



PROPRIETÀ MECCANICHE APPARENTI DI UN MATERIALE FORTEMENTE ETEROGENEO

S. Briccoli Bati
G. Ranocchiani
Dipartimento di Costruzioni, Piazza Brunelleschi, 6
50121 Firenze

SOMMARIO

Le dimensioni dei campioni usati per le prove di laboratorio, nonché le stesse modalità ritenute atte ad individuare i parametri caratteristici del comportamento dei materiali, ne condizionano i risultati influenzando i valori delle proprietà meccaniche apparenti che ne vengono dedotti. Tale circostanza assume ancora maggior peso quando trattasi di materiali fortemente eterogenei per cui, in genere, il campione di prova è solo poche volte più grande dell'elemento di volume rappresentativo. Ci si imbatte così in quella vasta serie di problemi inerenti la definizione delle dimensioni dei campioni di prova più idonee alla individuazione delle proprietà apparenti ed effettive di un mezzo eterogeneo. Ciò vale in genere per qualunque parametro materiale e a maggior ragione anche per la misura dell'energia di frattura che risulta fortemente dipendente dalle dimensioni del campione; questa grandezza, che viene determinata con modalità di prova ormai consolidate, risulta infatti sovrastimata. Da più parti si sta cercando di fare chiarezza a questo proposito cercando di individuare tutte le possibili sorgenti di dissipazione di cui tener conto all'atto del calcolo dell'energia di frattura. Nonostante i diversi tentativi effettuati non è ancora stata fatta completa luce sulla questione.

In base alle esperienze condotte su di un materiale lapideo naturale -il tufo di Sorano- e a quanto reperibile in letteratura sulla questione del "size effect" nella valutazione dei parametri energetici oggetto della meccanica della frattura, si propongono qui di seguito alcune considerazioni e riflessioni in questo ambito di problematiche.

INTRODUZIONE

Le indagini, svolte nell'ambito della meccanica della frattura, sul comportamento del tufo -materiale lapideo di origine vulcanica- hanno, anch'esse, messo in evidenza che, sebbene le modalità di prova atte a determinare le grandezze ritenute rappresentative del comportamento dei materiali nei riguardi della frattura, siano state ormai sistemate, tuttavia restano alcune questioni cui non è stata data una adeguata risposta. Tra queste quella che più di ogni altra richiede ulteriori approfondimenti riguarda il problema dell'"effetto scala", ovvero dell'influenza delle dimensioni del campione, di cui risente la misura dell'energia di frattura, grandezza ritenuta invece

intrinseca al materiale. Questo problema si pone in maniera ancora più complessa quando trattasi di materiali naturali affetti, più di quelli artificiali, da imperfezioni o difetti di differenti dimensioni. Tale circostanza, già evidenziata con l'applicazione della meccanica della frattura allo studio dei materiali cementizi quali malte, calcestruzzi e laterizi [1, 2, 3, 4, 5], investe, ovviamente, anche tutta la classe dei materiali eterogenei che collassano progressivamente esibendo un comportamento strain softening. Per questi, infatti, la dispersione di risultati, ottenuti con le usuali prove, varia al variare del rapporto tra le dimensioni delle eterogeneità o imperfezioni e quelle del campione. Negli ultimi anni si è tentato di inquadrare tale fenomenologia in vario modo facendo ricorso ad approcci di tipo statistico o weakest-link.

L'osservazione che le superfici di frattura risultano sempre irregolari e rugose, con caratteristiche di forma variabili da un materiale all'altro, denuncia inequivocabilmente il fatto che la loro forma dipende sia dalla microstruttura, inclusioni, grani, pori, che dalla geometria del campione. La difficoltà maggiore consiste nel sintetizzare e formalizzare le informazioni che è possibile trarre dal rilievo della superficie di frattura. Recentemente [6, 7, 8, 9, 10], si è intrapresa una nuova via che pare poter fornire ulteriori chiarimenti alla questione se l'energia di frattura possa, a ragione, essere ritenuta una proprietà intrinseca a ciascun materiale. Per questa via si tratta di assumere come modello della geometria della superficie di frattura un insieme di dimensioni fratte ovvero di individuarne la dimensione frattale D che è relazionabile al meccanismo del processo di frattura. Tale dimensione frattale, se usata nel dedurre l'energia di frattura e quindi nella interpretazione dei risultati sperimentali, correlata al parametro tenacità che cresce al decrescere della dimensione frattale, sembra fornire valori dell'energia di frattura indipendenti dalle dimensioni del campione. A questo proposito tuttavia occorre osservare che non è sempre corretto attribuire alla dimensione frattale la causa delle leggi di variazione esponenziale delle caratteristiche meccaniche, di un qualsivoglia materiale, al variare delle dimensioni del campione come ora spesso accade sulla scia dell'entusiasmo.

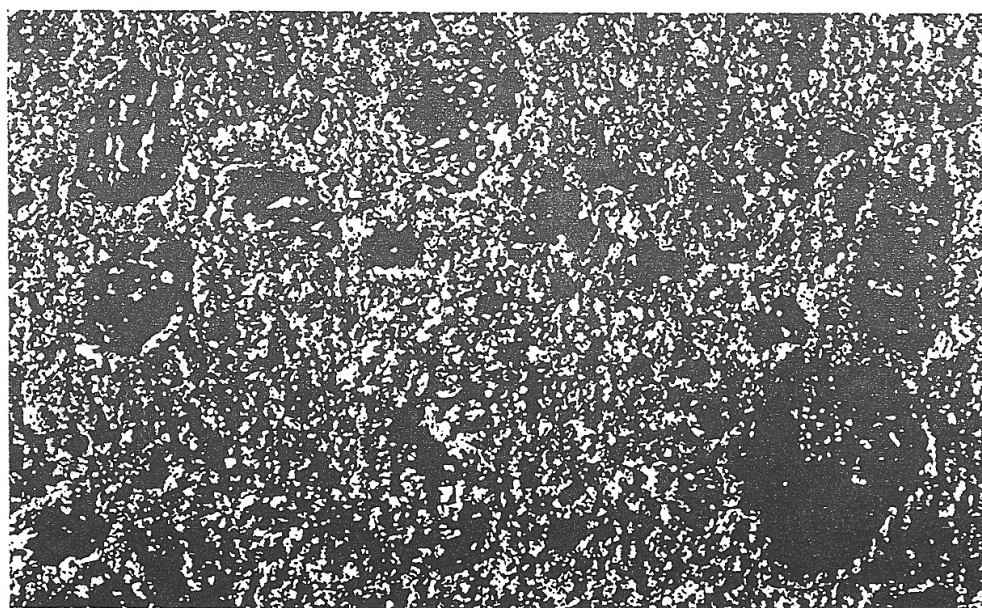
Nell'ambito di tale prospettiva si ritiene opportuno riportare alcune considerazioni che si è avuto l'opportunità di formulare in occasione di una vasta campagna sperimentale effettuata su provini di tufo di varia forma e dimensioni, assoggettati, oltre che a three-point bending test, a prove di compressione e trazione monoassiali.

CARATTERISTICHE DEL TUFO DI SORANO

Il tufo di Sorano, come tutti i tipi di tufo propriamente detti, è una roccia sedimentaria di origine vulcanica, classificabile tra le rocce tenere in virtù della sua resistenza a compressione; esso appartiene alla classe dei materiali eterogenei che collassano progressivamente esibendo un comportamento strain softening ed una ben diversa resistenza a trazione e compressione tanto da poter essere annoverato tra i materiali scarsamente reagenti a trazione: il rapporto tra le due resistenze caratteristiche è all'incirca di 1/14.

La sua forte eterogeneità è dovuta sia alla disomogeneità dei grani costituenti, per la presenza di inclusioni di materiali diversi, sia alla micro e macro porosità con dimensioni dei pori variabili dai micron a qualche centimetro (fig. 1, tab. 1).

L'alto valore della porosità determina una forte igroscopicità: il materiale assorbe lo 0,7% del proprio peso e assume una deformazione lineare dello 0,7‰ rispetto allo stato secco, in condizioni ambientali caratterizzate dal 60% di U. R., cosa che rende difficile il controllo degli esperimenti di durata media; con il 100% di U. R. si ha un assorbimento del 6,9% in peso ed una deformazione lineare del 1,04‰.



0 1 5 cm

Fig. 1 Porosità superficiale di un campione di tufo.

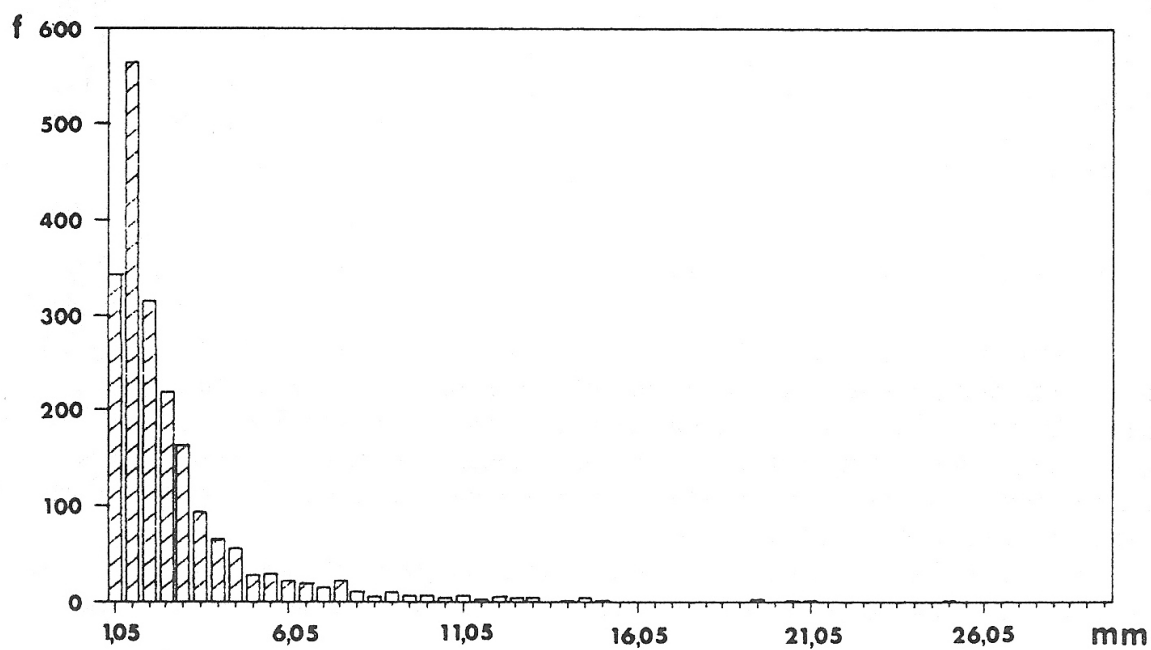


Fig. 2 Istogramma di frequenza della porosità superficiale; le classi sono definite sui diametri osservati.

I parametri descrittivi della distribuzione della porosità sono stati determinati analizzando la struttura superficiale del tufo di Sorano, ovvero misurando, in primo luogo, i vuoti superficiali di diametro superiore a 4 mm, su 52 campioni di forma cubica (10 x 10 x 10 cm). L'area dei vuoti, misurata sulle facce dei cubi parallele ai piani di sedimentazione della roccia, è risultata pari al 5,26% mentre quella relativa alle facce normali ammonta al 9,23% del totale.

Questi risultati spiegano come l'anisotropia delle proprietà meccaniche sia determinata essenzialmente dalla anisotropia della frazione più grande della porosità superficiale; infatti i valori medi di resistenza e di modulo elastico, che, se determinati facendo riferimento ad aree e lunghezze nominali rivelano l'anisotropia di questo tipo di materiale, risultano costanti se riferiti alla superficie depurata da questa classe di porosità.

Un'analisi più dettagliata ha permesso di tracciare le curve di distribuzione dell'area dei vuoti per classi di diametri, utilizzando i dati rilevati su 1222 cmq di superficie parallela ai piani di sedimentazione, per vuoti di diametro medio superiore a 1,04 mm. Sulla base di tali curve di distribuzione (fig. 2), è stato possibile calcolare, utilizzando i dati relativi ai vuoti di diametro superiore ad ogni classe considerata, la dimensione frattale della geometria superficiale ed il limite superiore del dominio al quale tale dimensione si applica. Ovviamente, ogni volta si fa riferimento alla dimensione frattale, è fondamentale precisarne il dominio e se al di fuori di tale dominio esiste la dimensione euclidea.

Per il momento, l'indagine porosimetrica è stata realizzata soltanto a scala macroscopica, ossia sui vuoti individuabili ad occhio nudo; ciò non permette, pertanto, allo stato attuale della ricerca, di precisare il limite inferiore di tale dominio. Il valore della dimensione osservato è di 1,91 circa, su di un dominio inferiore ai 3,4 cm (fig. 3). Va comunque precisato che i dati riportati riguardano esclusivamente la porosità relativa alle superfici del campione non essendo ancora in possesso di dati in grado di fornire un valore per la dimensione frattale relativo alla porosità volumica.

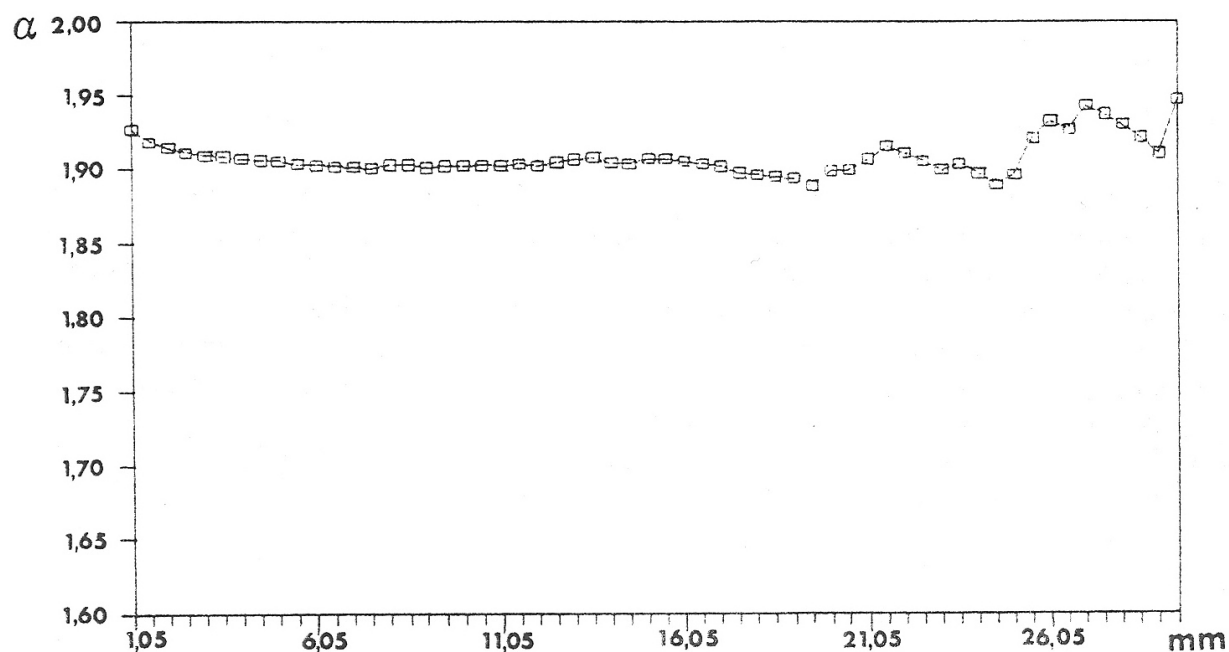


Fig. 3 Dimensione frattale calcolata in funzione del diametro di riferimento.

Sulla base di questi dati, relativi alle caratteristiche fisiche, e sulla scia dei numerosi tentativi, fatti negli ultimissimi tempi, di rileggere e reinterpretare i risultati ottenuti sia sulla resistenza a trazione che sulla energia di frattura dei calcestruzzi alla luce della teoria dei frattali, si è cercato di trarre, dalle prove meccaniche eseguite, alcune considerazioni sulla validità ed utilità di fare riferimento alla dimensione frattale nella valutazione delle proprietà meccaniche del materiale in esame.

Tab. 1 Caratteristiche principali del tufo di Sorano: le caratteristiche meccaniche sono riferite alla direzione ortogonale al piano di sedimentazione.

P. V. (kN/mc)	P. V. ass. (kN/mc)	porosità (%)	σ_{rc} (MPa)	σ_{rt} (MPa)	E (MPa)
10,5	26,4	58	2,98	0,21	1347

Tab. 2 Dati sulle caratteristiche meccaniche e relativi coefficienti di variazione; β indica il rapporto tra i raggi equivalenti delle superfici reagenti nominali e quello del massimo difetto osservato.

	comp. cub. (5x5x5) $\beta = 1,91$	comp. cub. (10x10x10) $\beta = 3,83$	comp. cub. (15x15x15) $\beta = 5,74$	comp. cub. (20x20x20) $\beta = 7,65$	traz. diretta (10x10x30) $\beta = 3,83$	fless. tre pti (36x9x3) $\beta = 1,75$
σ_r (MPa)	3,21	3,01	2,89	2,78	0,21	0,58
c (%)	19	33	4,9	8,5	38	34

Innanzitutto i risultati pubblicati mostrano alcuni aspetti contraddittori dovuti, a nostro avviso, al fatto che l'apparato teorico che inquadra il fenomeno della frattura ed i parametri caratteristici che lo descrivono, sono stati costruiti per rendere conto di quanto osservato e misurato sui materiali di natura metallica; non appare dunque scontato il trasferimento automatico di quell'apparato ai fenomeni specifici dei materiali lapidei. Infatti i materiali lapidei naturali ed artificiali esibiscono quasi tutti una scarsa reagenza a trazione dell'ordine, in media, di 1/10 di quella a compressione; cionondimeno, questi ultimi, si fratturano anche se sollecitati a compressione mostrando quadri fessurativi variabili da materiale a materiale.

Ci si chiede se per questi non sia possibile definire una energia di frattura determinabile con prove di compressione ed eventualmente se sia possibile relazionarla, in un qualche modo, a quella determinabile con prove di trazione diretta o three-point bending test?

La soluzione di un tale problema sarebbe di fondamentale importanza per la comprensione del comportamento di materiali siffatti.

In secondo luogo è ben noto agli sperimentatori come le superfici reali separate da un crack mostrino una geometria irregolare, caratterizzata da rugosità ed andamento tortuoso, dipendente sia dal materiale che dalla natura del processo di frattura prodotto da un tipo o da un altro di sollecitazione. Appare dunque più opportuno fare riferimento, nel calcolo dell'energia dissipata, alla superficie effettiva di frattura piuttosto che a quella nominale. Sorge così il problema di come

misurare una tale superficie. Da considerazioni analoghe consegue che, quasi certamente, tutti i parametri caratteristici del comportamento dei materiali eterogenei andrebbero rideterminati sulla base di osservazioni che tengano conto in un qualche modo della micro e macro geometria della struttura del materiale

Le manifeste incongruenze tra quanto appare logico per via teorico-deduttiva ed i risultati che è possibile trarre dalle prove su campioni sono dunque da ricercare nella interpretazione dei risultati sperimentali ovvero nelle operazioni che vengono eseguite per dedurre dalle grandezze direttamente misurabili le caratteristiche meccaniche dei materiali.

Questa idea non è certo nuova e comincia a farsi strada, ma, allo stato attuale, non sono ancora completamente precisati i limiti e le potenzialità di un tale approccio.

La grande dispersione di risultati, riscontrata nelle prove meccaniche eseguite sul tufo, fornisce lo spunto per alcune precisazioni sulle questioni sopra esposte e d'altra parte già segnalate in letteratura, come il fatto che al crescere del disordine diminuisce l'effetto scala.

Gli esperimenti condotti, rappresentati dalle prove di compressione monoassiale su provini cubici di dimensione variabili, hanno mostrato un effetto scala cui corrisponde un coefficiente angolare $d = -0.15$. D'altra parte in letteratura era già stato segnalato il fatto che al crescer del disordine diminuisce l'effetto scala al variare delle dimensioni dei campioni di prova. Avendo determinato la dimensione frattale superficiale del tufo, cui corrisponde nel caso in esame un valore pari a 1.91, con semplici calcoli si può risalire ad una legge di scala del tipo rappresentato in fig. 4 caratterizzato da un valore di $d = -0.09$; tale risultato è in disaccordo con l'evidenza sperimentale. La contraddizione evidenziata conferma dunque il fatto che gli effetti scala non sono esclusivamente dipendenti dalla dimensione frattale del mezzo.

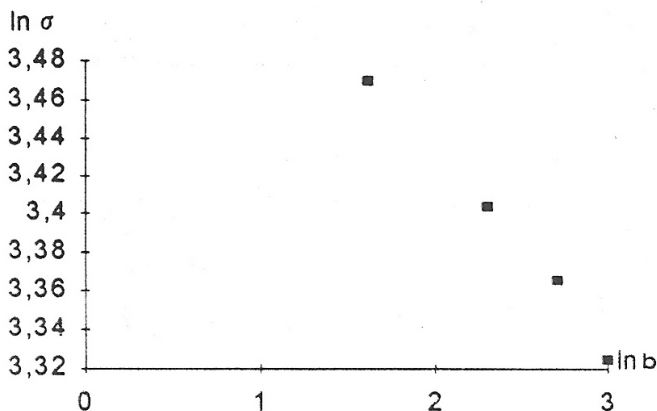


Fig. 4 Variazione della resistenza a compressione cubica in funzione del lato del campione.

CONCLUSIONI

L'esperienza condotta sul materiale oggetto di studio, anche se non ancora completata, ha comunque fornito indicazioni essenziali per la comprensione delle questioni inerenti la determinazione delle caratteristiche meccaniche di un materiale eterogeneo. In questo ambito di ricerca, l'utilizzo degli strumenti messi a disposizione dalla geometria frattale si è rivelato indispensabile per la descrizione sistematica di strutture complesse che presentino le

caratteristiche di autosimilarità proprie di molti materiali da costruzione e di molti processi naturali. Tuttavia la natura frattale dei materiali o dei percorsi di frattura non può essere ritenuta l'unica causa degli effetti scala che si rilevano comunemente nelle prove di laboratorio. Ne è conferma il fatto che, nel caso del materiale preso in esame, il dominio frattale termina ad una scala, che è pari alle dimensioni dell'elemento di volume rappresentativo, ben più piccola degli usuali campioni di laboratorio. Inoltre, se si interpretano gli effetti scala dei materiali lapidei naturali e artificiali in termini di dimensione frattale, risulta incomprensibile il motivo per il quale si osserva un andamento decrescente nelle resistenza a trazione diretta (e quindi una dimensione < 2 della superficie di frattura) mentre è ben noto che i valori di G_F sono crescenti al crescere delle dimensioni del campione utilizzato (giustificando la presenza di una dimensione > 2 per la superficie di frattura).

In realtà la presenza di una qualsiasi eterogeneità in un mezzo comporta una serie di circostanze che vanno dall'"effetto Weibull", all'influenza del gradiente di tensione, alla impossibilità di eseguire un test omogeneo, anche solo nelle condizioni al contorno, che sono significative se investono un dominio che si estende almeno dalle dimensioni dell'elemento di volume rappresentativo fino a 10 volte la dimensione del difetto maggiore, causando grande dispersione ed effetto scala [11].

Tuttavia, come ben si sa, l'identificazione dell'elemento di volume rappresentativo dà la possibilità di modellare le proprietà medie e di procedere anche sperimentalmente allo studio delle scale superiori.

Infine pare importante sottolineare che se i processi di fratturazione e di danneggiamento, legati a fenomeni di localizzazione o di "globalizzazione" dei difetti, hanno, nei materiali eterogenei, dimensione non intera, i parametri descrittivi del comportamento a scala macro possono derivare, non solo da proprietà intrinseche del materiale, ma anche da proprietà della geometria intrinseca a tale processo. Restano ovviamente da affinare e da rendere più spedite, in questo settore, le tecniche di indagine per lo studio delle geometrie complesse.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Mazars, J., "L'effet d'échelle dans les structures en béton", Rev. Franç. Géotech., n. 49, 1989, pp.15-24.
- [2] Carpinteri, A., "Cusp catastrophe interpretation of fracture instability", J. Mech. Phys. Solids, vol. 37, 1989, pp. 567-582.
- [3] Harder, N. A., "Dimensional analysis for concrete in fracture", Mat. and Struct., vol. 24, 1991, pp.202-209.
- [4] Harder, N. A., "Brittleness, fracture energy and size effect in theory and in reality", Mat. and Struct., vol. 25, 1992, pp.102-106.
- [5] Elices, M., Guinea, G. V., Planas, J., "Measurement of the fracture energy using three-point bend test: Part3 - Influence of cutting the P - δ tail", Mat. and Struct., vol. 25, 1992, pp. 327-334.
- [6] Bessendorf, M. H., "Stochastic and fractal analysis of fracture trajectories", Int. J. Engng. Sci., vol. 25, n. 6, 1987, pp.667-672.

- [7] Saouma, V. E., Barton, C. C., Gamaleldin, N. A., "Fractal characterization of fracture surfaces in concrete", *Engng. Fract. Mech.*, vol. 35, 1990, pp. 47-53.
- [8] Shouzhzhu, Z., "Fractal dimension and fracture toughness", *Z. angew. Math. Mech.*, vol. 70, 1990, pp. 530-532.
- [9] Carpinteri, A., "Fractal nature of material microstructure and size effects on apparent mechanical properties", *Laboratory of Fracture Mechanics Int. Rep. n. 1*, 1992.
- [10] Gol'dshtein, R. V., Mosolov, A. B., "Fractal cracks", *J. Appl. Maths Mechs*, vol.56, n. 4, 1992, pp. 563-571.
- [11] Morlier, P., Amokrane, K., Duchamps, J. M., "L'effet d'échelle en mécanique des roches; recherche de dimensions caractéristiques", *Rev. Franç. Géotech.*, n. 49, 1989, pp.5-15.