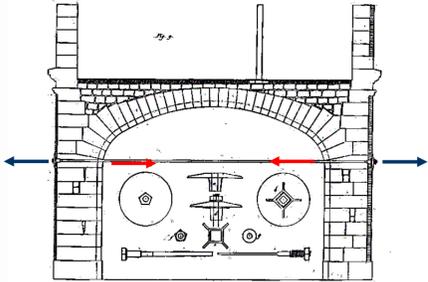


## Introduzione e caso studio

### Catene storiche

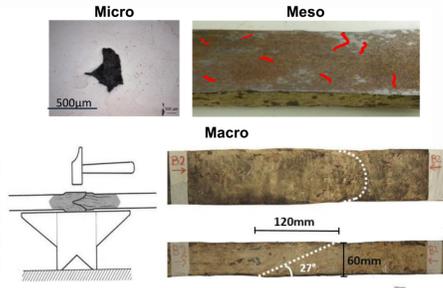
Importante ruolo strutturale negli edifici storici:

- riduzione spinta orizzontale indotta da volte
- assicurarne il «comportamento scatolare»



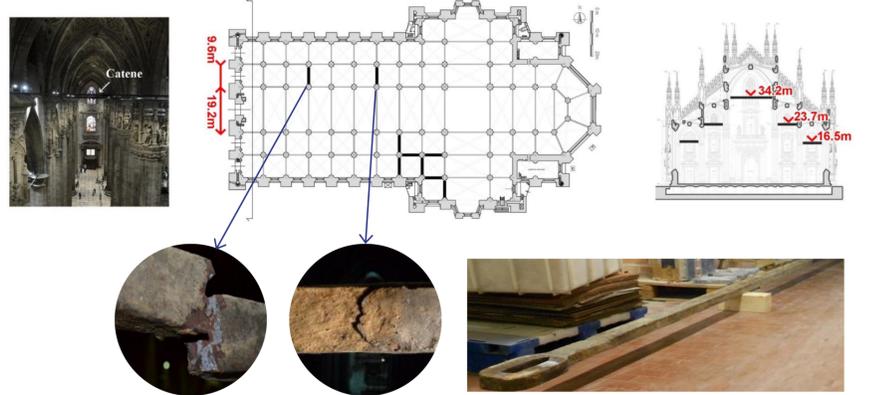
### Difetti a diverse scale

Sono dovuti alle tecniche di lavorazione tradizionale ed incidono fortemente sul comportamento meccanico dell'elemento



### Caso studio: le catene del Duomo di Milano

vengono inserite parallelamente alla costruzione della cattedrale



Recentemente due catene sono state sostituite perché gravemente danneggiate in corrispondenza delle bolliture ( antiche «saldature» )

**Obiettivo della ricerca:** definizione di un piano di indagini a più livelli per individuare e caratterizzare i difetti dominanti.

**Strategia:** studiare CND utilizzati nel settore dell'ingegneria industriale per comprendere se e in che modo essi possano essere estesi al campo dei beni culturali

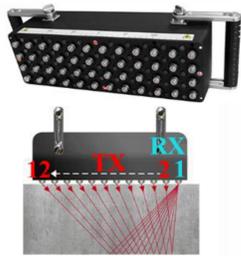
## Onde guidate

### Principio fisico

Propagazione delle onde guidate per lunghe distanze con ridotto dispersione di energia e identificazione del difetto tramite riflessione parziale

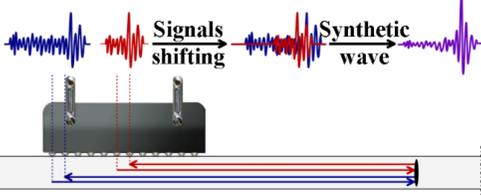
### Applicazione

Tomografo ad ultrasuoni a bassa frequenza  
A1040 MIRA Acoustic Control Systems  
(normalmente impiegato per l'ispezione di blocchi in cls)



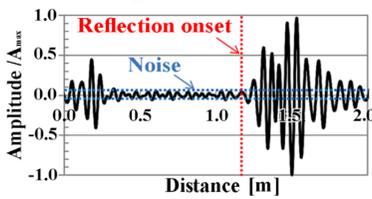
- 12 blocchi di misurazione da 4 trasduttori ciascuno
- Acquisizione di 66 segnali in pochi secondi (f=25KHz)
- Trasduttori DPC (Dry Point Contact) che non richiedono mezzo accoppiante
- Trasduttori dotati di molle per assecondare rugosità

### Processamento dati acquisiti



Costruzione di un'onda sintetica in grado di evidenziare la riflessione, traslando lungo l'asse dei tempi gli impulsi ricevuti in base alla posizione effettiva dei sensori coinvolti

### Risultati prove in laboratorio



Riflessione in corrispondenza del difetto chiaramente riconoscibile

## Metodi analizzati

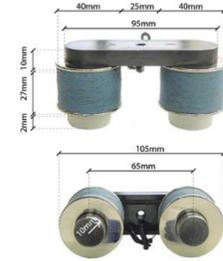
### Correnti indotte

#### Principio fisico

Induzione di correnti parassite nell'oggetto da ispezionare e misurazione della variazione della risposta elettrica del circuito (impedenza) in presenza del difetto

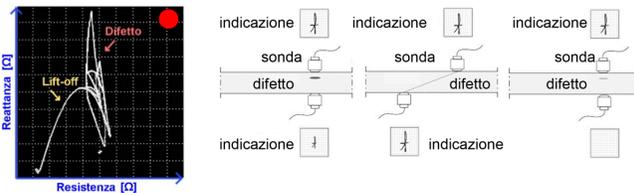
#### Applicazione

Realizzazione di una sonda ad hoc sulla base dei risultati ottenuti con sonde commerciali



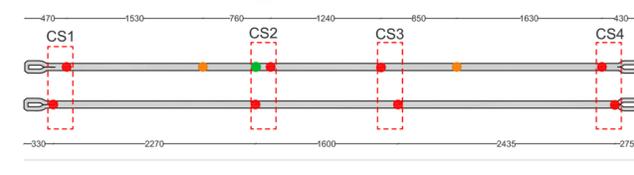
- Ispezione dell'intero spessore della catena
- Ridotta risoluzione spaziale per individuare solo di difetti dominanti
- Elementi di protezione dei poli della sonda sostituibili
- Rumore estremamente ridotto

#### Processamento dati acquisiti



Classificazione delle indicazioni in base all'ampiezza, all'andamento e alla correlazione dei segnali registrati su lati opposti

#### Risultati prove in laboratorio



Indicazioni nelle zone in cui sono state individuate le bolliture con il metodo delle particelle magnetiche

## Termografia attiva

### Principio fisico

Introduzione di un gradiente termico nell'oggetto e analisi delle differenze di temperatura durante il riscaldamento in funzione di presenza, estensione e profondità del difetto.

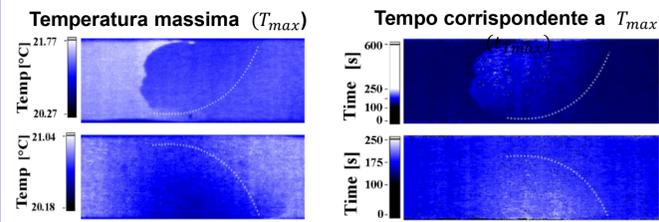
### Applicazione

Utilizzo del metodo "in trasmissione" e analisi nel tempo dei termogrammi: in presenza di un difetto il calore si propaga più lentamente e la zona appare più fredda rispetto a quelle circostanti

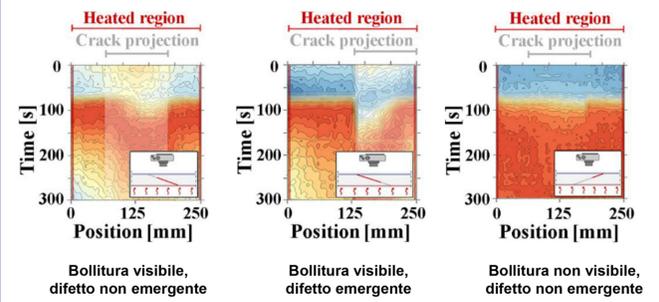


- Evitare riscaldamento prolungato dall'elevato spessore elevato
- Ridurre i problemi relativi a diversi valori di emissività della superficie

### Risultati prove in laboratorio



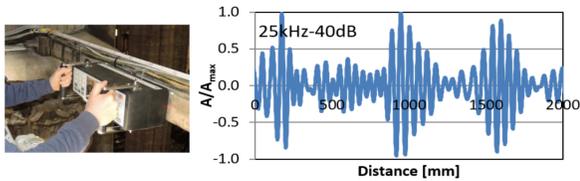
### Variazione della temperatura massima nel tempo



## Risultati applicazione in situ e conclusioni

I metodi delle onde guidate e delle correnti indotte sono stati validati in situ su 6 catene collocate in prossimità del tiburio. L'indagine è stata supportata dall'acquisizione di immagini ad elevata risoluzione

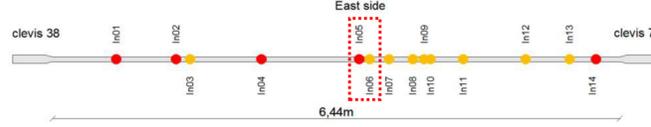
### Onde guidate



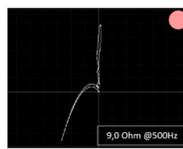
Risultati dipendono fortemente dalla dimensione del difetto

- picchi di riflessione non sempre identificabili
- eccitazione di numerosi modi, alcuni dei quali dispersivi

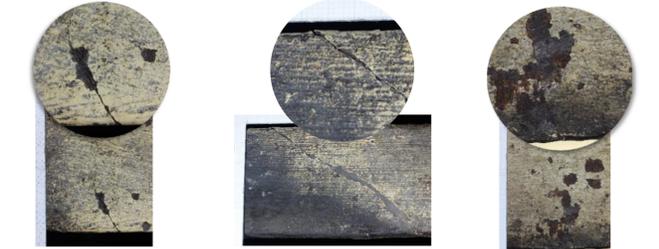
### Correnti indotte



- 14 indicazioni (ampiezza elevata o media)
- 3 zone riconducibili a bolliture
- Regione da In05 - In06  
Distanza tra indicazioni ca. 120mm  
Ampiezza In05 = 9 Ohm  
Ampiezza In06 = 7 Ohm



### Analisi visiva



Cricca su tre lati della catena, caratterizzata da un'ampiezza massima di ca. 0.3 mm

Tra le alternative considerate, i risultati più convincenti sono stati ottenuti con il metodo delle correnti indotte. La sonda realizzata ad hoc per l'applicazione consente di identificare i difetti principali. La presenza di indicazioni correlate tra i lati opposti permette di ipotizzare quali indicazioni potrebbero essere associate a bolliture. Il metodo delle onde permette di riconoscere gli elementi danneggiati ma la dimensione del difetto incide fortemente sul rumore e quindi sulla sua identificazione. Si rende pertanto necessario un ulteriore perfezionamento del metodo al fine di migliorarne i risultati.

