

### 3. VALUTAZIONE DELLA QUALITÀ MECCANICA DELLE MURATURE

Carlo Baggio e Caterina Carocci

**Abstract:** An abacus or catalogue of masonry walls is here presented, coming from survey of historical centers in south and center Italy. 3D axonometric representation, section and prospect help to identify quality of material and craftsmanship. The catalogue show good masonry with dressed blocks assembled in a regular geometric pattern, or minor quality typologies with undressed stones placed with a scattered texture. A mechanical analysis is performed by a limit analysis procedure in view of evaluating a quality index, either in out-of-plane behaviour or in in-plane behaviour of walls. Results show that rule of art, except for a single case, is everywhere respected, using available material.

#### 3.1 Introduzione

La nostra guida nella valutazione della qualità della muratura sono gli scritti di Antonino Giuffrè; in particolare le “Lecture sulla meccanica delle murature storiche”, (Giuffrè, 1990). Giuffrè riconosce una tecnica muraria appartenente alla tradizione colta, individuata nella muratura in pietra squadrata, l’*opus quadratum* dei romani derivato, secondo Vitruvio, dalla muratura isodoma o pseudoisodoma dei greci. Questa è caratterizzata da blocchi parallelepipedi (pietre squadrate) disposti con regolarità alternando, secondo vari assemblaggi, pietre disposte di fascia con pietre disposte con la lunghezza maggiore ortogonale al muro: i diatoni. Tutti i blocchi sono disposti su filari orizzontali, con giunti verticali sfalsati. L’alterna disposizione di elementi di fascia e di punta segue ritmi prestabiliti e costanti.

La fattura dell’*opus quadratum* è caratterizzata dal rigore geometrico sia nella preparazione degli elementi sia nella loro regola di posizionamento. «Giaciture orizzontali e monolitismo trasversale sono le caratteristiche meccaniche introdotte dallo spirito geometrico che sta a fondamento della nostra civiltà e gli sviluppi medioevali con il rimescolamento delle culture che li caratterizza hanno introdotto una miriade di varianti su questo originario e ineludibile binomio»

Questa forma classica di tessitura muraria realizza tre aspetti meccanici fondamentali: la corretta trasmissione dei carichi verticali, un comportamento quasi monolitico della parete (anche se composta di molti blocchi) sotto carichi orizzontali ortogonali al paramento, grazie alla presenza delle pietre di cucitura o diatoni, nonché una risposta alle azioni sismiche “organizzata”, con formazione di cinematismi regolari, dovuta alla planarità dei piani di posa.

Secondo Giuffrè, la maggior parte dei muri medievali e moderni, realizzati con pietrame solo malamente sbizzato, organizzate con l’ausilio di frammenti di pietre e malta, tende consapevolmente all’*opus quadratum* e le regole manualistiche fanno riferimento a tale categoria ideale. In tale quadro rientrano le raccomandazioni sull’uso di pietre disposte

di testa, sulla formazione di orizzontamenti mediante ricorsi di mattoni, sull'evitare l'inclinazione verso l'esterno delle facce superiori dei blocchi; la compattezza del muro deve derivare dalla sua tessitura, mentre la malta è usata per regolarizzare il contatto. Questi ed altri criteri esposti dalla tradizione manualistica formano la "regola d'arte" ed il giudizio meccanico sulla qualità della muratura coincide con il giudizio sulla qualità della sua fattura, sulla competenza con la quale il muratore ha applicato la regola d'arte e sulla presenza di quei materiali, ad esempio un congruo numero di diatoni, che soli possono garantire quella ricercata monoliticità.

### 3.2 La regola d'arte

Il rilievo e la lettura delle murature si basa su considerazioni generali sulla "regola dell'arte" di cui troviamo una formulazione scritta nei trattati ottocenteschi; la regola per la realizzazione di buone murature è basata sull'individuazione delle caratteristiche comuni alle murature prodotte dalla cultura popolare, con riferimento a quelle che avevano dimostrato un utile comportamento meccanico. Le norme da seguire per la costruzione del muro di pietra grezza, vengono riproposte da diversi trattatisti con formulazioni invariate, rendendo in tal modo esplicita la loro provenienza dalla osservazione dei muri della città storica e dando così credito alla lunga sperimentazione che ne ha confermato la validità. Tali regole costituiscono perciò il fondamento sul quale si basano i muri esistenti.

Le prescrizioni per costruire un muro di buona qualità sono le seguenti:

1) realizzare l'ingranamento delle pietre attraverso lo spessore del muro usando con frequenza i "diatoni", pietre disposte con la loro maggior lunghezza trasversalmente al muro. La dimensione delle pietre usate per realizzare un muro non è indifferente, la preponderanza di pietre grandi su quelle piccole permette una accurata ammorsatura nel piano della parete, ma soprattutto nel suo spessore. Infatti i muri devono essere tessuti in modo da non presentare alcuna divisione verticale parallela alle facce esterne; non si accetta la suddivisione della sezione in due paramenti esterni, separati da un nucleo non organizzato. Questa prescrizione indica la necessità che nel muro si ottenga il monolitismo trasversale;

2) circondare ogni pietra di malta ma senza eccesso, riempiendo con pietre più piccole e scaglie di mattone gli spazi di risulta tra quelle più grandi. In un buon muro la malta gioca un ruolo secondario rispetto alle pietre, la resistenza della parete è realizzata dalla sapiente disposizione degli elementi lungo le giaciture, mentre la resistenza della malta è chiamata in causa dal difetto di ammorsatura tra le pietre. Questa prescrizione indica la necessità che nel muro sia realizzata la massima compattezza lapidea;

3) realizzare, a intervalli di 60 o 100 cm lungo l'altezza del muro, ripianamenti del letto di posa, in modo da predisporre assise regolari, utilizzando scaglie di pietra o di mattone, sulle quali collocare le pietre dei filari superiori. Questa prescrizione indica che bisogna garantire superfici di posa perfettamente orizzontali per garantire la corretta trasmissione dei carichi verticali tra i filari.

Dall'insieme di queste richieste appaiono di fondamentale importanza la dimensione e la disposizione degli elementi lapidei nel tessuto del muro; entrambe, infatti, sono necessarie per ottenere una muratura che soddisfi i requisiti meccanici della monoliticità trasversale e della compattezza interna.

Appare anche evidente che le regole contenute nei trattati hanno una inequivocabile finalizzazione statica: per questo motivo si può affermare che il rispetto di queste le regole generali garantisce sulla qualità della fattura del muro e contemporaneamente sulla sua qualità meccanica.

La “regola dell’arte”, che descrive le caratteristiche generali di una buona muratura, è stata applicata in differenti aree culturali e specializzata in molteplici accezioni locali, caratterizzate dal materiale disponibile e dalla sapienza tecnica dei costruttori; sostanzialmente da quest'ultima dipende l'efficacia meccanica del muro che può essere valutata, malgrado le differenze riscontrabili in murature di località diverse, misurando lo scostamento dalla regola d'arte generale: la fattura di un muro può essere giudicata con obiettività attraverso il riconoscimento delle caratteristiche generali sopra esposte, evidenziando dove la regola dell'arte è stata mal applicata, o dimenticata.

La capacità di utilizzare gli elementi grezzi, privi di lavorazione e di diverse dimensioni sanando per quanto possibile la mancanza di regolarità geometrica e tendendo idealmente a ricostituire la compattezza del blocco parallelepipedo misura l’arte del maestro d’opera, che riesce ad assegnare ad ogni elemento un preciso ruolo nel contesto costruttivo utilizzando secondo ragione e senza sprechi ogni pietra disponibile per ottenere un tessuto murario nel quale la sovrapposizione e l’ingranamento delle pietre grezze corrispondono alla geometrica regola di sfalsamento che governa l’*opus quadratum*.

### **3.3 Il catalogo delle murature storiche**

Raccogliendo tutto il materiale prodotto dall’Unità di Roma Tre negli anni precedenti sotto la guida di Antonino Giuffrè sono state organizzate schede (vedi ad esempio la figura 3.1) che raccolgono le informazioni sulle murature delle diverse realtà locali studiate allo scopo di fornire un catalogo delle tecniche costruttive storiche. Il lavoro di raccolta e sistematizzazione del materiale riguardante le murature di diverse località italiane ha lo scopo di fornire un prodotto che permetta di confrontare la qualità dell’opera muraria e di definire, se possibile, delle tipizzazioni riguardo al comportamento sismico. Con tale finalità è stata formulata una scheda che descrive le caratteristiche della muratura rilevata sia con grafici, sia con didascalie esplicative, sia attraverso materiale fotografico di riferimento.

CATALOGO DELLE MURATURE STORICHE		GNDT UNIROMA3
AVELLINO	MURATURA DI BLOCCHI DI TUFO SQUADRATI	TAV. 01

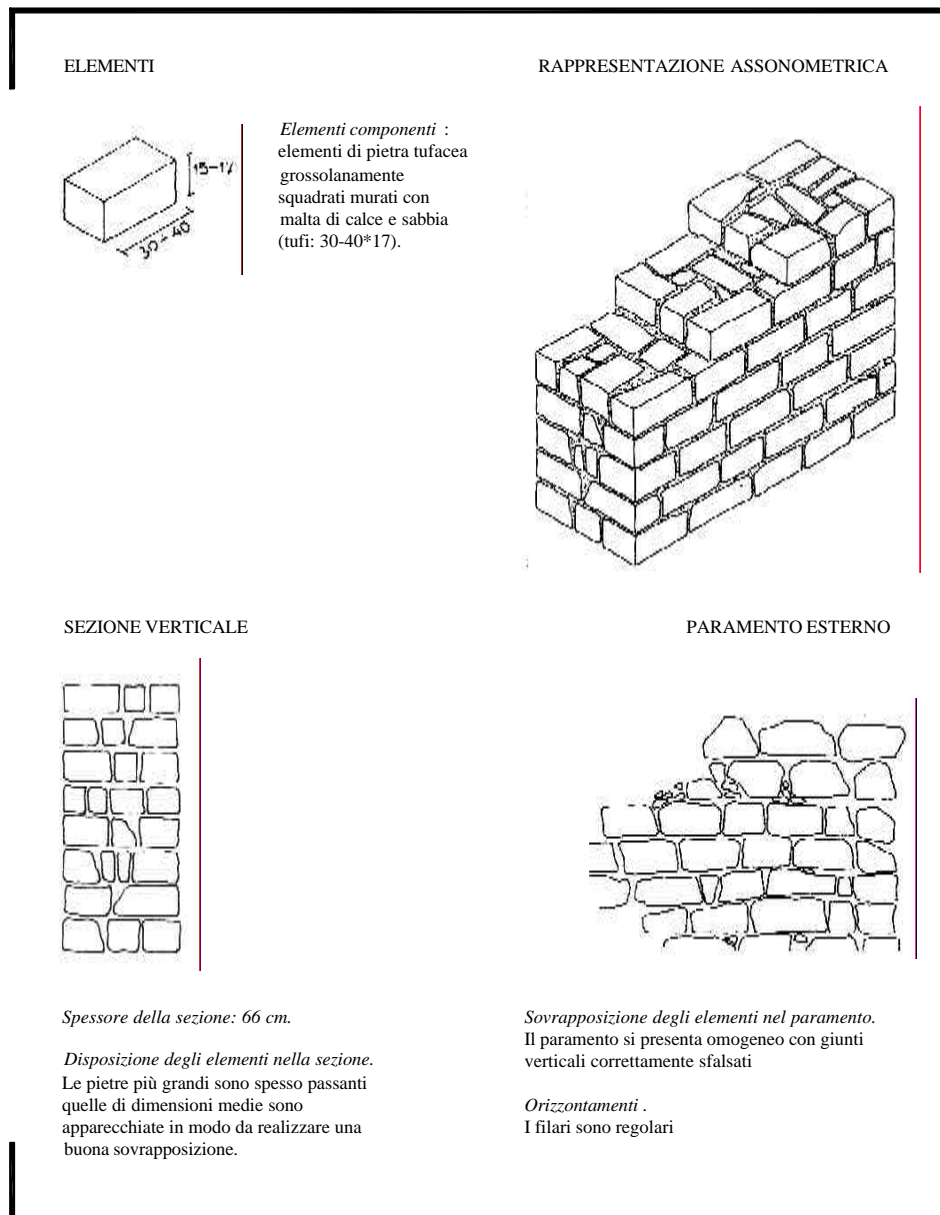


Fig. 3.1 – Vedi pag. 3, paragrafo 3.3

Per ogni tipologia, viene illustrata la tecnica costruttiva locale, mediante grafici che mettono in evidenza:

- le dimensioni ricorrenti degli elementi lapidei;
- organizzazione della sezione;
- organizzazione del paramento esterno (prospetto);
- la tessitura muraria (rappresentazione assonometrica).

Il prospetto risulta particolarmente utile a individuare la regolarità dei piani di posa ma risulta decisamente insufficiente a valutare la qualità muraria: nelle tavole 01 e 02 di Siracusa, se si dovesse giudicare la qualità dai soli paramenti sarebbe difficile distinguere tra le due tipologie, ma osservando le sezioni è possibile riconoscere una qualità decisamente migliore al campione 01, con i diatoni, come sarà mostrato numericamente più avanti; la sezione dà informazioni sul numero di allineamenti di blocchi nello spessore, sull'esistenza di pietre di cucitura, ma risulta ad esempio impossibile valutare il numero dei diatoni per unità di superficie paramentale; l' assonometria è la rappresentazione che da maggiori informazioni, tuttavia è possibile immaginare una varietà di rappresentazioni utili, il cui fine è comunque quello di fornire il massimo numero di informazioni sulla struttura del muro, anche delle porzioni normalmente celate dai paramenti.

Le didascalie inserite nelle schede permettono una lettura critica dei grafici:

- qualità degli ingranamenti nella sezione;
- qualità degli ingranamenti nei paramenti;
- materiale lapideo utilizzato, tipo di lavorazione degli elementi;
- tipo di malta; e finiture superficiali;
- descrizione dell'organizzazione della tessitura.

### *3.3.1 Metodi di rilievo*

Per quanto osservato sopra è indispensabile, per valutare la qualità della muratura, conoscere la sua tessitura interna, in particolare per individuare numero e posizione delle pietre disposte di testa; ciò non appare proibitivo: anche in assenza delle distruzioni prodotte da un sisma, un rudere, una cellula in abbandono, possono fornire, negli studi di vulnerabilità, un numero di esempi sufficienti a ricostruire le più diffuse tipologie murarie presenti in un dato sito. Inoltre, dopo aver individuato le dimensioni medie delle pietre, osservando la superficie del muro non è difficile distinguere la pietra posta "di fascia" dalla pietra posta "di punta". Nei muri di spessore non molto elevato, cioè nei muri degli edifici abitativi, un saggio di un metro quadrato eseguito togliendo l'intonaco sulle due facce della parete muraria permette di scoprire l'alternarsi dei diatoni e ricostruire, nei tratti essenziali, la composizione del muro.

Le schede (25) sono allegate in appendice e riguardano 11 diversi centri storici (tab. 3.1).

Tabella 3.1

Centri storici	Numero di schede
Avellino	3
Barbarano	1
Castelvetere	1
Catania	2
Città di Castello	4
Matera	1
Palermo	3
Roma	3
S. Angelo dei Lombardi	3
Siracusa	3
Viterbo	1

### 3.4 Modellazione della muratura reale

#### 3.4.1 *Il modello discreto in opus quadratum*

Questo studio ha come obiettivo l'individuazione degli aspetti meccanici fondamentali dell'opera muraria nelle configurazioni locali che essa presenta negli organismi edilizi dei centri storici italiani.

Aver individuato nell'*opus quadratum* il modello di riferimento della muratura reale non solo rappresenta compiutamente l'approccio teorico di Giuffré al problema della meccanica muraria; il suo primo effetto pratico è stato quello di orientare l'analisi meccanica su modelli costituiti da elementi squadrati. Questo passaggio ha il significato di scegliere alcune delle caratteristiche della muratura grezza e considerarle preminenti rispetto alle altre e ad introdurle nel modello: queste sono l'assenza di coesione e la coerenza interna, la dimensione finita degli elementi e la loro disposizione reciproca, la malta vista come elemento di regolarizzazione del contatto tra elementi, tralasciando, a favore di sicurezza, il suo contributo di resistenza di difficile parametrizzazione.

Per la formulazione del modello in «opus quadratum equivalente», la muratura reale deve dunque essere letta individuando le dimensioni medie delle pietre componenti e raggruppandole in poche classi; inoltre deve essere decodificata la regola con cui il muratore le ha assemblate.

Il passaggio dal muro reale al modello si ottiene individuando il nucleo costitutivo delle pareti che è caratterizzato da elementi di una certa dimensione, posizionati seguendo una certa regola e trasformandolo in un muro di blocchi di più semplice studio analitico. In tal modo si garantisce il legame del modello con la realtà delle strutture murarie presenti nei centri storici e si dà una prima risposta alla difficoltà posta dalla considerazione della apparente differenza tra le murature.

Il modello in *opus quadratum* si presta ad essere studiato sia con algoritmi numerici sia con sperimentazioni fisiche: la geometrizzazione degli elementi componenti la muratura reale consente entrambi gli approcci e approfondimenti in termini parametrici (diversi rapporti dimensionali tra pietre grandi e pietre piccole, diversa percentuale tra pietre grandi e pietre piccole, diverso numero di pietre poste «di punta» per unità di superficie di parete, diverse tessiture etc).

In anni precedenti è stato svolto un notevole lavoro sperimentale e numerico su queste ipotesi: su pareti composte di blocchi parallelepipedi regolarmente spazati e con giunti verticali sfalsati, a simulare l'apparecchiatura muraria isodoma, si sono condotte analisi numeriche e prove sperimentali a piccola scala (Baggio e Trovalusci 1993, 1995, 1998), mettendo in luce la notevole influenza che la tessitura e la geometria dei blocchi hanno sulla resistenza al collasso della parete nonché sulla configurazione di collasso.

Il modello numerico, che analizza blocchi indeformabili ed infinitamente resistenti giustapposti tramite superfici di contatto monolatero (giunti), reagenti alla sola compressione e attritive si è dimostrato in grado di riprodurre i cinematismi di collasso osservati sperimentalmente con una fedeltà sorprendente; tuttavia i valori dei moltiplicatori di collasso sono risultati sovrastimati in quanto nelle sperimentazioni il collasso dipende fortemente da imperfezioni nella planarità dei giunti.

La procedura numerica preferenzialmente utilizzata nei lavori citati è quella dell'analisi limite, anche se altri approcci discreti sono disponibili per l'analisi strutturale del "modello muratura" descritto (elementi finiti non lineari con elementi gap, elementi distinti) e sono stati, in qualche caso, utilizzati a scopo di confronto e per meglio delineare vantaggi e limiti delle singole procedure. A seconda dell'approccio utilizzato, variano cinematismi e moltiplicatori di collasso ma si è comunque in grado di cogliere gli aspetti fondamentali del modello in esame.

Nel caso dell'analisi limite, utilizzata anche nel presente lavoro, le ipotesi di indeformabilità e di infinita resistenza dei blocchi consentono di esprimere le condizioni di equilibrio e di resistenza del sistema in funzione delle azioni di contatto pervenendo ad un problema discreto di analisi limite che viene risolto con un algoritmo di ottimizzazione.

La messa in conto dell'attrito conduce ad un problema di programmazione formulato contemporaneamente in termini di condizioni di equilibrio e di ammissibilità cinematica del sistema che comporta un vincolo di complementarità non lineare. L'onere computazionale richiesto dal modello restringe l'ambito di applicazione a muri in due dimensioni composti da non oltre 50 blocchi.

Si è inoltre mostrato (Baggio e Trovalusci, 2000) che adottando una legge di scorrimento di tipo associato e scrivendo un programma di ottimo linearizzato si possono ottenere soluzioni confrontabili con quelle dell'analisi limite non standard, con l'indubbio vantaggio di trovare la soluzione in pochi secondi di elaborazione e di poter trattare assemblaggi con un numero molto maggiore di blocchi. Ciò ha portato, tra l'altro, a rivalutare l'impiego di modelli standard di analisi limite nella valutazione del carico di collasso di murature a blocchi. Considerare una legge di flusso associata equivale a considerare interfacce cementate con un materiale dotato di dilatanza nel senso specificato da Drucker (Drucker,

1954): la componente di scorrimento si accompagna ad una componente di dilatazione ortogonale al giunto; se il rapporto tra le due componenti è fatto pari alla tangente dell'angolo di attrito si ottiene una legge di scorrimento standard e si possono allora utilizzare, come nell'analisi limite classica, sia il teorema statico, sia il teorema cinematico, pervenendo allo stesso risultato.

### 3.4.2 *Il modello discreto irregolare*

Il passaggio dalla muratura reale al suo modello ideale attraverso la regolarizzazione geometrica costituisce lo snodo critico della procedura esposta al punto precedente. E' certamente un punto di forza del metodo ma pone una serie di interrogativi. In molti casi la irregolarità dell'apparecchio murario è così preminente da far dubitare che sia applicabile la sua riduzione ad un modello regolare ideale; inoltre la decodificazione della regola di assemblaggio può apparire impossibile, o dipendente da scelte soggettive di chi effettua l'analisi, senza regole certe e codificabili. In questo studio si è voluto verificare nel modo più stringente possibile i limiti della procedura esposta al punto precedente, esaminando campioni murari con geometria irregolare, con blocchi non parallelepipedi e piani di posa obliqui, limitando drasticamente la regolarizzazione geometrica (questa deve essere comunque condotta su pietre tondeggianti), conservando tutti i giunti obliqui ritenuti significativi e conservando la struttura minuta di pietre di riempimento (anche in questo caso una qualche semplificazione è richiesta per non aumentare a dismisura il numero dei corpi e dei giunti); ciò non comporta variazioni alla struttura del problema di ottimo descritto in precedenza, ma solo la difficoltà di costruire rapidamente gli assemblaggi da sottoporre al test numerico. Il numero e la struttura dei dati da immettere nel file di input rendono proibitivo un inserimento manuale e richiedono utilità di pre-processione; per gli assemblaggi irregolari, con blocchi non rettangolari o con piani di posa orizzontali ma discontinui è stato costruito appositamente per lo studio in oggetto un pre-processore che utilizza come input un file generato su Autocad e che produce i dati di ingresso del programma di ottimizzazione, riconoscendo i blocchi e i giunti reciproci in modo totalmente automatico.

La generazione di una *mesh* richiede dunque solo il tempo del disegno automatizzato. Il numero degli elementi per lo studio della muratura in sezione non è in genere elevato e la procedura di ottimizzazione lineare converge in pochi secondi, fornendo la configurazione geometrica del meccanismo di collasso, il relativo moltiplicatore e i valori delle sollecitazioni scambiate nei giunti.



### 3.5 L'indice numerico della qualità muraria (IQM)

Le procedure esposte in 3.4 sono state utilizzate per analizzare le murature presentate nel catalogo, in particolare per valutarne la resistenza al ribaltamento fuori dal piano, definito da Giuffrè collasso di primo modo (Giuffrè, 1991). Il test numerico è eseguito su assemblaggi di profondità unitaria, con rapporto  $h/b \cong 6$ , sottoposti al peso proprio  $P$  e ad una forza di massa orizzontale  $\alpha P$  agente in direzione ortogonale al paramento. ( $h$ ) rappresenta l'altezza complessiva della parete e ( $b$ ) il suo spessore. Il modello assunto a riferimento è il monolite con  $l_m = h/b = 6$  per il quale avviene il collasso per ribaltamento con  $\alpha \cong 0.166$ ; a questo si attribuisce l'indice numerico  $IQM=1$  corrispondente alla totale monoliticità del suo comportamento. Per poter sottoporre a test muri di diverso spessore e fattura, per ogni campione, assunto  $b$  pari allo spessore effettivo della parete, si è esaminato un assemblaggio con il numero di filari che meglio approssima l'altezza complessiva  $h=6b$ . Il risultato dell'analisi limite, in termini del moltiplicatore di collasso  $\alpha$  viene corretto per tenere conto della snellezza effettiva  $l_c$  del campione esaminato:  $IQM = (\alpha/0.166) \times (l_c / l_m)$ .

Tabella 3.2 – Valori dell'indice IQM per le murature del catalogo

RIFERIMENTO SCHEDE CATALOGO	TIPOLOGIA	IQM
Palermo 03	Blocchi grossolanamente squadri e scapoli	0.433
Siracusa 01	Pietra grezza e sbozzata	0.818
Roma 03	Pietra grezza	0.824
S. Angelo dei Lombardi 03	Ciottoli e pietre sbozzate	0.879
Avellino 01	Blocchi grossolanamente squadri	0.904
Viterbo 01	Blocchi squadri	0.946
Città di Castello 01	Ciottoli spaccati	0.958
Palermo 01	Blocchi grossolanamente squadri	0.963
Avellino 03	Blocchi grossolanamente squadri e mattoni	0.970
Catania 02	Blocchi grossolanamente squadri, pietrame e mattoni	0.988
Monolite (H/B) = 6		1.000

Sono stati analizzati i seguenti modelli tratti dalle schede: modelli regolari in blocchi squadri, Avellino (tipo 01), Palermo (tipi 01, 03), Viterbo (tipo 01), e modelli con tessiture irregolari, conci non squadri o tondeggianti e giunti obliqui, Avellino (tipo 03), Catania (tipo 02), Città di castello (tipo 01), Roma (tipo 03), S. Angelo dei lombardi (tipo 03), Siracusa (tipo 01).

L'analisi delle sezioni rivela una sorta di comportamento binario: ribaltamenti monolitici (qualità "1") o separazione in due paramenti (qualità "0") con conseguenti

ribaltamenti delle due porzioni e mutui scorrimenti delle facce interne dei blocchi (fig. 3.2); tuttavia l'indice numerico IQM della qualità "0" si approssima a  $0.4 \div 0.5$ : anche il peggiore dei muri, senza pietre di legatura ha una sua capacità portante, sia pure ridotta; i muri che rileviamo non possono non avere una qualche capacità portante, altrimenti sarebbero stati da tempo ridotti ad un cumulo di pietre.

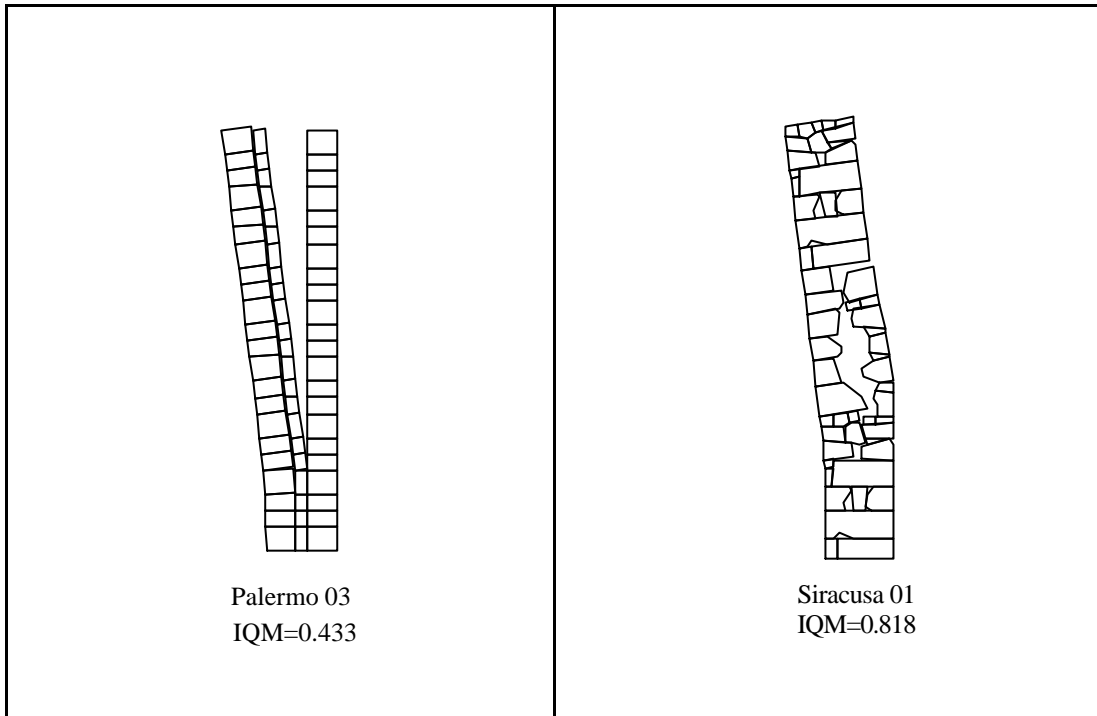


Fig. 3.2a

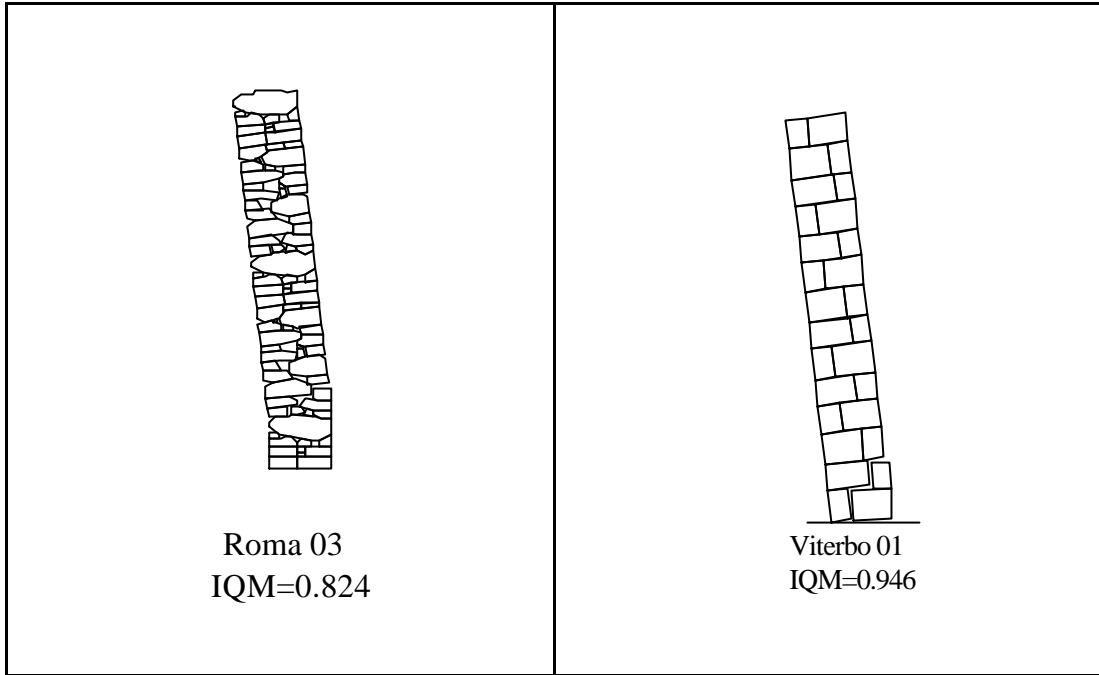


Fig. 3.2b

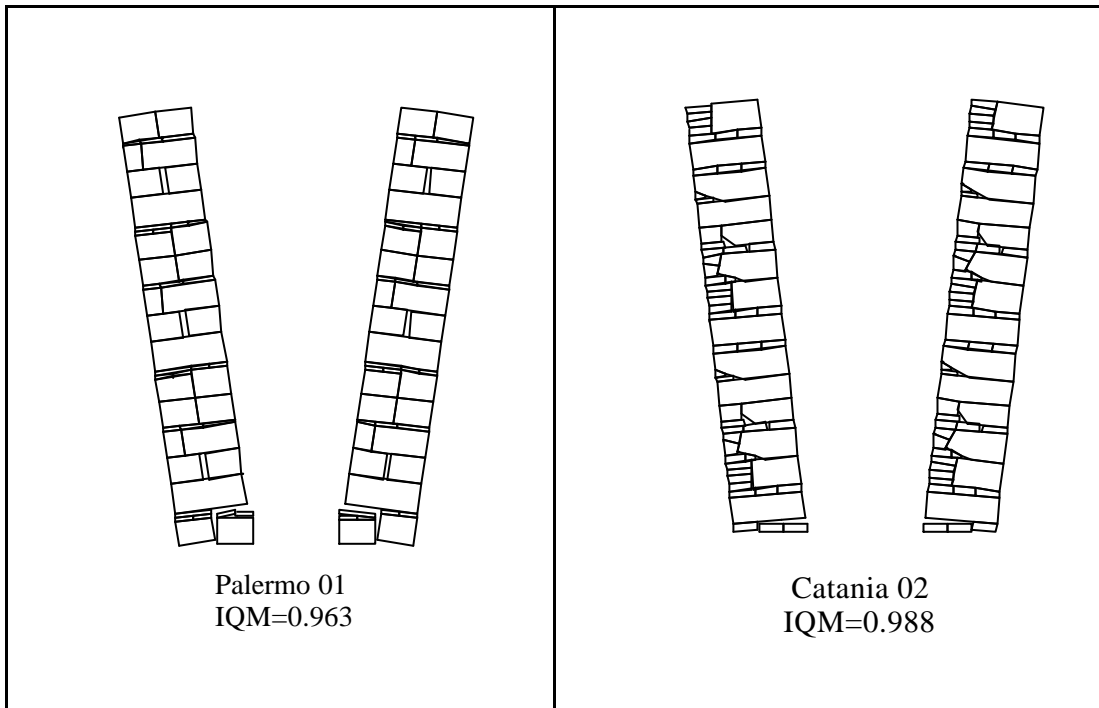


Fig. 3.2c

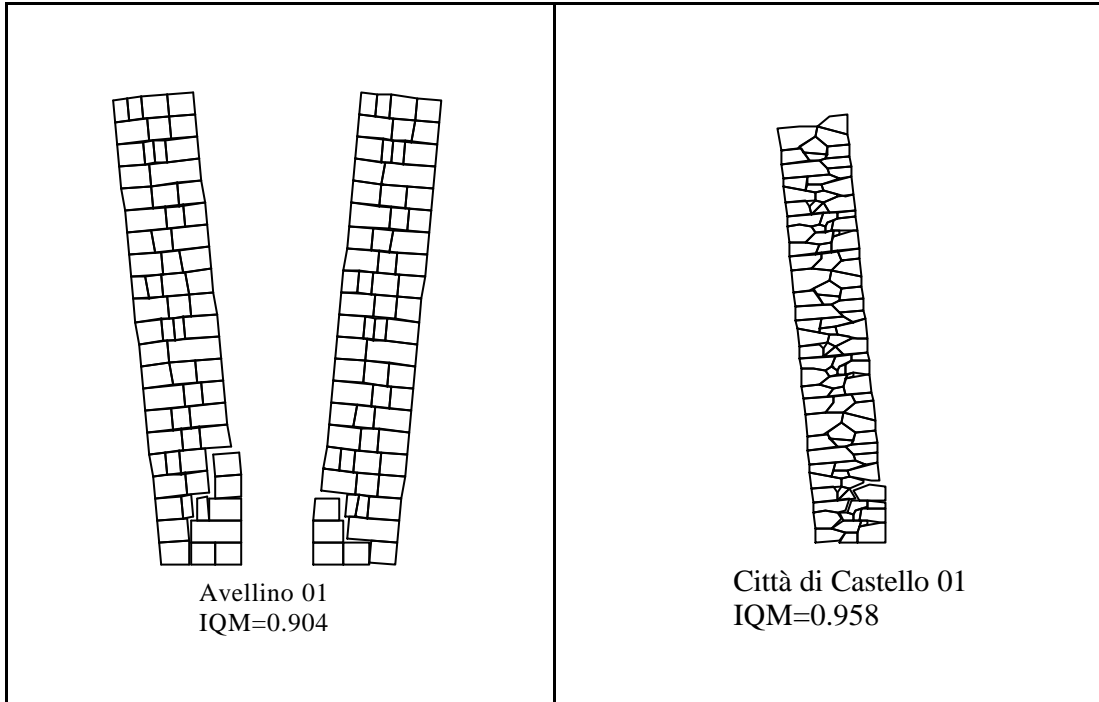


Fig. 3.2d

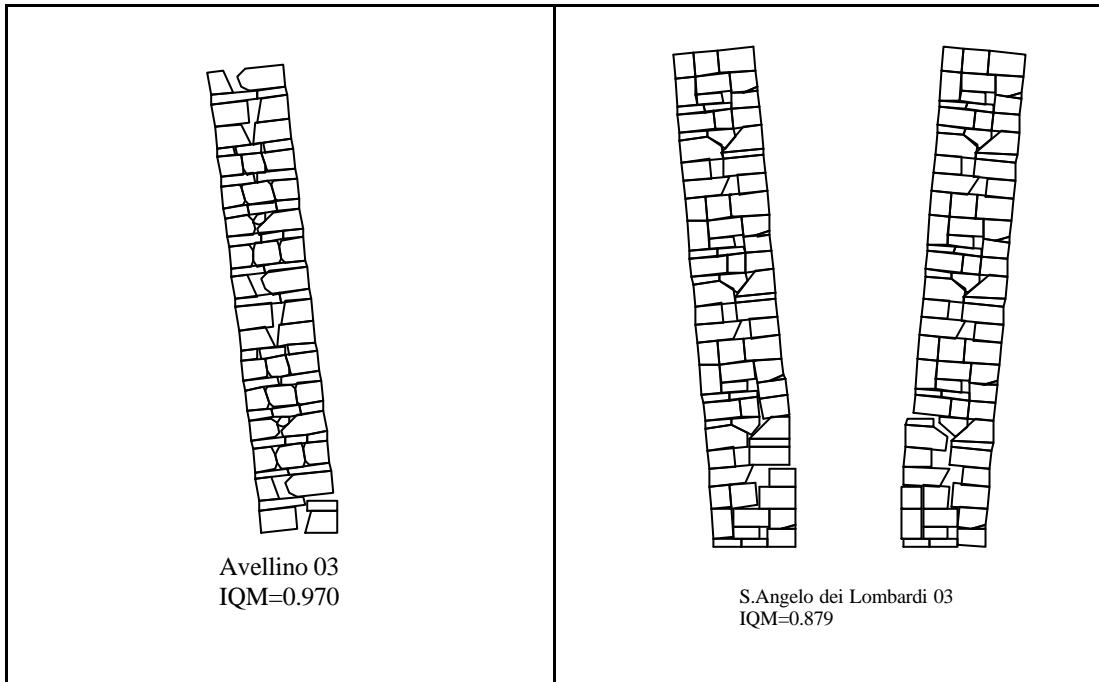


Fig. 3.2e

### 3.6 Le altre analisi nel piano

Le procedure esposte in 3.4 possono essere applicate all'analisi dei meccanismi di collasso di secondo modo: ossia meccanismi di collasso di pareti murarie sollecitate nel proprio piano dal peso e da forze di massa orizzontali variabili con il fattore  $\alpha$ . Il modello muratura preso in esame contiene come parametri materiali solo il coefficiente di attrito nei giunti e il suo comportamento dipende, come detto, solo da parametri geometrici come dimensioni e tessitura dei blocchi; nel caso di elementi irregolari in cui i giunti non coincidono con tutte e sole le facce dei blocchi, la disposizione dei giunti ha inoltre notevole influenza sulla determinazione del meccanismo di collasso. I test numerici sono in questo caso eseguiti su assemblaggi piani di dimensioni 100x100 cm ricavati dalle schede del catalogo: Siracusa01 e Palermo03. Il primo ha interesse in quanto assemblaggio notevolmente irregolare rappresentativo della muratura di qualità I; il secondo, seppur costituito da pietra conca, ha una tessitura difettosa con giunti "a sorella" ed esibisce una scarsa resistenza già nel caso di sollecitazioni ortogonali al piano (v. fig. 3.2a).

Più problematico risulta qui definire quale sia il campione di riferimento cui attribuire la qualità "1". Infatti una parete composta di molti elementi e con giunti privi di resistenza a trazione non ribalta monoliticamente ma piuttosto subisce un danno consistente prevalentemente in lesioni inclinate che viene di solito definito "rottura a taglio". Se si fa riferimento ad una parete con tessitura regolare (fig. 3.3), si può individuare la qualità "1" in una tessitura in grado di garantire il collasso monolitico per ribaltamento di un triangolo murario superiore che non chiami in causa mutui scorrimenti e sgranamenti tra i blocchi. Ciò avviene quando la linea di separazione tra le due porzioni murarie assume la forma a scala individuata in fig. 3.3. Il rapporto tra le masse delle due porzioni murarie nel campione di forma quadrata in esame dipende dal rapporto base/altezza del singolo blocco: nell'esempio di fig. 3.3 la massa in ribaltamento è maggiore della massa in posto, ma se approssimiamo la linea di separazione alla diagonale del quadrato il valore del moltiplicatore di collasso per il campione di qualità "1" vale 0.5.

Le pareti a tessitura regolare mostrano comunque un limite intrinseco superiore del coefficiente  $\alpha$ , infatti quando la forza orizzontale raggiunge il valore del coefficiente di attrito i blocchi scorrono l'uno sull'altro dando luogo ad una rottura per scorrimento generalizzato della parete.

Nel caso di Siracusa01 il campione analizzato appartiene ad un lembo della parete muraria e la forza orizzontale  $\alpha P$  agisce nel solo verso indicato in fig. 3.4; si distingue nettamente il meccanismo di collasso, con una rotazione di una catasta di grandi blocchi di bordo e una traslazione di un insieme di pietre irregolari di minori dimensioni che si conserva coerente, scorrendo su pochi giunti di separazione. Il triangolo inferiore destro rimane perfettamente in posto. L'indice numerico della qualità del campione può essere calcolato in analogia a quanto operato in 3.5:  $IQM_{II}=0.338/0.5=0.676$ .

L'assemblaggio ricavato da Palermo03 è stato invece analizzato nei due versi (fig. 3.5), come campione isolato dal contesto; il comportamento risulta molto differenziato a seconda del verso della forza orizzontale: la qualità muraria per il caso peggiore scende a  $IQM_{II}=0.249/0.5=0.498$ ; nella direzione migliore IQM è superiore a "1" (ciò dipende ovviamente dall'aver scelto per la qualità "1" il meccanismo indicato in fig. 3.3 come detto precedentemente).

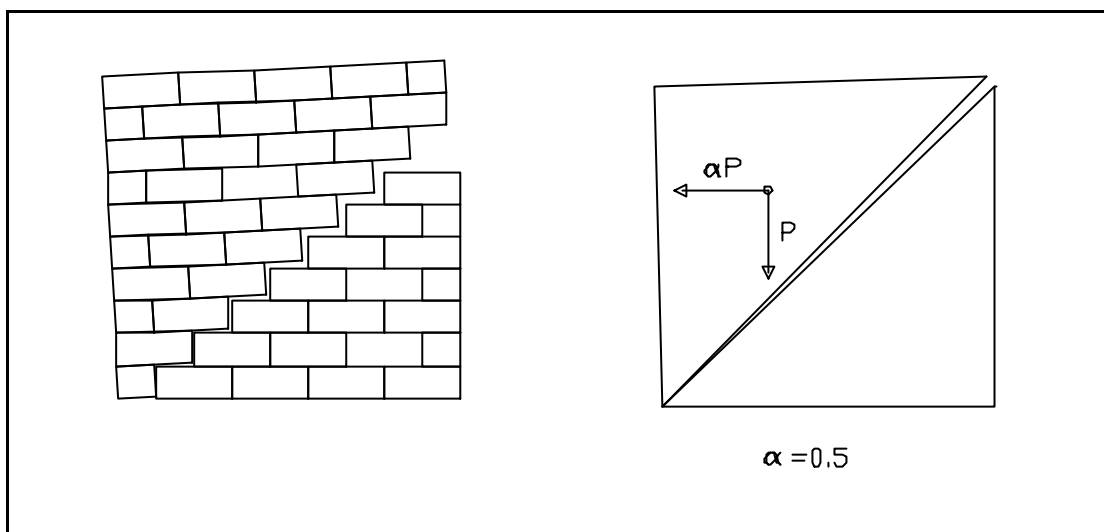


Fig. 3.3

### 3.6 Conclusioni

La qualità meccanica delle murature è stata qui indagata sotto un duplice punto di vista: tipologico strutturale e numerico.

I risultati coincidono in larga misura con gli esiti attesi: tutti i campioni rilevati dimostrano una più che accettabile qualità, e gli scostamenti dalla regola d'arte, quando presenti sono individuabili senza alcuna analisi meccanica.

Di maggior interesse il confronto tra tessiture regolari e tessiture irregolari di elementi non squadrati: irregolarità di tessitura o la presenza di giunti inclinati non alterano sostanzialmente il comportamento quasi monolitico nel ribaltamento fuori dal piano o l'andamento diagonale della rottura nel piano. Ciò che conta sono il numero e la posizione dei contatti, anche se puntiformi, tra blocco e blocco. I risultati tendono a convalidare l'approccio al problema istituito da Antonino Giuffrè, descritto nell'introduzione.

In questo lavoro si è tralasciato di indagare aspetti più complessi quali la qualità meccanica delle connessioni murarie; tale indagine, che apre la strada all'indagine meccanica dei più semplici meccanismi di collasso di strutture murarie tridimensionali è stata già intrapresa con l'ausilio del "modello muratura" qui delineato (Baggio & Giannini, 1999, de Felice & Giannini, 1999), ma una sua trattazione "tipologizzata" deve essere ancora condotta a termine.

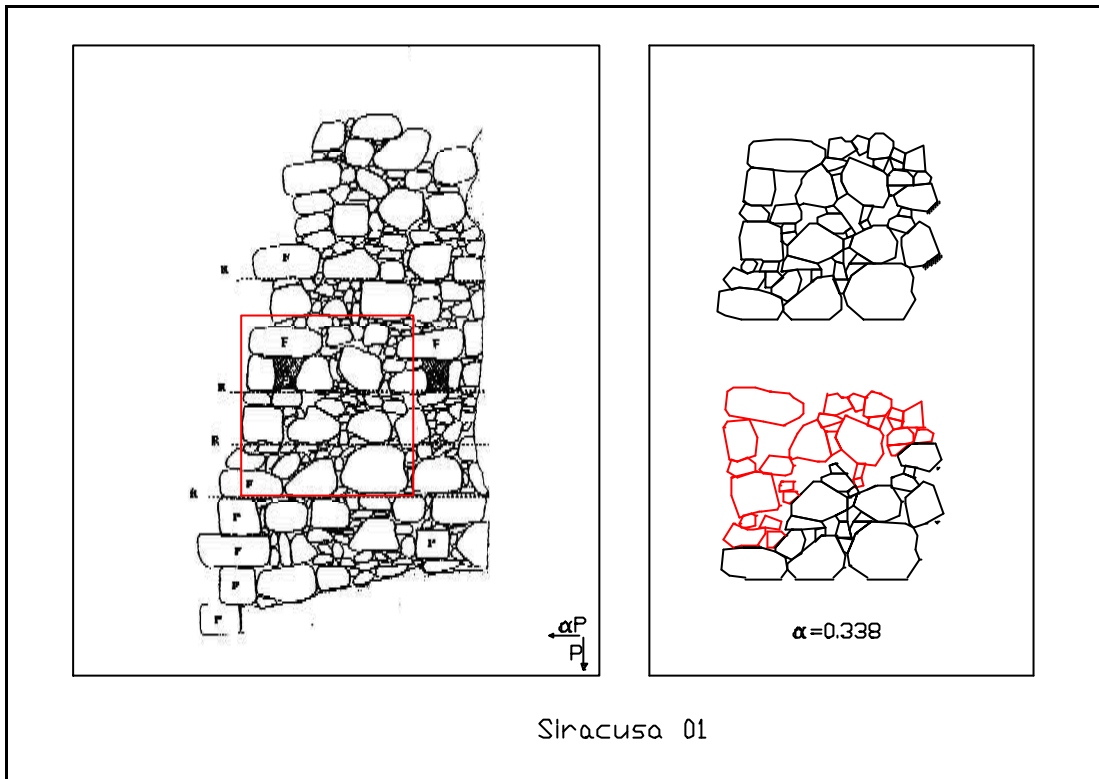


Fig. 3.4

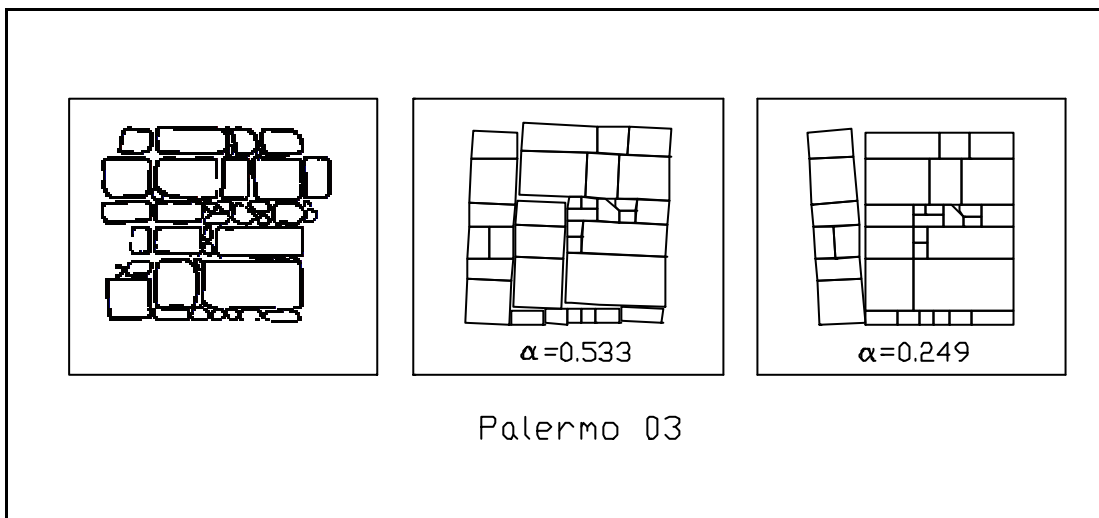


Fig. 3.5

## Bibliografia

- Donghi, D., (1925): Il manuale dell'architetto, Vol.I, parte prima, Cap.II, pag. 358.
- Drucker D. C., (1954): Coulomb friction, plasticity, and limit loads, *ASME Journal of Applied Mechanics*, **21**, 71-74.
- Giuffrè, A., (1990): Letture sulla meccanica delle murature storiche, Roma.
- Giuffrè, A., (1991): Vulnerabilità e conservazione nel quartiere della Graziella in Ortigia, Atti del 5° *Convegno Nazionale L'Ingegneria Sismica in Italia*, Palermo.
- Baggio, C., Trovalusci P. (1993): Discrete models for jointed block masonry walls. Proc. *6NAMC, Philadelphia*, 2, 939 - 949.
- Giuffrè, A., (1993): Sicurezza e conservazione dei centri storici in area sismica. Sintesi metodologica, in: Giuffrè, A. (a cura di), *Sicurezza e conservazione dei centri storici. Il caso Ortigia*, pag. 7.
- Giuffrè, A., Carocci, C., (1993): Restauro strutturale. Il rilievo quale indispensabile preliminare dell'analisi meccanica, in: *XY Dimensioni del disegno*
- Baggio, C., Trovalusci P. (1995): Stone assemblies under in-plane actions. Comparison between nonlinear discrete approaches. Third International Symposium on *Computer Methods in Structural Masonry*, Lisbon, 184-193.
- Baggio, C. (1997): La meccanica nei muri dei Sassi. In *Codice di pratica per la sicurezza e la conservazione dei Sassi di Matera*, a cura di A. Giuffrè e C. Carocci, Matera, 271-293.
- Baggio, C., Trovalusci, P. (1998): Limit Analysis for No-tension and Frictional Three-Dimensional Discrete Systems. *Mechanics of Structures and Machines*, **26**, 3, 287-304.
- Baggio, C., Giannini, R., (1999): Modellazione ed analisi delle strutture in muratura regolare con il metodo degli elementi finiti, *Atti del 9° Convegno Nazionale L'Ingegneria Sismica in Italia*, Torino.
- De Felice, G., Giannini, R., (1999): Meccanismi di collasso e metodi di calcolo della vulnerabilità del costruito storico, *Atti del 9° Convegno Nazionale L'Ingegneria Sismica in Italia*, Torino.
- Baggio, C., Trovalusci, P. (2000): Collapse behaviour of three-dimensional brick-block systems using non-linear programming. *Structural Engineering and Mechanics*, **10**, 2, in stampa.