



**Materiali ed Approcci Innovativi per il Progetto in Zona Sismica e la Mitigazione della Vulnerabilità delle Strutture**  
**Università degli Studi di Salerno – Consorzio ReLUIS, 12-13 Febbraio 2007**

 **POLITECNICO DI MILANO**



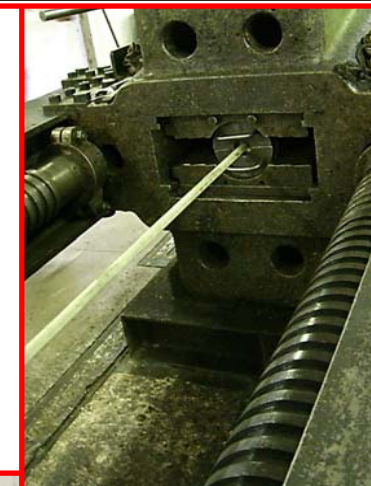
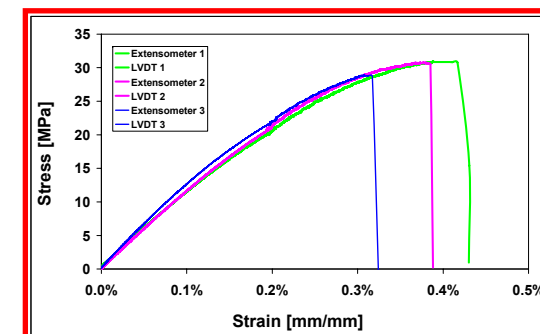
## **ANALISI NUMERICA E SPERIMENTALE DI SISTEMI DI RINFORZO IN FRP PER STRUTTURE ED ELEMENTI METALLICI**

**M. Bocciarelli, P. Colombi, G. Fava e C. Poggi**

**Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Politecnico di Milano**

## Task 8.1 Materiali - Unità del Politecnico di Milano (Prof. C. Poggi)

1. Analisi delle **proprietà meccaniche e di durabilità degli FRP** (CFRP e AFRP) e **degli adesivi**: cicli termici, di umidità, raggi UV e nebbia salina.
2. Caratterizzazione di **nuovi materiali compositi** (lamine e barre in FRP) e descrizione di un modello di scheda tecnica.
3. Studio sperimentale di **elementi strutturali rinforzati con FRP** con provini sottoposti a cicli di variazione di temperatura ed umidità, esposizione a raggi ultravioletti ed ambiente salino.
4. Raffinamento dei **coefficienti di conversione** delle resistenze degli FRP e degli adesivi.



## 1) Rinforzo strutturale di elementi metallici

### Prove sperimentali

Prove di trazione su giunti;  
Prove di flessione su travi

### Modelli analitici per la valutazione della distribuzione di sforzi e dei parametri della meccanica della frattura

Two parameters elastic foundation  
Sezione omogeneizzata

### Analisi ad elementi finiti

Modelli 3D  
Tecnica Three layer technique  
Modelli coesivi

## 2) Durabilità agli agenti atmosferici

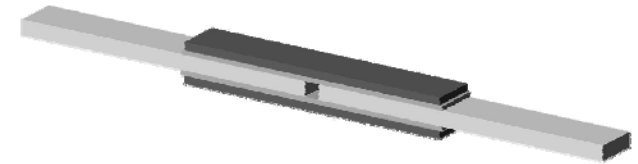
Cicli termici e/o sali antighiaccio

## 3) Fatica

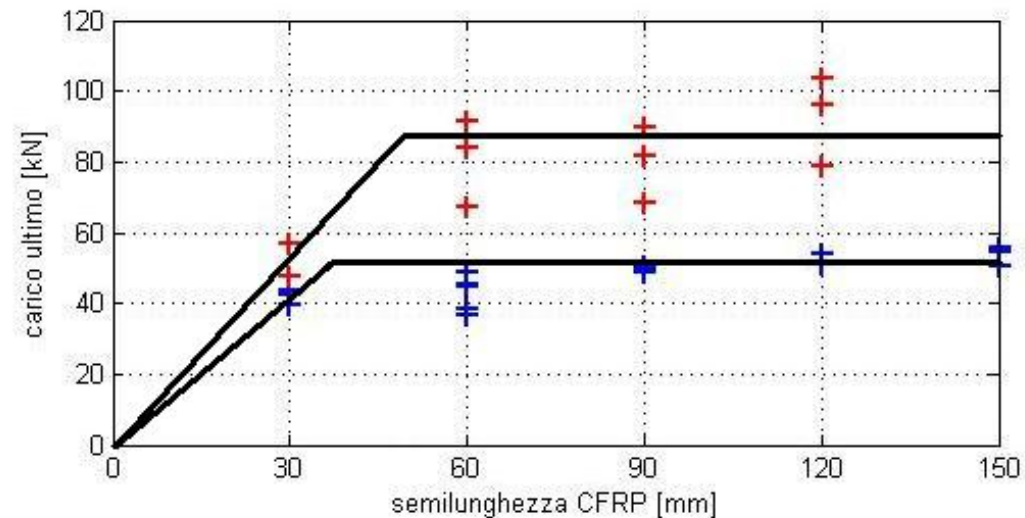
## Prove Sperimentali

## Prove di trazione su giunti 'double shear lap'

- **Acciaio:** Fe E 275 ( $f_y = 275$  MPa ;  $f_t \geq 430$  MPa)
- **CFRP:** Sika® CarboDur® M614 ( $E > 200$  GPa;  $f_t > 2800$  MPa)
- **Adesivo:** Sikadur® 30 ( $E = 4500$  MPa;  $f_t \geq 24.8$  MPa)



Il provino 'double shear lap' riproduce materiali ed interfacce in elementi metallici rinforzati con CFRP.



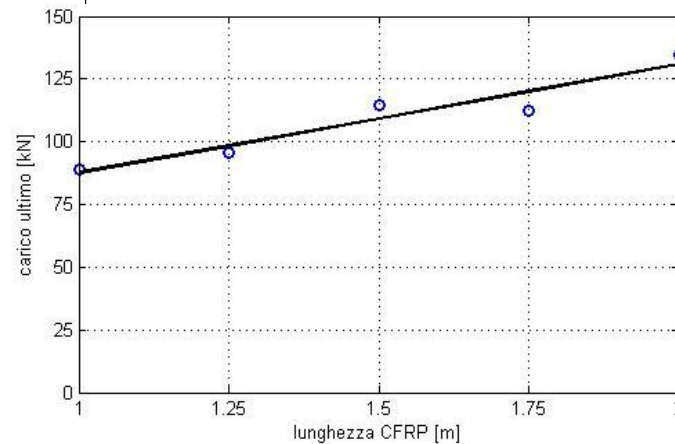
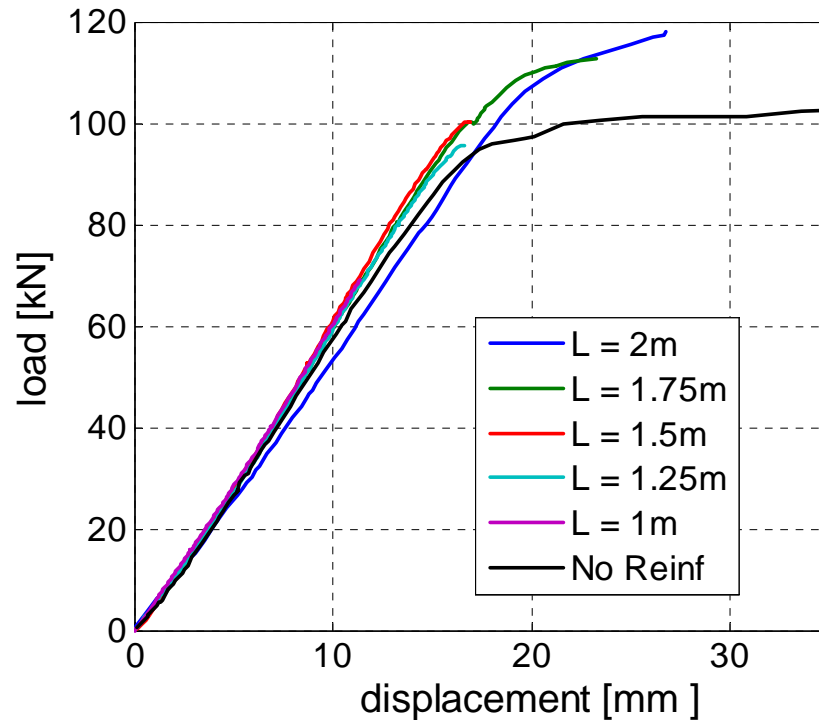
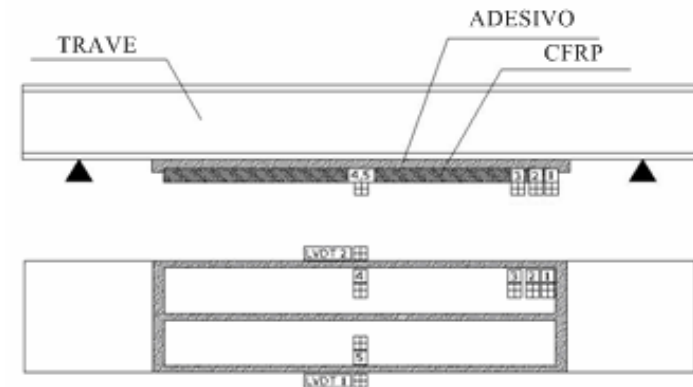
Sezione 60 x 10

Sezione 30 x 10

## Prove Sperimentali

## Prove di flessione su travi

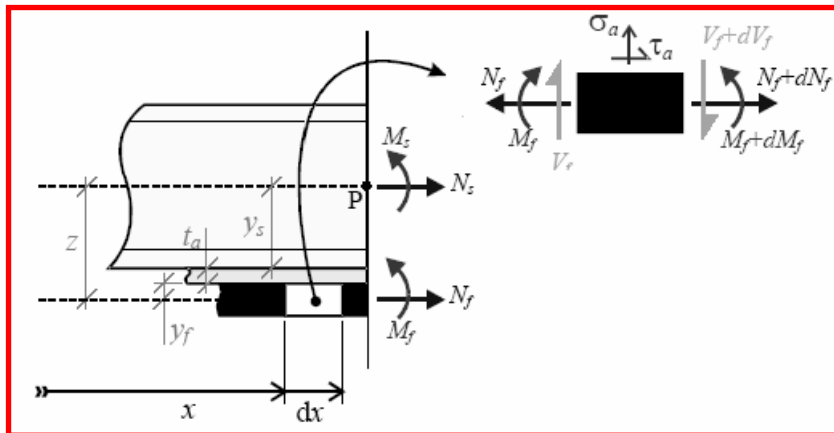
- **Acciaio:** Fe E 275 ( $f_y = 275$  MPa ;  $f_t \geq 430$  MPa)
- **CFRP:** Sika® CarboDur® M614 ( $E > 200$  GPa;  $f_t > 2800$  MPa)
- **Adesivo:** Sikadur® 30 ( $E = 4500$  MPa;  $f_t \geq 24.8$  MPa)





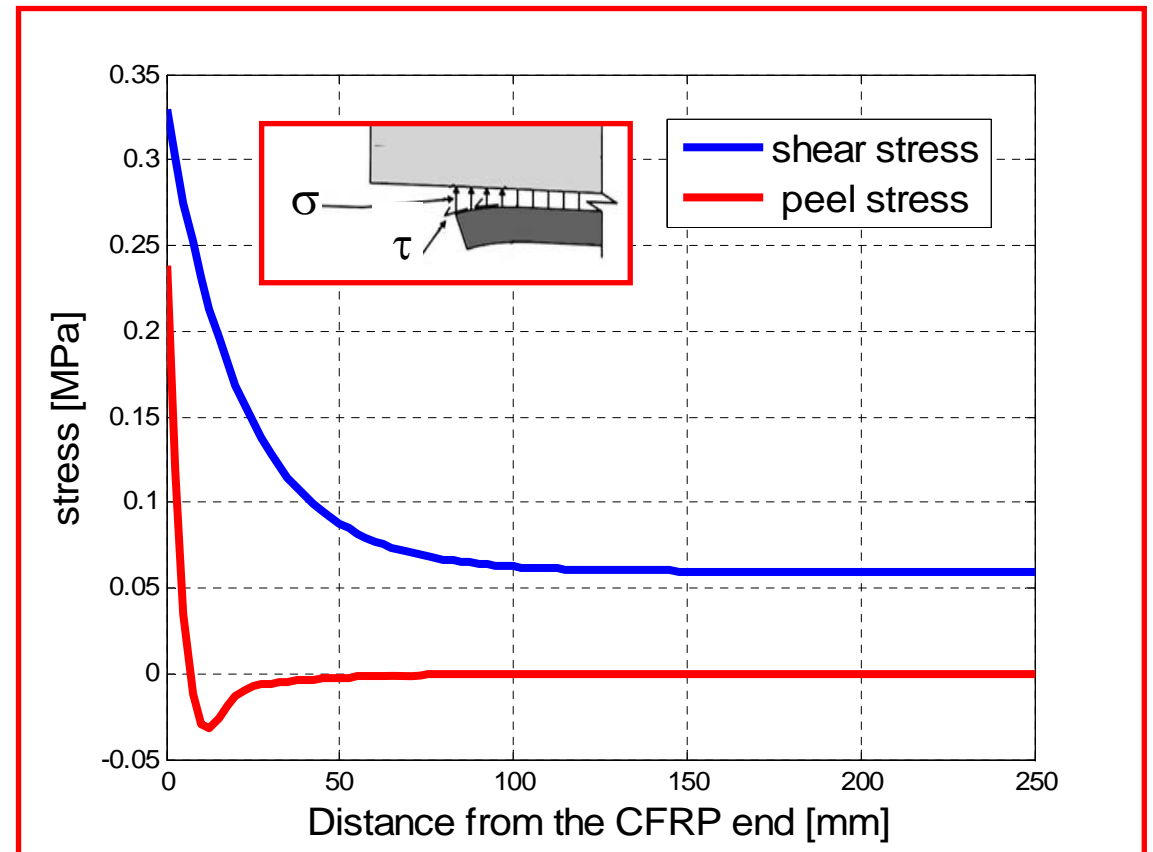
## Modelli Analitici

Analisi dello stato tensionale basata su criteri di equilibrio e congruenza



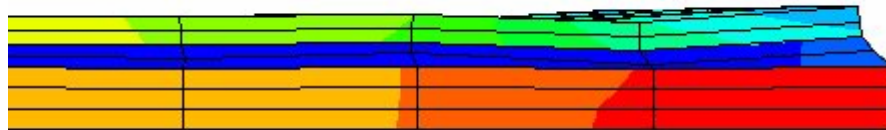
All'estremità della lamina si ricava:

$$\sigma_1 = \frac{\sigma}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma}{2}\right)^2 + \tau^2} \leq \bar{\sigma}$$

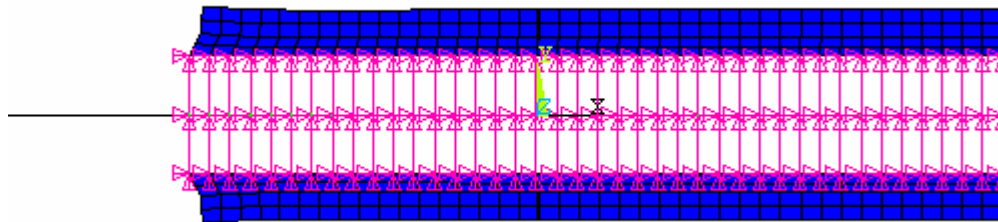


## Modelli Numerici

**MODELLI 3D:** inizialmente usati per modellare i giunti in campo elastico.

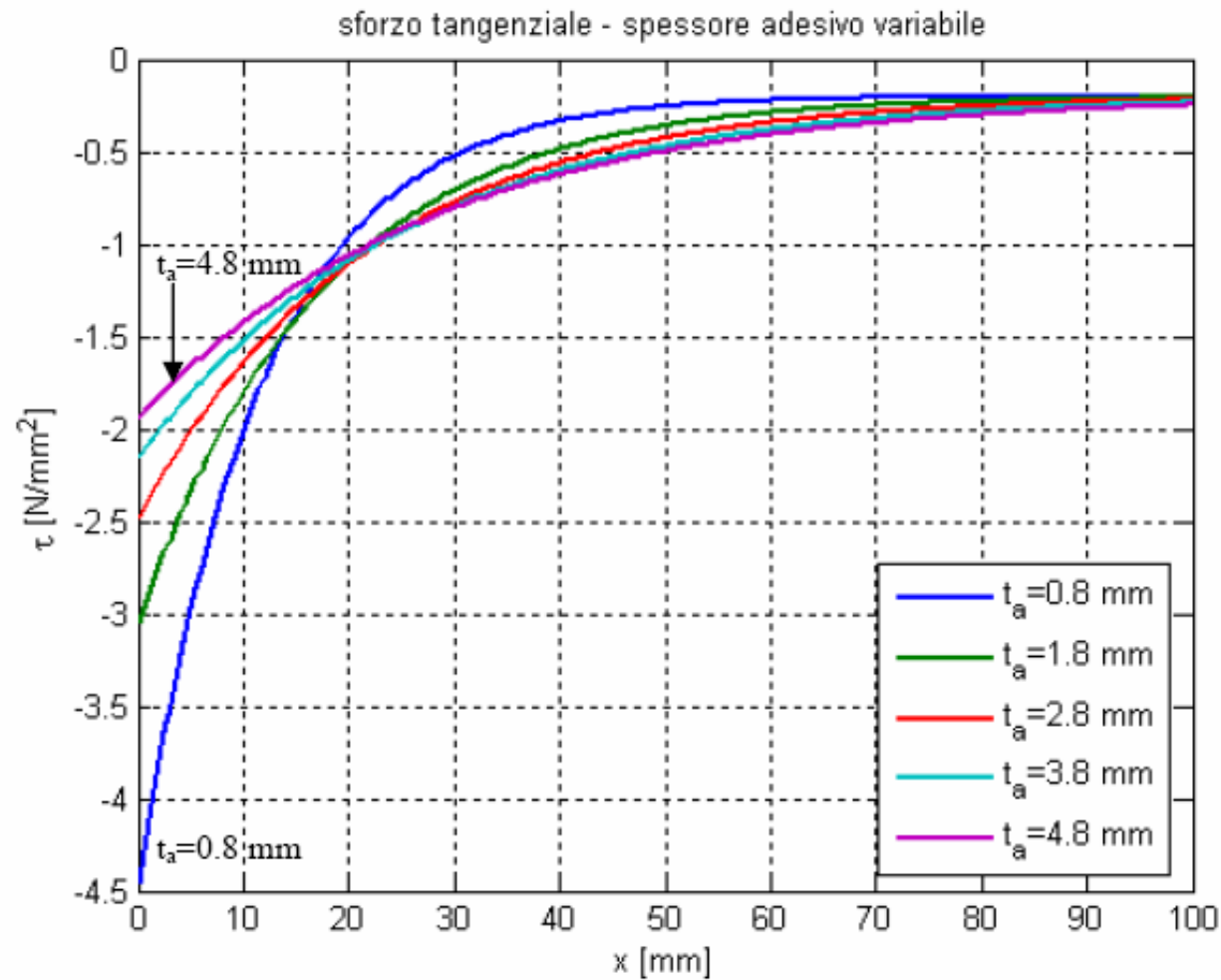


**THREE LAYER TECHNIQUE:** Adesivo, metallo e rinforzo modellati come piastre, relazioni cinematiche impongono continuità degli spostamenti all'interfaccia e simulano la progressiva delaminazione.



**MODELLI COESIVI:** colgono il meccanismo di delaminazione tramite elementi d'interfaccia e un'opportuna legge coesiva

## Analisi parametriche analitiche e numeriche

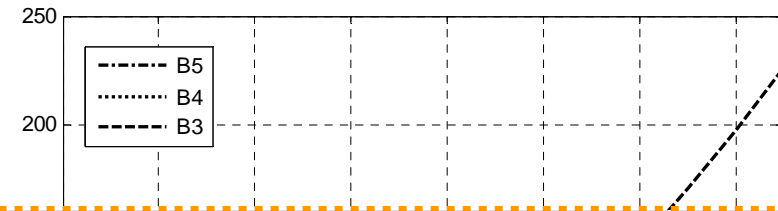
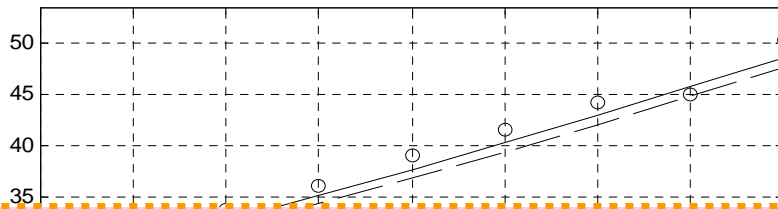


I valori di sforzo necessari per innescare la delaminazione sono pari a circa 20 MPa.



## Approccio energetico

L'energia rilasciata  $G$  viene determinata a partire dall'energia potenziale dell'intera struttura prima e dopo che avvenga la propagazione virtuale della delaminazione.



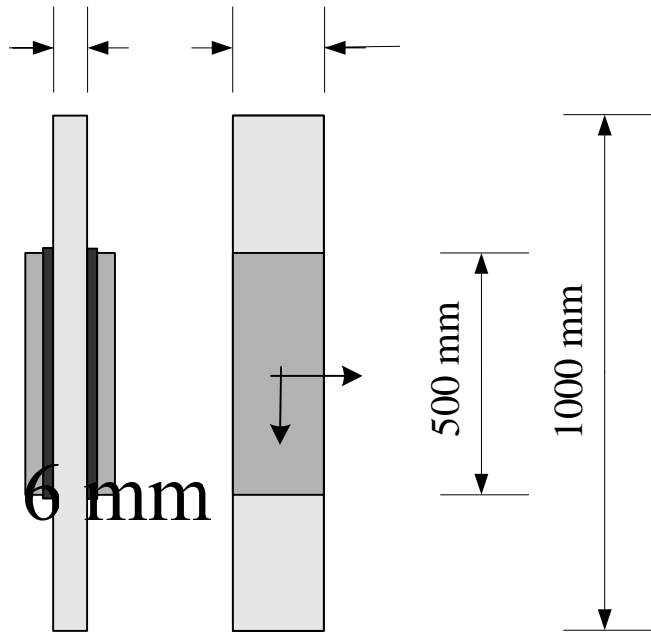
I modelli teorici, numerici e le prove sperimentali sono stati confrontati e risultano coerenti.

Si determina il valore critico di sforzo principale e di tasso di energia rilasciato.

A partire dai modelli sviluppati e variando i parametri legati alla progettazione del rinforzo è possibile valutare come varia lo sforzo principale e il tasso di energia rilasciato  $G$ .

I valori di energia necessari per innescare la delaminazione risultano sempre superiori al valore critico di circa  $100 \text{ J/m}^2$ .

## Prove Sperimentali

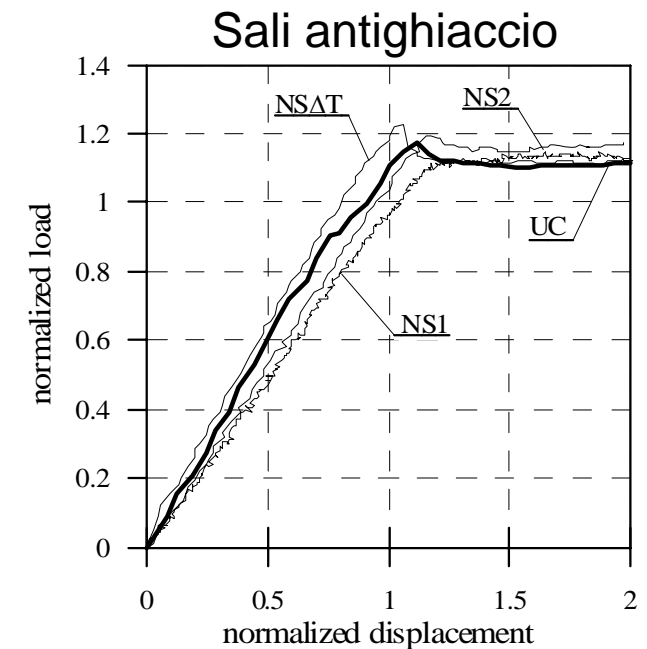
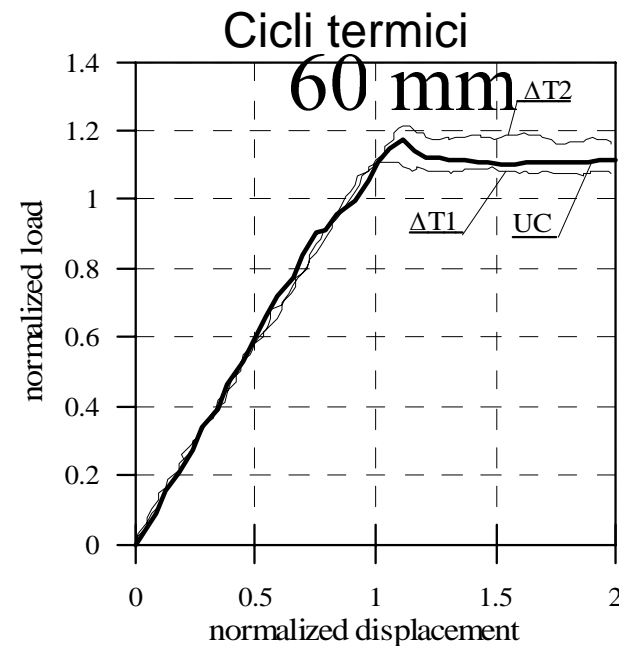


### Cicli termici

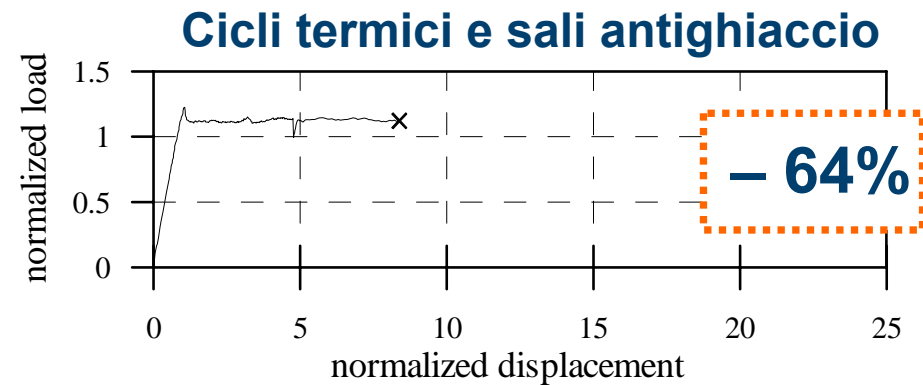
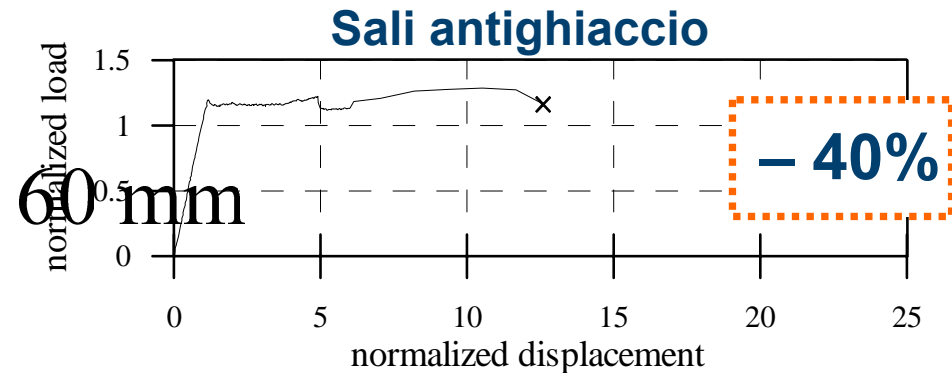
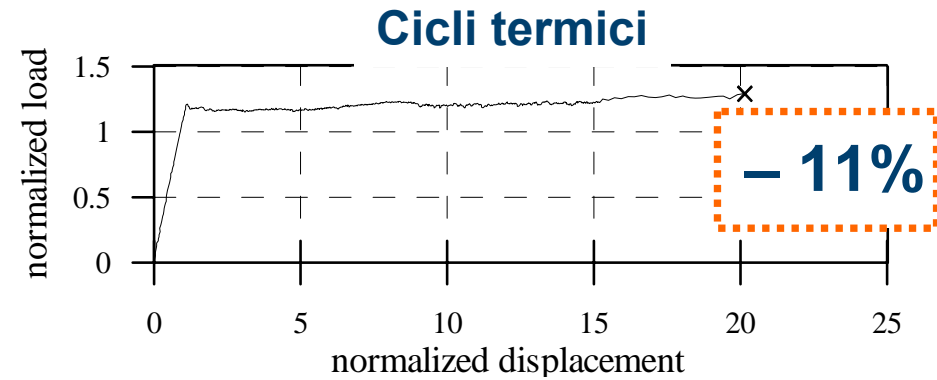
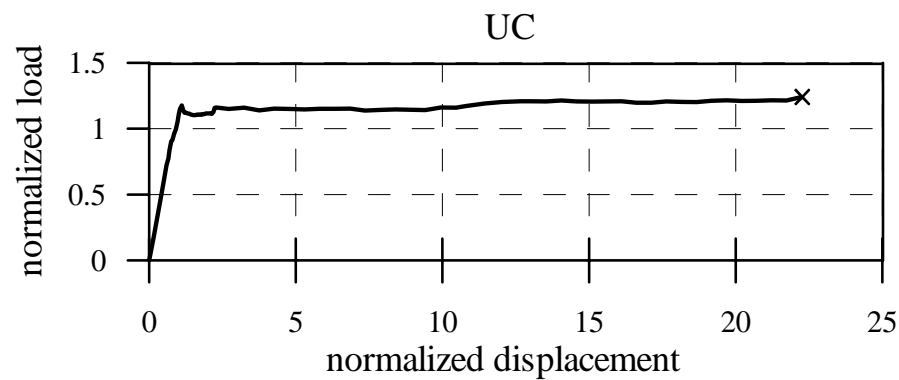
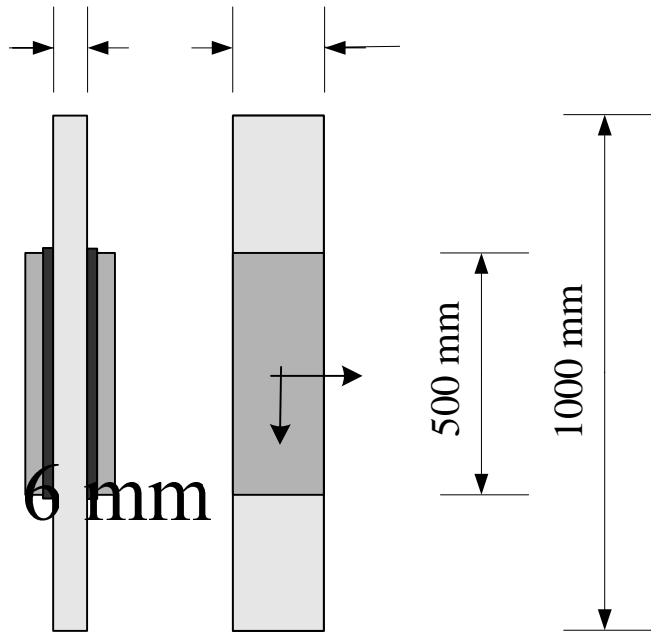
-20 °C (6 h) + 50 °C (6 h)

### Sali antighiaccio

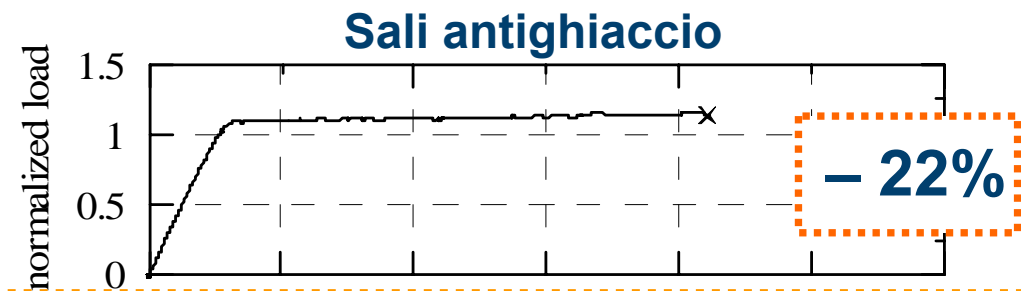
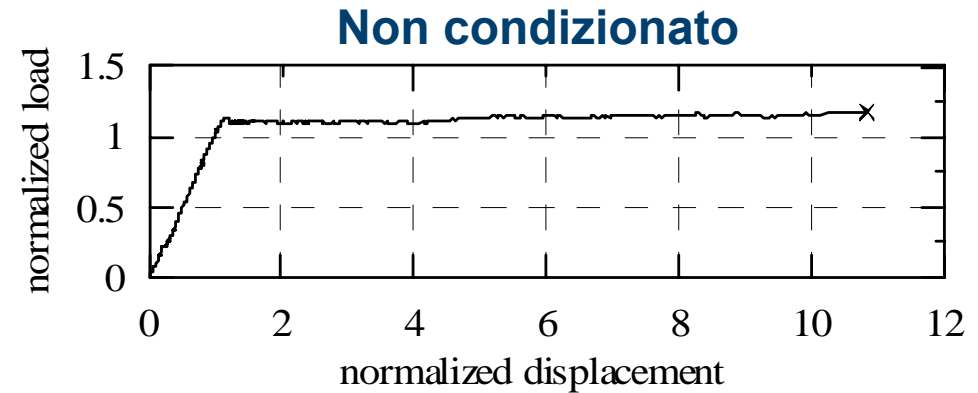
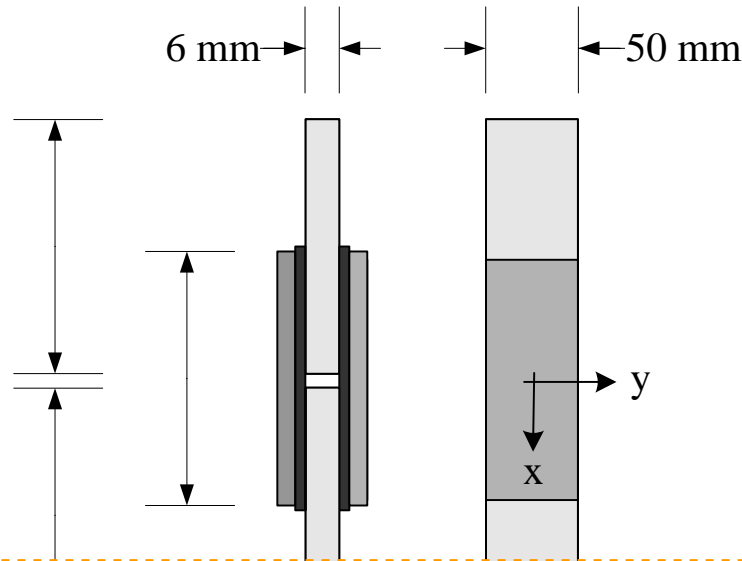
[H<sub>2</sub>O] = 95 % ; [NaCl] = 5 %



## Prove Sperimentali



## Prove Sperimentali



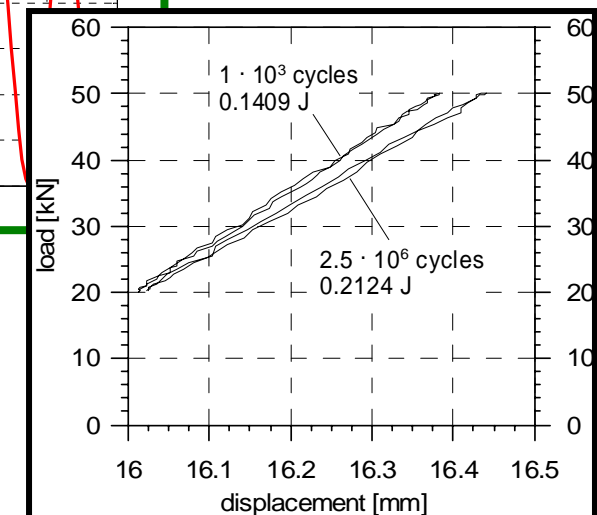
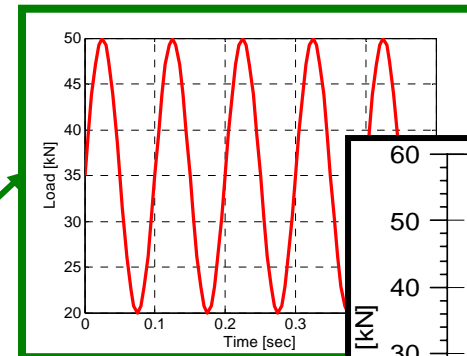
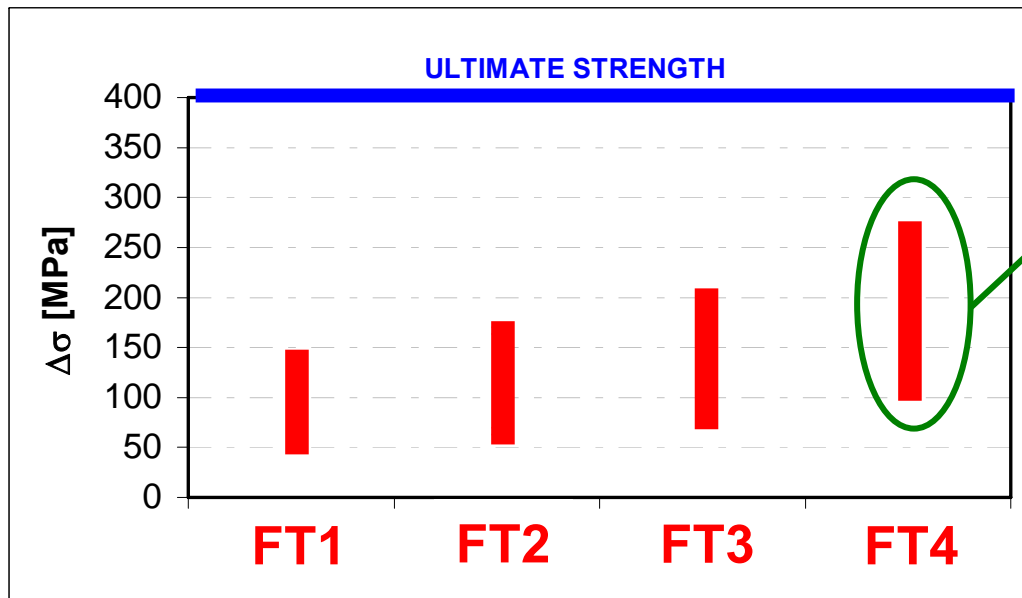
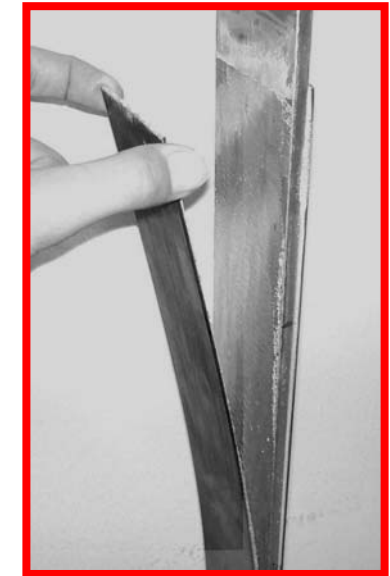
**Le prove hanno interessato un solo tipo di adesivo.**

I cicli termici non alterano le proprietà dell'adesivo, ma possono produrre microfessurazioni nell'adesivo, che facilitano le infiltrazioni d'acqua all'interfaccia.

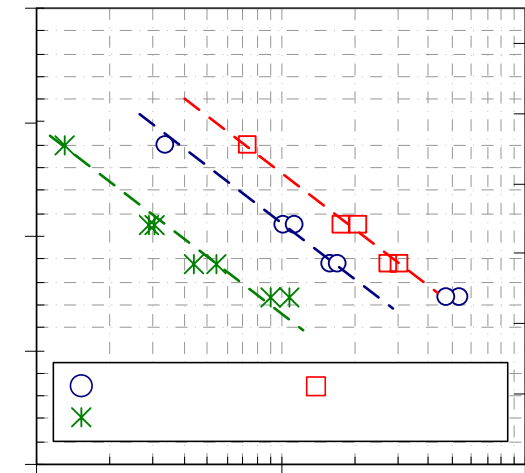
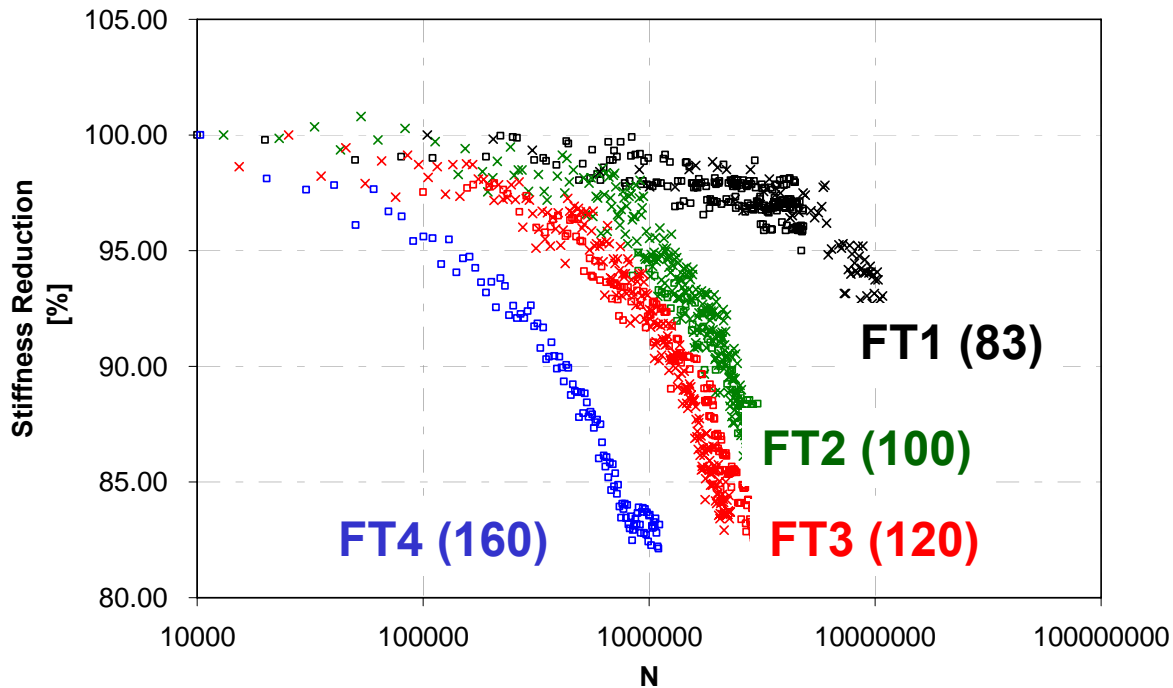
L'effetto combinato di cicli termici e l'elevata umidità determinata dalla fase in nebbia salina hanno un effetto pregiudizievole sul sistema.

## Prove sperimentali

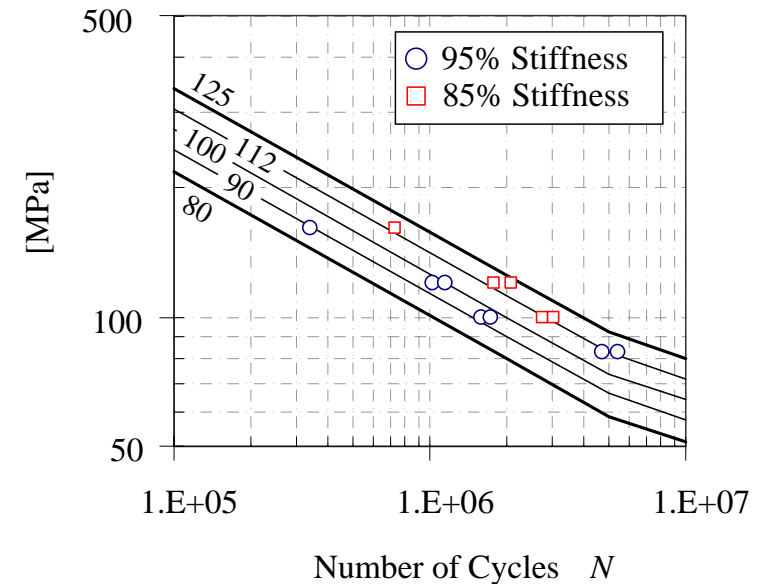
Specimen	$\Delta\sigma$ [MPa]	Load [kN]	R (min/Max)
FT1	83	min 17; max 42	0.4
FT2	100	min 20; max 50	0.4
FT3	120	min 24; max 60	0.4
FT4	160	min 32; max 80	0.4



## Risultati



Quando si innesca la delaminazione, la rigidezza si riduce progressivamente. La perdita di rigidezza è il primo segnale di collasso del sistema.





Per ulteriori informazioni:  
[www.stru.polimi.it](http://www.stru.polimi.it)

