



LE TECNICHE DIAGNOSTICHE, EVOLUZIONE E RICERCA

T. Vassalli

4 Emme Service Spa

Sommario

Lo sviluppo tecnologico compie quotidianamente passi da gigante nel perfezionamento e nell'affidabilità degli strumenti di diagnosi e previsione, questo avviene trasversalmente in campi come la medicina, l'ingegneria, le telecomunicazioni e più in generale nella nostra vita di tutti i giorni.

Rimanere aggiornati è arduo, perché ciò che costituisce la novità "oggi", diventa obsoleto già domani. Questa continua progressione, da un lato agevola l'operatività in sito, consentendo il trasferimento telematico istantaneo dell'informazione misurata in campo ai propri colleghi o al professionista in ufficio, dall'altro impone agli addetti del settore di operare scelte coraggiose nel proporre e nel perseguire nuove metodologie.

Diventa fondamentale restare al passo con le nuove tecniche d'indagine e le relative normative di riferimento: questi due aspetti sono indissolubilmente concatenati, perché il secondo viene fortemente condizionato dal primo. Ecco perché gli istituti di ricerca, le università ed i laboratori devono fornire al progettista o al collaudatore supporto costante e trasparente sulle capacità ed i limiti dei differenti metodi di indagine.

Questo intervento si propone l'obiettivo di presentare con una rapida carrellata le tecniche d'indagine in situ, opportunamente suddivise in base ai differenti materiali utilizzati nelle strutture civili ed industriali. L'attenzione si concentrerà poi sulle tecniche che hanno subito le maggiori rivoluzioni, sia in sito che in fase di stesura del report, e su quelle che possono costituire la differenza nella diagnosi delle strutture in cemento armato precompresso.

1 INTRODUZIONE

Gli aspetti più importanti durante la stesura di un piano indagini sono il contesto operativo e gli obiettivi che si intendono raggiungere: oltre ai paletti offerti dai Livelli di Conoscenza, imposti dalla Normativa e dalle Linee Guida, un altro tassello fondamentale nel processo decisionale è il confronto tra i progettisti ed i tecnici degli uffici sismica. Questo è necessario per non vedersi bocciare la pratica di deposito, per carenza o insufficienza di informazioni.

Non di meno vanno considerate le possibilità e le condizioni operative: se si sta lavorando in quota o in spazio confinato, l'operatore è obbligato ad utilizzare determinati DPI, che non ne agevolano assolutamente i movimenti, o più semplicemente non ci sono gli spazi necessari per determinate attrezzature. Ecco perché un'analisi del contesto diventa il primo scalino da dover affrontare da parte degli specialisti.



Figura 1: Georadar in quota su by bridge

Altro aspetto da considerare è il budget a disposizione: capita sovente di dover rimodulare posizione e quantità di indagini, per una carenza di risorse economiche a disposizione del committente. In questo complesso quadro vengono in aiuto dei professionisti e dei tecnici numerose tecniche di indagine, dalle più distruttive a quelle meno invasive.

2 I MATERIALI E LE TECNICHE PRINCIPALI

Le prove in sito si articolano su cinque categorie fondamentali di materiali:

Calcestruzzo	ordinario e pre/post-compresso
Acciaio	da carpenteria e profilati
Legno	lamellare e massiccio
Muratura	a blocchi omogenei e mista
Compositi	a matrice polimerica e non

Ognuna di queste categorie presenta degli approcci “standard”, come lo possono essere le indagini pacometriche ed i prelievi di campioni cilindrici per il calcestruzzo armato, ovvero metodi innovativi e mirati a valutare lo stato tensionale nel c.a.p. come i rilasci tensionali su provino troncopiramidale.

Vi sono poi indagini trasversali applicabili a più materiali, come il georadar, utile per valutare stratigrafia e posizione di elementi strutturali in profondità, oppure le tomografie ultrasoniche utilizzabili su calcestruzzo o pietra naturale per saggiarne

omogeneità o eventuali macrodifettosità interne.

Esistono inoltre tecniche radiografiche, magnetoscopiche ed ultrasoniche per l'analisi delle saldature o per organi meccanici, soggetti a cicli di lavoro onerosi ed usuranti. Di seguito si riportano la maggior parte delle indagini applicabili in situ, suddivise per tipologia di materiale.

2.1 Indagini sui calcestruzzi [1]

- Ultrasuoni con trasmissione diretta, semidiretta, indiretta
- Valutazione della resistenza del calcestruzzo con metodo Pull-out
- Prove di aderenza su sottofondi per pavimentazioni
- Valutazione della resistenza del calcestruzzo con sclerometro
- Valutazione della resistenza del calcestruzzo metodo Windsor
- Valutazione della profondità della carbonatazione
- Carotaggio del calcestruzzo
- Valutazione della resistenza del calcestruzzo mediante Speedymet
- Misura delle tensioni tramite Strain-Gauges (estensimetri)
- Indagini tramite endoscopio
- Analisi quantitativa dello ione-cloro
- Valutazioni con metodo SonReb
- Prove di rilascio tensionale con provino troncopiramidale
- Prove di rilascio tensionale con carota strumentata

2.2 Indagini sui ferri d'armatura nel c.a. [1]

- Indagini tramite pacometro
- Saggi e rilievi dei ferri d'armatura
- Prelievo di armature
- Misura del potenziale di corrosione
- Misura dello stato di tensione tramite Strain-Gauges (estensimetri)

2.3 Indagini sugli acciai da carpenteria [1]

- Prove con microdurometro Vickers
- Controllo delle saldature con liquidi penetranti PT
- Controllo delle saldature con particelle magnetiche MT
- Controllo delle saldature con ultrasuoni UT
- Misure spessimetriche con ultrasuoni
- Misure spessimetriche del rivestimento
- Esame macrografico delle saldature
- Analisi con spettrometro sulla composizione chimica
- Esame mediante repliche metallografiche
- Verifica della coppia di serraggio di bulloni
- Verifica di integrità delle chiodature

2.4 Indagini su legno [1]

- Ispezioni in situ
- Indagini soniche
- Determinazione del profilo resistografico

Valutazione del modulo elastico tramite Pilodyn (Woodpecker)
Indagini tramite endoscopio
Misura dell'umidità con igrometro

2.5 Indagini sulle murature [1]

Indagini tramite endoscopio
Valutazioni con martinetto piatto
Valutazioni con martinetto piatto doppio
Misurazioni soniche
Prelievo di muratura
Misura dell'umidità mediante igrometro
Verifica omogeneità con martello strumentato
Valutazione della resistenza dei giunti di malta con sclerometro
Valutazione della resistenza dei giunti di malta con sclerometro a pendolo
Valutazione della resistenza dei giunti di malta con penetrometro
Carotaggio su elementi murari
Prova di assorbimento delle pareti in muratura

2.6 Compositi

Controlli di accettazione su FRP / FRCM / CRM
Misura della forza di adesione (Pulloff)
Prove a trazione su fiocchi
Lap shear test (prove di scorrimento)

Delle indagini appena citate verranno approfondite in questa memoria solo alcune, per le quali negli ultimi anni vi è stato un notevole salto qualitativo, soprattutto in termini di precisione e portabilità in sito.

3 SCLEROMETRI DIGITALI

Questo tipo di strumentazione sta progressivamente sostituendo i modelli precedenti, che spesso si avvalevano di un rullo cartaceo per la registrazione del dato di indice di rimbalzo.

La preparazione delle superfici, così come le incudini di taratura, rimangono sempre requisiti e caratteristiche efficaci, mentre il trattamento e la rapidità di lettura dei dati avviene interfacciando i nuovi strumenti mediante app dedicate: queste possono trasferire in cloud le informazioni ricavate in cantiere, snellendo la trascrizione e riducendo efficacemente i tempi di report.



Figura 2: Sclerometro digitale e app dedicata

La stessa analisi ed interpretazione dei dati, con la possibilità di scelta della Normativa di riferimento (ASTM, UN EN, JGJ, JCSE, GOST) prima di eseguire la campagna d'indagine, la verifica della deviazione standard, la mediana dei dati **che** sono facilmente accessibili mediante le nuove interfacce digitali.

Ovviamente questi strumenti possono essere sfruttati in condizione stand alone, per gli amanti dei metodi tradizionali, ma il salto qualitativo non richiede competenze accademiche elevate ed il consiglio è quello di sfruttare appieno le nuove risorse.

La preparazione per l'esecuzione delle indagini rimane la medesima: l'indagine pacometrica deve precedere quella sclerometrica, in modo da creare una griglia di riferimento ed evitando di eseguire le battute sclerometriche in corrispondenza delle barre d'armatura più superficiali. In caso di superfici scabre ed irregolari è necessaria la levigatura mediante pietra abrasiva, fornita sempre a corredo.

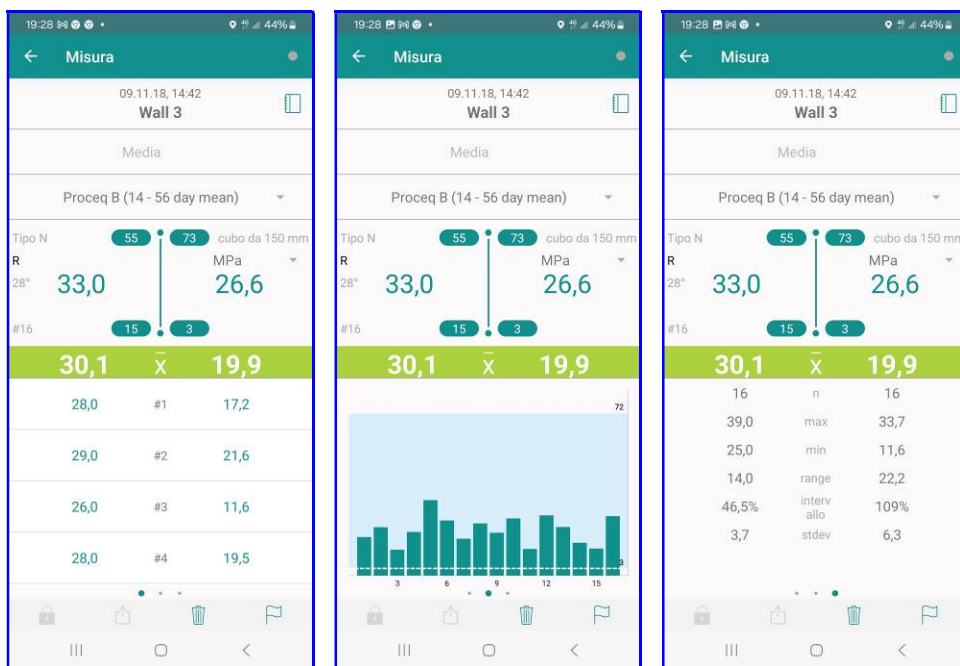


Figura 3: Screenshot da app

Come tutti gli strumenti a rimbalzo, questi sono soggetti a taratura annuale ed a verifica su incudine di riferimento previa indagine in sito. Un'ulteriore accortezza è quella di utilizzare lo sclerometro in funzione della massa dell'oggetto indagato: esistono modelli che producono impulsi maggiori (per calcestruzzi ordinari) o impatti più soft per indagini sui massetti o calcestruzzo alleggerito.

In quanto metodo di verifica superficiale le misure possono essere affette da sovrastima in caso di carbonatazione o sottostima in caso di calcestruzzi non completamente maturi o a contatto con l'acqua (pensate ad esempio ad una fondazione a contatto con la falda o con un terreno parzialmente saturo).

Per ovviare a questi inconvenienti è possibile accoppiare l'indice di rimbalzo con rilevazioni ultrasoniche sulla sezione d'indagine, ma si rimanda al capitolo successivo per ogni approfondimento.

4 RILEVATORI AD ULTRASUONI DIGITALI

Le attrezzature ultrasoniche sono quelle che negli ultimi dieci anni hanno subito la trasformazione maggiore: siamo passati da un peso medio di 6-8 kg, fondamentalmente imputabile al peso delle batterie, ad un quinto della massa, sonde escluse.

Ormai l'operatore è in grado di eseguire in totale autonomia misure di qualsiasi tipo, grazie alla possibilità di portare gli ultrasuoni a tracolla: dalla misura lineare diretta, alla tomografia di un'intera sezione.



Figura 4: Attrezzatura ultrasonica nel 2011 (a sx) ed il confronto con il 2023 (a dx)

Possono poi essere condotte indagini per la verifica della profondità delle fessure, purché prive di acqua al loro interno (che fungerebbe da accoppiante), indagini sonre che forniscono la resistenza del calcestruzzo al termine della misurazione. È sufficiente caricare all'interno del Data Logger le curve di correlazione desiderate, per fornire in tempo reale il dato di resistenza cubica finale.

Rimane valida la regola che le superfici, se parliamo di calcestruzzo, devono essere prive di intonaco, ché potrebbe alterare il risultato finale, mentre l'uso di accoppianti in gel o plastilina sono quasi sempre d'obbligo. Esistono infatti in commercio sonde definite dry contact, utilizzabili nei casi in cui il manufatto da analizzare non possa subire alcuna contaminazione chimica superficiale oppure in caso di elementi estremamente lisci e regolari.

La tomografia ultrasonica, quando l'obiettivo è quello di mappare l'omogeneità di un materiale, è semplificata da algoritmi e software che permettono di programmare un interesse di misura, attribuendo graficamente alle zone più ammalorate colori più vivi, mentre per quelle integre, colori più tenui e freddi.

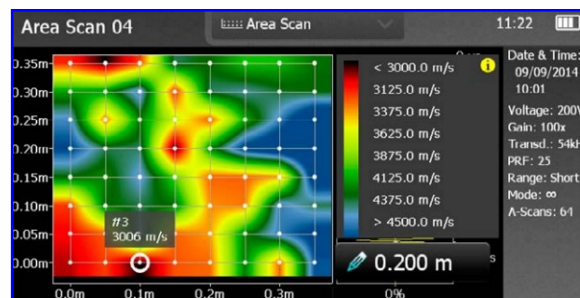


Figura 5: analisi tomografica ultrasonica

Le possibilità di utilizzo riguardano tutti i materiali attualmente impiegati nelle strutture. La scelta dei trasduttori è fondamentale ed avviene in funzione della densità e granulometria del materiale, nonché delle sue dimensioni. Sonde con differenti frequenze operative, permettono di operare con lunghezze d'onda variabili in funzione del materiale analizzato, come da tabella sottostante.

	Limiti dell'oggetto da provare		Applicazioni
Trasduttori onda P			
f	Lunghezza d'onda	Dimensioni max aggregato	
24 kHz	154 mm	≈ 77 mm	Calcestruzzo: aggregato molto grossolano e oggetti di grandi dimensioni (alcuni metri)
54 kHz	68,5 mm	≈ 34 mm	Calcestruzzo, legno, roccia
150 kHz	24,7 mm	≈ 12 mm	Materiale a grana fine, mattoni refrattari, roccia (carota NX)
250 kHz	14,8 mm	≈ 7 mm	Materiale a grana fine, mattoni refrattari, roccia, campioni di piccole dimensioni
500 kHz	7,4 mm	≈ 3 mm	Materiale a grana fine, mattoni refrattari, roccia, utilizzo con campioni di piccole dimensioni limitato alle dimensioni del trasduttore
Trasduttore esponenziale			
54 kHz	68,5 mm	≈ 34 mm	Calcestruzzo: superfici ruvide e arrotondate (nessun mezzo di accoppiamento necessario). Legno, roccia (beni culturali)
Trasduttore onda S			
250 kHz	≈ 5 mm	Superiore allo spessore dell'oggetto	Utilizzato per determinare il modulo di elasticità, calcestruzzo, legno, roccia (solo campioni di piccole dimensioni), mezzo di accoppiamento speciale per onda di taglio necessario

Tabella 1 : sonde ultrasoniche e loro applicazioni

5 PACOMETRI DIGITALI

I pacometri sono strumenti il cui funzionamento è basato sulle correnti indotte, che consentono la temporanea magnetizzazione delle barre d'armatura presenti nel calcestruzzo.

Le informazioni tipicamente ricavabili dai modelli più semplici sono il copriferro, ovvero la distanza tra la barra e la superficie esterna, e la stima del diametro delle barre, nonché ovviamente la posizione.



Figura 5: pacometro dei primi anni 2000

Questa tipologia di strumenti non ha migliorato la portabilità, che già rappresentava un suo punto di forza, ma ha ampliato gli accessori collegabili, rendendoli di fatto multitasking. Le case produttrici hanno inoltre inserito nei setting delle nuove attrezzature l'intelligenza artificiale, in grado di ovviare all'influenza delle barre vicine. Resta sempre valida la necessità di verificare mediante saggio diretto il diametro effettivo, per avere assoluta certezza della dimensione della barra indagata.



Figura 5: pacometro moderno

I nuovi sistemi consentono, mediante l'utilizzo di encoder, come per i georadar portatili, di eseguire misure 2D lineari, con le quali si può evincere copriferro e diametro delle barre graficandone la sezione, e 3D areali principalmente pensate per una mappatura estesa del copriferro. Questa è propedeutica ad un'altra importante funzione, ovvero quella della mappatura del potenziale di corrosione.

La mappatura del potenziale prevede l'utilizzo di una serie di accessori, quali:

- Elettrodo a barra (da utilizzare con una soluzione di solfato di rame)
- Elettrodo a ruota singola
- Elettrodo a quattro ruote

Gli ultimi due dispositivi vengono sfruttati quando le superfici da indagare risultano molto estese, come ad esempio le solette o le travi di un viadotto.

E' utile richiamare alcuni concetti base sulle cause della corrosione per comprenderne meglio la metodologia d'indagine. In condizioni normali l'acciaio d'armatura è protetto dalla corrosione da una sottile pellicola passiva di ossido di ferro idrato. Questa pellicola passiva si decompone a causa della reazione del calcestruzzo con il biossido di carbonio atmosferico (CO₂, carbonatazione), o attraverso la

penetrazione di sostanze aggressive per l'acciaio, in particolare i cloruri del sale antighiaccio o l'acqua salata.

All'anodo vengono dissolti ioni ferrosi (Fe^{++}) e si liberano elettroni. Questi elettroni migrano attraverso l'acciaio verso il catodo, dove formano idrossido (OH^-) con l'acqua e l'ossigeno generalmente disponibili. Questo principio crea una differenza di potenziale che può essere misurata con il metodo della semicella (half-cell) [2].

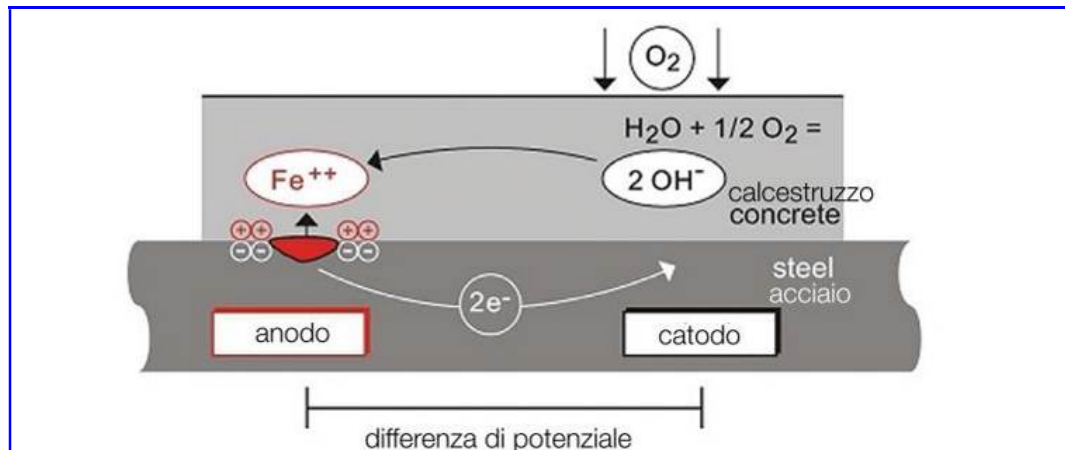


Figura 6: processo chimico della corrosione nelle barre d'armatura

L'idea di base della misura del campo di potenziale è quella di misurare i potenziali sulla superficie del calcestruzzo, al fine di ottenere un quadro caratteristico dello stato di corrosione della superficie dell'acciaio all'interno del calcestruzzo.

Per questo scopo, tramite un voltmetro ad alta impedenza, all'armatura in acciaio viene collegato un elettrodo di riferimento, che viene quindi spostato lungo un reticolo sulla superficie del calcestruzzo.

Gli ordini di grandezza tipici (solo a scopo informativo) del potenziale di semicella dell'acciaio nel calcestruzzo misurato rispetto a un elettrodo di riferimento Cu/CuSO_4 sono i seguenti (RILEM TC 154-EMC):

- | | |
|--|--------------------|
| - calcestruzzo saturo d'acqua senza O_2 : | da -1000 a -900 mV |
| - calcestruzzo umido, contaminato da cloruro: | da -600 a -400 mV |
| - calcestruzzo umido, senza cloruro: | da -200 a +100 mV |
| - calcestruzzo umido, carbonatato: | da -400 a +100 mV |
| - calcestruzzo asciutto, carbonatato: | da 0 a +200 mV |
| - calcestruzzo asciutto, non carbonatato: | da 0 a +200 mV |

In generale, la probabilità di corrosione aumenta con potenziali bassi (negativi); ci si può aspettare corrosione attiva nei punti in cui un potenziale negativo è circondato da potenziali sempre più positivi, ovvero punti con un gradiente di potenziale positivo. Differenze di potenziale con delta di circa +100 mV all'interno di un'area di misura di 1 m, insieme con potenziali negativi sono una chiara indicazione di corrosione attiva.

Il valore assoluto del potenziale effettivo, (soglia di corrosione) al di sotto del quale ci si può attendere una corrosione attiva, può variare in modo significativo a seconda della struttura. È comunque utile menzionare le soglie suggerite dall'ASTM C 876-09, Appendice X1, che assegna una probabilità del 90% di corrosione in corso alle aree con

valori più negativi di -350 mV e una probabilità del 90% di assenza di corrosione alle aree con valori più positivi di -200 mV, giudicando come incerta la situazione nelle regioni comprese tra queste due soglie. Per l'applicabilità di questi valori di soglia, consultare le condizioni stabilite dall'ASTM.



Figura 7: esempio di una corrosion scan

L'analisi del potenziale di corrosione offre risultati attendibili se le armature sono a diretto contatto con la matrice cementizia, ideale quindi per calcestruzzo ordinario come anche per c.a.p. a cavi aderenti (preteso). Non risulta più efficace in caso di cavi in acciaio all'interno di una guaina, sia essa metallica o plastica, perché la schermatura ovviamente altera la misura di potenziale (c.a.p. a cavi post-tesi).

6 GEORADAR STRUTTURALI AD ALTA FREQUENZA

Il georadar è una delle attrezzature, che ha beneficiato negli ultimi anni della miniaturizzazione dei componenti, offrendo sistemi ultracompati, con schermi touch e batterie più leggere e prestanti.

Questi sono sistemi ad alta frequenza (1,5 – 3,0 GHz) che consentono la visione immediata degli oggetti presenti nell'elemento strutturale indagato, grazie anche alla presenza di schermi generosi inseriti nel corpo dello strumento.

L'unico limite è la profondità d'indagine, infatti le versioni attualmente in commercio consentono di leggere fino a 50 – 70 cm di profondità, perpendicolarmente alla superficie di scansione.



Figura 8: georadar per la ricerca dei cavi nel c.a.p.

Il loro utilizzo è trasversale e può riguardare praticamente tutti i materiali attualmente presenti in edilizia e nel campo delle infrastrutture. L'affidabilità dei dati acquisiti dipende molto dalle condizioni in cui si trova la superficie esterna, infatti le ruote su cui sono inseriti gli encoder (sistemi di lettura dell'avanzamento) in caso di superficie scabra ed irregolare perdono di precisione.

Le scansioni possono essere bidimensionali o 3D: queste ultime lavorando su una griglia di dimensioni prestabilite, permettono una visione ancora più intuitiva della stratigrafia dell'oggetto analizzato. Le singole griglie possono poi essere combinate una con l'altra per ricostruire l'oggetto analizzato nella sua interezza.

Negli ultimi anni vi è stato un grande utilizzo di questo strumento nella ricerca della posizione dei cavi nelle strutture armate precomprese: travi di grandi luci ed a sezione

snella, hanno il loro punto debole nello stato di conservazione dei cavi.

Carenze nella presenza di iniezione nelle guaine per il post-teso o corrosione profonda non visibile esternamente per il pre-teso, sono le prime cause da valutare nel patrimonio infrastrutturale. Ecco perché il georadar va sfruttato per intercettare cavi ed armature “lente”, per poi approfondire le indagini con altri metodi complementari, come la tomografia ultrasonica.

7 TOMOGRAFIA ULTRASONICA

La Tomografia Ultrasonica si basa sulla trasmissione nell’oggetto di onde ultrasonore di taglio ad alta frequenza (shear waves) e la registrazione di tempo di arrivo, ampiezza e fase delle riflessioni che tornano in superficie a seguito delle discontinuità in esso presenti.

Per discontinuità si intende ogni interfaccia che separi due materiali aventi differenti valori di impedenza acustica (densità per velocità del suono).

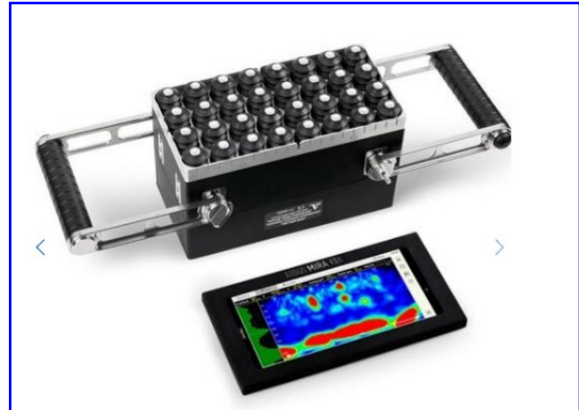


Figura 9: tomografo ad ultrasuoni

Nel caso di indagini su calcestruzzo armato, o materiali lapidei, risulta individuabile ogni interfaccia pieno/vuoto. La metodologia tomografica è inoltre ottimale per definire lo spessore dell’elemento e la presenza di difetti quali delaminazioni, fessurazioni e disadensamenti. Tra le applicazioni più specifiche si impiega nell’analisi di elementi precompressi, dove la tomografia è utilizzata per l’individuazione dei difetti di iniezione nelle guaine dei cavi.

La strumentazione è composta da una serie di sensori piezoelettrici trasmettenti e ricevitori affiancati fra loro che vengono posti a contatto della superficie (senza necessità di mezzo di accoppiamento, dry contact) da un modulo di digitalizzazione e trasmissione del segnale, e da un eventuale dispositivo ottico di posizionamento e di visualizzazione (integrata o remota). I sensori sono dotati di molle precaricate, che ne permettono l’adattamento anche a superfici non perfettamente piane .



Figura 10: tomografia su trave in c.a.p.

Un’altra peculiarità riguarda il tipo di vibrazioni generate, che consistono in brevi impulsi di onde di taglio di frequenza variabile da 10 a 90 kHz. Questo permette un maggiore dettaglio nella restituzione tomografica (minor lunghezza d’onda), un più

agevole adattamento alle diverse qualità di calcestruzzo e di spessori da indagare, oltre alla capacità di identificare anche fessure saturate d'acqua.

La profondità d'indagine varia essenzialmente con la compattezza del materiale investigato. Nel caso di calcestruzzo ad alta resistenza, privo di difetti, si possono oltrepassare i 200 cm di penetrazione, che scendono al di sotto dei 60 cm nel caso di conglomerati porosi e disomogenei.

Si riportano alcuni esempi di difetti riscontrati mediante tomografo, previa scansione georadar, su alcuni cavi di precompressione. Ad ulteriore verifica si è proceduto mediante endoscopio per verificare dettagliatamente il livello di degrado.

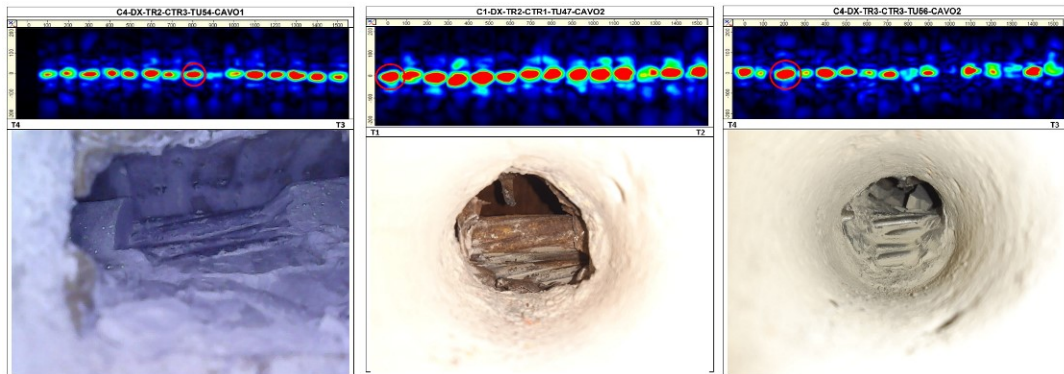


Figura 11: risultati di indagine tomografica su trave in c.a.p. (post-tesa), caso A (sx)-B-C (dx)

Nel caso A, visibile nell'immagine a sinistra, i trefoli sono ricoperti da boiaccia, ma quest'ultima non è aderente alla guaina, lasciando all'acqua la possibilità di penetrare. Nel caso B (centrale) i trefoli non sono ricoperti da boiaccia e risultano corrosi, mentre nell'ultimo caso (C) i trefoli sono parzialmente coperti da boiaccia.

Le zone maggiormente soggette a questi fenomeni di infiltrazione, sono quelle dei cavi provenienti dalla soletta, se presenti, oppure quelle delle testate di ancoraggio, spesso fortemente ammalorate dalla percolazione d'acqua dal piano stradale.

Rimane il problema sulle strutture a cavi aderenti pre-tesa: per ovviare a questa carenza la società giapponese Konica-Minolta [3] sta sperimentando l'applicazione di uno strumento estremamente sensibile alla variazione dei campi magnetici: in buona sostanza in caso di rotture su cavi pretesi, questa tecnologia è in grado di riconoscere microinterruzioni e microrotture, che come nel caso della tomografia ultrasonica, richiedono un approfondimento mediante endoscopia o saggio diretto.



Figura 11: scansione con Senriqan su travi in c.a.p.

L'unico sistema ad oggi affidabile per una valutazione dello stato tensionale di una struttura in c.a. ordinario o c.a.p. rimane la tecnica del rilascio tensionale, che affronteremo nel prossimo paragrafo.

8 RILASCI TENSIONALI

La tecnica del rilascio tensionale, concettualmente identica alle prove con i martinetti piatti sulla muratura, consente di ricavare il valore di precompressione residua sui manufatti in c.a.p. o la tensione di lavoro in un punto di una qualsiasi struttura in calcestruzzo armato ordinario.

Questa consiste nell'applicare una coppia di estensimetri paralleli, lungo la direzione di massima sollecitazione, per poi separare la zona di installazione dalla matrice circostante mediante dei tagli nel calcestruzzo.

La conoscenza dello stato tensionale di un elemento strutturale è fondamentale per una corretta valutazione delle condizioni di lavoro, e quindi di sicurezza(,) di una struttura. La sua misura, di natura sperimentale, permette di migliorare la calibrazione del modello numerico, rendendo così più affidabili i risultati teorici.

Se ci riferiamo, ad esempio, alla conoscenza delle sollecitazioni dei pilastri di fondazione di un edificio, dove il naturale assestamento nel tempo comporta un riallineamento dei carichi teorici, la conoscenza dello stato di tensione reale, confrontata con la resistenza ultima del materiale, permette di valutare il livello di sicurezza e lo spazio di sollecitazione ancora accettabile a fronte di eventi straordinari come quelli sismici. [...]

La possibilità di misurare lo stato tensionale in esercizio è altrettanto interessante nel caso delle travi precomprese, dove i fenomeni di degrado possono ridurre, nel tempo, lo stato di precompressione all'intradosso e quindi produrre una condizione che comporta, attraverso i carichi di esercizio, uno stato tensionale di trazione con possibili fessurazioni. Quanto premesso rende l'idea dell'utilità di avere metodi sperimentali per la misura dello stato tensionale in esercizio sia di elementi strutturali fondamentali, come pilastri e travi di edifici, che di elementi in condizione di massima sollecitazione, come le mezzerie delle travi precomprese da ponte. [4]



Figura 12: Discovery su trave in c.a.p.

Come ben noto, la precompressione presenta delle perdite di tensione nel tempo per un fenomeno di rilassamento degli acciai, oppure per un ammaloramento delle testate di ancoraggio dovuto al loro dilavamento.

La tecnica del rilascio tensionale è stata perfezionata con due nuovi sistemi brevettati: il Tensometer, utilizzato per eseguire le carote strumentate, ed il Discovery, ideato per il rilascio di campioni troncopiramidali.

Il Discovery nasce prevalentemente per travi precomprese, nelle quali la stretta vicinanza delle armature e dei cavi di precompressione, non consente di operare dei tagli troppo invasivi e profondi nell'elemento strutturale.

Il Tensometer invece nasce per eseguire carote strumentate, che in seconda battuta potranno essere testate a compressione in laboratorio, eseguendo dei tagli per ricavare campioni cilindrici dai 10 cm di profondità in su.



Figura 13: Tensometer su spalla in c.a.

Il vantaggio offerto da questo strumento è la possibilità di seguire il processo progressivo di rilascio, durante il suo intero sviluppo: il Tensometer, infatti, potendo essere alloggiato all'interno della carotatrice durante l'operazione di taglio consente all'operatore di seguirne il fenomeno con continuità su app dedicata.

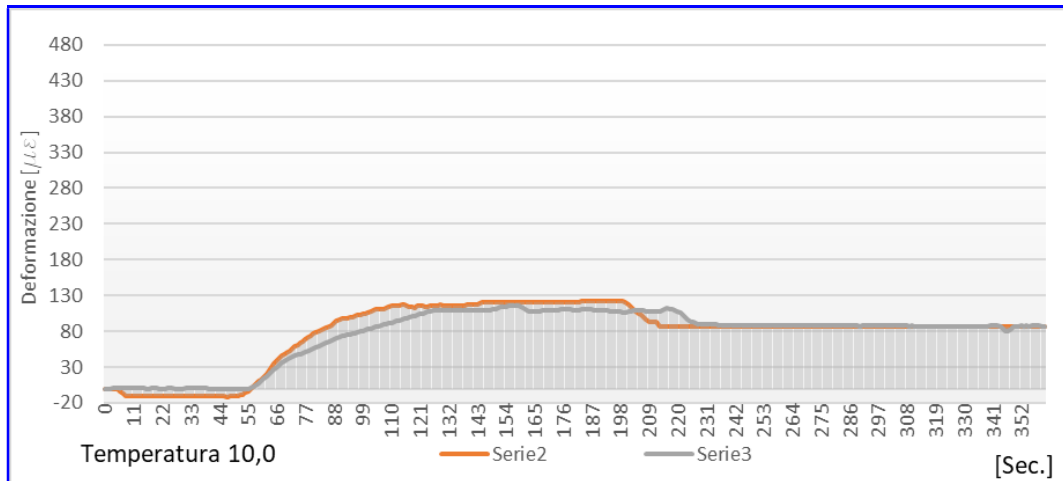


Figura 14: grafico di Tensometer

Lo stesso discorso vale per il Discovery, per il quale invece si leggeranno quattro "scalini" caratteristici, dovuti ai tagli eseguiti.

Secondo la procedura si eseguono prima i due tagli verticali e di seguito i due orizzontali.

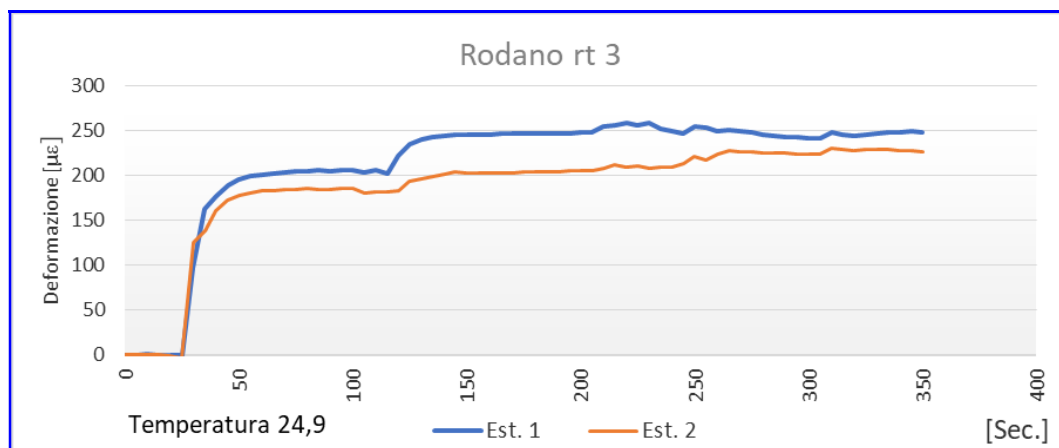


Figura 15: grafico di Discovery

9 CONCLUSIONI

Il percorso appena concluso, attraverso le più recenti tecniche d'indagine, deve essere di stimolo per il professionista al fine di mettersi in gioco ed uscire dalla zona di comfort, adottando delle scelte sperimentali innovative. Non si tratta di un mero salto nel buio, ma di comprendere che gli attuali strumenti disponibili possono fare la differenza nella progettazione antisismica ed in quella di ristrutturazione e consolidamento delle opere civili ed infrastrutturali.

La tecnologia continuerà il suo progresso incessante e forse un giorno sarà l'intelligenza artificiale a dirci se un cavalcavia è prossimo al collasso.

Parliamo di un futuro ancora lontano, quindi sta ai professionisti il compito di rimanere aggiornati e di avere "il coraggio" di adottare queste nuove metodologie con senso critico ma nell'ottica di avere risposte più adeguate alla reale condizioni e caratteristiche delle opere e dei materiali su cui si indaga.

BIBLIOGRAFIA

- [1] A. Ceccotti, E. Giangreco, L. Jurina, S. Martinello, E. Siviero, S. Tattoni, R. Bruson, M. Bruson, G. Caramel, L. Malisardi, A. Papaleo, L. Perrone, L. Bertamini, S. Cattari, A. Cimino, F. Corazzola, A. Lupoi, N. Martinello, F. Minelli – *Cap. 14 Indagini sperimentali – Prove in sito*, Editore CIAS, 2022
- [2] Proceq SA, 2017
- [3] <https://www.konicaminolta.com/global-en/newsroom/2021/1101-01-01.html>
- [4] S. Martinello, Tecniche di misura dello stato tensionale, Rivista Le Strade, Aprile 2023

