

# PROBABILITÀ DI RILEVAZIONE DI DIFETTI IN ASSILI CAVI MEDIANTE BOROSONDA

M. CARBONI<sup>1</sup>, S. BERETTA<sup>2</sup>, S. CANTINI<sup>3</sup>, C. GILARDONI<sup>4</sup>

<sup>1,2</sup> Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Milano, Via La Masa 1, 20156 Milano

<sup>3</sup> Lucchini RS SpA, Via G. Paglia 45, 24065 Lovere (BG)

<sup>4</sup> Gilardoni SpA, Via A. Gilardoni 1, 23826 Mandello del Lario (LC)

<sup>1</sup> Tel.: 02-23998253, Fax: 02-23998202, michele.carboni@polimi.it

<sup>2</sup> Tel.: 02-23998246, Fax: 02-23998202, stefano.beretta@polimi.it

<sup>3</sup> Tel.: 035-963111, Fax: 035-963324, s.cantini@lucchinirs.it

<sup>4</sup> Tel.: 0341-705111, Fax: 0341-735046, gx@gilardoni.it

## SOMMARIO

Gli assili cavi, nati negli anni '70 per applicazioni ferroviarie ad alta velocità su treni tiltanti, trovano oggi sempre maggiori applicazioni anche su veicoli metropolitani ed intercity. Infatti, al vantaggio dato dalla riduzione delle masse non sospese che ha guidato inizialmente lo sviluppo di questi componenti, si somma quello di un controllo dalla superficie interna che ora può offrire una sensibilità ed affidabilità superiori rispetto alle tecniche convenzionali. Il controllo dell'assile cavo viene eseguito, infatti, mediante metodo UT e tecnica detta "borosonda" che consta in una sonda multi-cristallo roto-traslante all'interno del foro barenato. Una serie di trasduttori, diversamente angolati, ispeziona l'intera superficie esterna dell'assile allo scopo di individuare cricche e difetti. L'integrità strutturale viene quindi garantita, insieme agli altri fattori in gioco, dalla derivazione affidabile delle curve "Probability of Detection" della borosonda che costituiscono un dato di input fondamentale nella definizione della frequenza di controllo (intervalli di ispezione). Allo scopo di derivare tali curve POD, basandosi su un campione statistico significativo di misure sperimentali, si è costruito un lotto unico nel suo genere di assili contenenti cricche a fatica naturali; dieci assili cavi sono stati infatti sollecitati a fatica in modo da generare due cricche di fatica in ognuno di essi. In aggiunta, su un assile sono stati introdotti, mediante elettroerosione, difetti artificiali la cui morfologia ricalca quella dei danneggiamenti tipici da esercizio. In questo modo è stato definito un insieme di 28 difetti caratterizzato da un'escursione di profondità da 0.4 a 12 mm. L'ispezione con metodo UT di tale insieme di difetti, avvalendosi della tecnica boro sonica, ha permesso il confronto di differenti procedure d'esame attraverso il confronto delle curve POD caratteristiche. La fase finale dello studio è consistita nell'ottimizzazione della procedura d'esame stessa grazie a simulazioni numeriche dedicate.

## 1. INTRODUZIONE

Gli assili cavi, tipicamente utilizzati in applicazioni ferroviarie ad alta velocità, vengono ispezionati, nelle ultime fasi di produzione e durante il servizio, con metodo ultrasonoro e

tecnica che prevede l'impiego di una borosonda roto-traslante lungo il foro barenò. Concentrandosi qui sulle ispezioni durante il servizio, lo scopo è quello di individuare eventuali danneggiamenti, e conseguenti eventuali propagazioni di cricche fino a rottura, in seguito a fenomeni tipici, quali corrosione-fatica o impatti del ballast, secondo una logica "Damage Tolerant" **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.-Errore. L'origine riferimento non è stata trovata..** Da questo punto di vista, la borosonda utilizzata nel presente lavoro di ricerca (prodotta da Gilardoni SpA secondo le specifiche di Lucchini RS SpA [3]) è composta da una serie di trasduttori piezoelettrici, diversamente angolati, in grado di ispezionare l'intera superficie esterna dell'assile. L'integrità strutturale dell'assile in esercizio viene quindi garantita, insieme agli altri fattori in gioco caratterizzanti l'approccio Damage Tolerant **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.-Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.,** dalla derivazione affidabile delle curve "Probability of Detection" (POD) [4]-[6] della borosonda.

Da questo punto di vista, è anche importante isolare la performance assoluta della strumentazione dalla sua applicazione a differenti procedure di controllo e, soprattutto, dalle operazioni di taratura e calibrazione in esse contenute.

Allo scopo di derivare tali curve, per la borosonda considerata e sulla base di un campione statistico significativo, dieci assili cavi full-scale prodotti in acciaio 30NiCrMoV12 secondo UNI 6787 sono stati sollecitati a fatica in modo da generare due cricche naturali in ognuno di essi e su uno sono stati ulteriormente introdotti difetti artificiali mediante elettroerosione.

La disponibilità di cricche propagate naturalmente sotto carichi alternati al banco prova, costituisce una peculiarità della ricerca qui presentata: essendo il fascio ultrasonoro riflesso funzione diretta della superficie riflettente, si può immediatamente constatare la differenza tra una superficie ottenuta artificialmente (Es. intaglio mediante asportazione di materiale) e la tipica superficie frastagliata creatasi dal lento propagare di una cricca a fatica (Linee di spiaggia). In quest'ultimo caso l'energia riflessa può risultare inferiore rispetto all'intaglio artificiale, con conseguenti rischi di sottostimare l'entità del fenomeno a fatica rilevato.

Tale popolazione statistica di difetti naturali in assili è, attualmente, unica nel suo genere e permette di:

- consolidare le curve POD relative alle istruzioni tecniche di controllo attualmente prescritte per i controlli in esercizio, permettendo anche una migliore stima degli intervalli di ispezione;
- validare nuove istruzioni tecniche di controllo;
- caratterizzare le strumentazioni nuove e/o esistenti (anche conto terzi);
- verificare periodicamente le performance delle apparecchiature di ispezione.

Soffermandoci, in questa memoria, sul solo primo punto, l'ispezione di tale insieme di difetti, mediante la borosonda considerata, ha permesso il confronto di differenti curve POD sulla base di diverse procedure di taratura. La fase finale dello studio è poi consistita nell'ottimizzazione della borosonda stessa grazie a simulazioni numeriche dedicate eseguite mediante il software CIVA<sup>nde</sup> [7].

## **2. REALIZZAZIONE DI UN SET DI ASSILI CAVI FULL-SCALE CRICCATI**

Innanzitutto, è stato deciso di generare le cricche di fatica negli assili, mediante il banco BDA disponibile al Dipartimento di Meccanica del Politecnico di Milano, nella locazione

più pericolosa della transizione tra corpo e portata ruota (Sez. “T” della EN13261 [8]), dove la sovrasollecitazione degli sforzi  $K_t$  vale approssimativamente 1.2 ed i momenti flettenti di esercizio sono prossimi al valore massimo.

Dieci assili cavi in 30NiCrMoV12 sono stati, quindi, criccati a fatica mediante l’applicazione di un carico di flessione rotante ad ampiezza costante. Allo scopo di ottenere due cricche di fatica per ogni assile nelle sezioni critiche, entrambe le transizioni “T” di ogni assile sono state preparate introducendo opportuni intagli artificiali inclinati (circa  $5^\circ$ ) in modo da essere perpendicolari alla superficie esterna dell’assile stesso nella sezione di interesse: gli intagli artificiali, di dimensioni pari a centinaia di micron, fungono esclusivamente da sito preferenziale d’innescò della cricca a fatica. In particolare, i primi tre assili sono stati preparati mediante combinazioni di micro-fori artificiali (Fig. 1a) rappresentanti possibili crateri di corrosione, mentre i rimanenti mediante elettroerosione (Fig. 1b) e di forma semi-circolare in modo da rappresentare possibili impatti da ballast o graffi da movimentazione. Infine, al termine del processo di criccatura, nel primo assile sono stati introdotti undici difetti artificiali di elettroerosione caratterizzati da morfologia (concavi e convessi), dimensioni e posizione differenti in modo da arricchire il set di difetti a disposizione per la caratterizzazione delle prestazioni della borosonda.

Al termine della campagna di prova, i difetti disponibili sono risultati 20 (caratterizzati da un’escursione di profondità da 0.4 a 12 mm), ovvero 17 cricche naturali e 3 difetti artificiali nella transizione T, a cui si sommano 4 difetti posizionati ad un tempo di volo differente (sulla portata) e 4 inclinati diversamente (sul corpo).

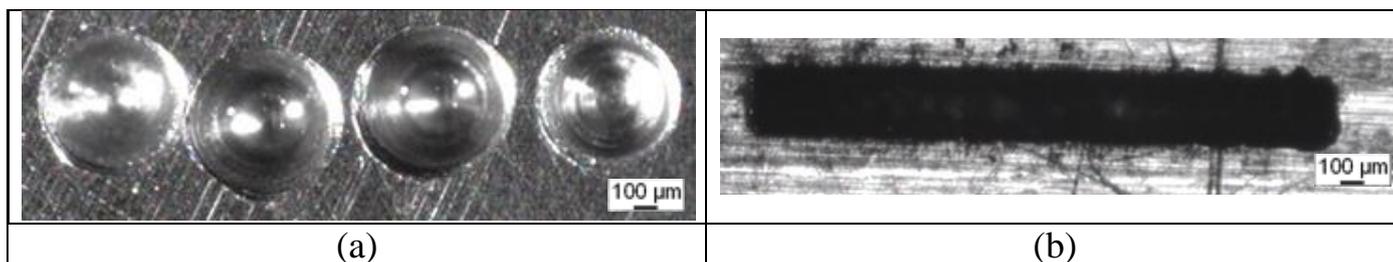


Figura 1 – Esempi di intagli artificiali adottati per la criccatura degli assili.

### 3. CARATTERIZZAZIONE DELLA CURVA POD PER ASSILI BARENATI IN 30NiCrMoV12

Gli assili criccati sono stati ispezionati considerando le sonde a  $45^\circ$  e a  $38^\circ$  (in entrambi i casi orientate sia nel verso d’esame ovvero “avanti” sia nel verso opposto, ovvero “indietro”, si veda la Figura 2a) tarate mediante il blocco campione descritto in [3] e caratterizzato da difetti concavi di dimensioni 16x1 mm. Le risposte delle cricche naturali sono state acquisite in ottica “signal response” [4]-[6], ovvero ogni difetto è stato ispezionato manualmente ricercando la posizione in grado di massimizzare la risposta all’80% dello schermo. Inoltre, la borosonda è stata introdotta, in ogni assile criccato, da entrambe le estremità in modo da ispezionare ogni difetto disponibile da entrambi i lati, approfondendone l’aspetto di inclinazione rispetto alla sezione circonferenziale dell’assile. Infatti, essendo i difetti inclinati rispetto alla verticale e dipendentemente dall’angolazione della sonda considerata, il singolo difetto è, quindi, orientato, alternativamente, in condizione di ispezione “favorevole” o “sfavorevole” (Fig. 2b). La definizione di “favorevole” o “sfavorevole” nasce dall’osservazione che l’inclinazione relativa tra sonda e difetto in certi casi aumenta l’area riflettente del difetto stesso, in altri la diminuisce. E’

intuitivo osservare che una sonda in condizione “favorevole” entrando da uno dei lati dell’assile diventa “sfavorevole” entrando dall’altro, rendendo così conveniente ispezionare le transizioni “T” da entrambi i lati.

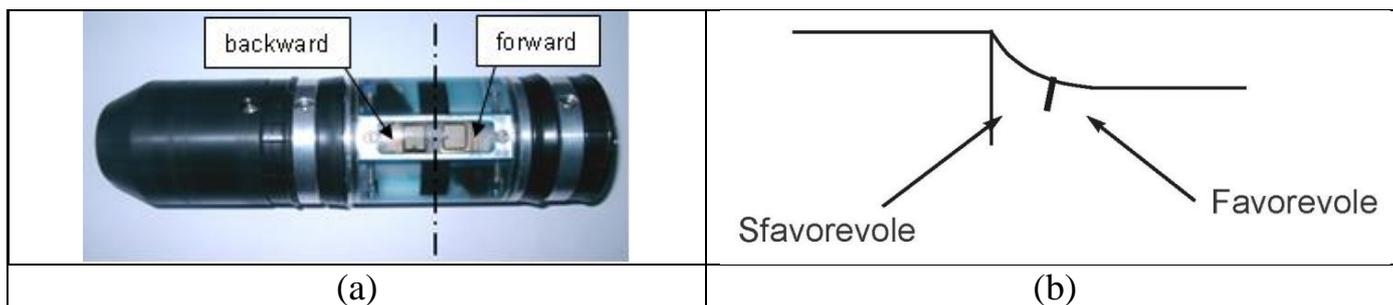


Figura 2 – Possibili approcci della borosonda ai difetti inclinati posti nella transizione T.

E’ necessario aggiungere che i risultati verranno qui mostrati ed interpretati considerando l’approccio innovativo basato sull’area del difetto realmente investita dal fascio ultrasonoro. **Errore. L’origine riferimento non è stata trovata..** Le curve POD sono state quindi determinate applicando l’approccio statistico descritto in [4]-[6] tenendo conto che, per l’analisi, è più semplice e comodo utilizzare dati caratterizzati da un trend matematico crescente e quindi le letture della borosonda (in dB) sono state trasformate in ampiezza dell’eco sullo schermo. Il termine di riferimento per questa trasformazione è stato assunto corrispondente al valore di risposta del difetto di taratura (concavo 16x1 mm).

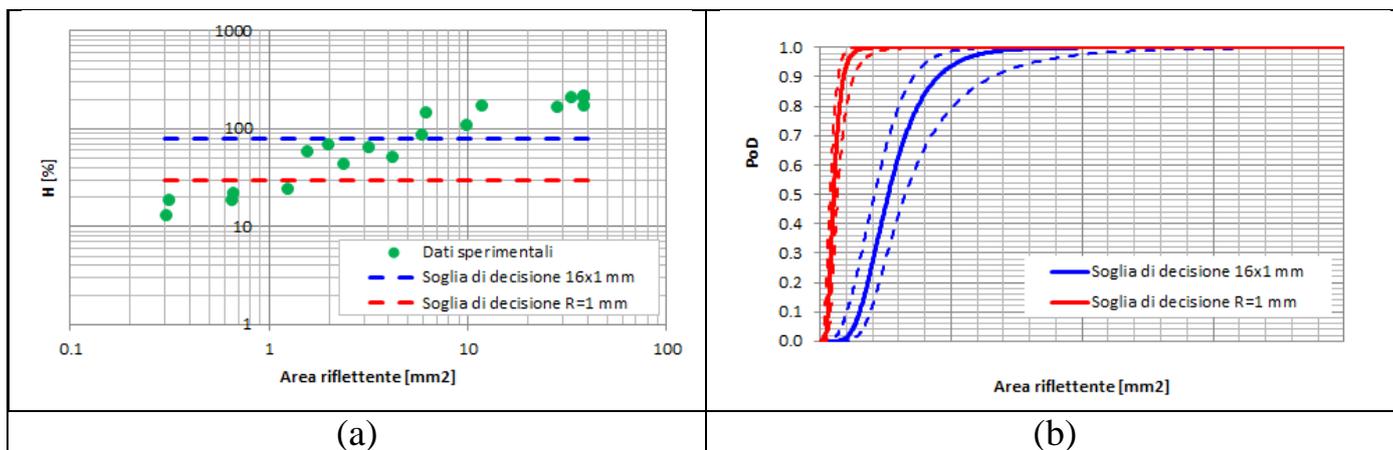


Figura 3 – Curve POD del sistema borosonda applicato manualmente alla transizione T.

Essendo la borosonda un sistema complesso formato da differenti trasduttori, i dati necessari per la definizione della sua curva POD sono stati definiti raccogliendo la risposta migliore ottenuta dalle quattro sonde per ogni difetto ispezionato (Fig. 3a). La Figura 3b mostra le curve POD ottenute e i relativi intervalli di confidenza al 95%. E’ importante notare che sono state applicate due differenti soglie di decisione (ovvero il livello di risposta del difetto che si vuole poter individuare al 50%, [4]-[6]) per la derivazione delle curve POD: il difetto di taratura 16x1 mm (rappresentativo della performance della borosonda applicata secondo la procedura Lucchini RS SpA [3]) ed il difetto semicircolare avente raggio pari a 1 mm (rappresentativo della performance assoluta della borosonda come strumento a sé stante). Questi due scenari mostrano le attuali prestazioni della borosonda (difetto 16x1 mm) e quanto si potrebbe spingere (difetto R=1 mm), agendo sul difetto di taratura, sulle stesse per individuare difetti, negli assili, sempre più piccoli.

Bisogna però evidenziare che la taratura del controllo in esercizio non può prescindere dalle specifiche di fabbricazione del componente ed, in particolare, dall'accettabilità del controllo volumetrico in produzione. Salvo casi particolari, non avrebbe, infatti, alcun senso, effettuare un controllo in esercizio con accettabilità più restrittiva rispetto al controllo richiesto nelle specifiche di fornitura.

La figura 3b mostra quindi sia le performance “pure” della borosonda, con taratura spinta oltre le specifiche di fabbricazione della maggior parte degli assili (taratura  $R=1$ ), sia le performance di una taratura allineata al reale grado di fabbricazione del pezzo e quindi in grado di effettuare ripetuti controlli in esercizio limitando la rilevazione di indicazioni accettabili e/o false indicazioni.

#### 4. COLLOCAZIONE DELLE CURVE POD OTTENUTE IN RIFERIMENTO ALLO STATO DELL'ARTE

Allo scopo di verificare la performance delle curve POD appena derivate, un confronto con lo stato dell'arte (rappresentato dalle curve POD di Benyon & Watson [10]) è mostrato in Figura 4a. In particolare, per effettuare tale confronto, le curve POD di Figura 3 in termini di area riflettente sono state trasformate in termini della profondità di una cricca di forma semi-circolare. E' necessario aggiungere che diversi dettagli alla base della derivazione sperimentale delle curve di Benyon & Watson non sono pubblicamente noti e che esse sono solo indicative in quanto relative ad assili pieni. Si può, comunque, concludere che le curve POD qui ottenute considerando due diversi difetti di taratura sono sistematicamente migliori di un'ispezione “far end scan” e comparabili con quella “near end scan”.

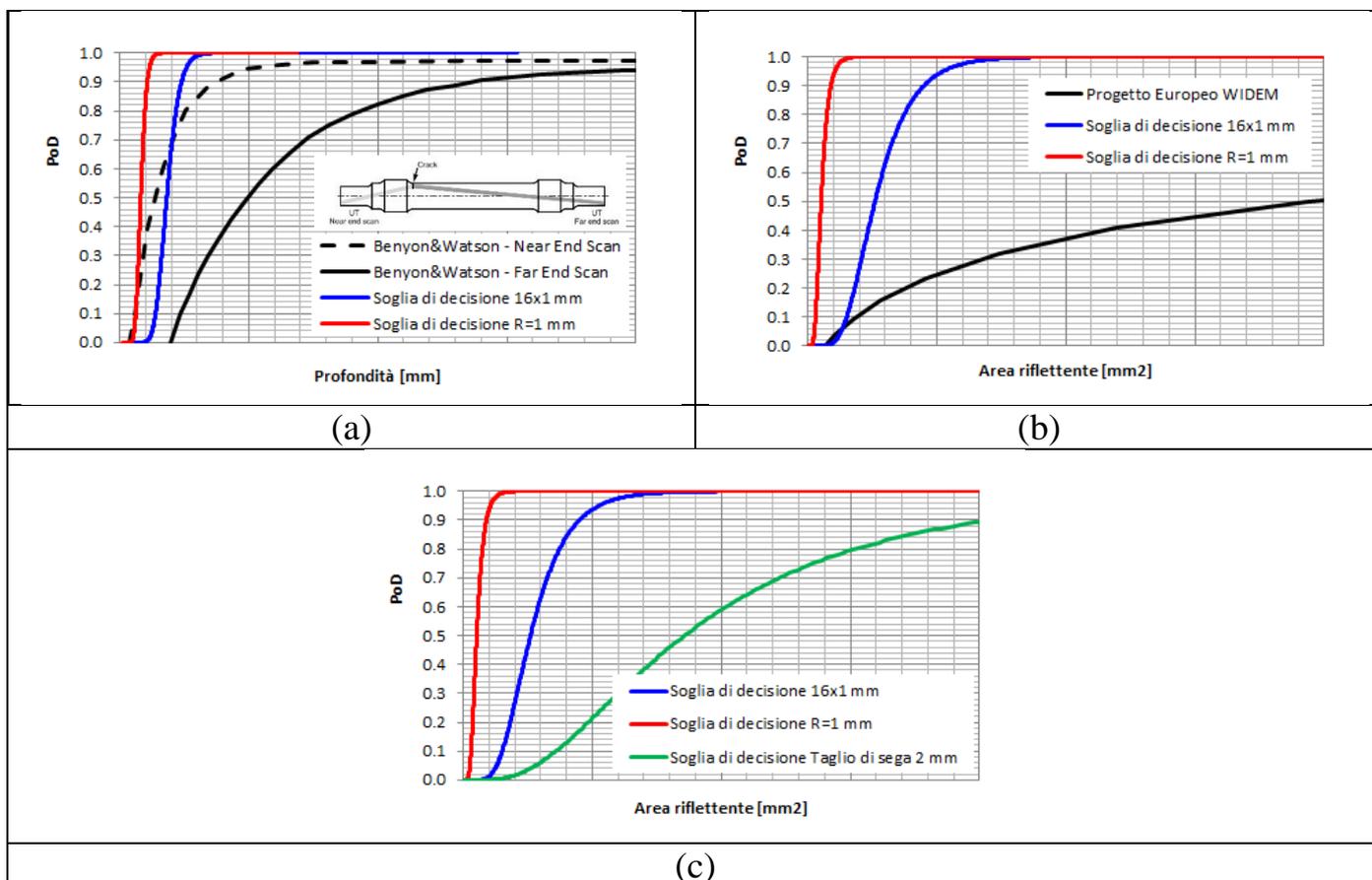


Figura 4 – Confronto delle curve POD ottenute con lo stato dell'arte.

Un secondo confronto utile ed interessante è stato eseguito tra le curve POD appena definite e quella ottenuta nell'ambito del Progetto Europeo WIDEM [11] per la stessa borosonda qui considerata, ma sulla base di un campione di difetti molto ristretto. Figura 4b mostra questo confronto, evidenziando come la curva POD derivata ed utilizzata in WIDEM sia eccessivamente conservativa e come sia importante la numerosità del campione nella derivazione affidabile della curva POD.

E' stato infine effettuato un confronto tra le curve POD qui ottenute con quella che si ricaverebbe adottando, come soglia di decisione, il tipico difetto di taratura utilizzato storicamente da alcune ferrovie Europee, tra cui DB, ovvero l'intaglio a mezzaluna ottenuto mediante taglio di sega profondo 2 mm. Figura 4c mostra questo confronto considerando le sole curve POD medie per semplicità di interpretazione. Se ne deduce che il difetto di taratura adottato da alcune Ferrovie è significativamente non conservativo rispetto agli altri due considerati nel confronto: tarando l'apparecchiatura su un intaglio a mezzaluna profondo 2mm equivale a tarare l'apparecchiatura su una cricca a fatica semiellittica di profondità superiore a 4mm. Questo è tanto più significativo, quanto si considera la vita residua di un assile in acciaio legato: nel caso di una propagazione a spettro è stato dimostrato, infatti, che il 90% di tale propagazione avviene al di sotto della soglia dei 4mm ed oltre i 5mm di profondità la vita residua può essere inferiore all'intervallo di ispezione.

## **5. ULTERIORI CONSIDERAZIONI SULL'ISPEZIONE BOROSONICA DI ASSILI BARENATI IN 30NiCrMoV12**

Alcuni ulteriori risultati sono stati ottenuti ispezionando i difetti artificiali realizzati sul primo assile. Come accennato nella Sezione 2, essi sono stati posizionati sulla portata centrale, sul corpo e nella transizione "T". E' interessante notare che la morfologia e le dimensioni dei difetti sono state mantenute le stesse tra queste tre sezioni in modo da poter confrontare le risposte degli stessi difetti in condizioni differenti.

Tutti i difetti artificiali sono, quindi, stati ispezionati con la borosonda utilizzando nuovamente le sonde a 45° e a 38° e da entrambi i lati di entrata. La Figura 5 mostra, come esempio, le risposte ultrasonore ottenute da una delle due sonde a 45°. E' importante aggiungere che le altre sonde hanno fornito risultati analoghi.

Considerando i difetti inclinati nella transizione "T" (Fig. 5a), l'influenza dell'approccio "favorevole" – "sfavorevole" già mostrato in Figura 2b è evidente, in quanto avvicinare gli stessi difetti da un lato di entrata o dall'altro ha generato differenze significative nella risposta ultrasonora, anche fino a 12 dB. Osservando, invece, i difetti non inclinati (corpo e portata, Fig. 5b e c), le risposte ultrasonore sono risultate, come atteso, coincidenti rispetto al lato di entrata.

La Figura 5d, poi, mostra un confronto diretto tra le risposte ultrasonore ottenute dalle tre sezioni considerate. E' interessante notare come i difetti non inclinati posizionati sul corpo si pongano a metà strada tra gli stessi difetti inclinati nella transizione "T" e ispezionati in modo favorevole e sfavorevole: in particolare, è possibile quantificare la risposta ultrasonora dei difetti sul corpo in circa +6 dB rispetto ai difetti inclinati in modo sfavorevole e in circa -6 dB rispetto ai difetti inclinati in modo favorevole. Inoltre, è possibile osservare come i difetti sulla portata, caratterizzati da un tempo di volo maggiore rispetto al corpo e alla transizione "T", rispondano in maniera coincidente, a parte il difetto di area riflettente minore, con i difetti nella transizione "T" ispezionati in modo sfavorevole, suggerendo la parità di condizione tra l'inclinazione sfavorevole nella

transizione “T” stessa ed il maggiore tempo di volo della portata. Queste due ultime condizioni (difetti nella portata e nella transizione “T” ispezionata in modo sfavorevole) rappresentano anche le condizioni più difficili di individuazione in quanto caratterizzate dalle risposte più basse.

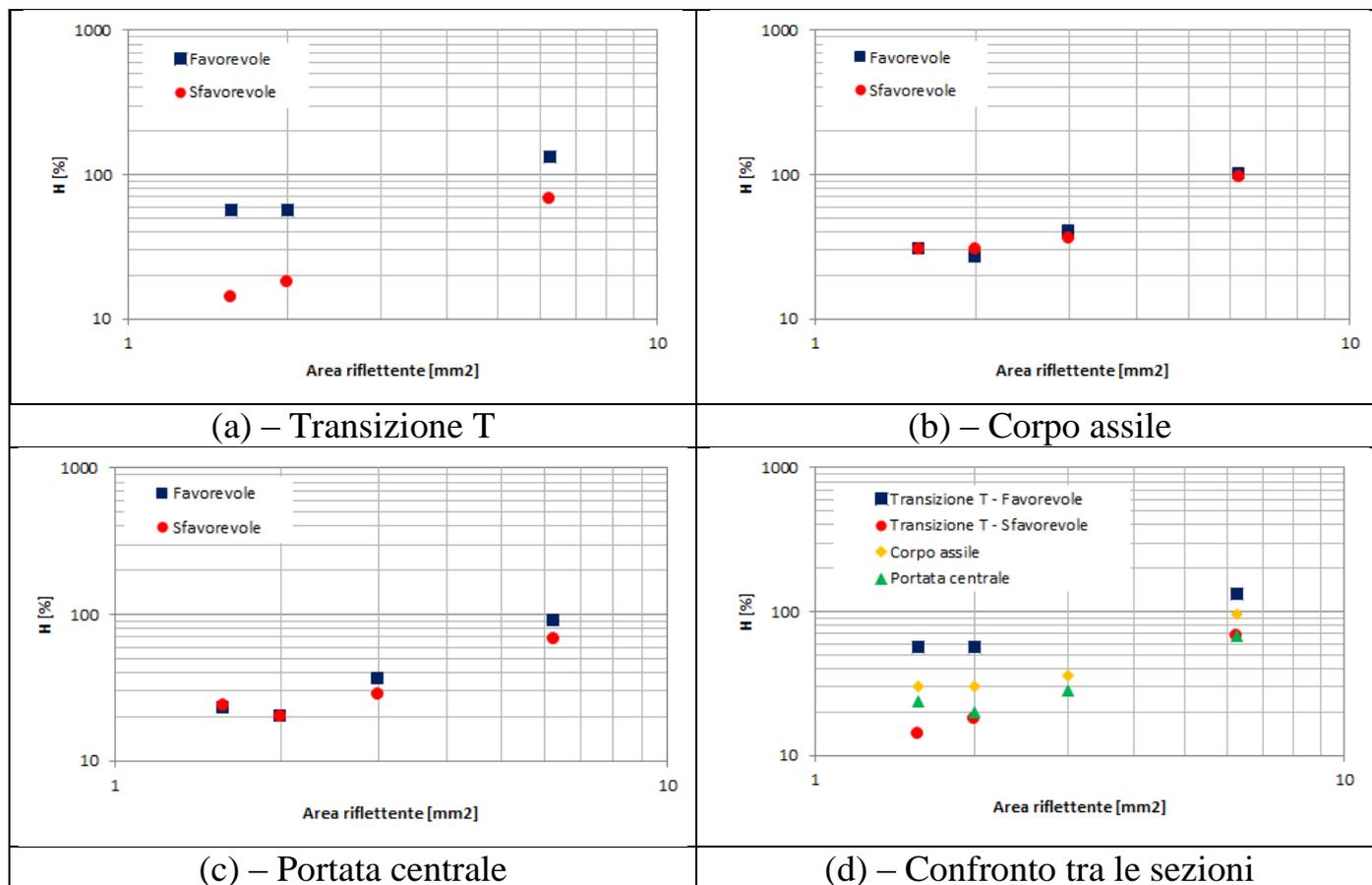


Figura 5 – Ispezione dei difetti artificiali mediante sonda a 45°.

## 6. OTTIMIZZAZIONE DELLA TECNICA BOROSONICA ADOTTATA

L’ottimizzazione della borosonda, definita dalle specifiche della procedura di ispezione Lucchini RS SpA [3], è stata eseguita per via numerica utilizzando il pacchetto software dedicato CIVA<sup>nde</sup> 10.0b [7]. I casi geometrici considerati sono riportati in Figura 6 e sono rappresentativi di diversi possibili posizionamenti del difetto campione (concavo 16x1 mm) sull’assile: a 5 mm dal bordo della portata e ispezionato da ambo i lati (casi A e A’), nella transizione T con approccio favorevole e sfavorevole (casi B e C) e, infine, sul corpo cilindrico (caso D).

I parametri di ispezione considerati durante le analisi per l’ottimizzazione sono stati:

- frequenza: 2, 4 e 5 MHz;
- angolo di rifrazione: 36°, 38°, 42°, 45°, 48° e 50°;
- dimensioni del cristallo: 8×8 mm, 10×10 mm e 12×12 mm, diametro = 11.3 mm (in quest’ultimo caso, la superficie di emissione del cristallo circolare è pari a quella del cristallo quadrato di dimensione 10×10 mm);
- ampiezza si riferimento: 0.105, corrispondente al valore di risposta del caso D in Figura 6.

La prima serie di analisi è stata condotta allo scopo di verificare le prestazioni del software mediante confronto con i risultati sperimentali mostrati in Figura 5, ovvero simulando

quale, tra gli scenari di difetto considerati, produce la risposta ultrasonora di ampiezza maggiore. Allo scopo, sono state simulate tutte le combinazioni dei parametri di ottimizzazione considerati (per un totale di 360 simulazioni) e, come esempio rappresentativo, la Figura 7 mostra il caso della borosonda attualmente implementata (frequenza 4 MHz, cristallo 10x10 mm e angolo di rifrazione 45°). E' necessario aggiungere che, per una migliore rappresentazione delle risposte numeriche ottenute, esse sono state relativamente traslate, in modo da risultare affiancate invece che sovrapposte.

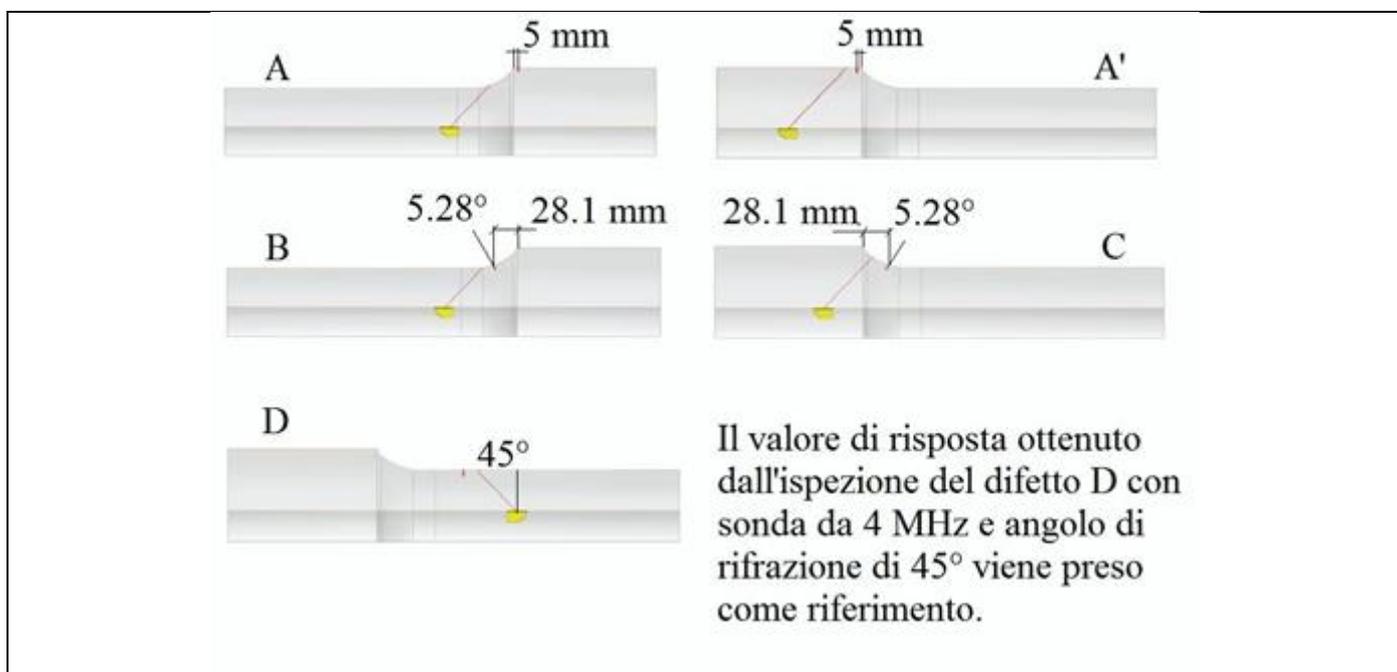


Figura 6 – Scenari utilizzati per l'ottimizzazione della borosonda.

Come atteso, lo scenario B (transizione “T” ispezionata in modo favorevole) è risultato restituire la quantità maggiore di energia. Inoltre, come nelle evidenze sperimentali, lo scenario C (transizione “T” ispezionata in modo sfavorevole) è risultato il meno individuabile insieme agli scenari A e A' rappresentanti la risposta del difetto nella portata. Infine, lo scenario D (difetto nel corpo) si è posto nel mezzo tra B e C. Questa serie di osservazioni, analogamente ottenute da tutte le simulazioni eseguite in questa prima serie di analisi, permette di ritenere correttamente calibrato il modello numerico in base alle evidenze sperimentali.

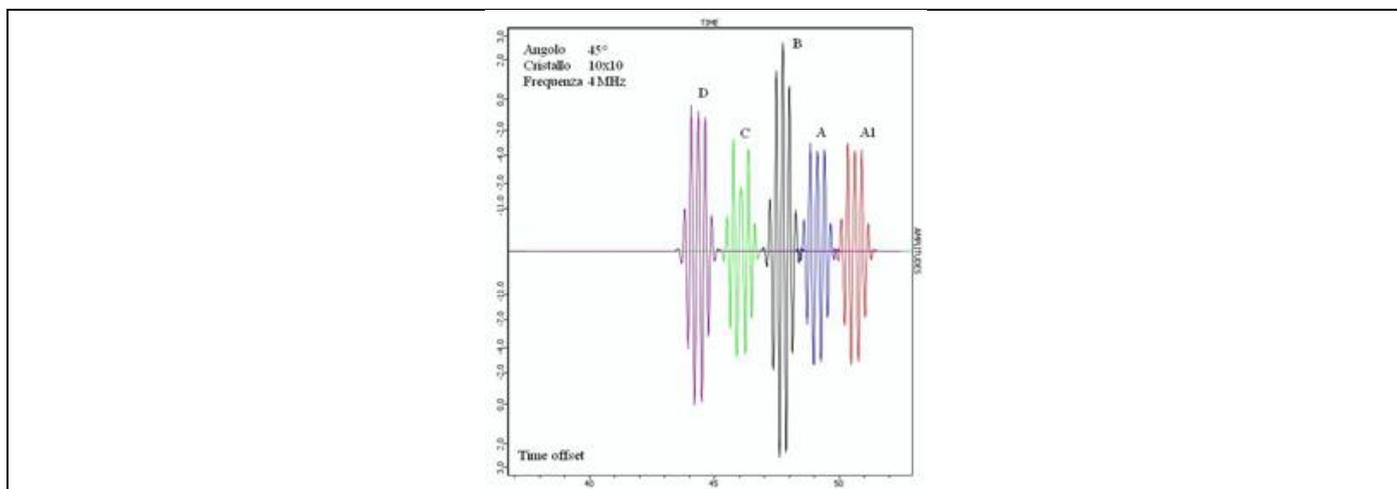


Figura 7 – Esempio di analisi numerica di validazione del modello.

Considerando, quindi, nel seguito il solo scenario B, le successive analisi numeriche hanno riguardato l'ottimizzazione vera e propria della borosonda. La Figura 8a mostra, come esempio, il caso di frequenza 4 MHz e cristallo 10x10 mm al variare dell'angolo di rifrazione. In questo caso, tale angolo ottimo è risultato 48°, ma, generalizzando, esso è risultato essere sempre 48° (a 4 MHz) o 50° (a 2 e 5 MHz).

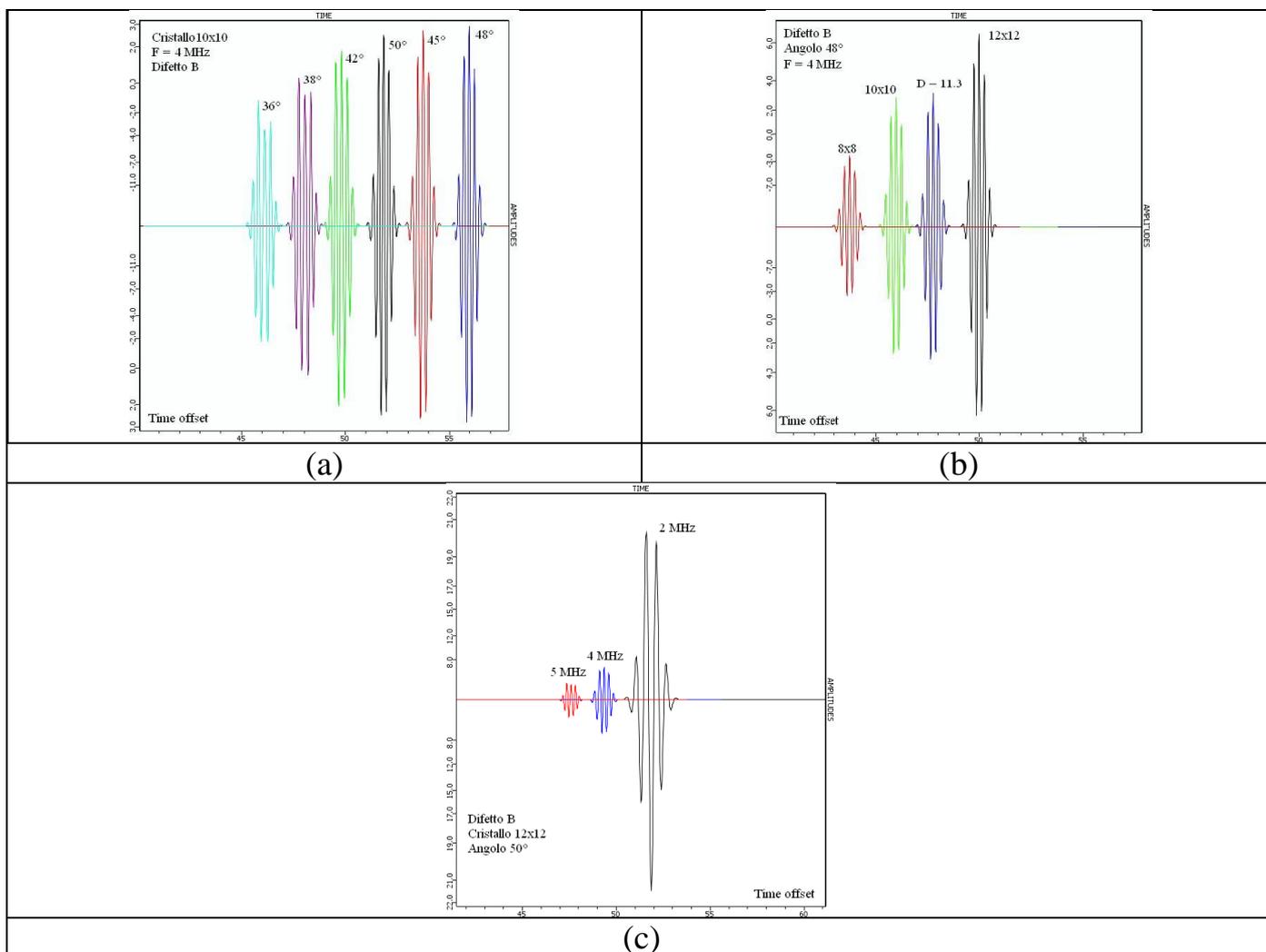


Figura 8 – Ottimizzazione numerica della borosonda.

La successiva analisi (un esempio è mostrato in Figura 8b) ha mirato al confronto delle prestazioni in termini di dimensione e forma del cristallo. Sono stati considerati costanti lo scenario di difetto B e l'angolo di rifrazione ottimo (50° per la sonda a 2 MHz e 5 MHz, 48° per la sonda a 4 MHz), mentre sono state variate le caratteristiche geometriche del cristallo. Anche in questo caso, le risposte ultrasonore sono state fittiziamente traslate. In tutti i casi, la risposta migliore è stata ottenuta dal cristallo 12x12 mm. E' anche interessante notare che il cristallo circolare fornisce risposte identiche a quello quadrato di pari area.

L'ultima analisi, riportata in Figura 8c, confronta l'influenza della frequenza del segnale sulla risposta ultrasonora. In questo caso, sono stati mantenuti costanti lo scenario di difetto B, l'angolo di rifrazione ottimo e la dimensione ottima del cristallo. E' poi stata applicata l'usuale traslazione fittizia tra le curve. Si osserva come il diminuire della frequenza del segnale tenda ad aumentare significativamente l'ampiezza della risposta ultrasonora.

Riassumendo, tra tutti i parametri considerati ed analizzati, al di là dello scenario che non è una caratteristica intrinseca della borosonda, la migliore configurazione ottenuta, in termini di ampiezza della risposta ultrasonora, sembra consistere in:

- angolo di rifrazione in acciaio pari a  $50^\circ$
- cristallo quadrato 12x12 mm
- frequenza del segnale pari a 2 MHz

E' necessario aggiungere che tali parametri rappresentano la condizione ideale di ottimizzazione della borosonda a sé stante. Nell'ipotesi dell'applicazione di una procedura reale agli assili ferroviari, altri fattori entrano in gioco, obbligando a scelte di compromesso. In particolare:

- motivi di ingombro dovuti ai diametri tipici dei fori barenati degli assili di produzione impediscono, in generale, l'applicazione di cristalli piezoelettrici aventi area 12x12 mm. Migliore, invece, l'applicazione di cristalli quadrati 10x10 mm o circolari con diametro 11.3 mm che generano, avendo pari area di trasmissione, medesime risposte, rappresentando un buon compromesso tra ingombri e performance;
- considerando l'angolo di rifrazione, è stato possibile notare come le risposte numeriche, in generale, non varino sostanzialmente tra  $45^\circ$  e  $50^\circ$ , mentre si abbia un maggior degrado della performance per angoli inferiori a  $45^\circ$ . Si può aggiungere che i percorsi ultrasonori nel materiale, realizzati da angoli di rifrazione maggiori, possono essere considerati maggiormente influenzati dall'attenuazione (non considerata nelle analisi numeriche), anche se probabilmente in modo trascurabile viste le distanze in gioco. Può, però, valere la pena considerare anche questi aspetti ottimizzando il percorso ultrasonoro e l'attenuazione mediante la scelta dell'angolo di rifrazione pari a  $45^\circ$ ;
- per quanto riguarda la frequenza, essa ha un'influenza importante sull'angolo di divergenza  $\alpha$  del fascio ultrasonoro e può quindi influenzare l'estensione delle porzioni di assile lungo le cui le sonde vengono rese inattive per non segnalare le indicazioni legate alla geometria. Da questo punto di vista, utilizzando le note formule di letteratura per il calcolo di tale angolo si trova che esso vale, adottando un cristallo 10x10 mm,  $9.3^\circ$  per la sonda a 2 MHz e  $4.63^\circ$  per quella da 4 MHz. La ridotta copertura, garantita da una sonda da 4 MHz, è da preferirsi considerando il fatto che le tipiche cricche di fatica tendono a nucleare proprio in prossimità delle variazioni geometriche che non si vuole vengano rilevate con indicazioni di difetto.

Si può concludere che l'analisi numerica eseguita ha permesso di individuare la configurazione ottima per la borosonda come strumento a sé stante, ma anche che i vincoli di utilizzo e di applicazione della borosonda stessa a reali procedure di controllo suggeriscono una configurazione molto vicina a quella attualmente implementata, validandola di fatto.

## **7. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE**

I risultati più importanti ottenuti dalle attività relative al presente lavoro di ricerca sono descritti e riassunti nel seguito:

- è stato preparato un set di dieci assili full-scale barenati in 30NiCrMoV12 contenenti cricche naturali di fatica e costituente una popolazione statisticamente significativa, ad oggi inesistente, per la caratterizzazione di strumentazione borosonica;

- sono state caratterizzate le curve POD della borosonda Gilardoni SpA sia a sé stante, sia applicata nella procedura di ispezione Lucchini RS;
- la curva POD relativa alla borosonda nel suo complesso è stata confrontata con le curve POD disponibili in letteratura ottenendo un ottimo collocamento di prestazioni;
- è stata eseguita l'ottimizzazione della borosonda mediante simulazioni numeriche utilizzando il software CIVA<sup>nde</sup>. La configurazione ottenuta rappresenta la performance ottima e assoluta della borosonda: considerando anche gli altri vincoli derivanti dall'applicazione reale, si trovano valori dei parametri molto simili a quelli attualmente implementati.

Tra i prossimi sviluppi, il campione di assili con cricche a fatica sarà impiegato per caratterizzare altre apparecchiature di controllo borosonico attualmente sul mercato unitamente a procedure di taratura definite da operatori ferroviari Europei e non, al fine di valutarne affidabilità e coerenza con gli intervalli di ispezione definiti.

### **RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI**

- [1] S. Cantini, S. Beretta (Editors), Structural reliability assessment of railway axles, LRS-Techno Series 4, 2011.
- [2] Grandt AF Jr. Fundamentals of structural integrity. John Wiley & Sons Inc., Hoboken, 2003.
- [3] G. Patelli et al.: Istruzione Tecnica QUA IT 065 Rev.7. 2009, Lucchini RS S.p.A., Lovere (BG).
- [4] Georgiou GA. Probability of Detection (POD) curves: derivation, applications and limitations. Research Report 454, HSE Books, Health and Safety, Executive, UK, 2006.
- [5] ASM. ASM handbook – Vol. 17: Non-destructive evaluation and quality control. 1997.
- [6] MIL-HDBK-1823A. Nondestructive evaluation system reliability assessment. Department of Defense of the US, 2009.
- [7] CEDRAT, CIVA<sup>nde</sup> 10.0b User's Manual, 2011.
- [8] EN13261 – “Railway applications- Wheelsets and bogies – Axles – Product requirements”, CEN, 2003.
- [9] 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.
- [10] Benyon J.A., Watson A.S. (2001), The use of Monte Carlo Analysis to increase inspection intervals, Atti dell'International Wheelset Conference, Roma.
- [11] WIDEM EU Project. Wheel-set Integrated Design and Effective Maintenance. Website: [www.widem.org](http://www.widem.org).