

NONLINEAR ULTRASONICS

Sviluppi recenti e applicazioni per la caratterizzazione del danneggiamento nei materiali

P. Antonaci, P.G. Bocca, C.L.E. Bruno

Structural and Geotechnical Engineering Department, Politecnico di Torino, Italy

M. Scalerandi, A.S. Gliozzi

Physics Department, Politecnico di Torino, Italy





Generalità su Nonlinear Ultrasonics

- Fenomenologia
- Modelli interpretativi
- Applicazioni per la caratterizzazione dei materiali



Un approccio specifico: SSM

- Formulazione
- Implementazione sperimentale
- Risultati



Applicazioni future

- Caratterizzazione del danno nelle superfici murarie



Outline

Nonlinear
ultrasonics

SSM

Applicazioni
future

Evidenza sperimentale per una nuova classe di materiali detti Nonlinear Mesoscopic Elastic - NME (**rocce, calcestruzzi, terreni...**) caratterizzati da una struttura composita e da comportamento **non lineare**, con **isteresi** e **discrete memory**



I meccanismi alla base di tale comportamento sembrano risiedere nella natura “eterogenea” di tali materiali, che in essa si differenziano dai materiali dalla cosiddetta **elasticità atomica**



Anche i materiali ad elasticità atomica possono comportarsi come materiali NME se danneggiati. Il **danneggiamento** accentua il carattere di non linearità nei materiali NME



Outline

Nonlinear
ultrasonics

SSM

Applicazioni
future

La **teoria classica** esprime l'evoluzione temporale del campo di spostamenti locali indotti dalla sollecitazione dinamica attraverso l'espansione in serie di Taylor del campo deformativo

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{K_0}{\rho_0} \left[\frac{\partial u}{\partial x} + \beta \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \delta \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^3 + \dots \right]$$



I termini non lineari β , δ , etc. producono **interazioni tra i campi** deformativi: il termine cubico genera un'interazione tra tre campi, in cui la coalescenza tra due (con frequenza ω_1 e ω_2 , ampiezza ε_1 e ε_2) forma un terzo campo (con componenti di frequenza $\omega_1 \pm \omega_2$ e ampiezza proporzionale al prodotto $\varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2$)



Tale teoria è in grado di spiegare alcune evidenze sperimentali (formazione di **sidebands** negli esperimenti di modulazione, etc.)



Outline

Nonlinear
ultrasonics

SSM

Applicazioni
future

Le **teorie isteretiche** estendono la teoria classica esprimendo il contributo dei fenomeni isteretici al moto del campo di spostamenti attraverso termini aggiuntivo non analitici:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{K_0}{\rho_0} \left[\frac{\partial u}{\partial x} + \beta \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \delta \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^3 + \dots \right] + A(\varepsilon, \dot{\varepsilon})$$



Esistono poi numerosi **modelli fenomenologici** che cercano di spiegare evidenze sperimentali ancora non del tutto chiarite (*P-M Space Model...*)



Outline

Nonlinear
ultrasonics

SSM

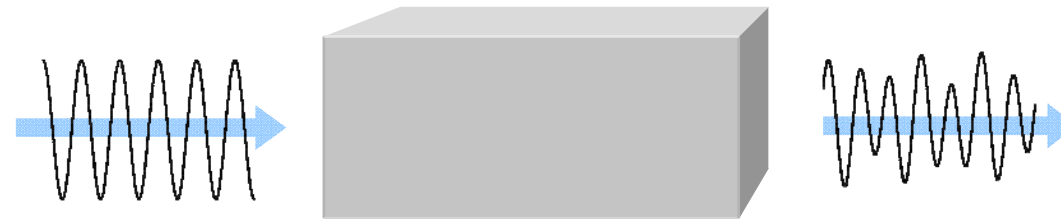
Applicazioni
future

- Guyer R.A. and Johnson P.A. (1999) - Nonlinear mesoscopic elasticity: evidence for a new class of materials, *Physics Today*, vol. 52(4) pp. 30-36.
- Van Den Abeele K.E.A., Johnson P.A. and Sutin A. (2000) - Nonlinear elastic wave spectroscopy (NEWS) techniques to discern material damage. Part I: Nonlinear wave modulation spectroscopy. *Research on Nondestructive Evaluation*, Vol. 12(1) pp. 17-30.
- Goursolle T., Callé S., Dos Santos S. and Bou Matar O. (2007)., A two-dimensional pseudospectral model for time reversal and nonlinear elastic wave spectroscopy, *Journal of the Acoustic Society of America* Vol. 122, pp. 3220-3229.
- Antonaci P., Bocca P.G., Bruno C.L.E., Gliozzi A.S. and Scalerandi M. (2010) - Nonlinear ultrasonic evaluation of load effects on discontinuities in concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol. 40(2), pp. 340-346.
- Antonaci P., Bruno C.L.E., Gliozzi A.S. and Scalerandi M. (2010) - Monitoring evolution of compressive damage in concrete with linear and nonlinear ultrasonic techniques, *Cement and Concrete Research*, Vol. 40(7), pp. 1106-1113.



DANNO

Presenza di porzioni di materiale a **comportamento elastico non lineare** che rompono la **proporzionalità tra input e output**



Perdite non lineari di energia elastica (**attenuazione non lineare**)

Ridistribuzione dell'energia a **frequenze** diverse e generazione di componenti armoniche secondarie

Dipendenza della **fase** del segnale dall'ampiezza dell'eccitazione in funzione dell'estensione della zona non lineare attraversata



Estrarre un **indicatore di danno** in base alla risposta non lineare del campione:
Scaling Subtraction Method (SSM)

1. Iniettare un segnale a **bassa ampiezza** e rilevare il corrispondente output

$$v_{lin}(t) = B_1(A \rightarrow 0) \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$$

2. Definire un **segnale di riferimento lineare** $v_{ref}(t)$ all'ampiezza generica, ottenuto **scalando** $v_{lin}(t)$

$$v_{ref}(t) = k v_{lin}(t)$$

$$k = (A/A_{lin})$$

3. Considerare solo la parte non lineare di $v_A(t)$

$$w_A(t) = v_A(t) - v_{ref}(t)$$

$w_A(t)$ è detto **NONLINEAR SSM SIGNAL**

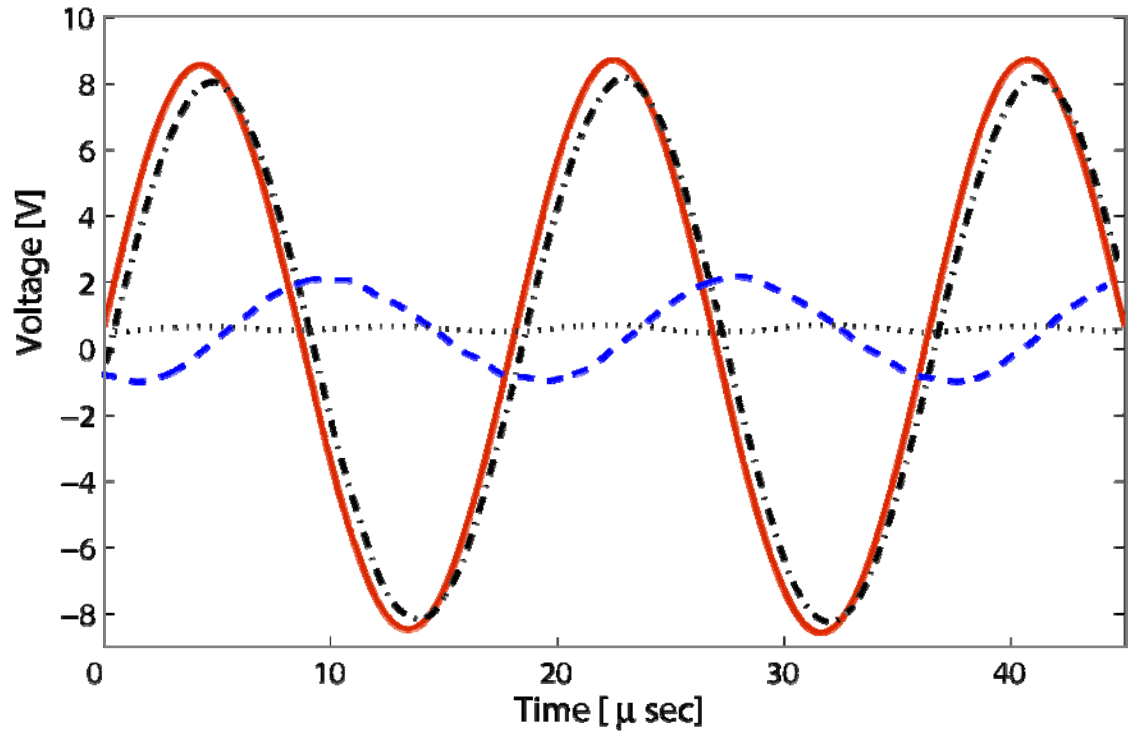


Outline

- Nonlinear ultrasonics
- SSM**
- Applicazioni future



SSM Formulazione



$w_A(t) \rightarrow$ Attenuazione non lineare + Sfasamento + Armoniche

Outline

Necessità di **quantificare la non linearità** nell'elemento in esame



Definizione di un **indicatore QUANTITATIVO** come il massimo del segnale **SSM** $w_A(t)$



$$\theta_A = \max |w_A(t)|$$

Rappresentazione in funzione del massimo dell'**output rilevato**



$$\eta_A = \max |v_A(t)|$$

Nonlinear
ultrasonics

SSM

Applicazioni
future



Outline

Necessità di **quantificare la non linearità** nell'elemento in esame



Definizione di un **indicatore QUANTITATIVO** come l'energia del **segnale SSM $w_A(t)$**



$$\theta_A = \frac{1}{T} \int_0^T w_A^2(t) dt$$

Rappresentazione in funzione dell'energia dell'**output rilevato**



$$x_A = \frac{1}{T} \int_0^T v_A^2(t) dt$$

Nonlinear
ultrasonics

SSM

Applicazioni
future



Outline

Nonlinear
ultrasonics

SSM

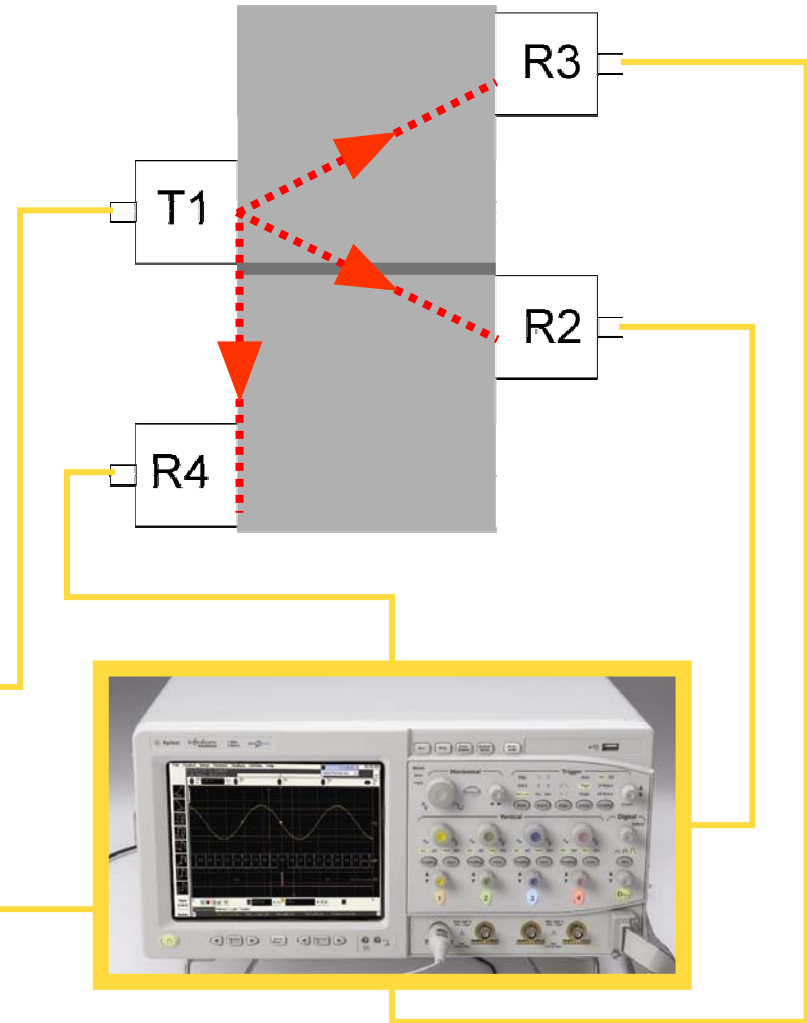
Applicazioni
future



Apparato sperimentale



SSM Implementazione sperimentale



Outline

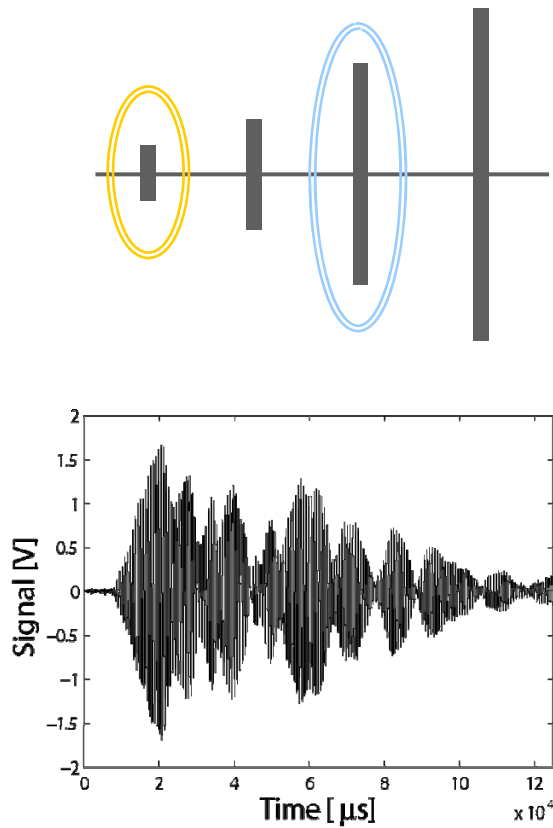
Nonlinear ultrasonics

SSM

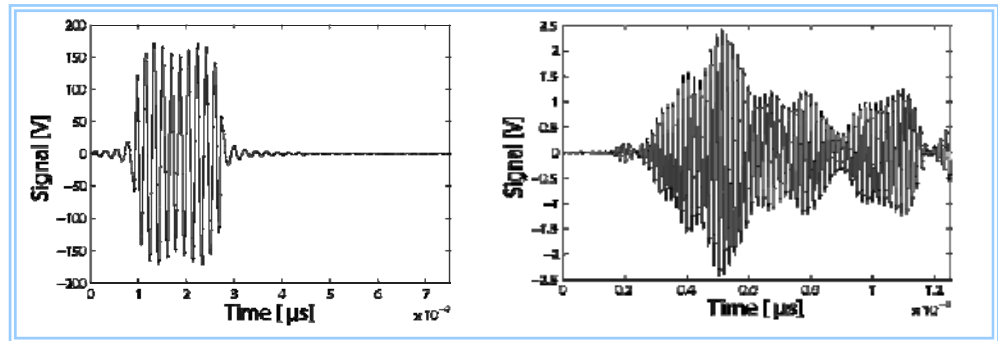
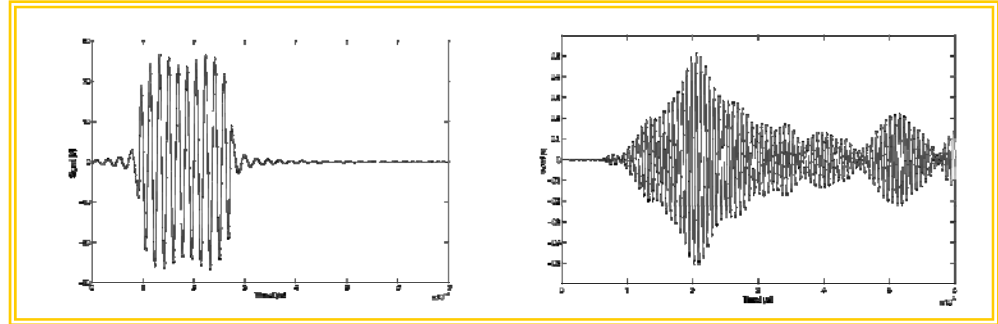
Applicazioni future



Signal processing



SSM Implementazione sperimentale



$$\theta_A = \max |w_A(t)|$$

$$\theta_A = \frac{1}{T} \int_0^T w_A^2(t) dt$$

Outline

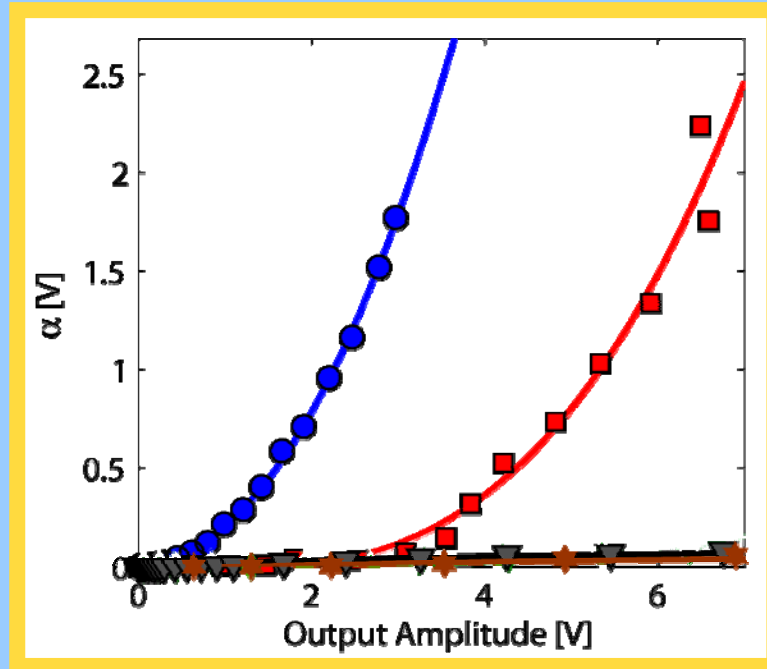
Nonlinear
ultrasonics

SSM

Applicazioni
future ValidazioneVerifica preventiva della linearità
dell'apparato **strumentale****Caratterizzazione** di
materiali lineari e
materiali non lineari**acciaio - calcestruzzo - malta**



➔ Validazione



Apparato

Acciaio

CIs

Malta

↓
l'indicatore SSM **coglie il comportamento** lineare o non lineare dei materiali esaminati e **non è affetto da alterazioni** strumentali

Eccitazione ripetuta di un elemento in calcestruzzo e rilevamento della risposta al variare di:

Nonlinear
ultrasonics

SSM

Applicazioni
future



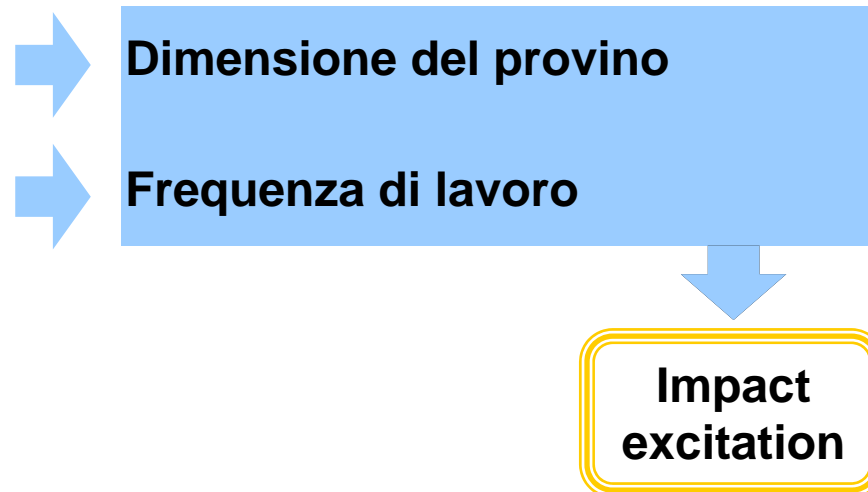
Outline

Eccitazione ripetuta di un elemento in calcestruzzo e rilevamento della risposta al variare di:

Nonlinear
ultrasonics

SSM

Applicazioni
future



Outline


Materiali e provini

Tipo di cemento	CEM II A-L 42.5 R
Dosaggio di cemento	270 kg/m ³
Dosaggio di sabbia (0-5 mm)	1063 kg/m ³
Dosaggio di ghiaia (5-15 mm)	799 kg/m ³
Diametro massimo aggregato	15 mm
Rapporto acqua/cemento	0.74
Additivi	–

Nonlinear
ultrasonics

SSM

Applicazioni
future

Outline

Nonlinear ultrasonics

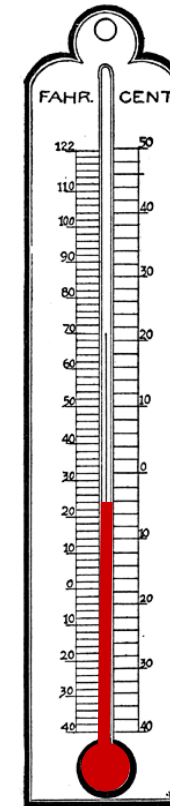
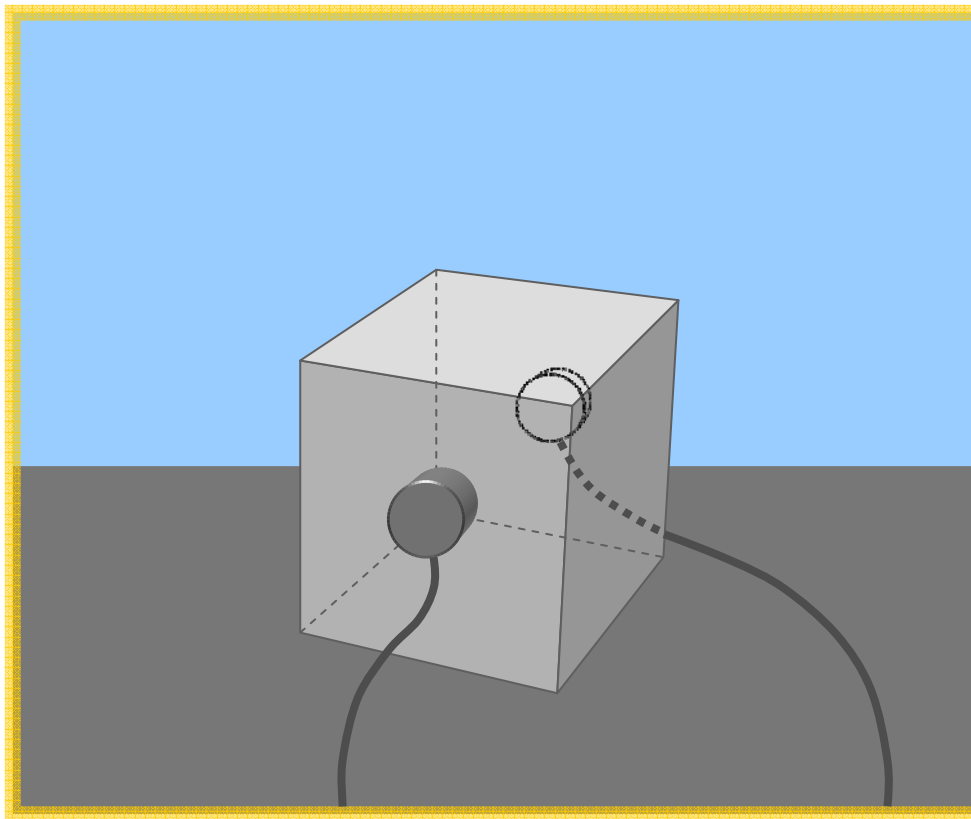
SSM

Applicazioni future



SSM Ultrasonic excitation

➔ **Procedura sperimentale:** variazione delle condizioni ambientali



Temperatura



$T = 22 \div 27 \text{ } ^\circ\text{C}$

Umidità relativa



$R.H. = 30 \div 50\%$

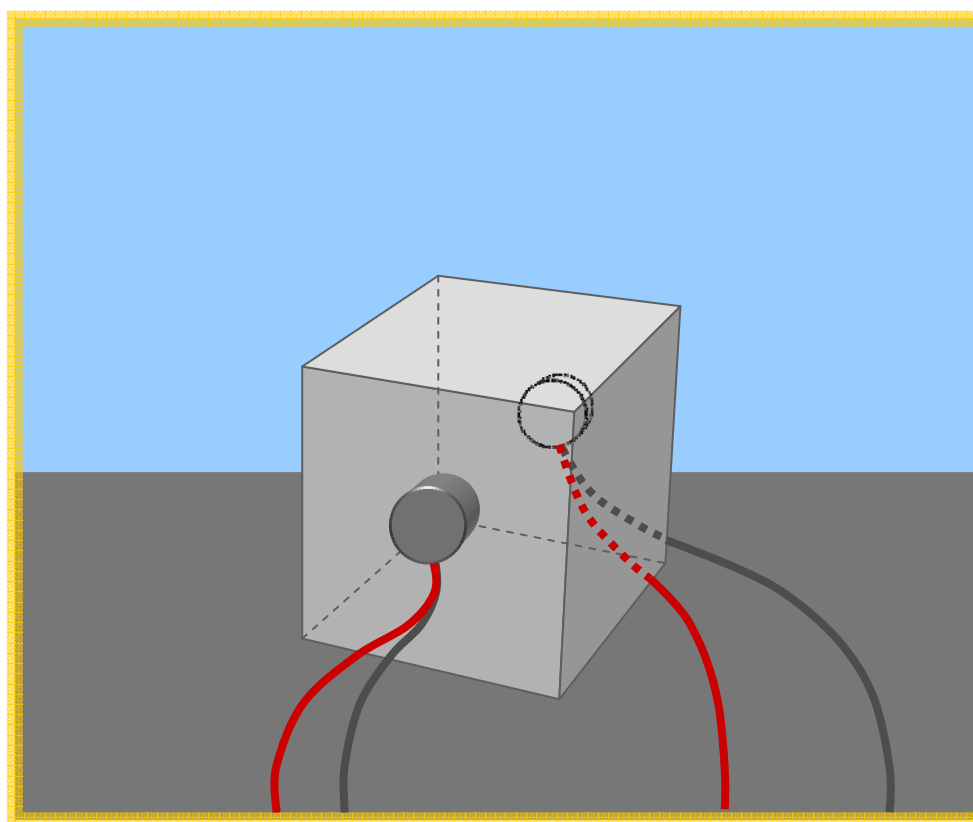
Outline

Nonlinear
ultrasonics

SSM

Applicazioni
future

➔ **Procedura sperimentale:** variazione delle condizioni di prova



Lunghezza dei cavi



$$L = 0.70 \div 3.50 \text{ m}$$



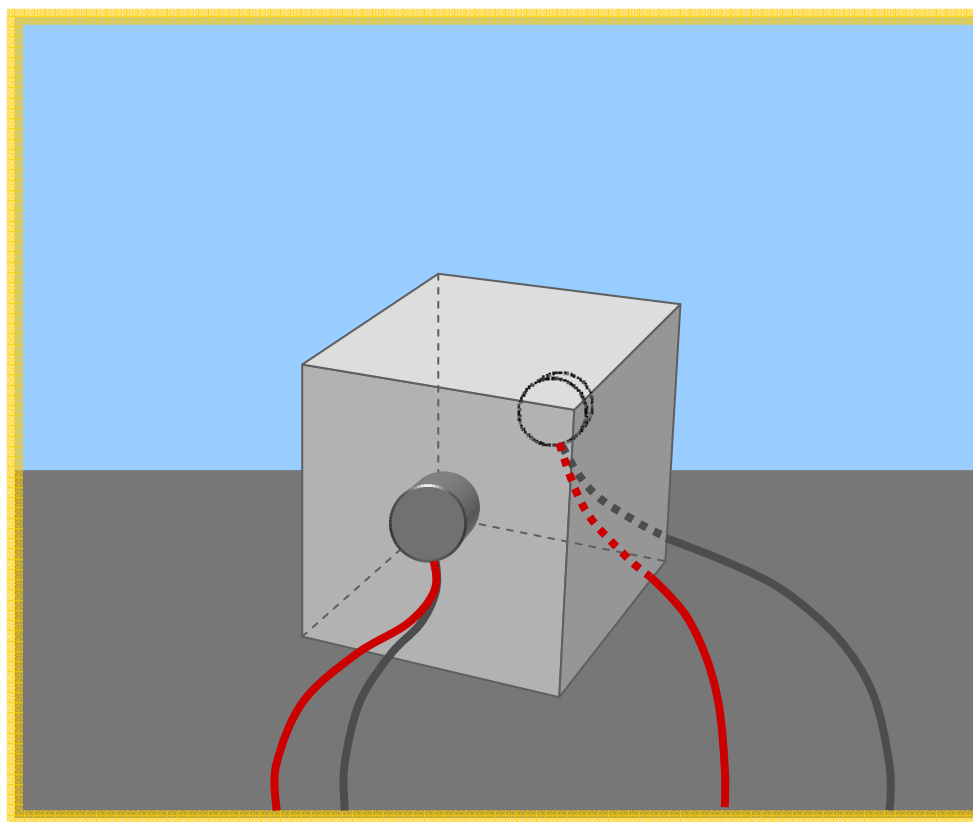
Outline

Nonlinear
ultrasonics

SSM

Applicazioni
future

➔ **Procedura sperimentale:** variazione delle condizioni di prova



Accoppiamento

Procedura di
rimozione e
re-incollaggio

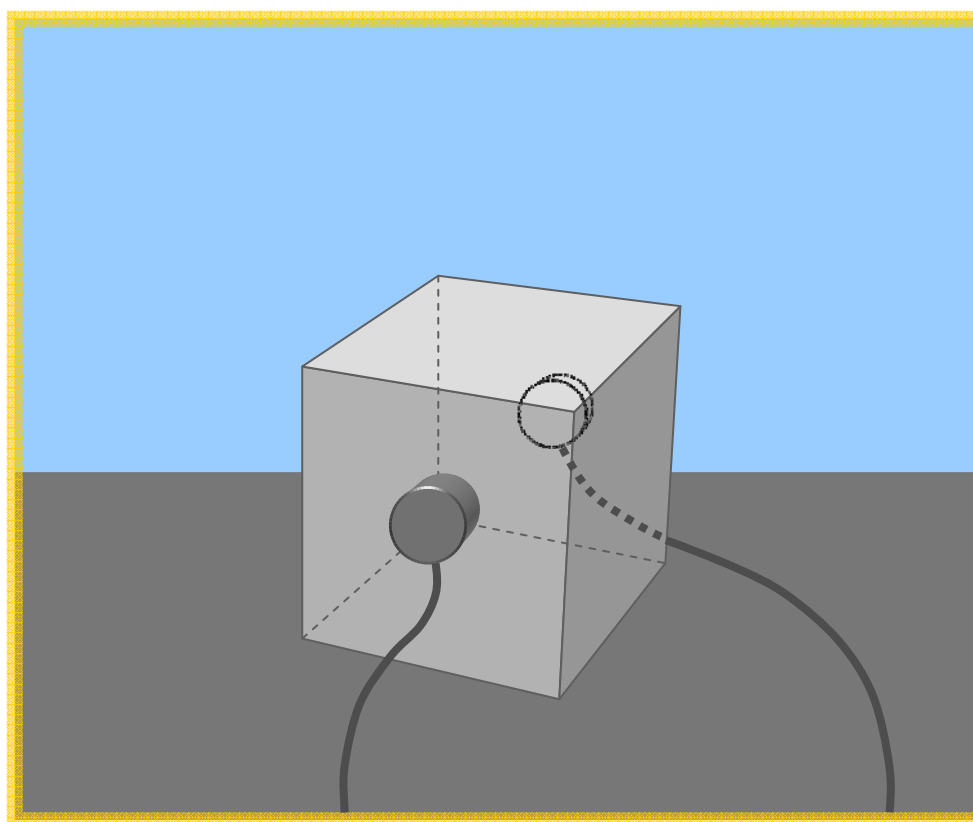
Outline

Nonlinear
ultrasonics

SSM

Applicazioni
future

➔ **Procedura sperimentale:** variazione delle condizioni di prova



Disposizione dei sensori

↓

Modalità di
trasmissione
diretta



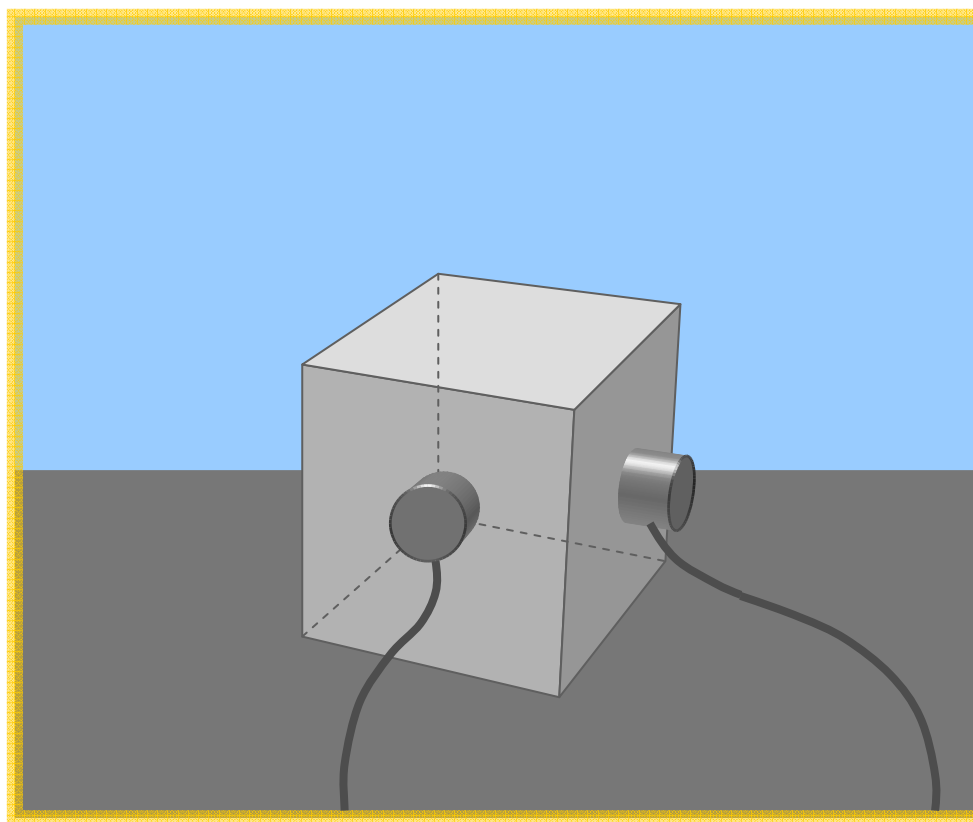
Outline

Nonlinear
ultrasonics

SSM

Applicazioni
future

➔ **Procedura sperimentale:** variazione delle condizioni di prova



Disposizione dei sensori

↓

Modalità di
trasmissione
semi-diretta



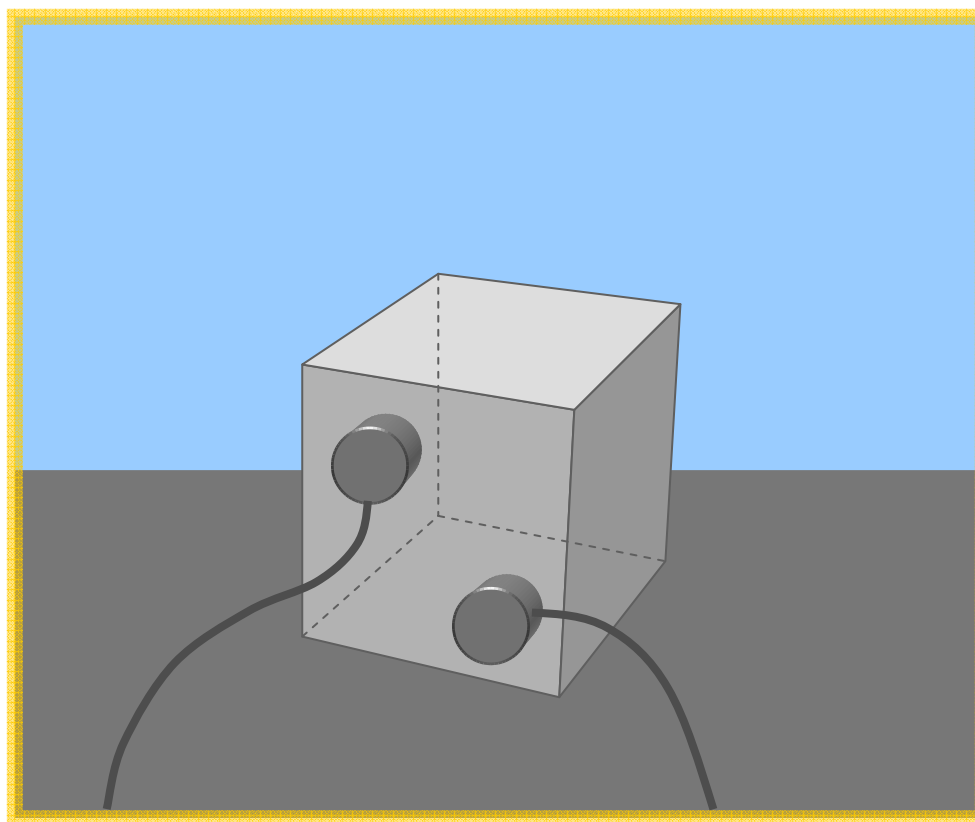
Outline

Nonlinear
ultrasonics

SSM

Applicazioni
future

➔ **Procedura sperimentale:** variazione delle condizioni di prova



Disposizione dei sensori

↓

Modalità di
trasmissione
indiretta



Outline

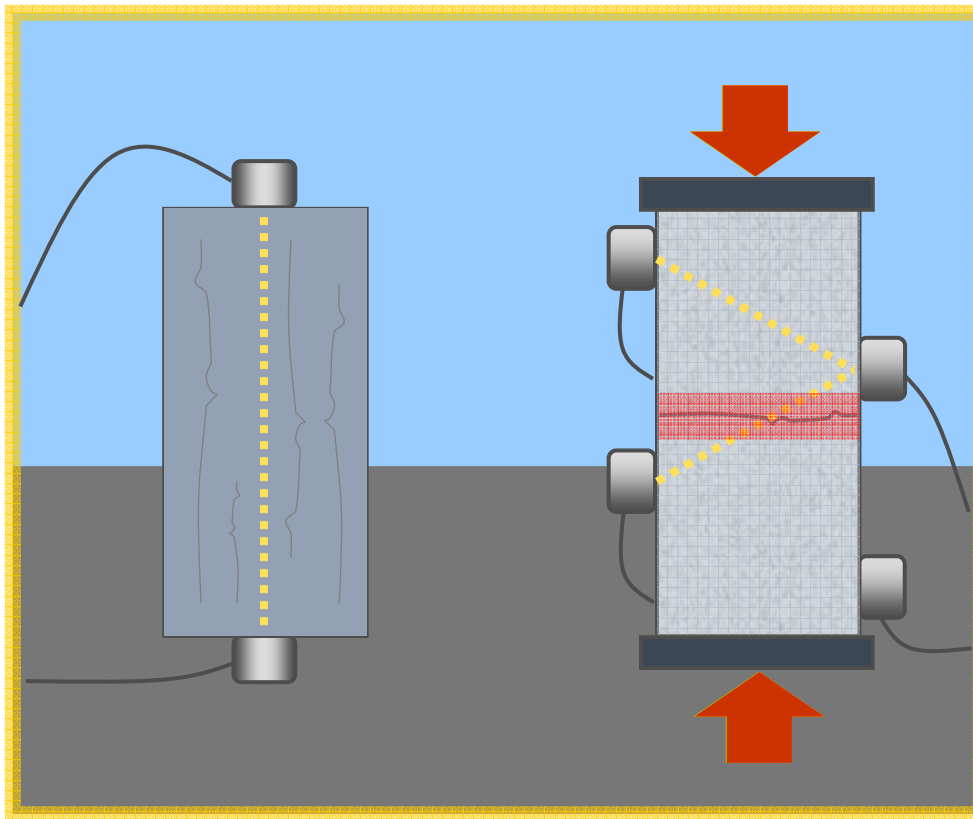
SSM
Ultrasonic excitation

➔ **Procedura sperimentale:** variazione della forma e del danno

Nonlinear
ultrasonics

SSM

Applicazioni
future



Forma



Cilindri o prismi

Danno



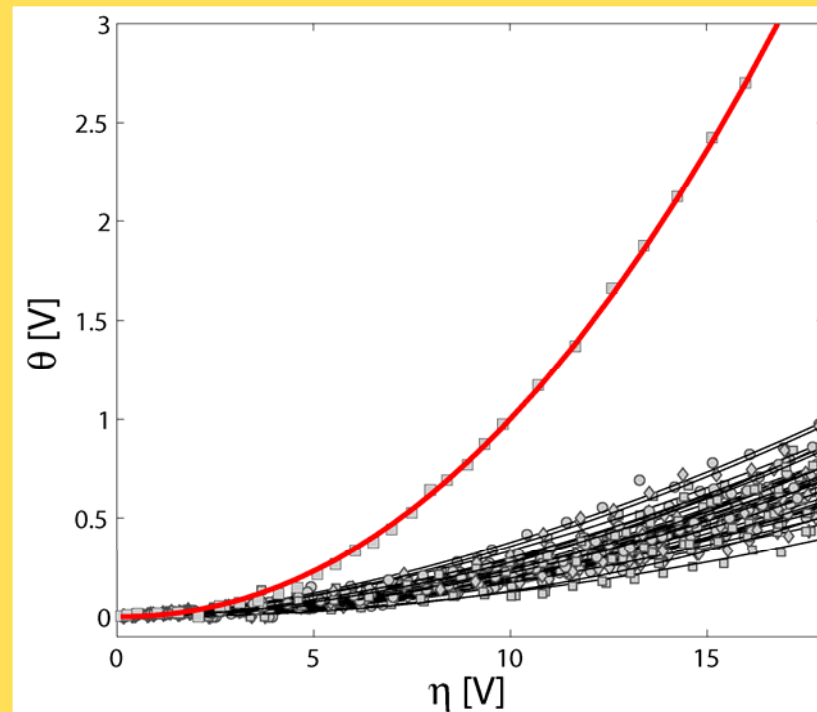
Diffuso o localizzato



Outline

Nonlinear
ultrasonics

SSM

Applicazioni
future
 Risultati


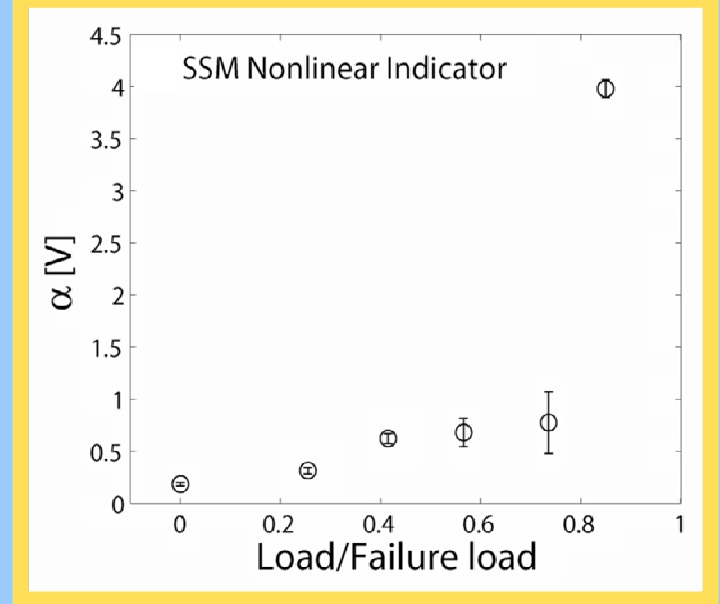
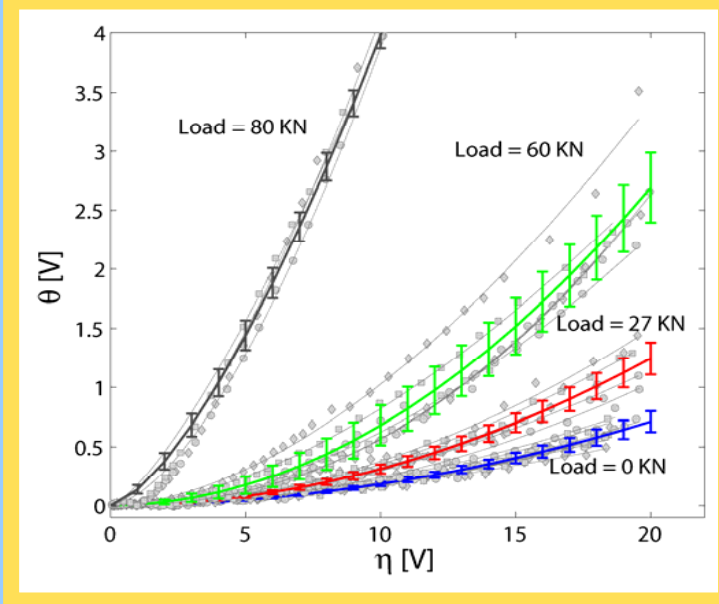
Tutte le curve riferite a provini **non caricati** si raggruppano in una fascia ben al di sotto della curva relativa al generico primo livello di carico



La variabilità delle misure SSM è sufficientemente bassa da consentire di **discriminare** i successivi livelli di carico/stati di danno



➔ Risultati



La non linearità dei provini cresce al progredire del carico e il rate di incremento non è costante

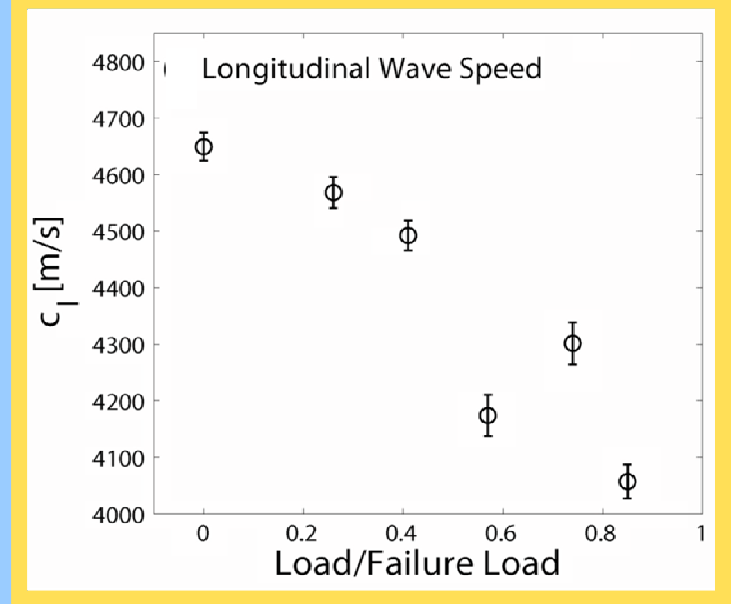
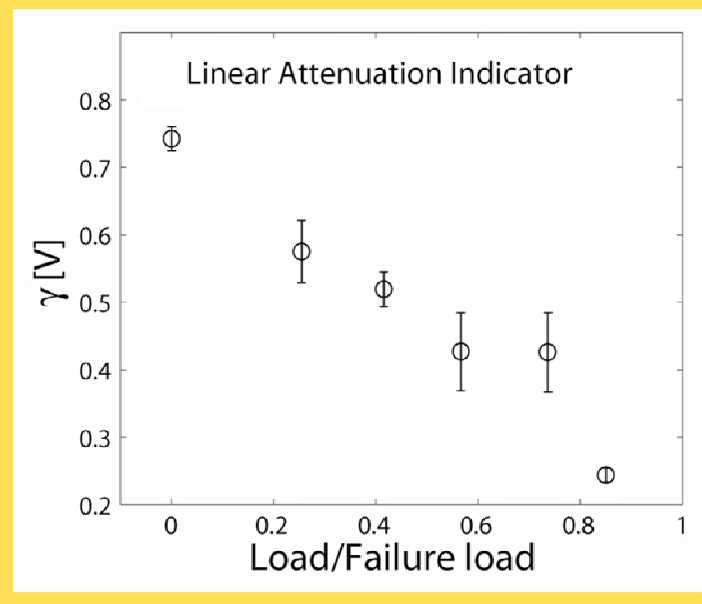


➔ Risultati

Nonlinear
ultrasonics

SSM

Applicazioni
future



Gli indicatori lineari non sono in grado di cogliere le diverse fasi nell'evoluzione del danneggiamento



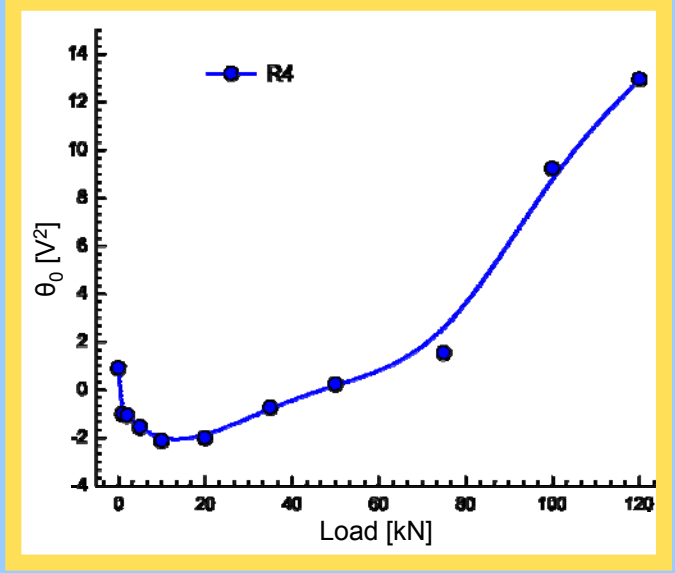
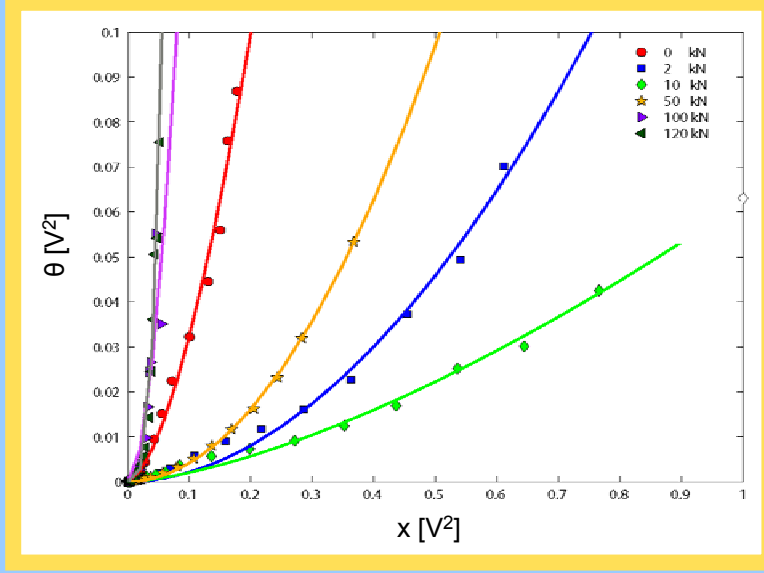
Outline

Nonlinear ultrasonics

SSM

Applicazioni future

➔ Risultati



La **non linearità** dei provini cresce al progredire del carico e il **rate di incremento** non è costante



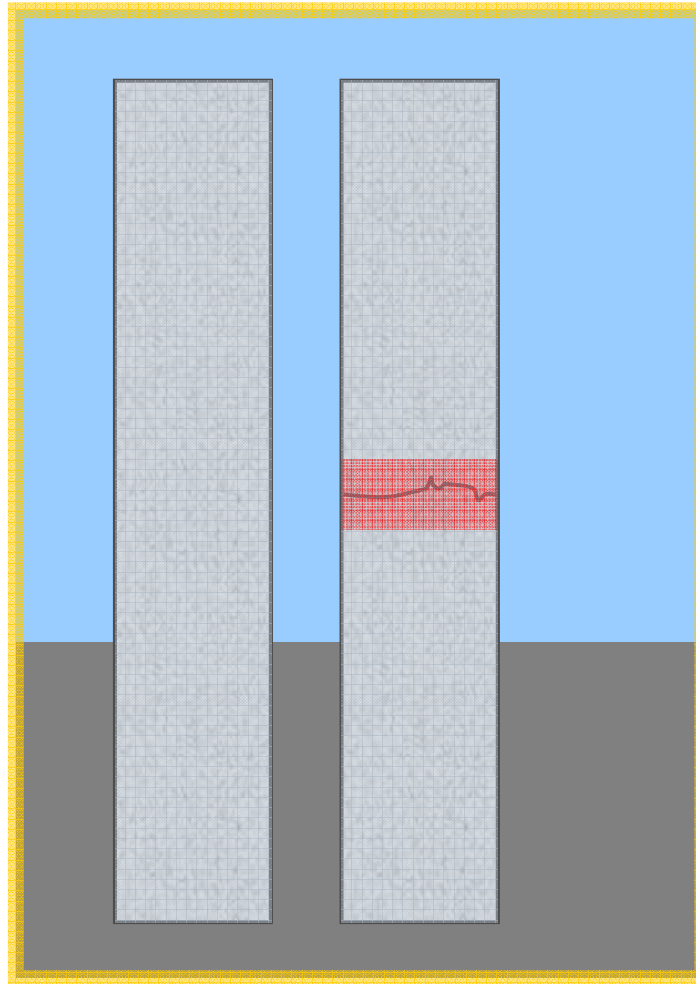
Outline

Nonlinear
ultrasonics

SSM

Applicazioni
future

Materials e provini



SSM
Impact excitation

Prismi in
**calcestruzzo
fibro-rinforzato**
di dimensioni
 $16 \times 16 \times 100 \text{ cm}^3$

Nello **stato intatto**
o
in presenza di
danno localizzato



Outline

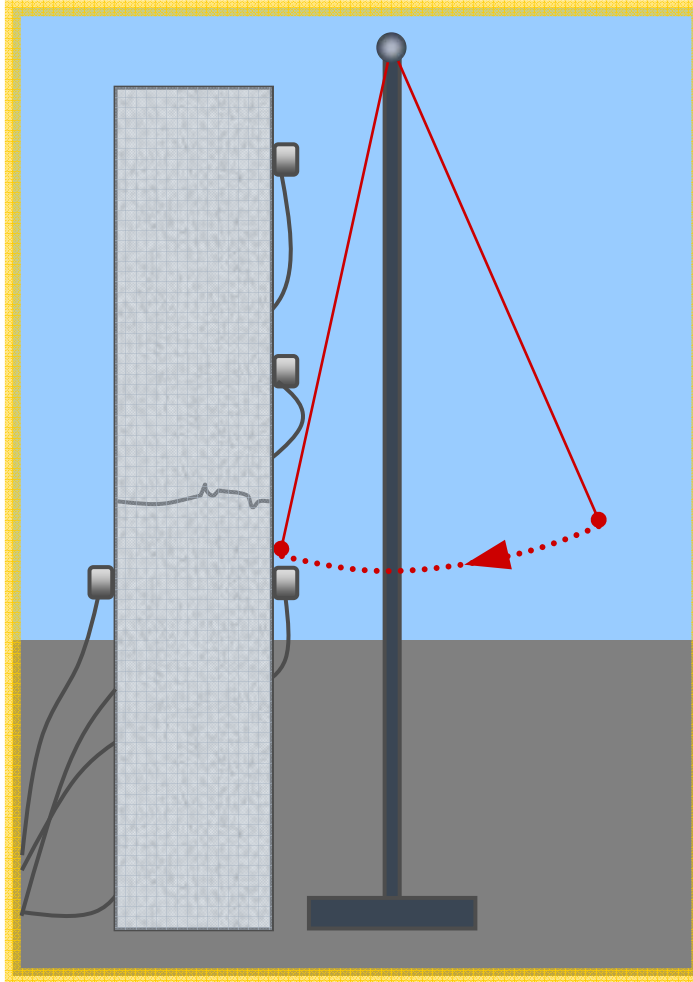
Nonlinear
ultrasonics

SSM

Applicazioni
future



Apparato sperimentale



SSM
Impact excitation

Sfera in acciaio (diametro 1.5 cm)
che impatta la superficie del provino
con **energia controllata crescente**



Accelerometri piezoelettrici
(frequency range: 2÷10,000 Hz)
agenti uno come trigger e gli altri
come trasduttori riceventi



Oscilloscopio digitale per
acquisizione e raccolta dati
(sampling rate: 1 MSa/s)

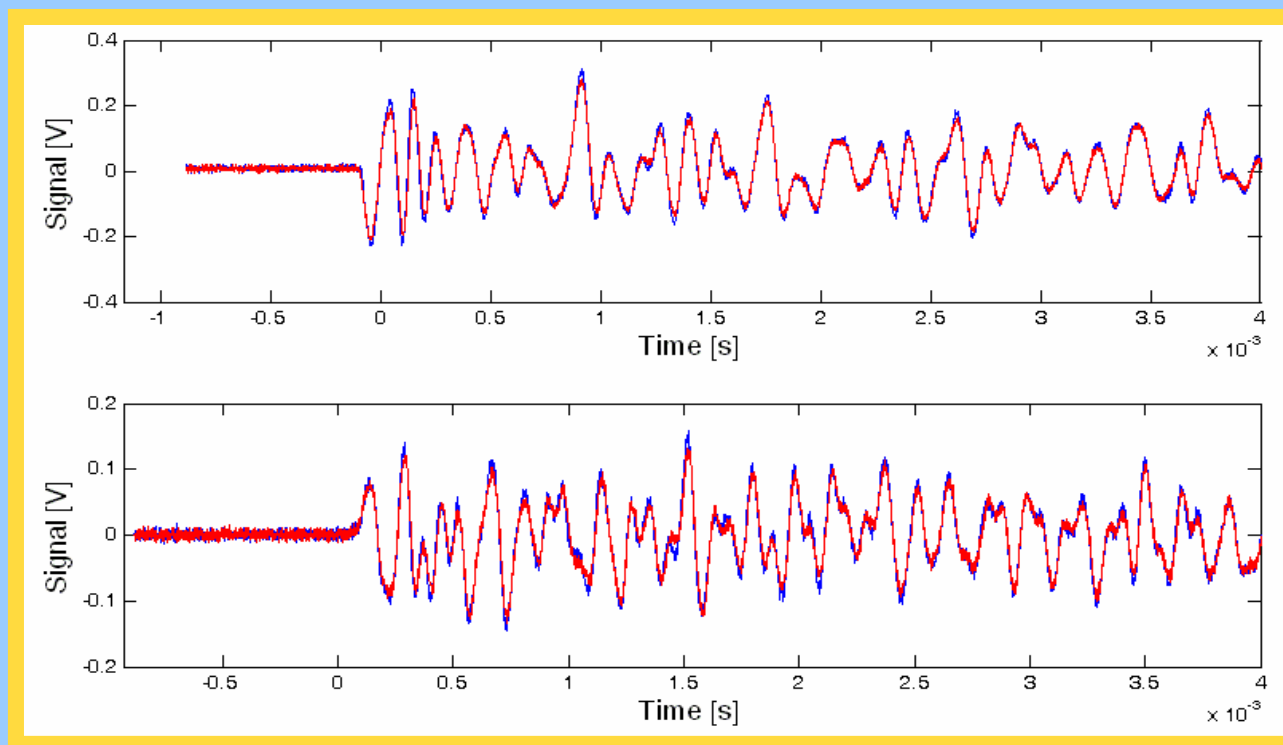
Outline

Nonlinear
ultrasonics

SSM

Applicazioni
future

Risultati



Ottima **ripetibilità dei segnali** su tutti i canali di acquisizione
a parità di condizioni di danno



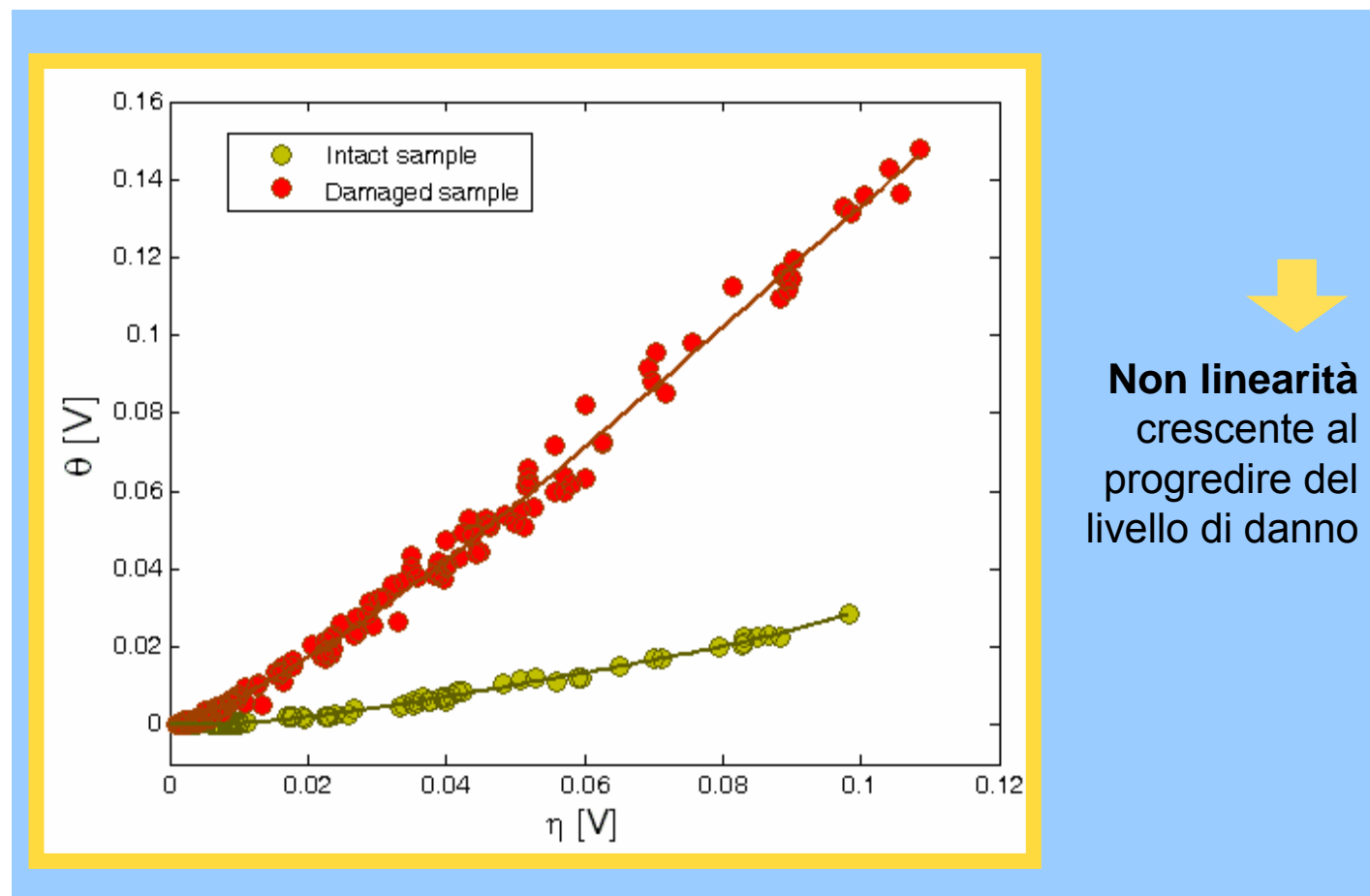
Outline

Nonlinear
ultrasonics

SSM

Applicazioni
future

➔ Risultati



↓
Non linearità
crescente al
progredire del
livello di danno



Outline

Nonlinear
ultrasonics

SSM

Applicazioni
future



Lo Scaling Subtraction Method si dimostra robusto rispetto alla variazione di numerosi fattori legati alle condizioni **ambientali e di prova**, nonché alla **dimensione e geometria** dei provini e al **tipo di danno**



Gli esperimenti condotti con ultrasuoni hanno rivelato che la **variabilità intrinseca** delle misure SSM è sufficientemente bassa da consentire di **discriminare i diversi stati di danno**, evidenziando l'esistenza di **fasi progressive** nell'evoluzione del danno



Outline

Nonlinear
ultrasonics

SSM

Applicazioni
future



Verifica dell'efficacia dello Scaling Subtraction Method nell'individuare e quantificare il danno usando **impact excitation**, ossia in un campo di frequenze soniche.



Sviluppo di opportune procedure sperimentali per caratterizzare il danneggiamento nelle **superfici murarie**, in presenza di **distacchi tra intonaco e substrato**.



GRAZIE PER LA VOSTRA ATTENZIONE !!!

NONLINEAR ULTRASONICS

Sviluppi recenti e applicazioni per la
caratterizzazione del
danneggiamento nei materiali

