BIMESTRALE DELL'ORDINE
DEGLI ARCHITETTI
DI ROMA E PROVINCIA

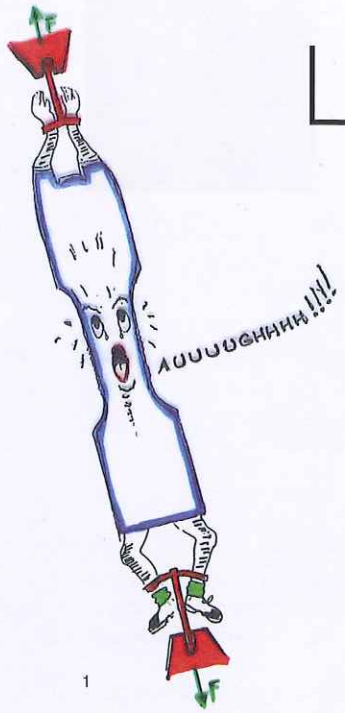
ANNO XLVII
GENNAIO-FEBBRAIO 2012

99/12

NUOVA SEDE
ENI-SAIPEM

OMAGGIO A LUCIO
PASSARELLI
INTERVISTA A
ROBERTO PALUMBO
L'ACUSTICA CI SALVERÀ
VALORIZZAZIONE DEI
BENI MILITARI A ROMA
OUTDOOR DESIGN

Spedizione in a. p. - D.L. 353/2003 (conv. in L. 27/02/2004 n. 46) art. 1, comma 1, DCB - Roma. In caso di mancato recapito rinviare a Ufficio Poste Romanina per la restituzione al mittente previo addebito.



1

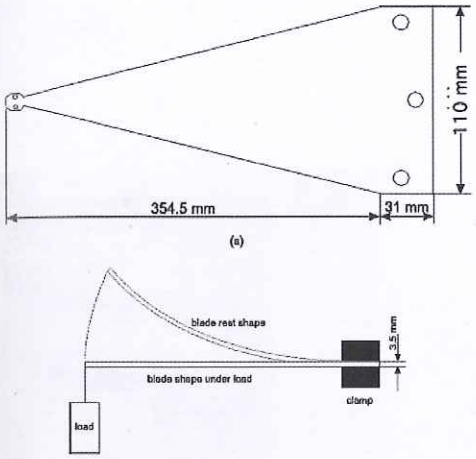
L'acustica ci salverà

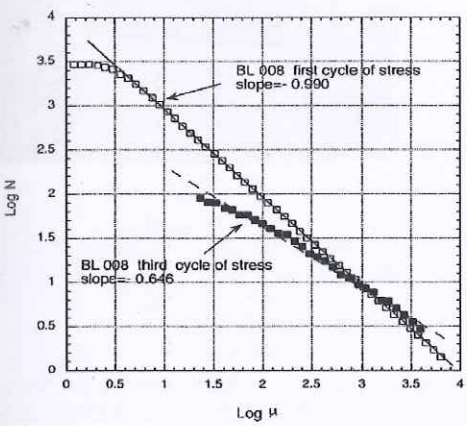
Francesco Bianchi

L'emissione acustica (AE) per il monitoraggio strutturale è una procedura che si basa sugli ultrasuoni emessi da un corpo solido soggetto a sollecitazione, in grado di eseguire una diagnosi della affidabilità e prestazione della struttura. Un metodo che consente di individuare una soglia di sicurezza secondo canoni prescelti, raggiunta la quale la struttura richiede o un intervento di messa in sicurezza o la sua ricostruzione ex novo.

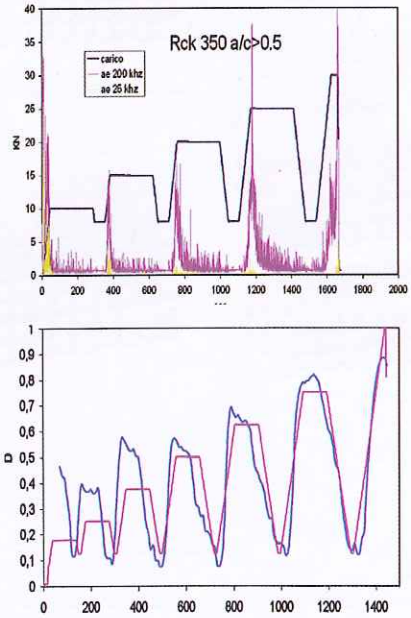
1. Emissione acustica. L'energia acustica è un processo fisico legato alla generazione di onde elastiche dovute al rapido rilassamento di energia immagazzinata da una o più sorgenti localizzate entro un materiale o una struttura. Gli strumenti utilizzati sono in grado di misurare passivamente i segnali (ultrasuoni) che vengono rilasciati da ogni struttura solida, allorché venga sottoposta a sforzi di qualsiasi genere ed entità.

Esiste finalmente la concreta possibilità di porre sotto sorveglianza continua ed in tempo reale ogni edificio o struttura, sia costruita dall'uomo (edifici, viadotti, macchinari diversi, etc.), sia naturale (fronti franosi, dighe, ghiacciai, etc.) con un rete di sensori centralizzata, ed operante come una sorta di assicurazione pagata su base volontaria dagli interessati.
La procedura, che si basa sugli ultrasuoni emessi da un corpo solido soggetto a sollecitazione, dà un'indicazione precisa sullo stato di invecchiamento di una struttura solida, ovvero esegue una diagnosi della affidabilità e prestazione della struttura.
Infatti ogni struttura costruita ad arte è sicura. Ma con il passare del tempo – con l'usura derivante o dall'uso o da fattori ambientali (escursioni termiche, fattori climatici, corrosione, inquinamento, etc.) – ogni materiale soffre di "invecchiamento" e la sicurezza della struttura diminuisce nel tempo. Ciò avviene per ogni materiale (metalli, calcestruzzo, pietra o marmo, laterizio, rocce, ceramica, vetro, legno, fibre al carbonio, etc.).
Questo metodo consente di individuare – per ogni caso applicativo specifico – una soglia di sicurezza secondo canoni prescelti, raggiunta la quale la struttura richiede o un intervento di messa in sicurezza o la sua ricostruzione ex novo.
Tutto ciò può applicarsi ad ogni edificio abitativo, o viadotto, o massicciata viaria, etc., sia a beni culturali, sia più in generale ad ogni materiale solido. Il sistema hardware e software per l'acquisizione e l'analisi di ultrasuoni, emessi a seguito di sforzi meccanici in strutture rigide, con lo scopo di identificare la perdita delle prestazioni di un materiale, è coperto da brevetto (*).
Da anni l'Istituto di Acustica "O.M. Corbino" studia le emissioni acustiche (AE) prodotte dal decadimento dei legami che costituiscono le strutture cristalline dei solidi sottoposti a sforzi. I solidi sono caratterizzati da una struttura cristallina determinata da una fitta rete di legami atomici o molecolari. La rottura dei legami cristallini produce nella struttura solida un degrado delle sue caratteristiche di resistenza meccaniche. Il principio di questa tecnica è l'utilizzo dell'emissione acustica che ogni materiale, sottoposto a sollecitazione, emette. Questo suo "lamento" si manifesta come un rilascio di AE che sono dapprima di frequenza più alta, essendo associate a falle di dimensione più piccola (ovvero a "domini di falla" più piccoli). Con l'evolvere del degrado della struttura cristallina, i "domini di falla" piccoli per coalescenza danno luogo a "domini di falla" di dimensione via via crescente, con rilascio di AE di frequenza sempre più bassa. Questo consente di riconoscere una direzione del tempo interna ed intrinseca al materiale solido in esame. Le applicazioni finora ese-





2

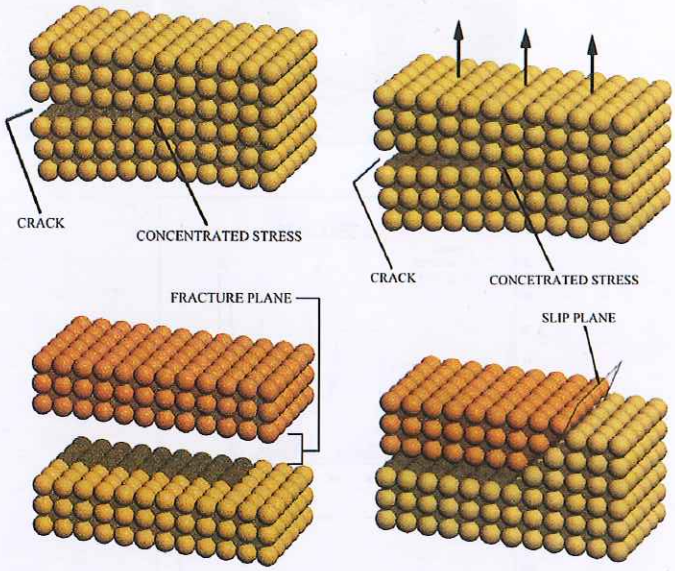


3

2. Sollecitazione di una lama di acciaio. Una lama di acciaio maraging (Marval 18 C-250) utilizzata in un superattenuatore dell'esperimento VIRGO è stata flessa per tre volte, denotando un invecchiamento progressivo, caratterizzato da un indice Dt che, da un valore iniziale ca. 1 (quando la lama veniva flessa per la prima volta dopo essere uscita dalla fonderia) è andato progressivamente decrescendo, fino a raggiungere un valore ca. 0.6 alla terza flessione, dopo di che si è stabilizzato. Tale comportamento è stato causato dal riassetto interno dei microcristalli della lega metallica di cui la lamina è costituita, fino a raggiungere una sorta di reciproco "incastro" ottimale.
La figura inferiore mostra il grafico ottenuto dalle misure sperimentali. Il parametro Dt è definito come il valore assoluto della tangente dell'angolo di pendenza della retta interpolatrice dei punti sperimentali. Questo mostra come l'invecchiamento di un materiale viene quantitativamente diagnosticato e misurato sperimentalmente.

3. Esempio di progressivo decadimento della struttura cristallina mentre il materiale è soggetto ad una costante o crescente sollecitazione: il segnale AE diminuisce, ma la sua struttura interna sta invecchiando precocemente.

guite hanno utilizzato frequenze tipicamente attorno a 250 kHz e a 25 kHz.
Cubi di calcestruzzi diversi, 15 cm di spigolo, sono stati compressi fino a collasso totale. I provini sono stati sottoposti ad una compressione mono-assiale, raggiungendo i 1500 kN mediante una pressa idraulica (50 kN/sec di gradiente). Le emissioni acustiche (AE) sono state misurate nelle due frequenze 200 kHz e 25 kHz. Nel diagramma (fig. 3 in alto) la curva di carico è mostrata in blu. Il segnale in alta frequenza HFAE (in giallo) precede (come aspettato) quello in bassa frequenza LFAE (in rosso). L'indice di invecchiamento (con la HFAE) è mostrato nel diagramma (fig. 3 in basso) e mostra come, mentre l'emissione AE va smorzandosi, D_t permanga su valori elevati, denotando che il provino va riorganizzandosi, mentre numerosi legami cristallini aggiuntivi si vanno rompendo all'interno dell'intero volume del campione sotto l'effetto permanente della forza applicata dalla pressa.
Si tratta di un metodo passivo, non invasivo e non distruttivo. Si osserva come il materiale solido stia invecchiando e si avvicini al momento del suo collasso, con una evoluzione temporale rivelata da una riduzione della frequenza ultrasonora con la quale si misura l'invecchiamento. L'unico requisito è che il contatto tra i sensori (microfoni) ed il materiale sia efficace, simile a quello che si può verificare con la sonda ecografica nel corso di una analisi, con l'ausilio del liquido gelatinoso. Se il materiale è incoerente (ad esempio sabbia) il sistema è inefficace. In pratica, gli strumenti utilizzati dalla S.M.E. misurano passivamente i segnali (AE) – molto tenui ma molto chiari – che vengono rilasciati da ogni struttura solida, allorché alcuni suoi legami cristallini cedono. Ovvero il fenomeno si rivela a partire dal livello microcristallino, su scala molto più piccola di quanto osservabile anche con il più potente microscopio. I segnali quindi, opportunamente amplificati, vengono accumulati in un data-logger e trasmessi ad una sala operativa – utilizzando se possibile anche solo la normale rete telefonica – dove vengono analizzati in tempo reale (ed il metodo di analisi è coperto da brevetto) permettendo di fornire una misura quantitativa, precisa, del livello più o meno avanzato dello stato di invecchiamento del materiale.
I tempi di preavviso sono essenziali. Va sottolineato come lo strumento non richieda di sentire un "urlo" della struttura (per es. uno scricchiolio che di norma precede il crollo di un edificio e che generalmente non consente di evitare vittime e danni), quanto un "lamento" estremamente tenue, che viene sempre emesso in tempi molto antecedenti il cedimento della struttura, e ne costituisce dunque un indicatore diagnostico molto affidabile. Il



4

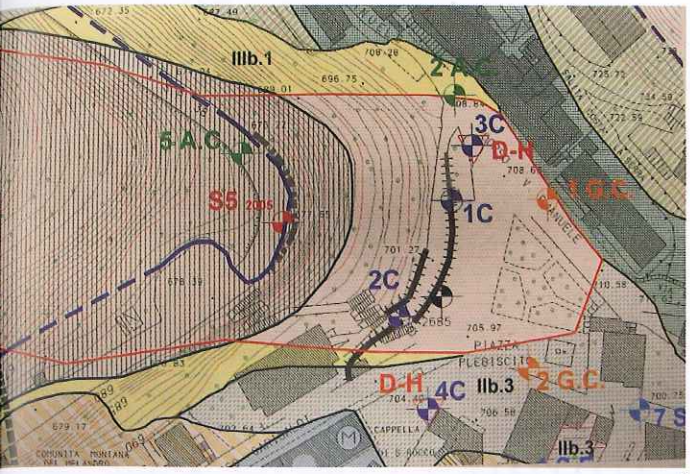
5

4. La rottura di un legame cristallino. Quando si rompe un legame cristallino si libera immediatamente energia elastica, che rilascia una emissione acustica (AE); la rottura di legami successivi provoca una reazione a catena fino al collasso. Infatti una successiva rottura sarà più facilmente verificabile in prossimità del punto dove si era verificata la prima.

5. Sistema di misura con le sonde

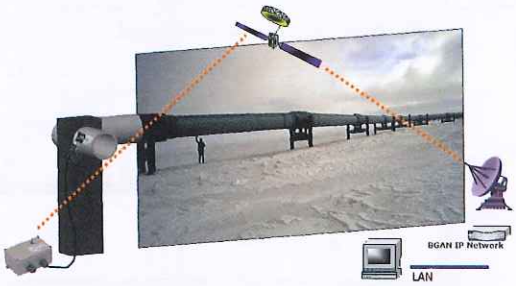
Pagina a fianco:
6. Il versante franoso a Savoia di Lucania (PZ). In collaborazione con il CNR IBAM di Potenza, sulla base di un progetto di consolidamento, si sta monitorando lo scivolamento, a secco, di circa 3 mm l'anno della collina prospiciente il paese di Savoia di Lucania. È stato realizzato un muro di contenimento in cemento armato alto 5 m e lungo 150 m, fondato su micro pali di 20 cm di diametro, lunghi 25 m, sul quale sono stati inseriti dei trasduttori ad ultrasuoni in grado di captare le emissioni acustiche ("lamento") emesse dalla struttura sottoposta a sollecitazioni meccaniche dovute alla spinta del versante franoso. Le informazioni finora trasmesse dalle sonde testimoniano che al momento il muro di contenimento svolge un'azione meccanica di contrasto sufficientemente adeguata.

tempo di preavviso è tale da consentire ampie possibilità operative per eseguire analisi ingegneristiche ed eventuali interventi atti a prevenire la "catastrofe" finale. Se questi non fossero più possibili – quando il danno fosse ormai troppo avanzato ed il ricorso a questo tipo di analisi troppo tardivo, – sarà comunque sempre possibile avere un ampio tempo per la mitigazione delle conseguenze (ad es. per l'evacuazione di beni, persone, etc.).
I potenziali settori applicativi sono i più svariati, e concernono qualsivoglia struttura sia naturale sia costruita dall'uomo, purché sia costituita di materiale solido compatto (calcestruzzo armato o meno, acciaio, metalli vari, laterizio, pietra, marmo, calcare, granito, lava, etc., legno, fibre al carbonio, vetro, ceramica, etc., edifici, beni culturali, viadotti, gallerie, massicciate, fronti franosi, dighe, macchinari, gru, serbatoi, navi, aerei, materiale rotabile, piattaforme petrolifere, oleodotti, etc., precursori sismici e/o vulcanici, etc.).
Peraltro lo strumento non va inteso come universale "da scaffale", cioè tale da potersi identicamente porre in opera in un qualsivoglia contesto. Caso per caso – considerato il tipo di problema da risolvere – si individuerà la configurazione ottimale al fine di minimizzare i costi in ragione delle informazioni necessarie che, in generale, sono diverse nelle diverse applicazioni specifiche, anche in ragione delle richieste dell'utente (dimensione e tipologia della struttura da monitorare, dettaglio e/o tempo di preavviso richiesti, etc.). Caso per caso sarà infatti anche necessario eseguire una "calibrazione" del livello di "allerta" in ragione sia dei materiali specifici impiegati, sia delle necessità operative richieste dall'utente, considerati i suoi tempi di intervento, di sicurezza, etc.: un'allerta tardiva può risultare inutile, nel senso che la struttura sarebbe ormai irrimediabilmente perduta o i danni ormai incontenibili, mentre un'allerta in tempi congrui consentirebbe interventi di "bonifica" salvando il manufatto.
Quanto alle diverse tipologie operative, va anche considerato che in alcuni casi sarà opportuno installare uno strumento per monitorare permanentemente una assegnata struttura, e che fornisca eventualmente un segnale di "allerta". Ma, alternativamente in altri casi si potrà invece prevedere un "tagliando" periodico – ad es. su materiale rotabile o su macchinari o gru, etc. – atto a verificare se quell'oggetto abbia subito o meno, dopo il "tagliando" antecedente, un degrado tale da consigliarne, ad esempio, la sostituzione.
Considerata l'ampia gamma di configurazioni diverse potenzialmente prevedibili, è difficile dare indicazioni di costi a carattere generale. Questi vanno valutati caso per caso, previo studio di un progetto di massima, che indichi il numero di punti da monitorare, la loro ubicazione ed accessibilità, i ripari eventuali da mettere in opera per la strumentazione, la disponibilità di alimentazione elettrica (la potenza richiesta è molto piccola), la disponibilità di mezzi di trasmissione della misura ad una stanza di controllo, le modalità operative, etc.
I risultati sperimentali hanno mostrato come con l'AE sia possibile evidenziare e tenere sotto controllo l'intensità delle emissioni ultrasonore causate da una sollecitazione sui materiali e la conseguente perdita di prestazione delle strutture, dovuta a fatica ed invecchia-



6

7



8

7. Casa dello studente all'Aquila. Il sistema di monitoraggio DMP-0X2 (Diagnosing Material Performance) permette di rilevare le alterazioni meccaniche a livello microcristallino, quando le variazioni sono su scala nanometrica, impercettibili alla vista e con molto tempo di preavviso rispetto agli attuali metodi di diagnosi. Gli strumenti conosciuti, come accelerometri, estensimetri, biffe, traguardi laser ecc. lavorano in situazioni già evidenti, quando cioè il fenomeno si è manifestato a livello macrosopico, come cricche, fessure, spostamenti, scricchiolii fino al collasso. Ciò che è accaduto alla casa dello studente non deve più accadere.

8. Monitoraggio di un oleodotto. La foto mostra un esempio di monitoraggio di un oleodotto al fine di garantirne la stabilità statica ed identificare eventuali furti di greggio o manomissioni. I sensori rilevano in tempo reale eventuali sollecitazioni le cui emissioni possono essere registrate ed inviate alla control-room per valutarne i dati ed attivare tempestivamente procedure di sicurezza.

mento, a livello microcristallino, quando ancora non sono evidenti le manifestazioni macroscopiche, ad esempio fessure o crepe. È ragionevole asserire che in generale è possibile pianificare l'intervento tipicamente anche con mesi di preavviso.

Infine è anche possibile distinguere diversi tipi di AE. Vi sono quelle causate da risposta della struttura ad una sollecitazione causata da un agente esterno. Ma vi sono anche quelle di riassestamento interno della struttura, dopo il cessare della sollecitazione esterna, consentendo una migliore comprensione diagnostica del fenomeno di degrado.

È molto importante sottolineare che con ciò non si fa mai una "previsione". Si fornisce piuttosto uno strumento diagnostico circostanziato ed oggettivo. Valga un'analogia: un medico non potrà mai "prevedere" il trapasso di un paziente, ma può ben "diagnosticarlo" in ragione della sua età e degli acciacchi che lo affliggono! Gli strumenti operativi che la S.M.E. propone servono a diagnosticare lo stato di "fatica" o di "invecchiamento" di una struttura, e dunque la sua prestazione, sicurezza, affidabilità.

Per chiarezza valga un semplice esempio: confrontiamo il Colosseo ed il ponte di Brooklyn, che sono entrambi costruiti ad arte.

Il Colosseo sfida il tempo da due millenni. È costruito in travertino, la sua statica è a gravità, e si trova in un clima temperato. Ben diverso sarebbe il suo stato se si trovasse o in clima molto caldo con forti escursioni termiche, ovvero in clima molto rigido dove si avrebbe il congelamento dell'acqua penetrata nelle porosità del travertino.

Il ponte di Brooklyn è ormai collaudatissimo. Ma non durerà due millenni, poiché la sua statica è basata sulla tensione dei cavi di sostegno, e quando l'acciaio di questi perderà di performance a livello microcristallino, il ponte dovrà venire distrutto e ricostruito, oppure avverrà la "catastrofe".

Non esiste infatti un materiale che sfugga all'invecchiamento. Non esiste alcun oggetto idealmente elastico. Anche le corde di un violino devono venire sostituite. Non soltanto le sollecitazioni meccaniche, ma anche una semplice e tenue escursione termica è causa di "invecchiamento" di qualsivoglia materiale, come pure fenomeni chimici (ad es. al contatto fra tondino e calcestruzzo, etc.), o elettrolitici (ad esempio fra una conduttura od un cavo ed il suolo), o di isteresi magnetica. Quando le AE associate possono venire rivelate è possibile diagnosticare lo stato di invecchiamento della struttura. ❐

(*) Brevetto internazionale n. RM2011A000151, utilizzando gli studi compiuti da Giovanni Gregori e Gabriele Paparo, ricercatori dell'Istituto Corbino (ADASC-CNR), commercializzato in esclusiva dalla SME srl, viale Cristoforo Colombo, 112 Roma – www.sme-ae.it