

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

Chiappa<sup>a,\*</sup> Andrea, Giorgetti<sup>a</sup> F., Messina<sup>b</sup> M., Augugliaro<sup>c</sup> G.,  
Biancolini<sup>a</sup> M. E.

<sup>a</sup>Università di Roma Tor Vergata, Via del Politecnico 1, 00133, Roma

<sup>b</sup>Università di Bologna, Viale del Risorgimento 2, 40136, Bologna

<sup>c</sup>INAIL, Via di Fontana Candida 1, 00040, Monte Porzio Catone, Roma

\*andrea.chiappa@uniroma2.it

# Sommario

---

- Il progetto SmartBench
- Introduzione sulle EA
- Simulazioni FEM: COMSOL, APDL, FEMAP con NX NASTRAN
  - Bulk 2D
  - Guided 2D
  - Guided 3D
- Conclusioni

# Il progetto SmartBench

**INAIL**

ISTITUTO NAZIONALE PER L'ASSICURAZIONE  
CONTRO GLI INFORTUNI SUL LAVORO



**Sensore Virtuale Invecchiamento**  
Invecchiamento virtuale

**Monitoraggio EA**  
Monitoraggio EA

**Strumenti misura per EA**

**Letture etichette smart**

**Etichette Intelligenti**  
Etichette intelligenti

**Sensori IoT**

**Ambienti Difficili**  
Ambienti difficili

**SmartBench**  
Smart Industrial Safety Workbench

Logos: Università di Roma Tor Vergata, Alma Mater Studiorum, Università Campus Bio-Medico di Roma, Università del Salento, Università di Bari, Università di Messina.



[www.smartbench-project.it](http://www.smartbench-project.it)

# Introduzione sulle EA

L'emissione acustica (EA) è una tecnica di controllo non distruttivo, basata sulla propagazione e sull'acquisizione di segnali ultrasonori

## LE EMISSIONI ACUSTICHE



SONO EMESSE DA UN MATERIALE SOTTO SFORZO PER EFFETTO DI FENOMENI IRREVERSIBILI (DANNEGGIAMENTO) CHE SI VERIFICANO DURANTE LA PROVA



VENGONO GENERATE DA APPARECCHIATURE ESTERNE ED INDIRIZZATE NELLA STRUTTURA. DURANTE LA LORO PROPAGAZIONE INTERAGISCONO CON EVENTUALI DIFETTI E PRODUCONO ONDE RIFLESSE

# Introduzione sulle EA

Le proprietà di propagazione di un'onda meccanica in un mezzo dipendono dal rapporto tra lunghezza d'onda ( $\lambda$ ) e dimensione del dominio ( $L$ )

Se $\lambda \ll L$ ONDE BULK	Se $\lambda \approx L$ ONDE GUIDED
velocità di fase costante	velocità di fase funzione della frequenza
velocità di gruppo costante	velocità di gruppo funzione della frequenza
non dispersive	generalmente dispersive
scansione punto per punto	scansione globale
non affidabili (possono mancare un punto)	affidabili (copertura dell'intero volume)
alto livello di addestramento	addestramento minimo
la struttura deve essere accessibile	ispezione di strutture sommerse o rivestite

# Simulazioni FEM: Bulk 2D



Caso più semplice:

- due tipi di onde
- le velocità dipendono solo dalle caratteristiche del materiale
- l'ipotesi di deformazione piana riduce la dimensione del modello

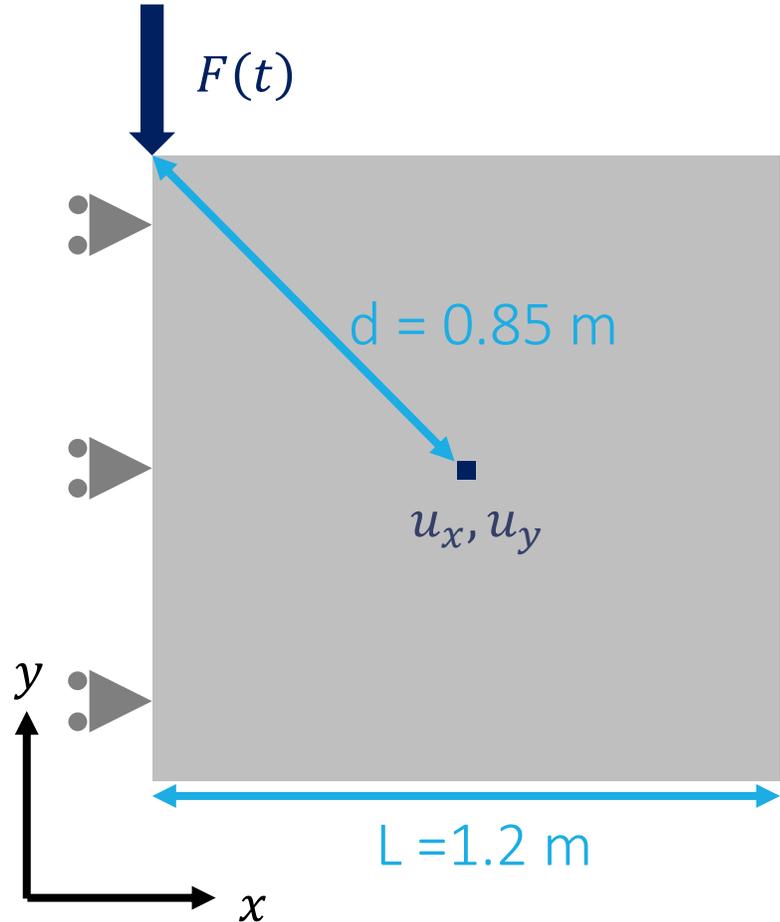
## ACCIAIO

- modulo di Young:  $E = 209 \text{ GPa}$
- modulo di taglio:  $G = 80.4 \text{ GPa}$
- coefficiente di Poisson:  $\nu = 0.3$
- densità:  $\rho = 7800 \text{ kg/m}^3$

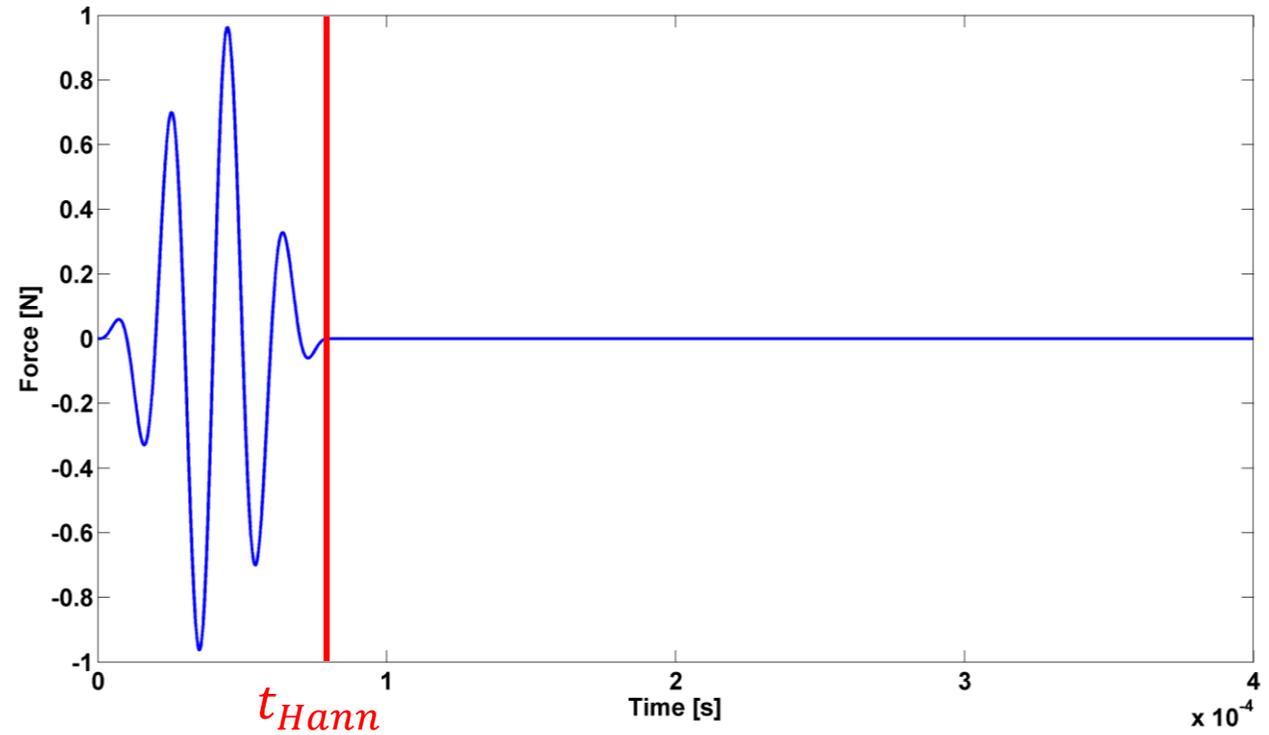
$$c_L = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} = 6005.8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$c_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = 3210.3 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

# Simulazioni FEM: Bulk 2D



Forzante con frequenza centrale  $f_0 = 50 \text{ kHz}$



# Simulazioni FEM: Bulk 2D

## Linee guida per la discretizzazione FEM

$b_e$  = lato dell'elemento più piccolo

$\Delta t$  = passo temporale

$\lambda_{min}$  = lunghezza d'onda più piccola

$f_{max}$  = frequenza massima del problema dinamico

CFL = numero di Courant

$$\frac{\lambda_{min}}{20} \leq b_e \leq \frac{\lambda_{min}}{10}$$

$$\Delta t = \min \left( CFL \cdot \frac{b_{e,min}}{c_L} , \frac{1}{20 \cdot f_{max}} \right)$$

# Simulazioni FEM: Bulk 2D

Linee guida per la discretizzazione FEM

$$\lambda_{min} = \lambda_T = \frac{c_T}{f_0} = 0.064 \text{ m}$$

$$f_{max} = f_0 = 50 \text{ kHz}$$

$$CFL = 0.25$$

$$b_e = \frac{\lambda_{min}}{20} = 0.0032 \text{ m}$$

$$\Delta t = 0.25 \cdot \frac{b_{e,min}}{c_L} = 1.33 \cdot 10^{-7} \text{ s}$$

# Simulazioni FEM: Bulk 2D

Verifica dei risultati numerici, controllo sulle velocità di propagazione

$c_L$  = velocità delle onde longitudinali

$c_T$  = velocità delle onde di taglio

$[0 \quad t_{Hann}]$  = intervallo della finestra di Hanning

$d$  = distanza

$$t_{1L} = \frac{d}{c_L} = 1.414 \cdot 10^{-4} \text{ s}$$

$$t_{2L} = t_{Hann} + \frac{d}{c_L} = 2.214 \cdot 10^{-4} \text{ s}$$

$$t_{1T} = \frac{d}{c_T} = 2.646 \cdot 10^{-4} \text{ s}$$

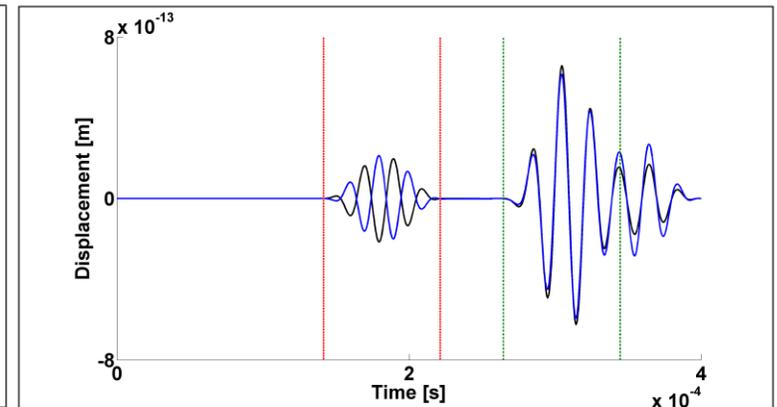
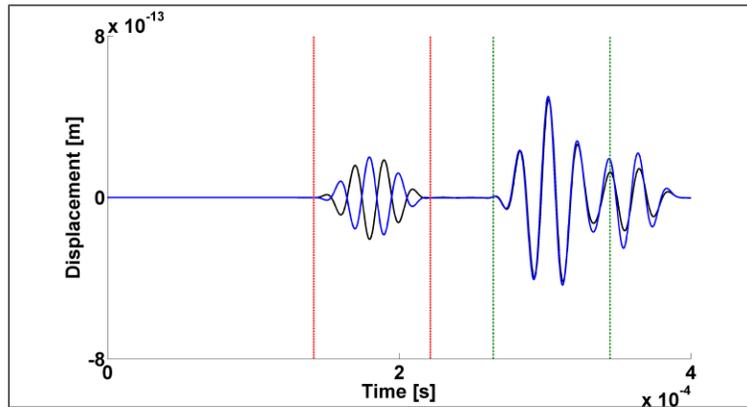
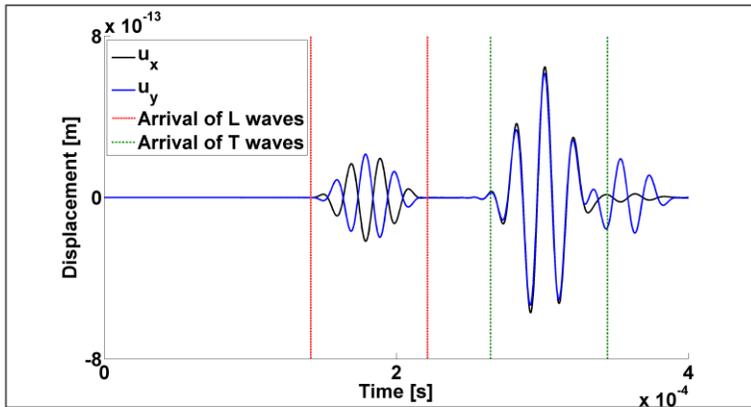
$$t_{2T} = t_{Hann} + \frac{d}{c_T} = 3.446 \cdot 10^{-4} \text{ s}$$

# Simulazioni FEM: Bulk 2D

COMSOL

APDL

FEMAP con NX NASTRAN



Codice impiegato	Lato elemento [m] $b_e$	Passo temporale [s] $\Delta t$	Numero di elementi*	Tempo di calcolo** [s]
COMSOL	$3.2 \cdot 10^{-3}$	$1.33 \cdot 10^{-7}$	140625	1339
APDL	$3.2 \cdot 10^{-3}$	$1.33 \cdot 10^{-7}$	141376	2600
FEMAP	$3.2 \cdot 10^{-3}$	$1.33 \cdot 10^{-7}$	139876	3276

\*Bilineari 4 nodi

\*\*Dell Precision T5810 con processore a 3.50 GHz, 48.0 GB di RAM e 6 cores

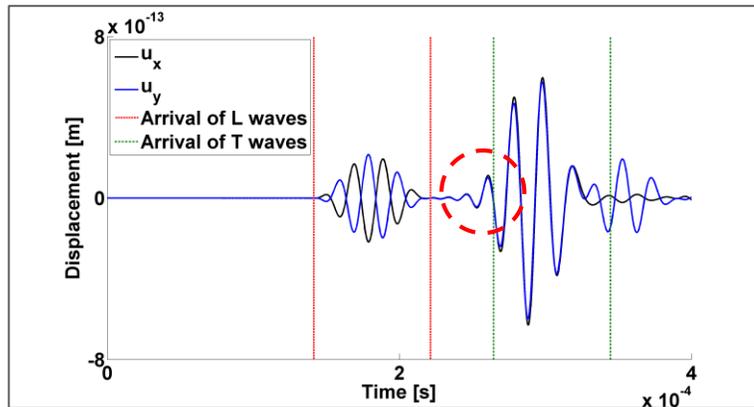
# Simulazioni FEM: Bulk 2D

$$b_e = \frac{\lambda_{min}}{10} = 0.0064 \text{ m}$$

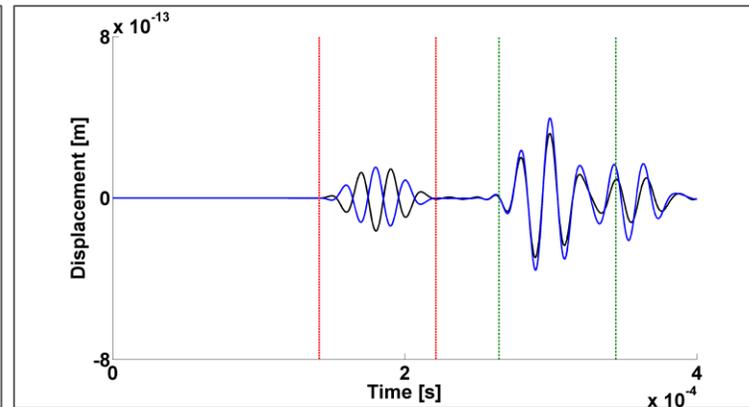
$$CFL = 0.25$$

$$\Delta t = 0.25 \cdot \frac{b_{e,min}}{c_L} = 2.66 \cdot 10^{-7} \text{ s}$$

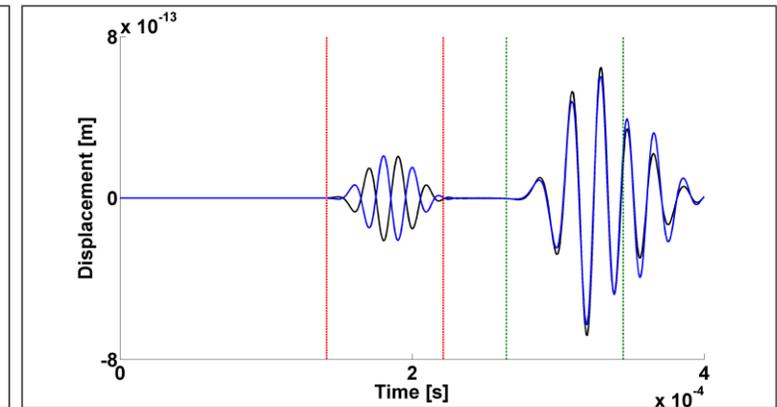
COMSOL



APDL



FEMAP con NX NASTRAN



**L'arrivo dell'onda T è anticipato**

# Simulazioni FEM: Bulk 2D

---

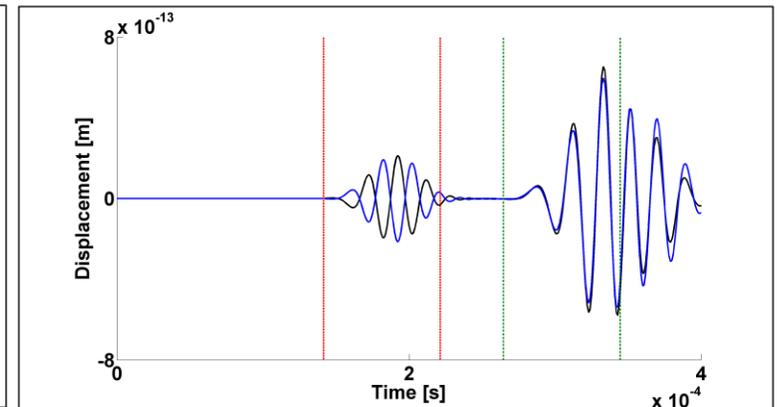
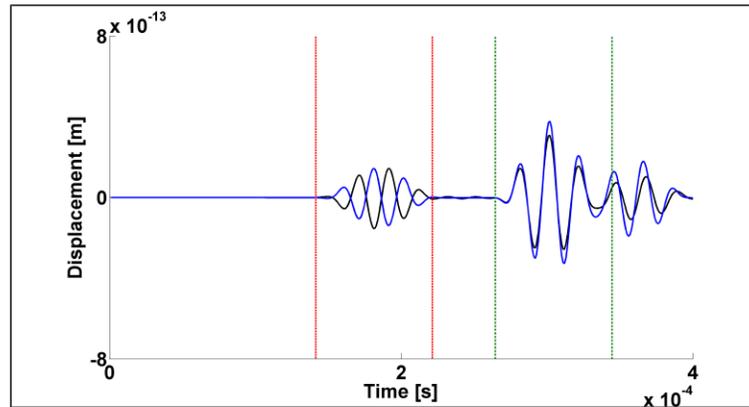
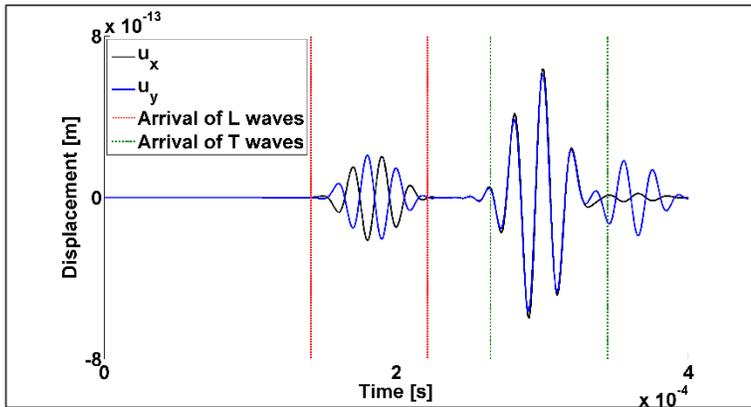
- Dopo una serie di prove è emersa una relazione di offset tra  $b_e$  e  $\Delta t$ :
  - $b_e$  grandi anticipano l'arrivo delle onde
  - $\Delta t$  grandi ritardano l'arrivo delle onde
- Proporzionalità da tarare tra  $b_e$  e  $\Delta t$
- Nuove analisi con  $CFL = 1$

# Simulazioni FEM: Bulk 2D

COMSOL

APDL

FEMAP con NX NASTRAN



Codice impiegato	Lato elemento [m] $b_e$	Passo temporale [s] $\Delta t$	Numero di elementi*	Tempo di calcolo** [s]
COMSOL	$6.4 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-6}$	35344	44
APDL	$6.4 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-6}$	35344	91
FEMAP	$6.1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-6}$	35344	375

\*Bilineari 4 nodi

\*\*Dell Precision T5810 con processore a 3.50 GHz, 48.0 GB di RAM e 6 cores

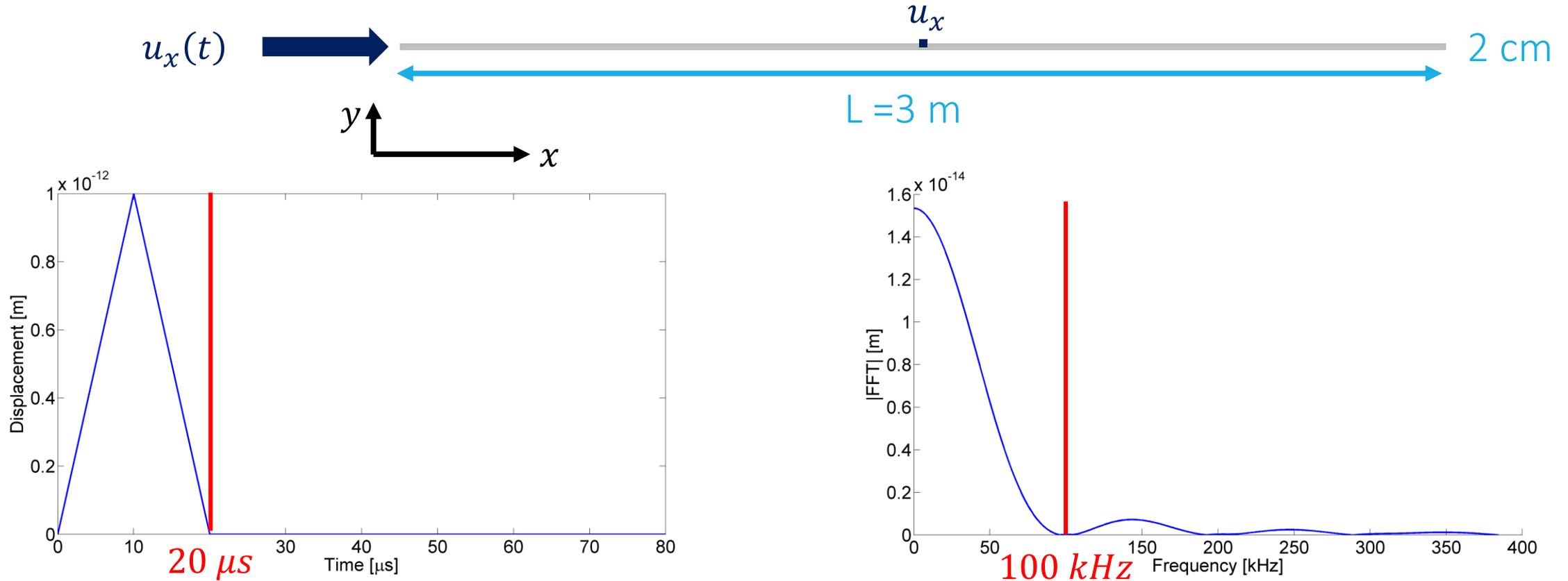
# Simulazioni FEM: Guided 2D

Caso più complesso rispetto al precedente:

- più tipi di onde
- le velocità dipendono dalle caratteristiche del materiale, dalla forma del dominio e dalla frequenza del problema dinamico
- si distingue tra velocità di fase e di gruppo
- l'ipotesi di deformazione piana riduce la dimensione del modello

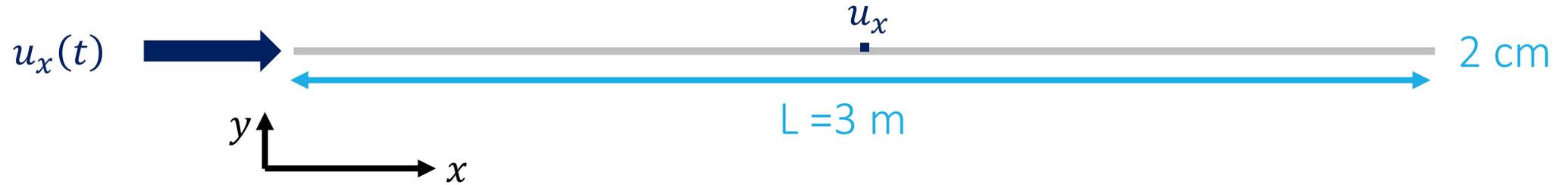


# Simulazioni FEM: Guided 2D



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. NTD&E International 38, 325-334

# Simulazioni FEM: Guided 2D

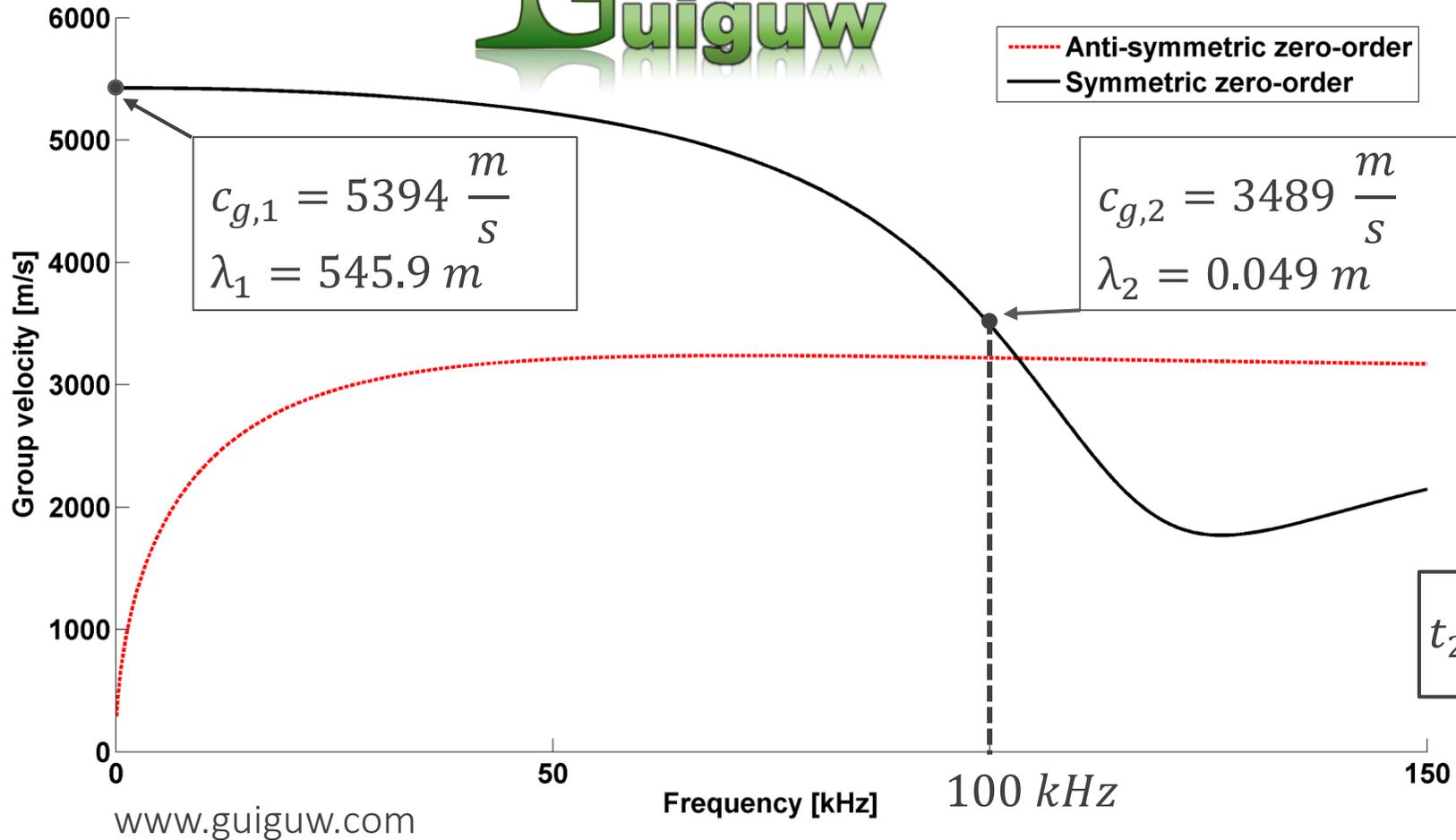


- Geometria sottile
- Materiale isotropo
- Contorni liberi
- Deformazione piana

Problema di Lamb

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. NTD&E International 38, 325-334

# Guiguw



$$t_1 = \frac{d}{c_{g,1}} = 2.781 \cdot 10^{-4} s$$

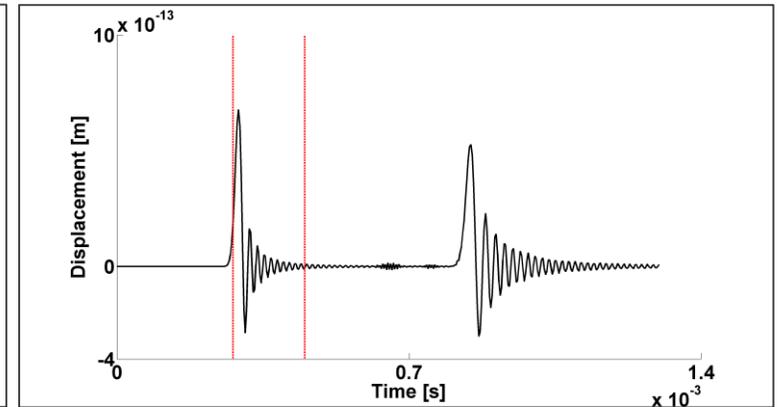
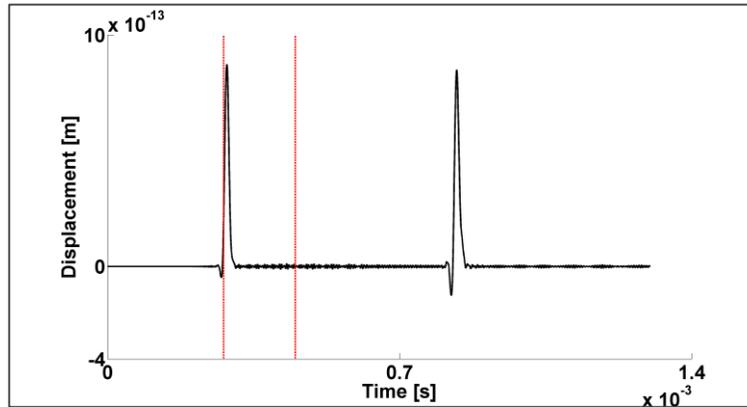
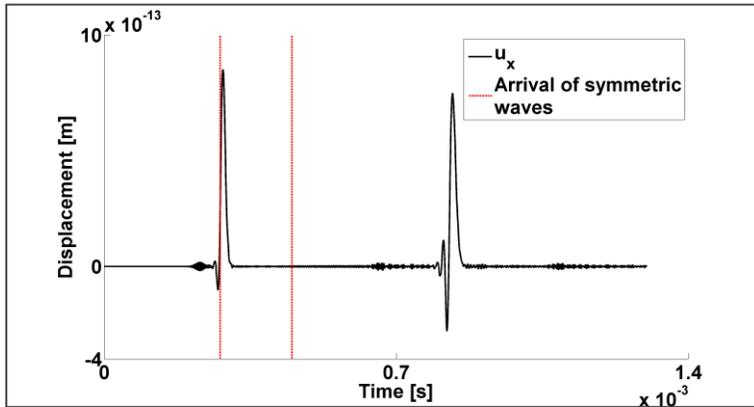
$$t_2 = 20[\mu s] + \frac{d}{c_{g,2}} = 4.499 \cdot 10^{-4} s$$

# Simulazioni FEM: Guided 2D

COMSOL

APDL

FEMAP con NX NASTRAN



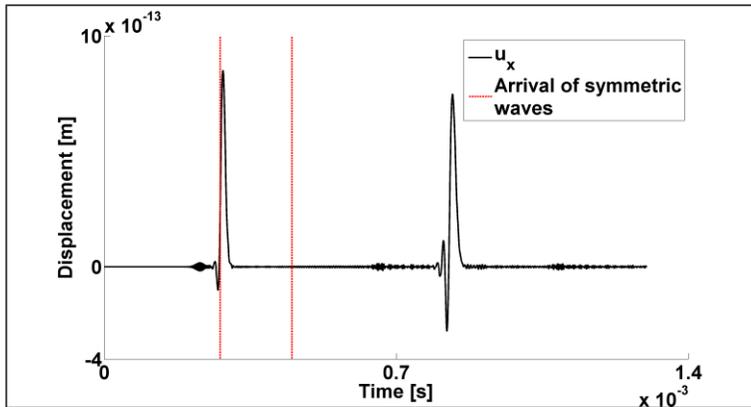
Codice impiegato	Lato elemento [m] $b_e$	Passo temporale [s] $\Delta t$	Numero di elementi*	Tempo di calcolo** [s]
COMSOL	$10 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-7}$	600	32
APDL	$10 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-7}$	600	64
FEMAP	$10 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-7}$	600	5

\*Bilineari 4 nodi

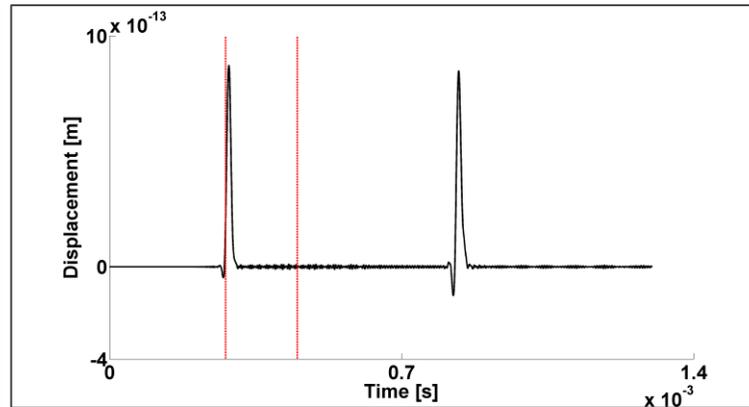
\*\*Dell Precision T5810 con processore a 3.50 GHz, 48.0 GB di RAM e 6 cores

# Simulazioni FEM: Guided 2D

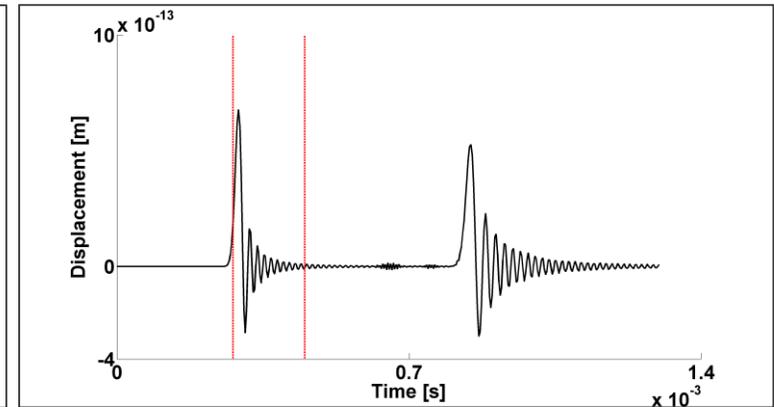
COMSOL



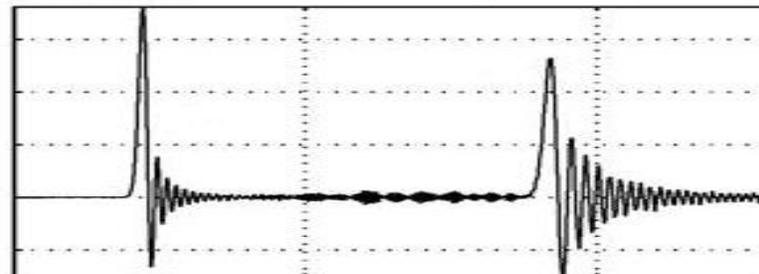
APDL



FEMAP con NX NASTRAN



ABAQUS EXPLICIT



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. NTD&E International 38, 325-334

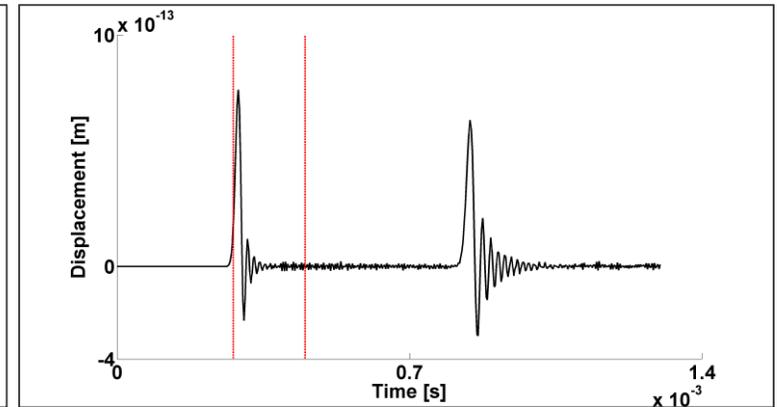
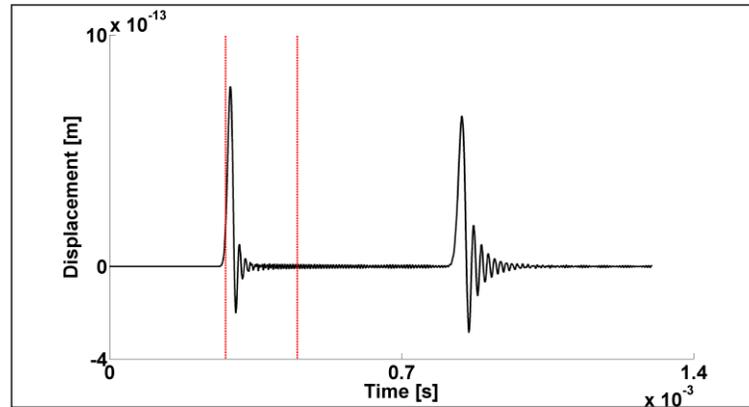
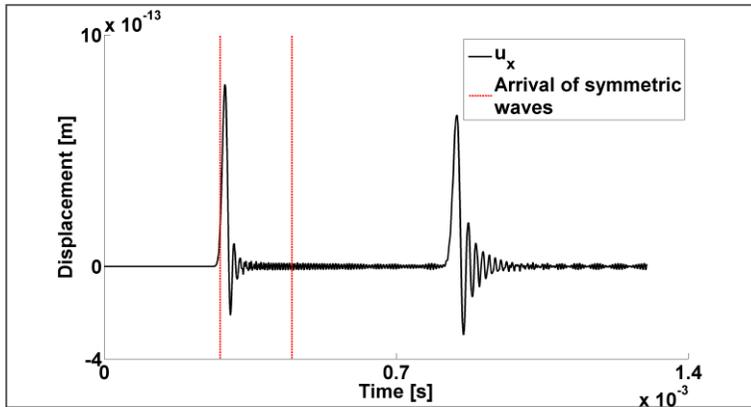
$$b_e = \frac{\lambda_2}{20} = 0.0025 \text{ m}$$

$$\Delta t = \frac{b_e}{c_{g,1}} = 4.6 \cdot 10^{-7} \text{ s}$$

COMSOL

APDL

FEMAP con NX NASTRAN



Codice impiegato	Lato elemento [m] $b_e$	Passo temporale [s] $\Delta t$	Numero di elementi*	Tempo di calcolo** [s]
COMSOL	$2.5 \cdot 10^{-3}$	$4.6 \cdot 10^{-7}$	9600	76
APDL	$2.5 \cdot 10^{-3}$	$4.6 \cdot 10^{-7}$	9600	188
FEMAP	$2.5 \cdot 10^{-3}$	$4.6 \cdot 10^{-7}$	9600	115

\*Bilineari 4 nodi

\*\*Dell Precision T5810 con processore a 3.50 GHz, 48.0 GB di RAM e 6 cores

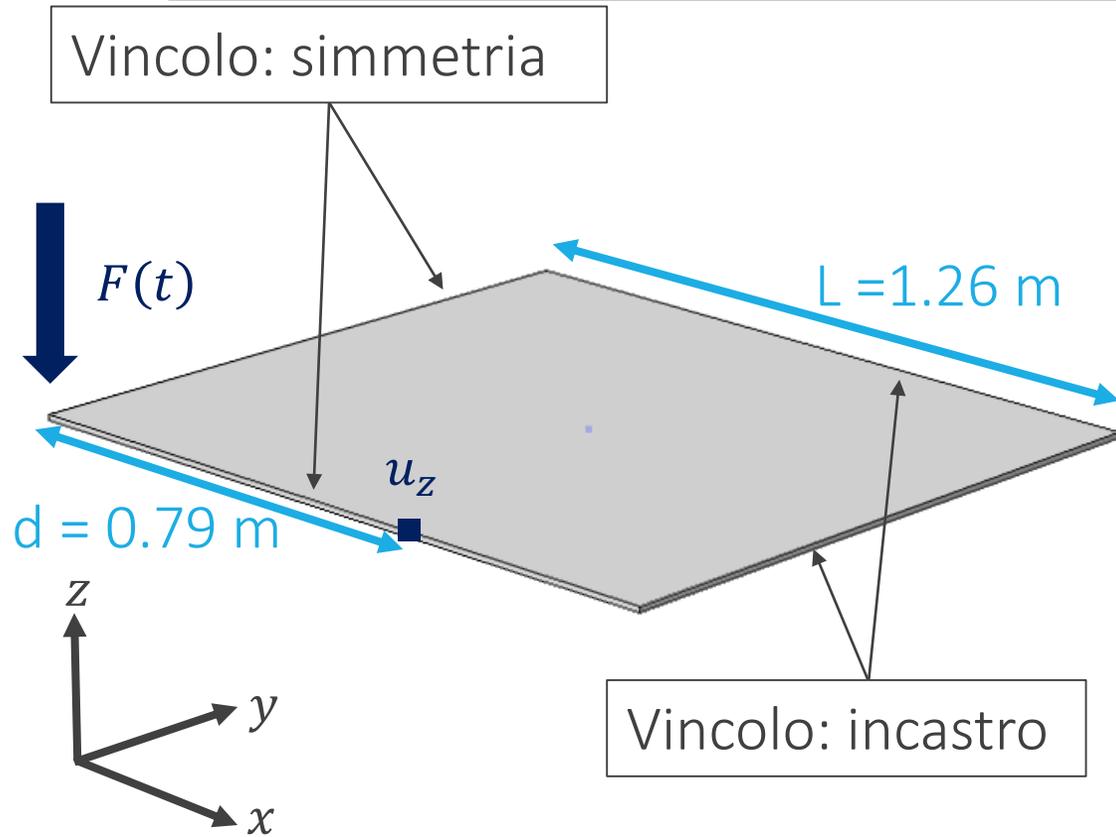
# Simulazioni FEM: Guided 3D

Caso più complesso rispetto al precedente:

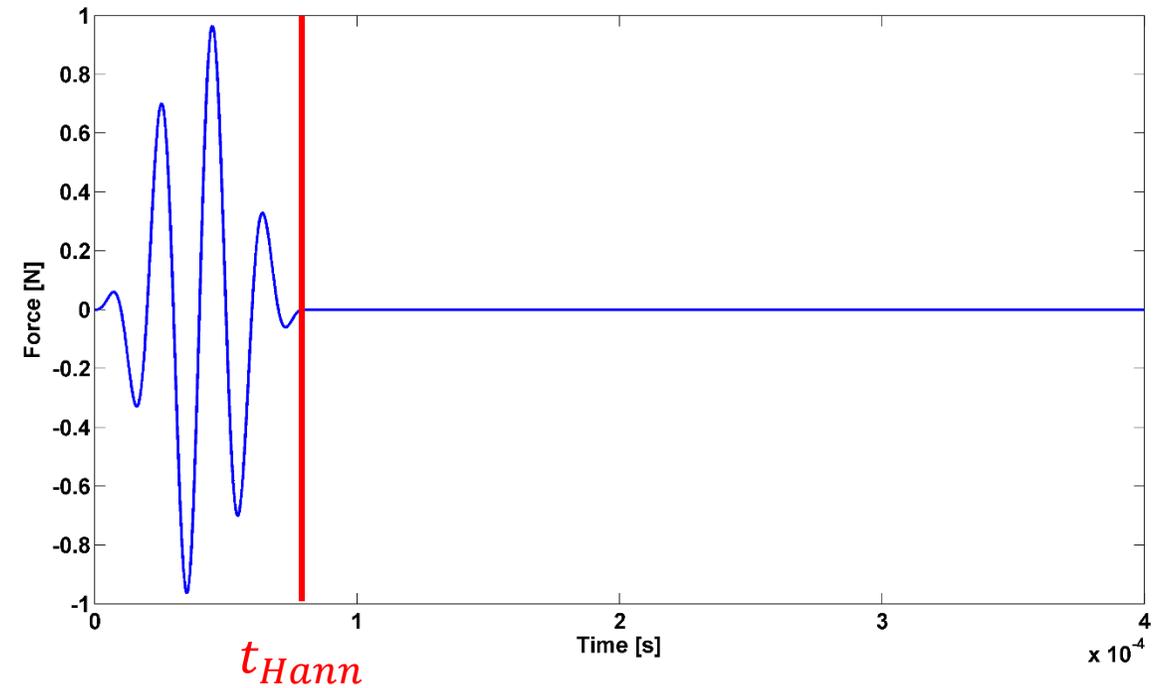
- più tipi di onde
- le velocità dipendono dalle caratteristiche del materiale, dalla forma del dominio e dalla frequenza del problema dinamico
- si distingue tra velocità di fase e di gruppo
- modello tridimensionale



# Simulazioni FEM: Guided 3D

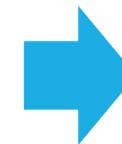


Forzante con frequenza centrale  $f_0 = 50 \text{ kHz}$



Spessore = 1 cm

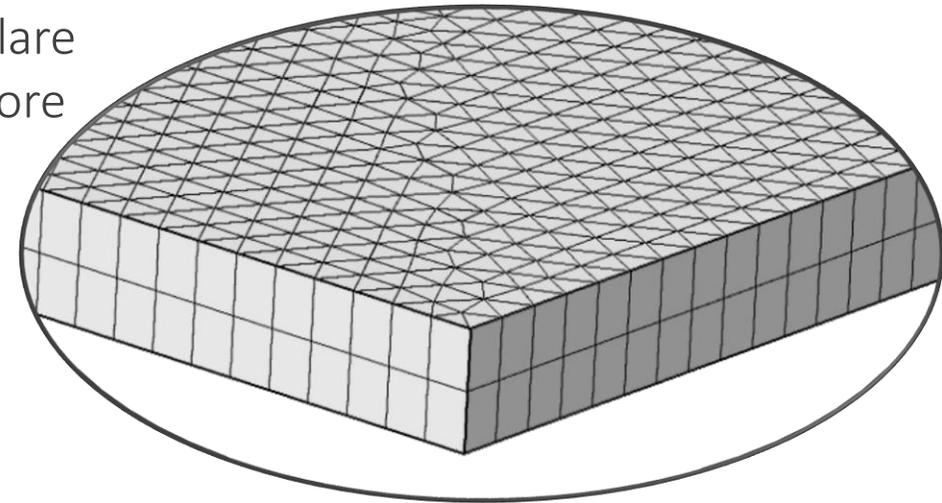
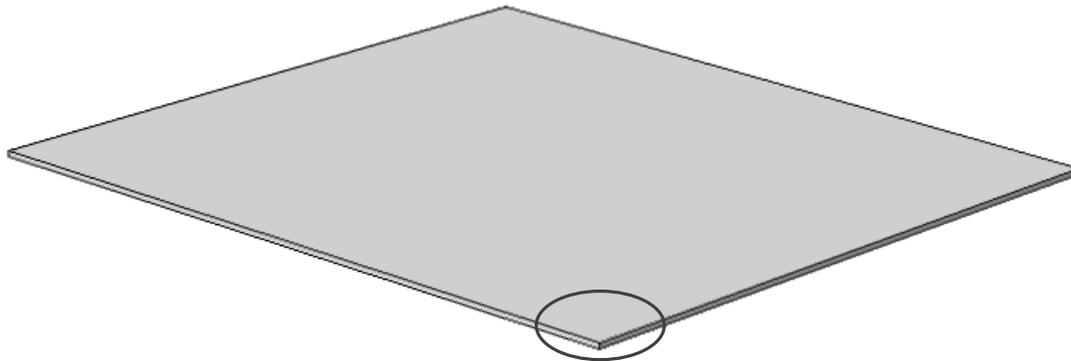
superfici superiore ed inferiore libere



problema di Lamb

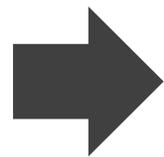
# Simulazioni FEM: Guided 3D

- Prismi di base triangolare
- 2 divisioni nello spessore



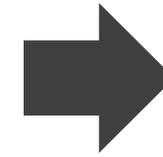
Forzante con frequenza centrale  $f_0 = 50 \text{ kHz}$  stimola selettivamente il modo asimmetrico di ordine 0

**Guiguw**



$$c_{g,1} = 2965 \frac{m}{s}$$

$$\lambda_1 = 0.038 \text{ m}$$



$$t_1 = \frac{d}{c_{g,1}} = 2.66 \cdot 10^{-4} \text{ s}$$

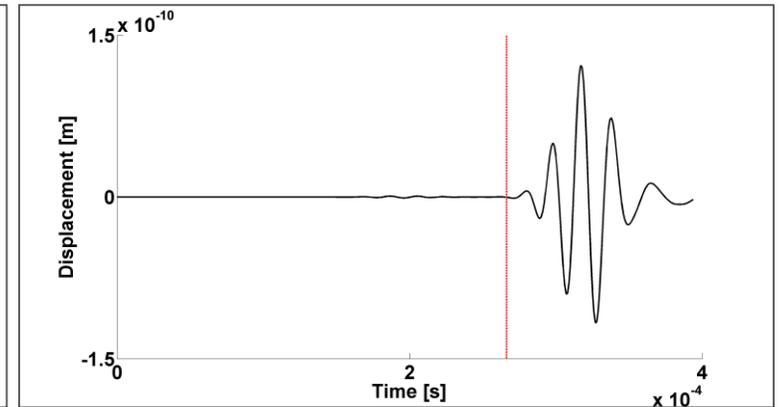
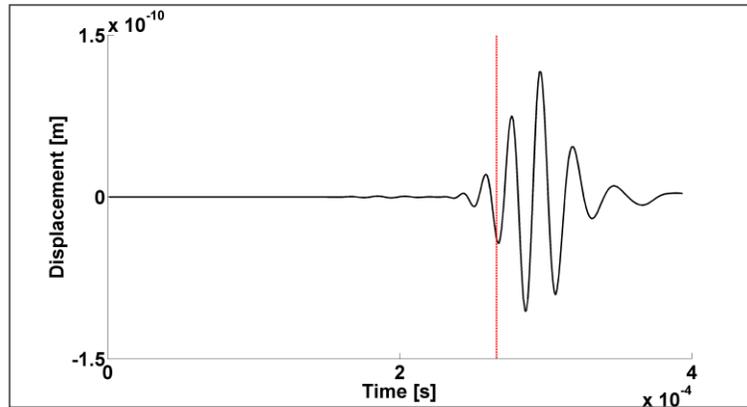
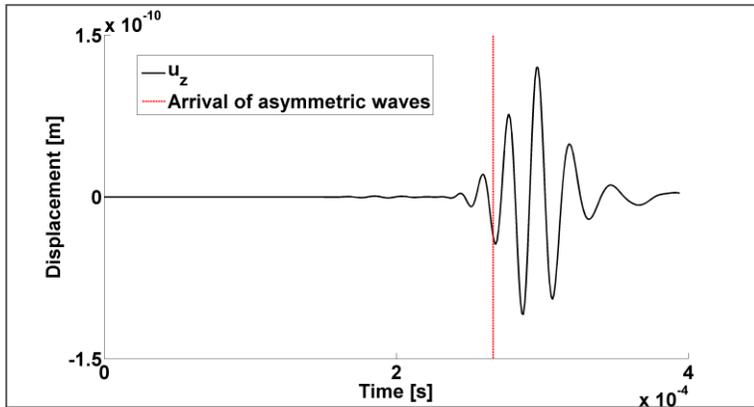
$$b_e = \frac{\lambda_1}{10} = 0.0038 \text{ m}$$

$$\Delta t = \frac{1}{20 \cdot f_{max}} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ s}$$

COMSOL

APDL

FEMAP con NX NASTRAN



Codice impiegato	Lato elemento [m] $b_e$	Passo temporale [s] $\Delta t$	Numero di elementi	Tempo di calcolo* [s]
COMSOL	$3.8 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-6}$	530104	1331
APDL	$3.8 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-6}$	763416	2297
FEMAP	$3.8 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-6}$	440896	1137 (output ridotto)

\*Dell Precision T5810 con processore a 3.50 GHz, 48.0 GB di RAM e 6 cores

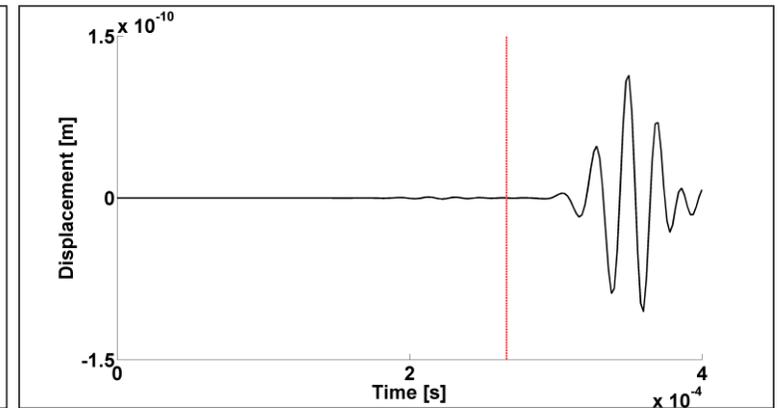
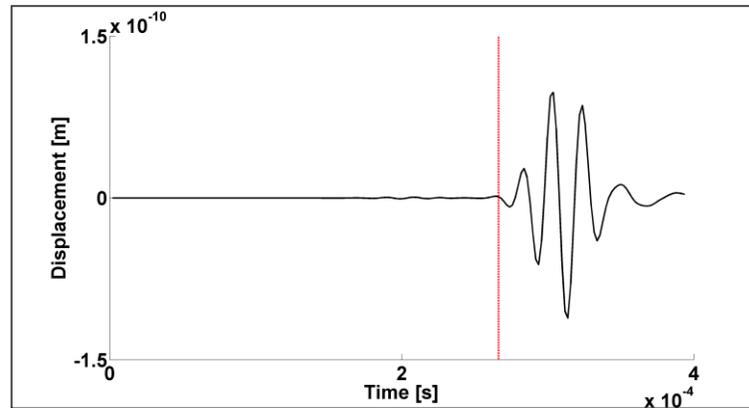
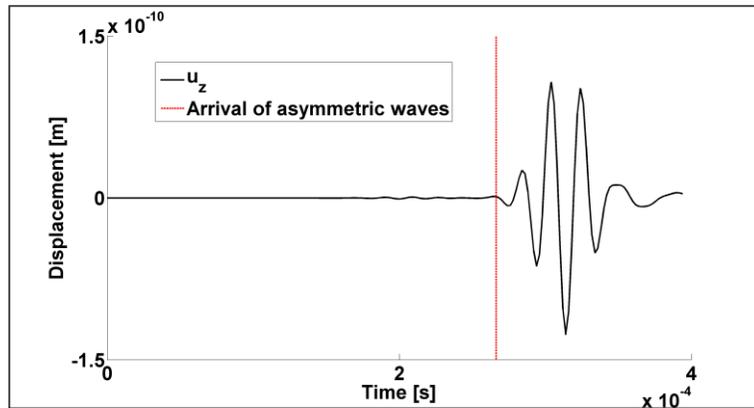
$$b_e = \frac{\lambda_1}{10} = 0.0038 \text{ m}$$

$$\Delta t = \frac{1}{10 \cdot f_{max}} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ s}$$

COMSOL

APDL

FEMAP con NX NASTRAN



Codice impiegato	Lato elemento [m] $b_e$	Passo temporale [s] $\Delta t$	Numero di elementi	Tempo di calcolo* [s]
COMSOL	$3.8 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-6}$	530104	751
APDL	$3.8 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-6}$	763416	1139
FEMAP	$3.8 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-6}$	440896	711 (output ridotto)

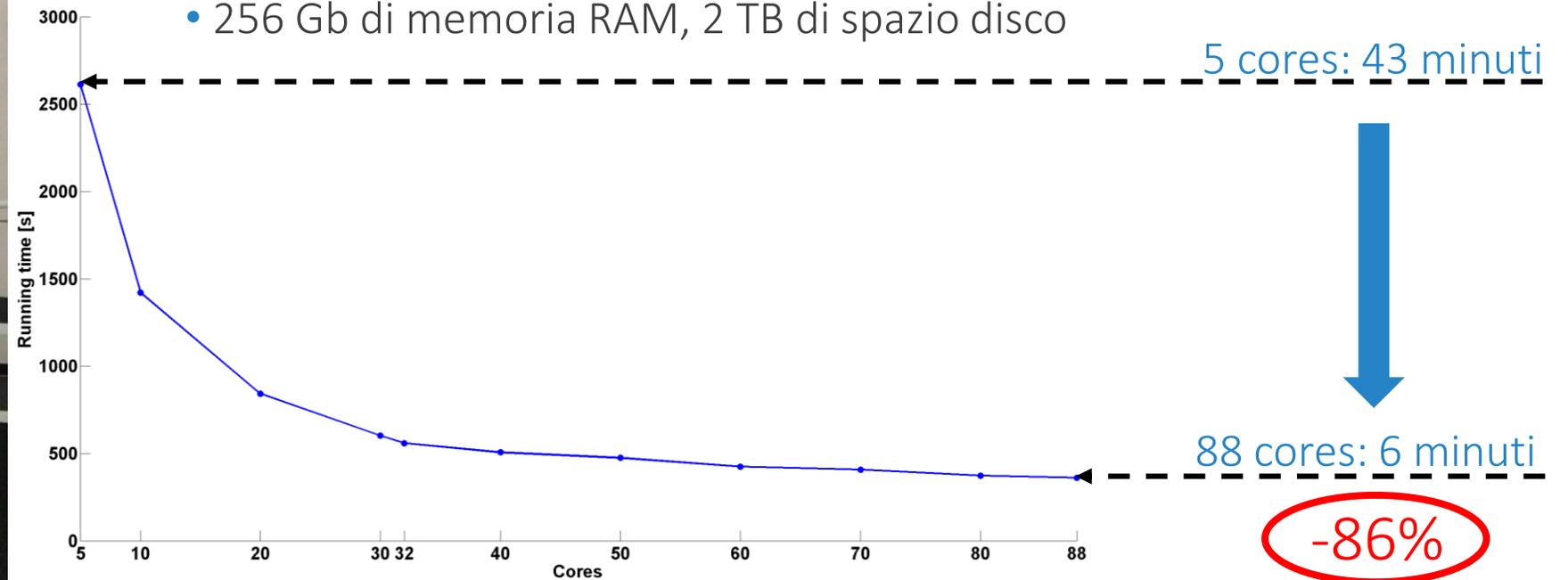
\*Dell Precision T5810 con processore a 3.50 GHz, 48.0 GB di RAM e 6 cores

# High Performance Computing (HPC)



Simulazione 3D con Ansys APDL

- Server Dell PowerEdge R940
- 4 CPU Intel(R) Xeon (R) Gold 6152 CPU @ 2.10 GHz con 22 cores per CPU (totale 88 cores)
- 256 Gb di memoria RAM, 2 TB di spazio disco



# Conclusioni

---

- COMSOL, Ansys APDL e FEMAP con NX NASTRAN sono stati impiegati per simulare problemi dinamici di propagazione ondosa
- I risultati sono stati controllati con il metodo delle velocità
- Relazione di offset tra passo spaziale e temporale
- Taratura *ad hoc*
- COMSOL più veloce ma più sensibile alla discretizzazione

# Grazie dell'attenzione

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

Chiappa Andrea<sup>\*</sup>, Giorgetti F., Messina M., Augugliaro G., Biancolini M. E.

<sup>\*</sup>andrea.chiappa@uniroma2.it