

IGF8 - VIII CONVEGNO NAZIONALE
GRUPPO ITALIANO FRATTURA
Genova, 27 - 29 maggio 1992

COMPORAMENTO DI TIPO SOFTENING

DI UN MATERIALE FORTEMENTE ETEROGENEO

S. Briccoli Bati
G. Ranocchiali

Professore Associato
Tecnico Laureato
Dipartimento di Costruzioni - Universita' degli Studi di Firenze
Piazza Brunelleschi 6 Firenze

SOMMARIO

Il tufo, materiale di natura lapidea e di origine vulcanica, rientra nella classe dei materiali eterogenei che collassano progressivamente esibendo un comportamento strain softening. Questo materiale deve la sua forte eterogeneita' sia alla disomogeneita' dei grani costituenti sia alle dimensioni dei pori che presentano diametri fino ad un centimetro; esso esibisce inoltre una diversa resistenza a trazione e a compressione tanto da poter essere annoverato tra i materiali scarsamente reagenti a trazione.

Nell' ambito della meccanica della frattura si analizza qui il comportamento di elementi in tufo intagliati e sottoposti a prova "three point bending" al fine di indagare sull'influenza delle dimensioni e della distribuzione dei pori sul comportamento softening. In particolare si discutono i risultati delle analisi sperimentali effettuate per coglierne il comportamento post - picco e si propone un modello strutturale, seppure grossolano, che permette di rendere conto di alcuni comportamenti registrati. Questa analisi e' limitata ai risultati della prova di flessione.

Introduzione

Il crescente interesse manifestato negli ultimi anni per la meccanica della frattura applicata allo studio dei materiali cementizi e ceramici quali malte, calcestruzzi e laterizi, ha portato ad una generale sistemazione delle modalita' di prova [20] atte a determinare le grandezze ritenute rappresentative del comportamento dei materiali nei riguardi della frattura. Tali modalita' di prova e gli aspetti essenziali di alcune

prove classiche di frattura si trovano, precisati e definiti, nella letteratura sull'argomento alla quale si rimanda a questo proposito.

L'analisi che qui si presenta, a carattere prevalentemente sperimentale, oltre ad un preciso significato intrinseco, ha lo scopo di indagare sul comportamento post-picco di un materiale lapideo - classificabile in base alla sua resistenza caratteristica tra le rocce tenere - caratterizzato da forte eterogeneità e da macroporosità. L'interesse per il comportamento del materiale preso in esame deriva dal fatto che esso è stato usato, fin dall'antichità, come materiale da costruzione nelle zone dell'Italia in cui esso è reperibile sotto forma di roccia.

Partendo da precedenti studi di base sul comportamento a frattura dei laterizi [12], [14], [18], ci si propone qui di confrontare la risposta globale dei campioni di prova con quella ottenuta assumendo un modello strutturale per il quale viene ipotizzata una legge costitutiva puntuale del materiale.

La risposta globale del provino sottoposto a three point bending test, rappresentata dalle curve $P-\delta$ e $P-CMOD$, viene interpretata tenendo presente la diversa distribuzione dei pori macroscopici presenti nella sezione con intaglio. Per la simulazione numerica si è fatto ricorso ad un modello che, seppure grossolano, è in grado di cogliere la presenza e l'ubicazione dei pori nella sezione con intaglio nella quale ha luogo la frattura. Il confronto tra le risultanze sperimentali e numeriche ha fornito indicazioni in merito ad esempio al ruolo esercitato nel problema in questione dalla distribuzione dei pori.

Analisi sperimentale

L'analisi sperimentale è stata rivolta alla registrazione delle curve $P-CMOD$ e $P-\delta$ (ovvero carico-apertura della fessura in corrispondenza dell'intradosso del provino - Crack Mouth Opening Displacement - e carico-freccia) di provini in tufo di Sorano soggetti a flessione (fig.1). I provini esaminati, rappresentati da venti esemplari, sono stati ricavati da blocchi di tufo delle dimensioni di 37x11x27 cm tagliandoli secondo piani normali al piano di sedimentazione. Le caratteristiche meccaniche classiche, modulo di elasticità longitudinale, resistenza caratteristica a compressione e trazione diretta, sono state preventivamente determinate su campioni cubici e prismatici di opportune dimensioni. È da precisare che, data la forte eterogeneità del materiale, i risultati delle prove suddette risultano alquanto dispersi e pertanto i valori delle caratteristiche meccaniche riportate in tab.1 sono solo indicativi.

A questo proposito sembra opportuno esprimere alcune considerazioni in merito alla interferenza di fenomeni strutturali sul comportamento di un materiale siffatto. Come è ben noto la determinazione del legame $\sigma-\epsilon$ di un materiale in trazione o compressione si ottiene procedendo ad una prova capace di garantire un campo di deformazioni, e quindi di tensioni, omogeneo; ma, se si considera la natura, e quindi la struttura del tufo in esame, data la presenza di pori macroscopici e quindi di vuoti di grandi dimensioni, è subito evidente che non è possibile configurare tali condizioni di prova su campioni ovviamente di dimensioni finite. Il campione di prova infatti è non solo un elemento strutturale come sempre accade, ma esso stesso è dotato di una struttura interna anche a livello macroscopico; ciò comporta inevitabilmente che quella che dovrebbe essere

una prova di trazione semplice (ma lo stesso vale anche per la prova di compressione) di fatto si risolve sempre in una prova di sollecitazione composta e quindi diviene ambigua la definizione di prova sul materiale.

TAB 1. Caratteristiche principali del tufo di Sorano.

Le caratteristiche meccaniche sono riferite alla direzione ortogonale al piano di sedimentazione

p.v. KN/m ³	p.v. ass. KN/m ³	porosita' %	σ_{rc} MPa	σ_{rt} MPa	E MPa
10,5	26,4	58	2,98	0,21	1347

I provini, delle dimensioni di 36x9x3 cm e con intaglio di 2 cm (fig.2) sono stati sottoposti a three point bending test con una macchina di prova che permette di procedere a di spostamento impresso. La profondità di intaglio costante, pari a 0,22 volte l'altezza totale h del provino, e' stata determinata in modo tale da garantire il manifestarsi della frattura nella sezione di mezzeria del campione. Occorre precisare che profondita' di intaglio inferiori a quella adottata non portavano alla comparsa della frattura nella sezione desiderata. Cio' e' comprensibile se si tiene conto della particolare struttura del materiale in esame. La necessita' di adottare un intaglio minimo di 0,22 h fornisce in un qualche modo una indicazione del grado di eterogeneita' (dovuto alla presenza di vuoti macroscopici) di cui e' dotato il tufo. E' nostra opinione che un materiale siffatto sia da riguardare piuttosto come una struttura che non un materiale nel senso della meccanica classica dei continui. Anche in relazione a questa considerazione, la determinazione della energia di frattura appare per il momento priva di significato. Essendo infatti impossibile riferirsi comparativamente alla energia elastica del singolo campione, si rende necessario definire un valore medio di Gf, la cui entita' assume significato in relazione alla energia elastica media e per la cui determinazione occorre, basandosi su procedimenti di omogenizzazione di tipo statistico, avere a disposizione un gran numero di dati.

Nella fig.3 sono riportate le curve P-CMOD e P- δ relative a due provini; nonostante l'impossibilita', per i motivi sopraccennati di ottenere campioni simili, le curve P- δ e P-CMOD si presentano affini; cio' mette in luce una notevole ripetitivita' di comportamento. Infatti, sebbene le due curve siano distinte, come deve essere, purtuttavia presentano gli stessi andamenti, il che conferma che i fenomeni caratteristici registrati sono inerenti al campione e al materiale di cui esso e' costituito.

La dispersione dei risultati dal punto di vista quantitativo conferma l'eterogeneita' strutturale dei campioni. In particolare i rami discendenti delle curve P- δ e P-CMOD presentano tratti in cui la concavita' e' rivolta verso l'alto e tratti in cui essa e' rivolta verso il basso. La circostanza della inversione della concavita' e' dovuta alla presenza di macropori (fig.5 e 6); in particolare quando la frattura nel propagarsi incontra un poro di grandi dimensioni, la concavita' del ramo discendente delle due curve P- δ e P-CMOD si inverte.

Infine a proposito delle curve $P-\delta$ e' interessante notare che nei provini esaminati mai si e' manifestata instabilita' interna, ovvero mai la pendenza del ramo discendente e' risultata positiva.

Modello numerico

La descrizione del comportamento di un materiale siffatto, in termini di tensione-deformazione e il considerare le proprieta' meccaniche medie, elastiche, ed inelastiche, senza tener conto della geometria della struttura interna, come gia' accennato, a nostro avviso, fa perdere significato fisico al termine campo di tensioni e di deformazioni. In questa circostanza e' parso possibile, in prima istanza, seguire un approccio al problema che prevede la calibrazione di un modello geometrico meccanico che esibisca lo stesso comportamento del campione studiato sperimentalmente.

La simulazione numerica e' stata condotta secondo il modello di fessura coesiva fittizia, ovvero concentrando l'intera zona di processo in una singola fessura e trascurando la modestissima energia dissipata dalla micro fessurazione del materiale. Tale modello ipotizza che l'apertura della fessura abbia inizio allorchè lo sforzo principale massimo uguaglia la resistenza a trazione diretta del materiale.

Per l'approccio numerico il modello utilizzato e' piano ed e' costituito da una elemento "trave appoggiata" a deformabilita' concentrata nella sezione con intaglio (fig.4). Tale assunzione e' giustificabile per la trascurabile deformazione totale del campione dati i modestissimi carichi sopportabili determinati dalla scarsissima resistenza a trazione del materiale. La simulazione numerica assume dunque per il materiale, al di fuori della zona di processo, un comportamento rigido, mentre la zona di processo viene simulata con elementi a biella a comportamento elasto-fragile. Per la risoluzione si e' fatto uso di un procedimento iterativo. Sono stati cosi' eseguiti numerosi esperimenti numerici simulando la presenza di pori macroscopici con la mancanza di elementi biella. Variando la posizione degli elementi biella mancanti lungo l'altezza della sezione, simulando una prova a spostamento impresso, si sono ottenute le corrispondenti curve numeriche $P-\delta$. Anche queste mostrano chiaramente che quando la frattura nel suo propagarsi incontra una zona in cui manca un elemento biella, la curva che descrive il ramo discendente del percorso d'equilibrio inverte la concavita'.

Gli andamenti delle curve $P-CMOD$ e $P-\delta$ messi cosi' a confronto ben evidenziano l'effetto prodotto dalla diversa posizione dei pori in corrispondenza della sezione di intaglio, cio' e' riscontrabile non solo nelle differenti ordinate di carico ma anche nei diversi andamenti dei tratti del ramo discendente di softening.

A parità di intaglio e di altezza del provino la diversa posizione del poro influenza fortemente la pendenza dei tratti del ramo di softening.

In particolare le fig.7 e 8 riportano sempre per le grandezze $P-\delta$ i confronti tra le risultanze sperimentali e quelle numeriche.

Considerazioni conclusive

L'analisi sperimentale sulla frattura di elementi di tufo e la modellazione numerica adottata hanno evidenziato ancora una volta la complementarità dei due approcci.

Le risultanze sperimentali, ottenute con una idonea attrezzatura per prove three point bending a spostamento impresso, sono state messe a confronto con le risultanze numeriche ottenute assumendo legami costitutivi del materiale di tipo fragile.

La scelta del legame di tipo fragile (fig.4), come già detto, è motivata dalle difficoltà di varia natura che si incontrano qualora ci si proponga di determinare, per il materiale in esame, che riteniamo essere esso stesso una struttura a livello macroscopico, il valore dell'energia di frattura ovvero dell'area sottesa dal legame $\sigma-w$. D'altronde l'ipotesi di comportamento elasto - fragile per il materiale di cui sono costituiti gli elementi biella che rappresentano la zona di processo, oltre a costituire qui una comoda semplificazione, ha permesso di cogliere senz'altro, in modo corretto, la realtà fisica nella sua globalità. Infatti le analisi numeriche, condotte adottando un comportamento elasto - softening per gli stessi elementi, hanno mostrato la non influenza di una tale assunzione, sull'andamento, ovvero sulla qualità, del tratto di softening del modello strutturale esaminato. Ciò che conforta è dunque che l'analisi numerica, nonostante la grossolanità del modello adottato, ottimamente si accorda con i rilievi sperimentali per quanto attiene il ramo discendente delle curve $P-\delta$. Di conseguenza le principali osservazioni si possono riferire all'andamento dei diagrammi $P-\delta$ e $P-CMOD$ mentre niente si può ancora asserire per quanto riguarda l'energia di frattura. Le due curve riportate mostrano infatti le stesse caratteristiche che vengono anche riprodotte dalla simulazione numerica. L'aspetto fondamentale risiede nel fatto che quando la frattura, nel propagarsi, incontra un poro macroscopico o la mancanza di un elemento biella, la pendenza del ramo discendente dei diagrammi sia sperimentali che numerici non solo diminuisce, ma la concavità nel tratto di curva corrispondente è rivolta verso il basso a differenza di quanto accade quando la frattura si propaga in zone non affette da vuoti. Questa circostanza appare significativa e di non scarsa influenza sulla eventuale definizione e determinazione della energia di frattura di un materiale siffatto a proposito della quale gli autori sollevano qualche perplessità.

BIBLIGRAFIA

- [1] Dougill, J.W. "A mathematical model for the failure of cement paste and mortars." Magazine of Concrete Research, vol.19, n.60, 1967, pp. 135-142.
- [2] Uppal, J.Y., Kemp, K.O. "An instability theory of failure for concrete" Magazine of Concrete Research, vol.25, n.28, 1973, 21-30.
- [3] Bazant, Z.P. "Instability, ductility, and size effect in strain-softening concrete." J. Engrg. Mech. Div., ASCE, vol.102, n.2, 1976, pp.331-344.
- [4] Dougill, J.W. "On stable progressively fracturing, solids" J. of Applied Mathematics and physics (ZAMP), vol.27, 1976, pp.423-437.
- [5] Walsh, J. B. "Static deformation of rock." J. Engrg. Mech. Div., ASCE, vol.106, n.5, 1980, pp. 1005-1019.
- [6] Carpinteri, A. "Static and energetic fracture parameters for rocks and concretes." Mater. Struct., RILEM, vol.14, 1981, pp.151-162.
- [7] Carpinteri, A. "Application of fracture mechanics to concrete structures." J. Struct. Div. ASCE, vol.108, n.4, 1982, pp.833-848.
- [8] Shaha, S:P. "Dependence of concrete fracture toughness on specimen geometry and on composition." in Fracture Mechanics of concrete: Material characterisation and testing, A. Carpinteri and A.R. Ingraffea, eds., Martinus Nijhaoff Publishers, 1984, pp.111-135.
- [9] Hillerborg, A. "Results of three comparative test series for determining the fracture energy G_f of concrete.", Material. Struct. RILEM, vol.18, 1985, pp.407-413.
- [10] Hillerborg, A. "The theoretical basis of a method to determine the fracture energy G_f of concrete.", Material. Struct. RILEM, vol.106, n.18, 1985, pp.291-296.
- [11] Ingraffea, A.R., e Saouma, V. "Numerical modelling of discrete crack propagation in reinforced and plain concrete." in Fracture Mechanics of Di Tommaso, eds., Martinus Nijhaoff publishers, 1985, pp.171-225.
- [12] Cedolin, L., De Poli S., Iori, I. "Meccanica della frattura dei laterizi utilizzati in collaborazione con elementi strutturali in conglomerato armato." Studi e Ricerche, vol.9, Corso di perfezionamento per le Costruzioni in Cemento Armato, F.lli Pesenti, Politecnico di Milano, 1987.
- [13] Biolzi, L. "Influence of slenderness and size-scale on the globale behaviour of concrete slabs." Atti del IX congresso nazionale AIMETA, Bari, 4-7 Ottobre 1988, pp.111-114.
- [14] Bocca, P., Carpinteri A., Valente, S. "Fracture mechanics of brick masonry: size effects and snap-back analysis." Mater. and Struct., RILEM, n.22, 1989.
- [15] Carpinteri, A. "Softening and snap-back instability in cohesive solids." Int. J. for numerical methods in Engrg., vol.28, 1989, pp.1521-1537.
- [16] Carpinteri, A. "Decrease of opparent tensile and bending strenght with speciment size: two different explanations based on fracture mechanics." Int. J. Solids Structures, vol.25, n.4, 1989, pp.407-429.
- [17] Chauang, T.J. e Mai, Y.W. "Flexural behavior of strain-softening solids." Int. J. Solids Structures, vol.25, n.12, 1989, pp.1427-1443.
- [18] Iori, I., Mirabella Roberti, G. "Instabilita' interna del laterizio: analisi numerico sperimantale di elementi tensoinflexi", Studi e

Ricerche, vol.11, Corso di Perfezionamento per le Costruzioni in Cemento Armato, F.lli Pesenti, Politecnico di Milano, 1989.

[19] Reihardt, H.W., Gaber, K. "From pore size distribution to an equivalent pore size of cement mortar." Mater. and Struct., RILEM, n.23, 1990, pp. 3-15.

[20] Shah, S.P., Carpinteri, A., (editors), "Fractures mechanics test methods for concrete." Rilem Report, n.5, London, 1991.

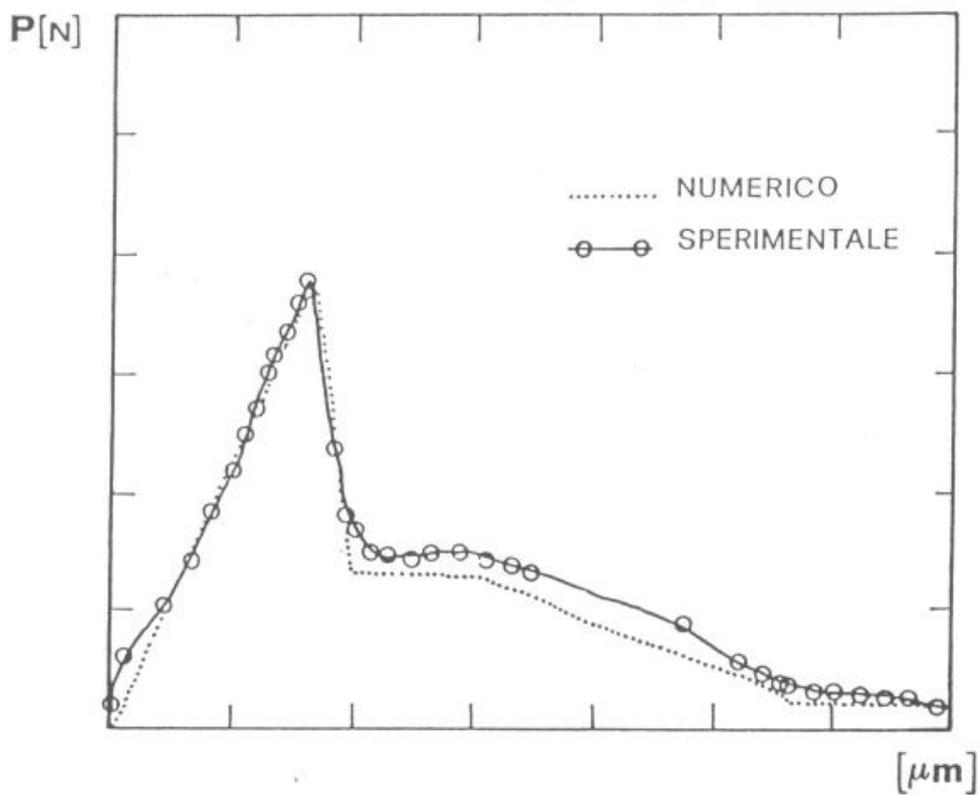
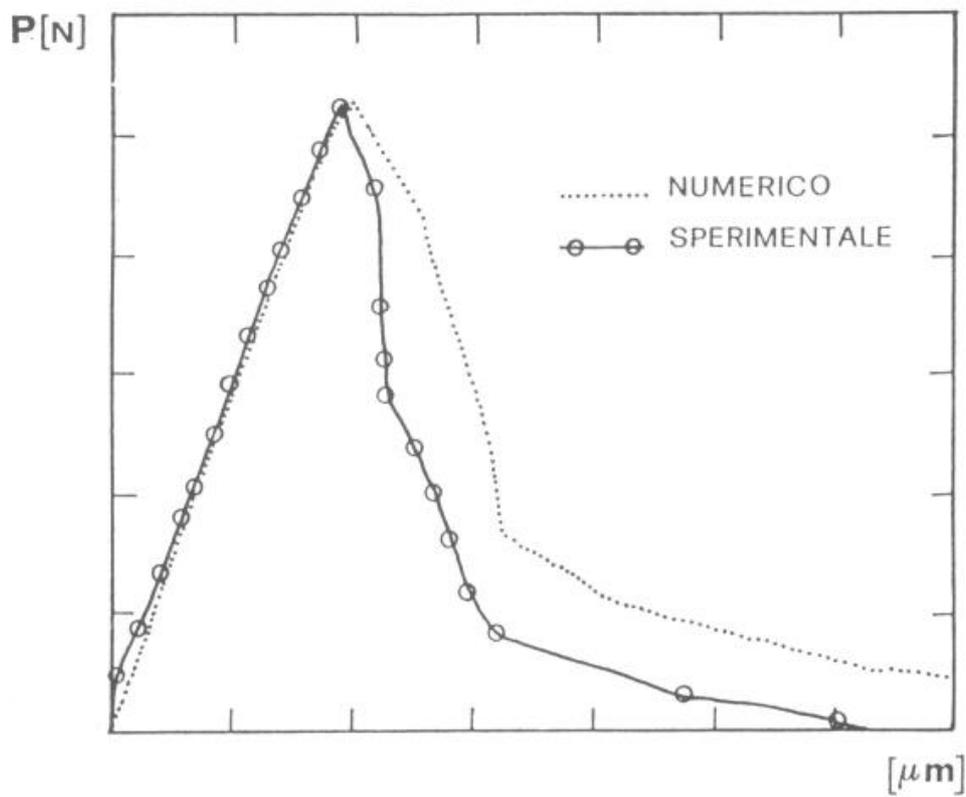


Fig.7-8 Diagrammi carico freccia relativi ai campioni 9 e 15

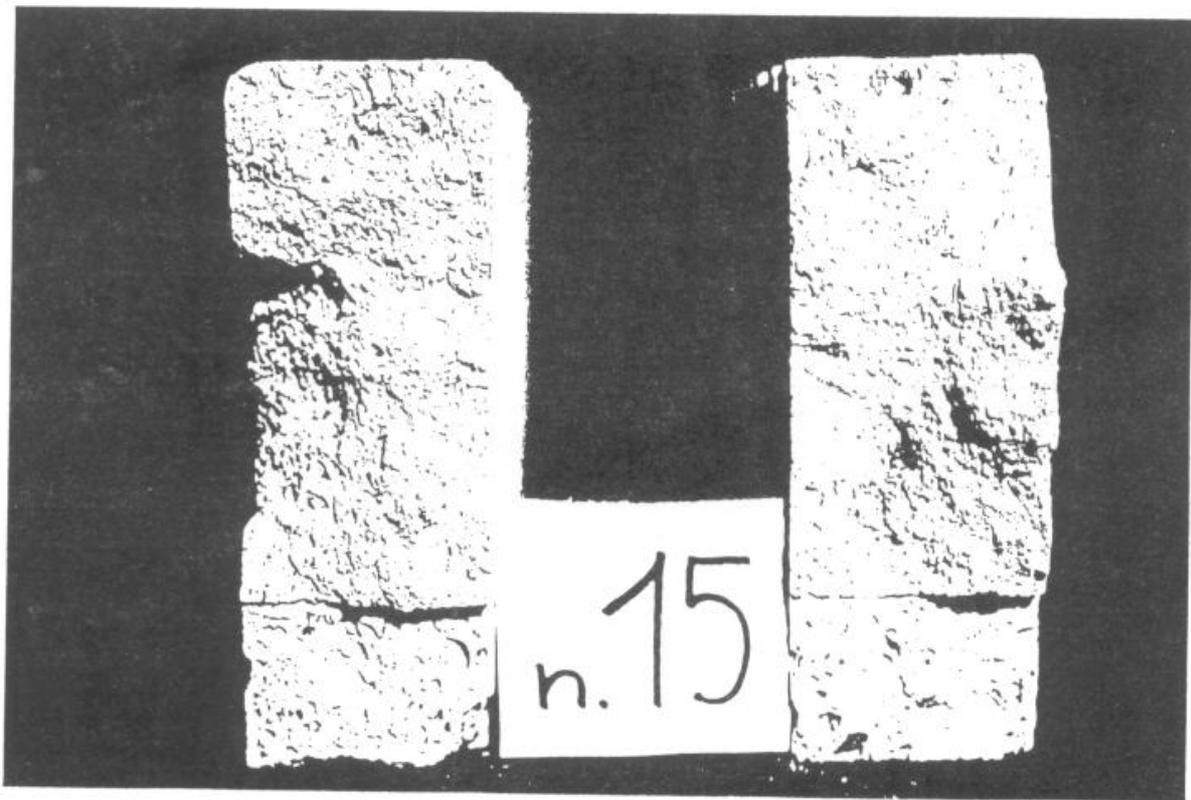
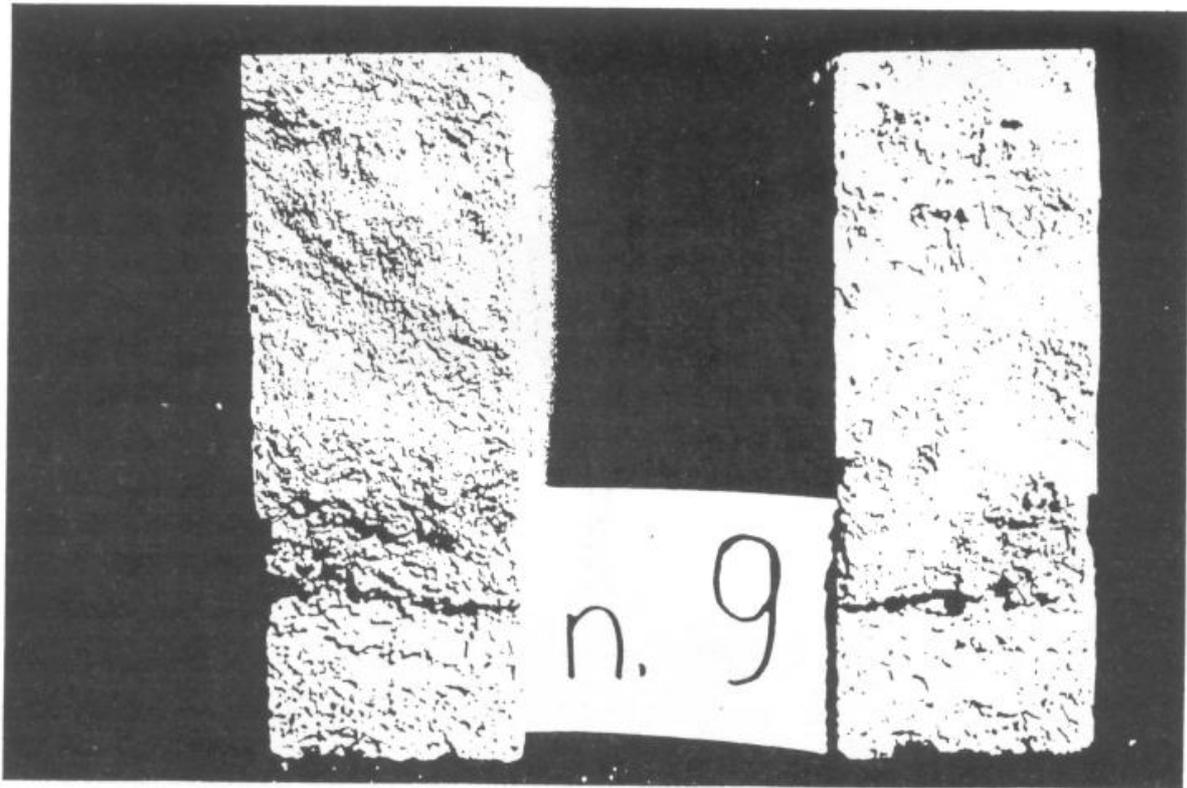


Fig.5-6 Superficie di frattura

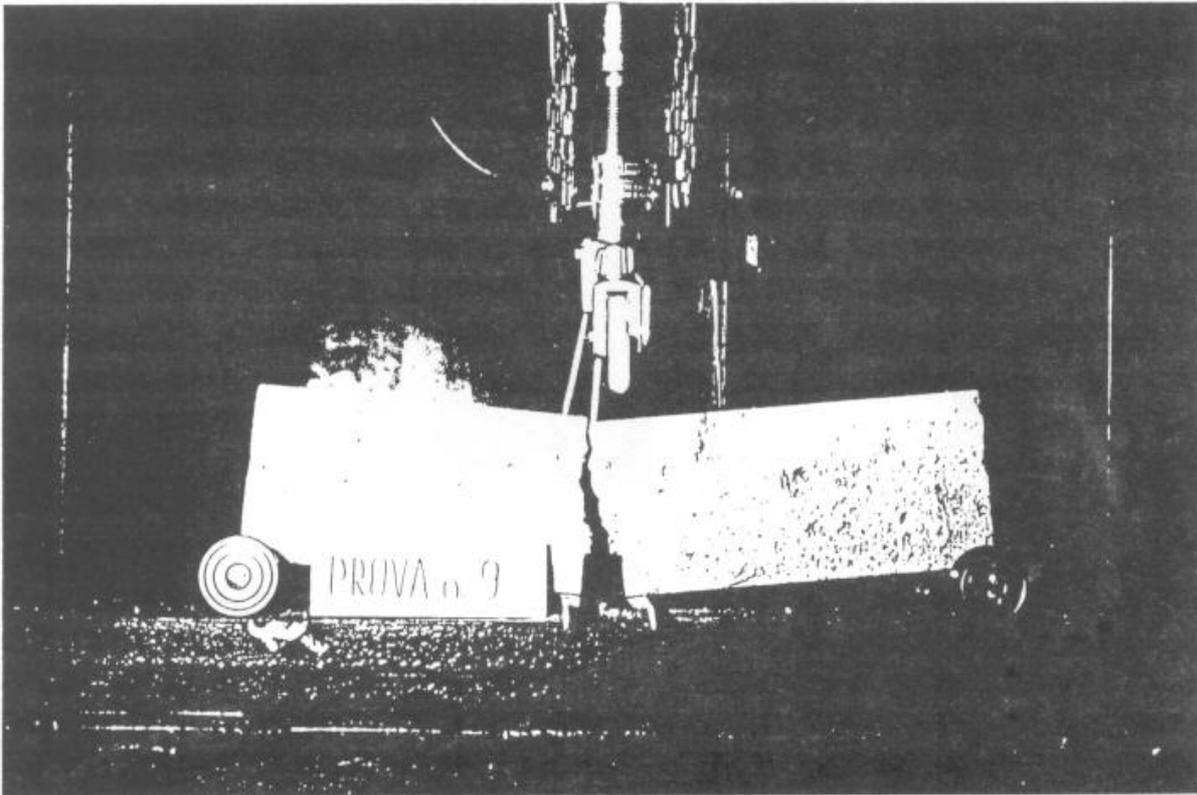


Fig.1 Attrezzatura e campione di prova

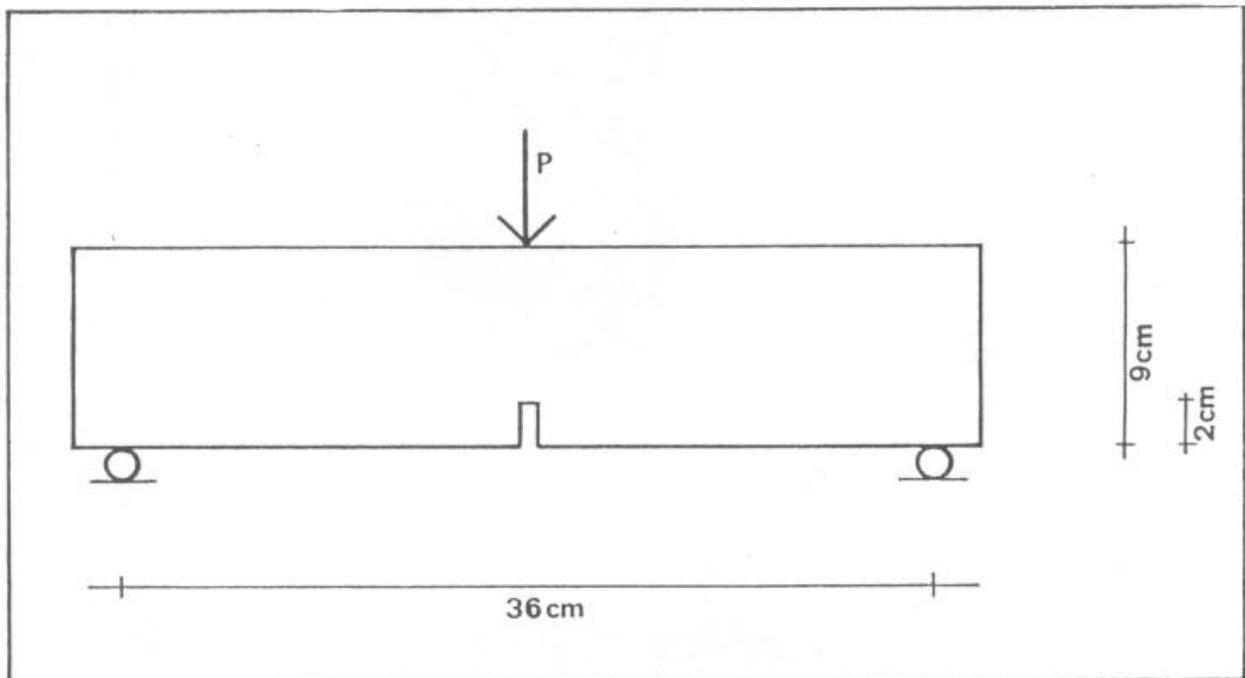


Fig.2 Caratteristiche geometriche dei provini

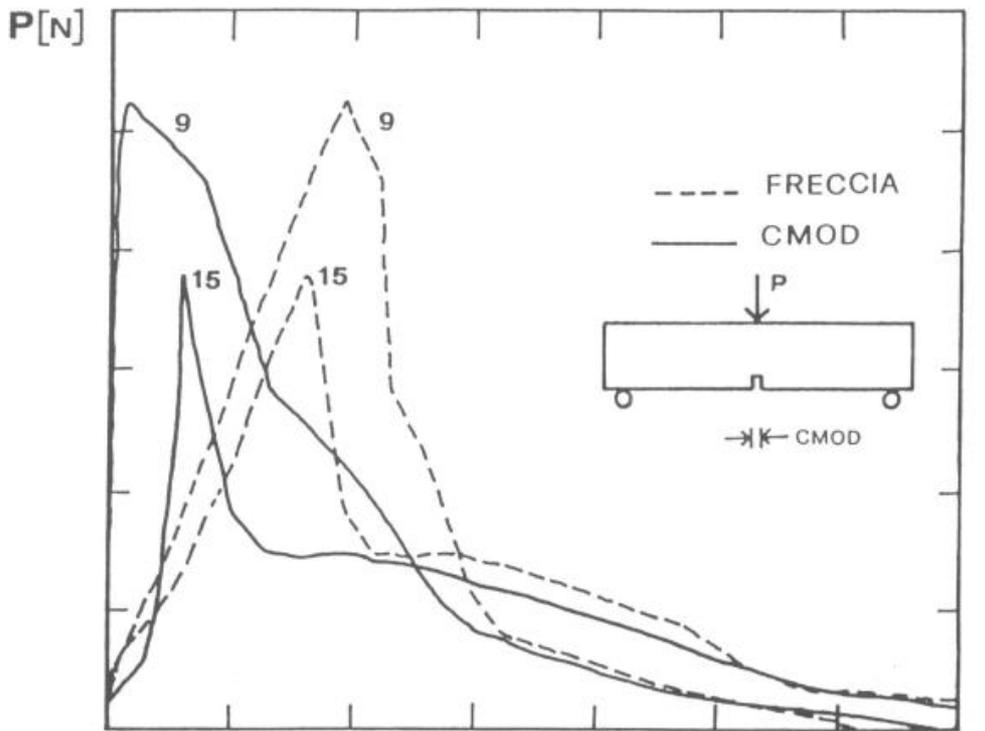


Fig.3 Diagrammi sperimentali carico - freccia e carico - CMOD relativi ai campioni 9 e 15

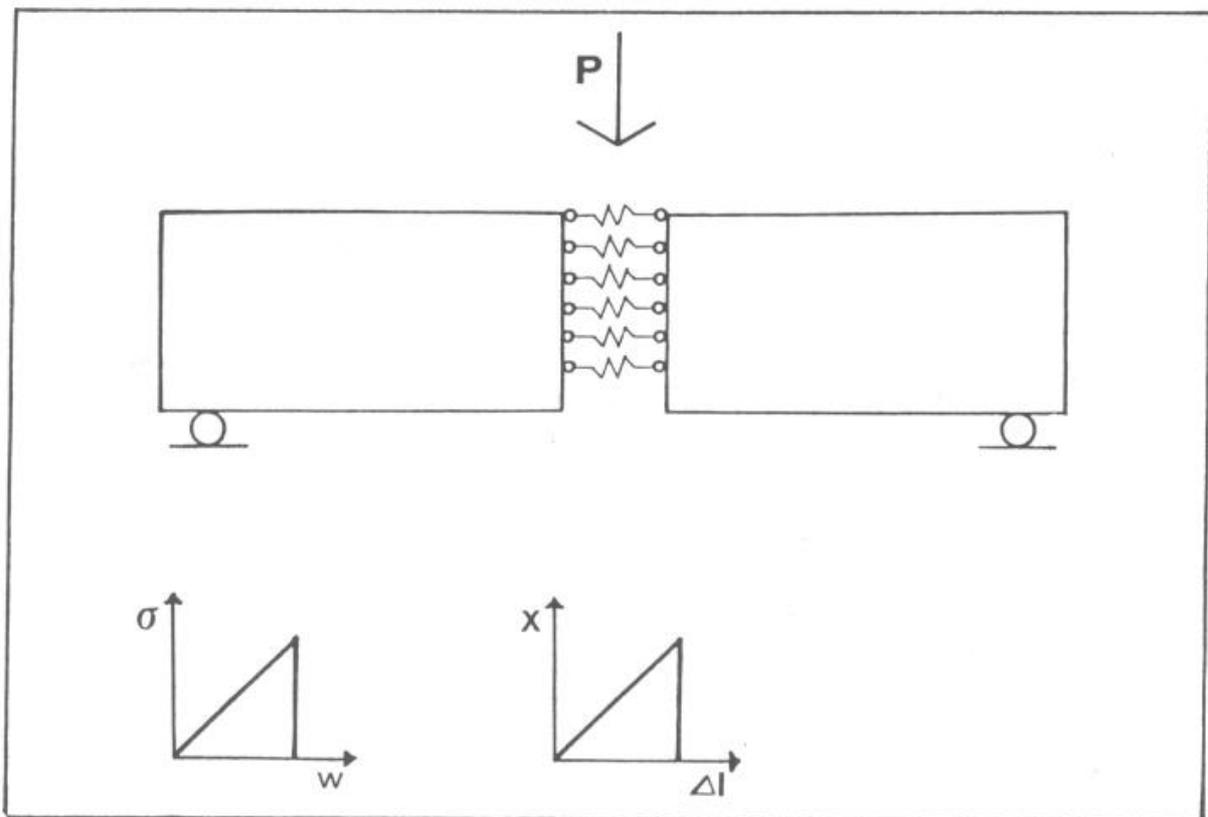


Fig.4 Modello strutturale per l'approccio numerico