

FOCUS  
RESTAURO RECUPERO RIQUALIFICAZIONE  
IL PROGETTO CONTEMPORANEO NEL CONTESTO STORICO  
Bologna 29 settembre 2010

# **IL RECUPERO STRUTTURALE NELL'ANTICO**

## **Problematiche strutturali e soluzioni interdisciplinari**

Dott. Ing. Alberto Moretti

### **I problemi del recupero strutturale nell'antico**

- L'effettiva "conoscenza" dell'oggetto sul quale si interviene.
- La disponibilità di metodi di verifica della sicurezza adatti alla situazione specifica.
- I limiti nell'uso di tecniche e materiali.

## Le Norme Tecniche sulle Costruzioni

(D.M. Infrastrutture 14 gennaio 2008)

- Le Norme Tecniche sulle Costruzioni prevedono, per le *“costruzioni esistenti”* di lasciare al progettista la libertà di adottare il modello di valutazione della sicurezza più adatto al caso specifico *“in relazione al comportamento strutturale attendibile della costruzione”*.
- Per i Beni culturali vale la D.P.C.M del 12.10.2007 per la *“valutazione e la riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle norme tecniche per le costruzioni”*.

## Indicazioni generali delle NTC

- Le NTC forniscono delle *“indicazioni generali”* delle quali tener conto nell'intervento strutturale (percorso di conoscenza):
  - L'analisi storico-critica;
  - Il rilievo;
  - La caratterizzazione meccanica dei materiali;
  - I livelli di conoscenza e i fattori di confidenza;
- Le NTC e il DPCM 12.10.2007 forniscono indicazioni per l'adozione di utili metodi di verifica per i beni culturali.

## Le tecniche e i materiali per gli interventi

- Rispetto al passato la disponibilità di materiali per il recupero strutturale nell'antico si è molto ampliata e diversificata.
- Non esistono materiali e tecniche "buone" o "cattive": il loro uso dipende sempre dalle condizioni particolari, dalla compatibilità e dell'impatto sulla struttura e dall'efficacia nel perseguire l'obiettivo progettuale.

## Due casi limite

- **La Torre Quadrata del Circo Romano a Milano**

- Direzione Regionale per i Beni Culturali e Paesaggistici della Lombardia

Responsabile del procedimento:

Progetto:

Diretto dei lavori:

Direttore operativo per il restauro delle superfici:

Progetto strutturale:

Dott.ssa Marina De Marchi

Dott. Arch. Daniela Lattanzi

Dott. Arch. Stefano Pilato

Dott.ssa Michela Palazzo

Dott. Ing. Alberto Moretti

- **Monumento funebre nella Badia Benedettina di Santa Maria della Strada a Matrice (CB)**

- ISCR, Istituto Superiore per la Conservazione ed il Restauro

Responsabile del procedimento:

Progettazione restauro e D.L.:

Progettazione restauro superfici e D.L.:

Analisi e progetto strutturale:

Dott. Arch. Donatella Cavezzali

Dott. Arch. Donatella Cavezzali

Dott.ssa Dora Catalano

Carla D'Angelo

Dott. Ing. Alberto Moretti

## La Torre Quadrata del Circo Romano a Milano

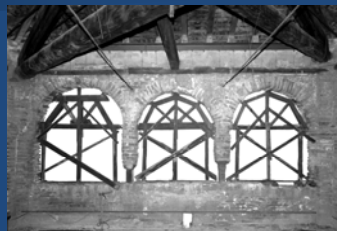


- E' stata oggetto di interventi strutturali negli anni '80 che hanno riguardato il corpo (trefoli orizzontali), il solaio di calpestio della loggia (misto acciaio-calcestruzzo) e il coronamento superiore (profilato metallico).
- Le arcate non sono state oggetto di intervento, salvo un puntellamento in legno eseguito nel 1981 che negli ultimi tempi è vistosamente degradato e allentato.
- Sono in corso i lavori di restauro e messa in sicurezza.

## Le viste interne della loggia



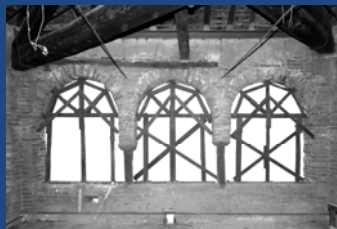
Lato NORD



Lato EST



Lato SUD



Lato OVEST

## Le indagini per il progetto

- Lettura e verifica degli interventi realizzati nel 1981 e 2001;
- Rilievo geometrico, raddrizzamento fotografico, discontinuità murarie, quadro fessurativo e deformativo;
- Rilievo stratigrafico;
- Prove dinamiche per valutare il tiro nelle catene;
- Identificazione e classificazione dei materiali lapidei;
- Caratterizzazione della malte di allettamento.

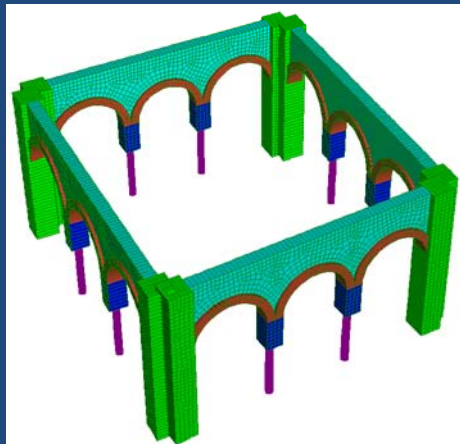
## I risultati delle indagini

- Deformazioni, perdita di verticalità;
- Esiguità della sezione muraria d'imposta (muratura a due teste);
- Malta di allettamento decoesa;
- Fessurazioni attraverso i giunti di malta della muratura dei soprarchi e delle imposte con soluzione di continuità della sezione muraria (possibile di espulsione di materiale);
- Scarso ingranamento dell'apparecchiatura muraria

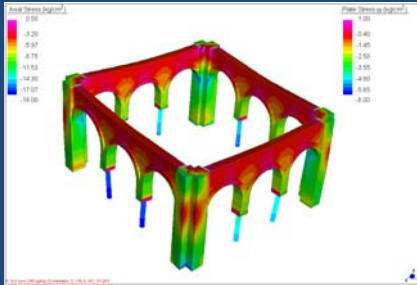
## I problemi strutturali riscontrati

- Archi deformati nel loro piano e fuori piano.
- Alle estremità le ghiera scaricano sulle cornici dei pilastri d'angolo e non all'interno di questi ultimi;
- Gli archi poggiano su una struttura snella, costituita da piastrini in muratura talvolta deformati e da esili colonnine non vincolate per eventuali spostamenti;
- Perdita di malta nei giunti e fessurazioni alla base delle colonnine.

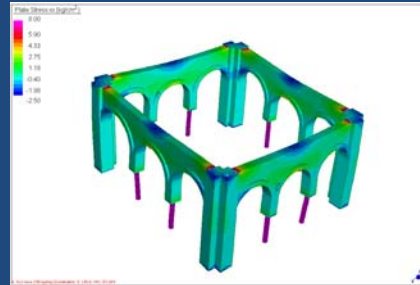
## La modellazione agli elementi finiti



## Tensioni e deformate in combinazione SLU1 (azione preponderante neve)

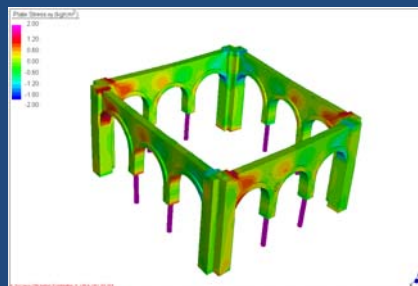


Tensioni verticali



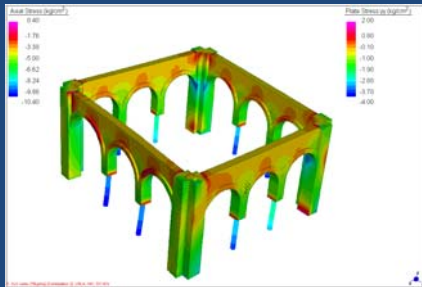
Tensioni orizzontali

## Tensioni e deformate in combinazione SLU1 (azione preponderante neve)

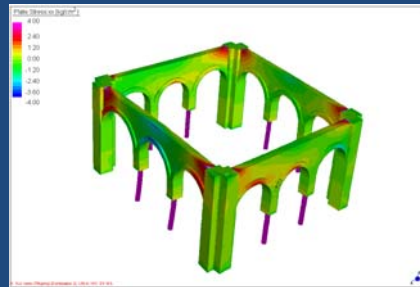


Tensioni di taglio

## Tensioni e deformate in combinazione SLU2 (azione preponderante vento)

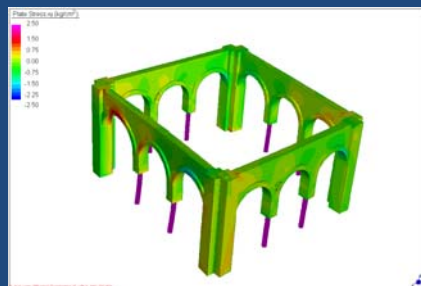


Tensioni verticali



Tensioni orizzontali

## Tensioni e deformate in combinazione SLU2 (azione preponderante vento)



Tensioni di taglio

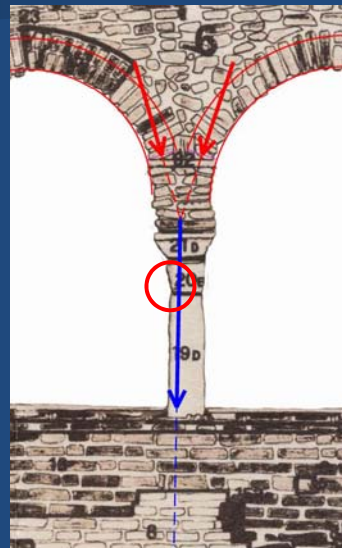


# L'importanza dell'analisi strutturale locale

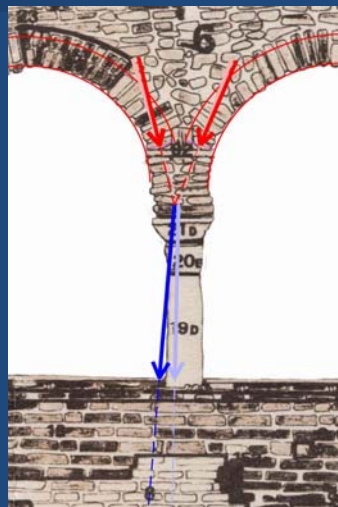
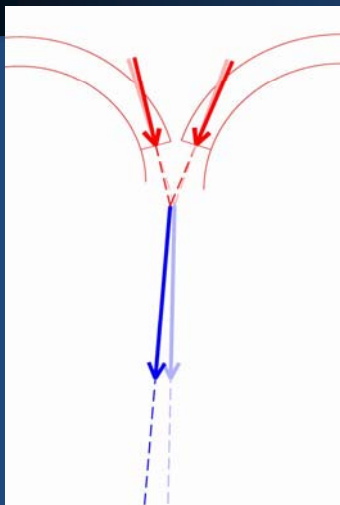
- La modellazione numerica, utile per cogliere l'entità delle sollecitazioni in gioco, non fa emergere alcuni problemi strutturali specifici.
- E' necessario analizzare globalmente e nel dettaglio la costruzione per poter prevedere il suo *"comportamento strutturale attendibile."*

## Un problema di equilibrio

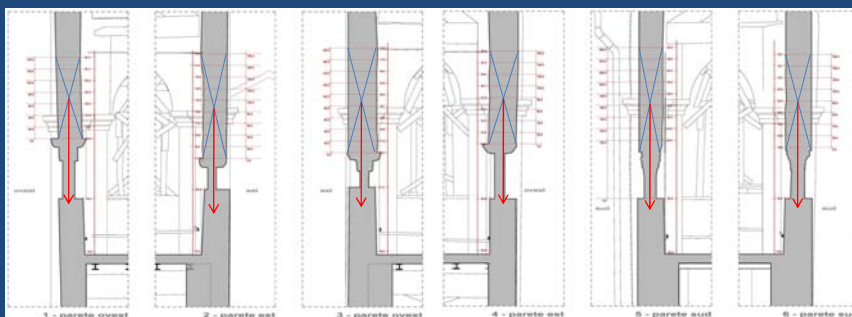
1. identificare lo schema resistente interno alle murature;
2. individuare i carichi agenti;
3. individuare come i carichi vengono portati alla base della loggia (il "percorso" delle forze).



## Un problema di equilibrio

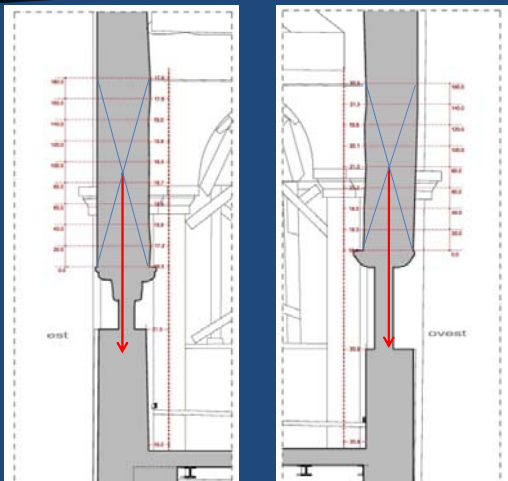


## Un problema di equilibrio



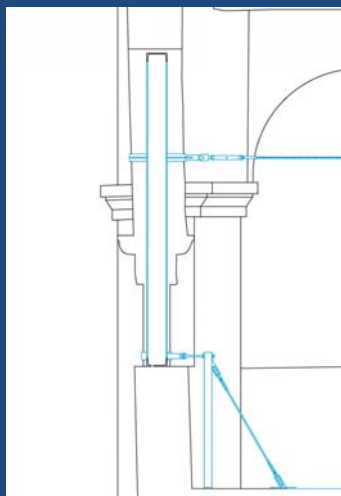
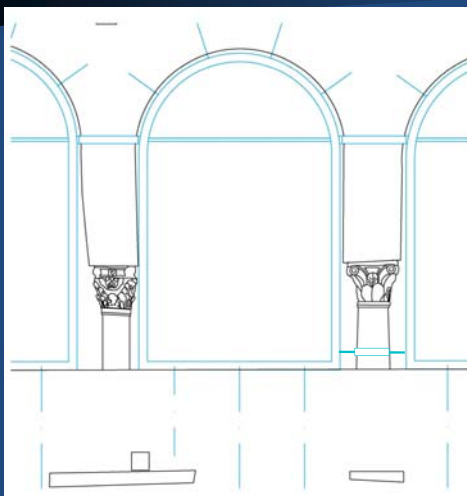
L'andamento dei carichi verticali nelle  
situazioni effettivamente rilevate

## Un problema di equilibrio

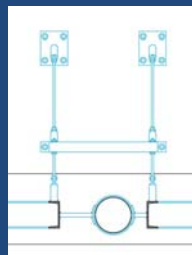
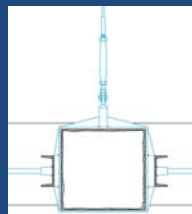
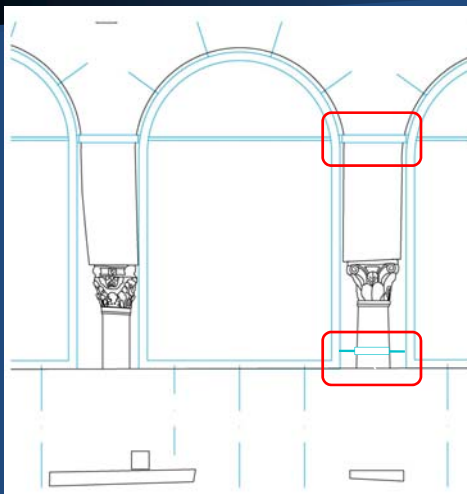


La risultante dei carichi verticali passa al limite della sezione delle colonnine. La situazione è prossima alla perdita di equilibrio per rotazione.

## L'intervento per garantire l'equilibrio



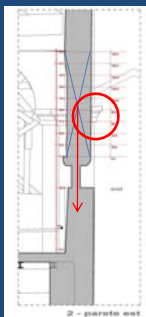
## L'intervento per garantire l'equilibrio



## I dati conoscitivi ottenuti con l'avvio del cantiere

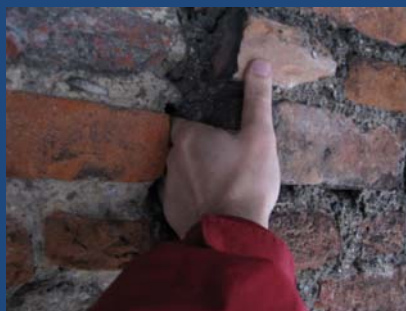
- L'avvio del cantiere con la predisposizione dei ponteggi e le operazioni di pulitura, hanno messo in luce una situazione più critica del previsto per la resistenza della muratura.
- La malta di allettamento si è rivelata particolarmente scadente e in alcuni punti molto erosa; si è riscontrata la presenza di molti vuoti ben visibili e mancanze di ammorsamento.
- Si sono rese necessarie ulteriori indagini più invasive ma giustificate dallo stato della costruzione.

## La ricognizione delle murature dall'esterno



Cavità riscontrate nei pilastrini del lato EST

## La ricognizione delle murature dall'esterno



Lato EST  
Punto di scarico dell'arco sul pilastro angolare (a sinistra)  
Discontinuità fra le murature del lato Est e il pilastro angolare (sopra)

## Dopo la pulitura interna



Arcate sul lato SUD

## Le ulteriori indagini

- Carotaggi e videoendoscopie;
- Prove soniche;
- Endoscopie;
- Prove con sclerometro a pendolo;
- Prove con pacometro.

## Risultati principali delle ulteriori indagini

- Si denota una tessitura disgregata nello spessore interno;
- Si evidenzia uno stato generale di mancanza di malta di allettamento anche in profondità, in punti di discontinuità muraria e in punti fessurati sia dei pilastri che delle pareti murarie.

## L'intervento sulle murature

- Dare continuità e coesione ai paramenti murari attraverso la rifugatura in profondità con malta a base di legante idraulico pozzolanico additivata con fibre di polivinilalcol;
- Ricucire le discontinuità con barre in fibre aramidiche con un'estremità a filamenti da annegare nelle rifugature;
- Iniezioni di legante idraulico per colmare i vuoti;
- Connettere i paramenti murari con barre in fibra di carbonio.

## L'interdisciplinarietà

- L'intervento di restauro riguarda la messa in sicurezza della loggia e il restauro delle superfici;
- Le caratteristiche della costruzione sono tali che non è possibile separare le lavorazioni di carattere strutturale da quelle del restauro.
- Tutte le scelte sugli interventi vengono discusse, valutate e concordate dallo strutturista, dall'architetto direttore dei lavori e dal direttore operativo per il restauro delle superfici.

## L'interdisciplinarietà

- La gestione del cantiere è complicata dalla necessità di operare mantenendo sempre in sicurezza la struttura, dall'esiguità degli spazi a disposizione e dall'altezza alla quale si trova il cantiere;
- E' indispensabile agire sempre in team con i tecnici incaricati delle indagini, con le imprese incaricate dei lavori (ponteggiisti, impresa edile, fabbro, restauratori) e con le ditte produttrici dei materiali (malte, barre...)



## La stabilizzazione della struttura che permette l'operatività in cantiere



Incuneatura delle centine in legno;  
Sostituzione/ rinforzo degli elementi ammalorati;  
Tirantatura con fibre in poliestere.

## La rifugatura dei giunti



Asportazione della malta decoesa

## La rifugatura dei giunti



Rifugatura con  
malta  
additivata con  
fibre in  
polivinilalcol

## La Torre Quadrata del Circo Romano a Milano

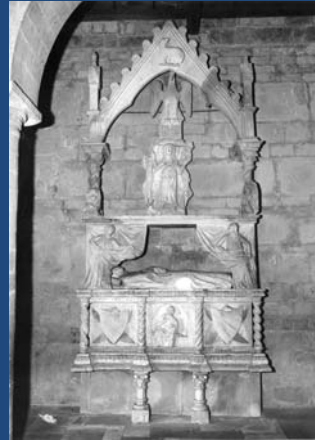


Prova di  
rifugatura  
prima  
dell'applicazione  
dello strato di  
finitura

## Monumento funebre nella Badia Benedettina a Matrice (CB)



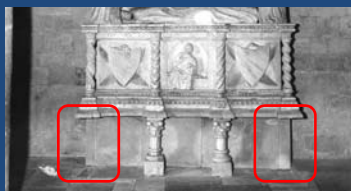
La Badia del sec. XII



Il monumento funebre prima del terremoto del 2002

## Gli effetti del sisma del 2002

- Il sisma del 2002 ha provocato un significativo dissesto dei conci in pietra della parte alta del monumento.
- Prima del sisma sono stati sottratti i due appoggi laterali alla base; ciò nonostante non sono presenti dissesti dovuti alla questa mancanza.



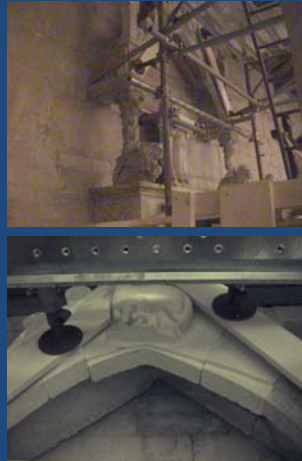
## I problemi strutturali

- Il monumento funebre è strutturalmente costituito da un sistema a blocchi rigidi in pietra (lastre, elementi prismatici, e colonne) in cui l'equilibrio è garantito prevalentemente dall'ingranamento meccanico fra i blocchi stessi.
- I letti di malta risultano essere di esiguo spessore e talvolta assenti (assemblaggio a secco dei blocchi); in ogni caso, ad una verifica sommaria la malta non presenta caratteristiche tali da garantire resistenza allo scorrimento e/o a trazione.

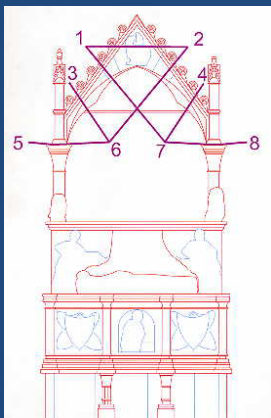
## I problemi strutturali

- Il collegamento alla parete laterale alla quale il monumento è addossato è affidato sostanzialmente a due soli blocchi (mensole) inserite nella muratura
- Dal rilievo diretto e in seguito alle ispezioni che si sono potute effettuare in loco si è compreso come tali mensole siano state inserite nel paramento murario in seguito a parziale smontaggio e rimontaggio di quest'ultimo con conseguente alterazione locale del regime degli sforzi.

## La “messa in sicurezza” dopo il terremoto del 2002



## La prima stabilizzazione per il rilievo laser scanner 3D e le indagini



I puntelli d'emergenza risultavano non più efficaci e impedivano per la loro conformazione le operazioni di restauro e consolidamento.



## La prima stabilizzazione per il rilievo laser scanner 3D e le indagini



La messa in sicurezza è consistita nell'adozione di un sistema di cavi di acciaio con tenditori ancorati alla parete laterale della chiesa in grado di consentire la rimozione dei vecchi puntelli non più efficaci

## Il rilievo laser scanner 3D



# La stabilizzazione per l'esecuzione del restauro



Al sistema di ancoraggio con cavi regolabili si è aggiunta una centina lignea per consentire lo smontaggio dei conci labili del timpano e dei pinnacoli propedeutica al restauro

## Le indagini

### Analisi dello stato di conservazione delle superfici lapidee

Ha evidenziato:

- distacchi
- sollevamenti
- vecchie stuccature
- crettature
- lesioni

### Analisi della tecnica di esecuzione

Ha evidenziato la presenza di:

- elementi metallici di collegamento tra i conci lapidei
- staffe metalliche
- giunti stuccati con malta di calce.



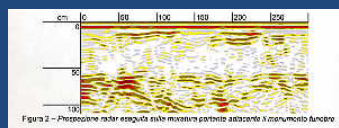
## Le indagini



### Indagini endoscopiche

La muratura interna è in spezzame di pietra e malta di calce molto incoerente e decoesa

## Le indagini



### Prospezioni radar nel pavimento

Hanno evidenziato la presenza di vuoti e discontinuità

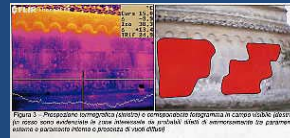


## Le indagini



### Indagini termografiche e ultrasoniche sulla parete esterna

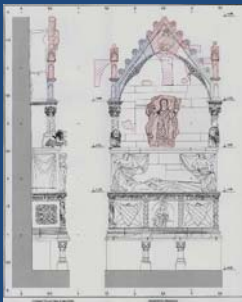
Hanno evidenziato i distacchi del paramento lapideo dal nucleo murario



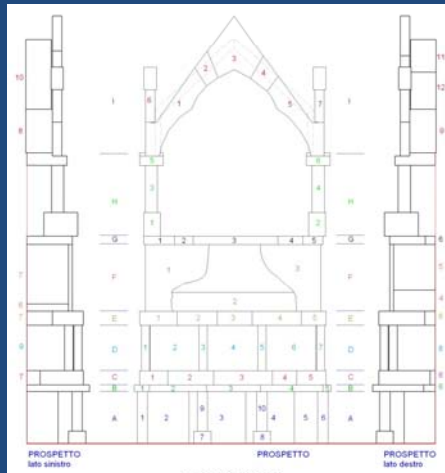
## Gli smontaggi

### Smontaggi eseguiti:

- smontaggio dei conci del timpano
- smontaggio delle sculture
- smontaggio di alcuni conci lapidei della parete



# L'individuazione dei conci



## Livello I



## Livelli H e G



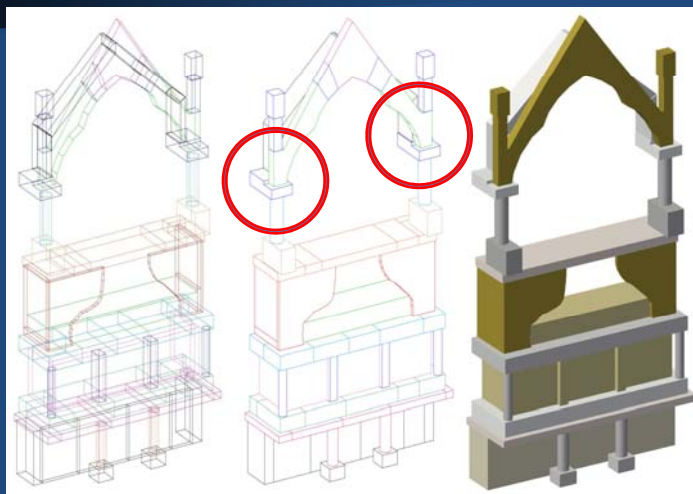
## Livelli G,F ed E



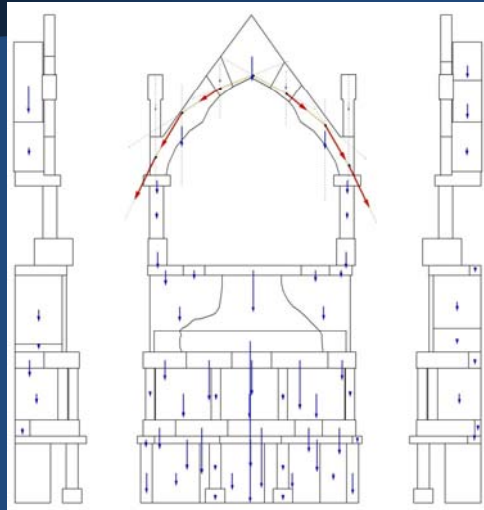
## Livelli A, B, C e D



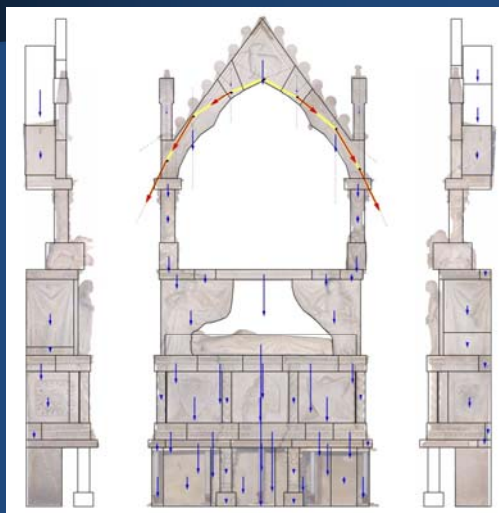
## La modellazione a blocchi rigidi



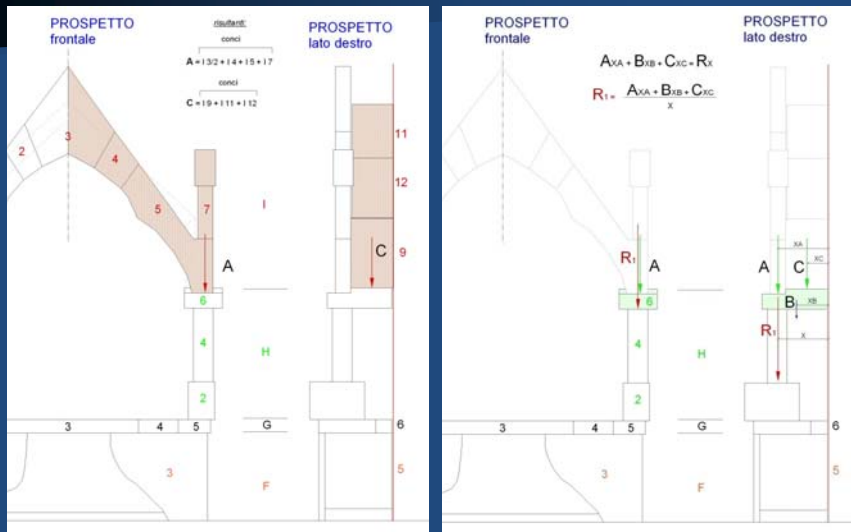
## I carichi e la curva delle pressioni nella parte alta



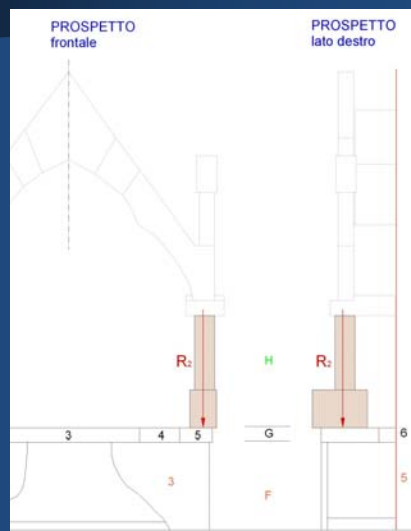
## I carichi e la curva delle pressioni nella parte alta



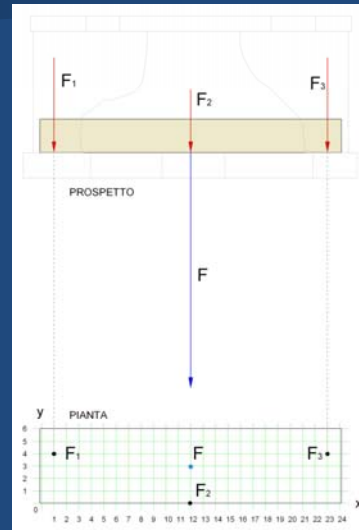
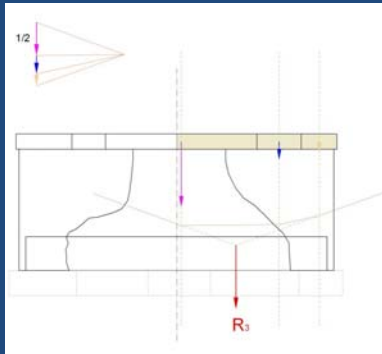
# La risoluzione con i metodi della statica grafica e dell'equilibrio di corpi rigidi



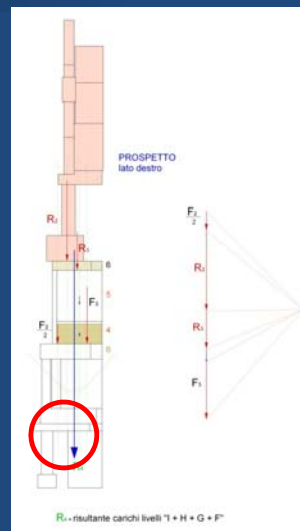
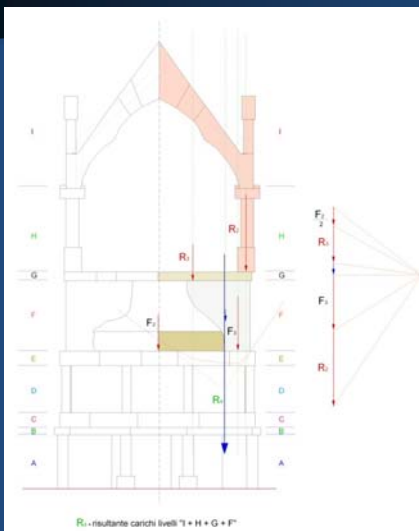
# La risoluzione con i metodi della statica grafica e dell'equilibrio di corpi rigidi



# La risoluzione con i metodi della statica grafica e dell'equilibrio di corpi rigidi



# La risoluzione con i metodi della statica grafica e dell'equilibrio di corpi rigidi





## I risultati dell'analisi

- Sia nella parte alta che in corrispondenza del basamento l'equilibrio della struttura è precario (risultante prossima a uscire dalla sezione).
- Non è necessario procedere ad una onerosa verifica con una componente di forza orizzontale che simula il sisma per giustificare un intervento teso a migliorare la connessione interna fra blocchi e trasferire forze alle strutture adiacenti (a terra e sulla parete laterale).

## L'intervento strutturale

- Conferire vincoli interni alle parti del monumento che, alla luce del rilievo diretto e delle analisi strutturali, si sono evidenziati problemi per l'equilibrio locale;
- Realizzare efficaci vincoli esterni nei punti in cui è necessario garantire l'equilibrio globale del monumento.



## Collegamento del timpano-portale con la parete laterale

- Fissaggio di una lamina di alluminio 4x50 alla parete laterale disposta secondo l'inclinazione delle lastre del portale con 5+5 barre filettate inox  $\varnothing 8$  e resina in foro  $\varnothing 12$
- Riempimento con malta di calce degli interstizi fra lamina e muratura
- Applicazione di fascia di rete in fibra di vetro bidirezionale disposta a "L" applicata con resina al profilo in alluminio e all'estradosso delle lastre per 7-8 cm.
- Applicazione di una seconda lamina di alluminio 4x50 con bordo inferiore arrotondato per la tenuta della rete, serrata con dadi alle barre inox filettate ancorate al muro.
- Riempimento delle fughe con malta di calce per conferire caratteristiche di coesione.

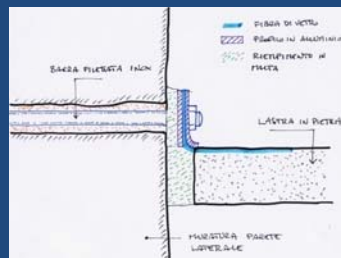
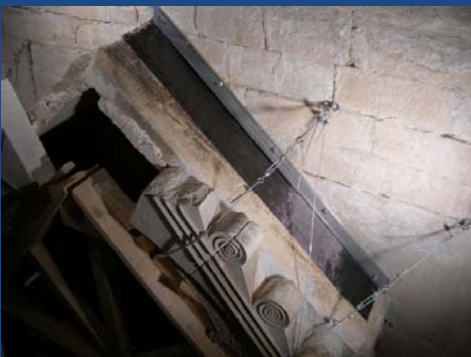
## Collegamento del timpano-portale con la parete laterale



## Collegamento del timpano-portale con la parete laterale



## Collegamento del timpano-portale con la parete laterale



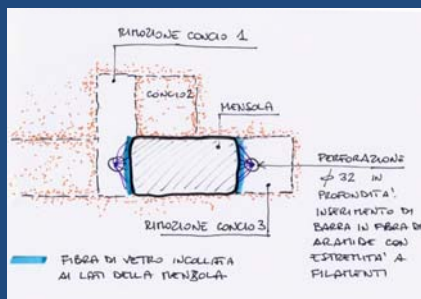
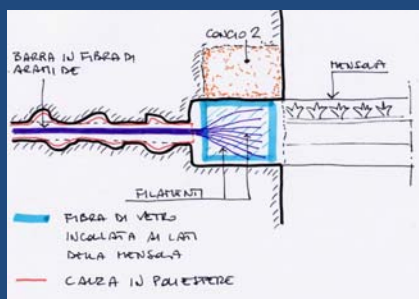
## Collegamento mensole-muro

- Rimozione dei conci in pietra attorno all'incastro delle mensole (conci già smossi in fase di costruzione del monumento): a sinistra conci 1 e 3; a destra conci 4, 5 e 6.
- Esecuzione di perforazioni  $\varnothing 32$  lateralmente alle basi delle mensole per una lunghezza di 60-70 cm
- Applicazione mediante resine di rete in fibra di vetro alle parti laterali della mensola interne al paramento
- Inserimento nelle perforazioni di barre in fibra di aramide con filamenti d'estremità entro calze in poliestere o bussole metalliche
- Iniezione all'interno della calza/bussola di malta di calce e resina.
- Incollaggio dei filamenti di aramide alle fibre di vetro alla base delle mensole con resine
- Riempimento e intasamento dei vuoti attorno alla base delle mensole con malta di calce e pozzolana
- Ricollocamento dei conci rimossi.

## Collegamento mensole-muro



## Collegamento mensole-muro



## Collegamento mensole-muro



## I nuovi appoggi a terra

