

Esperienze dal terremoto dell'Aquila

Prof. Gaetano Manfredi

Presidente ReLUIIS
Dipartimento di Ingegneria Strutturale
Università di Napoli Federico II
Gaetano.manfredi@unina.it

Potenza, 25 ottobre 2012



TERREMOTO DE L'AQUILA:

Il consorzio ReLUIS è stato coinvolto nelle attività di emergenza post-terremoto come centro di competenza del DPC. In particolare, :

Verifiche di agibilità su edilizia pubblica

A partire **dall'8 aprile** sono iniziate le verifiche di agibilità che hanno coinvolto circa 680 squadre per un totale di 2000 giorni/uomo

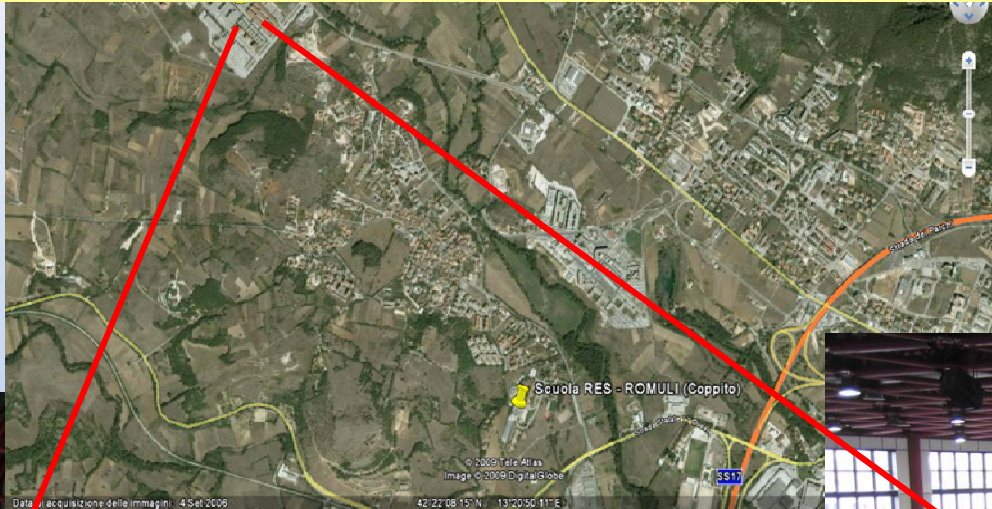
Rilievo del danno di edifici monumentali

A partire **dal 14 aprile** sono iniziate verifiche di agibilità che hanno coinvolto circa 500 squadre per un totale di 1400 giorni/uomo

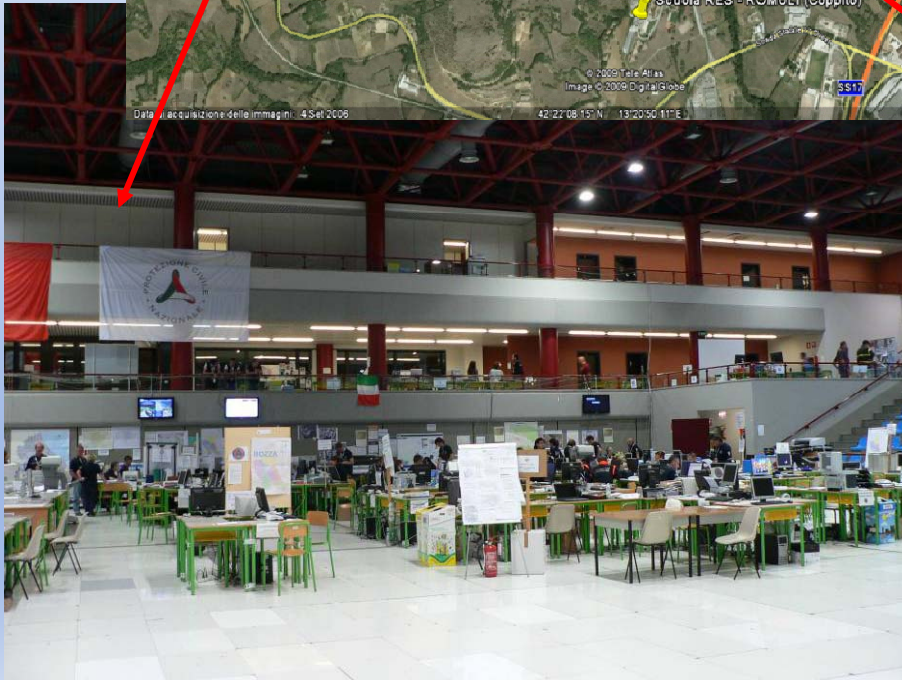
Supporto funzione idro-geo (con AGI)

Valutazioni di agibilità

Struttura di coordinamento ReLUIS operativa dal 07.06.09
ore 7.00 (30 ore post-sisma)



**DICOMAC e REISS
ROMOLI
a COPPITO, AQ**



Valutazioni di agibilità

No. di ispezioni fino al 23.07.09

65 000 edifici esaminati

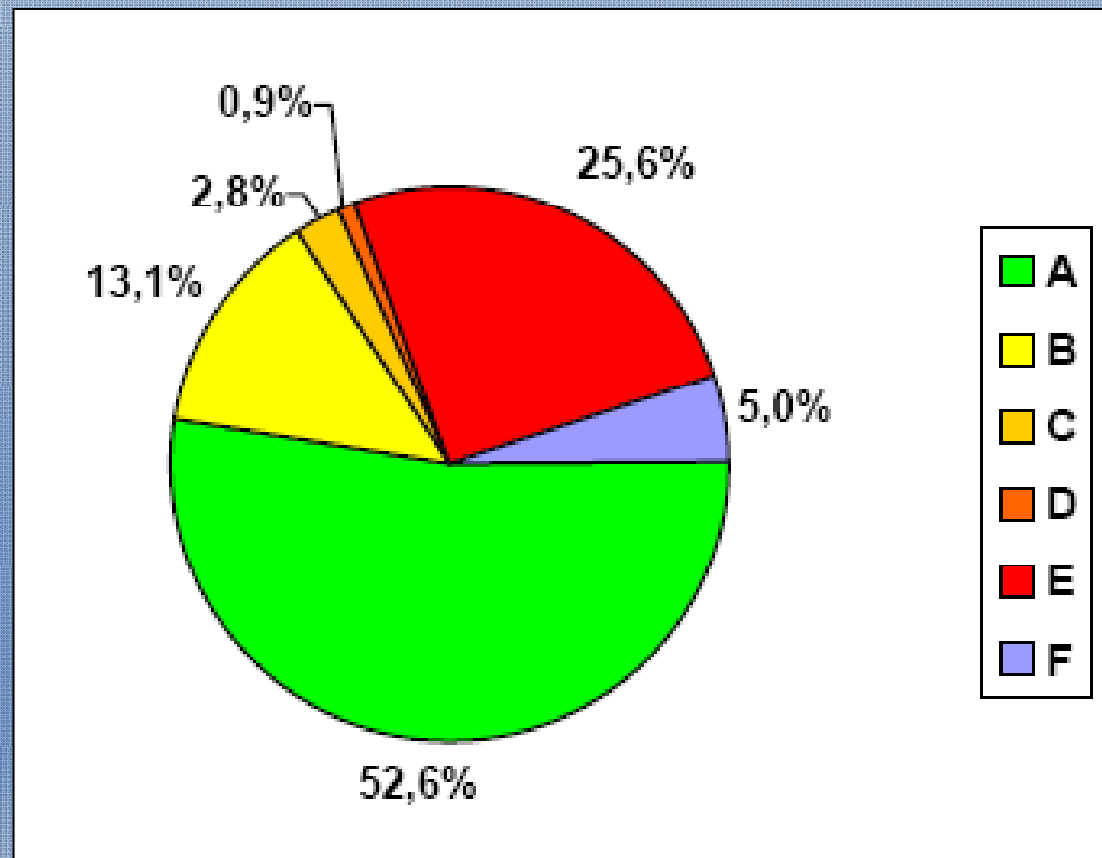
7 Aprile

26 Luglio



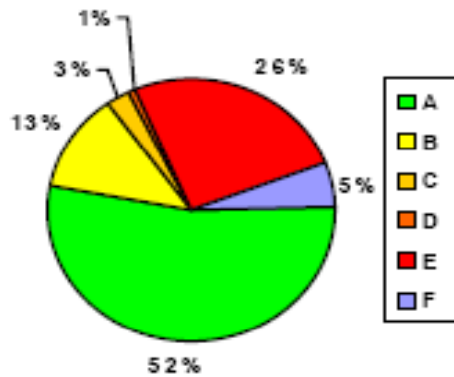
Statistiche

PRIVATI	PUBBLICI	OSPEDALI	CASERME	SCUOLE	ATT_PROD
59061	1235	54	177	682	1743

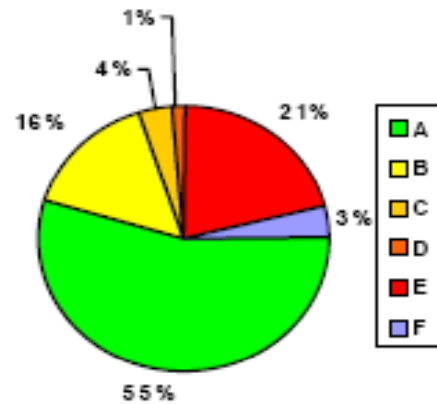


Statistics per type of use

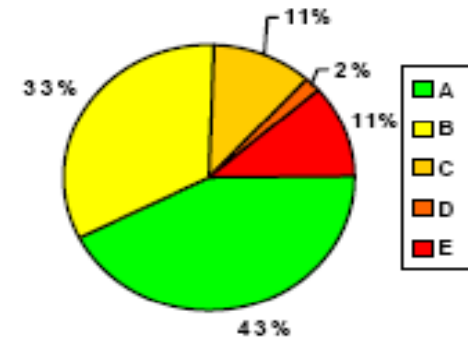
PRIVATE



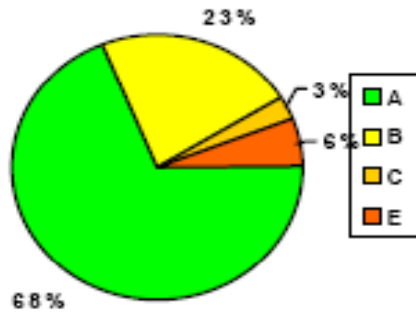
PUBLIC



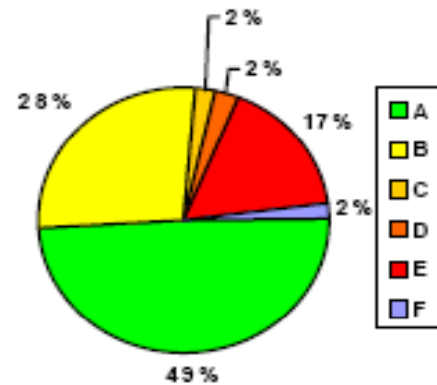
HOSPITALS



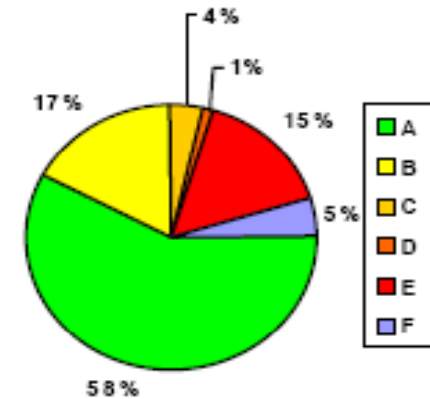
BARRACKS



SCHOOLS



PROD.ACTIVITIES



Verifiche di agibilità sulle scuole di L'Aquila

- A partire **dall'8 aprile** iniziate verifiche di agibilità su scuole di competenza comunale (da nido a medie) e provinciale (superiori) site a L'Aquila ed in provincia
- A l'Aquila visitate **53 scuole** di competenza comunale (su un totale di 54, manca solo la De Amicis parzialmente crollata) e **9 scuole** di competenza provinciale (su un totale di 16, quelle che mancano sono state schedate con scheda palazzo); in totale, **156 corpi di fabbrica**
- In termini di studenti le scuole comunali visitate ospitano circa **6,300 studenti** (su circa 7,000 totali) e quelle provinciali circa **4,000 studenti** (su circa 5,000 totali)

Esempi di danni a scuole classificate A



Scuola primaria di Monticchio a L'Aquila

Esempi di danni a scuole classificate B



Scuola primaria di Paganica a L'Aquila

Esempi di danni a scuole classificate B



Scuola primaria di Paganica a L'Aquila

Esempi di danni a scuole classificate E



Scuola materna S. Elia a L'Aquila

Verifiche di agibilità sulle scuole di L'Aquila

Sul totale di 156, i corpi A, B ed E sono 140 (i restanti 16 sono: 4 C, 4 D, 8 F)

1 piano

13% A, 6% B, 3% E (TOT: 22%)

2 piani

8% A, 12% B, 12% E (TOT: 33%)

3 piani

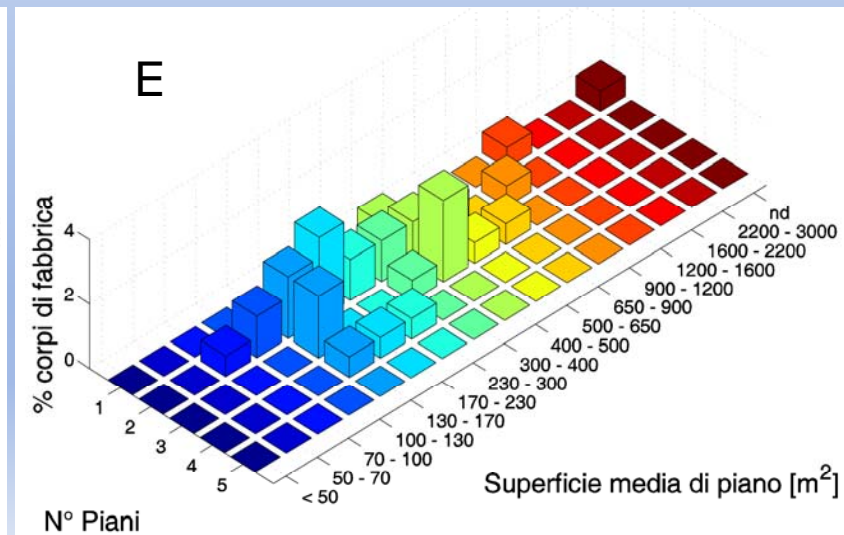
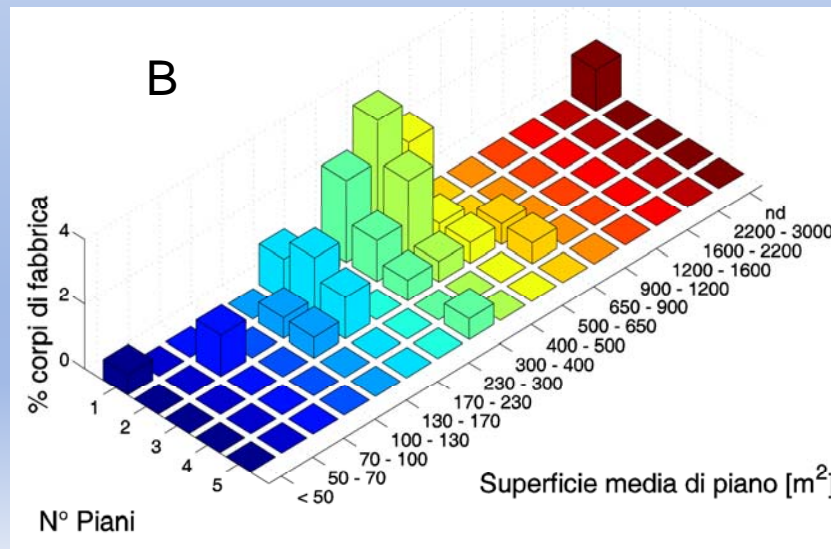
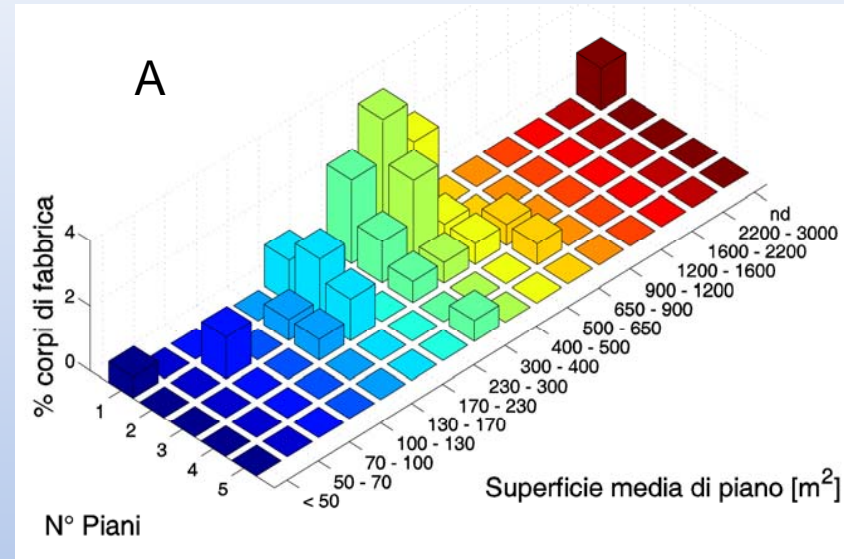
4% A, 10% B, 8% E (TOT: 23%)

4 piani

1% A, 8% B, 2% E (TOT: 10%)

5 piani

1% A, 1% B, 0% E (TOT: 2%)





La ricostruzione

Classificazione degli Interventi sugli edifici esistenti

Si individuano le seguenti categorie di intervento:

✓ **interventi di adeguamento sismico**

atti a conseguire i livelli di sicurezza previsti dalle norme;

✓ **interventi di miglioramento sismico**

atti ad aumentare la sicurezza strutturale esistente, pur senza necessariamente raggiungere i livelli richiesti dalle presenti norme;

✓ **riparazioni o rafforzamenti locali**

che interessino elementi isolati, e che comunque comportino miglioramento delle condizioni di sicurezza preesistenti senza variare in maniera sostanziale i rapporti di rigidità degli elementi.

Gli interventi di **adeguamento e miglioramento** devono essere sottoposti a **collaudo statico**.

RICOSTRUZIONE DELL'EDILIZIA PRIVATA

Tre categorie di intervento sono state pianificate in relazione ai risultati delle verifiche di agibilità:

1. Riparazione con un rimborso a forfait pari a 10000+2500 €/unità abitativa per edifici agibili tipo "A"
2. Riparazione completa + **rafforzamento locale (di elementi strutturali e non strutturali)** con 150-250€/sqm per edifici "B", "C" e per edifici "E" con estesi danni non strutturali e modesti danni strutturali
3. Riparazione completa + **miglioramento sismico** con 400-600 €/sqm per edifici "E" buildings con estesi danni strutturali
4. Ricostruzione o sostituzione di edifici crollati o non recuperabili
5. Norme speciali per i centri storici

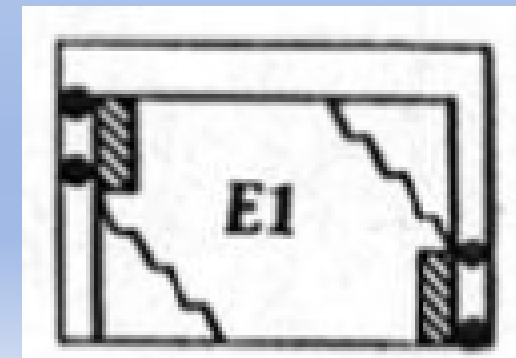
Danni agli elementi non strutturali: le tamponature



Danni agli elementi non strutturali: le tamponature

Tipica rottura per lo schiacciamento della tamponatura in prossimità degli angoli dove è applicata direttamente la pressione di contatto.

Si osserva anche la fessura diagonale in testa al pilastro



I nodi trave-colonna



Assenza di staffe nel nodo

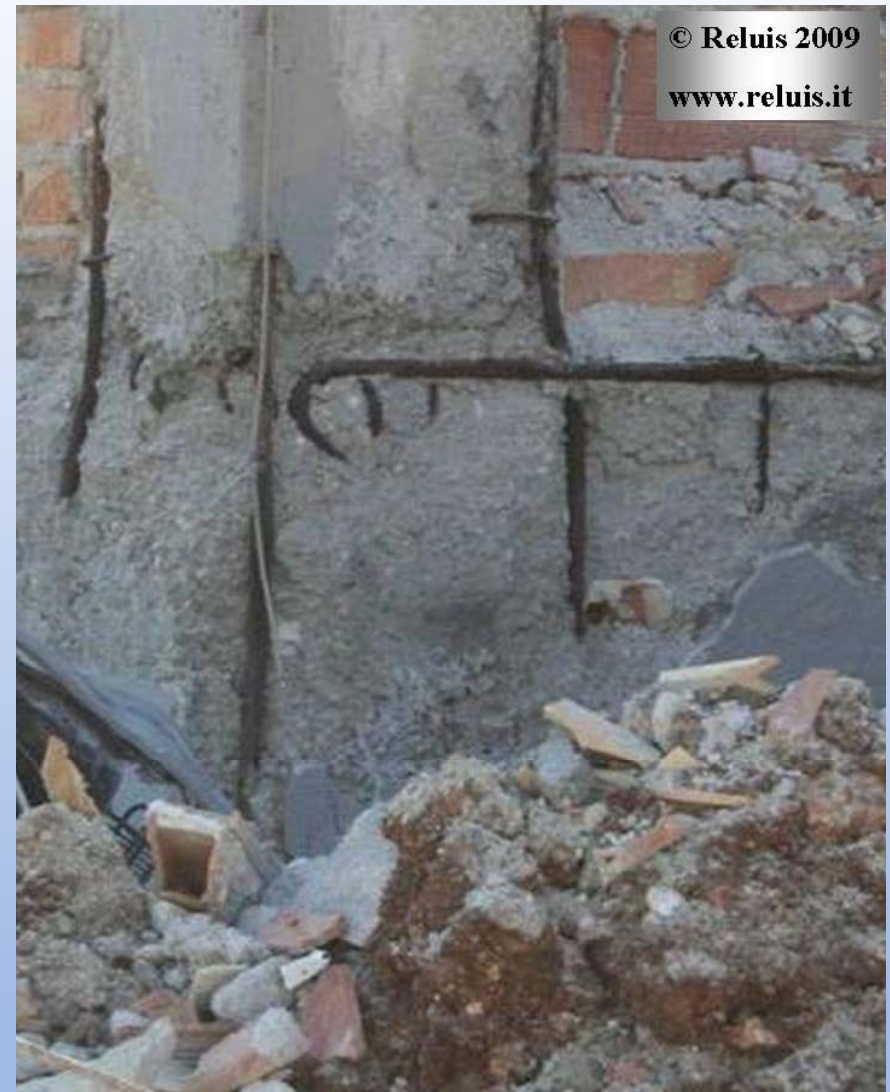


Instabilità armatura pilastro passante nel nodo

I nodi trave-colonna



Assenza di staffe nel nodo



Scarsa qualità del calcestruzzo

I nodi trave-colonna



Indice

1. Introduzione
2. Interventi strutturali (di riparazione o intervento locale)
 - 2.1. Strutture in c.a.
 - 2.1.1. Interventi sui nodi trave-pilastro esterni
 - 2.1.2. Interventi di rafforzamento locale per carichi verticali
 - 2.2. Strutture in muratura
 - 2.2.1. Interventi di prevenzione dei meccanismi fuori dal piano
 - 2.2.2. Interventi di riparazione delle lesioni
 - 2.2.3. Interventi di rafforzamento locale di elementi inflessi per carichi verticali
3. Interventi non strutturali
 - 3.1. Tamponature
 - 3.1.1. Interventi di collegamento perimetrale a pilastri e travi emergenti
 - 3.1.2. Interventi di collegamento perimetrale a pilastri e travi a spessore
 - 3.1.3. Interventi di collegamento trasversale delle tamponature a doppia fodera
 - 3.1.4. Interventi con rete per prevenire rotture fragili
 - 3.1.5. Interventi di riparazione delle lesioni
 - 3.1.6. Interventi di sostituzione o ricostruzione delle tamponature
 - 3.4. Tramezzature
 - 3.4.1. Intervento di collegamento perimetrale a pilastri e travi/solai
 - 3.4.2. Intervento con rete per prevenire rotture fragili
 - 3.4.3. Interventi di sostituzione o ricostruzione delle tramezzature
 - 3.5. Altri elementi non strutturali e arredi potenzialmente pericolosi in caso di caduta
 - 3.5.1. Controsoffitti
 - 3.5.2. Aggetti
 - 3.5.3. Componenti pensili (riferimento a Linee Guida Consiglio Superiore)
4. APPENDICE – LLGG CSLPP x intesa

LINEE GUIDA PER LA RIPARAZIONE E IL RAFFORZAMENTO DI ELEMENTI STRUTTURALI, TAMPONATURE E PARTIZIONI

Dipartimento Protezione Civile

ReLUIS



BOZZA - AGOSTO 2009

Il testo e gli schemi riportati in questo documento vogliono costituire un supporto al tecnico che debba affrontare il delicato problema del rafforzamento locale antisismico di elementi strutturali e non strutturali a seguito del terremoto del 6 aprile 2009.

Data l'urgenza del problema, a seguito dell'emanazione delle OPCM 3779 e 3790, si è ritenuto di pubblicare il presente documento anche nell'attuale forma di bozza, fermo restando che il singolo progettista si assume la piena responsabilità del progetto e dei dettagli costruttivi, anche se ripresi da questo documento.

www.reluis.it

Scopo delle Linee Guida

Nell'ambito degli interventi previsti dagli Indirizzi, le presenti linee guida presentano possibili soluzioni per l'esecuzione di interventi ricadenti nelle seguenti categorie:

- **riparazione di elementi non strutturali danneggiati** (A.1 negli Indirizzi);
- **riparazione locale di elementi strutturali** (A.4 negli Indirizzi);
- **interventi su tamponature e paramenti esterni** non danneggiati volti a prevenire crolli pericolosi per l'incolumità delle persone (B.1 negli Indirizzi);
- **interventi di rafforzamento locale** di singole parti e/o elementi di strutture in cemento armato e muratura, ai sensi dell'art. 8.4.3 del DM 14.01.08 e della relativa Circolare n. 617 del 2 febbraio 2009 (B.2 negli Indirizzi).

Gruppo di lavoro

Mauro Dolce, Giacomo Di Pasquale,
Claudio Moroni



Gaetano Manfredi, Andrea Prota,
Alberto Balsamo e Ivano Iovinella



Indice

1. **Scopo delle linee guida**
2. **Introduzione**
- 2.1. **Danni ai nodi di strutture in c.a.**
- 2.2. **Danni a strutture in muratura**
- 2.3. **Danni alle tamponature di strutture in c.a.**
- 2.4. **Danni alle partizioni**
3. **Interventi strutturali (di riparazione o intervento locale)**
- 3.1. **Strutture in c.a.**
- 3.1.1. **Criteri per il progetto del rafforzamento locale di nodi non confinati**
- 3.1.2. **Note per il ripristino e la preparazione dei supporti**
- 3.1.3. **Lavorazioni esecutive per intervento con materiali compositi**
- 3.1.4. **Lavorazioni esecutive per intervento con incamiciatura in acciaio**
- 3.2. **Strutture in muratura**
- 3.2.1. **Incatenamenti**
- 3.2.2. **Intervento di scuci e cucì**
- 3.2.3. **Lavorazioni esecutive per intervento di scuci e cucì**
- 3.2.4. **Intervento di sarcitura delle lesioni**
- 3.2.5. **Intervento di ristilatura dei giunti**
- 3.3. **Interventi di rafforzamento locale per carichi verticali**
- 3.3.1. **Interventi di rafforzamento locale di travi e solai in c.a.**
- 3.3.2. **Interventi di rafforzamento locale di travi e solai in legno**

Indice

- 4. Interventi non strutturali**
- 4.1. Tamponature**
- 4.1.1. Interventi di collegamento perimetrale a pilastri e travi emergenti**
- 4.1.2. Interventi di collegamento perimetrale a pilastri e travi a spessore**
- 4.1.3. Lavorazioni per intervento di collegamento perimetrale (travi emergenti)**
- 4.1.4. Lavorazioni per intervento di collegamento perimetrale (travi a spessore)**
- 4.1.5. Interventi di collegamento trasversale delle tamponature a doppia fodera**
- 4.2. Partizioni**
- 4.2.1. Intervento di collegamento perimetrale a pilastri e travi/solai**
- 4.2.2. Lavorazioni per interventi di collegamento perimetrale a pilastri e travi/solai**
- 4.2.3. Intervento con rete per prevenire rotture fragili**
- 4.2.4. Lavorazioni esecutive per intervento con rete per prevenire rotture fragili**
- 5. Riferimenti tecnici**
- 6. Gruppo di Lavoro**
- 7. Appendice A: Cause di degrado di elementi in legno**

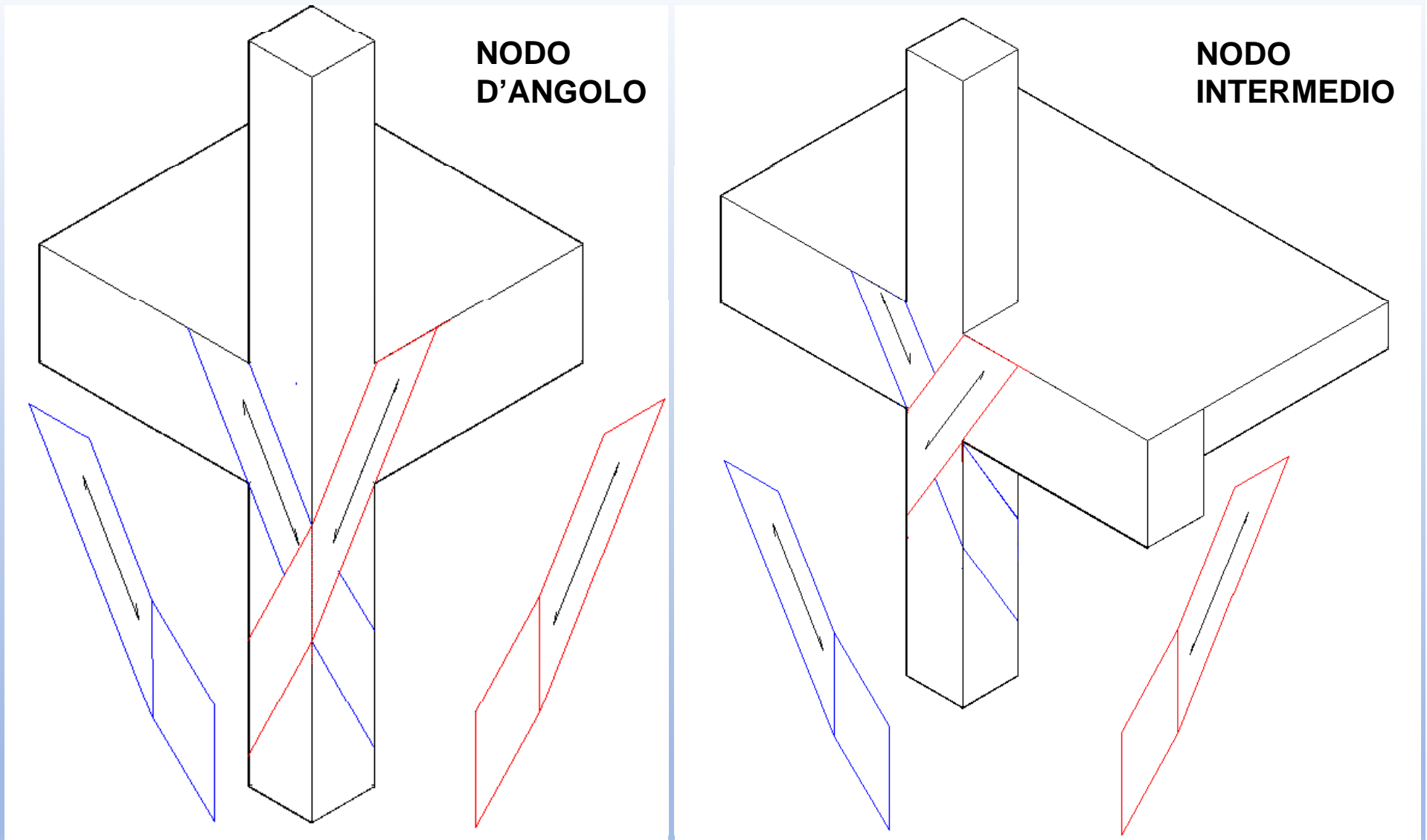
Indice

1. Scopo delle linee guida
2. Introduzione
 - 2.1. Danni ai nodi di strutture in c.a.
 - 2.2. Danni a strutture in muratura
 - 2.3. Danni alle tamponature di strutture in c.a.
 - 2.4. Danni alle partizioni
3. **Interventi strutturali** (di riparazione o intervento locale)
 - 3.1. **Strutture in c.a.**
 - 3.1.1. Criteri per il progetto del rafforzamento locale di nodi non confinati
 - 3.1.2. Note per il ripristino e la preparazione dei supporti
 - 3.1.3. Lavorazioni esecutive per intervento con **materiali compositi**
 - 3.1.4. Lavorazioni esecutive per intervento con **incamiciatura in acciaio**
 - 3.2. Strutture in muratura
 - 3.2.1. Incatenamenti
 - 3.2.2. Intervento di scuci e cucì
 - 3.2.3. Lavorazioni esecutive per intervento di scuci e cucì
 - 3.2.4. Intervento di sarcitura delle lesioni
 - 3.2.5. Intervento di ristilatura dei giunti
 - 3.3. Interventi di rafforzamento locale per carichi verticali
 - 3.3.1. Interventi di rafforzamento locale di travi e solai in c.a.
 - 3.3.2. Interventi di rafforzamento locale di travi e solai in legno

Indice

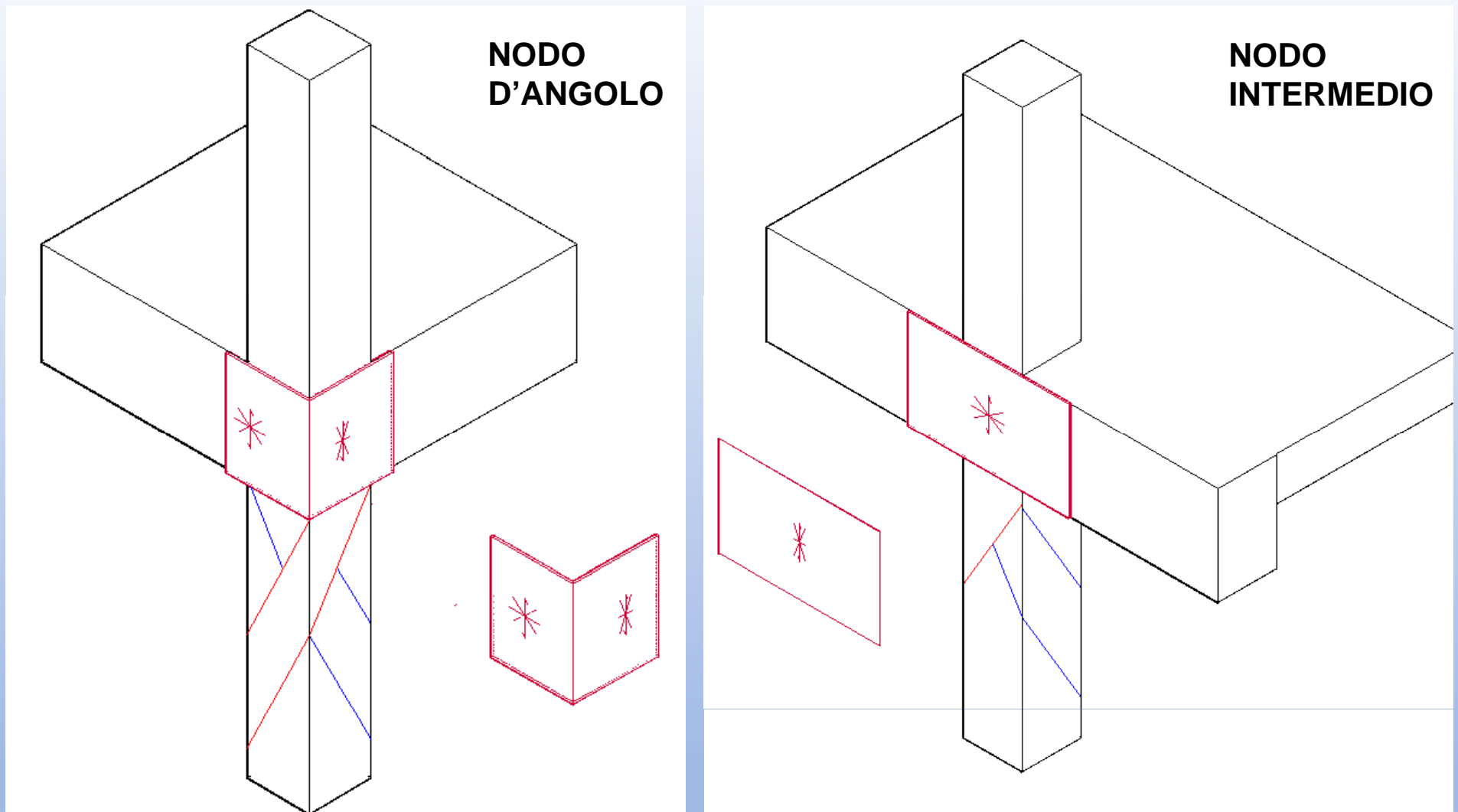
1. Introduzione
2. Interventi strutturali (di riparazione o intervento locale)
 - 2.1. Strutture in c.a.
 - 2.1.1. **Interventi sui nodi trave-pilastro esterni**
 - 2.1.2. Interventi di rafforzamento locale per carichi verticali
 - 2.2. Strutture in muratura
 - 2.2.1. Interventi di prevenzione dei meccanismi fuori dal piano
 - 2.2.2. Interventi di riparazione delle lesioni
 - 2.2.3. Interventi di rafforzamento locale di elementi inflessi per carichi verticali
3. Interventi non strutturali
 - 3.1. Tamponature
 - 3.1.1. Interventi di collegamento perimetrale a pilastri e travi emergenti
 - 3.1.2. Interventi di collegamento perimetrale a pilastri e travi a spessore
 - 3.1.3. Interventi di collegamento trasversale delle tamponature a doppia fodera

Intervento locale sui nodi trave-pilastro esterni



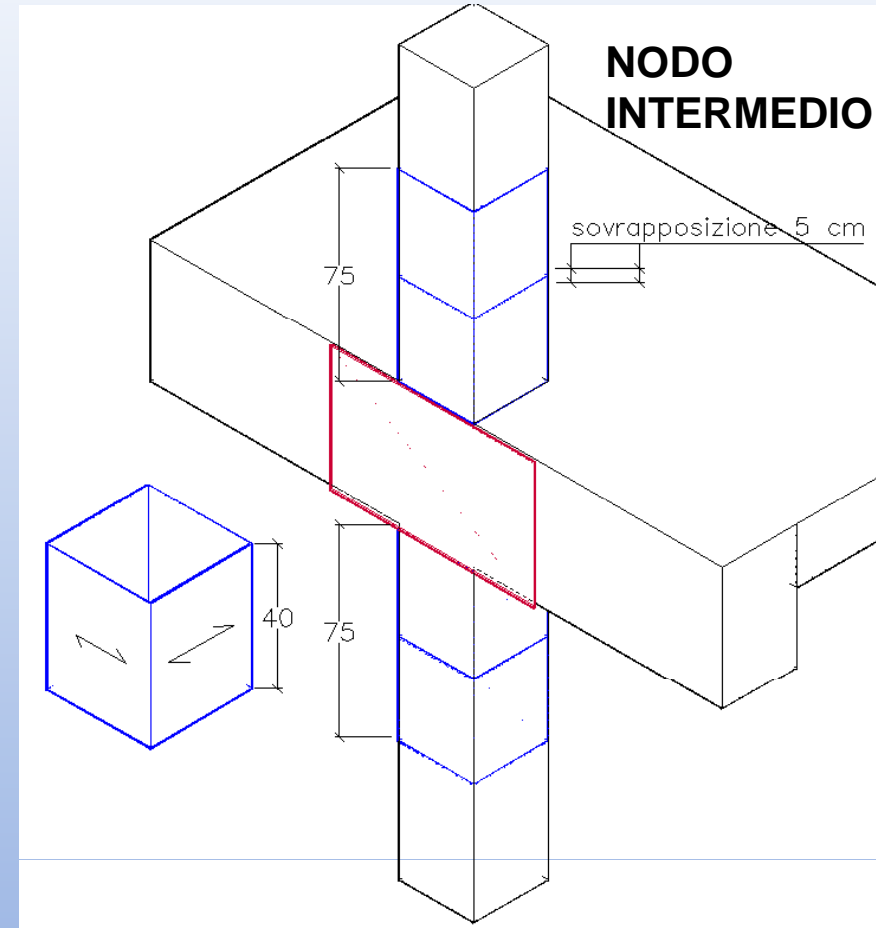
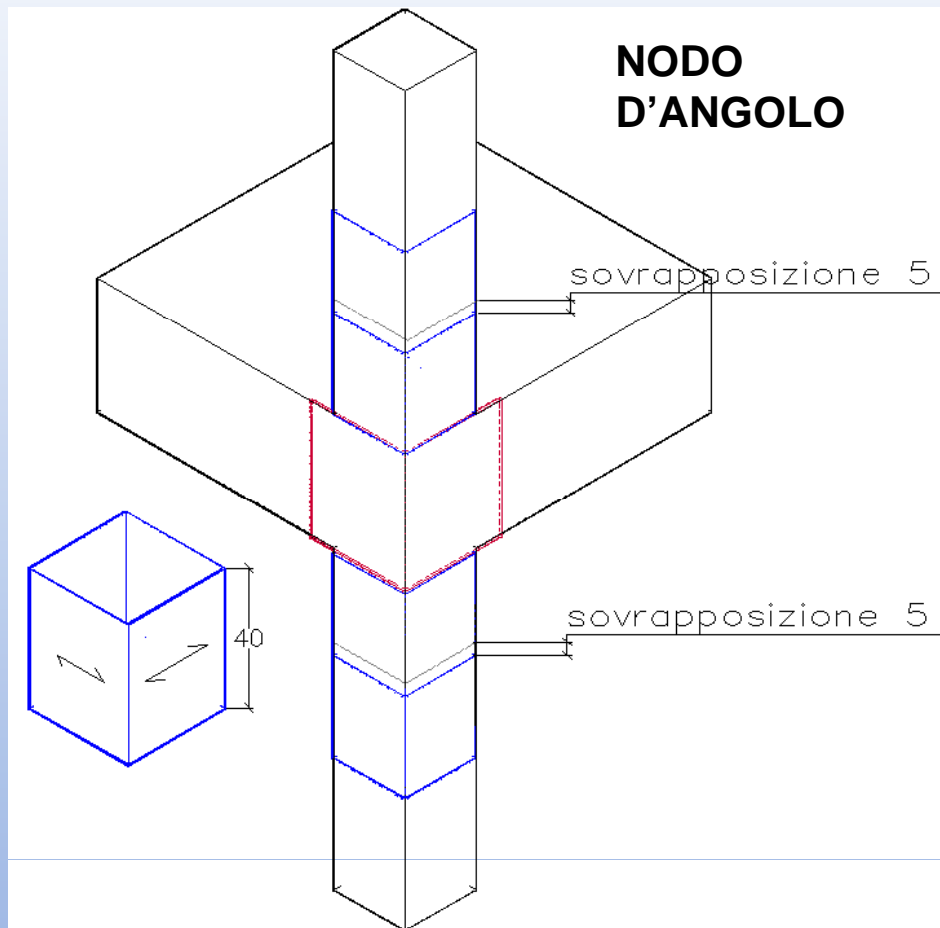
- Fasce diagonali in tessuto metallico uniassiale
- Dimensionate per assorbire azioni dovute alla tamponatura (puntone equivalente)

Intervento locale sui nodi trave-pilastro esterni



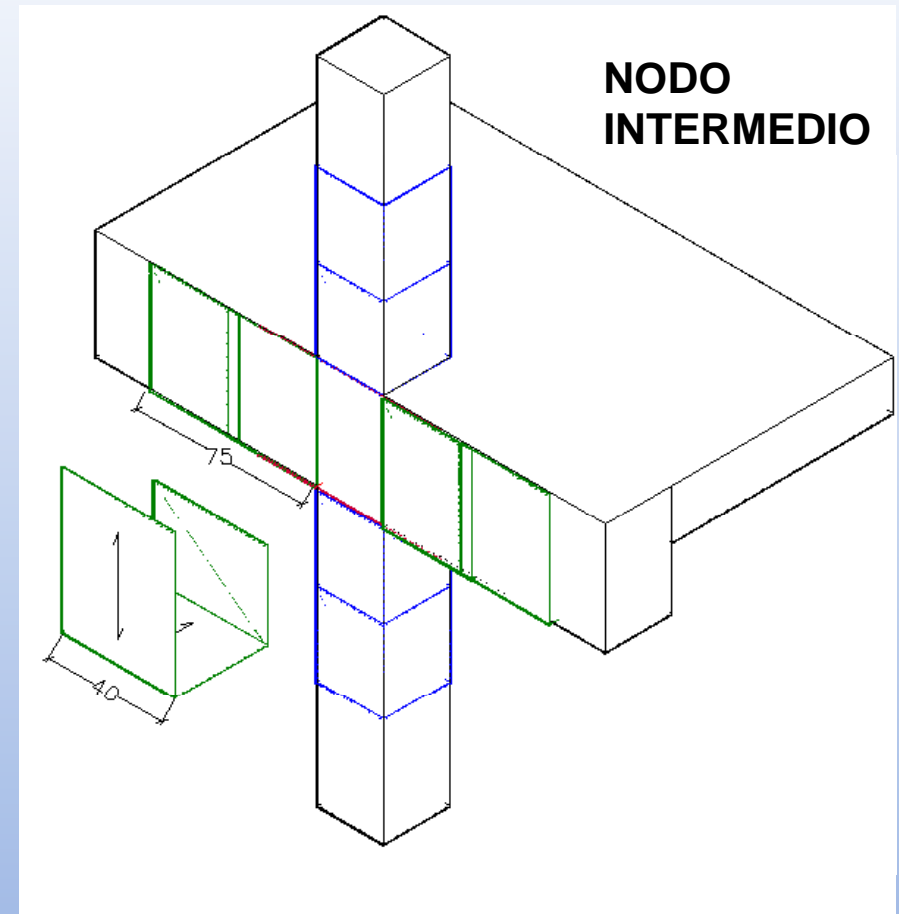
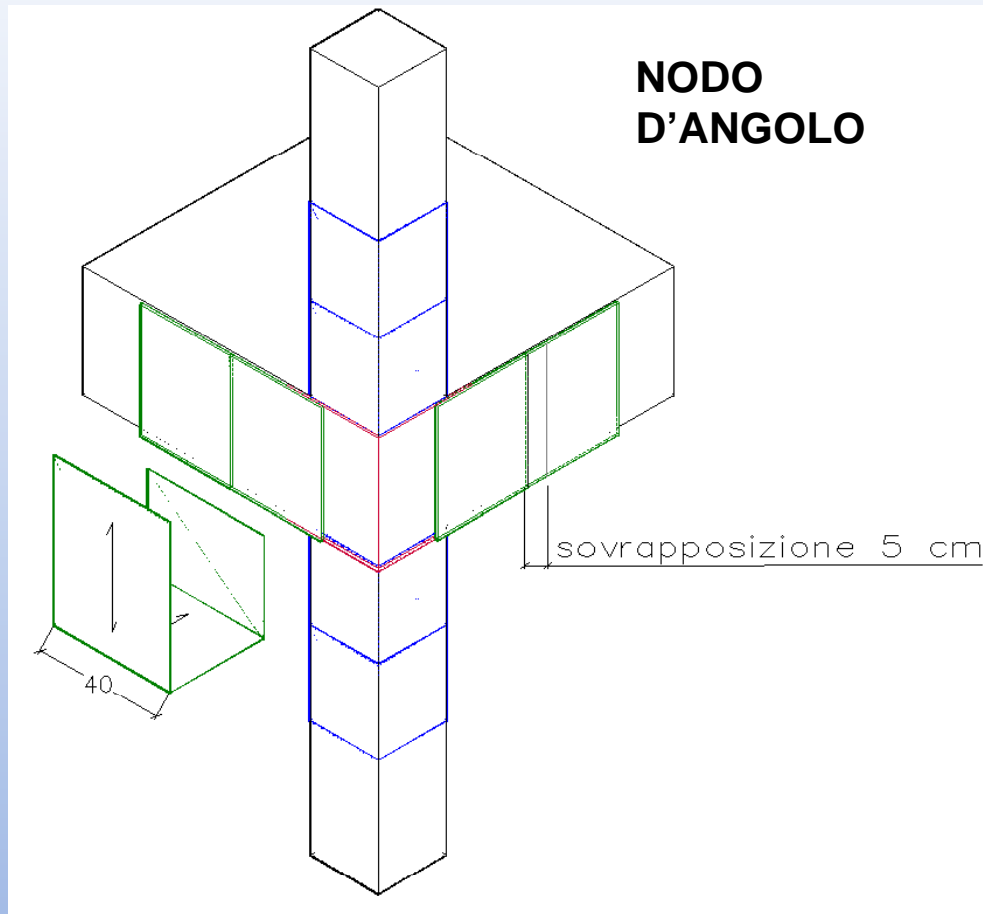
- Tessuto quadriassiale in fibra di carbonio sul pannello di nodo
- Incremento della resistenza a trazione del pannello di nodo (CNR DT 200)

Intervento locale sui nodi trave-pilastro esterni



- Confinamento estremità dei pilastri con tessuto uniassiale in fibra di carbonio
- Incremento della ε_c e quindi della curvatura della sezione (CNR DT 200)

Intervento locale sui nodi trave-pilastro esterni



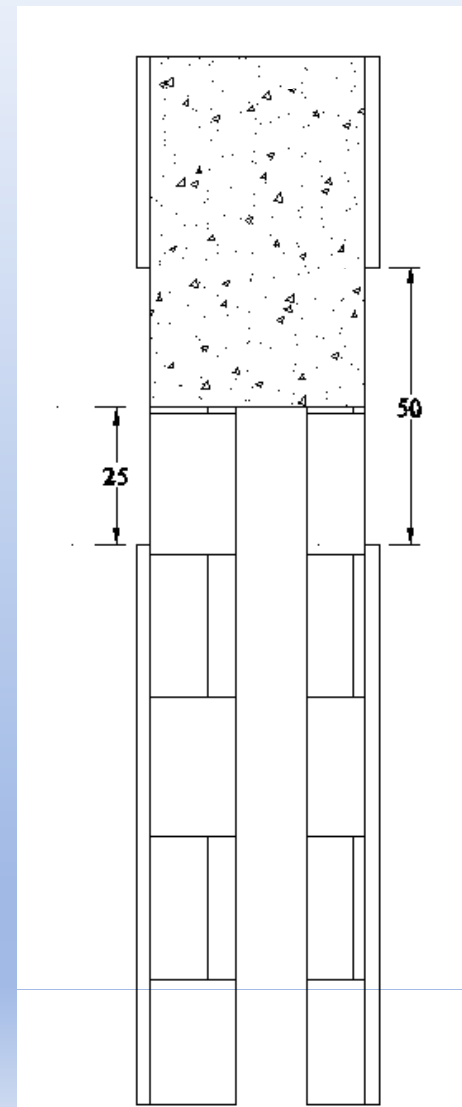
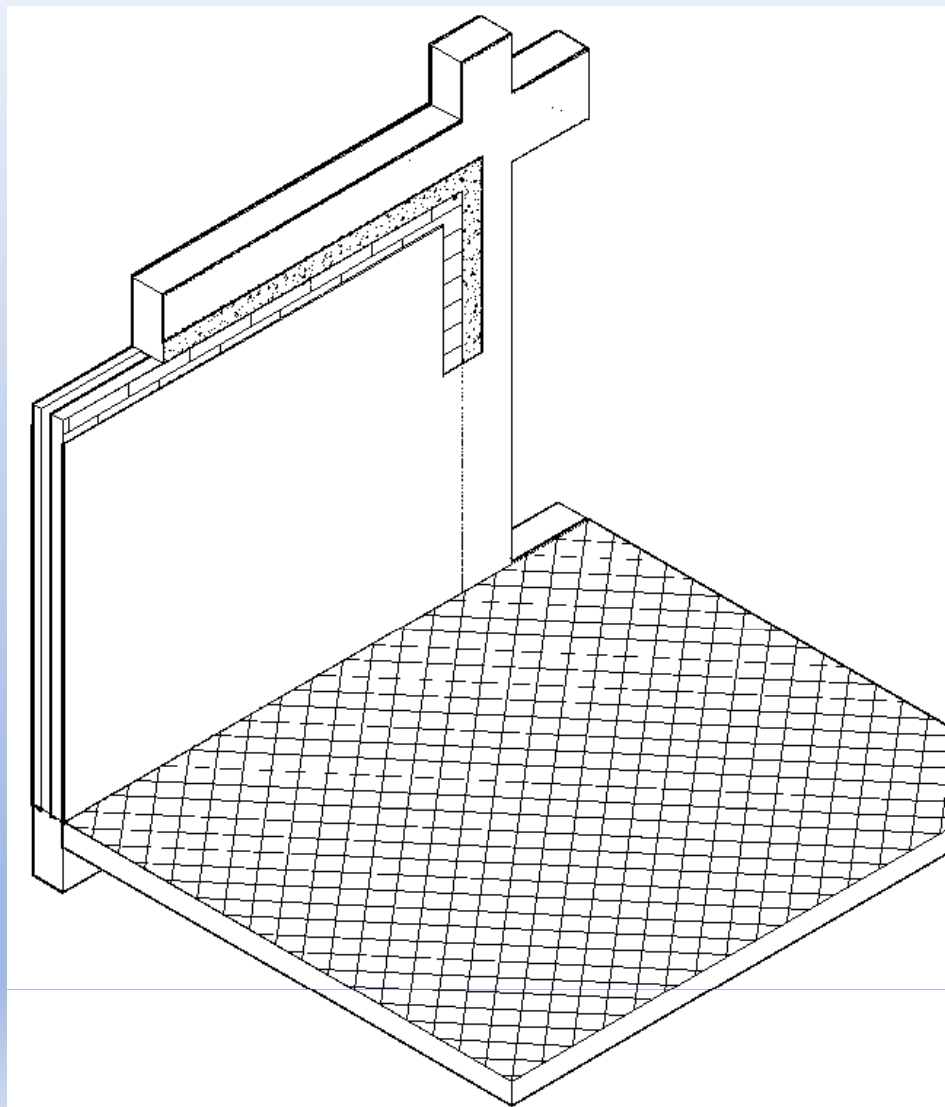
- Fasce ad U (ancoraggio tessuto pannello e rinforzo a taglio trave) in tessuto uniassiale in fibra di carbonio
- Incremento di resistenza a taglio della trave (CNR DT 200)

Indice

- 3.1.4. Interventi con rete per prevenire rotture fragili
- 3.1.5. Interventi di riparazione delle lesioni
- 3.1.6. Interventi di sostituzione o ricostruzione delle tamponature
- 3.4. Tramezzature
 - 3.4.1. **Intervento di collegamento perimetrale a pilastri e travi/solai**
 - 3.4.2. Intervento con rete per prevenire rotture fragili
 - 3.4.3. Interventi di sostituzione o ricostruzione delle tramezzature
- 3.5. Altri elementi non strutturali e arredi potenzialmente pericolosi in caso di caduta (Intesa Rep. 7/CU del 28/1/2009)
 - 3.5.1. Controsoffitti
 - 3.5.2. Aggetti
 - 3.5.3. Componenti pensili (riferimento a Linee Guida Consiglio Superiore)
- 4. APPENDICE – LLGG CSLLP x intesa

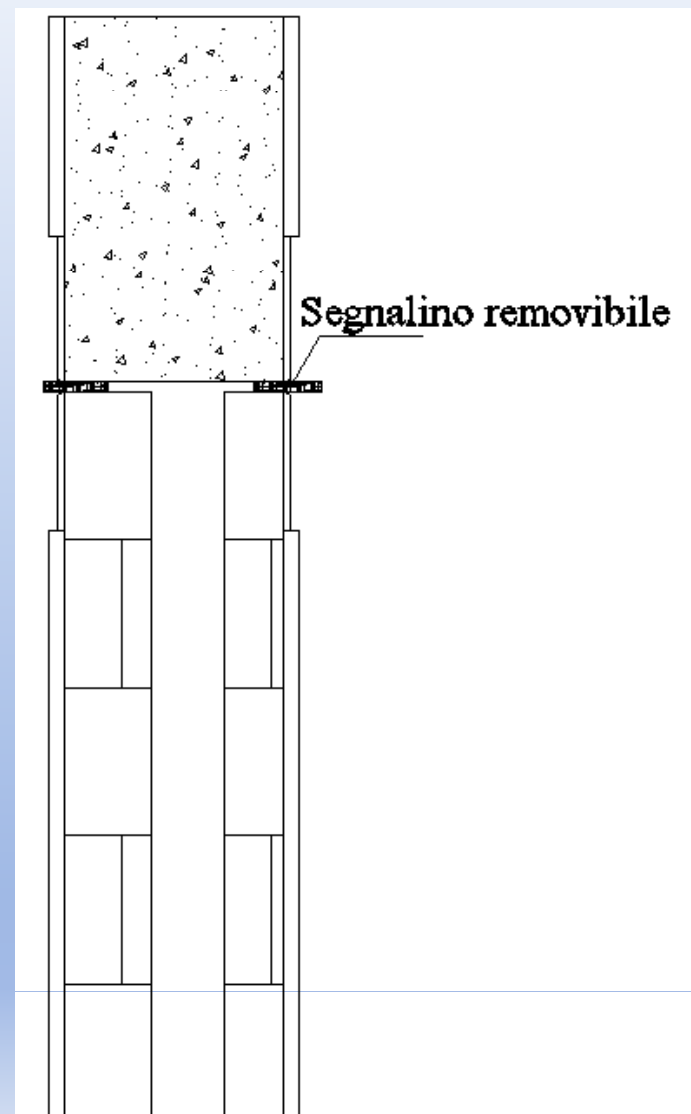
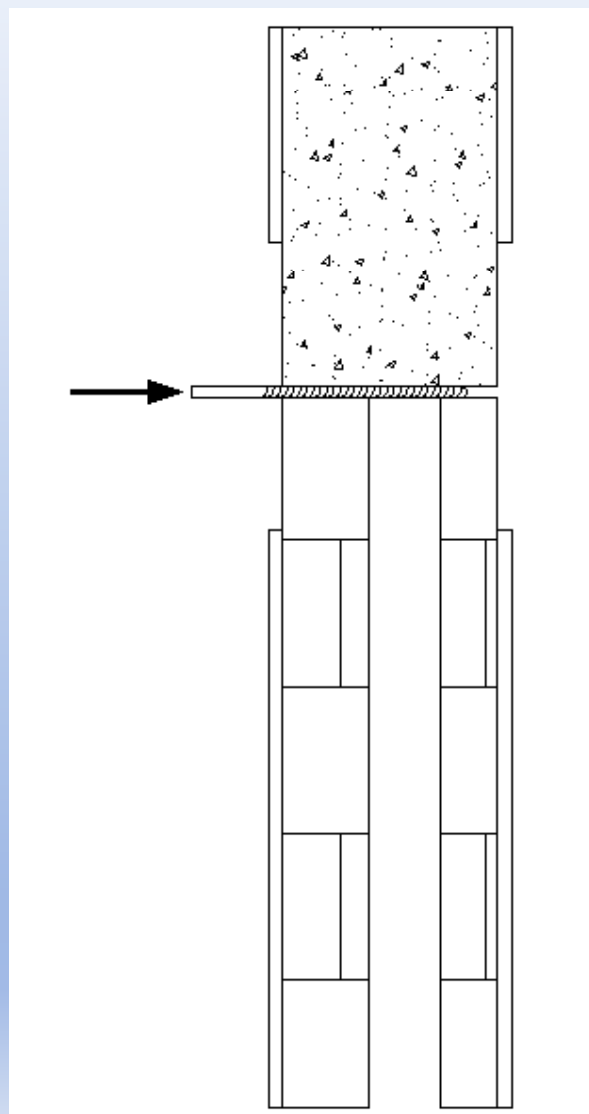
Collegamento perimetrale tamponature/tramezzature

Caso della trave emergente



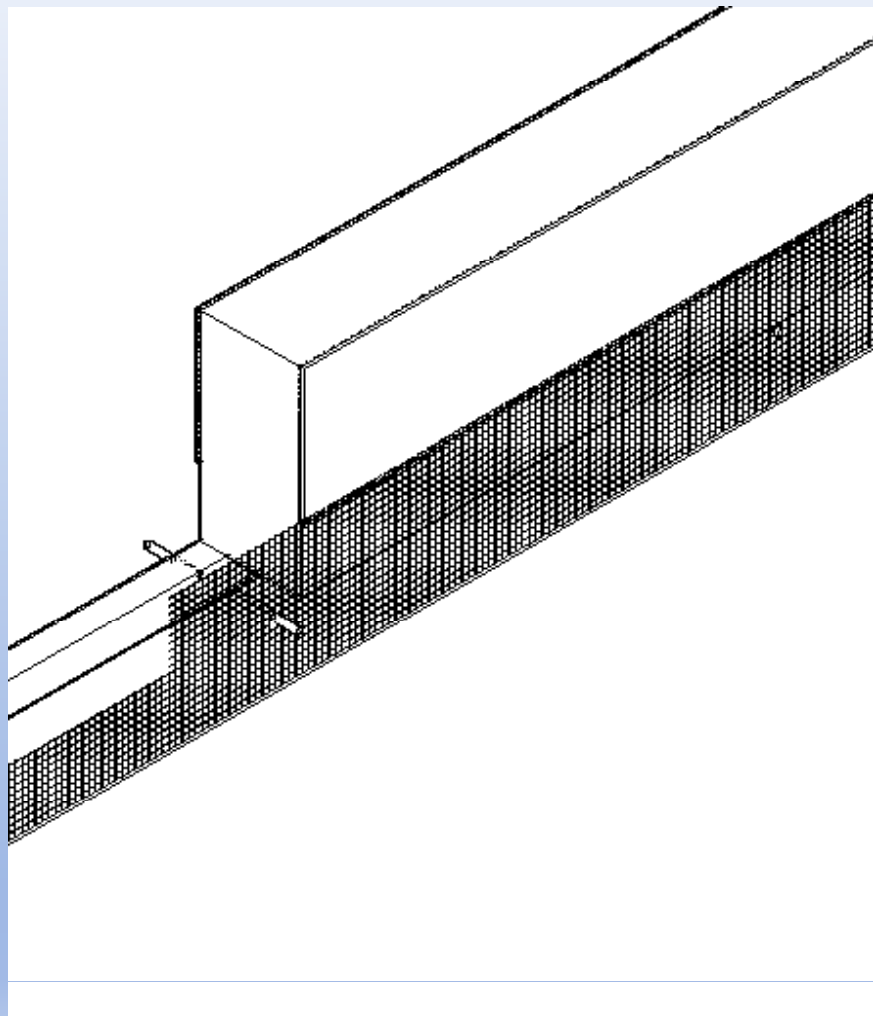
Collegamento perimetrale tamponature/tramezzature

Caso della trave emergente



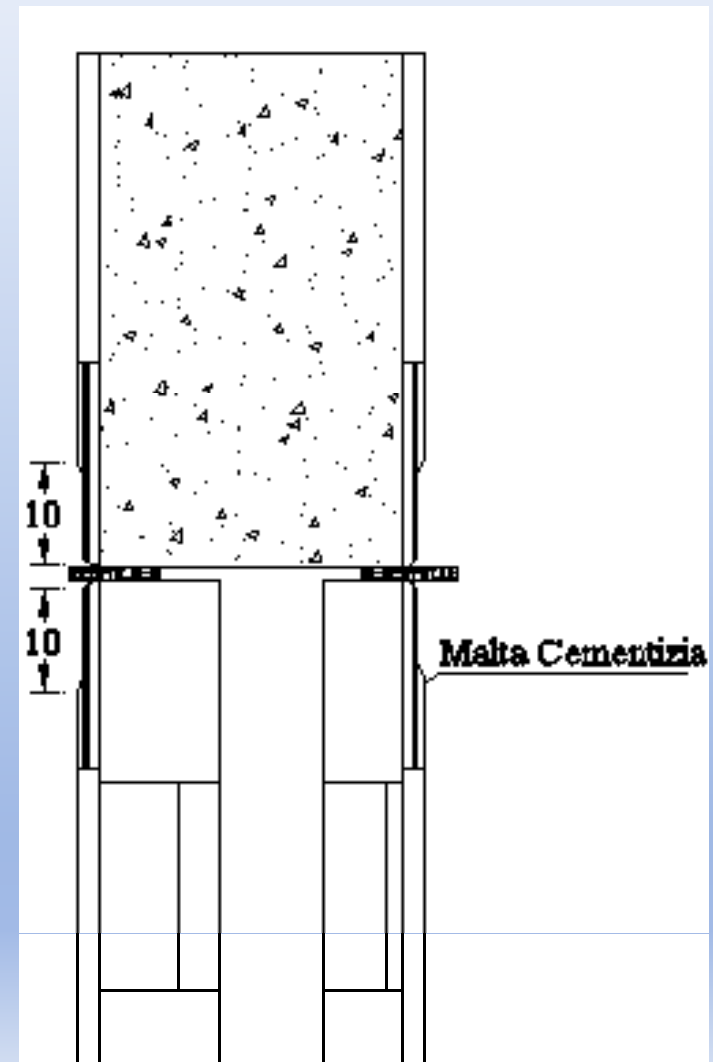
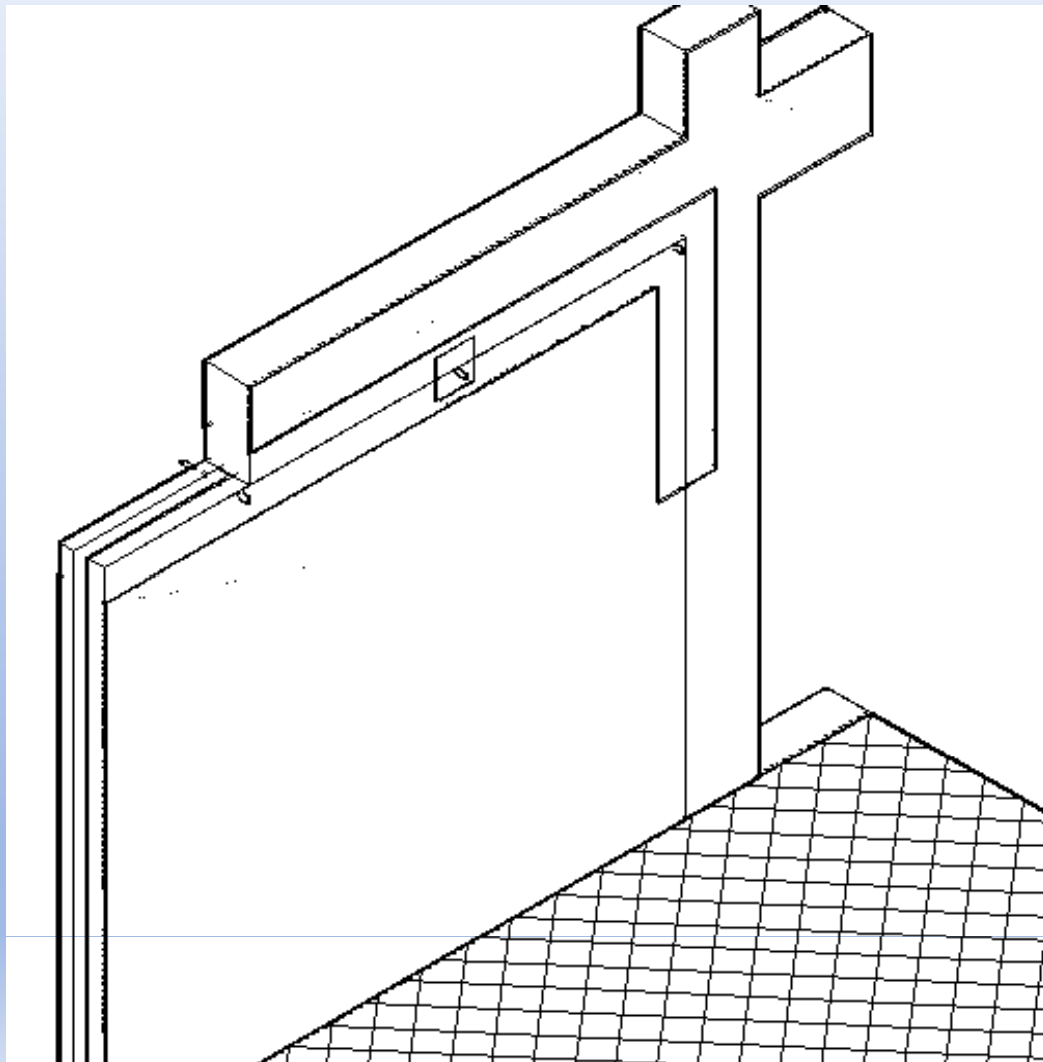
Collegamento perimetrale tamponature/tramezzature

Caso della trave emergente



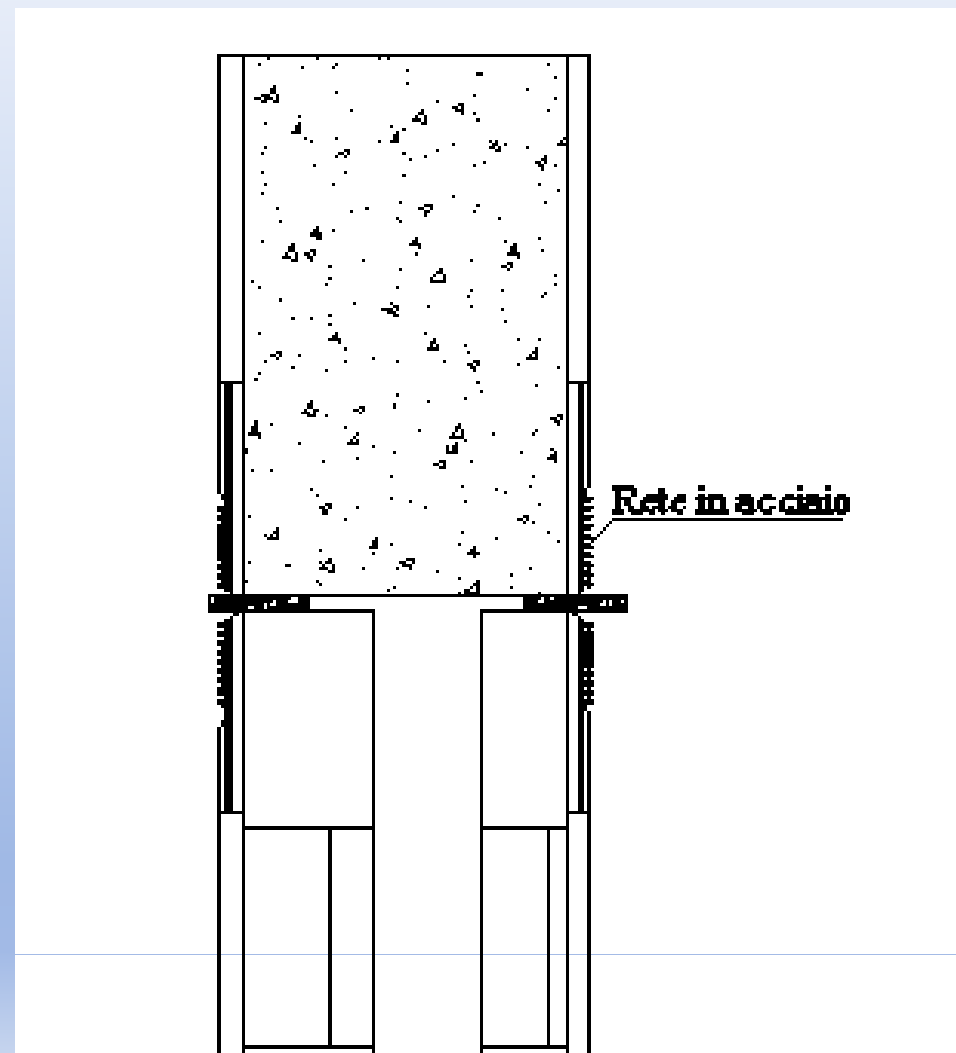
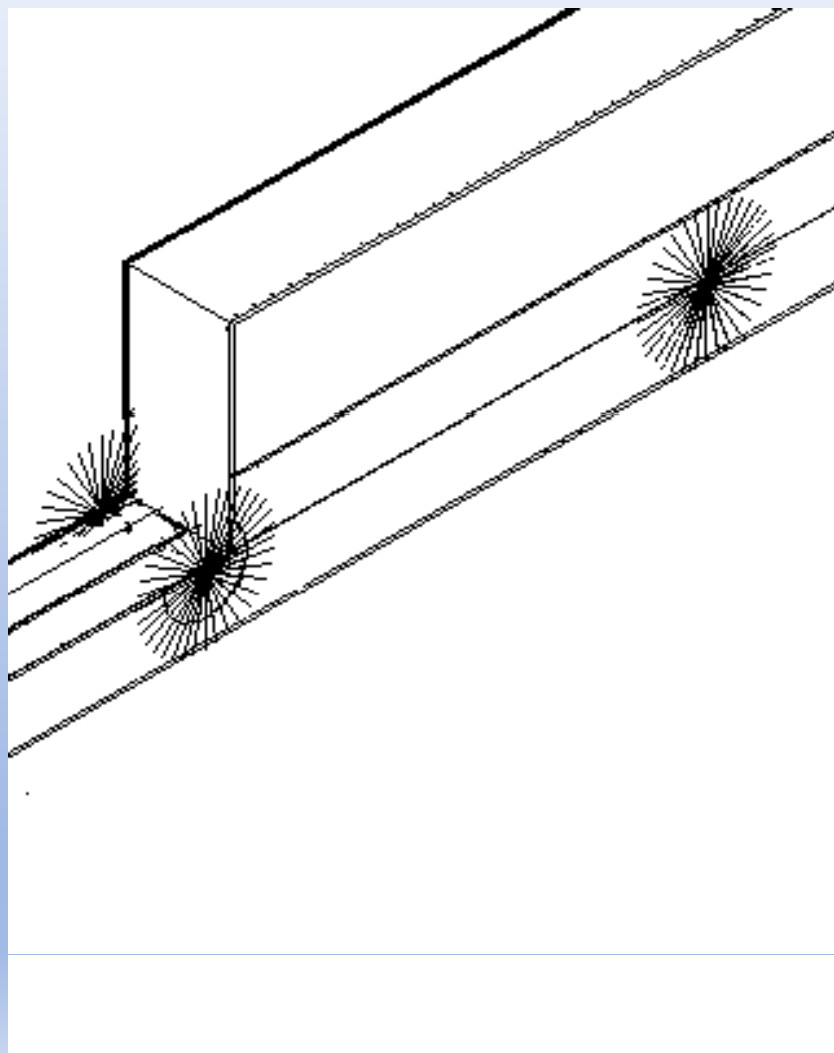
Collegamento perimetrale tamponature/tramezzature

Caso della trave emergente



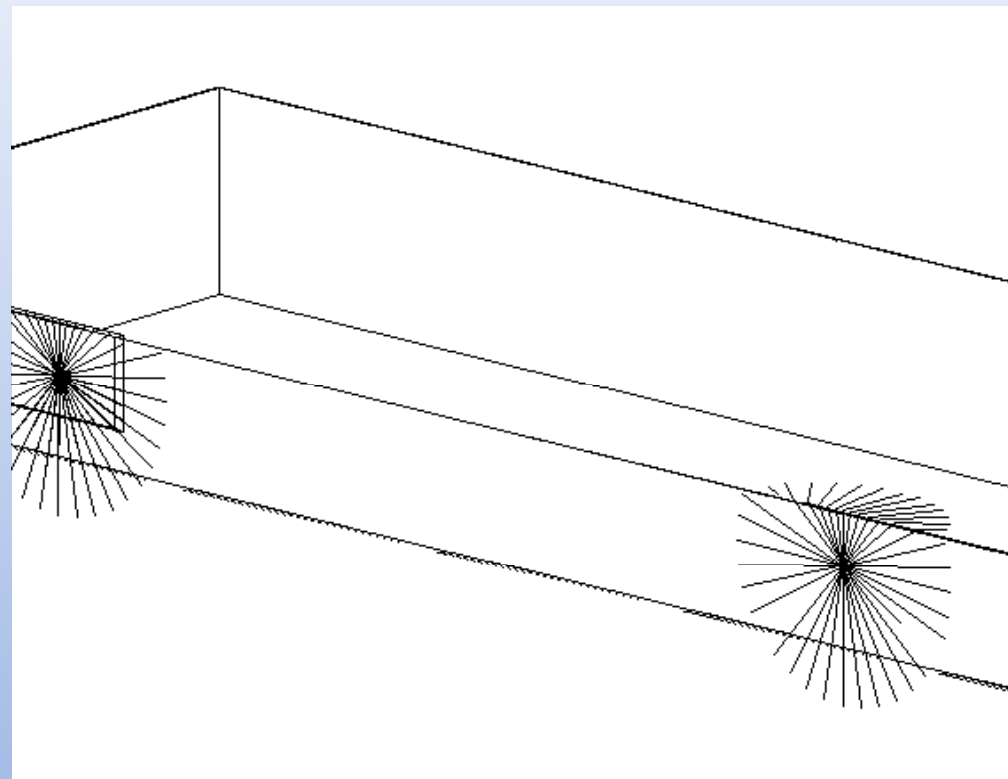
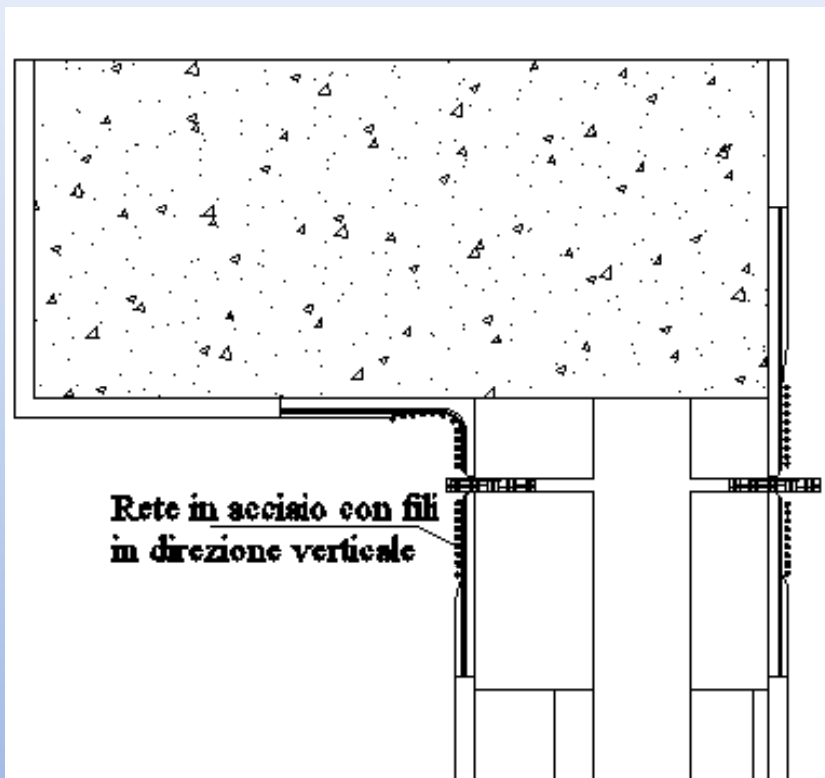
Collegamento perimetrale tamponature/tramezzature

Caso della trave emergente



Collegamento perimetrale tamponature/tramezzature

Caso della trave a spessore: vista finale



ACCORDO DI COLLABORAZIONE PER LE ATTIVITÀ DI VERIFICA STATICA E VALUTAZIONE SISMICA SUGLI EDIFICI PUBBLICI

tra

RELUIS e Provveditorato alle OOPP Lazio, Sardegna e Abruzzo
siglato lo scorso 2 luglio 2009

In questo ambito, RELUIS ha fornito supporto tecnico al Provveditorato alle Opere Pubbliche in relazione ai lavori sulle scuole di l'Aquila dichiarate B che saranno pronte per il nuovo anno scolastico. Si tratta di 15 scuole di competenza comunale e 4 di competenza provinciale.

In tali scuole si stanno mettendo in opera numerose tipologie di intervento che sono incluse nel manuale degli interventi.

Il programma Scuole Sicure

- Le scuole del cratere sono rimaste chiuse dopo il 6 Aprile 2009.
- Le famiglie hanno subito chiesto scuole sicure per i loro figli
- La necessità di un programma completo che garantisse scuole sicure per la fine di settembre è apparsa subito una priorità

Il programma Scuole Sicure

Riparazione e rafforzamento locale di 35 plessi scolastici con estesi danni alla componenti non strutturali e modesti danni strutturali per 7000 studenti

La tempistica del programma:

- *inizio verifiche sulle scuole 9 aprile 2009*
- *inizio progettazioni e prove maggio 2009*
- *inizio lavori luglio 2009*
- *consegna scuole tra il 21 settembre ed il 5 ottobre*

Prime applicazioni sulle strutture scolastiche



Alcune immagini dai cantieri di scuole di l'Aquila



Scuola media Dante Alighieri: fasi di preparazione intervento nodi

Alcune immagini dai cantieri di scuole di l'Aquila



Scuola media Dante Alighieri: fasi di preparazione intervento nodi

Alcune immagini dai cantieri di scuole di l'Aquila



Scuola media Dante Alighieri: fasi di preparazione intervento nodi

Alcune immagini dai cantieri di scuole di l'Aquila



Scuola elementare a Paganica

Alcune immagini dai cantieri di scuole di l'Aquila



Scuola elementare a Paganica

Alcune immagini dai cantieri di scuole di l'Aquila



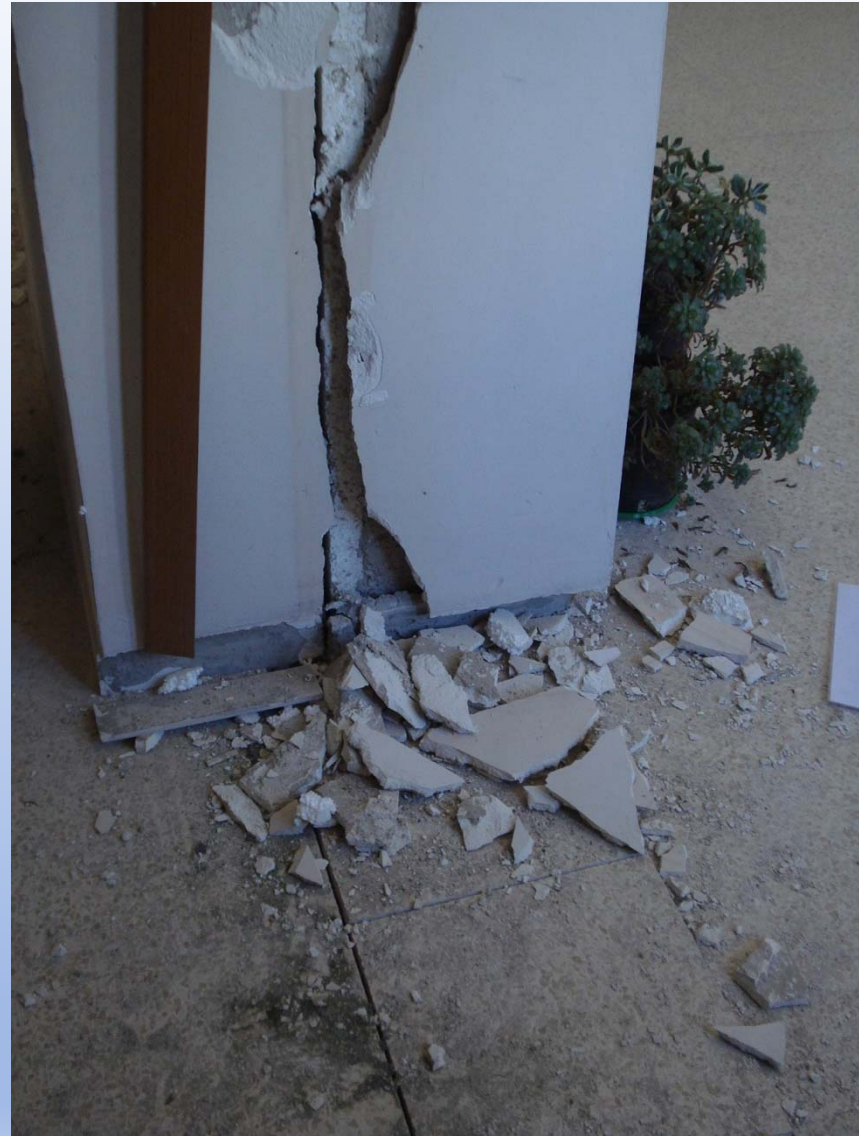
Scuola elementare a Paganica: fasi di preparazione intervento nodi

Alcune immagini dai cantieri di scuole di l'Aquila



Istituto ITIS

Alcune immagini dai cantieri di scuole di l'Aquila



Istituto ITIS: ripristino giunti

Alcune immagini dai cantieri di scuole di l'Aquila



Istituto Tecnico Commerciale: interventi di collegamento perimetrale

Rafforzamento locale sui nodi trave-pilastro esterni

Fasce diagonali in tessuto metallico uniassiale



Rafforzamento locale sui nodi trave-pilastro esterni

Tessuto quadriassiale in fibra di carbonio sul pannello di nodo



Rafforzamento locale sui nodi trave-pilastro esterni

Confinamento estremità dei pilastri con tessuto uniassiale in fibra di carbonio



Rafforzamento locale sui nodi trave-pilastro esterni

Fasce ad U (ancoraggio tessuto pannello e rinforzo a taglio trave) in tessuto uniassiale in fibra di carbonio



Alcune immagini dai cantieri di scuole di l'Aquila



Scuola media Dante Alighieri

Rafforzamento locale sui nodi trave-pilastro esterni



Rafforzamento locale su tamponature e partizioni

Collegamento perimetrale



Rafforzamento locale su tamponature e partizioni

Collegamento perimetrale



Rafforzamento locale su tamponature e partizioni

Collegamento perimetrale



Alcune immagini dai cantieri di scuole di l'Aquila



Istituto Tecnico Commerciale: interventi di collegamento perimetrale

Rafforzamento locale su partizioni

Inserimento di rete portaintonaco



Seismic assessment of school buildings



SEISMIC SAFETY ASSESSMENT OF SCHOOL BUILDINGS IN L'AQUILA



- TORRIONE school (1 building);
- I.P.S.I.A.S.A.R. “Leonardo da Vinci” school (2 buildings);
- RENDINA school (6 buildings);

Seismic assessment of school buildings



SEISMIC SAFETY ASSESSMENT OF SCHOOL BUILDINGS IN L'AQUILA



- TORRIONE school (1 building);
- I.P.S.I.A.S.A.R. “Leonardo da Vinci” school (2 buildings);
- RENDINA school (6 buildings);

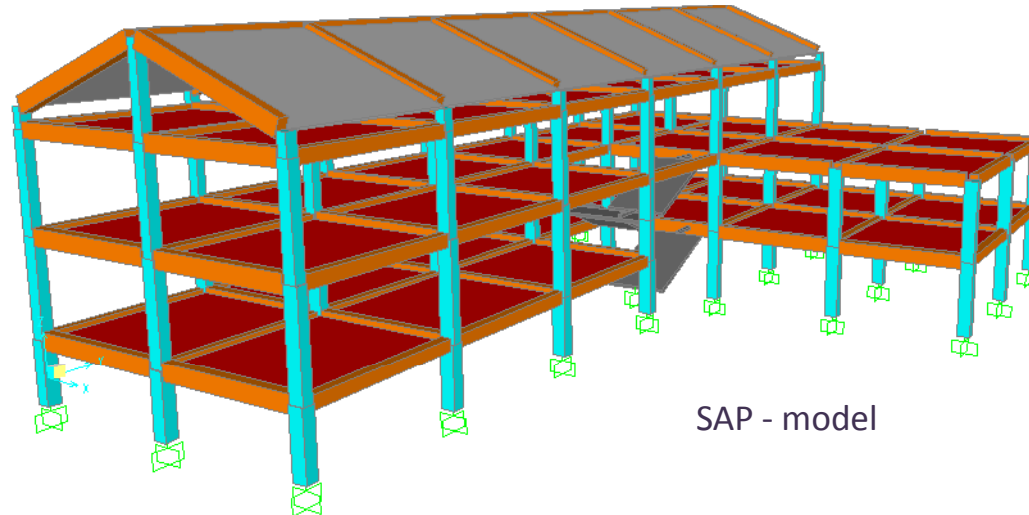
How much FRP based local strengthening interventions (fast and easy to execute) could increase the global seismic capacity of existing RC structures?

Seismic assessment of school buildings



TORRIONE

3 story building
Built in 1961



SAP - model

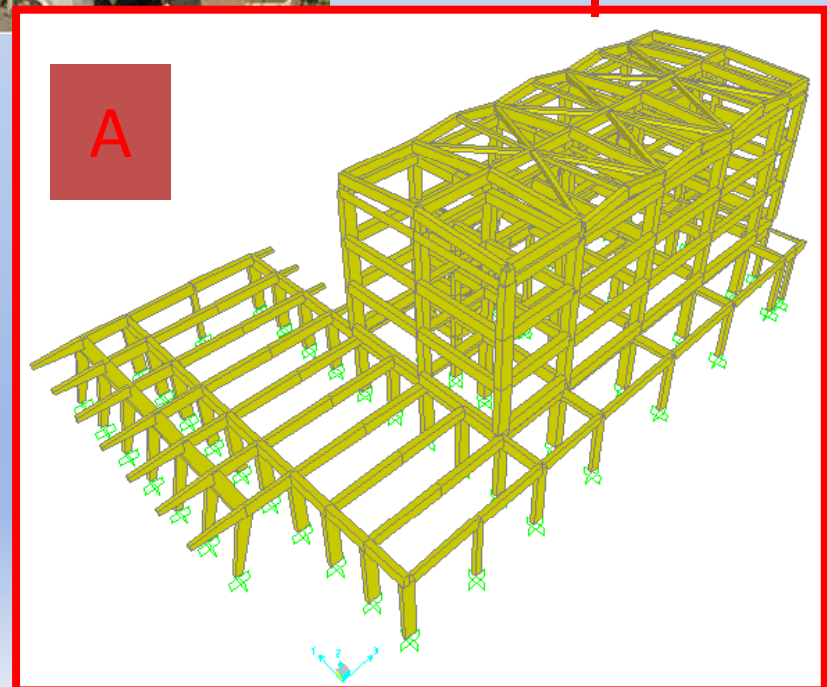
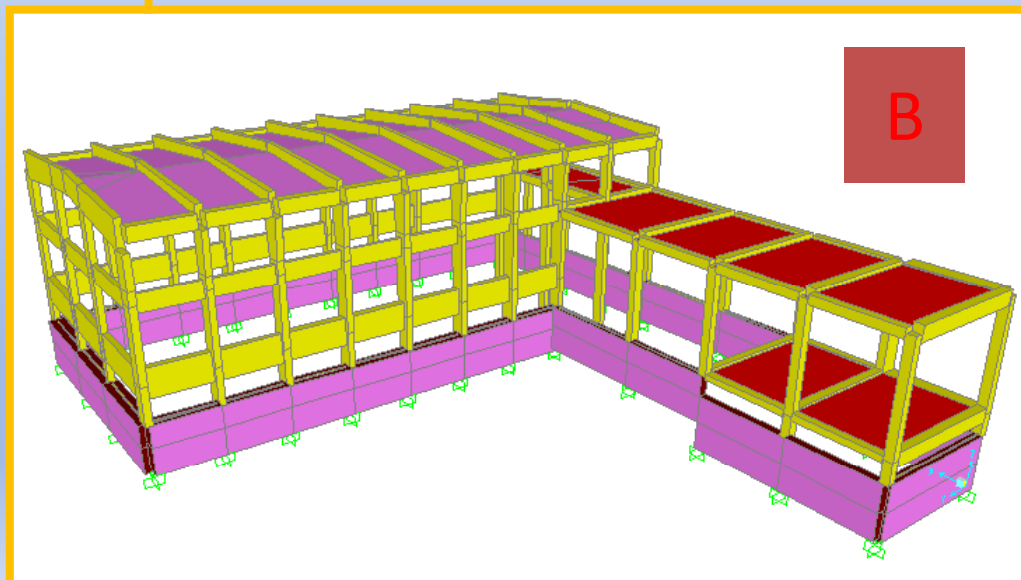
Seismic assessment of school buildings

I.P.S.I.A.S.A.R.



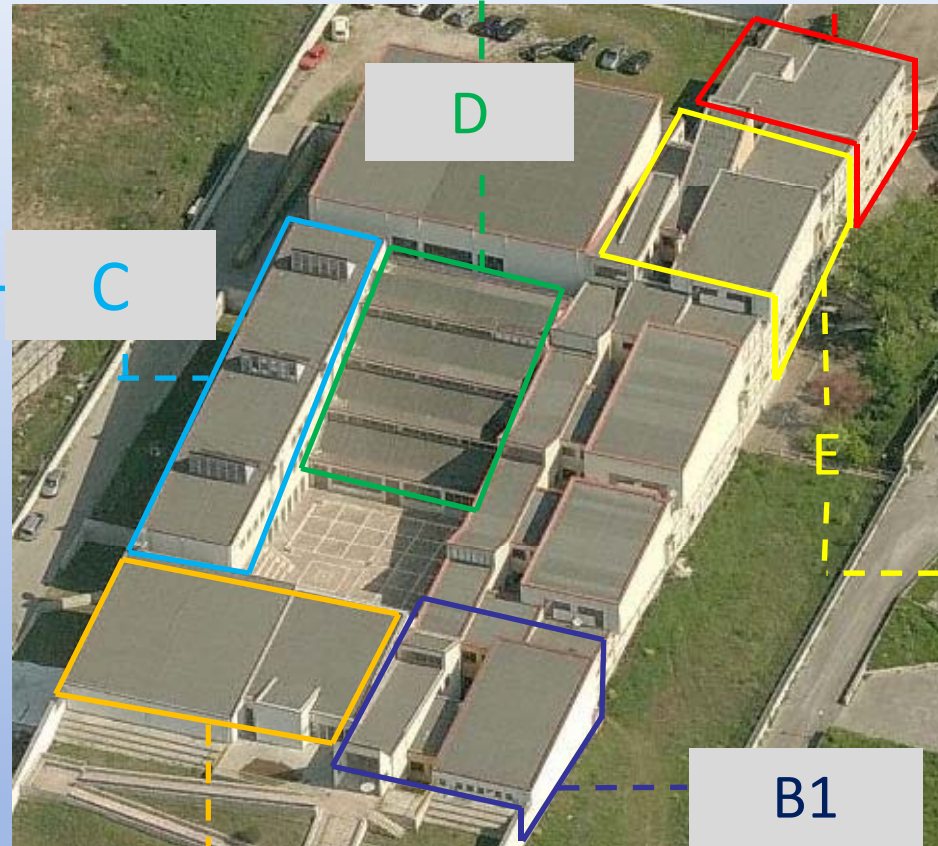
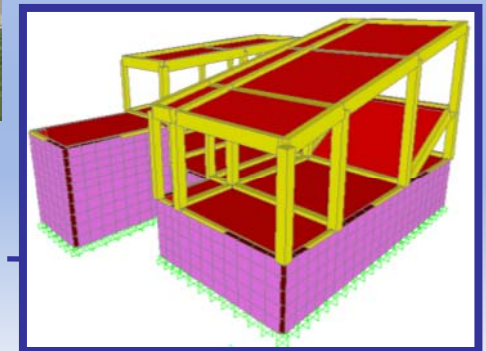
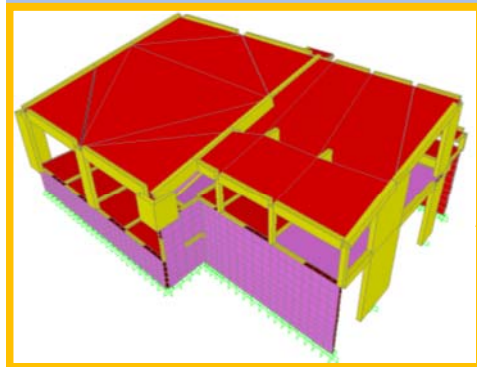
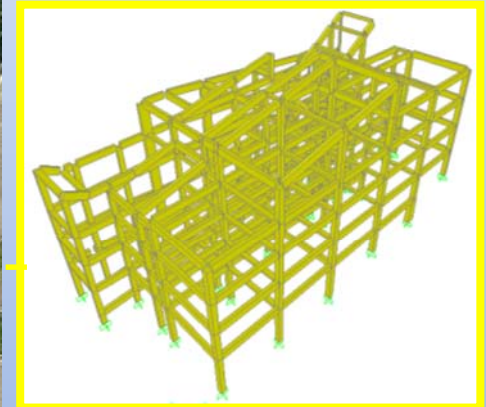
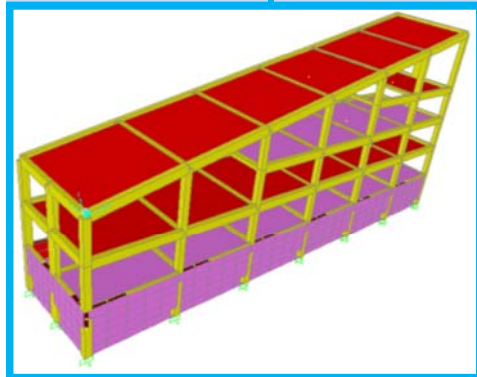
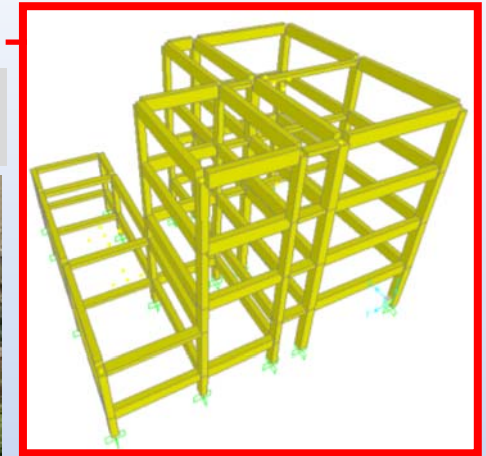
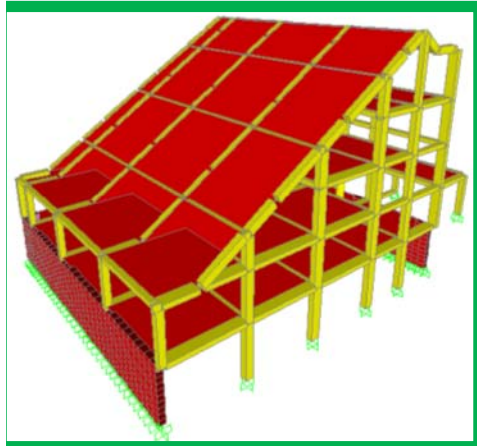
2 story building
Built in 1969

4 story building
Built in 1969



Seismic assessment of school buildings

6 buildings, Built 1982-1999



C

D

G

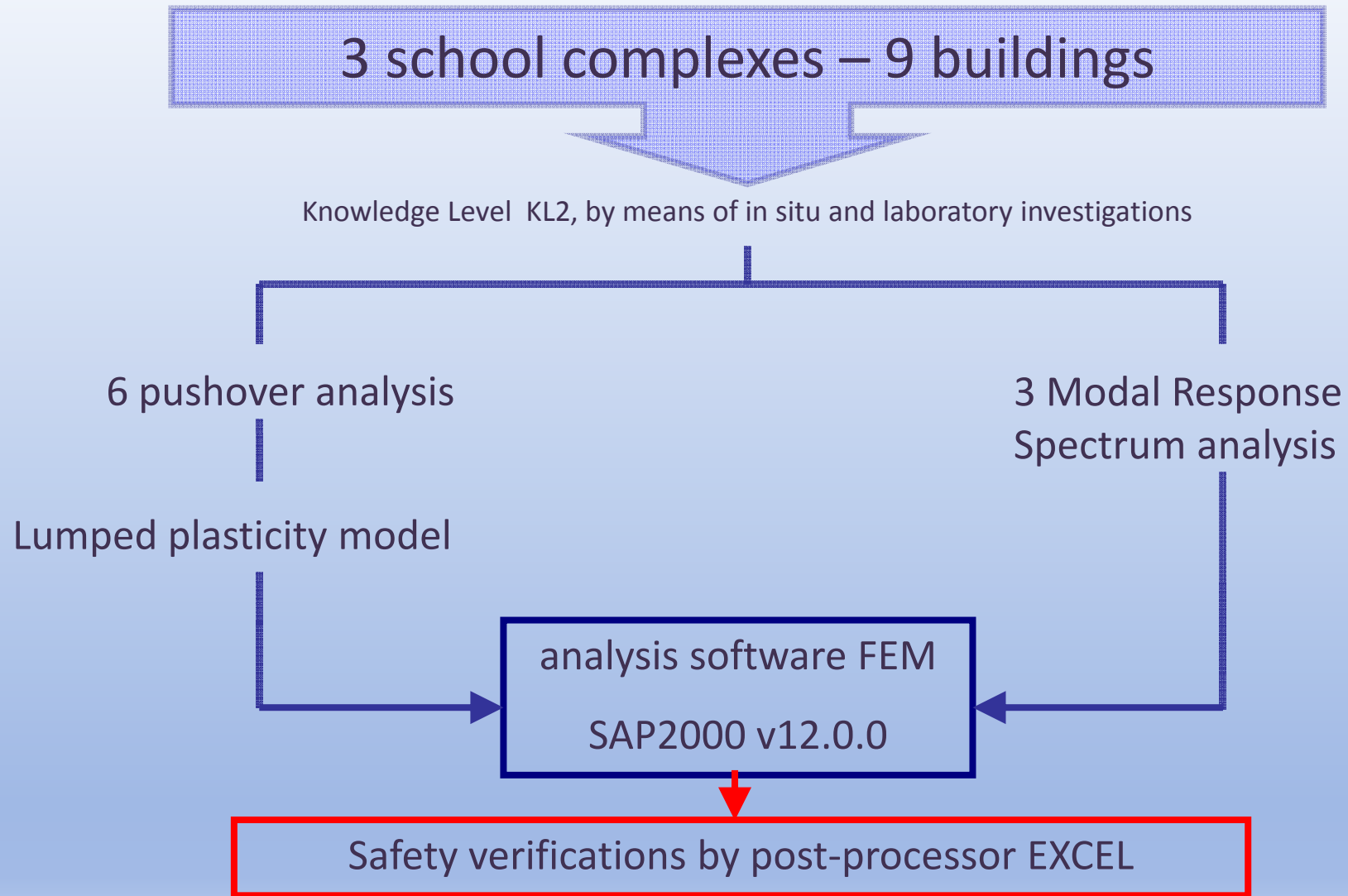
E

B1

B2

RENDINA

Seismic assessment of school buildings

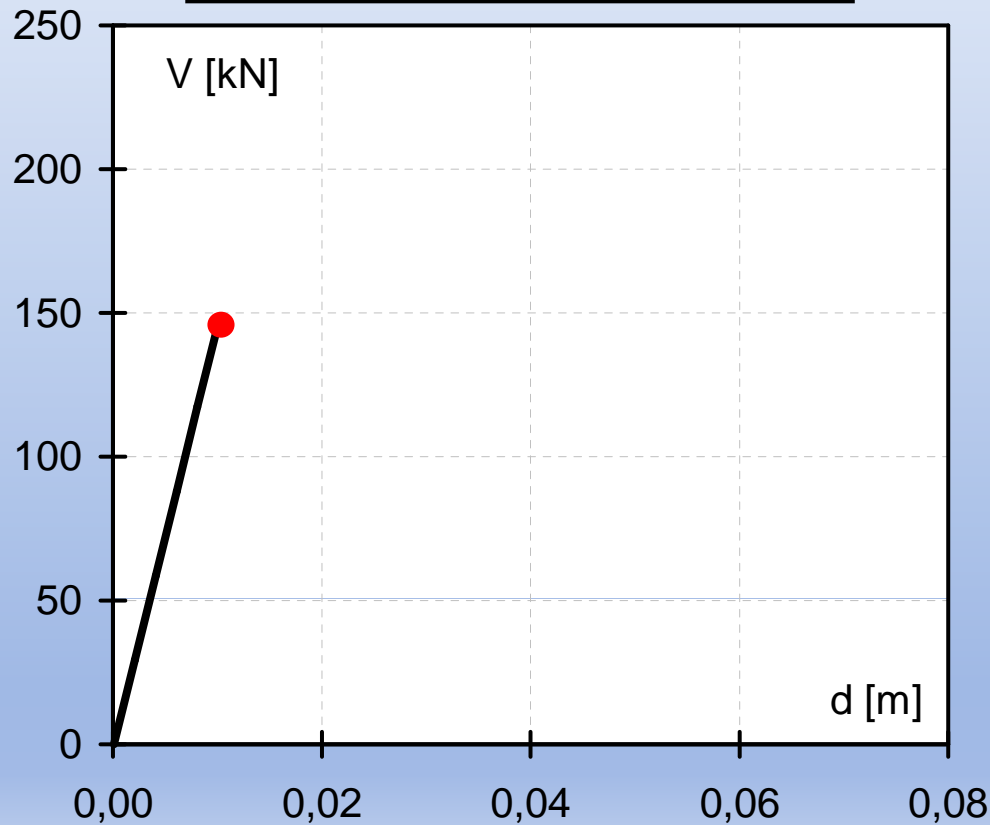


Capacity curve and progressive failures



First brittle failure on joint (tensile stress)

PUSHOVER ANALYSIS
CAPACITY CURVE



$$p_t = 0.30\sqrt{f_c}$$

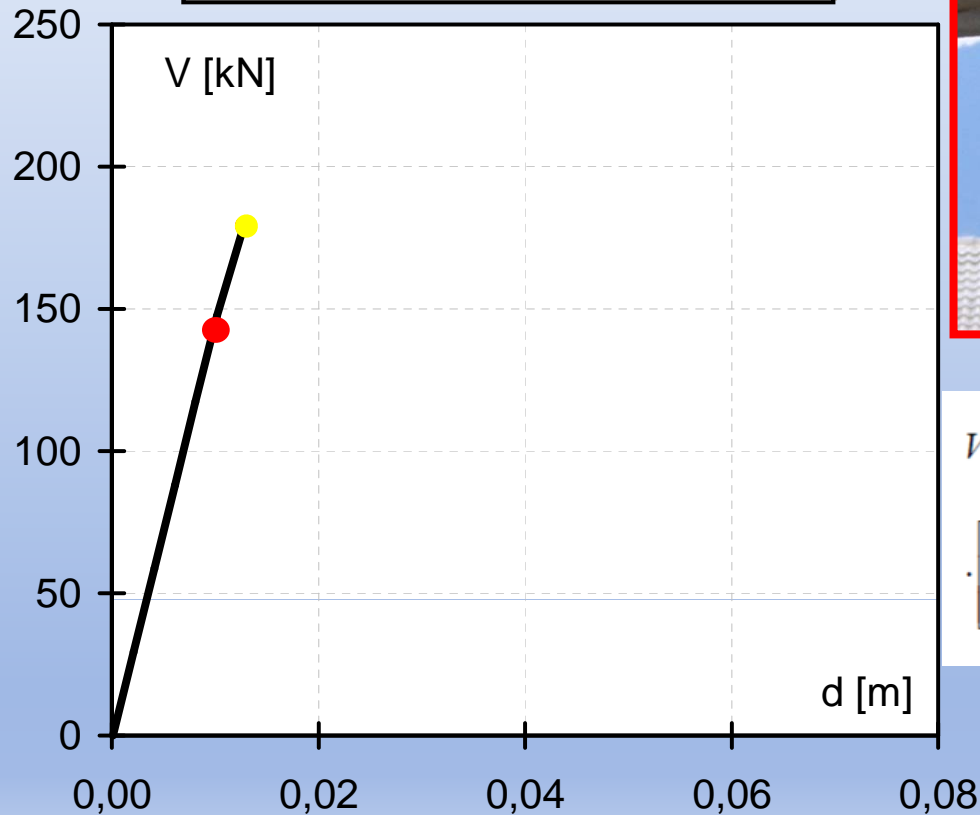
$$p_t = \left| \frac{f_a}{2} - \sqrt{\left(\frac{f_a}{2}\right)^2 + v_j^2} \right| \leq k\sqrt{f_c}$$

$$f_a = \frac{N_c}{b_j \cdot h_c} \quad v_j = \frac{V_{jh}}{b_j \cdot h_c}$$

Capacity curve and progressive failures

● First brittle (shear) failure on columns

PUSHOVER ANALYSIS
CAPACITY CURVE



$$V_R = \frac{1}{\gamma_{el}} \left[\frac{h-x}{2L_V} \min(N; 0,55A_c f_c) + \left(1 - 0,05 \min\left(5; \mu_{\Delta}^{pl}\right)\right) \cdot \left[0,16 \max\left(0,5; 100\rho_{tot}\right) \left(1 - 0,16 \min\left(5; \frac{L_V}{h}\right)\right) \sqrt{f_c} A_c + V_w \right] \right]$$

$$\mu_{\Delta}^{pl} = \mu_{\Delta} - 1.$$

min = 0
max = 5

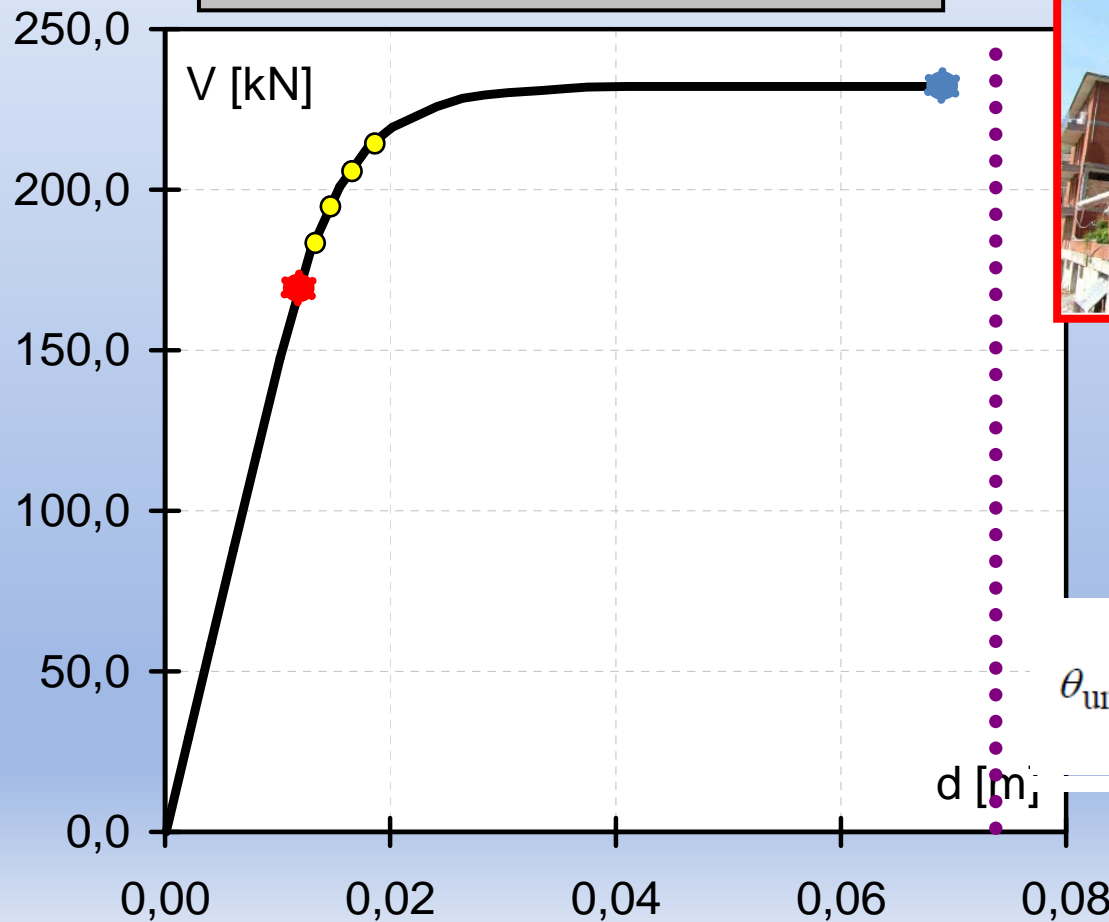
Capacity curve and progressive failures

◆ Displacement capacity

LS Significant damage; (plastic hinge $3/4\theta_u$)

●●●●● Displacement demand

PUSHOVER ANALYSIS
CAPACITY CURVE



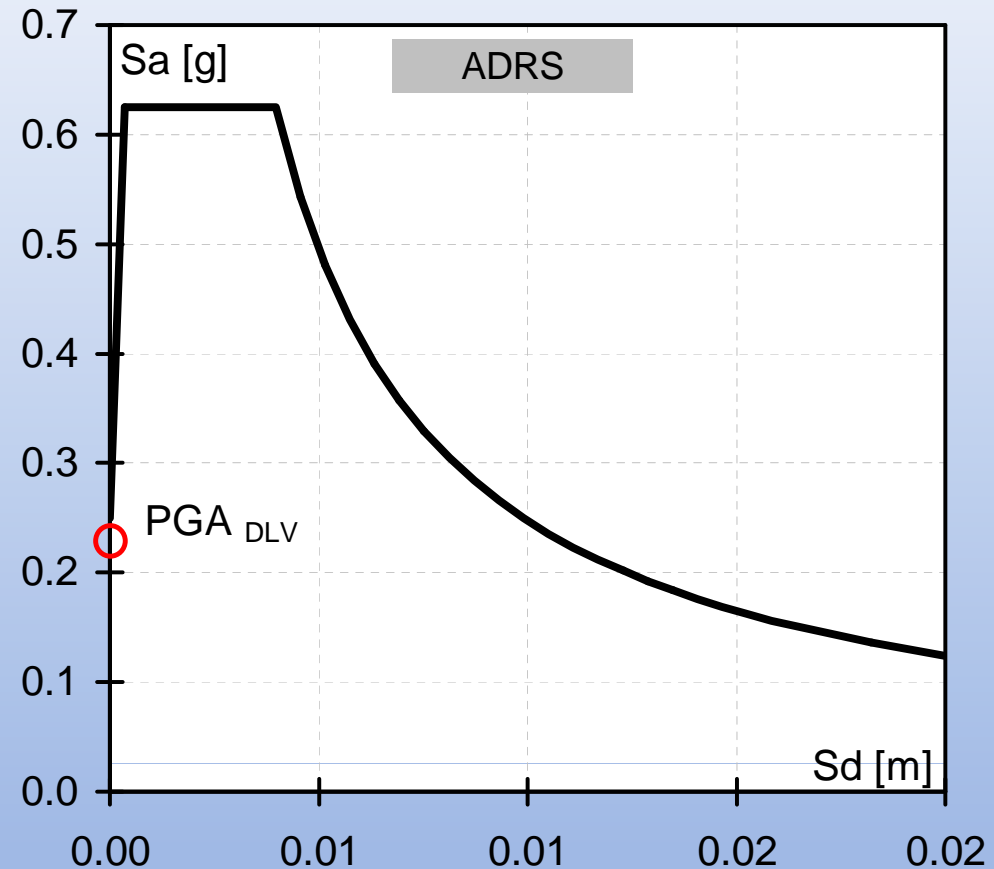
$$\theta_{um} = \frac{1}{\gamma_{el}} \left(\theta_y + (\varphi_u - \varphi_y) L_{pl} \left(1 - \frac{0,5L_{pl}}{L_V} \right) \right)$$

Safety index: PGA capacity/demand ratio

THE PARAMETER α HAS BEEN ADOPTED TO COMPUTE THE CAPACITY DEMAND RATIO

$$\alpha = \frac{PGA_{CLV}}{PGA_{DLV}}$$

PGA_{DLV} = peak ground acceleration on type A ground with a reference probability of exceedance $P_{NCR} = 10\%$ (no collapse requirement) in 50 years (reference return period $T_{NCR} = 475$ years)



$PGA_{DLV} = \underline{\underline{L'Aquila = 0.261g}}$

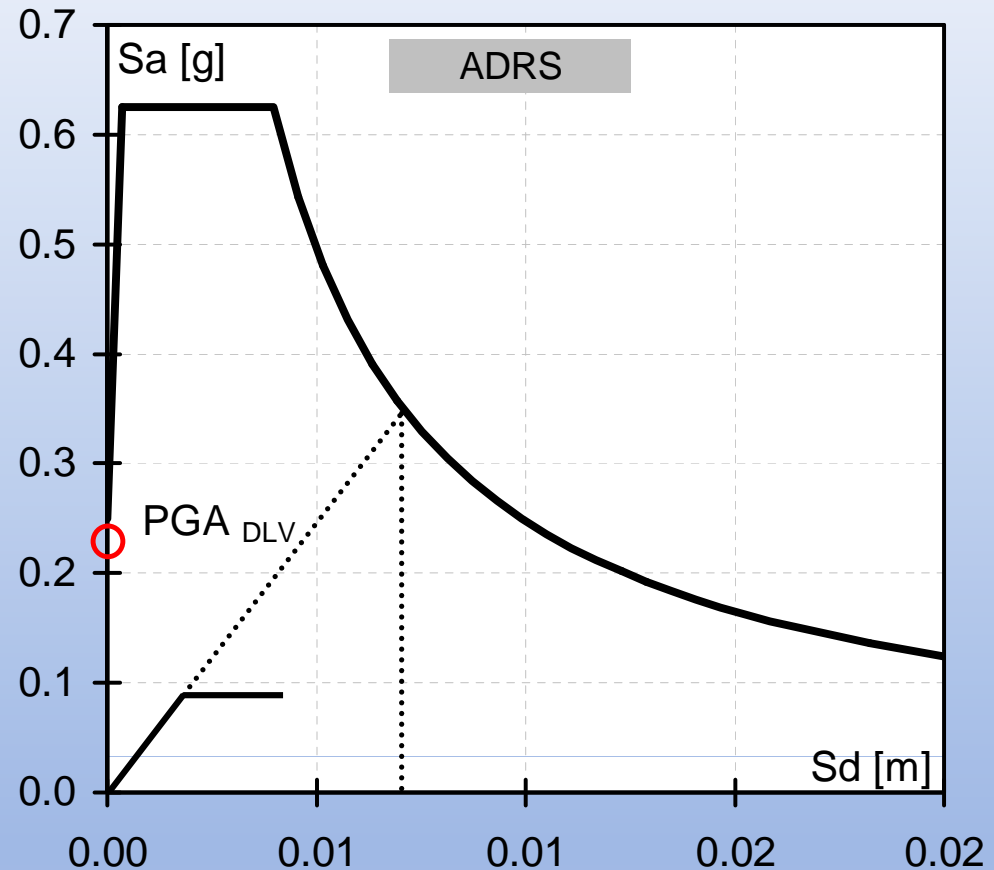
Safety index: PGA capacity/demand ratio

THE PARAMETER α HAS BEEN ADOPTED TO COMPUTE THE CAPACITY DEMAND RATIO

$$\alpha = \frac{PGA_{CLV}}{PGA_{DLV}}$$

PGA_{DLV} = accelerazione orizzontale massima su sito di riferimento rigido orizzontale che ha una probabilità di essere superato pari al 10% ($P_{vr}=10\%$) in un tempo pari al periodo di riferimento dell'opera

PGA_{CLV} = peak ground acceleration on type A ground which can be sustained by the structure at Limit State of Significant Damage (LSSD)



$$PGA_{DLV} = \underline{\underline{L'Aquila = 0.261g}}$$

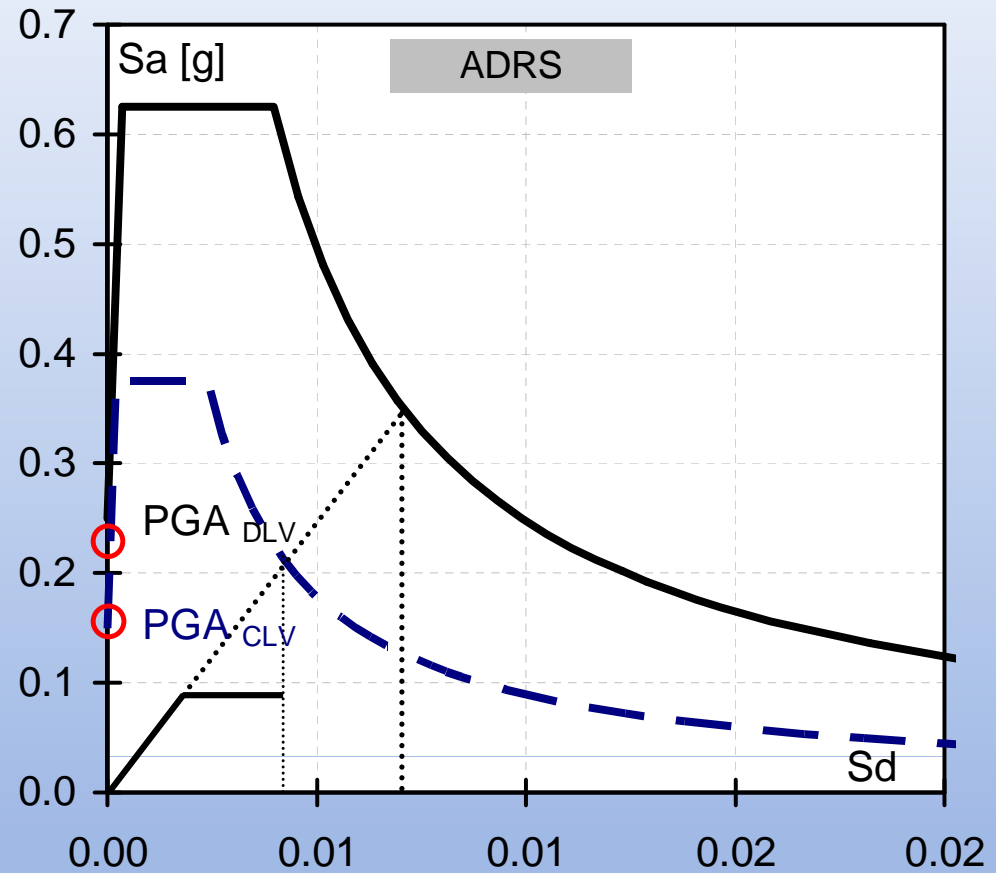
Safety index: PGA capacity/demand ratio

THE PARAMETER α HAS BEEN ADOPTED TO COMPUTE THE CAPACITY DEMAND RATIO

$$\alpha = \frac{PGA_{CLV}}{PGA_{DLV}}$$

PGA_{DLV} = accelerazione orizzontale massima su sito di riferimento rigido orizzontale che ha una probabilità di essere superato pari al 10% ($P_{vr}=10\%$) in un tempo pari al periodo di riferimento dell'opera

PGA_{CLV} = peak ground acceleration on type A ground which can be sustained by the structure at Limit State of Significant Damage (LSSD)



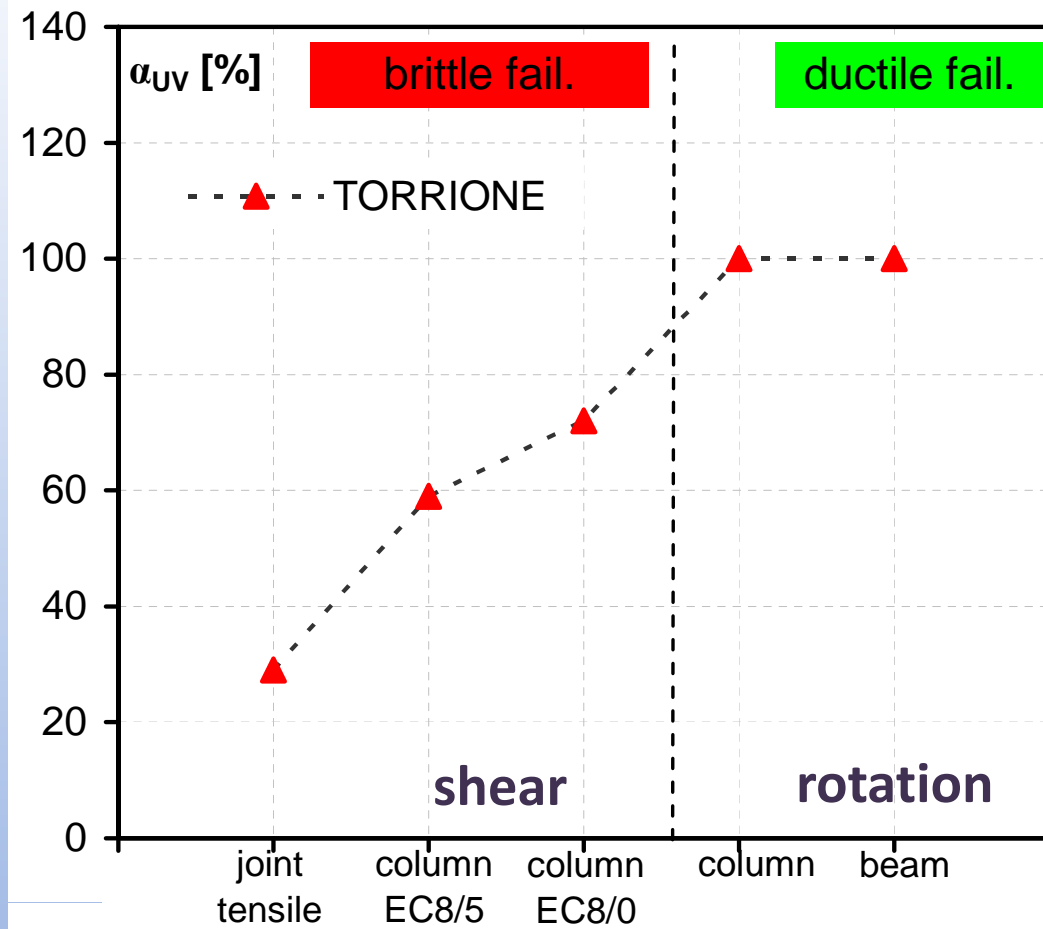
PGA_{DLV} = L'Aquila = 0.261g

Torrione: Assessment

Pushover

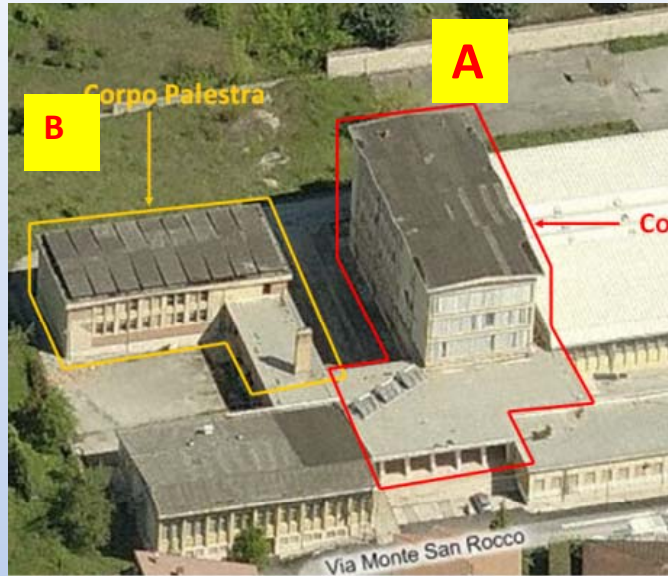


N. story	3
f_{cm} [MPa]	14
f_{ym} [MPa]	320
Rebars Type	Plain
year	1961

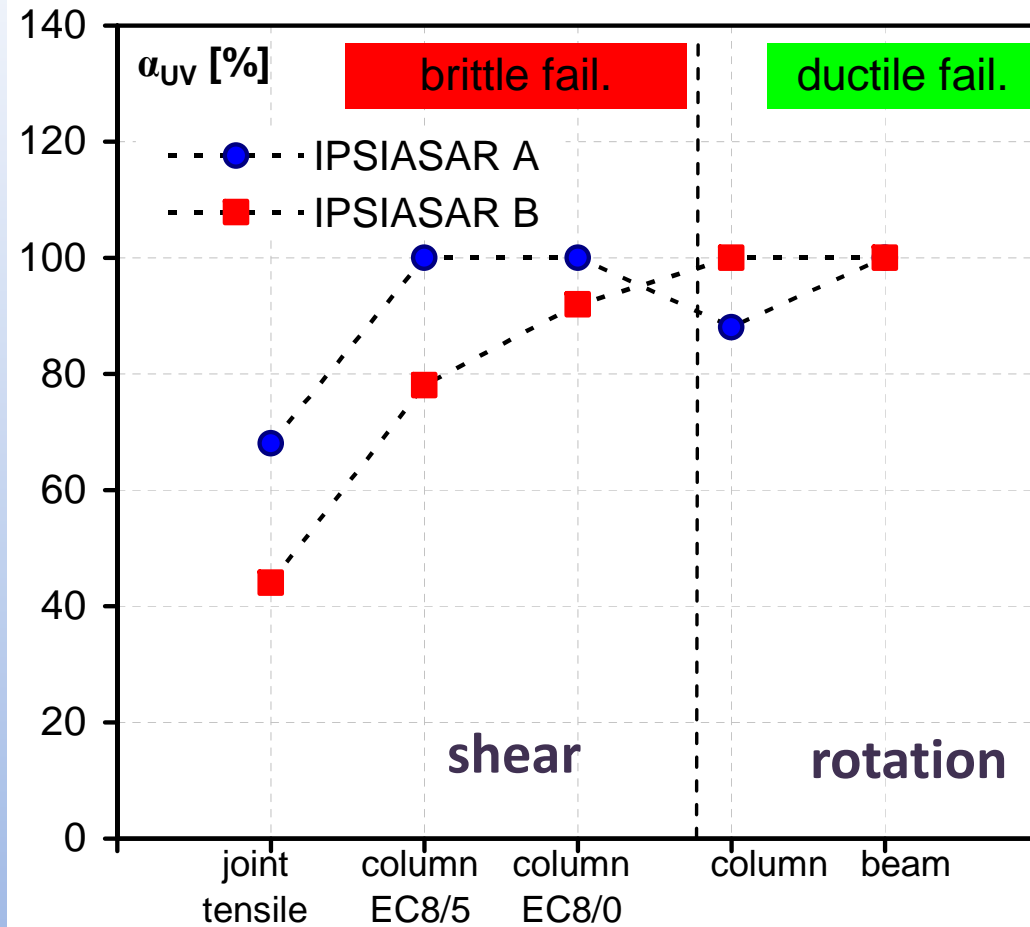


I.P.S.I.A.R.: Assessment

Pushover

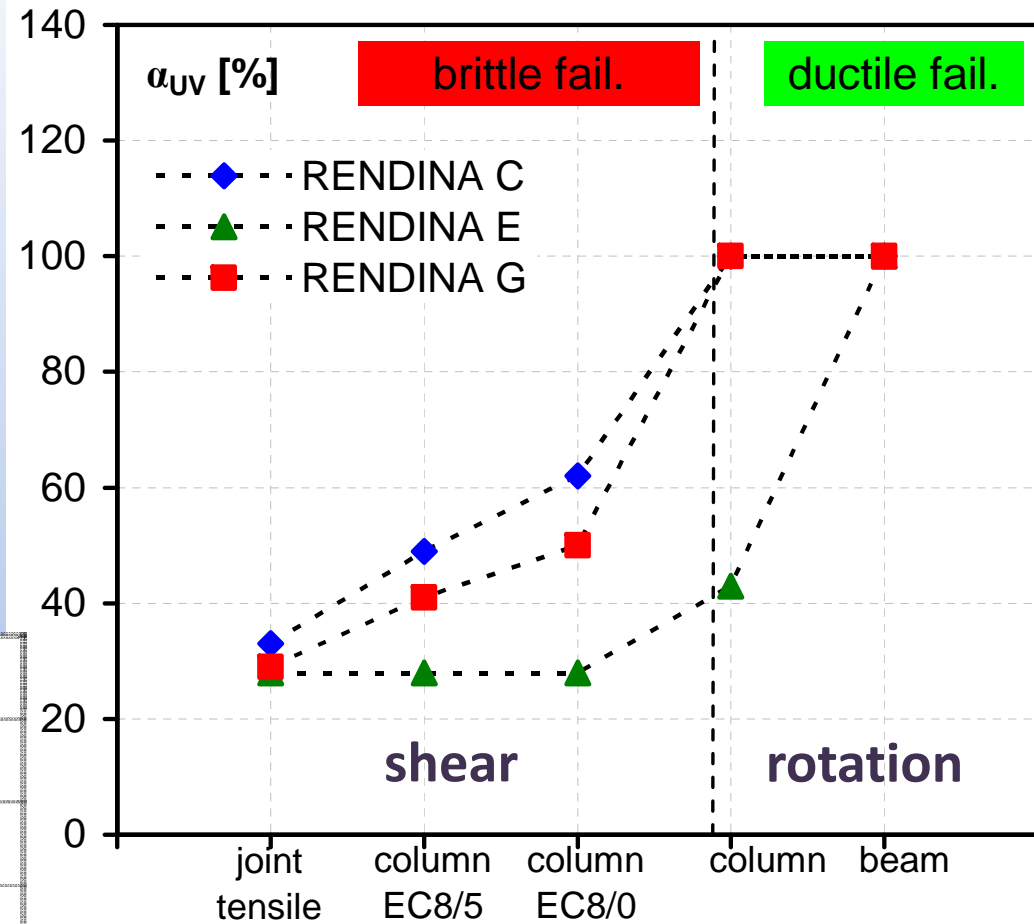
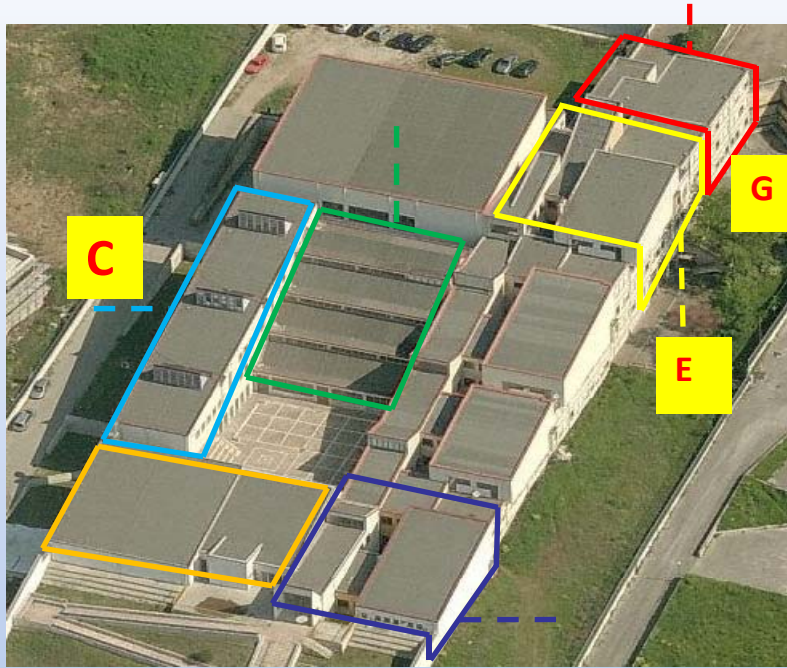


Building	A	B
N. story	4	2
f_{cm} [MPa]	16.6	16.7
f_{ym} [MPa]	320	320
Rebars Type	plain	plain
year	1969	1969



Rendina: Assessment

Pushover

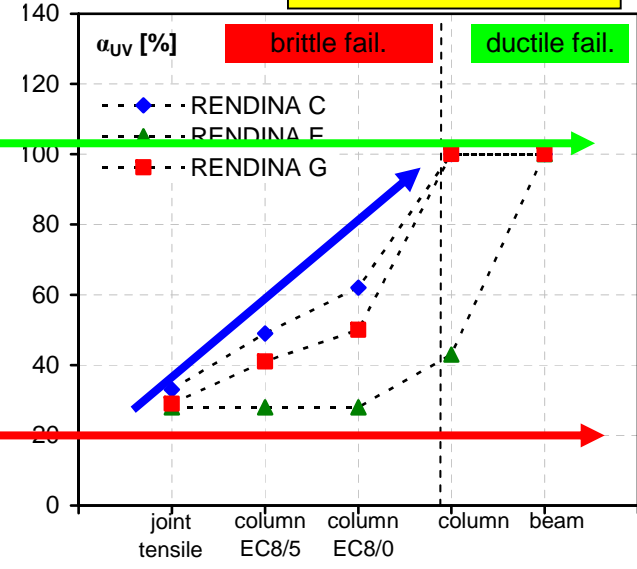
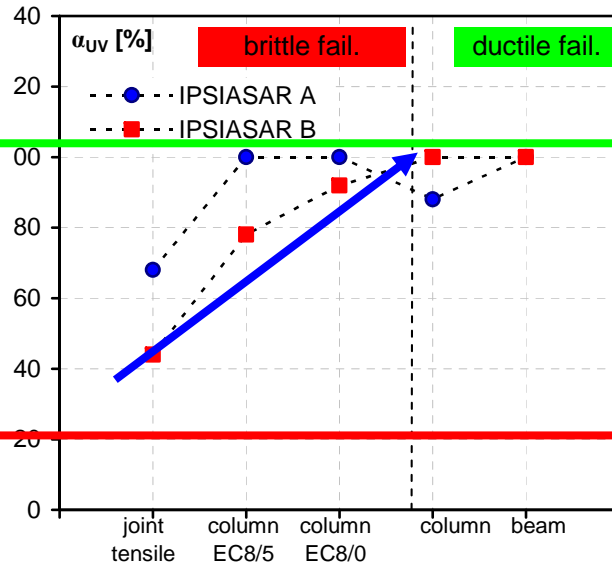
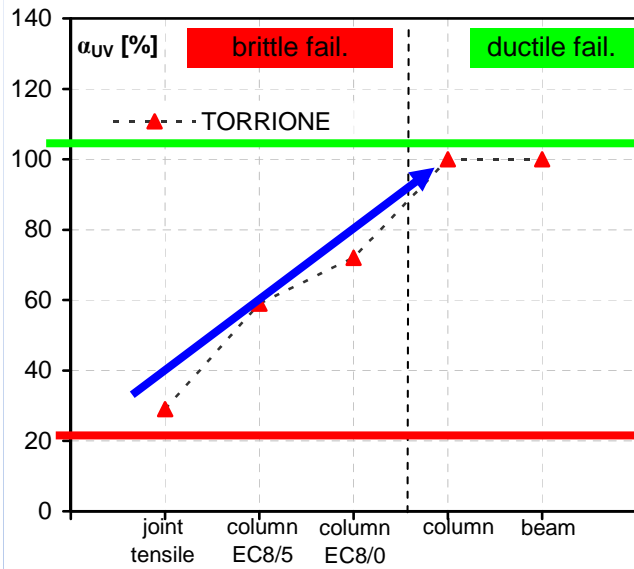


Building	C	E	G
N. story	4	4	3
f_{cm} [MPa]	33.3	21.4	23.5
f_{ym} [MPa]	480	375	375
Rebars Type	def.	def.	def.
year	1999	1982	1982



How much FRP based local strengthening interventions could increase the global seismic capacity of existing RC structures?

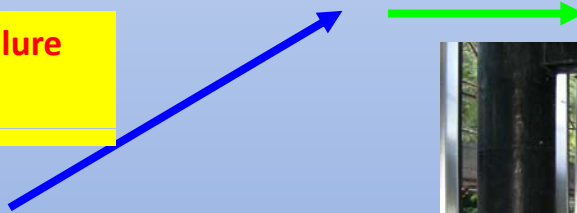
Pushover



Rehabilitation

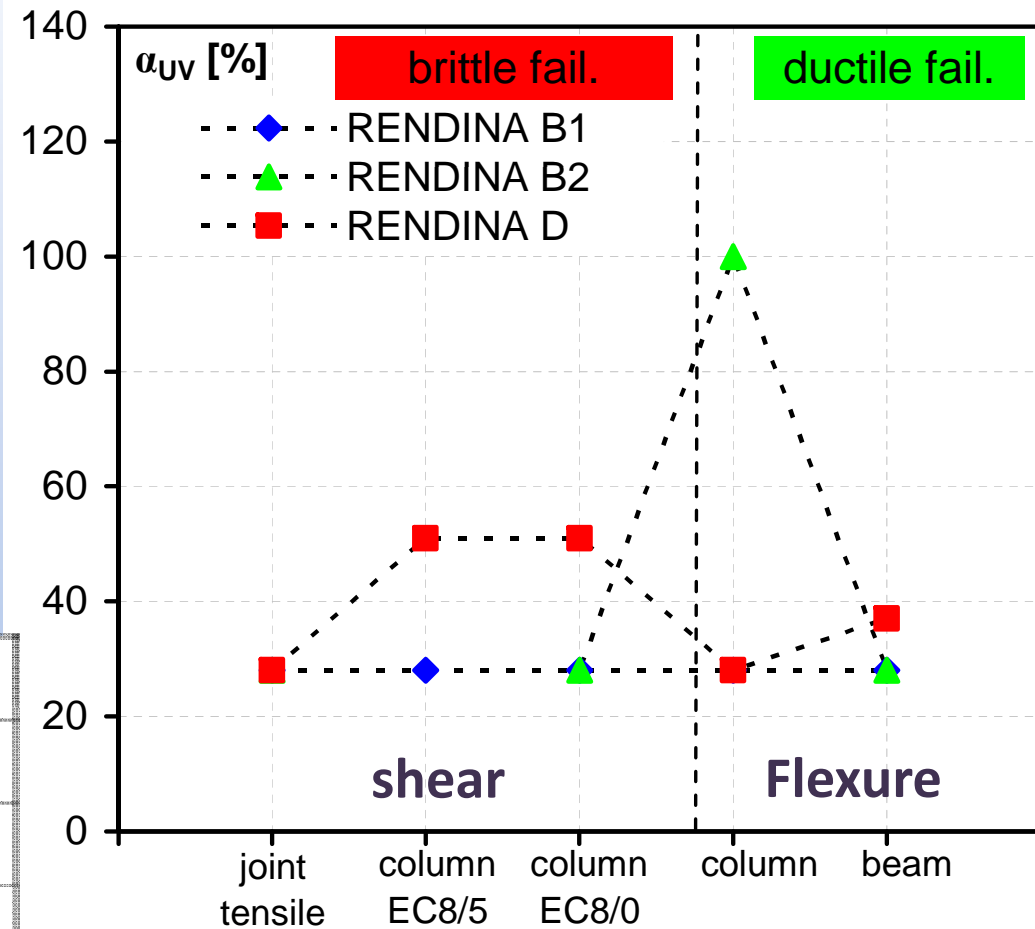
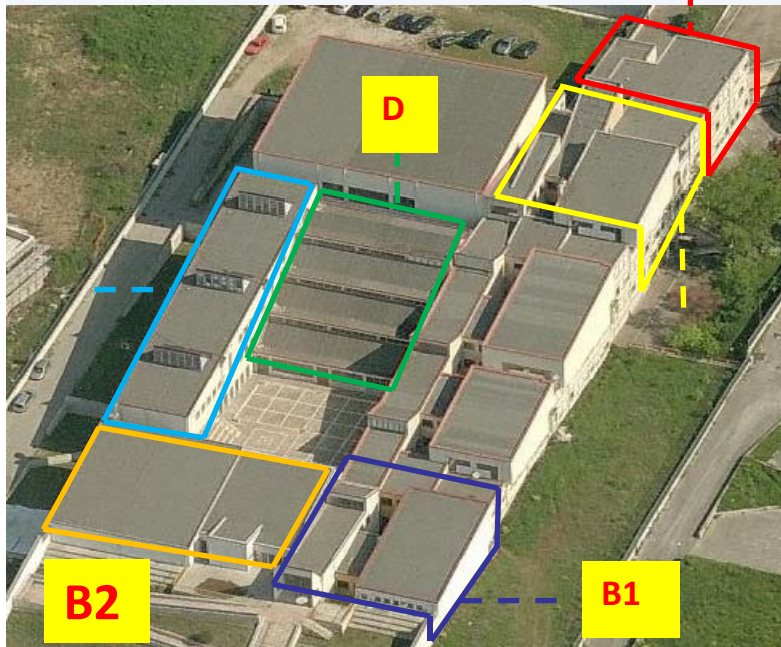
Removing brittle failure mechanisms

Minimum Safety level



Rendina: Assessment

Linear Analysis



Building	B1	B2	D
N. story	2	2	4
f_{cm} [MPa]	35.5	35.5	29.6
f_{ym} [MPa]	480	480	480
Rebars Type	def.	def.	def.
year	1999	1999	1995



Local intervention: FRP Strengthening

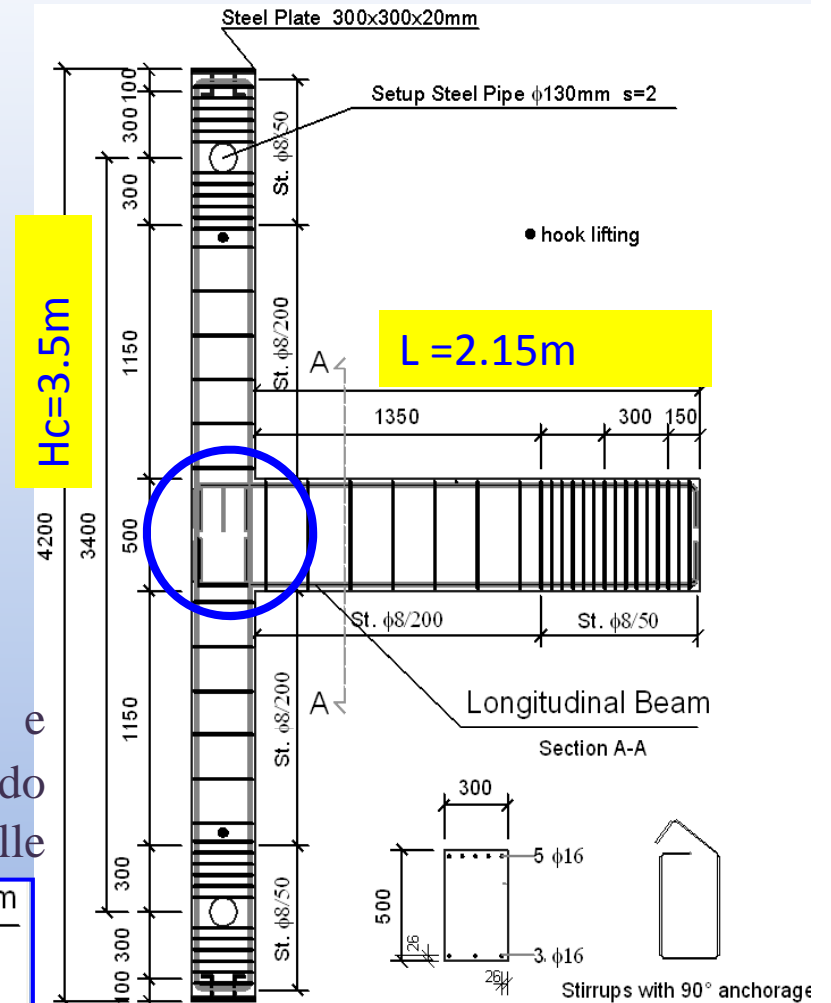
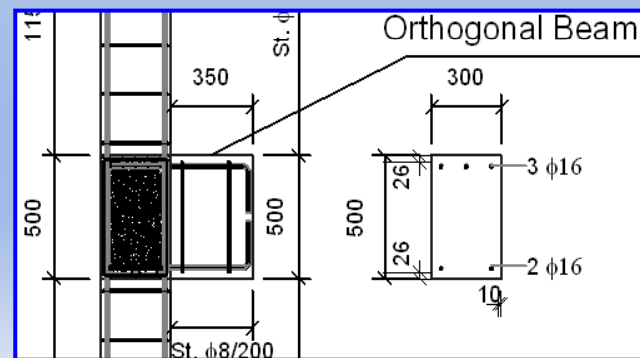
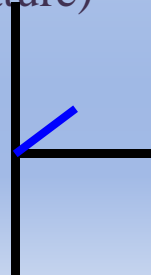


Prove sperimentali nodi trave-pilastro

- calcestruzzo $f_{cm} = 16-19 \text{ MPa}$
- Barre nervate (FeB44k) $f_{ym} = 470 \text{ MPa}$

- Pilastri 30x30cm (4 ϕ 16, $\rho=0,9\%$)
- Travi 30x50 cm, armatura longitudinale:
 - 5 ϕ 16 ($\rho=1.12\%$) arm. superiore
 - 3 ϕ 16 ($\rho=0.67\%$) arm. inferiore

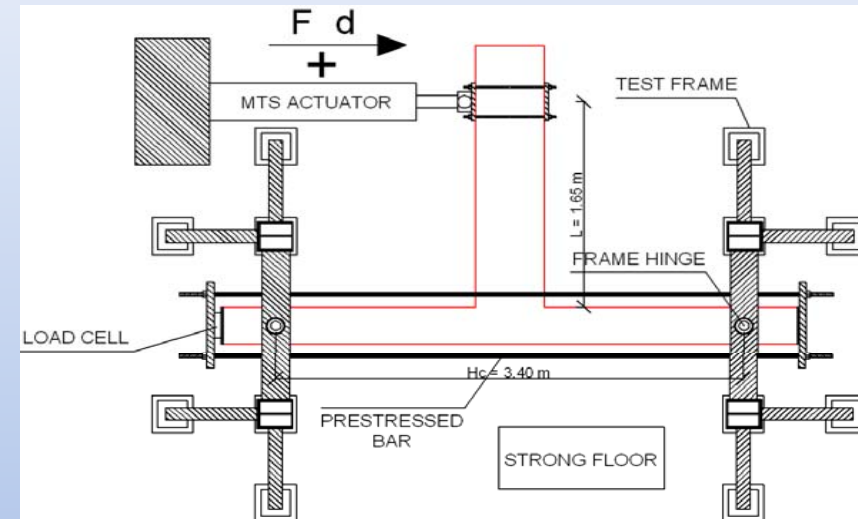
- Staffe ϕ 8mm /20 cm (travi e pilastri.)
- Assenza di staffe nel pannello nodale
- Trave ortogonale (35cm) per simulare casi reali e valutarne l'influenza sul comportamento del nodo (progettata con riferimento ai carichi indotti dalle tamponature)



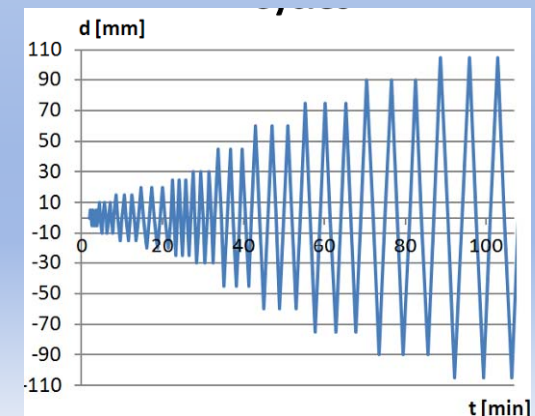
Test Setup



- Provini disposti parallelamente al piastrone di contrasto

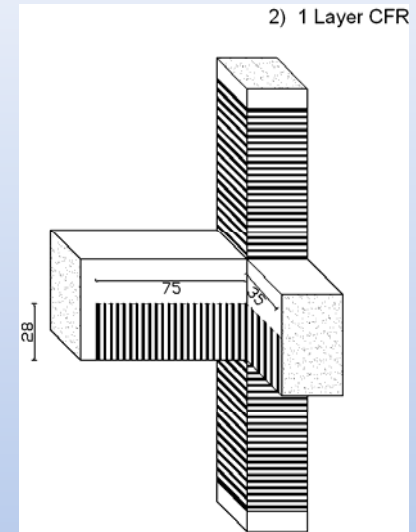


- Sforzo normale costante ($\nu = 0.21$)
- Storia di carico:
 - precarico di 19.2 kN per simulare I carichi gravitazionali
 - storia di carico a controllo di spostamento, spostamenti crescenti (3 ripetizioni per ciclo)

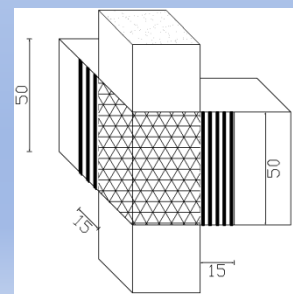


Matrice di prova

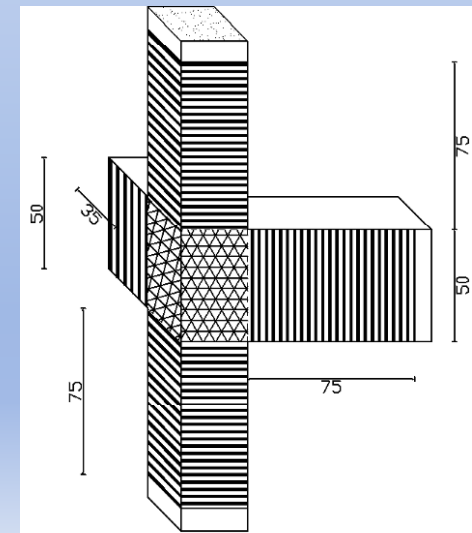
Nome	Provino	f_{cm}	ρ^{FRP} (joint panel)
[-]	[-]	[MPa]	[%]
T_C	Non rinforzato	16.38	-
T_C3	Non rinforzato	16.30	-
T_FRP	“Light” CFRP (schema 1)	14.84	0.0176
T_FRP2	“Strong” FRP (schema 2)	17.74	0.0176



“Light” CFRP
(Scheme 1)



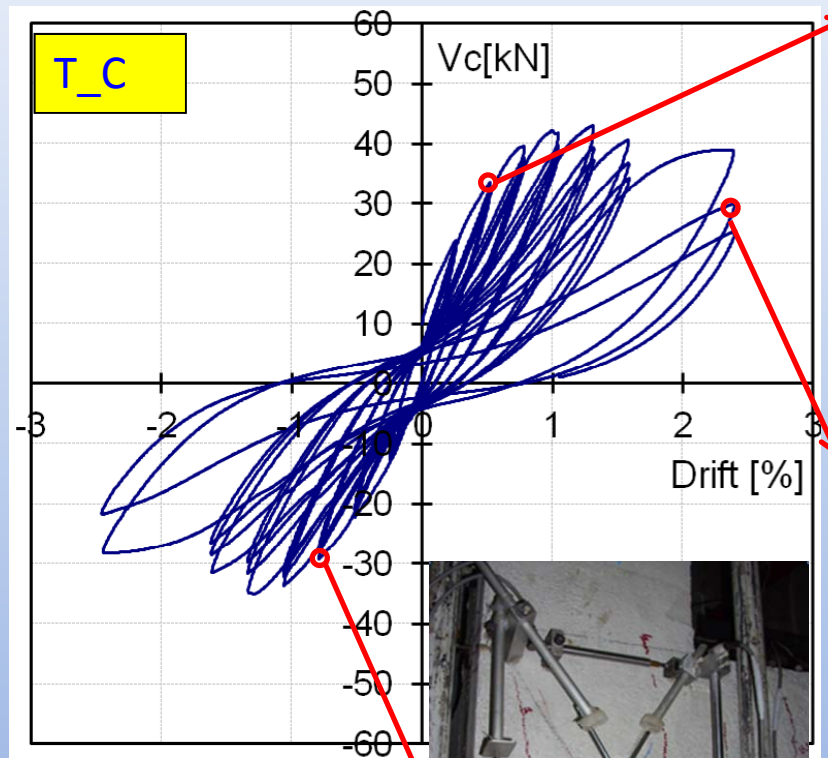
“Strong” CFRP
(Scheme 2)



$$v = N / (A_c \cdot f_{cm}) = 0.21$$

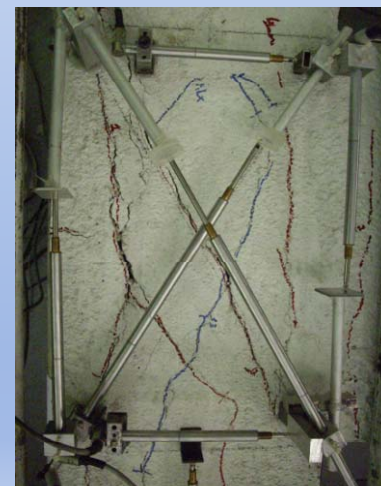
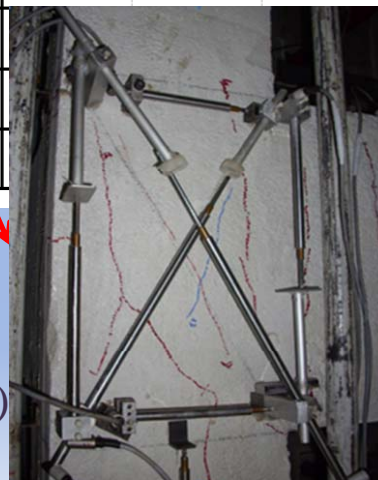
Risultati sperimentali: Non rinforzato

- Quadro fessurativo e modalità di rottura



3° Ciclo
Prima fessurazione
(Drift =0.52%,
 $V_c = 33.2$ kN)

5° Ciclo
Fessurazione diagonale
Carico negativo
(Drift =0.70%, $V_c = -29.7$ kN)

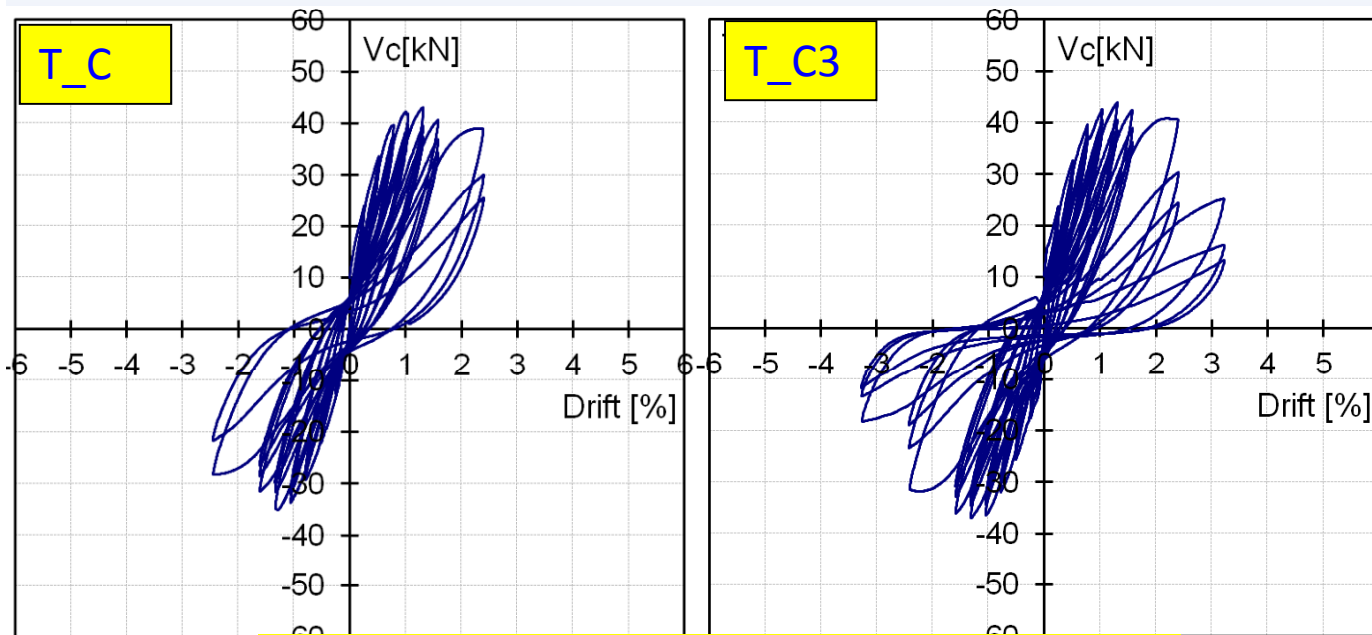


7° Ciclo (Drift=2.4%, $V_c = 25.2$ kN)

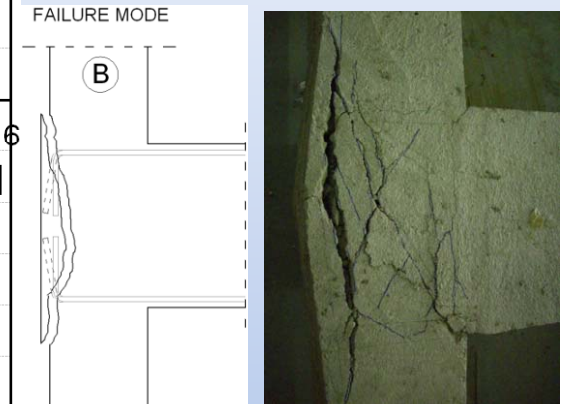
danno esteso



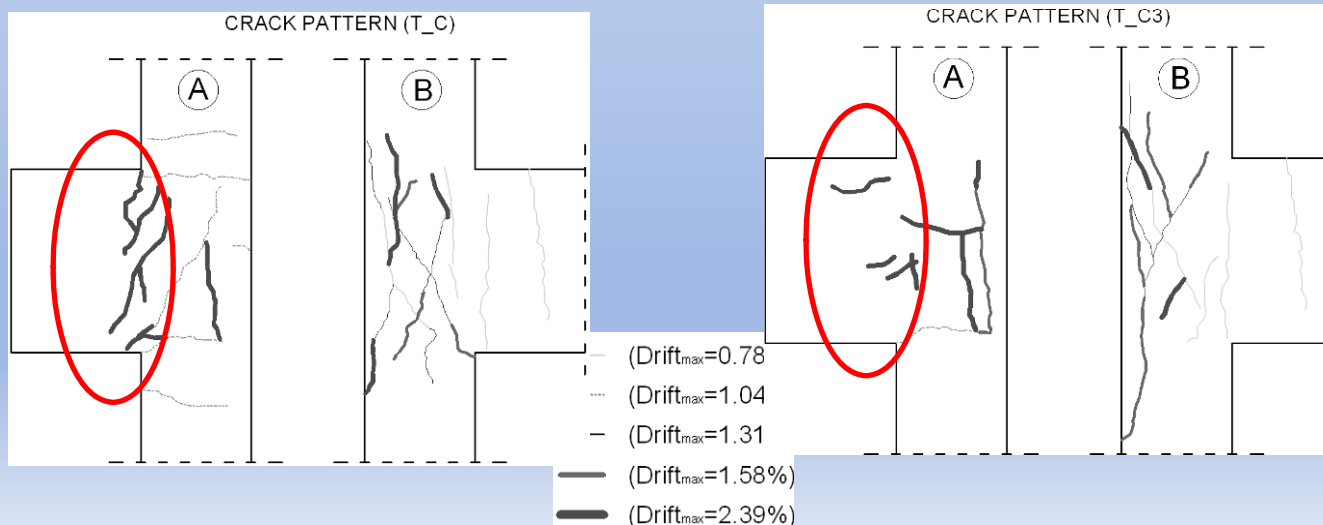
Risultati sperimentali: Non rinforzato



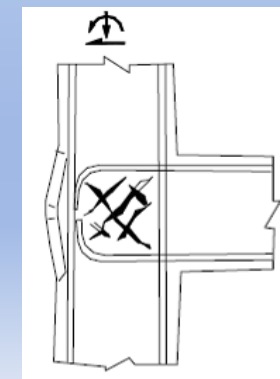
Failure mode



Quadro fessurativo simile

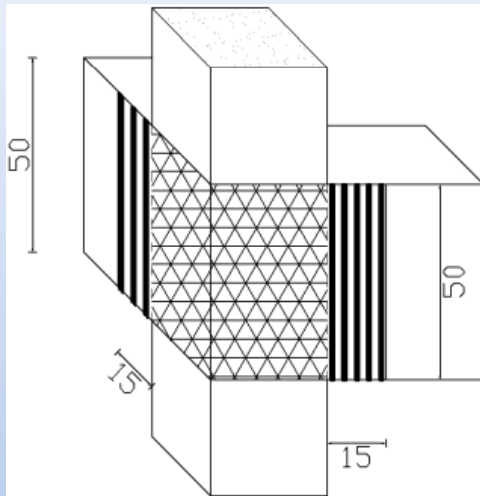


Espulsione copriferro nella zona di estremità del nodo a causa dell'instabilizzazione delle barre longitudinali dei pilastri



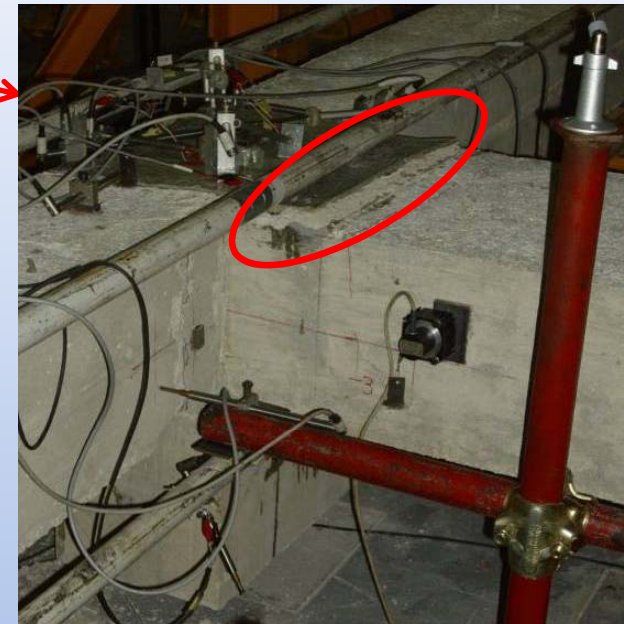
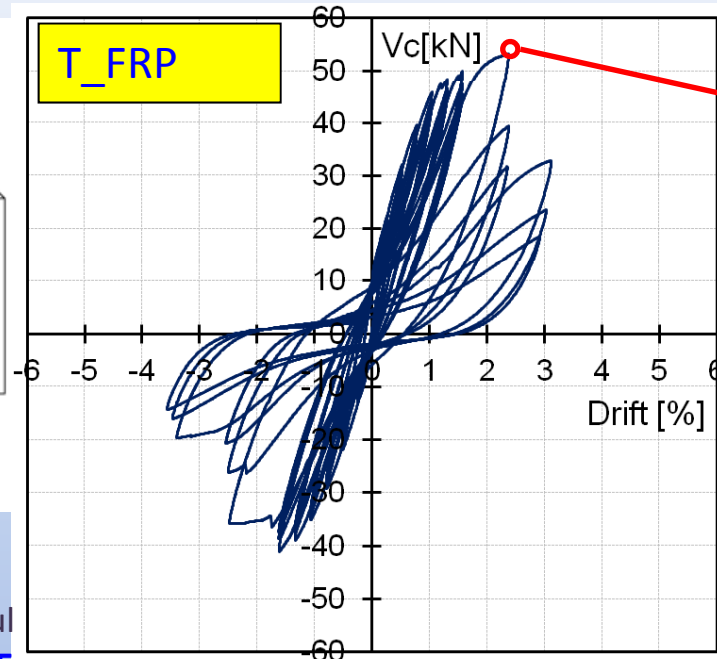
Risultati sperimentali: Provini rinforzati

“Light” CFRP (Schema 1)

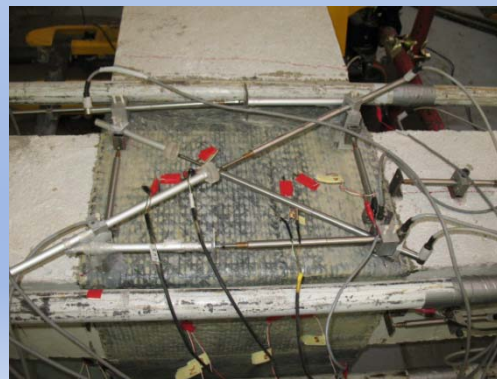


1 strato CFRP quadriassiale sul pannello di nodo esteso per **15 cm** sulla trave

1 strato uniassiale CFRP sagomato ad U estensione **15 cm** sulla trave

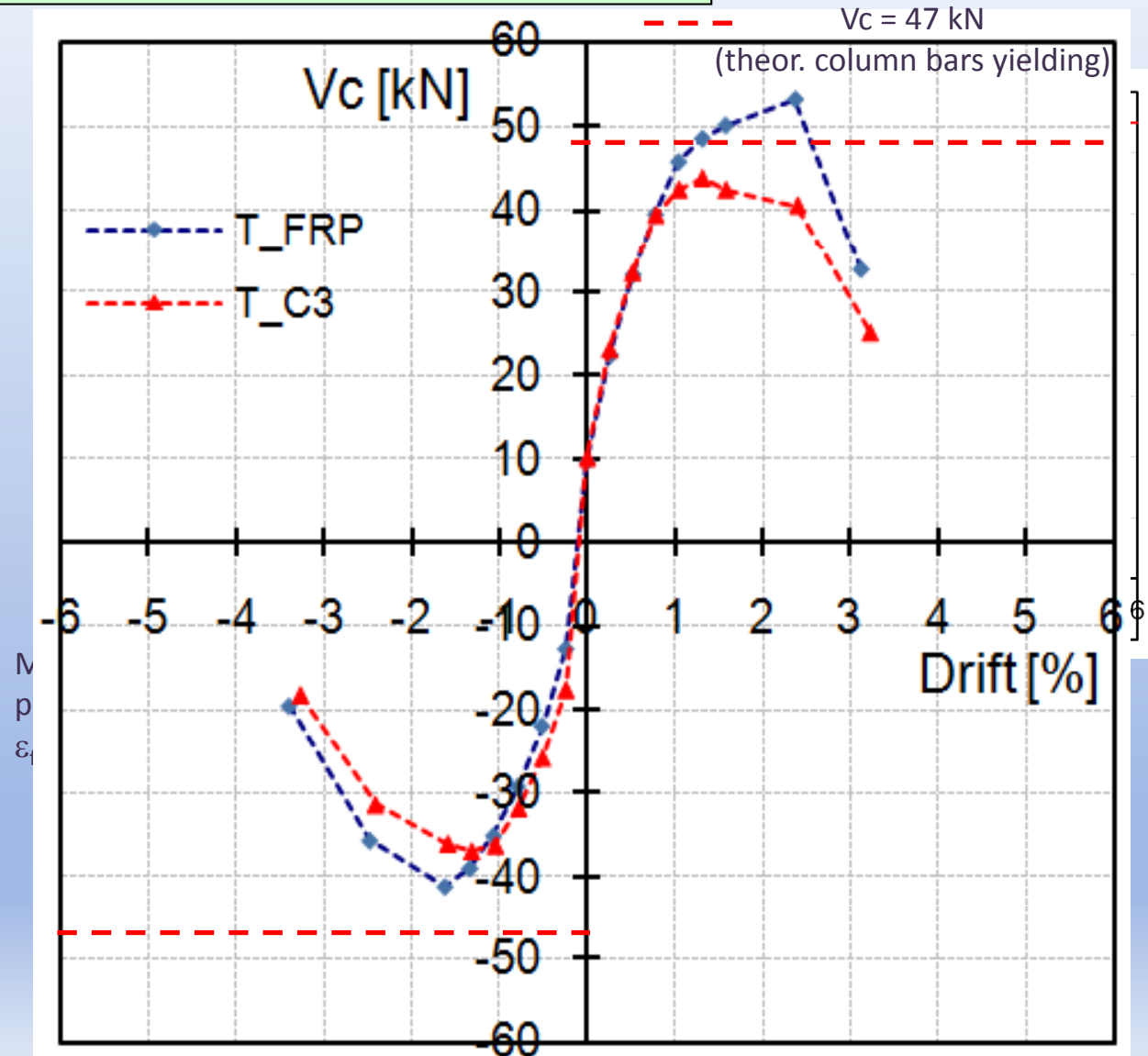
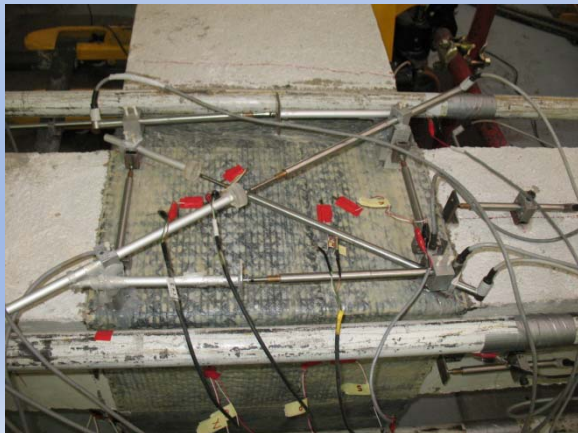
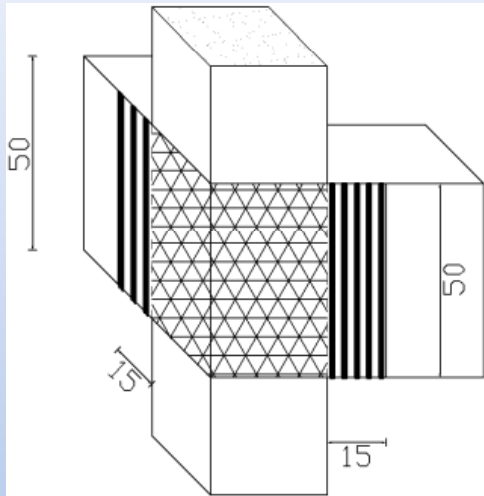


FRP debonding a partire dall'estremità-6° cycle (Drift = 2.37%, Vc = 53.15 kN)



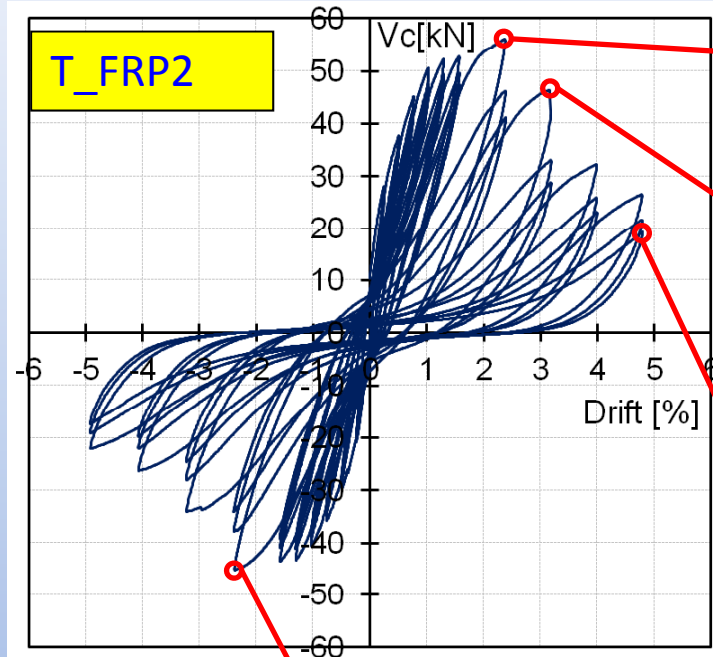
Risultati sperimentali: Confronti

“Light” CFRP (Schema 1)



Risultati sperimentali: Provini rinforzati

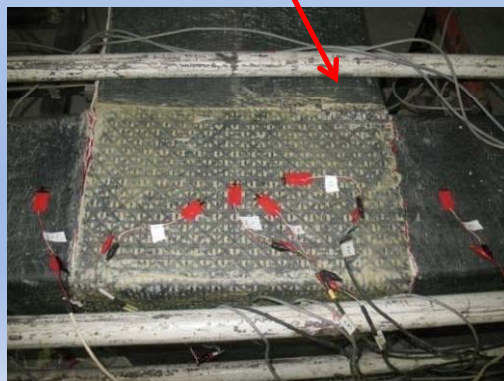
“Strong” CFRP (Schema 2)



7° Ciclo
Primo debonding
(Drift =2.38%,
V_c = 56.1 kN)



8° Ciclo
Debonding di estremità
(Drift =3.18%,
V_c = 46.0 kN)

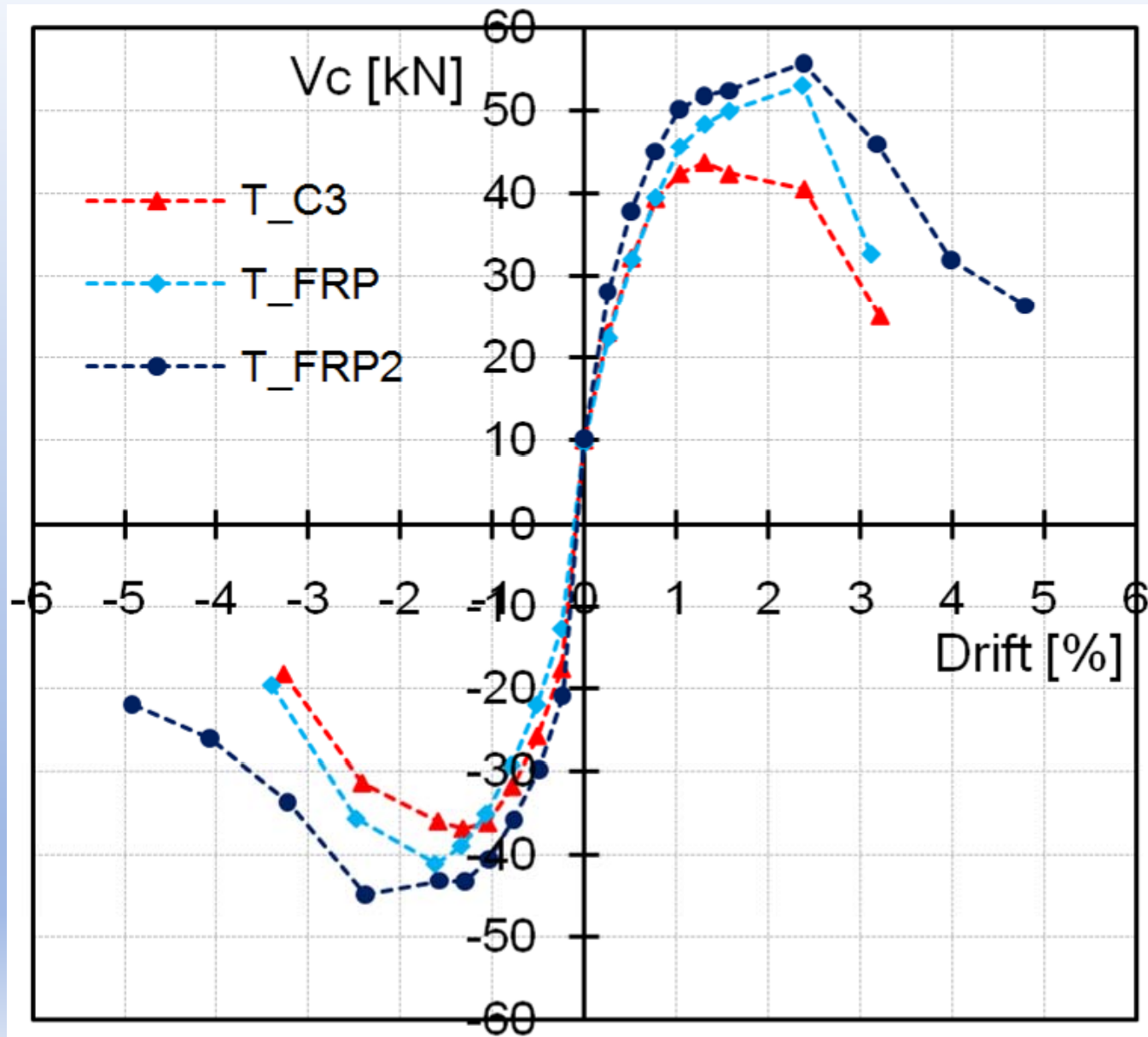


7° Ciclo
Tranciamento tessuto quadriax
(Drift=2.39%,
V_c = 44.9 kN)



10° Ciclo
(Drift =4.8%,
V_c = 19.1 kN)

Risultati sperimentali: Confronti



Ripartire da L'Aquila



5 ottobre 2009