

# Apparati decorativi e rischio sismico: vulnerabilità sismica e danneggiamento del portale del palazzo dei Priori di Perugia

A. Borri<sup>1</sup>, G. Castori<sup>2</sup>, A. Giannantoni<sup>3</sup> ■

## Sommario

L'articolo riassume gli studi e le analisi diagnostiche condotte dagli autori sul portale del Palazzo dei Priori di Perugia, al fine di individuare le possibili cause meccaniche dello stato di danneggiamento di tale manufatto e di valutarne il grado di rischio sismico, anche alla luce delle recenti "Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale" emanate dal Ministero per i Beni e le Attività culturali.

Lo stato limite di danno per questa opera artistica, dal duplice ruolo di struttura e di apparato decorativo, è stato più volte superato nel

corso dei suoi settecento anni di vita, portando a fessurazioni e danneggiamenti di particolare rilievo, tali da richiedere, in più riprese, ampi interventi di consolidamento e di restauro.

Nel presente lavoro sono riassunte le principali vicende del portale e vengono presentate le analisi diagnostiche e numeriche eseguite, giungendo ad individuare le possibili cause alla base del quadro fessurativo. Viene infine valutata la sicurezza della struttura nello stato attuale, per quanto riguarda la risposta ad azioni di tipo sismico della intensità prevista per l'area perugina.

## 1. Introduzione

Nell'Aprile 2006 un grosso frammento lapideo del monumentale portale del Palazzo dei Priori di Perugia cadeva rovinosamente al suolo, per fortuna senza provocare danni a persone. Nel giro di pochi mesi la Soprintendenza per i Beni Architettonici di Perugia ha provveduto sia alla messa in sicurezza che al restauro del prezioso manufatto, avviando nel contempo le indagini rivolte alla comprensione di un fenomeno che si è ripetuto più volte nella sua storia.

L'ultima volta che lo stato fessurativo e di degrado era giunto ad un punto tale da richie-

dere un approfondito intervento di restauro era stata appena una ventina d'anni or sono (1985 - 1986).

A differenza del passato, in questa occasione, mentre venivano messi in opera i necessari interventi di tipo conservativo e di restauro, la Soprintendenza ha ritenuto opportuno far condurre alcune indagini sia strumentali che numeriche, rivolte ad individuare le cause delle lesioni che più volte hanno interessato il portale nel corso dei secoli.

Nel presente articolo sono riassunti i risultati più significativi di tale lavoro.

## 2. Processo diagnostico: anamnesi

Per la comprensione del comportamento strutturale e dei quadri fessurativi presenti ha un ruolo centrale l'indagine intesa alla ricostruzione della storia del manufatto, delle modificazioni che ha subito nel corso del tempo e delle sue vicissitudini.

La costruzione del Palazzo dei Priori, iniziata nel 1292 come "Palatium Novum Populi", fu portata a termine solo nel 1443.

Non è noto il nome del progettista dell'opera;

si conoscono però i direttori dei lavori nella prima fase costruttiva: Iacopo di Servadio e Giovannello di Benvenuto. Ambrogio Maitani partecipò poi all'ampliamento della costruzione tra il 1321 e 1339.

Realizzato per fasi successive, il Palazzo si sovrappone e si addossa ad edifici più antichi, con il risultato di un'architettura d'impatto irregolare, ricca di asimmetrie e di movimento. In particolare, sul lato di Corso Vanucci, la parete del Palazzo presenta un

<sup>1</sup> Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Università degli Studi di Perugia - ✉ borri@unipg.it

<sup>2</sup> Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Università degli Studi di Perugia - ✉ gcastori@strutture.unipg.it

<sup>3</sup> Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Università degli Studi di Perugia - ✉ andrea.giannantoni@serviziidingegneria.com

Fig. 1  
Palazzo dei Priori di  
Perugia.



andamento leggermente sinuoso, determinato dalla sovrapposizione dell'edificio all'impianto edilizio preesistente.

Su questo lato l'elemento predominante è proprio il grande portale, la cui costruzione viene fatta risalire al periodo dei lavori di ampliamento del Palazzo, compresi tra il 1321 e il 1333 sotto la direzione del "magister" Ambrogio Maitani. Probabilmente il progetto del portale si deve a Giovanni Pisano o a un suo allievo dei primi anni del '300.

In quasi settecento anni di vita questa struttura è stata soggetta a diverse vicende che hanno portato all'insorgenza di lesioni particolarmente gravi, tali da indurre, in più riprese nel corso degli anni, a interventi di consolidamento e di restauro.

Le notizie storiche relative al portale che si ritengono più rilevanti per le finalità del presente studio, possono essere brevemente riassunte come segue.

1576 - Lo scarpellino Pierantonio Scarlattina venne incaricato di rifare il cordone di pietra rossa al portale principale del Palazzo dei Priori in quanto era da molti anni che esso era in degrado assieme ai basamenti dei due leoni di pietra posti ai lati del Portale stesso.

1741 - Il Palazzo dei Priori venne danneggiato da un terremoto e l'architetto Pietro Caratolli ne propose l'abbassamento; il Vanvitelli lo approvò.

1789 - Il 30 Settembre un terremoto devastò Città di Castello ed i suoi effetti si fecero sentire anche a Perugia. In particolare il Palazzo dei Priori subì danni alla torre campanaria e

alle parti sottostanti ad essa. I successivi lavori di ristrutturazione, sotto la guida dell'architetto Serafino Calindri, si incentrarono sul consolidamento, tramite "zeppe", dell'architrave del portale che dava accesso alla torre dell'orologio e sulla stuccatura di tutte le crepe causate dall'evento.

1832 - Nelle cartelle dell'archivio storico risulta che il terremoto del 1832 provocò danni anche al Palazzo comunale.

1835 - Si riscontra un cedimento dell'architrave del portale del Palazzo dei Priori, segnalato dalla rottura di una delle mensole poste al di sopra di uno dei quattro pezzi conformati a cuneo che formavano l'architrave stesso. L'intervento di consolidamento venne effettuato tramite l'inserimento di uno staffone di ferro, piegato ad angolo retto, dietro il fascione murario che fa da battente alla porta. Tale fascione fu piegato alle estremità, in modo tale da poter essere collegato alle spalle laterali.

1844 - Massari presenta un accurato progetto esecutivo per il restauro del portale, eseguendo, per l'occasione, un calco in gesso dell'intero portale.

1854 - Antonio Bartolo scrive al gonfaloniere di Perugia che, a causa dei passati terremoti, la cortina esterna della facciata del campanile, proprio sopra il portone d'ingresso, si è distaccata.

1884 - La Commissione comunale invita gli scultori Angeletti e Biscarini ad esporre il proprio parere sul restauro della porta monumentale. Vengono rilevate perdite di materiale in corrispondenza della parte sinistra e destra



Fig. 2  
1884: il portale presenta nell'archivolto molte cadute di materiale lapideo soprattutto nella parte alta più esposta agli agenti atmosferici. L'ala del grifo di sinistra è spezzata.



Fig. 3  
1890: vista del portale al termine dei lavori di restauro.

dell'archivolto; la perdita di parte dell'ala del grifo di sinistra; perdita di materiale e lesioni in corrispondenza dei basamenti dei due leoni. 1888 - Il Municipio affida i lavori di restauro a Biscarini ed Angeletti. La commissione raccomanda agli scultori di salvare il più possibile l'antico "rimettendo solamente a nuovo quelle parti che appositamente fossero necessarie e non suscettibili di essere accomodate". Di fatto gli interventi realizzati furono prettamente di restauro delle pareti decorative e non di consolidamento strutturale.

1890 - Biscarini ed Angeletti sottopongono al Sindaco una relazione integrativa relativa a nuovi interventi di restauro, eseguiti fuori contratto, sul portale del Palazzo dei Priori. I suddetti interventi comportavano, oltre l'aggiunta di parti in pietra, anche stuccature in cemento di Francia e impermeature delle parti voltate lesionate o crollate.

1980 - Cade l'ala destra del Grifone situato

a sinistra del portale del Palazzo comunale. 1985 - L'Accademia di Conservazione dei Beni Culturali di Perugia commissiona il restauro dell'arcata superiore del Portale del Palazzo Comunale; vengono inoltre smontate le statue dei Santi protettori e viene riassemblata l'ala sinistra del grifone.

1986 - Il Comune di Perugia finanzia un ulteriore intervento di restauro, che interessa l'architrave, gli stipiti esterni e i pilastri laterali. 2005 - Una indagine fatta sul portale, tramite un cestello elevatore, mette in evidenza un quadro fessurativo molto più rilevante rispetto a quello del 1985.

Aprile 2006 - L'aggravamento del quadro fessurativo, con evidenti fenomeni di decoesione superficiale, fessurazioni, scagliature ed il crollo di un grosso frammento, comporta la necessità di una messa in sicurezza e di un nuovo intervento di restauro che viene effettuato e terminato nel mese di Agosto 2006.

### 3. Processo diagnostico: esame obiettivo

Sulla scorta del materiale raccolto dall'anamnesi è stato possibile definire l'evoluzione del quadro fessurativo, che comparato alle condizioni attuali ha fornito utili indicazioni per comprendere il "funzionamento" meccanico della struttura. L'analisi del quadro fessurativo antecedente all'intervento di restauro completato nel 1890 (Fig. 5) evidenziava:

- una presenza diffusa di cadute di materiale lapideo in corrispondenza dei due archi più

esterni (archi 9 e 10, Fig. 4): all'estradosso in prossimità dei basamenti arcuati delle due trifore per l'arco 10, all'intradosso in prossimità della chiave per l'arco 9;

- un limitato numero di fessure, concentrate nella porzione centrale e nella parte destra dell'architrave;
- un limitato danneggiamento dei pilastri, con perdite di materiale limitate al "tortiglione" più esterno di sinistra (in prossimità del piano di imposta) e alla parte inferiore del pilastro di destra dell'arco 5;

Fig. 4  
Numerazione utilizzata per  
gli archi che compongono il  
portale.



- lesioni diffuse in corrispondenza dei basamenti dei due leoni e dei basamenti del portale, caratterizzate da perdite di materiale costanti sviluppate tutte lungo la superficie di appoggio dei pilastri.

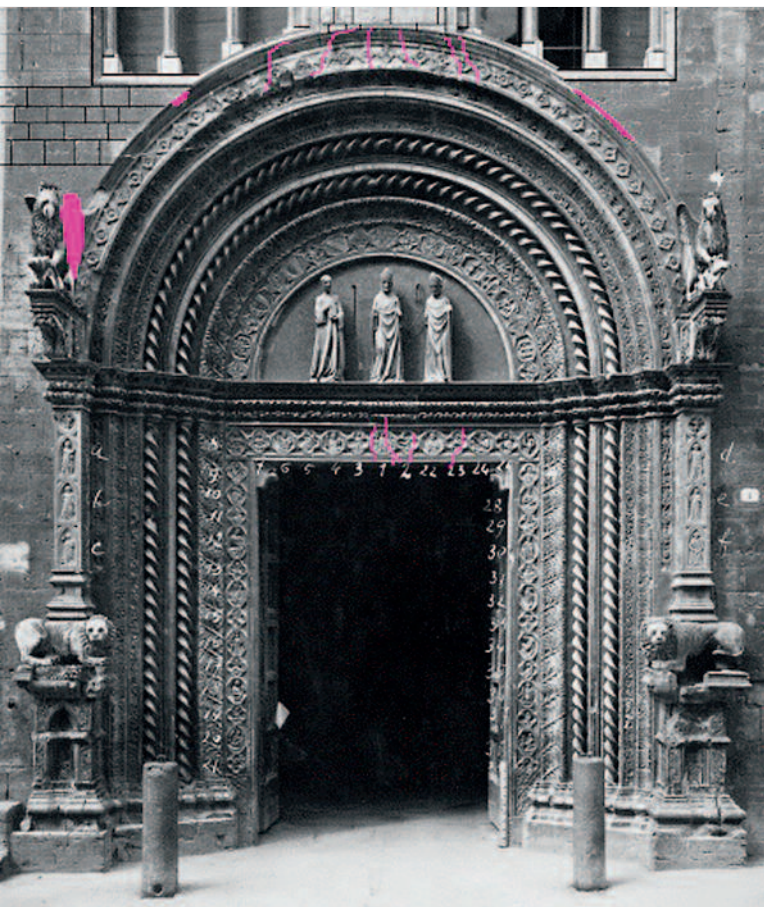
L'analisi del quadro fessurativo antecedente all'intervento di restauro del 1985 (Fig. 6) mostrava una prima e significativa evoluzione del quadro fessurativo, evidenziando:

- un limitato danneggiamento dell'arco più esterno (arco 10), con perdite di materiale in prossimità dei basamenti arcuati delle trifore;

- una presenza diffusa di lesioni in chiave, in corrispondenza degli archi più esterni (archi 9 e 10);
  - un quadro fessurativo molto più rilevante rispetto a quello del 1889 nell'architrave, con lesioni per lo più verticali (lungo tutto lo spessore dell'architrave stesso) concentrate nella parte centrale dell'elemento;
  - l'assenza di lesioni e perdite di materiale lungo i pilastri e il basamento del portale.
- Infine, l'analisi del quadro fessurativo attuale (Fig. 7) ha fornito le seguenti indicazioni:

Fig. 5  
Portale Palazzo dei Priori,  
zone interessate dalle  
lesioni (1889).





il quadro fessurativo attuale, molto più rilevante di quello del 1985, ha interessato anche il maschio murario situato al di sopra della chiave dell'ultimo arco (arco 10). Le fessure hanno interessato le pietre danneggiandole in alcuni casi lungo tutto lo spessore; rispetto alle situazioni precedentemente esaminate, le lesioni presentano una distribu-

zione simmetrica e tendono a concentrarsi per lo più negli archi più interni (archi 5 - 8); i distacchi di materiale lapideo sono limitati all'intradosso degli archi centrali e si concentrano nella parte di sinistra del portale; in analogia al quadro fessurativo del 1985 non si hanno lesioni o perdite di materiale lungo i pilastri sul il basamento del portale.

Fig. 6 Portale Palazzo dei Priori, zone lesionate e zone interessate da caduta di materiale (1985).

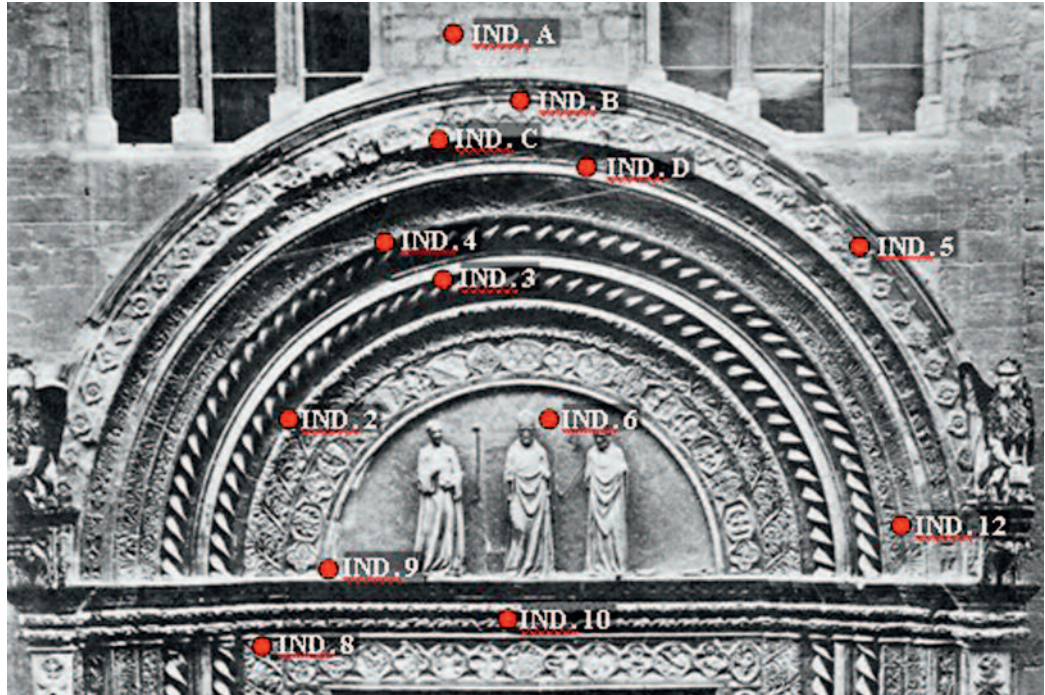
Fig. 7 Portale Palazzo dei Priori, zone lesionate e zone interessate da caduta di materiale (2006).

#### 4. Processo diagnostico: indagini sperimentali

L'analisi dell'evoluzione del quadro fessurativo e, più in generale, delle vicende subite dal portale nel corso dei secoli legittima l'ipotesi che quanto avvenuto sia il risultato di una molteplicità di fattori. È chiaro tuttavia che l'individuazione delle cause che possono aver prodotto il quadro fessurativo osservato non può prescindere da un'attenta analisi delle modalità di interazione tra il portale e la struttura circostante. Due potrebbero essere le ipotesi in merito allo schema costruttivo del portale: o il portale è stato costruito in modo solidale con tutto il complesso ed è dunque parte integrante della costruzione muraria complessiva, oppure è stato inserito in un secondo

momento, con un carattere decorativo. Dal punto di vista strutturale siamo in presenza di un caso "non banale" di meccanica strutturale, che viene ad essere funzione di un insieme di variabili: attrito tra parete muraria e arco estradossale di parete, attrito tra arco estradossale di parete e gli archi inferiori parzialmente sovrapposti, attrito tra i conci, attrito tra arco intradossale e lunetta, collegamento degli archi del portale con l'architrave, etc. Per comprendere la situazione e quindi valutare l'influenza delle suddette variabili sul comportamento d'insieme della struttura è stata condotta un'indagine video-endoscopica (Fig. 8), tramite la quale è stato possibile acquisire maggiori informazioni sull'organizzazione a livello strutturale del portale.

Fig. 8  
Layout delle prove  
video – endoscopiche.



I risultati ottenuti hanno permesso di comprendere che il portale è parte integrante della costruzione muraria e che sono principalmente gli archi più esterni a sostenere il peso della muratura sovrastante (Fig. 9). Altro elemento significativo per la determinazione del comportamento meccanico della struttura è la conoscenza della diversa natura dei litotipi costituenti: marmi per i pilastri laterali, mandorlato d’Assisi per le colonne tortili e pietra caciolfa per tutto il portale. In particolare

quest’ultima tipologia di pietra, molto utilizzata in Umbria (Cattedrale di Foligno, Museo dell’Opera del Duomo di Perugia, ecc.), ha alcune caratteristiche peculiari, che ne condizionano fortemente il comportamento meccanico. La pietra caciolfa è un calcare grigio o giallognolo di notevole omogeneità e finezza di grana, riferibile alla formazione marrnoso-arenacea di età miocenica. Questo pietra è particolarmente adatta ad essere impiegata per elementi scolpiti, essendo il materiale

Fig. 9  
Sezione e vista  
assonometrica del portale;  
posizione delle indagini  
videoendoscopiche.

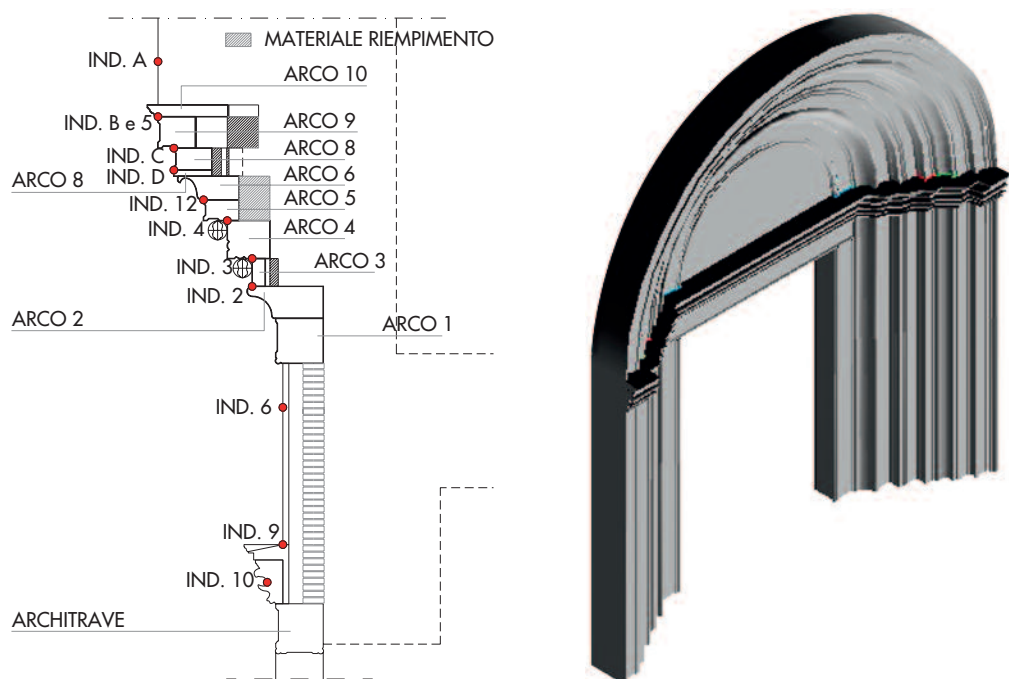




Fig.10  
Prova di compressione su  
un campione di pietra  
caciolla.

facilmente lavorabile quando è appena estratto dalla cava e tendendo poi ad indurire rapidamente. Alcuni studi presenti in letteratura (Manni, 1986; Sperandio, 2004) evidenziano tuttavia una sua certa vulnerabilità nei confronti degli agenti atmosferici.

L'esposizione all'aria, all'azione disgregante delle concentrazioni saline ed ai cicli gelo-disgelo ne deteriorano infatti in modo significativo le proprietà meccaniche.

In quest'ottica, per indagare proprio sulle caratteristiche del materiale, ed in particolar modo sulla resistenza a compressione, sono stati effettuati dei test su elementi simili (per quanto pos-

sibile) alla pietra del portale. Tali elementi sono stati reperiti presso un sito di estrazione situato 20 km a NE rispetto a Perugia. Le prove di compressione condotte su un campione di cinque provini cubici (100x100x100 mm) hanno mostrato un valore medio di resistenza a compressione di circa 110 N/mm<sup>2</sup>, con una ridotta dispersione dei risultati (8.5 N/mm<sup>2</sup>).

Ovviamente, non va trascurato il fatto che tale materiale è rimasto per secoli alle intemperie, e questo fatto, viste anche le particolari proprietà precedentemente citate, può influire significativamente sulle caratteristiche meccaniche della pietra.

## 5. Analisi strutturale

Il portale è un gioiello architettonico composto da dieci archi aggettanti l'uno rispetto all'altro, realizzati con una moltitudine di conci che si sostengono tra loro per mutuo contrasto. La struttura è "incastonata" nella parete di facciata del Palazzo dei Priori, per uno spessore rilevante di essa e quindi ne viene condizionata la risposta in misura rilevante. Le deformazioni della parete impongono e, allo stesso tempo, limitano i cinematismi al portale e questo può portare a stati tensionali non compatibili con la sua resistenza.

Per indagare su questi aspetti risultano molto utili i moderni strumenti numerici di analisi strutturale, capaci di fornire indicazioni sulla veridicità o meno di una determinata ipotesi diagnostica. In questo caso l'indagine è stata perciò rivolta a valutare la situazione nello stato attuale, cercando di fornire una possibile diagnosi del dissesto.

Con lo scopo di determinare lo stato tensionale presente nella struttura, è stato messo a

punto un modello agli elementi finiti capace di riprodurre geometricamente e meccanicamente il comportamento del manufatto. Tale modello, ottenuto partendo dai risultati conseguiti a seguito del rilievo video - endoscopico, è stato semplificato, per un più agevole utilizzo a fini strutturali. Le modifiche effettuate, consentendo la regolarizzazione delle superfici e l'eliminazione di quelle parti prive di alcuna funzione dal punto di vista strutturale, hanno così permesso di rappresentare il volume solido del portale che è poi servito per la definizione degli oltre 50000 elementi finiti del modello.

Sono state quindi eseguite, mediante un codice di calcolo ampiamente utilizzato in ambito scientifico, le analisi strutturali rivolte a valutare lo stato tensionale nei vari punti della struttura. L'analisi condotta è sin qui rimasta nell'ambito elastico - lineare in quanto interessava conoscere quali fossero, per la struttura non fessurata, le zone maggiormente interessate da tensioni di compressione.

### 5.1 Primo Modello: archi perfettamente collegati tra loro (Carichi verticali)

Le prime analisi sono state effettuate ipotizzando la perfetta collaborazione tra gli archi, ovvero escludendo possibili scorrimenti relativi tra i diversi elementi costituenti la struttura. Sulla base dei risultati ottenuti è stato dunque

possibile rilevare come per i carichi "ordinari" (peso proprio della muratura sovrastante) lo stato tensionale sia modesto. In aggiunta la distribuzione delle tensioni principali di compressione presenta un andamento che si discosta in maniera piuttosto evidente dal quadro fessurativo attuale.

Fig. 11  
Modello solido semplificato utilizzato per l'analisi FEM (perfetta collaborazione tra gli archi).



### 5.2 Secondo Modello: archi perfettamente collegati tra loro (Carichi verticali e sisma)

Sono state allora messe in conto, come possibili cause del dissesto, le situazioni "straordinarie" (sisma, cedimenti, etc). Come noto, l'Umbria, e in particolare le aree

limitrofe alla città di Perugia, hanno subito nel passato eventi anche catastrofici. Da una analisi della storia sismica perugina è possibile osservare come nel passato si siano manifestati terremoti di intensità anche pari al X - XI grado della scala MCS.

Fig. 12  
Archi soggetti al solo peso proprio: tensioni principali di compressione.

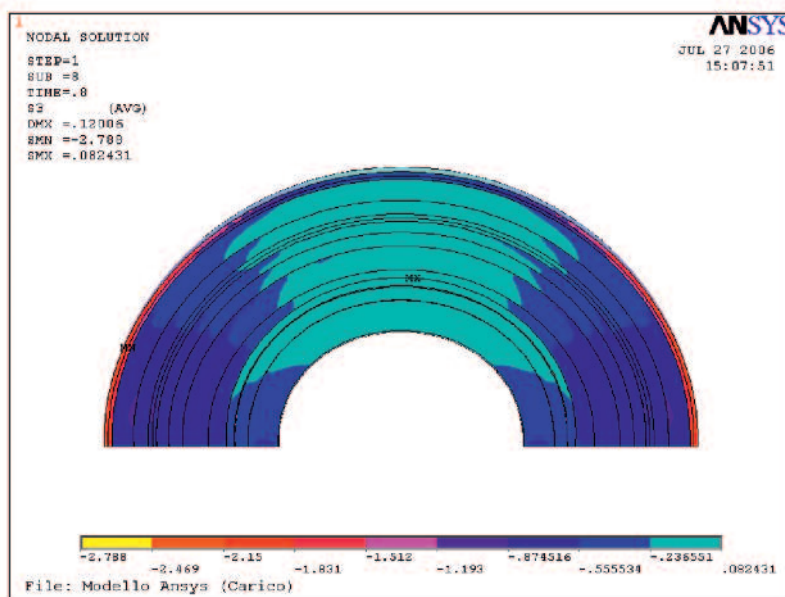




Tabella 1 - Principali eventi sismici nell'area perugina

Data	Intensità MCS	Epicentro	Magnitudo
30-4-1279	IX	Appennino Umbro – Marchigiano	6.6
9-9-1349	X	Italia Centrale	7.6
29-4-1420	VII	Perugia	
5-1-1456	X-XI	Umbria	
26-4-1458	VIII-IX	S. Sepolcro – Città di Castello	
13-6-1590	VII	Perugia	
25-4-1593	VII	Perugia	
14-1-1703	XI	Norcia – Cascia	6.5
27-7-1751	X	Appennino Umbro	6.0
30-9-1789	X	Selci – Città di Castello	5.4
13-1-1832	VIII-IX	Foligno	
10-2-1832	VII-VIII	Foligno	
13-3-1832	VII-VIII	Assisi	
12-2-1854	VII-VIII	Bastia – Assisi	
30-7-1978	VII	Umbria	
29-4-1984	VIII	Valfabbrica	5.2
26-9-1997	VIII-IX	Appennino Umbro – Marchigiano	5.8

Per quanto riguarda le intensità avvertite nella città di Perugia, si può notare che dopo il 1349 si sono avuti eventi non superiori al grado VII della scala MCS (Fig. 13).

In quest'ottica si è deciso di adottare tale valore (massimo sisma registrato per la zona in questione negli ultimi 650 anni) come evento sismico di progetto.

È stata così eseguita un'analisi numerica, nella

quale la struttura è soggetta al peso proprio e ad un'accelerazione orizzontale di 0.2 g, che simula l'azione sismica agente nel piano della struttura stessa. Rispetto al modello precedente, si è tenuto poi conto della presenza non solo della parete sovrastante, ma anche di quelle laterali.

Dalle analisi numeriche si può stimare un incremento delle tensioni di compressione all'incirca

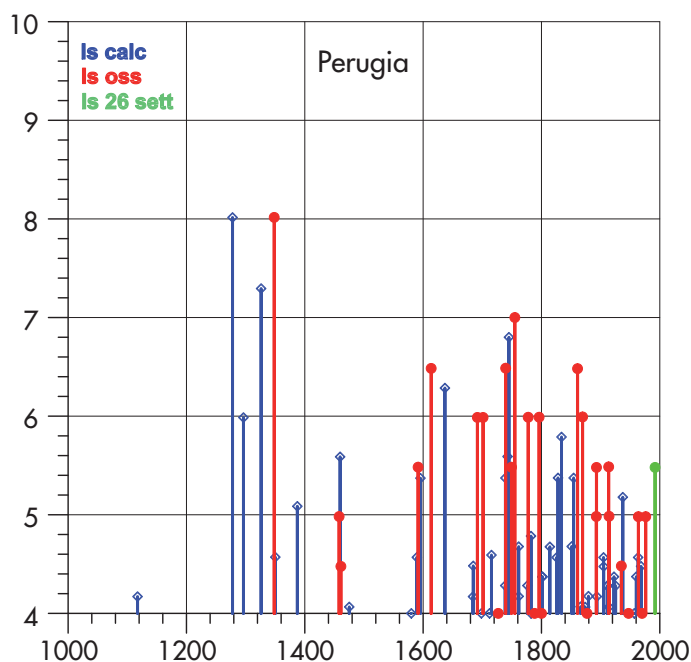
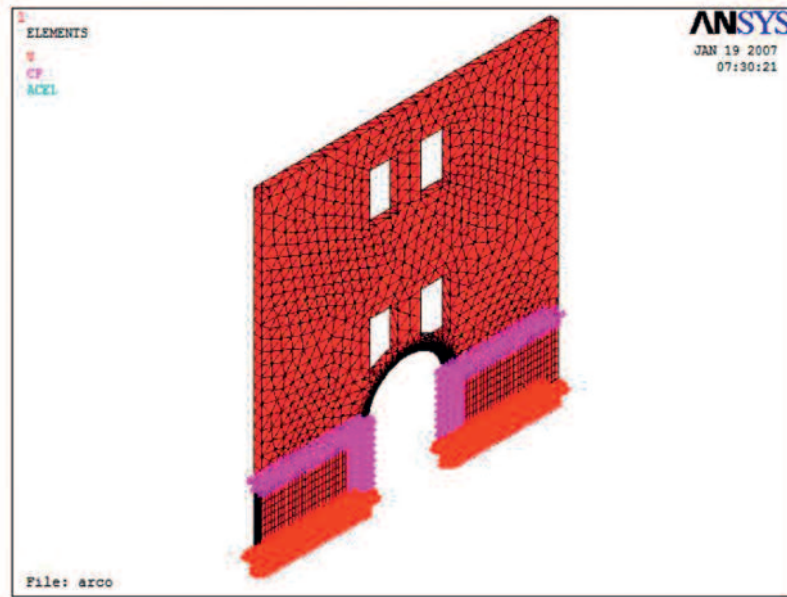


Fig. 13  
Principali eventi sismici nella città di Perugia.

Fig. 14  
Modello solido utilizzato  
per l'analisi FEM.



del 100% rispetto ai valori ottenuti nel modello soggetto ai soli carichi ordinari (peso proprio della muratura sovrastante). I valori ottenuti, nell'ordine dei  $2 \text{ N/mm}^2$ , sono però ancora troppo piccoli per poter legittimare l'ipotesi di una perfetta collaborazione tra gli archi costituenti il portale. Peraltro, l'assunzione di una perfetta aderenza tra gli archi appare di fatto non coerente con il suo comportamento reale e dunque con il corrispondente quadro fessurativo.

### 5.3 Terzo modello: archi interagenti con attrito

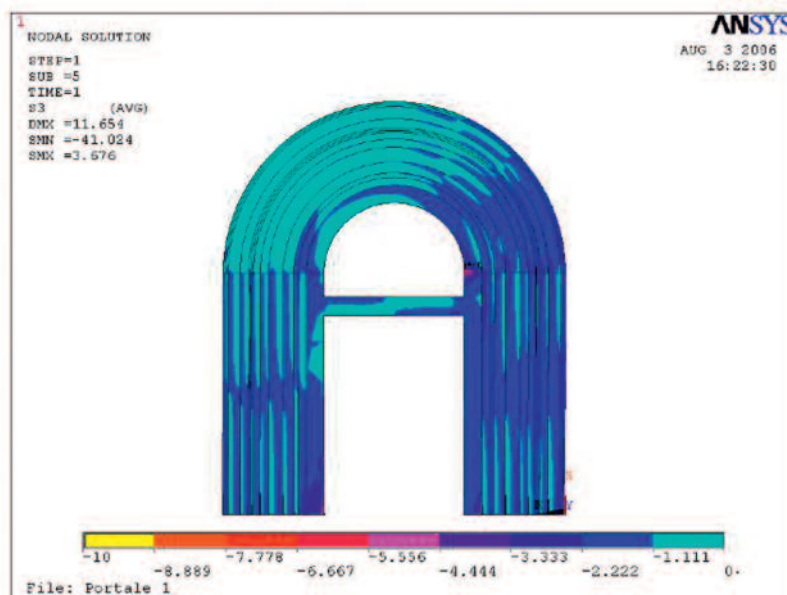
Sono stati perciò considerati in un terzo modello: l'attrito tra la parete muraria e l'arco estradossale di parete, e l'attrito tra l'arco

estradossale di parete e gli archi inferiori parzialmente sovrapposti, considerando un comportamento di tipo attritivo in corrispondenza delle superfici di contatto tra ciascuno dei dieci archi che costituiscono il portale.

Il medesimo modello comportamentale è stato poi assegnato anche alla superficie di separazione tra l'arco estradossale di parete (arco 10) e la parete muraria sovrastante.

In accordo a quanto riportato in letteratura (Heyman, 1982) è stato assunto un coefficiente  $\mu = 0.4 \div 0.6$ . Anche in questo caso è stato anzitutto esaminato il comportamento meccanico della struttura sotto l'azione dei soli carichi verticali dovuti al peso proprio

Fig. 15  
Distribuzione delle tensioni  
principali di compressione  
(azione sismica da sinistra).



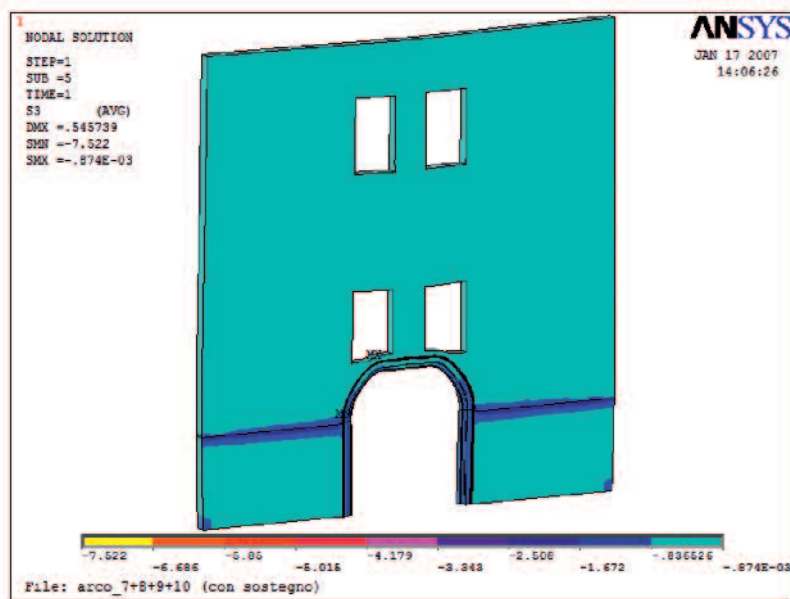
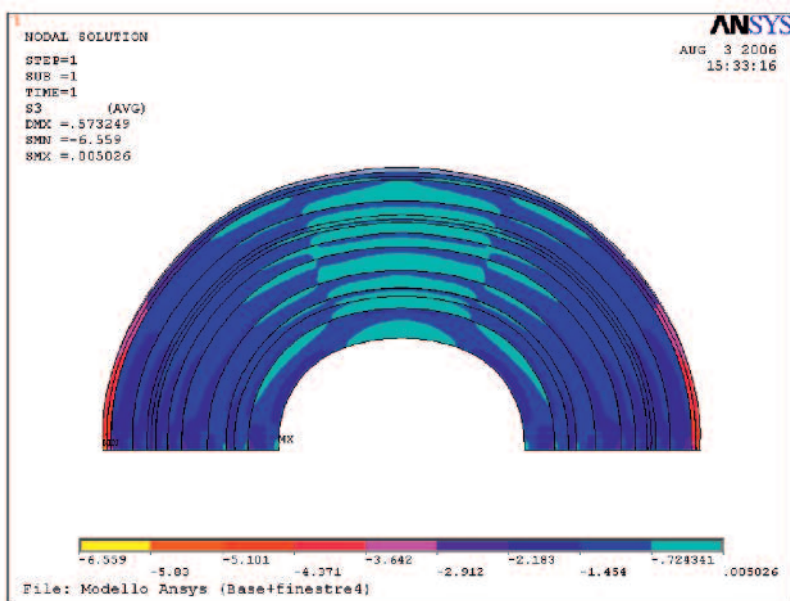


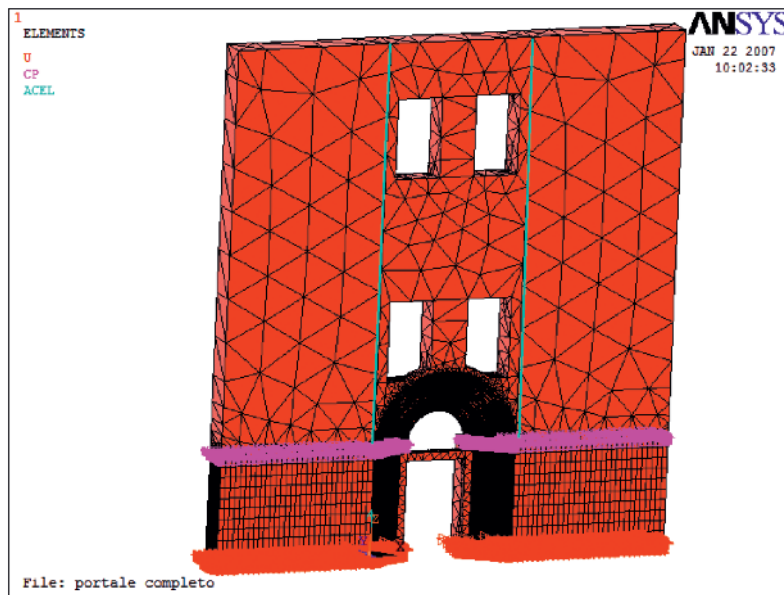
Fig. 16  
Distribuzione delle tensioni principali di compressione sotto l'azione dei soli carichi verticali.



della parete muraria soprastante. I risultati ottenuti mostrano un andamento delle tensioni di compressione qualitativamente diverso da quello ottenuto in precedenza. In particolare si è iniziato a rilevare arco per arco un incremento delle suddette tensioni all'intradosso delle sezioni alle reni (Fig. 16). Si è poi passati ad indagare la risposta offerta dalla struttura in presenza di azioni sismiche. Il modello è stato ulteriormente "arricchito" (in modo tale da rappresentare al meglio il comportamento della struttura reale) modellando la parete muraria al di sopra del piano di imposta del portale attraverso tre diversi volumi. Si ricorda peraltro come il corpo di fabbrica in

cui è inserito il portale sia frutto della sovrapposizione dell'edificio ad un impianto edilizio preesistente. In particolare sulla destra del portale (Fig. 18) è ancora visibile il "giunto" di separazione tra due corpi di fabbrica. Per simulare l'attrito tra le superfici di contatto dei diversi volumi è stato riproposto un modello analogo a quello definito per gli archi. I risultati delle analisi mostrano come i massimi di compressione sono localizzati proprio nelle zone sedi delle fessurazioni effettivamente rilevate, supportando quindi l'ipotesi che a generare lo stato di danneggiamento avuto nel corso degli anni siano stati proprio gli eventi sismici del passato.

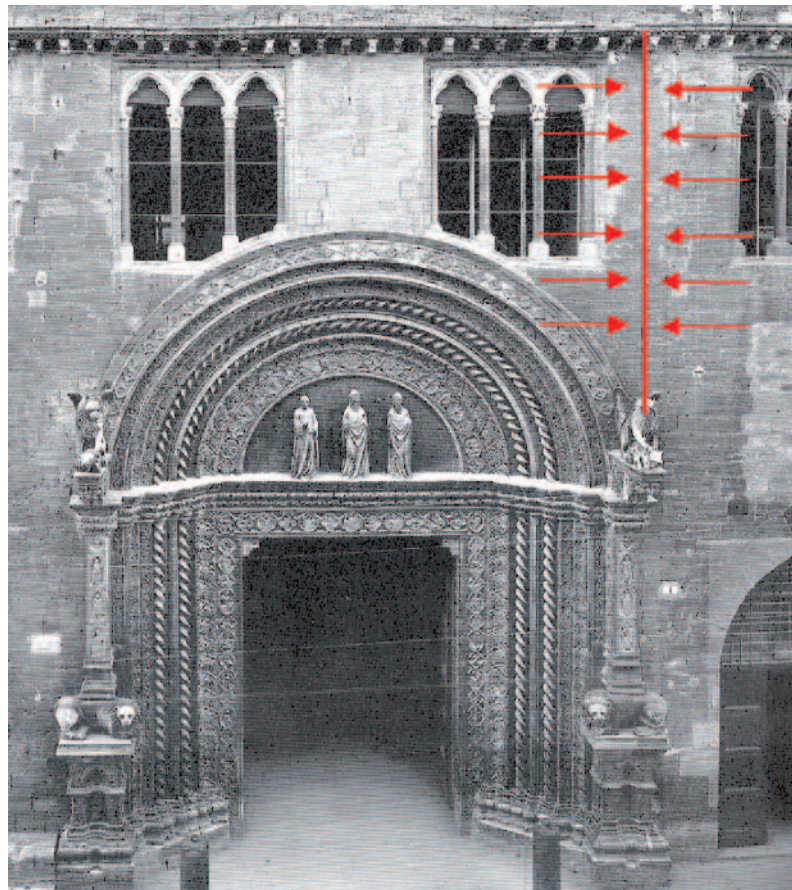
Fig. 17  
Suddivisione della parete muraria in tre volumi distinti.

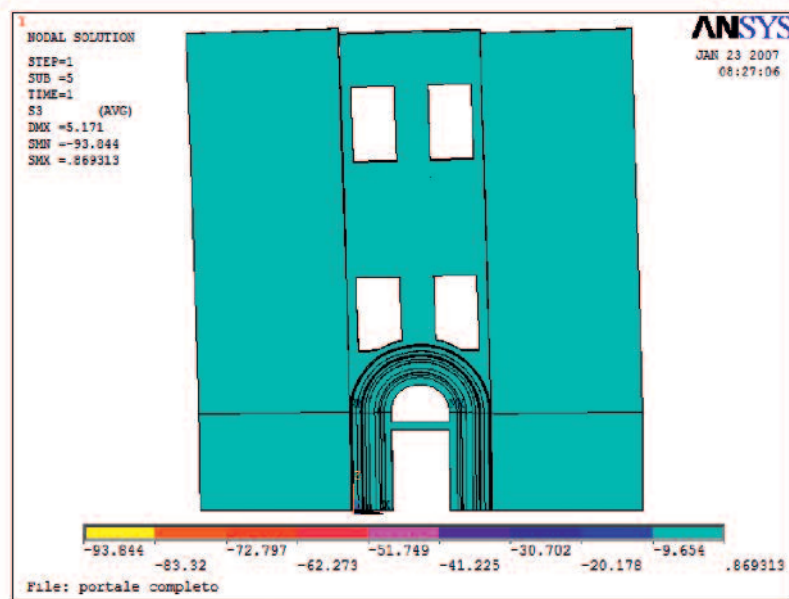


È però vero che, quantitativamente si è molto distanti dai valori della resistenza a compressione della pietra caciolfa, quanto meno quelli determinati per via sperimentale su provini di pietra non invecchiati. I picchi di tensione registrati nelle aree "critiche", ovvero in quelle porzioni del portale dove si sono regi-

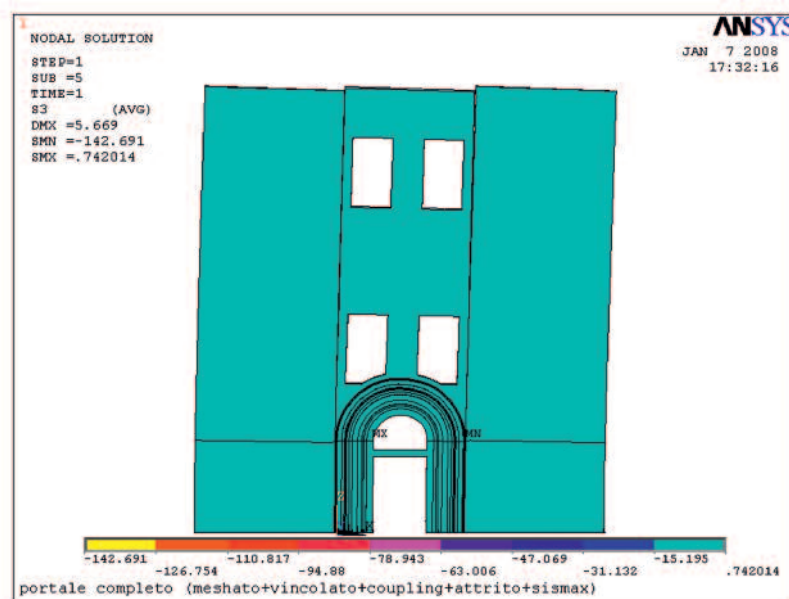
strate perdite di materiale e lesioni da schiacciamento non superano infatti i  $5 \text{ N/mm}^2$ . Tali differenze sono però ben giustificabili se si considera che proprio nelle zone di massima compressione i conci degli archi in questione sono accostati tra loro solo attraverso gli spigoli; un contatto di tipo puntuale non può che portare

Fig. 18  
Giunto di separazione tra i due corpi di fabbrica.





a)



b)

Fig. 19  
 Risposta d'insieme del modello:  
 a) sisma in direzione x;  
 b) sisma in direzione -x.

ad un forte incremento locale delle tensioni. Per mostrare, almeno dal punto di vista qualitativo, quale può essere il livello di tale incremento sono qui riportati i risultati di un'analisi nella quale sono stati modellati distintamente, in campo elastico, i singoli blocchi lapidei ed i letti di malta. Ciò ha permesso di valutare l'effetto della interazione tra i materiali coinvolti. Un segmento di arco, corrispondente ad una porzione dell'arco più esterno del portale (arco 10), di lunghezza pari a circa un metro è stato così modellato con elementi solidi tridimensionali ad otto nodi. Lo schema statico adoperato è di mensola incastrata ad un estremo. Per l'azione verticale è stato consi-

derato il solo peso proprio, mentre le tensioni radiali sono state simulate impartendo una pressione ( $4 \text{ N/mm}^2$ ) all'estremo libero della struttura. I problemi locali di contatto puntuale tra i conci (causati dal movimento degli archi) sono stati analizzati facendo variare lo spessore dei giunti di malta da un valore di riferimento derivante dalla pratica costruttiva ( $s = 6 \text{ mm}$ ) fino a simulare l'effettivo contatto, in corrispondenza della zona intradossale, tra gli elementi lapidei ( $s = 0 \text{ mm}$ ). I risultati delle analisi mostrano (nel caso  $s = 0 \text{ mm}$ ) un incremento delle massime tensioni di compressione di oltre il 500%, passando

Fig. 20  
Distribuzione delle tensioni principali di compressione:  
a) sisma in direzione x;  
b) sisma in direzione -x.

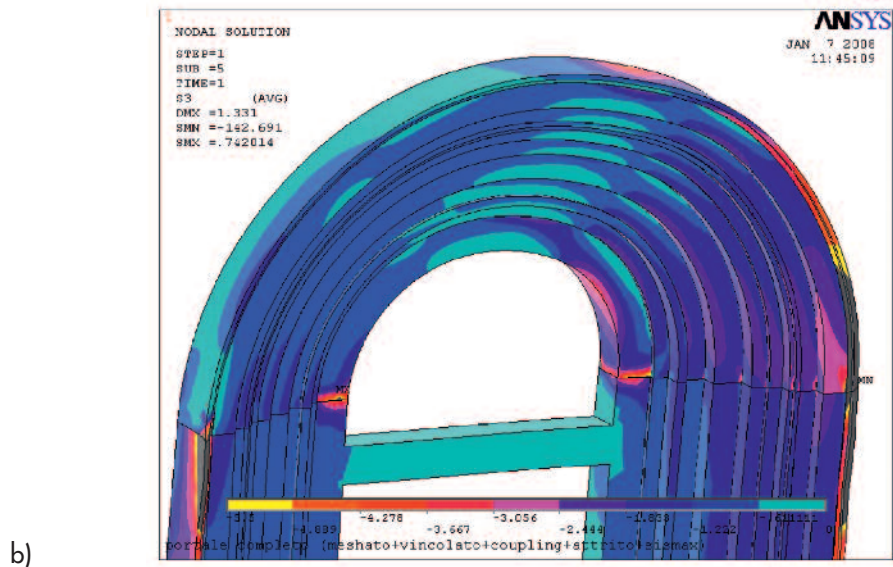
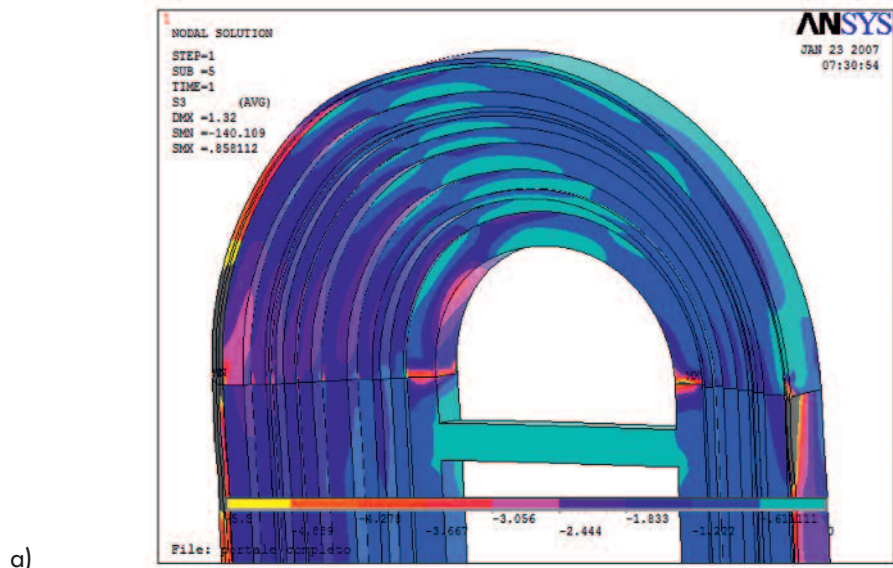
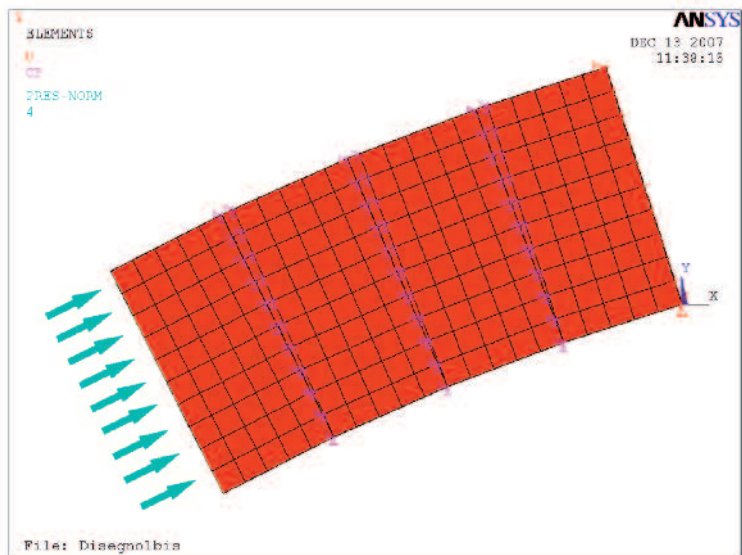
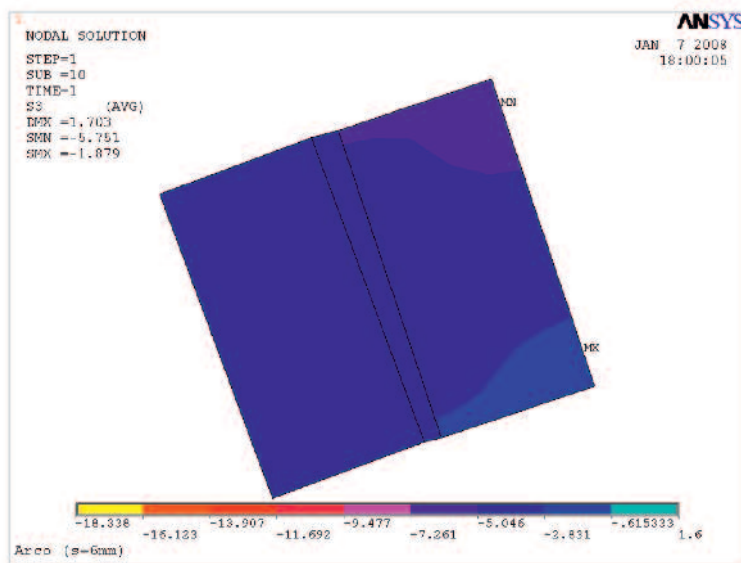
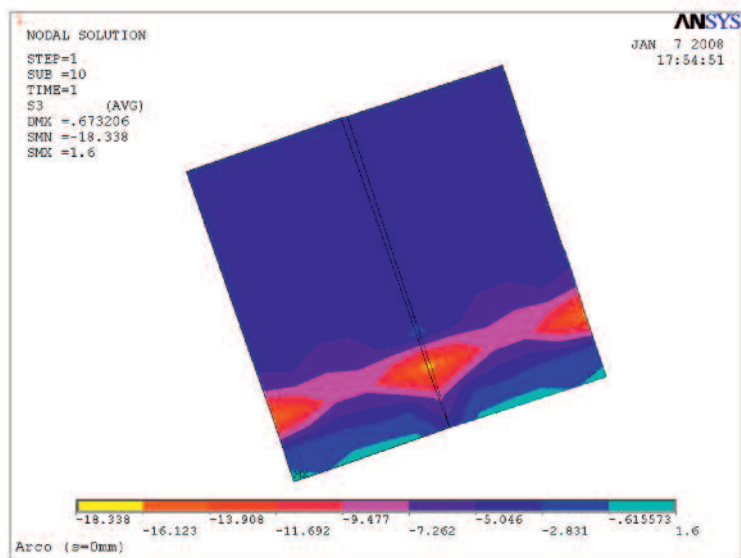


Fig. 21  
prospetto del modello  
utilizzato per l'analisi dei  
problemi locali dovuti ai  
contatti puntuali tra blocchi  
lapidei.





a)



b)

Fig. 22  
Massime tensioni di compressione:  
a)  $s=6$  mm;  
b)  $s=0$  mm.

da  $3.4 \text{ N/mm}^2$  a  $18.2 \text{ N/mm}^2$  (Fig. 22). Questo risultato, insieme al degrado delle caratteristiche meccaniche del materiale derivante dall'esposizione per secoli e secoli, spiega l'insorgere di lesioni proprio in queste zone maggiormente sollecitate a compressione.

## 6. Conclusioni

Per quanto riguarda i carichi statici, le analisi effettuate non hanno evidenziato particolari problematiche, mentre le analisi sismiche sono in grado di "spiegare" i quadri fessurativi in questione. Un successivo approfondimento dovrà svilupparsi secondo i seguenti indirizzi:

- considerare i problemi strutturali della parete muraria di Corso Vannucci (dove sono ben

In conclusione, quindi, le lesioni rilevate sul portale appaiono correlate a comportamenti meccanici conseguenti alla risposta della struttura alle sollecitazioni sismiche ed in particolare a problemi locali di contatto puntuale tra spigoli e conci.

- visibili lesioni di rilievo, anche antiche) e la loro influenza sul portale;
- determinare, tramite indagini di tipo sperimentale, l'influenza del degrado sulle proprietà meccaniche dei materiali costituenti il portale, per cercare di chiarire, per quanto possibile, quale differenza di comportamento ci si può attendere per gli elementi degradati che costituiscono il portale;

- individuare una strategia di intervento compatibile con i principi della conservazione, che consenta di salvaguardare il portale limitando quelle azioni “straordinarie” che, in particolari situazioni (sisma, cedimenti, ecc.), gli vengono trasmesse dalla muratura. Il portale non è, infatti, in grado di seguire “elasticamente”, senza danni, quelle condizioni deformative onerose che, in tali situazioni, gli vengono imposte dalla parete che lo ingloba;
- pianificare una serie di interventi volti a contrastare quei problemi locali di contatto puntuale tra spigoli e conci di cui si è detto, mediante l’interposizione tra i conci di un materiale (ad esempio il piombo, inserito mediante fusione) in grado di ripartire le azioni. Il quadro fessurativo rilevato, in assenza di interventi tesi a rimuoverne le cause, è infatti destinato ad un inevitabile riacutizzarsi in occasione di futuri eventi sismici.

### Ringraziamenti

Un particolare ringraziamento alla Dott.ssa Vittoria Garibaldi, Soprintendente per i Beni Architettonici dell’Umbria all’epoca dell’intervento, alla cui sensibilità ed intuizione si deve il coinvolgimento, accanto ai restauratori, di competenze come quelle degli strutturalisti, con la finalità di una ricerca approfondita delle

motivazioni alla base del danneggiamento. Si ringrazia inoltre il Geom. Raul Paggetta della Soprintendenza ai Beni Architettonici dell’Umbria e il Dott. Dino Sperandio della Coo.Be.C. s.r.l. per la loro importante e costruttiva collaborazione. Si ringrazia inoltre il Consorzio RELUIS che ha parzialmente supportato le analisi numeriche eseguite.

### Bibliografia

Ansys Structural Analysis Guide, Release 10.0, Ansys Inc.  
 Baratta M. (1901). I Terremoti d’Italia. Saggio di Storia, geografia e bibliografia sismica italiana. F.lli Bocca Editori, Torino.  
 Boschi E., Ferrari G., Gasperini P., Guidoboni E., Smriglio G. e Valensise G. (1995). Catalogo dei forti terremoti in Italia dal 461 a.C. al 1980. ING-SGA, Bologna, 970 pp.  
 Garibaldi V. (a cura di) (2006). Il Portale del Palazzo dei Priori di Perugia. Quattroemme s.r.l. Perugia, Italy.  
 Heyman J. (1982). The masonry arch, Ellis Horwood-

Wiley, West Sussex, UK.  
 Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (2002). Catalogo della sismicità italiana. Banche dati su terremoti. Web site: <http://emidius.mi.ingv.it>.  
 Manni A.C. (1986). S. Maria della Bruna. Nota sullo stato di conservazione, Spolegium: rivista di arte, storia, cultura, Vol. 28, 27.  
 Mastrodicasa S. (1993). Dissesti statici delle strutture edilizie. Hoepli editore, Italy.  
 Page A.W. (1978). Finite element model for masonry, J. Struc. Div., ASCE, Vol. 104 (8), 1267-1285.  
 Sperandio B. (2004). Delle pietre dell’Umbria da costruzione e ornamentali. Perugia, Italy.