

SAFAP 2018

SICUREZZA E AFFIDABILITA' DELLE ATTREZZATURE A PRESSIONE

La gestione del rischio dalla costruzione all'esercizio a 130 anni dalla prima legge sulla sicurezza delle caldaie a vapore

INAIL

Bologna - 28 e 29 novembre 2018

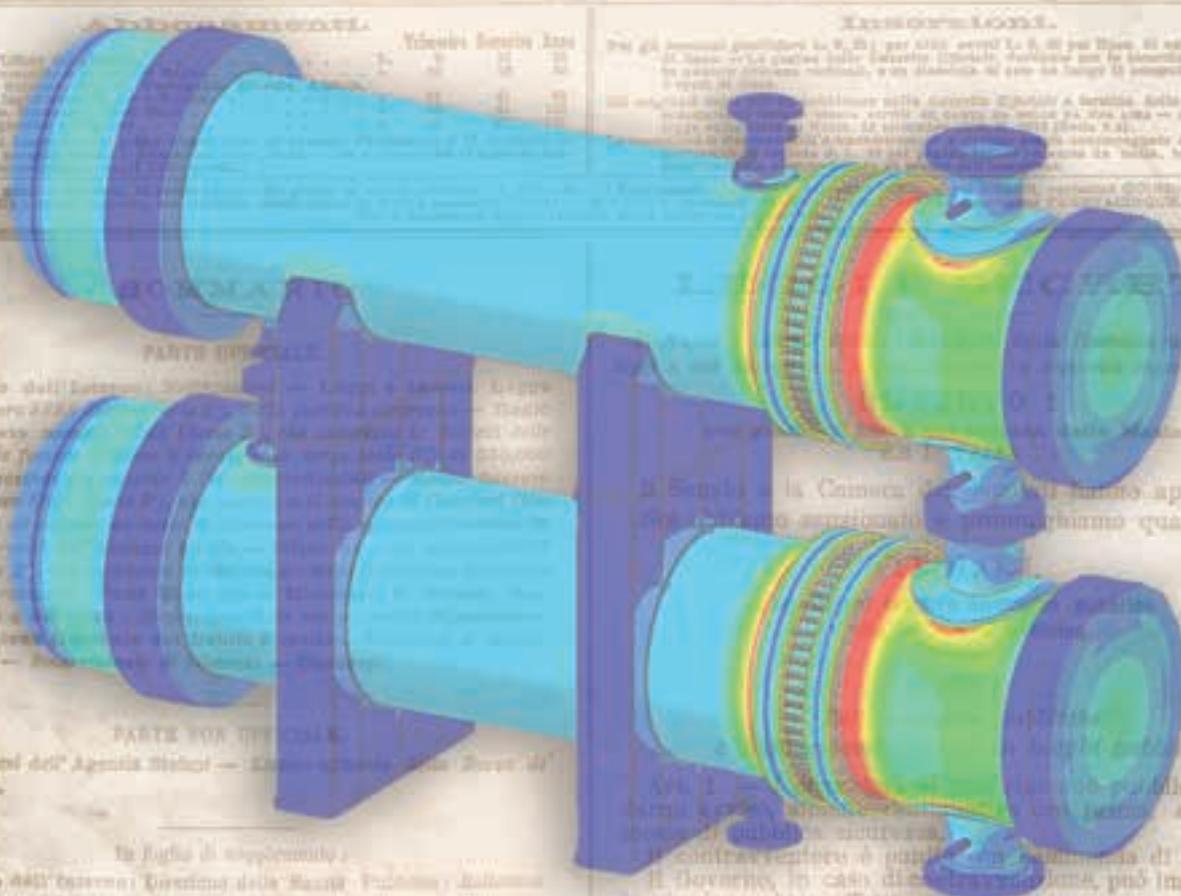
GAZZETTA UFFICIALE

DEL REGNO D'ITALIA

ANNO 1888

ROMA — SABATO 29 GENNAIO

N.° NUM. 22



PARTE UFFICIALE

MINISTERO DELL'INTERNO

Confronto di modelli numerici per lo studio della propagazione dei segnali EA

A. Chiappa¹, F. Giorgetti¹, M. Messina², G. Augugliaro³, M.E. Biancolini¹

¹ Università degli Studi di Roma "Tor Vergata"

² Alma Mater Studiorum - Università di Bologna

³ Inail - Dit

Sommario

La tecnica delle emissioni acustiche (EA) consente di definire sistemi di monitoraggio estremamente precisi ed affidabili. Nell'ambito del progetto SmartBench le informazioni sullo stato di salute dei componenti vengono aggregate nella piattaforma per rendere la sicurezza integrata, attiva e smart. La progettazione e l'interpretazione dei dati di una rete di sensori EA o di nodi sensore connessi fra loro in modalità wireless sono fondate su una accurata previsione della propagazione delle onde meccaniche all'interno delle apparecchiature. La simulazione numerica dei transitori è una tecnica ben consolidata ma risulta molto costosa in termini di tempi di calcolo. Nella presente memoria si riportano diversi scenari di propagazione bulk e guidata (2D e 3D) simulati con software commerciali differenti (COMSOL, ANSYS APDL e NX NASTRAN). I risultati vengono confrontati sia in termini di accuratezza che in termini di prestazioni. Si studia infine la scalabilità nel caso in cui si ricorra all'uso del super calcolo dimostrando un sostanziale abbattimento del tempo richiesto per la simulazione.

1. Introduzione

Le onde guidate (ultrasonic guided waves, UGW) stanno emergendo come un approccio efficace per i controlli non distruttivi e per il monitoraggio dell'integrità di strutture che si comportano come guide d'onda. Rispetto alle onde bulk hanno una maggiore versatilità e consentono di ispezionare strutture a forma di piastra o di trave come tubature e binari ferroviari [1,2]. La capacità di propagare in un mezzo dipendono dal rapporto fra lunghezza d'onda e dimensione del dominio [3], se la lunghezza d'onda è maggiore dello spessore si ha che l'effetto dei contorni diventa dominante e si possono instaurare onde guidate, in caso contrario il mezzo si comporta come infinito e si hanno onde bulk. La verifica strutturale mediante UGW si basa su due fenomeni di propagazione: la riflessione e la distorsione del segnale che incontra un difetto, l'emissione spontanea di vibrazioni prodotta dall'evoluzione di un difetto. Il comportamento dispersivo delle UGW, dovuto alla dipendenza della velocità di fase dalla frequenza ed alla presenza di modi diversi, ne complica l'interpretazione e deve essere analizzato in modo corretto. Ogni modo è caratterizzato da una curva di dispersione e una frequenza eccitatrice può coinvolgere la risposta di più modi. Il calcolo della dispersione per strutture in parete sottile [4] può essere studiato mediante gli elementi finiti (FE), l'approccio può essere esteso al caso di guide d'onda solide [5] mediante una discretizzazione FE della sezione retta abbinato allo studio analitico nella direzione di propagazione (metodo FE semi analitico, semi-analytical finite element SAFE). Lo stesso approccio è stato poi esteso [6] sfruttando la simmetria ciclica. Il metodo SAFE è stato ulteriormente migliorato in studi successivi [7] tenendo anche conto degli effetti di smorzamento adottando una formulazione complessa della matrice di rigidezza [8]. Mentre il metodo SAFE è uno strumento utile per determinare le proprietà dispersive dei modi propagativi ed evanescenti nelle guide d'onda, analisi FE nel dominio del tempo sono ancora la scelta prediletta se le forme d'onda o il campo di spostamenti sono d'interesse,

come nello studio [9] dove i calcoli condotti con ABAQUS EXPLICIT trovano un ottimo accordo con le evidenze sperimentali per la localizzazione di un difetto in un binario ferroviario. La validazione di tale metodo FE è riportata in [10] dove il caso della piastra piana, la cui soluzione analitica è nota, viene usato come riferimento. In [11] si riportano dei controlli incrociati rispetto a risultati numerici per il caso dei laminati ottenuti con ABAQUS, ANSYS, COMSOL e un software in-house. Sebbene ci sia una buona rispondenza in termini di risultati, i tempi di calcolo sono molto diversi e COMSOL dimostra di essere lo strumento più veloce.

Lo studio presentato in questa memoria si inquadra all'interno delle attività sull'uso delle Emissioni Acustiche del progetto Smartbench (www.smartbench-project.it) e riporta un confronto fra i risultati ottenuti nella simulazione FE della propagazione di onde ad ultrasuoni mediante tre software commerciali (COMSOL, ANSYS APDL e NX NASTRAN) per il caso di onde bulk e di onde guidate sia in 2D che in 3D.

2. Test numerici

In questo paragrafo si riportano i dettagli dello studio numerico relativi a scenari di propagazione di onde ultrasoniche di complessità crescente: un modello 2D in condizioni di deformazione piana per il caso sia delle onde bulk che guidate, un modello 3D completo per il caso di onde guidate. Il materiale è organizzato in sotto-paragrafi contenenti la descrizione del problema, la base teorica delle specifiche modalità di propagazione e una sintesi dei risultati ottenuti. In tutti i casi il materiale considerato per il modelli è un acciaio con le seguenti caratteristiche:

- Modulo di Young $E = 209 \text{ GPa}$
- Coefficiente di Poisson $= 0.3$
- Densità $\rho = 7800 \text{ Kg/m}^3$

I tre solutori si basano su una formulazione di tipo implicito: generalized- α nel caso di COMSOL, il metodo di Newmark nel caso di ANSYS APDL e una variante del metodo Newmark-Beta nel caso di NX NASTRAN. Se non specificato diversamente, i calcoli hanno girato con una workstation Dell Precision T5810 con processore a 3.50 GHz, 48.0 GB di RAM e 6 core.

2.1 Propagazione onde bulk in dominio 2D

Il primo confronto riguarda la propagazione di onde bulk in un blocco di acciaio rappresentato con elementi 2D in stato di deformazione piana.

La propagazione bulk ha velocità delle onde longitudinali e trasversali pari rispettivamente a $c_L = 6005.8 \text{ m/s}$ e $c_T = 3210.3 \text{ m/s}$. Lo smorzamento viene trascurato e il modello ha spessore unitario. Il dominio ha forma rettangolare con estremi liberi ed è sollecitato da una forza variabile nel tempo in direzione ortogonale alla mezzeria del lato superiore. Per motivi di simmetria il modello FEM, visibile in figura 2a, rappresenta metà del dominio ed ha quindi forma quadrata con la forza applicata al vertice in alto a destra; il lato sinistro è vincolato per rappresentare la simmetria, ovvero spostamento nullo in direzione ortogonale al lato stesso.

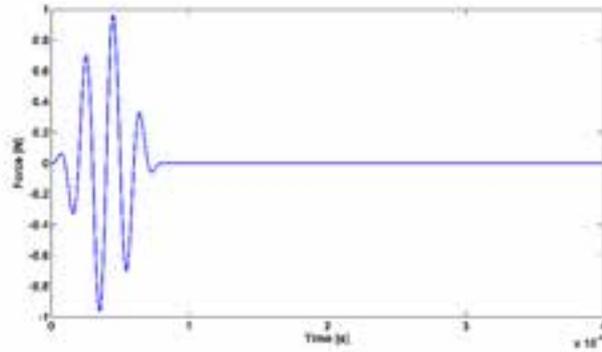


Figura 1. Evoluzione della forzante nel tempo

La forzante utilizzata per innescare la propagazione ondosa evolve nel tempo come mostrato in figura 1. Si tratta di una sinusoide con frequenza centrale $f_0 = 50\text{kHz}$, modulata da una funzione di Hann non nulla nell'intervallo da $t = 0$ a $t_{Hann} = 8 \cdot 10^{-5}$ s. Le simulazioni girano da $t = 0$ fino a $t_{end} = 4 \cdot 10^{-4}$ s. Considerando i valori della velocità delle onde e la frequenza della forzante si ha che la lunghezza d'onda delle onde longitudinali e di taglio risultano essere rispettivamente $\lambda_L = c_L / f_0 = 0.12$ m e $\lambda_T = c_T / f_0 = 0.064$ m. Il lato L del quadrato è stato scelto pari a 10 volte la lunghezza λ_L , $L = 10 \cdot \lambda_L = 1.2$ m.

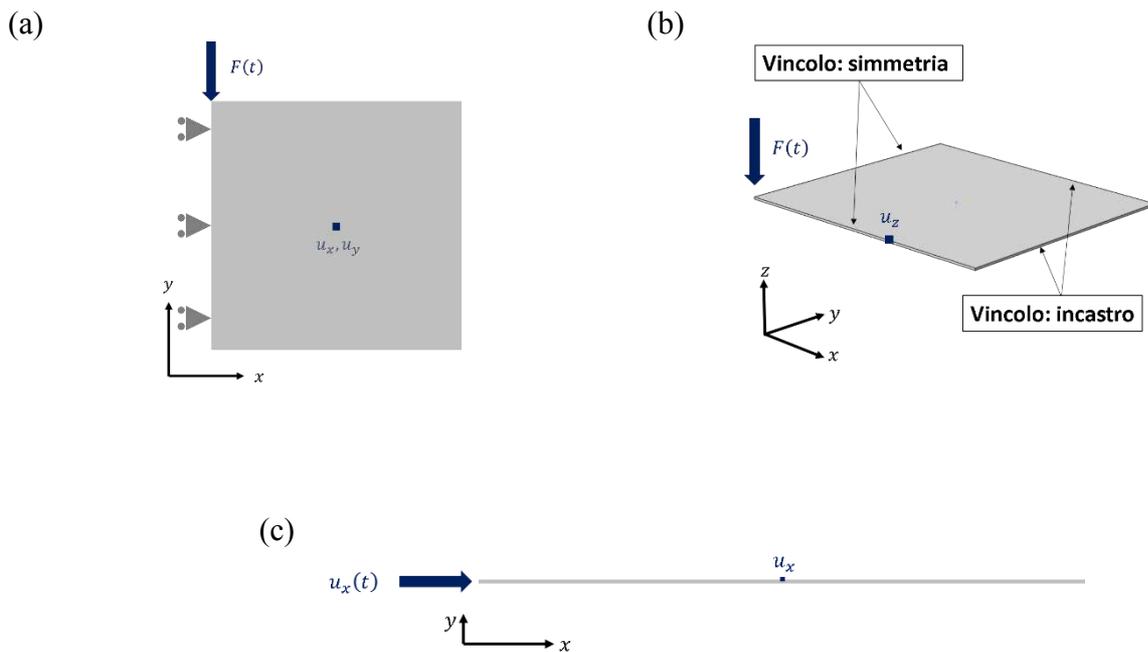


Figura 2. Domini di simulazione: (a) 2D bulk; (b) 3D guided; (c) 2D guided

Un aspetto cruciale per l'accuratezza e la velocità delle simulazioni, specialmente per le onde ultrasoniche, è la scelta della discretizzazione usata nello spazio e nel tempo. Nello studio [7] si raccomanda di utilizzare un lato dell'elemento finito b_e dipendente dalla più piccola lunghezza d'onda che si intende analizzare λ_{min} ; la risoluzione spaziale viene scelta fra un minimo di 10 a un massimo di 20 nodi per lunghezza d'onda.

$$\frac{\lambda_{min}}{20} \leq b_e \leq \frac{\lambda_{min}}{10} \quad (1)$$

Per quanto riguarda il passo temporale Δt , si sceglie la condizione più stringente fra (2) e (3), con f_{max} la frequenza più alta del problema dinamico.

$$\Delta t = \frac{b_{e,\min}}{c_L} \quad (2)$$

$$\Delta t = \frac{1}{20 \cdot f_{\max}} \quad (3)$$

Nel riferimento [10] si riporta come il limite di 20 divisioni nella (1) sia troppo severo e si dimostra che il vincolo sulla risoluzione spaziale è meno stringente rispetto a quello del lasso di calcolo. Nel riferimento [11] si suggerisce come 8 nodi per lunghezza d'onda siano già adeguati utilizzando un numero di Courant pari a 0.58 moltiplicando il termine a destra della (2). Poiché i requisiti di discretizzazione possono dipendere dal software (in questo studio COMSOL, ANSYS APDL e NX NASTRAN) e dallo specifico algoritmo, sono stati fatti alcuni tentativi per definire i valori ottimali. Il riscontro più semplice per verificare l'adeguatezza della discretizzazione è nel confrontare l'andamento della velocità di propagazione. A tale scopo si definisce un punto sonda (rappresentato dai quadratini blu in figura 2) ad una certa distanza dalla sorgente il quale riceve il segnale dopo un tempo che dipende dal rapporto fra la distanza e la velocità. Si è esaminato il centro del dominio quadrato posto ad una distanza $d = 0.85$ m dal punto di eccitazione. Poiché l'eccitazione è confinata dalla finestra di Hahn anche la risposta sul punto sonda è limitata all'intervallo $[t_{1L} \ t_{2L}]$ con:

$$t_{1L} = \frac{d}{c_L} = 1.414 \cdot 10^{-4} \text{ s} \quad t_{2L} = t_{Hamm} + \frac{d}{c_L} = 2.214 \cdot 10^{-4} \text{ s} \quad (4)$$

L'intervallo delle onde di taglio, $[t_{1T} \ t_{2T}]$, si calcola in modo analogo:

$$t_{1T} = \frac{d}{c_T} = 2.646 \cdot 10^{-4} \text{ s} \quad t_{2T} = t_{Hamm} + \frac{d}{c_T} = 3.446 \cdot 10^{-4} \text{ s} \quad (5)$$

Questi limiti consentono di verificare quanto siano attendibili i risultati numerici. Poiché le indicazioni di letteratura sono numerose, si è deciso di iniziare con la condizione più severa data dalla (1), usando 20 nodi per lunghezza d'onda, e dalla (2) moltiplicandone il risultato con un numero di Courant pari a 0.25, ottenendo $b_e = 0.0032$ m e $\Delta t = 1.33 \cdot 10^{-7}$ s. Il dominio è stato diviso con elementi quadrati a 4 nodi bilineari. L'andamento del segnale al punto sonda ottenuto con i tre solutori è riportato in figura 3. Gli intervalli dati dalla (4) e dalla (5) sono rappresentati dalle linee verticali rosse e verdi. Le oscillazioni che attraversano la seconda linea verde sono dovute alle onde riflesse; tutti i solutori danno risultati simili e rispettano il check sulla velocità.

È stata quindi provata la griglia più rada (10 nodi per lunghezza d'onda) definendo l'intervallo temporale anche in questo caso con la (2) e con numero di Courant ancora pari a 0.25 ($b_e = 0.0064$ m e $\Delta t = 2.66 \cdot 10^{-7}$ s) ma in questo caso COMSOL mostra un comportamento anomalo con un arrivo in anticipo delle onde di taglio (figura 4). Sperimentando ulteriori combinazioni si deduce che una griglia più rada tende ad anticipare l'arrivo dell'onda ed un intervallo temporale più ampio tende ad introdurre un ritardo; sembrerebbe quindi opportuno mantenere una proporzionalità fra le due spaziature. Si è quindi cambiato il numero di Courant, usando un valore unitario, così da avere Δt pari al valore della (2). I risultati di tale discretizzazione ($b_e = 0.0064$ m e $\Delta t = 1 \cdot 10^{-6}$ s) sono riportati in figura 5. Si nota ancora un anticipo nella soluzione COMSOL, anche se di minore entità, un buon centraggio del segnale calcolato con ANSYS e un ritardo sul segnale calcolato con NASTRAN. Intervalli temporali più elevati non sono stati provati perché non avrebbero rispettato il criterio di (3). In tabella 1 (righe "2D BULK") si riportano i parametri delle simulazioni e il tempo impiegato dai diversi solutori.

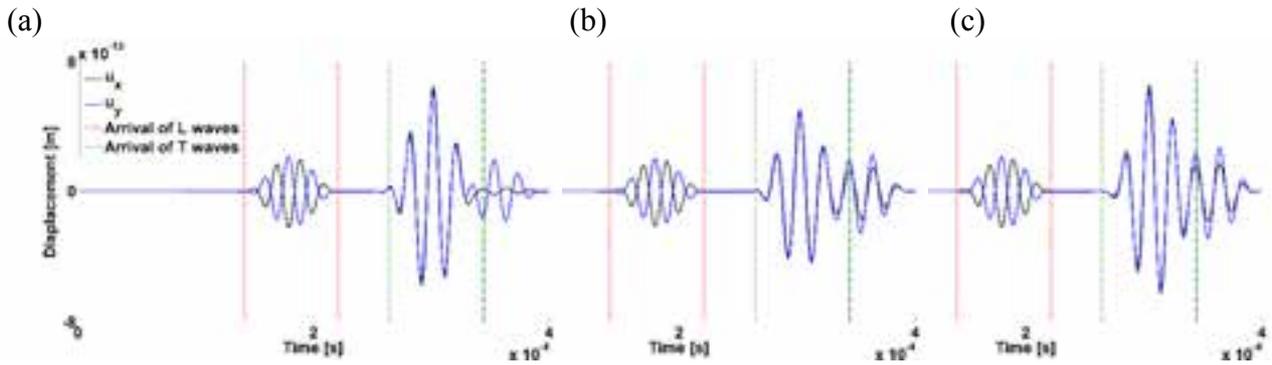


Figura 3. Risultati del primo set di simulazioni per il caso 2D bulk: (a) COMSOL; (b) ANSYS; (c) NASTRAN.

Simulazione	b_e [m]	Δt [s]	Numero di elementi			Tempo di calcolo [s]		
			COMSOL	ANSYS	NASTRAN	COMSOL	ANSYS	NASTRAN
2D BULK	$3.2 \cdot 10^{-3}$	$1.33 \cdot 10^{-7}$	140625	141376	139876	1339	2600	3279
2D BULK	$6.4 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-6}$	35344	35344	35344	44	91	375
2D GUIDED	$10 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-7}$	600	600	600	32	64	5
2D GUIDED	$2.5 \cdot 10^{-3}$	$4.6 \cdot 10^{-7}$	9600	9600	9600	76	188	115
3D GUIDED	$3.8 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-6}$	530104	763416	440896	1331	2297	1137
3D GUIDED	$3.8 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-6}$	530104	763416	440896	751	1139	711

Tabella 1. Discretizzazioni spaziali e temporali usate nelle simulazioni di propagazione, dimensione della griglia di calcolo e tempo necessario per il completamento del run.

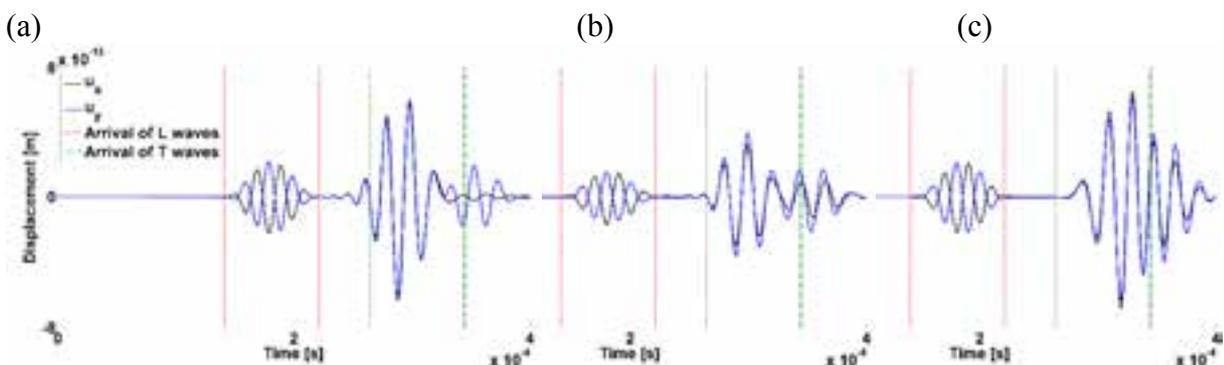


Figura 4. Risultati del secondo set di simulazioni per il caso 2D bulk: (a) COMSOL; (b) ANSYS; (c) NASTRAN.

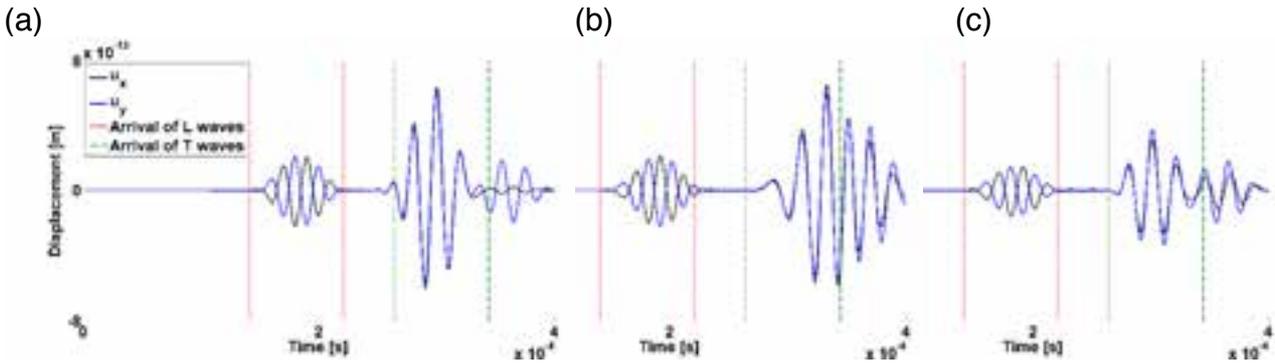


Figura 5. Risultati del terzo set di simulazioni per il caso 2D bulk: (a) COMSOL; (b) ANSYS; (c) NASTRAN.

2.2 Onde guidate in dominio 2D

Il caso di onde guidate in una piastra sottile di materiale isotropo con contorni scarichi è governato dall'equazione di Lamb la cui soluzione di Rayleigh-Lamb risulta essere:

$$\frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} = -\frac{4k^2 pq}{(q^2 - k^2)^2} \text{ modi simmetrici} \quad \frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} = -\frac{(q^2 - k^2)^2}{4k^2 pq} \text{ modi antisimmetrici} \quad (6)$$

con k numero d'onda e $2h$ spessore della piastra.

I parametri p e q si ottengono dalla pulsazione angolare ω , il numero d'onda k e la velocità delle onde bulk:

$$p^2 = \left(\frac{\omega}{c_L}\right)^2 - k^2 \quad q^2 = \left(\frac{\omega}{c_T}\right)^2 - k^2 \quad (7)$$

Nel caso di sezioni rette di forma generica è necessario ricorrere all'approccio SAFE [7], implementato in questo studio nel software Guiguw (disponibile sul sito www.quiguw.com); l'esempio qui studiato è lo stesso riportato nel riferimento [9], si tratta di una piastra sottile 2D lunga 3 m e spessa 2 cm di lunghezza infinita nella terza direzione e con superfici superiore e inferiore libere (figura 2c). L'eccitazione avviene ad uno degli estremi per una durata di 20 μ s con andamento mostrato nella figura 6a, il cui spettro (figura 6b), mostra come il limite superiore in frequenza possa essere definito pari a 100 kHz. Le curve di dispersione ottenute con il solutore SAFE Guiguw (figura 7) rivelano che nell'intervallo di frequenza considerato ci siano solo i modi di ordine zero simmetrico S_0 e anti-simmetrico A_0 ; essendo l'eccitazione simmetrica rispetto al piano medio longitudinale si ha l'attivazione del solo modo simmetrico S_0 . I primi calcoli sono stati svolti usando le spazature suggerite in [9] (elementi a 4 nodi in stato di deformazione piana con dimensioni $b_e = 10$ mm e un passo temporale $\Delta t = 2 \cdot 10^{-7}$ s).

Osservando le curve di dispersione di Lamb si nota che per le frequenze di interesse la velocità di fase delle onde simmetriche risulta pari a $c_{ph,1} = 5459$ m/s per frequenze basse e $c_{ph,2} = 4942$ m/s per la frequenza di 100 kHz. Trattandosi di onde guidate è necessario considerare la velocità di gruppo associata a pacchetti di onde che in questo caso diminuisce da $c_{g,1} = 5394$ m/s a $c_{g,2} = 3489$ m/s, con una variazione di lunghezza d'onda da $\lambda_1 = 545.9$ m a 0 kHz, fino a $\lambda_2 = 0.049$ m a 100 kHz.

La variabile monitorata è lo spostamento longitudinale di un punto a metà della superficie superiore che si trova ad una distanza $d = 1.5$ m dall'eccitazione. Le simulazioni vengono fatte girare nell'intervallo da $t = 0$ a $t_{end} = 1.3 \cdot 10^{-3}$ s e la finestra di arrivo $[t_1 t_2]$ viene stimata come nell'applicazione delle onde bulk, considerando in questo caso le velocità di gruppo:

$$t_1 = \frac{d}{c_{g,1}} = 2.781 \cdot 10^{-4} \text{ s} \quad t_2 = 20[\mu\text{s}] + \frac{d}{c_{g,2}} = 4.499 \cdot 10^{-4} \text{ s} \quad (8)$$

I risultati di questa simulazione sono riportati nella figura 8 che mostra i segnali di spostamento calcolati con i tre solutori COMSOL, ANSYS e NASTRAN. Sia COMSOL che ANSYS anticipano leggermente l'arrivo dell'onda simmetrica con un picco negativo subito prima della curva rossa, mentre il segnale calcolato con NASTRAN sembra essere centrato meglio e risulta più simile al risultato di letteratura. La seconda oscillazione è dovuta alla riflessione generata all'estremo di destra. Anche in questo caso si sono variate le spazature spaziali e temporali mantenendo la proporzionalità. L'intervallo riportato in (1) è ben bilanciato dal passo temporale della (2) con numero di Courant unitario. Si è quindi usata una spaziatura di 20 nodi per lunghezza d'onda considerando che il passo temporale associato si correla bene con il criterio di Nyquist (3) e che il dominio ha piccole dimensioni. I risultati di questo secondo set di analisi ($b_e = \lambda/20 = 0.0025 \text{ m}$, $\Delta t = b_e/c_{g,1} = 4.6 \cdot 10^{-7} \text{ s}$) sono mostrati in figura 9 dove si confrontano le soluzioni ottenute con COMSOL, ANSYS e NASTRAN. Si evidenzia che in questo caso tutte le curve sono simili e ben centrate. I parametri dei modelli e i tempi necessari alle simulazioni sono riassunti nella tabella 1 (righe "2D GUIDED").

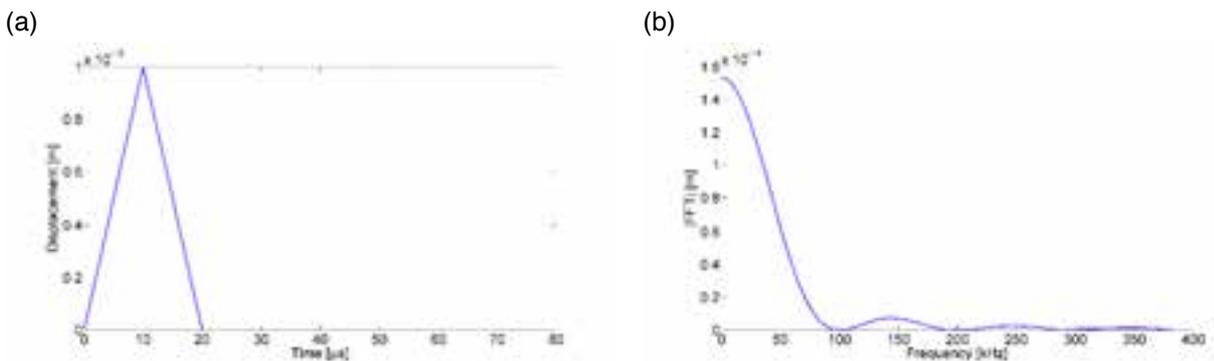


Figura 6. Legge temporale di spostamento dell'impulso (a) e spettro in frequenza (b).

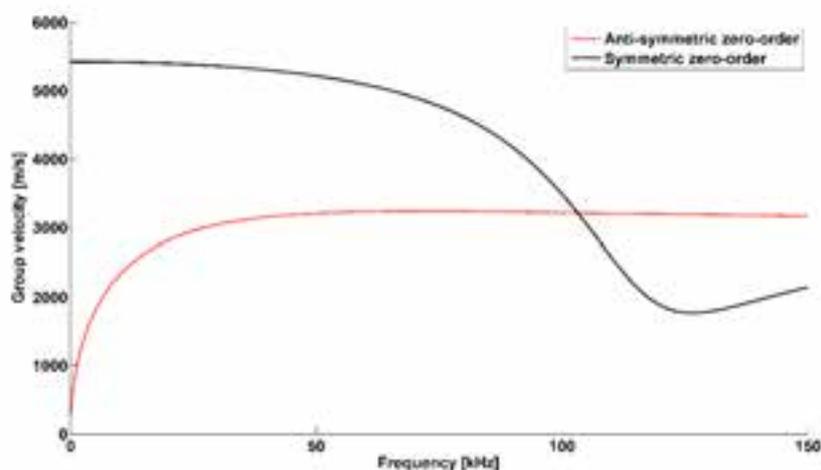


Figura 7. Velocità di gruppo in funzione della frequenza per il caso 2D guidato.

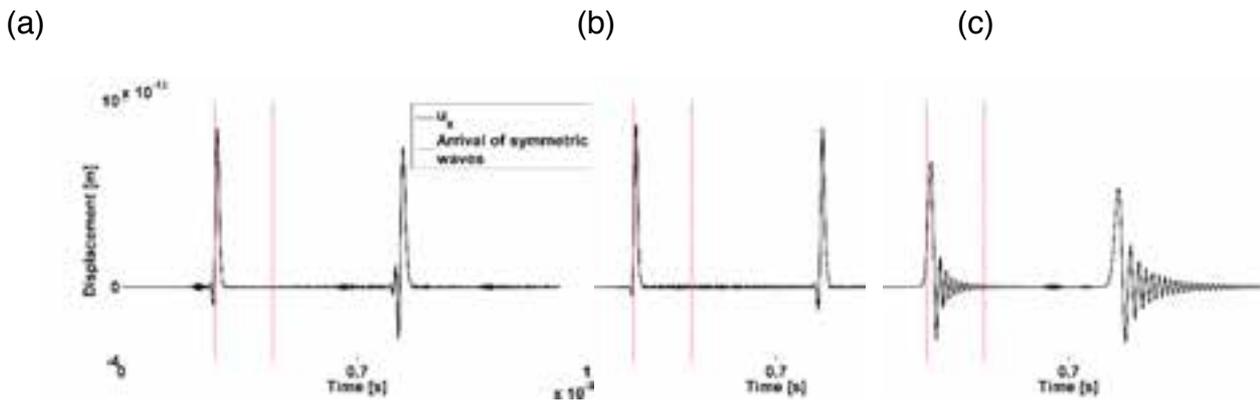


Figura 8. Risultati del primo set di simulazioni per il caso 2D guidato: (a) COMSOL; (b) ANSYS; (c) NASTRAN.

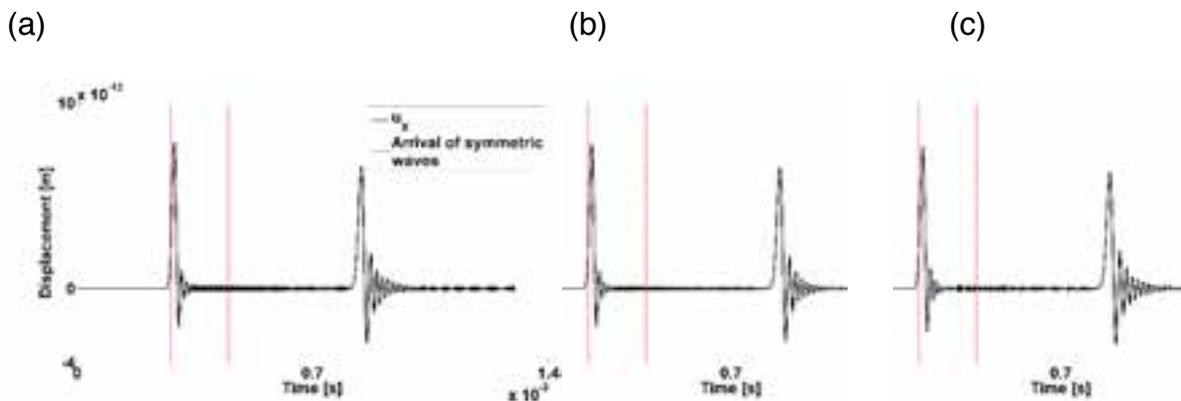


Figura 9. Risultati del secondo set di simulazioni per il caso 2D guidato: (a) COMSOL; (b) ANSYS; (c) NASTRAN.

2.3 Onde guidate in dominio 3D

Con l'ultima applicazione numerica è stato affrontato il problema della propagazione di onde guidate in un solido tridimensionale; si tratta di una piastra sottile con superfici superiore ed inferiore scariche, di forma quadrata e lato di 1.26 m e spessore di 1 cm (figura 2b). Il solido è eccitato dalla stessa forzante dell'esempio del sotto paragrafo 2.1: una forza trasversale applicata al vertice in alto a sinistra del quadrato. Anche in questo caso si prescrive la condizione di simmetria al lato sinistro e a quello superiore mentre i lati in alto e a destra sono mantenuti fissi. La forza è posizionata in modo da eccitare il modo anti-simmetrico A_0 . Il segnale di risposta viene monitorato sulla superficie esterna del lato sinistro ad una distanza $d = 0.79$ m dalla zona eccitata dalla forzante. La soluzione del problema di Lamb per il problema anti-simmetrico consente di stimare una velocità di fase $c_{ph,1} = 1897$ m/s, una velocità di gruppo $c_{g,1} = 2965$ m/s e una lunghezza d'onda $\lambda_1 = 0.038$ m a 50 kHz. Anche in questo caso la spaziatura viene posta pari a $b_e = \lambda_1/10 = 0.0038$ m e $\Delta t = 1/(20 \cdot 50 \cdot 10^3) = 1 \cdot 10^{-6}$ s (3). Tale condizione è valida per le direzioni di propagazione; poiché si eccita solo il modo di ordine zero antisimmetrico, il campo di spostamento attraverso lo spessore risulta essere monotono (con un picco negativo ed uno positivo ai punti più esterni), giustificando quindi la scelta di usare solo due divisioni attraverso lo spessore al fine di mantenere un rapporto di forma accettabile degli elementi finiti. La griglia di calcolo è realizzata con due strati di elementi prismatici a base triangolare. Le simulazioni vengono

fatte girare nell'intervallo $t = 0$ e $t_{end} = 4 \cdot 10^{-4}$ s. Lo spostamento trasversale nel punto monitorato è riportato nella figura 10 confrontando i risultati ottenuti con i tre solutori (COMSOL, ANSYS e NASTRAN). La linea rossa segna il tempo di arrivo dell'onda antisimmetrica previsto a $t = d/c_{g,1} = 2.66 \cdot 10^{-4}$ s. Il secondo limite in questo caso non è riportato perché fuori dalla finestra di simulazione. Le immagini mostrano chiaramente che solo il NASTRAN è in grado di rispettare il check sulla velocità. Anche in questo caso per poter affrontare le discrepanze registrate con COMSOL e ANSYS si è operato sull'offset fra le diverse andature nello spazio e nel tempo delle onde. Dopo numerosi tentativi è stato possibile indentificare una soluzione accettabile solo rilassando le condizioni della (3), usando 10 divisioni per ciclo. I nuovi run sono stati quindi fatti girare usando un passo temporale $\Delta t = 2 \cdot 10^{-6}$ s e i risultati sono riportati in figura 11. Si nota in questo caso che COMSOL e ANSYS rispettano i check sulla velocità mentre NASTRAN prevede un ritardo eccessivo. Anche in questo caso si riportano i parametri delle simulazioni e il tempo impiegato dai diversi solutori nella tabella 1 (righe "3D GUIDED").

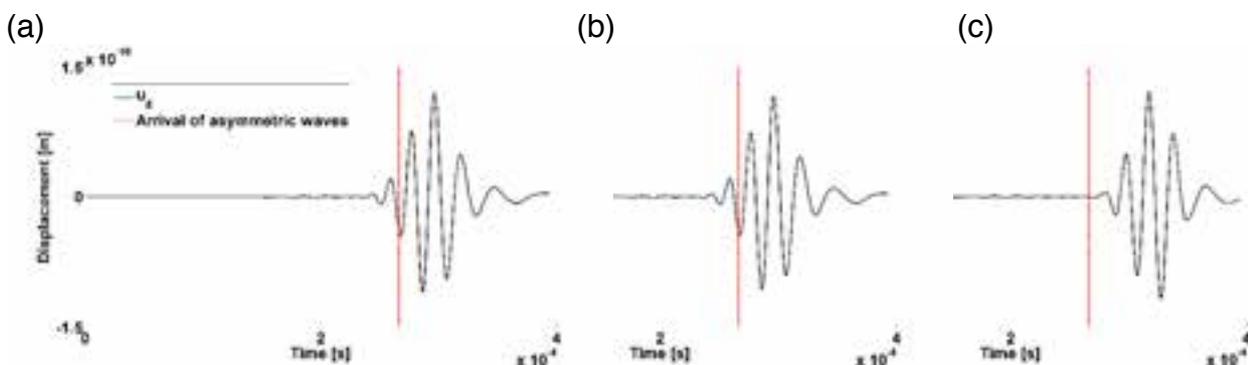


Figura 10. Risultati del primo set di simulazioni per il caso 3D guidato: (a) COMSOL; (b) ANSYS; (c) NASTRAN.

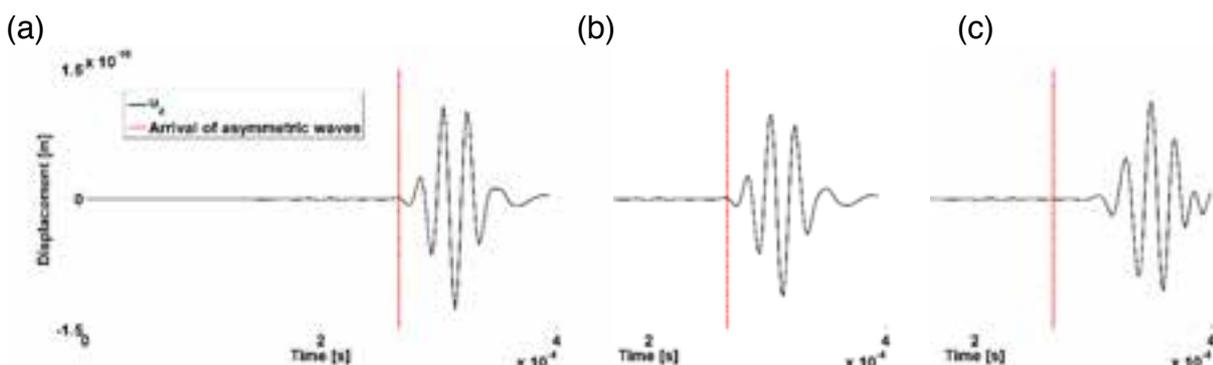


Figura 11. Risultati del secondo set di simulazioni per il caso 3D guidato: (a) COMSOL; (b) ANSYS; (c) NASTRAN.

1.1. High Performance Computing (HPC)

Essendo i tempi necessari per le simulazioni numeriche piuttosto elevati sono stati svolti dei test in ambiente HPC avvalendosi di un Server Dell PowerEdge R940 con 4 CPU Intel(R) Xeon(R) Gold 6152 CPU @ 2.10GHz, 256 GB di RAM, 2 TB di disco e 88 core. Gli speed-up relativi al solo caso del solutore ANSYS APDL sono mostrati nel grafico della figura 12 e riguardano il caso di propagazione guidata con modello 3D. Si hanno vantaggi importanti

salendo fino a 30 core. Passando da 5 a 88 core, il tempo per la simulazione si riduce da 43 minuti a circa 6 minuti con un risparmio pari a 86%.

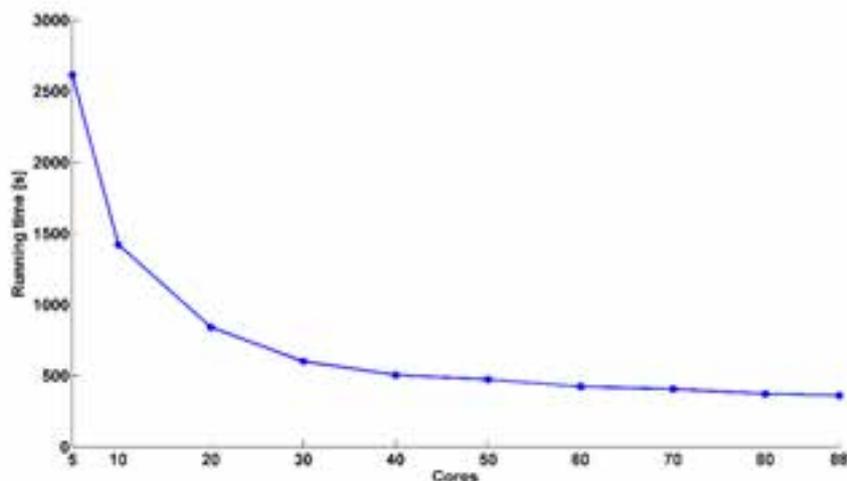


Figura 12. Tempo di calcolo in funzione del numero di core utilizzati durante i test HPC.

3. Conclusioni

Negli ultimi anni le onde guidate a ultrasuoni si sono affermate come uno strumento valido per la valutazione dell'integrità strutturale delle strutture mediante metodi di emissione acustica. La fisica che governa il problema è piuttosto complessa e la soluzione analitica è disponibile solo per geometrie molto semplici. Per studiare casi di forma complessa è quindi necessario ricorrere ad analisi transitorie utilizzando il metodo degli elementi finiti per le quali risulta molto critica la definizione delle discretizzazioni spaziali e temporali adatte a catturare il fenomeno. In questa memoria si è presentato un confronto fra i risultati numerici ottenuti con tre software commerciali molto diffusi, COMSOL, ANSYS APDL e NX NASTRAN, per lo studio della propagazione di onde bulk e onde guidate per casi bidimensionali e della propagazione di onde guidate per un caso tridimensionale. Nel caso di onde guidate sono stati modellati domini a parete sottile in modo da rispettare le ipotesi del problema di Lamb utilizzando le curve di dispersione per verificare l'attendibilità dei risultati dei modelli FE.

ANSYS e NASTRAN hanno dimostrato una maggiore robustezza fornendo risultati accettabili al variare della discretizzazione spaziale e temporale. Per quanto riguarda il tempo di calcolo, COMSOL si è dimostrato molto più veloce pur mostrando una maggiore sensibilità alle scelte di discretizzazione.

Un aspetto critico è dato proprio dal fatto che la velocità di propagazione, essendo legata sia alla discretizzazione spaziale che temporale, dipende molto dai parametri ed è quindi necessario rispettare un opportuno rapporto fra dimensione dell'elemento e passo di calcolo temporale.

Per quanto riguarda l'analisi HPC, qui sperimentata per il solo solutore ANSYS APDL, si è osservato che nel caso 3D consenta un risparmio del tempo di calcolo pari a 86% passando da 5 core a 88 core con benefici importanti già usando 30 core.

Ringraziamenti

Il lavoro è stato finanziato da INAIL nell'ambito del bando BRIC/2016 ID=15, progetto SMARTBENCH.

Bibliografia

- [1] Lowe, MSJ., Alleyne, DN., Cawley, P., 1998. Defect detection in pipes using guided waves. *Ultrasonics* 36, 147-154
- [2] Leckey, CAC., Wheeler, KR., Hafiychuk, VN., Hafiychuk, H., Timuçin, DA., 2018. Simulation of guided-wave ultrasound propagation in composite laminates: benchmark comparisons of numerical coded and experiment. *Ultrasonics* 84, 187-200
- [3] Rose, JL., 2014. *Ultrasonic guided waves in solid media*. Cambridge University Press, New York USA
- [4] Gavrić, L., 1994. Finite element computation of dispersion properties of thin-walled waveguides. *Journal of Sound and Vibration* 173(1), 113-124
- [5] Gavrić, L., 1995. Computation of propagative waves in free rail using a finite element technique. *Journal of Sound and Vibration* 185(3), 531-543
- [6] Wilcox, P., Evans, M., Diligent, O., Lowe, M., Cawley, P., 2002. Dispersion and excitability of guided acoustic waves in isotropic beams with arbitrary cross section. *Review of Quantitative Nondestructive Evaluation* 21, 203-210
- [7] Bartoli, I., Marzani, A., Lanza di Scalea, F., Viola, E., 2006. Modeling wave propagation in damped waveguides of arbitrary cross-section. *Journal of Sound and Vibration* 295(3), 685-707
- [8] Marzani, A., Viola, E., Bartoli, I., Lanza di Scalea, F., Rizzo, P., 2008. A semi-analytical finite element formulation for modeling stress wave propagation in axisymmetric damped waveguides. *Journal of Sound and Vibration* 318, 488-505
- [9] Bartoli, I., Lanza di Scalea, F., Fateh, M., Viola, E., 2005. Modeling guided wave propagation with applications to the long-range defect detection in railroads tracks. *NDT&E International* 38, 325-334
- [10] Moser, F., Jacobs, LJ., Qu, J., 1999. Modeling elastic wave propagation in waveguides with the finite element method. *NDT&E International* 32, 225-234
- [11] Leckey, C. A., Wheeler, K. R., Hafiychuk, V. N., Hafiychuk, H., & Timuçin, D. A. (2018). Simulation of guided-wave ultrasound propagation in composite laminates: Benchmark comparisons of numerical codes and experiment. *Ultrasonics*, 84, 187-200.