

# Técnicas ultrasonicas en desarrollo

## Evaluación no destructiva y Calidad de Estructuras

Guillermo Rus

Universidad de Granada

2023



ugr

Universidad  
de Granada

LABORATORIO  
EVALUACIÓN NO DESTRUCTIVA



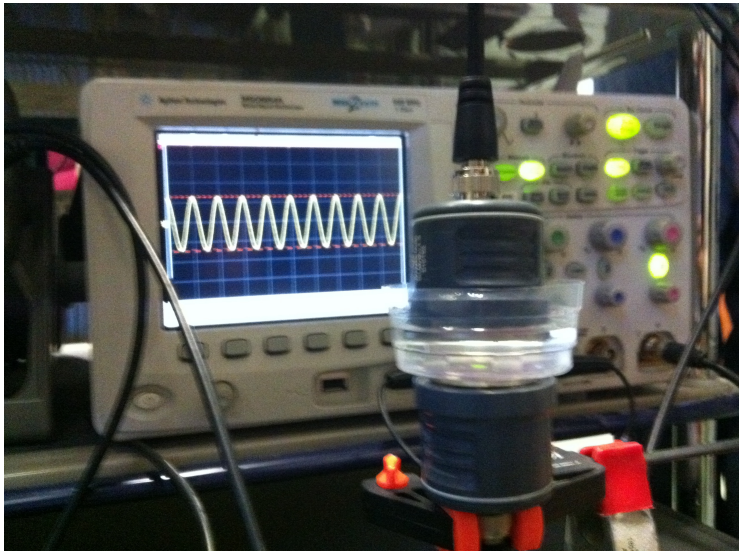
# Índice

## 1 Experimental

- Armónicos no lineales
- Propiedades
- Ondas Lamb
- Excitación y medición láser

## 2 Computacional

- END basada en modelos
- Aceleración del problema directo
- Calibración experimental-numérica
- Probabilidad de detección



# Armónicos no lineales

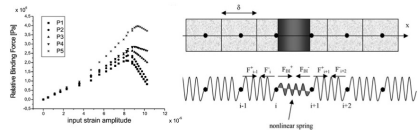
(loading...)



# Armónicos no lineales

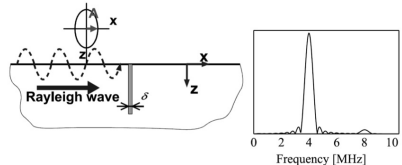
Delsanto et al. (2002)

- Constitutively nonlinear epoxy bonding
- Experimental and numerical retrieval of relative bonding force



Kawashima et al. (2002)

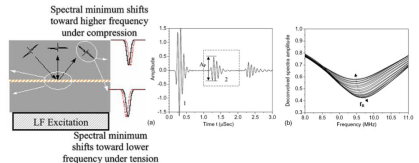
- Nonlinear contact by Rayleigh waves
- Numerical appearance of second harmonic



# Armónicos no lineales

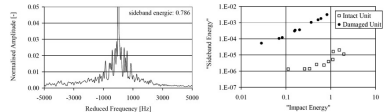
Rokhlin et al. (2004)

- theoretical explanation
- frequency shift
- compression - traction from LF



Van Den Abeele et al. (2001)

- sideband intensity versus impact LF energy



# Armónicos no lineales

Solodov et al. (2002)

- Air coupling and high pressure
- Harmonic and clapping modes

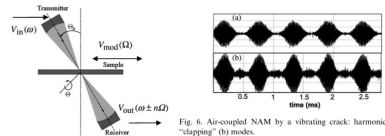


Fig. 6. Air-coupled NAM by a vibrating crack: harmonic (a) and "clapping" (b) modes.

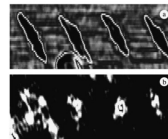
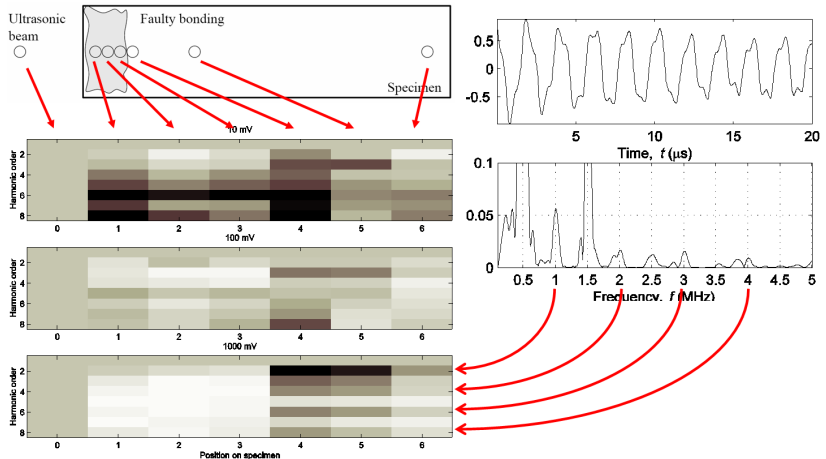


Fig. 13. Linear (a) and second harmonic (b) air-coupled images of impacts in CFRP.

# Armónicos no lineales

Rus et al. (2004)



# Tomografía ultrasónica

Meglis et al. (2005)

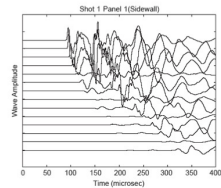
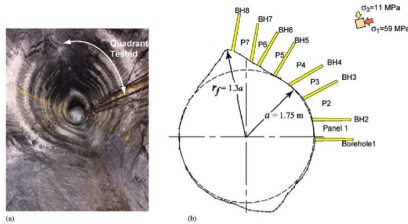
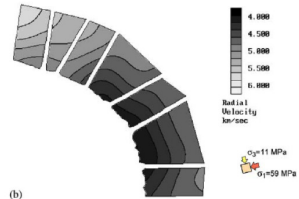
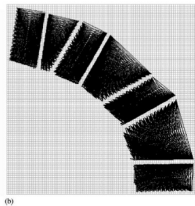


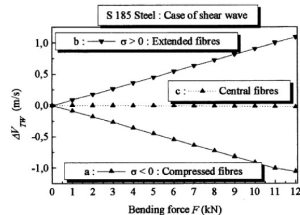
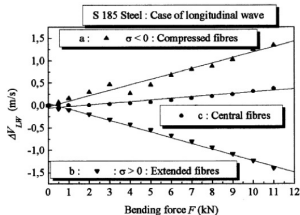
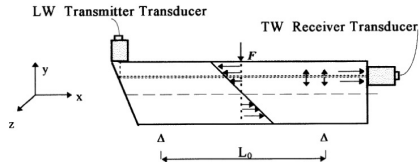
Fig. 4. Examples of waveforms from one transmitter position to 15 receivers, taken from the lowermost Panel (1) in the sidewall region.



# Acustoelasticidad

Si-Chiab et al. (2001)

$$\rho_0 V_{xx(x)}^2 = \lambda + 2\mu + \frac{\sigma}{3K} \left[ \frac{\lambda + \mu}{\mu} (4\lambda + 10\mu + 4m) + \lambda + 2l \right]$$



# Propiedades de material anisótropo por discrepancia de velocidad

Audoin et al. 2002

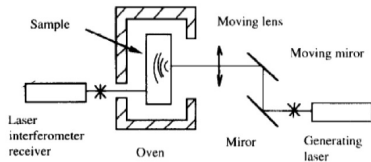


Fig. 1. Experimental apparatus.

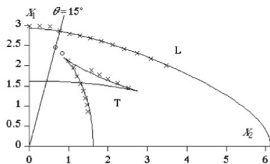


Fig. 4. Group velocities (km/s) obtained by processing experimental signals measured for the 1D composite material. The solid lines show the optimum fit of data denoted by crosses.

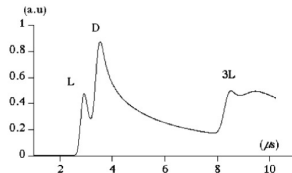


Fig. 2. Signal calculated for an observation angle of 15° through the composite plate.

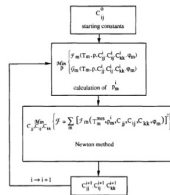
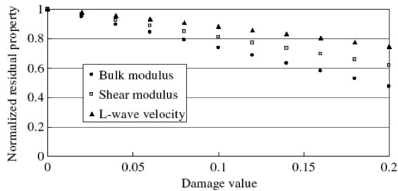


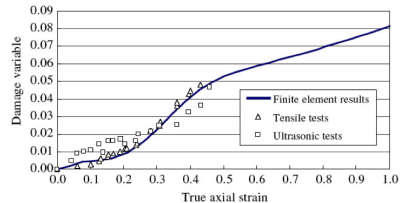
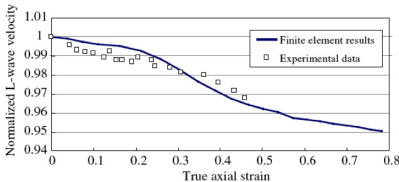
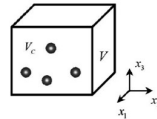
Figure 3 Optimization process

# Modelo de daño

Yeh et al. (2003), extensión del modelo Mori-Tanaka (1973)



$$\bar{G} = G_0 \left[ 1 - \frac{15(1 - \nu_0)}{(7 - 5\nu_0) + 2D(4 - 5\nu_0)} D \right], \quad \bar{K} = K_0 \left[ 1 - \frac{3(1 - \nu_0)}{2(1 - 2\nu_0) + D(1 + \nu_0)} D \right],$$





# Modelo de daño

Jeong et al. (1996), Hernández et al. (2002)

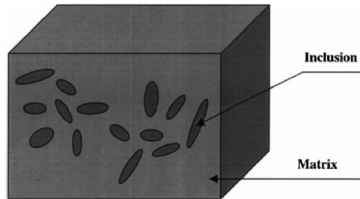


Fig. 1. Scheme of composite material.

$$\sqrt{\frac{C_{11}}{\rho}} = \text{measured longitudinal wave velocity } V_L$$

$$\sqrt{\frac{C_{44}}{\rho}} = \text{measured shear wave velocity } V_S.$$

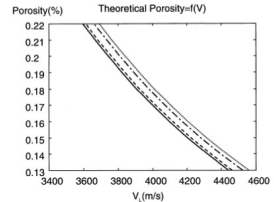


Fig. 2. Theoretical function relational porosity and longitudinal velocity; obtained from destructive and nondestructive dates.

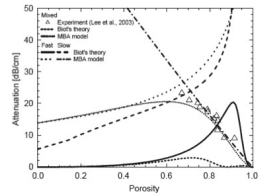
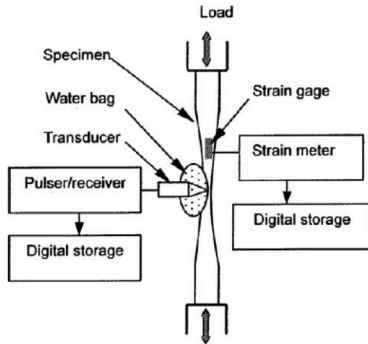


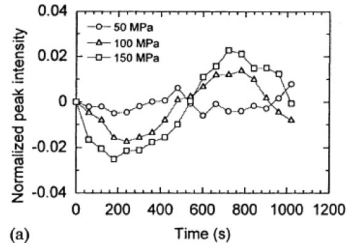
Fig. 4. Experimental and theoretical attenuation coefficients of the mixed, the fast, and the slow waves as a function of porosity at a frequency of 1 MHz.

# Relajación de frecuencia según energía disipada / vida remanente

Min et al. (2004)



(a) Schematic representation of setup



(a)

# Propiedades por backscattering

Vergara et al. (2001)

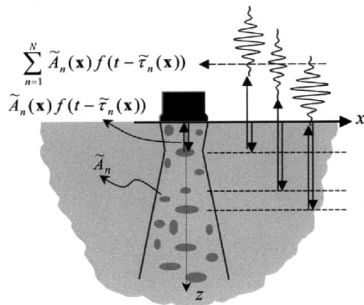
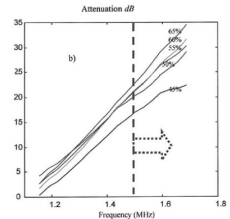
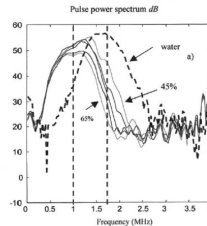
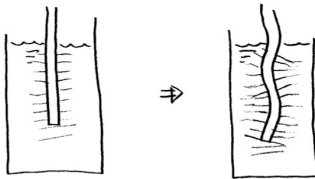


Fig. 2. Ultrasonic signal generation model in pulse-echo mode.



# Ondas Lamb

Viscosímetro por ondas quasi-Scholte



Obstrucciones en tubos



Placas (aeronáutica)  
Embedded sensors

## Propiedades por backscattering

Banda ultra-ancha

Permite analizar frecuencias ultra-altas, por emisión de pulsos muy cortos

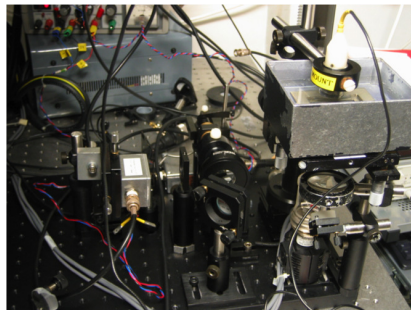
Descripción:

- Un pulso láser calienta un área muy pequeña (ms) durante muy poco tiempo (ps).
- El área se calienta y enfría, dilatándose y siendo una fuente puntual de una onda esférica de presión mecánica.

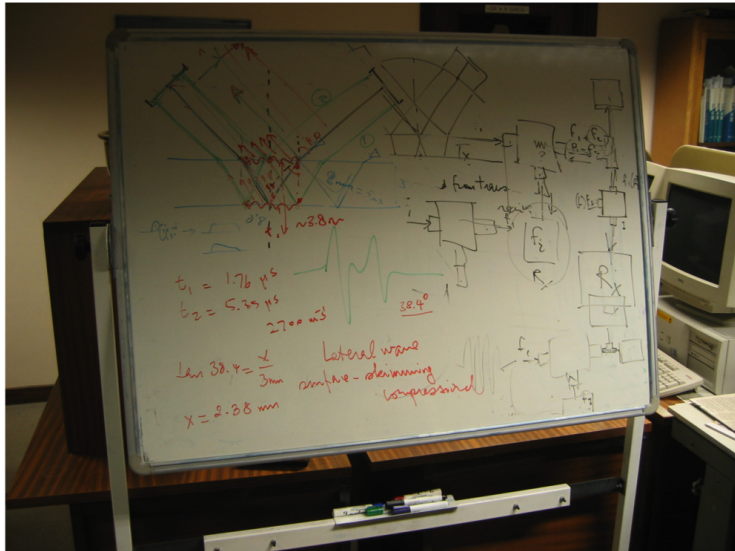
# Interferometría láser

Banda ultra-ancha

Funcionamiento: Se mide el desplazamiento en un punto en sentido longitudinal al láser por interferometría de su fase. Puede combinarse con barridos de alta frecuencia para escanear áreas.



Laboratorio MedPhysics (UCL,  
Londres) 2004



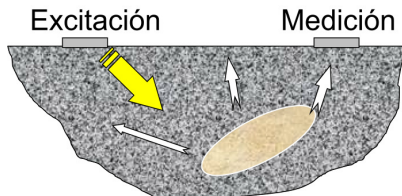
# END basada en modelos

## Principios:

- Ultrasonidos
- Corriente inducida
- Radar
- Tomografía infrarrojos
- Penetrante magnético
- Resistividad
- Emisión acústica
- Gravimetría ...

## Modelos:

$$(\lambda + \mu)u_{j,jj} + \mu u_{i,jj} + \rho b_i = \rho \ddot{u}_i$$





# Introducción

## Principios:

- Ultrasonidos
- Corriente inducida
- Radar
- Tomografía infrarrojos
- Penetrante magnético
- Resistividad
- Emisión acústica
- Gravimetría ...

## Modelos:

$$(\lambda + \mu)u_{j,jj} + \mu u_{i,jj} + \rho b_i = \rho \ddot{u}_i$$

Solución: FEM, BEM, ...

(loading...)

## Limitaciones actuales en US

Atenuación

Ruido

Cuantitativa - Cualitativa

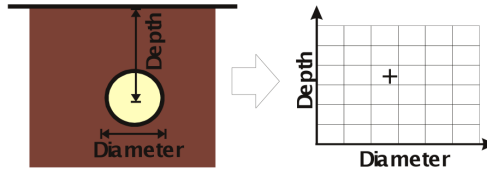
Adhesión - Interfaz en contacto

Daño / Defecto

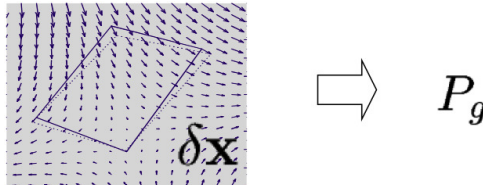
Computación a alta frecuencia

# Parametrización

Parametrización de defecto tipo cavidad:

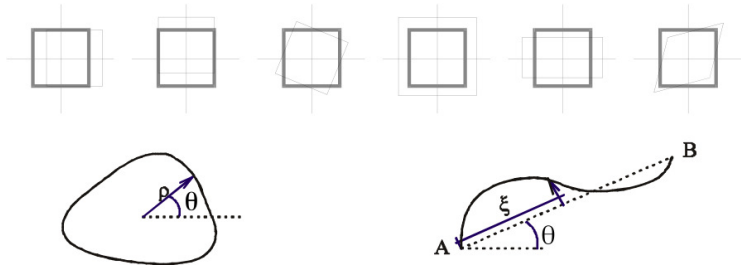


Parametrización geométrica genérica:



# Parametrización

Otros ejemplos: genérica 2D lineal; cavidad por spline en polares; grieta por spline:



## Aceleración del problema directo

Modelos simplificados:

- Teoría de rayos: casos límite de frecuencia / direccionalidad.

Modelos analíticos:

- Geometrías de medio infinitas, semiinfinitas, por capas?
- Geometrías de defectos puntuales, circulares?
- Excitación armónica con un frente: posible generalización por series de Fourier.

Modelos computacionales:

- FD
- FEM
- BEM
  - Multipolo
  - Soluciones semianalíticas

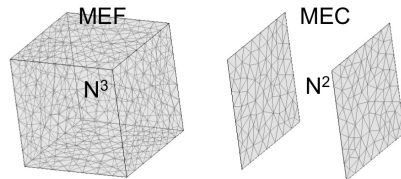
# Comparación de modelos

## Tiempo de solución

- $N$  = división típica
- $GDL$  = grados de libertad

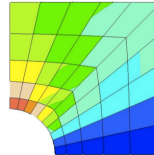
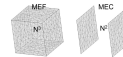
## Solucionadores

- Directo:  $GDL^3$
- Iterativo:  $GDL^2$
- Métodos multipolo:  
 $GDL^1 \log(GDL)$



# Comparación de modelos

Tiempo de solución  
Error de discretización

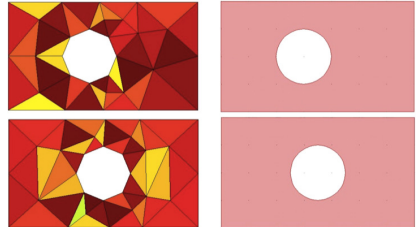
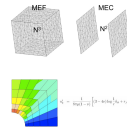


$$u_k^i = \frac{1}{8\pi\mu(1-\nu)} \left[ (3-4\nu) \log \frac{1}{r} \delta_{ik} + r_{,i} r_{,k} \right]$$

# Comparación de modelos

Tiempo de solución  
Error de discretización  
Contornos móviles

- Remallado
- Análisis de perturbación





# Comparación de modelos

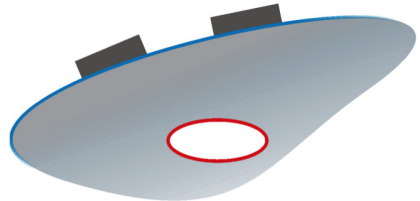
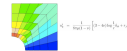
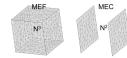
Tiempo de solución

Error de discretización

Contornos móviles

Sólo contorno

- Datos (mediciones)
- Incógnitas (definir defecto)



# Algoritmos de optimización robustos

$\mu$ GA

Hybrid GA

Gradient based method / CHC

Climbing GA

# Gradiente

Diferencias finitas:

- Simple de programar.

Derivación Directa:

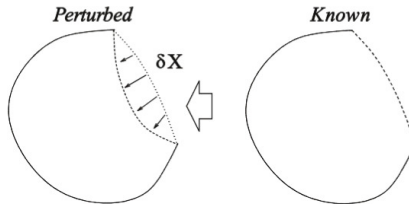
- Analítica.
- Mayor exactitud y velocidad que D.F.

Método de la Variable Adjunta:

- Requiere precisión de cálculo (FIT).
- Formulación independiente del método de resolución: caja negra (pero inconsistente).

# Gradiente

Diferencias finitas:

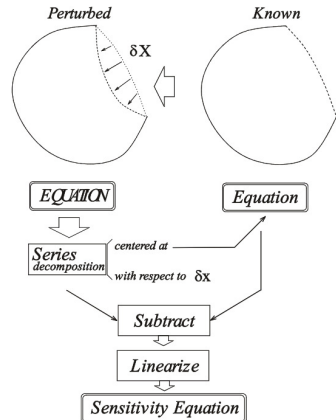


$$\frac{\partial f}{\partial x} \approx \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\overset{\text{perturbada}}{f(x + \varepsilon)} - \overset{\text{no perturbada}}{f(x)}}{\varepsilon}$$

# Gradiente

Derivación directa:

$$\delta \text{modelo} \approx \lim_{\delta x \rightarrow 0} (\text{m\~{o}delo} - \text{modelo})$$



# Gradiente

Ejemplos:

Optimización: Gauss-Newton

Sensibilidad: Derivación directa

(loading...)

# Gradiente

Ejemplos:

Optimización: Gauss-Newton

Sensibilidad: Derivación directa

(loading...)

# Derivada Topológica - Método de las burbujas

Extensión de la derivada topológica a dinámica:

- Se requieren soluciones analíticas de ondas P y S incidentes y emitidas.

Burbujas:

- Cálculo con una nube de cavidades/inclusiones de posición fija, y calcular los tamaños de cada una, creando un mapa de densidad de daño.



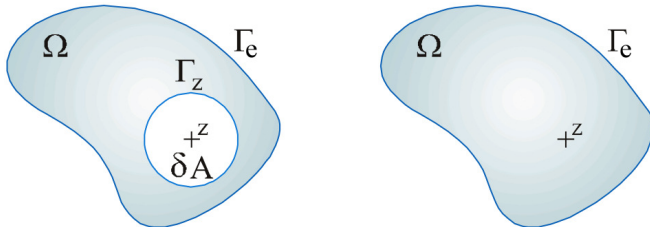
# Derivada Topológica

Gallego & Rus (2004) - concepto:

(loading...)

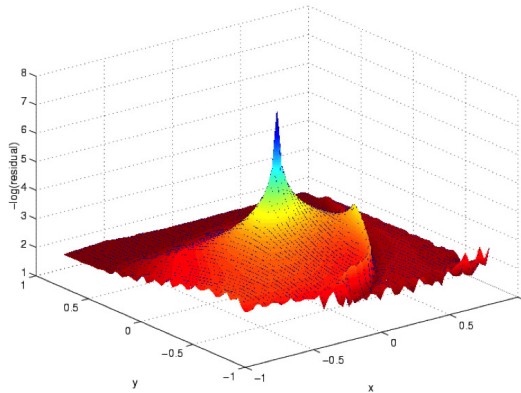
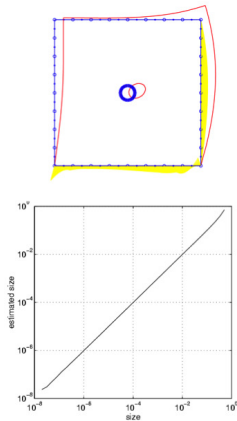
# Derivada Topológica

$$o(m) = o(0) + \frac{\partial o}{\partial m} A + O(A^2)$$

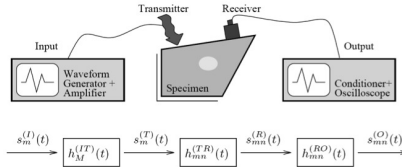


# Derivada Topológica

## Predicción de tamaño y posición



# Calibración experimental-numérica



$$s^O(t) = h^{RO}(t) * s^R(t)$$

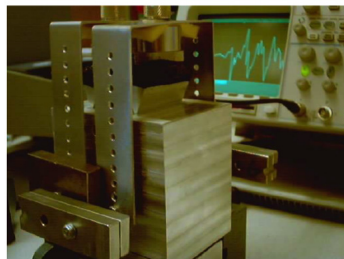
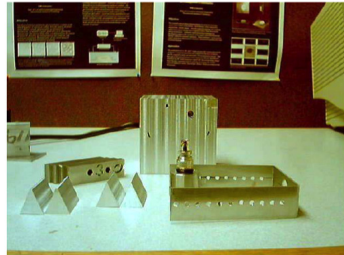
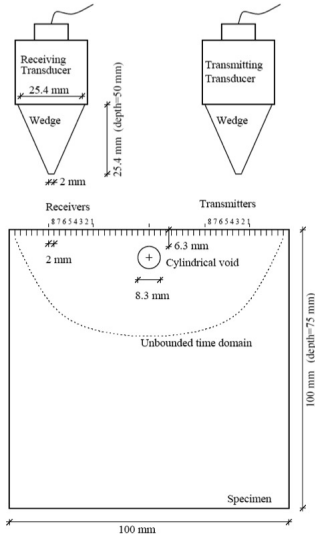
$$s^R(t) = h^{TR}(t) * s^T(t)$$

$$s^T(t) = h^{IT}(t) * s^I(t)$$

$$s^O(t) = g(t) * h^{TR}(t)$$

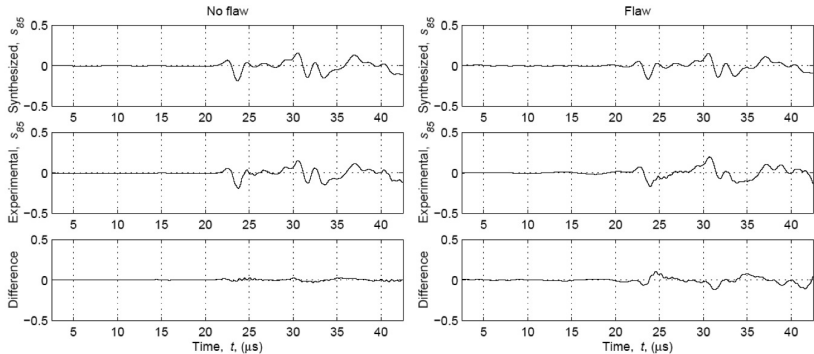
$$g(t) = s^I(t) * h^{IT}(t) * h^{RO}(t)$$

# Calibración experimental-numérica: ejemplo



# Calibración experimental-numérica

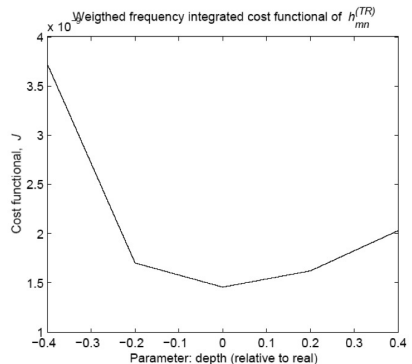
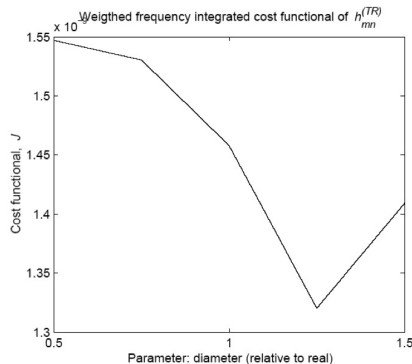
## Ejemplo: señal experimental y sintética



Nótese la importancia de las ondas Rayleigh ocultando el defecto

# Calibración experimental-numérica

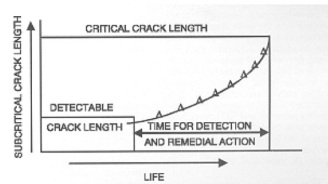
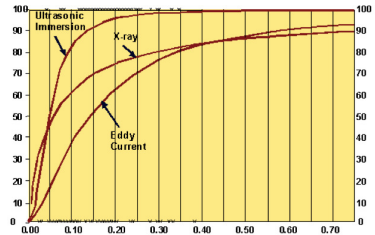
## Ejemplo: funcional de costo



Nótese que el rango del  $J$  del Diámetro (1.2:1) < rango de  $J$  de la Profundidad (2.5:1)

# Probabilidad de detección

Origen del término: búsqueda con perros policía (PoD, Probability of Detection)  
Complemento: PFI (Probability of False Identification)





# Probabilidad de detección

Si conseguimos crear un estimador de la POD, podemos usarlo como criterio de optimalidad para optimizar los sensores.

Definición de POD:

$$POD = P \left( \frac{|\text{signal}|^2}{|\text{noise}|^2} > 1 \right)$$

Expansión en serie de las observaciones:

$$o(m, \sigma) = o(0, 0) + \underbrace{m \frac{\partial o}{\partial m}(0, 0)}_{\text{signal}} + \underbrace{\sigma \frac{\partial o}{\partial \sigma}(0, 0)}_{\text{noise}} + \text{hot}$$

## Probabilidad de detección

Si el ruido es gaussiano,  $\frac{\partial o}{\partial \sigma}(0,0) \sim N(1,0)$ :

$$POD = P \left( m^2 > \frac{\sigma^2 |N(1,0)|^2}{\left| \frac{\partial o}{\partial m}(0,0) \right|^2} \right) = F \left( \frac{\sigma^2 |N(1,0)|^2}{\left| \frac{\partial o}{\partial m}(0,0) \right|^2} \right)$$

Puesto que el cuadrado de  $N$  procesos gaussianos se aproxima por una distribución  $\chi^2(N) \approx N(N - 2/3, \sqrt{2N})$  de media  $N - 2/3$  y desviación típica  $\sqrt{2N}$ ,

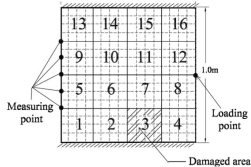
$$m^2 \longrightarrow N \left[ \frac{\sigma^2(N - 2/3)}{\left| \frac{\partial o}{\partial m}(0,0) \right|^2}, \frac{\sigma^2 \sqrt{2N}}{\left| \frac{\partial o}{\partial m}(0,0) \right|^2} \right]$$

También se puede despejar  $\frac{m}{\sigma}$  que resulta invariante del ruido,

$$\frac{m}{\sigma} = \sqrt{\frac{(N - 2/3)}{\left| \frac{\partial o}{\partial m}(0,0) \right|^2} \left( 1 - G[POD] \frac{\sqrt{2N}}{N - 2/3} \right)}$$

# Probabilidad de detección

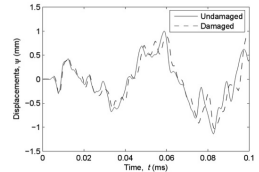
Modelo:



Simulación:

(loading...)

Señal:



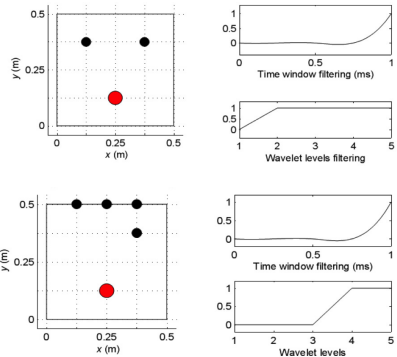
# Probabilidad de detección

Filtro  $w$ :

- Escalas wavelet
- Ventana de tiempo
- Puntos de medición

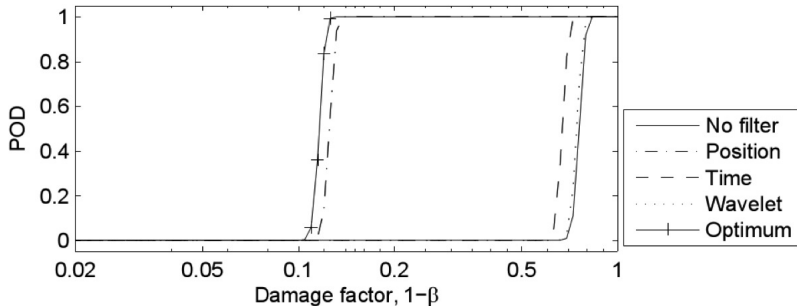
Optimización:

- GA



# Probabilidad de detección

Estimación de POD con varios filtros. 5% ruido



Mejora: 3x - 6x Mejor filtro: posición mediciones

# Calibración experimental-numérica

Ejemplo: Monitorizar estructuras de materiales compuestos (CFRP)

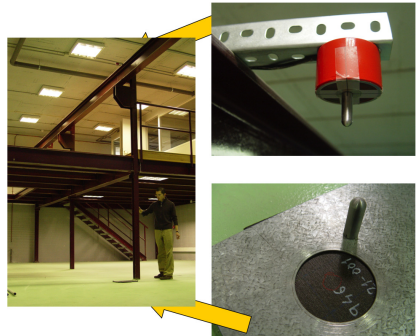


# Calibración experimental-numérica

Ejemplo: CFRP

Simulación de daño:

- Impacto
- Fatiga

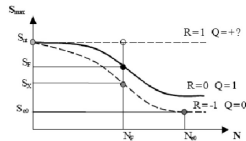
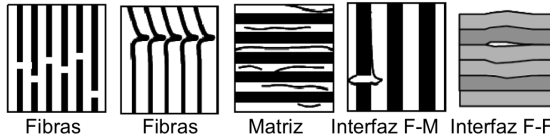


# Calibración experimental-numérica

Ejemplo: CFRP

Modelo de daño

- Delaminación: degradación de interfaz
- Degradación: microfisuración en matriz
- Vida remanente: curvas S-N





# Calibración experimental-numérica

## Ejemplo: CFRP - Transmisión ultrasónica

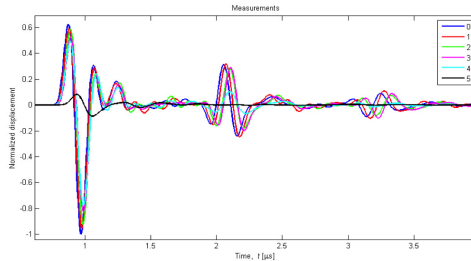


# Calibración experimental-numérica

Ejemplo: CFRP

Modelo MEF 1D lineal

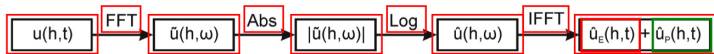
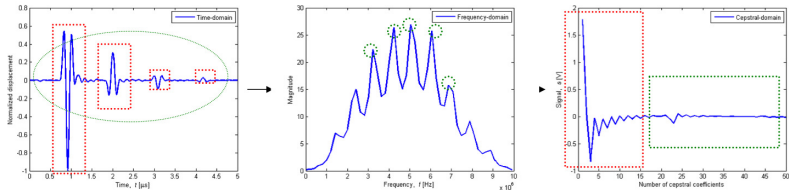
Solución del PI por BFGS



# Definición de observación

Discrepancia en el dominio del cepstrum.

Cepstrum: transformación homomórfica que convierte la convolución en una suma



# Definición de observación

Discrepancia en el dominio del cepstrum.

