



**AIPnD**  
Associazione Italiana  
Prove non Distruttive  
Monitoraggio Diagnostica

# Milano2015

16° Congresso AIPnD

Conferenza Nazionale sulle Prove non Distruttive Monitoraggio Diagnostica

---

---

Aeronautica ed Aerospaziale	Affidabilità e Sicurezza	Conservazione dei Beni Culturali	Controlli e Caratterizzazione Meccanica dei Materiali Compositi
Controlli e Caratterizzazione Meccanica e Monitoraggio dell'Ingegneria Civile	Formazione, Qualificazione e Certificazione del Personale	Impianti a Fune	Manutenzione degli Impianti Industriali
Radiografia – Radiografia Digitale	Tecniche Innovative nel Controllo NDT in campo Civile	Tecniche Innovative nel Controllo NDT in campo Industriale	Tecnologia e Strumentazione
Trasporto Ferroviario e Marittimo	Sessione Speciale Elettrotecnica	Comitato Scientifico	

---

---

<b>IDN 5</b>	<b>ELABORAZIONE DI CURVE POD MULTI PARAMETRO PER IL MONITORAGGIO STRUTTURALE MEDIANTE ONDE DI LAMB</b>	<a href="#">pdf download</a>
	<i>A. Gianneo, M. Carboni, M. Giglio</i>	

---

---

<b>IDN 6</b>	<b>CONTROLLO ULTRASONORO DI RECIPIENTI IN RAME PER LO STOCCAGGIO FINALE DI RIFIUTI NUCLEARI: ATTENUAZIONE STRUTTURALE ED ELABORAZIONE DI CURVE POD</b>	<a href="#">pdf download</a>
	<i>A. Gianneo, M. Carboni, C. Mueller, U. Ronneteg</i>	

---

---

<b>IDN 7</b>	<b>VERIFICHE DELLO STATO DI CONSERVAZIONE DI MEMBRATURE DI GENERATORI DI VAPORE ESERCITI DA OLTRE 45 ANNI. GLI EFFETTI DEL DEGRADO STRUTTURALE DOVUTO ALL'ESERCIZIO</b>	<a href="#">pdf download</a>
	<i>C. Delle Site, F. Giacobbe, E. Artenio, C. Fossati</i>	

---

---

<b>IDN 8</b>	<b>VERIFICA DELLA CONFORMITÀ DI APPARATI PER LA MAGNETOSCOPIA ALLA DIRETTIVA 2013/35 CE</b>	<a href="#">pdf download</a>
	<i>A. Canova, L. Giaccone</i>	

---

---

# **CONTROLLO ULTRASONORO DI RECIPIENTI IN RAME PER LO STOCCAGGIO FINALE DI RIFIUTI NUCLEARI: ATTENUAZIONE STRUTTURALE ED ELABORAZIONE DI CURVE POD**

A. Gianneo<sup>1</sup>, M. Carboni<sup>1</sup>, C. Mueller<sup>2</sup>, U. Ronneteg<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Milano, Via La Masa 1, 20156 Milano, Tel. 02-23998253, andrea.gianneo@polimi.it, michele.carboni@polimi.it

<sup>2</sup> BAM, Berlin, Germany, christina.mueller@bam.de

<sup>3</sup> SKB, Oskarshamn, Sweden, ulf.ronneteg@skb.se

La presente ricerca tratta l'ispezione ultrasonora, mediante tecniche innovative Phased Array, e la formulazione delle relative curve di affidabilità (POD), di recipienti in rame a mantello cilindrico per lo stoccaggio finale di scorie nucleari. Ricerche precedenti hanno messo in evidenza l'effetto di filtraggio "passa-basso" sullo spettro del segnale UT a causa degli elevati livelli di attenuazione strutturale presenti nei suddetti manufatti metallici. Ciò implica l'impossibilità di ottenere stime attendibili dei livelli di attenuazione basandosi solamente sulle ampiezze degli echi di fondo. Pertanto, sulla base di differenti livelli di attenuazione, sono stati ricavati dei provini a spessore di parete crescente da recipienti in rame realizzati secondo processi di deformazione plastica a caldo per estrusione e trafilatura. L'analisi degli echi di fondo, condotta nel dominio delle frequenze, ha permesso dapprima di mettere in evidenza una distribuzione del grano non uniforme nello spessore del mantello cilindrico ed in seguito l'effetto della struttura cristallina in termini di banda e frequenza centrale del segnale UT. Successivamente, è stato possibile determinare l'effettiva attenuazione strutturale legata alla distribuzione del grano cristallino e conseguentemente l'implementazione delle curve POD della procedura di ispezione.

## **1. Introduzione**

Secondo il progetto svedese elaborato dalla compagnia SKB (Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company) lo stoccaggio finale dei rifiuti nucleari prevede l'utilizzo di diverse barriere, si veda Fig. 1, ognuna delle quali esplica una specifica funzione. Nel merito, la prima barriera è costituita da un mantello cilindrico in rame in cui vengono immagazzinati i pellet di uranio esausto tramite un inserto in ghisa sferoidale; in tal modo è garantita sia la resistenza alla corrosione che meccanica [1, 2]. Successivamente è previsto uno strato di bentonite con la funzione di buffer proteggendo il contenitore in rame da fenomeni corrosivi, movimenti del terreno e fuoriuscite di materiale radioattivo; il tutto è a sua volta immerso in un basamento roccioso a 500m di profondità.

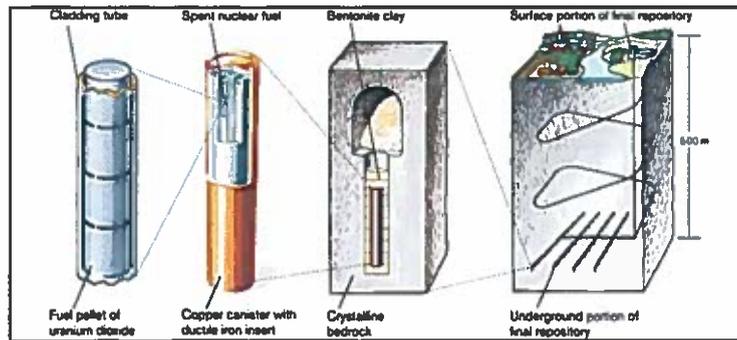


Figura 1: Soluzione SKB per lo stoccaggio finale del combustibile esausto [1, 2].

Le criticità risiedono nell'integrità strutturale del recipiente in rame che deve essere garantita nei 100000 anni previsti di vita utile, e nell'impossibilità di condurre ispezioni intervallate a seguito dello stoccaggio finale. Ne discende l'importanza del controllo qualità nella produzione e nei CND. In particolar modo nella seguente memoria vengono caratterizzate, tramite elaborazione di curve POD [3], le performance raggiungibili nel controllo non distruttivo dei recipienti in rame tramite tecnica non convenzionale ultrasonora PAUT.

## 2. Ispezione PAUT del mantello cilindrico

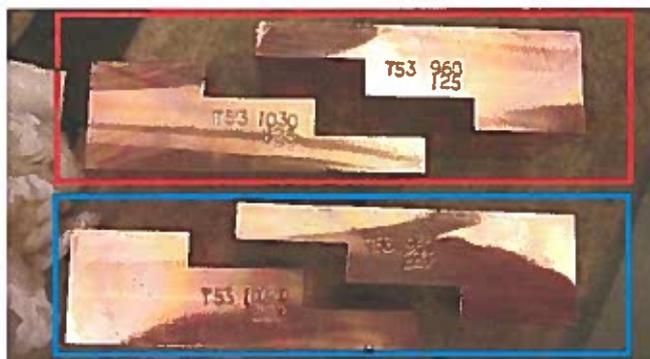
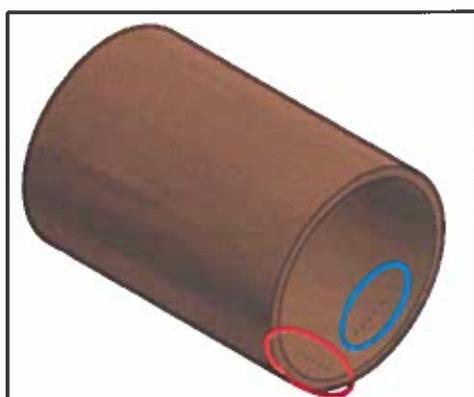
Come messo in evidenza da studi precedenti [4, 5, 6], l'ispezione ultrasonora è fortemente condizionata dagli elevati livelli di attenuazione strutturale riscontrabili nel mantello cilindrico ed è pertanto riconosciuto nella presente ricerca come un fattore importante nella definizione delle curve POD. Nel merito, i valori di attenuazione oltre ad essere fortemente eterogenei, vi è una forte variabilità sia ispezionando lo stesso lotto di recipienti in rame sia tra recipienti prodotti con diverse tecniche [6], determinano un filtraggio passa-basso del contenuto spettrale UT in termini di banda e frequenza centrale.

A tal fine, per studiare l'effetto della struttura cristallina sulla propagazione ultrasonora [7, 8], sono stati ricavati da diversi spezzoni di tubo, provenienti da diverse metodologie di produzione, dei provini a spessore crescente (17-34-49 mm). Per brevità nella seguente memoria viene preso come riferimento il recipiente in rame T53, proveniente da un processo di estrusione: presenta due aree a differente attenuazione strutturale lungo la direzione assiale e circonferenziale, nel seguito identificate come T53-Low e T53-High.

La nomenclatura utilizzata per i provini estratti, i.e. T53-XXX-YYY, individua rispettivamente lo spezzone di tubo ispezionato, le coordinate assiali e circonferenziali come in Fig. 2 a), b); in Tab.1 sono specificate invece le zone di estrazione.

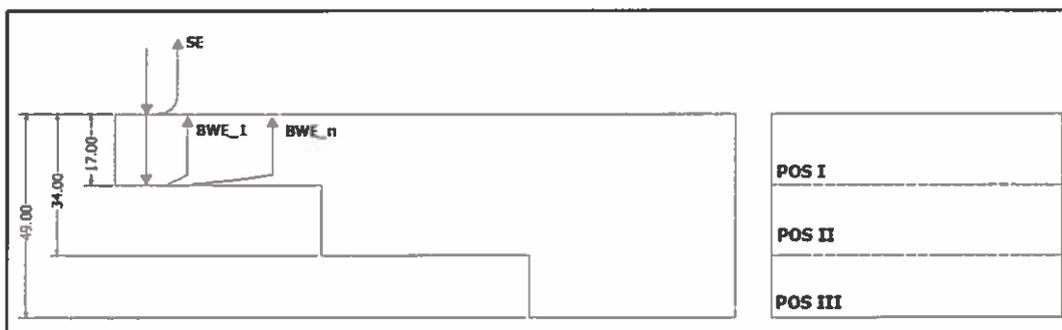
Tabella 1: Provini a gradino estratti dallo spezzone di tubo T53

Nomenclatura	Pos. Circ. (°)	Pos. Assiale (mm)	Superficie Piana	Zona di attenuazione
T53 960-125	125	960	Outer dia.	Alta
T53 1030-125	125	1030	Inner dia.	Alta
T53 960-220	220	960	Outer dia.	Bassa
T53 1030-220	220	1030	Inner dia.	Bassa



a)

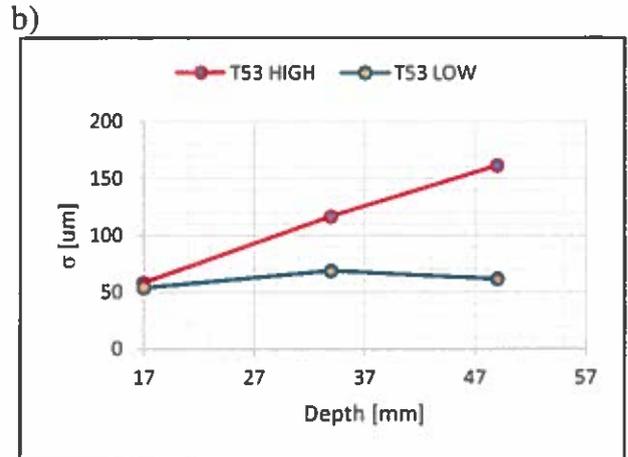
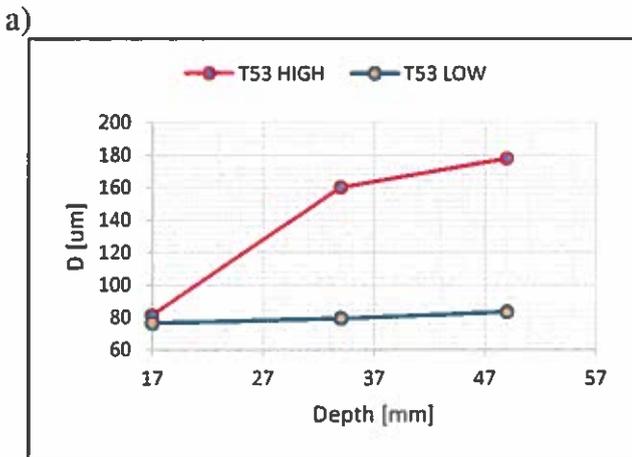
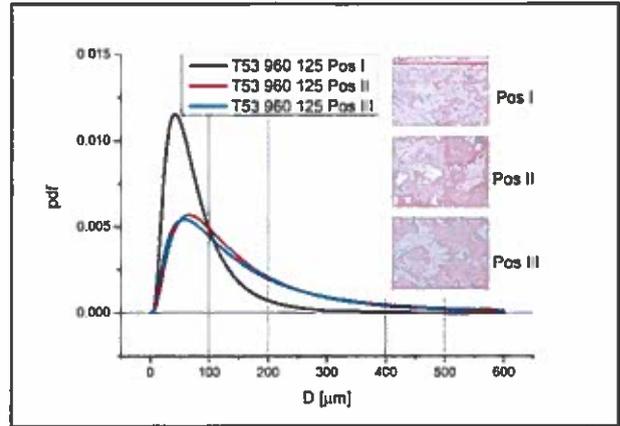
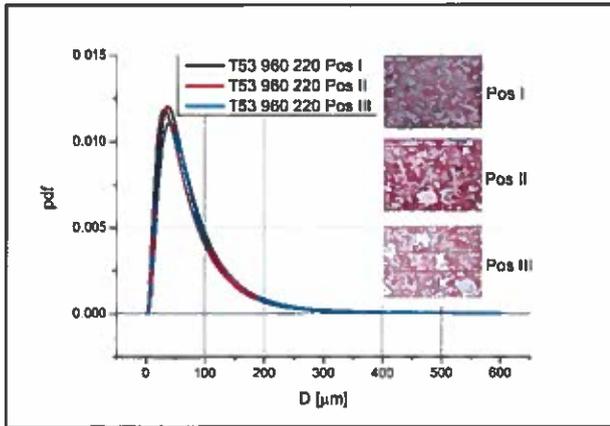
b)



c)

Figura 2: a) Recipiente in rame estruso T53, b) provini a gradino, c) schema ispezione.

La distribuzione dei grani cristallini lungo lo spessore, nelle posizioni indicate in Fig. 2 c) con POS I, POS II e POS III, è stata valutata tramite la norma ASTM E112-13 [9]; in figura 3 sono riportate rispettivamente le distribuzioni secondo log-Normale nonché valor medio e deviazione standard della struttura cristallina lungo lo spessore del mantello in rame



c) d) Diametro medio e Deviazione Standard.

L'analisi micrografica ha permesso di mettere in evidenza la presenza contemporanea di due aree differenti: difatti, il provino T53-Low, proveniente dalla zona circonferenziale, è caratterizzato da una distribuzione cristallina pressoché omogenea lungo lo spessore, assestandosi su un valor medio di 80 μm, Fig. 3 a), c). Al contrario, Fig. 3 b), d) nel provino T53-High è presente un gradiente positivo sia in termini di valor medio che di deviazione standard.

Qualitativamente, l'effetto di una distribuzione dei grani omogenea piuttosto che eterogenea lungo lo spessore è evidenziata dai C-Scan riportati in Fig. 4; si noti inoltre come nel provino T53-High la direzione di ispezione rispetto all'ordine con cui si presenta la struttura cristallina ha un notevole impatto come evidenziato dalle Fig. 4 c) e d).

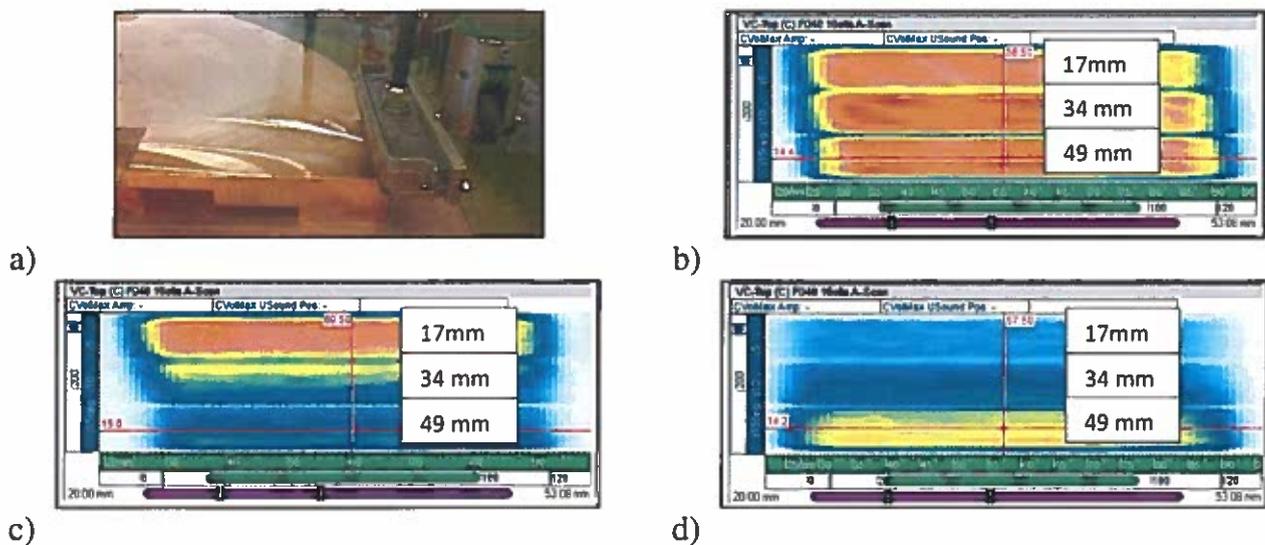


Figura 4: a) Setup Sperimentale, b) T53-Low C-Scan, c), d) C-Scan T53-High.

Il setup sperimentale impiegato nella realizzazione dei C-Scan è lo stesso utilizzato dalla SKB per l'ispezione dei recipienti in rame. In dettaglio prevede l'utilizzo di una tecnica totalmente automatizzata PAUT in immersione, con una colonna d'acqua di 30 mm, mediante una sonda da 128 elementi, 1 mm di pitch. Quest'ultima opera nominalmente ad una frequenza centrale di 3.5 MHz ed è caratterizzata da una banda del 62%; l'apertura è costituita da 16 elementi attivi con focalizzazione elettronica a 40 mm nel mantello cilindrico.

Come conseguenza il calcolo dei livelli di attenuazione basato sui rapporti tra consecutivi echi di fondo nel dominio del tempo non restituisce valori attendibili, a causa dello shift del contenuto spettrale, nonché non è possibile determinare la relazione che intercorre tra il valore di attenuazione e la frequenza con un'unica sonda. Una maniera più efficace ed efficiente è quella di analizzare i singoli echi di fondo nel dominio delle frequenze, calcolandone la propria trasformata di Fourier discreta (DFT) come illustrato in Fig. 5. Noti gli spettri è possibile dapprima determinare l'attenuazione apparente tramite un rapporto tra un eco di fondo e il successivo:

$$\hat{\alpha}(f) = \frac{dB\left(\frac{X(f)_{BWE(l)}}{X(f)_{BWE(l+1)}}\right)}{2L} \left[\frac{dB}{m}\right] \quad (1)$$

e successivamente, corretta l'Eq. (1) delle perdite di interfaccia acqua-rame e dell'attenuazione geometrica del fascio UT, è possibile determinare il "vero" valore di attenuazione strutturale.

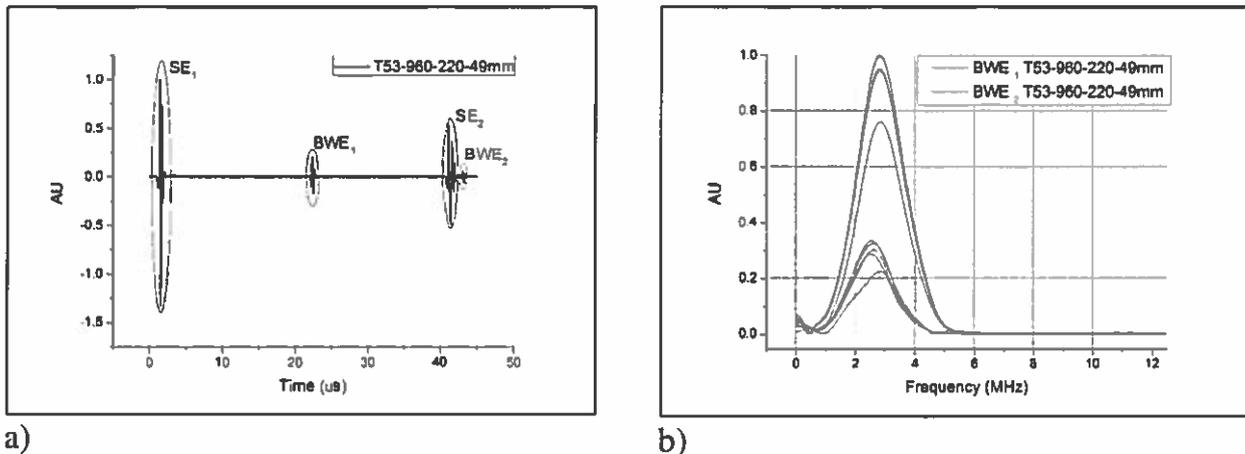


Figura 5: a) A-Scan, b) DFT del segnale.

Le suddette analisi sono riportate in Fig. 6 con riferimento alla frequenza di 3 MHz. Come ci si aspetterebbe, nel caso T53-Low la distribuzione cristallina omogenea restituisce in output, indipendentemente dalla direzione di ispezione e spessore, livelli di attenuazione e shift dello spettro sugli stessi livelli. Tale comportamento non è riscontrabile nel provino T53-High: difatti, in funzione della direzione di ispezione, o meglio, dell'ordine con cui il fascio interagisce con i grani cristallini possono esaltare oppure smorzare i valori di attenuazione.

In accordo con la distribuzione cristallina di Fig. 3, ispezionando il provino T53-High lato interno l'attenuazione maggiore si riscontra sottopelle (grani grossolani) mentre ispezionandolo lato esterno, maggiore sullo spessore di 49 mm. Interessante è anche notare che, come è stato evidenziato nei C-Scan di Fig. 4 c) e d), a pari spessore, ad esempio 49 mm, si possono avere elevati o modesti valori di attenuazione in funzione dell'ordine di interazione con la struttura cristallina, sebbene il numero di interazioni nello spessore sia il medesimo.

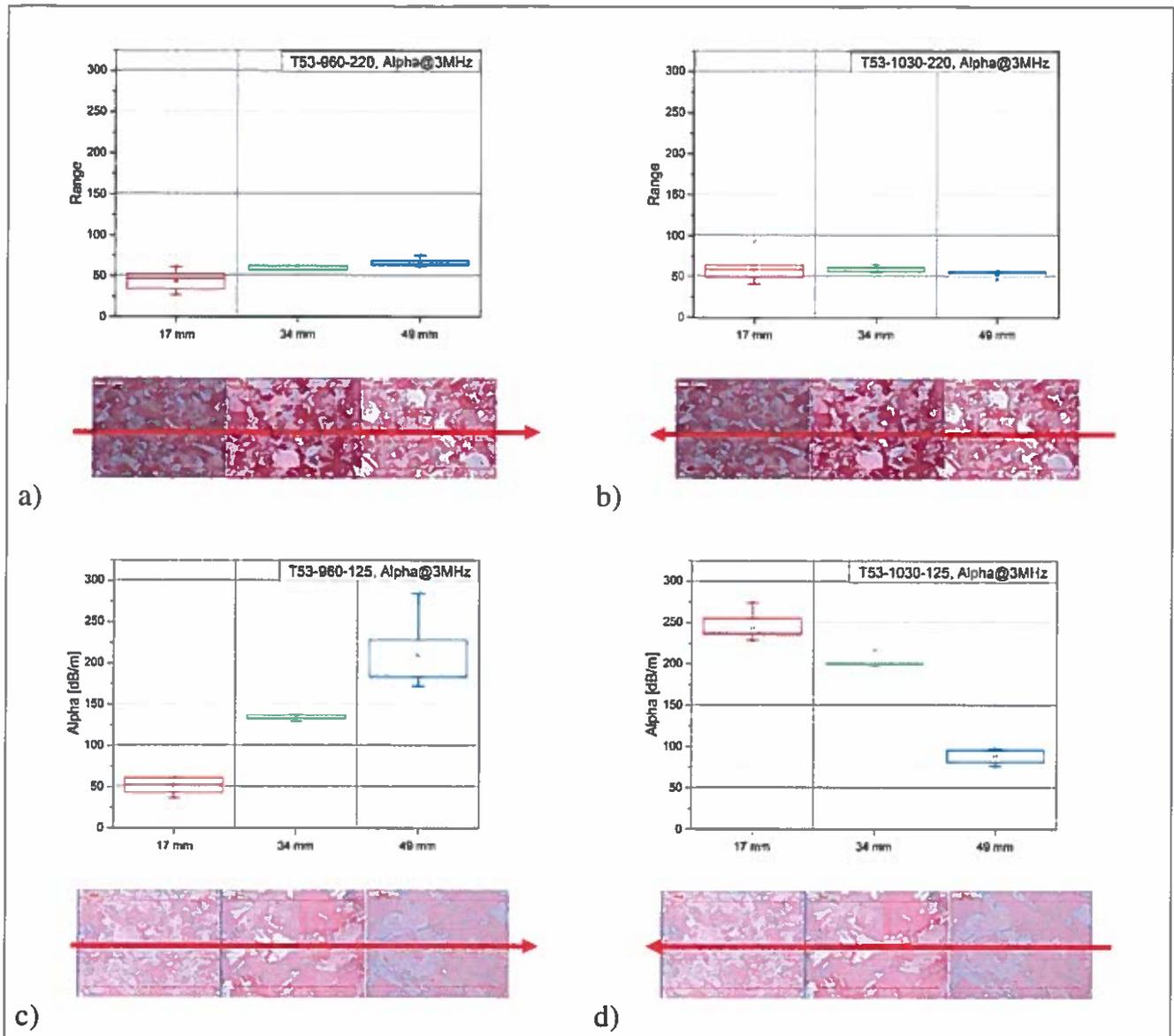


Figura 6: Attenuazione strutturale @3MHz: a), b) T53-Low, c), d) T53 High

Tale fenomeno fisico trova spiegazione tenendo conto del filtraggio passa basso operato sullo spettro del segnale per via dell'interazione del fascio con la struttura: fintanto che viene preservato il contenuto ad alta frequenza, inizialmente  $f_c=3.5\text{MHz}$  con il 62% di banda, e questo interagisce con i grani grossolani si avranno valori di attenuazione elevati. Questo è evidente nel provino T53-960-125 a 49 mm laddove il fascio UT risente poco della struttura cristallina fine ed interagisce invece, con il contenuto spettrale ad elevata frequenza pressoché intatto, con i grani grossolani. Viceversa nel T53-1030-125 il fascio incontra immediatamente il grano grossolano subendo uno shift importante ma tale da rendere "modeste" le successive interazioni in quanto il contenuto ad alta frequenza si è perso immediatamente nei primi millimetri.

### 3. Performance dell'ispezione PAUT

Le performance del controllo PAUT sono state quantificate per mezzo dell'elaborazione di curve POD ampiezza-dimensione del difetto basate sul modello di Berens [3]. A tal fine, lungo la direzione assiale (alta attenuazione) e quella circonferenziale (bassa attenuazione) del recipiente T53, sono stati ricavati dei fori a fondo piatto di profondità 49mm e diametro compreso tra 1 e 6 mm, come illustrato in Fig. 2 a). Per ogni FBH sono state ripetute due misure a sufficiente distanza temporale così da considerarle come misure indipendenti e non ripetute. Tale campionamento ha richiesto un considerevole sforzo in termini di tempo e costi per le lavorazioni e la produzione di uno spezzone di recipiente; l'onere sarebbe stato maggiore nel caso in cui si fosse voluto caratterizzare la curva POD utilizzando 40 campioni come descritto nella MIL-HDBK-1823A [10].

Vista l'onerosità della derivazione puramente sperimentale della curva POD, gli autori hanno inoltre investigato, tramite software di simulazione UT CIVA 11.1, un approccio "Full Model-Assisted Probability of Detection" [10], in cui, tramite estrazione Monte Carlo, è possibile replicare la propagazione dell'incertezza derivante dall'esperimento, una volta assegnati i fattori chiave. In particolar modo, essendo l'ispezione automatizzata, si è modellata come sorgente di variabilità l'attenuazione strutturale tramite una distribuzione statistica gaussiana, sulla base dei dati raccolti sperimentalmente. La calibrazione del modello è stata effettuata utilizzando l'eco di fondo del recipiente T53 in una zona a bassa attenuazione. Come evidente dalla Fig. 7 i valori di  $d_{90/95}$  previsti dall'approccio MAPOD e POD sperimentale sono in ottimo accordo, prevedendo per la zona a bassa attenuazione, T53-Low, un difetto equivalente di 1.22 mm mentre per quella ad alta, T53-High, di circa 2.7mm.

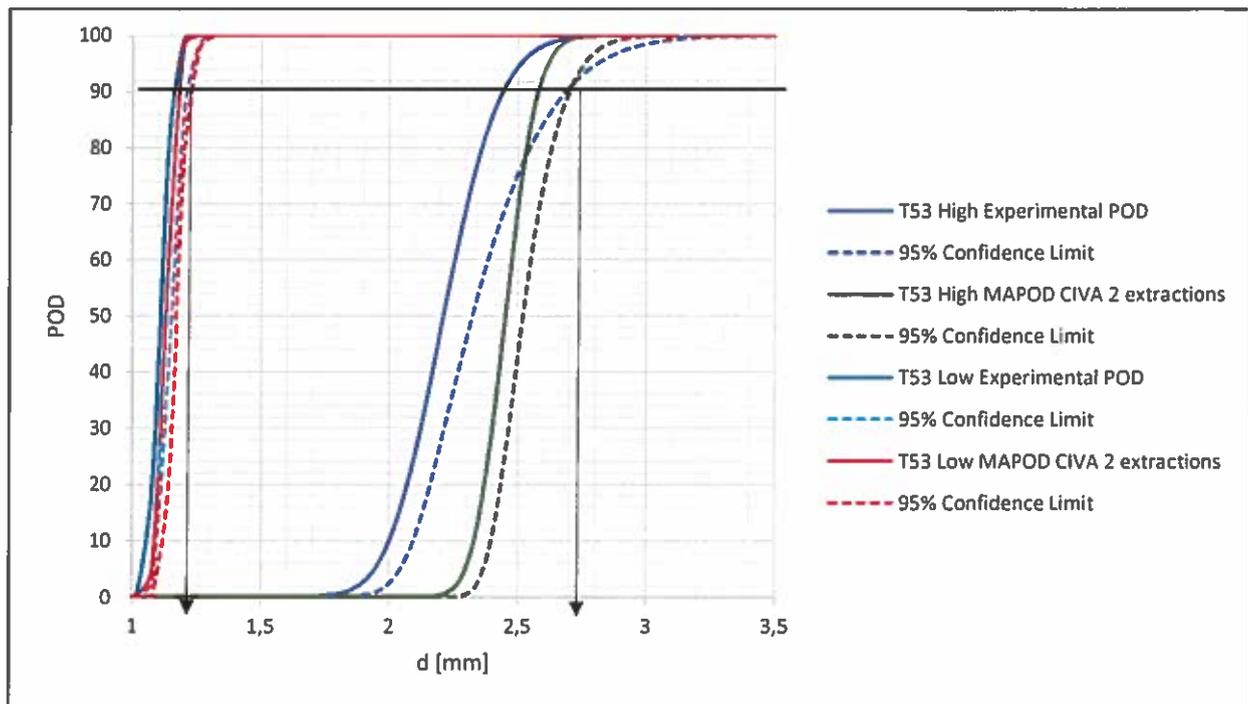


Figura 7: Confronto tra curve POD sperimentali e numeriche Full-MAPOD

#### 4. Conclusioni

Nella presente memoria è stata affrontata l'ispezione PAUT di recipienti in rame per lo stoccaggio finale di rifiuti nucleari. In particolar modo lo studio del segnale UT nel dominio delle frequenze ha messo in evidenza una correlazione tra il livello di attenuazione e la distribuzione dei grani cristallini nello spessore, nonché l'effetto del verso di ispezione rispetto all'ordine con cui si presenta una struttura cristallina nello spessore. In aggiunta, vista l'onerosità legata ai tempi e ai costi per ottenere sperimentalmente una curva POD che quantifichi le performance raggiungibili dell'ispezione, si è indagato un approccio Full-MAPOD. A tal fine, giudicata come unica sorgente di variabilità del controllo l'attenuazione strutturale, e sulla base di una distribuzione statistica gaussiana determinata in una precedente fase di caratterizzazione sperimentale su provini a spessore crescente, si è operata un'estrazione Monte-Carlo. I risultati ottenuti sono molto promettenti: difatti realizzando due estrazioni per FBH in modo da avere lo stesso numero di campioni sperimentali, i valore di  $d_{90/95}$  risultano in ottimo accordo con quelli basati sui dati sperimentali. Infine, sulla base delle performance raggiungibili a seconda dei livelli di attenuazione presenti nei mantelli cilindrici, si potrà emettere un giudizio di ispezionabilità del componente.

#### Bibliografia

1. J Pitkänen, Posiva Oy, Inspection of Disposal Canisters Components, POSIVA 2012-35 Report, December 2013.
2. U Ronneteg, M Bertovic, Reliability Studies, a Tool in the Development of Techniques for NDT of the Canister for the Swedish Spent Nuclear Fuel, 5th European-American Workshop on Reliability of NDE, October 7-10 2013.
3. A P Berens, NDE Reliability Data Analysis – Metals Handbook Volume 17, 9th Edition: Non-destructive Evaluation and Quality Control, ASM International, OH, 1989.
4. M Pavlovic, K Takahashi, U Ronneteg, J Pitkänen, C Müller, Multi-Parameter Influence on the Response of the Flaw to the Phased Array Ultrasonic NDT System. The Volume POD. In Proceedings of the 4th European-American Workshop on Reliability of NDE, Berlin, June 24-26, 2009.
5. M Pavlovic, K Takahashi, C Müller, Probability of Detection as a Function of Multiple Influencing Parameters”, Insight Vol 54 No. 11, pp. 606-611, November 2012.
6. C Müller, T. Heckel, P. Brömel, M. Pavlovic, U. Ronneteg, ‘Attenuation dependent detectability at ultrasonic inspection of copper’, SKB, 2014.
7. R L Smith, The effect of grain size distribution on the frequency dependence of the ultrasonic attenuation in polycrystalline materials, Ultrasonics, Volume 20, Issue 5, pp. 211-214, September 1982.
8. E P Papadakis, Revised Grain-Scattering Formulas and Tables, Journal of the Acoustical Society of America, 37, 703, November 1965.
9. ASTM E112-13, Standard Test Methods for Determining Average Grain Size
10. MIL-HDBK-1823A, Non Destructive Evaluation System Reliability Assessment, April 2009