

VALIDAZIONE MEDIANTE APPROCCIO MAPOD DELLA TECNICA “SONDA ROTANTE” APPLICATA AL CONTROLLO UT DI ASSILI PIENI

M. CARBONI¹, S. CANTINI², C. GILARDONI³

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

² Lucchini RS SpA, Via G. Paglia 45, 24065 Lovere (BG)

³ Gilardoni SpA, Via A. Gilardoni 1, 23826 Mandello del Lario (LC)

¹ Tel.: 02-23998253, Fax: 02-23998202, michele.carboni@polimi.it

² Tel.: 035-963111, Fax: 035-963324, s.cantini@lucchinirs.it

³ Tel.: 0341-705111, Fax: 0341-735046, gx@gilardoni.it

SOMMARIO

Il controllo in esercizio di assili pieni riveste un aspetto sempre più critico per il trasporto ferroviario in Europa, alla ricerca di soglie di sicurezza superiori ma, allo stesso tempo, costi di manutenzione contenuti. Le più diffuse tecniche di controllo prevedono l'ispezione dalla superficie dell'assile e richiedono, quindi, l'asportazione della vernice protettiva e, in molti casi, lo smontaggio di componenti come, ad esempio, i cuscinetti. Una tecnica alternativa, in uso in Italia sin dagli anni '70, prevede di effettuare l'intero controllo della superficie esterna dell'assile attraverso una scansione dall'estremità dello stesso, senza necessità di rimuovere componenti o vernici protettive. Tale tecnica è di natura ultrasonora e si basa su una sonda rotante capace di ispezionare le zone critiche degli assili mediante trasduttori diversamente angolati ed emittenti onde longitudinali tipicamente a 4 MHz. L'integrità strutturale viene quindi garantita, insieme agli altri fattori in gioco, dalla derivazione affidabile delle curve “Probability of Detection” della sonda rotante.

Nella presente memoria viene esplorata, in particolare, l'applicazione al trasporto merci. Vista l'onerosità della derivazione puramente sperimentale della curva POD, la presente ricerca descrive un approccio “Model-Assisted Probability of Detection”, dove si affiancano, alle risultanze sperimentali provenienti da difetti artificiali realizzati in assili, i risultati di opportune simulazioni numeriche eseguite col software dedicato CIVAnd. La combinazione di risultati numerici e sperimentali, rispetto all'approccio puramente sperimentale tradizionale, permette una maggiore flessibilità sui casi analizzati, l'opportunità di ottimizzare le procedure di controllo ed un risparmio significativo nella determinazione dell'affidabilità dei controlli tramite le curve “Probability of Detection”.

1. INTRODUZIONE

Lo scenario attuale del trasporto ferroviario merci in Europa mostra una tendenza verso nuove procedure di manutenzione degli assili pieni in esercizio, alla ricerca di un livello di sicurezza superiore e, allo stesso tempo, un'ottimizzazione dei costi totali di gestione della sala montata. Tra le tradizionali tecniche di controllo, l'associazione dei detentori di carri privati ha sviluppato le proprie linee guida che prevedono il controllo dell'assile mediante

diverse sonde angolate dalla superficie esterna dell'assile stesso [1]. Tale tecnica presenta due controindicazioni: la necessità di rimuovere parte della vernice e la necessità di smontare boccole e cuscinetti. In particolare, lo sviluppo di una nuova generazione di rivestimenti protettivi di tipo permanente [2] ne rende inopportuna la rimozione anche parziale per permettere il controllo UT.

Vale la pena ricordare che lo scopo del controllo in esercizio o durante gli interventi manutentivi è quello di individuare eventuali danneggiamenti, e conseguenti propagazioni di cricche fino a rottura, in seguito a fenomeni tipici, quali corrosione-fatica o impatti del ballast, secondo una logica "Damage Tolerant" [3]-[4]: il controllo deve quindi essere particolarmente efficace nelle sezioni dell'assile a maggior sollecitazione ed a maggior probabilità di danneggiamento. Con queste premesse, già dagli anni '70 grazie al lavoro delle Ferrovie dello Stato [5], in Italia è impiegata la tecnica della sonda rotante per il controllo di assili pieni.

Viene quindi qui descritta una evoluzione di tale tecnica CND ulteriormente sviluppata per l'ispezione periodica di sale montate di treni merci e basata su una nuova sonda rotante (Fig. 1a) prodotta da Gilardoni SpA secondo le specifiche di Lucchini RS SpA [6]. Tale sonda è configurata con trasduttori diversamente angolati (Fig. 1b) in grado di ispezionare le zone critiche degli assili (le transizioni geometriche e le parti più critiche dei calettamenti forzati). I limiti tradizionali di questa tecnica sono principalmente legati alla condizione superficiale delle teste dell'assile: in particolare, la marcatura di identificazione non deve essere troppo profonda per non influenzare la sensibilità del metodo e la presenza dei tre fori filettati (posizionati a 120° l'uno dall'altro) per l'applicazione del coperchio delle boccole mettono in ombra alcune porzioni longitudinali dell'assile. E' doveroso aggiungere che gli autori stanno validando l'impiego di ulteriori sonde in grado di ispezionare queste porzioni critiche di assile.

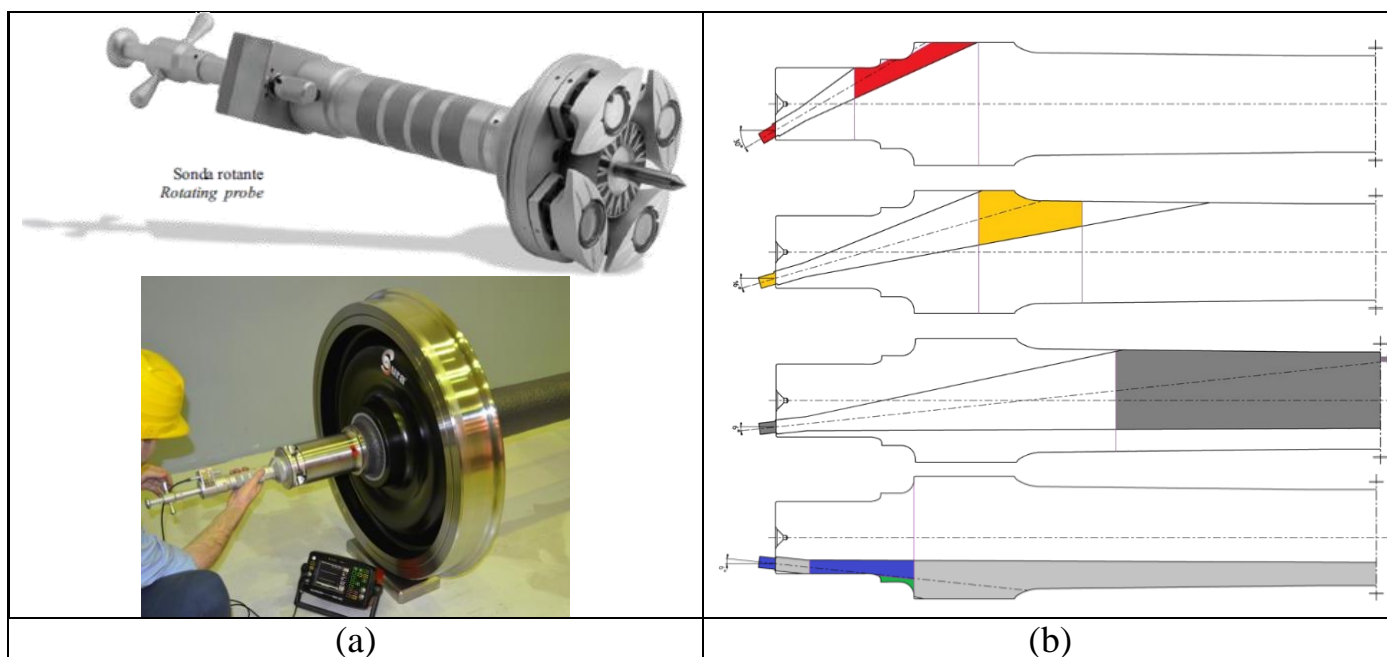


Figura 1 – La sonda rotante per l'ispezione ultrasonora di assili pieni.

L'integrità strutturale dell'assile in esercizio viene quindi garantita, insieme agli altri fattori in gioco caratterizzanti l'approccio Damage Tolerant [3]-[4], dalla derivazione affidabile delle curve "Probability of Detection" (POD) [7]-[9] della sonda rotante.

Tradizionalmente, tali probabilità di individuazione dei difetti sono espresse e diagrammate in funzione di una dimensione lineare caratteristica degli stessi (profondità, lunghezza, diametro, ...), ma, tuttavia, esse sono anche funzione di molti altri fattori fisici e operativi. Per questo motivo, molto raramente la curva POD determinata per una data procedura di ispezione può essere adottata per un'altra, anche se simile. Un altro aspetto critico risiede nel fatto che, per l'affidabilità e la progettazione, ciò che serve è una caratterizzazione statistica del difetto più grande che può non essere individuato e non il difetto più piccolo che può essere individuato. Per questa ragione, le curve POD vengono spesso fornite insieme alla banda di confidenza al 95% che, per essere determinata, richiede uno sforzo sperimentale considerevole.

Nel presente lavoro di ricerca, si esplora la possibilità di applicare, alla sonda rotante, l'approccio "Model-Assisted Probability of Detection" (MAPOD) [10]-[12], molto recente e basato sulla possibilità di poter sostituire parte delle evidenze sperimentali con i risultati di analisi numeriche, almeno per quei parametri chiave di cui è possibile definire un modello fisico descrittivo efficace. È importante infatti aggiungere che l'approccio MAPOD non permette di eliminare l'intera attività sperimentale necessaria alla derivazione di una curva POD perché non tutti i parametri rilevanti sono, ad oggi, descrivibili da modelli fisici noti.

Le simulazioni numeriche sono state qui eseguite mediante il software dedicato CIVA^{nde} 10.1a [13] e hanno mostrato ottime potenzialità e risultati nell'applicazione dell'approccio MAPOD alla descrizione delle performance della sonda rotante per assili ferroviari pieni.

2. ATTIVITÀ SPERIMENTALE

Per valutare le prestazioni della sonda rotante applicata ad assili per sale carro in acciaio EA1N, tre di essi sono stati preparati introducendo, in diverse sezioni (Fig. 2), una serie di difetti artificiali ottenuti per elettroerosione e caratterizzati da forma sia concava (rappresentante la cricca da fretting-fatica osservabile nelle sedi dei calettamenti forzati), sia convessa (rappresentante la cricca classica di fatica osservabile sul corpo e lungo le transizioni geometriche). In particolare, ogni sezione è stata caratterizzata da tre difetti di ugual forma, ma area riflettente differente, e angolarmente equispaziati di 120°.

Tutti i difetti sono stati ispezionati mediante la sonda rotante, collegata ad un rilevatore UT digitale Gilardoni RDG500, dotata di cristalli piezoelettrici di diametro 20 mm e frequenza nominale pari, in due distinte campagne di prova, sia a 4 MHz, sia a 2.25 MHz. Sono state impiegate onde longitudinali e la loro velocità è stata impostata a 5900 m/s. Le angolazioni scelte per l'ispezione delle differenti sezioni contenenti i difetti artificiali sono (Fig. 1b):

- onde longitudinali a 6° convergenti: Sez. B, Sez. E
- onde longitudinali a 16° convergenti: Sez. A, Sez. C
- onde longitudinali a 30° convergenti: Sez. D, Sez. F
- onde longitudinali a 6° divergenti: Sez. G, Sez. H

Per ogni difetto è stato registrato il livello di guadagno (dB) necessario a portare la risposta dello stesso ad un'ampiezza pari al 90% dello schermo. Figura 3a mostra, ad esempio, le risposte dei difetti posizionati nelle sezioni B ed E, che si trovano allo stesso tempo di volo (pari a 1190 mm) e contengono difetti della stessa geometria (convessa), ma

dimensioni differenti: è, quindi, possibile considerarle in un unico set di risposte ultrasonore. Figura 3b, invece, mostra l'esempio dei risultati ottenuti per la sezione G posta ad un tempo di volo pari a 155 mm e caratterizzata da difetti di forma concava. I diagrammi riportano la dimensione dei difetti in termini di area riflettente efficace [14].

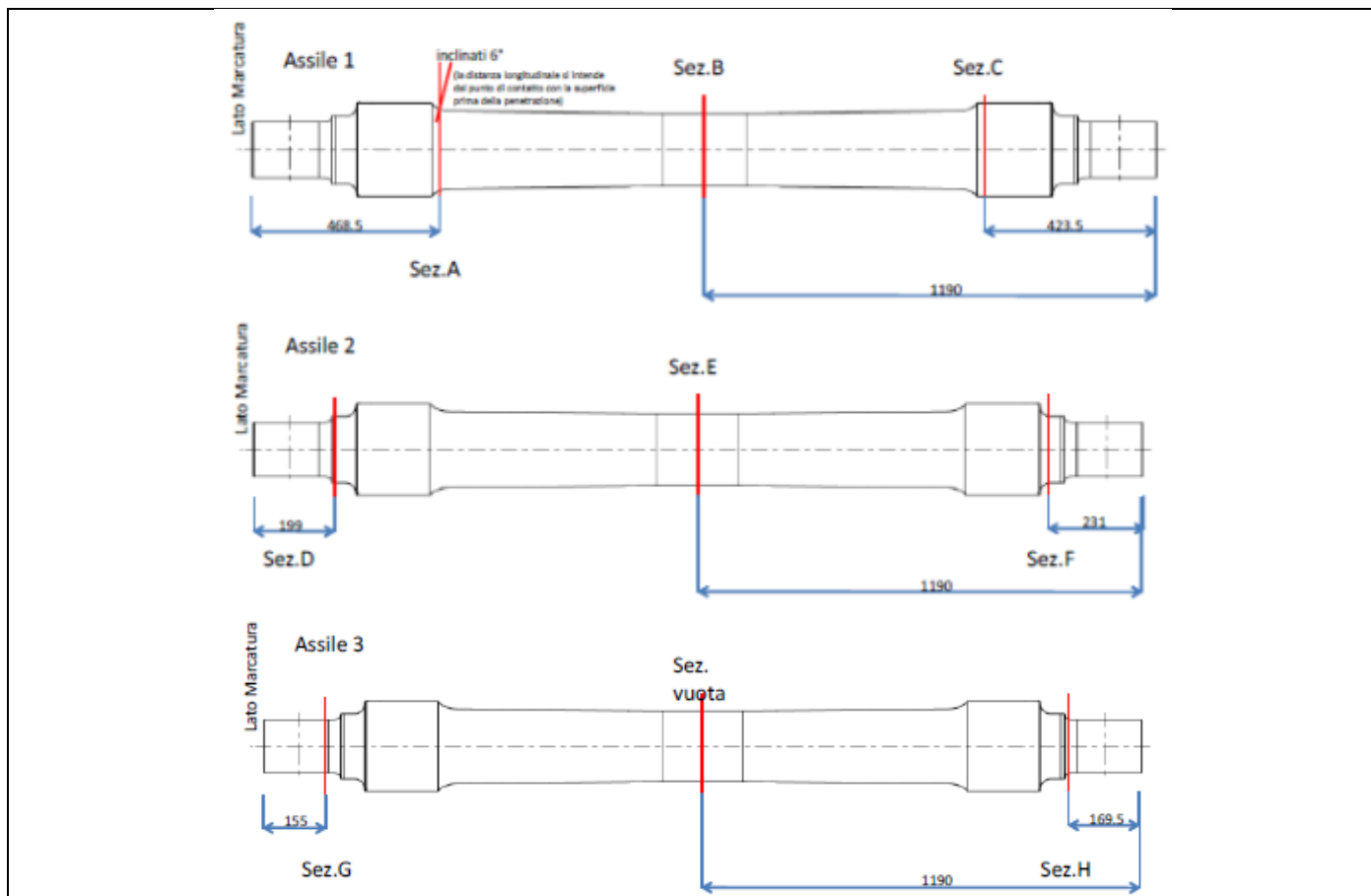


Figura 2 – Sezioni di introduzione dei difetti artificiali.

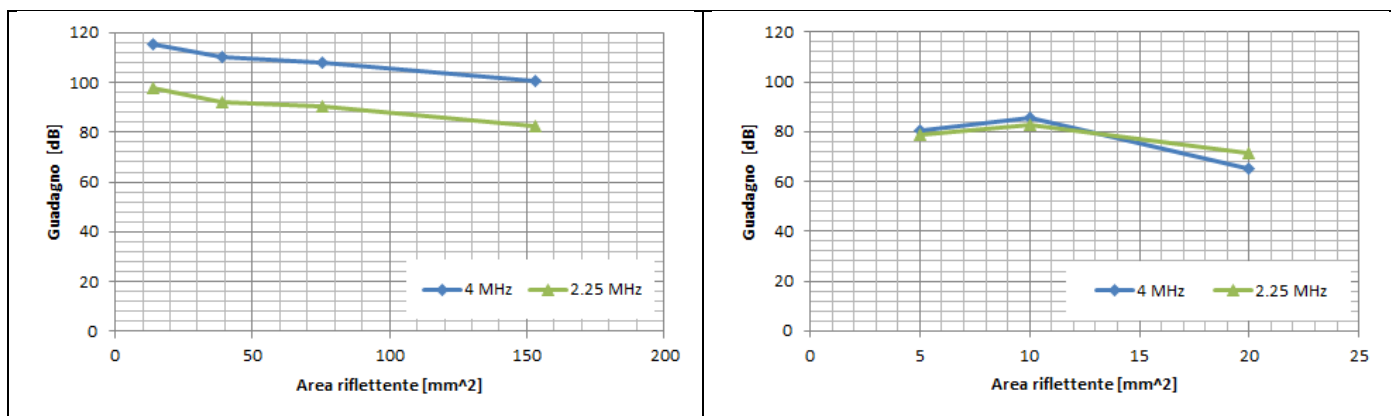


Figura 3 – Risposte ultrasonore dei difetti artificiali nelle sezioni B+E (a) e G (b).

Dall'osservazione di Figura 3a, è possibile osservare che la sonda da 2.25 MHz richiede livelli di energia sonora significativamente inferiori rispetto a quella da 4 MHz. Inoltre, dei sei difetti disponibili, i due più piccoli (area riflettente pari a 1.57 e 6.28 mm²) non sono stati individuati da nessuna delle due frequenze considerate. Considerando, invece, la Figura 3b, tutti i difetti disponibili sono stati individuati e il livello di energia per le due frequenze considerate sembra essere confrontabile. Generalizzando, Tabella 1 riassume

l'analisi della frequenza migliore di lavoro in funzione del tempo di volo e per tutte le sezioni contenenti difetti artificiali.

I risultati ottenuti permettono di proporre una versione della sonda rotante ottimizzata nel seguente modo:

1. l'ispezione del fusello e della sua transizione al collarino (ovvero fino a percorsi pari a 200 mm) dovrebbe essere eseguita mediante sonde a 4 MHz;
2. l'ispezione delle porzioni di assile a percorso maggiore di 200 mm dovrebbe essere eseguita mediante sonde a 2 o 2.25 MHz.

Tabella 1 – Prospetto dei risultati ottenuti dalle misure su assili pieni.

Sezione	Percorso [mm]	Frequenza migliore [MHz]
B + E	1190	2.25
C	423.5	2.25
F	231	2.25
G	155	Confrontabile
H	169.5	4

La validazione di questa conclusione derivante dalle evidenze sperimentali verrà, a questo punto, eseguita mediante l'approccio MAPOD e l'utilizzo di opportune simulazioni numeriche.

3. APPROCCIO MAPOD PER LA VALIDAZIONE DELLA SONDA ROTANTE

L'ottenimento dei risultati sperimentali precedentemente descritti ha richiesto un certo sforzo in termini di tempo e costi ed esso sarebbe stato ancora maggiore nel caso si avesse voluto caratterizzare completamente la curva POD della sonda rotante con la sua banda di confidenza. Come già detto nell'Introduzione, questo problema può, però, essere affrontato e parzialmente risolto mediante un approccio MAPOD. In particolare, esso si avvale del fatto che le curve POD si basano su distribuzioni statistiche che descrivono la risposta dei difetti, le quali, a loro volta, sono controllate da un certo numero di fattori collegati ai dettagli applicativi della procedura CND adottata. Ad oggi, gli effetti di molti di tali fattori possono essere simulati mediante opportuni modelli numerici perché è noto il modello fisico ad essi sottostante.

Nella presente ricerca, le simulazioni numeriche sono state eseguite mediante il software dedicato CIVA^{nde} 10.1a [13]. Il modello è stato calibrato simulando tutti i casi sperimentali disponibili. In particolare, le Figure 4a e 4b mostrano i modelli costruiti per le stesse sezioni di esempio già mostrate in Figura 3. Come si può osservare dalle Figure 4c e 4d, l'andamento dei risultati numerici segue ragionevolmente quello degli esperimenti, permettendo di ritenere calibrata la procedura numerica adottata.

I risultati numerici mostrati in Figura 4 non forniscono informazioni sulla variabilità intrinseca di quelli sperimentali perché essi sono stati ottenuti considerando condizioni "ideali". La conseguenza di ciò è che la banda di confidenza dei risultati numerici risulterà fittiziamente stretta e non rappresentativa di quella reale. Nella necessità di caratterizzare numericamente anche la confidenza delle curve POD, è necessario applicare l'approccio MAPOD "completo" [11] che suggerisce di modellare ogni sorgente di variabilità della

risposta CND, o almeno tutte quelle descrivibili da un modello fisico, mediante opportune distribuzioni statistiche.

La procedura numerica qui applicata è essenzialmente basata sul metodo Monte Carlo: prima di ogni lancio di una simulazione, un valore della sorgente (o delle sorgenti) di variabilità scelta viene estratto casualmente dall'opportuna distribuzione statistica e utilizzato per definire il set-up numerico. Alla fine di tutte le simulazioni programmate, i risultati dispersi ottenuti dovrebbero essere rappresentativi degli effetti della sorgente scelta di variabilità sui risultati stessi che possono, quindi, essere utilizzati per definire la curva POD con la sua confidenza.

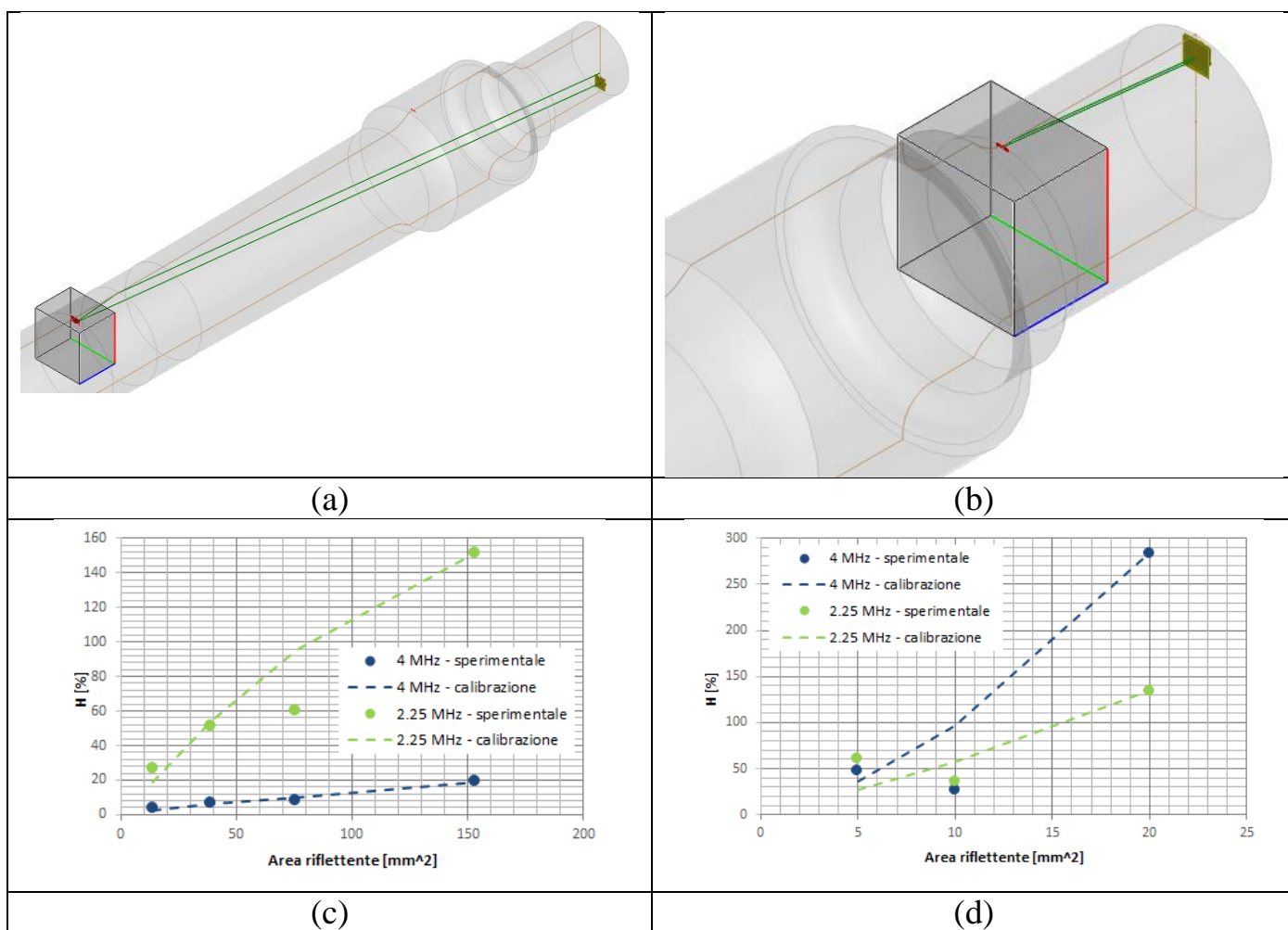


Figura 4 – Calibrazione del modello MAPOD: a) e c) sezione B+E; b) e d) sezione G.

Prima di procedere alla descrizione delle simulazioni numeriche eseguite e dei risultati ottenuti, è necessario analizzare alcune peculiarità della sonda rotante. Essa consiste in un sistema complesso studiato per ispezionare un oggetto anch'esso complesso, ma non è possibile né sensato definirne un'unica curva POD. Questo perché la sonda rotante è studiata per permettere, ad ogni trasduttore che la costituisce, di ispezionare una zona dell'assile differente dalle altre e, quindi, ogni zona critica può essere osservata da uno solo dei trasduttori disponibili. Si può concludere che la caratterizzazione dell'affidabilità della sonda rotante consiste nella collezione delle curve POD relative a ogni trasduttore montato in essa, e facenti riferimento ad una specifica porzione superficiale dell'assile. Per semplicità di trattazione, si analizzeranno qui, senza comunque perdere generalità nella

descrizione del metodo, le prestazioni delle sole due sezioni (B+E e G) già considerate nelle Figure 3 e 4.

Figura 5 mostra i risultati ottenuti per le due sezioni considerate. In entrambi i casi, è stata considerata, per semplicità di trattazione, una sola sorgente di variabilità: la posizione, lungo la coordinata longitudinale dell'assile, dell'eventuale difetto all'interno della zona di azione della sonda corrispondente (si faccia riferimento a Figura 1b per l'indicazione schematica delle zone di azione). Inoltre, per entrambi gli scenari, tale posizione è stata caratterizzata da una distribuzione statistica uniforme.

Ciò è possibile in forza alle seguenti considerazioni:

- nel caso della sezione B+E (Fig. 5a), la nucleazione di cricche di fatica avviene in corrispondenza di danneggiamenti da servizio quali pit di corrosione o impatti da ballast, per i quali non è possibile prevedere la posizione di accadimento e, quindi, tutte le sezioni attive dell'assile vanno assunte con la stessa probabilità di danneggiamento;
- nel caso della sezione G (Fig. 5b), l'eventuale danneggiamento si manifesta in termini di fretting-fatica sul fusello ad una distanza massima di 20 mm dal bordo raccordo collare e, quindi anche in questo caso, non è possibile prevedere una sezione preferenziale, ma tutte quelle all'interno dei 20 mm avranno stessa probabilità di veder nascere un difetto.

Va inoltre considerato che, per gli assili di nuova progettazione:

- il fenomeno di fretting-fatica nella portata di caletto ruota risulta molto limitato e confinato nei primi 15 mm dal raccordo corpo/portata: quindi non è necessario, ai fini del controllo periodico, ispezionare l'intera portata (che sarà oggetto di controllo MT in sede di grande manutenzione e sostituzione ruota).

A questo punto, per ognuna delle dimensioni di difetto artificiale presenti nelle due sezioni e per i due valori considerati di frequenza di lavoro (2.25 e 4 MHz), sono stati estratti trenta valori della sorgente stocastica ed eseguite altrettante simulazioni, per un totale di 240 simulazioni per la sezione B+E (Fig. 5c e 5e) e 180 per la sezione G (Fig. 5d e 5f). La scelta di trenta estrazioni per ogni scenario discende dalla teoria statistica che richiede un minimo di 29 risultanze per la definizione della banda di confidenza al 95%. I risultati ottenuti possono quindi essere utilizzati per derivare le curve POD delle sonde considerate, ricordando che il metodo può anche essere facilmente generalizzato per tenere conto di più sorgenti di variabilità caratteristiche della procedura di ispezione adottata.

4. DERIVAZIONE DELLE CURVE POD

I dati "signal response" mostrati in Figura 5 (anche chiamati " \hat{A} vs. A", dove \hat{A} è la risposta ottenuta dal difetto avente area riflettente pari ad A [8]) sono stati interpretati matematicamente [7] mediante una distribuzione Normale descritta, in un diagramma bi-logaritmico, dall'andamento della media $\mu_{\log_{10}(\hat{A})}$ lineare con la dimensione del difetto e dalla deviazione standard $\sigma_{\log_{10}(\hat{A})}$ costante:

$$\begin{cases} \mu_{\log_{10}(\hat{A})} = \beta_0 + \beta_1 \cdot \log_{10}(A) \\ \sigma_{\log_{10}(\hat{A})} = \beta_2 \end{cases} \quad (1)$$

dove i parametri empirici β_0 , β_1 e β_2 sono stati stimati dai dati descritti precedentemente mediante il Metodo della Massima Verosimiglianza.

In generale, considerando dati “signal response”, un difetto è considerato individuato se \hat{A} eccede una qualche soglia predefinita (ad esempio dalla taratura della strumentazione) di decisione \hat{A}_{th} corrispondente alla risposta del difetto che si vuole individuare col 50% delle probabilità [7]-[9]. La curva POD può quindi essere costruita calcolando, per ogni dimensione di interesse per il difetto, la probabilità che esso risponda con un’energia superiore alla soglia scelta [7]:

$$POD(A) = \Pr \left[\log_{10}(\hat{A}) > \log_{10}(\hat{A}_{th}) \right] \quad (2)$$

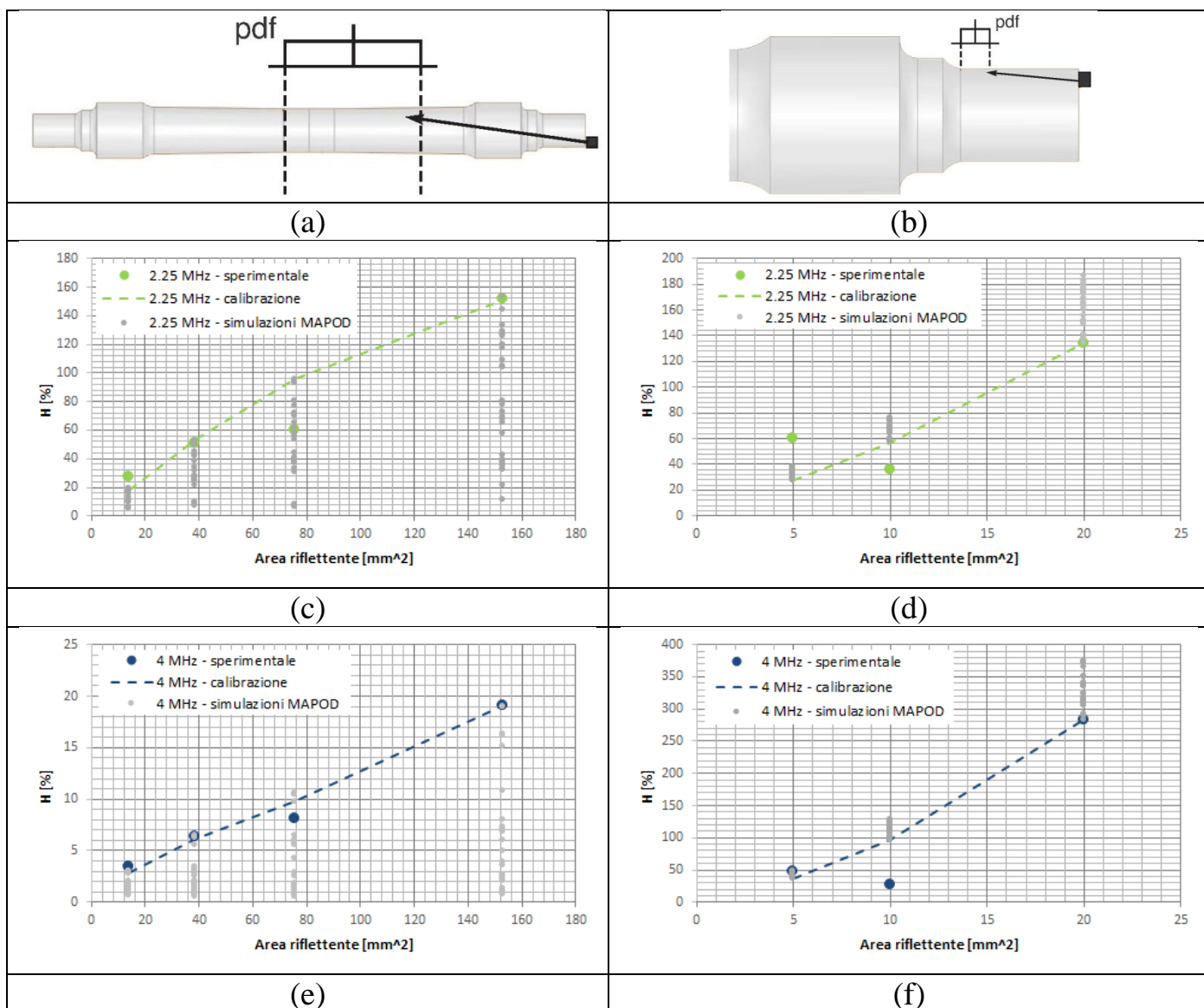


Figura 5 – Simulazioni MAPOD: a), c) e e) sezione B+E; b), d) e f) sezione G.

che può essere riscritta come:

$$POD(A) = 1 - F \left\{ \frac{\log_{10}(\hat{A}_{th}) - [\beta_0 + \beta_1 \cdot \log_{10}(A)]}{\beta_2} \right\} = F \left\{ \frac{\log_{10}(A) - \left[\frac{\log_{10}(\hat{A}_{th}) - \beta_0}{\beta_1} \right]}{\frac{\beta_2}{\beta_1}} \right\} \quad (3)$$

L'Eq. (3) rappresenta la funzione di probabilità cumulata della distribuzione Log-Normale caratterizzata da media μ e deviazione standard σ pari a:

$$\mu = \frac{\log_{10}(\hat{a}_{th}) - \beta_0}{\beta_1} \quad \sigma = \frac{\beta_2}{\beta_1} \quad (4)$$

dove i parametri β sono quelli già utilizzati nell'Eq. (1).

La scelta della soglia di decisione è quindi uno dei punti critici nella definizione delle curve POD e dovrebbe essere sempre legata alla procedura di calibrazione della strumentazione. In questo lavoro, essa è stata assunta pari al valore della risposta UT ottenuta, mediante la simulazione CIVA^{nde} degli scenari riguardanti le sezioni B+E e G e le frequenze di lavoro 4 e 2.25 MHz, dal difetto campione definito nella procedura Lucchini RS [6]. Figura 6 mostra un'analisi dell'effetto della soglia di decisione sulle curve POD ottenute partendo dai dati sperimentali mostrati in Figura 4. Non sono riportate le bande di confidenza data l'esigua numerosità del campione che non ne permette una determinazione statisticamente rigorosa.

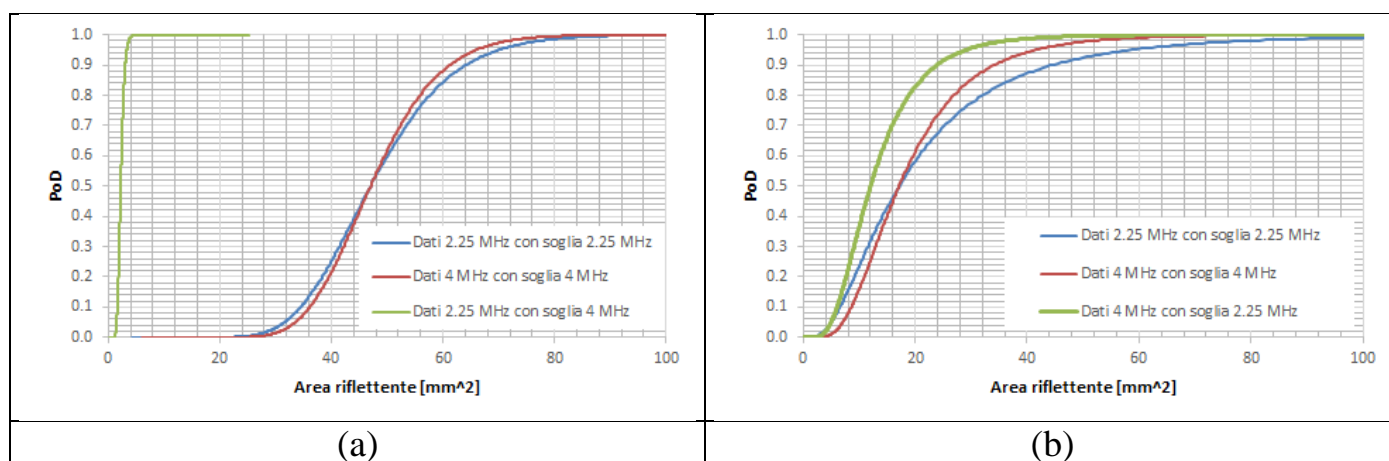


Figura 6 – Analisi dell'influenza della soglia di decisione per le sezioni B+E (a) e G (b).

Come si può osservare per entrambe le sezioni considerate, la definizione della curva POD risulta equivalente quando un set di dati viene elaborato mediante la soglia di decisione (ovvero la corretta calibrazione) ad esso relativa. Ciò è evidente, ad esempio, osservando le Figure 4c e 6a: dalla prima si evince che l'energia ottenuta dai difetti artificiali posizionati nella sezione B+E, con la sonda da 2.25 MHz, è significativamente maggiore, a pari tutto il resto, rispetto a quella ottenuta dalla sonda a 4 MHz. Questa informazione viene persa nella costruzione delle curve POD, visto che esse risultano (Fig. 6a), se calibrate opportunamente, di fatto equivalenti per i due valori di frequenza. Lo stesso fenomeno può essere osservato per la sezione G (Fig. 4d e 6b) anche se il ruolo del valore della frequenza di lavoro si inverte. Non è, quindi, vantaggioso tralasciare l'analisi, insieme alle curve POD, dei diagrammi come quelli di Figura 4, perché è noto che a risposte di maggiore ampiezza a pari condizioni corrispondono, solitamente, segnali e rapporti segnale-rumore più elevati. Volendo, poi, osservare l'influenza del contenuto energetico tramite le curve POD, è necessario attuare una metodologia (non consigliabile e non applicata nella pratica industriale) basata sull'utilizzo della stessa soglia di decisione per tutti i set di dati disponibili, in modo da renderli coerenti tra loro. In particolare, la

soglia di decisione corretta sarà quella relativa al set di minore energia, ma ciò corrisponderebbe ad una calibrazione della strumentazione basata su un difetto campione differente da quello ottimo e, tipicamente, troppo conservativo. Figura 6 mostra, comunque, anche questa analisi, la quale porta alle stesse conclusioni già viste in precedenza: per lunghi percorsi, la sonda da 2.25 MHz sembra migliore, mentre, per percorsi corti, a sembrare migliore è la sonda da 4 MHz.

Considerando, ora, i risultati numerici MAPOD di Figura 5, le relative curve POD sono confrontate con le corrispondenti sperimentali in Figura 7. Le differenze evidenti tra le curve numeriche e quelle sperimentali nascono dalla diversa numerosità dei set di dati, però è anche facile notare come tutte le curve, a pari sezione considerata, passino, in corrispondenza di una probabilità di rilevazione pari al 50%, per lo stesso punto, corrispondente alla soglia di decisione definita sulla risposta UT del difetto di calibrazione.

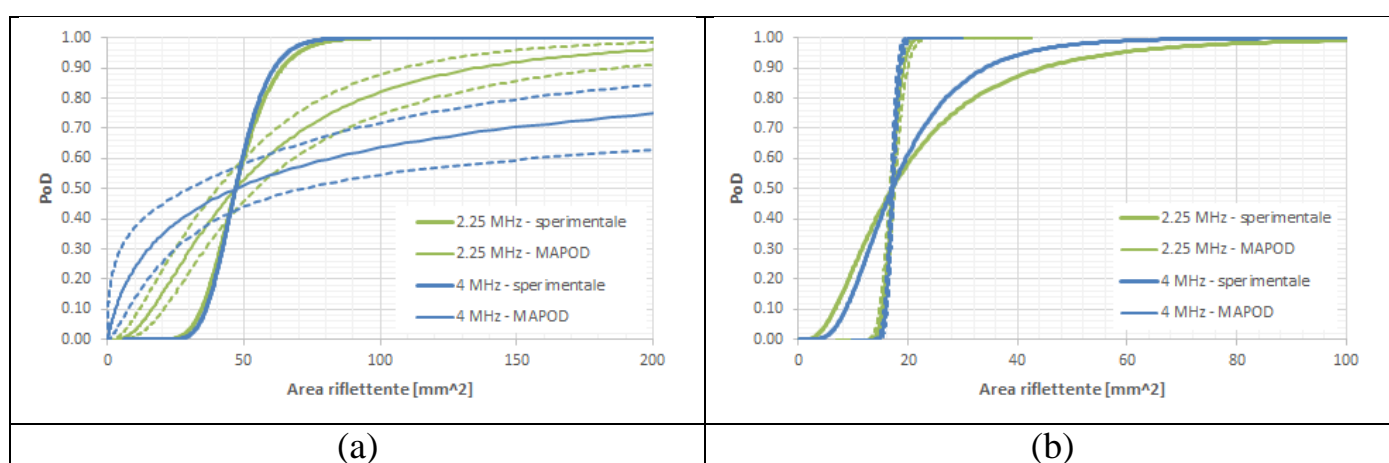


Figura 7 – Analisi dei dati MAPOD per le sezioni B+E (a) e G (b).

Tenendo numericamente conto della variabilità statistica sulla procedura di controllo, almeno per quanto riguarda uno dei possibili fattori influenzanti, si può notare che, in certi casi, essa produce curve POD di prestazione migliore rispetto al caso sperimentale ottenuto da un numero esiguo di dati (Fig. 7b), in altri casi peggiore (Fig. 7a). Ciò suggerisce che tale variabilità statistica sia effettivamente in grado di influenzare in modo significativo le prestazioni della procedura di controllo. D'altronde, tale conclusione si sarebbe potuta trarre anche dall'osservazione di Figura 5, dove le risposte sperimentali sembrano posizionarsi al limite superiore di quelle numeriche per il caso della sezione B+E e al limite inferiore per la sezione G. Questa informazione potrebbe essere utilizzata per un'ulteriore ottimizzazione del difetto campione e del suo posizionamento nel blocco di riferimento.

5. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Nella presente ricerca, sono state analizzate le prestazioni della sonda rotante applicata ad una geometria particolare di assili pieni in EA1N contenenti differenti tipologie, dimensioni e posizioni di difetti artificiali ottenuti per elettroerosione. I risultati ottenuti mostrano che:

- la frequenza ottima di ispezione dipende dal percorso ultrasonoro: difetti vicini sembrano essere meglio rilevati da sonde da 4 MHz, mentre difetti lontani da sonde da 2.25 MHz;

- la soglia di decisione per le definizioni delle curve POD è un parametro critico e andrebbe calibrata contestualmente alla definizione del blocco di riferimento;
- tenendo numericamente conto della variabilità statistica sulla procedura di controllo, si è osservata una descrizione delle prestazioni della sonda rotante significativamente differente da quella ottenuta da pochi valori sperimentali. Ulteriori approfondimenti su un campione statisticamente più numeroso sono ora in corso nell'ambito del prosieguo del progetto.

RINGRAZIAMENTI

Gli autori desiderano ringraziare Marco Sarti (Trenitalia) per aver reso disponibile il riferimento bibliografico [5] e per gli stimolanti spunti di discussione.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] VPI, VPI 04 – Manutenzione di carri merci – Sale montate, 2° edizione, 1° modifica, valida dal 01/08/2008.
- [2] S. Cervello, D. Sala, LURSAK: Development of Innovative anti impact coating return from experience, Proc. 17th International Wheelset Congress, Kiev, 2013.
- [3] S. Cantini, S. Beretta (Editors), Structural reliability assessment of railway axles, LRS-Techno Series 4, 2011.
- [4] Grandt AF Jr. Fundamentals of structural integrity. John Wiley & Sons Inc., Hoboken, 2003.
- [5] G. Pettinato, Il controllo ad ultrasuoni semiautomatico degli assi delle sale montate dei veicoli ferroviari in opera o fuori opera, La Metallurgia Italiana 8, 1971.
- [6] F. Benzoni, S. Cantini, L. Tonelli, Istruzione Tecnica QUA IT 142 Rev.1. 2013, Lucchini RS S.p.A., Lovere (BG).
- [7] Georgiou GA. Probability of Detection (POD) curves: derivation, applications and limitations. Research Report 454, HSE Books, Health and Safety, Executive, UK, 2006.
- [8] ASM. ASM handbook – Vol. 17: Non-destructive evaluation and quality control. 1997.
- [9] MIL-HDBK-1823A. Nondestructive evaluation system reliability assessment. Department of Defense of the US, 2009.
- [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', Proc. 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] CEDRAT, CIVA^{nde} 10.1a User's Manual, 2013.
- [14] Carboni M. (2012), A critical analysis of ultrasonic echoes coming from natural and artificial flaws and its implications in the derivation of probability of detection curves, Insight 54, 208-216.