XXX Curset
Jornadas Internacionales sobre la intervencion en el patrimonio arquitectonico
Barcellona – 13-16 .12.2007

**“Estrategias docentes
para la comprension de las estructuras historicas”**

Sperimentazione e didattica per la comprensione delle strutture storiche

Lorenzo Jurina
Politecnico di Milano – Italia
lorenzo.jurina@jurina.it
www.jurina.it

Introduzione
Da alcuni anni stiamo assistendo ad un rinnovato interesse per le strutture storiche ed in particolare per la comprensione del loro comportamento meccanico, in vista della definizione del loro livello di sicurezza attuale (soprattutto in zona sismica) e della eventuale necessità di opere di consolidamento
Lasciati alle spalle (o almeno così si spera…) gli anni degli interventi pesanti e sostitutivi, in cui alla scarsa fiducia sulle capacità resistenti della muratura si sommava una ignoranza sulle tecniche e le tecnologie adottate nel passato, stiamo sperimentando un rinnovato interesse per il comportamento statico e dinamico di strutture murarie, siano esse facciate, torri, chiese, oppure porzioni di esse quali archi, volte, solai, capriate lignee, ecc.

La maggior conoscenza di tali strutture è passata attraverso lo studio della storia delle costruzioni, che ha visto nel prof. Edoardo Benvenuto, dell’università di Genova, un vero precursore.
Alcuni recenti crolli avvenuti in Italia (tra cui la torre civica di Pavia e la cattedrale di Noto), hanno sollecitato studi teorici e sperimentali su elementi murari e lignei, a varie scale, i cui esiti si ritrovano in numerose pubblicazioni e convegni sull’argomento.
Anche la didattica ha ricevuto un forte impulso dal rinnovato interesse per questi temi.
Nella presente memoria si vuole dare testimonianza di alcune esperienze che ho potuto condurre con allievi del Politecnico di Milano, appartenenti sia alla Facoltà di Ingegneria che di Architettura.

La modellazione fisica
La conoscenza passa attraverso la sperimentazione.
Con questo principio ben chiaro, da parecchi anni è funzionante un piccolo laboratorio didattico presso il DIS (Dipartimento di Ingegneria Strutturale) del Politecnico di Milano.
L’obiettivo è di realizzare modelli in piccola scala, da portare in aula, con lo scopo di illustrare il comportamento meccanico delle strutture.
Con l’aiuto di tesisti e dottorandi si sono costruiti vari modelli su cui è possibile eseguire prove ripetibili e misurabili.
Tra questi ricordiamo travi di sezione variabile, travi reticolari, modelli di arco di varia geometria, muri di sostegno e fondazioni su terreno cedevole, pilastri caricati di punta, capriate e molti altri.
Uno dei modelli realizzati illustra una apparecchiatura di prova a flessione dove è possibile misurare gli spostamenti sotto carico di travi di diversa rigidezza, facendo comprendere ad esempio il contributo dei connettori a piolo nel rinforzo dei solai in legno.
Un secondo modello illustra il tema del carico critico e consente di testare il comportamento di pilastri soggetti a differenti vincoli alle estremità.
Un terzo consente di valutare il comportamento flesso-torsionale di mensole di diversa forma, sotto carichi eccentrici. Una quarta semplice apparecchiatura consente di verificare gli effetti dei carichi non baricentrici su un pilastro in muratura o comunque non resistente a trazione.

Un quinto modello rappresenta una trave a tre appoggi, a campate non costanti, di cui si mette in evidenza il verso delle reazioni vincolari, al variare del carico, mediante display luminosi..
Particolarmente interessante il modello di arco a tutto sesto di figura 1, oggetto di una tesi di Zorloni, in cui un elastico contenuto all'interno dei conci consente di porre agevolmente in evidenza i principali meccanismi di collasso, a seconda del punto di applicazione del carico.
Si può simulare la formazione delle successive cerniere tra concio e concio e naturalmente le modalità di consolidamento (l'uso o meno di una catena alle imposte, l'adozione di rinfianchi, la posa di nastri resistenti a trazione all'estradosso oppure all'intradosso…).
Una delle tecniche simulate mediante questo modello è quella dell'**arco armato**, che ho proposto alcuni anni fa e che ha dato ottimi risultati.
La sperimentazione su modelli condotta da vari studenti sul tema degli archi è stata particolarmente preziosa e ha lasciato traccia consistente nel laboratorio.
Interessante la tesi di Fumagalli sulla posizione ottimale delle catene negli archi.
Le figure 2 sono tratte dalla tesi di Savoldelli e Cultreri sul tema dell'arco armato in cui si è confrontata questa tecnica con quella molto più usuale e molto più invasiva della cappa in calcestruzzo armato posta all'estradosso.
Le figure 3 appartengono al lavoro sulle architravi e le piattabande realizzato da Pandolfi.
Le figure 4, sono foto scattate durante il lavoro di tesi di Colombo, Rotondi e Venturini, riguardante il tema dei cedimenti delle pareti e la formazione di archi naturali di scarico e di fessure sulla muratura.
Le figure 5 appartengono alla tesi di Giglio che studia il carico di collasso di archi non resistenti a trazione, di differente geometria, al variare della pretensione applicata da cavi metallici all'estradosso o all'intradosso di archi, sia nel caso di cavi scorrevoli che di cavi fissi..
Le figure 6 illustrano un semplice modello di "graffetta", predisposto da Galimberti, per la applicazione di carichi orizzontali alle estremità di archi spingenti, agendo dall'estradosso.

Quasi tutti i modelli illustrati fanno parte del Laboratorio Didattico e sono messi a disposizione degli studenti del corso di "Riabilitazione e Consolidamento delle strutture"per la loro sperimentazione.

L'esperienza di <u>veder utilizzare</u> un modello in aula è certamente formativa e difficilmente dimenticabile ma è superata dalla possibilità di <u>utilizzarlo in proprio</u> e, ancora di più, dal fatto di <u>costruirsi un proprio modello</u> e di utilizzarlo.
Le figura 7 illustra un semplice modello di portico fessurato, realizzato in cartoncino, dove si può osservare che lo spostamento verso il basso del pilastro centrale oppure lo spostamento verso l'alto del pilastro di destra oppure, ancora, lo spostamento orizzontale verso destra dell'arco portano al medesimo quadro fessurativo.
Ciò rafforza nello studente il concetto che il legame effetto-causa non è univoco e quindi che, dato un quadro fessurativo, le cause che lo hanno provocato possono essere molteplici.
Va trovata la più verosimile e a questa si deve porre rimedio.
La figure 8 illustrano un classico metodo sperimentale per la determinazione della curva delle pressioni in un arco in muratura, ben conosciuto nella città di Barcellona che ha visto con quanta maestria operasse Gaudì. Sono certo che nessun ragionamento alla lavagna possa sostituire l'emozione derivante dall'osservare le modifiche geometriche subite, al variare dei carichi, dalla fune che lo stesso studente ha costruito con mezzi talora poveri ma di indubbia efficacia.

Nelle tecniche di consolidamento che ho proposto nella mia esperienza progettuale, di ricerca e di didattica si fa frequentemente uso di <u>cavi metallici</u>. Le ragioni sono legate alla flessibilità di questi elementi costruttivi, capaci di adattarsi a tutte le geometrie, alla loro leggerezza e rimovibilità e, da ultimo, alla loro efficacia strutturale e alla distinguibilità dal contesto antico.
Durante vari corsi universitari ad Ingegneria e ad Architettura ho proposto la costruzione di modelli che avevano per oggetto strutture semplici costituite prevalentemente da cavi in trazione, con pochi elementi compressi, alla ricerca di una ottimizzazione delle risorse, una volta che fosse assegnata la posizione dei carichi e dei vincoli. Questa strategia didattica è stata utilizzata con profitto anche con allievi di Disegno Industriale. Le figure 9 illustrano questi modelli in cui l'obiettivo è la realizzazione di una struttura di minimo costo, assegnando costi unitari diversi agli elementi in cavo (poco costosi) e a quelli in legno (molto costosi). I primi infatti sono capaci di

resistere a sola trazione mentre i secondi sono capaci di resistere sia a trazione che a compressione.
Chi non è in grado di prevedere se una certa asta sarà tesa o compressa sarà portato ad usare un elemento in legno, facendo così incrementare il costo totale.

Le strutture in acciaio rappresentano spesso una soluzione vantaggiosa e leggera negli interventi sul costruito storico e pertanto la costruzione di modelli costituiti da elementi snelli, opportunamente assemblati, che simulino strutture unifilari in acciaio, fornisce un forte supporto alla intuizione strutturale.
E' importante naturalmente che tale intuizione sia verificata ed allora , da alcuni anni, propongo una competizione, ai miei studenti di Tecnica delle Costruzioni, che ho chiamato *"Spaghetti & Structures"*, la quale si propone di determinare la migliore struttura reticolare, soggetta a carichi e vincoli noti, che contemporaneamente sia la più resistente, la più rigida, la meno ingombrante in termini di volume, la più leggera, la meno fragile agli urti e contemporaneamente… la più bella.
I primi parametri sono valutati sperimentalmente, l'ultimo è frutto di un giudizio, quantificato numericamente, espresso da tutti gli altri partecipanti. Il soddisfacimento di ognuno dei parametri precedenti, tra loro conflittuali, definisce punteggi parziali. Una media, a pesi dichiarati in precedenza, consente di trovare la struttura "migliore tra tutte", frutto di un compromesso tra i vari parametri da ottimizzare. Osservo che la fase certamente più utile e divertente è costituita dalla prova a rottura, condotta su tutte le strutture che partecipano alla competizione, in cui gli studenti sono guidati a prevedere, prima, e a verificare, dopo, le ragioni del collasso.
Le figure 10 illustrano alcune fasi della competizione del 2007, alla quale è legato, in una assegnata percentuale, il voto finale del corso.

I sopralluoghi e i lavori sul campo
I modelli sono una semplificazione della realtà che consente di studiare e di descrivere con una certa semplicità i fenomeni del degrado strutturale. La loro utilità è indiscutibile me l'osservazione del comportamento reale degli edifici storici resta una necessità ineliminabile.
Ne consegue la opportunità di consentire ai propri studenti la visita ai monumenti e l'accesso ai cantieri, soprattutto quando sia possibile la gestione di piccoli gruppi, come avviene con gli allievi delle Scuole di Specializzazione in Restauro dei Monumenti.
La visita deve consentire di toccare, sperimentare, "vivere il monumento".
Lo studente deve immergersi nella realtà storica, geometrica, tecnica e tecnologica della fabbrica. Deve chiedersi il come è il perché funziona, deve accorgersi e poi darsi una spiegazione delle "anomalie" presenti, che spesso sono sintomi di degrado.
Deve entrare nelle stanze, nelle cripte, nei sottotetti, nei luoghi usualmente meno frequentati e, proprio per questo, più veri, in quanto meno modificati durante la loro storia.
Negli ultimi anni, assieme alle normali visite di cantiere, con alcuni colleghi abbiamo organizzato varie attività di studio e di ricerca che hanno coinvolto gli studenti della Facoltà di Architettura del Politecnico di Milano. In particolare abbiamo organizzato settimane di studio e campi di lavoro al Castello di Pergine, a Foligno dopo l'ultimo terremoto, a Pietra de Giorgi per una campagna di misure, a Laino Castello, durante un lavoro realizzato assieme a docenti e studenti delle Facoltà di Bari e Cosenza nell'ambito di un Progetto di Rilevante Interesse Nazionale (PRIN). Da ultimo li abbiamo portati in Armenia ad occuparci del Castello di Amberd.
Sono fermamente convinto che occorra passare un certo tempo "di qualità" di fianco all'oggetto, guardandolo, misurandolo, interrogandosi. Il rilievo è conoscenza perchè permette di osservare e di interiorizzare i comportamenti delle costruzioni, soprattutto quando siano degradate o fessurate.
Durante queste visite, accanto al rilievo geometrico e materico (che è stato offerto in segno di collaborazione e ringraziamento alle istituzioni che ci hanno ospitato) nelle ore serali abbiamo organizzato seminari e convegni aperti anche ai tecnici locali, con la sperimentazione di attrezzature per la diagnostica applicate al caso di studio.
La fatica delle giornate, molto intense, è stata certamente ripagata dai risultati, misurabili in termini di crescita culturale e scientifica degli studenti partecipanti L'esperienza descritta non rappresenta certamente un caso isolato del solo Politecnico di Milano ma va detto che le nostre Università non sempre appoggiano come dovrebbero tali iniziative. Una istituzione privata, la nota Fondazione Mastrodicasa , organizza corsi annuali con una impostazione simile, denominati "Salviamo il salvabile".

L'idea è che gli studenti sperimentino la verità che solo il reale può dare, non il modello. L'idea è che facciano cose utili, partecipino alle fasi della diagnostica, apprendano per confronto critico tra loro e per frequentazione con esperti.
L'obiettivo è che restituiscano quel che hanno elaborato e che prospettino soluzioni.
La strategia adottata è di mostrare il problema ma di non dare subito la risposta.
La risposta va data dopo un congruo periodo di tempo, consentendo allo studente di arrivarci da solo.

Le figure 11 illustrano alcune fasi del lavoro, durato vari mesi, portato a termine a Laino Castello, un borgo nel sud Italia, in provincia di Cosenza. Si sono effettuati rilievi delle parti murarie, dei solai e delle coperture, delle superfici esterne, delle finestre e dei pavimenti. Si sono elaborate schede di vulnerabilità sismica e si sono sperimentate tecniche diagnostiche note assieme ad altre innovative.
Un paese deserto ma, fortunatamente, ancora non allo stato di rovina ci era stato offerto perché lo analizzassimo, con il proposito di valutarne il residuo grado di sicurezza e di abitabilità. I risultati sono stati confortanti ed hanno portato alla organizzazione di un convegno specifico ed alla prossima pubblicazione di un libro con i risultati acquisiti.
Le figure 12 illustrano un altro esempio: il Castello di Pergine, dove in cambio di vitto ed alloggio (il ristorante era ottimo …) pochi docenti e molti studenti hanno fornito una accurata indagine metrica e materia dell'edificio, mettendo in evidenza le zone che abbisognavano di interventi. Mente nel caso di Laino il convegno è stato organizzato a posteriori, a Pergine gli incontri con esperti e imprese si sono sviluppati durante tutti i dieci giorni di permanenza
Portare al castello società di diagnostica, costruttori e progettisti è stato un completamento necessario al lavoro svolto e una risposta alle domande che man mano gli studenti si venivano ponendo.

Le figure 13, da ultimo, illustrano una esperienza condotta in Armenia, con la collaborazione della Facoltà di Architettura di Erevan. Oggetto dello studio e del parallelo convegno è stato il Castello di Amberd, splendido e difficilmente accessibile. Una esperienza di condivisione didattica e scientifica in un ambiente certo non facile, ma umanamente appagante.

Al di là di queste esperienze specifiche desidero ricordare una positiva scelta operata al Politecnico di Milano che consiste nel tenere le medesime lezioni contemporaneamente a ingegneri ed architetti (nell'ambito del corso di Riabilitazione e Consolidamento strutturale da me tenuto).
Ricordo da ultimo che le Scuola di Specializzazione in Restauro dei Monumenti (che il Italia si trovano a Roma, Napoli, Genova e Milano) sono aperte ad architetti e ad ingegneri a testimonianza di quanto l'obiettivo della interdisciplinarietà e della collaborazione tra tecnici di differenti formazioni sia prioritario nel mondo del restauro e della conservazione delle strutture storiche.

La modellazione numerica
Un tema di grande rilevanza è costituito dalle modalità di verifica numerica del comportamento delle strutture, in vista di una definizione quantitativa della sicurezza.
La disponibilità di programmi di calcolo, soprattutto metodi di calcolo agli elementi finiti, adattabili alla analisi di strutture generiche ritengo sia decisamente pericolosa nel caso delle strutture antiche. Si tende infatti ad estendere ad esse i criteri adottabili per le strutture nuove, mentre è evidente che la scelta dei parametri meccanici relativi alla geometria , al materiale ed ai carichi esistenti è soggetta a forte aleatorietà.
Occorre insegnare a usare tali metodi di calcolo anzitutto per la ricerca dei parametri più verosimili, sperimentando numericamente la sensibilità dei risultati al variare dei dati di input, e ricordando che la sperimentazione fisica è l'unico strumento adatto a darci il conforto della veridicità.
E' necessario abituare lo studente a fare ipotesi e poi a verificarle, a operare scelte con un adeguato compromesso tra semplicità e realismo.

Le strutture antiche spesso sono semplici, intuitivamente comprensibili, spesso isostatiche , come i solai o i tetti, ma il continuo tridimensionale che le caratterizza e la natura non lineare dei materiali le può rendere complesse.
Dire che una struttura non è in grado di resistere perché con i nostri modelli numerici non sono stati in grado di dimostrarlo è un controsenso.
La modellazione numerica deve rincorrere la realtà, non viceversa.
Occorre pertanto abituare lo studente a un uso del modello numerico con finalità di esplorazione degli effetti provocati da variazione ragionevoli delle ipotesi di calcolo.
Un esempio recente sul quale applicare quanto detto è il Duomo di Cremona.
La figura 14-b illustra il comportamento del Duomo se si analizza soltanto uno dei telai che lo compongono. Il risultato è che il Duomo dovrebbe essere già crollato. Estendendo l'analisi ad una modellazione tridimensionale (Figura 14-c) è possibile introdurre contributi ulteriori (ad esempio la resistenza offerta dai matronei e dalle coperture) che ne giustificano la stabilità, anche se con limitati margini. Il modello della struttura esistente può da ultimo essere integrato con strutture parallele ed attive, rimovibili e riconoscibili come quelle proposte in figura 14-d, in grado di migliorare in modo consistente la sicurezza dell'edificio.

Conclusioni

Ingegneria e architettura devono farsi compagnia nel cammino verso la comprensione del costruito. Occorre recuperare la unicità di approccio che ha caratterizzato i maestri costruttori del passato, per i quali forma e sostanza, geometria e meccanica coincidevano.
Non c'era divisione nelle strutture antiche.
"Costruzione" e "struttura" spesso erano sinonimi e oggi occorre tornare a comprenderne i meccanismi leggendoli con la sensibilità di ieri e gli strumenti di oggi.
Occorre abituare lo studente che geometria, materiali e carichi costituiscono parametri fondamentali che vanno ricercati, compresi, verificati e poi scelti come i più realistici e rappresentativi.
Su queste scelte si dovranno basare le conclusioni diagnostiche del tecnico responsabile, una figura che unisca le doti dell'architetto e quelle dell'ingegnere, il quale deve decidere anzitutto "se" si deve agire oppure no, e poi (solo poi…) deve precisare con "quali criteri" progettuali si dovrà agire .
Allo studente, da ultimo, andrà ricordato che fare esperienza fisica dell'edificio è una fase insostituibile nel processo della conoscenza.
Se non si tocca non si capisce.
Se non si vive l'edificio non si può con-vivere con esso.

Figura 1 a, b
Modello di arco a tutto sesto.
Le molle laterali, che, come si osserva, sono più caricate, simulano i rinfianchi

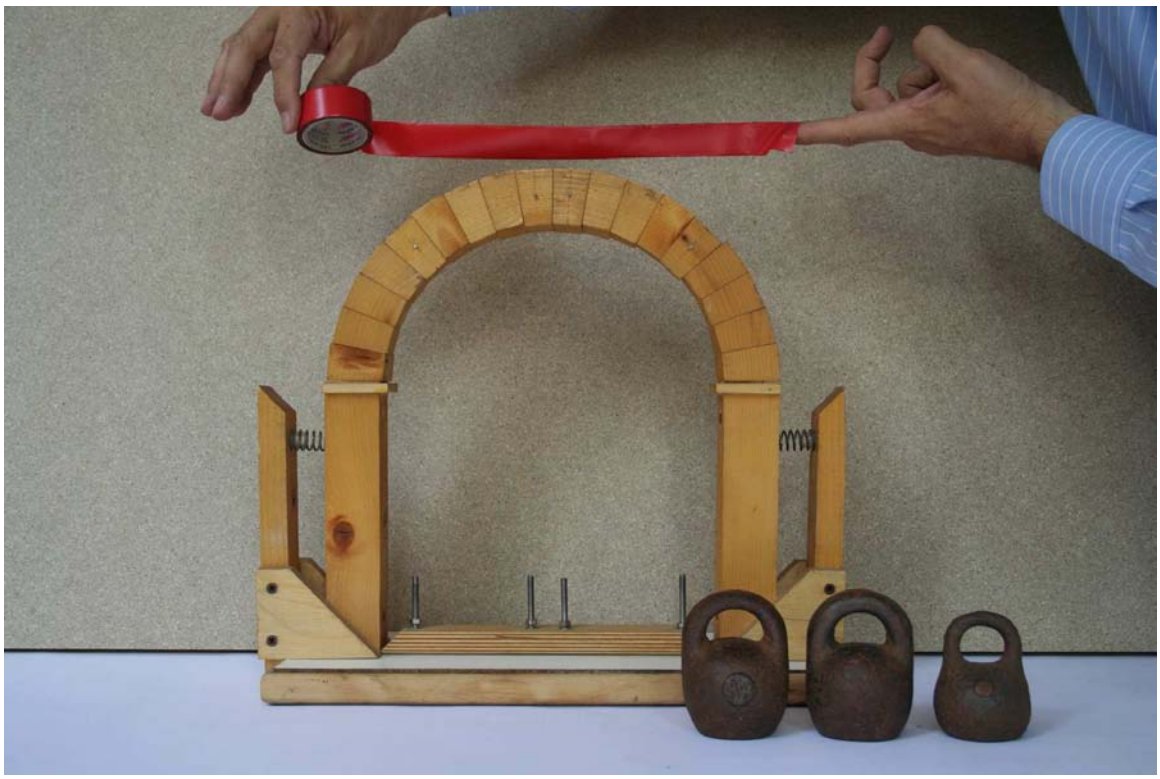


Figura 1, c,d
Modello di arco a tutto sesto con nastro per impedire la formazione di fessure all'estradosso e quindi ritardare la formazione di meccanismi di collasso

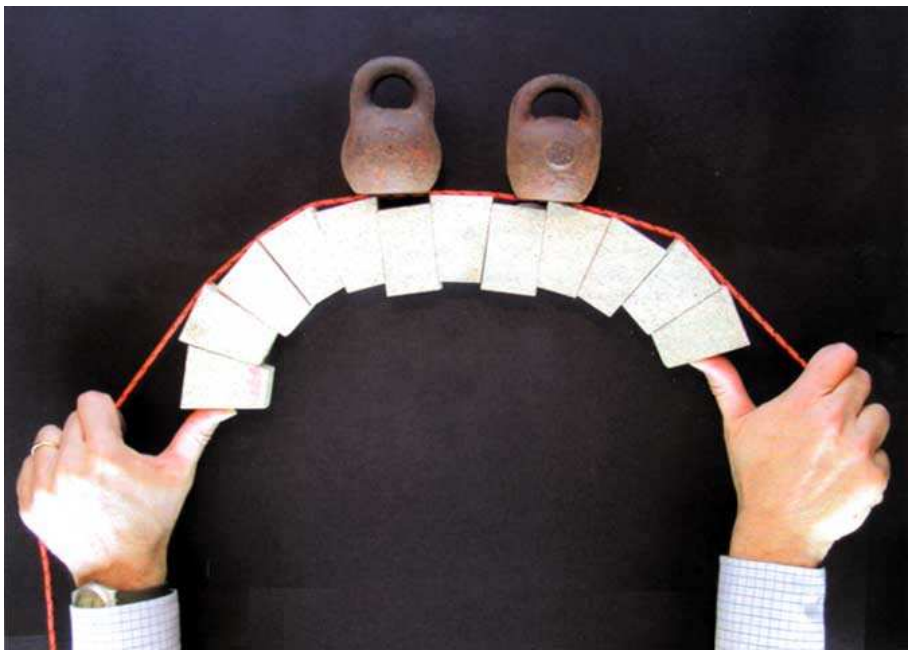


Figura 1, e
Una esemplificazione del concetto di “arco armato” dove un cavo post-teso induce una benefica compressione tra i conci dell’arco

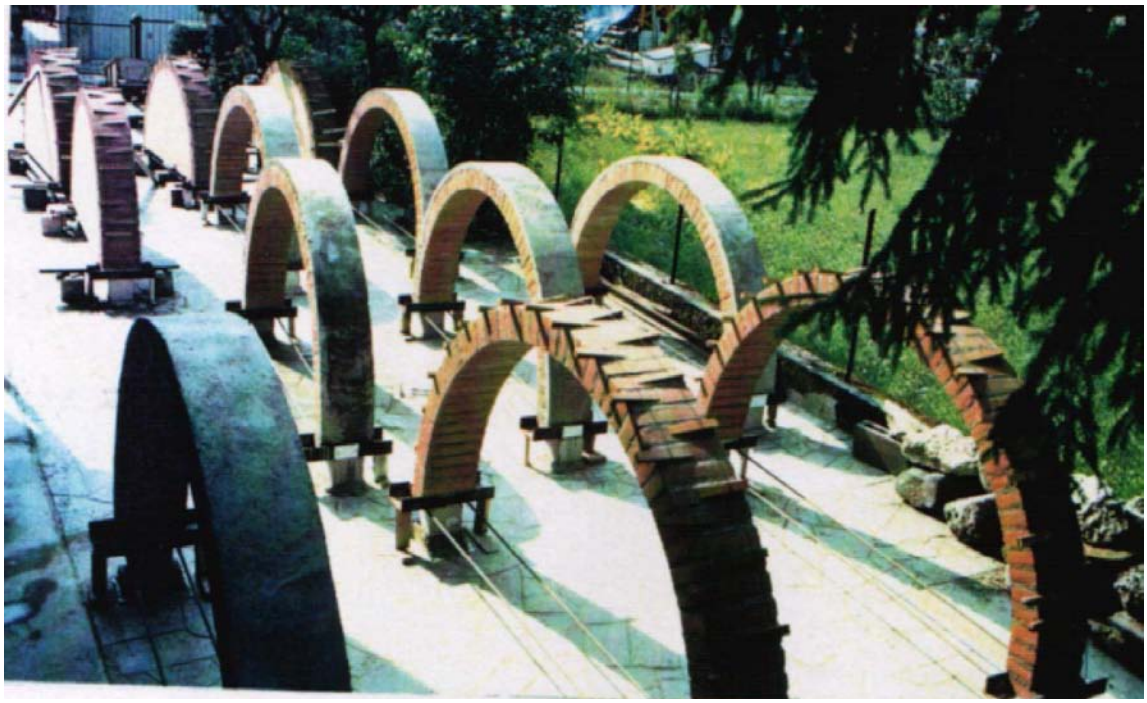


Figura 2 a
Sperimentazioni e confronti tra “arco armato” e cappa in calcestruzzo estradossale

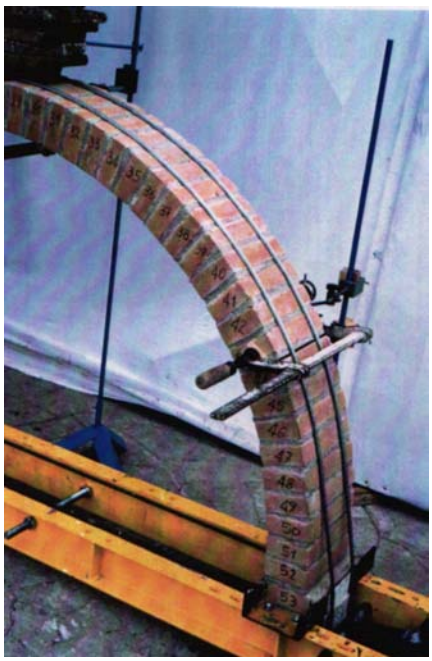


Figura 2 b
I cavi dell'arco armato contrastano la formazione di fessure estradossali

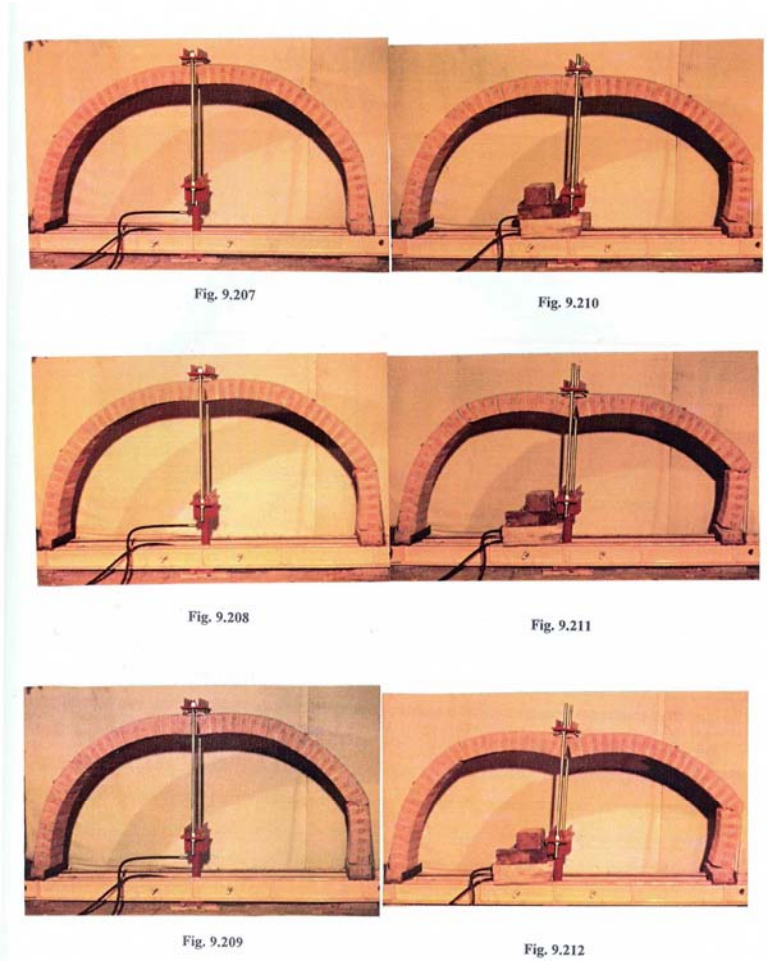


Figura 2 c
Meccanismo di collasso con arco armato, consentito dalla limitata resistenza a compressione dei mattoni

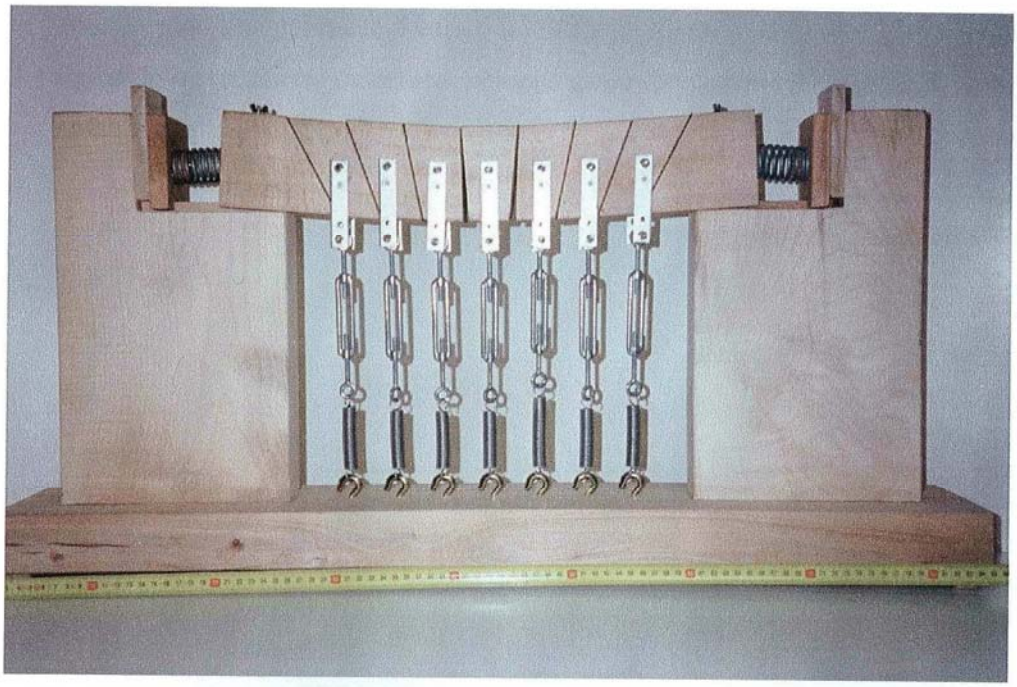


Fig. 8.17 Formazione di quattro cerniere in seguito all'applicazione di un carico uniformemente ripartito

Figura 3
Modello di architrave a conci inclinati , fortemente spingente

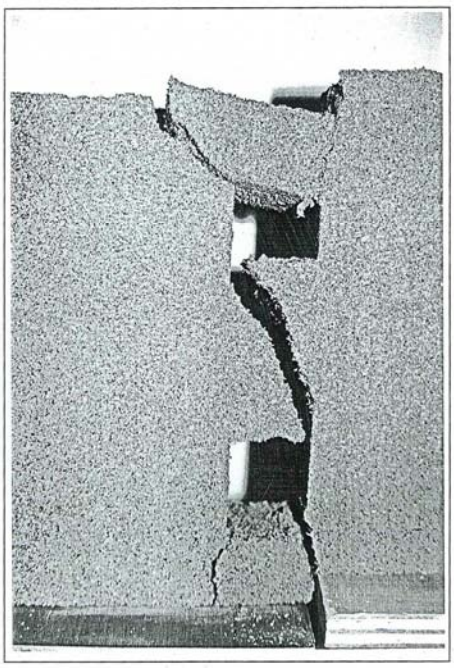


Figura 11-43. Muretto 27 - Particolare in una fase più progredita.

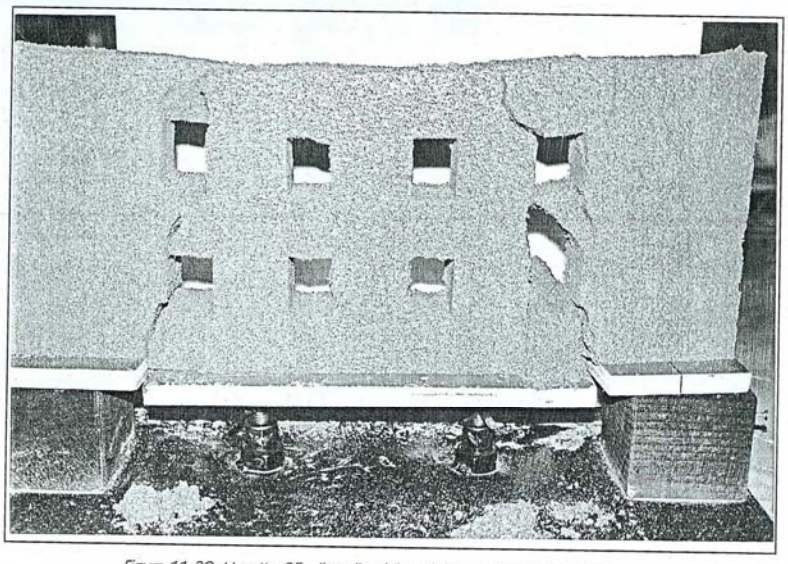


Figura 11-39. Muretto 25 - Il crollo dei nuclei compresi fra le aperture

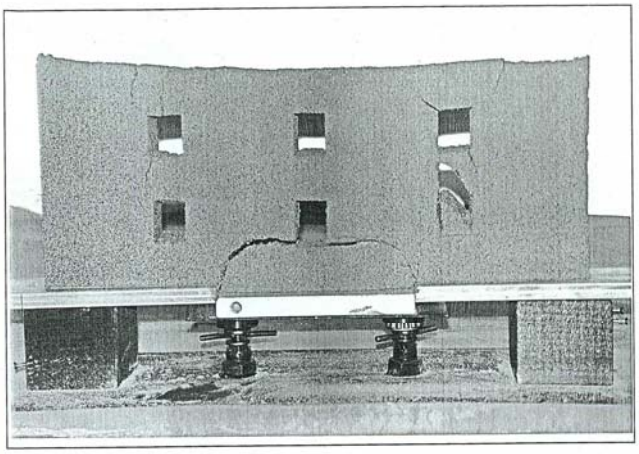


Figura 11-51. Muretto 32 - La fessurazione.

Figura 4 a,b,c
Cedimento delle fondazioni in pareti di sabbia debolmente legata e formazione di archi di scarico

Figura 5, a,b,c
Archi armati, cinematismi di collasso

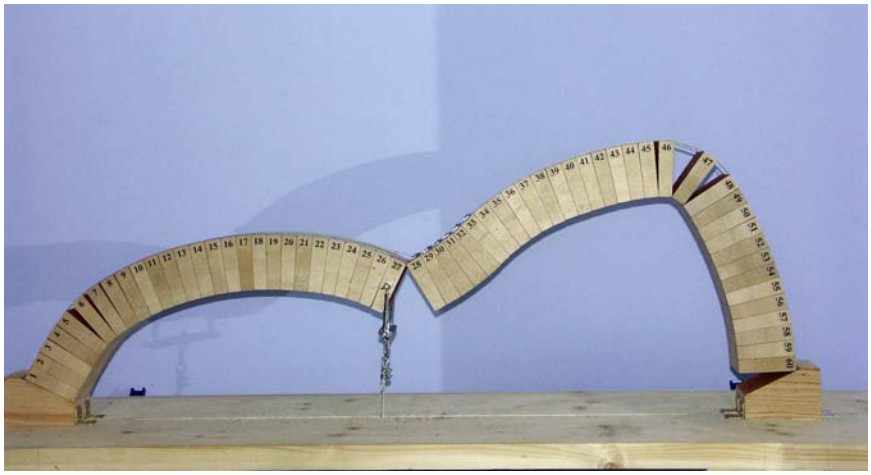


Figure 6

a- arco scarico
b- arco caricato che spinge sui piedritti e provoca la rotazione degli appoggi
c- arco caricato con catena alle imposte per la eliminazione delle spinte

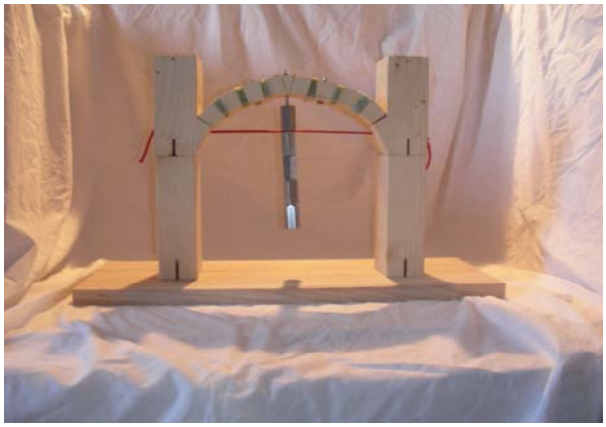
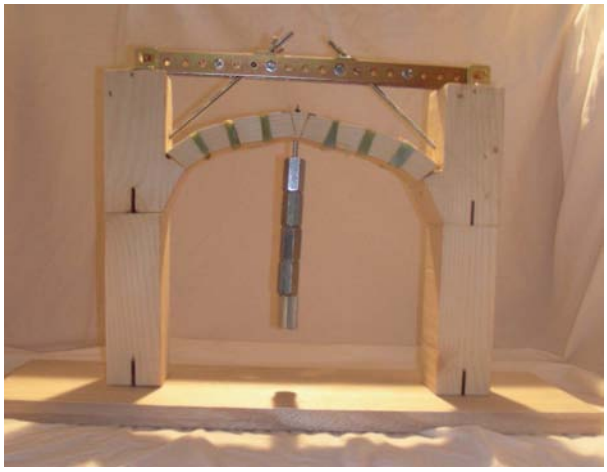


Figure 6

d- arco caricato con catena estradossale e conseguente flessione alle imposte
e- arco caricato, con “graffetta” estradossale per la eliminazione delle spinte
f- Un tiro eccessivo delle graffette causerebbe una inversione dei momenti alle imposte



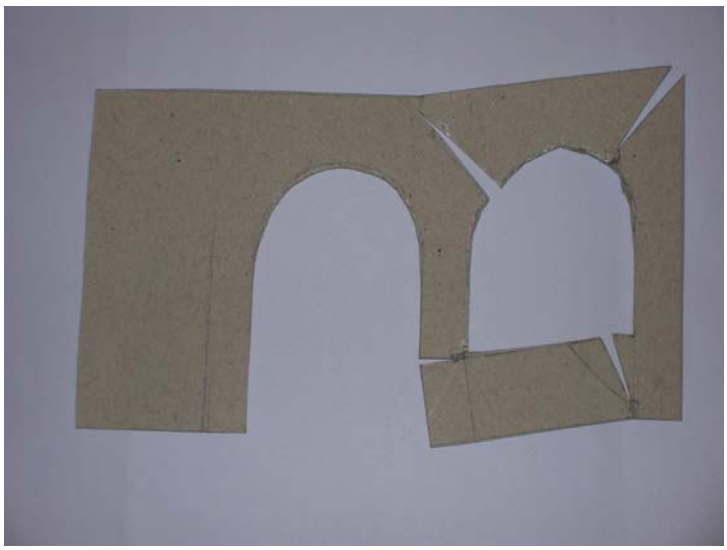
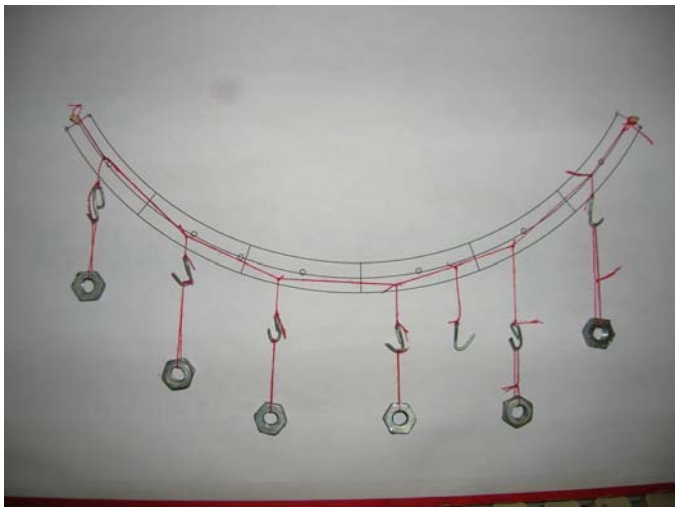


Figura 7
Un semplice modello in cartone per la illustrazione dei possibili cinematismi di collasso



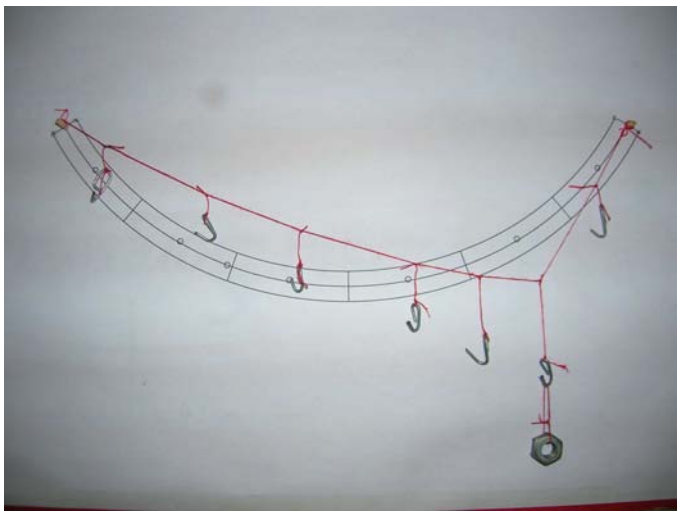


Figure ba, b
Determinazione della curva delle pressioni sotto carichi distribuiti e concentrati

Figure 9, a,b
Esperienze in aula. Costruzione di Modelli ad aste incernierate, alla ricerca della soluzione ottimale

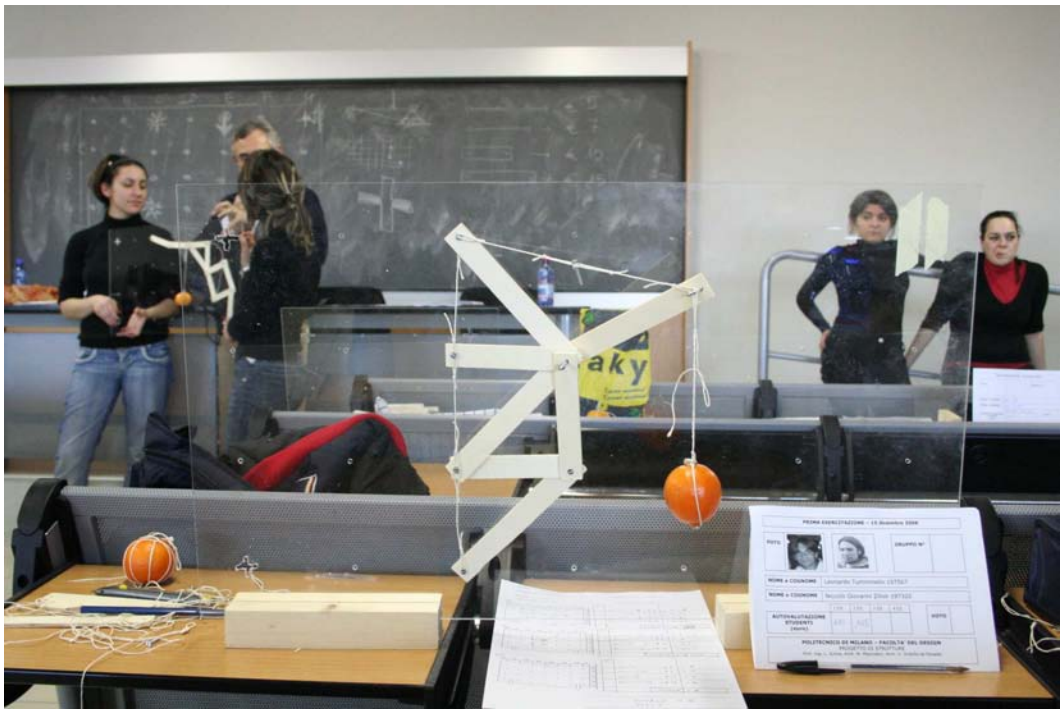
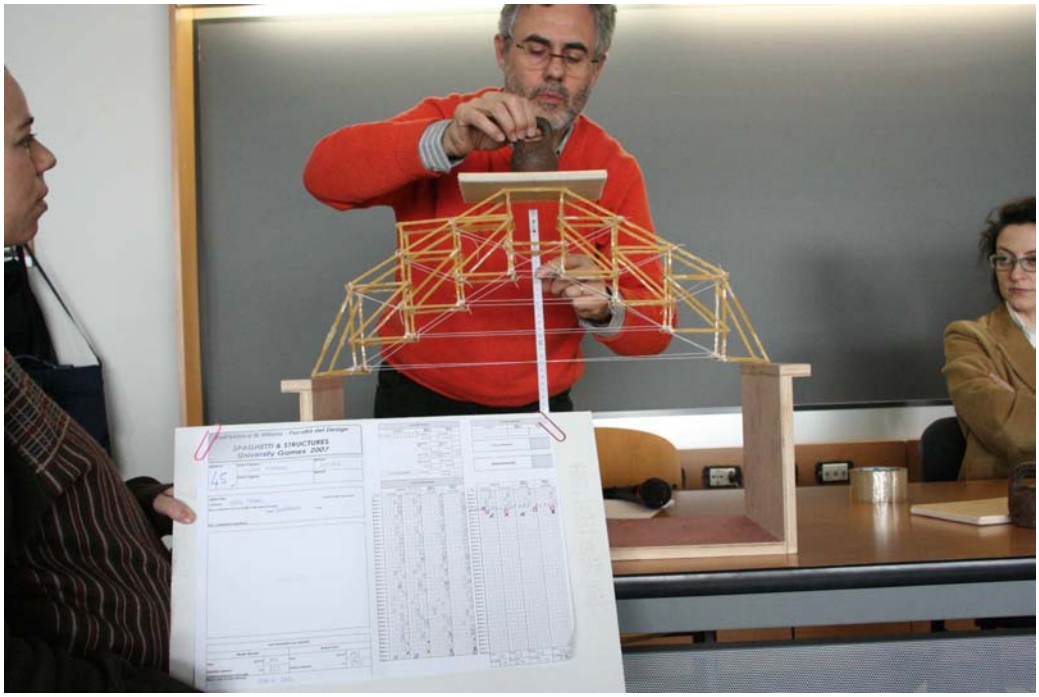


Figure 10 a,b
“Spaghetti & Structures” - Modelli di strutture reticolari durante le prove di carico



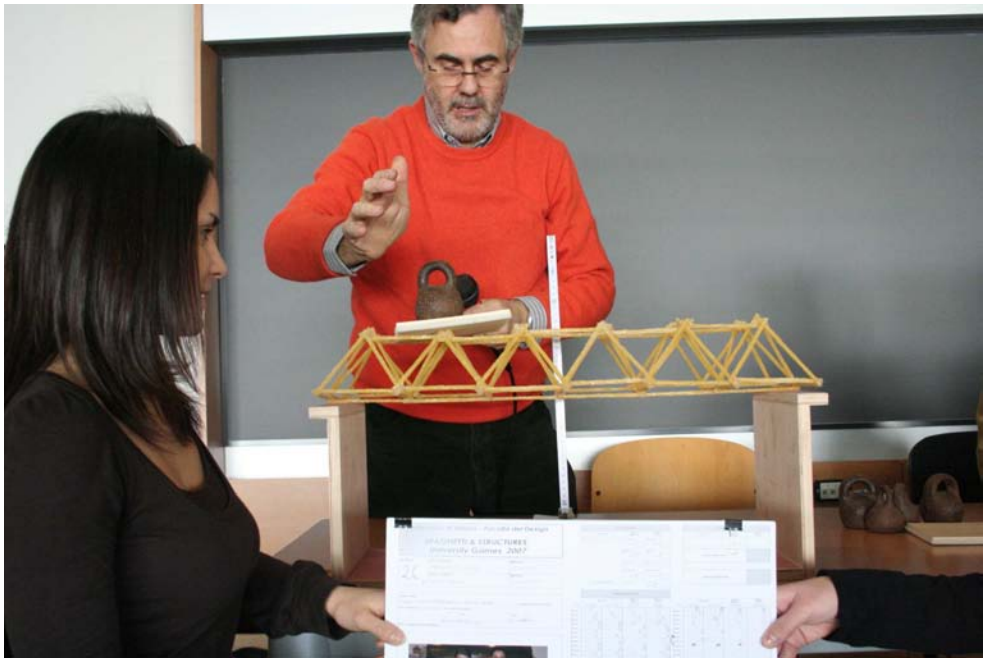


Figura 11 a . Vista di Laino Castello, da valle

Figura 11 b . Una parte del gruppo di lavoro

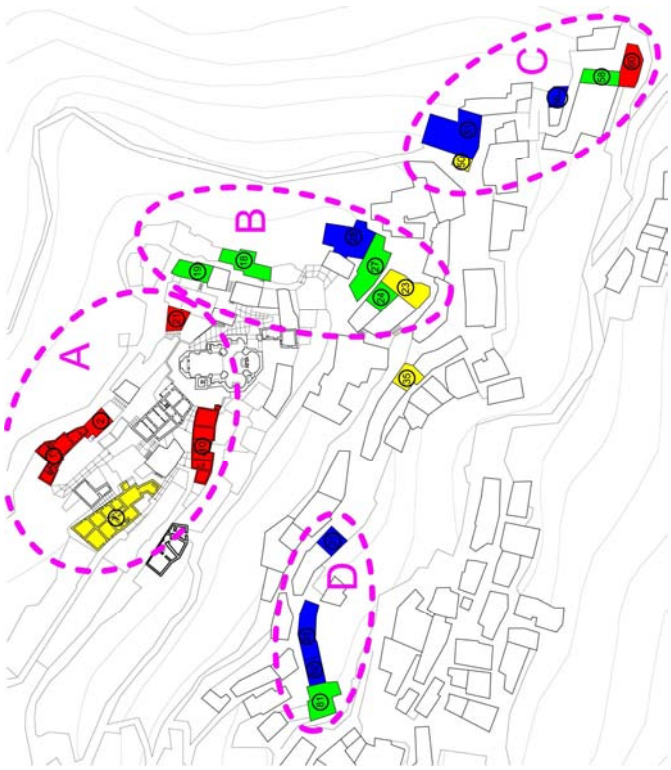


Figura 11 c – Gli edifici esaminati ed i raggruppamenti tipologici individuati

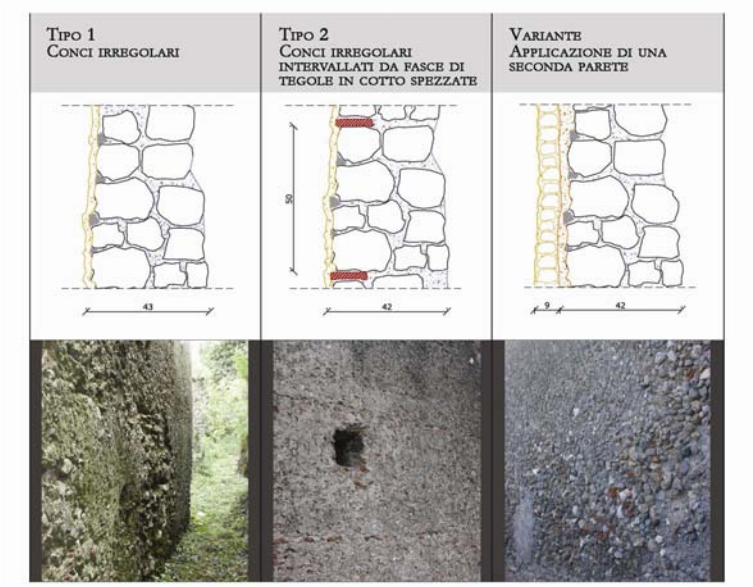


Figura 11 d -. Principali tipologie costruttive delle apparecchiature murarie

Figura 11 e -. Lesione nell'architrave ed "arco di scarico"

Figura 11d -. Portoni di case signorili e di case popolari

Progetto di Rilevate Interesse Nazionale PRIN 2003 - LAINO CASTELLO (CS)
UNITÀ OPERATIVA POLITECNICO DI MILANO

N° edificio	Solai e coperture	ID scheda
10/a		C

Num. solai - 3

Agibilità solai

solaio di sottotetto - inagibile per mancanza assito;

solaio piano terra - inagibile per crollo parziale;

solaio primo interrato - non ispezionabile

Descrizione solai esistenti

solaio di sottotetto: n°7 travi 20x24

solaio di piano terra: dalla breccia si intravede lo spessore del massetto di conglomerato ad inerti misti, spesso circa 8 cm.

Stato di conservazione solai

solaio di sottotetto: manca l'assito e le travi portano segni di un incendio che ne ha fatto gonfiare la vernice di rivestimento e probabilmente crollare il tavolato.

solaio di piano terra: semi crollato e la parte rimanente si mostra imbarcata in prossimità del crollo e verso la mezzeria

Struttura copertura - a capanna

Descrizione copetura

trave di colmo ϕ 24

n° 6 terzere 20x20

listelli ϕ 8 paralleli ai coppi

sul lato sud travetti di connessione al muro 4x8

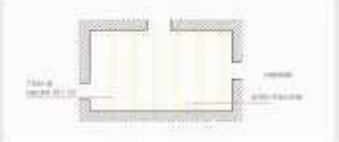
Stato di conservazione copertura -

terzere con segni di bruciatura

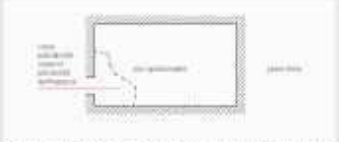
coppi in parte mancanti (circa il 20%), alcuni anneriti, altri sconnessi

Sezione dell'alzato dell'edificio. Il solaio in tratteggio nero risulta inagibile per crollo parziale; quello in tratteggio rosso è la traccia del controsoffitto mancante.

Schema della copertura. In blu sono segnati i connettori presenti solo su lato Sud, tra reggicoppo e la muratura. In rosso, la mancanza localizzata di coppi.



Schema del solaio di sottotetto. L'assito è del tutto mancante probabilmente a causa di un incendio di cui rimangono tracce.



Schema del solaio di piano terra, semi crollato e non ispezionabile dal basso.

Foto della copertura

GIUDIZIO DI QUALITÀ 4

Operatori: S. Barbò, F. Peluchetti, S. Petrucci — data di rilievo: 04 Maggio 2005

Figura 11 e -. Esempio di Scheda di rilevo, edificio 10°

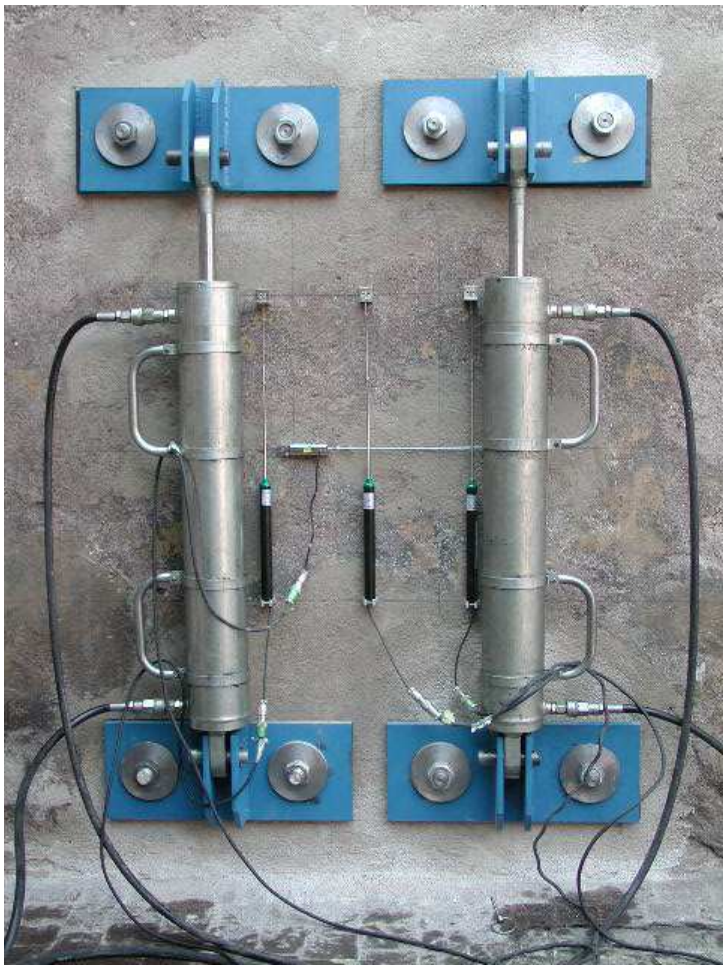


Figure 11
e- prova non distruttiva sulle malte di intonaco, con trapano strumentato
f- prova di carico su muratura con martinetti di grandi dimensioni

Figura 12

a- il Castello di Pergine

b- prove penetrometriche sulle capriate

Figura 12

b- rilevazioni con apparecchiatura termografica

c- d- il gruppo di lavoro

Figura 13

a- Il castello di Amberd in Armenia
b- Studenti all'opera durante le fasi di rilievo

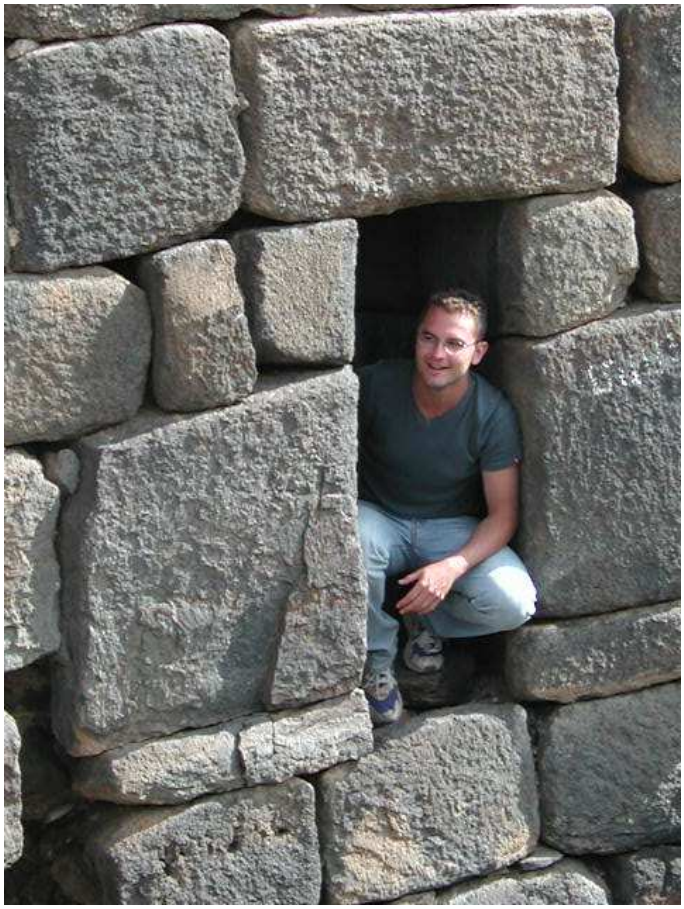


Figura 13

c- La fase del rilievo

d- Attività seminariale durante il convegno presso l'Università di Erevan (Armenia)

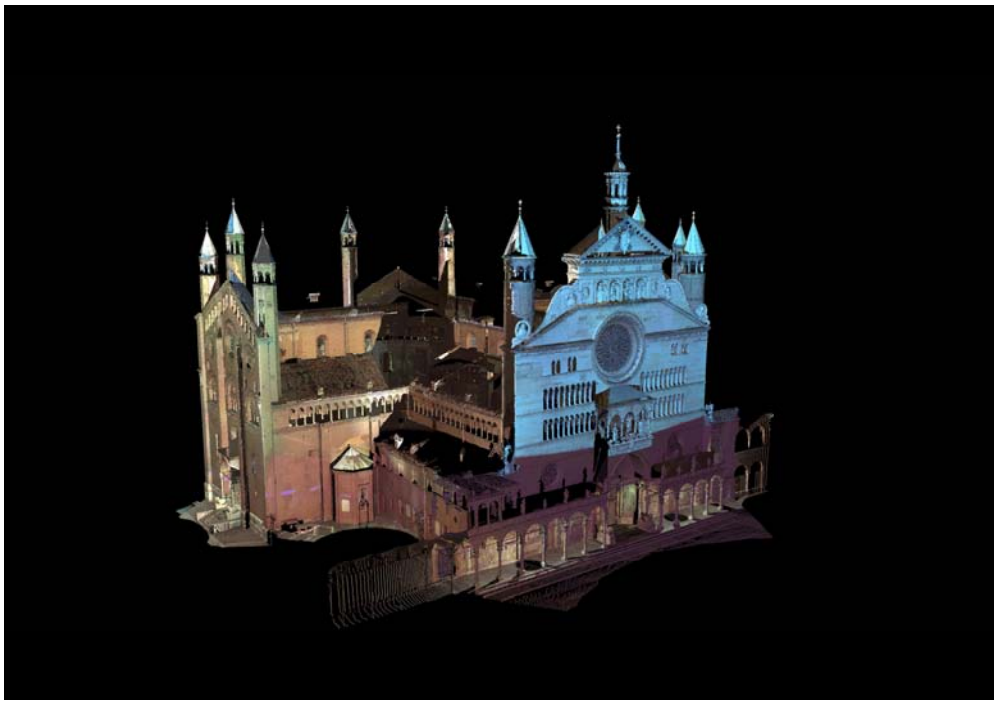


Figura 14
a- Il Duomo di Cremona, rilievo laser-scanner

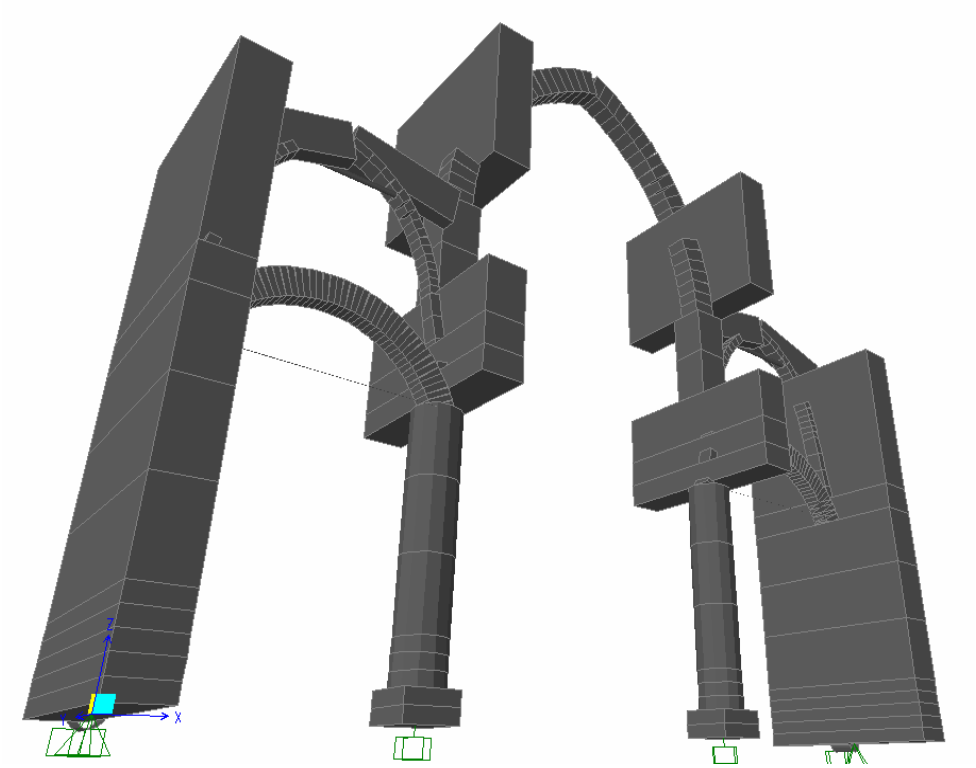


Figura 14
b- Modello FEM di telaio singolo. bi-dimensionale

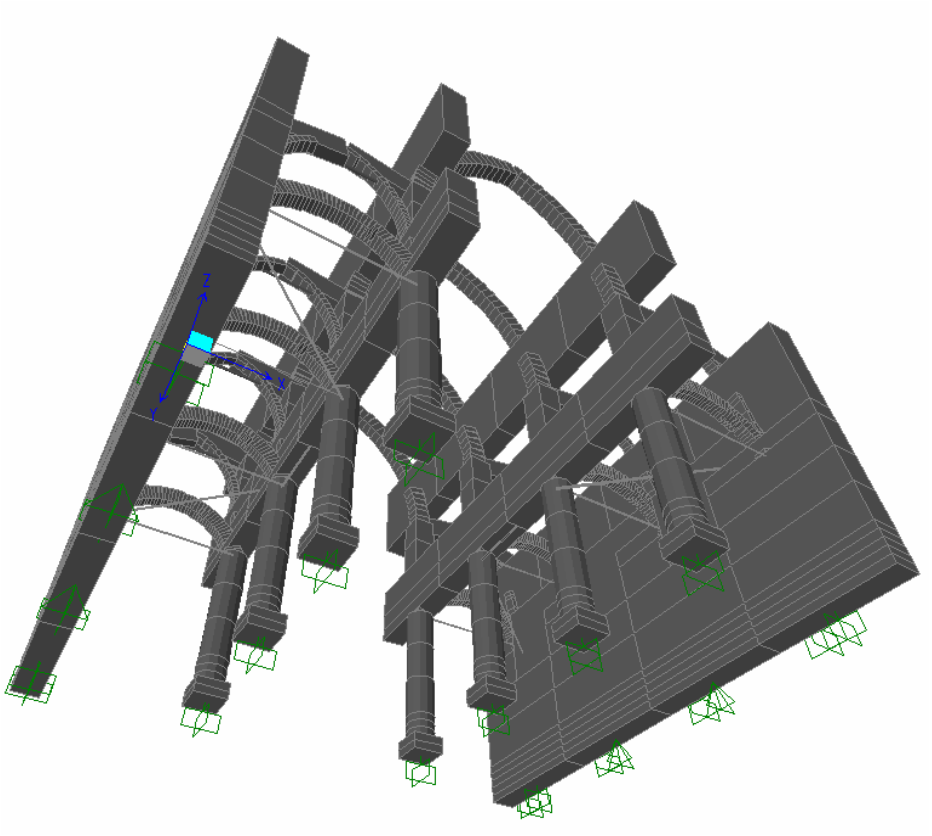


Figura 14
c- Modello FEM di telaio multiplo, struttura tri-dimensionale

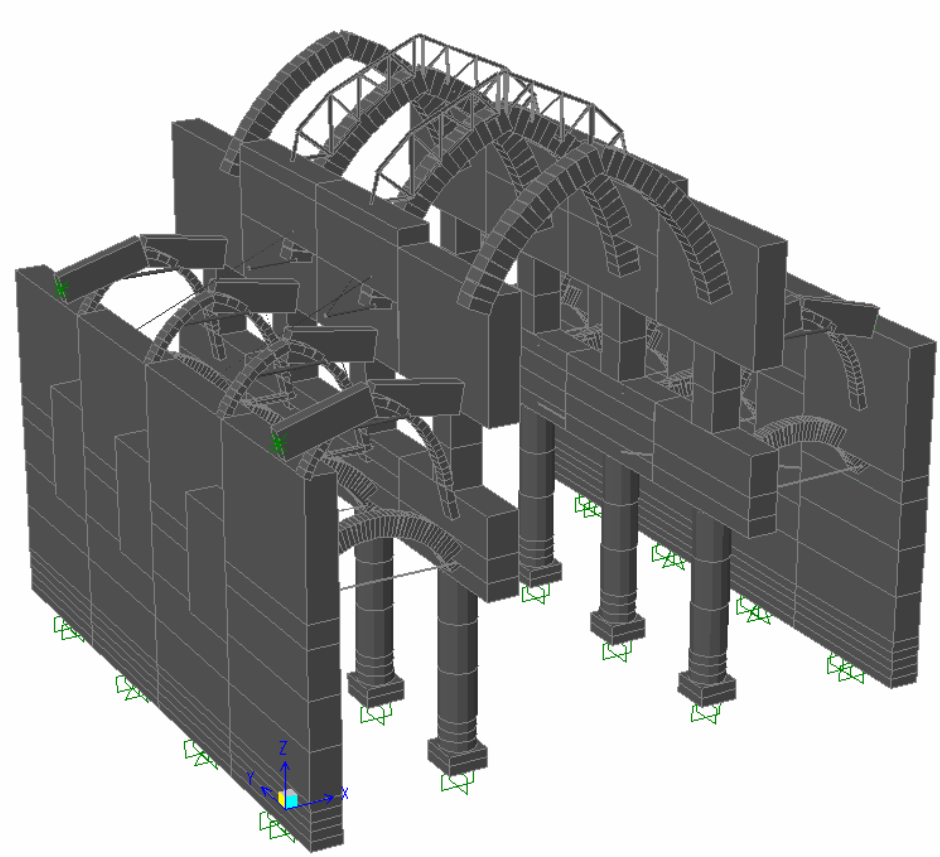


Figura 14
d- Modello FEM tridimensionale con interventi di consolidamento (eliminazione delle spinte)