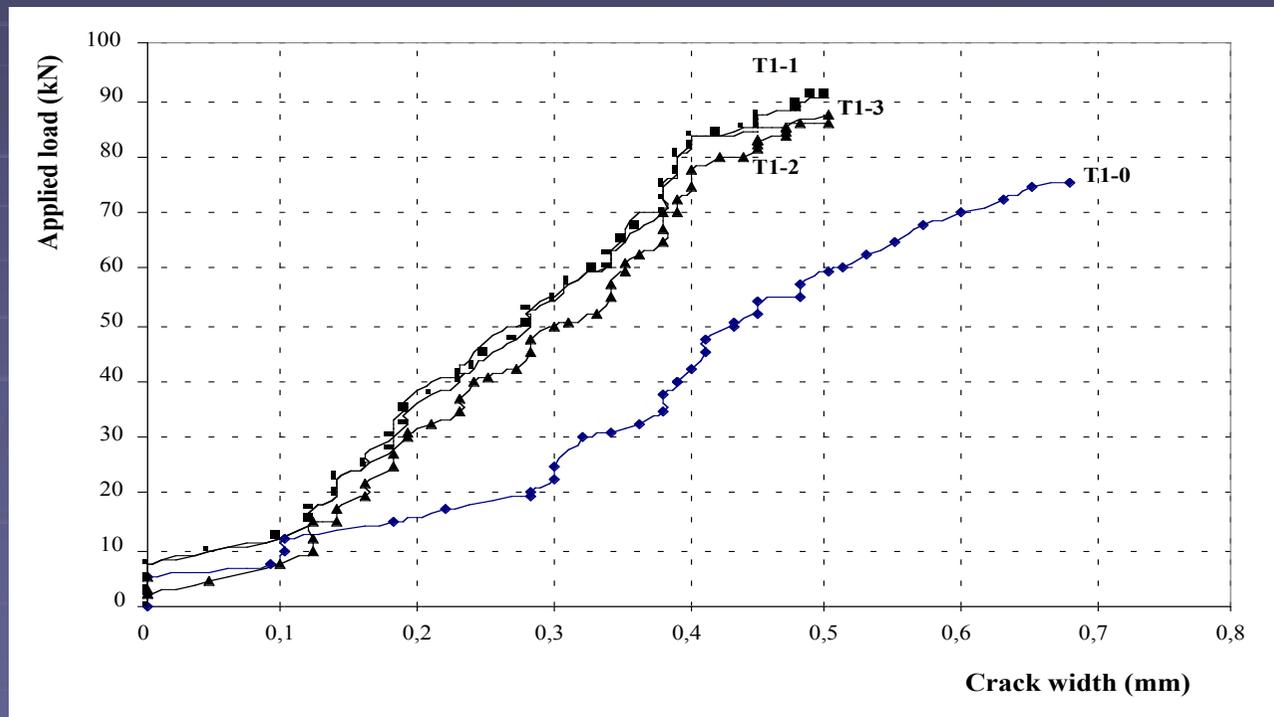


Diagramma carico - ampiezza delle fessure (Travi S1-T1)

C RINFORZI FRCM PER STRUTTURE IN MURATURA ED IN C.A.

Firenze, 10 giugno 2010

- **CONFINAMENTO DI ELEMENTI COMPRESSI IN CALCESTRUZZO RINFORZATI CON FRCM**

CONFRONTO PROVINI CONFINATI CON FRP / PROVINI CONFINATI CON FRCM



Formazione di lesioni verticali
Rottura lenta e graduale per bassi valori del quantitativo di rinforzo
Rottura improvvisa con cedimento del rinforzo per elevati quantitativi di rinforzo



Collasso del provino improvviso
nucleo di calcestruzzo danneggiato solo nella zona prossima alla fessura
Rottura del rinforzo in FRP

RINFORZI FRCM PER STRUTTURE IN MURATURA ED IN C.A.

Firenze, 10 giugno 2010

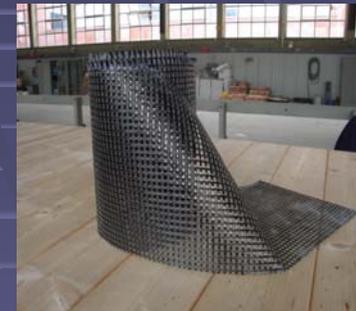
		GEOMETRIA			PROPRIETA' DEL COMPOSITO			PROPRIETA' DEL CLS			PROPRIETA' DEL CONFINAMENTO			RISULTATI SPERIMENTALI			
Sigla Provino		D (mm)	H (mm)	nt (mm)	E _f (GPa)	f _{tu} (MPa)	ε _{tu} (%)	f' _{co} (MPa)	ε _{co} (%)	E _{co} (MPa)	E _f (MPa)	P _u (MPa)	P _u /f' _{co}	f' _{cc} (f' _{co}) (MPa)	f' _{cc} /f' _{co}	ε _{cc} (ε _{cu}) (%)	ε _{cc} /ε _{co}
CR1a	FRCM	150	300	0,047	240	3404	1,418	27,05	0,63	20544	150	2,13	0,08	40,03	1,48	0,408	0,65
CR1b		150	300	0,047	240	3404	1,418	27,05	0,63	20544	150	2,13	0,08	27,87	1,03	0,505	0,80
CR1c		150	300	0,047	240	3404	1,418	27,05	0,63	20544	150	2,13	0,08	28,20	1,04	-	-
CR2a		150	300	0,094	240	3404	1,418	27,05	0,63	20544	301	4,27	0,16	36,83	1,36	0,524	0,83
CR2b		150	300	0,094	240	3404	1,418	27,05	0,63	20544	301	4,27	0,16	31,10	1,15	0,548	0,87
CR2c		150	300	0,094	240	3404	1,418	27,05	0,63	20544	301	4,27	0,16	36,69	1,36	-	-
CR3a		150	300	0,141	240	3404	1,418	27,05	0,63	20544	451	6,40	0,24	35,95	1,33	0,751	1,19
CR3b		150	300	0,141	240	3404	1,418	27,05	0,63	20544	451	6,40	0,24	38,13	1,41	0,704	1,12
CR3c		150	300	0,141	240	3404	1,418	27,05	0,63	20544	451	6,40	0,24	36,30	1,34	-	-
CS1a	FRP	150	300	0,221	392	2740	0,6	27,05	0,63	20544	1155	6,93	0,26	39,23	1,45	0,544	0,86
CS1b		150	300	0,221	3920	2740	0,6	27,05	0,63	20544	1155	6,93	0,26	38,19	1,41	0,580	0,92
CS1c		150	300	0,221	392	2740	0,6	27,05	0,63	20544	1155	6,93	0,26	36,30	1,34	-	-
CS2a		150	300	0,442	392	2740	0,6	27,05	0,63	20544	2310	13,86	0,51	50,48	1,87	0,758	1,20
CS2b		150	300	0,442	392	2740	0,6	27,05	0,63	20544	2310	13,86	0,51	47,60	1,76	0,658	1,05
CS2c		150	300	0,442	392	2740	0,6	27,05	0,63	20544	2310	13,86	0,51	43,70	1,62	-	-
CS3a		150	300	0,663	392	2740	0,6	27,05	0,63	20544	3465	20,79	0,77	45,10	1,67	1,337	2,12
CS3b		150	300	0,663	392	2740	0,6	27,05	0,63	20544	3465	20,79	0,77	58,08	2,15	1,581	2,51
CS3c		150	300	0,663	392	2740	0,6	27,05	0,63	20544	3465	20,79	0,77	56,00	2,07	-	-

RINFORZI FRCM PER STRUTTURE IN MURATURA ED IN C.A.

Firenze, 10 giugno 2010

SPERIMENTAZIONE SU PROVINI IN CALCESTRUZZO CONFINATI CON FRCM (XMesh C10)*

- Sperimentazione eseguita su tre tipologie di provini in calcestruzzo:
 - a) Provini cilindrici, diametro 150 mm, altezza 300 mm;
 - b) Provini prismatici con sezione quadrata, lato 150 mm ed altezza 300 mm;
 - c) Provini prismatici con sezione rettangolare 150 x 300 mm ed altezza 300 mm.



Le prove di compressione uniassiale sono state eseguite su 62 provini di cui 9 non confinati e 53 confinati con diversi strati di C-FRCM

- I provini sono stati confezionati con tre diverse miscele di calcestruzzo per ciascuna delle quali la resistenza a compressione è risultata

$$f_{c0} = 19.42 \text{ MPa (LSC)}$$

$$f_{c0} = 27.05 \text{ MPa (NSC)}$$

$$f_{c0} = 67.10 \text{ MPa (HSC)}$$

*L. Ombres: **Confinement effectiveness in concrete strengthened with Fiber Reinforced Cement based composite jacket**- Proceedings of the FRPRCS-8 International Symposium, Patras, Greece, 2007

RINFORZI FRCM PER STRUTTURE IN MURATURA ED IN C.A.

Firenze, 10 giugno 2010

PROVINI CILINDRICI

Sono stati confezionati **26** provini (**2** non confinati e **24** confinati) e provati a temperatura ambiente (25 °C).

I provini sono stati suddivisi in tre gruppi in base al tipo di miscela di calcestruzzo utilizzato

Serie A (LSC) $f_{co} = 19.42 \text{ MPa}$

Serie B (NSC) $f_{co} = 27.05 \text{ MPa}$

Serie C (HSC) $f_{co} = 67.10 \text{ MPa}$



La rottura dei provini è avvenuta in modo graduale a seguito della formazione di ampie fessure verticali. Al collasso il calcestruzzo all'interno del rinforzo si è completamente disgregato

RINFORZI FRCM PER STRUTTURE IN MURATURA ED IN C.A.

Firenze, 10 giugno 2010

RISULTATI SPERIMENTALI- Serie A (LSC)

Sigla provino	nt (mm)	f_{c0} (MPa)	f'_{c0} (MPa)	f'_{c0}/f_{c0}	ϵ_{c0} (%)	ϵ'_{c0} (%)	$\epsilon'_{c0}/\epsilon_{c0}$
CR-2a-C	0.094	19.42	29.65	1.52	0.165	0.530	3.19
CR-2b-C	0.094	19.42	28.34	1.45	0.165	0.560	3.42
CR-2c-C	0.094	19.42	-	-	0.165	-	-
CR-3a-C	0.141	19.42	30.57	1.57	0.165	0.630	3.80
CR-3b-C	0.141	19.42	30.85	1.58	0.165	1.420	8.59
CR-3c-C	0.141	19.42	32.88	1.68	0.165	1.210	7.32
CR-4a-C	0.188	19.42	33.18	1.70	0.165	1.210	7.36
CR-4b-C	0.188	19.42	35.12	1.80	0.165	1.310	7.94
CR-4c-C	0.188	19.42	36.97	1.89	0.165	1.680	10.20

nt= spessore rinforzo

RINFORZI FRCM PER STRUTTURE IN MURATURA ED IN C.A.

Firenze, 10 giugno 2010

■ Serie B (NSC)

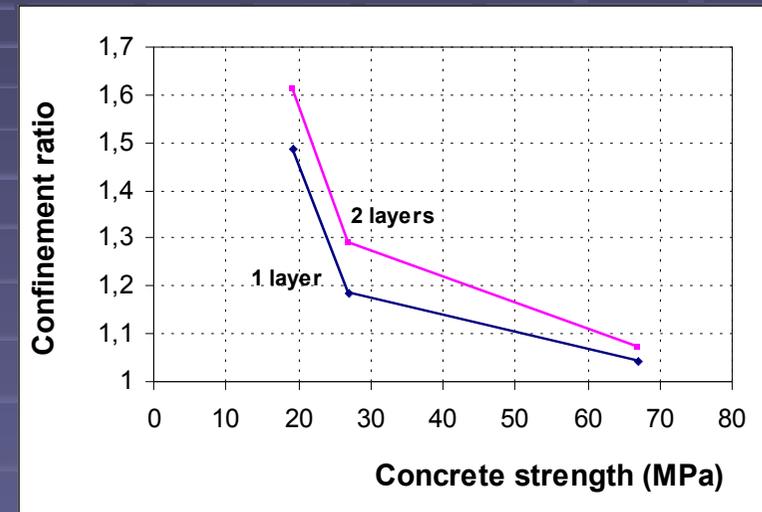
Sigla Provino	nt (mm)	f_{c0} (MPa)	f'_{c0} (MPa)	f'_{c0}/f_{c0}	ϵ_{c0} (%)	ϵ'_{c0} (%)	$\epsilon'_{c0}/\epsilon_{c0}$
CR-1a-B	0.047	27.05	40.03	1.48	0.20	0.13	0.65
CR-1b-B	0.047	27.05	27.87	1.03	0.20	0.16	0.80
CR-1c-B	0.047	27.05	28.20	1.04	0.20	-	-
CR-2a-B	0.094	27.05	36.83	1.36	0.20	0.166	0.83
CR-2b-B	0.094	27.05	31.10	1.15	0.20	0.174	0.87
CR-2c-B	0.094	27.05	36.69	1.36	0.20	-	-
CR-3a-B	0.141	27.05	35.95	1.33	0.20	0.238	1.19
CR-3b-B	0.141	27.05	38.13	1.10	0.20	0.224	1.12

RINFORZI FRM PER STRUTTURE IN MURATURA ED IN C.A.

Firenze, 10 giugno 2010

Serie C (HSC)

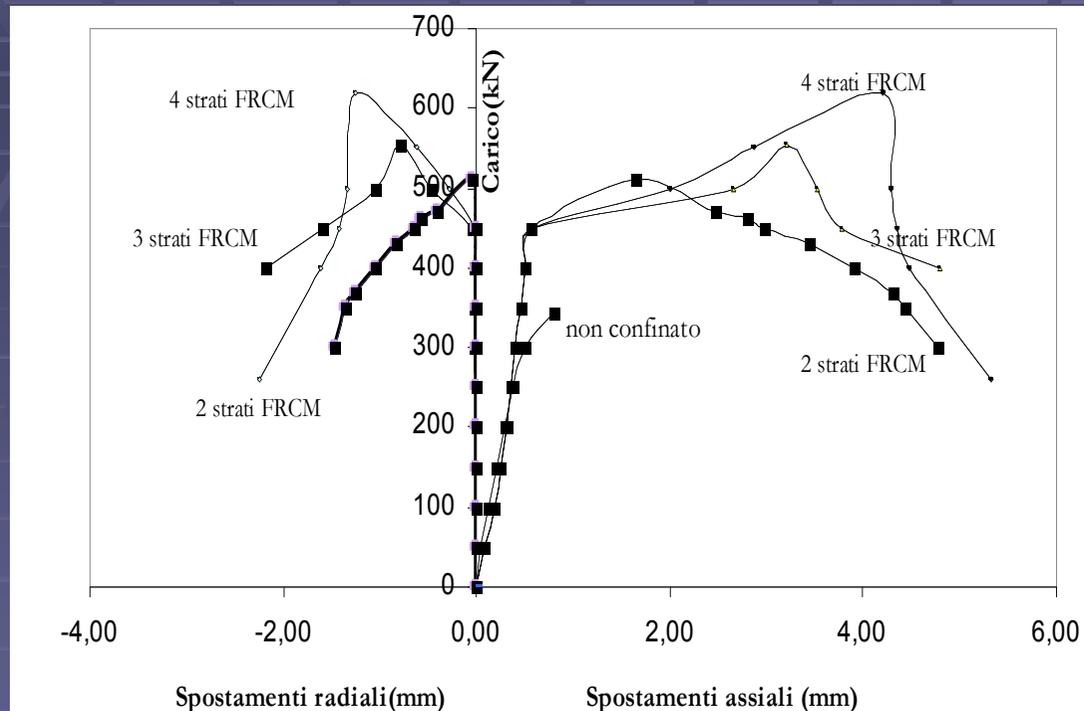
Sigla >Provino	nt (mm)	fc0 (MPa)	Fc0 (MPa)	Fc0/fc0
HCR1a-A	0.047	67.10	69.17	1.03
HCR1b-A	0.047	67.10	73.98	1.10
HCR1c-A	0.047	67.10	67.10	1.00
HCR2a-A	0.094	67.10	68.24	1.02



Il grado di confinamento decresce al crescere della resistenza meccanica del calcestruzzo

RINFORZI FRCM PER STRUTTURE IN MURATURA ED IN C.A.

Firenze, 10 giugno 2010



Il comportamento dei provini è influenzato dal quantitativo di rinforzo utilizzato

I più alti valori del grado di confinamento sono stati ottenuti sui provini rinforzati con 4 strati di FRCM.

Ciascuno strato di FRCM ha uno spessore totale di circa 3 mm in cui 0.047 mm è lo spessore della fibra: la malta, pertanto, offre un significativo contributo al confinamento del calcestruzzo.

RINFORZI FRCCM PER STRUTTURE IN MURATURA ED IN C.A.

Firenze, 10 giugno 2010

- Per bassi valori del carico applicato la risposta del calcestruzzo confinato è simile a quella del calcestruzzo non confinato. Dopo aver raggiunto il valore massimo di resistenza del calcestruzzo non confinato, l'espansione laterale del rinforzo in FRCCM aumenta sensibilmente.

■ Raggiunto il valore della resistenza massima del calcestruzzo non confinato, per bassi valori del quantitativo di rinforzo (uno o due strati) il diagramma evidenzia una progressiva riduzione della tensione nel calcestruzzo fino al collasso del provino mentre per valori più elevati del quantitativo di rinforzo (tre o quattro strati) la tensione nel calcestruzzo aumenta fino al collasso del provino.

Il calcestruzzo confinato con FRCCM presenta, pertanto, due diverse risposte in funzione del quantitativo di rinforzo utilizzato:

- la prima caratterizzata da uno **strain softening** corrisponde a bassi valori del quantitativo di FRCCM
- la seconda caratterizzata da uno **strain hardening** corrisponde ad alti valori del quantitativo di FRCCM.

RINFORZI FRCM PER STRUTTURE IN MURATURA ED IN C.A.

Firenze, 10 giugno 2010

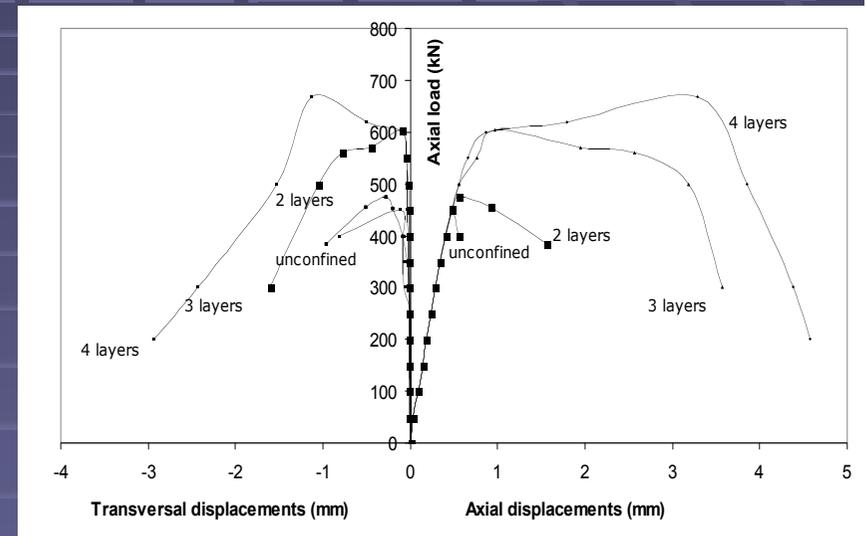
- **Provini prismatici a sezione quadrata**
- Prove eseguite su 12 provini (2 non confinati e 10 confinati)
- Il collasso dei provini è avvenuto a seguito della formazione di lesioni verticali, in molti casi posizionate in corrispondenza degli spigoli (arrotondati).
- Il collasso è avvenuto con gradualità



RINFORZI FRCM PER STRUTTURE IN MURATURA ED IN C.A.

Firenze, 10 giugno 2010

Provino	nt (mm)	f_{c0} (MPa)	P_{c0} (MPa)	P_{c0}/f_c 0	ϵ_{c0} (%)	ϵ'_{c0} (%)	$\epsilon'_{c0}/\epsilon_{c0}$
R-Q11	0.047	17.42	20.02	1.15	0.20	0.470	2.36
R-Q12	0.094	17.42	23.11	1.33	0.20	0.620	3.08
R-Q13	0.094	17.42	21.06	1.21	0.20	0.520	2.58
R-Q14	0.094	17.42	20.22	1.16	0.20	0.610	3.04
R-Q24	0.141	17.42	26.41	1.52	0.20	0.300	1.51
R-Q25	0.141	17.42	26.75	1.54	0.20	0.400	2.00
R-Q26	0.141	17.42	27.54	1.58	0.20	0.320	1.60
R-Q27	0.188	17.42	30.56	1.75	0.20	1.020	5.10
R-Q28	0.188	17.42	27.89	1.60	0.20	1.000	4.99



Comportamento simile a quello
dei provini cilindrici

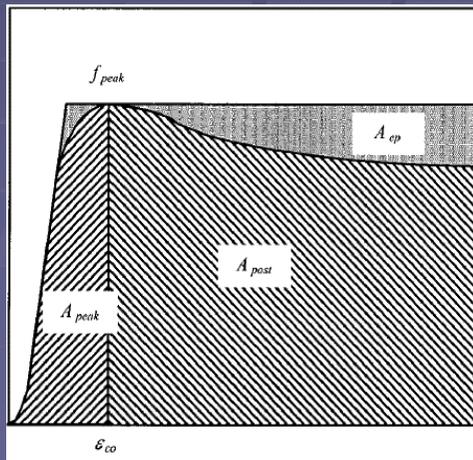
RINFORZI FRM PER STRUTTURE IN MURATURA ED IN C.A.

Firenze, 10 giugno 2010

DUTTILITA' DEI PROVINI CONFINATI

Indice di duttilità

Valutato attraverso il rapporto $\mu = A_{tot}/A_{ep}$ tra A_{tot} area sottesa dalla curva tensione –deformazione ed A_{ep} area sottesa dalla curva costituita da un tratto elastico lineare (da zero al valore di picco della tensione $f_{c0} = f_{peak}$) e da un tratto plastico (da ϵ'_{c0} ad ϵ_{cc} , deformazione ultima). Quando il valore di μ è pari ad 1.0, l'elemento strutturale presenta un comportamento elastico lineare-perfettamente plastico e pertanto può essere considerato duttile.



La duttilità aumenta con il numero di strati di rinforzo.

L'indice di duttilità è prossimo ad 1 per provini confinati con 4 strati di FRM

Provini	Strati di FRM	Aumento di resistenza (%)	Indice di duttilità (m)
Cilindrico	2	48.50	0.92
Cilindrico	3	61.00	0.97
Cilindrico	4	79.70	0.98
Prismatico	1	15.00	0.97
Prismatico	2	21.00	0.97
Prismatico	3	54.50	0.97
Prismatico	4	70.70	0.98

RINFORZI FRCCM PER STRUTTURE IN MURATURA ED IN C.A.

Firenze, 10 giugno 2010

PROVINI CONFINATI CON FRCCM: INFLUENZA DELLA TEMPERATURA

12 provini confinati (6 cilindrici e 6 prismatici) e 3 non confinati sono stati esposti a carichi termici che hanno permesso di raggiungere nel rinforzo in FRCCM valori di temperatura compresi tra 25°C (temperatura ambiente) e 90°C.

Tutti I provini sono stati confinati con 2 strati di FRCCM. Le prove sono state condotte considerando 4 valori di temperatura: 25°C, 50 °C, 70 °C e 90 °C.

Il collasso dei provini è stato graduale ed è avvenuto dopo la formazione di ampie fessure verticali. Sulla superficie esterna del rinforzo in FRCCM, è stata rilevata una diffusa microfessurazione, dovuta agli effetti termici.



RINFORZI FRCC PER STRUTTURE IN MURATURA ED IN C.A.

Firenze, 10 giugno 2010

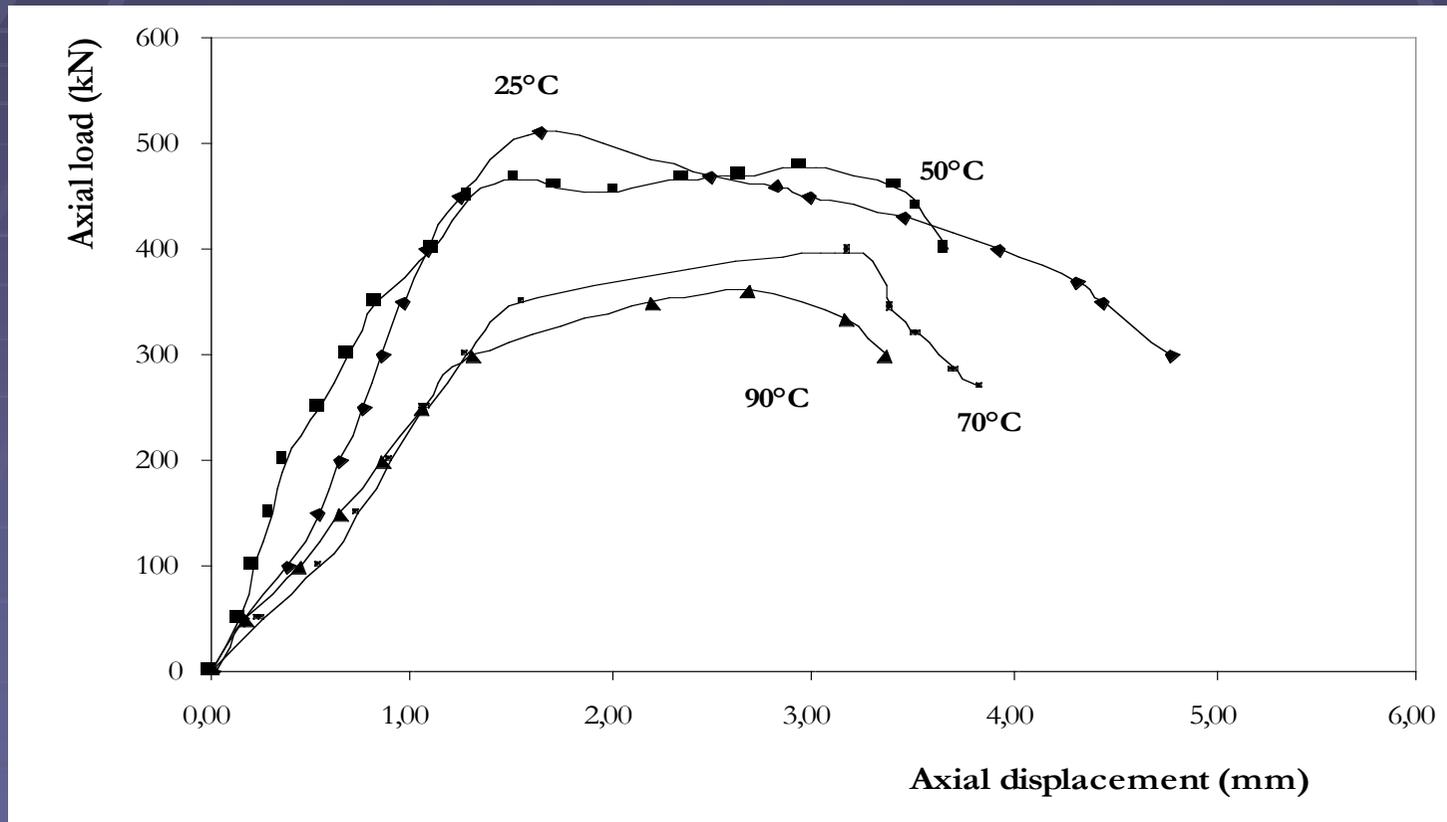
PROVINI CONFINATI CON FRCC: INFLUENZA DELLA TEMPERATURA

Provino	T (°C)	nt (mm)	f_{c0} (MPa)	f'_{c0} (MPa)	f'_{c0}/f_{c0}
C-T2-1	50	0.094	19.52	27.14	1.39
C-T2-2	50	0.094	19.52	-	-
Q-NC	50	0.094	17.42	15.79	0.91
Q-T2-1	50	0.094	17.42	21.64	1.24
Q-T2-2	50	0.094	17.42	19.96	1.15
C-NC	70	0.094	19.52	21.65	1.11
C-T2-1	70	0.094	19.52	23.91	1.23
C-T2-2	70	0.094	19.52	21.07	1.08
Q-T2-1	70	0.094	17.42	17.82	1.02
Q-T2-2	70	0.094	17.42	19.91	1.14
C-T2-1	90	0.094	19.52	21.00	1.08
C-T2-2	90	0.094	19.52	19.90	1.02
Q-NC	90	0.094	17.42	16.07	0.92

RINFORZI FRCM PER STRUTTURE IN MURATURA ED IN C.A.

Firenze, 10 giugno 2010

PROVINI CONFINATI CON FRCM: INFLUENZA DELLA TEMPERATURA

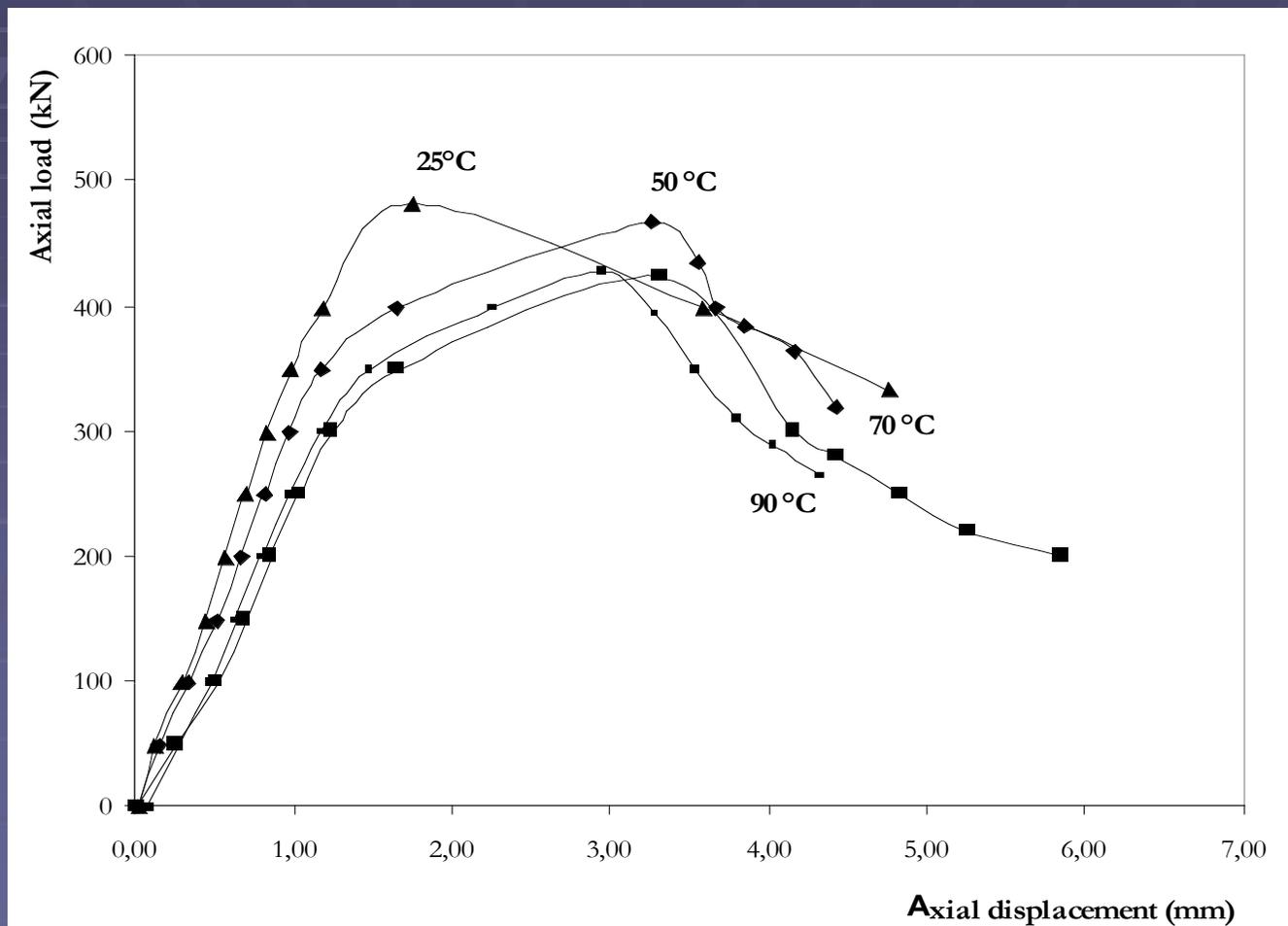


PROVINI CILINDRICI

RINFORZI FRCM PER STRUTTURE IN MURATURA ED IN C.A.

Firenze, 10 giugno 2010

PROVINI CONFINATI CON FRCM: INFLUENZA DELLA TEMPERATURA



PROVINI PRISMATICI

RINFORZI FRCC PER STRUTTURE IN MURATURA ED IN C.A.

Firenze, 10 giugno 2010

PROVINI CONFINATI CON FRCC: INFLUENZA DELLA TEMPERATURA

- Le curve carico –spostamento assiale presentano un andamento bilineare per tutti i valori di temperatura considerati,
- Nel campo 25-50 °C è stata riscontrata una modesta riduzione della resistenza (6% per i provini cilindrici, 2% per i provini prismatici) rispetto al valore ottenuto a temperatura ambiente (25°C);
- Nel campo 50-90 °C la riduzione della resistenza è stata molto più accentuata (fino al 30% del valore ottenuto dalle prove a temperatura ambiente).

RINFORZI FRCC PER STRUTTURE IN MURATURA ED IN C.A.

Firenze, 10 giugno 2010

■ CONFINAMENTO DI ELEMENTI COMPRESI IN CALCESTRUZZO RINFORZATI CON PBO-FRCM

Prove su cilindri in calcestruzzo confinati con PBO-FRCM (X Mesh Gold)

Parametri variabili

- numero di strati di rinforzo;
- resistenza a compressione del calcestruzzo;
- orientamento delle fibre rispetto all'asse del provino.

Risultati sperimentali su due serie di 5 provini:

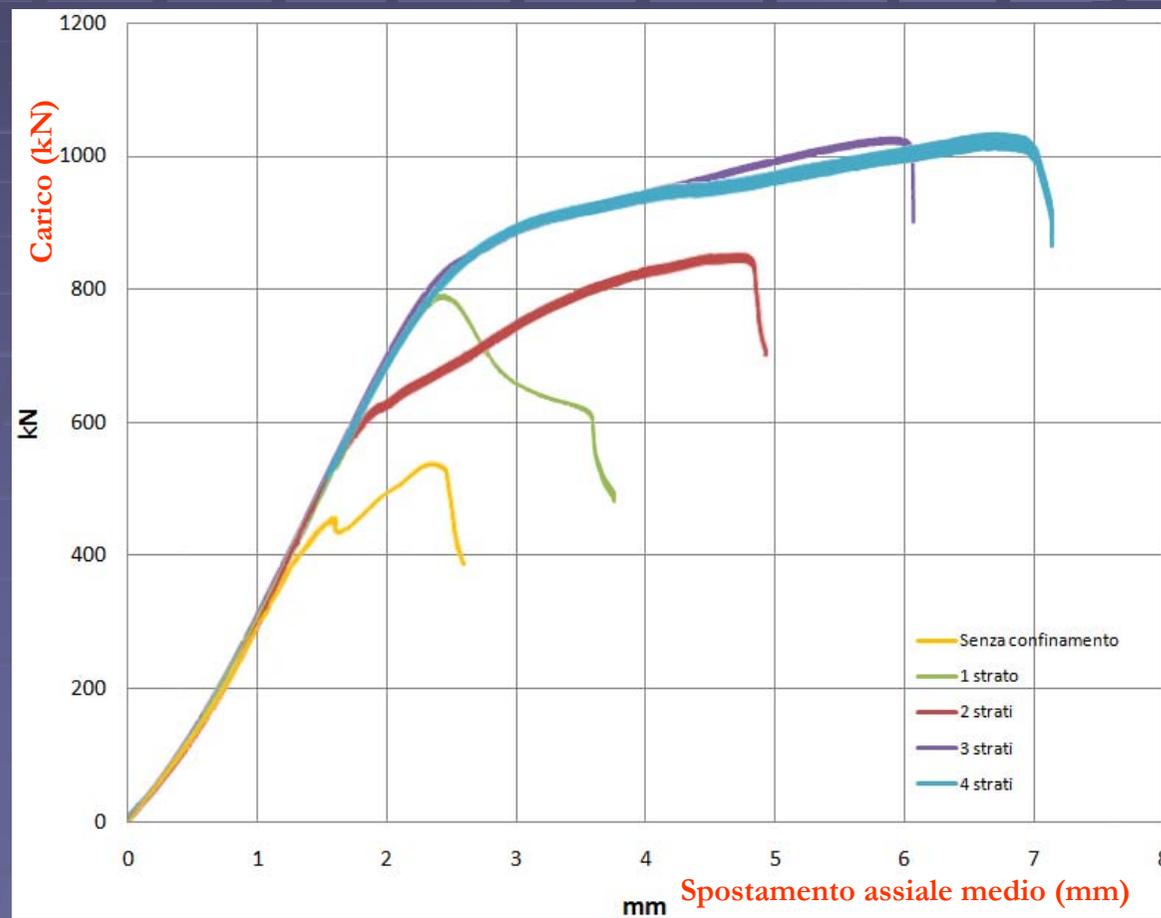
- | | |
|--------------------------------|----------------------------------------------|
| • serie A ($f_{ck} = 35$ MPa) | 1 provino non confinato, 4 provini confinati |
| • serie B ($f_{ck} = 20$ MPa) | 1 provino non confinato, 4 provini confinati |

RINFORZI FRCM PER STRUTTURE IN MURATURA ED IN C.A.

Firenze, 10 giugno 2010

- **CONFINAMENTO DI ELEMENTI COMPRESI IN CALCESTRUZZO RINFORZATI CON PBO-FRCM**

Risultati sperimentali- Serie A

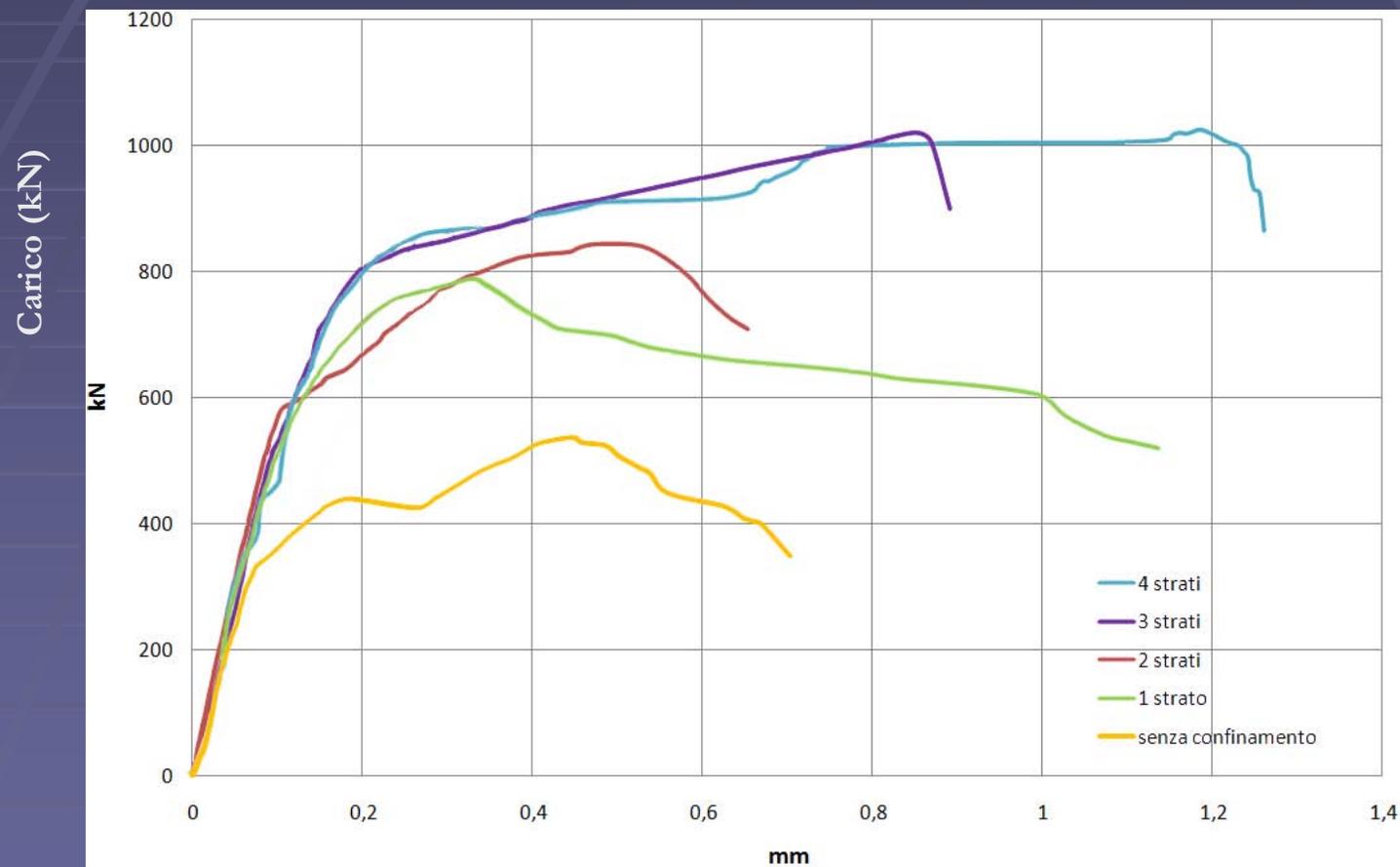


RINFORZI FRM PER STRUTTURE IN MURATURA ED IN C.A.

Firenze, 10 giugno 2010

CONFINAMENTO DI ELEMENTI COMPRESI IN CALCESTRUZZO RINFORZATI CON PBO-FRCM

Risultati sperimentali- Serie A



Spostamento radiale (mm)

RINFORZI FRCM PER STRUTTURE IN MURATURA ED IN C.A.

Firenze, 10 giugno 2010

CONFINAMENTO DI ELEMENTI COMPRESI IN CALCESTRUZZO RINFORZATI CON PBO-FRCM

Provino con tre strati



Lesione lungo la quale è stato effettuato il taglio



RINFORZI FRCM PER STRUTTURE IN MURATURA ED IN C.A.

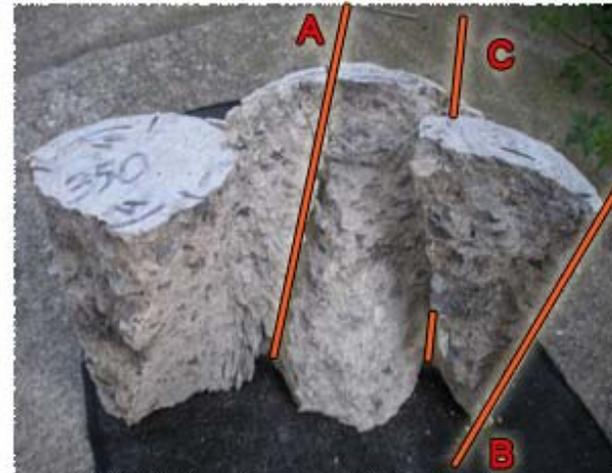
Firenze, 10 giugno 2010

CONFINAMENTO DI ELEMENTI COMPRESI IN CALCESTRUZZO RINFORZATI CON PBO-FRCM

Provino con quattro strati



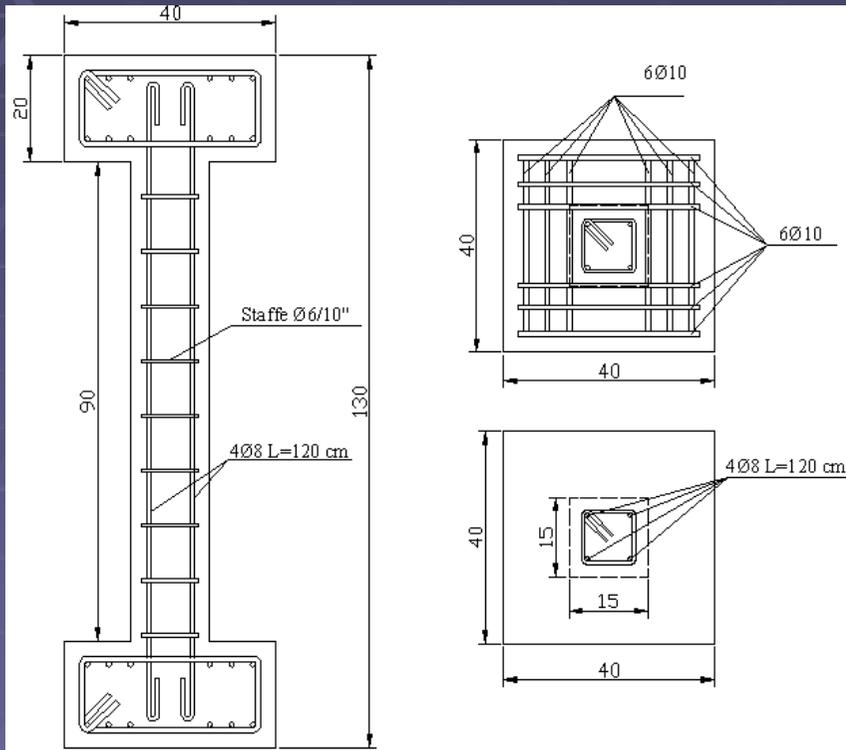
Lesione lungo la quale è stato effettuato il taglio



RINFORZI FRCM PER STRUTTURE IN MURATURA ED IN C.A.

Firenze, 10 giugno 2010

■ ELEMENTI PRESSOINFLESSI IN C.A. CONFINATI CON FRCM*



Sperimentazione eseguita su cinque pilastri in c.a. confinati con FRCM

Caratteristiche meccaniche dei materiali

Calcestruzzo : $R_{cm} = 24.25 \text{ MPa}$

Acciaio (FeB32K) $f_{ym} = 312.10 \text{ MPa}$

Armatura longitudinale realizzata con barre lisce

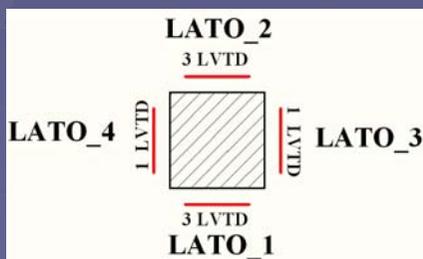
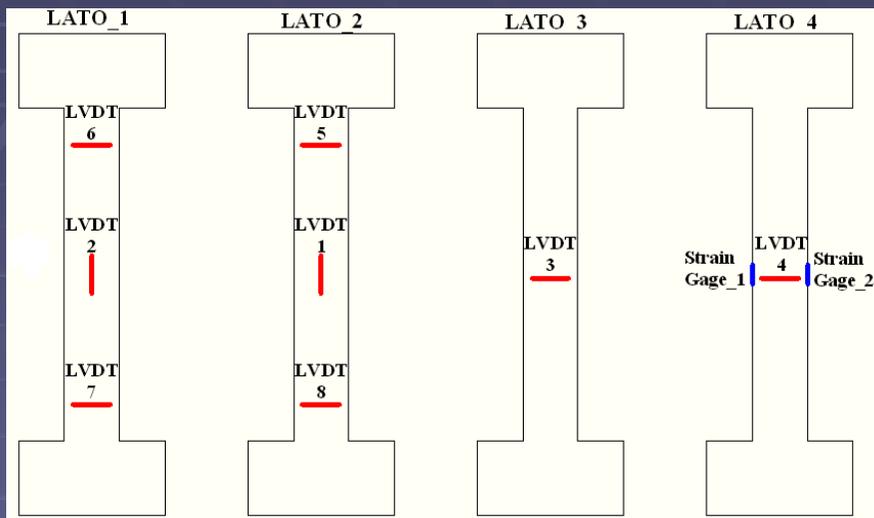
Sigla Provino	Tipo di rete di rinforzo	Numero strati di rete	Eccentricità (mm)
NC-T2-0-Q1	-	0	18
RC-T2-2-Q2	PBO	2	24
RC-T2-2-Q3	PBO	2	27
RC-T2-2-Q4	Carbonio	2	20
RC-T2-2-Q5	Carbonio	2	18

Eccentricità non intenzionali



RINFORZI FRCM PER STRUTTURE IN MURATURA ED IN C.A.

Firenze, 10 giugno 2010



Strumentazione di prova

L. Ombres: **Elementi strutturali presso-inflessi in c.a. rinforzati con FRCM (Fiber Reinforced Cementitious Mortar): indagine sperimentale.** Atti Convegno IF-CRASC, 2009, pp. 635-646

RINFORZI FRCM PER STRUTTURE IN MURATURA ED IN C.A.

Firenze, 10 giugno 2010

■ ELEMENTI PRESSOFLESSI IN C.A. CONFINATI CON FRCM



Rottura del provino non confinato: schiacciamento del calcestruzzo e della successiva instabilizzazione delle barre longitudinali nel tratto compreso tra due staffe. La rottura è avvenuta in prossimità della sezione di base ed è stata caratterizzata dalla formazione di un'ampia ed estesa lesione inclinata a circa 45° lungo l'altezza del provino



La misura della deformazione sulle facce del provino ha evidenziato la presenza di una pressoflessione con piccola eccentricità

RINFORZI FRCM PER STRUTTURE IN MURATURA ED IN C.A.

Firenze, 10 giugno 2010

■ ELEMENTI PRESSOFLESSI IN C.A. CONFINATI CON PBO- FRCM



Provino RC-T2-2-Q2: pressoflessione con piccola eccentricità

Provino RC-T2-2-Q3: pressoflessione con grande eccentricità

Rottura La rottura del provino RC-T2-2-Q2 è avvenuta in corrispondenza della sezione di base con cedimento del calcestruzzo e successiva rottura della fibra in PBO. La deformazione a rottura della fibra è risultata pari a circa il 2.3%; valore molto prossimo al valore nominale fornito dal produttore.

La rottura del provino RC-T2-2-Q3 è avvenuta in corrispondenza della sezione di testa ed è stata di tipo duttile con cedimento del calcestruzzo compresso a seguito della plasticizzazione delle armature in acciaio. Non sono state riscontrate significative lesioni e la fibra in PBO non ha presentato segni di rottura nonostante le deformazioni massime misurate in essa siano risultate di circa il 2.4%.

RINFORZI FRCM PER STRUTTURE IN MURATURA ED IN C.A.

Firenze, 10 giugno 2010

ELEMENTI PRESSOFLESSI IN C.A. CONFINATI CON C- FRCM



Provino RC-T2-2-Q4:
pressoflessione con
piccola eccentricità

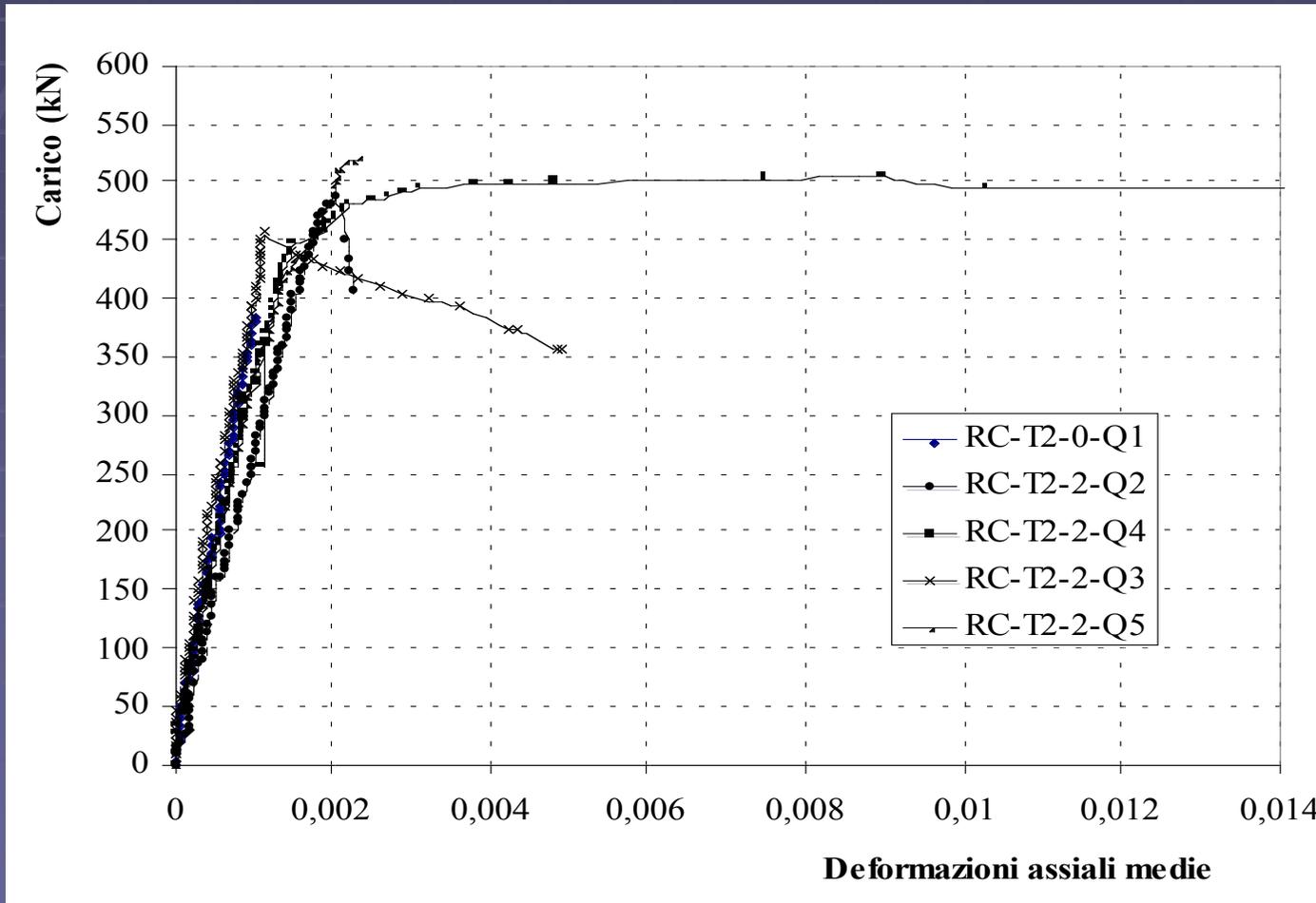
Provino RC-T2-2-Q5:
pressoflessione con
piccola eccentricità

Il provino RC-T2-2-Q4 ha raggiunto la rottura in prossimità della sezione di base; la rottura è stata caratterizzata dalla formazione di una lesione inclinata a circa 45° lungo l'asse e dal cedimento del calcestruzzo compresso accompagnato dalla rottura della fibra in carbonio.

La rottura del provino RC-T2-2-Q5 è avvenuta sempre in corrispondenza della parte inferiore del provino con cedimento del calcestruzzo compresso; non si è avuta, invece, rottura nella rete in carbonio.

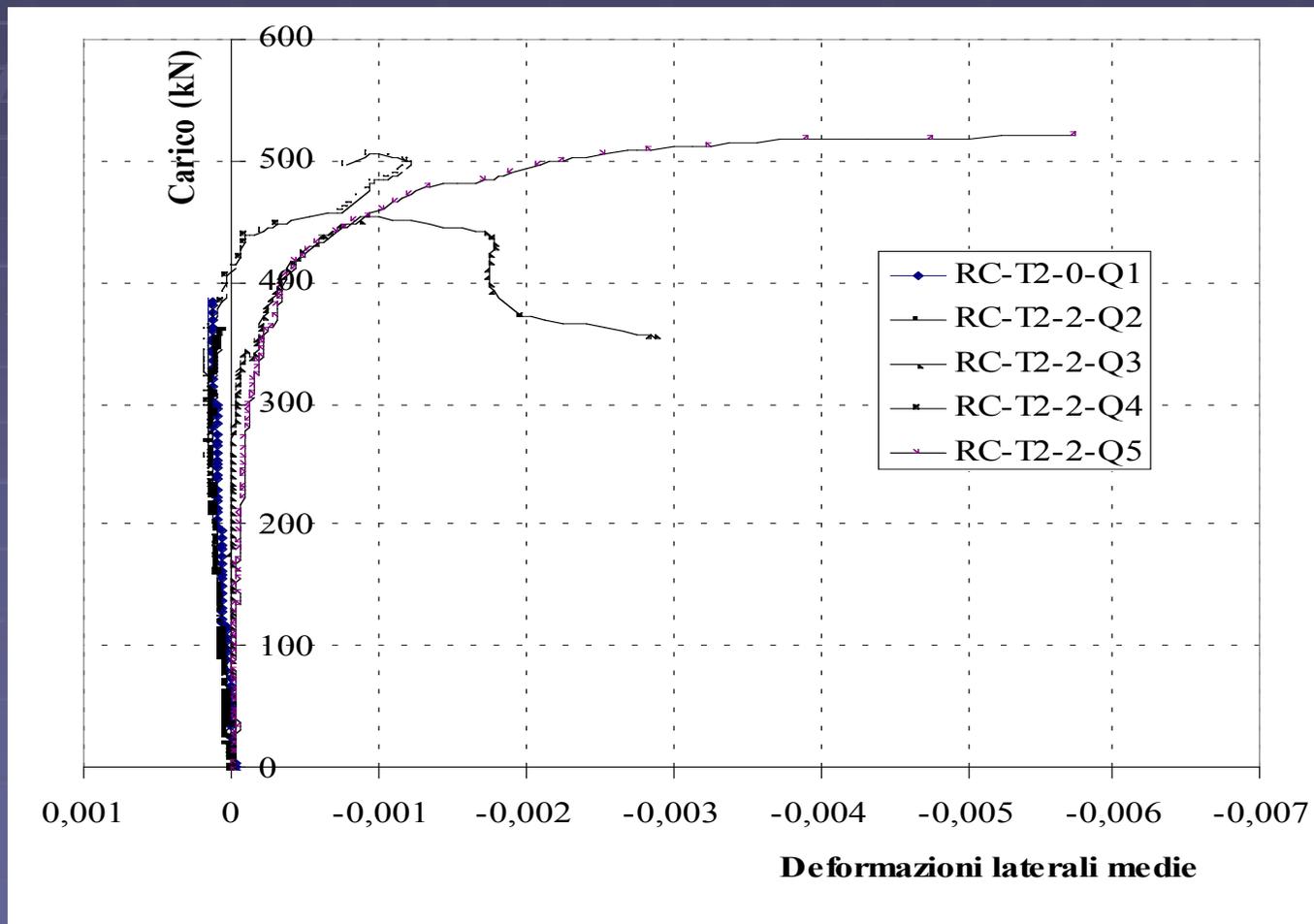
RINFORZI FRM PER STRUTTURE IN MURATURA ED IN C.A.

Firenze, 10 giugno 2010



RINFORZI FRCM PER STRUTTURE IN MURATURA ED IN C.A.

Firenze, 10 giugno 2010



RINFORZI FRCM PER STRUTTURE IN MURATURA ED IN C.A.

Firenze, 10 giugno 2010

Sigla Provino	Carico di rottura (kN)	ϵ_{fmax} (%)	ϵ_{cc} (%)	f_{cm} (N/mm ²)	f_{cm}/f_{c0}	$\epsilon_{cc} / \epsilon_{c0}$
NC-T2-0-Q1	-	-	-	-	-	-
RC-T2-2-Q2	486.50	2.30	0.2253	24.97	1.03	1.13
RC-T2-2-Q3	456.00	2.39	0.4892	23.41	0.97	2.45
RC-T2-2-Q4	505.62	1.19	0.8960	25.95	1.07	4.48
RC-T2-2-Q5	521.88	3.76	0.3177	26.78	1.10	1.59

- **Rilevante influenza dell'eccentricità di carico sul valore della capacità portante dei provini.**

- -L'efficacia del confinamento in termini di incremento di resistenza è molto contenuta;

- **Il confinamento risulta più efficace in termini di deformazione (risultato analogo a quello evidenziato negli elementi presso-inflessi in calcestruzzo armato confinati con FRP)**

- La ridotta efficacia del confinamento nei provini in calcestruzzo armato è da imputare alla presenza delle eccentricità e quindi della sollecitazione di presso flessione; il sistema FRCM, infatti, garantisce un buon confinamento del calcestruzzo sia in termini di resistenza sia in termini di deformazione come dimostrano i risultati di precedenti sperimentazioni.