

# **IMPIEGO DELLA TECNICA DELLE EMISSIONI ACUSTICHE NELLA PREVISIONE DEI DISSESTI IN CAVITÀ: STUDI PRELIMINARI IN LABORATORIO**

**HALL STEVE \***, **DE SANCTIS FIORENZA \*\***,  
**VIGGIANI GIOACCHINO\***, **EVANGELISTA ALDO \*\***

\*Laboratoire 3S INPG Grenoble

\*\*Dipartimento di Ingegneria Geotecnica Università di Napoli Federico II

---

Il fenomeno di propagazione di discontinuità naturali nelle rocce tenere è di grande interesse applicativo nell'ambito dei problemi di instabilità dei fronti di scavo e dei pendii naturali. Le discontinuità esistenti nell'ammasso roccioso svolgono il ruolo di concentratori di sforzi di trazione e sono in grado di attivare nel tempo un progressivo processo di microfessurazione che riduce la resistenza a lungo termine del materiale. L'interazione, la propagazione e la coalescenza di fratture a livello microscopico può contribuire in modo significativo alla formazione di una fessura macroscopica che si manifesta improvvisamente e senza alcun segno premonitore. A questo tipo di meccanismo sembra imputabile l'origine di alcuni dei dissesti che si sono verificati recentemente nelle cavità sotterranee della città di Napoli, dove l'improvviso distacco di grossi blocchi di tufo dalle volte o dai pilastri può provocare il collasso parziale o addirittura totale della struttura, anche a distanza di 100 anni dalla fine delle operazioni di scavo. La valutazione e gestione del rischio associato ai fenomeni di dissesto richiede l'impiego di una tecnica di monitoraggio che consenta di tenere sotto osservazione continua l'evoluzione del sistema di fratture nell'ammasso. La tecnica delle emissioni acustiche (EA) sembra rappresentare uno strumento particolarmente idoneo a tal fine, dal momento che è in grado di rilevare le onde elastiche provocate dall'improvviso rilascio di energia dovuto alla propagazione di lesioni. La possibilità di impiegare le emissioni acustiche come sistema di prevenzione in sito è in sede di verifica in laboratorio. Una campagna sperimentale in corso presso il Laboratoire 3S di Grenoble su campioni naturali di tufo giallo napoletano mostra che il numero di eventi acustici e lo spettro di frequenze possono essere messi in relazione ai fenomeni di innesco e propagazione di fessure. In particolare i parametri delle emissioni acustiche (conteggi, ampiezza, durata ed energia degli eventi) sono stati registrati durante prove di compressione uniaassiale su campioni di tufo sia integri sia dotati di intagli appositamente realizzati per favorire l'innesco della propagazione. Dall'esame contestuale dei diagrammi carico - tempo e conteggi EA - tempo è possibile individuare il processo di microfessurazione che precede la rottura e la formazione di una macro-fessura in corrispondenza del carico di picco. Inoltre per i provini a due intagli l'esame dello spettro di frequenze fornisce utili informazioni sui due diversi meccanismi di coalescenza per trazione del ponte di roccia tra le fessure.

## **INTRODUZIONE**

Il sottosuolo della città di Napoli (CROCE , 1967; CROCE A. e PELLEGRINO A., 1967; NICOTERA P. e LUCINI P., 1967;) è costituito da materiali piroclastici sia lapidei sia sciolti. Alle profondità di interesse tecnico, si incontrano nella gran parte del territorio il Tufo Giallo Napoletano e, al di sopra, le pozzolane. La formazione tufacea è interessata da una fitta rete di cavità sotterranee scavate fin dai primi insediamenti umani, sia allo scopo di estrarre materiale da costruzione sia per la realizzazione di opere in sotterraneo (acquedotti, gallerie, fognature). Nel corso di quasi tremila anni, sono stati estratti milioni e

milioni di metri cubi di tufo, e se finora le cavità censite nella sola area urbana sono circa 800, non è difficile immaginare che questo numero sia destinato a crescere (fig.1). La stragrande maggioranza di queste cavità versa in uno stato di abbandono, senza che siano state prese le opportune precauzioni per garantirne la conservazione nel tempo. Per questo motivo le condizioni di stabilità delle cavità appaiono spesso precarie e possono rappresentare un notevole elemento di rischio per il territorio in superficie. I dissesti più frequentemente osservati in cavità consistono nel distacco, dalle volte e/o dai pilastri, di blocchi di dimensioni variabili da qualche metro ad alcune decine di metri cubi (fig.2). Questi crolli parziali avvengono in modo improvviso e senza alcun segno premonitore, anche a distanza di centinaia di anni dalla fine delle operazioni di scavo (EVANGELISTA A. et al., 1980, 2002). Anche se il loro effetto in termini di danni a cose o persone è certamente contenuto visto l'attuale stato di inutilizzazione di molte cavità, la modifica delle condizioni statiche che ne deriva può essere estremamente pericolosa e può innescare un fenomeno di collasso generale (EVANGELISTA A. et al., 1980, 2002).



Fig. 1 – Dettaglio planimetrico di una zona della città di Napoli con indicazione delle cavità  
Negli ultimi anni si sono talvolta verificati episodi di dissesto ascrivibili direttamente al crollo totale o parziale di cavità sotterranee. La maggior parte di essi ha provocato l'apertura di voragini, lo sprofondamento della sede stradale o del calpestio di androni o abitazioni, e nei casi più gravi anche la perdita di vite umane (VIGGIANI C. et al., 2002).



Fig. 2- Esempio di crolli dalla volta di una cavità

Per una corretta valutazione del rischio associato ai fenomeni di dissesto nel sottosuolo di Napoli è necessaria la conoscenza delle effettive condizioni di stabilità delle cavità e delle possibili cause che sono all'origine dei meccanismi di crollo. Le prime sono indispensabili per stabilire una scala di priorità degli interventi e per la progettazione delle opere di consolidamento, mentre le seconde sono estremamente utili per la scegliere le più idonee tecniche di monitoraggio che tengano sotto controllo l'evoluzione nel tempo dei fenomeni di dissesto.

Per quanto riguarda la valutazione delle condizioni statiche, alcuni semplici criteri per una verifica preliminare sono stati fissati nell'ambito dell'attività di ricerca condotta dal C.U.G.R.I. (Consorzio inter-Universitario per la Prevenzione e Previsione Grandi Rischi, Università di Napoli Federico II e Università di Salerno) e commissionata dalla Pubblica Amministrazione.

Le condizioni statiche dei pilastri e delle volte sono state analizzate separatamente facendo riferimento ai dati raccolti su un certo numero campione di cavità censite. Il livello di sicurezza dei pilastri (fig.3a) è stato definito in base alla tensione massima calcolata con il metodo delle "aree di influenza". Il coefficiente di sicurezza in volta (fig.3b) è stato valutato attraverso una serie di analisi numeriche tenendo conto delle principali caratteristiche geometriche note del problema (profondità della volta, spessore del tetto di tufo, luce della cavità e forma della sezione) e della resistenza a compressione mobilitata (EVANGELISTA A. et al., 2000).

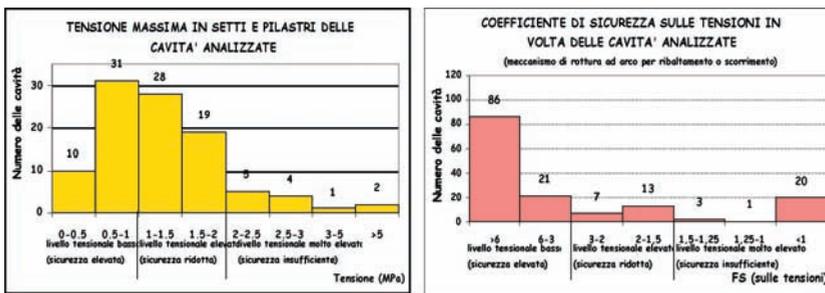


Fig. 3 - a) Tensione massima calcolata in setti e pilastri b) Coefficiente di sicurezza sulle tensioni in volta

Le analisi e le elaborazioni effettuate hanno consentito di rispondere in tempi rapidi alle richieste dell'amministrazione comunale, offrendo i primi criteri per individuare le cavità in condizioni più critiche e per definire una strategia degli interventi e delle operazioni di recupero (EVANGELISTA A. et al., 2002). Questo studio ha richiesto una consistente raccolta di dati sullo stato di fatto delle cavità, che si sono rivelati utilissimi anche per individuare le possibili cause dei meccanismi di crollo. In particolare dai sopralluoghi effettuati è emerso che l'ammasso tufaceo è quasi sempre attraversato da lesioni, la cui interazione e propagazione nel tempo può contribuire in maniera significativa ai fenomeni di instabilità. Le discontinuità osservate hanno natura diversa: alcune di esse sono preesistenti allo scavo e sono sorte a seguito del processo di formazione del banco piroclastico lapideo (per effetto del rapido raffreddamento durante la deposizione dei materiali sciolti); altre invece si sono formate nel tempo a seguito della redistribuzione dello stato tensionale dovuta alle operazioni di scavo. Quasi sempre il quadro fessurativo è assimilabile ad un vero e proprio schema di "sistemi di discontinuità", perché le fessure mostrano quelle orientazioni ordinate e preferenziali tipiche dei giunti e appaiono sufficientemente ravvicinate da suddividere la massa in grossi blocchi.

Un blocco isolato dall'intersezione di famiglie di discontinuità è potenzialmente instabile quando tende a scorrere lungo una giacitura critica delle pareti o a distaccarsi in volta per effetto del proprio peso. Spesso però anche quando si sono raggiunte le condizioni cinematiche per l'instabilità, il blocco non crolla immediatamente, ma possiede una sorta di stabilità dipendente dal tempo. Questo meccanismo può essere spiegato se si tiene conto che le discontinuità non sono completamente persistenti, cioè esistono lungo la lesione dei segmenti di roccia intatta tra fessure contigue. La presenza di questi ponti di roccia è in grado di fornire al blocco potenzialmente instabile una stabilità aggiuntiva. Il crollo parziale si manifesta allora solo a seguito del processo di deteriora-

mento nel tempo del ponte sotto carico costante. Affinché il fenomeno di instabilità in cavità avvenga devono dunque sussistere più fattori concomitanti:

- 1) presenza di discontinuità non persistenti
- 2) evoluzione nel tempo delle proprietà meccaniche della roccia
- 3) presenza di un elevato stato tensionale

Per quanto riguarda il primo, la costante presenza di discontinuità nell'ammasso roccioso, come detto, è comprovata dalle ispezioni effettuate. Tuttavia bisogna precisare che le informazioni riguardanti regolarità, ricorrenza e persistenza delle fessure sono talvolta incerte, a causa della loro difficile individuazione con le tradizionali tecniche di rilievo strutturale basate sull'esame visivo delle pareti o sull'esecuzione di linee di sondaggio.

Riguardo al fenomeno di degradazione delle proprietà meccaniche del tufo napoletano, studi condotti in laboratorio da EVANGELISTA e AVERSA (1994, 1998) confermano che il materiale in prove di creep va soggetto ad una significativa riduzione della resistenza a compressione nel tempo, cui corrisponde una riduzione della coesione ed un incremento dell'angolo di attrito. La perdita di coesione nel tempo, che è una caratteristica comune a molti materiali fragili, dipende dal processo di formazione, propagazione e coalescenza di microfessure che in ultima analisi da luogo all'insorgere di una frattura a livello macroscopico.

Infine, pur non disponendo di una misura diretta dello stato tensionale effettivamente agente in sito, è ragionevole ritenere che esso sia elevato, sia perché la forma irregolare delle sezioni favorisce la concentrazione di sforzi e sia perché a causa dell'intenso sfruttamento delle cave gli spessori degli elementi resistenti sono talvolta molto ridotti. Poiché le condizioni di sicurezza delle cavità diminuiscono per effetto dell'evoluzione del sistema di fratture nell'ammasso tufaceo, il miglior intervento di mitigazione del rischio di dissesto appare l'impiego di una idonea tecnica di monitoraggio. La tecnica delle emissioni acustiche (EA) sembra rappresentare uno strumento particolarmente idoneo a tal fine, dal momento che è in grado di rilevare le onde elastiche provocate dall'improvviso rilascio di energia dovuto alla propagazione di lesioni.

## **1. I METODI ACUSTICI PER IL MONITORAGGIO IN SITO E IN LABORATORIO**

I metodi acustici sono solitamente suddivisi in due categorie a seconda che debbano essere impiegati in sito o in laboratorio. Il metodo microsismico (MS) rileva le frequenze nell'intervallo compreso tra 0.1 e 10 kHz ed è particolarmente adatto al monitoraggio di ampi volumi di roccia ( $\leq 1 \times 10^7 \text{m}^3$ ) in cavità o gallerie. Il metodo delle emissioni acustiche (EA) si usa nell'intervallo di frequenze 30-250 kHz e si presta al monitoraggio di piccoli volumi di roccia o campioni di laboratorio (Young R.P., 1999). Entrambi i sistemi hanno il vantaggio di essere poco invasivi ed una volta installati consentono di effettuare il monitoraggio per lunghi periodi di tempo senza eccessivi oneri di manutenzione. La strumentazione consiste in una batteria di sensori che in sito sono disposti a contatto con le pareti di roccia in appositi fori di sondaggio, mentre in laboratorio sono incollati direttamente sul campione. Una volta installato, il sistema può essere utilizzato sia per la rilevazione dei fenomeni acustici (monitoraggio passivo), sia per la misura delle proprietà dei materiali (monitoraggio attivo). I sensori rilevano le onde sonore transienti prodotte dall'improvviso rilascio di energia elastica dovuto alle modifiche strutturali di un materiale posto in una generale condizione di carico. Nel caso di una roccia tra le possibili cause di queste modifiche ci sono la formazione, la propagazione e la coalescenza di microfessure.

I dati, registrati sotto forma di impulsi elettrici, consentono di trarre informazioni differenziali a seconda del tipo e numero dei sensori e del sistema di acquisizione. Con i normali trasduttori disponibili in commercio i parametri che si possono valutare (conteggi,

ampiezza, durata ed energia degli eventi) permettono solo un'analisi qualitativa dei fenomeni da monitorare. Per ottenere dati quantitativi, viceversa, è richiesto l'impiego di trasduttori ad elevata tecnologia e di un sistema di acquisizione dati estremamente veloce, di modo che siano disponibili le informazioni relative alla forma delle onde acustiche. Studi recenti effettuati sia in sito che in laboratorio hanno evidenziato la molteplicità delle informazioni che è possibile trarre dall'impiego di queste tecniche. I metodi acustici, infatti, consentono di:

- 1) sapere dove avvengono i fenomeni di danno: noti i tempi di arrivo delle onde acustiche a ciascun sensore e la velocità di propagazione delle onde nel materiale, è possibile localizzare un evento EA/MS all'interno della roccia con grande accuratezza.
- 2) valutare l'estensione della zona danneggiata o fratturata: l'insieme dei punti relativi a tutti gli eventi localizzati in un dato intervallo di tempo permette di fotografare la densità del danno nel materiale. Quando la distribuzione geometrica dei punti localizzati si concentra secondo un percorso ben delineato, si assiste alla progressiva formazione di una fessura. Inoltre la velocità delle onde sismiche nelle zone danneggiate è significativamente più bassa di quella nelle zone intatte.
- 3) avere informazioni sul meccanismo di danno: la forma delle onde registrate da ciascun sensore è funzione del meccanismo sorgente e dipende dal percorso effettuato dall'onda acustica quando essa viaggia dalla sorgente al ricevitore. L'analisi della forma delle onde consente di distinguere tra i diversi meccanismi di propagazione delle fessure (per taglio o per trazione).
- 4) ricavare informazioni sullo stato tensionale: è stato accertato che esiste una relazione tra zone che presentano una elevata anomalia della velocità e regioni soggette ad un elevato stato di tensionale, e dunque potenzialmente danneggiate.
- 5) determinare le proprietà del materiale nel volume di roccia: la frequenza e l'ampiezza di un'onda che viaggia in un materiale dipendono direttamente dalle sue proprietà. Misure della velocità sismica, dell'anisotropia e dell'attenuazione sono dunque sensibili a qualsiasi variazione delle proprietà dei materiali.
- 6) valutazione del comportamento dipendente dal tempo: attraverso il monitoraggio continuo si ottengono informazioni sull'evoluzione della risposta meccanica di un materiale, e dunque sui fenomeni di degradazione e progressiva formazione di fessure.

Il monitoraggio acustico è dunque ideale per l'osservazione dei meccanismi di fratturazione e la risposta deformativa della roccia sotto carico; inoltre ha dimostrato di essere uno strumento particolarmente efficace per l'individuazione del grado di danneggiamento della roccia a seguito di variazioni dello stato tensionale e di degradazione del materiale nel tempo. Di conseguenza rappresenta una soluzione all'avanguardia per affrontare il problema d'instabilità delle cavità del sottosuolo napoletano, tanto più che sopperisce ad alcune delle carenze di informazioni precedentemente elencate, tra cui la conoscenza dello stato tensionale in sito e la configurazione geometrica delle discontinuità. Inoltre può essere impiegata anche per verificare la buona riuscita degli eventuali interventi di consolidamento.

La possibilità di impiegare le emissioni acustiche come sistema di prevenzione in sito è attualmente in sede di verifica in laboratorio.

## **2. PROVE SPERIMENTALI**

Il monitoraggio acustico è stato adoperato nell'ambito di una campagna sperimentale avviata presso il Laboratoire 3S di Grenoble e volta a chiarire il ruolo delle discontinuità nel complesso meccanismo di rottura progressiva dei materiali fragili. Il principale obiettivo di questa ricerca è analizzare i fenomeni di innesco e propagazione di fessure a partire da difetti preesistenti nel materiale ed il processo di coalescenza del ponte di

roccia tra due fessure. A tal fine sono state effettuate delle prove di compressione uniassiale su campioni di tufo napoletano sia integri sia dotati di intagli appositamente realizzati. Nella sperimentazione sono stati impiegati provini parallelepipedi (100x50x35 mm) prelevati da un unico banco affiorante di tufo giallo napoletano (tufo a grana fine). Il materiale in esame è caratterizzato da una ridotta eterogeneità (pomici e inclusi lapidei di qualche mm) e piccole dimensioni dei pori ( $8 \times 10^{-4} \div 2 \times 10^{-3}$  mm). Le sue caratteristiche fisico-meccaniche sono riportate in tab.1.

K (m/s)	$\gamma_D$ (KN/m <sup>3</sup> )	n (%)	$\sigma_c$ (MPa)
$1.6 \times 10^{-7}$	12.8	47.3	11.0

Tabella 1 – Proprietà fisico – meccaniche del tufo fine (Aversa, Evangelista, Ramondini, 1991)

Numerosi studi sperimentali sul comportamento del ponte di roccia tra due fessure non persistenti (SHEN B. et al., 1995; BOBET A. et al., 1996; WONG R.C. et al., 1998) hanno evidenziato che il fenomeno di propagazione, in prove di compressione, dipende da: numero, grado di apertura, configurazione geometrica (dimensione, inclinazione, sovrapposizione, distanza) degli intagli e confinamento. Nella presente sperimentazione è stata analizzata in particolare l'influenza dell'inclinazione del ponte di roccia. A tal fine sono stati realizzati, attraverso lo spessore dei campioni, due intagli uguali (lunghezza 12 mm), aperti (apertura 0.4 mm), paralleli, inclinati di un angolo  $\alpha = 45^\circ$  rispetto alla direzione di applicazione del carico (fig.4a) e le prove sono state condotte mantenendo costante la distanza tra gli intagli (12 mm) e facendo variare l'inclinazione del ponte tra le fessure (b) tra  $45^\circ$  e  $120^\circ$  con incrementi di  $15^\circ$  (fig.4b).

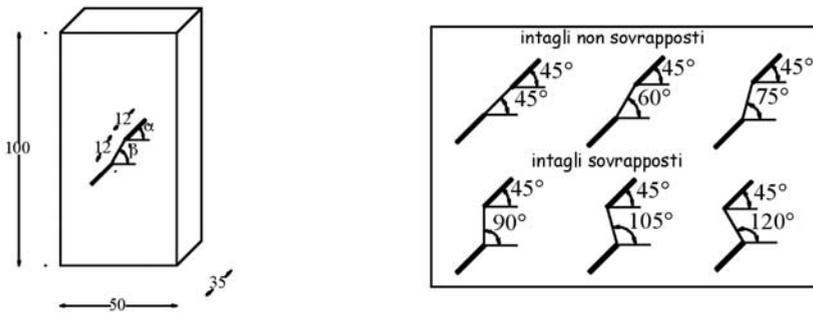


Fig.4 – a) Geometria del provino e degli intagli b) Variazione dell'inclinazione del ponte

Tutte le prove di compressione sono state effettuate in condizioni di deformazione piana, in assenza di confinamento e fluido interstiziale nella cella piana (fig.5) del Laboratoire 3S di Grenoble. In tale apparecchiatura, poiché il provino è posto tra due piastre rigide trasparenti, è possibile osservare il piano della deformazione e, dunque, fotografare il fenomeno di propagazione di fessure in corso di prova. Inoltre essa garantisce la sostanziale assenza di impedimenti cinematici allo sviluppo del meccanismo di rottura piano, grazie ad una piastra munita di un carrello privo di attrito in grado di scorrere orizzontalmente nel piano della deformazione. Due trasduttori consentono di misurare lo spostamento ed il carico assiale durante la prova.



Fig.5 – Cella piana del Laboratorio 3S

Per il rilevamento delle emissioni acustiche, è stata adoperata una attrezzatura composta da (fig.6):

- 1) trasduttori di emissioni acustiche
- 2) pre-amplificatore
- 3) filtro
- 4) amplificatore
- 5) sistema di acquisizione dati

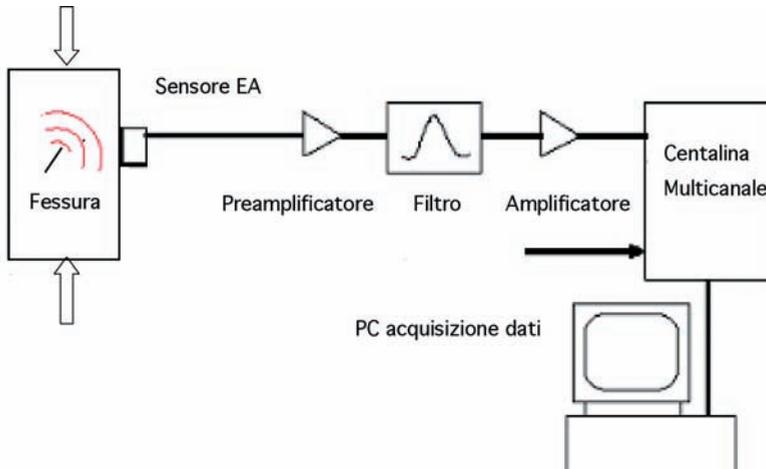


Fig.6 – Schema dell'attrezzatura per il rilevamento delle emissioni acustiche

Durante il processo di microfessurazione del tufo le onde create dall'improvviso rilascio di energia elastica sono state rilevate attraverso due sensori piezoelettrici a banda larga della Digital Acoustic Corporation, tipo B1025 di 1cm di diametro. Il campo di frequenze che sono in grado di individuare è compreso tra 50 kHz e 2 MHz. I trasduttori sono stati posizionati direttamente sulle superfici laterali del campione nella direzione normale al piano di frattura previsto (fig.7). Perché il monitoraggio vada a buon fine è fondamentale stabilire un perfetto contatto tra sensore e provino. Ciò significa che il trasduttore deve essere ben incollato sulla superficie del campione e tra i due non deve passare aria. Il collante inoltre deve poter essere rimosso senza danneggiare i sensori. Per garantire le necessarie condizioni di isolamento e incollaggio sono stati allora previsti due accorgimenti tecnici: 1) tra il trasduttore e la superficie è stato interposto uno strato di gel viscoso isolante 2) intorno al trasduttore è stato inserito un anello in gomma poi incollato sulla superficie.

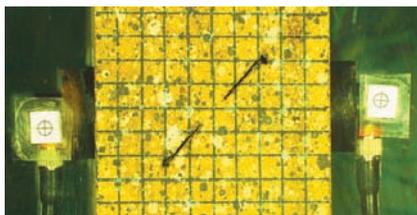


Fig.7– Dettaglio dell'incollaggio dei sensori

Il segnale rilevato passa attraverso un preamplificatore, un filtro ed un amplificatore. Il preamplificatore PAC (Physical Acoustic Corporation) da 20 dB svolge il duplice compito di amplificare i segnali più deboli, in modo che non vadano persi, e di ridurre il disturbo dovuto all'ambiente esterno. Il filtro elimina il rumore di sottofondo (meccanico o elettromagnetico) che tende a prevalere alle basse frequenze. L'amplificatore (40-60 dB) amplifica ulteriormente ed in modo regolabile il segnale, prima di inviarlo al sistema di acquisizione attraverso una centralina multicanale. I dati arrivano ad un PC dotato di scheda audio e di un software (MISTRAS 2001) in grado di acquisire e mostrare in tempo reale l'evoluzione di tutti i parametri delle emissioni acustiche. Il sistema di acquisizione acustico è sincronizzato con quello collegato alla cella piana che fornisce il carico e lo spostamento agenti sul provino.

In questa prima sperimentazione sono stati utilizzati solo due sensori durante il monitoraggio, pertanto le informazioni disponibili sono soltanto di tipo qualitativo (conteggi, ampiezza, durata ed energia degli eventi) e nulla ancora può dirsi riguardo alla localizzazione delle sorgenti acustiche per la quale è necessario disporre di una batteria di almeno 4 o più sensori. Questo aspetto sarà esaminato in futuro nel corso di una successiva campagna di prove.

### 3. PRIMI RISULTATI

I parametri acustici ottenuti nella sperimentazione sono: conteggi, ampiezza, durata ed energia degli eventi. Con riferimento alla fig.8 si ricorda che possono essere così definiti:

- 1) evento: è ogni segnale al di sopra di un certo livello prefissato (soglia) che arriva al trasduttore di EA
- 2) ampiezza di un evento: è il picco del segnale
- 3) conteggio di un evento: è il numero di volte che il segnale attraversa la soglia
- 4) durata di un evento: è l'intervallo di tempo compreso tra il primo e l'ultimo conteggio
- 5) energia di un evento: è l'area sottostante l'involuppo dell'evento

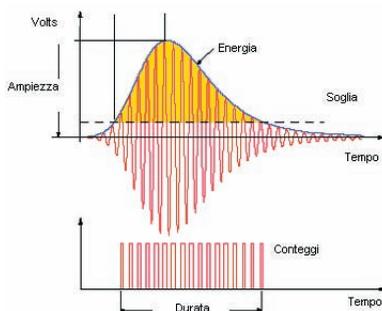


Fig.8 – I parametri delle emissioni acustiche

L'evoluzione di questi dati nel tempo può essere messa in relazione al diagramma carico-tempo delle prove di compressione uniassiali e alle osservazioni visive del piano di deformazione in corso di prova. Si ottengono così utili informazioni sul processo di microfessurazione prima della rottura e sulla formazione di una macro-fessura in corrispondenza del carico di picco. In particolare verranno discussi i risultati ottenuti in una prova su campione integro ed una su campione dotato di intagli.

Nei provini integri la rottura fragile in compressione uniassiale avviene secondo il tipico meccanismo di axial splitting (HORII H., NEMAT-NASSER S., 1985), ovvero con la formazione di una o più fessure verticali. L'eterogeneità del materiale sembra essere il fattore scatenante del meccanismo di rottura. Il tufo napoletano, infatti, è una roccia porosa che presenta una struttura particolare, costituita da una matrice cineritica che ingloba dei componenti granulari (inclusi lapidei e pumicei) di dimensioni fino al cm. Queste imperfezioni, siano esse pori, inclusi o microfessure, svolgono il ruolo di concentratori di sforzi e sono responsabili della formazione di microfessure da trazione, anche quando il provino è soggetto a compressione. All'aumentare del carico si assiste alla formazione di nuove microfessure e alla loro propagazione nella direzione di applicazione del carico. Raggiunta una certa densità critica nel campione, le fessure iniziano ad interagire fin quando non avviene la loro coalescenza e la conseguente formazione di una frattura macroscopica. Una chiara evidenza di questo fenomeno è indicata in figura 9a, in cui sono riportati nello stesso diagramma le curve normalizzate della forza, dei conteggi cumulativi ai due sensori e del gradiente della forza in funzione del tempo per la prova su campione integro.

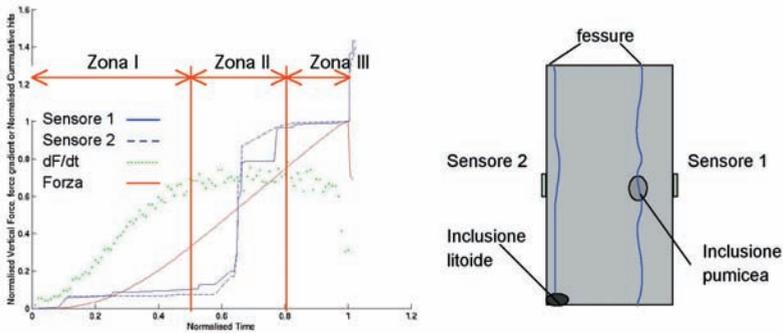


Fig.9 – a) Curve normalizzate carico, gradiente e conteggi cumulati in funzione del tempo b) posizione delle fessure e delle inclusioni

E' possibile individuare tre zone a differente comportamento: la zona I, caratterizzata dall'insacco delle prime microfessure; la zona II, caratterizzata dal primo fenomeno di coalescenza delle fessure e la zona III, caratterizzata dalla completa formazione di due macrofessure.

L'insacco nelle prime microfessure nella zona I è indicato dall'esistenza di un'attività acustica di piccola entità e pressoché costante, cui si accompagna un aumento del gradiente di forza e un andamento non lineare della curva di carico. Nella zona II, dove la curva di carico è invece praticamente elastica, si osserva prima un leggero incremento e poi un picco dei conteggi cumulati in corrispondenza del massimo della curva del gradiente. A questo primo salto, rilevato da entrambi i sensori, ne segue un secondo di minore entità individuato solo dal sensore 1. In questa fase sono state osservate le prime fessure visibili sul campione. Nella zona III la curva di carico ha andamento non lineare; in corrispondenza del picco vi è un brusco incremento dei conteggi ed una diminuzione del gradiente. La rottura avviene lungo due fessure verticali. Dall'esame delle

superfici di rottura al termine della prova, è emerso che i piani principali di frattura si sono sviluppati a partire da due inclusioni di grosse dimensioni: una pumicea ed una litoide (fig.9b). Il primo fenomeno di coalescenza delle fessure avviene presumibilmente lungo il piano contenente l'inclusione litoide. La formazione di questa discontinuità infatti scherma la ricezione del segnale al sensore 2 mentre si sta sviluppando la coalescenza lungo il piano contenente l'inclusione pumicea.

Lo spettro di frequenze riportato in fig.10 conferma che la prima parte della prova è caratterizzata da eventi di piccola frequenza che si possono associare al processo di microfessurazione per trazione, mentre la fase di propagazione e coalescenza mostra eventi di frequenza più elevata.

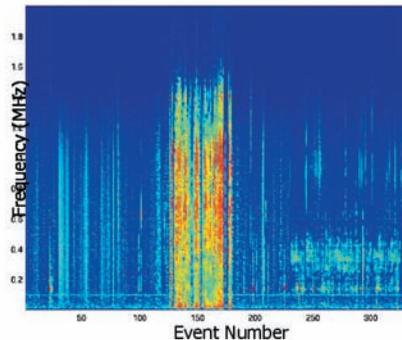


Fig.10– Spettro di frequenze

Nei provini dotati di due intagli la rottura fragile è caratterizzata sempre dalla formazione di fratture primarie di trazione (wing cracks) che partono dagli apici degli intagli e propagano nella direzione di applicazione del carico assiale (SHEN B. et al., 1995; BOBET A. et al., 1996; WONG R.C. et al., 1998) Le wing cracks si sviluppano sia agli apici esterni che agli apici interni al ponte di roccia. Esse possono essere direttamente o indirettamente responsabili del meccanismo di coalescenza del ponte tra le fessure a seconda della posizione relativa degli intagli nel campione: se gli intagli sono sovrapposti (fig.4b) la rottura avviene secondo le traiettorie di propagazione individuate proprio dalle wing crack, se gli intagli non sono sovrapposti (fig.4b), l'apertura delle fessure primarie induce l'insorgere di fratture secondarie da taglio (secondary cracks). In sintesi può dirsi che:

- 1) per valori dell'inclinazione del ponte  $\beta \leq 60^\circ$  la coalescenza del ponte tra le fessure avviene per taglio, con la formazione di due fratture secondarie che iniziano a propagare agli apici interni fino a ricongiungersi (fig.11a e 11b)
- 2) per valori dell'inclinazione del ponte  $75^\circ \leq \beta \leq 105^\circ$  la coalescenza del ponte tra le fessure avviene per taglio combinato a trazione. Si assiste prima alla formazione di fessure da trazione e successivamente, all'aumentare del carico, alla propagazione per taglio a partire dagli apici interni. (fig.11c, 11d, 11e)
- 3) per valori dell'inclinazione del ponte  $\beta > 105^\circ$  (fig.11f) la coalescenza del ponte tra le fessure avviene per trazione, con la formazione di una wing cracks all'apice interno della fessura inferiore che propaga verso la fessura superiore.

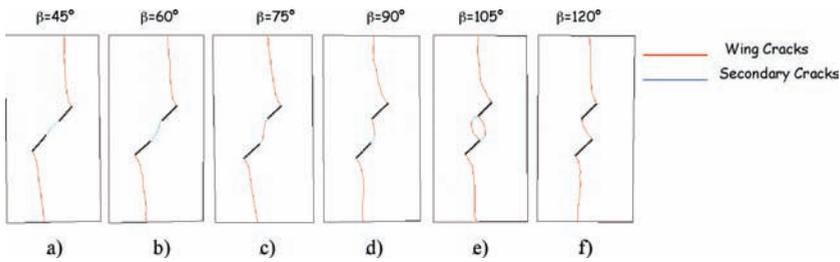


Fig.11 – Traiettorie di propagazione per diverse configurazioni degli intagli: a)  $\beta=45^\circ$  b)  $\beta=60^\circ$  c)  $\beta=75^\circ$  d)  $\beta=90^\circ$  e)  $\beta=105^\circ$  f)  $\beta=120^\circ$

In figura 12 sono riportati le curve normalizzate relative a due prove condotte su campioni aventi la stessa configurazione geometrica degli intagli. In particolare si illustrano i risultati ottenuti per  $\beta=120^\circ$  che sono confrontabili con quelli ottenuti su campione integro, dal momento che in entrambe le prove la rottura fragile avviene secondo un meccanismo diretto di trazione.

Analogamente al caso precedente è possibile riconoscere le tre zone a diverso comportamento acustico e fessurativo. Tuttavia rispetto al caso dei campioni integri il maggior numero di eventi acustici non si presenta più in corrispondenza del massimo del gradiente, ma si verifica al picco della curva di carico. Questo accade perché non è più l'eterogeneità "naturale" del materiale a regolare il fenomeno di innesco e propagazione di microfessure, ma piuttosto la macrostruttura imposta dalla presenza dei due intagli. La rottura fragile che prima si manifestava seguendo la distribuzione casuale dei difetti nel campione, adesso si sviluppa completamente a partire dagli apici degli intagli quando le wing crack portano a coalescenza il ponte di roccia (fig.13). A parità di macrostruttura e, quindi, di configurazione geometrica degli intagli, l'andamento delle emissioni acustiche nelle zone I e II (fig.12) è diverso in relazione al minore o maggiore contenuto inclusioni presenti nei campioni.

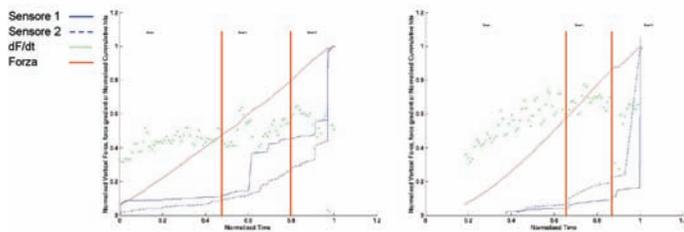


Fig.12 – Curve normalizzate carico, gradiente e conteggi cumulati in funzione del tempo

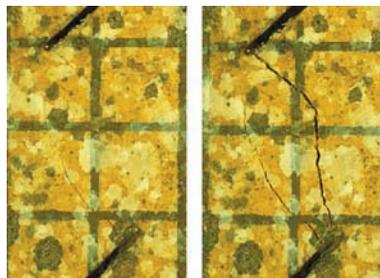


Fig.13 – Dettaglio della propagazione delle fessure primarie attraverso il ponte di roccia

## CONCLUSIONI

Una campagna di prove di laboratorio condotte su campioni di tufo napoletano ha evidenziato che il monitoraggio con emissioni acustiche è in grado di rilevare il processo di microfessurazione che si manifesta prima della rottura e la formazione di una macrofessura in corrispondenza del carico di picco. Inoltre il progressivo aumento delle emissioni acustiche nel tempo può essere interpretato come campanello d'allarme nei riguardi dei meccanismi di fratturazione che conducono a rottura. Di conseguenza l'applicazione di questa tecnica appare promettente per il monitoraggio in sito delle cavità del sottosuolo di Napoli, in quanto può contribuire alla previsione dei fenomeni di dissesto dovuti alla propagazione di discontinuità naturali.

## BIBLIOGRAFIA

- CROCE A. (1967) - Il sottosuolo della città di Napoli nei riguardi dei problemi geotecnici. Atti dell'VIII Convegno di Geotecnica, Cagliari, vol. 3, 23-44
- CROCE A., PELLEGRINO A. (1967) - Il sottosuolo della città di Napoli. Caratterizzazione geotecnica del territorio urbano. Atti dell'VIII Convegno di Geotecnica, Cagliari. Vol. 3: Il sottosuolo di Napoli, 233-270
- NICOTERA P., LUCINI P. (1967) - La costituzione geologica del sottosuolo di Napoli nei riguardi dei problemi tecnici. Atti dell'VIII Convegno di Geotecnica, Cagliari. Vol. 3: Il sottosuolo di Napoli, 45-112
- EVANGELISTA A., LAPEGNA U., PELLEGRINO A. (1980) - Problemi geotecnici nella città di Napoli per la presenza di cavità nella formazione del tufo. Atti del XIV Convegno di Geotecnica, Firenze
- EVANGELISTA A., FLORA A., LIRER S., DE SANCTIS F., LOMBARDI G. (2002) – Studi ed interventi per la tutela di un patrimonio sotterraneo: l'esempio delle cavità di Napoli. XXI Convegno di Geotecnica, L'Aquila
- LOMBARDI G., PERRONE S., VIGGIANI C. (2002) - Le voragini nella città di Napoli: una calamità naturale? XXI Convegno di Geotecnica, L'Aquila.
- EVANGELISTA A., AVERSA S. (1994) – Experimental evidence of non-linear and creep behaviour of pyroclastic rocks. Proc. Course on Visco-plastic behaviour of geomaterials. Cristescu N.D.; Gioda G. (eds) CISM Courses and Lectures N°350, Springer Wien New York – pp 55-102
- AVERSA S., EVANGELISTA A. (1998) – The mechanical behaviour of a pyroclastic rock: yield strength and “destruction” effect. Rock Mech. Rock Eng. Vol.31(1) pp 25-42
- YOUNG R.P. (1999) – Acoustic remote monitoring of rock and concrete structures for nuclear waste depositories. Swedish National Council for Nuclear Waste - Stockholm
- AVERSA S., EVANGELISTA A., RAMONDINI M. (1991) – Snervamento e resistenza a rottura di un tufo a grana fine. Atti del II Convegno dei Ricercatori del G.N.C.S.I.G. del C.N.R., Ravello, vol.1- pp 3-22
- HORII H., NEMAT-NASSER S. (1985) – Compression-induced microcrack growth in brittle solids: axial splitting and shear failure. J. Geophys. Res., vol.90:B4, pp. 3105-3215.
- SHEN B., STEPHANSSON O., EINSTEIN H.H., GHAREMAN B. (1995) – Coalescence of fracture under shear stress in experiments. J. Geoph. Res., vol. 100 (B4), pp 5975-5990
- BOBET A., EINSTEIN H.H. (1996) – Fracture coalescence in rock material under uniaxial and biaxial loading. Proceeding 2<sup>nd</sup> North American Rock Mechanics Symposium NARMS'96, vol. 2, pp. 1603-1609 Montreal, Quebec, Canada.
- WONG R.H., CHAU K.T. (1998) – Crack coalescence in a rock-like material containing two cracks. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., vol. 35, pp. 147-164