

Distacchi degli strati

Il distacco degli strati superficiali di completamento e di finitura è un problema particolarmente diffuso nelle costruzioni civili. La tradizionale battitura delle superfici, integrata con semplici strumentazioni per l'analisi del suono, è un metodo pratico e accessibile per l'identificazione di questi difetti.

Roberto Felicetti

Uno dei problemi più comuni nelle ispezioni sulle strutture civili è l'identificazione dei distacchi poco profondi (entro 0.1 m) che spesso caratterizzano gli strati di completamento e di finitura. Rivestimenti resistenti all'abrasione nelle pavimentazioni industriali, solette collaboranti di solai prefabbricati, intonaci e piastrelle nelle facciate sono alcuni esempi di strati superficiali la cui aderenza al supporto può venire a mancare in conseguenza di errori di esecuzione, condizioni severe di sollecitazione o problemi di durabilità. La rilevanza del degrado è spesso accentuata dalla grande estensione delle aree interessate, che pone stringenti limitazioni al tipo di indagini che è ragionevole effettuare.

METODI E TECNOLOGIE

Per l'identificazione di questo tipo di difetti sono disponibili diverse tecniche non distruttive avanzate. La discussione delle loro potenzialità e delle limitazioni con riferimento al problema in esame è uno dei temi più rilevanti affrontati dal Comitato Tecnico RILEM 207-INR (Interpretation of NDT results and assessment of RC structures), che presto pubblicherà uno stato dell'arte sull'argomento. Un primo esempio sono le tecniche impact- e pulse-echo^[1], basate sulla propagazione di brevi impulsi ultrasonici che vengono in parte riflessi dalle interfacce e dalle discontinuità presenti nel materiale (si veda anche l'insero della figura nella pagina a fronte, in alto). Tali metodi sono largamente utilizzati per determinare lo spessore di membrature accessibili da un solo lato o la presenza di vuoti e discontinuità. La durata dell'impulso (in genere non meno di 20 µs) determina anche il minimo tempo dopo il quale un'onda riflessa può essere distinta dall'onda di eccitazione, e quindi la profondità minima dei difetti che possono essere identificati (dell'ordine di 40 mm). Questo rappresenta una forte limitazione per l'applicazione in oggetto.

Un altro metodo di sicuro interesse è la termografia all'infrarosso, che si basa sulla misura della radiazione termica emessa dalle superfici in funzione della loro temperatura ed emissività. Il rilievo è facilitato dall'impiego di speciali termocamere di sempre più larga diffusione, che permettono una misura accurata su grandi superfici, anche se non direttamente accessibili. La pre-



senza dei distacchi viene rivelata in ragione del loro effetto sulla trasmissione dei flussi di calore, sia in condizioni stazionarie (differenza di temperatura tra le due facce di una parete) sia in condizioni di transitorio termico (ciclo giorno-notte o riscaldamento attivo con sorgenti artificiali). Nel caso di elementi protetti dalle variazioni termiche giornaliere (pavimentazioni in edifici chiusi) o in mancanza di flussi termici significativi diventa necessario l'impiego delle tecniche con riscaldamento attivo, la cui implementazione richiede però tempi lunghi, a causa della scarsa diffusività termica dei materiali indagati^[2].

Altri metodi promettenti possono essere citati, come l'analisi delle onde superficiali, il georadar e le misure di resistività elettrica. Tuttavia, la loro applicazione richiede in genere l'impiego di strumentazioni sofisticate e di personale particolarmente specializzato, il che le rende poco competitive sul piano economico.

A dispetto del vasto assortimento di tecniche di indagine disponibili, è facile verificare che una prima

identificazione delle zone ammalorate può essere effettuata ascoltando la risposta acustica superficiale alla battitura con un comune martello o un'asta. Rispetto alla tecnica impact-echo, questo approccio si basa sulle vibrazioni a bassa frequenza (e quindi udibili) che caratterizzano lo strato delaminato in presenza di particolari condizioni geometriche. Di fatto, il metodo può essere reso più oggettivo e rigoroso registrando e analizzando opportunamente il suono emesso dalla superficie battuta, dando così origine alla tecnica dell'acustica di impatto.

In questa nota viene discussa l'implementazione di tale metodo per mezzo di dispositivi a basso costo e di facile reperibilità, in vista dell'applicazione sistematica su grandi superfici. Viene anche affrontato il problema della concomitante determinazione della posizione del punto indagato, ai fini della redazione di mappe di danno indispensabili per progettare e pianificare i successivi interventi di ripristino.

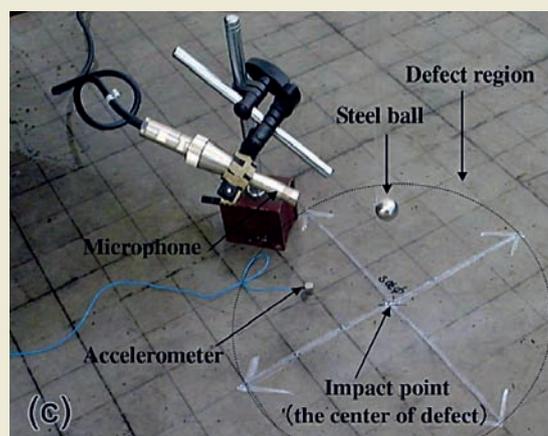
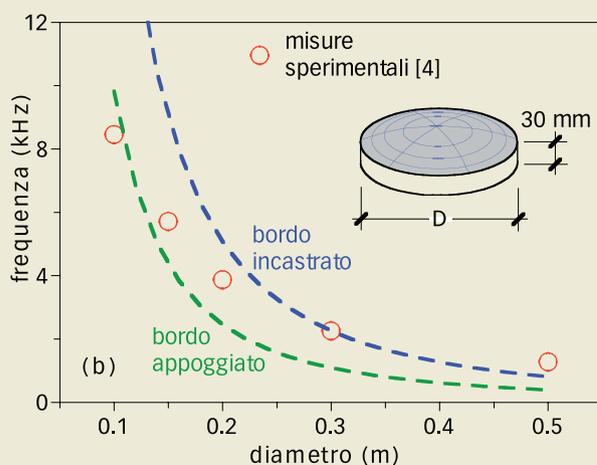
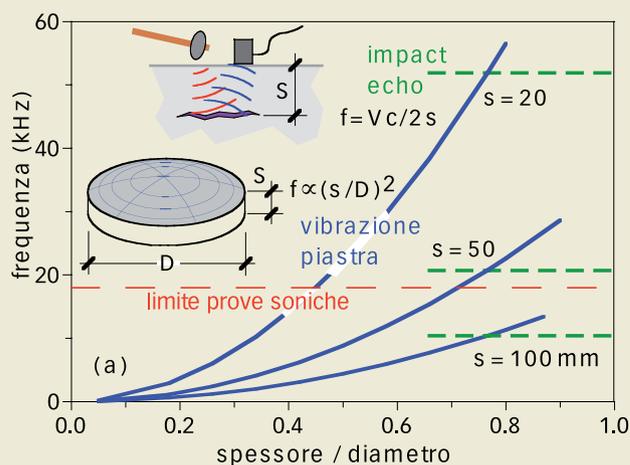
La discussione trae spunto da due casi reali, relativi ad una pavimentazione industriale e a una facciata, che hanno richiesto lo sviluppo di specifici accorgimenti operativi e hanno reso possibile una valutazione dell'efficacia e della resa delle tecniche impiegate.

RISPOSTA ACUSTICA DELLA SUPERFICIE DISTACCATA

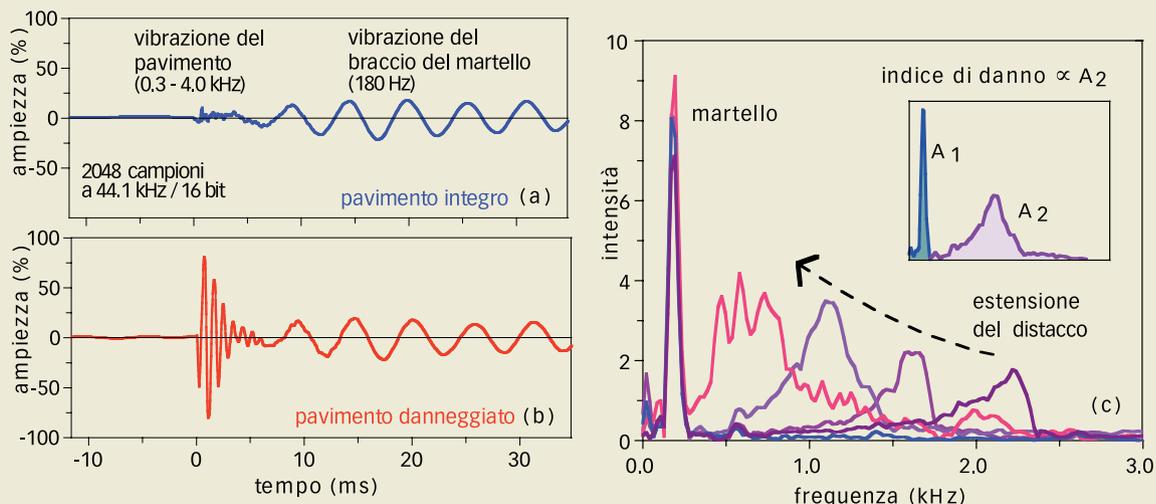
In presenza di distacchi degli strati di rivestimento, la risposta acustica della superficie di un manufatto è governata da due meccanismi fondamentali, che vengono attivati dall'impulso di eccitazione: la propagazione delle onde di compressione e la vibrazione flessionale dello strato distaccato (figura a lato, in alto). Nel primo caso (impact-echo) la frequenza del segnale registrato sulla superficie può essere ricondotta, con qualche semplificazione, al tempo impiegato dalle onde per attraversare lo strato in andata e ritorno ($T = 2s / V_c$, dove V_c è la velocità delle onde di compressione). La possibilità di identificare la frequenza $1/T$ mediante un microfono, e quindi senza contatto, è stata verificata con successo in una specifica sperimentazione su piastre in calcestruzzo che includevano dei difetti artificiali noti^[3].

Il secondo meccanismo è invece schematizzabile come la vibrazione naturale di una piastra inflessa, che è regolata dalla profondità del distacco (rigidezza e inerzia della piastra) e dalla sua dimensione (flessibilità della placca distaccata). La buona attendibilità questa schematizzazione può essere dimostrata traendo spunto da alcuni risultati sperimentali di letteratura^[4], relativi a distacchi circolari di diverse dimensioni ottenuti mediante l'inserimento di fogli di materiale polimerico all'interno di una piastra in calcestruzzo (figura a lato, sotto). Nello stesso studio è stata verificata la perfetta corrispondenza tra le misure a contatto, mediante un accelerometro incollato alla superficie, e quelle basate sulla pressione acustica captata da un microfono a condensatore (figura a lato, in basso). La possibilità di utilizzare un microfono in questo tipo di misurazioni è di fondamentale importanza nella messa a punto di metodi speditivi di rilievo, adatti per l'applicazione sul campo.

Dal confronto tra i due tipi di vibrazione risulta che nel caso di difetti relativamente estesi (diametro $\geq 2 \times$ profondità) il meccanismo che produce la frequenza più bassa, e quindi più facil-



Meccanismi che governano la risposta acustica delle superfici in funzione della geometria del distacco; (b) confronto tra i risultati sperimentali e la frequenza naturale di piastre circolari e (c) verifica della corrispondenza tra misure di vibrazione mediante accelerometro a contatto e microfono^[4].



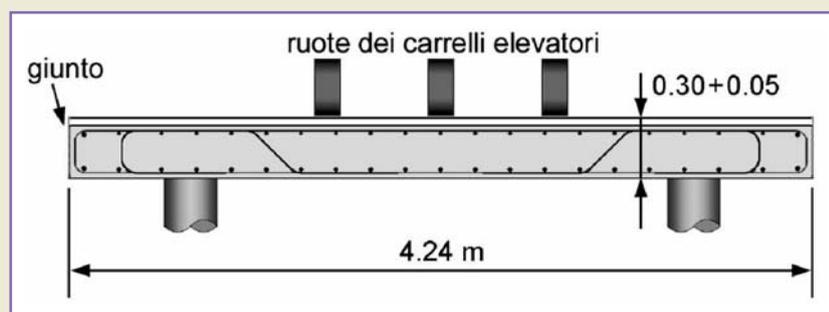
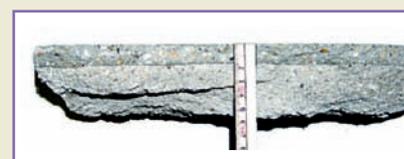
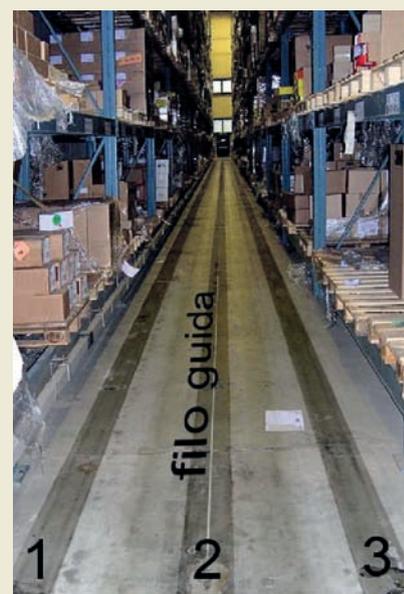
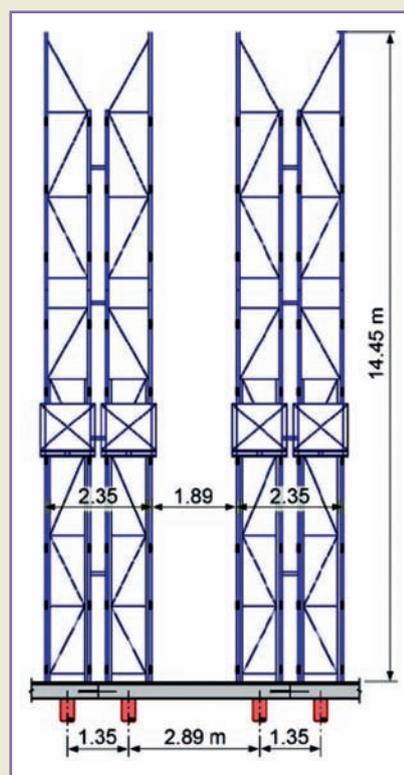
Confronto tra la risposta (a) del pavimento integro e (b) di un punto distaccato; (c) spettro di frequenza in corrispondenza di distacchi di dimensione crescente e definizione dell'indice di danno come area sottesa dallo spettro.

mente identificabile, è quello riconducibile alla piastra inflessa. Inoltre, per le profondità più comuni nella problematica in esame (20-100 mm), la vibrazione indotta da un impulso meccanico ricade nel campo sonico, e quindi può essere percepita direttamente dall'operatore o analizzata con comuni dispositivi audio commerciali. La frequenza che caratterizza la risposta della superficie indagata fornisce anche delle indicazioni sul tipo di eccitazione che è opportuno applicare durante le indagini. Normalmente ci si orienta su martelli con testine in plastica dura o metallo capaci di fornire impulsi più brevi di 1.0 ms, e quindi capaci di eccitare frequenze di qualche kHz.

STRUMENTAZIONE E RISULTATO DELLE MISURE

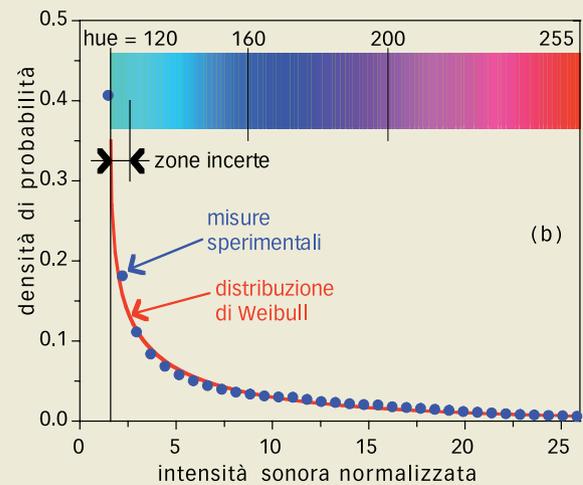
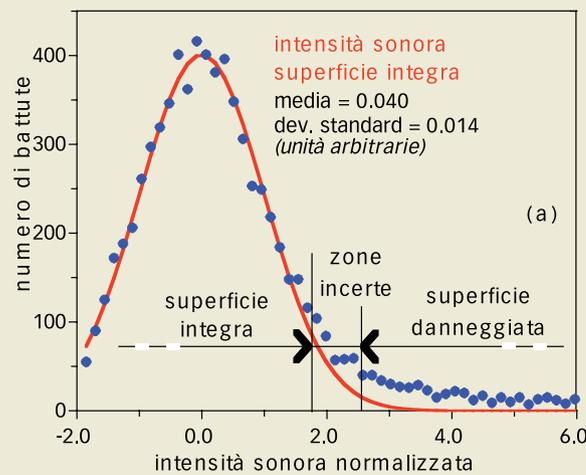
Un esempio dei tipici risultati che si possono ottenere è presentato nella figura in alto, con riferimento alla battitura della pavimentazione industriale presentata in maggior dettaglio nel seguito. Per la registrazione del suono ci si è avvalsi di un microfono a condensatore (AKG 451B) e di una scheda audio digitale esterna (Edirol UA-25) collegata a un computer portatile. Rispetto a quella integrata nel computer, la scheda esterna ha il vantaggio di una migliore preamplificazione e della compatibilità con questo tipo di microfono (alimentazione "phantom" a 48 V). Esistono sul mercato anche degli interessanti adattatori USB per microfono, che in sostanza permettono un collegamento diretto dello stesso al computer (CEntrance MicPort Pro, Shure X2u ecc).

La semplice visualizzazione delle forme d'onda già permette di riconoscere facilmente le zone distaccate da quelle integre, soprattutto in termini di ampiezza del segnale registrato (prima figura in alto, sotto). Occorre però tenere presente che lo stesso dispositivo utilizzato per l'eccitazione può generare segnali acustici non trascurabili, come nel caso delle vibrazioni del martello



Sezione tipo delle scaffalature e vista di una corsia di accesso con le impronte delle tre ruote dei carrelli elevatori e il filo guida; campione di massetto con lo strato resistente all'usura e sezione della piastra di pavimentazione posata su pali.

Distribuzione di probabilità dell'intensità sonora delle zone integre e definizione della soglia minima di danno e (b) distribuzione di probabilità delle zone danneggiate e definizione della scala cromatica di rappresentazione.



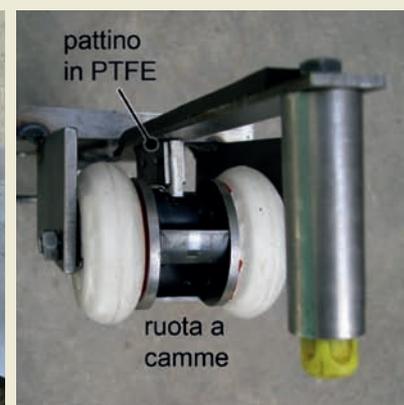
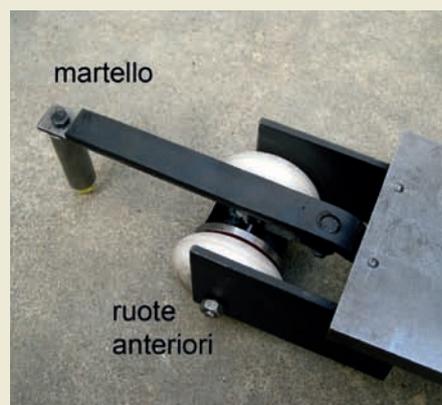
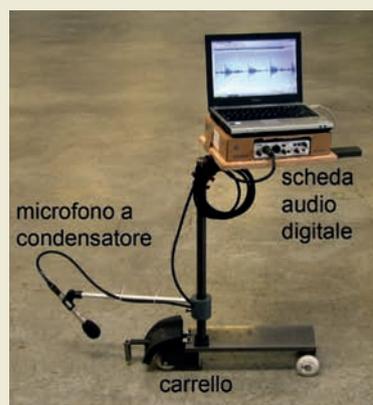
utilizzato per la battitura della già citata pavimentazione industriale. È quindi importante che nella messa a punto delle attrezzature si riescano a mantenere ben distinti i segnali effettivamente prodotti dalla superficie indagata rispetto ad altre vibrazioni parassite o ai rumori esterni. Un esame più approfondito dei risultati può essere svolto analizzando lo spettro di frequenza del segnale registrato (figura nella pagina a fronte, in alto). Risulta in tal modo evidente la presenza di una frequenza dominante, di valore decrescente e di maggiore intensità al crescere della dimensione del distacco. Tuttavia, in molte situazioni reali lo strato superficiale non rimane integro, ma presenta delle fessurazioni dovute al ripetersi delle sollecitazioni di esercizio. Diventa allora problematica l'identificazione di una frequenza caratteristica, mentre rimane chiaramente leggibile l'aumento dell'intensità sonora media, rappresentato dall'area sottesa dallo spettro in un determinato intervallo di frequenza (in genere da 0.3 a 4-5 kHz). Dalle esperienze condotte, questo è risultato l'indicatore più affidabile della gravità del degrado della superficie indagata, indipendentemente dagli eventuali ulteriori danneggia-

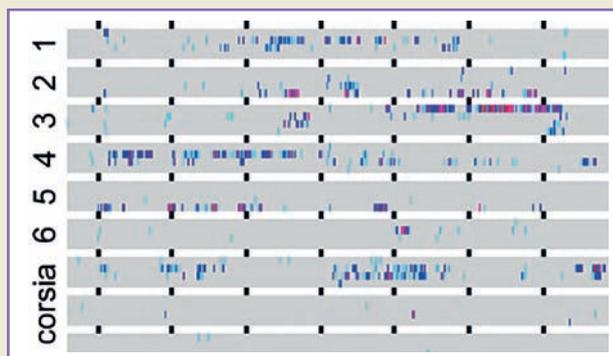
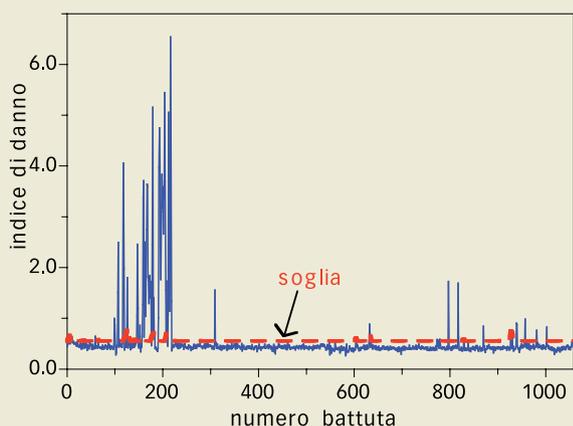
menti subiti dagli strati superficiali. In tal caso è però necessario tenere conto anche dell'intensità dell'eccitazione meccanica, che va mantenuta per quanto possibile costante o almeno rilevata con una cella di carico dinamica, in modo da poter normalizzare le misure effettuate. Esistono anche tecniche più sofisticate di elaborazione dei segnali, basate sull'analisi dell'evoluzione dello spettro di frequenza negli istanti che seguono la percussione della superficie^[5] o sul rapporto tra gli spettri di frequenza della superficie e dell'impulso applicato^[6]. Queste tecniche non hanno però dimostrato una sufficiente attendibilità nelle esperienze fin qui svolte.

INTERPRETAZIONE DEI RISULTATI

Per quanto semplice da ricavare e affidabile nelle applicazioni sul campo, l'indicatore di danno basato sull'intensità sonora non ha di per sé un significato in termini assoluti, essendo frutto di una serie di scelte operative riguardanti la catena strumentale (sensibilità del microfono, amplificazione, distanza dalla sorgente ecc). È pertanto indispensabile garantire la costanza di tutti i parametri in gioco, in modo da consentire

Strumentazione per la battitura delle pavimentazioni e dettagli del meccanismo di azionamento del martello attivato dalle ruote anteriori (intervallo tra le battute = 75 mm).





Individuazione delle zone distaccate di una corsia dal confronto tra l'indice di danno e una soglia minima; estratto della mappa del danno della pavimentazione (4 scansioni per ciascuna corsia).

un confronto diretto tra tutte le misure effettuate sull'area esaminata.

Completata l'acquisizione dei dati sull'intera superficie, occorre stabilire al di sopra di quale soglia la risposta acustica di un generico punto indagato vada considerata anomala. A tal fine è in genere risolutiva un'analisi statistica sul numero di eventi registrati per i diversi livelli dell'indice di danno (prima figura nella pagina precedente, in alto). Nei casi in cui le aree danneggiate non siano prevalenti, è possibile riconoscere una distribuzione di probabilità normale centrata sull'indice di danno più frequente, che è rappresentativa della sonorità delle parti integre del manufatto. Per valori crescenti dell'intensità sonora si osserva invece una "coda" più elevata del previsto, che è rappresentativa delle parti più o meno danneggiate.

Al confine tra le due distribuzioni esiste evidentemente un intervallo di incertezza, in genere non molto esteso, in cui non è possibile stabilire in maniera deterministica l'esistenza o meno di un incipiente fenomeno di distacco. Il limite superiore di questa zona di transizione coincide indicativamente con la soglia percettiva di un operatore che esegua la battitura senza l'ausilio di strumentazioni di analisi.

Il vantaggio indubbio dell'indagine strumentale è però rappresentato dalla maggiore oggettività e dalla possibilità di tradurre l'indice di danno in una scala cromatica opportunamente calibrata per la rappresentazione dei risultati. Ad esempio, ai livelli di sonorità superiori alla soglia minima e che ricadono nell'intervallo di danneggiamento più rappresentativo può essere fatta corrispondere una scala cromatica da ciano (hue = 120) a rosso (hue = 255), dove i valori della tinta (hue) corrispondono allo standard HSI comunemente utilizzato in ambito informatico.

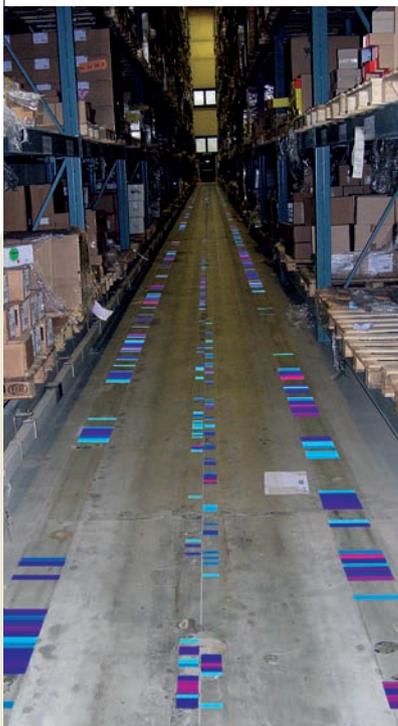
Un ulteriore vantaggio del rilievo strumentale è la più facile integrazione con i sistemi automatizzati per l'esecuzione delle indagini. Due esempi di applicazione di questo tipo di approccio vengono presentati nelle pagine seguenti.

ALCUNI ESEMPI

Indagine su una pavimentazione industriale

Il primo esempio discusso riguarda la pavimentazione industriale di un edificio adibito a logistica di superficie pari a circa 8000 m². L'area in oggetto è organizzata in 20 corsie di lunghezza 80 m a servizio di scaffalature metalliche di notevole altezza (14.5 m - figura a pag. 46, in basso). L'accesso alle scaffalature è garantito da speciali carrelli elevatori a tre ruote con guida elettromagnetica, che insistono ripetutamente sulle stesse impronte di carico. Questo ha portato, dopo una decina di anni di esercizio (~10⁵ cicli), a registrare alcuni distacchi localizzati dello strato superficiale resistente all'usura, complice la relativa deformabilità della piastra di fondazione, progettata a suo tempo per carrelli di tipo più leggero. Data l'elevata altezza a cui operano gli elevatori, è evidente il pericolo rappresentato da una perdita di planarità della pavimentazione. Per questo motivo, si è reso necessario individuare le zone danneggiate e fornire un'indicazione sul più o meno elevato rischio di distacco, in modo da poter pianificare i necessari interventi di ripristino.

Considerato che l'interesse è focalizzato sulle sole impronte caricate, è stata messa a punto una specifica strumentazione, tale da rendere possibile una più rapida applicazione del metodo dell'acustica di impatto su una vasta estensione e seguendo uno sviluppo prevalentemente lineare. L'attrezzatura è basata su un piccolo carrello, le cui ruote anteriori attivano un martello dotato di punta intercambiabile in plastica dura (figura a pagina 47). Il meccanismo fa sì che l'azionamento si ripeta ad interasse costante di 75 mm, consentendo di risalire alla posizione del carrello dal semplice conteggio delle battute. Il campo ottimale di funzionamento è tra 1 e 6 battute al secondo, per evitare fenomeni di interferenza tra i componenti meccanici. In tal modo l'intensità degli impulsi presenta una buona ripetibilità (coefficiente di variazione \approx 8%), anche se in un successivo aggiornamento il martello è stato dotato di una cella di



carico dinamica, collegata anch'essa ad un canale della scheda audio per l'acquisizione dati.

L'indagine è stata organizzata in 4 scansioni per ciascuna corsia, in corrispondenza delle impronte laterali e delle due metà dell'impronta centrale individuate dal filo guida dei carrelli. Con l'aggiunta dell'area di manovra si è così giunti a indagare circa 7 km lineari di pavimentazione, ad una velocità media di 4 battute al secondo (0.3 m/s). L'intero lavoro sul campo ha richiesto circa 12 ore lavorative di un unico operatore ed è stato così possibile inserirlo nella pausa del fine settimana, che rappresenta l'unica interruzione disponibile dell'attività continuativa dello stabilimento.

Mediante l'indagine statistica già discussa è stato

possibile individuare un soglia limite dell'intensità sonora (indice di danno), superata la quale si può assumere che lo strato di rivestimento sia distaccato dal supporto (figura nella pagina a fronte, in alto a sinistra). L'attribuzione di una opportuna scala cromatica ai valori superiori a tale soglia, unitamente alla uniforme spaziatura delle battute, ha consentito di redigere una mappa rappresentativa delle condizioni della pavimentazione (figura nella pagina a fronte in alto a destra), sulla base della quale sono stati pianificati i successivi lavori di ripristino.

Indagine su facciate con rivestimento in gres

Il secondo esempio di applicazione sul campo del metodo dell'acustica di impatto riguarda la facciata di un edificio residenziale di 8 piani (figura a lato), rivestito con piastrelle in gres di grandi dimensioni (da 30 a 60 cm di lato) incollate su intonaco. In seguito ad alcuni distacchi si è reso necessario verificare la stabilità del rivestimento nella parte inferiore dei parapetti dei balconi e nella fascia di coronamento della copertura.

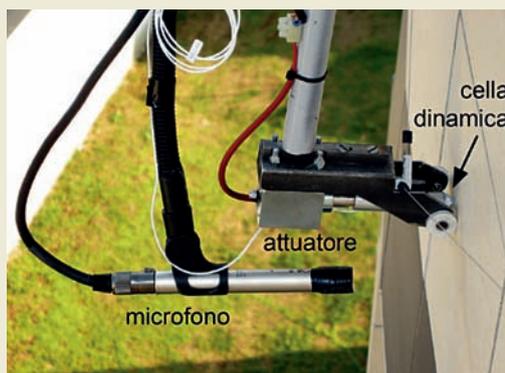
Per poter operare senza l'ausilio di ponteggi o pedane mobili, si è deciso di eccitare la superficie da ispezionare mediante un martello azionato elettricamente e dotato di un manico sufficientemente lungo da consentire un accesso dall'alto (figura a lato sotto). Il martello è stato strumentato con una cella di carico dinamica (figura a lato in basso), in modo da tenere conto delle eventuali variazioni di intensità degli impulsi in corrispondenza delle irregolarità locali della superficie.

Nel caso dei balconi, per identificare la posizione dei punti di misura, ci si è avvalsi della loro organizzazione in moduli sostanzialmente uguali (216 moduli da circa 1.6 m). Agli estremi di ciascuna campitura sono stati disposti due trasduttori di spostamento a filo (corsa 2.0 m) che permettono, per trilaterazione, di determinare in continuo la posizione del martello e quindi di costruire una mappa della risposta acustica della porzione di facciata indagata.

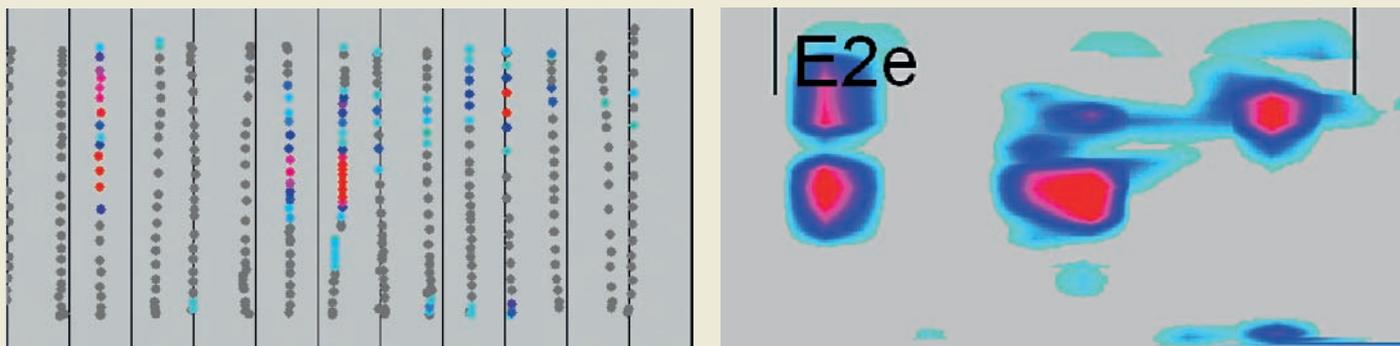
Dopo aver svolto l'analisi statistica sulla distribuzione dell'intensità sonora delle circa 70.000 misure totali, i valori superiori alla soglia di danno minimo sono stati tradotti in una scala cromatica opportunamente calibrata (si veda la figura a pag. 47 in alto).

La distribuzione delle battute, organizzate in una serie di scansioni verticali, non si presta ad una rappresentazione uniforme delle condizioni del rivestimento (figura nella pagina successiva). È stata quindi definita una griglia regolare di punti (intervallo = 5 mm) a cui far corrispondere i pixel della mappa del danno. Il colore di ciascun pixel è stato determinato per interpolazione lineare tra le battute più vicine al punto considerato (figura nella pagina successiva).

Nel complesso sono stati indagati circa 400 m² di superficie, impiegando due tecnici per 6 giorni lavorativi. Occorre sottolineare che una quota rilevante del tempo necessario per il rilevamen-



Fronte principale dell'edificio indagato e strumentazione utilizzata nelle prove di acustica di impatto: martello strumentato e microfono, trasduttori a filo per la determinazione della posizione del martello.



to sul campo è da imputare alla necessità di accedere alle singole unità abitative e di rimuovere eventuali ostacoli presenti sui balconi (piante e arredi), mentre l'installazione dei trasduttori a filo e la scansione della superficie in genere non hanno richiesto più di 5 minuti per modulo.

CONCLUSIONI

L'identificazione dei distacchi dei rivestimenti può essere svolta efficacemente con la tradizionale battitura delle superfici con asta o martello, confidando nella diversa risposta acustica che caratterizza le aree danneggiate. Nella presente nota è stato discusso il possibile miglioramento del metodo mediante una strumentazione a basso costo per la registrazione e l'analisi del suono, basata su un comune calcolatore portatile e su una scheda audio digitale.

I principali punti di interesse della tecnica proposta sono la maggiore accuratezza, la facilità di rappresentazione grafica mediante mappe cromatiche e la notevole versatilità sul campo. Quest'ultimo aspetto è stato discusso con riferimento a due applicazioni reali, relative ad una pavimentazione

industriale e ad al rivestimento in gres delle facciate di un edificio residenziale. In entrambi i casi si è cercato di trarre spunto dalla particolare morfologia delle aree indagate, in modo da adattare le attrezzature al fine di integrare la misura della risposta acustica con il rilevamento della posizione del punto indagato.

Si tratta solo di primi tentativi di risposta alle esigenze operative imposte dalle applicazioni sul campo, ma vi è ancora molto da fare per rendere tali attrezzature più efficienti e flessibili. Per quanto riguarda le superfici orizzontali, una linea di sviluppo di sicuro interesse è quella suggerita da alcuni sistemi di movimentazione automatizzati di crescente diffusione (robot per sorveglianza, pulizia dei pavimenti ecc). Per le pareti verticali il problema è reso più complesso dalla notevole difficoltà di realizzazione di attrezzature capaci di sostenersi autonomamente aderendo alla superficie (climbing robots basati su ventose o su adesivi ad azione elettrostatica). Tra le alternative da considerare vi sono i sistemi di posizionamento per le pedane mobili e le misure a distanza mediante vibrometro laser.

Restituzione grafica delle misure effettuate su un modulo di balcone e corrispondente mappa ottenuta per interpolazione tra i punti misurati.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Krause, M., Bärmann, M., Frielinghaus, R., Kretschmar, F., Kroggel, O., Langenberg, K.J., Maierhofer, C., Müller, W., Neisecke, J., Schickert, M., Schmitz, V., Wiggenhauser, H. and Wollbold, F., 'Comparison of pulse-echo methods for testing concrete', NDT&E International, 30 (4), 1997, 195-204.
- [2] Weritz, F., Wedler, G., Brink, A., Röllig, M., Maierhofer, C. and Wiggenhauser, H., "Investigation of concrete structures with Pulse Phase Thermography", Proceedings International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE), Berlin, 2003, 9p. <http://www.ndt.net/article/ndtce03/papers/v080/v080.htm>
- [3] Zhu, J. and Popovics, J.S. 'Imaging Concrete Structures Using Air-Coupled Impact-Echo', Journal of Engineering Mechanics, 133 (6), 2007, p.628-640. <http://www.kexue.com.cn/upload/blog/file/2009/7/20097272056537785.pdf>
- [4] Asano, M., Kamada, T., Kunieda, M. and Rokugo, K., "Impact acoustics methods for defect evaluation in concrete", Proceedings International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE), Berlin, 2003, 8p. <http://www.ndt.net/article/ndtce03/papers/v040/v040.htm>
- [5] Haya, H., Luo, X. and Uomoto, T., "Study on Impact Acoustic Method and System Development Based on Wavelet", Proceedings International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE), Berlin, 2003, 9p. <http://www.ndt.net/article/ndtce03/papers/p004/p004.htm>
- [6] Davis, A.G., Lima, M.K. and Germann Petersen C. "Rapid and economical evaluation of concrete tunnel linings with impulse response and impulse radar non-destructive methods", NDT&E International, 38, 2005, p.181-186.