

Intervalli di ispezione di assili ferroviari in acciaio ad alta resistenza: influenza della curva POD

S. Cantini¹, G. Patelli¹, S. Beretta², M. Carboni²

¹ Lucchini Sidermeccanica S.p.A., Dipartimento per la Qualità

² Politecnico di Milano, Dipartimento di Meccanica

SOMMARIO

La crescente domanda di affidabilità per i componenti ferroviari, specialmente considerando le applicazioni ad alta velocità, ha portato ad una nuova definizione di coefficiente di sicurezza determinabile mediante l'approccio "defect tolerant" e la stima di intervalli di ispezione "safe life" in funzione delle caratteristiche del materiale, dei modelli di propagazione di cricche e delle ispezione CND. La presente memoria tratta la definizione degli intervalli di ispezione di assili ferroviari, considerando la speciale applicazione di un tipico acciaio per treni ad alta velocità, assili cavi e una speciale borosonda per il controllo UT in servizio. Inizialmente, la curva POD dell'innovativa borosonda, sviluppata secondo le specifiche Lucchini, è stata ottenuta mediante misure UT sperimentali dedicate e il software di simulazione CIVA[®] 8.1. Tale curva è stata poi adoperata insieme al comportamento a propagazione dell'acciaio 30NiCrMoV12 nell'ottica di definire gli intervalli di ispezione di assili ferroviari per l'alta velocità.

1. Introduzione

La stima di vita a fatica degli assili ferroviari è di grande importanza per l'industria ferroviaria, in quanto un loro eventuale cedimento può dare origine a gravi conseguenze. La progettazione di assili ferroviari è regolata da raccomandazioni tecniche [1-3] essenzialmente basate sull'utilizzo di acciai dolci e sulla definizione del massimo sforzo ammissibile a fatica per una data combinazione di carichi agenti sugli assili stessi. Oltre a questo approccio classico, si osserva una richiesta crescente di valutazione affidabilistica degli assili, specialmente considerando gli intervalli di ispezione "safe life" [4-5] e le applicazioni dell'alta velocità, dove assili cavi e acciai ad alta resistenza possono venire impiegati (ad esempio il Pendolino o l'ICE). In particolare, la vita a fatica di degli assili ferroviari supera spesso i 30 anni [6] e, durante questo periodo, essi vengono regolarmente ispezionati mediante metodi CND. L'intervallo di ispezione viene definito come la distanza che può essere percorsa in sicurezza tra due ispezioni CND successive. Questo intervallo è funzione di (Fig. 1a): i) la minima dimensione osservabile di cricca o difetto ($a_{50\%}$); ii) la curva di propagazione (da/dN); iii) il fattore di intensificazione degli sforzi critico a rottura (K_{IC}).

Nell'ottica di ridurre il costo totale della sala ferroviaria, è quindi necessaria un'ottimizzazione degli intervalli d'ispezione degli assili. Per allungare gli intervalli di ispezione è necessario:

- sviluppare materiali ad alta tenacità, il che corrisponde ad una a_{max} più alta, e maggiore resistenza alla propagazione di cricche, il che corrisponde ad una velocità di propagazione limitata e ad una riduzione della pendenza della curva di Fig. 1a;
- ottimizzare gli algoritmi per la previsione della propagazione a carichi variabili e dotarli della corretta descrizione delle geometrie in gioco, ottenendo una migliore descrizione della curva di Fig. 1a;
- migliorare la rilevabilità di cricche o difetti di dimensioni ridotte ottenendo così la riduzione di $a_{50\%}$.

Siccome i primi due aspetti sono già stati affrontati precedentemente dagli autori [7-9], la presente memoria è principalmente focalizzata sull'aspetto CND degli intervalli di ispezione. Una breve descrizione della procedura qui utilizzata per il calcolo della POD ("Probabilità of Detection") di un difetto è riportata nel seguito.

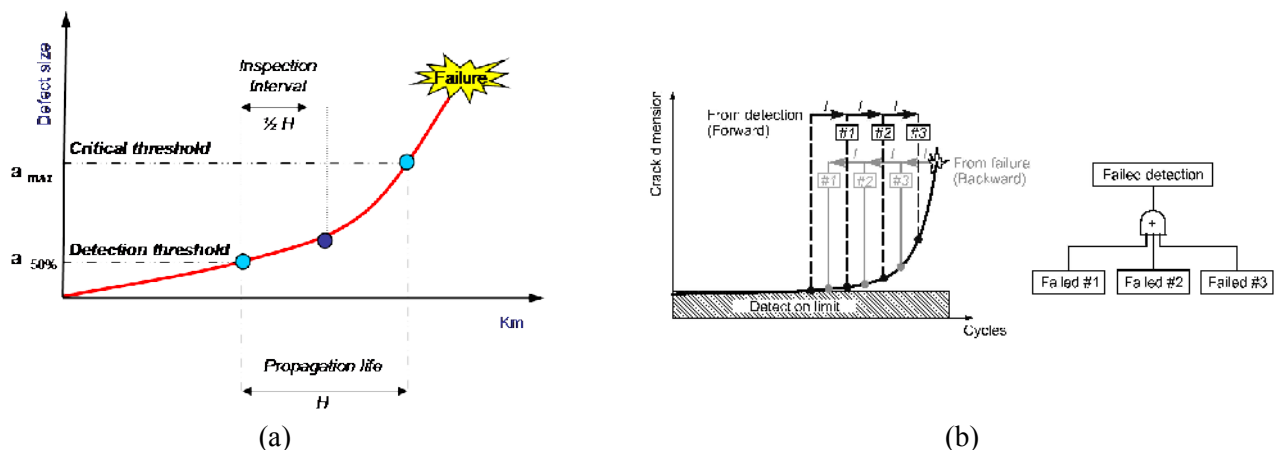


Figura 1 – a) rappresentazione schematica dell'intervallo di ispezione; b) definizione della probabilità cumulate di rilevamento "in avanti" e "indietro".

1.1. Probabilità cumulata di rilevamento di un difetto

Una definizione semplice (Fig. 1a) di intervallo di ispezione consiste nel fissarlo alla metà della vita a propagazione che incorre dal rilevamento al cedimento finale. Tuttavia, siccome il rilevamento è caratterizzato da una curva POD (maggiori sono le dimensioni della cricca, più è facile vederla), risulta più opportuno adottare la probabilità cumulata di rilevamento.

Dato un intervallo di ispezione “*T*”, la probabilità di rilevare il difetto, potenzialmente osservabile in un dato numero “*i*” di ispezioni derivato dalla curva POD del metodo CND utilizzato, può essere calcolata. Fig. 1b, nella quale vengono assunte tre ispezioni a dove *I* concetti di ispezioni “in avanti” e “indietro” vengono introdotti, mostra questo approccio. E’ necessario aggiungere che a causa del conservatorismo introdotto [10] dall’adozione di ispezioni “indietro”, solo queste ultime saranno considerate nel prosieguo della ricerca. La probabilità totale di rilevare un difetto può quindi essere determinata come:

$$(1)$$

dove PC_{DET} è la probabilità cumulate teorica di rilevamento e POND (“Probability of Non Detection”) rappresenta la probabilità di non fallire l’ispezione. Lo svantaggio di questo approccio è che la ripetizione di ispezioni su cricche aventi POD molto bassa (nelle fasi iniziali della vita a propagazione) aumenta il valore di PC_{DET} , ma introduce ulteriori influenze (errori di “sizing”, errori dell’operatore) tipiche di questa fase.

1.2. Scopi del lavoro

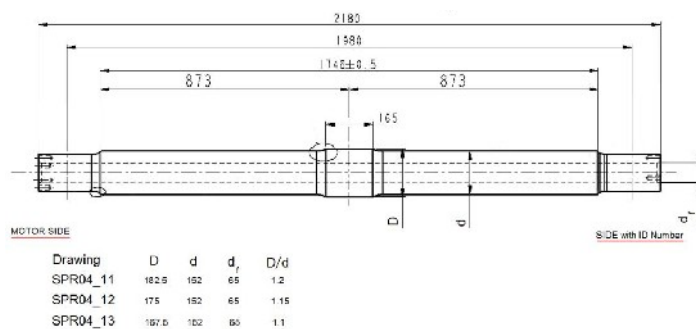
La determinazione degli intervalli di ispezione è stata condotta nella presente ricerca considerando l’applicazione speciale dell’acciaio 30NiCrMoV12 ad alta resistenza (UNI6787-71 [11]) usualmente utilizzato da Lucchini nella produzione di assili cavi montati su treni ad alta velocità. In particolare, la curva POD della borosonda sviluppata secondo specifiche Lucchini [12] è stata ottenuta mediante esperimenti UT dedicati e il software di simulazione CIVA® 8.1. Tale curva è poi stata utilizzata insieme al comportamento a propagazione fratture dell’acciaio 30NiCrMoV12 (ricavato altrove [7-9]) nell’ottica di definire gli intervalli di ispezione di assili ferroviari per alta velocità.

2. Misure sperimentali UT su assili cavi

Misure sperimentali UT sono state condotte su assili criccati allo scopo di derivare la curva POD del sistema BAT (“Bore Axle Testing”) sviluppato [12] secondo le specifiche Lucchini. Esso consiste in un sistema multi-canale che permette l’ispezione continua e a pari sensibilità anche delle più complicate geometrie di sala ferroviaria grazie, nella versione standard, ad un massimo di otto sonde montate in modo compatto su un portasonde che scorre e ruota nel barenò dell’assile cavo considerato. Nella presente memoria, verranno considerate quattro sonde caratterizzate da frequenza pari a 4Mhz: 45° avanti (l’energia sonora è diretta nel verso di avanzamento dello strumento) e indietro (l’energia sonora è diretta in senso opposto al verso di avanzamento dello strumento) e 38° avanti e indietro.

Le misure sono state condotte su 11 assili caratterizzati da cricche multiple generate per fretting fatica sulla portata di calettamento del cuscinetto. La geometria di assile qui

considerata (Fig. 2a) è riferita a quella dei campioni full-scale per prove di fatica e di propagazione di cricche descritta in [1]. I test di fatica e propagazione vengono eseguiti mediante un apposito banco di prova (Fig. 2b) disponibile nei laboratori di Lucchini e del Politecnico di Milano. Maggiori dettagli riguardo al banco possono essere trovati in [7-9].



(a)

(b)

Figura 2 – Provino full-scale per prove di fatica e propagazione (a) e banco di prova dedicato (b).

Le cricche sono state innanzitutto individuate per mezzo di MT fluorescente (Fig. 3 mostra un esempio) e quantificate (in termini di profondità e lunghezza superficiale) mediante sia ispezione UT manuale con sonde di diverso angolo, sia con un sistema ACPD. Gli assili cavi sono poi stati ispezionati usando il sistema BAT e i segnali UT sono stati registrati per determinare la curva POD.

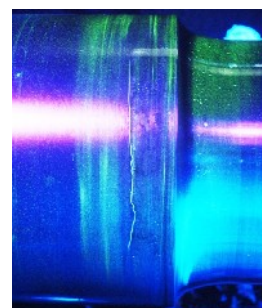


Figura 3 – Cricca da fretting fatica evidenziata con metodo MT.

3. Simulazione numerica di UT su assili cavi

La simulazione UT è stata eseguita mediante il software dedicato CIVA[®] v.8.1 [13]. Sono stati eseguiti due differenti tipi di analisi pulse-echo: la prima riguardante la simulazione delle misure UT eseguite sul blocco campione utilizzato da Lucchini per determinare la curva DAC (o TGS) allo scopo di verificare la capacità del software di cogliere le risultanze sperimentali; la seconda riguardante la simulazione di risposte UT in assili cavi caratterizzati da due tipologie differenti di difetto presenti in due zone critiche: la transizione T ed il caletto.

In tutte le simulazioni, il materiale modellato rappresenta l'acciaio 30NiCrMoV12 ed è importante aggiungere che sono stati effettuati esperimenti dedicate per determinarne la trasparenza trovando che l'attenuazione delle onde sonore è trascurabile alle frequenze di 2 e 4 MHz. I valori delle velocità sono stati impostati a 5920 m/s per le onde longitudinali e 3230 m/s per le onde trasversali.

3.1. Simulazione delle tarature su blocco campione

Le dimensioni del blocco campione [14] sono riportate in Fig. 4. Ogni sezione del blocco campione è stata modellata utilizzando CIVA[®]. Le Figg. 5a e 5b mostrano il caso della sezione avente diametro esterno 120 mm (il barenò ha diametro 65 mm in ogni sezione). In queste figure è riportato anche il percorso sonoro previsto mediante una semplice tecnica ray-tracing.

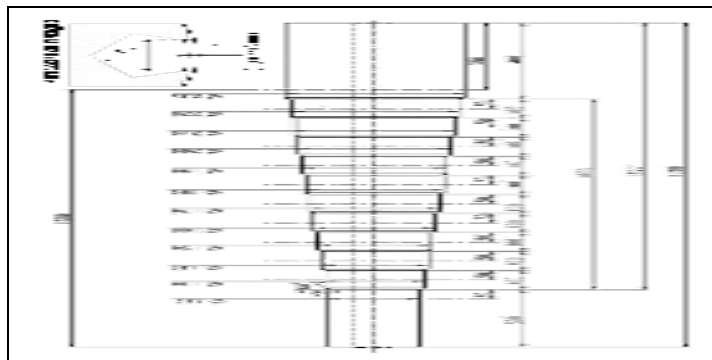


Figura 4 – Blocco campione per la determinazione della curva DAC (o TGS) [14].

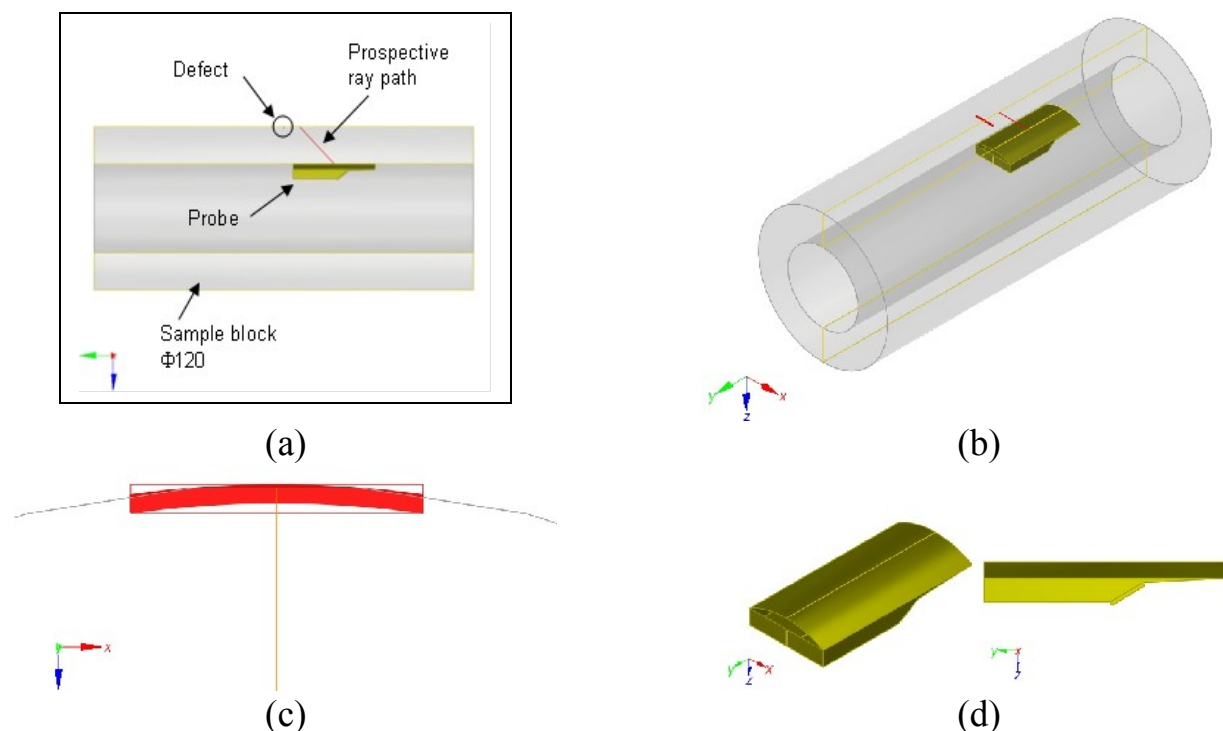


Figura 5 – Modellazione CIVA® del blocco campione (a) e (b), difetto (c) e sonda (d).

Particolare attenzione è stata utilizzata nella modellazione dei difetti artificiali (Fig. 5c) e della sonda (Fig. 5d).

Considerando la sonda, sia le dimensioni del cristallo sia dello zoccolo realizzato in plexiglas ($V_L=2680$ m/s e $V_T=1320$ m/s) sono stati modellati esattamente come nella sonda reale seguendo le indicazioni del certificato tecnico fornito dal produttore. La stessa cosa può essere detta riguardo alla morfologia del segnale trasmesso che è stato modellato a partire dal contenuto in frequenza ricavato sperimentalmente. Infine, le simulazioni sono state eseguite sia per la sonda a 45° sia per quella a 38° (entrambe a 4 MHz).

La taratura è stata simulata muovendo la sonda longitudinalmente lungo il blocco campione da 5 mm prima a 5 mm dopo il difetto con un avanzamento di 0.5 mm. L'accoppiamento è stato modellato per mezzo di olio come nella realtà. Siccome CIVA® considera solo ampiezze di segnale, i dB generate dalle eco sono stati qui definiti considerando, come segnale di riferimento, l'ampiezza del segnale trasmesso (mantenuto uguale in tutte le analisi).

Fig. 6a mostra il B-scan ottenuto dalla simulazione del caso di diametro 120 mm, mentre Fig. 6b l'A-scan estratto dal B-scan in corrispondenza dell'eco più alta. Ripetendo la procedura per tutte le sezioni del blocco campione e per tutte le sonde, diviene possibile il confronto tra la curva TGS simulata e quella sperimentale (Fig. 7). I risultati ottenuti

sembrano incoraggianti visto che le simulazioni sono molto vicine alle evidenze sperimentali.

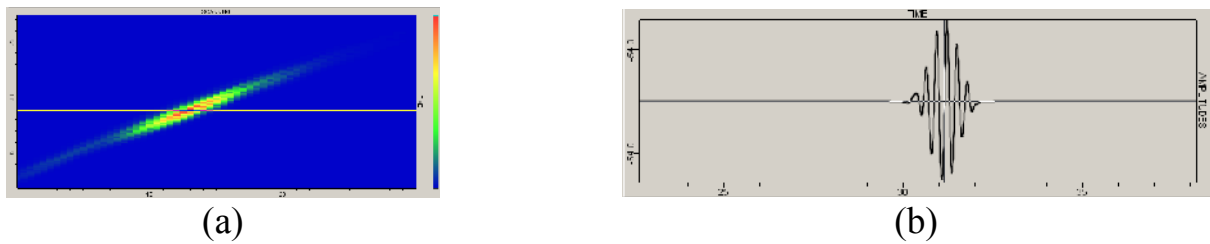


Figura 6 – Risultati ottenuti nel caso di diametro pari a 120 mm: a) B-scan; b) A-scan corrispondente alla massima eco.

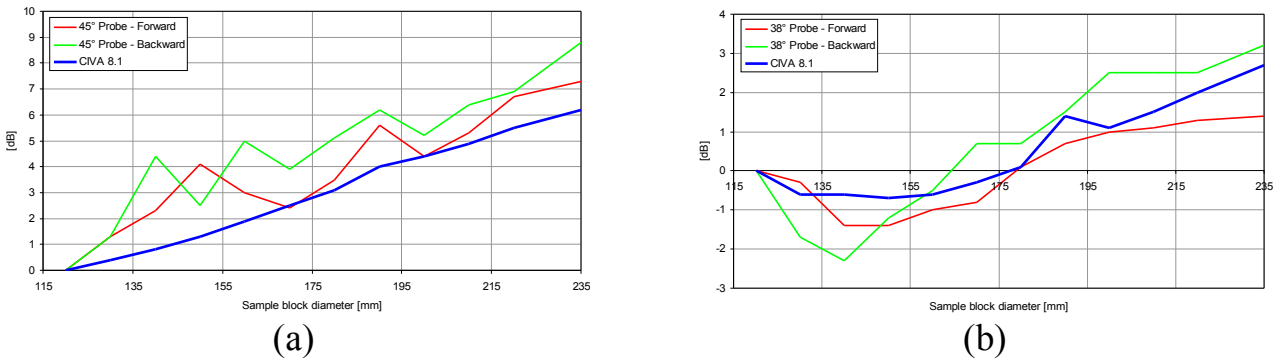


Figura 7 – Curve TGS per le sonde a 45° (a) e 38° (b).

3.2. Simulazione di difetti in assile e determinazione della curva POD

Allo scopo di ridurre i tempi di calcolo, è stata modellata solo una parte dell'assile (Fig. 8): questa include il corpo, la transizione T ed il caletto. Sono state considerate due differenti geometrie di difetto: difetto convesso (simile ad una cricca di fatica, tipicamente osservabile sul corpo in prossimità delle transizioni) e difetto concavo (simile ad una cricca da fretting fatica, tipicamente osservabile al caletto). Le profondità "d" di difetto considerate sono 0.5, 1, 2, 3, 5, 10, 15 e 20 mm. In particolare (Fig. 8), al caletto i difetti sono stati posizionati a 10 mm dal bordo mentre alla transizione T in corrispondenza della radice dell'intaglio. Tutti gli altri parametri delle simulazioni sono stati mantenuti come descritto nel precedente paragrafo. Le simulazioni sono state eseguite osservando i difetti sia in avanti, sia indietro.

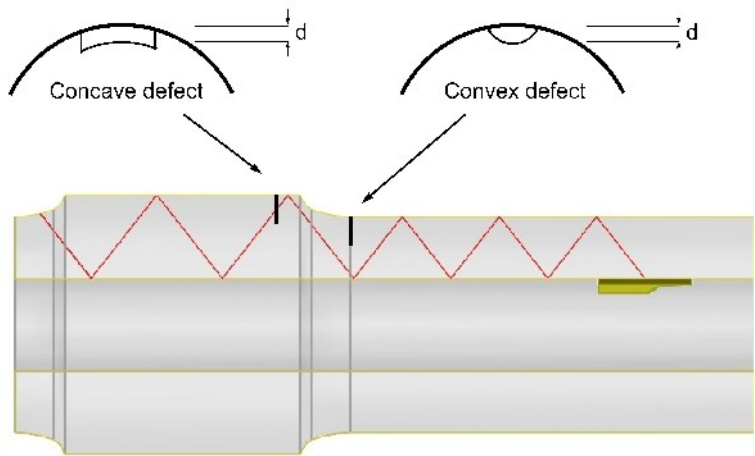


Figura 8 – Simulazione di difetti in assili.

Allo scopo di ridurre i tempi di calcolo, è stata modellata solo una parte dell'assile (Fig. 8): questa include il corpo, la transizione T ed il caletto. Sono state considerate due differenti geometrie di difetto: difetto convesso (simile ad una cricca di fatica, tipicamente osservabile sul corpo in prossimità delle transizioni) e difetto concavo (simile ad una cricca da fretting fatica, tipicamente osservabile al caletto). Le profondità "d" di difetto considerate sono 0.5, 1, 2, 3, 5, 10, 15 e 20 mm. In particolare (Fig. 8), al caletto i difetti sono stati posizionati a 10 mm dal bordo mentre alla transizione T in corrispondenza della radice dell'intaglio. Tutti gli altri parametri delle simulazioni sono stati mantenuti come descritto nel precedente paragrafo. Le simulazioni sono state eseguite osservando i difetti sia in avanti, sia indietro.

Nella presente ricerca, la zona critica più interessante è la transizione T ma, sfortunatamente, nessun assile criccato in tale zona è risultato disponibile per l'ispezione sperimentale. Quindi, allo scopo di trasportare i risultati sperimentali dal caletto alla transizione T, il risultato fondamentale delle simulazioni è consistito nella differenza di ampiezza del segnale tra il difetto concavo al caletto e quello convesso alla transizione, nell'ipotesi che i due difetti abbiano stessa profondità. Bisogna, quindi tenere conto di due effetti: il tempo di volo differente (la transizione T è più vicina alla sonda) e la differente

area riflettente (il difetto convesso supposto semi-circolare ha area minore di quello concavo avente pari profondità).

Considerando il tempo di volo, è stato possibile osservare che la differenza in dB di un difetto posto al caletto rispetto allo stesso difetto posto alla transizione T risulta pari a +2 dB qualsiasi siano la profondità di difetto (fino a 20 mm), la geometria (concavo e convesso) e la sonda utilizzata (38° o 45°, in avanti o indietro). Fig. 9 mostra l'esempio di difetto convesso sonorizzato con sonda a 45° in avanti.

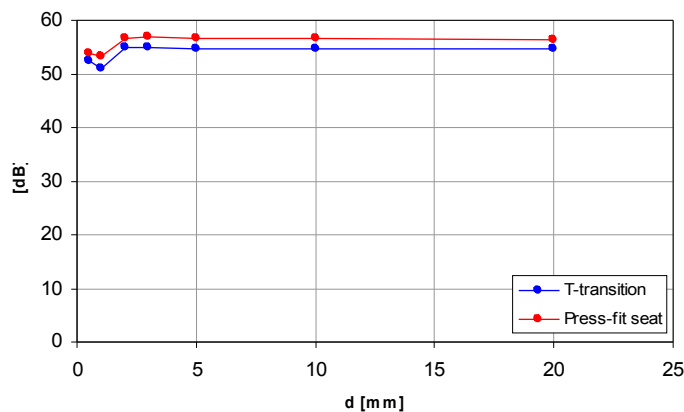
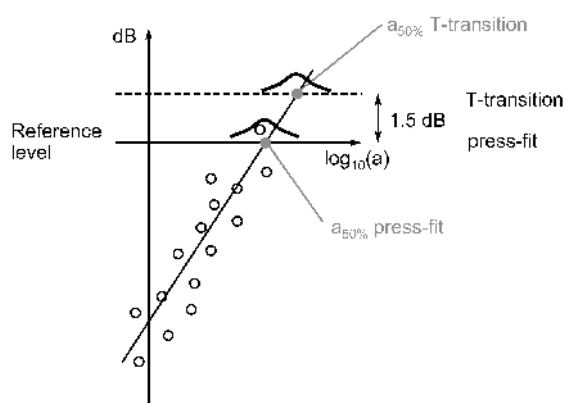


Figura 9 – Differenza in dB tra un difetto al caletto e lo stesso alla transizione T.

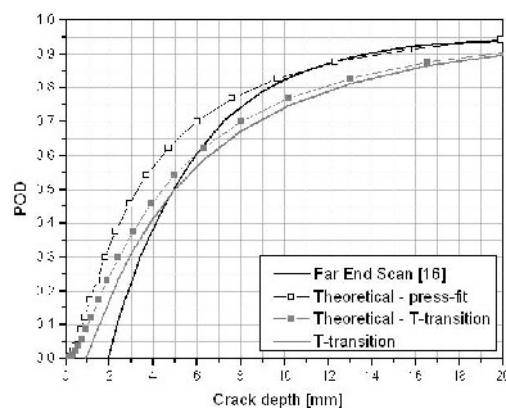
Considerando invece la differente area

riflettente è stato possibile osservare che la sensibilità di un difetto concavo rispetto ad uno convesso di pari profondità si stabilizza (per $d > 5$ mm) ad un valore in media di -3.5 dB. Tenendo conto che i due effetti hanno influenza contrapposta, per trasportare la risposta in dB di un difetto concavo al caletto a quella di un difetto convesso alla transizione T è necessario aggiungere ai dB sperimentali ottenuti al caletto la quantità di 1.5 dB (Fig. 10a). sembra, inoltre, che l'effetto dell'area riflettente sia più forte di quello del tempo di volo, almeno per le geometrie di assile e i parametri ultrasonori qui adottati.

I risultati ottenuti hanno quindi permesso di determinare le curve POD del sistema BAT sia per il caletto, sia per la transizione T mediante la metodologia classica di analisi per derivare le curve POD [15]. Fig. 10b mostra le curve teoriche ottenute confrontate con quella relativa alla metodologia tradizionale Far End Scan [16] e quella utile per la determinazione degli intervalli di ispezione caratterizzata dal troncamento delle profondità di cricca inferiori a 1 mm (ovvero la profondità degli intagli di calibrazione).



(a)



(b)

Figura 10 – Determinazione della curva POD del sistema BAT: a) procedura adottata; b) curve POD risultanti dalle analisi.

4. Determinazione degli intervalli di ispezione

Allo scopo di determinare la lunghezza degli intervalli di ispezione, il comportamento a frattura del materiale considerato deve essere utilizzato. Nel presente paragrafo, vengono brevemente riassunti i risultati precedentemente ottenuti dagli autori a riguardo [7-9] prima di procedere al calcolo vero e proprio degli intervalli di ispezione.

4.1. Analisi della propagazione di fratture

Le proprietà meccaniche base dell'acciaio 30NiCrMoV12 sono [7-9]: carico di rottura $R_m=1050$ MPa, snervamento $R_{p0.2}=995$ MPa, coefficiente di riduzione $Z=67\%$, tenacità a frattura a 20°C $K_{IC}=120$ MPa $\sqrt{\text{m}}$, resilienza a 20°C (intaglio U) $KCU=70$ J, snervamento ciclico $R_{p0.2cyc}=730$ MPa, durezza Vickers 330

HV e limite di fatica a $R=-1$ $\sigma_{wo}=525$ MPa.

I carichi di servizio degli assili ferroviari sono il risultato delle forze verticali e laterali [2-3] agenti in conseguenza alle tipiche operazioni di

esercizio: è importante aggiungere che gli sforzi massimi possono essere trovati in vicinanza del forzamento delle ruote. Sulla base di queste considerazioni, la propagazione a fatica di cricche alla transizione T è stata analizzata considerando uno spettro di carico (Fig. 11) derivato sperimentalmente [7] su un Pendolino e corrispondente a 10^7 km di linee ferroviarie italiane.

In letteratura sono disponibili diversi algoritmi per la previsione di vita di corpi criccati: nella presente ricerca, è stato considerato NASGRO v. 3.0.21 [17]. Tale scelta è dovuta al fatto che questo software è uno dei riferimenti per l'analisi con carichi variabili. In particolare, NASGRO tiene conto dei diversi effetti agenti sulla velocità di propagazione in materiali metallici (rapporto di ciclo, interazione dei carichi) simulando il fenomeno della "plasticity induced crack closure" [18].

Il modello analitico è basato sulle cosiddette "NASGRO Equations" [17]. La prima descrive la velocità di propagazione ("da/dN") in funzione del SIF (" ΔK ") per tutti e tre i regimi di propagazione (soglia, Paris e critico), mentre la seconda descrive la variazione della soglia (" ΔK_{th} ") in funzione del rapporto di ciclo. La calibrazione dei parametri empirici di queste equazioni viene eseguita mediante esperimenti dedicati di meccanica della frattura: nel caso dell'acciaio 30NiCrMoV12, tale calibrazione è stata precedentemente eseguita dagli autori in precedenti lavori [8-9].

Lo spettro di carico è stato applicato in termini di blocchi ad ampiezza costante arrangiati secondo una sequenza di Gassner [16] caratterizzata da $R=-1$. Inoltre, i blocchi di carico sono stati applicati in termini di flessione piana in quanto NASGRO non è in grado di considerare condizioni di flessione rotante.

L'assile è stato modellato come un tubo circolare avente diametro esterno pari a 152 mm e diametro interno pari a 65 mm. La concentrazione di sforzo alla base della transizione T è stata introdotta moltiplicando le ampiezze dello spettro per un fattore di concentrazione degli sforzi $K_t=1.22$ [19]. La cricca iniziale è stata assunta semi-circolare di profondità 2 mm (un valore certamente conservativo per gli impatti da ballast [20]), mentre 43 mm è stato il valore limite di profondità al cedimento. I risultati sono riportati in Fig. 12.

Figura 11 – Spettro di carico normalizzato corrispondente a 10^7 km su linee ferroviarie italiane [7].

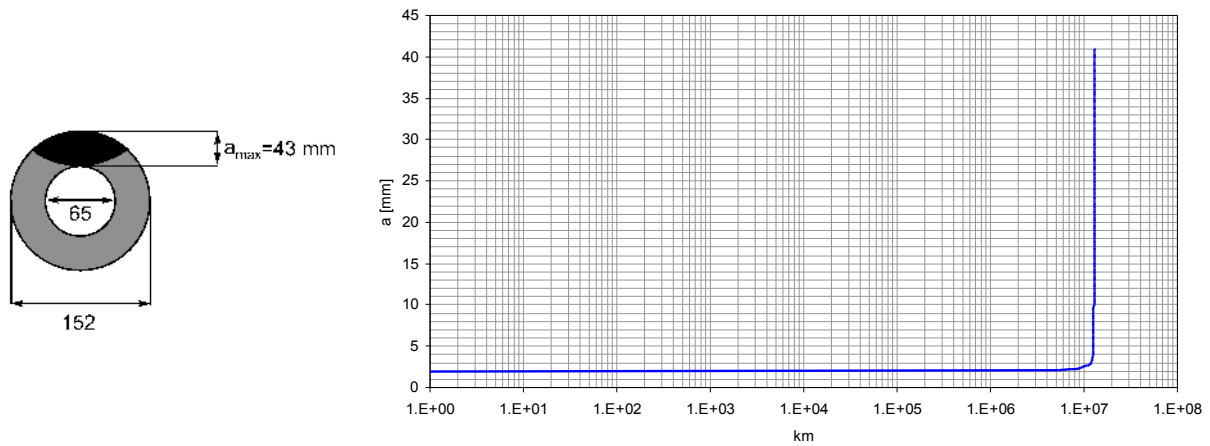


Figura 12 – Previsione di vita ottenuta dallo spettro di carico considerato.

4.2. Intervalli di ispezione

L'analisi della POD delle cricche, basata sull'Eq. (1), è stata condotta in termini di variazione dell'intervallo di ispezione espresso in chilometri. Fig. 13a mostra l'andamento ottenuto di PC_{DET} considerando la curva POD del sistema BAT e quella del tradizionale Far End Scan [16].

In generale, sembra che il sistema BAT produca risultati migliori rispetto al Far End Scan. Considerando la lunghezza degli intervalli di ispezione adottati per il Pendolino (tipicamente 200.000 km), Fig. 13b mostra che il valore PC_{DET} ottenuto con BAT è uguale a 1, mentre quello ottenuto con il Far End Scan è leggermente inferiore. Inoltre, dato un qualsiasi valore PC_{DET} , BAT produce sempre intervalli di ispezioni più lunghi: ad esempio, considerando $PC_{DET}=0.99$, la lunghezza dell'intervallo di ispezione usando BAT dovrebbe essere impostata a 550.000 km, mentre usando il Far End Scan a 210.000 km. Ciò può sembrare strano visto che la curva POD del BAT è più alta di quella del Far End Scan solo per piccole profondità di cricca (meno di circa 5 mm), ma Fig. 12 mostra che questa profondità di cricca viene raggiunta giusto prima del cedimento finale.

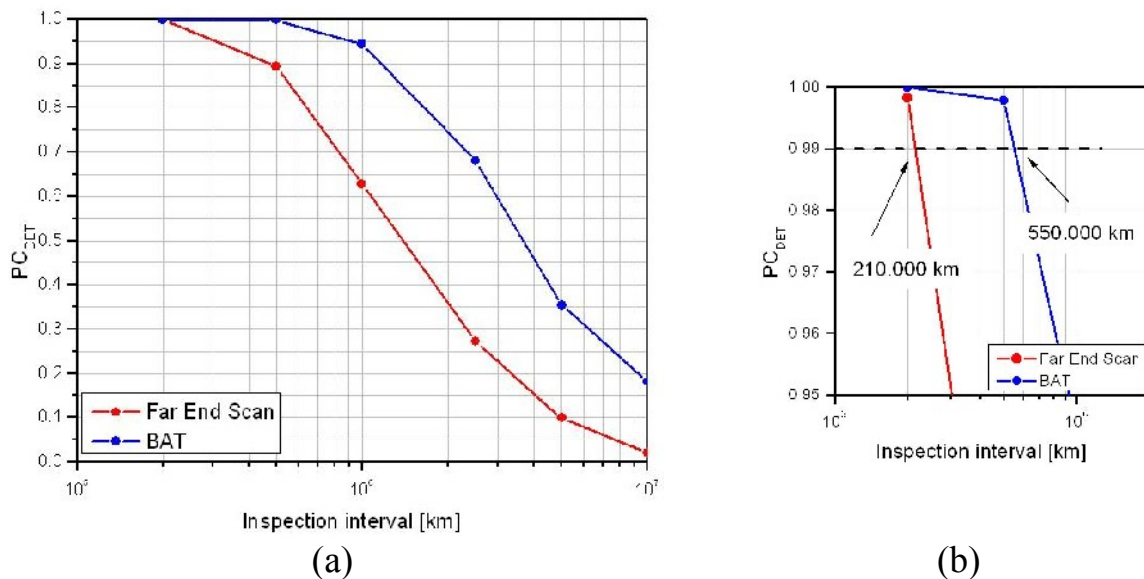


Figura 13 – Probabilità cumulata di rilevamento contro intervallo di ispezione.

Infine, dal punto di vista operativo, è necessario rimarcare che BAT rende possibile ispezionare l'intero assile con angoli costanti tra le sonde ed il volume ispezionato, mentre

il Far End Scan non permette l'ispezione di differenti parti dell'assile allo stesso tempo e a sensibilità costante.

5. Conclusioni

E' stata studiata la definizione degli intervalli di ispezione di assili ferroviari considerando l'applicazione speciale dell'acciaio 30NiCrMoV12 per treni ad alta velocità, assili cavi e ispezioni UT. Esperimenti UT dedicati e simulazioni mediante CIVA[®] 8.1 hanno innanzitutto permesso di determinare le curve POD al caletto e alla transizione T della borosonda sviluppata su specifiche Lucchini. Le curve POD hanno permesso, insieme alle stime di vita a propagazione, di derivare la probabilità cumulata di rilevamento di cricche e difetti in termini di lunghezza dell'intervallo di ispezione. Il risultato ottenuto è che la configurazione studiata di borosonda presenta migliori performance rispetto al tradizionale Far End Scan con il vantaggio aggiuntivo di avere sensibilità costante in tutte le sezioni di assile.

Infine, la configurazione BAT qui considerata potrebbe essere arricchita di ulteriori sonde col risultato di diminuire ulteriormente i costi di esercizio grazie ad un ulteriore miglioramento della curva POD per tutte le sezioni dell'assile e ad un incremento della distanza percorribile in sicurezza tra ispezioni.

6. Bibliografia

1. BS EN13261. CEN, 2003.
2. EN13103. CEN, 2001.
3. EN13104. CEN, 2001.
4. SMITH, R.A. et al.: In: Proc. 13th Int. Wheelset Congress. 2001, Roma, Italy.
5. ZERBST, U. et al.: Eng. Fract. Mech. 72, 2003, 209.
6. STONE, D.H. et al.: J. Rail and Rapid Transit 218, 2004, 357.
7. CANTINI, S. et al.: In: Proc. 14th Int. Wheelset Congress. 2004, Orlando, USA.
8. BERETTA, S. et al.: In: Fatigue and Fracture Mechanics: 34th Volume, ASTM STP 1461. 2004, S. R. Daniewicz, J. C. Newman and K.-H. Schwalbe, Eds., ASTM International, West Conshohocken, PA.
9. BERETTA, S. et al.: J. Rail and Rapid Transit 218, 2004, 317.
10. BERETTA, S. et al.: Eng. Fract. Mech 73, 2006, 2627.
11. UNI 6787-71: Italian National Standardisation Bureau, 1971.
12. GILARDONI C. et al.: In: Proc. 15th Int. Wheelset Congress. 2007, Prague, Czech Republic.
13. CEA: CIVA 8 User Manual, Website: <http://www-civa.cea.fr>.
14. G. PATELLI et al.: Technical Instruction QUA T.I. 065 Rev.5. 2007, Lucchini Sidermeccanica S.p.A., Lovere (BG), Italy.
15. GEORGIU, G.A.: Research Report 454. HSE Books, Health and Safety, Executive, UK.
16. BENYON, J.A. et al.: In: Proc. 13th Int. Wheelset Congress. 2001, Roma, Italy.
17. NASA: NASGRO User Manual, Website: www.nasgro.swri.org.
18. ELBER, W.: In: ASTM STP 486, 1971, 230.
19. CARBONI, M. et al.: Accepted for publication on J. Rail and Rapid Transit.
20. GRAVIER, N. et al.: Revue générale des chemins de fer 3, 1999, 33.