

MONITORAGGIO PERIODICO E CONTINUO DI STRUTTURE DEL PATRIMONIO ARCHITETTONICO

Vicoforte, June 15-16 2017



POLITECNICO  
DI TORINO



## INQUADRAMENTO

### RICERCA INTERDISCIPLINARE SU CATENE METALLICHE STORICHE



Chiara Calderini:	Ingegneria strutturale
Rita Vecchiattini:	Restauro
Paolo Piccardo:	Archeometallurgia
Carlo Battini:	Rilievo digitale

### OBBIETTIVI:

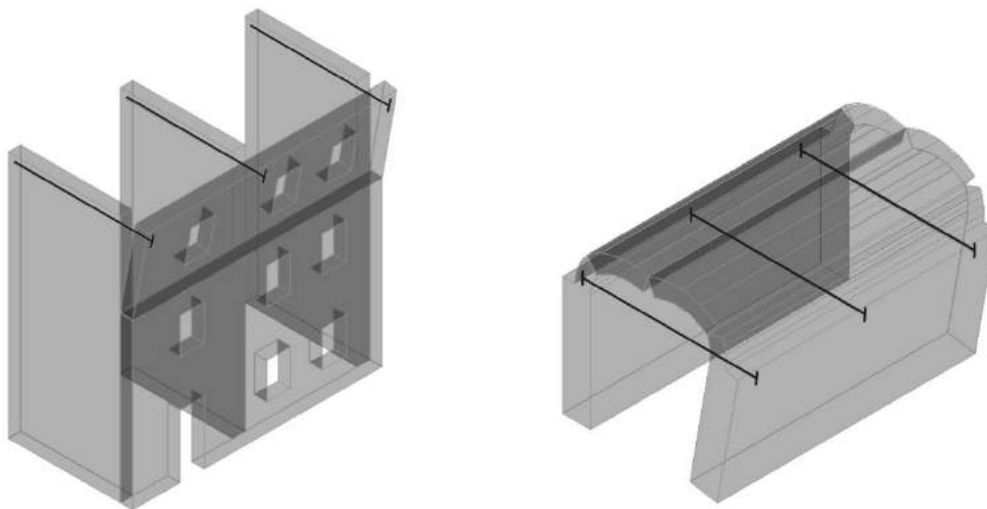
- fornire modelli affidabili per la descrizione della risposta strutturale delle catene metalliche storiche;
- definire una metodologia diagnostica per la valutazione in sito dei parametri meccanici delle catene esistenti;
- progettare interventi di protezione e consolidamento per la preservazione nel tempo delle catene metalliche storiche;

## INQUADRAMENTO

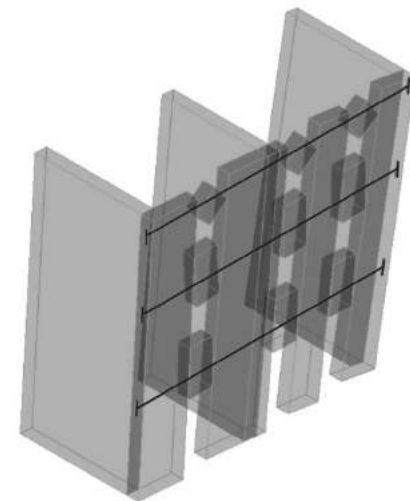
### ► MOTIVAZIONI

Ruolo determinante delle catene metalliche nella risposta statica e sismica delle strutture murarie

MECCANISMI LOCALI



MECCANISMI GLOBALI



(esigenze di sicurezza e conservazione)

## INQUADRAMENTO

### ► MOTIVAZIONI

Ruolo determinante delle catene metalliche nella risposta statica e sismica delle strutture murarie



## INQUADRAMENTO

### ► MOTIVAZIONI

Ruolo determinante delle catene metalliche nella risposta statica e sismica delle strutture murarie



## INQUADRAMENTO

### ► MOTIVAZIONI

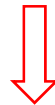
rinnovamento normativo in materia sismica



necessità di valutare la sicurezza delle costruzioni storiche in modo quantitativo



richiesta di modelli strutturali affidabili



necessità di identificare parametri meccanici affidabili

Se un grande sforzo è stato fatto negli ultimi anni per definire modelli e parametri relativi alla componente muraria delle nostre costruzioni, pochi sono stati gli studi sulle catene metalliche.

## INQUADRAMENTO

### ▶ ANALISI DEI MECCANISMI LOCALI

Le catene svolgono ruolo fondamentale nell'analisi dei meccanismi locali.

L'analisi di questo tipo di meccanismi (tipicamente fuori piano) si basa sullo studio dell'equilibrio delle pareti mediante l'applicazione dei teoremi dell'analisi limite.

Due metodi alternativi:

- ❑ **analisi cinematica lineare**, basata su un confronto tra l'accelerazione orizzontale imprimibile dal terremoto e l'accelerazione orizzontale che attiva il meccanismo di collasso;
- ❑ **analisi cinematica non lineare**, basata sul confronto tra la domanda di spostamento del terremoto e la capacità di spostamento del sistema associata a quel meccanismo di collasso.

## INQUADRAMENTO

### ▶ ANALISI DEI MECCANISMI LOCALI

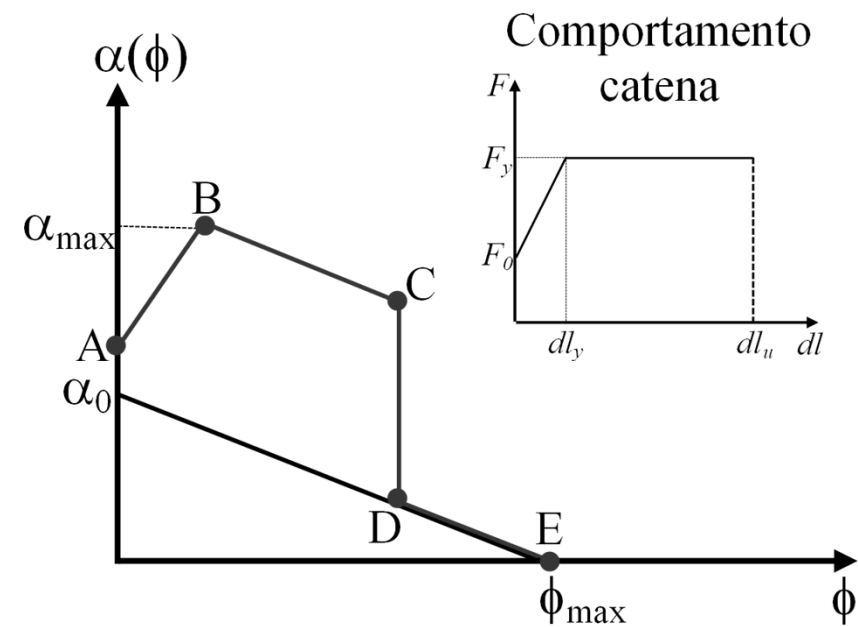
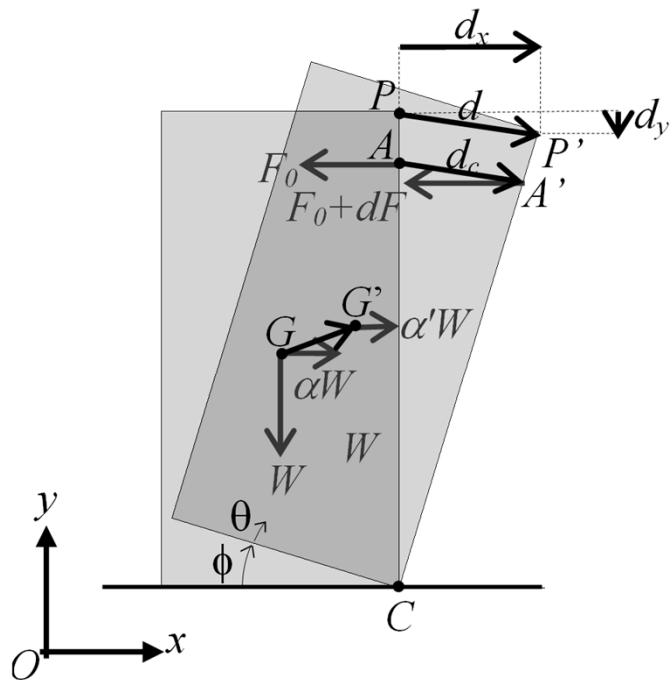


analisi cinematica lineare e non lineare



## INQUADRAMENTO

### ▶ ANALISI DEI MECCANISMI LOCALI

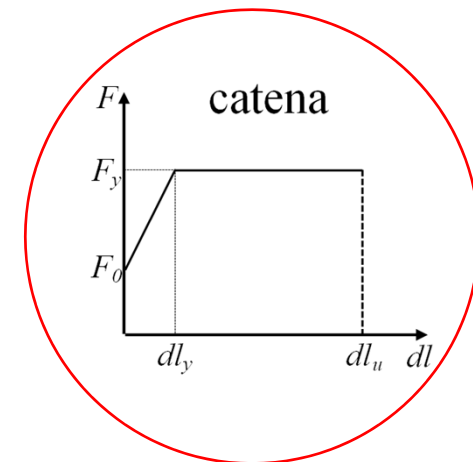
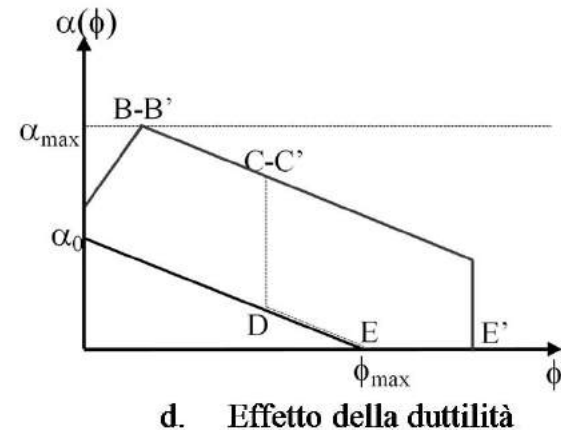
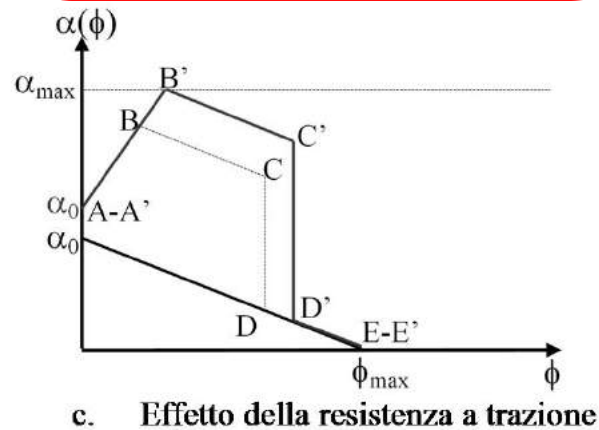
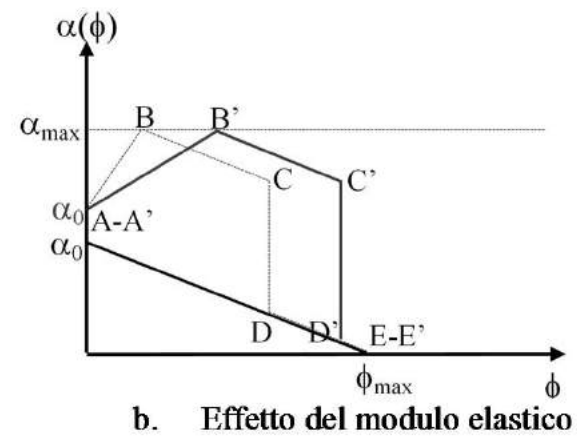
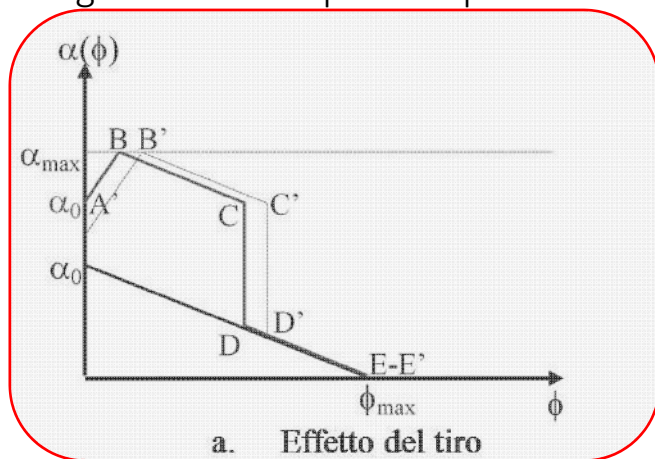


analisi cinematica lineare e non lineare

## INQUADRAMENTO

### ► INFLUENZA DEI PARAMETRI

Legame elastico-plastico perfetto



## IDENTIFICAZIONE DEL TIRO

### ▶ INDAGINI DINAMICHE

#### RAGIONI OPERATIVE:

- SEMPLICITA' DI ESECUZIONE DELLE PROVE;
- NON DISTRUTTIVITA' DELLE PROVE.

#### RAGIONI STRUTTURALI:

- FREQUENZE E MODI DI VIBRAZIONE SONO PARAMETRI SINTETICI DELLA RISPOSTA, IN QUANTO CONCORRONO IN ESSE LE RIGIDENZE, LE MASSE E I VINCOLI.
- LE CATENE, PER LORO NATURA, SONO STRUTTURE LIBERE, FACILMENTE ECCITABILI, NELLE QUALI LE FREQUENZE PROPRIE SONO BEN INDIVIDUABILI ATTRAVERSO UN'ANALISI DEI SEGNALI IN FREQUENZA.

Lagomarsino, S., Calderini, C. (2004). The dynamical identification of the tensile force in ancient tie-rods, *Engineering Structures*, 27(6), pp. 846-856.

Lagomarsino, S., Calderini, C. (2003). Una metodologia diagnostica per l'identificazione dinamica del tiro nelle catene metalliche antiche, *Atti del XV Convegno AIMETA*, Ferrara, 9-12 Settembre 2003.

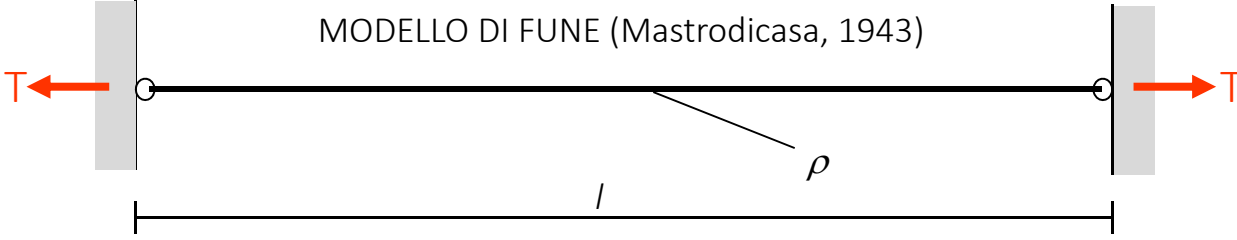
## IDENTIFICAZIONE DEL TIRO

▶ INDAGINI DINAMICHE

SCELTA DEL MODELLO STRUTTURALE

## IDENTIFICAZIONE DEL TIRO

MODELLO DI FUNE (Mastrodicasa, 1943)




$$T = \frac{4\rho f_n^2 l^2}{n^2}$$

VANTAGGI: E' SUFFICIENTE CONOSCERE LA PRIMA FREQUENZA DI VIBRAZIONE DEL SISTEMA  
ESISTE LA SOLUZIONE IN FORMA CHIUSA DEL PROBLEMA INVERSO

LIMITI: TRASCURA LA RIGIDEZZA FLESSIONALE DELLA CATENA  
TRASCURA LA RIGIDEZZA DI VINCOLO

MODELLO DI TRAVE INCERNIERATA



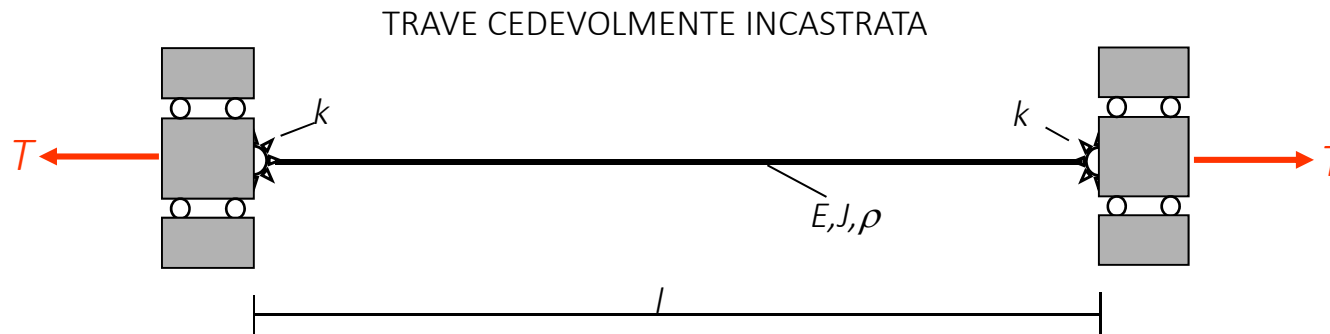
$$T = 4\rho l^2 \left( \frac{j^2 f_i^2}{i^2 (j^2 - i^2)} - \frac{i^2 f_j^2}{j^2 (j^2 - i^2)} \right)$$

$$EJ = \frac{4\rho l^4}{\pi^2} \left( \frac{f_j^2}{j^2 (j^2 - i^2)} - \frac{f_i^2}{i^2 (j^2 - i^2)} \right)$$

VANTAGGI: E' SUFFICIENTE CONOSCERE DUE FREQUENZE DI VIBRAZIONE DEL SISTEMA  
ESISTE LA SOLUZIONE IN FORMA CHIUSA DEL PROBLEMA INVERSO

LIMITI: TRASCURA LA RIGIDEZZA DI VINCOLO

## IDENTIFICAZIONE DEL TIRO



### DATI:

LUNGHEZZA DELLA CATENA E DENSITA' DEL MATERIALE, FREQUENZE MODALI

### INCOGNITE:

TIRO ( $T$ ), RIGIDEZZA FLESSIONALE DELLA CATENA ( $EJ$ ), RIGIDEZZA DEGLI INCASTRI CEDEVOLI ( $k$ )

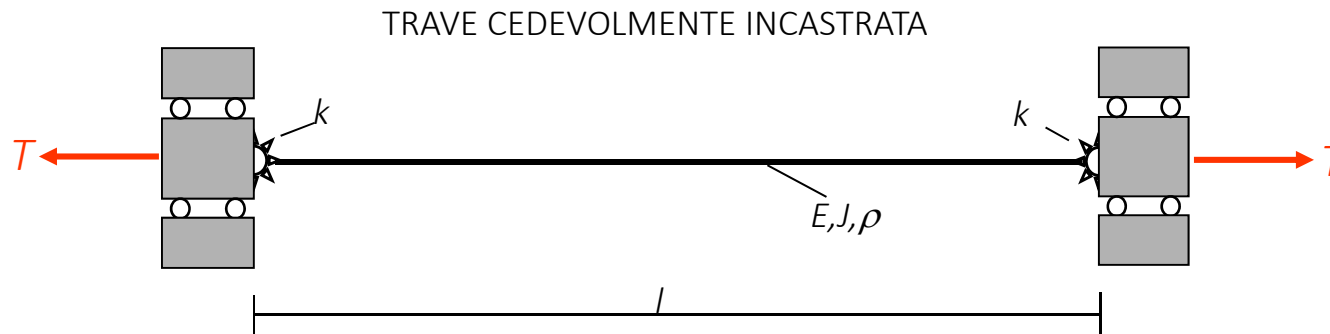
### MOTIVAZIONI:

le catene storiche presentano una sezione irregolare e non perfettamente uniforme nella lunghezza

fenomeni di corrosione, anche non visibili, possono alterare le proprietà geometriche e meccaniche

l'incastro delle catene nella muratura non è mai perfetto, ma dipende dal materiale in cui sono incastrate, dal suo stato di degrado, dallo spessore della muratura e dal sistema d'ancoraggio

## IDENTIFICAZIONE DEL TIRO



### DATI:

LUNGHEZZA DELLA CATENA E DENSITA' DEL MATERIALE, FREQUENZE MODALI

### INCOGNITE:

TIRO ( $T$ ), RIGIDEZZA FLESSIONALE DELLA CATENA ( $EJ$ ), RIGIDEZZA DEGLI INCASTRI CEDEVOLI ( $k$ )

### LIMITI DEL MODELLO:

- NON OMOGENEITA' DELLA RIGIDEZZA FLESSIONALE DELLA CATENA NELLA SUA LUNGHEZZA;
- POSSIBILITA' DI DIVERSI GRADI DI VINCOLO ALLE DUE ESTREMITA' DELLA CATENA.

## IDENTIFICAZIONE DEL TIRO

### POSIZIONE DEL PROBLEMA

EQUAZIONE DEL MOTO DEL SISTEMA:

$$-EJ \frac{\partial^4 y(x, t)}{\partial x^4} + T \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial x^2} = \rho \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial t^2},$$

CONDIZIONI AL CONTORNO STATICHE:

$$y(0, t) = 0,$$

$$y(x, l) = 0,$$

CONDIZIONI AL CONTORNO CINEMATICHE:

$$EJ \frac{\partial^2 y(0, t)}{\partial x^2} - k \frac{\partial y(0, t)}{\partial x} = 0,$$

$$EJ \frac{\partial^2 y(l, t)}{\partial x^2} + k \frac{\partial y(l, t)}{\partial x} = 0,$$

METODO DELLA SEPARAZIONE DELLE VARIABILI:  $y(x, t) = Y(x)F(t)$

(per passare da problema alle derivate parziali a problema a derivate ordinarie –  $\omega$  variabile di separazione)

$$\frac{d^2 F(t)}{dt^2} + \omega^2 F(t) = 0,$$

$$EJ \frac{d^4 Y(x)}{dx^4} - T \frac{d^2 Y(x)}{dx^2} - \omega^2 \rho Y(x) = 0,$$



## IDENTIFICAZIONE DEL TIRO

### SOLUZIONE DEL PROBLEMA

$$\frac{d^2 F(t)}{dt^2} + \omega^2 F(t) = 0,$$

→ funzione armonica con frequenza circolare  $\omega$

$$EJ \frac{d^4 Y(x)}{dx^4} - T \frac{d^2 Y(x)}{dx^2} - \omega^2 \rho Y(x) = 0,$$

$$\rightarrow Y(x) = C_1 \sin(\alpha x) + C_2 \cos(\alpha x) + C_3 \sinh(\beta x) + C_4 \cosh(\beta x),$$

con:

$$\alpha = \sqrt{\frac{T}{2EJ} \left( \sqrt{1 + \frac{4\omega^2 \rho EJ}{T^2}} - 1 \right)},$$

$$\beta = \sqrt{\frac{T}{2EJ} \left( \sqrt{1 + \frac{4\omega^2 \rho EJ}{T^2}} + 1 \right)}.$$

L'imposizione delle condizioni al contorno alla soluzione generale porta ad un sistema lineare algebrico di equazioni nelle costanti  $C_1, C_2, C_3, C_4$ .

## IDENTIFICAZIONE DEL TIRO

### SOLUZIONE DEL PROBLEMA

$$\frac{d^2 F(t)}{dt^2} + \omega^2 F(t) = 0,$$

→ funzione armonica con frequenza circolare  $\omega$

$$EJ \frac{d^4 Y(x)}{dx^4} - T \frac{d^2 Y(x)}{dx^2} - \omega^2 \rho Y(x) = 0,$$

→  $Y(x) = C_1 \sin(\alpha x) + C_2 \cos(\alpha x) + C_3 \sinh(\beta x) + C_4 \cosh(\beta x),$

con:

$$\alpha = \sqrt{\frac{T}{2EJ} \left( \sqrt{1 + \frac{4\omega^2 \rho EJ}{T^2}} - 1 \right)},$$

$$\beta = \sqrt{\frac{T}{2EJ} \left( \sqrt{1 + \frac{4\omega^2 \rho EJ}{T^2}} + 1 \right)}.$$

$$\begin{aligned} & 2kEJ(\alpha^2 + \beta^2)(\beta \sin(\alpha l) \cosh(\beta l) \\ & - \alpha \cos(\alpha l) \sinh(\beta l)) + \sin(\alpha l) \sinh(\beta l) \\ & \times [E^2 J^2 (\alpha^2 + \beta^2)^2 - k^2 (\alpha^2 - \beta^2)] \\ & - 2\alpha\beta k^2 (\cos(\alpha l) \cosh(\beta l) - 1) = 0. \end{aligned}$$

IL SISTEMA NON E' RISOLVIBILE IN FORMA CHIUSA

L'imposizione delle condizioni al contorno alla soluzione generale porta ad un sistema lineare algebrico di equazioni nelle costanti  $C_1, C_2, C_3, C_4$ .

## IDENTIFICAZIONE DEL TIRO

### ADIMENSIONALIZZAZIONE DELL'EQUAZIONE CARATTERISTICA:

PRIMA FREQUENZA MODALE DELLA TRAVE INCERNIERATA:

(dove  $EJ_s$  è un valore empirico della rigidità flessionale della catena)

$$\bar{\omega} = \pi^2 \sqrt{\frac{EJ_s}{\rho l^4}}$$

PARAMETRI ADIMENSIONALI:

$$\gamma = \frac{kl}{EJ_s} \quad \varphi = 2\pi^2 \frac{EJ_s}{Tl^2} \quad \delta = \frac{EJ}{EJ_s}$$

$$g\left(\varphi, \gamma, \delta, \frac{\omega_n}{\bar{\omega}}\right) = \sin \alpha \sinh \beta \left[ (\alpha^2 + \beta^2) - \frac{\gamma^2}{\delta^2} (\alpha^2 - \beta^2) \right] + 2 \frac{\gamma}{\delta} \sin \alpha \cosh \beta \cdot \beta \cdot (\alpha^2 + \beta^2) - 2 \frac{\gamma}{\delta} \cos \alpha \sinh \beta \cdot \alpha \cdot (\alpha^2 + \beta^2) - 2 \frac{\gamma^2}{\delta^2} \alpha \beta (\cos \alpha \cosh \beta - 1),$$

DOVE:

$$\alpha = \pi \sqrt{\frac{l}{\delta \varphi} \left( \sqrt{l + \delta \varphi^2 \left( \frac{\omega_n}{\bar{\omega}} \right)^2} - l \right)} \quad \beta = \pi \sqrt{\frac{l}{\delta \varphi} \left( \sqrt{l + \delta \varphi^2 \left( \frac{\omega_n}{\bar{\omega}} \right)^2} + l \right)} \quad \text{con } n=1,2,3,\dots$$

IL PROBLEMA RICHIEDE LA RISOLUZIONE NUMERICA DI UN SISTEMA NELLE TRE 3 INCOGNITE ( $\gamma, \varphi, \delta$ ),  
NOTE 3 FREQUENZE MODALI DI VIBRAZIONE.

## IDENTIFICAZIONE DEL TIRO

SOLUZIONE NUMERICA DEL SISTEMA:

$$\begin{cases} g_1 = g\left(\varphi, \gamma, \delta, \frac{\omega_1}{\omega}\right) = 0 \\ g_2 = g\left(\varphi, \gamma, \delta, \frac{\omega_2}{\omega}\right) = 0 \\ g_3 = g\left(\varphi, \gamma, \delta, \frac{\omega_3}{\omega}\right) = 0 \end{cases}$$

MINIMIZZAZIONE DI UNA FUNZIONE DI ERRORE:

$$G(\gamma, \delta, \varphi) = g_1^2 + g_2^2 + g_3^2$$

METODO DI NEWTON-RAPHSON MODIFICATO (AL 2° ORDINE)

DATI: - LUNGHEZZA DELLA CATENA

- DENSITA' VOLUMETRICA DELLA CATENA

- STIMA EMPIRICA DELLA RIGIDEZZA FLESSIONALE DELLA CATENA

- PRIME TRE FREQUENZE DI VIBRAZIONE DELLA CATENA

OTTIMIZZAZIONE DEI VALORI DI PRIMO TENTATIVO DI  $\phi, \delta, \gamma$

## IDENTIFICAZIONE DEL TIRO

SOLUZIONE NUMERICA DEL SISTEMA:

$$\begin{cases} g_1 = g\left(\varphi, \gamma, \delta, \frac{\omega_1}{\omega}\right) = 0 \\ g_2 = g\left(\varphi, \gamma, \delta, \frac{\omega_2}{\omega}\right) = 0 \\ g_3 = g\left(\varphi, \gamma, \delta, \frac{\omega_3}{\omega}\right) = 0 \end{cases}$$

MINIMIZZAZIONE DI UNA FUNZIONE DI ERRORE:

$$G(\gamma, \delta, \varphi) = g_1^2 + g_2^2 + g_3^2$$

METODO DI NEWTON-RAPHSON MODIFICATO (AL 2° ORDINE)

DATI: - LUNGHEZZA DELLA CATENA

- DENSITA' VOLUMETRICA DELLA CATENA

- STIMA EMPIRICA DELLA RIGIDEZZA FLESSIONALE DELLA CATENA

- PRIME TRE FREQUENZE DI VIBRAZIONE DELLA CATENA

OTTIMIZZAZIONE DEI VALORI DI PRIMO TENTATIVO DI  $\phi, \delta, \gamma$

## IDENTIFICAZIONE DEL TIRO

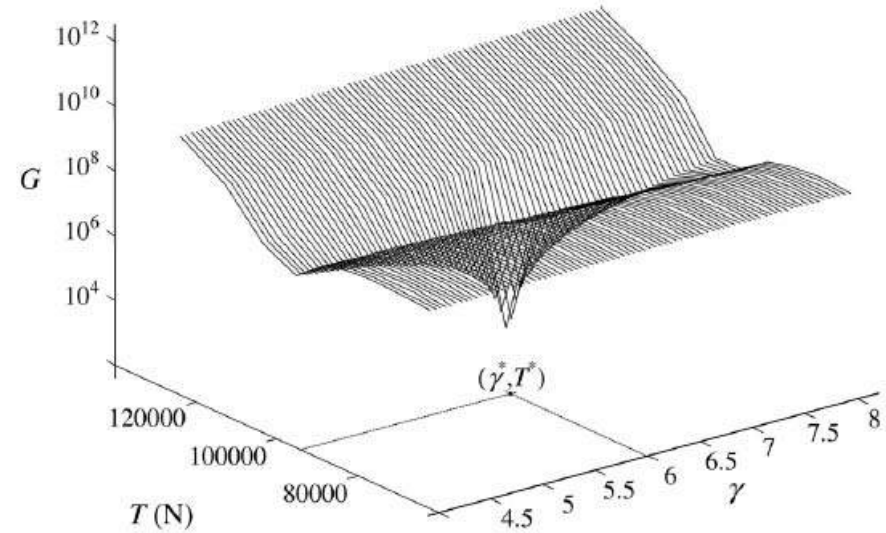
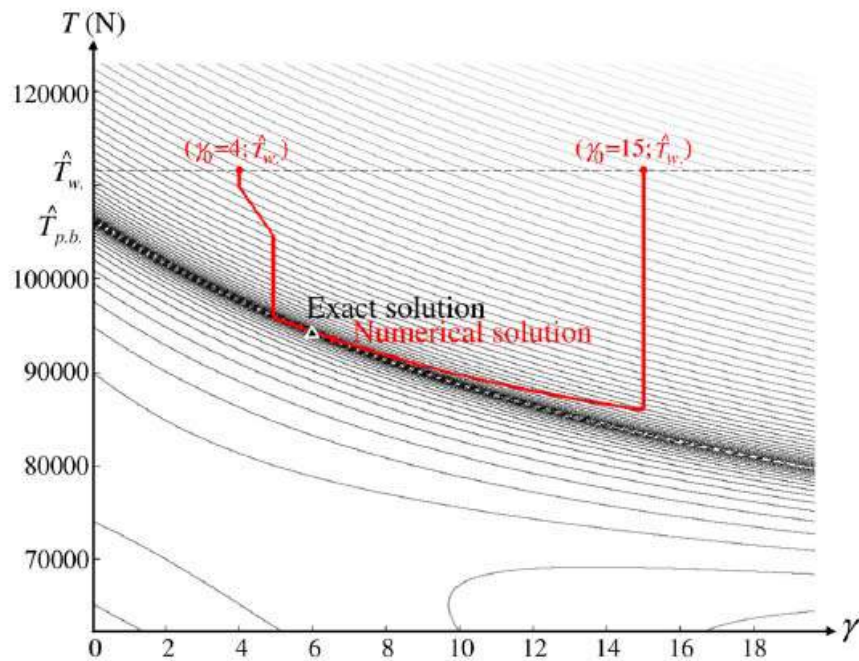


Fig. 4. Three dimensional plot of the  $G$  function as a function of the variables  $T$  and  $\gamma$  ( $\delta = 1$ ).

## IDENTIFICAZIONE DEL TIRO

### IDENTIFICAZIONE DEL TIRO IN CATENE IDEALI

#### SNELLEZZE

---

$l=9 \text{ m} - \phi=0.055 \text{ m}$	CATENE DELLE NAVATE DELLE CHIESE
$l=6 \text{ m} - \phi=0.04 \text{ m}$	CATENE NEGLI EDIFICI CIVILI
$l=3 \text{ m} - \phi=0.025 \text{ m}$	CATENE DEI PORTICI E DELLE LOGGE

#### STATO TENSIONALE

---

$\sigma = 25 \text{ N/mm}^2$	CATENA LENTA
$\sigma = 75 \text{ N/mm}^2$	CATENA MEDIAMENTE TESA
$\sigma = 125 \text{ N/mm}^2$	CATENA TESA

#### VINCOLI

---

$\gamma = 30$	CATENA QUASI INCASTRATA
$\gamma = 6$	CATENA MEDIAMENTE INCASTRATA
$\gamma = 0.66$	CATENA QUASI INCERNIERATA

MODELLAZIONE DELL' L'INSIEME DI  
CATENE ATTRAVERSO MODELLI FEM



ANALISI DI CONVERGENZA

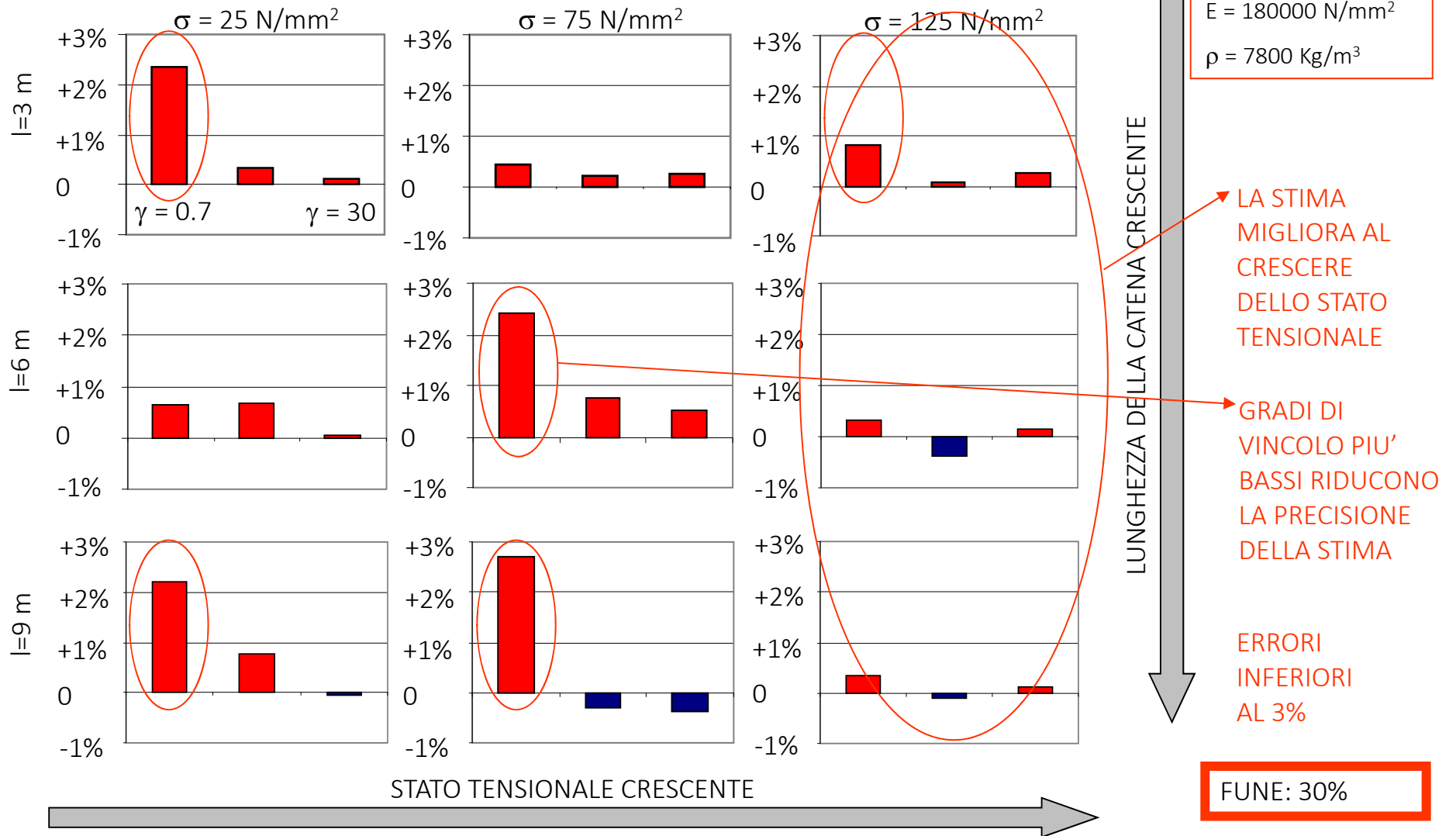


SOLUZIONI NUMERICHE DI  
RIFERIMENTO

MONITORAGGIO PERIODICO E CONTINUO DI STRUTTURE DEL PATRIMONIO ARCHITETTONICO

Vicoforte, June 15-16 2017

IDENTIFICAZIONE DEL TIRO





MONITORAGGIO PERIODICO E CONTINUO DI STRUTTURE DEL PATRIMONIO ARCHITETTONICO

Vicoforte, June 15-16 2017

## IDENTIFICAZIONE DEL TIRO

NON OMOGENEITA' DELLA RIGIDEZZA



IDENTIFICAZIONE DEL TIRO

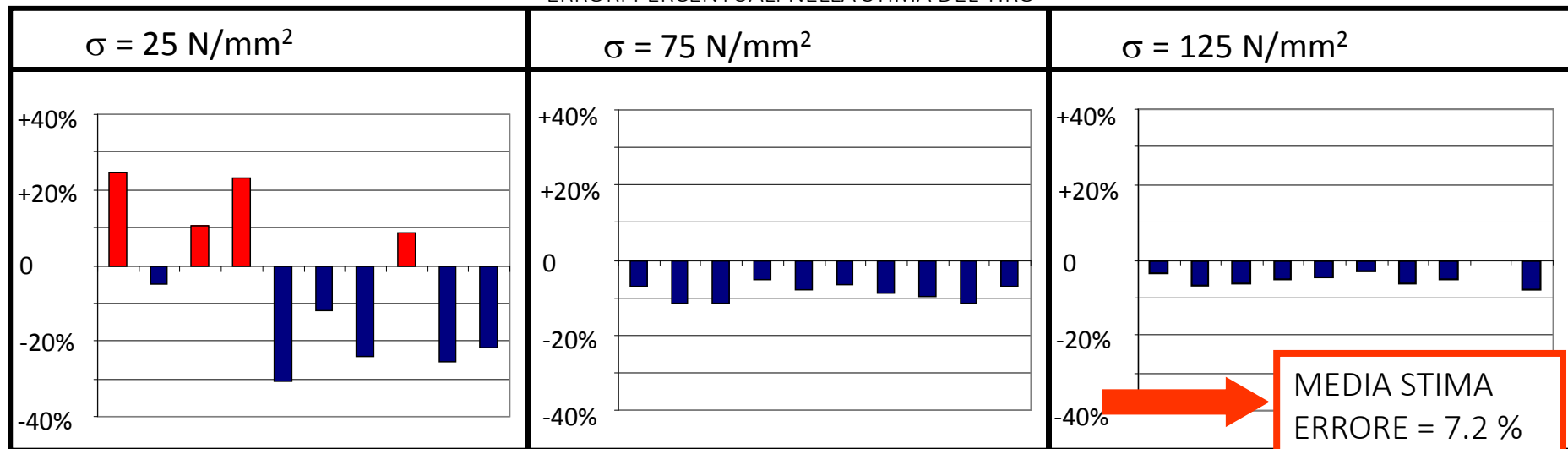
	CATENA DI RIFERIMENTO	INSIEME STATISTICO
$l$	6 m	6 m
$\phi$	0.04 m	VARIABILE
$\rho$	7800 Kg/m <sup>3</sup>	7800 Kg/m <sup>3</sup>
$E$	180000 N/mm <sup>2</sup>	180000 N/mm <sup>2</sup>
$\gamma$	6	6

Set di 10 catene a diametro variabile secondo una distribuzione statistica di tipo gaussiano, con:

MEDIA=0.04 m

COEFFICIENTE DI VARIAZIONE=5%

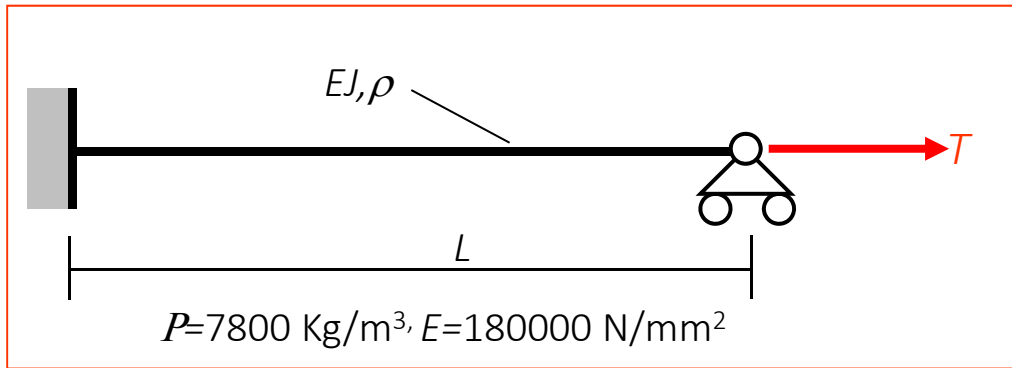
ERRORI PERCENTUALI NELLA STIMA DEL TIRO



MONITORAGGIO PERIODICO E CONTINUO DI STRUTTURE DEL PATRIMONIO ARCHITETTONICO

Vicoforte, June 15-16 2017

NON OMOGENEITA' DEI VINCOLI  $\longleftrightarrow$  ?  $\longleftrightarrow$  IDENTIFICAZIONE DEL TIRO



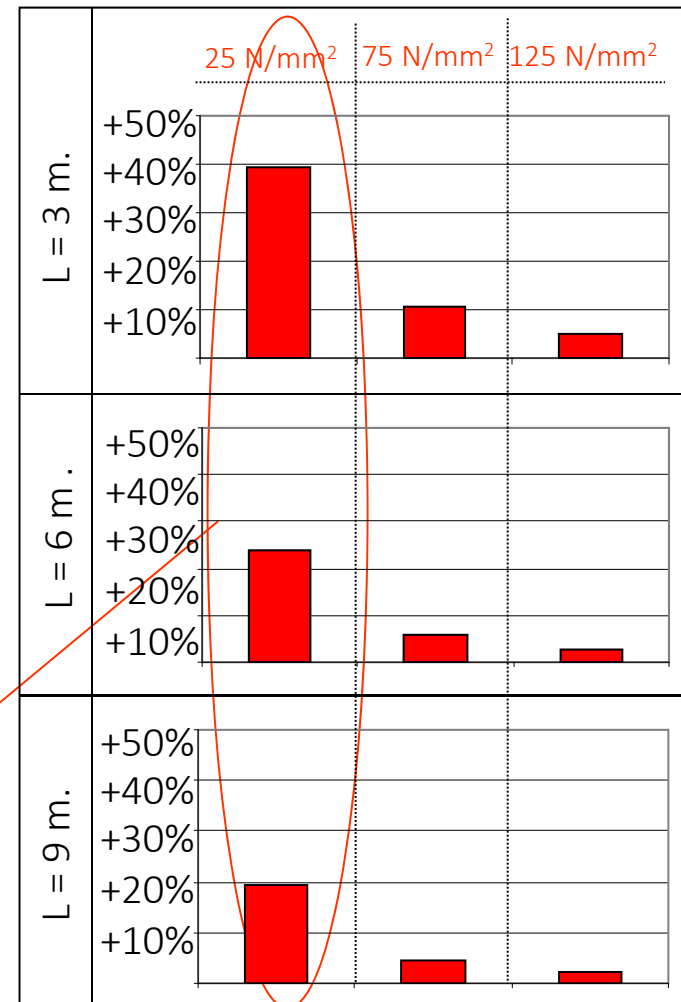
CONDIZIONE PIU' SFAVOREVOLE NEI RIGUARDI DELLA METODOLOGIA ADOTTATA



STIMA DELL'ERRORE MASSIMO

- IL TIRO E' SEMPRE SOVRASTIMATO: IL METODO LAVORA SEMPRE A FAVORE DI SICUREZZA.
- L'ERRORE MASSIMO (40%) SI RISCONTRA NELLE CATENE CORTE E CON TIRO LIMITATO.

ERRORI NELLA STIMA DEL TIRO



## MONITORAGGIO PERIODICO E CONTINUO DI STRUTTURE DEL PATRIMONIO ARCHITETTONICO

Vicoforte, June 15-16 2017

### IDENTIFICAZIONE DEL TIRO



CHIESA DI SAN PASQUALE (AL)



EDIFICIO GALATA (GE)

1. CHIESA DI SAN VITO – MORZASCO (AL)
2. CHIESA DI SAN PASQUALE – MORZASCO (AL)
3. EDIFICIO “GALATA” - GENOVA

SONO STATE SCELTE CATENE CON DIVERSE CARATTERISTICHE GEOMETRICHE E TENSIONALI

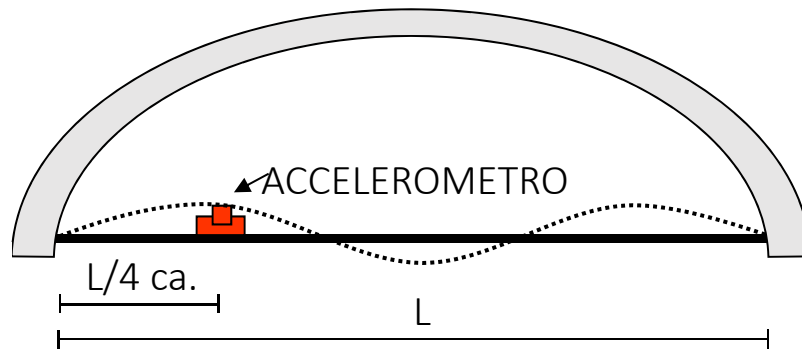
Nome riferimento	L (m.)	f (m.)
San Vito - 1	3.11	0.0135
San Vito - 2	3.1	0.0135
San Vito - 3	3.77	0.0135
San Vito - 4	4.37	0.014
San Vito - 5	4.37	0.014
San Pasquale - 1	5.45	0.0145
San Pasquale - 2	5.45	0.014
Galata - 1	7.84	0.0275
Galata - 2	3.64	0.025
Galata - 3	3.65	0.025
Galata - 4	7.59	0.0275

# MONITORAGGIO PERIODICO E CONTINUO DI STRUTTURE DEL PATRIMONIO ARCHITETTONICO

Vicoforte, June 15-16 2017

Chiesa di San Pasquale – catena 2

## IDENTIFICAZIONE DEL TIRO



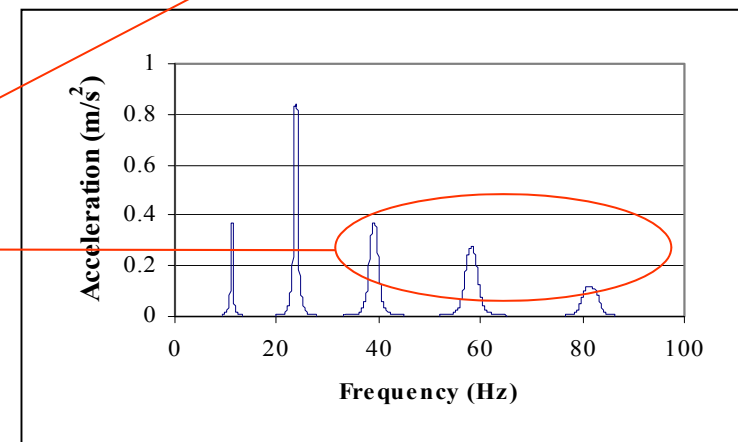
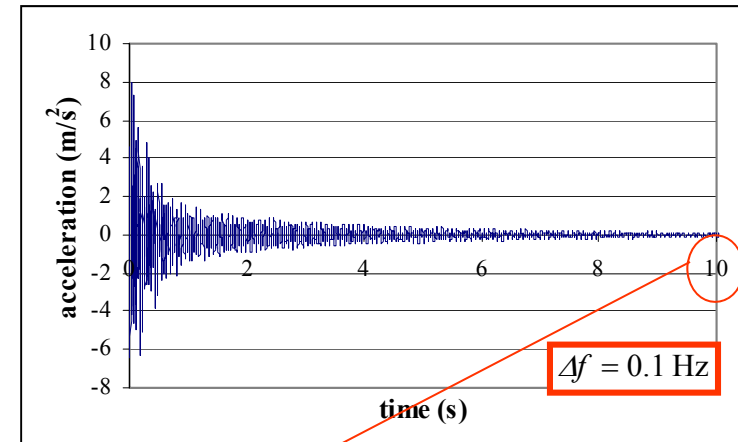
L'ECCITAZIONE IMPULSIVA PRODUCE UN SEGNALE CHE E' AFFETTO, AL PRINCIPIO, DA UNA RISPOSTA TRANSITORIA CONTENENTE LE ARMONICHE DEL MARTELLO. QUESTA PARTE DEL SEGNALE E' STATA RIMOSSA.

POICHE' LO SMORZAMENTO PRODUCE UNA ATTENUAZIONE DELLA RISPOSTA NEL TEMPO, SI E' STIMATO CHE LA QUALITA' DEL SEGNALE PUO' ESSERE CONSIDERATA BUONA PER I PRIMI 10 SECONDI.

A CAUSA DELLO SMORZAMENTO, IL PICCO DELLE FREQUENZE PIU' ALTE SI PRESENTA PIUTTOSTO LARGO.

$\pm 0.2$  Hz

ERRORE NELLA STIMA DELLE FREQUENZE DI VIBRAZIONE PIU' ALTE (2° E 3°)



MONITORAGGIO PERIODICO E CONTINUO DI STRUTTURE DEL PATRIMONIO ARCHITETTONICO

Vicoforte, June 15-16 2017

IDENTIFICAZIONE DEL TIRO

	n1 (Hz)	n2 (Hz)	n3 (Hz)	T ("Wire" model)	T ("Pinned beam" model)	T (estimat ed)	$\gamma$	$\delta$	G value	Iter. Num.	n1* (Hz)	n2* (Hz)	n3* (Hz)
<b>San Vito - 1</b>	17.33	40.82	72.80	52247	46740	34680	9.27	1.05	2.E+12	330	17.33	40.72	72.90
<b>San Vito - 2</b>	18.60	42.29	73.61	59798	54733	36904	21.85	0.87	2.E-10	396	18.60	42.21	73.71
<b>San Vito - 3</b>	19.10	40.70	66.40	93217	89592	74059	22.28	0.97	6.E-06	234	19.10	40.62	66.44
<b>San Vito - 4</b>	11.10	25.00	43.30	45493	41655	34878	7.48	1.15	6.E-12	299	11.10	24.90	43.20
<b>San Vito - 5</b>	11.30	25.20	43.40	47147	43412	39347	3.68	1.14	8.E-11	531	11.30	25.18	43.44
<b>San Pasquale</b>	6.84	15.89	28.05	28788	26064	20444	7.66	1.27	2.E-12	297	6.84	15.79	28.15
<b>San Pasquale</b>	11.21	23.78	39.11	49166	46890	63115	9.21	1.47	9.E-07	469	11.21	23.84	39.05
<b>Galata - 1</b>	7.39	16.08	27.04	250100	235039	214676	4.06	1.00	8.E-10	374	7.39	16.08	27.08
<b>Galata - 2</b>	18.20	46.40	86.80	270586	226053	155436	6.47	1.00	9.E+10	9988	18.20	46.30	86.90
<b>Galata - 3</b>	17.90	45.40	84.90	263179	219967	123153	10.48	0.94	6.E+10	9990	17.90	45.30	85.00
<b>Galata - 4</b>	8.03	17.40	28.80	277145	264479	236694	5.19	0.91	7.E-10	346	8.03	17.32	28.84

ANCHE SE I DATI USATI NELL'IDENTIFICAZIONE POSSONO RAPPRESENTARE UNA SOLUZIONE INESISTENTE, LA METODOLOGIA GIUNGE A UNA SOLUZIONE NUMERICA APPROSSIMATA.

LA CONVERGENZA VIENE RAGGIUNTA CON UN NUMERO RELATIVAMENTE LIMITATO DI ITERAZIONI.

I RISULTATI DIFFERISCONO NOTEVOLMENTE DA QUELLI OTTENUTI DAI MODELLI DI FUNE E TRAVE INCERNIERATA.

LA SOLUZIONE VIENE TROVATA NEL CAMPO DI FREQUENZE ASSUNTO.

## IDENTIFICAZIONE DEL TIRO

### ▶ ALTRI METODI DI IDENTIFICAZIONE DINAMICA

Amabili M, Carra S, Collini L, Garziera R, Panno A. Estimation of tensile force in tie-rods using a frequency-based identification method. *J. Sound and Vibration* 2010; 329(11): 2057-2067.

Briccoli Bati, S, Tonietti U. Experimental methods for estimating in situ tensile force in tie-rods. *J. Engineering Mechanics* 2001, ASCE; 127(12): 1275-1283.

Sorace S. Parameter models for estimating in situ tensile force in tie-rods. *J. Engineering Mechanics* 1996; 122 (9): 818-25.

Tullini N, Laudiero F. Dynamic identification of beam axial loads using one flexural mode shape. [J. Sound and Vibration](#) 2008; 318(1-2):131-147.

# MONITORAGGIO PERIODICO E CONTINUO DI STRUTTURE DEL PATRIMONIO ARCHITETTONICO

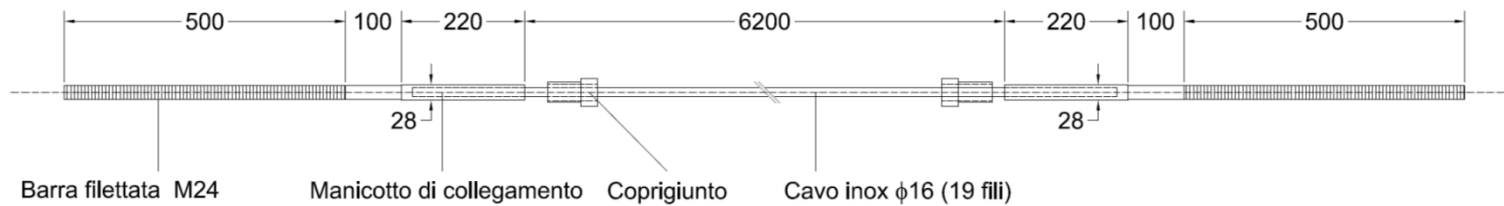
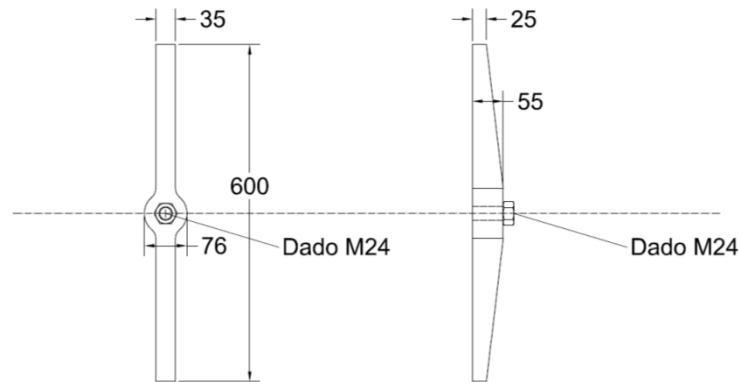
Vicoforte, June 15-16 2017

## MONITORAGGIO PERMANENTE DEL TIRO

Chiesa di S. Nicolò di Capodimonte a Camogli - Progetto della catena metallica e della chiave di collegamento

Progetto: Chiara Calderini

ACCIAIO INOX - AISI 316



## MONITORAGGIO PERIODICO E CONTINUO DI STRUTTURE DEL PATRIMONIO ARCHITETTONICO

Vicoforte, June 15-16 2017

---

### MONITORAGGIO PERMANENTE DEL TIRO



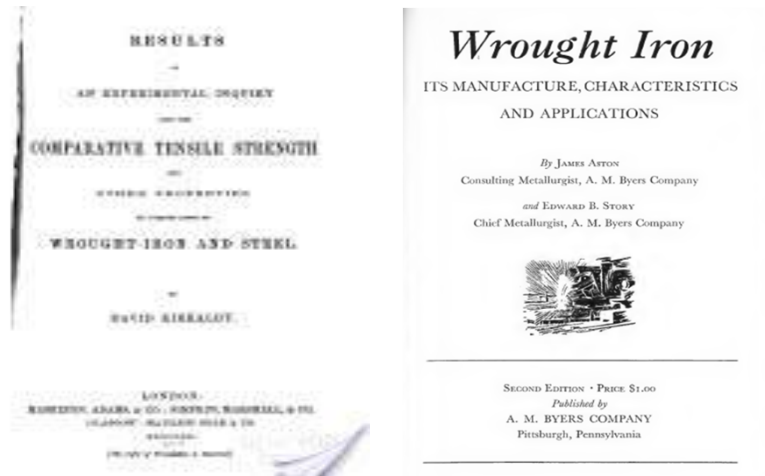


## IDENTIFICAZIONE PARAMETRI MECCANICI

### ► MOTIVAZIONI

Mancanza di conoscenza delle proprietà meccaniche e metallurgiche delle catene metalliche storiche e sul tiro cui sono soggette

XIX Ce. PROVE SU FERRO FORGIATO



PROVE SU PONTI DEL XIX Ce.

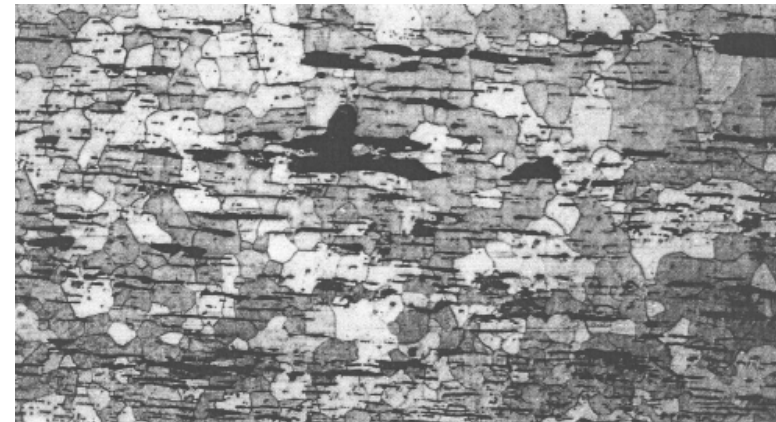
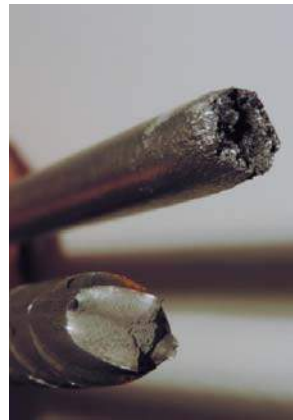


(non sono disponibili dati sperimentali)

## IDENTIFICAZIONE PARAMETRI MECCANICI

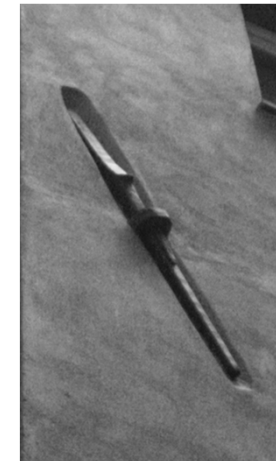
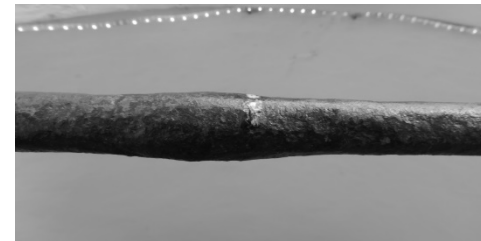
### ▶ SCALA DEL MATERIALE

Composizione chimica  
Microstruttura  
Risposta meccanica



### ▶ SCALA DELLA STRUTTURA

Posizione nella struttura  
Dimensioni e forma  
Giunzioni  
Bolzoni



## IDENTIFICAZIONE PARAMETRI MECCANICI

### ▶ METODO DI PRODUZIONE DEL MATERIALE

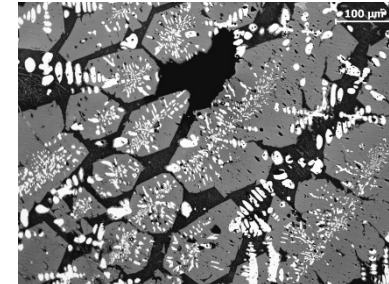
Riduzione diretta: processo utilizzato nei bassi forni fino al XIX secolo

Ferro prodotto dalla riduzione di ossidi, senza passaggio allo stato liquido

Prodotto grezzo: ammasso di ferro spugnoso e scorie, depurata tramite trattamento termomeccanico

Risultato: matrice ferrosa molto pura, con inclusioni silicacee

Elementi microstrutturali: introduzione di Carbonio solo tramite cementazione; modifiche microstrutturali e caratteristiche meccaniche in base ai trattamenti termici ed ai raffreddamenti.



## IDENTIFICAZIONE PARAMETRI MECCANICI

### ▶ EFFETTI DELLA TECNICA DI PRODUZIONE

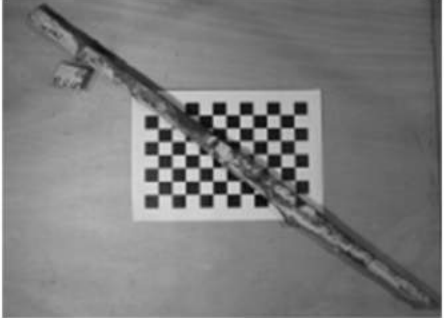
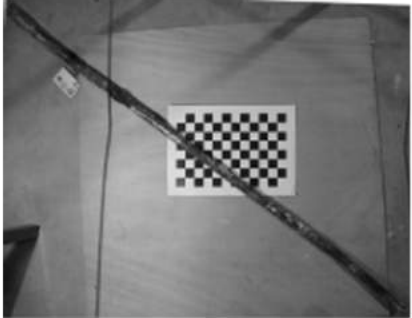
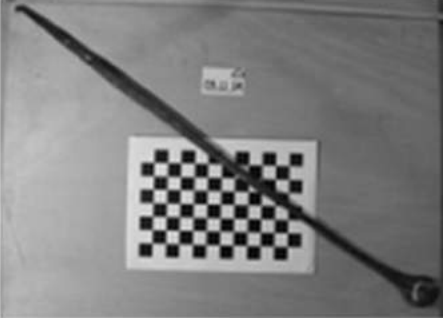
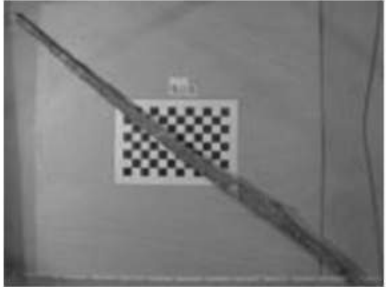


- Il materiale che costituisce le catene è originato da forgiatura a mano.
- La tecnica di produzione determina:
  - un'alta percentuale di scorie e inclusioni;
  - un metallo povero di elementi in lega (e.g. Mn, Ni, P, C);
  - Una distribuzione disuniforme di carbonio C (eterogeneità microstrutturale).
- La tecnica di produzione determina un'elevata dispersione nella composizione chimica e microstrutturale del materiale, e pertanto delle sue proprietà meccaniche.
- La duttilità è il parametro con la maggiore dispersione.

## IDENTIFICAZIONE PARAMETRI MECCANICI



- sono stati raccolti circa 25 campioni di catena da edifici in corso di restauro o demolizione;
- sono state raccolte sia barre che bolzoni (capochiave), oltre che vele derivanti da catene lignee;
- tutti gli elementi sono stati raccolti nel Nord-Italia e risalgono al 16°-19° secolo.

## IDENTIFICAZIONE PARAMETRI MECCANICI

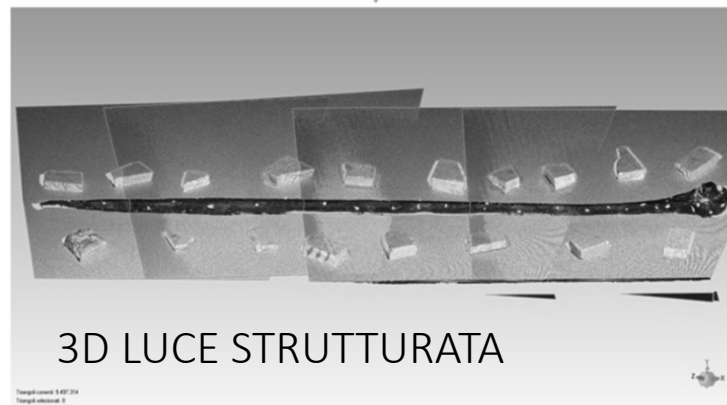
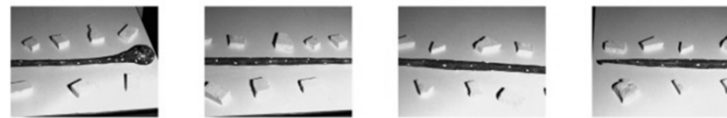
		
<p>10.LI.GE Liguria (Genova) – 16th c. Bolt</p>	<p>11.LI.GE Liguria (Genova) – 16th c. Tie-rod</p>	<p>03.LI.IM Liguria (Imperia) - 19th c. Tie-rod with terminal eye</p>
		
<p>04.LI.GE Liguria (Genova) - 17th c. Bolt</p>	<p>01.PI.TO Piemonte (Parella) - 17th c. Tie-rod with terminal eye</p>	<p>07.LI.IM Liguria (Imperia) - n.c. Bolt</p>

14 CAMPIONI SCELTI PER PROVE SPERIMENTALI

# MONITORAGGIO PERIODICO E CONTINUO DI STRUTTURE DEL PATRIMONIO ARCHITETTONICO

Vicoforte, June 15-16 2017

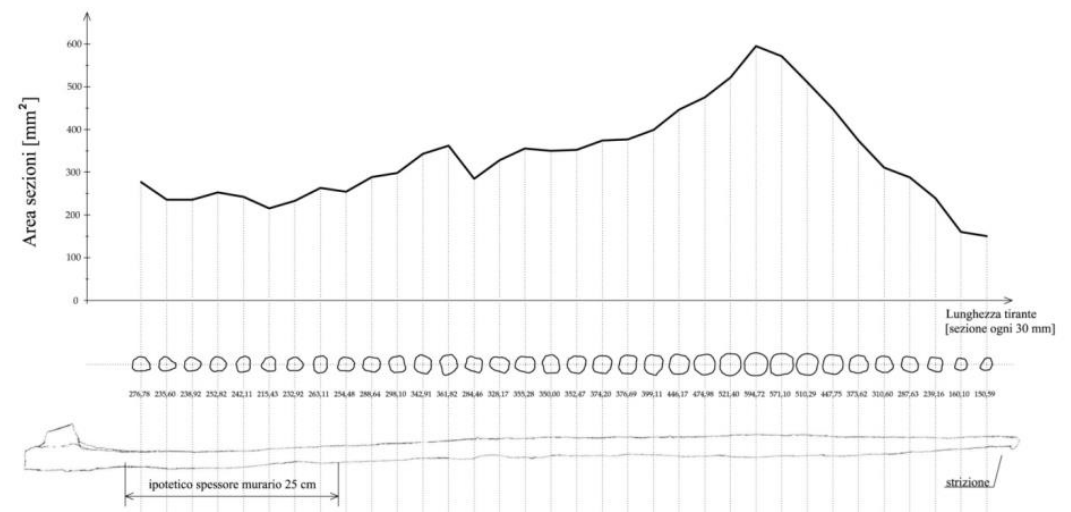
## IDENTIFICAZIONE PARAMETRI MECCANICI



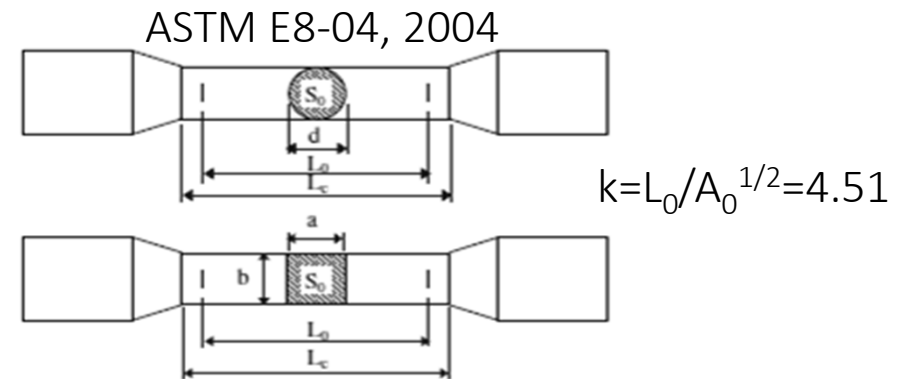
## OTTIMIZZAZIONE DEI PROVINI SPERIMENTALI



## ANALISI DELLE SEZIONI



## IDENTIFICAZIONE PARAMETRI MECCANICI



### DIMENSIONI DIVERSE

#### Criterio:

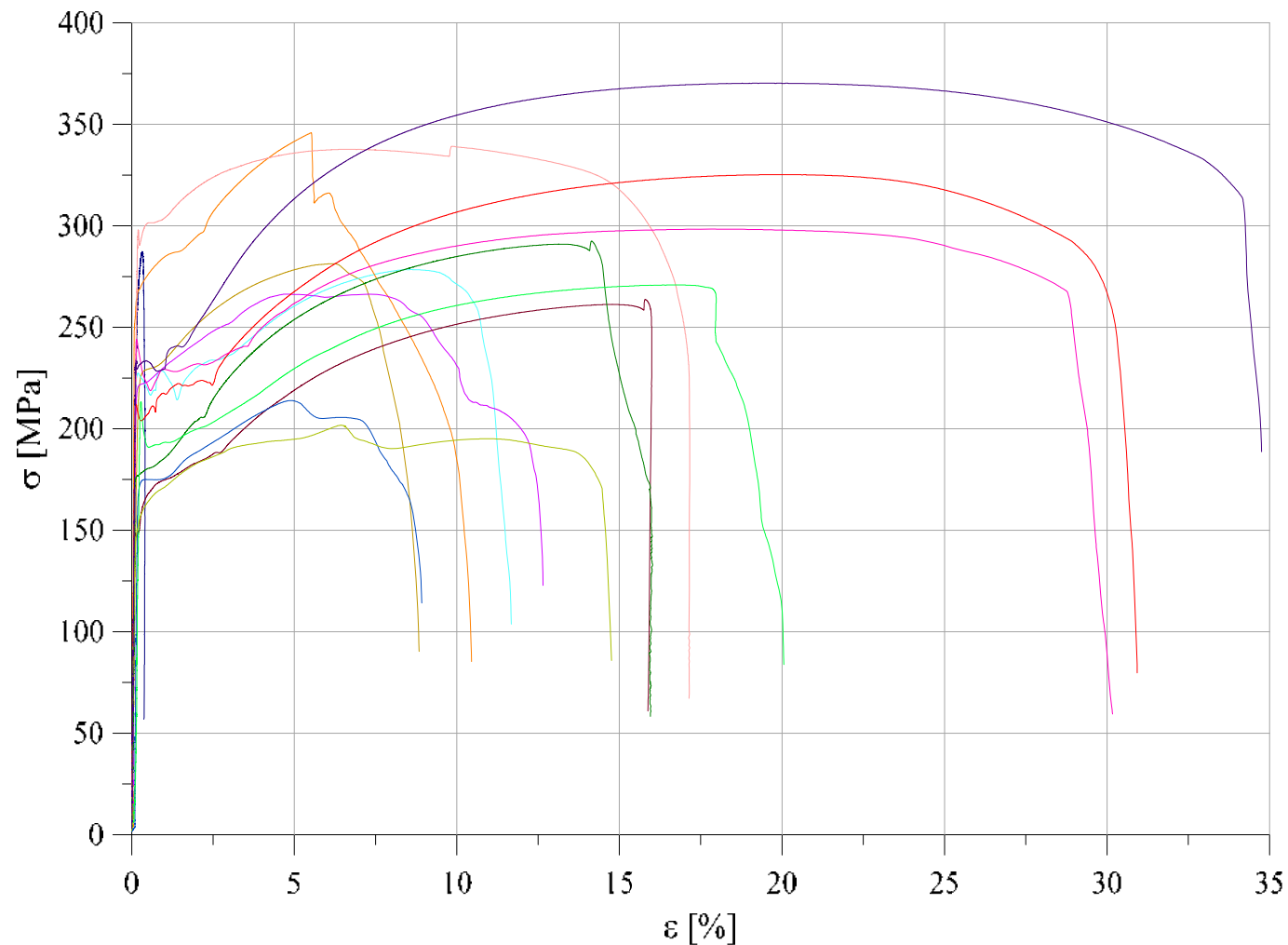
- Minimizzazione del rapporto tra la sezione del provino e la sezione della catena

#### Motivazioni:

- trattando materiale storico, si deve minimizzare la perdita di materiale;
- trattando materiale eterogeneo, si devono limitare gli effetti di sala riducendo il rapporto tra dimensioni delle inclusioni e del provino.



## IDENTIFICAZIONE PARAMETRI MECCANICI



PROVE A TRAZIONE  
UNI-EN 10002-1-2004

- 01-PI-TO
- 02-PI-TO
- 03-LI-IM
- 04-LI-GE
- 04-PI-TO
- 05-LI-GE
- 06-LI-GE-1
- 06-LI-GE-2
- 06-PI-TO
- 07-LI-IM
- 08-LI-IM
- 08-LI-IM-CHIAVE
- 10-LI-GE
- 11-LI-GE

MONITORAGGIO PERIODICO E CONTINUO DI STRUTTURE DEL PATRIMONIO ARCHITETTONICO

Vicoforte, June 15-16 2017

## IDENTIFICAZIONE PARAMETRI MECCANICI

Code	$A_0$ [mm]	$E$ [GPa]	$R_p$ 0.2 [MPa]	$R_m$ [MPa]	$\epsilon_u$ [%]
01.LI.IM	132.7	167	147	226	19.0
03.LI.IM	178.8	234	225	278	11.7
04.LI.GE	442.6	410	270	346	10.7
05.LI.GE*	216.0	286	222	266	-
06.LI.GE_a	190.9	251	204	325	30.9
06.LI.GE_b	131.5	301	155	264	15.9
07.LI.IM*	166.6	169	228	298	-
08.LI.IM_a (tie)	385.7	179	179	292	18.2
08.LI.IM_b (bolt)	265.6	157	194	271	16.0
10.LI.GE	556.6	125	158	202	14.8
11.LI.GE	314.2	202	233	370	34.8
01.PI.TO**	404.7	173	280	287	-
02.PI.TO	557.0	130	229	281	9.52
04.PI.TO	184.3	191	298	339	17.1
06.PI.TO	677.4	165	175	214	8.80
<b>Mean value</b>	-	<b>209</b>	<b>206</b>	<b>284</b>	<b>17.3</b>
<b>Standard Deviation</b>	-	<b>71.2</b>	<b>48.7</b>	<b>53.4</b>	<b>7.70</b>
<b>5% Percentile</b>	-	<b>128</b>	<b>152</b>	<b>209</b>	<b>9.18</b>
<b>Coef. of Variation</b>	-	<b>0.33</b>	<b>0.23</b>	<b>0.19</b>	<b>0.42</b>

**MODULO DI YOUNG**

Media: 209 GPa

Dev. St.: 71.2 GPa

(Coef. di var.: 0.33)

## IDENTIFICAZIONE PARAMETRI MECCANICI

Code	$A_0$ [mm]	$E$ [GPa]	$R_p$ 0.2 [MPa]	$R_m$ [MPa]	$\varepsilon_u$ [%]
01.LI.IM	132.7	167	147	226	19.0
03.LI.IM	178.8	234	225	278	11.7
04.LI.GE	442.6	410	270	346	10.7
05.LI.GE*	216.0	286	222	266	-
06.LI.GE_a	190.9	251	204	325	30.9
06.LI.GE_b	131.5	301	155	264	15.9
07.LI.IM*	166.6	169	228	298	-
08.LI.IM_a (tie)	385.7	179	179	292	18.2
08.LI.IM_b (bolt)	265.6	157	194	271	16.0
10.LI.GE	556.6	125	158	202	14.8
11.LI.GE	314.2	202	233	370	34.8
01.PI.TO**	404.7	173	280	287	-
02.PI.TO	557.0	130	229	281	9.52
04.PI.TO	184.3	191	298	339	17.1
06.PI.TO	677.4	165	175	214	8.80
<b>Mean value</b>	-	<b>209</b>	<b>206</b>	<b>284</b>	<b>17.3</b>
<b>Standard Deviation</b>	-	<b>71.2</b>	<b>48.7</b>	<b>53.4</b>	<b>7.70</b>
<b>5% Percentile</b>	-	<b>128</b>	<b>152</b>	<b>209</b>	<b>9.18</b>
<b>Coef. of Variation</b>	-	<b>0.33</b>	<b>0.23</b>	<b>0.19</b>	<b>0.42</b>

### TENSIONE DI SNERVAMENTO

Media: 206 MPa

Dev. St.: 48.7 MPa

5% per.: 152 MPa

(Coef. di var.: 0.23)

Max tiro: 150 Mpa (UNIPD)

Riferimento: S275\*

Media: 328 MPa

St. dev.: 22.7 MPa

5% per.: 296 MPa

(Coef. di var.: 0.039)

\*Braconi et al. (2013)

## IDENTIFICAZIONE PARAMETRI MECCANICI

Code	$A_0$ [mm]	$E$ [GPa]	$R_p$ 0.2 [MPa]	$R_m$ [MPa]	$\epsilon_u$ [%]
01.LI.IM	132.7	167	147	226	19.0
03.LI.IM	178.8	234	225	278	11.7
04.LI.GE	442.6	410	270	346	10.7
05.LI.GE*	216.0	286	222	266	-
06.LI.GE_a	190.9	251	204	325	30.9
06.LI.GE_b	131.5	301	155	264	15.9
07.LI.IM*	166.6	169	228	298	-
08.LI.IM_a (tie)	385.7	179	179	292	18.2
08.LI.IM_b (bolt)	265.6	157	194	271	16.0
10.LI.GE	556.6	125	158	202	14.8
11.LI.GE	314.2	202	233	370	34.8
01.PI.TO**	404.7	173	280	287	-
02.PI.TO	557.0	130	229	281	9.52
04.PI.TO	184.3	191	298	339	17.1
06.PI.TO	677.4	165	175	214	8.80
<b>Mean value</b>	-	<b>209</b>	<b>206</b>	<b>284</b>	<b>17.3</b>
<b>Standard Deviation</b>	-	<b>71.2</b>	<b>48.7</b>	<b>53.4</b>	<b>7.70</b>
<b>5% Percentile</b>	-	<b>128</b>	<b>152</b>	<b>209</b>	<b>9.18</b>
<b>Coef. of Variation</b>	-	<b>0.33</b>	<b>0.23</b>	<b>0.19</b>	<b>0.42</b>

### TENSIONE DI ROTTURA

Media: **284** MPa

St. dev.: **53.4** MPa

5% per.: **209** MPa

(Coef. di var.: **0.19**)

Riferimento: S275\*

Media: **436** MPa

St. dev.: **13.7** MPa

5% per.: **413** MPa

(Coef. di var.: **0.031**)

\*Braconi et al. (2013)

## IDENTIFICAZIONE PARAMETRI MECCANICI

Code	$A_0$ [mm]	$E$ [GPa]	$R_p$ 0.2 [MPa]	$R_m$ [MPa]	$\epsilon_u$ [%]
01.LI.IM	132.7	167	147	226	19.0
03.LI.IM	178.8	234	225	278	11.7
04.LI.GE	442.6	410	270	346	10.7
05.LI.GE*	216.0	286	222	266	-
06.LI.GE_a	190.9	251	204	325	30.9
06.LI.GE_b	131.5	301	155	264	15.9
07.LI.IM*	166.6	169	228	298	-
08.LI.IM_a (tie)	385.7	179	179	292	18.2
08.LI.IM_b (bolt)	265.6	157	194	271	16.0
10.LI.GE	556.6	125	158	202	14.8
11.LI.GE	314.2	202	233	370	34.8
01.PI.TO**	404.7	173	280	287	-
02.PI.TO	557.0	130	229	281	9.52
04.PI.TO	184.3	191	298	339	17.1
06.PI.TO	677.4	165	175	214	8.80
<b>Mean value</b>	-	<b>209</b>	<b>206</b>	<b>284</b>	<b>17.3</b>
<b>Standard Deviation</b>	-	<b>71.2</b>	<b>48.7</b>	<b>53.4</b>	<b>7.70</b>
<b>5% Percentile</b>	-	<b>128</b>	<b>152</b>	<b>209</b>	<b>9.18</b>
<b>Coef. of Variation</b>	-	<b>0.33</b>	<b>0.23</b>	<b>0.19</b>	<b>0.42</b>

### ALLUNGAMENTO A ROTTURA

Media: 17.3 %

St. dev.: 7.70 %

5% per.: 9.18 %

(Coef. di var.: 0.42)

Riferimento: S275\*

Media: 32.2 %

St. dev.: 1.60 %

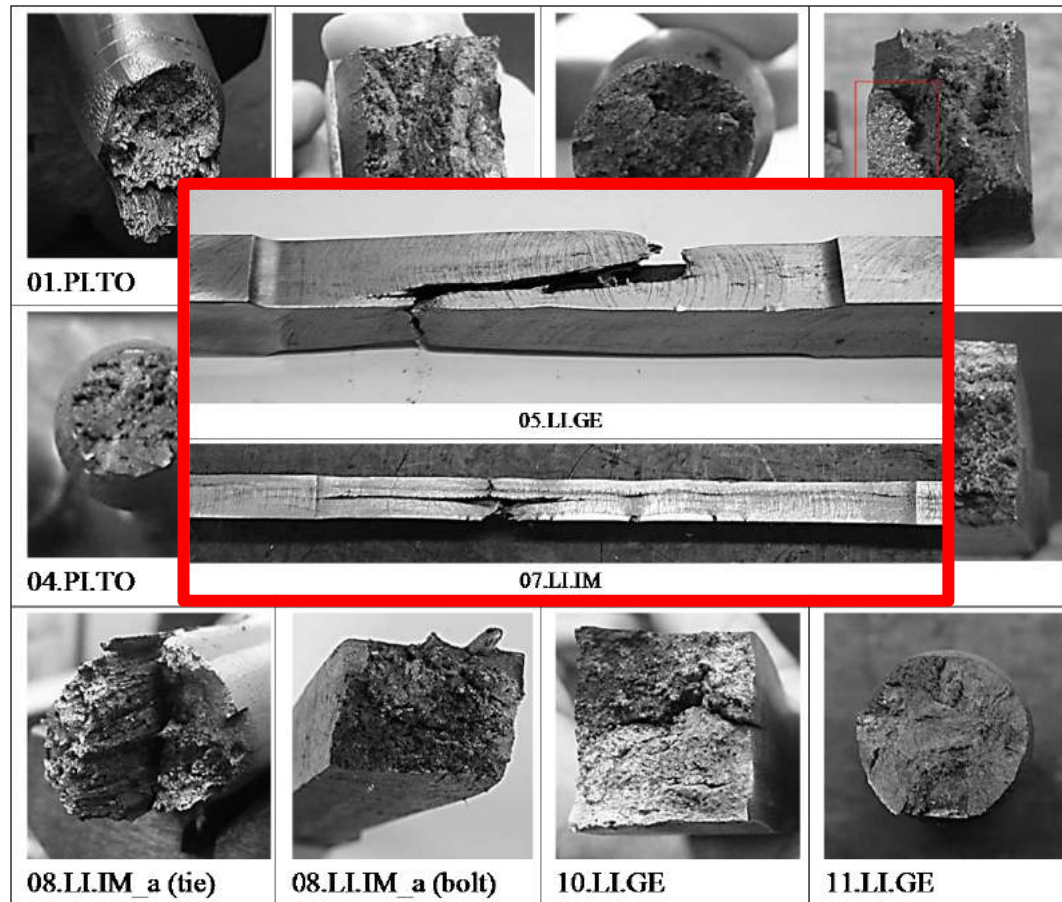
5% per.: 29.5 %

(Coef. di var.: 0.05)

\*Braconi et al. (2013)

## IDENTIFICAZIONE PARAMETRI MECCANICI

### MODI DI ROTTURA



### CONFRONTO CON ACCIAIO MODERNO



## IDENTIFICAZIONE PARAMETRI MECCANICI

UN CAMPIONE: 06.LI.GE\_a



ASTM E3-95



OPT.: LEICA WILD 8 STEREOS.  
SEM: LEICA MEF 4 MICROS.

Motivazioni:

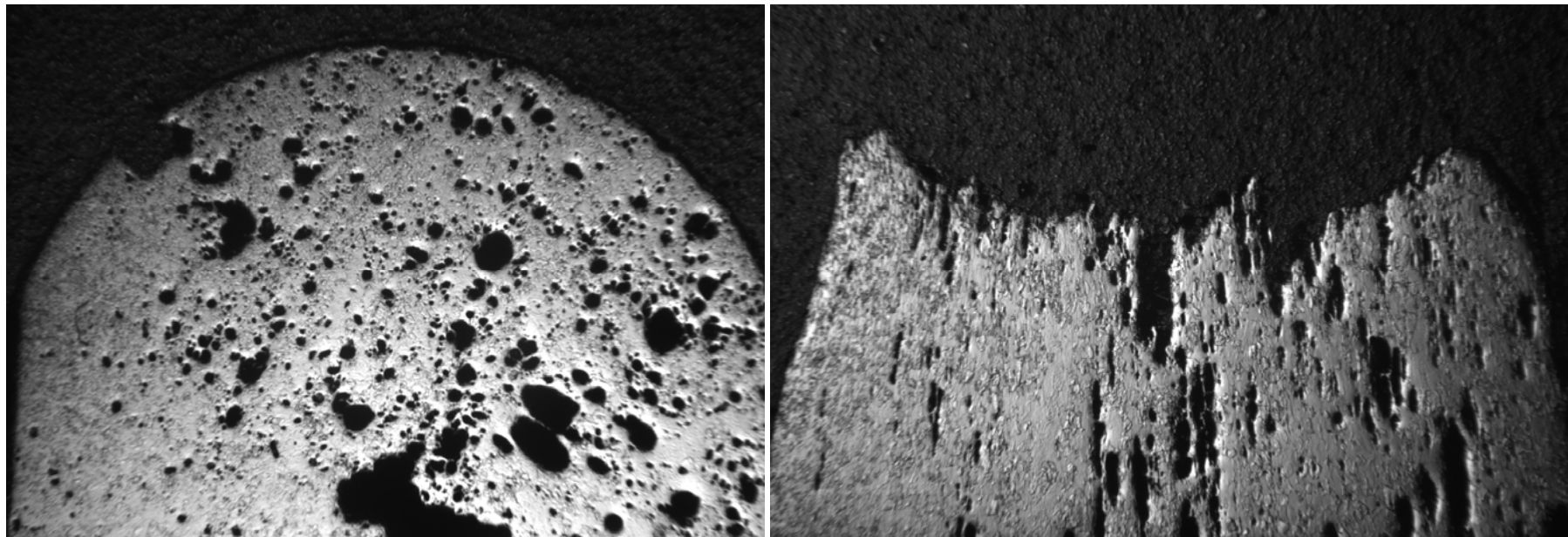
- curva tensioni-deformazioni e superfici di rottura abbastanza regolari
- inclusioni visibili

Obbiettivo:

- indagare la relazione tra parametri e microstruttura e interpretare le differenze rispetto alle curve usuali tensione-deformazione

## IDENTIFICAZIONE PARAMETRI MECCANICI

### ETEROGENEITA' DEL MATERIALE

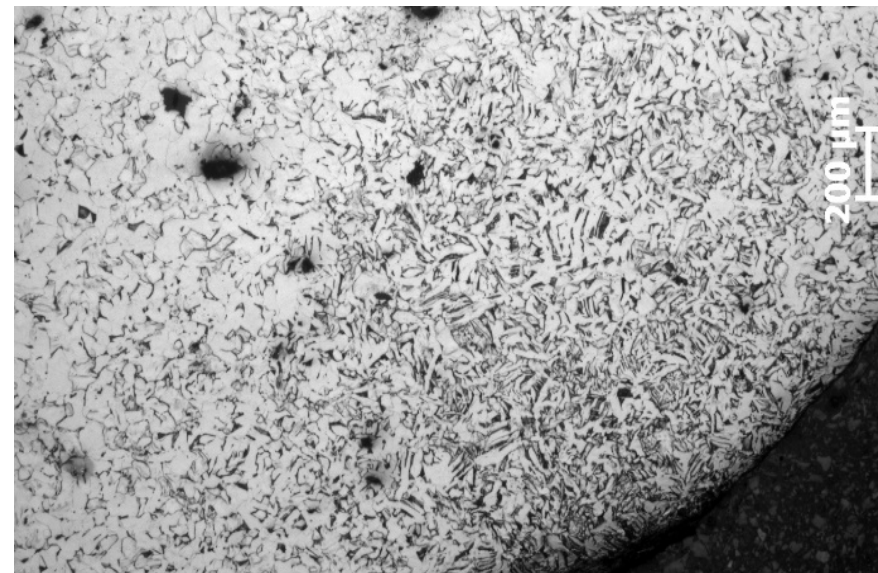
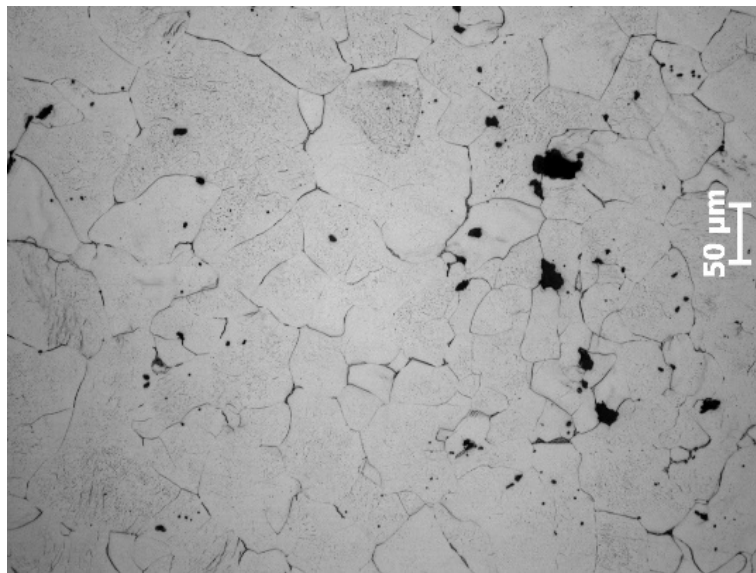


- matrice ferrosa ricca di inclusioni (vuoti e scorie di natura vetrosa)
- natura fibrosa del materiale



## IDENTIFICAZIONE PARAMETRI MECCANICI

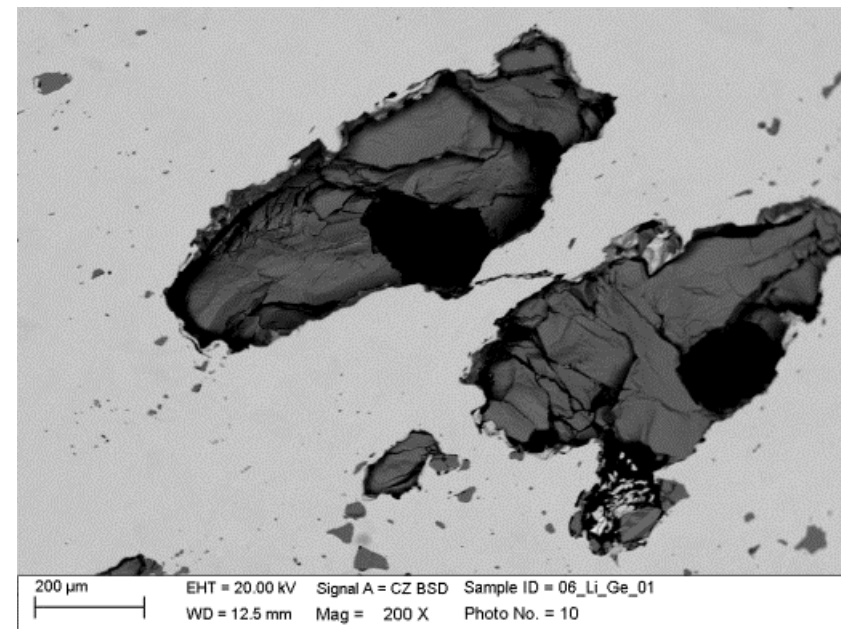
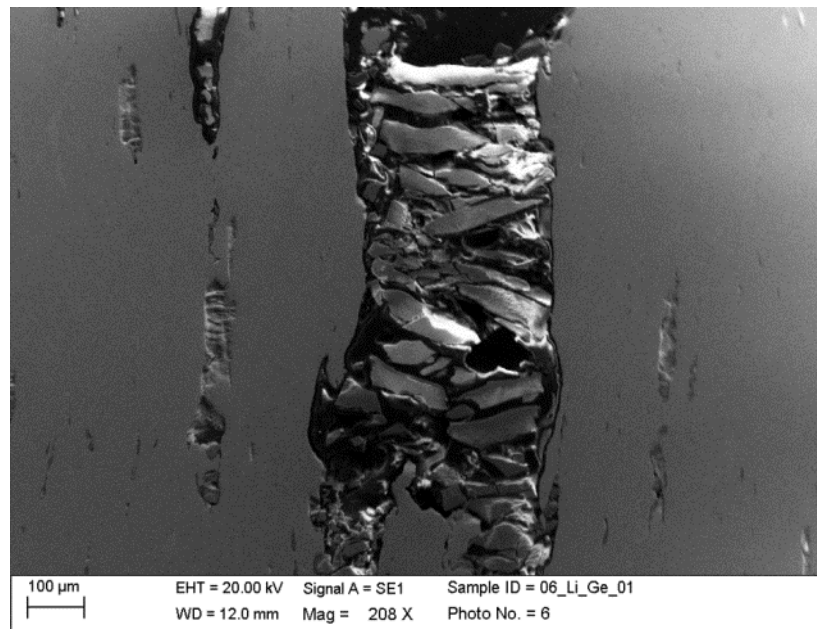
### MICROSTRUTTURA



- struttura ferritica con una dimensione dei grani abbastanza omogenea
- aree perlitiche superficiali e diffuse non omogeneamente

## IDENTIFICAZIONE PARAMETRI MECCANICI

### NATURA E RUOLO DELLE INCLUSIONI

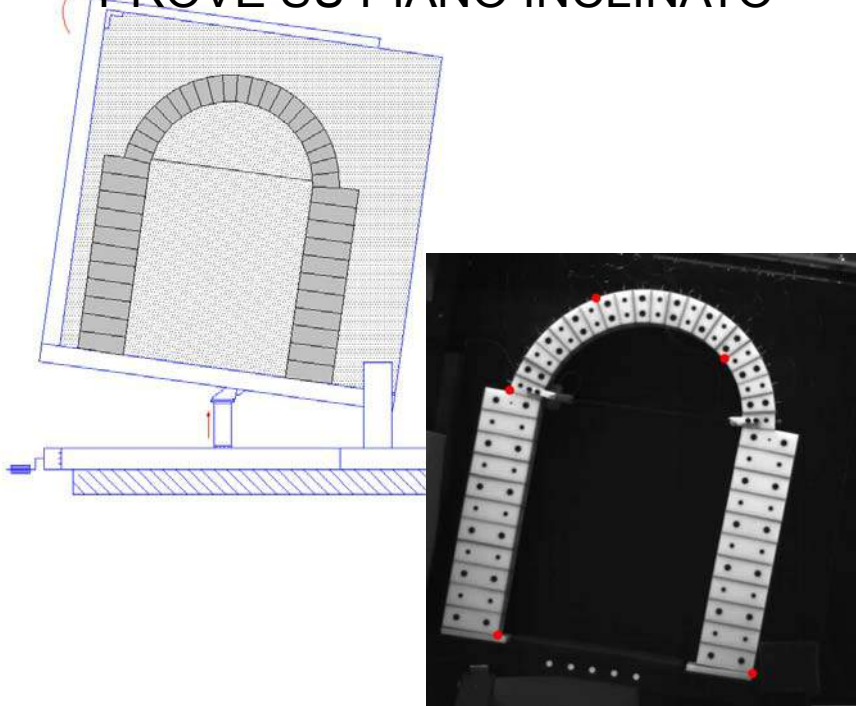


- le inclusioni sono soprattutto scorie vetrose (derivanti dalla riduzione degli ossidi)
- leffetto effects è una riduzione della sezione e la concentrazione di tensioni

## TIRO E PARAMETRI NEL PROGETTO DI NUOVE CATENE

PROVE STATICHE  
Università di Genova

PROVE SU PIANO INCLINATO



PROVE DINAMICHE  
Laboratorio ENEA

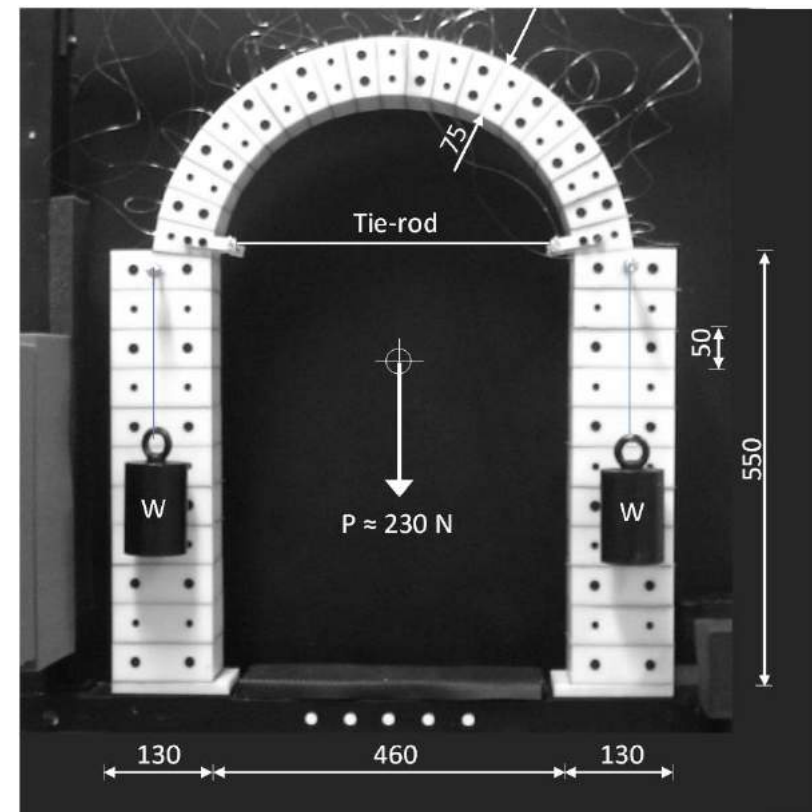
PROVE SU TAVOLA VIBRANTE



## TIRO E PARAMETRI NEL PROGETTO DI NUOVE CATENE

### IL MODELLO

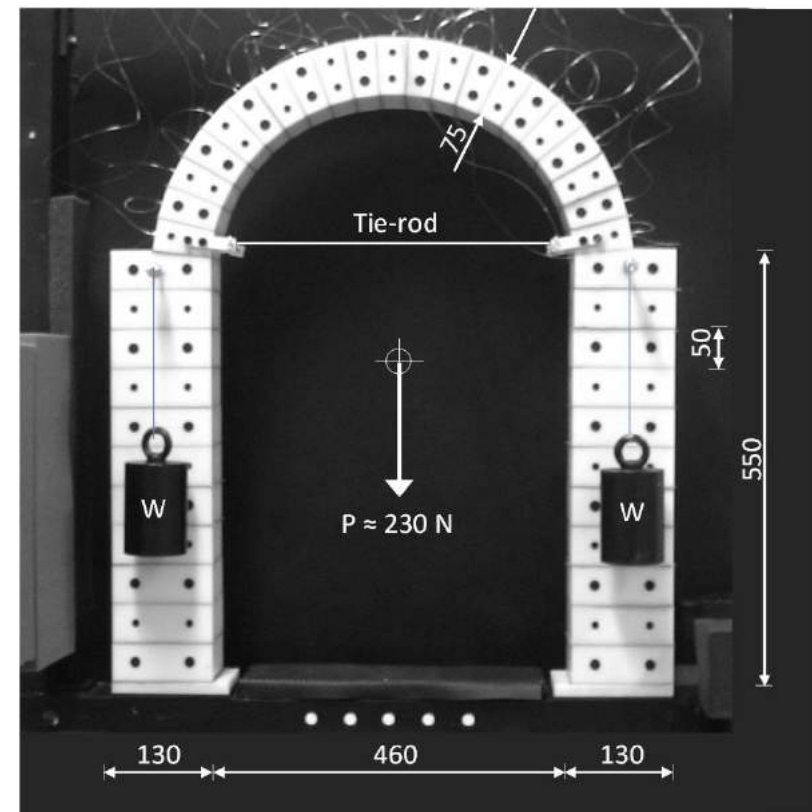
- SCALA 1:10
- BLOCCHI DISCRETI FATTI DI MATERIALE PLASTICO (Polyamide 6 cast - PA 6 G) REALIZZATI CON LA TECNICA DELLA PLASTICA FUSA.
- INTRODUZIONE DI SOTTILI MEMBRANE DI SCHIUMA DI ALCOL POLIVINILICO (PVA) SPESSI 0.3 mm PER INIBIRE LO SCORRIMENTO TRA I BLOCCHI
- CATENA REALIZZATA IN DIVERSI MATERIALI
- DIVERSI LIVELLI DI PRE-TENSIONE NELLA CATENA



## TIRO E PARAMETRI NEL PROGETTO DI NUOVE CATENE

### PARAMETRI DELL'ARCO

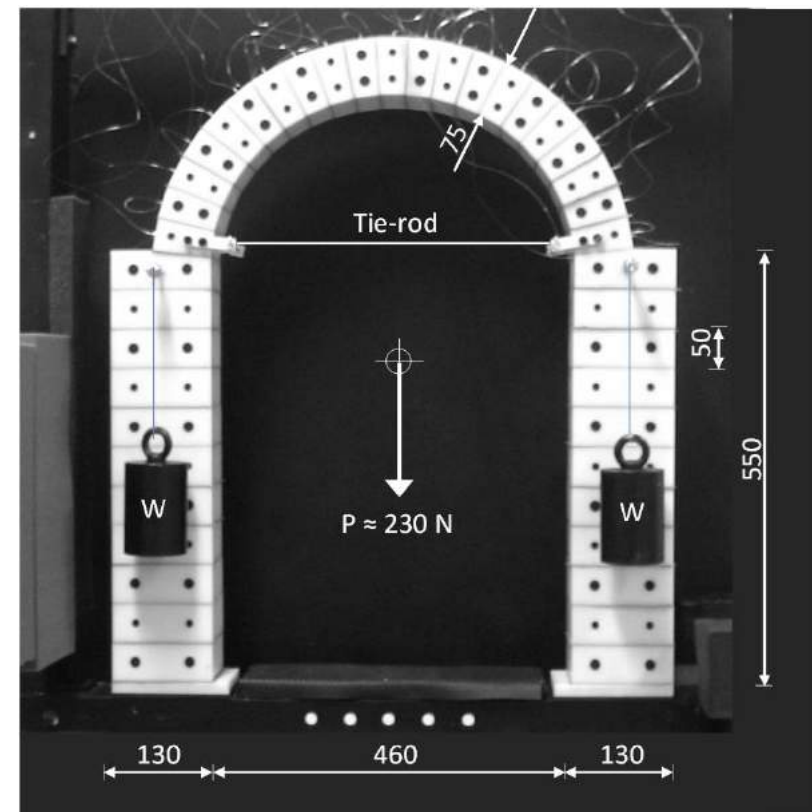
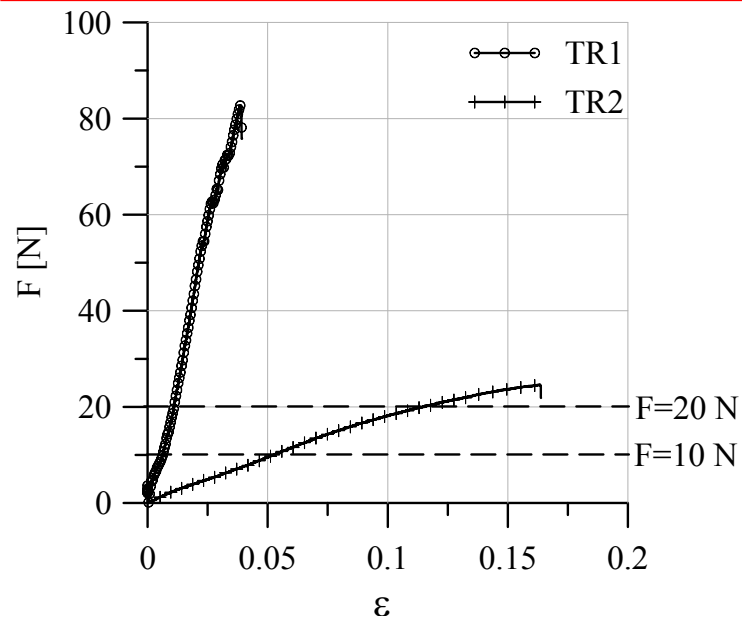
PARAMETER	UNIT	MODEL VALUE
Specific weight of Polyamide 6 cast ( $p_{P6}$ )	N/m <sup>3</sup>	11500
Specific weight of PVA sheets ( $p_{PVA}$ )	N/m <sup>3</sup>	195÷390
Homogeneous specific weight ( $p_h$ )	N/m <sup>3</sup>	~11430
Modulus of elasticity of Polyamide 6 cast ( $E_{P6}$ )	N/mm <sup>2</sup>	1800÷3100
Modulus of elasticity of PVA sheets ( $E_{PVA}$ )	N/mm <sup>2</sup>	~275
Homogeneous modulus of elasticity ( $E_h$ )	N/mm <sup>2</sup>	1750÷2940
Compressive strength of blocks ( $f_c$ )	N/mm <sup>2</sup>	60÷80
Span ( $s$ )	mm	550
Friction coefficient	rad	0.6



## TIRO E PARAMETRI NEL PROGETTO DI NUOVE CATENE

### PARAMETRI DELLE CATENE

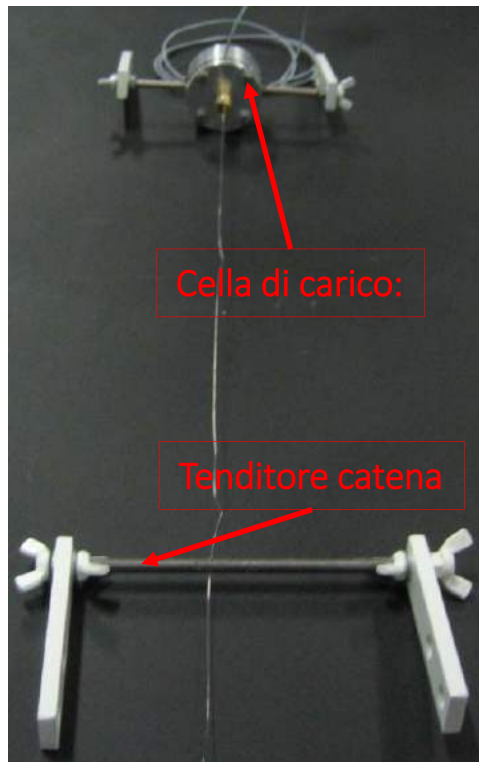
PARAMETER	UNIT	STEEL	NYLON
Young modulus ( $E_t$ )	N/mm <sup>2</sup>	67000	2840
Ultimate elongation ( $\varepsilon_u$ )	%	0.046	0.189
Stress at failure ( $f_u$ )	N/mm <sup>2</sup>	2800	780
Nominal diameter ( $d_t$ )	mm	0.2	0.3
Applied axial load ( $F$ )	N	10	10



## TIRO E PARAMETRI NEL PROGETTO DI NUOVE CATENE

### SISTEMI DI MISURA

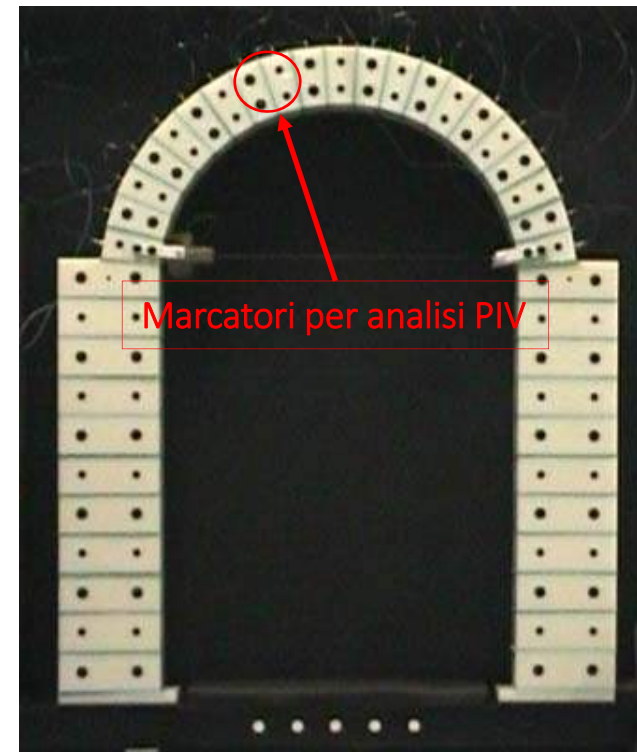
CELLA DI CARICO



LVDT + TELECAMERE ALTA FR.



MARCATORI



# MONITORAGGIO PERIODICO E CONTINUO DI STRUTTURE DEL PATRIMONIO ARCHITETTONICO

Vicoforte, June 15-16 2017

## TIRO E PARAMETRI NEL PROGETTO DI NUOVE CATENE

### PROVE STATICHE

#### PROVE STATICHE - LA PROVA DEL PIANO INCLINATO

GIUFFRÉ 1999, CERADINI 2002, RESTREPO VÉLEZ AND MAGENES 2009

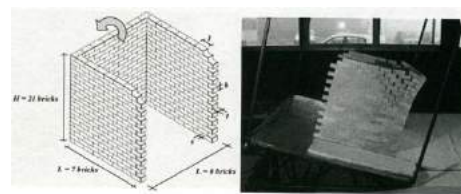
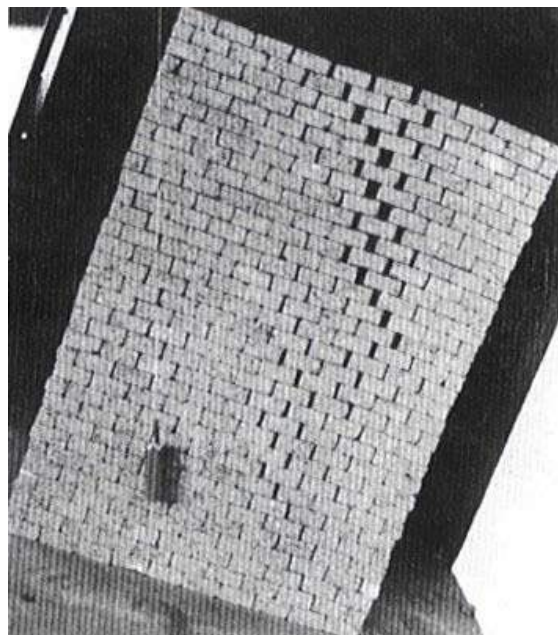


Figure A.4. Test S7,  $\lambda = 0.291$

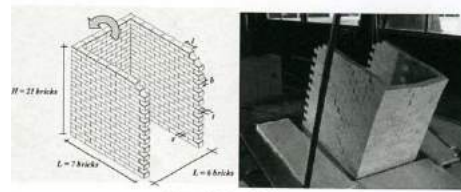
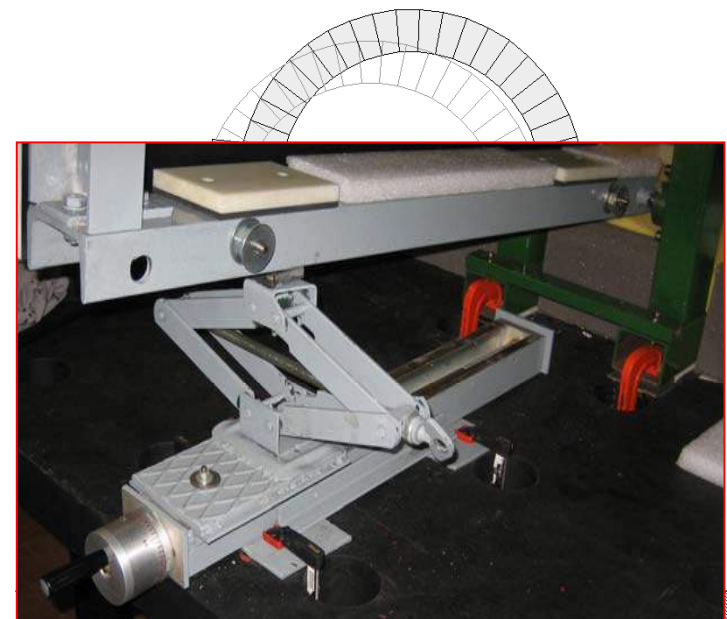
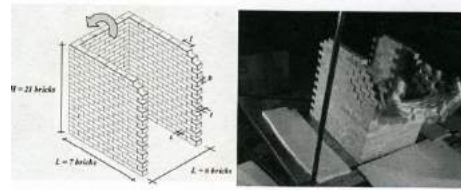


Figure A.5. Test S8,  $\lambda = 0.362$





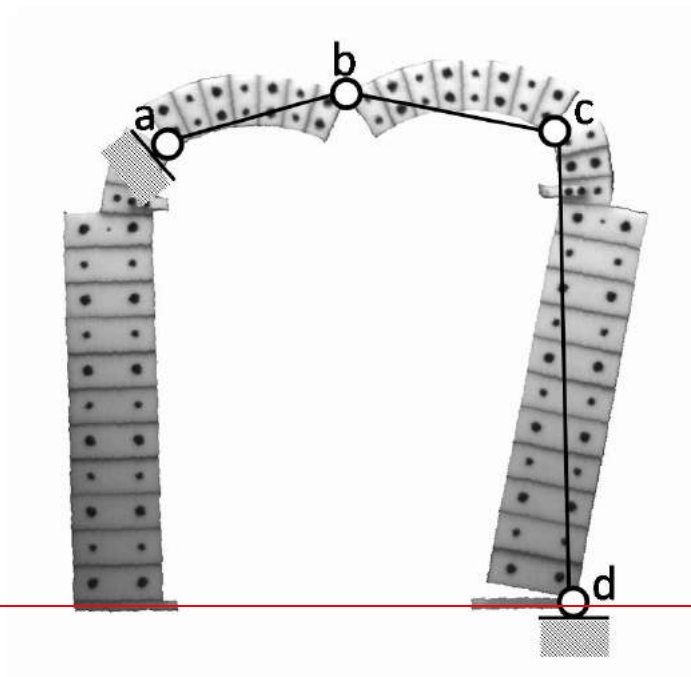
# MONITORAGGIO PERIODICO E CONTINUO DI STRUTTURE DEL PATRIMONIO ARCHITETTONICO

Vicoforte, June 15-16 2017

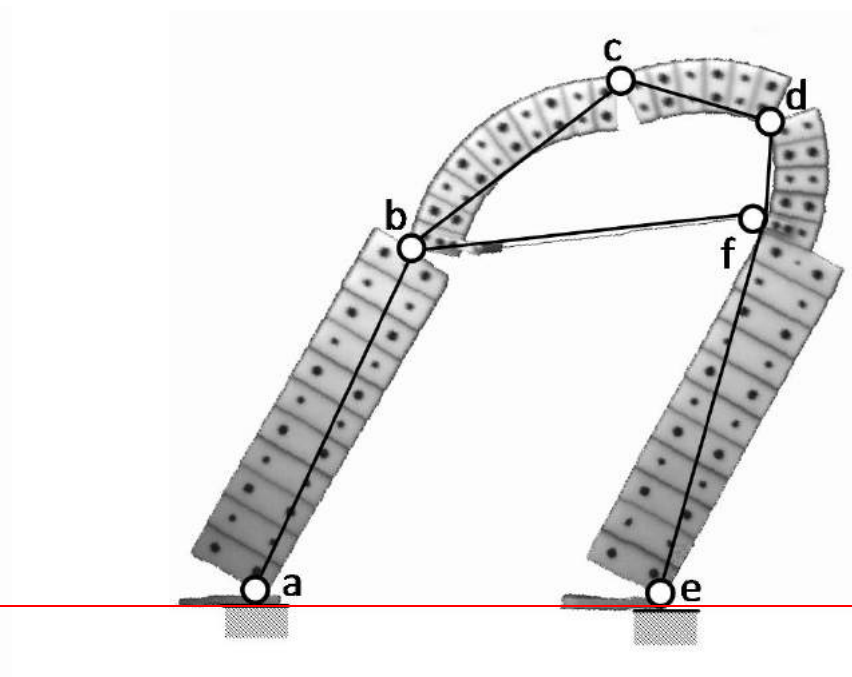
## TIRO E PARAMETRI NEL PROGETTO DI NUOVE CATENE

### PROVE STATICHE

ARCO SENZA CATENA



ARCO CON CATENA



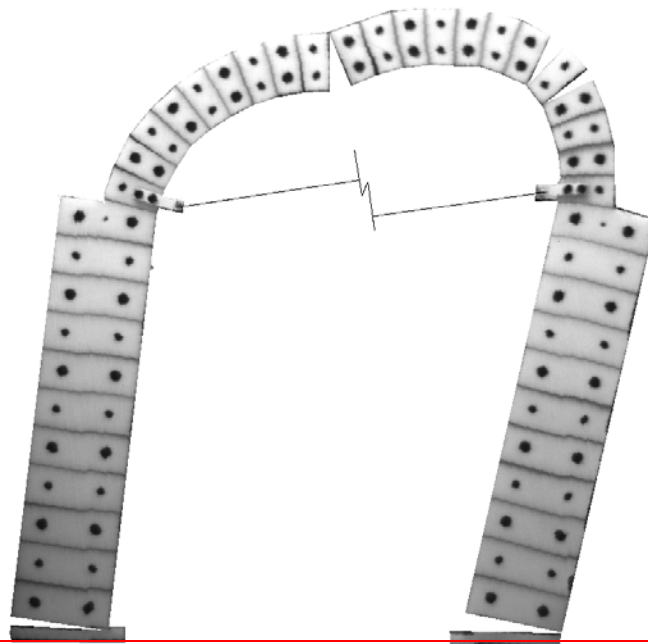
MONITORAGGIO PERIODICO E CONTINUO DI STRUTTURE DEL PATRIMONIO ARCHITETTONICO

Vicoforte, June 15-16 2017

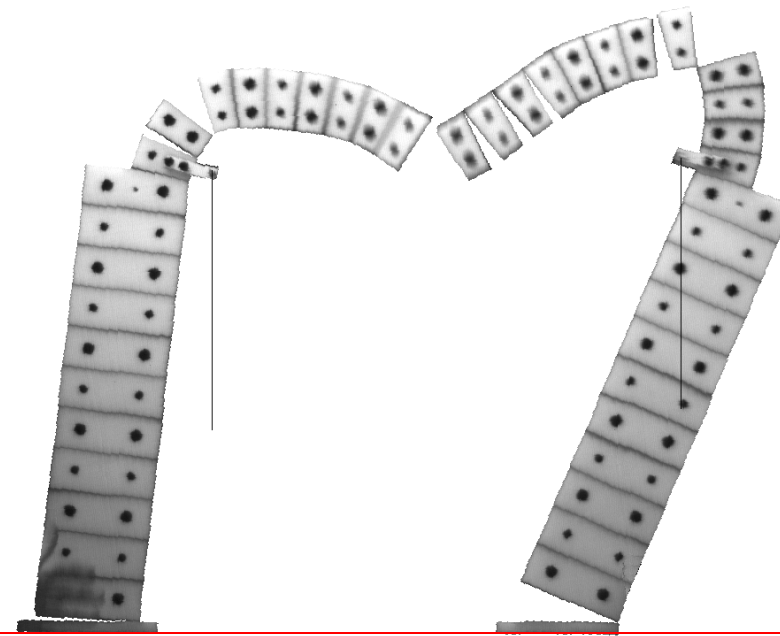
## TIRO E PARAMETRI NEL PROGETTO DI NUOVE CATENE

### PROVE STATICHE

MECCANISMO



A ROTTURA CATENA



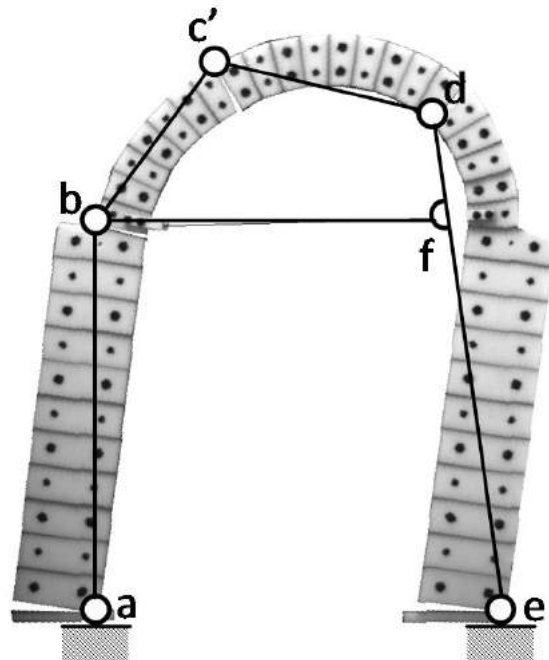
# MONITORAGGIO PERIODICO E CONTINUO DI STRUTTURE DEL PATRIMONIO ARCHITETTONICO

Vicoforte, June 15-16 2017

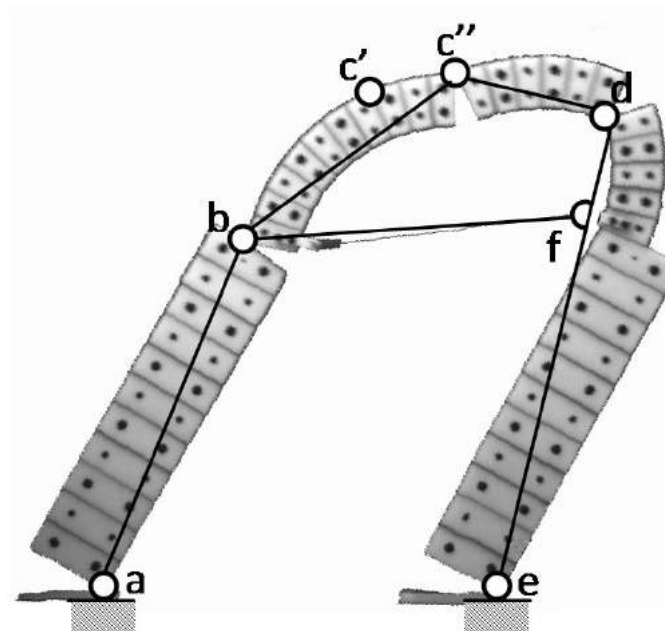
## TIRO E PARAMETRI NEL PROGETTO DI NUOVE CATENE

### PROVE STATICHE

ATTIVAZIONE MECCANISMO



PROGRESSIONE MECCANISMO



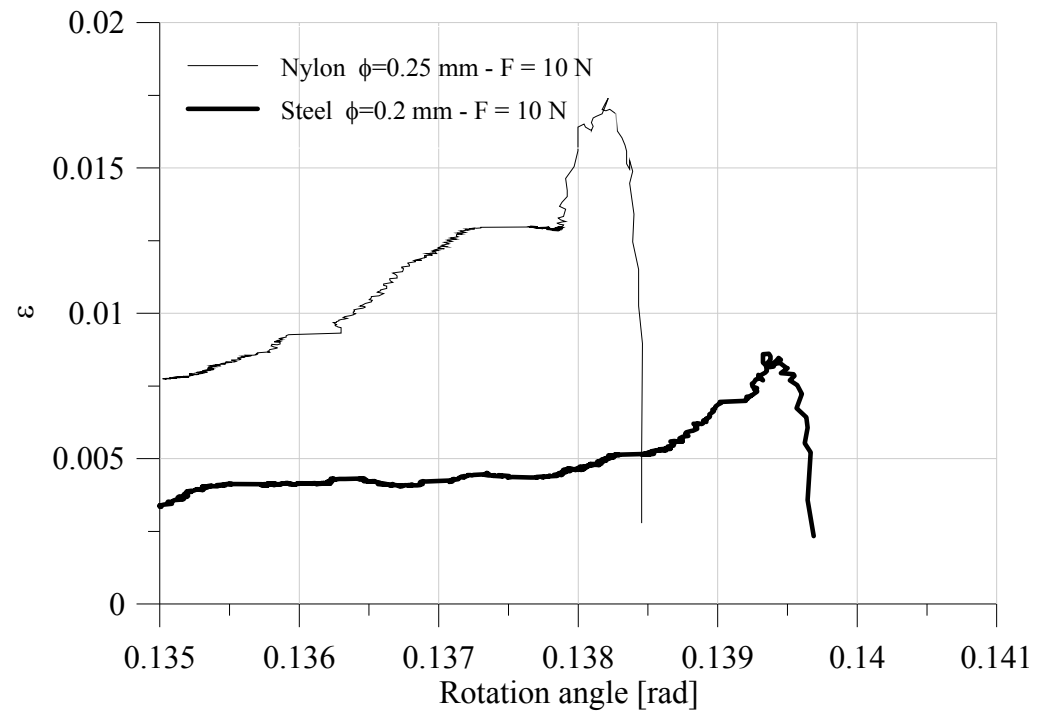
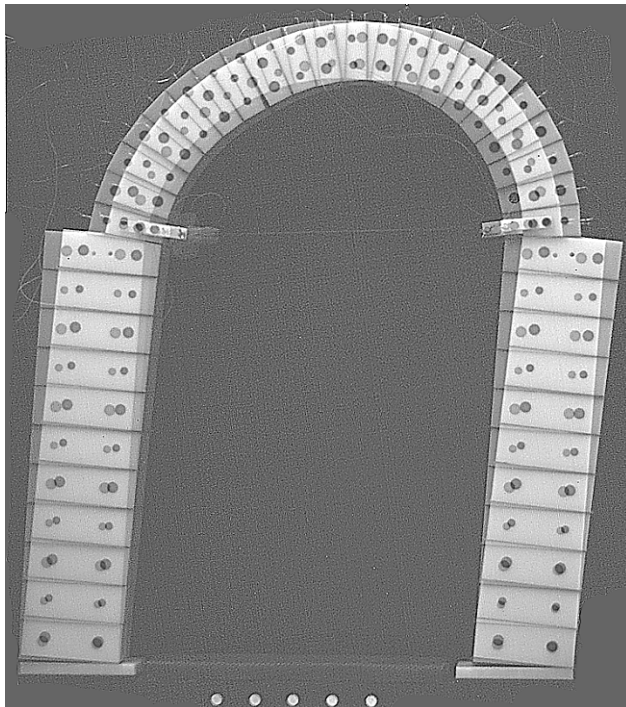
# MONITORAGGIO PERIODICO E CONTINUO DI STRUTTURE DEL PATRIMONIO ARCHITETTONICO

Vicoforte, June 15-16 2017

## TIRO E PARAMETRI NEL PROGETTO DI NUOVE CATENE

### PROVE STATICHE

### CONFRONTO DEFORMAZIONI ACCIAIO/NYLON (PER IDENTICA ROTAZIONE)



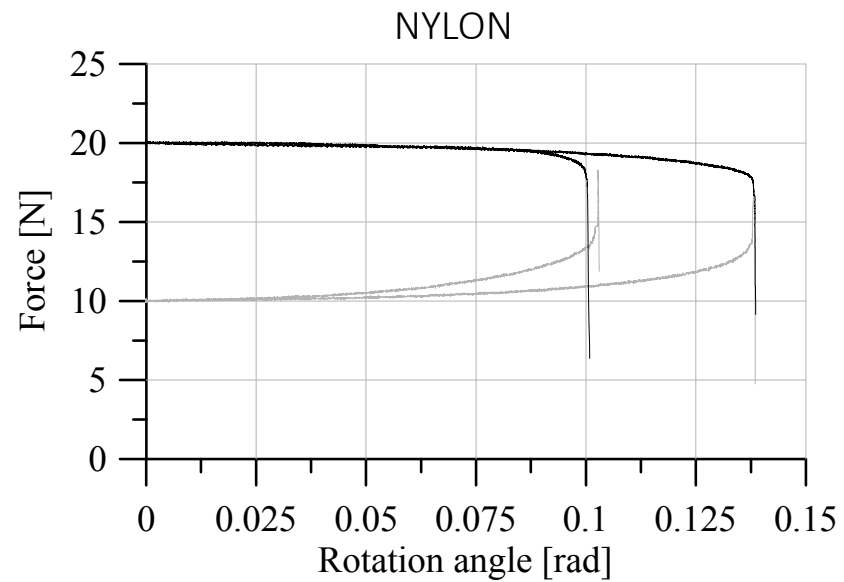
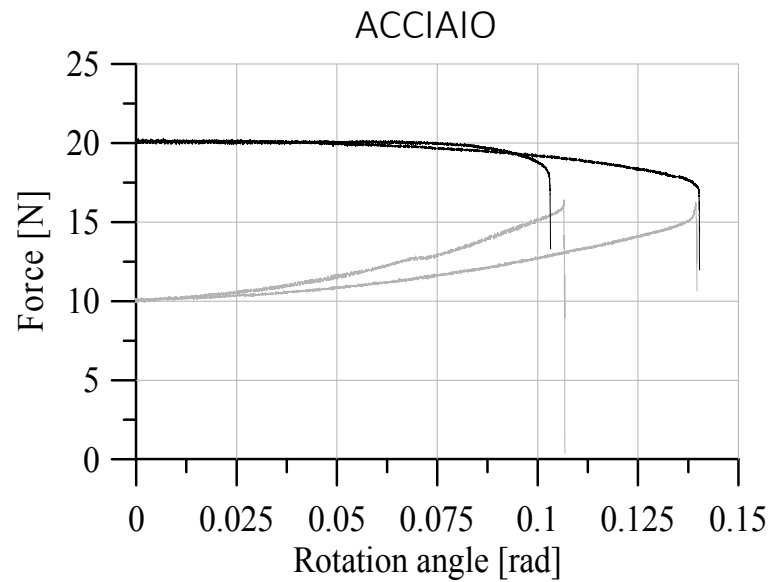
MONITORAGGIO PERIODICO E CONTINUO DI STRUTTURE DEL PATRIMONIO ARCHITETTONICO

Vicoforte, June 15-16 2017

# TIRO E PARAMETRI NEL PROGETTO DI NUOVE CATENE

## PROVE STATICHE

### EVOLUZIONE DEL TIRO NELLE CATENE



# MONITORAGGIO PERIODICO E CONTINUO DI STRUTTURE DEL PATRIMONIO ARCHITETTONICO

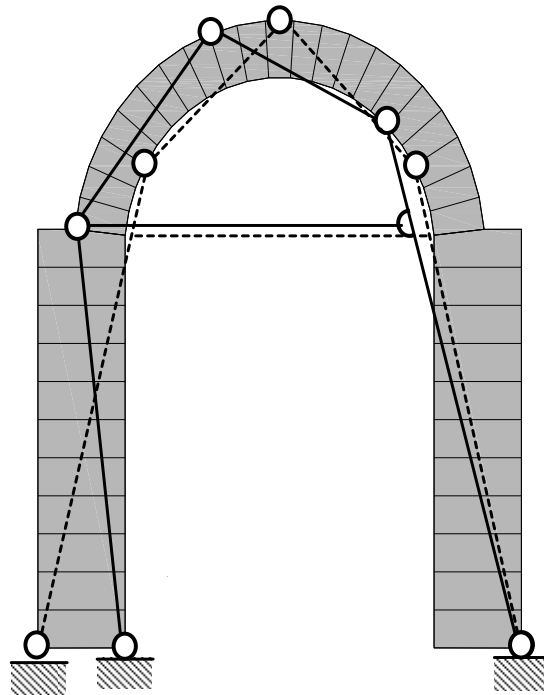
Vicoforte, June 15-16 2017

## TIRO E PARAMETRI NEL PROGETTO DI NUOVE CATENE

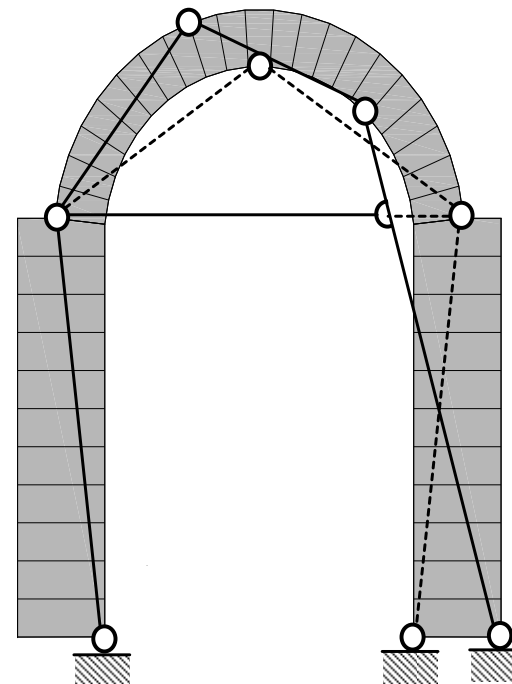
### PROVE STATICHE

### EVOLUZIONE DELLO SFORZO NELLE CATENE

CONDIZIONE  $T \rightarrow 0$  N



CONDIZIONE  $T \rightarrow \infty$  N



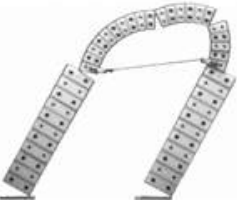
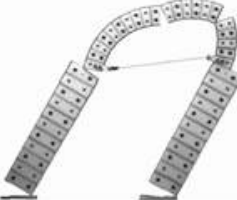



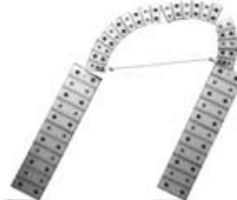




MONITORAGGIO PERIODICO E CONTINUO DI STRUTTURE DEL PATRIMONIO ARCHITETTONICO

Vicoforte, June 15-16 2017

TIRO E PARAMETRI NEL PROGETTO DI NUOVE CATENE

PROVE STATICHE

	No overload		With overload	
Free-standing arch	 $\lambda=0.035$		 $\lambda=0.048$	
	$T = 10 \text{ N}$	$T = 20 \text{ N}$	$T = 10 \text{ N}$	$T = 20 \text{ N}$
TR1	 $\lambda=0.139$	 $\lambda=0.140$	 $\lambda=0.106$	 $\lambda=0.103$
TR2	 $\lambda=0.138$	 $\lambda=0.137$	 $\lambda=0.103$	 $\lambda=0.101$

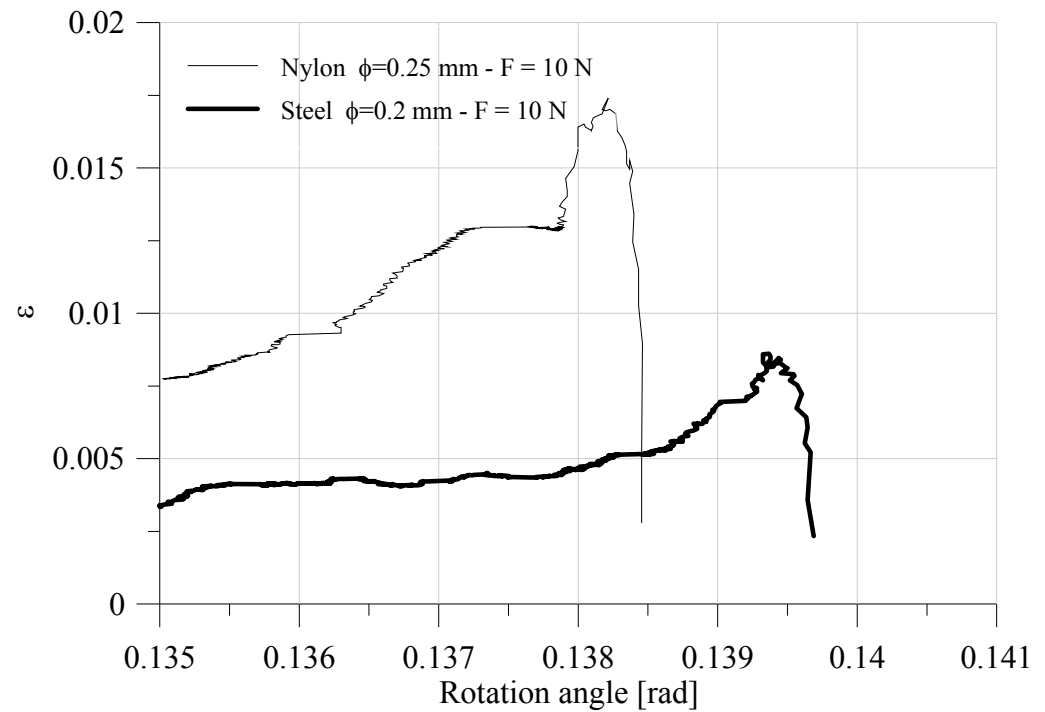
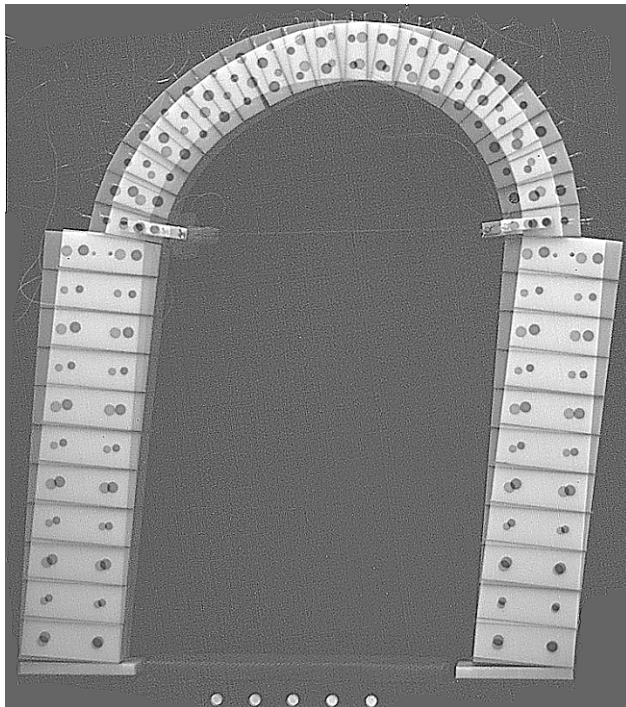
# MONITORAGGIO PERIODICO E CONTINUO DI STRUTTURE DEL PATRIMONIO ARCHITETTONICO

Vicoforte, June 15-16 2017

## TIRO E PARAMETRI NEL PROGETTO DI NUOVE CATENE

### PROVE STATICHE

### CONFRONTO DEFORMAZIONI ACCIAIO/NYLON (PER IDENTICA ROTAZIONE)



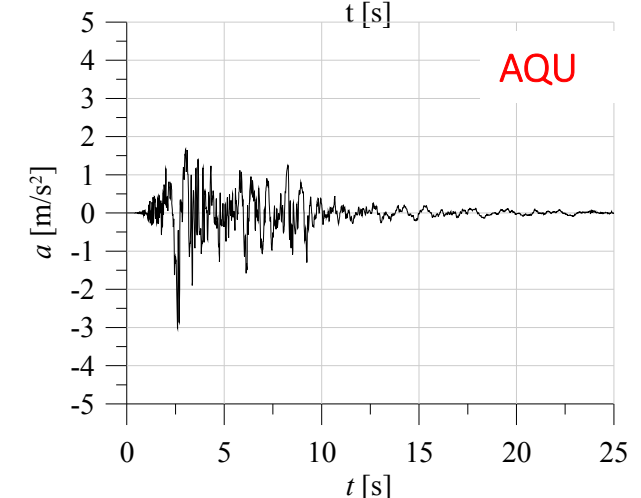
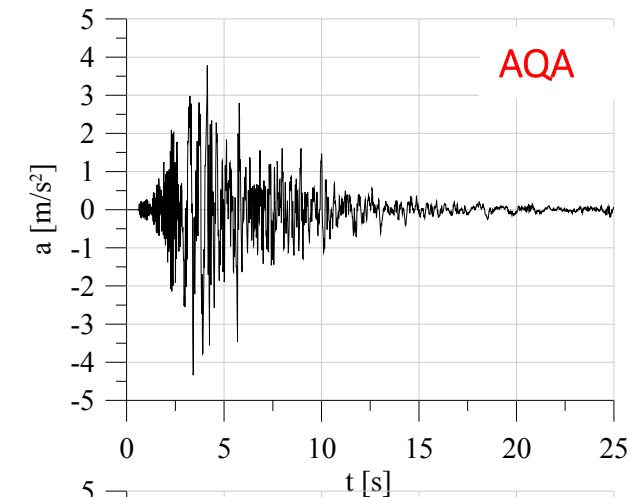
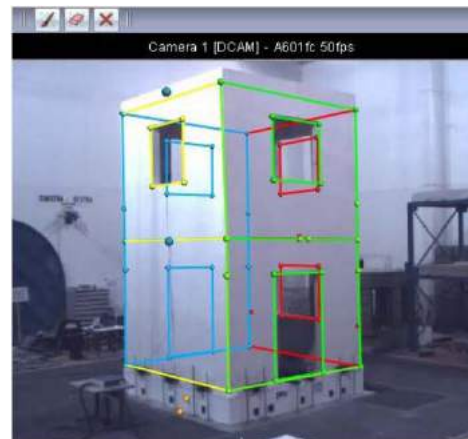
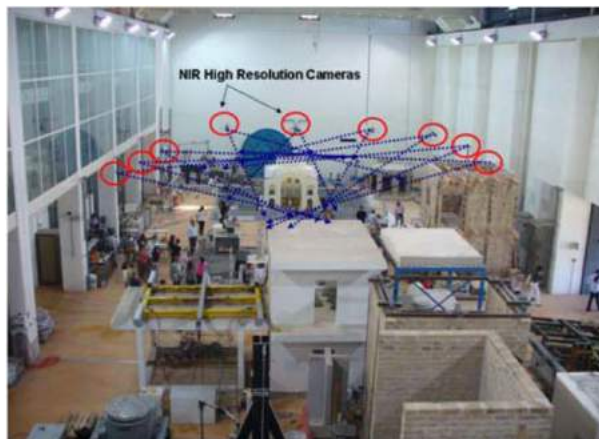


## MONITORAGGIO PERIODICO E CONTINUO DI STRUTTURE DEL PATRIMONIO ARCHITETTONICO

Vicoforte, June 15-16 2017

### TIRO E PARAMETRI NEL PROGETTO DI NUOVE CATENE

- PROVE SVOLTE PRESSO IL LABORATORIO ENEA UTTMAT-QUAL, SU UNA TAVOLA VIBRANTE 2M X 2M A 6 DOF
- SISTEMA DI MISURA DEGLI SPOSTAMENTI "3D MOTION", BASATO SU UNA COSTELLAZIONE DI 9 TELECAMERE AD INFRAROSSI E MARCATORI CATARIFRANGENTI
- ANALISI DINAMICA INCREMENTALE
- 2 DIVERSI ACCELEROGRAMMI (SCALATI)



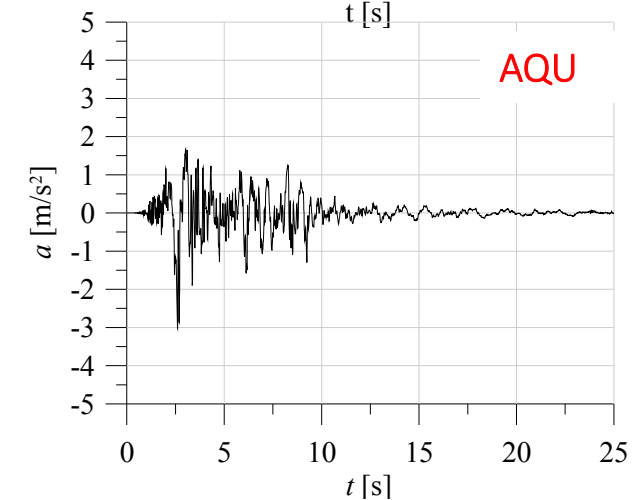
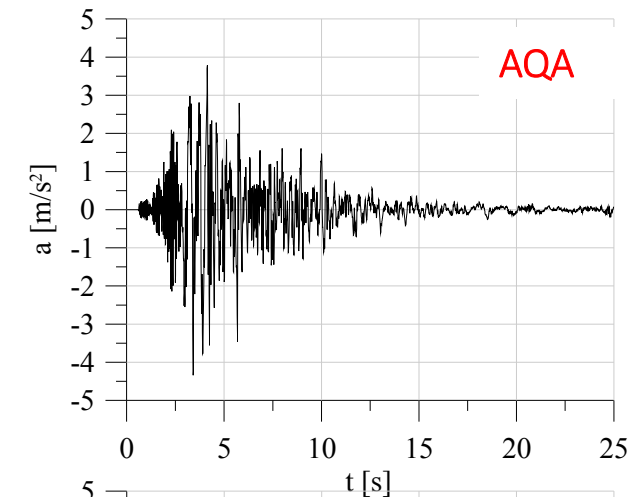
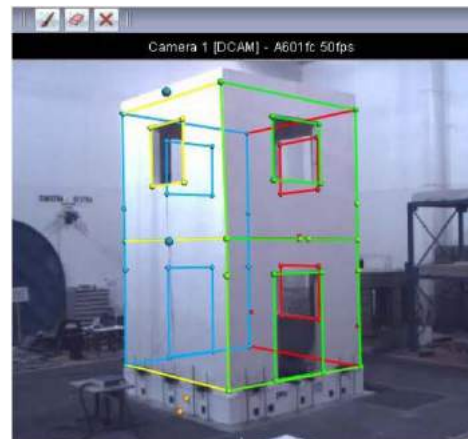
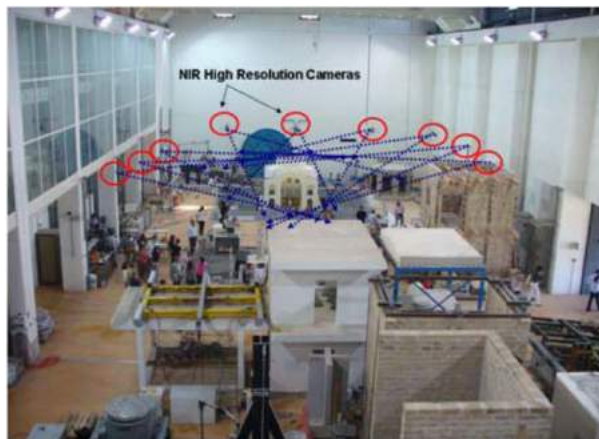
## MONITORAGGIO PERIODICO E CONTINUO DI STRUTTURE DEL PATRIMONIO ARCHITETTONICO

Vicoforte, June 15-16 2017

# TIRO E PARAMETRI NEL PROGETTO DI NUOVE CATENE

## PROVE DINAMICHE

- PROVE SVOLTE PRESSO IL LABORATORIO ENEA UTTMAT-QUAL, SU UNA TAVOLA VIBRANTE 2M X 2M A 6 DOF
- SISTEMA DI MISURA DEGLI SPOSTAMENTI "3D MOTION", BASATO SU UNA COSTELLAZIONE DI 9 TELECAMERE AD INFRAROSSI E MARCATORI CATARIFRANGENTI
- ANALISI DINAMICA INCREMENTALE
- 2 DIVERSI ACCELEROGRAMMI (SCALATI)



MONITORAGGIO PERIODICO E CONTINUO DI STRUTTURE DEL PATRIMONIO ARCHITETTONICO

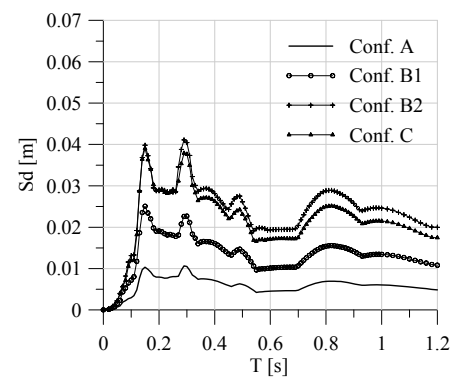
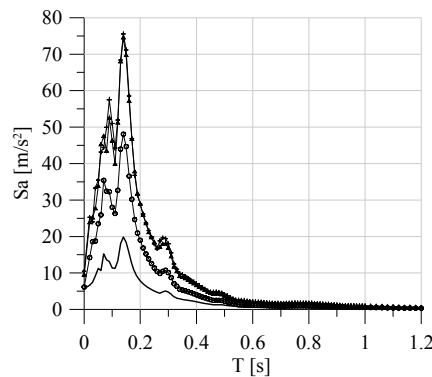
Vicoforte, June 15-16 2017

TIRO E PARAMETRI NEL PROGETTO DI NUOVE CATENE

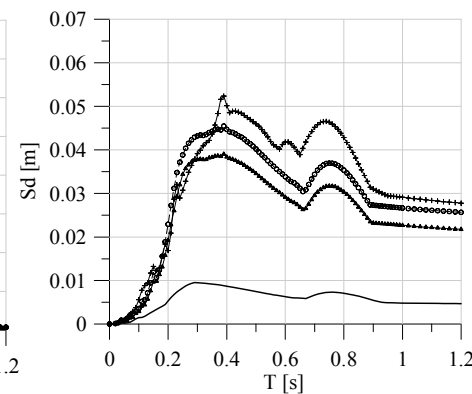
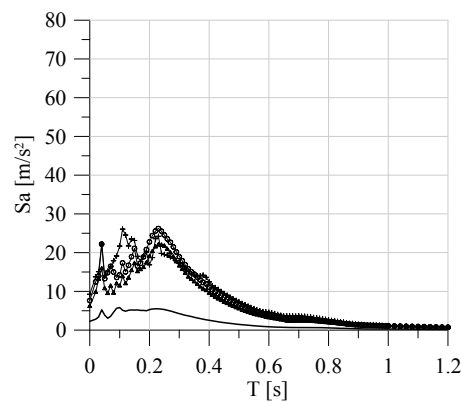
PROVE DINAMICHE

MECCANISMI DI COLLASSO

AQA



AQU



Case	AQA	AQU
A: Free standing arch	 PGA Max Displacement 0.50 g 66.48 mm (right pier)	 PGA Max Displacement 0.20 g Right pier collapsed
B1: Arch reinforced with rigid tie-rods	 PGA Max Displacement 1.20 g 12.23 mm (left pier)	 PGA Max Displacement 1.00 g 35.32 mm (right pier)
B2: Arch reinforced with flexible tie-rods	 PGA Max Displacement 2.00g 31.86 mm (left pier)	 PGA Max Displacement 1.30 g 53.58 mm (left pier)
C: Reinforced arch with flexible tie-rods and asymmetric b.c.	 PGA Max Displacement 1.75 g 27.08 mm (right pier)	 PGA Max Displacement 0.85 g 35.02 mm (right pier)

## CONCLUSIONI

- ruolo determinante del tiro e necessità di procedure affidabili di identificazione;
- ruolo determinante della tecnica di produzione sui parametri: eterogeneità del materiale, presenza di inclusoni e scorie, presenza di varie microstrutture e distribuzione disuniforme del carbonio;
- stabilità del modulo elastico;
- resistenza e allungamento a rottura delle catene storiche molto inferiori a quelle moderne;
- estrema variabilità del parametro di duttilità.
- necessità di considerare parametri macroscopici (catena intera)

## MONITORAGGIO PERIODICO E CONTINUO DI STRUTTURE DEL PATRIMONIO ARCHITETTONICO

Vicoforte, June 15-16 2017

---



SEGNALATECI CATENE NEI CANTIERI: LE VENIAMO A PRENDERE GRATIS!