

## **LA MECCANICA FENOMENOLOGICA PER L'ENIGMA DI NOTO**

A. TERTULLIANI<sup>1</sup>, G. VALENTE<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Roma.*

<sup>2</sup> *Dipartimento di Ingegneria delle Strutture, Acque e Terreno; L'Aquila.*

### **SOMMARIO**

I metodi di analisi possono essere collaudati sulla Chiesa Madre di Noto e sulla Chiesa di S. Nicolò l'Arena a Catania che hanno problemi strutturali esasperati. La cupola della chiesa di Noto ha già subito tre crolli, essa ha invariati: geometria, muratura non armata, mancato uso delle leggi costitutive. Nelle due chiese siciliane, sembrerebbe verificarsi la fortuna scientifica di documentare chiaramente tutti gli azzardi, equivoci ed abbagli verificatisi col MdM. I monumenti vanno analizzati con l'interazione del terreno; assume importanza l'identificazione dinamica. Fin dagli anni '80 era affidabile la Meccanica dei Geomateriali (MdG), che riproduce nell'analisi i fenomeni sperimentali. La coerenza fra prove sperimentali, analisi e MdG consente di migliorare molto la diagnosi ed il progetto. Attualmente esistono i computers per il progetto con tutti i g.d.l. di un intero monumento.

### **ABSTRACT**

The analytical methods may be verified on the Chiesa Madre in Noto and the Chiesa S. Nicolò l'Arena in Catania that have exasperated structural problems. The dome of the church in Noto collapsed three times in the past; it has unchanged: geometry, unreinforced masonry, unused constitutive laws. In these churches, it would seem to have the scientific luck to document all the misunderstandings, dazzlings and hazards due to MdM. The monuments must be analyzed with soil interaction; and dynamic identification is very important. But since 80's the Geomaterials Mechanics were available, it reproduces the experimental phenomena in the analysis. The coherency between tests, analysis and MdG allows to improve diagnosis and project. Actually computers are available for the project with all d.o.f. of a monument.

### **1. INTRODUZIONE**

I problemi strutturali dei monumenti sono fra i più impegnativi, per le seguenti caratteristiche: 1) le strutture sono ammalorate con basso PGA di collasso; 2) la prescrizione di interventi non invasivi e rimovibili; 3) l'auspicio di conservazione indefinita nel tempo, che aumenta il rischio sismico; 4) l'impossibilità di elaborare una normativa appropriata; 5)

l'incontrollabilità da parte della committenza dei problemi e degli eventuali interventi; 6) la responsabilità dei monumenti principali che sono italiani solo geograficamente.

Studiando due chiese siciliane emblematiche, emergono due metodologie molto diverse: a) sono diffusi metodi approssimati rapidi e facili; essi creano equivoci perché qualsiasi professionista può applicarli, incorrendo sempre in abbagli nella diagnosi ed azzardi nel progetto; quindi sono potenzialmente pericolosi e non andrebbero mai usati da soli; b) l'analisi non lineare dell'interazione terreno-struttura, coerente con prove sperimentali e meccanica fenomenologica; matura dagli anni '80, riduce le imprecisioni a) di un ordine di grandezza; solo per ricercatori di ingegneria, impegnativa come la costruzione di un videogioco.

Perdura l'enigma della Chiesa Madre di Noto, risultando invariabili finora: geometria della cupola, uso dei soli metodi a), collasso sismico col  $PGA=0,300$  per ogni progetto e diagnosi; a fronte dei crolli nel 1780, nel 1848 col  $PGA=0,100$ , nel 1996 in assenza di sisma. Nella presente nota, si propone la verifica delle metodologie per la diagnosi ed il progetto di interventi sui monumenti.

## 2. MANCANZE ED ABBAGLI NELLA DIAGNOSI

La diagnosi di vulnerabilità sembrerebbe da sempre latente. Per la Chiesa Madre di Noto:

1) fra la riapertura al culto nel 1862 ed il dopoguerra degli anni '50, fu aperto un vano (a circa 1,30 m dal pavimento) nel quarto pilastro (dal retrospetto), rivolta alla navata destra, per il pulpito, verso la navata centrale (a circa 3,00 m dal pavimento della chiesa) con la contemporanea parziale tamponatura dell'analogo vano presente nel pilastro 4 lato sinistro;

2) nel 1986, Sovrintendenza di Catania, Prof. Rosario Viola, *“evidenti segni di dissesto principalmente nel prospetto architettonico e nella zona del transetto”*;

3) nel 1986, Comune di Noto, Ing. Giovanni Lavore, *“si ritiene che il fenomeno fessurativo relativo alla trabeazione, se non controllato, potrebbe degenerare in irreversibili fenomeni di parziale collasso”*;

4) il G.C. di Siracusa nel Febbraio 1992, fa eseguire anche *“il puntellamento di forza del varco all'interno della colonna portante il pulpito”*, solo parzialmente eseguito;

5) nel 1992, la dichiarazione di inagibilità e la sua revoca nello spazio della seconda metà di Febbraio; gli uffici tecnici sembrano disorientati;

6) nel 1992, Sovrintendenza di Siracusa e tecnici dell'Impresa Rodio, *“improvviso aggravarsi della situazione statica dei pilastri della navata destra .. distacchi di intonaco in diversi punti probabilmente causati da schiacciamento colonne”* a partire dal pilastro 4 con passaggio interno per il pulpito;

7) nel 1992, *“visibile vegetazione .. acqua piovana raccolta in appositi recipienti”*;

8) nel 1994, progetto di massima di miglioramento della resistenza sismica, *“terremoto del 13.12.90 .. le lesioni apparse all'indomani della scossa si allargarono sensibilmente col passare del tempo, dimostrando così una sorta di instabilità della configurazione da esse prodotta .. il quadro che esse disegnano prefigura con chiarezza il meccanismo di collasso che deve essere temuto .. inclinazione di circa 6 cm verso l'interno .. tutti i pilastri del lato destro .. in misura crescente dalla facciata verso il transetto”*; ma per il MdM si dichiara[5] *“il sisma non disintegra in modo disordinato .. ma seleziona le parti .. più deboli .. mediante meccanismi definibili in anticipo”*, ma ciò potrebbe indicare un abbaglio dovuto alla solita valutazione del collasso sismico col  $PGA=0,300$ , mentre la sola gravità produsse il terzo crollo due anni dopo.

Analogamente, da “Catania Terremoti e Lave” [8] a pag.275, “*dopo il crollo della cupola e del tetto della Chiesa Madre di Noto, avvenuto il 13 marzo 1996, il Genio Civile di Catania valutò le condizioni statiche della grande Chiesa di S. Nicolò l’Arena .. visto il quadro fessurativo dei due pilastri antistanti la facciata (vi erano lesioni parallele ad andamento sub-verticale) .. fu dato un parere di inagibilità .. chiusura al pubblico*”; con la chiusura per timore dopo il crollo di Noto e la riapertura per rassegnazione alla fatalità.

### 3. CONTRADDIZIONI SUL PGA DI COLLASSO

E’ possibile valutare la vulnerabilità sismica per: a) la seconda cupola crollata nel 1848, b) la ricostruzione attuale. Per il crollo del 1848 a Noto, i terremoti incriminati sono ampiamente documentati, da fonti convergenti, Tabella I e Figura 2; si scelgono a sfavore di sicurezza: l’intensità sismica della fonte bibliografica (in grassetto), le tolleranze “Δh” sulla profondità “h” e “ΔD” sulla distanza epicentrale “D”.

Si usa la formula di attenuazione (1), attendibile perché è tarata sui terremoti locali, e riconducibile ai progettisti della ricostruzione in corso [3].

$$\log \text{PGA}(\text{cm}/\text{sec}^2) = 2,75 + 0,07 I_{\text{MCS}} - 0,80 \log R(\text{km}); \quad \text{con } R = [(D-\Delta D)^2 + (h-\Delta h)^2]^{1/2} \quad (1)$$

Si ottiene un limite superiore del PGA di collasso pari a 0,113g ; laddove, con la normativa vigente, dovrebbe essere garantito un comportamento elastico lineare.

Risultati ancora inferiori si ottengono con una più recente formula di attenuazione [32].

Data	D Km	Epicentro					A Noto		Rif.
		MCS	Lat.	Long.	Località	M <sub>k</sub>	PGA	MCS	
<b>20.02.1818</b>	<b>78</b>	IX-X	37.60	15.12	Catania	6.4	<b>0.088</b>	<b>V</b>	[4]
		IX-X	37.60	15.130		6.0			[9]
		<b>IX-X</b>	<b>37.602</b>	<b>15.141</b>		<b>6.3</b>			<b>[10]</b>
<b>01.03.1818</b>	<b>42</b>	VII-VIII	37.200	14.750	M.Iblei	5.5	<b>0.113</b>		[9]
		<b>VII-VIII</b>	<b>37.173</b>	<b>14.803</b>		<b>5.9</b>			<b>[4]</b>
<b>08.09.1818</b>	<b>138</b>	VII-VIII	37.820	14.080	Madonie	5.0	<b>0.039</b>		[4]
		<b>VII-VIII</b>	<b>37.820</b>	<b>14.080</b>		<b>5.0</b>			<b>[9]</b>
<b>11.01.1848</b>	<b>53</b>	VII-VIII	37.541	15.094	Augusta	5.5	<b>0.107</b>	<b>VI-VII</b>	[4]
		VII-VIII	37.366	15.154		5.4			[10]
		<b>VIII-IX</b>	<b>37.367</b>	<b>15.154</b>		<b>5.3</b>			<b>[9]</b>

**Tabella 1.** Terremoti più significativi per il secondo crollo del 1848.

Per la ricostruzione attuale, in [6, 17, 18], si usa il MdM in 2D di Fig. 3, ed una indagine parametrica sulla resistenza a trazione, pervenendo ad un PGA circa triplo di quello del 1848:

*“una seconda serie di indagini parametriche, stavolta relativa alla resistenza a trazione .. considerando che la resistenza appare troppo cautelativa, che 1,5 potrebbe essere il valore giusto .. e che anche 2,5 appare assai plausibile..la resistenza al sisma appare ragionevolmente sufficiente, senz’altro dell’ordine di 0,30 e probabilmente di più”.*

Le attuali analoghe analisi per la chiesa di Catania concludono “*la apposizione dei suddetti incatenamenti innalza il moltiplicatore di collasso della navata da 0,23g a 0,27g e quello della cupola da 0,22g a 0,25g*”; sono presenti fessurazione serie nei pilastri e nella cupola.

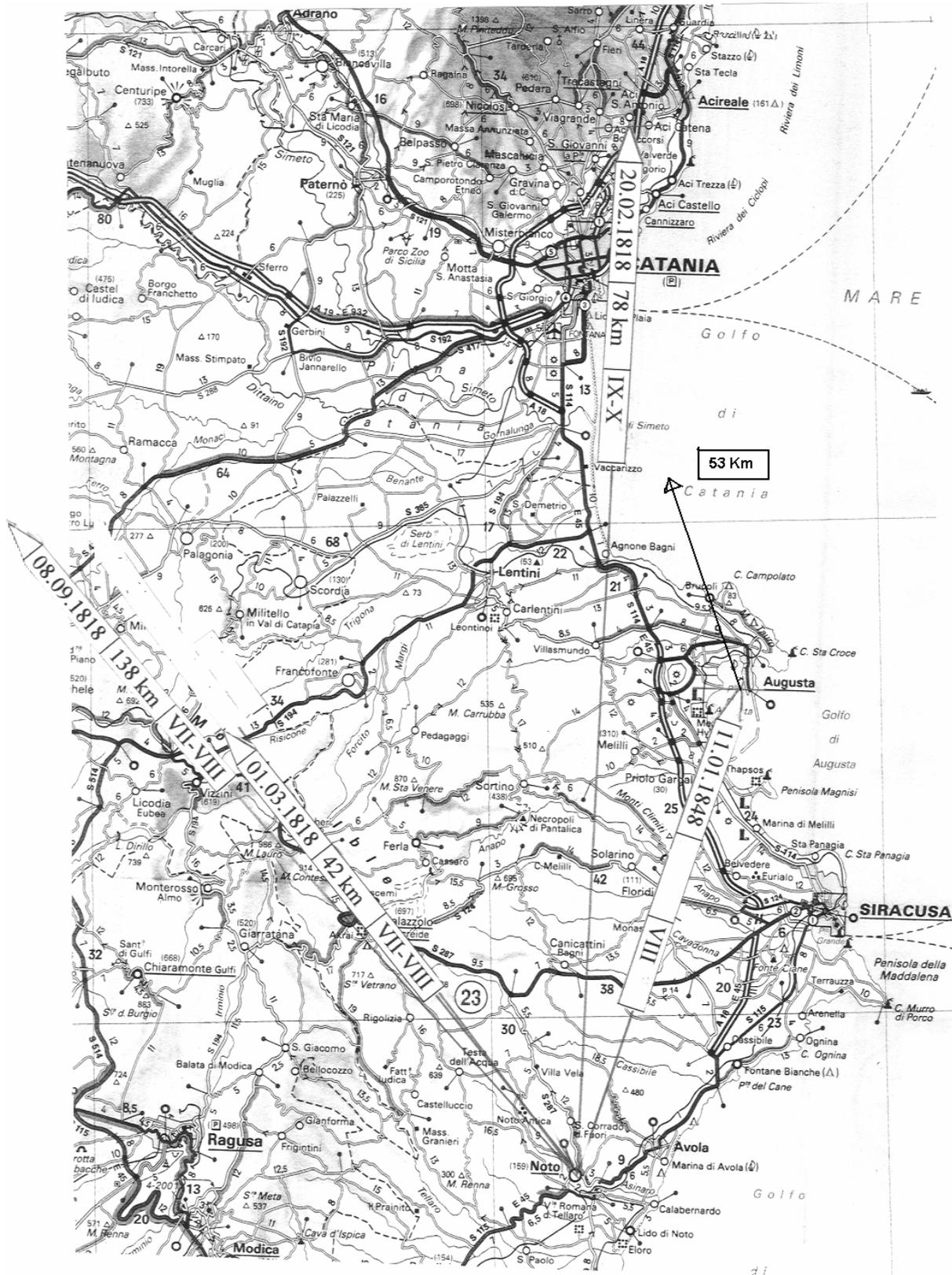
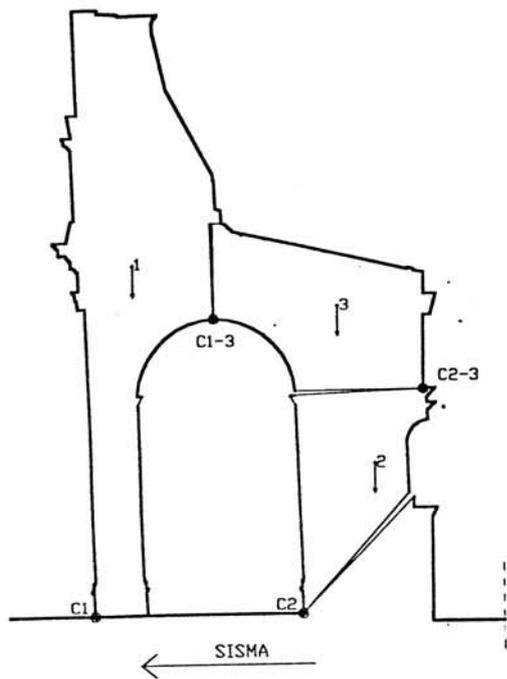
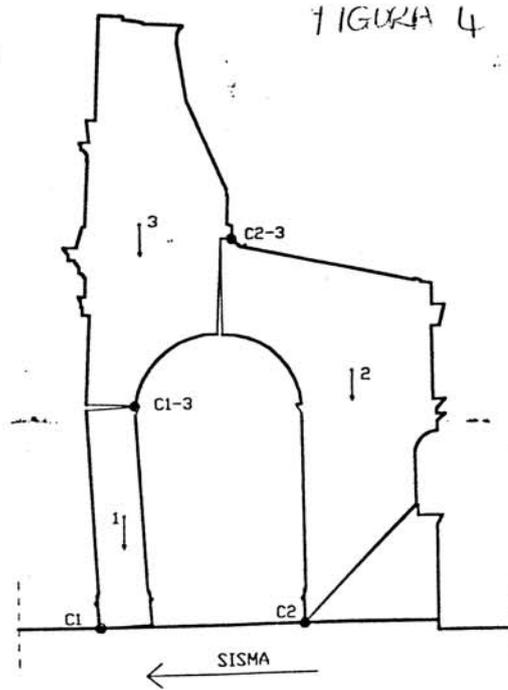


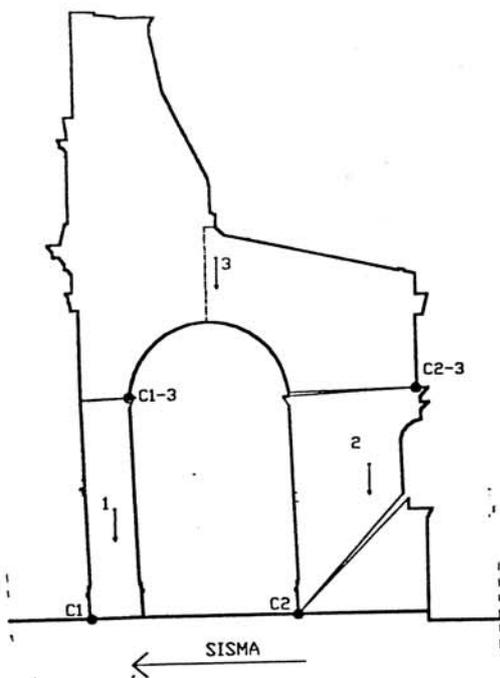
Figura 2. Epicentri sismici del XIX secolo nella Sicilia sud-orientale.



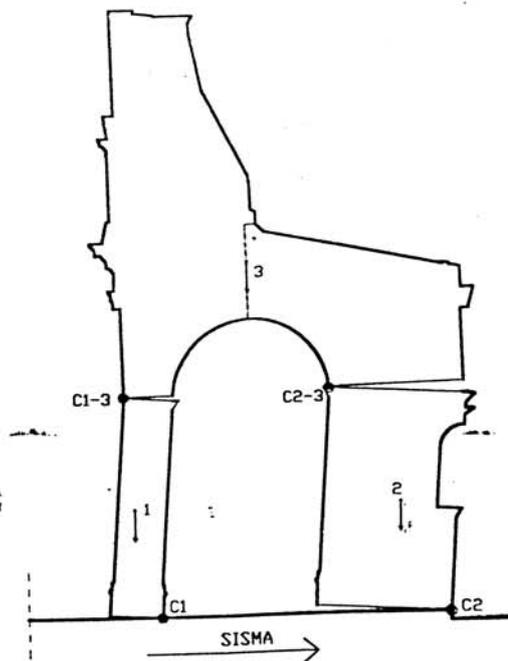
Meccanismo 1  
 $\lambda = 0.30$



Meccanismo 2  
 $\lambda = 0.32$



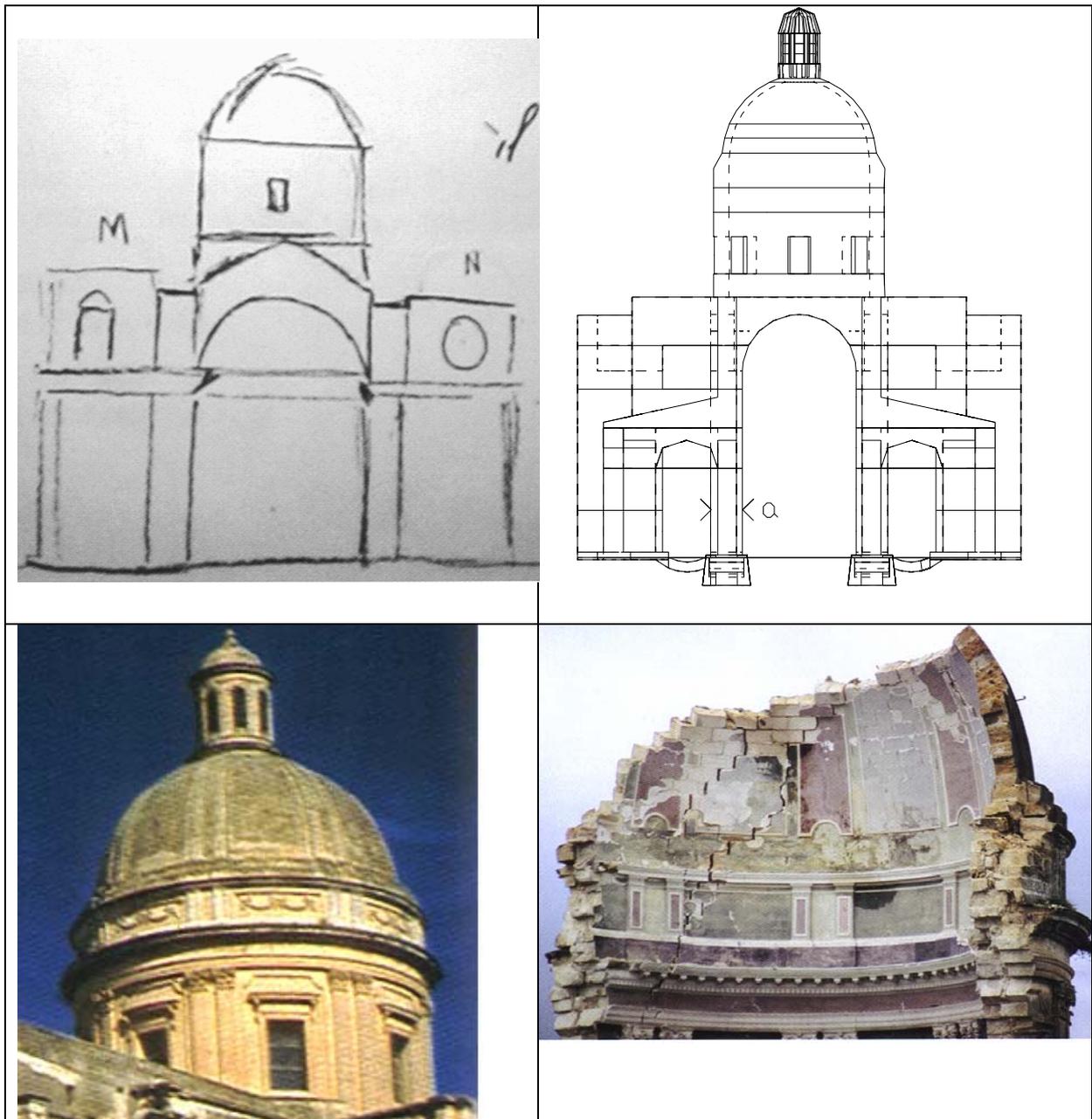
Meccanismo 3  
 $\lambda = 0.31$



Meccanismo 4  
 $\lambda = 0.59$

Figura 3. Ipotesi di meccanismi possibili e relativi moltiplicatori di collasso da [6, 17, 18].

#### 4. L'ENIGMA DI NOTO



**Figura 1.** Le cupole: a) schizzo di Dufourny, della seconda crollata nel 1848; b) la quarta in costruzione; c) la terza col fregio della prima; d) la terza dopo il crollo del 1996.

La Chiesa Madre di Noto ha già subito crolli nel 1780, nel 1848 col  $PGA=0,100$ , nel 1996 in assenza di sisma; con progetti attribuibili a Gagliardi, Ittar e Cassone, rispettivamente [2, 6].

Mentre fino ad oggi, risulta l'invariabilità di geometria della cupola, muratura non armata, uso del MdM col  $PGA=0,300$  per ogni diagnosi e progetto:

a) Tobriner parla della terza cupola del Cassone ([2], pag. 216, nota 18) *“Attribuisco il progetto originale di S. Nicolò a Gagliardi .. la parte alta del rinforzo della prima cupola che esiste ancora (sebbene la cupola sia crollata) .. ha un fregio con modanatura, segno indiscutibile della presenza di Gagliardi”*;

b) l'architetto francese Leon Dufourny visitando la città nel 1789 ([7], pag. 51) scriveva della cupola crollata *“per fare ammenda l'architetto Stefano Ittar..cambiò semplicemente la forma delle finestre a battente vicino agli archi di volta su cui deve essere eretta la nuova cupola, da quadrate o romanesche che erano, ad ovali”*, come dal suo schizzo;

c) i progettisti della ricostruzione ([7] a pag. 76) *“ad essere ricostruita sarà la cupola crollata il 13 marzo '96 .. la terza, costruita su progetto del Cassone .. il tamburo fu anch'esso ricostruito da Cassone nello stesso intervento di riedificazione della cupola, demolendo quello precedente che aveva uno spessore di oltre 2 metri e sostituendovi quello attuale, di buona muratura isodoma e per questo di solo 1,40 metri .. Del tamburo potrà essere infatti mantenuta sul posto la gran parte di ciò che non è crollato”*.

## **5. INTERAZIONE TERRENO-STRUTTURA**

I moduli di elasticità del terreno e della elevazione non sono molto distanti.

Il comportamento del monumento è molto diverso se considerato da solo o con l'interazione del terreno, e va trattato in questa seconda maniera [29..31].

I terreni possono avere comportamenti teorizzabili con: Drucker-Prager, Mohr-Coulomb, Cam-Clay; ma anche avere comportamenti qualsiasi, sempre analizzabili con l'ipoeleasticità.

## **6. MODELLO FISICO IN SCALA**

Nel 1937, P.L. Nervi proponeva la soluzione migliore quando lo perorava in [12].

Pensando alla conservazione indefinita dei monumenti, tutti sono esposti al rischio sismico; essi hanno un PGA di collasso basso (es. 0,10g) da innalzare (es. 0,25g).

Sono coinvolte le scale: geometrica, meccanica, sismica (nella casetta di Pavia furono alterati i tempi [11]), delle resistenze, e con domini di resistenza necessariamente diversi per i due materiali terreno e struttura; producendo l'incomunicabilità fra il modello ed il caso reale.

## **7. AZZARDI NELLA PROGETTAZIONE COL M.D.M. DA SOLO**

Esso sembrerebbe un modello metafisico [8] perché non usa le leggi costitutive, verifica solo l'equilibrio alla rotazione, e si basa su di un coacervo di ipotesi che sono:

1. carichi orizzontali statici, (dinamici);
  2. carichi orizzontali monotoni, (alternati);
  3. accelerazione orizzontale costante lungo l'altezza, (crescente);
  4. resistenza a trazione nulla, (è imprescindibile già per garantire la forma con la gravità);
  5. elevazione incastrata alla base, (interazione terreno struttura);
  6. generazione di macroelementi mediante tagli piani liberi, (superando le resistenze interne, il danneggiamento reale è diffuso ed articolato nello spazio);
  7. trasformazione del problema da 3D a 2D, praticamente si arriva ad un arco a 4 cerniere (il barocco siciliano è in 3D, la cupola di Catania ha danni gravi da vibrazioni torsionali);
  8. uso delle sole equazioni di equilibrio, trascurando congruenza e leggi costitutive, (granito o gesso, integro o danneggiato, sempre lo stesso moltiplicatore di collasso);
  9. introduzione di cerniere plastiche, (concentrazioni di tensione impossibili).
- Fra parentesi, è indicata la problematica reale.

A difesa della cultura corrente, si ripete quanto espresso da Di Pasquale nel 1986 [12]:

a) “ *qu’il n’emploiera plus soixante pages de calcul pour arriver à une conclusion qu’on établir par un raisonnement de dix lignes*“ ;

b) “ *.. varietà di vincoli iperstatici .. vincoli capaci di reagire solo in un senso .. una meccanica di tali solidi – e dunque delle murature – non è disponibile neppur oggi*”;

c) “ *non si può dare una risposta al quesito concernente l’origine delle fessure .. per le ossature murarie si sa tanto poco da rasentare il nulla*”.

Quindi, il professionista azzarda la soluzione, allegando: a) un’analisi di modesto impegno, b) prove sperimentali inutili perché non usa le leggi costitutive, c) grafici incoerenti.

Interventi grossolani alterano la mappa delle rigidzze, accelerando il degrado.

Con la sensibilità attuale per la conservazione indefinita dei monumenti, su tutti essi incombono i rischi sismico; e quindi il MdM da solo, sembrerebbero inopportuno.

## 8. PROGRESSI DOPO L’ILLUMINISMO

Fra gli anni ’30 e ’40, fessure instabili nel materiale fragile producevano catastrofi inspiegabili di ponti, serbatoi e di 700 navi Liberty in acciaio, pur progettati secondo Scienza e Normativa; allora una teoria che riusciva a risolvere i problemi fu inserita nelle Norme.

Nel 1955 Truesdell [1] teorizzò l’ipoelasticità che può seguire ogni legame costitutivo con una poligonale tangente, si accumula uno scarto riassorbibile con le iterazioni di equilibrio.

Diventa così sempre possibile la soluzione numerica per qualsiasi legame costitutivo, per qualsiasi struttura discretizzata con EE. FF., per qualsiasi legge di carico.

Nel 1955, L’Hermite scoprì sperimentalmente l’Effetto Scala [13]; provini omotetici a sezione quadrata, con lato “a”, lunghi 4a, dello stesso cls, soggetti al “Three Points Bending Test” di Figura 5b, mostravano una tensione nominale al collasso ( $P_U$ ) decrescente con “a”:

$$M_U = P_U (4a)/4; \quad \sigma_N = 6 M_U / a^3 = 6 P_U / a^2 = f(a) \quad (2)$$

Intorno al 1960, il fenomeno divenne esplicabile solo se per la trazione uniassiale si ammetteva un comportamento strain-softening, secondo il “Crack Band Model”, con: a) resistenza a trazione  $\sigma_T = \text{cost}$ ; b) banda fessurata  $w \approx 3 d_A = \text{cost}$ ; c) energia di frattura  $G_F = \text{cost}$ .

Intorno al 1980, Hawkins e Reinhardt avevano ampiamente dibattuto l’opportunità della MdF nella progettazione corrente [14, 15, 16]:

1) tale Meccanica è così complessa che non può essere affrontata con formule empiriche e tabelle o essere disciplinata da una Normativa, quindi è uno strumento di esclusiva ricerca specialistica, la cui onerosità è giustificata per i monumenti.

2) i modelli fenomenologici del cls e della muratura vengono estesi ad altri materiali simili quali le rocce, il terreno, il ghiaccio marino.

Tale cultura fu poi sviluppata ed approfondita da:

a) la scuola del Prof. Z. Bazant, col “Center for Concrete and Geomaterials” alla Northwestern University in Evanston, Illinois, fra gli anni 1970 e 1980, dopo una ricerca infruttuosa di una teoria unitaria (endocronica, micropiani, plastic-fracturing), approfondì tutti i singoli fenomeni con T.B. Belitschko, O. Carol, L. Cedolin, T.P. Chang, P. Gambarova, J.K. Kim, F.B. Lin, B.H. Oh, J. Ozbolt, G. Pijaudier-Cabot, P. Pfeiffer, P. Prat, A. Zubelewicz, e molti altri, con centinaia di lavori su confronti numerico-sperimentali;

b) la RILEM ha evidenziato la complessa fenomenologia della MdF, con: prove per l’energia di frattura in trazione [35], convegni su micro e macro-elementi (Simposio a Mexico

city 1966, Workshop in Svezia 1989, Conferenza a Nordwijk in Olanda 1991, Comitati tecnici di Londra 90-FMA del 1989 e 89-FMT del 1991, prove raccomandate in [34] e succ., round robin sul pull-out col Report del 1998 e [24];

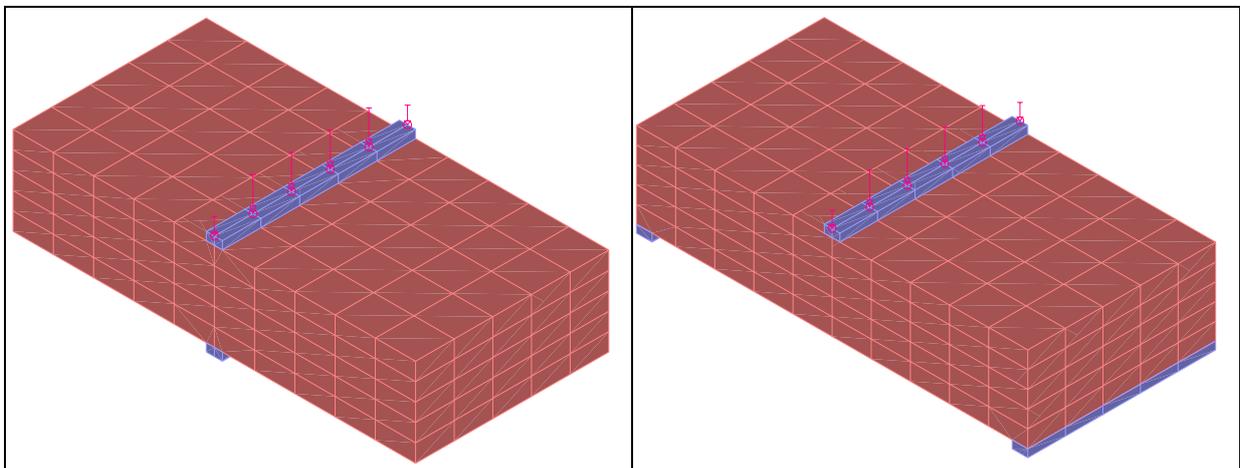
c) le Conferenze di: CMEM del Wessex Institute of Technology, del 1995 a Capri, del 2001 ad Alicante; University College of Swansea, Spalato 1984, S. Antonio in Texas del 1987, SCI-C Zell an See in Austria del 1990, EURO-C ad Innsbruck del 1994; IABSE, a Stoccarda nel 1991; SMiRT; FDCR a Vienna, nel 1987 e 1992; European Group of Fracture; FraMCoS;

d) il CEB che costituì diversi Task Groups per la MdF [28];

e) i numerosi e raffinati contributi numerici e sperimentali sulle riviste: 1) Deutscher Ausschuss für Stahlbeton fra gli anni '60 e '70, 2) Heron del TU di Delft fra gli anni '70 e '90.

Attualmente lo sviluppo dei computers consente di governare l'elevato numero di g.d.l., ed una complessa storia di carico di tipo sismico, per un intero monumento.

## 9. M.D.G. UTILIZZABILE DA RICERCATORI DI INGEGNERIA



**Figura 5.** Prove sperimentali e micro-modellazione [26] di: **a)** splitting; **b)** flessione.

Tale problema culturale può essere risolto da ricercatori di ingegneria, con grande impegno artigianale, usando rigorosa coerenza fra la MdG, le prove sperimentali, l'analisi.

Occorre il controllo numerico-sperimentale di tutti i fenomeni, anche con subroutines esterne da linkare al codice [19,.. 28] per: compressione biassiale con strain-softening, frattura, ingranamento, deformazioni nonlocali, passaggio dal mezzo eterogeneo al continuo omogeneizzato, path dependency, influenza della granulometria, ipoelasticità, effetto scala, "Crack Band Model", muratura con inerti irregolari o squadrati, analisi statica o dinamica.

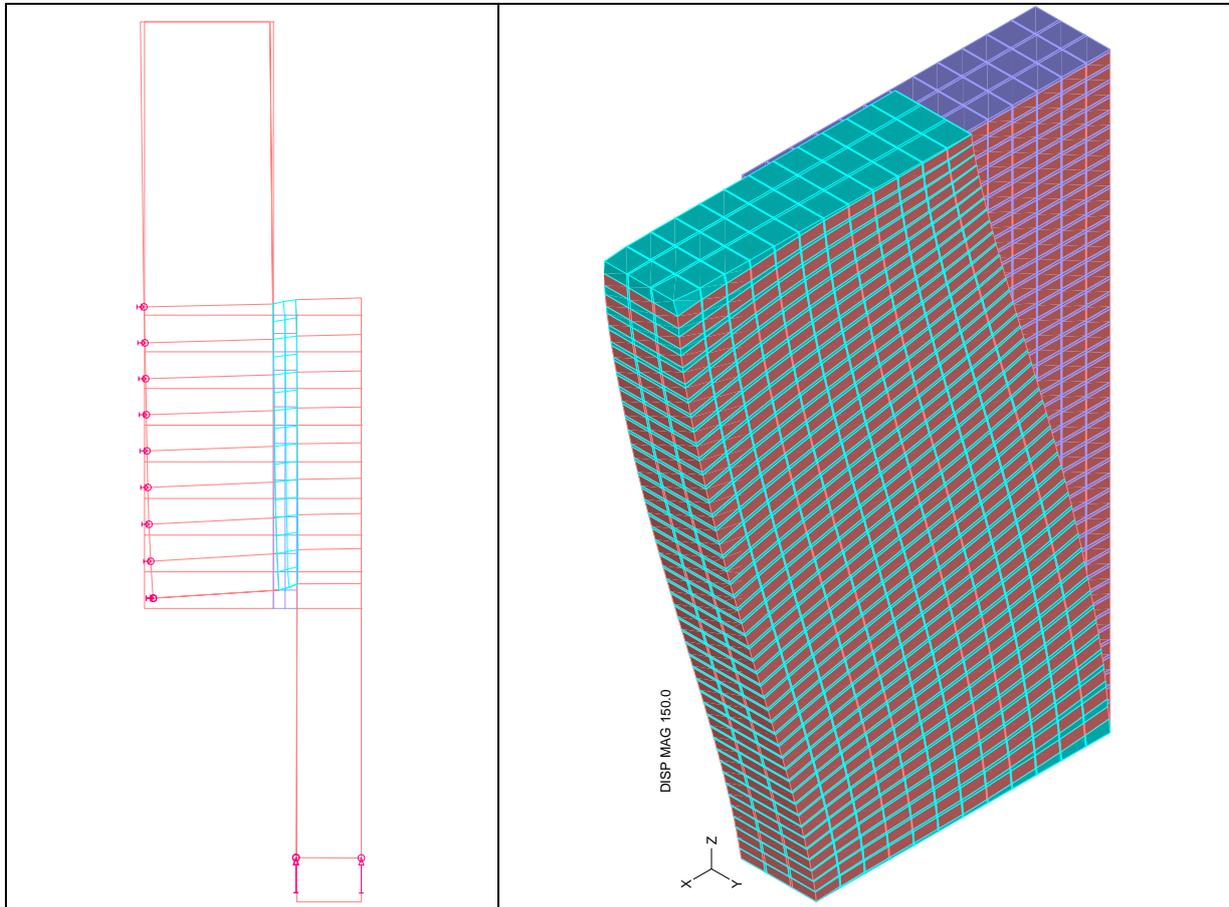
Per il progetto di una nuova costruzione come la Chiesa Madre di Noto, per la parte con muratura in pietrame squadrato, si può procedere come per la casetta di Pavia [ 25, 26].

Nel seguito le sigle A.1 .. C.3 indicano le prove RILEM [34] eseguite da [33], la parentesi quadra [] si riferisce alle analisi al collasso corrispondenti eseguite; le prove furono:

- 1) mattoni, compressione A.1 [20], trazione indiretta (brasiliana) A.3 [22], Figura 5a,
- 2) malta, trazione per flessione su provini 4 x 4 x 16 mm A.7 sui mezzi provini ottenuti dalla prova precedente [21], Figura 5b, trazione indiretta (brasiliana) A.3 [22] Figura 5a, e compressione A.6 [20];

e si costruiscono appropriati provini con gli stessi materiali precedenti:

- 3) tripletta, con carichi verticali costanti di 0.12, 0.4, 0.8, 1.25 MPa e poi soggetta ad azione orizzontale crescente, per ricavare la legge  $\tau/\sigma$  al collasso B.3, [26], Figura 6a;
- 4) muro di dimensioni 250 x 680 x 765 mm con compressione crescente B.1 [26];
- 5) pannello di dimensioni 380 x 1500 x 3000 mm con compressione verticale costante, e poi assoggettato in sommità ad azione orizzontale crescente col vincolo di rotazione e traslazioni verticali impedito C.3 [26], Figura 6b.



**Figura 6.** Prove sperimentali, micro e macro-modellazione [26] di: **a)** mezza tripletta ruotata 3); **b)** pannello 5).

Le analisi al collasso furono eseguite con: a) la micro-modellazione per i due materiali dei blocchi quadrati e della malta, per i n. 5 provini precedenti; b) la macro-modellazione che considera un unico materiale omogeneizzato, per il muro 4) ed il pannello 5).

Ricercando la migliore sovrapposizione delle curve carico-deformazioni con i confronti numerico-sperimentali di queste n. 5 prove si ricavano n. 3 gruppi di caratteristiche meccaniche, dei due materiali e per la macro-modellazione [26], che sono: modulo di elasticità iniziale  $E$ , resistenza a trazione  $\sigma_T$ , resistenza a compressione  $\sigma_C$ , resistenza ultima  $\sigma_U$ , allungamento a compressione  $\varepsilon_C$ , allungamento ultimo  $\varepsilon_U$ , energia di frattura  $G_F$ .

Analogamente per la tripletta 3) ed il pannello 5), si risolvono attrito ed ingranamento.

Non tutte le meshes sono adatte per le analisi nonlineare e dinamica; prima bisogna applicare la gravità che produce fenomeni nonlineari che potrebbero non convergere, poi si rischia di tagliare alcune frequenze nell'analisi dinamica.

Analogamente si può procedere per la muratura di Noto con inerti irregolari [19 .. 28].

Nel caso del progetto per un monumento esistente come la Chiesa di S. Nicolò l'Arena, occorre eseguire con cura il rilievo geometrico e l'identificazione dinamica (in itinere [31]), analoghe operazioni furono proposte per la Chiesa di Collemaggio [29] ed il Colosseo [30].

Con adeguata esperienza, si possono risolvere le problematiche dei paragrafi precedenti:

a) l'enigma della Chiesa Madre di Noto; b) le tolleranze di progettazione si riducono di un ordine di grandezza, specie nell'ex novo; per opere già esistenti, con la mappa dei moduli di elasticità dall'identificazione dinamica, si ipotizzano le caratteristiche meccaniche, e si analizzano i danneggiamenti del passato.

Per la diagnosi di un monumento esistente; la fessurazione ed i fuori piombo crescenti sono con le culture: c) del MdM, la prefigurazione del meccanismo di collasso per la gravità ed un eventuale futuro e remoto sisma distruttivo; d) della MdG, esercitata con i confronti numerico-sperimentali di cui sopra, il fenomeno di degrado in progresso per la sola gravità, e ci si potrebbe accorgere della necessità di un intervento immediato.

## 10. CONCLUSIONI

Se la diagnosi è latente, il medico non prescrive la cura; così per i monumenti, la progettazione col MdM è un grosso azzardo.

I metodi diffusi sono il Metodo dei Meccanismi (MdM) del '700, le prove sul modello in scala, l'analisi elastica lineare e la Meccanica dei Geomateriali (MdG); escludiamo subito l'analisi lineare perché siamo interessati al controllo del PGA di collasso, che non può essere effettuato senza un'analisi al collasso.

Tali metodi possono essere collaudati su tali due chiese che hanno esasperati: l'altezza fino a 61 m, i terremoti con prescrizione al collasso fino al  $PGA=0,30$ , i materiali non eccellenti, l'articolazione nello spazio per il barocco siciliano; ed i metodi approssimati danno problemi.

Ciò dimostrerebbe che i metodi approssimati non possono garantire la tutela dei monumenti, e sussiste un problema culturale da risolvere.

Tutti i guai nascono dal voler risolvere i problemi più difficili con i metodi più facili, essi non dovrebbero mai imputarsi ai professionisti, e riterrei che sono superabili solo con la MdG, risolvendo anche l'enigma di Noto.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Truesdell C.: Hypo-elasticity, *Journal of Rational Mechanics Analysis*, Vol.4, 1955, pp. 83-133.
- [2] Tobriner S.: La Genesi di Noto, Dedalo, 1989.
- [3] Decanini L., Gavarini C., Mollaioli F.: Sui Parametri relativi alla Definizione dei Terremoti di Progetto negli Studi di Pericolosità Sismica, Convegno Terremoti in Italia, Accademia dei Lincei, Roma, Dicembre 1994.
- [4] E. Boschi G., Ferrari P., Gasperini E., Guidoboni G., Smriglio G., Valensise, Catalogo dei forti terremoti in Italia dal 461 a.c. al 1980, Istituto Nazionale di Geofisica, Roma, 1995.
- [5] Giuffrè A., Carocci C., Ceradini V., De Benedictis R., De Felice G., Pugliano A., Zampilli M.; e con Baggio C., Boschi E., Guidoboni E., Mariotti D., Trovalusci P., Sicurezza e conservazione dei Centri Storici - Il Caso Ortigia, Laterza, 1999.
- [6] Comune di Noto: "Ricostruendo la Cattedrale di Noto e la Frauenkirche di Dresda", Atti del Seminario internazionale tenutosi a Noto in Febbraio 2000, L.C.T. edizioni, 2001.
- [7] De Benedictis R., Tringali S.: La Ricostruzione della Chiesa Madre di Noto, L.C.T. , Febbraio 2000.
- [8] Boschi E., Guidoboni E.: Catania Terremoti e Lave dal mondo antico alla fine del Novecento, (INGV-SGA), ed. Compositori, Bologna, 2001
- [9] CPTI (1999): Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani. ING, GNDT, SGA, SSN, Bologna 1999, 92 pp.
- [10] Barbano M.S., Rigano R.: Earthquakes sources and seismic hazard in Southeastern Sicily, *Annali di Geofisica*, vol. 44, 723-738, 2001.

- [11] Costley A.C., Abrams D. P., Calvi G. M.: Shaking table of an unreinforced brick masonry building, Proceedings of the 5<sup>th</sup> National Conference on Earthquake Engineering, Chicago, pages 127-135, 1994.
- [12] Di Pasquale S.: L'uso dei modelli nella costruzione della cupola di S. Maria del Fiore, Università di Firenze, Facoltà di Architettura, Pubblicazione 26/1984.
- [13] L'Hermitte: Annales ITBTP, 1973, N. 309-310.
- [14] Reinhardt H.W.: The role of fracture mechanics in rational rules for concrete design, *IABSE I/1986*.
- [15] Hawkins N.M.: The role for fracture mechanics in conventional reinforced concrete design, in Application of fracture mechanics to cementitious composites, edited by S.P. Shah, Northwestern university, Evanston, Illinois, September 1984.
- [16] Hawkins N.M., Wyss A.N., Mattock A.H.: Fracture Analysis of cracking in concrete beams, *J.Str.Div. ASCE 103/1977, ST5*, pp. 1015-1030.
- [17] Tringali S., De Benedictis R., La Rosa, Russo, Bramante, Gavarini, Ceradini, Tocci, Tobriner, Maugeri, Binda, Baronio, Valente: La Ricostruzione della Cattedrale di Noto, Int. Conference ERES 2001, Catania.
- [18] Tringali S., De Benedictis R., La Rosa, Russo, Bramante, Gavarini, Ceradini, Tocci, Tobriner, Maugeri, Binda, Baronio, Valente: The reconstruction of the cathedral of Noto, *Computer Building Mechanics*, 2002.
- [19] Valente G.: Fracture Mechanics for the reconstruction of Noto Cathedral, *Computer Building Materials jrn.*, Elsevier Science Ltd, UK, 17 (2003) 579-593.
- [20] Valente G.: Numerical analysis oriented biaxial stress-strain relationship, for plane concrete f.e., atti dell'Istituto di Scienza delle Costruzioni della Facoltà di Ingegneria dell'Università di Roma la Sapienza, n.447, Ottobre 1983.
- [21] Valente G.: Size effect on measured fracture energy of concrete in three point bend tests on notched beams 14.th International Conference on Numerical Methods on Fracture Mechanics, S.Antonio, Texas, USA, Marzo 1987.
- [22] Valente G.: "Computer aided analysis of reinforced concrete members by plane finite elements", Int. Conf. on Computer aided analysis and design of concrete structures, Split, Yugoslavia, Settembre 1984.
- [23] Valente G.: Fracture and Aggregate Interlock Mechanisms in Reinforced Concrete, con P.G.Gambarova, Paper Q-722, Proc.10th SMiRT, U.S.A., August 1989.
- [24] Di Tommaso A., Valente G.: Pull Out Test with Fracture and Aggregate Interlock, Round Robin Analyses and Tests of Anchor Bolts in Concrete Structures, RILEM TC 90 FMA Fracture Mechanics of Concrete - Applications, Edited by L.Elfgren, Department of Civil and Mining Engineering, Luleå University of Technology, Sweden, July 1998.
- [25] Gavarini C., U.Andreaus, A.Carriero, P.D'Asdia, D.D'Ayala, L.Ippoliti, F.Mollaioli, Valente G., A. Viskovic: Numerical Modeling of Unreinforced Masonry Building, Gennaio 1995, "Numerical Prediction of the Experimental Response", Dpt.di Meccanica Strutturale, Pavia.
- [26] Gavarini C., Mollaioli F., Valente G.: Comparison of Numerical Prediction with Tests for Brick Masonry, , "Computer Methods in Structural, Masonry", Lisbona, Aprile 1995.
- [27] Beolchini G., Grillo F., Valente G.: Analyses of repair and maintenance of a masonry wall, 5.th Int.Conf. STREMAH, San Sebastian, Spain, June 1997.
- [28] Valente G.: 3.1 Hypoelastic Model for Concrete Phenomena, documento finale del gruppo CEB T.G. 3.9 "Finite Elements in RC Design", Institut für Werkstoffe im Bauwesen, Stuttgart University, Ottobre 1999.
- [29] Valente G., Cartapati E.: Prove di eccitazione dinamica della facciata della Basilica di Collemaggio per mezzo di un palo infisso nel terreno sollecitato da vibrodina , XI Congresso nazionale "L'Ingegneria Sismica in Italia", ANIDIS, Genova, Italia, Gennaio 2004.
- [30] Valente G., Cerone M., Rovelli A.: Indagine preliminare per l'identificazione dinamica del Colosseo, XI Congresso nazionale "L'Ingegneria Sismica in Italia", ANIDIS, Genova, Italia, Gennaio 2004..
- [31] Valente G., Zingone G.: Identificazione dinamica dei sistemi strutturali a tipologia specialistica, XI Congresso nazionale "L'Ingegneria Sismica in Italia", ANIDIS, Genova, Italia, Gennaio 2004..
- [32] Scognamiglio L., Malagnini L., Akinci A.: Ground-motion scaling in eastern Sicily, Italy, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 95, No 2, pp 568-578, April 2005.
- [33] GNDT: Indagine sperimentale e numerica su un prototipo di edificio in muratura, Documento 1.1, Feb.92.
- [34] RILEM: Draft Recommendations TC-76 LUM Loading Bearing Unit Masonry, General recommendations for methods of testing load-bearing unit masonry, *Materials and structures*, Vol. 21, No. 123, May 1988.
- [35] RILEM, 50-FMC COMMITTEE FRACTURE MECHANICS OF CONCRETE, "Determination of the Fracture Energy of Mortar and Concrete by means of Three-Point Bend Tests on Notched Beams", *Materiaux et Constructions*, 1985, Vol.18 n.106, pp. 286-290.