



AIPnD

*Associazione Italiana
Prove non Distruttive
Monitoraggio Diagnostica*

Firenze2011

14°Congresso AIPnD

Ottobre 26-27-28. Centro Congressi Firenze Fiera
Conferenza Nazionale sulle Prove non Distruttive Monitoraggio Diagnostica

FIRENZE 2011
Ottobre 26-27-28

Entra

Firenze
Centro Congressi - Firenze Fiera
Ottobre 26, 27, 28 - 2011

segreteria@aipnd.it - www.aipnd.it



Firenze2011
14° Congresso AIPnD
Ottobre 26-27-28. Centro Congressi Firenze Fiera
Conferenza Nazionale sulle Prove non Distruttive Monitoraggio Diagnostica

Proceedings Book

IDN 1 / 20

IDN 21 / 40

IDN 41 / 60

IDN 61 / 81

IDN 62	M. Cavallini, V. Di Cocco, F. Iacoviello <i>ROTTURE PER FATICA: DUE SECOLI DI STUDI</i>	pdf download
IDN 63	S. Beretta, M. Carboni, A. Lo Conte <i>LA FATICA-CORROSIONE DI ASSILI FERROVIARI: ANALISI SPERIMENTALE E MODELLAZIONE</i>	pdf download
IDN 64	M. Carboni <i>ESPERIMENTI E SIMULAZIONI NUMERICHE ULTRASONORE PER UN'EFFICACE DERIVAZIONE DELLE CURVE POD DI ASSILI FERROVIARI</i>	pdf download
IDN 65	D. Crivelli, M. Guagliano, A. Monici, D. Marangoni <i>ANALISI DEL DANNEGGIAMENTO DA IMPATTO DI STRUTTURE IN COMPOSITO CON LA TECNICA DELL'EMMISSIONE ACUSTICA</i>	pdf download
IDN 66	G. Barbieri, A. Tati, M. Moncada, U. De Angelis <i>CONTROLLO E CARATTERIZZAZIONE DI SANDWICH COMPOSITI IN SCHIUMA METALLICA E DI LORO GIUNTI SALDATI</i>	pdf download
IDN 67	I. Iacobini, F. Crea, P. Frontera, G. Porco <i>INDAGINI NON DISTRUTTIVE SU MALTE A BASSO IMPATTO AMBIENTALE CONFEZIONATE CON MATERIALE P.F.U.</i>	pdf download
IDN 68	Il Laurent Enenkel, Jérôme Poirier, David Jervis <i>A PORTABLE SOLUTION TO ENABLE GUIDED ULTRASONIC INSPECTION</i>	pdf download
IDN 69	Luca Labbadia, Luigi Aruta, Marco Sarti <i>EVOLUZIONE DEI CND IN AMBITO TRENITALIA</i>	pdf download
IDN 70	S. Nardi, P.B. Finazzi <i>MISURE DI QUALITA' DEI FASCI E DELLA DIMENSIONE DELLA MACCHIA FOCALE IN FASCI DI FOTONI AD ALTA ENERGIA PRODOTTI DA ACCELERATORI LINEARI PER RADIOGRAFIE INDUSTRIALI</i>	pdf download
IDN 71	Dott. Ing. Fabio Casoni <i>SONDE ROTANTI MOTORIZZATE CON ENCODER, PER CONTROLLO ASSILI PIENI</i>	pdf download
IDN 74	Igor Maria De Rosa, Carlo Santulli, Fabrizio Sarasini <i>CARATTERIZZAZIONE NON DISTRUTTIVA DEL DANNEGGIAMENTO AD IMPATTO DI COMPOSITI IN FIBRA NATURALE</i>	pdf download
IDN 78	G. Nardoni, M. Certo, P. Nardoni, M. Feroldi, D. Nardoni, L. Possenti, A. Filosi, S. Quetti <i>DETERMINAZIONE SPERIMENTALE DEI CRITERI DI DISCRIMINAZIONE TRA DIFETTI VOLUMETRICI/PLANARI MEDIANTE TECNICA ULTRASONORA PULSE ECHO/PHASED ARRAY BASATA SUL RAPPORTO DEGLI ECHI DIFFRATTI NEL CONTROLLO DELLE SALDATURE</i>	pdf download

IDN 79	F. Vullo UN NUOVO METODO NON INTRUSIVO PER IL CONTROLLO DELLA CORROSIONE IN LINEA	pdf download
IDN 80	F. Vullo LA MISURA 3D, UN METODO AFFIDABILE PER VALUTARE LE INDICAZIONI IN UN'ISPEZIONE VISIVA	pdf download
IDN 81	M. Salustri, R. Ciabattoni INDAGINI RADIOGRAMMATICHE EFFETTUATE A REGGIO CALABRIA	pdf download

ESPERIMENTI E SIMULAZIONI NUMERICHE ULTRASONORE PER UN'EFFICACE DERIVAZIONE DELLE CURVE POD DI ASSILI FERROVIARI

M. Carboni

Politecnico di Milano, Dipartimento di Meccanica. Via La Masa 1, 20156 Milano, Italia

Tel.: 02 2399 8253 – Fax: 02 2399 8202 – Email: michele.carboni@polimi.it

SOMMARIO

Uno degli aspetti fondamentali nell'approccio "Damage Tolerant" alla progettazione di componenti meccanici è la probabilità di individuare un eventuale difetto dovuto all'esercizio. Nel caso particolare degli assili ferroviari, trattandosi di componenti di sicurezza, la problematica è ancora più delicata e critica.

Nella presente memoria viene innanzitutto descritto un approccio, recentemente proposto dall'autore, riguardante l'interpretazione delle risposte ultrasonore in termini di area riflettente del difetto al posto della tradizionale profondità. Tale approccio permette anche una rilettura più flessibile e versatile del processo di derivazione delle curve "Probability of Detection". Dato, però, l'elevato costo dell'attività sperimentale tipicamente richiesta per la derivazione statisticamente affidabile di tali curve, vengono qui aggiunte, ai dati sperimentali, opportune simulazioni numeriche condotte mediante il software dedicato CIVA 10.0b. I risultati ottenuti hanno dimostrato l'utilità di un approccio misto per la determinazione dell'affidabilità dei controlli non distruttivi.

Parole chiave: assili ferroviari, curve POD, ultrasuoni, area riflettente, simulazioni numeriche

1. INTRODUZIONE

La fatica è la causa più importante di cedimento degli assili ferroviari durante il servizio. Tale cedimento si manifesta, tipicamente, in termini di nucleazione e propagazione di cricche in corrispondenza di siti preferenziali quali: transizioni geometriche, pit di corrosione, impatti da ballast o calettamenti forzati. L'approccio più adatto alla progettazione di assili ferroviari risulta, quindi, la "Damage Tolerance", di cui Zerbst et al. [1] hanno elencato i punti critici. Tra questi, l'autore della presente memoria ha contribuito alla comprensione del comportamento a propagazione in aria di differenti acciai per assili [2] e alla sua descrizione statistica [3], alla determinazione del fattore di intensificazione degli sforzi di cricche posizionate nelle tipiche transizioni geometriche [4] e all'influenza delle curve di "Probability of Detection" (POD) del metodo non distruttivo adottato sugli intervalli manutentivi di ispezione [5].

La presente memoria è focalizzata, considerando i punti critici appena descritti, sull'efficacia dei controlli non distruttivi (CND) che è in relazione alla conoscenza affidabile delle curve POD ([6]-[8]) del metodo CND adottato. Tradizionalmente, tali probabilità vengono esplicitamente espresse e diagrammate in termini di una dimensione lineare caratteristica del difetto (profondità, lunghezza, diametro, ...). Tuttavia, esse sono anche funzione di molti altri parametri fisici e operativi quali: il metodo CND adottato, il

materiale, la geometria, il tipo di difetto, la strumentazione utilizzata, il fattore umano e le condizioni ambientali. Ciò significa che molto raramente la curva POD derivata per ben determinate condizioni ed operatori può essere trasposta così come è ad altre situazioni anche se simili. Un secondo aspetto critico delle curve POD consiste nella necessità, per la sicurezza e la progettazione, di caratterizzare statisticamente il difetto più grande che può non essere visto e non il più piccolo che si è in grado di vedere. Per questo motivo, le curve POD dovrebbero essere fornite insieme ad un opportuno limite inferiore di confidenza (tipicamente il 95%) che richiede un numero elevato di risultati sperimentali.

Considerando, qui, il caso specifico del CND ad ultrasuoni (UT) applicato agli assili ferroviari, viene innanzitutto riassunto un approccio, recentemente proposto dall'autore [9], riguardante l'interpretazione delle risposte ultrasonore in termini di area riflettente del difetto al posto della tradizionale dimensione lineare. Dato, però, l'elevato costo dell'attività sperimentale tipicamente richiesta per la derivazione statisticamente affidabile delle curve POD, viene anche investigata la possibilità di applicare l'approccio "model-assisted probability of detection" (MAPOD) [10]-[12] che è molto recente (le prime pubblicazioni risalgono al 2003) ed è basato sull'idea di utilizzare simulazioni numeriche dell'ispezione CND basate su opportuni modelli fisici nel processo di determinazione delle curve POD in modo da diminuire il numero necessario di esperimenti e, di conseguenza, i costi e i tempi. Rimane, comunque, da ricordare che l'approccio MAPOD non permette di eliminare totalmente lo sforzo sperimentale perché non tutti i fattori in gioco sono controllati da modelli fisici noti con la dovuta precisione.

2. SINTESI DELL'APPROCCIO "AREA RIFLETTENTE"

Il materiale qui considerato è l'acciaio A4T tipicamente utilizzato nella produzione di assili ferroviari e caratterizzato da velocità delle onde sonore longitudinali $V_L=5920$ m/s e trasversali $V_T=3230$ m/s. Tutte le misure sperimentali sono state eseguite dallo stesso operatore utilizzando una centralina RDG500 equipaggiata con una sonda a singolo cristallo 8x9 mm ATM45/4. Il responso degli ultrasuoni ai difetti ispezionati è stato sempre registrato ad un guadagno pari a 48 dB, corrispondente alla risposta di un grande riflettore (osservato in primo percorso) portata all'80% dello schermo. L'accoppiamento sonda-pezzo è stato garantito mediante grasso ed opportuni zoccoli sagomati in plexiglas.

Un totale di venti difetti artificiali è stato realizzato sulla superficie esterna di sei sezioni di assili cavi in A4T (Fig. 1a). In particolare, tali difetti sono caratterizzati da (Fig. 1b): geometrie diverse (taglio di sega, concava e convessa), da dimensioni differenti (da profondità di 0.5 mm fino a 8 mm) e da diversi processi tecnologici (lavorazioni di macchina utensile, elettroerosione). Vista la particolare geometria delle sezioni di assile, tutti i difetti sono stati ispezionati sia in primo percorso (riflessione diretta del fascio sul difetto), sia in secondo percorso (interponendo una riflessione sul foro baren). È importante ricordare che l'attuale procedura di ispezione di assili in esercizio adotta solo la configurazione in primo percorso grazie a speciali borosonde [13].

I risultati delle ispezioni sui difetti artificiali sono riportate in Figura 2a in termini della tradizionale dimensione lineare del difetto (in questo caso assunta essere la profondità). Come di può osservare, la deviazione standard dei dati è talmente elevata da causare un'intersezione delle risposte ottenute a tempi di volo raddoppiati. Ciò è stato attribuito [9]

all'influenza che la forma del difetto ha sulla risposta UT di difetti di pari profondità, ma differente morfologia.

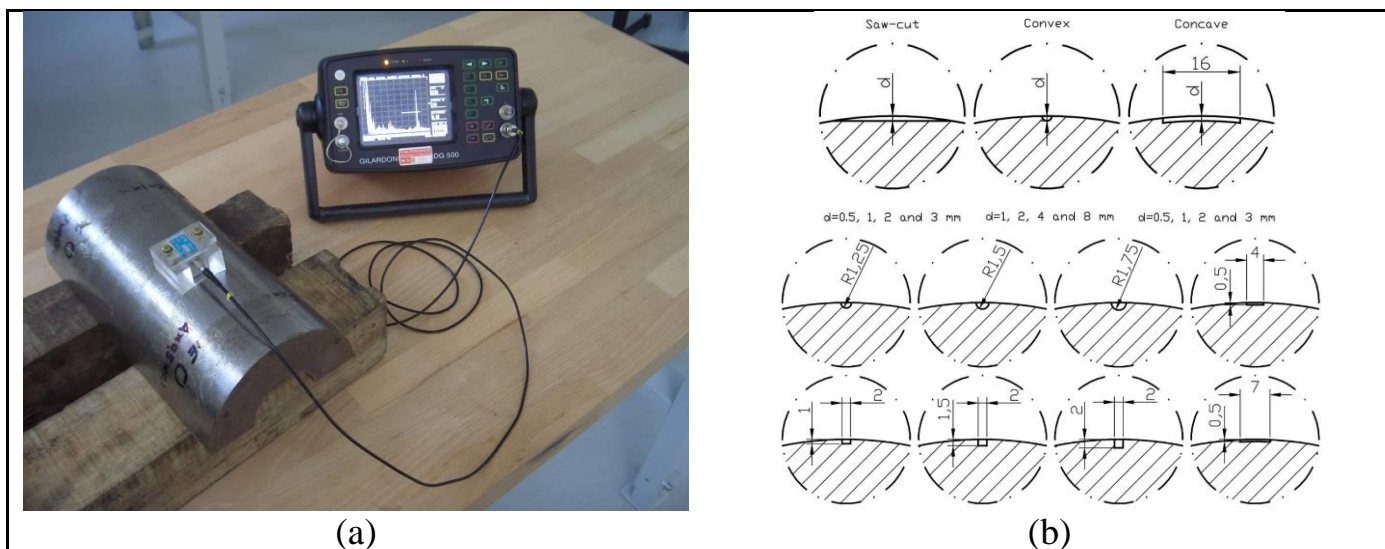


Figura 1 – Ispezione UT di differenti tipologie di difetti artificiali.

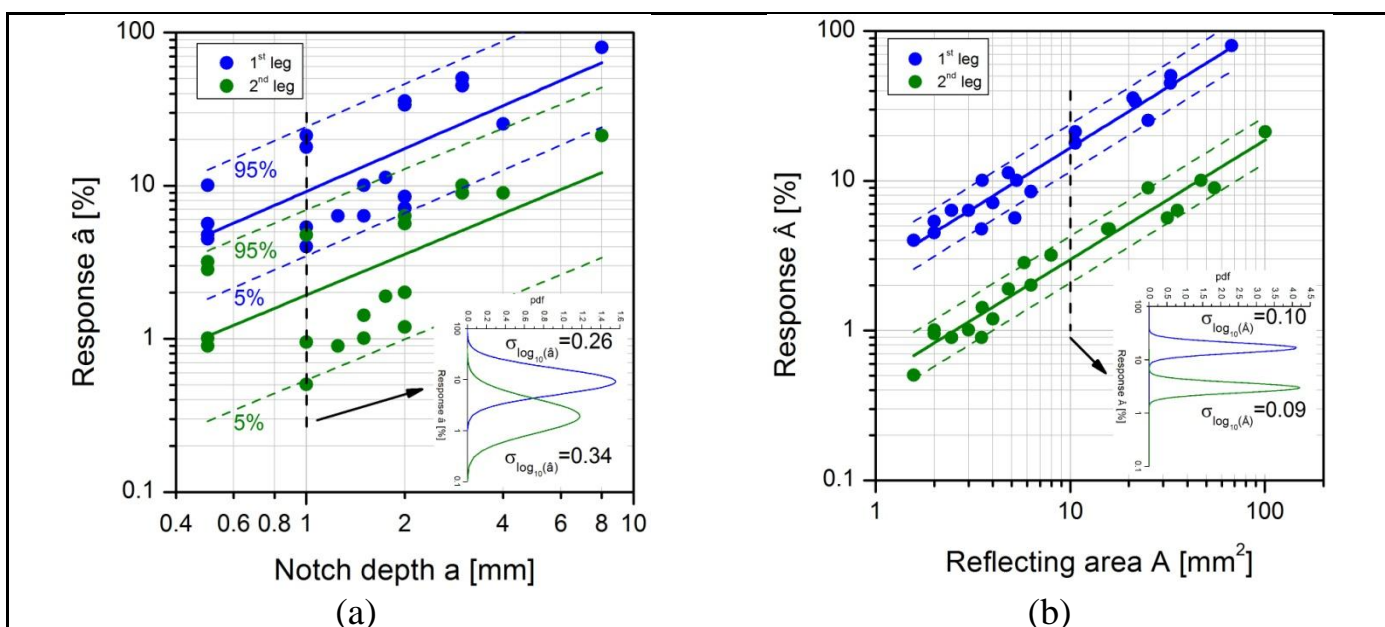


Figura 2 – Confronto tra gli andamenti delle ispezioni sui difetti artificiali in termini di profondità (a) e di area riflettente (b).

Per eliminare l'influenza della morfologia del difetto è quindi stato proposto [9] di diagrammare le risposte UT in termini dell'area riflettente del difetto, ovvero dell'intersezione tra l'area del fascio ultrasonoro al tempo di volo opportuno e l'area del difetto stesso. Maggiori dettagli sulla procedura sono disponibili in [9]. Il risultato dell'analisi è mostrato in Figura 2b, dove è evidente la diminuzione dell'influenza della forma del difetto (e quindi della deviazione standard) sulla risposta UT.

Ispezioni UT sono poi state effettuate su cricche di fatica indotte, mediante l'introduzione di micro-difetti artificiali, nel corpo di tre differenti assili cavi in scala reale (Fig. 3a) prodotti in A4T e testati mediante il banco dedicato disponibile presso i laboratori del Dipartimento di Meccanica del Politecnico di Milano. Siccome la configurazione di carico applicata agli assili è assimilabile ad una flessione rotante su tre punti, la forma attesa delle cricche di fatica è da considerare simile ai difetti convessi mostrati in Figura 2b, ovvero

semi-ellittica o semi-circolare. In particolare, le ispezioni sono state eseguite, considerando solo la configurazione in secondo percorso, durante prove di propagazione e quindi si è potuto misurare la risposta UT di cricche evolventi, in termini di dimensione, col numero di cicli.

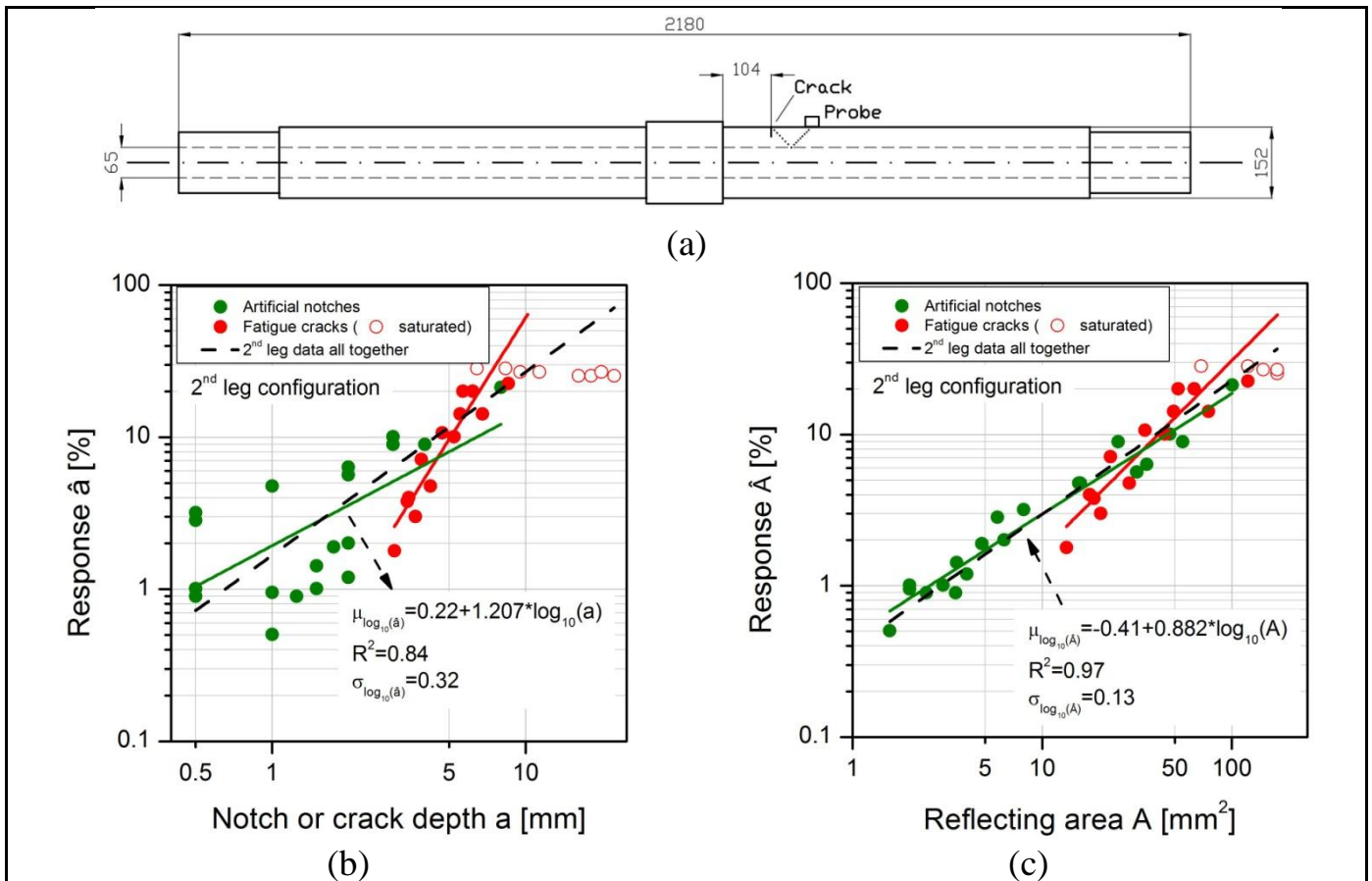


Figura 3 – Confronto tra gli andamenti delle ispezioni sui difetti naturali in assili ferroviari (a) e artificiali in termini di profondità (b) e di area riflettente (c).

I risultati ottenuti sia in termini di profondità, sia di area riflettente sono mostrati nelle Figure 3b e 3c rispettivamente. Come atteso, è possibile osservare la presenza di un livello di saturazione sopra cui i difetti o le cricche possono essere considerati dei grandi riflettori. Nel caso della profondità, inoltre, il comportamento delle cricche naturali è molto differente da quello dei difetti artificiali, come spesso riportato in letteratura [14]. Considerando, invece, l'area riflettente, la correlazione sembra decisamente migliore suggerendo che le proprietà di riflessione di una cricca da fatica classica (questa conclusione non è generalizzabile ad altre tipologie di cricca [9]) siano simili a quelle dei difetti artificiali.

I dati diagrammati in Figura 3 sono il punto di partenza per la determinazione delle curve POD mediante l'applicazione di approcci statistici opportuni ([6]-[8]). Risulta evidente che minore è la deviazione standard attorno all'andamento medio rettilineo e migliore sarà la curva POD, dove con "migliore" si intende caratterizzata da un intervallo di confidenza più stretto e da un andamento più ripido attorno alla soglia di decisione scelta, dove con soglia di decisione è da intendersi la risposta del difetto che si vuole poter vedere con POD pari al 50%. Si conclude, quindi, che l'area riflettente permette di derivare curve POD migliori. L'approccio "area riflettente" è caratterizzato anche da altre importanti utilità la cui descrizione è riportata altrove [9].

3. SIMULAZIONI NUMERICHE PER LE CURVE POD

L'ottenimento dei risultati descritti nella sezione precedente ha richiesto un elevato impegno sperimentale e, quindi, tempi e costi non trascurabili. Tali costi necessari alla determinazione delle curve POD risultano, in generale, noti e molto sentiti dalla comunità che si dedica al loro studio. Per questo motivo, recentemente hanno iniziato ad essere ricercate metodologie, alternative all'approccio puramente empirico, richiedenti un impegno di implementazione inferiore: tra queste ricade MAPOD. In particolare, le curve POD (e le collegate curve "Probability of False Alarm" PFA) sono basate sulle distribuzioni statistiche del responso ai difetti e del rumore. Tali distribuzioni sono, a loro volta, controllate da un certo numero di fattori relativi ai dettagli della procedura di ispezione adottata. Gli effetti di molti di questi fattori possono, al giorno d'oggi, essere previsti mediante modelli numerici opportuni e MAPOD si prefigge di sfruttare appieno questa possibilità. Come accennato nell'Introduzione, MAPOD non permette comunque di eliminare del tutto l'attività sperimentale perché non tutti i fattori fisici sono attualmente descritti da modelli fisici noti con la dovuta precisione. E' anche importante notare che l'approccio MAPOD è applicabile a qualsiasi metodo CND e non solo all'UT considerato nella presente memoria.

Al momento, esistono due variazioni (Fig. 4) nell'applicazione di MAPOD [11], ma, a lungo termine, si pensa che esse possano divenire due interpretazioni di uno stesso processo. La prima variazione viene detta "funzione di trasferimento" (Fig. 4a) perché suggerisce di poter utilizzare modelli numerici per facilitare l'operazione di trasferimento delle curve POD ottenute sperimentalmente per un particolare insieme di condizioni ad un'altra situazione dove alcune delle condizioni sono state modificate. La seconda variazione, detta "MAPOD completo" (Fig.4b), richiede, invece, di prevedere un insieme minimo di esperimenti per caratterizzare quei fattori dell'ispezione che non sono descritti da modelli fisici noti e simulazioni numeriche per caratterizzare, invece, tutti gli altri.

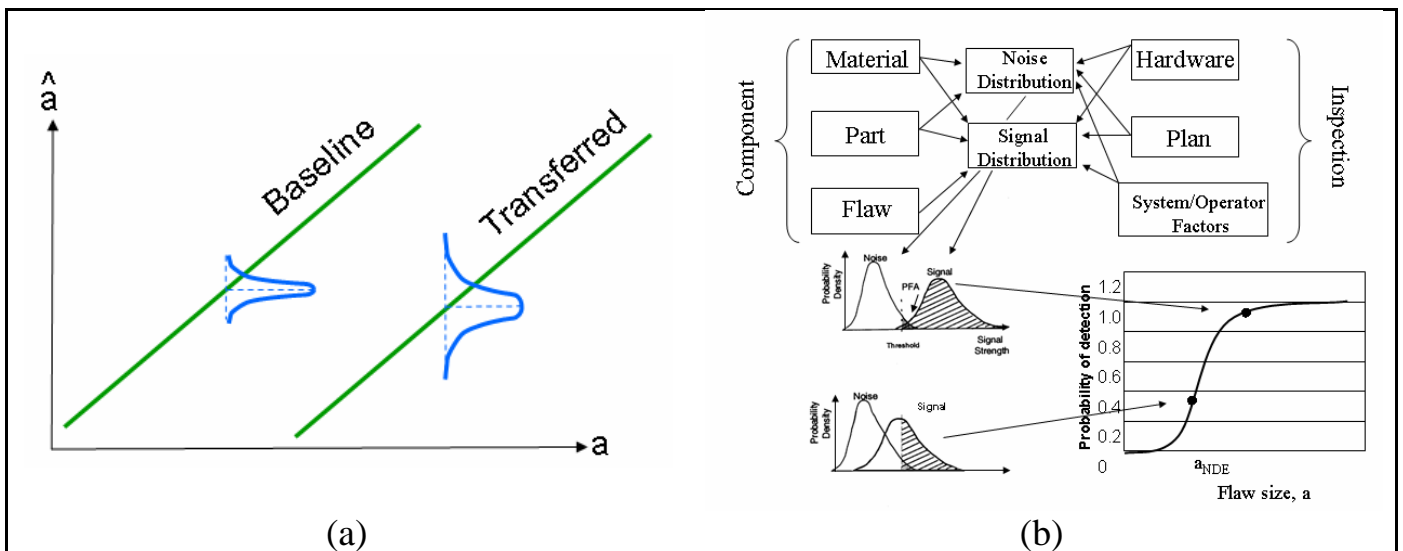


Figura 4 – Due approcci MAPOD [11]: a) funzione di trasferimento; b) completo.

Entrambe le metodologie MAPOD appena descritte possono essere applicate con successo all'ispezione UT di assili ferroviari. Nella presente ricerca, le modellazioni numeriche verranno effettuate utilizzando il software dedicato CIVA 10.0b [15], dotato di moduli per la simulazione dei controlli UT, ET e RT. Innanzitutto, è stata eseguita la calibrazione del

modello numerico (Fig. 5a) simulando il responso del difetto artificiale convesso di raggio pari a 8 mm (Fig. 2b) presente in una delle sezioni di assile cavo in A4T. In particolare, tutte le caratteristiche geometriche, dei materiali e acustiche per l'assile, la sonda e il difetto sono state impostate nel software con la massima cura. Per semplicità, è stata considerata solo la configurazione in secondo percorso, una generalizzazione al primo percorso, comunque, non pone ulteriori problematiche specifiche. La calibrazione è quindi consistita nel ricercare ed impostare in CIVA il guadagno opportuno perché il picco dell'A-Scan simulato del difetto scelto avesse la stessa altezza percentuale dello schermo della misura sperimentale. Mantenendo invariato tale guadagno, è stata poi simulata una serie di difetti convessi di area differente (tutti semi-circolari con raggio da 0.5 mm a 8 mm) e i risultati numerici sono stati confrontati con quelli sperimentali (Fig. 5b). Come si può osservare, i responsi UT numerici sono molto ben allineati a quelli sperimentali, suggerendo la bontà della calibrazione e la corretta impostazione del modello numerico per le successive analisi.

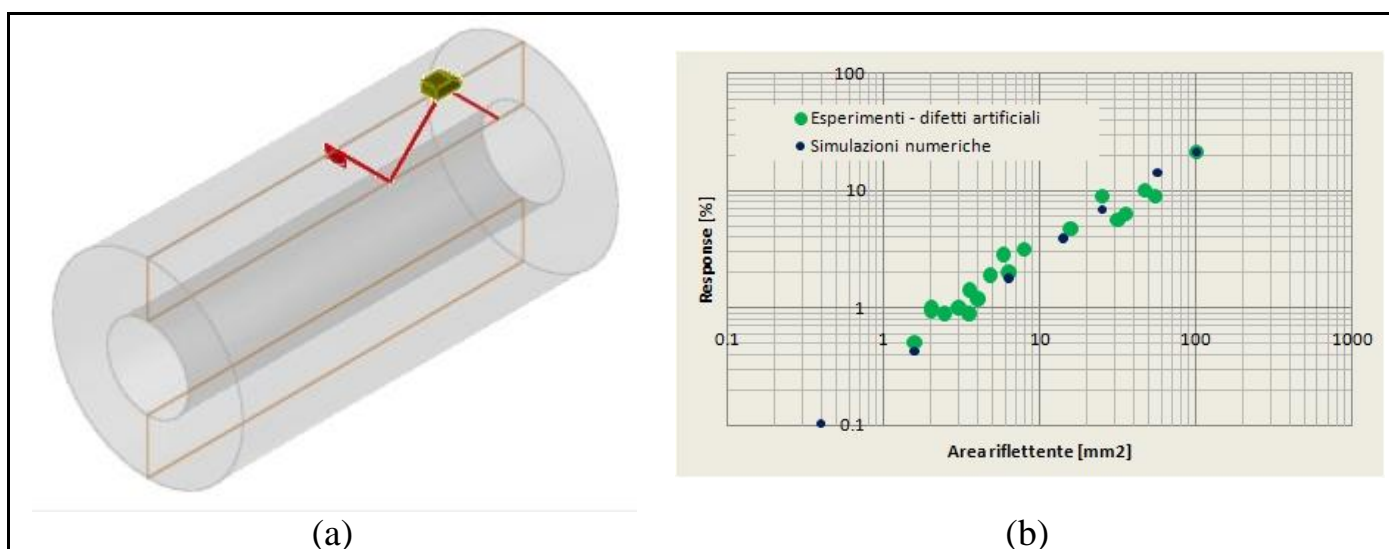


Figura 5 – Calibrazione del modello numerico: a) set-up numerico; b) confronto tra i risultati numerici e quelli sperimentali.

Nel seguito vengono presentati due esempi di applicazione degli approcci MAPOD al controllo ultrasonoro di assili ferroviari partendo dal modello calibrato appena descritto.

3.1 Approccio “funzione di trasferimento”

Come esempio applicativo dell'approccio mediante “funzione di trasferimento”, il modello numerico calibrato è stato impiegato per simulare la risposta UT degli stessi difetti convessi di diversa area riflettente già utilizzati, questa volta ispezionati in primo percorso. In questo modo: i) si considera una situazione simile a quella della calibrazione, ma con un fattore (il tempo di volo) significativamente differente; ii) si hanno a disposizione i dati sperimentali in primo percorso (Fig. 2) per valutare l'efficacia del metodo. La modellazione del problema è mostrata in Figura 6a dove l'unica variazione, rispetto alla calibrazione, riguarda il posizionamento della sonda (agente non dalla superficie esterna, ma dalla superficie del foro baren) e la forma dello zoccolo di accoppiamento (che da concavo, per adattarsi alla superficie esterna, è stato reso convesso per adattarsi alla superficie del foro baren). Tutti gli altri parametri sono stati mantenuti invariati, compreso il guadagno determinato durante la calibrazione. Il confronto tra le simulazioni

numeriche e i dati sperimentali è mostrato in Figura 6b. Come si può osservare, le simulazioni sono molto ben poste nei confronti degli esperimenti. Questo risultato suggerisce che, in assenza di dati sperimentali, il modello potrebbe permettere di ricavare la curva POD di difetti ispezionati in primo percorso a partire dal modello numerico calibrato con esperimenti in secondo percorso.

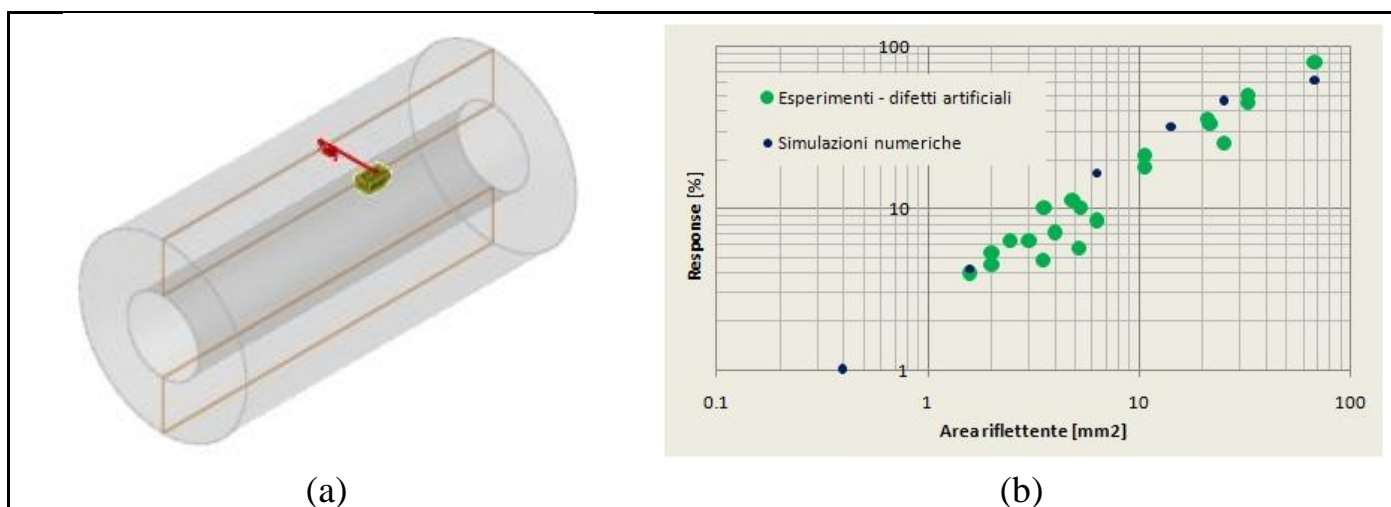


Figura 6 – Applicazione del metodo “funzione di trasferimento”: a) impostazione del modello; b) confronto tra le simulazioni in primo percorso e i dati sperimentali.

3.2 Approccio “MAPOD completo”

Come già osservato, i risultati numerici mostrati nelle Figure 5b e 6b sono certamente utili, interessanti e rappresentano un primo efficace strumento MAPOD per valutare le performance della particolare procedura di ispezione considerata. Purtroppo, però, da essi non è possibile ottenere informazioni sulle variabilità presenti nelle misure reali (come è evidente dalla forte differenza di deviazione standard tra risultati numerici e sperimentali) perché sono stati ottenuti in condizioni numeriche “ideali”, dove, per esempio, l'accoppiamento è sempre perfetto, il posizionamento della sonda è sempre tale da garantire la massimizzazione della risposta, ecc. Da ciò consegue che l'intervallo di confidenza dei risultati numerici ottenuti fino a qui è estremamente ristretto e assolutamente non rappresentativo di quello delle misure sperimentali.

Nella eventuale necessità di dover caratterizzare anche la confidenza delle curve POD, bisogna adottare l'approccio “MAPOD completo” che suggerisce di modellare, durante le simulazioni, ogni causa di variabilità delle risposte CND mediante una distribuzione statistica opportuna. E' però bene ricordare nuovamente che non tutte le cause di variabilità sono attualmente descrivibili da un modello statistico efficace utilizzabile in questo approccio.

Per semplicità e a scopo dimostrativo, nella presente ricerca si è considerata una sola variabile stocastica: la posizione della sonda lungo la direzione longitudinale dell'assile rispetto alla condizione di massimizzazione del difetto ispezionato in secondo percorso (Fig. 7a). La metodologia di analisi è qui basata sul metodo Monte Carlo: prima di ogni simulazione numerica del controllo UT, viene estratto casualmente un valore della posizione longitudinale della sonda, rispetto al difetto, da una distribuzione normale avente media pari alla posizione di massimizzazione del difetto stesso ed un coefficiente di variazione $CV=0.1$. E' importante aggiungere che tale distribuzione è stata assunta da

considerazioni di buon senso e non da sperimentazioni specifiche. Sono stati considerati cinque difetti aventi $R=0.5, 1, 2, 4$ e 8 mm e per ognuno di essi sono state effettuate trenta simulazioni numeriche a partire da altrettanti valori casuali della posizione della sonda. Il totale della analisi effettuate in questo semplice esempio è quindi 150. Il numero di analisi per ogni difetto è stato scelto pari a trenta perché il numero minimo di dati, per una data dimensione di difetto, necessario alla definizione della confidenza al 95% è 29. Figura 7b mostra i risultati ottenuti.

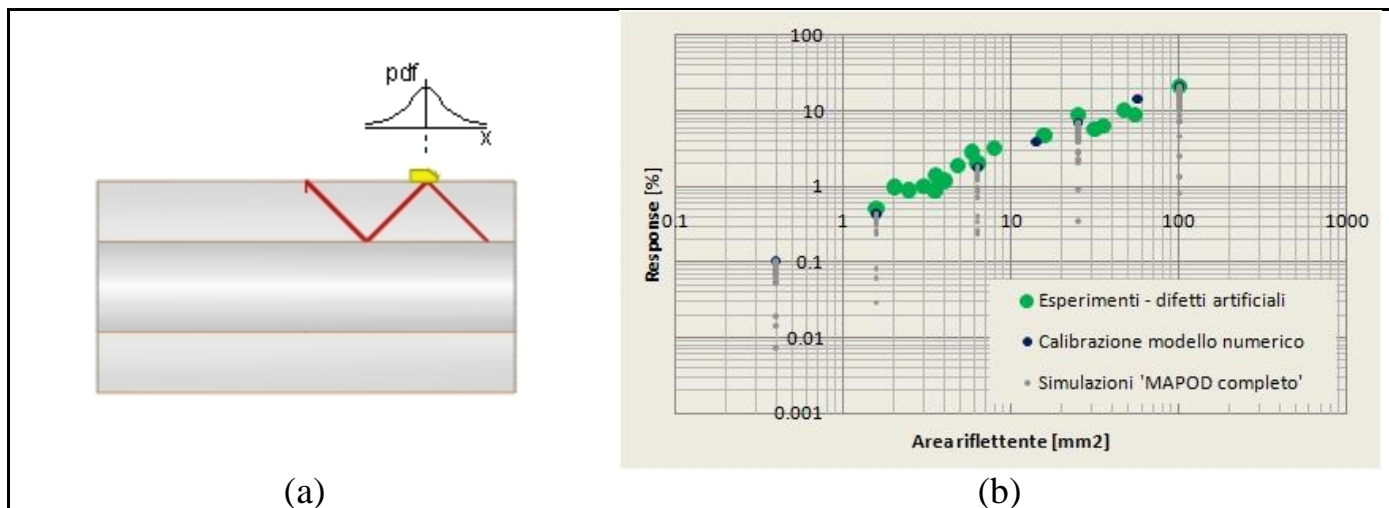


Figura 7 – Applicazione del metodo “MAPOD completo”: a) impostazione del modello; b) confronto tra le simulazioni in secondo percorso e i dati sperimentali.

La performance migliore, ovvero l’ampiezza più alta ottenuta dalle simulazioni numeriche, corrisponde ai punti di calibrazione che sono relativi alla posizione di massimizzazione della risposta dei difetti. Per tutti gli altri risultati si ottiene una risposta inferiore perché il fascio non investe nel modo migliore il difetto. In generale, la deviazione standard delle simulazioni risulta significativa e spalmata su circa una decade delle ampiezze di risposta. Considerando i dati sperimentali, è possibile osservare che essi si assestano sui risultati numerici migliori, ma anche che presentano valori irraggiungibili dalle simulazioni. Ciò è dovuto al fatto che nelle misure sono sicuramente presenti sorgenti di variabilità non considerate nelle simulazioni. Rimane che assumere i risultati numerici ottenuti permette di definire delle curve POD sicuramente conservative nei confronti delle misure sperimentali.

E’, infine, utile far notare che la costruzione di risultati numerici più complessi in grado di considerare un maggior numero di variabilità è possibile generalizzando la metodologia appena descritta ed applicata: prima dell’i-esima simulazione numerica si procede all’estrazione di un valore da ognuna delle n distribuzioni statistiche relative alle n variabili stocastiche da considerare.

4. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Dopo aver brevemente descritto l’approccio “area riflettente” recentemente proposto dall’autore per una più efficace interpretazione delle risposte ultrasonore, si è mostrata l’applicazione dell’approccio MAPOD, basato sulla modellazione numerica del fenomeno, e alcune sue utilità specialmente considerando la possibilità di diminuire il numero di esperimenti necessario alla derivazione delle curve POD. I risultati sembrano molto incoraggianti sia considerando l’approccio “funzione di trasferimento”, sia quello più

complesso “MAPOD completo”. In entrambi i casi, è stato possibile ottenere ottima corrispondenza tra i risultati numerici e le evidenze sperimentali di ispezioni UT applicate agli assili ferroviari, ma ulteriori studi si rendono necessari vista la novità di questo tipo di approccio.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] U. Zerbst, M. Vormwald, C. Andersch, K. Mädler e M. Pfuff, ‘The development of a damage tolerance concept for railway components and its demonstration for a railway axle’, *Eng Fract Mech*, Vol 72, pp 209–239, 2005.
- [2] S. Beretta, M. Carboni, S. Cantini e A. Ghidini, ‘Application of fatigue crack growth algorithms to railway axles and comparison of two steel grades’, *J Rail Rapid Transit*, Vol 218, pp 317–326, 2004.
- [3] S. Beretta e M. Carboni, ‘Experiments and stochastic model for propagation lifetime of railway axles’, *Eng Fract Mech*, Vol 73, pp 2627–2641, 2006.
- [4] M. Madia, S. Beretta e U. Zerbst, ‘An investigation on the influence of rotary bending and press fitting on stress intensity factors and fatigue crack growth in railway axles’ *Eng Fract Mech*, Vol 75, pp 1906–1920, 2008.
- [5] M. Carboni e S. Beretta, ‘Effect of probability of detection upon the definition of inspection intervals of railway axles’, *J Rail Rapid Transit*, Vol 221, pp 409–417, 2007.
- [6] G.A. Georgiou, ‘Probability of Detection (POD) curves: derivation, applications and limitations’, *Research Report 454*, HSE Books, Health and Safety, Executive, UK, 2006.
- [7] ASM. *ASM handbook – Vol. 17: Non-destructive evaluation and quality control*. 1997.
- [8] MIL-HDBK-1823A, ‘Nondestructive evaluation system reliability assessment’, Department of Defense of the US, 2009.
- [9] M. Carboni, ‘A critical analysis of ultrasonic echoes coming from natural and artificial flaws and its implications in the derivation of probability of detection curves’, sottoposto per la pubblicazione a *NDT&E International*, 2011.
- [10] <http://www.cnde.iastate.edu/MAPOD/index.htm>.
- [11] R.B. Thompson, L. Brasche, J. Knopp, J. Malas, ‘Use of physics-based models of inspection processes to assist in determining probability of detection’, *Atti Aging Aircraft Conference*, 2006.
- [12] J.S. Knopp, J.C. Aldrin, E. Lindgren, C. Annis, ‘Investigation of a model-assisted approach to probability of detection evaluation’, *AFRL-ML-WP-TP-2006-494 Report*, AIR FORCE RESEARCH LABORATORY, 2006.
- [13] C. Rocchi, G. Patelli, C. Gilardoni, ‘A new generation UT inspection device for high performance hollow axles’, *Atti 15th International Wheelset Congress (IWC15)*, Praga, Repubblica Ceca, 2007.
- [14] J.R. Birchack, C.G. Gardner, ‘Comparative ultrasonic response of machined slots and fatigue cracks in 7075 aluminum’, *Materials Evaluation* 1976;34(12):275-280.
- [15] CEA/CEDRAT, *CIVA 10.0b User’s Manual*, 2011.