



Prof. Angelo DI TOMMASO

Università IUAV di Venezia - Italia - Dipartimento di Costruzione dell'Architettura



INTRODUZIONE:

Materiali compositi per il rinforzo delle strutture in zona sismica

MATERIALI COMPOSITI
FRCM vs FRP

Firenze 10 – giugno 2010



L'Aquila, chiesa Santa Maria del Suffragio (Chiesa del Purgatorio o delle Anime Sante),



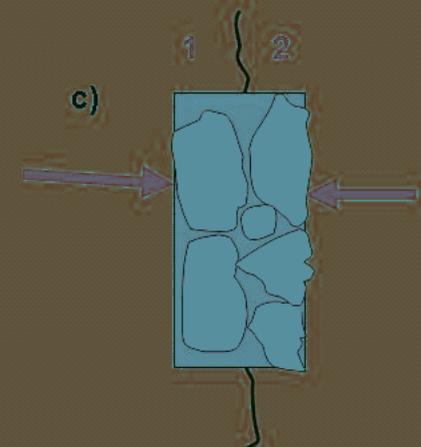
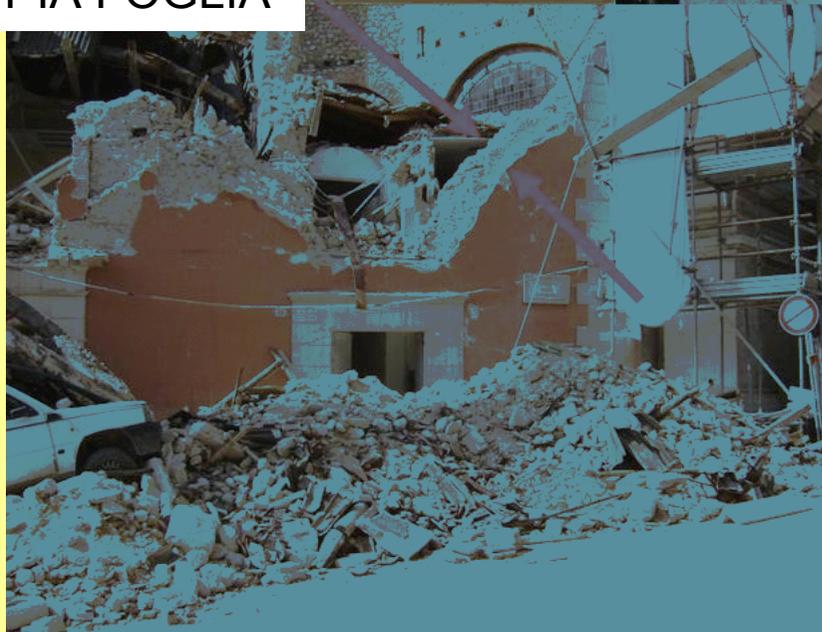
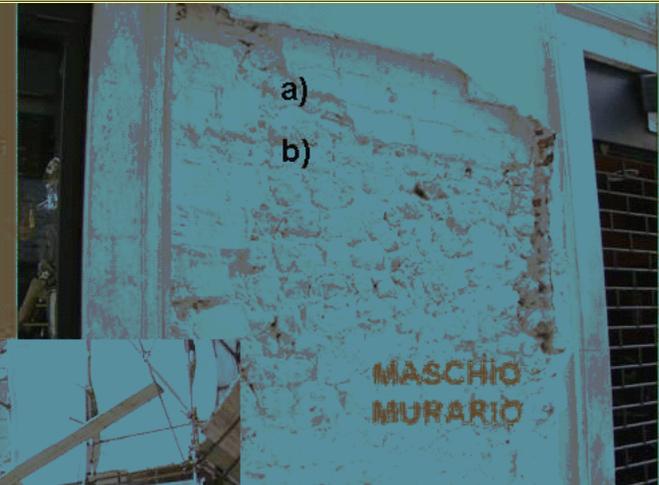
A) FREQUENTI MURATURE CON CONCI IRREGOLARI , PER DIMENSIONE E SPIGOLI TONDEGGIANTI

B) MALTE CON LEGANTE INCONSISTENTE

C) TESSITURA A “DOPPIA FOGLIA”



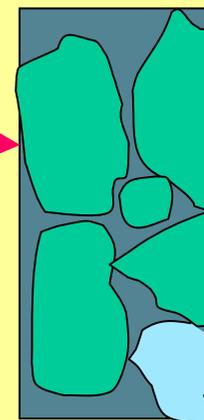
a) irregular stones (round edges)
b) mortars with scarce binder
c) “two lives” masonry structure



Tessitura tipica della muratura e relato meccanismo di collasso



1 2



**Fattore di vulnerabilità
Morfologia Architettonica**

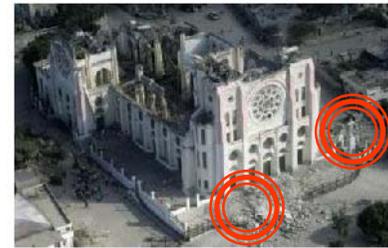
**SOLUZIONI ARCHITETTONICO-COSTRUTTIVE
INADEGUATE in presenza di solidi murari di scarsa qualità**

Chiesa a L'Aquila aprile 2009

Cella sinistra



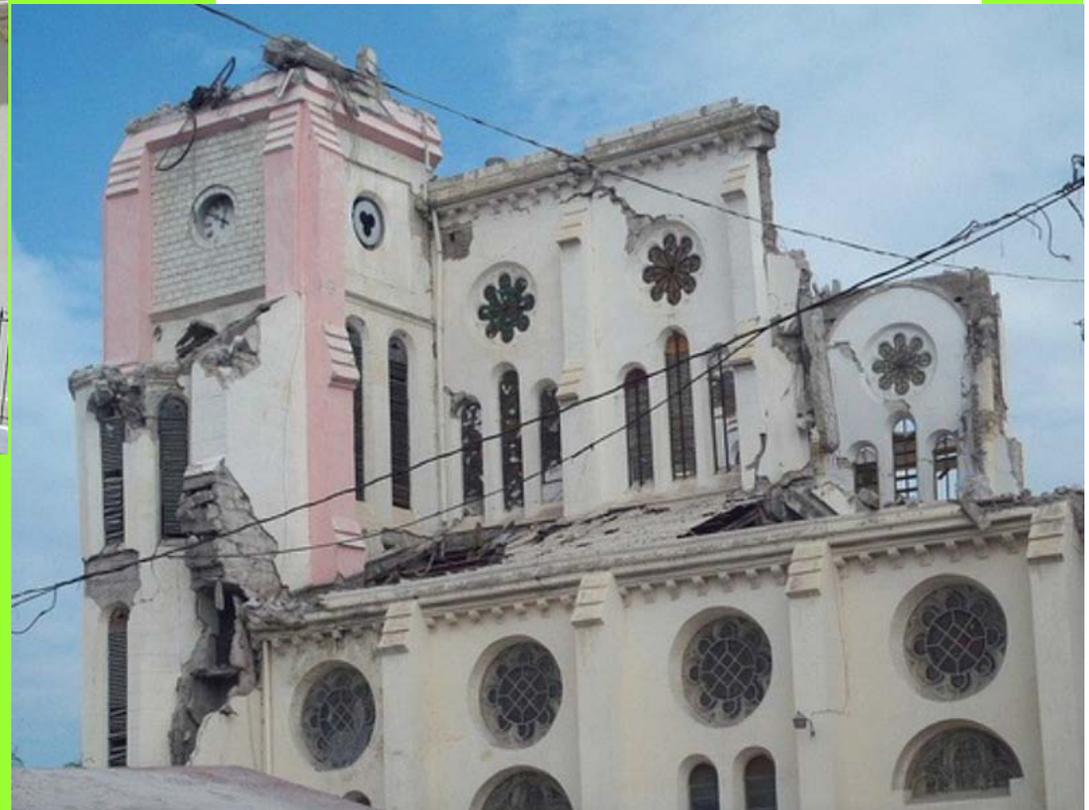
Cella destra

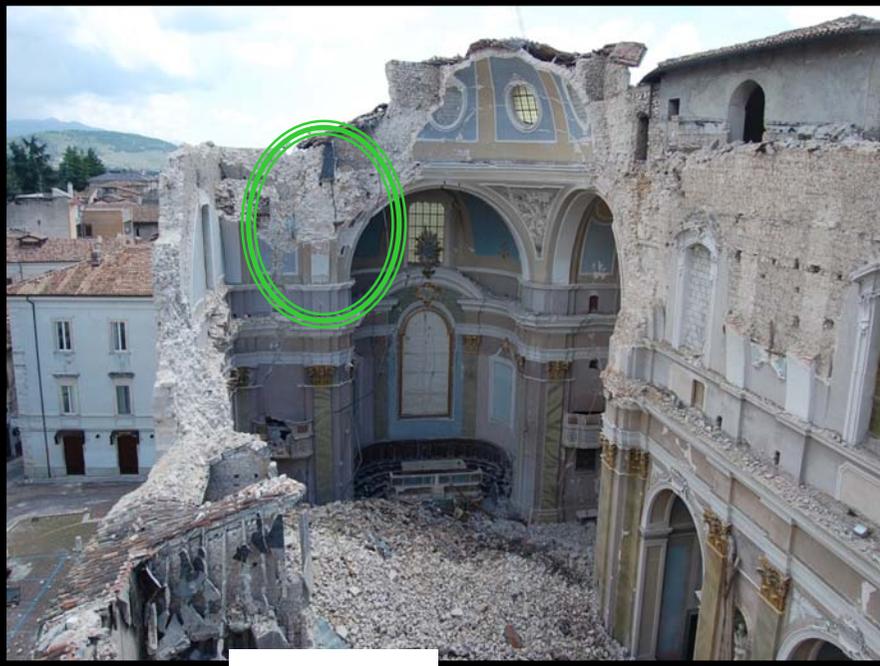


Pagina 1 di 1

Cattedrale di Port au Prince - HAITI

I cupolotti simmetrici sono crollati uno innanzi alla facciata, l'altro lateralmente

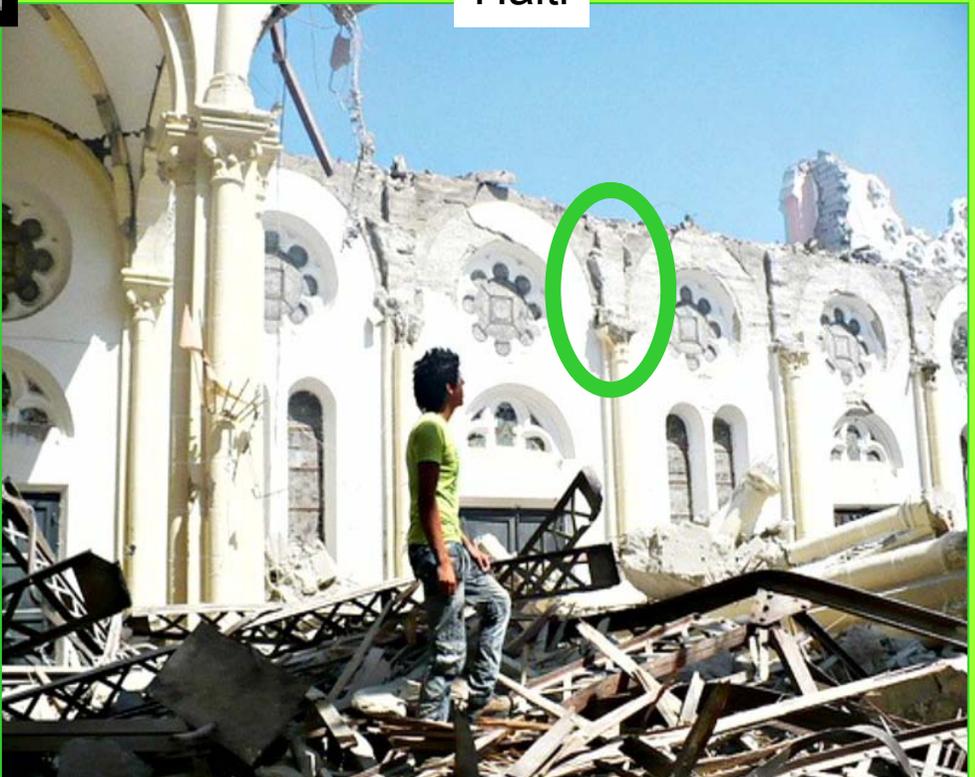




L'Aquila



Noto



Haiti



Catedral Puerto Principe HAITI



Julie Dermansky ©2010 www.jsdart.com

13 gennaio 2010

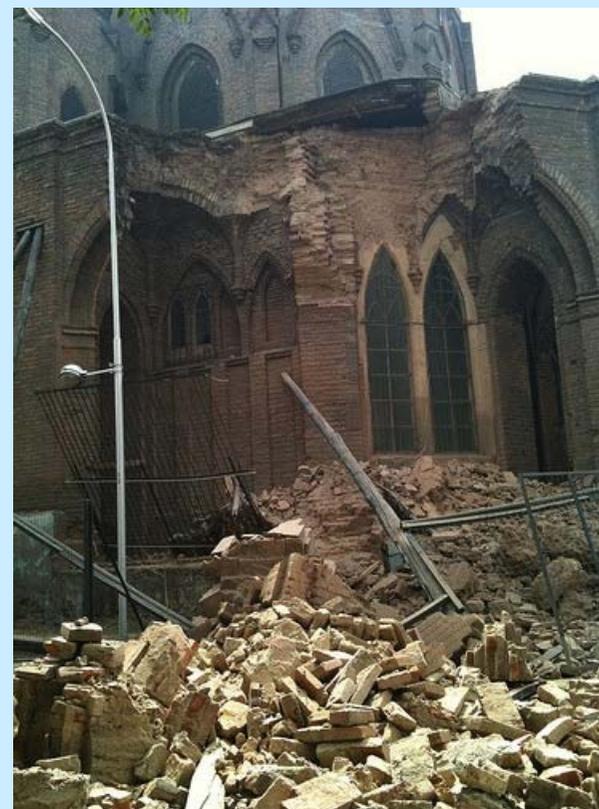


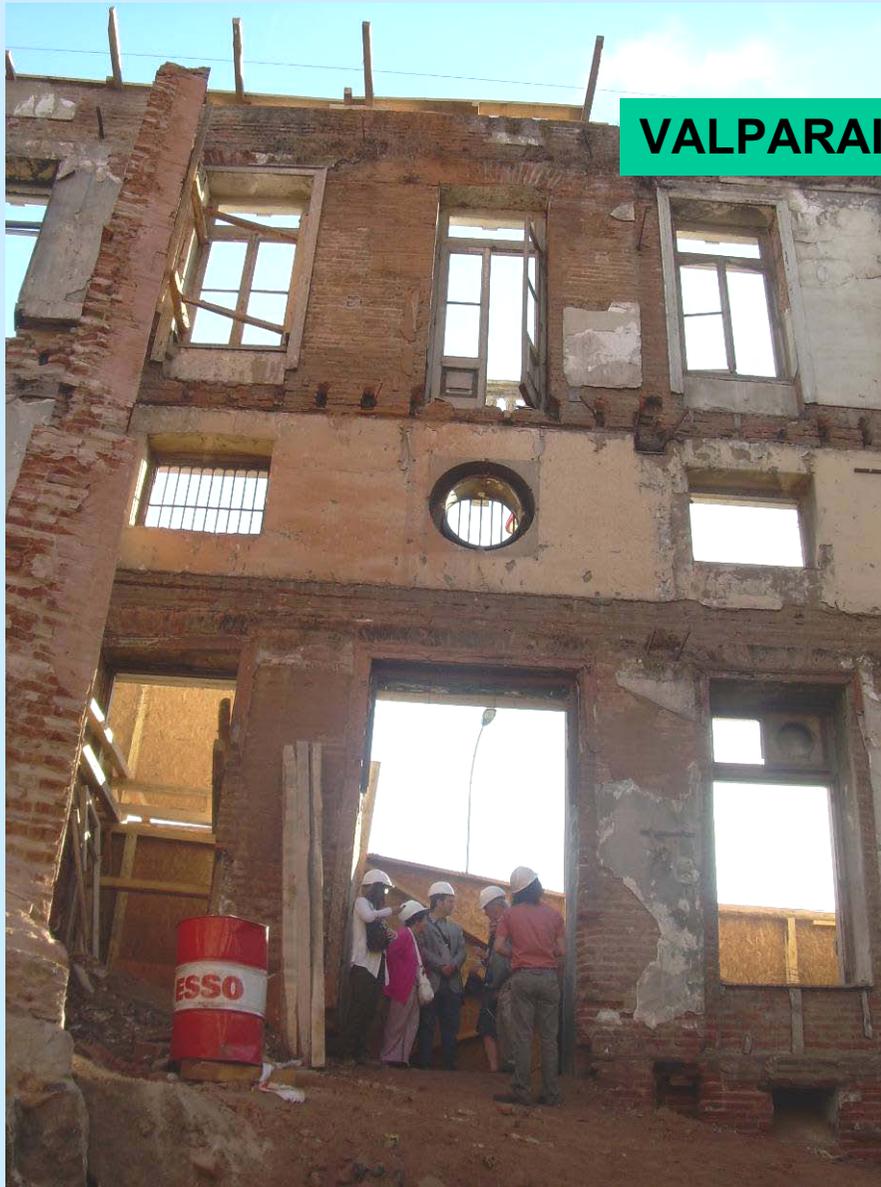


Nuestra Señora de la
Divina Providencia SANTIAGO

27 febbraio 2010

Santiago CHILE





VALPARAISO CHILE



Con posterioridad a la visita, se indicó con urgencia reforzamiento del edificio, se sugiere estructura provisoria de madera, actualmente en construcción.



Edificio Luis Cousiño – futura sede DUOC UC



Cordolo in calcestruzzo armato in sommità !?

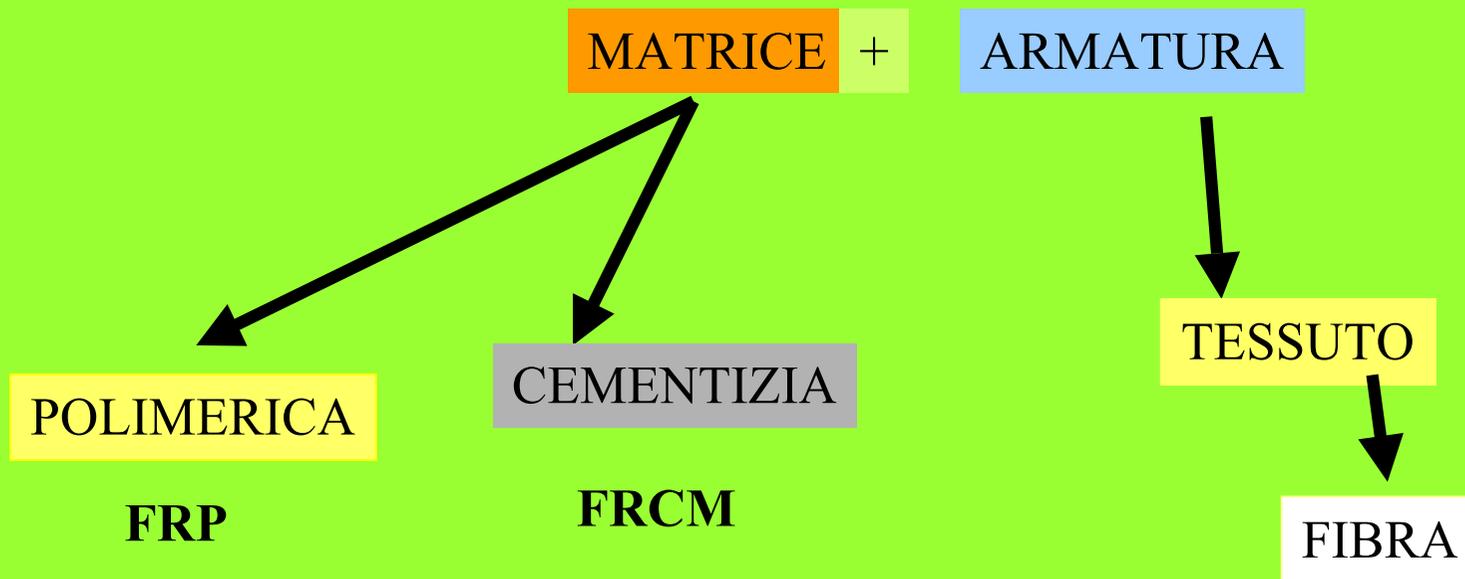
Energia specifica di Frattura del c.a.
50÷ 100 volte superiore a quello della muratura

La energia conferita al manufatto dal sisma
si dissipa nella muratura prima che nel cordolo:
Pertanto appare una azione deleteria del cordolo



Fig 10 Top reinforced concrete beams can give negative effects

MATERIALE COMPOSITO



COMPOSITI COMPOSITE

ARMATURA del composito

REINFORCING of composite

CONTINUA /continuous

continua

FIBRE
FIBERS

STEEL

METALLICO

CARBON

GLASS

INORGANICO

ARAMID

ORGANICO

PBO, PVA ...

MONO-DIRECTIONAL

Pseudo-TESSUTO

Pseudo FABRIC

BI-DIRECTIONAL

Trama e ordito TESSUTO
weft and warp FABRIC

MULTI-DIRECTIONAL

ARMATURA del composito

REINFORCING of composite

ARMADURA del compuesto

Filamento (**Mono-filament**): elemento base



Filamento



Cavo di filatura (**tow**): prodotto dalla macchina di filatura.

Fascio di filamenti (± 1000), senza torsione (senza ritorcitura) → FIBRA



Hilado o Cable de filamentos (**tow**): producido por la máquina de hilado

Haz de filamentos (± 1000), sin torsión. → FIBRA

ARMATURA del composito

REINFORCING of composite

ARMADURA del compuesto

Cavo di filatura (*tow*)



Filato (*spun yarn*): cavi di filatura assemblati con torsione (ritorcitura)



Hilado o Cable de Filamentos: agrupados y torsionados



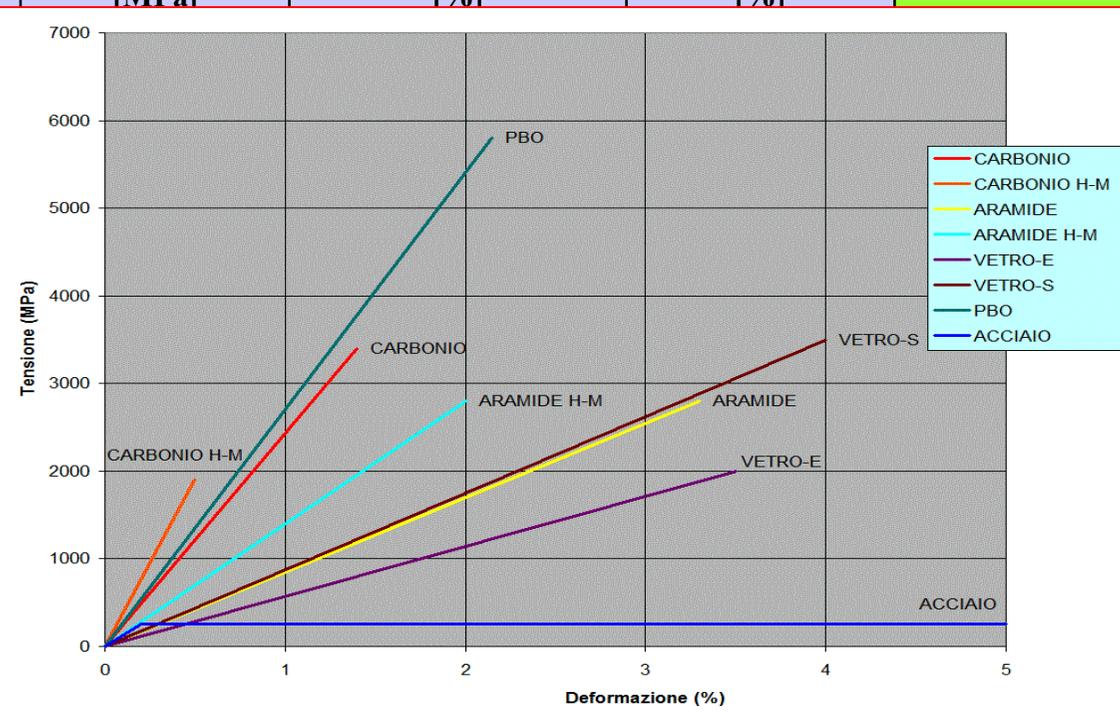
Filati assemblati (roving)



Haz de cables agrupados.

Fibre a CONFRONTO

MATERIALE	DENSITA' [g/cm ³]	MODULO ELASTICO [GPa]	RESISTENZA A TRAZIONE [MPa]	DEFORMAZIONE A ROTTURA [%]	ASSORBIMENTO UMIDITA' [%]
VETRO E	2.58	73			
VETRO S	2.58	86			
CARBONIO	1.78	240			
CARBONIO H-M (High-Module)	1.83	640			
ARAMIDE	1.44	80			
ARAMIDE H-M (High-Module)	1.45	125			
PBO	1.56	270			
ACCIAIO	7.85	200	300-600	25.0	-



COMPOSITI COMPOSITE COMPUESTOS

MATRICE del composito

MATRIX of composite

MATRIZ del compuesto

CEMENTIZIA / CEMENT BASED (GROUT) / CEMENTO

FRCM Fiber Reinforced Cementitious Matrix

POLIMERICA (RESINA) / POLYMERIC (RESIN) / POLIMERICA (RESINA)

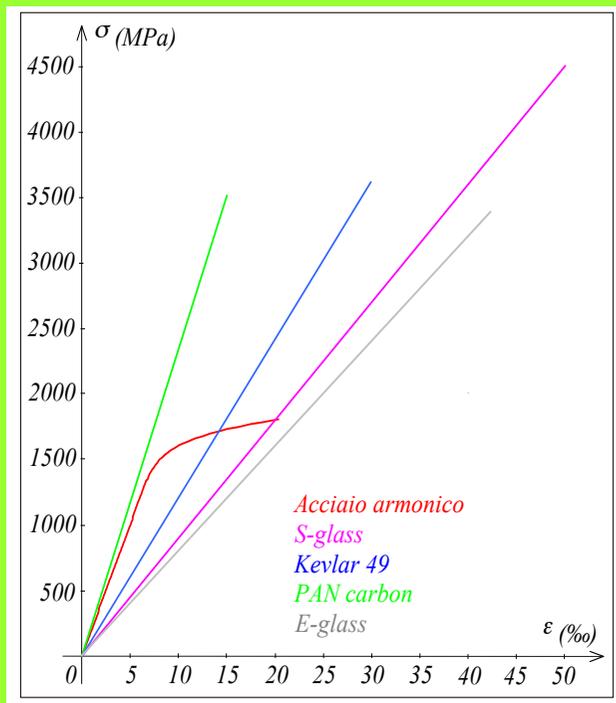
FRP Fiber Reinforced Polymer

CARATTERISTICHE MECCANICHE

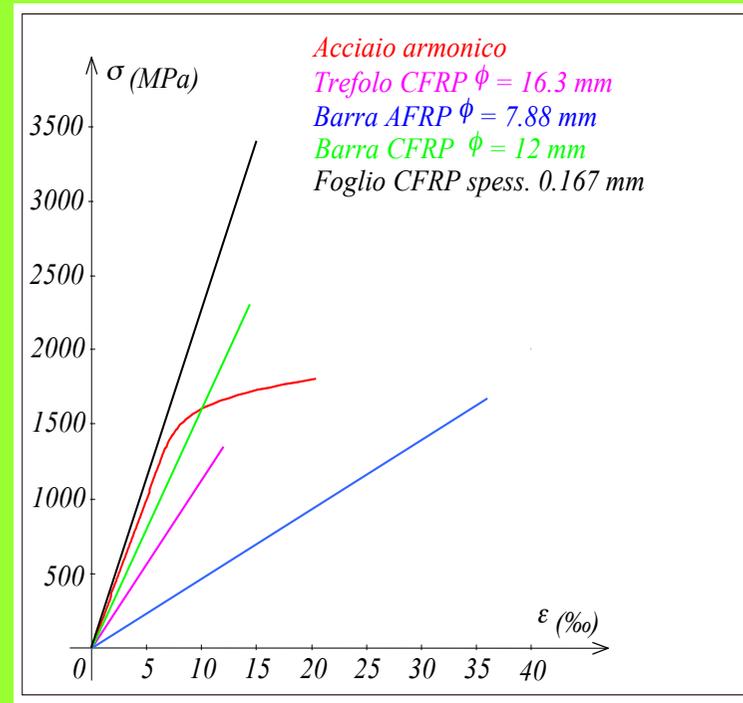
MATERIALE ANISOTROPO

◆ CARATTERISTICHE MECCANICHE LONGITUDINALI

ELASTICITA' LINEARE FINO A ROTTURA (E_F, f_{ft})



$$f_{ft} = \sigma_{fr} V_f + \sigma_m(\epsilon_{fr})(1 - V_f)$$
$$E_L = E_f V_f + E_m(1 - V_f)$$

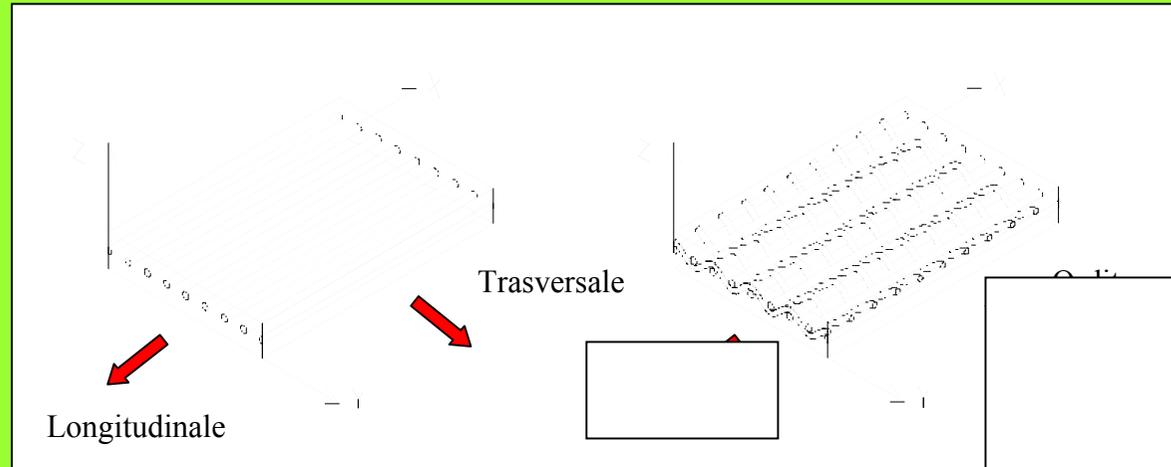


FIBRE

MICROMECCANICA

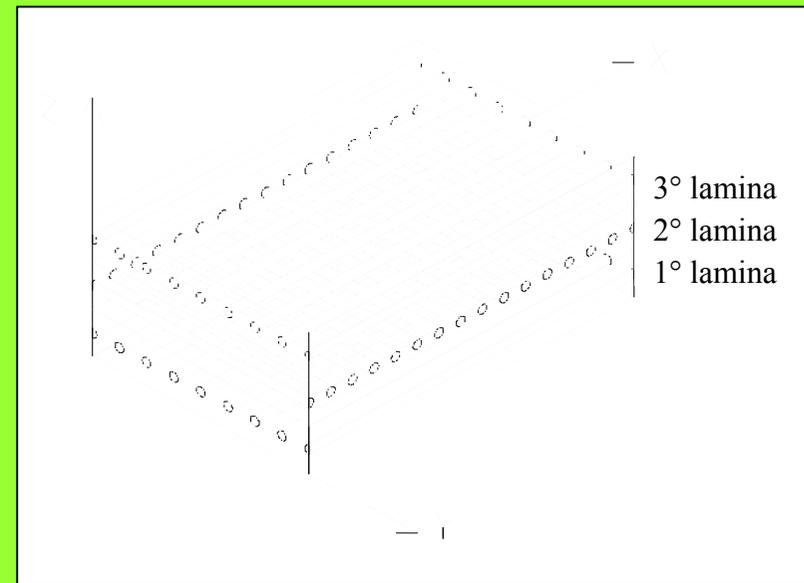
COMPOSITI

COMPOSITI COMPOSITE COMPUESTOS



Lamine sovrapposte

Láminas sobrepuestas.



Inserimento del tessuto G nella resina saturante

- Stesura manuale
- Integrazione della resina con un rullo metallico

Hand-process



Colocación de la Resina epoxi saturante

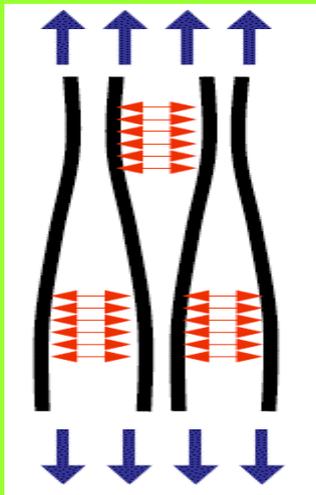
Incorporación del tejido G(vidrio) a la resina saturante:

- colocación manual;
- integración a la resina con un rodillo metálico.

Meccanismi di CRISI - FRP

Meccanismi di crisi sono molto più complessi rispetto a quelli dei materiali omogenei ed isotropi

Difettologia: una mancanza di allineamento delle fibre, causata da una scarsa accuratezza nella lavorazione o da stati tensionali anomali.



Mancanza di allineamento delle fibre e conseguente compressione della matrice sotto l'azione del carico

Distribuzione non uniforme delle fibre e conseguente nascita del

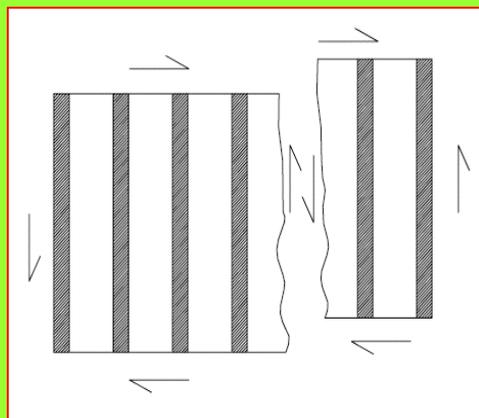
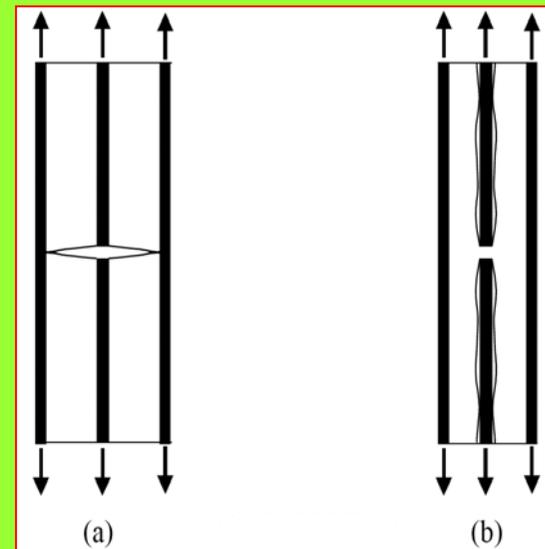
Taglio Intralaminare sotto l'azione del carico



Meccanismi di CRISI negli FRP

Trazione PARALLELA alle fibre

- (a) propagazione trasversale
- (b) propagazione longitudinale



Taglio NEL PIANO

APPLICAZIONE DEL RINFORZO STRENGTHENING APPLICATION

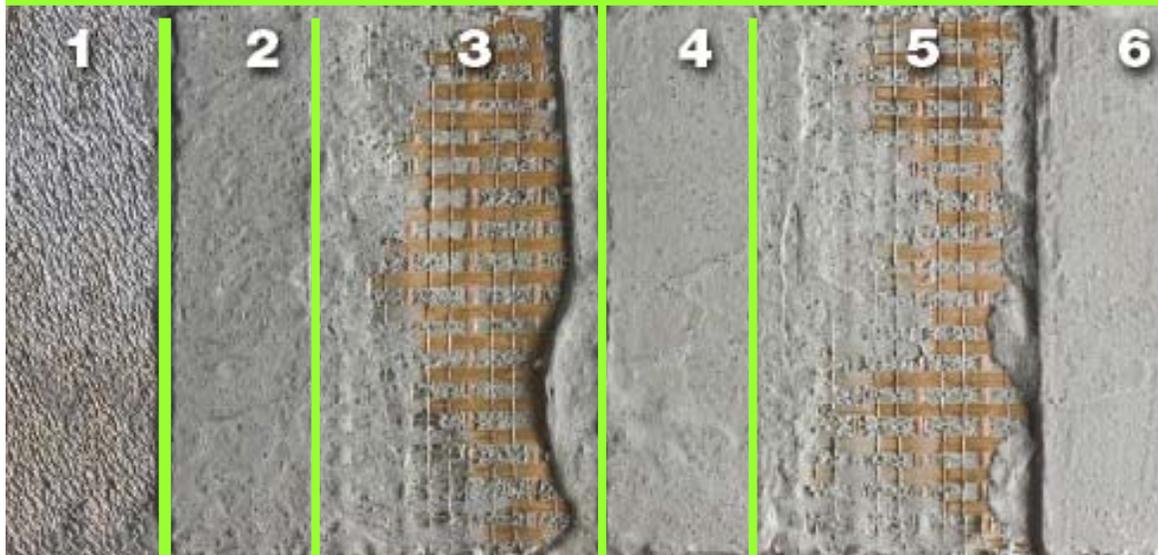
APLICACIÓN DEL REFUERZO

MATRICE (CEMENTIZIA)
MATRIX (CEMENT BASED)
MATRIZ (CEMENTICIA)
+
PSEUDO-TEJIDO MESH PBO



COMPOSITI FRCM
COMPOSITE FRCM
COMPUESTOS FRCM

FRCM

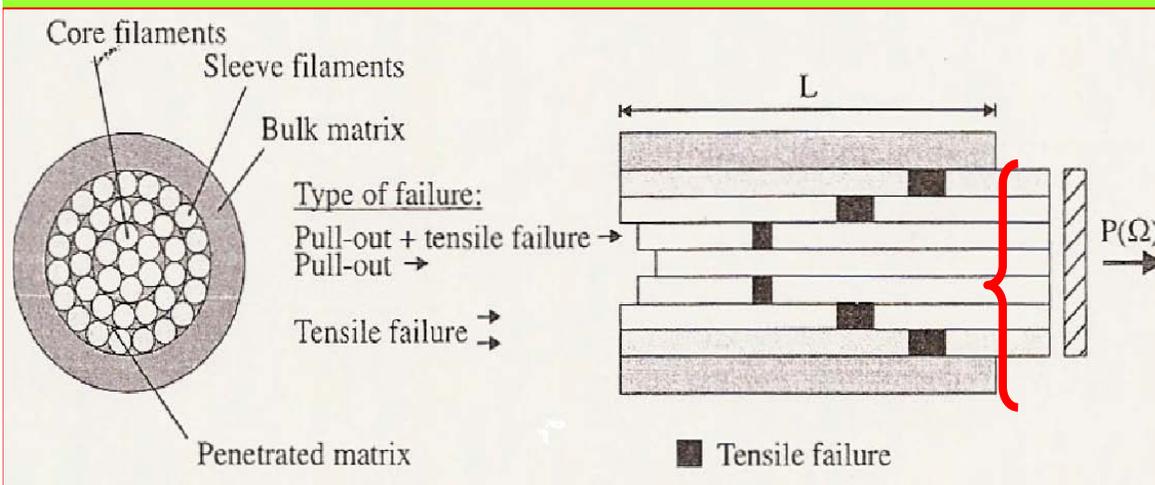


1. Sottofondo in calcestruzzo
2. Primo strato di malta Ruredil X Mesh M750
3. Ruredil X Mesh Gold
4. Secondo strato di malta Ruredil X Mesh M750
5. Ruredil X Mesh Gold (eventuale)
6. Terzo strato di malta Ruredil X Mesh M750

Meccanismi di CRISI negli FRCCM

Prova sperimentale a carattere semi-distruttivo che consiste nell'estrarre un inserto (in questo caso un filato in fibra di vetro) da una matrice solida per valutarne l'interazione e la resistenza dei materiali testati

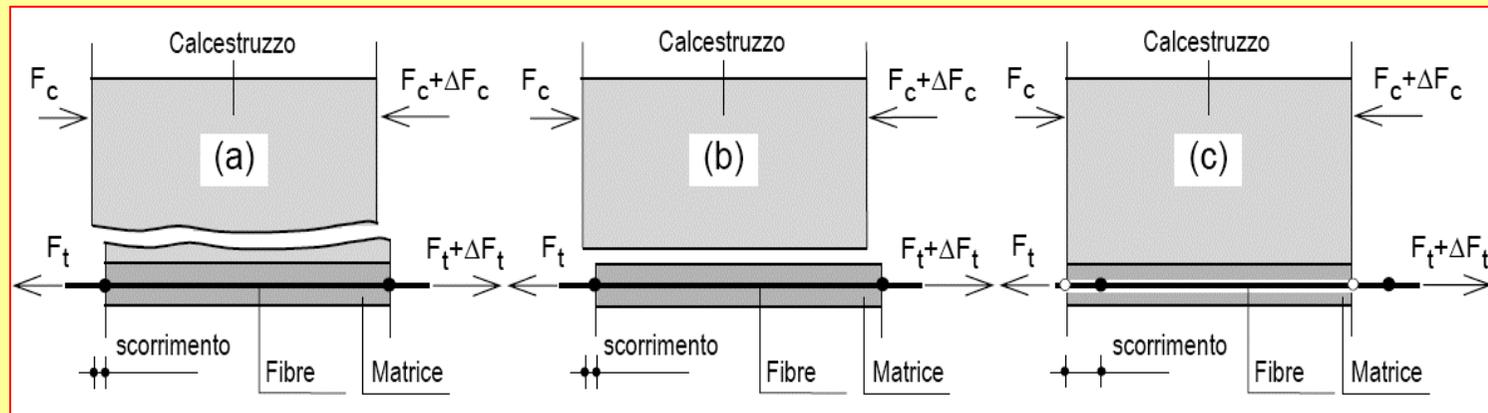
Il comportamento durante la prova è condizionato dalla forte adesione che i filamenti più esteri del filato sviluppano con la matrice mentre quelli più interni si lasciano scivolare come avvolti da una guaina, questo avviene perché la penetrazione della malta tra i filati non avviene in maniera omogenea.



Frattura telescopica

la perdita di efficacia del rinforzo diminuisce gradualmente garantendo una maggiore dissipazione di energia di rottura e quindi la duttilità che li contraddistingue

Modi di CRISI - FRCM

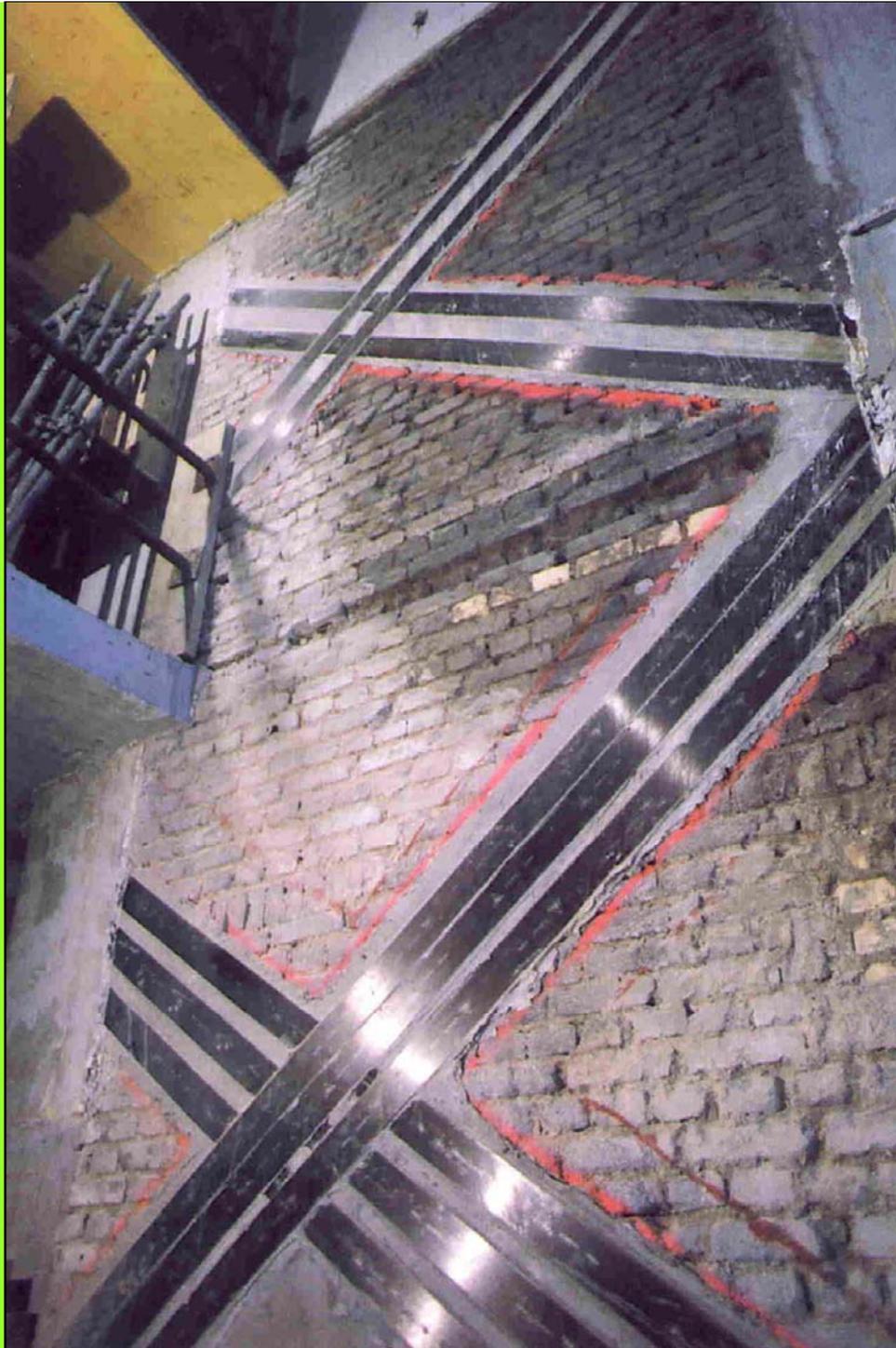


“D” - CFRP

“C” -
FRCM con
PBO

“B” - FRCM
con
CARBONIO

Zurich 1996



Applicazione di lamina de fibra di carbonio su pannelli mediante Malta/collante epossidico



Mortero epoxi tixotrópico.



Aplicación de lamina de fibra de carbono
sobre paneles mediante mortero/cola
epoxi

MODO DI COLLASSO COLLAPSE MODE MODO DE COLAPSO

collasso

collapse

colapso

scollamento

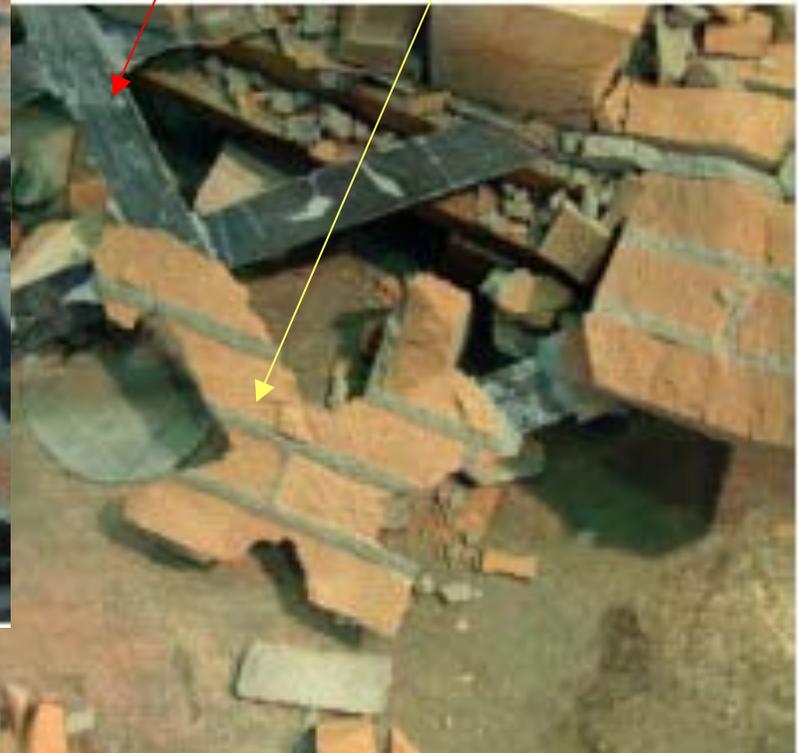
debonding

desencolado

delaminazione

delamination

delaminacion



Applicazione di connettore



Anchor application

Aplicación de un Conector

Modi di CRISI

provini A (*non rinforzati*): hanno raggiunto il collasso per compressione del calcestruzzo con armature metalliche plasticizzate;



provini B (*rinforzati con FRCCM e rete in CARBONIO*): dopo lo snervamento delle armature in acciaio, si sono osservati notevoli scorrimenti delle fibre nella matrice cementizia e quindi il contributo del rinforzo è stato caratterizzato da elevata dissipazione. Nel momento della crisi, che è avvenuta per compressione del calcestruzzo compresso, non si è verificato alcun distacco del pacchetto di rinforzo.

Modi di CRISI

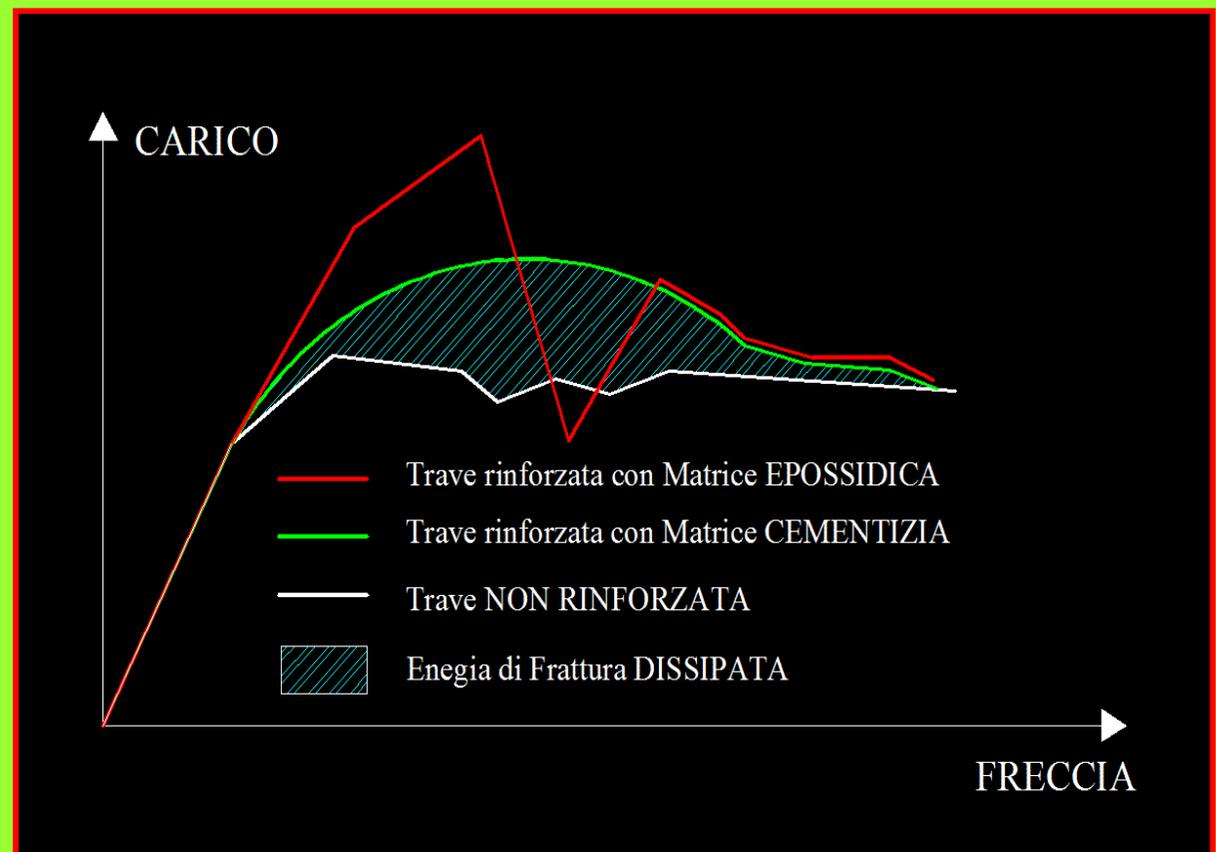


provini C (*rinforzati con FRCM e rete in PBO*): la crisi si è manifestata con un improvviso distacco dell'intero pacchetto di rinforzo all'interfaccia tra matrice cementizia e calcestruzzo anche se per elevati carichi. Questo tipo di crisi è fragile ed all'atto del distacco si ha una repentina diminuzione del carico.

provini D (*rinforzati con CFRP*): dopo lo snervamento delle armature metalliche, si è avuto il distacco improvviso tipico dei rinforzi a matrice epossidica; innescatosi in una delle due sezioni caricate e propagatosi verso l'estremità della trave.



**COMPORTAMENTO schematico DI TRE TRAVI
FITTIZIE IN Calcestruzzo ARMATO PORTATE A
ROTTURA PER FLESSIONE**



Meccanismi di CRISI nei rinforzi a matrice CEMENTIZIA

I meccanismi di crisi dei materiali compositi a matrice inorganica (cementizia) si differenziano sostanzialmente da quelli a matrice organica (resina epossidica) per le **modalità con cui si manifestano**.

Generalmente la crisi di provini rinforzati con questi compositi risulta **più duttile** di quella dei medesimi provini rinforzati con FRP, anche se i rinforzi in FRCM, TRM o SRG **pagano** in termini di carico ultimo di collasso.

Il perché di questa maggiore duttilità è concepibile se **focalizziamo la nostra attenzione su un composito unidirezionale sollecitato a trazione parallela alle fibre** (*prova di pull-out*).

F R C M Fibre Reinforced Cementitious Matrix

Matriz cementicia armada con fibra.



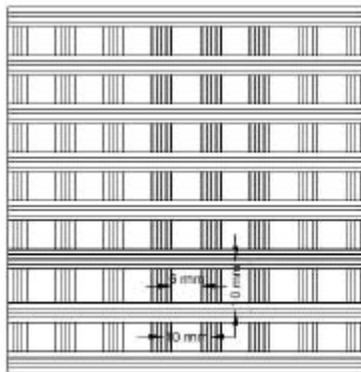
Matriz



Pseudo-Tejido



Matriz



Carbon mesh (GRID)

Pseudo tejido de carbono en forma de red.

Fiber density [g/m ²]	168
Nominal thickness [cm]	0.047
Strength (for a width of 1 cm) [N/cm]	1600

carbon grid FRCM



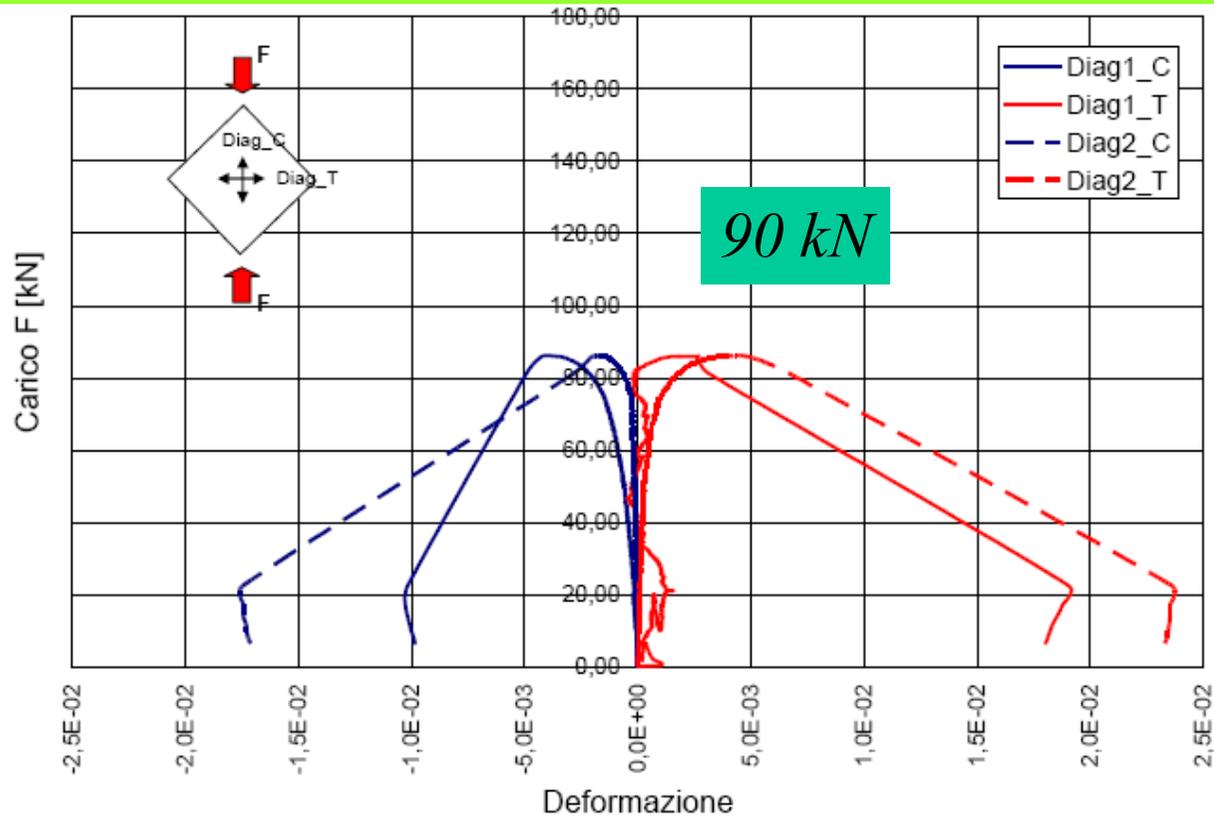
Roman Arch re-construction in Rimini (Italy)

Reconstrucción de un arco romano en Rímini-Italia.

Quadro Normativo

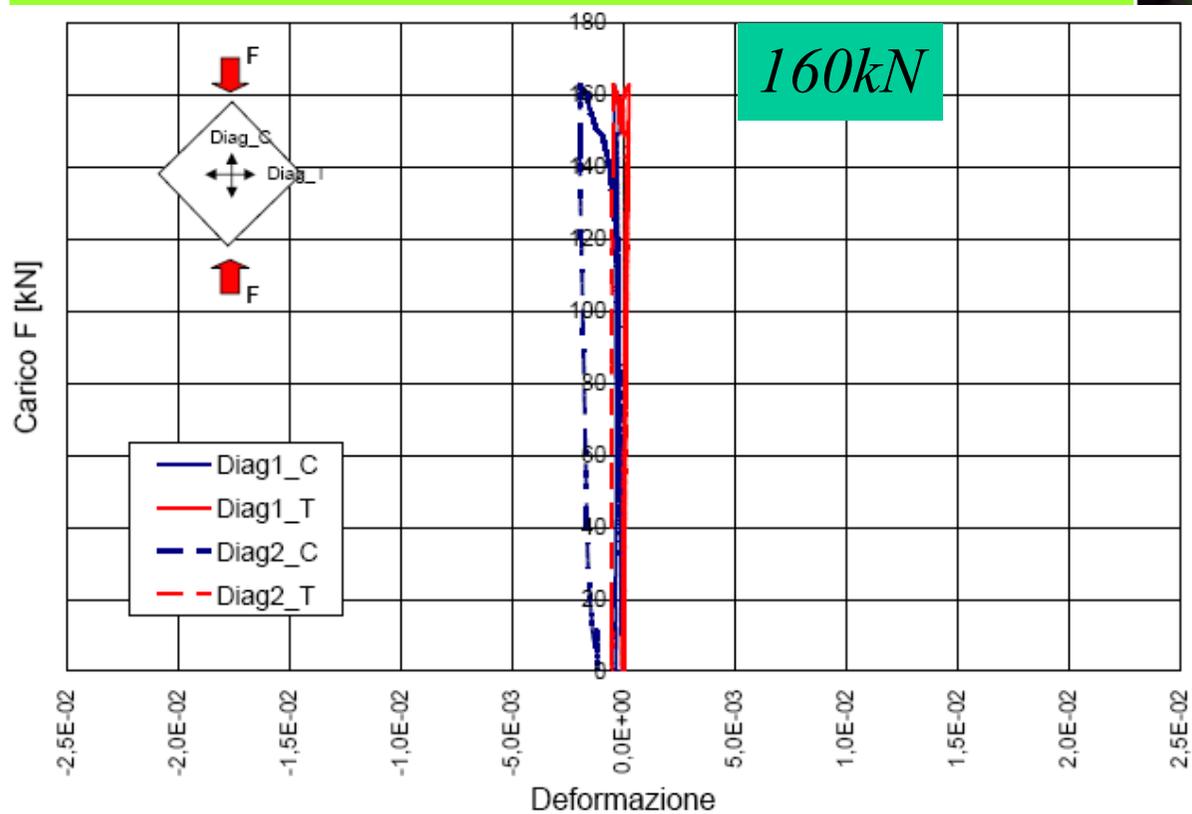
- ✓ **“ Norme Tecniche per le Costruzioni” (entrato in vigore gennaio 2008)**
- ✓ **Linee guida ministeriali**
 - ☞ Istruzioni del CNR ossia i DT-CNR;
 - ☞ L’Ordinanza del Pres. del Consiglio dei Ministri O.P.C.M. del 23 marzo 2003, n.3274 e successive modifiche;
- ✓ **“Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle Norme Tecniche per le Costruzioni” (approvato dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici nel parere numero 66 dell’Assemblea Generale del 21 luglio 2006)**
 - ☞ O.P.C.M. 3274 del 20 marzo 2003 e successive modifiche ed integrazioni;
 - ☞ Norme tecniche per le costruzioni;
 - ☞ Decreto Legislativo 22 gennaio 2004, n. 42 (Codice dei beni culturali e del paesaggio).

In particolare quest’ultimo stabilisce all’articolo 4, comma 9 che per i beni immobili collocati nelle zone dichiarate a rischio sismico il restauro comprende l’intervento di miglioramento strutturale.



*LabSCo Venezia
Febbraio 2008*

Pannello 1 (2 strati 0°/90° e ± 45° ambo i lati):



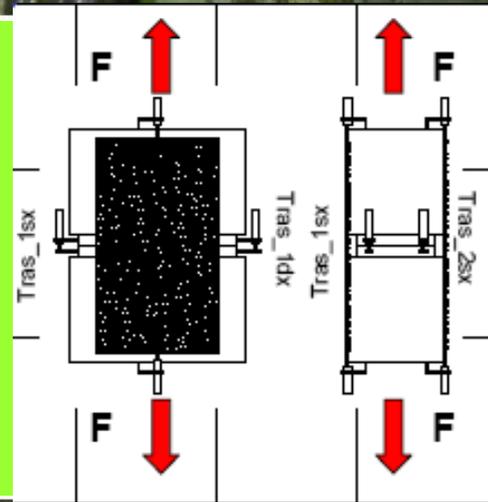


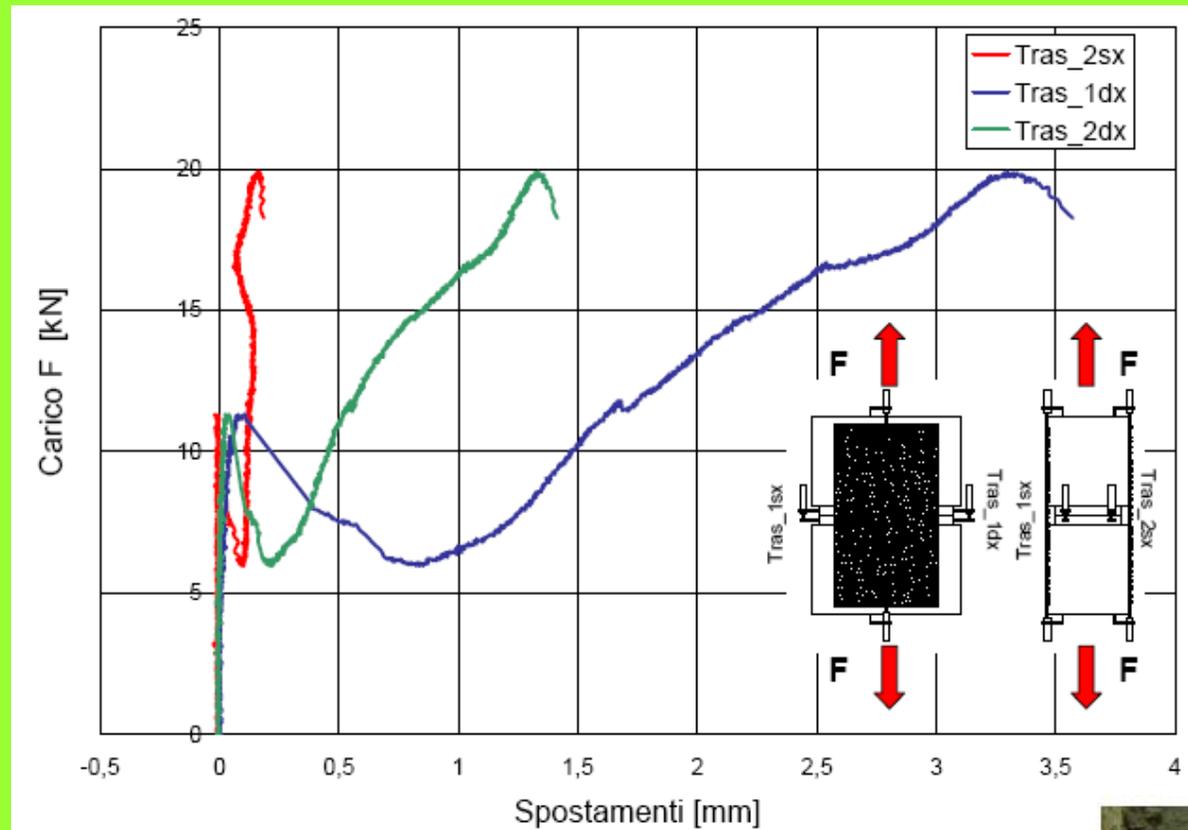
Fig. 4: Innesco della fessurazione, lato 1



Fig. 7: Si osservi la non planarietà del ciglio fessurativo.



Fig. 5: Il rinforzo risulta integro sul lato 2



LabSCo Venezia
Febbraio 2008



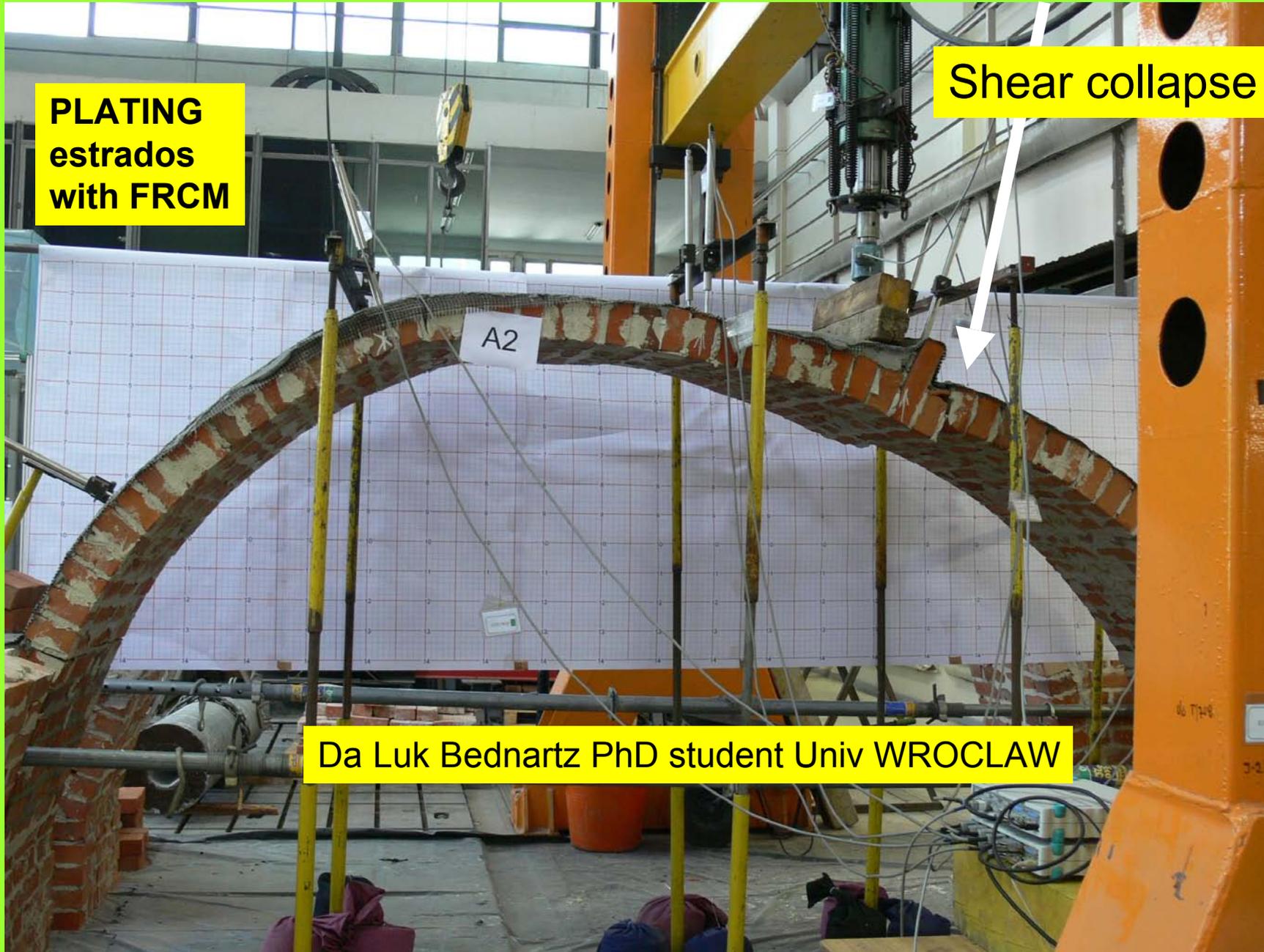
Fig. 8: Ampliamento della fessura sul lato 1

**PLATING
estrados
with FRCM**

Shear collapse

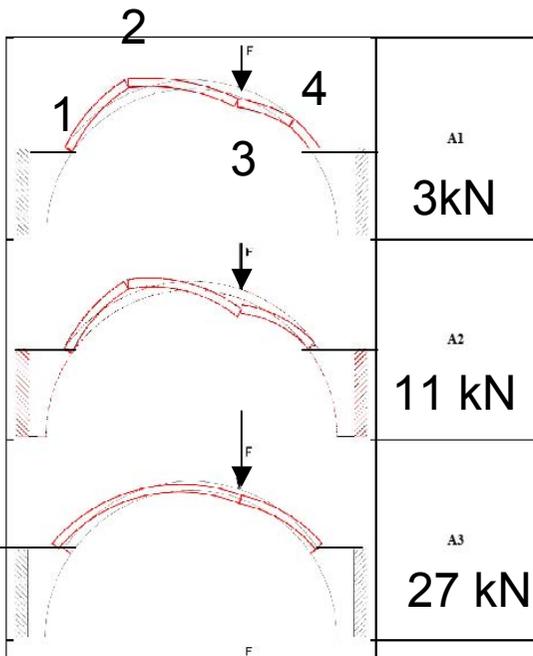
A2

Da Luk Bednartz PhD student Univ WROCLAW

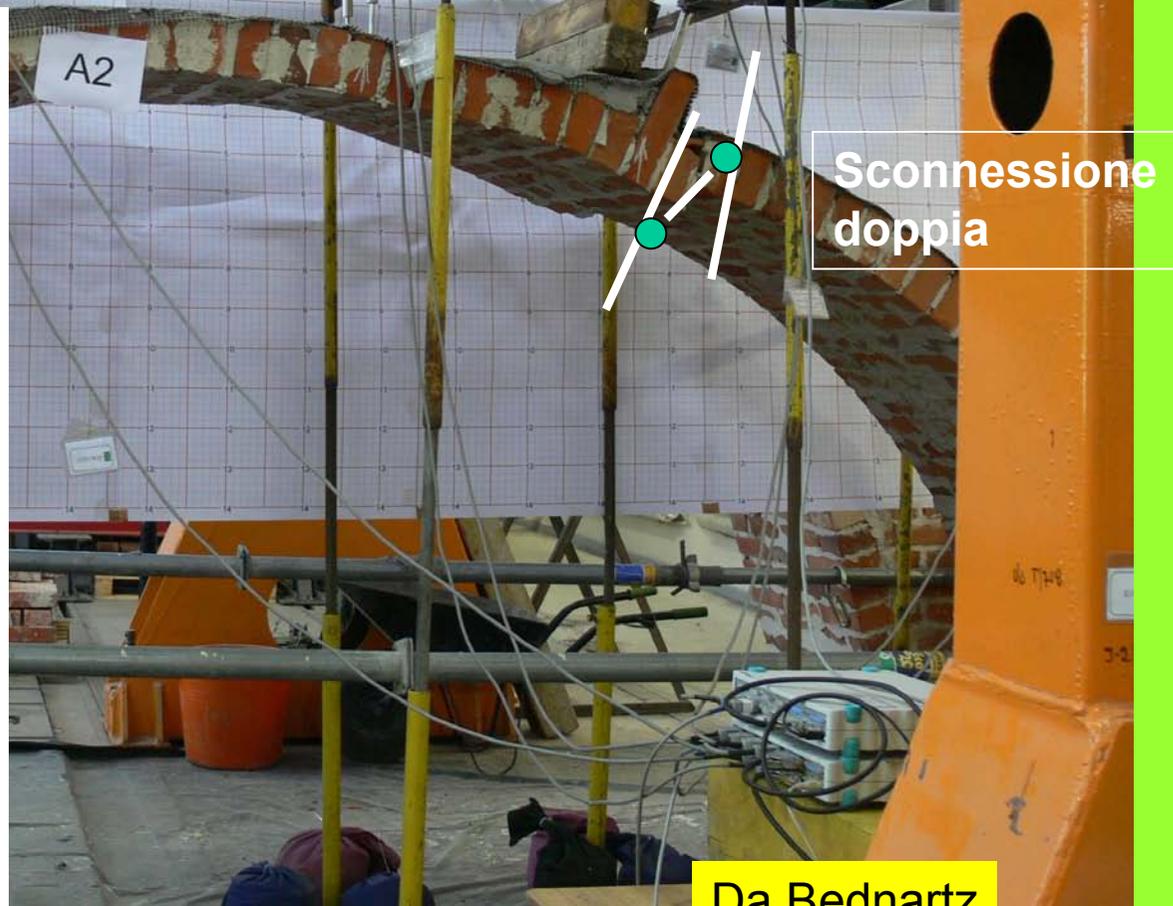


PLATING

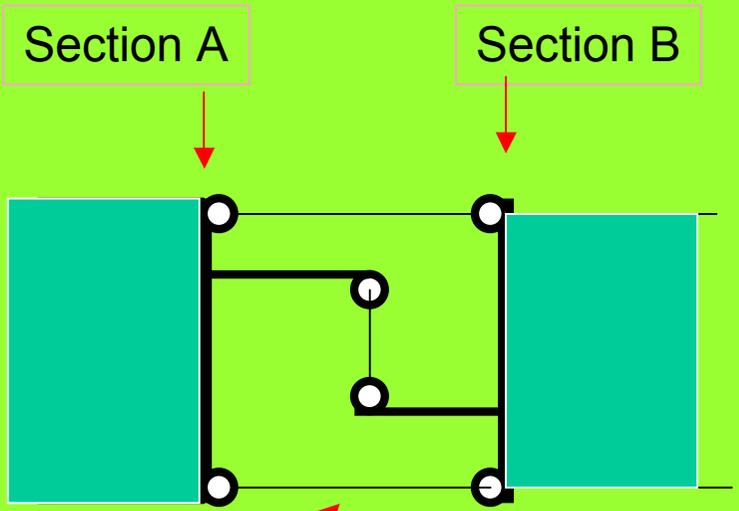
Shear collapse



A1 senza rinforzo
A2 FRCM in estradosso
A3 FRCM in estradosso e
Intradosso



Da Bednartz



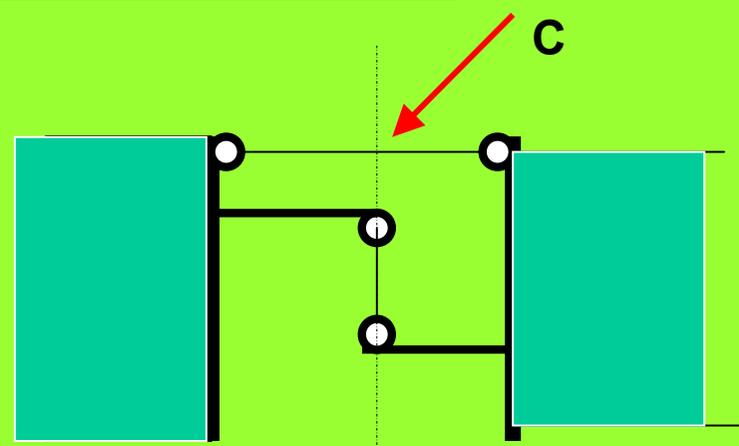
Section A

Section B

Perfect connection between sections

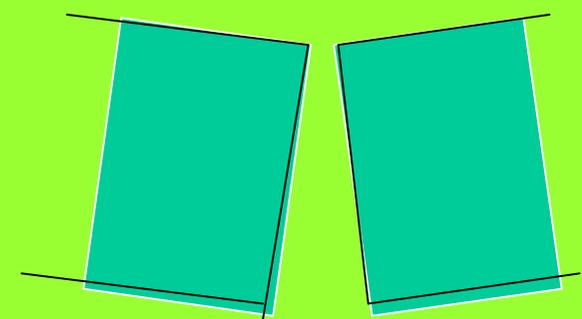
Collapsing pendulum

- 1 connection

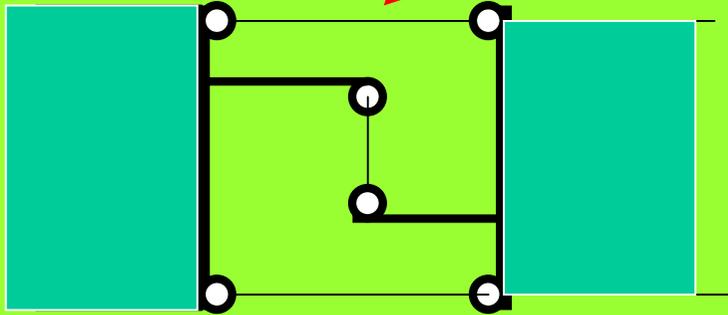


Upper hinge (estrados hinge)

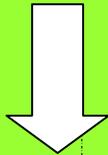
C center of relative rotation



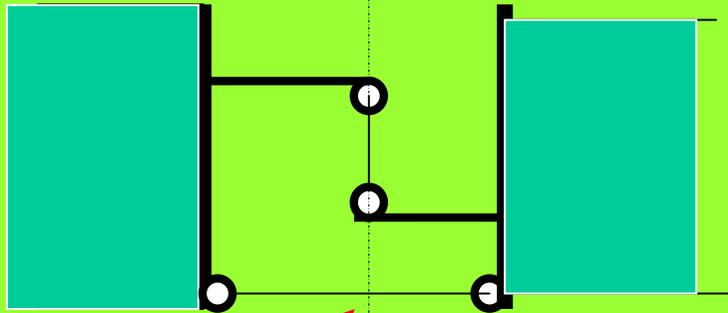
Collapsing pendulum



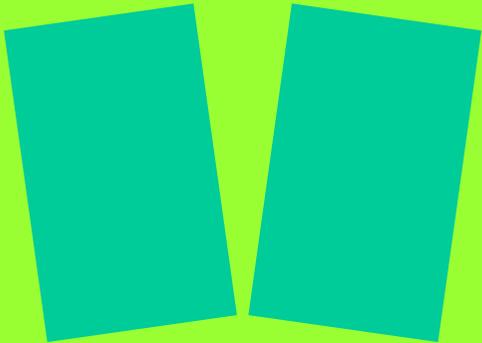
Perfect connection



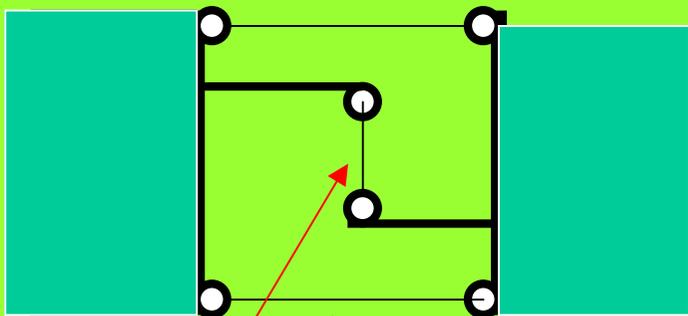
- 1 connection



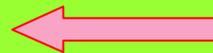
C Lower hinge (intradoss hinge)



C center of relative rotation



Collapsing pendulums

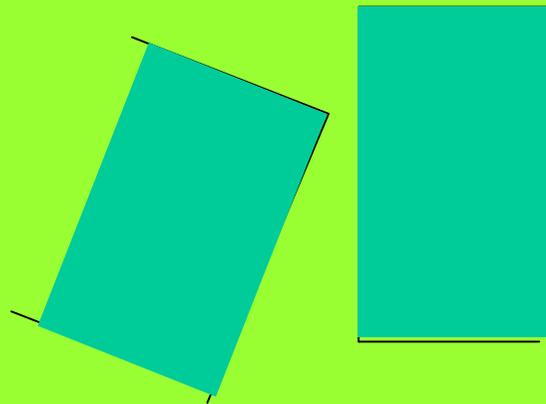
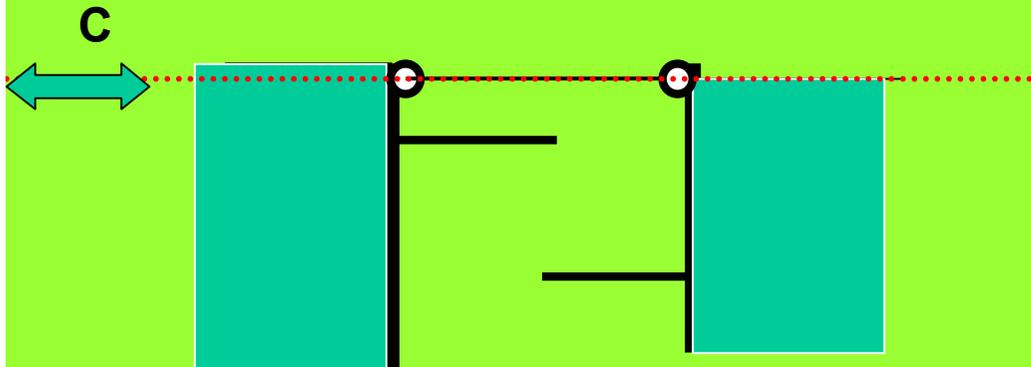


Perfect connection

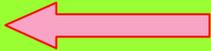
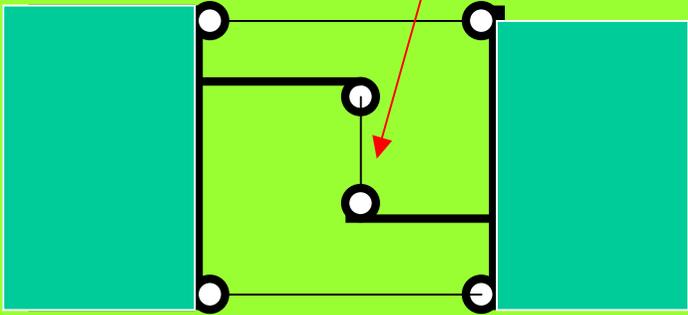
- 2

Connection

Parallel sliding + rotation



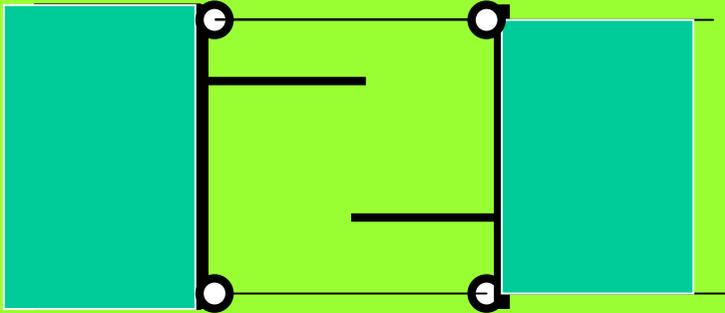
Collapsing pendulum



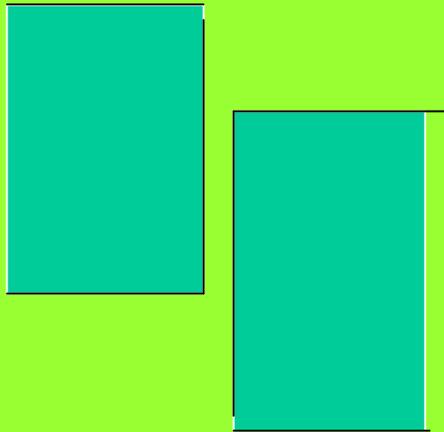
Perfect connection

- 1

Connection

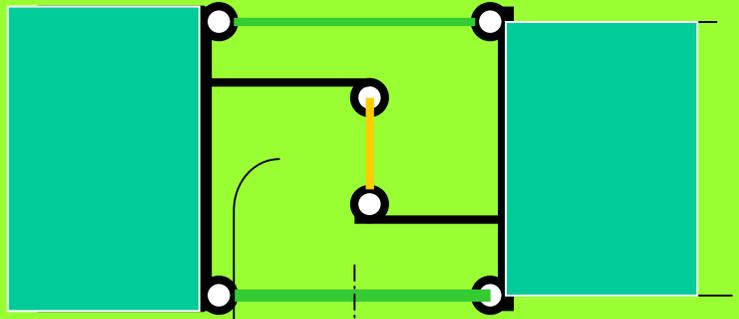


Parallel sliding



Section A

Section B



Perfect connection between sections

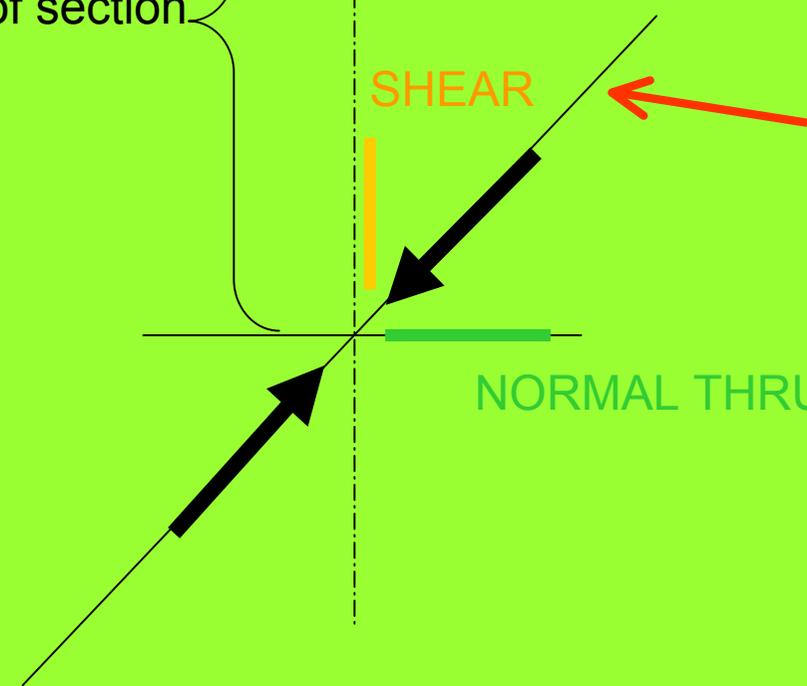
Thrust line
OUT of section

SHEAR

Thrust line

STRENGTHENED ARC

NORMAL THRUST



Section A

Section B

STRENGTHENED ARC

Perfect connection between sections

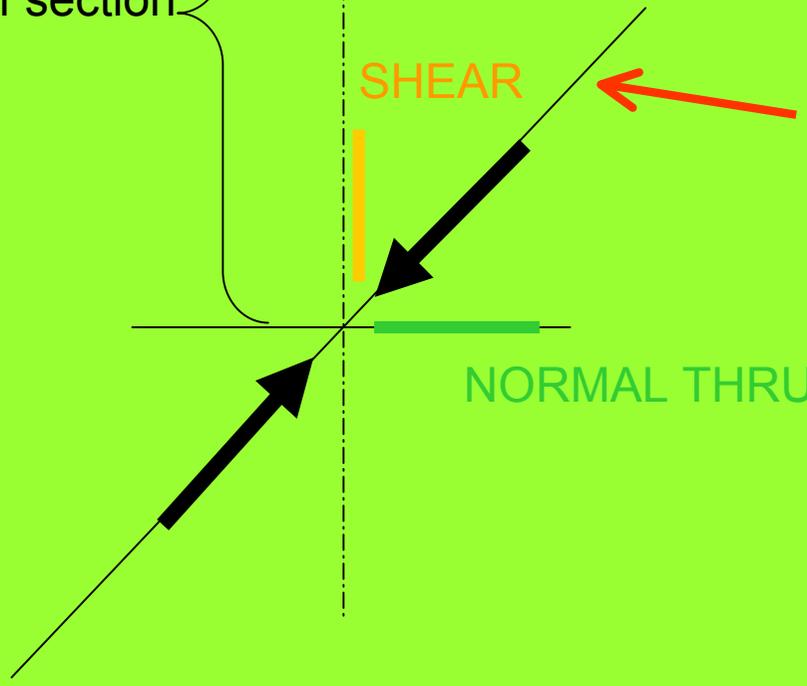
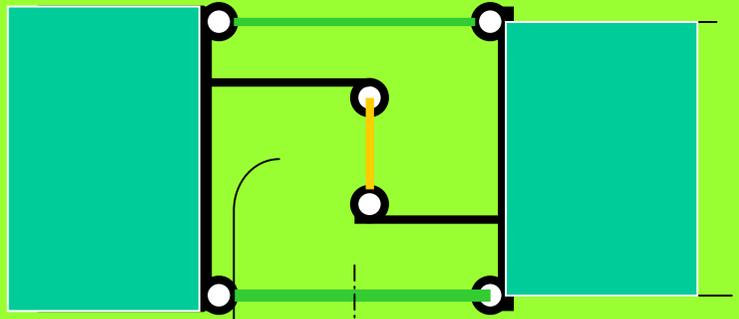
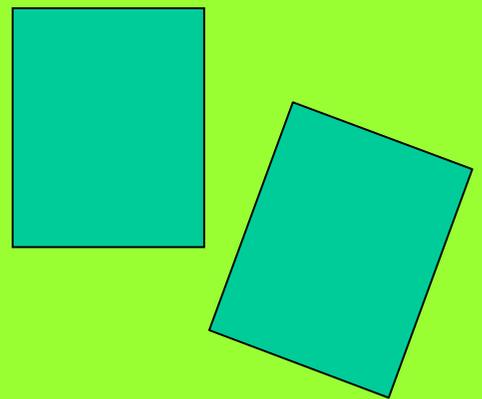
Thrust line
OUT of section

SHEAR

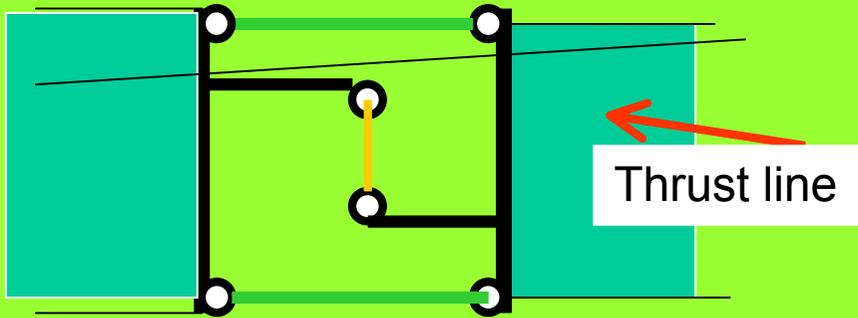
Thrust line

NORMAL THRUST

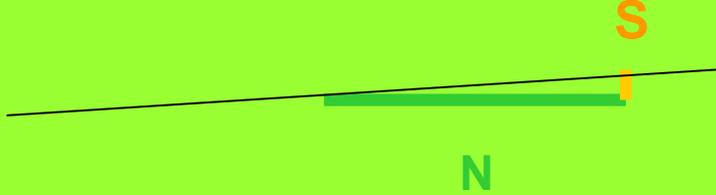
-2



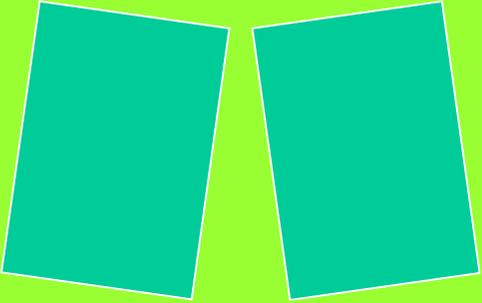
UN-STRENGTHENED ARC

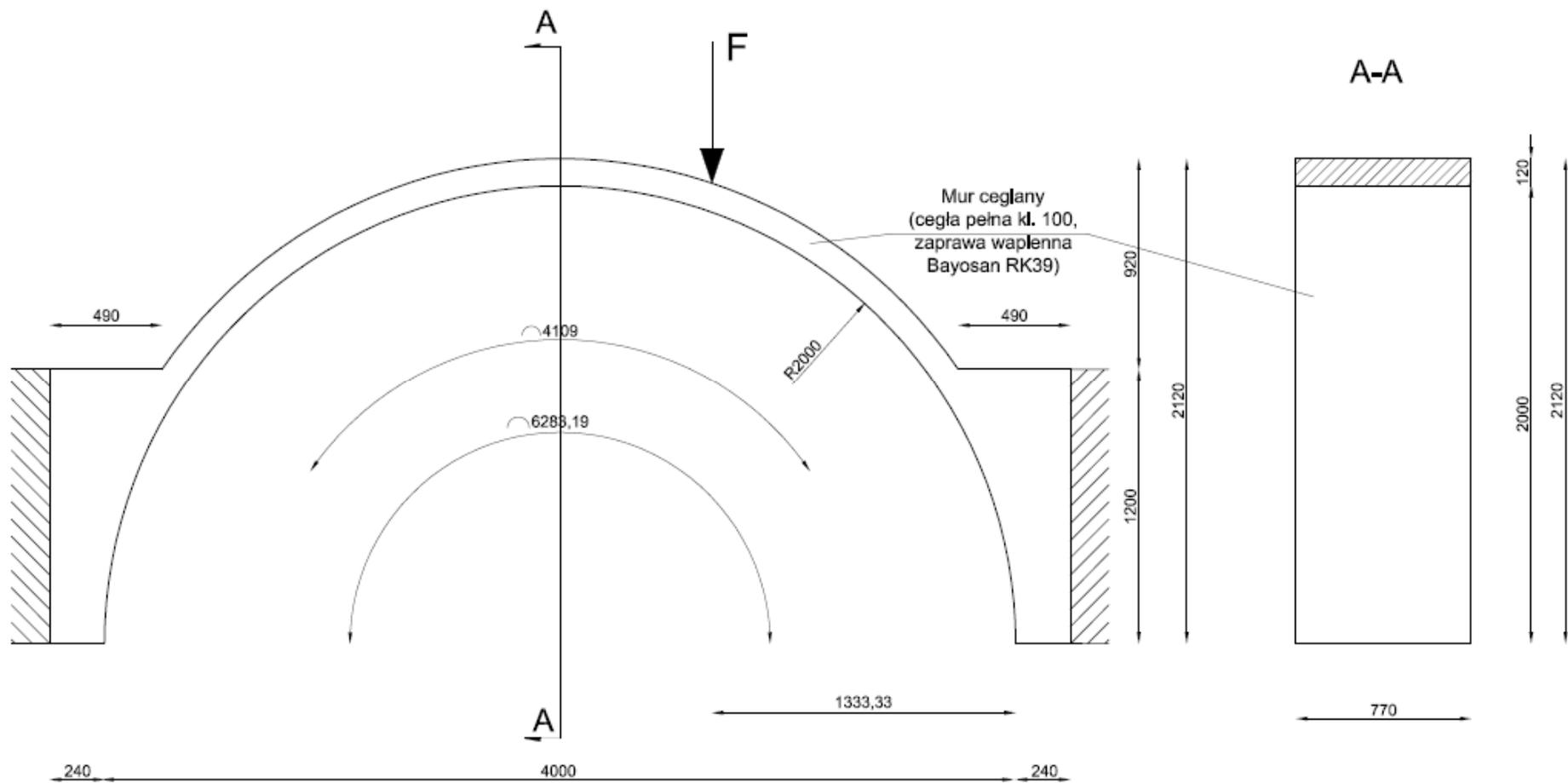


Thrust line
inside of section

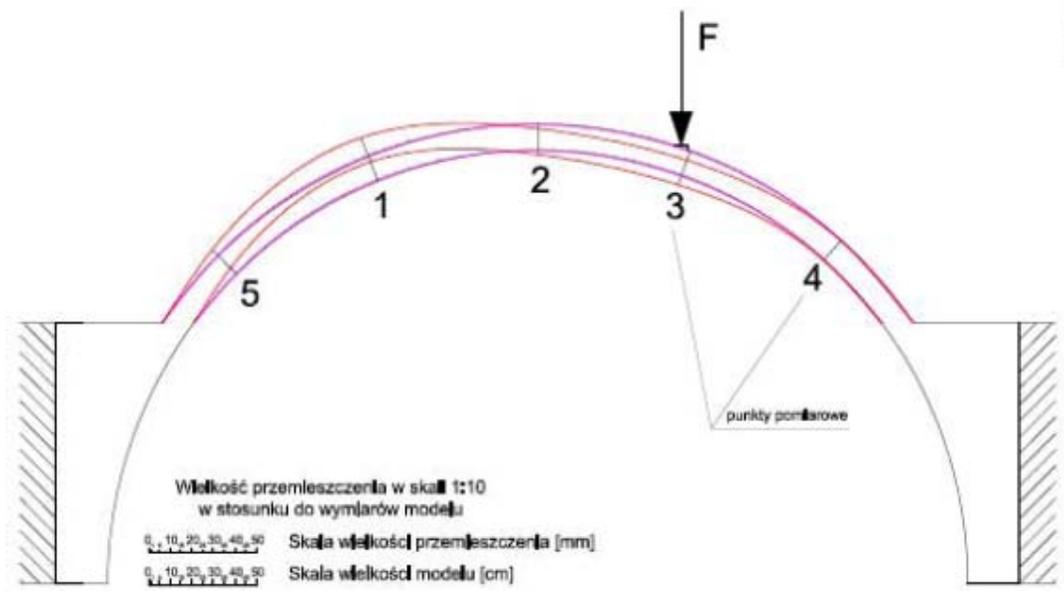


$$\frac{S}{N} = \text{SMALL}$$





Łuk A1



Kolory obrazujące kolejne etapy przemieszczenia przy różnych poziomach obciążenia

- F=1kN
- F_{max}=2,882kN

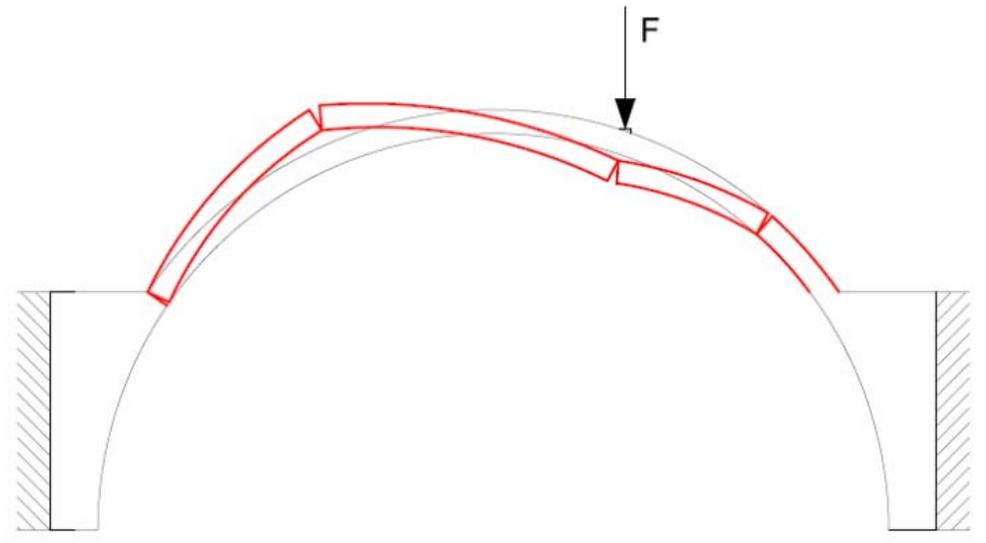
Wielkość przemieszczenia w skali 1:10 w stosunku do wymiarów modelu

Skala wielkości przemieszczenia [mm]
0 10 20 30 40 50

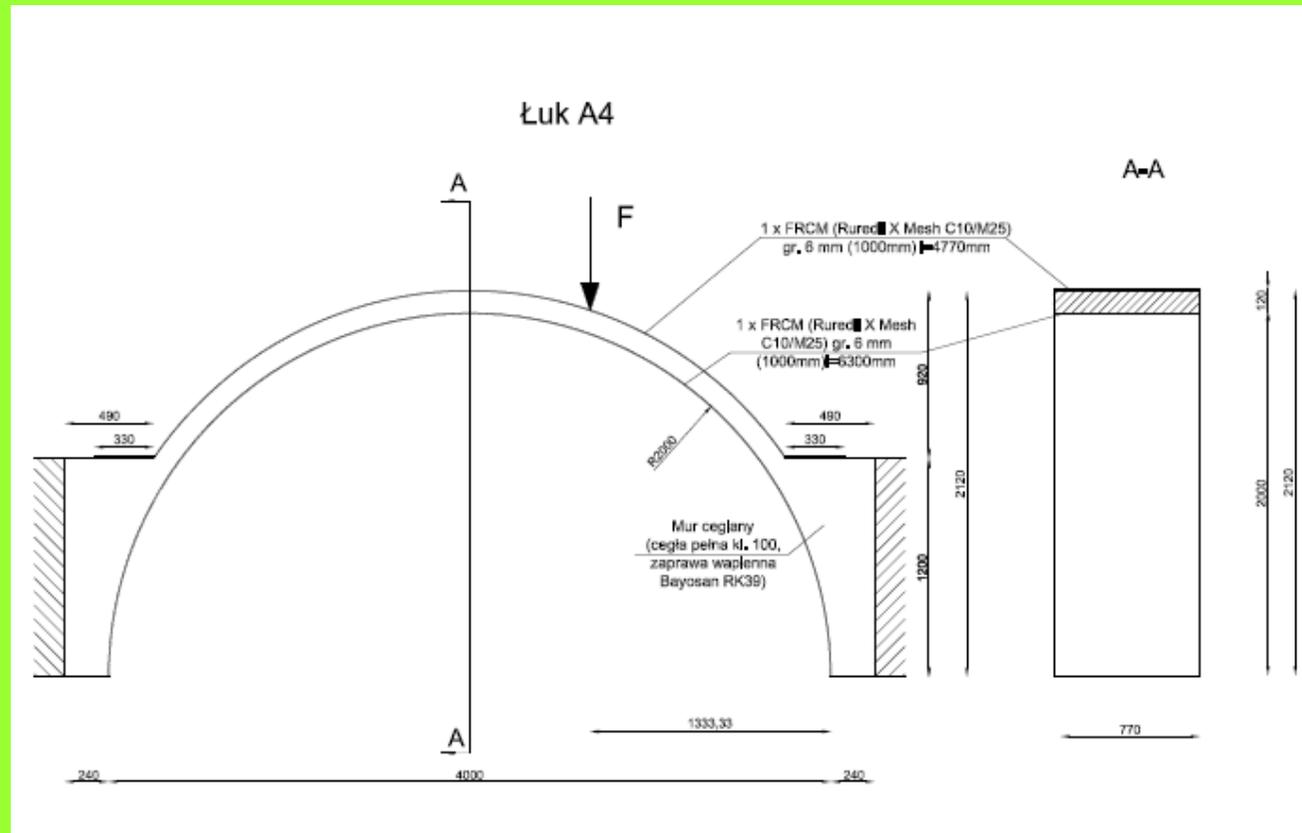
Skala wielkości modelu [cm]
0 10 20 30 40 50

A1

F = 2.88 kN

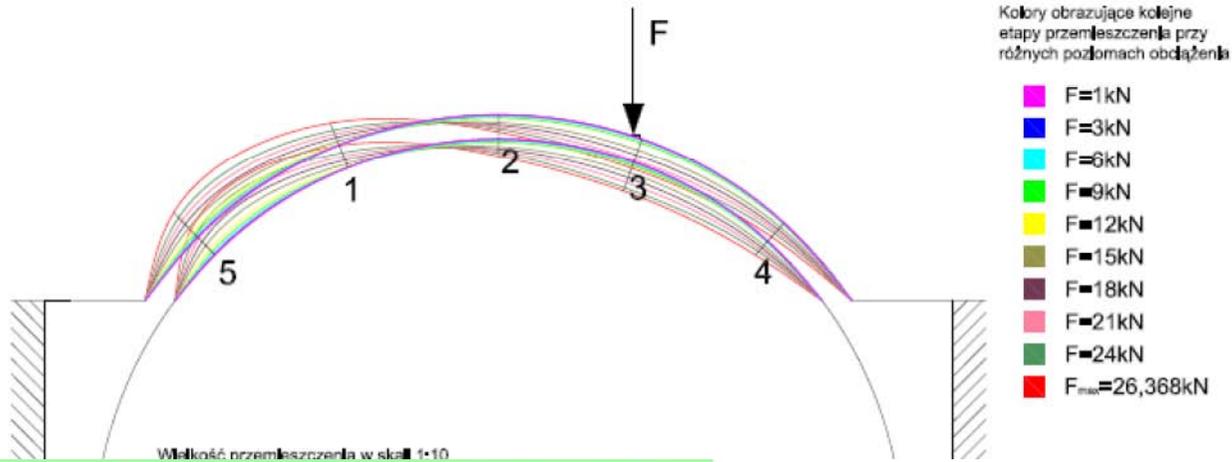


A4 FRCM in estradoss and in intrados

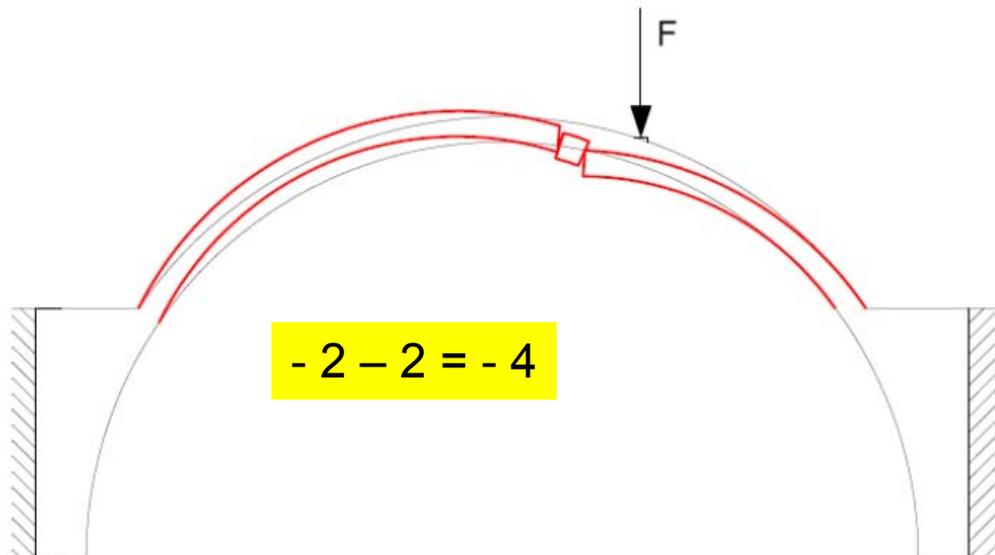


A4 FRCM in estradoss and in intrados

Łuk A4

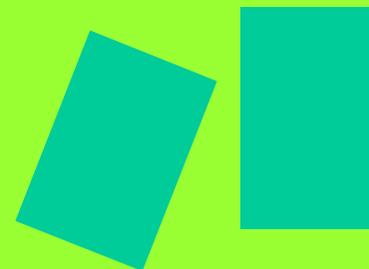


A4 FRCM in estradoss and in intrados

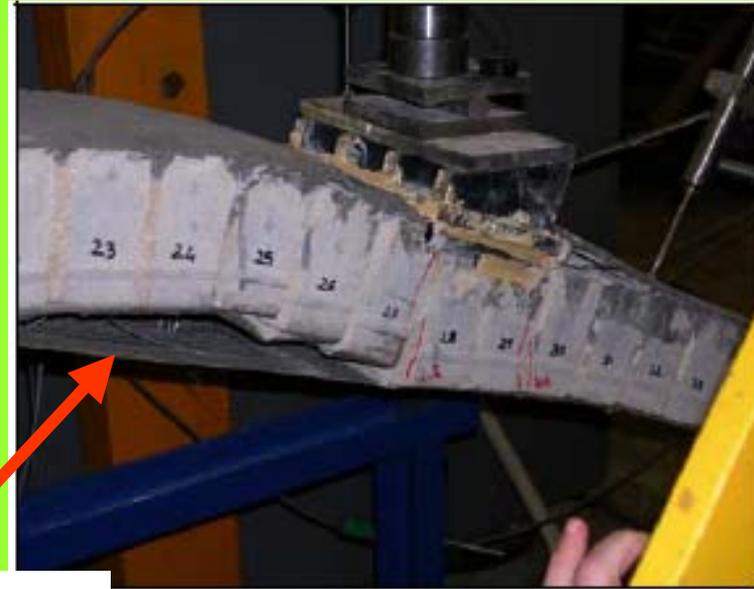
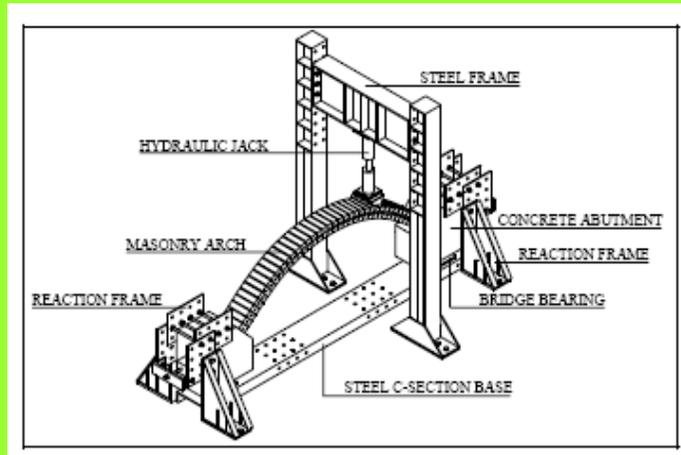


- 2 Connection

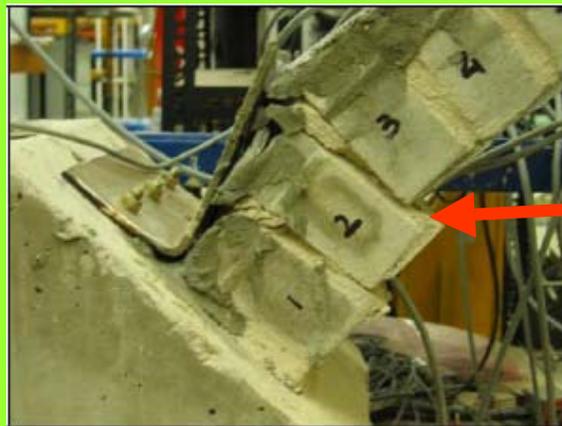
Parallel sliding + rotation



Steel-FRCM



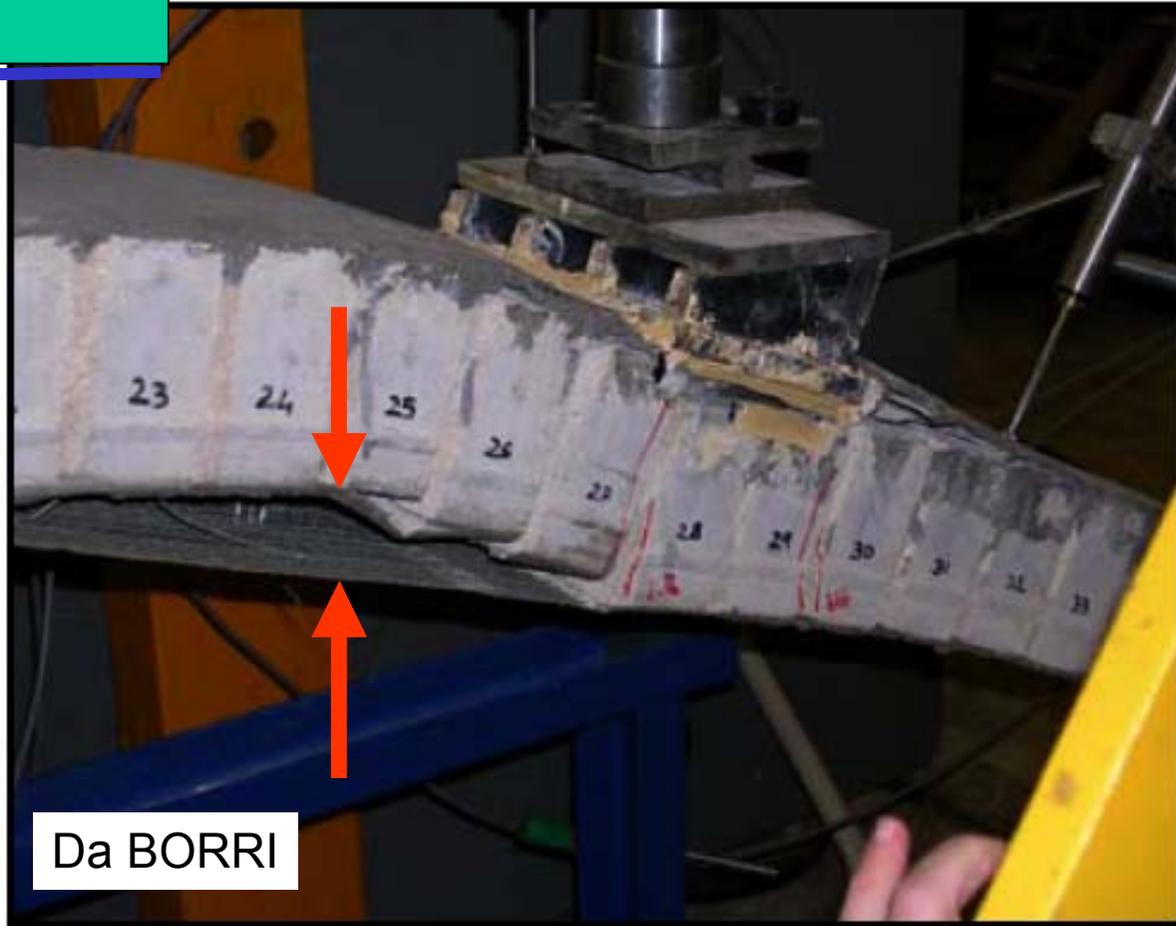
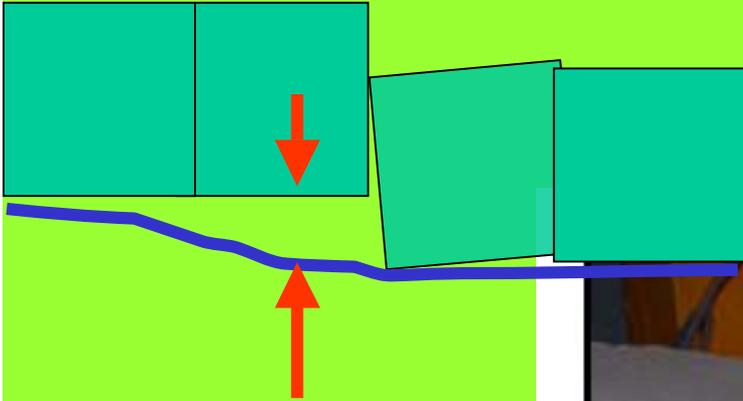
Steel net



Corrimiento por corte



debonding



Da BORRI



Carbon fibre Fabrics



PLATING VAULTS with FRCM

Fiber Reinforced Cementitious Matrix

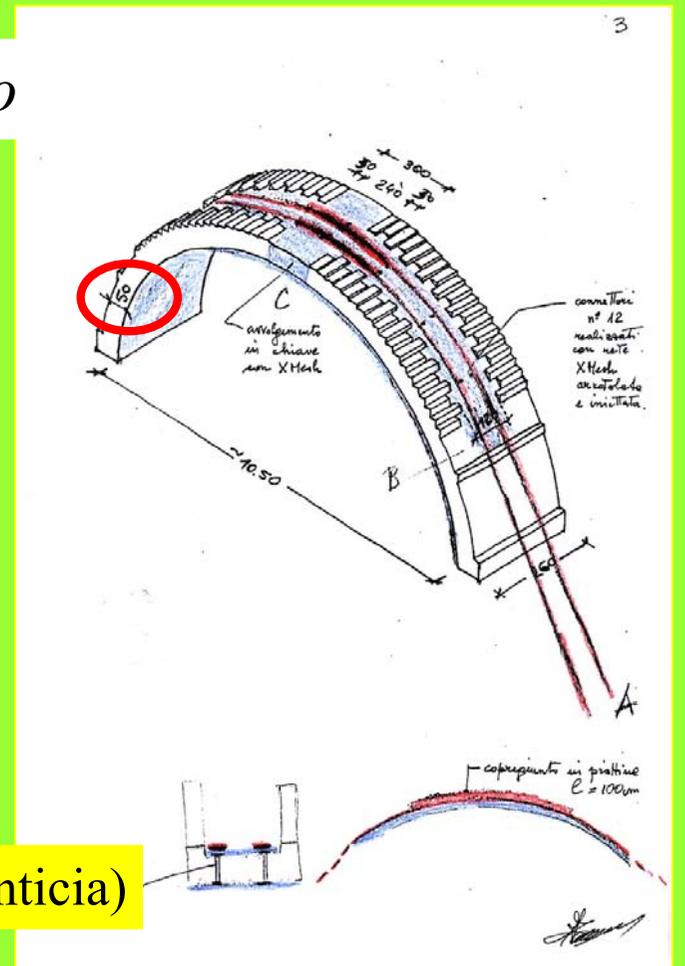
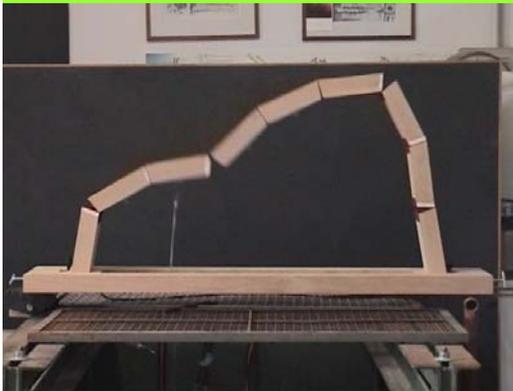




Catedral de NOTO (Sicilia): Refuerzo de NUEVOS ARCOS de la nave

Espesor original del arco 50 cm

Objetivo: inhibición de mecanismos de colapso



Piedra local + FRCM (compuestos de matriz cementicia)



SALTA Argentina

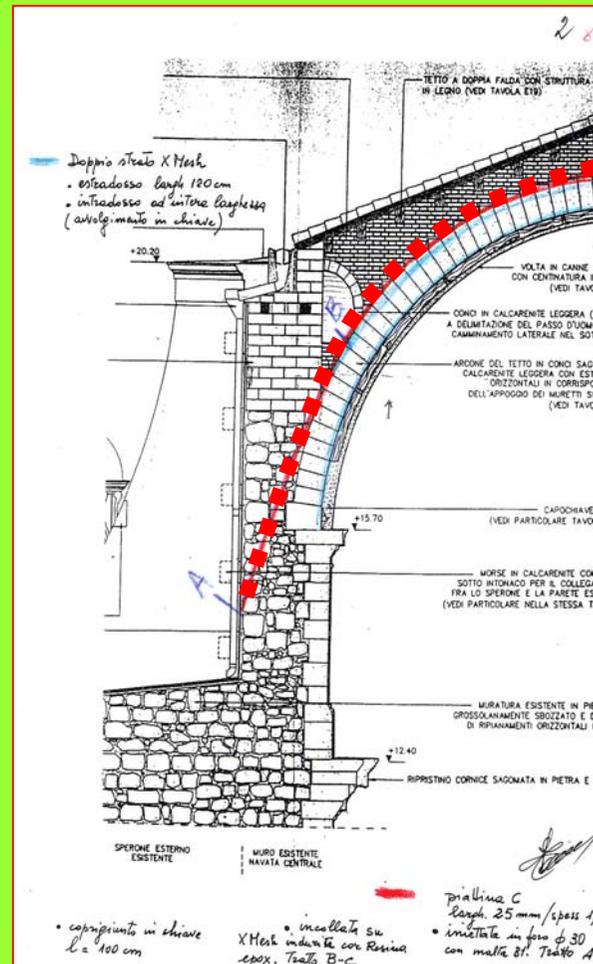
Catedral de NOTO :

Refuerzo NUEVOS ARCOS de la nave

*Recubrimiento con FRCM
(una capa)
En intrados y estrados*

+

Cinturon de lamina FRP



BANDED MASONRY

MURATURA LISTATA



SANT JOAN BARCELONA

MURATURA LISTATA

DIFETTO: GIUNTI VERTICALI ALLINEATI



**Ss TRINITA' ABBEY -
VENOSA (POTENZA) zona fortemente sismica**



Roma



Madrid

MURATURA LISTATA DI MATTONI ARMATI DI FRCM

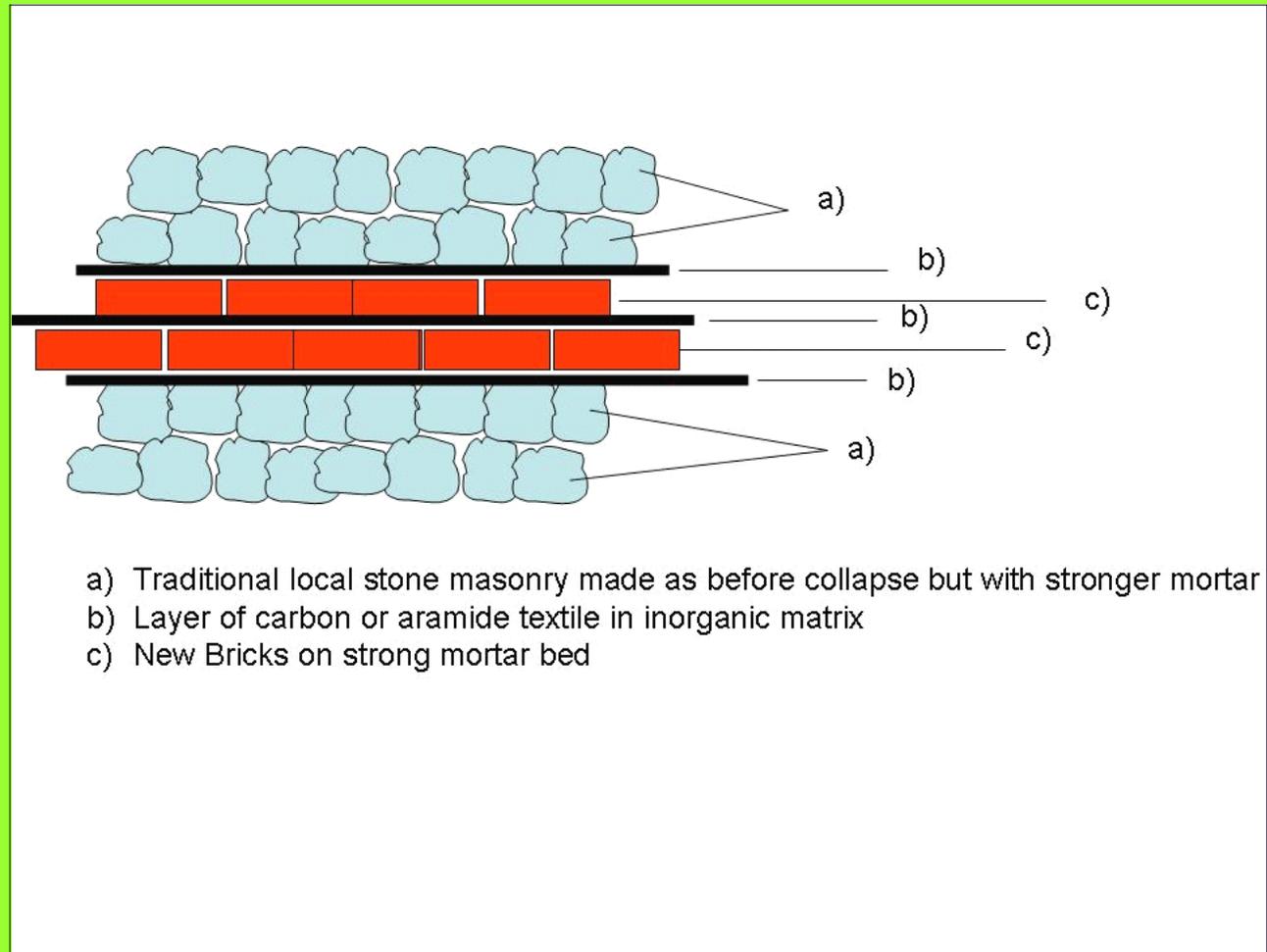


Fig 14 Proposed integrated texture for RECONSTRUCTION: FRCM reinforcing brick band at different level of new masonry



“armatura”
FRCM della
listatura

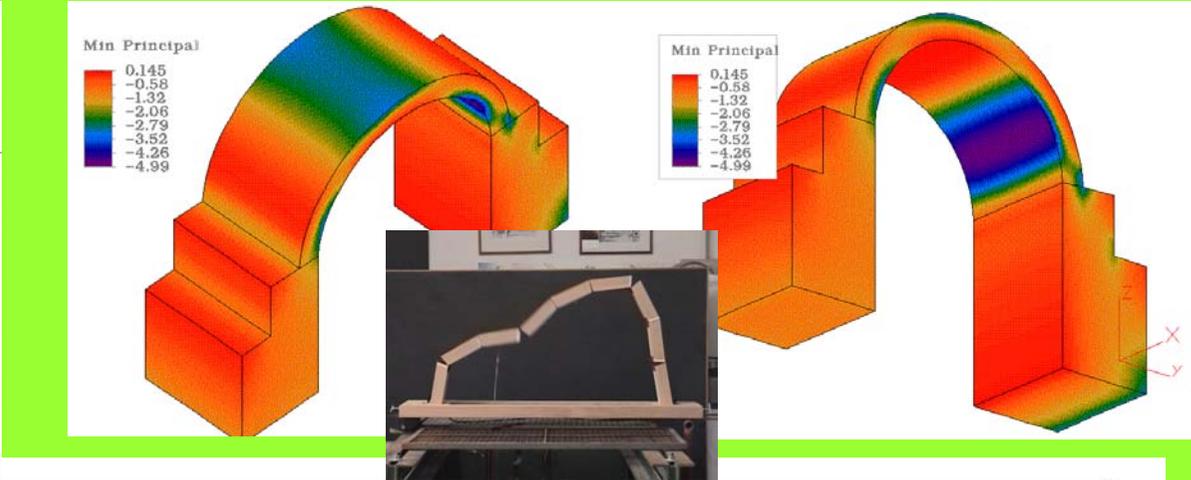
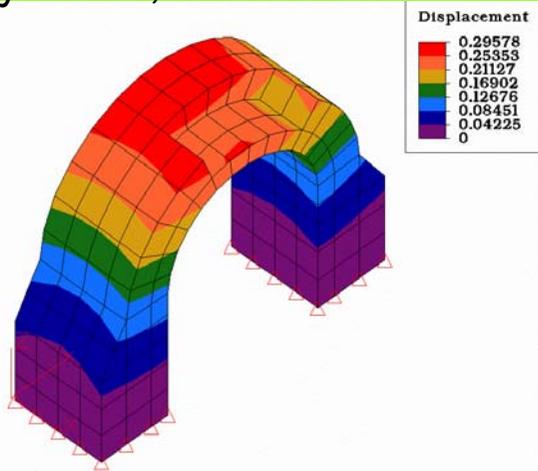
Resistenza flessionale del cordolo o listatura
in mattoni armati di composito



Da Ricerca del prof A. BORRI

Static horizontal forces (10% vertical w.)

Dynamic, II mode



Roman Arch in Rimini

FRCM plating first ring.

Cementitious matrix and reinforcing carbon net.

To contrast collapse mechanisms (15)



Re-construction of Roman Arch, ancient Rimini gate

FRCM

SM-E : arch

Bed Joint Revitalising