



**INSTITUTO DE
TECNOLOGIA**

PROF. JORGE A. SABATO

**UNIVERSIDAD NACIONAL
DE GENERAL SAN MARTIN**

**COMISION NACIONAL
DE ENERGIA ATOMICA**

**MAESTRIA EN
CIENCIA Y
TECNOLOGIA
DE MATERIALES**

**CARACTERIZACIÓN Y
PROPAGACIÓN
DE ONDAS DE EMISIÓN ACÚSTICA
EN PROBETAS TUBULARES
DE ACERO**

Juan Ignacio Mieza

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE GENERAL SAN MARTÍN
COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA
INSTITUTO DE TECNOLOGÍA
“Prof. Jorge A. Sabato”**

**Caracterización y Propagación de Ondas de Emisión
Acústica en Probetas Tubulares de Acero ^(*)**

por J. Ignacio Mieza

Directores

**Dra. María Isabel López Pumarega
Dr. José E. Ruzzante**

^(*) Tesis para optar al título de Magister en Ciencia y Tecnología de Materiales

República Argentina

Junio de 2004

COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA CENTRO DE INFORMACION C A C

RESUMEN

En este trabajo se estudian las características de las señales de emisión acústica (EA) originadas por la rotura de un recubrimiento superficial y las originadas por la emisión en el volumen de cuerpos sólidos de acero. La EA proviene de ensayos de deformación plástica triaxial de probetas de acero con forma de "herradura", cortadas de un tubo de acero sin costura. Las señales se analizan con métodos avanzados, como son la transformada Wavelet y el análisis fractal, junto con las técnicas tradicionales utilizadas en la emisión acústica. Se logran separar claramente las señales originadas por los distintos mecanismos, considerando modelos estadísticos de distribución de los parámetros. Paralelamente, se estudia la propagación de ondas elásticas en geometrías cilíndricas huecas, mediante un novedoso método que combina la descripción de las soluciones teóricas de la ecuación de ondas, con los diagramas Tiempo-Frecuencia-Energía obtenidos mediante la transformada Wavelet de las señales experimentales.

Palabras Claves: Emisión Acústica, Propagación de Ondas Elásticas, Cilindros Huecos de Acero, Transformadas Tiempo-Frecuencia, Dimensión Fractal, Distribución de Amplitud.

ABSTRACT

In this work, the characteristics of Acoustic Emission (AE) due to a coating layer breakage and the AE from bulk steel material are studied. AE is originated in triaxial plastic deformation tests applied to "horseshoe" shaped testsamples, obtained from a seamless steel tube. Signals are analyzed with advanced methods like the Wavelet transform and Fractal analysis, and with traditional AE techniques. Signals from diferent sources are clearly separated with statistical models of distribution of parameters. The elastic wave propagation in hollow cylindrical shaped testsamples is also studied with a novel technique that combines theoretical solutions of the wave equation and experimental Time-Frequency-Energy diagrams obtained with the Wavelet transform.

Key words: Acoustic Emission, Elastic Wave Propagation, Steel Hollow Cylinders, Time-frequency Transforms, Fractal Dimension Analysis, Amplitude Distribution

Algunos de los resultados de este trabajo fueron presentados en congresos y enviados para su publicación en revistas internacionales, según el siguiente detalle:

- **"IDENTIFICATION OF AE BURST BY CLASSIFICATION OF PHYSICAL AND STATISTICAL PARAMETERS"** - J.I. Mieza, M. Oliveto, M.I. López Pumarega, M. Armeite, J. E. Ruzzante, R. Piotrkowski - QNDE2004 – Colorado School of Mines - EEUU, 25-30 de Julio de 2004.
- **"METHODS FOR SIGNAL ANALYSIS IN ULTRASONIC WAVES"** - R. Piotrkowski, M.I. López Pumarega, M. Armeite, M. Oliveto, J.I. Mieza, J. E. Ruzzante -, abstract enviado para su presentación en el "Eight World Multi-Conference on Systemics Cybernetic and Informatics, SCI2004", Orlando, EEUU, 18-21 de Julio de 2004.
- **"IDENTIFICATION OF REFLECTED WAVES IN ACOUSTIC EMISSION COMPLEX SIGNALS USING STATISTICAL METHODS, LAMB WAVES AND WAVELET TRANSFORM"** -R. Piotrkowski, M.I. López Pumarega, M. Armeite, M. Oliveto, J.I. Mieza, J. E. Ruzzante — Ultrasonics – Enviado Octubre de 2003 – En revisión.
- **"AVANCES EN EMISIÓN ACÚSTICA, GRUPO ONDAS ELÁSTICAS"** - M. I. López Pumarega, M. Armeite, J. E. Ruzzante, R. Piotrkowski, J. I. Mieza - - Segundas Jornadas de Acústica, Electroacústica y Áreas vinculadas" – Buenos Aires – 2 al 4 de Octubre de 2003.
- **"ANÁLISIS DE LOS ECOS EN SEÑALES DE EMISIÓN ACÚSTICA"** - R. Piotrkowski, M. I. López Pumarega, M. Armeite, J. I. Mieza, J. E. Ruzzante — III PAN-AMERICAN CONFERENCE FOR NONDESTRUCTIVE (PANNDT) - Río de Janeiro – Brasil – Junio de 2003 – (Code: PANNDT 027) .

PRESENTACIÓN DEL TRABAJO	3
1 INTRODUCCIÓN	4
1.1 GENERALIDADES DE LA EMISIÓN ACÚSTICA.....	4
1.2 LA EMISIÓN ACÚSTICA COMO ENSAYO NO DESTRUCTIVO (END).....	5
1.3 ORIGEN DE LA EMISIÓN ACÚSTICA EN METALES.....	7
1.3.1 EA por Movimiento de Dislocaciones	7
1.3.2 EA por Maclado.....	10
1.3.3 EA por Fractura	10
1.3.4 EA por Fractura y Decohesión de Partículas.....	11
1.4 PROPAGACIÓN DE ONDAS ELÁSTICAS.....	12
1.4.1 Medio Elástico Infinito.....	12
1.4.2 Medio Elástico Semi-infinito	13
1.4.3 Ondas de Superficie.....	15
1.4.4 Medio Elástico Acotado (Guías de Ondas).....	16
1.4.5 Atenuación y Dispersión.....	17
1.5 TERMOELASTICIDAD	18
1.6 INSTRUMENTACIÓN	19
1.6.1 Sensores	19
1.6.2 Amplificadores.....	21
1.6.3 Ruido.....	21
1.6.4 Procesadores	22
1.7 ANÁLISIS DE LAS SEÑALES	22
1.7.1 Parámetros.....	22
1.7.2 Distribuciones Estadísticas.....	23
1.7.3 Dimensión Fractal (Diagrama de Richardson).....	27
1.8 TÉCNICAS AVANZADAS DE ANÁLISIS DE SEÑALES.....	29
1.8.1 Transformada de Fourier.....	29
1.8.2 Transformada Localizada de Fourier.....	29
1.8.3 Transformada Wavelet	30
1.8.4 Distribuciones Tiempo-Frecuencia	33
2 EXPERIMENTAL	35
2.1 DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS	35
2.1.1 Probetas tipo Tubo	35
2.1.2 Probetas tipo Herradura	37
2.2 EQUIPAMIENTO	40
2.2.1 Osciloscopio Digital	40
2.2.2 Equipo Paramétrico de EA	40
2.2.3 Dispositivo de apertura de probetas tipo herradura.....	42
2.2.4 Sensores	43
2.2.5 Pre-amplificadores.....	43
2.2.6 Fuente Hsu-Nielsen.....	43
2.2.7 Calefactor y Termocupla	44
2.2.8 Programas de computadora (software)	44
3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	45
3.1 ENSAYOS CON TUBOS.....	45
3.1.1 Superposición Curvas Dispersión sobre Diagramas TFE.....	45
3.1.2 Aproximación de curvas de dispersión de placas a tubos.....	50
3.1.3 Trayectorias de Propagación.....	52
3.1.4 Efectos del Tipo de Fuente.....	54
3.1.5 Efectos del Sensor	56

3.1.6	Tubo I - Ensayo 1	56
3.1.7	Tubo I - Ensayo 2	61
3.1.8	Tubo I - Ensayo 3	64
3.1.9	Tubo II - Ensayo 1	67
3.1.10	Tubo II - Ensayo 2	70
3.1.11	Tubo II - Ensayo 3	73
3.1.12	Tubo II - Ensayo 4	74
3.1.13	Tubo II - Ensayo 5	78
3.1.14	Tubo III - Ensayo 1	81
3.1.15	Tubo IV - Ensayo 1	83
3.1.16	Tubo IV - Ensayo 2	84
3.1.17	Tubo V - Ensayo 1	85
3.1.18	Tubo V - Ensayo 2	90
3.1.19	Tubo V - Ensayo 3	91
3.1.20	Tubo V - Ensayo 4	93
3.2	ENSAYOS TIPO HERRADURA	94
3.2.1	Estudio general de los Parámetros	95
3.2.1	Distribución de la Amplitud	99
3.2.2	Parámetros Externos, Velocidad y Eventos Acumulados	103
3.2.3	Dimensión Fractal	105
3.2.4	Diagramas TFE	108
4	CONCLUSIONES	112
	BIBLIOGRAFÍA	115
	ANEXO A – PROPAGACIÓN DE ONDAS ELÁSTICAS EN TUBOS	118
	ANEXO B – TABLAS DE ENSAYOS DE PROBETAS TIPO TUBO	124
	ANEXO C – CURVAS DE CALIBRACIÓN DE SENSORES	130

PRESENTACIÓN DEL TRABAJO

El objetivo de este trabajo consiste en la caracterización de señales de emisión acústica (EA) originadas por la rotura de recubrimientos superficiales y la originada en el volumen, para cuerpos sólidos de acero.

La importancia de la discriminación entre señales provenientes de distintas fuentes, radica en la posibilidad de diagnóstico y seguimiento de componentes críticos o inaccesibles en muchas estructuras industriales. Además, por ser la EA un proceso de liberación de energía que involucra zonas muy localizadas de los materiales (algunos átomos) se presenta como una herramienta muy útil para el estudio y caracterización microscópica de los materiales.

Tradicionalmente, se estudia a la EA a través de un conjunto de parámetros típicos de las señales. Actualmente, existe la posibilidad de contar con la señal completa de manera sencilla y a bajo costo, que junto con herramientas de análisis de señales avanzadas, permite a la técnica una mayor flexibilidad y profundidad en los estudios. Las transformadas tiempo-frecuencia surgen como una vía natural para el análisis de señales transitorias como lo son las generadas por EA. En particular, una de estas transformadas es la Wavelet, que ha sido exitosamente aplicada a un gran conjunto de problemas y para la cual existen herramientas desarrolladas para la implementación directa del algoritmo.

Sobre estas bases se diseñaron los experimentos y las etapas a cumplir en el trabajo. Como primer punto debe considerarse que la geometría de las probetas utilizadas estaba definida previamente. Provenían de un diseño de trabajos anteriores del Grupo, lo mismo que la máquina con que se realizaron los ensayos. Las probetas son secciones anulares de un tubo de acero sin costura, maquinadas con forma de "herradura".

Las características geométricas de este tipo de probetas introduce modificaciones importantes en la forma de las señales que se generan durante los ensayos, haciendo más complejo el análisis sin un conocimiento previo de las características de propagación. Por este motivo, se decidió empezar el trabajo por un estudio de probetas con geometrías más simples, como son las probetas tipo "tubos". Sobre ellas se estudiaron las características de propagación de las ondas, mediante resultados teóricos conocidos y la aplicación de la transformada Wavelet a las señales experimentales.

Una vez conocidos los alcances de la aplicación de esta nueva técnica de estudio de señales, se aplicó para las probetas originales. A su vez, se realizaron estudios con los parámetros tradicionales de EA, para comparar con resultados anteriores y con la nueva técnica.

1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se describe un panorama amplio de las características principales de la Emisión Acústica tanto en su aspecto básico como en su aplicación como técnica de ensayo no destructivo. Además se detallan las características de la propagación de ondas elásticas y de algunas de las herramientas de análisis de señales más utilizadas.

1.1 GENERALIDADES DE LA EMISIÓN ACÚSTICA

La emisión acústica (EA), es un proceso dinámico de generación y propagación de ondas elásticas en sólidos, dentro de un rango de frecuencias ultrasónicas (20 kHz - 1 MHz). Las ondas, son originadas por una rápida liberación de energía en zonas localizadas del sólido, involucrando un movimiento colectivo de átomos. Los mecanismos que producen EA tienden a minimizar la energía del sistema luego de producido algún desbalance. Es necesario que exista alguna perturbación que active las fuentes internas del material; por este motivo se diferencia a la EA de otras técnicas en donde se introducen externamente las ondas elásticas. En la Figura 1.1, se muestra el rango de frecuencias y un esquema de los elementos principales de la emisión acústica.

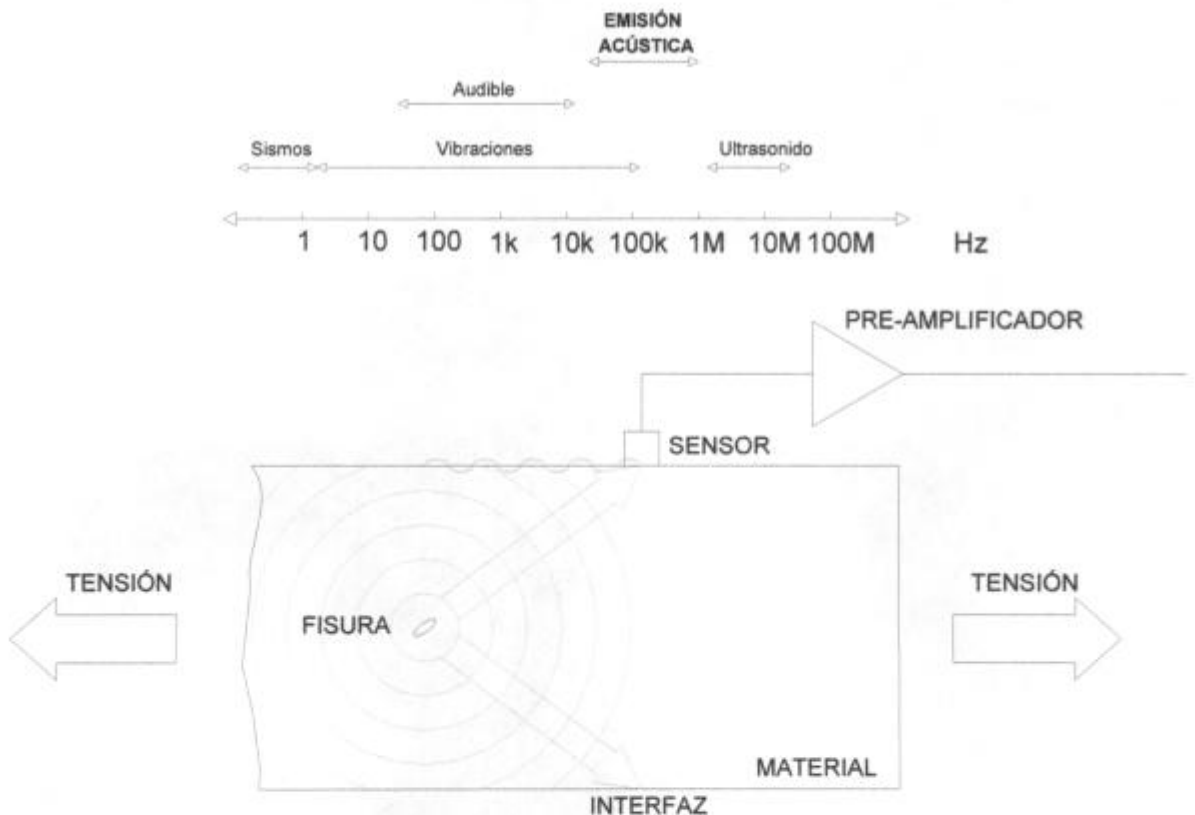


Figura 1.1 – Rango de frecuencias y Esquema de los elementos involucrados en la Emisión Acústica.

Una vez liberada la energía elástica, la onda generada se propaga de acuerdo a la geometría, las condiciones de contorno y las características físicas del material.

Dependiendo del tipo de fuente, a las ondas¹ elásticas generadas se las clasifica como tipo **evento** o tipo **continuas**, como se muestra en la Figura 1.2. La emisión tipo evento es un fenómeno transitorio donde se localiza claramente el inicio y el fin; siendo su forma la de una oscilación amortiguada. En cambio, para la emisión continua, la forma de la onda responde a una superposición de señales tipo evento que conforman una señal extendida en el tiempo. En realidad, considerando a los mecanismos de generación de la emisión acústica, es claro, que todas las señales son de tipo evento; el hecho de distinguir señales de tipo continuas se debe a efectos prácticos de clasificación.

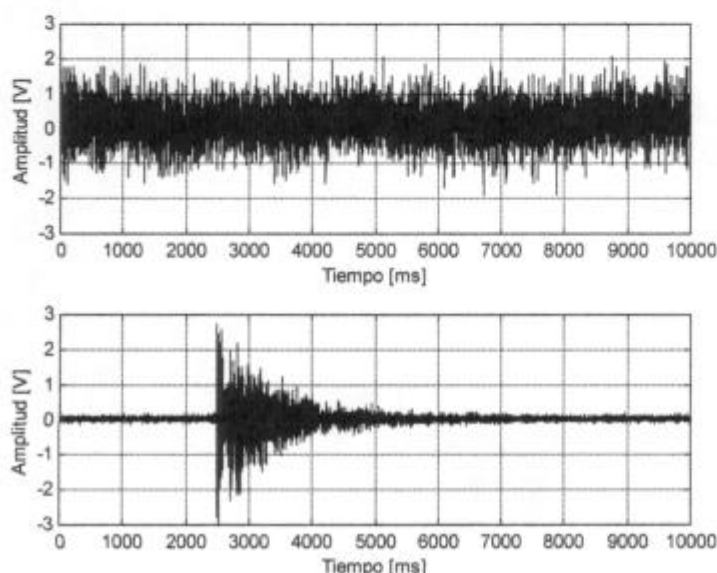


Figura 1.2 – Tipo de señales de Emisión Acústica. En la parte superior, una señal de tipo **continua**, y en la parte inferior una de tipo **evento**. La señal continua se forma por superposición de señales tipo evento.

Existe una amplia gama de fuentes conocidas de emisión acústica que abarcan diferentes mecanismos y magnitudes.

En los metales se han identificado como fuentes a movimientos de dislocaciones, crecimiento de fisuras, deslizamiento de borde de grano, fractura y decohesión de inclusiones, corrosión bajo tensión, rotura de recubrimientos e inicio y propagación de fisuras. Otros mecanismos posibles, menos estudiados hasta el presente, son transformaciones de fases sólidas, procesos de solidificación o licuefacción y movimiento de dominios magnéticos.

Para los materiales compuestos, se ha informado actividad acústica debida a la rotura de la matriz, fractura de las fibras y decohesión entre fibra y matriz.

Existen además otros tipos de fuentes dentro de un rango muy amplio de amplitudes y frecuencias, que abarcan desde niveles microscópicos hasta fenómenos sísmicos y volcánicos.

1.2 LA EMISIÓN ACÚSTICA COMO ENSAYO NO DESTRUCTIVO (END)

¹ A lo largo del trabajo se tomarán como sinónimos a las palabras ondas y señales. Teniendo presente que la señal es el resultado de transducir la onda elástica a una magnitud eléctrica.

A partir de las ondas elásticas generadas en los objetos bajo estudio, es posible extraer mucha información sobre su estado y características. Este es el fundamento para la aplicación de la emisión acústica como técnica de ensayo y caracterización no destructiva, cuyos orígenes se encuentran en la década de 1960.

La medición de las ondas elásticas generadas (o una parte de ellas) se realiza mediante transductores colocados en la superficie de las muestras, materiales o estructuras estudiados. Dichos transductores miden los desplazamientos mecánicos que se suceden en la superficie y los transforman en magnitudes eléctricas (señales de emisión acústica).

La señal así obtenida posee información tanto sobre el tipo de fuente como sobre el camino de propagación hasta la superficie. El análisis se realiza posteriormente con diversas herramientas matemáticas.

A modo de resumen, en la Figura 1.3 se muestra un esquema de los bloques principales involucrados en la aplicación de la EA como técnica de ensayo no destructivo que se describirán detalladamente en los incisos que continúan.



Figura 1.3 – Esquema básico de un ensayo de Emisión Acústica.

Características de la Técnica:

Como ya se dijo, la EA es una técnica que utiliza la energía de deformación (mecánica, térmica) para activar la emisión de ondas elásticas a partir de los defectos internos del material que actúan como fuentes. En contraposición, las técnicas activas suministran la energía elástica desde el exterior (ej: ultrasonido). La emisión es intrínseca al material, depende de las características físicas y del estado de sollicitaciones en cada instante.

Como los procesos son dinámicos, la técnica permite un seguimiento continuo de los fenómenos estudiados durante el servicio normal de la pieza o componente. Este tipo de facilidad, permite además la posibilidad de un registro histórico de los eventos más importantes. En contraposición, en aquellas situaciones dónde no se presenten los efectos dinámicos esta técnica no puede aplicarse.

En general, la emisión de las ondas no es direccional, se originan en fuentes puntuales que emiten esféricamente, lo que permite un amplio rango de inspección y gran flexibilidad en la localización de los sensores. Además, por cada ensayo se releva una gran superficie con el consiguiente ahorro de tiempo respecto a los análisis locales; aunque la sensibilidad comparada puede ser inferior.

Dada su importancia práctica e histórica se hace una descripción breve del Efecto Kaiser y la Relación Felicity, ampliamente utilizados en la emisión acústica.

El efecto Kaiser establece que un material emitirá siempre y cuando sea sometido a una carga superior a la última carga que generó una emisión. En otro caso, si la carga no supera la máxima, el material permanecerá sin emitir. Este tipo de efecto está presente en varios metales, aunque puede desaparecer si son sometidos a temperaturas de recocido. Basados en este efecto, existen métodos de inspección de estructuras, como en grandes recipientes a presión [1-1].

Para algunos materiales, especialmente los compuestos, el efecto Kaiser no es observable o no respeta el postulado original. En general, el efecto Kaiser falla cuando los mecanismos que controlan la deformación de los materiales son dependientes del tiempo, como la relajación de una matriz de un compuesto, procesos de corrosión, transformaciones de fase o fragilización por hidrógeno. En estos casos se utiliza otro parámetro llamado efecto Felicity, que tiene como caso particular al efecto Kaiser cuando la relación es igual a uno. La expresión para la relación Felicity (F) es:

$$F = \text{Tensión de reinicio de la EA} / \text{Máxima tensión anterior}$$

Una generalización del postulado del efecto Kaiser se encuentra cuando se sustituye el estudio de la carga por el estudio de las tensiones; de esta forma los materiales emitirán solo bajo aquellas tensiones que superen las máximas anteriores.

A continuación se listan algunas de las actividades dónde la técnica de emisión acústica se emplea con éxito:

- Ensayo y caracterización de materiales
- Ensayos en servicio de componentes (recalificación)
- Monitoreo continuo de componentes
- Monitoreo durante soldaduras
- Identificación de procesos durante maquinado (ej. Torneado)
- Detección de descargas eléctricas parciales en transformadores.
- Detección y localización de pérdidas por goteo
- Aplicaciones geológicas, seguimiento de la actividad sísmica y volcánica

1.3 ORIGEN DE LA EMISIÓN ACÚSTICA EN METALES

La deformación plástica y la fractura son las fuentes principales de emisión acústica en los metales. La emisión es modificada por un conjunto de factores que dependen de la historia previa del material y de las condiciones en que se registre la medición. En consecuencia, es necesario conocer muy bien los parámetros de cada ensayo para poder extraer conclusiones válidas. A continuación se hace una recopilación de los principales orígenes de la emisión acústica en metales [1-2] [1-3].

1.3.1 EA por Movimiento de Dislocaciones

Se han propuesto diferentes mecanismos que explican la generación de ondas elásticas por el movimiento de dislocaciones. Entre los más aceptados están los que postulan la generación de ondas elásticas por relajación del campo de tensiones

debido al paso de una dislocación, la radiación ante la aceleración de una dislocación y la aniquilación entre dislocaciones. Todos éstos, son modelos con un alto grado de simplificación y se detallan a continuación.

- Relajación del campo de Tensiones:

Relacionando los desplazamientos en cualquier punto de un cuerpo elástico, generados por una fuerza puntual que simula el campo de tensiones de un anillo de dislocaciones, Scruby, calculó cuál sería la amplitud máxima del desplazamiento en la superficie. Consideró para el cálculo solamente la componente longitudinal de la onda y un material isótropo. La expresión para el desplazamiento máximo en la superficie es según este modelo:

$$U_n = \frac{nbrvC_s^2}{DC_l^3} \quad (1.1)$$

en dónde b es el vector de Burguers, C_s la velocidad de la onda transversal, C_l la velocidad de la onda longitudinal, r el radio final alcanzado por el anillo, v la velocidad de crecimiento del anillo, D la distancia hasta la superficie y n el número de anillos que se expanden colectivamente.

De la expresión anterior, se desprende que la máxima amplitud depende directamente de la distancia " r " recorrida por la dislocación y la velocidad a la que se movió; además es inversamente proporcional a la distancia a la superficie. Los parámetros del material se consideran en las velocidades y en el vector de Burguers. Un cálculo típico para el acero con $C_l = 5960$ m/s, $C_s = 3200$ m/s, $b = 3 \cdot 10^{-10}$ m, $v = 200$ m/s, $r = 100 \cdot 10^{-6}$ m, $D = 0,03$ m y $n = 1$, resulta en un valor para la máxima amplitud del desplazamiento de $U = 9,7 \cdot 10^{-15}$ m.

Considerando que la sensibilidad de los sensores piezoeléctricos (ver 1.8 Instrumentación) es del orden de 10^{-14} m y que en metales policristalinos la distancia de deslizamiento es del orden de 20 a 50 μ m, la amplitud de las ondas generadas por el movimiento de una dislocación queda por debajo de la sensibilidad de los transductores. Excepcionalmente, en policristales con grano grande y condiciones favorables de velocidad y longitud de desplazamiento, el movimiento puede ser detectado en un bajo porcentaje.

Como se explicó más arriba, el movimiento de una única dislocación causa un desplazamiento indetectable, en cambio, cuando un grupo de dislocaciones se mueven en conjunto en un pequeño espacio, si pueden ser detectadas. Los mecanismos que se postulan para explicar este fenómeno de movimiento masivo, son el trabado y liberación de dislocaciones y la creación o activación de fuentes de dislocaciones.

Las dislocaciones que están trabadas, durante un proceso de deformación, pueden liberarse repentinamente si se alcanza la tensión apropiada. Éstas, a su vez, pueden liberar a otras dislocaciones cercanas, produciéndose así un efecto de avalancha. Este fenómeno ocurre en un tiempo muy corto y en un espacio acotado, dando origen a una onda elástica detectable por los sensores. En muchos metales,

se ha observado que en estas zonas de movimiento masivo de dislocaciones es donde se registra la mayor actividad de emisión acústica.

Por este mismo mecanismo se explican las emisiones en las aserraciones (Portevin-LeChatelier), por una repetición de trabado y liberación de las dislocaciones en átomos de soluto durante la deformación.

Otro mecanismo, postula la activación de fuentes de dislocaciones (Frank-Read y bordes de grano), cuando se alcanza la tensión necesaria para el comienzo de la emisión. Las dislocaciones se mueven por los planos de deslizamiento hasta que son frenadas por algún obstáculo, como un borde de grano, un precipitado u otra dislocación; generando un apilamiento de dislocaciones. La tensión generada por el apilamiento aumenta rápidamente hasta contrarrestar la emisión de nuevas dislocaciones por la fuente.

Estos dos últimos mecanismos, el destrabado de dislocaciones y la creación de nuevas dislocaciones, pueden diferenciarse midiendo la fricción interna como función de la deformación. La fricción interna depende de la potencia cuarta de la longitud de los lazos de dislocaciones entre dos obstáculos; en cambio, depende linealmente de la densidad de dislocaciones. Entonces, en una liberación de dislocaciones, la longitud promedio de los lazos de dislocaciones incrementan el factor de la fricción más intensamente de lo que lo hace la creación de nuevas dislocaciones por incremento en la densidad.

- Aceleración de las Dislocaciones

Este mecanismo propone que las dislocaciones aceleradas emiten energía de una forma análoga a como lo hacen las cargas eléctricas aceleradas. El modelo establece, que la generación, movimiento y arresto de las dislocaciones puede ser tratado como un proceso periódico. La energía radiada por unidad de tiempo por una dislocación de hélice es:

$$E \propto v^2 L l \quad (1.2)$$

donde v es la velocidad promedio de la dislocación, L es la longitud total de la dislocación en movimiento y l es la longitud del segmento en movimiento de la dislocación.

- Aniquilación de Dislocaciones

Otro de los mecanismos propuestos por el cual es posible generar ondas elásticas es por aniquilación de dislocaciones. A pesar de existir algunas experiencias que han confirmado este mecanismo como una fuente efectiva de emisión, la posibilidad de detección está muy limitada por el número de emisiones y la baja energía liberada.

Todos los mecanismos anteriormente explicados para la emisión debida a dislocaciones son altamente dependientes de los parámetros del material y del experimento. Algunos de los parámetros que afectan la detección y la emisión son: la velocidad de deformación, la temperatura del ensayo, la energía de falla de

apilamiento, los tratamientos termo-mecánicos previos, el tamaño de grano y la distribución de tensiones.

1.3.2 EA por Maclado

Junto con el deslizamiento, el maclado es otro de los mecanismos posibles de deformación plástica de los metales; caracterizado por una deformación de corte y una simetría especular entre la región maclada y la región sin maclar. Se observa principalmente en aquellas estructuras cristalinas de menor simetría, debido a que poseen un número menor de planos de deslizamiento para el movimiento de las dislocaciones. Sin embargo, el maclado puede ocurrir en cualquier estructura cristalina si se alcanzan las condiciones de tensión y orientación cristalográfica requeridas.

La deformación por maclado ocurre en tres etapas que consisten en: la nucleación de un embrión de macla, el crecimiento rápido del embrión hasta una macla macroscópica y por último el ensanchamiento de la macla, normal a la dirección original de crecimiento.

Existen diferentes velocidades para cada etapa de la formación de una macla. La nucleación y el crecimiento se caracterizan por una alta velocidad, crecen aproximadamente a la velocidad del sonido. La última etapa, la del ensanchamiento, ocurre a una velocidad mucho menor que las anteriores.

Durante la formación y crecimiento de una macla, la rápida deformación de corte libera una importante cantidad de energía en un tiempo muy corto. Como las señales de emisión acústica están relacionadas con la energía liberada y el tiempo en que esto ocurre, el proceso de maclado es una excelente fuente de emisión acústica.

Un análisis más detallado, muestra que por cada macla generada existe un evento de emisión acústica. A su vez, se verifica que la emisión durante la nucleación y el crecimiento de la macla es mucho mayor que la emisión durante el ensanchamiento, que es consistente con la relación de velocidades registradas en cada una de estas etapas.

Lo mismo que ocurre para el movimiento de dislocaciones, la emisión por maclado es influida por las variables del material y las condiciones de ensayo. Las variables más importantes que afectan la emisión son: la velocidad de deformación, la temperatura del ensayo, la estructura cristalina, los tratamientos termo-mecánicos previos, el tamaño de grano y la distribución de tensiones presentes.

1.3.3 EA por Fractura

El crecimiento de fisuras dentro del material es considerado una de las principales fuentes de emisión de los materiales metálicos. A medida que el proceso de fractura progresa, se crean superficies libres acompañadas por una rápida variación de las tensiones en la región vecina a la fisura. Esta liberación de energía se disipa en forma de calor y como onda elástica.

Los procesos de fractura se clasifican en: fractura frágil y fractura dúctil. Las características de cada una definen el tipo de emisión y las posibilidades de detección. Se ha demostrado [1-4] que el parámetro que controla la amplitud de la emisión es la velocidad de liberación de energía, directamente relacionada con la velocidad de avance de la fisura.

Debido a la complejidad de los fenómenos involucrados en los procesos existen varios modelos parciales que relacionan la emisión acústica con la creación y/o propagación de fisuras [1-5] [1-1].

La fractura de tipo frágil se caracteriza por una rápida liberación de energía que origina una onda elástica de gran amplitud. Los modelos existentes relacionan los parámetros tradicionales de la mecánica de fractura con la emisión registrada.

En el caso de la fractura dúctil gran parte de la energía se utiliza para agrandar la zona plástica de la fisura; esto implica un crecimiento lento y evita una propagación catastrófica. La amplitud de las ondas elásticas así generadas es de menor amplitud y más difícil de detectar. Los modelos que describen la fractura establecen que es una repetición de nucleación y crecimiento de microfisuras.

También, las fisuras pueden originar emisiones denominadas secundarias, que se relacionan con emisiones que se producen sin que haya avance de la fisura. Son casos de este tipo, la fractura frágil de residuos de corrosión, y la fricción entre las superficies libres de la fisura.

1.3.4 EA por Fractura y Decohesión de Partículas

Tanto la fractura de inclusiones como de partículas de segunda fase dan origen a procesos de emisión acústica detectables. Las propiedades de estas partículas difieren de las de la matriz que las contiene. En general las partículas son más frágiles y duras aunque existen algunas excepciones.

Las diferencias en las propiedades elásticas entre partículas y matriz dan origen a una concentración de tensiones en la interfaz. Si las tensiones son lo suficientemente altas puede ocurrir la fractura de las partículas o la propagación de una fisura en la interfaz partícula-matriz hasta alcanzar la decohesión. La característica común de estos procesos es la alta velocidad con que se libera la energía, convirtiéndolos en una muy buena fuente de emisión acústica.

Al contrario que en el maclado, durante la fractura y decohesión de inclusiones, la emisión se registra en varias etapas, generando múltiples eventos para una misma fuente.

Según la forma en que actúen las tensiones cambia la característica de la emisión; cuando las tensiones son de tracción sobre las partículas se favorece la emisión, en cambio se previene la emisión, cuando las tensiones son de compresión.

Existen varios modelos que relacionan la fractura y decohesión con la emisión acústica. Los más importantes tienen en cuenta la energía liberada durante el proceso de fractura, los desplazamientos en la superficie y la concentración de tensiones en la inclusión.

También, en este caso, las variables del material y del ensayo afectan las características de la emisión. Los aspectos más importantes a considerar son: la velocidad de deformación, la temperatura del ensayo, la densidad, geometría y propiedades mecánicas de las inclusiones, los tratamientos termo-mecánicos previos y el estado de tensiones.

1.4 PROPAGACIÓN DE ONDAS ELÁSTICAS

Las ondas emitidas por las fuentes son perturbaciones elásticas que se propagan en el material. Tanto la fuente, la geometría y las propiedades intrínsecas del material definen las características de las ondas que arriban al detector.

A continuación se describen las generalidades sobre la propagación de ondas elásticas de interés en este trabajo [1-1] [1-6] [1-7].

1.4.1 Medio Elástico Infinito

Considerando el caso más general de un medio sólido lineal, elástico e infinito se plantean las ecuaciones que describen el movimiento de las partículas según la aproximación de la mecánica del continuo. Utilizando las ecuaciones de la elasticidad que relacionan las deformaciones con los desplazamientos, la ley de Hooke generalizada y la segunda ley de Newton, se llega a una ecuación de movimiento general.

Agregando como condiciones la isotropía del material, la constancia de la densidad y la ausencia de fuerzas externas aplicadas; la expresión para la ecuación de ondas de un **medio lineal elástico isótropo e infinito** es:

$$(\lambda + \mu)\nabla\nabla \cdot \vec{u} + \mu\nabla^2 \vec{u} = \rho \ddot{\vec{u}} \quad (1.3)$$

donde:

- λ y μ : constantes de Lamé (sólido isótropo)
- ρ : densidad del material (constante)
- $\vec{u}$: vector desplazamiento
- ∇ : gradiente de un campo escalar
- $\nabla \cdot$: divergencia de un campo vectorial
- ∇^2 : laplaciano

En la ecuación 1.3 y en lo que sigue, los dos puntos sobre el vector desplazamiento indican una derivada segunda con respecto al tiempo, en este caso corresponde al vector aceleración de las partículas materiales.

De la solución de la ecuación 1.3 surgen dos tipos de ondas que se propagan en el medio con velocidades y formas de desplazamiento diferentes. Comúnmente a estos modos de propagación se los denomina longitudinal (dilatacionales) y transversales (equivoluminales).

Las velocidades constantes con que se propagan estas ondas son:

$$c_d = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad \text{velocidad de ondas longitudinales} \quad (1.4)$$

$$c_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad \text{velocidad de ondas transversales} \quad (1.5)$$

En la figura 1.4, se muestra la forma que toman los desplazamientos de las partículas cuando cada uno de estos modos se propaga. En el caso de las ondas longitudinales, el movimiento es paralelo a la dirección de propagación; considerando un elemento diferencial es fácil ver el cambio de volumen que sufre ante el paso de una onda, se comprime o se dilata según el caso. Para las ondas transversales, las partículas tienen un movimiento perpendicular a la dirección de propagación; igual que en el caso anterior si se observa un elemento diferencial, el efecto en este caso es de distorsión pero sin cambio de volumen.

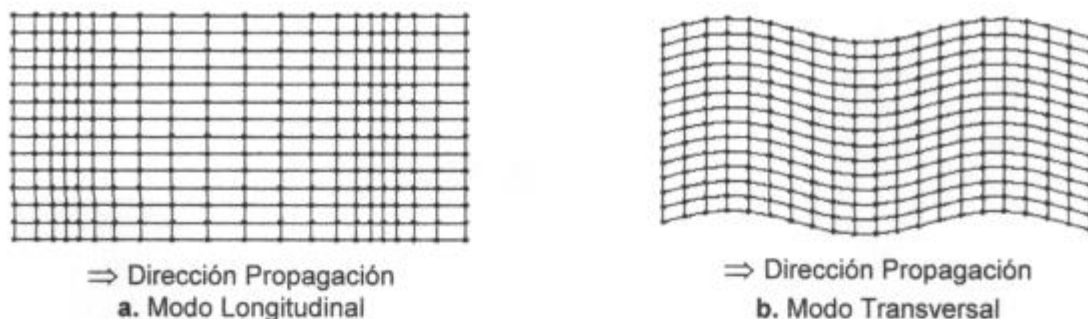


Figura 1.4 – Movimiento de las partículas para un medio infinito.

1.4.2 Medio Elástico Semi-infinito

Cuando se imponen restricciones a las fronteras de los medios elásticos, surgen nuevas condiciones de contorno y formas de propagación para las ondas. En estos casos, las ondas pueden reflejarse, refractarse, cambiar de modo de propagación, cambiar la amplitud y la fase cuando interactúan con las fronteras.

En el caso más general, los desplazamientos de las partículas y las tensiones deben mantener la continuidad en la interfaz. Con estas condiciones, se forma un sistema de ecuaciones que permite obtener los valores de las amplitudes de las ondas reflejadas y refractadas. Es común expresar, en lugar de las amplitudes, los coeficientes de reflexión (R) y de transmisión (T).

Las leyes que gobiernan la reflexión y la transmisión de las ondas en la interfaz son análogas a la ley de Snell utilizada en óptica. En el caso más general, para una interfaz con dos medios sólidos, la expresión es la siguiente:

$$\frac{\sin \theta_{di}}{c_{d1}} = \frac{\sin \theta_{si}}{c_{s1}} = \frac{\sin \theta_{d1}}{c_{d1}} = \frac{\sin \theta_{s1}}{c_{s1}} = \frac{\sin \theta_{d2}}{c_{d2}} = \frac{\sin \theta_{s2}}{c_{s2}}$$

donde:

- θ_{di} : ángulo de incidencia de una onda longitudinal (dilatacional)
- θ_{si} : ángulo de incidencia de una onda transversal (equivoluminal)
- θ_{d1} : ángulo de reflexión de una onda longitudinal (dilatacional)
- θ_{s1} : ángulo de reflexión de una onda transversal (equivoluminal)
- θ_{d2} : ángulo de refracción de una onda longitudinal (dilatacional)
- θ_{s2} : ángulo de refracción de una onda transversal (equivoluminal)
- c_d : velocidad de una onda longitudinal según el medio (1 o 2)
- c_s : velocidad de una onda transversal según el medio (1 o 2)

En la figura 1.5 están representados dos casos de incidencia oblicua en una interfaz entre dos medios sólidos; en este caso, los coeficientes indican el tipo de onda de que se trata. El primer subíndice se refiere a la onda incidente y el segundo al tipo de onda reflejada o transmitida. Por ejemplo, R_{ds} , indica el coeficiente que resulta de la reflexión de una onda longitudinal (dilatacional) incidente que cambia de modo a una onda transversal; y T_{ss} , indica la transmisión de una onda transversal debido a una onda transversal incidente.

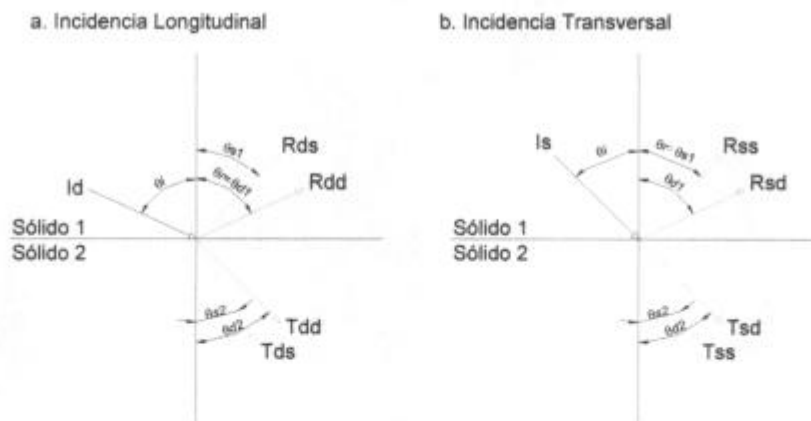


Figura 1.5 – Ondas en una Interfaz Sólido-Sólido.

Como casos particulares, se presentan la interfaz sólido-vacío y sólido-líquido. En el primer caso, no existen restricciones para los desplazamientos en la frontera; y las tensiones deben anularse para mantener la continuidad. Para el segundo caso, las tensiones transversales no pueden existir, quedando únicamente la posibilidad de desplazamientos longitudinales.

En detalle, para el caso de una interfaz sólido-vacío, las condiciones de contorno exigen que las tensiones normales y transversales sean nulas pero no imponen ninguna restricción a los desplazamientos. No existen ondas transmitidas de ningún

tipo, solamente hay reflexión interna y cambio de modo de propagación. En el caso de incidencia de una onda transversal puede ocurrir que exista reflexión interna total si se supera el ángulo crítico, es decir, que se elimine la componente longitudinal en la reflexión. Esto sucede cuando $\theta_d = 90^\circ$, debido a que la velocidad de una onda longitudinal es siempre mayor que la velocidad de una transversal $c_d > c_s$. Expresado matemáticamente:

$$\frac{\sin \theta_s}{c_s} = \frac{\sin \theta_d}{c_d} \quad \text{con } c_d > c_s$$

La Figura 1.6, muestra el caso de incidencia en una interfaz sólido–vacío, en la parte “a”, se muestra el caso de una incidencia longitudinal; y en la “b” de una incidencia transversal.

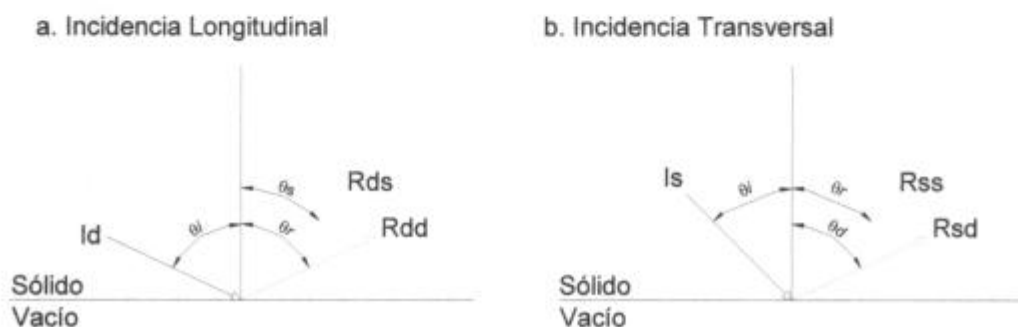


Figura 1.6 – Ondas en una Interfaz Sólido-Vacío.

El estudio del comportamiento de las ondas en la interfaz, permite abordar una gran cantidad de aplicaciones prácticas. Por ejemplo, es de gran utilidad para evaluar el ángulo óptimo de acoplamiento de transductores; teniendo en cuenta los valores críticos y las pérdidas de energía. Estos fenómenos de interfaz, también se registran en imperfecciones o defectos internos de los materiales que pueden inducir cambios de modos o reflexiones en los caminos de propagación.

1.4.3 Ondas de Superficie

Estudiando la ecuación de ondas 1.3, en un semiespacio con una superficie libre, Rayleigh demostró la existencia de un tipo de ondas que se propagan superficialmente.

Estas ondas son de especial interés en la emisión acústica ya que los transductores utilizados se ubican en las superficies, además, estas ondas se atenúan en menor medida que las ondas de volumen.

El movimiento que siguen las partículas es de tipo elíptico como se muestra en la figura 1.7. La amplitud decae exponencialmente desde la superficie hacia el interior del material, típicamente se logra una atenuación muy importante a una profundidad de una a dos longitudes de onda desde la superficie.

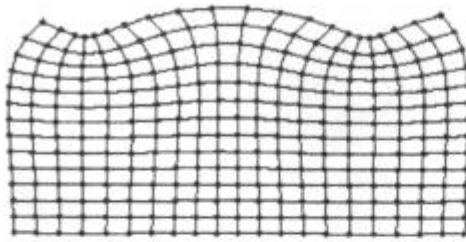


Figura 1.7 – Movimiento de las partículas para Ondas de Rayleigh

La velocidad de estas ondas, es una fracción de la velocidad de las ondas transversales en volumen. El coeficiente que relaciona la velocidad de una onda de superficie (c_r) con una de volumen transversal (c_s), se calcula en forma aproximada en función del coeficiente de Poisson (ν) del material con la siguiente ecuación:

$$c_r = \alpha \cdot c_s \quad \alpha = \frac{0,87 + 1,12\nu}{1 + \nu} \quad (1.6)$$

Existen otros tipos de ondas superficiales, como son las ondas denominadas de Love y de Stoneley. Aunque son importantes en muchas situaciones, para este trabajo no son de utilidad porque no se satisfacen las condiciones requeridas para su existencia, por lo tanto no serán desarrolladas aquí.

1.4.4 Medio Elástico Acotado (Guías de Ondas)

Ondas de Lamb

Las ondas de Lamb son perturbaciones elásticas que se propagan en placas sólidas con superficies libres, originadas por múltiples reflexiones, cambios de modos e interferencias en el espesor acotado de las placas. Los desplazamientos son en la dirección de propagación y en la dirección perpendicular a ésta. Existen infinitos modos de propagación que satisfacen la ecuación de ondas con las condiciones de contorno impuestas por la placa.

Se designa a los modos de propagación según sea la simetría de los movimientos respecto al plano medio de la placa. Los modos simétricos, tienen movimientos opuestos respecto del plano medio; en los modos asimétricos, las partículas se mueven en fase respecto del plano medio. En la figura 1.8 se muestran los dos primeros modos de las ondas de Lamb, en la parte superior se representa a los movimientos simétricos y la parte inferior a los asimétricos.

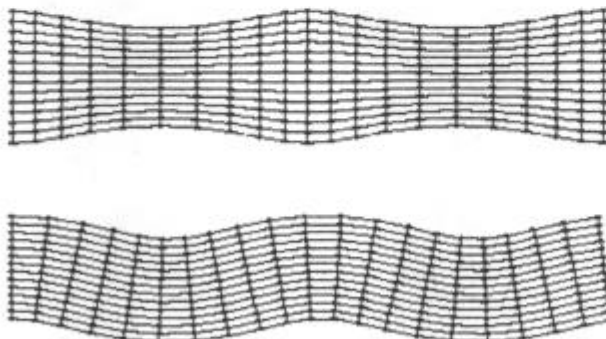


Figura 1.8 – Movimiento de las partículas para Ondas de Lamb. En la parte superior está el modo Simétrico; y en la parte inferior el modo Asimétrico.

Cada uno de los modos se propaga con diferente velocidad según la frecuencia; debido a esta dependencia con la frecuencia es común denominarlas ondas dispersivas. La representación gráfica más común de estos modos se expresa como la velocidad de fase o de grupo versus el producto frecuencia-espesor de la placa. La figura 1.9 muestra dos representaciones típicas de estas curvas de dispersión para una placa de acero, la parte "a" muestra las curvas de dispersión para la velocidad de fase y en la parte "b" las curvas para la velocidad de grupo. El efecto del espesor ya está considerado en la escala de las frecuencias.

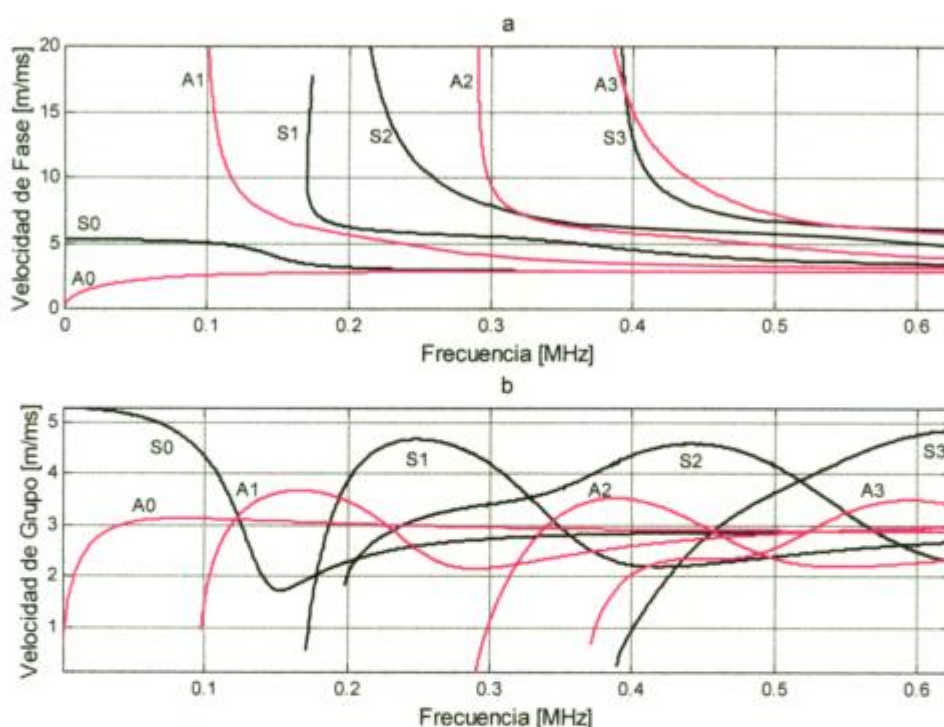


Figura 1.9 – Curvas de Dispersión para Ondas de Lamb para una placa de acero de 16 mm de espesor. **a.** Curvas dispersivas de fase. **b.** Curvas dispersivas de grupo. **A_i** modos Asimétricos. **S_i** modos Simétricos.

Ondas en Geometrías Cilíndricas Huecas

Otra forma de medio elástico acotado son las geometrías cilíndricas huecas; en este trabajo se hace uso de las soluciones de la ecuación de ondas para este caso. Siguiendo las ideas desarrolladas más arriba, se puede conocer como es la propagación de las ondas en estos medios. En el Anexo A se desarrolla en detalle el aspecto formal de dichas soluciones.

1.4.5 Atenuación y Dispersión

Durante la propagación de las ondas elásticas dentro de un material, se registra una disminución en la amplitud debido a diferentes mecanismos. Sin embargo, el hecho de disminuir el valor de amplitud, no implica necesariamente una pérdida en la energía de la onda, pues, puede ocurrir una redistribución.

El mecanismo general que influye en la atenuación está conectado con la naturaleza no conservativa de los materiales. Las "pérdidas" de energía más importantes se deben a fenómenos asociados a efectos termoelásticos, deformación plástica, creación de nuevas superficies o interacción con el movimiento de dislocaciones.

Uno de los efectos, denominado atenuación geométrica, se debe a la forma de emisión por parte de la fuente. En el caso de una fuente que emita en todas las direcciones, la energía se redistribuirá idealmente en esferas concéntricas, de manera que la amplitud detectada es función del radio a la fuente.

Otro caso particular se encuentra en la difracción que se origina dentro de los materiales por los defectos presentes. Cuando las ondas son difractadas, parte de la energía sigue diferentes caminos, disminuyendo la amplitud de la onda original.

En una situación concreta, dentro de un material, ocurren la combinación de todos los efectos anteriores. Se debe evaluar en cada caso la importancia de los efectos individuales.

En aquellos medios, en que la longitud de la onda sea del orden de alguna de las dimensiones del material existe una relación entre la velocidad y la frecuencia. A esta función entre la velocidad y la frecuencia se la conoce como dispersión. Además de la relación antedicha, la dispersión también puede afectar la amplitud y registrarse atenuación.

1.5 TERMOELASTICIDAD

Los cambios de temperatura ocurridos en los materiales elásticos tienen influencia sobre la distribución de tensiones y deformaciones, con la consiguiente variación del volumen; estos efectos recíprocos entre temperatura y volumen son conocidos bajo el nombre de termoelasticidad.

La teoría clásica de la conducción del calor (Ley de Fourier) se basa en la hipótesis de que el flujo de calor es proporcional al gradiente de temperatura; lo que implica que la distribución de temperaturas en un cuerpo esté controlada por ecuaciones diferenciales parciales de tipo parabólico. Esto implica, una velocidad de propagación infinita para las perturbaciones térmicas; algo físicamente imposible. De aquí, el origen de la modificación de la Ley de Fourier para tiempos cortos, introduciendo un término dependiente del tiempo. Este término, modifica la solución de la ecuación diferencial a una de tipo hiperbólico; y por lo tanto la conducción del calor es explicada como un fenómeno de propagación de ondas.

Introduciendo los efectos de la temperatura en las relaciones elásticas, como en la ley de Hooke, se llega a una ecuación de onda general, similar a 1.3, pero con los efectos que introduce la temperatura. Los detalles matemáticos no se exponen aquí, pero se recomienda al lector interesado recurrir a diversos textos y publicaciones periódicas que se listan en la bibliografía [1-6] [1-8] [1-9] [1-10] . Finalmente, la expresión formal para la ecuación de onda es:

$$(\lambda + \mu)\nabla\nabla \cdot \vec{u} + \mu\nabla^2 \vec{u} - \alpha(3\lambda + 2\mu)\nabla(T - T_0) = \rho\vec{\ddot{u}} \quad (1.7)$$

en dónde,

T_0 : la temperatura de referencia

α : coeficiente de dilatación térmica,

el resto de las variables es según las definiciones antes dadas.

El acoplamiento entre la deformación y la temperatura puede tener efectos importantes en la propagación de las ondas. Para ondas armónicas, se puede demostrar que el efecto entre el acoplamiento térmico-mecánico resulta en una atenuación y en una dispersión de las ondas. La intensidad del efecto se mide por un coeficiente de acoplamiento que involucra tanto magnitudes elásticas como térmicas.

1.6 INSTRUMENTACIÓN

En este apartado se describen los elementos físicos necesarios para la adquisición de la señal proveniente del material y su acondicionamiento para el análisis posterior.

1.6.1 Sensores

Los sensores son los elementos utilizados para transformar los desplazamientos mecánicos de las ondas elásticas en magnitudes eléctricas proporcionales. La señal eléctrica, tensión en función del tiempo, es influida por las características de conversión del sensor, por lo tanto, es muy importante conocer la respuesta del sistema de detección para interpretar correctamente las mediciones.

Existe una gran variedad de sensores que responden a distintos principios de funcionamiento. En la tabla 1.1, se listan los mecanismos y la sensibilidad de los transductores más comunes. Los más utilizados son los que poseen cristales piezoeléctricos como elemento activo para la conversión.

Principio	Sensibilidad	Características
Capacitivo	10^{-10} m	Variación de la capacidad eléctrica con el desplazamiento de la superficie. Muy buena fidelidad. Poca sensibilidad.
Interferometría Láser	10^{-12} m	Compromiso entre ancho de banda vs. Sensibilidad.
Piezoeléctrico	10^{-14} m	Piezoelectricidad . Buena sensibilidad. Robustos. Baratos

Tabla 1.1 – Descripción de los principales tipos de sensores utilizados en emisión acústica.

La piezoelectricidad es un fenómeno que se registra en algunos materiales y consiste en la transformación reversible entre deformación mecánica y tensión eléctrica. El material más extendido como transductor piezoeléctrico es el denominado PZT, por sus componentes: plomo, circonio y titanio. La figura 1.10 muestra para el caso de cuarzo, otro material piezoeléctrico, como se origina la diferencia de potencial en la superficie del cristal cuando se le aplica una tensión mecánica.

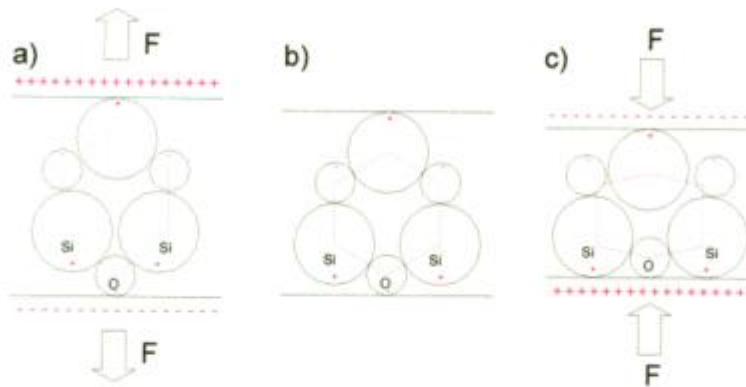


Figura 1.10 – Efecto piezoeléctrico registrado en un cristal de cuarzo. a) Tracción sobre el cristal. b) cristal sin deformar. c) Compresión sobre el cristal.

Los sensores registran comúnmente el desplazamiento normal a la superficie; aunque los movimientos tienen en general componentes en tres direcciones ortogonales; una normal a la superficie y dos tangenciales. La elección de las componentes a sensar se consigue cortando apropiadamente las caras de los cristales piezoeléctricos.

Los parámetros más importantes que definen el comportamiento del sensor son el espesor del elemento activo y el diámetro del mismo. El espesor, define la frecuencia de resonancia del elemento. Utilizando una masa de respaldo se cambian las características resonantes del elemento, obteniendo sensores sensibles a una banda estrecha de frecuencias (resonantes) o sensores de banda ancha.

El diámetro, determina el área sobre la cual se registra el desplazamiento. La respuesta final, es un promedio sobre la energía que incide sobre toda la superficie. Rangos típicos de diámetros son de 1 a 10 mm.

Una descripción esquemática de un sensor piezoeléctrico se muestra en la figura 1.11; sus partes principales son el elemento activo (cristal piezoeléctrico), los electrodos para la señal eléctrica, una masa de respaldo (depende del diseño) y una carcasa protectora. La masa de respaldo es utilizada para que las ondas que lleguen al sensor puedan propagarse y atenuarse fuertemente en este volumen de tal forma que no regresen al elemento activo. El material común utilizado para esta masa de respaldo es una resina tipo epoxy con una gran densidad de partículas de tungsteno.

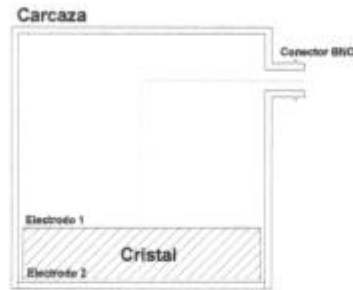


Figura 1.11 – Esquema básico de un sensor piezoeléctrico.

Para lograr un buen contacto acústico entre el sensor y la superficie del material se coloca un material acoplante. Se utilizan grasas o resinas con distintos valores de viscosidad que definen el tipo de ondas que se pueden propagar; por ejemplo, si la viscosidad es muy baja, no se pueden transmitir los desplazamientos transversales, que corresponden a esfuerzos de corte.

1.6.2 Amplificadores

Como la tensión generada en el cristal piezoeléctrico es de muy pequeña amplitud es necesario amplificar inmediatamente esta señal. En conjunto con el sensor, se coloca un amplificador a una distancia muy corta (hasta 50 cm), para poder transmitir la señal hasta donde se encuentren los equipos que almacenen o procesen la señal. A esta etapa de amplificación se la denomina de pre-amplificación, para distinguirla de la que se realiza en el lugar de proceso.

Los preamplificadores comúnmente tienen una ganancia de 100 veces entre la entrada y la salida (40 dB). Además, poseen algún tipo de filtro pasa altos para eliminar las componentes de baja frecuencia de origen mecánico. Como efecto negativo, junto con la amplificación, se introduce ruido electrónico que limita el valor de tensión (desplazamiento) del sensor.

La siguiente etapa de amplificación, aunque depende de cada equipo, comúnmente llega hasta los 60 dB. Posteriormente la señal ingresa a los equipos de detección, análisis y almacenamiento.

1.6.3 Ruido

El ruido es un factor que afecta negativamente la sensibilidad y la posibilidad de detección de las señales. El origen del ruido puede deberse a distintos mecanismos, cada uno con diferentes características de amplitud y rango de frecuencias. Los ruidos mecánicos son de baja frecuencia comparados con el rango de emisión acústica, lo que permite filtrarlos fácilmente. En cambio, los ruidos de origen electromagnético, al estar dentro de los mismos rangos de frecuencias son más difíciles de eliminar.

Las acciones para evitar la contaminación de la medición por ruido se enfocan en distintas etapas. Como primer paso, se aísla la zona de medición tanto de ruidos

mecánicos como eléctricos. En el caso de que sean aplicables, se utilizan filtros para eliminar las componentes indeseadas, sin eliminar ninguna parte útil de la señal. También se aplican técnicas de rechazo de ruidos según la localización de la fuente; aquellas señales que provienen de lugares que no son esperados se eliminan del estudio colocando sensores denominados "guarda". Por último, se hacen tratamiento de eliminación o filtrado de ruido con técnicas avanzadas de análisis de señales.

1.6.4 Procesadores

Se abarca bajo este nombre a todos aquellos equipos que extraen de las señales, acondicionadas y amplificadas, información sobre los parámetros de interés. La evolución de la tecnología de los equipos ha hecho que se consideren nuevos parámetros y técnicas más sofisticadas de análisis. Actualmente la información extraída es en formato digital.

Esta gran variedad de opciones limita la descripción general de este apartado. En el capítulo 2, donde se hace la descripción de los ensayos, se dan los detalles de los equipos utilizados en este trabajo.

1.7 ANÁLISIS DE LAS SEÑALES

1.7.1 Parámetros

Como se analizó en el inciso 1.1, las señales de EA son de tipo evento, cuya forma se repite en la figura 1.12 con mayor nivel de detalle. Se caracterizan por ser transitorias y oscilantes.

Junto con la señal "útil", definida por una magnitud eléctrica de tensión en función del tiempo $V(t)$, en la adquisición de un evento de EA se incorpora ruido indeseado en la medición. El efecto del ruido se contempla imponiendo un valor umbral para la detección de la señal. Cualquier señal que se registre por debajo del valor umbral no será considerada.

Se caracteriza a las señales de EA por una serie de parámetros ampliamente difundidos [1-11]. Esto permite una descripción precisa de los fenómenos, aún sin contar con la "forma" completa de la señal. A continuación se definen dichos parámetros, y en la figura 1.12 se muestran gráficamente.

- **Amplitud (A):** corresponde al máximo valor de tensión alcanzado en la señal, considerado desde el cero de referencia, es decir que no depende del umbral elegido. Es el más importante por la íntima relación que guarda con los procesos que originan los eventos. Es una medida directa de la energía que posee la señal.
- **Duración (D):** es el tiempo durante el cuál la señal se mantiene sobre el umbral. Este parámetro depende de la fuente y de las características acústicas y geométricas del medio.

- **Tiempo de Pico (R)** (Rise Time): es el tiempo desde que se supera el umbral por primera vez hasta el tiempo en que se produce el pico máximo de la señal.
- **Número de Cuentas (N)** (Ring Down): es el número de veces que la señal supera el valor umbral durante su oscilación.

Otro parámetro más complejo, es la medición del área contenida debajo de la envolvente de la señal que supera el umbral. Esta medición está relacionada con la energía, y además aporta información tanto de la amplitud como de la duración de la señal.

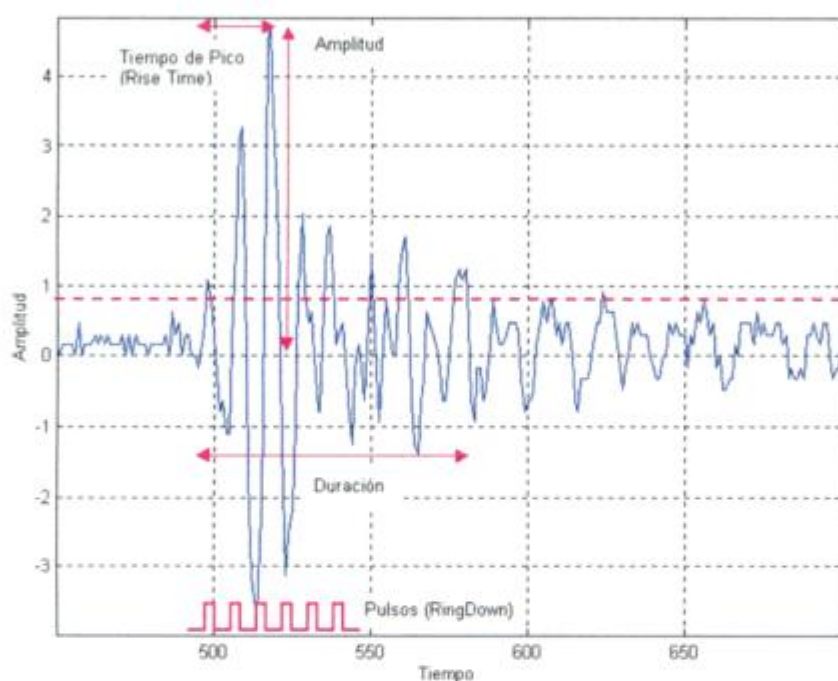


Figura 1.12 – Descripción de los parámetros A, D, R de una señal de emisión acústica.

La energía contenida en una señal está definida según la expresión 1.8.

$$E = \frac{1}{R} \int_0^{\infty} V(t)^2 dt \quad (1.8)$$

donde: R es la carga resistiva que presenta el sensor y $V(t)$ la tensión eléctrica como función del tiempo. Es importante aclarar que la definición dada en la ecuación 1.8 es la energía de la señal que llega al sensor, no es la energía liberada por la fuente. La energía liberada en forma elástica sufre una serie de transformaciones hasta convertirse en la señal eléctrica, como atenuación, cambios de modos y deficiencia en el acoplamiento (ver 1.4 propagación de ondas elásticas).

1.7.2 Distribuciones Estadísticas

Los parámetros definidos anteriormente (A , D , R , N) se comportan estadísticamente, y existen modelos que se ajustan a dicho comportamiento [1-12]. De acuerdo a los modelos se obtiene información sobre las características y eventualmente sobre los procesos que originaron la emisión. Sin embargo, las distribuciones son solamente herramientas matemáticas, es necesario un conocimiento de las variables que se analizan para que las interpretaciones sean correctas; este es un punto muy importante para la elección del parámetro a estudiar.

La amplitud (A), es una de las variables que tiene fundamental importancia, porque está directamente relacionada con la energía transportada por las ondas elásticas. En EA, existe un amplio rango de variación para las amplitudes, dependiendo de la energía de la fuente emisora y de la ubicación del sensor. El origen de tan diferentes valores de amplitud, responde a su vez, a un amplio espectro de fuentes emisoras que pueden variar desde efectos microscópicos como movimiento de dislocaciones, hasta niveles macroscópicos como los fenómenos sísmicos o volcánicos.

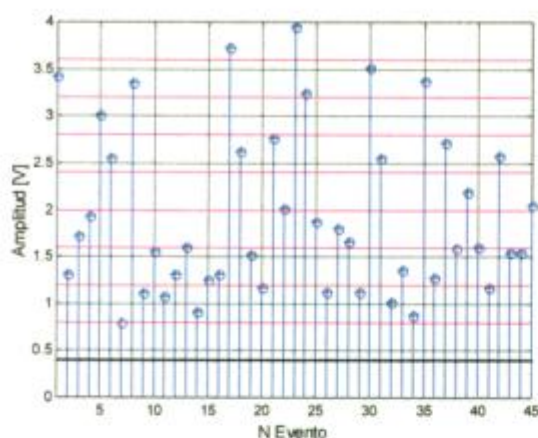
Tradicionalmente, la amplitud se define como el valor máximo alcanzado por la señal en toda su excursión; es decir, que existe un único valor por cada evento. El conjunto de valores correspondientes a un mismo ensayo (con varios eventos), proporciona los datos para el estudio estadístico, los cuales se comparan con modelos teóricos de distribuciones y se analiza la bondad del ajuste.

Cada modelo estadístico describe la forma en que la variable estudiada se distribuye. En este trabajo se utilizará la variable amplitud de la señal, expresada² en volts (V) para la presentación de los modelos.

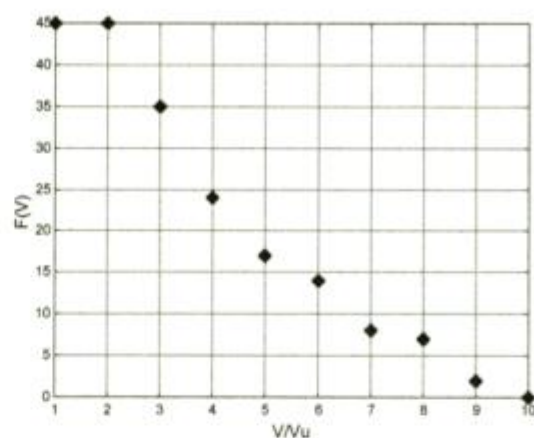
Se define a la función de distribución acumulada $F(V)$, como el número de eventos cuya amplitud supere el valor V ; ésta es una función monótonamente decreciente. La función densidad de probabilidad $f(V)$ se define como $dF(V)/dV$.

En la figura 1.13, se muestra la sucesión de amplitudes registradas en un ensayo particular con los correspondientes niveles de V (tensión) elegidos. El mínimo valor (línea negra) corresponde al valor umbral $V = V_u$, y los sucesivos valores están indicados con líneas rojas. En la parte b de la figura, se muestra la distribución acumulada de amplitudes; es fácil comprobar que para el valor umbral $V/V_u = 1$ se registra el máximo número de cuentas, y a medida que aumenta el valor de V se observa la tendencia decreciente.

² Hasta aquí se ha definido a la amplitud por el parámetro A . Cuando se trata de magnitudes medidas, se utiliza el símbolo V referido a la tensión en voltios. Esta es la identificación más generalizada en la literatura para el análisis de la distribución estadística.



a. Amplitud de los eventos



b. Distribución Acumulada en función del umbral

Figura 1.13

De las distribuciones posibles, se describirá en detalle la ley de distribución Potencial, por ser históricamente una de las más difundidas en EA y la distribución Log-Normal, por la gran cantidad de fenómenos de emisión acústica que responden a ella; otros tipos de modelos aplicables se resumen en la tabla 1.2 .

LEY POTENCIAL

La ley Potencial surgió en sismología y luego fue adoptada al análisis de señales de EA [1-13], debido a la gran cantidad de experimentos que se ajustan a ella, y a la relativa sencillez del modelo. Matemáticamente la ley se expresa como:

$$F(V) = \left(\frac{V}{V_u} \right)^{-b} \quad (1.9)$$

en dónde; $F(V)$ es la cantidad de eventos acumulados que superan la tensión V , V_u la tensión umbral elegida y b el exponente que caracteriza la distribución.

Considerando el amplio rango de amplitudes posibles, otra representación de la misma distribución, se obtiene aplicando logaritmos en ambos miembros de la ecuación 1.9:

$$\log F(V) = -b \log \left(\frac{V}{V_u} \right) \quad (1.10)$$

quedando representada una recta con pendiente negativa de valor b que caracteriza al proceso. El rango registrado en la literatura para el parámetro b está entre $-0,4$ y -4 aproximadamente; indicando diferentes mecanismos de emisión según sea dicha pendiente. En la figura 1.14, se presenta esta distribución en las dos formas descritas anteriormente, para dos valores diferentes del coeficiente b . Comparativamente la distribución con el coeficiente b_1 posee mayores amplitudes que la distribución que corresponde a b_2 . Esto se aprecia en el gráfico logarítmico,

representación usual para este tipo de distribución, como una recta de menor pendiente.

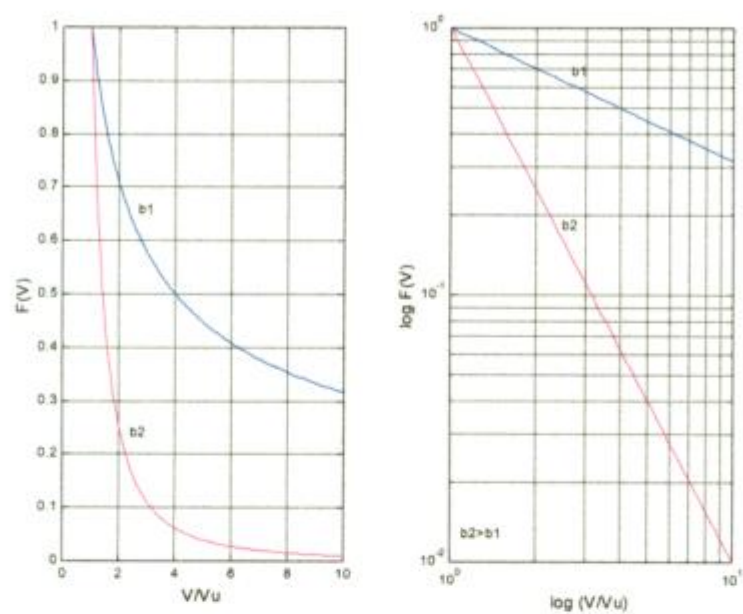


Figura 1.13 – Distribución de amplitudes según la Ley Potencial en representación lineal y logarítmica.

Aunque la aplicación del modelo de la Ley Potencial se ajusta a una gran variedad de situaciones, existen casos dónde se requieren otros modelos para lograr un buen ajuste; a continuación se describe la distribución log-normal.

DISTRIBUCIÓN LOG-NORMAL

Esta distribución es ampliamente utilizada dado que posee una asimetría positiva como muchas situaciones encontradas en la naturaleza. Además, está en estrecha relación con la distribución Normal, lo que permite fácilmente calcular las distribuciones acumuladas y las densidades de probabilidad [1-12] [1-14]. La expresión formal que describe la distribución en la forma de densidad de probabilidad es:

$$f(V) = \frac{1}{V\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2\sigma^2}(\ln V - \mu)^2} \tag{1.11}$$

donde σ y μ son parámetros relacionados con la forma y la escala de la distribución, aunque no exactamente igual que en la distribución Normal. La distribución acumulada Log-Normal se obtiene integrando la expresión anterior:

$$F(V) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^V \frac{1}{V} e^{-\frac{1}{2\sigma^2}(\ln V - \mu)^2} dV \tag{1.12}$$

Si se garantizan *a priori* algunos requisitos sobre las características de las variables y las causas que las originan, se puede esperar que las mediciones respondan a

una distribución Log-Normal de acuerdo a los teoremas centrales del límite [1-14]. Estas consideraciones son:

- La medición debe ser el efecto multiplicativo de causas subyacentes.
- Las causas deben ser independientes.
- Debe existir un gran número de causas.

Tipo de Distribución	Expresión
Ley Potencial	$F(V) = \left(\frac{V}{V_u}\right)^{-b}$
Weibull	$F(V) = e^{-\left(\frac{V}{V_0}\right)^q}$
Modelos Extremos	$F(V) = 1 - e^{-\left(\frac{V}{V_0}\right)^{-b}}$
Log-Normal	$f(V) = \frac{1}{V\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\left(\frac{\ln V}{V_0}\right)^2 / 2\sigma^2}$

Tabla 1.2 – Distribuciones estadísticas comúnmente aplicables a los fenómenos de EA. Nótese que la distribución Log-Normal está expresada como una función de densidad de probabilidad. Los parámetros *b*, *q* y *V*₀ dependen de las características del proceso de emisión.

Un estudio más profundo de modelos de distribuciones de amplitudes se encuentra en Pollock [1-12].

1.7.3 Dimensión Fractal (Diagrama de Richardson)

En los últimos años se ha aplicado exitosamente la teoría de los fractales para un amplio rango de problemas y disciplinas. La profundidad y extensión de la teoría escapa ampliamente el alcance de los análisis aquí realizados; más detalles se pueden encontrar en numerosos textos [1-15] [1-16] [1-17].

La potencialidad del análisis fractal radica en la posibilidad de estudiar fenómenos que abarcan desde el determinismo hasta la aleatoriedad. En este inciso se estudian los fenómenos relacionados con las series temporales [1-18], o más específicamente con fenómenos puntuales; en el sentido de que solo se considera la presencia o ausencia de información, no su magnitud o energía.

El algoritmo utilizado es el ideado por Richardson, originalmente aplicado a la medición de la longitud de costas marítimas. En él se establecen diferentes escalas de medición, según las cuales, la dimensión final medida, depende de las características físicas. El rango de escalas, o reglas de medidas, debe ser considerado de acuerdo al problema particular considerado. Siendo *μ* la longitud de la regla, existirá un rango tal que:

$$\mu_1 < \mu < \mu_2$$

siendo *μ*₁ el límite inferior y *μ*₂ el límite superior.

Para cada valor de μ utilizado se mide la longitud total asociada $L(\mu)$, y la pendiente en un gráfico $\log L(\mu)$ vs. $\log \mu$ es el valor de la dimensión fractal de ese conjunto.

Según se dijo, se utilizan para la construcción del diagrama, variables puntuales, como puede ser el tiempo de aparición de un evento de EA. Entonces, aplicando el procedimiento se elige un valor mínimo (μ_1) de regla de acuerdo a los tiempos de muestreo y se superpone sobre la señal de manera consecutiva hasta alcanzar el final de los datos. En cada región abarcada por la regla se marca como "1" si existe al menos un suceso dentro de esa longitud μ , finalmente se cuenta la cantidad de casilleros que tienen algún evento y se suma en la magnitud $L(\mu)$. El procedimiento continúa con otra longitud mayor y se repite el proceso hasta alcanzar la cota máxima μ_2 .

El valor obtenido para la pendiente caracteriza al proceso estudiado. Así, el valor de una pendiente que tiende a "1" indica un proceso altamente aleatorio; en cambio si el valor de la pendiente tiende a "0" existe un alto grado de ordenamiento o de memoria entre los datos, es decir que existen causas conectadas. En la figura 1.14 se muestran dos casos extremos de fenómenos puntuales; en la parte "a" se presenta un proceso aleatorio con una dimensión fractal tendiente a 1. Por el contrario, en la parte "b", se presenta un proceso completamente determinístico con un valor de dimensión fractal nulo.

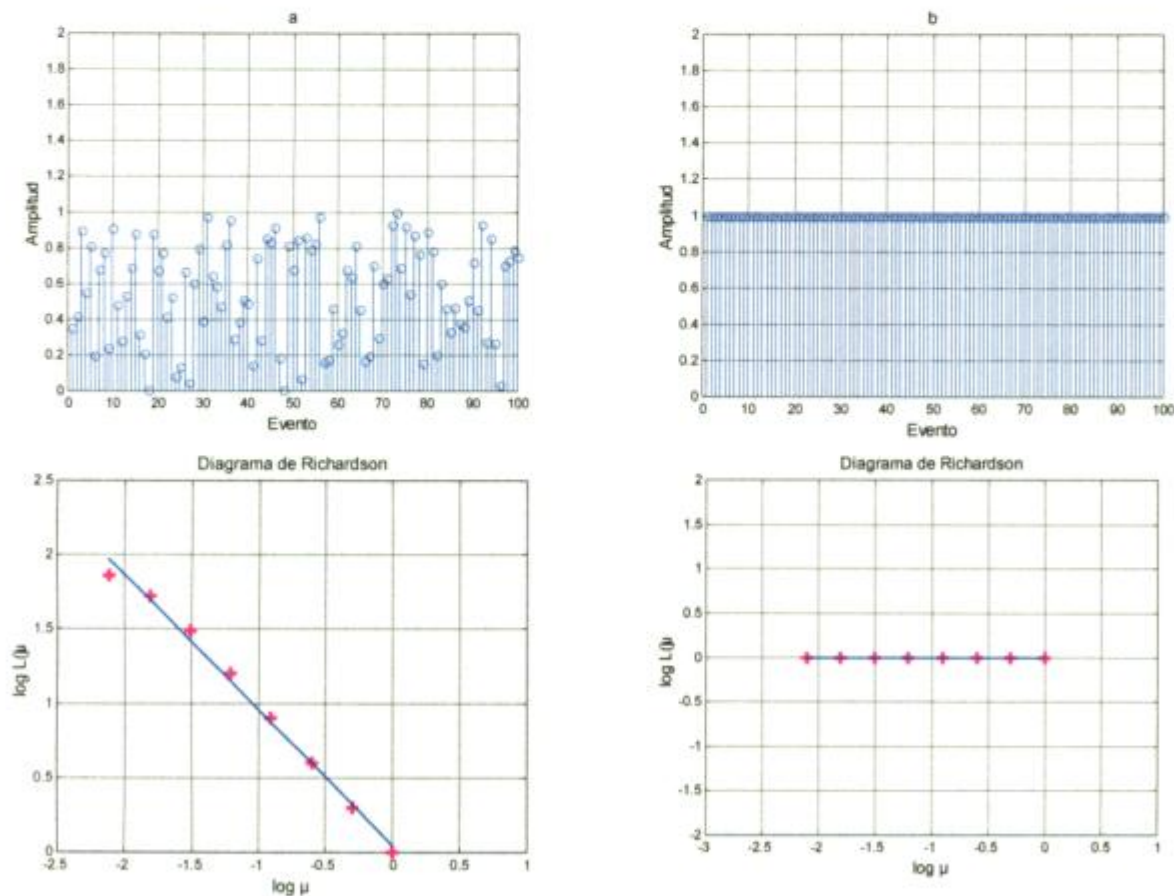


Figura 1.14 – Dimensión Fractal para fenómenos puntuales. a. Proceso aleatorio, dimensión fractal: 0,91. b. Proceso determinístico, dimensión fractal: 0.

1.8 TÉCNICAS AVANZADAS DE ANÁLISIS DE SEÑALES

Las señales obtenidas en los ensayos son funciones del tiempo que contienen información de los procesos que las originaron. Usualmente, esta representación temporal no es suficiente para caracterizar los eventos y se requiere un procesamiento posterior. El estudio en el plano de frecuencias es históricamente uno de los métodos más utilizados; aunque existen herramientas más complejas que permiten un análisis en el plano tiempo-frecuencia conjuntamente.

1.8.1 Transformada de Fourier

La transformada continua de Fourier es una representación en el plano de las frecuencias de la señal temporal $f(t)$. Su definición formal es:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt \quad (1.13)$$

donde $F(\omega)$ es la transformada de Fourier de la función $f(t)$ y ω es la frecuencia angular expresada en radianes ($\omega = 2\pi f$). Las funciones bases que permiten sintetizar la función original $f(t)$ desde el campo de frecuencias $F(\omega)$, son funciones armónicas monocromáticas, representadas por exponenciales complejas.

Esta forma de representación de la señal es complementaria a la expresión temporal, es decir, que contiene la misma información en un dominio diferente.

La ecuación 1.13, está definida para funciones continuas del tiempo; cuando se trabaja con señales digitalizadas como en este caso, se debe aplicar la correspondiente transformada discreta y tener en cuenta el período de muestreo. Para el cálculo de la transformada discreta existe un algoritmo muy eficiente conocido por sus siglas en inglés FFT (Fast Fourier Transform).

Cuando las señales no son estacionarias, la información dada por la transformada de Fourier es incompleta, ya que no especifica la duración o el tiempo en que existe una determinada componente de frecuencia. Es imposible distinguir entre un proceso oscilatorio infinito de una oscilación transitoria de frecuencia equivalente. Esta dificultad, ha dado origen a nuevos enfoques para el análisis de las señales.

1.8.2 Transformada Localizada de Fourier

Una herramienta que permite obtener tanto la información temporal como frecuencial de la señal es la denominada transformada localizada de Fourier (STFT, Short Time Fourier Transform). Se basa en el cálculo de la transformada de Fourier en una región acotada de tiempo definida por una función ventana $w(t)$.

La función ventana $w(t)$ abarca una pequeña porción de la función temporal $f(t)$ y se desplaza temporalmente hasta cubrir toda la longitud de la señal. De esta forma, se logra la descripción en un dominio tiempo-frecuencia, cuya expresión matemática es:

$$STFT_f(\tau, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot w(t - \tau) e^{-i\omega t} dt$$

donde τ es el parámetro que indica el desplazamiento temporal de la ventana y $w(t)$ es la función que describe a la ventana temporal.

La duración finita de la ventana, incide sobre la resolución en tiempo y frecuencia de la transformada. Pero, aunque se obtiene una peor resolución en frecuencia con respecto a las funciones armónicas infinitas utilizadas en la transformada de Fourier, permite localizar en el tiempo componentes de la señal. La resolución en tiempo (Δt) y en frecuencia ($\Delta \omega$) está limitada por el principio de incertidumbre que establece la relación:

$$\Delta t \cdot \Delta \omega \geq \frac{1}{2}$$

Cuando la función ventana es Gaussiana, la transformada se conoce como transformada de Gabor, y la expresión anterior para el producto de las resoluciones resulta mínimo; esto es $\Delta t \cdot \Delta \omega = \frac{1}{2}$.

1.8.3 Transformada Wavelet

En la transformada localizada de Fourier, el ancho y la forma de la ventana es constante, lo mismo que su resolución en frecuencia. Por el contrario, existen otras transformadas, como la Wavelet, que permiten utilizar diferentes resoluciones según la frecuencia (análisis multirresolución) [1-19] [1-20] [1-21].

La transformada Wavelet permite mayor flexibilidad a las funciones ventana para mantener el mismo número de oscilaciones, optimizando la resolución en todo el rango de frecuencias.

Estrictamente, la transformada Wavelet es un análisis de escala-tiempo, y no de frecuencia-tiempo; aunque son conceptos relacionados. De aquí en más se la denomina descripción frecuencia-tiempo por ser más adecuada a las señales analizadas en los capítulos siguientes.

Matemáticamente, la transformada Wavelet es similar a la definición de las transformadas antes vistas para una función $f(t)$ de energía finita; la diferencia está en la función base. La expresión formal es:

$$W_s(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot \psi_{a,b}^*(t) dt$$

$$\psi(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$$

siendo $\psi(t)$ la función wavelet madre, que genera el resto de las wavelets $\psi_{a,b}(t)$ por traslaciones y cambios de escala. La función $\psi(t)$ debe cumplir algunos requisitos (condiciones de admisibilidad) para poder ser generadora del resto de las funciones. Debe estar bien localizada, poseer valor medio nulo (oscilatoria), y de rápido decaimiento temporal. Existen varias funciones madre que cumplen estos requisitos, entre las más conocidas están las wavelet de: Gabor, Morlet, Meyer, Daubechies y Haar.

El parámetro a es el que corresponde a la escala (frecuencia) y el parámetro b a la traslación (tiempo). El factor $1/\sqrt{|a|}$ cumple el propósito de normalización de la energía.

Como característica principal, el análisis multirresolución permite tener a altas frecuencias una buena resolución temporal; y a bajas frecuencias una buena resolución frecuencial. La resolución en el tiempo es inversa a la resolución en frecuencia por lo tanto su producto es una constante $\Delta t \cdot \Delta \omega = c$. La figura 1.15, muestra mapas de resolución según los distintos enfoques vistos; para la transformada wavelet el esquema es el que corresponde al punto d.

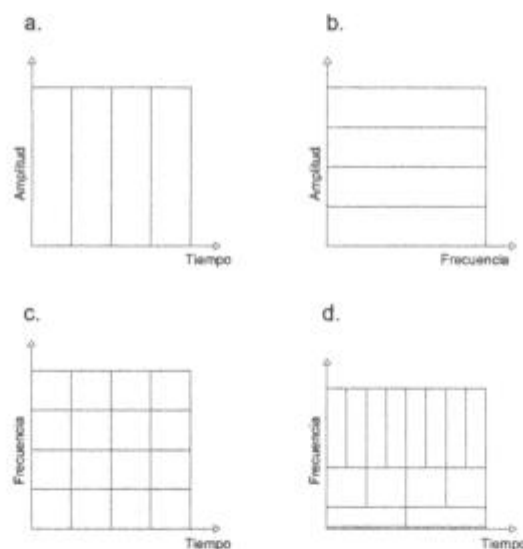


Figura 1.15 – Mapas de resolución. **a.** Señal temporal **b.** Transformada de Fourier **c.** STFT **d.** Wavelet.

La figura 1.16, muestra comparativamente para una función senoidal modulada por una gaussiana, como son las oscilaciones según el análisis utilizado. En la parte superior de la figura se muestra la representación que corresponde a la transformada STFT; donde se observa que la cantidad de oscilaciones es variable. En cambio, en la parte inferior, para el análisis multirresolución el número de oscilaciones se mantiene constante. Los rectángulos dibujados debajo de cada señal representan un espacio de los mapas de resolución, como se consideró en la figura 1.15.

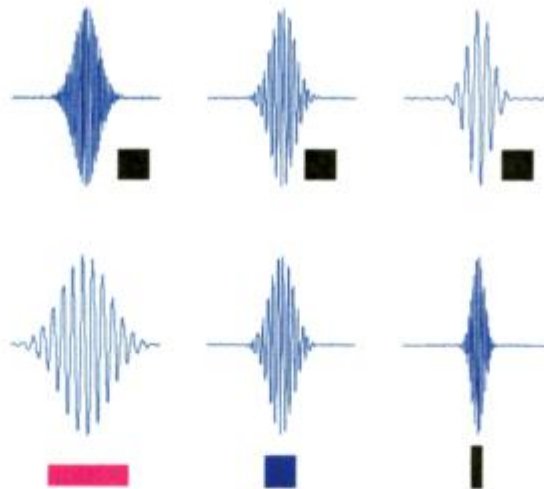


Figura 1.16 – Comparación de resolución para STFT (superior) y análisis multirresolución (abajo).

Hasta aquí se ha considerado solamente la transformada Wavelet continua, pero debido a que las señales resultan de un muestro temporal, la implementación de la transformada requiere un equivalente discreto. Existen varios métodos de implementación de estos algoritmos, como por ejemplo la descomposición en una serie de filtros en cascada ("subband coding"); que no se desarrollan aquí. En la literatura de análisis de señales existe abundante información sobre los métodos y la forma de implementarlos.

La figura 1.17 muestra para dos señales oscilatorias con una envolvente gaussiana la transformada de Fourier y la transformada Wavelet. Claramente, las señales temporales presentan diferencias notables en frecuencia y en duración. La transformada de Fourier distingue la diferencia en frecuencias pero no aporta información sobre el comportamiento temporal de las señales. En cambio, la transformada Wavelet indica tanto la localización de frecuencias como la localización temporal.

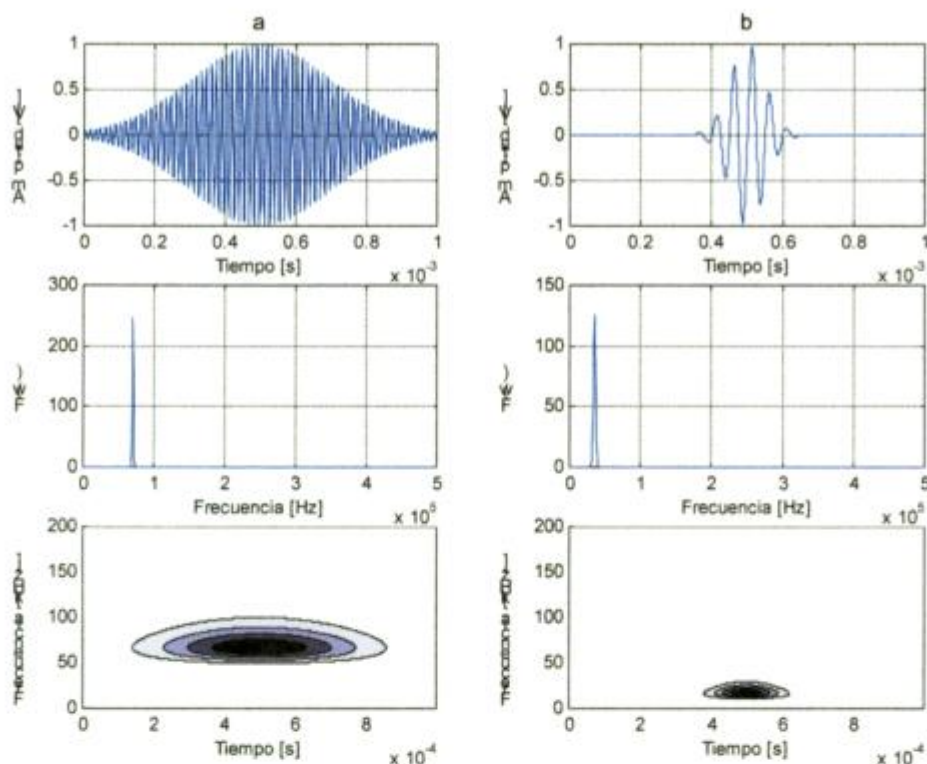


Figura 1.17 – Comparación entre dos señales: representación temporal (superior), representación frecuencial (medio) y representación tiempo-frecuencia (inferior).

1.8.4 Distribuciones Tiempo-Frecuencia

Las transformadas descriptas anteriormente utilizan algún tipo de ventana para realizar el mapeo desde el dominio del tiempo a un dominio tiempo-frecuencia. El proceso de aplicar ventanas tiene una restricción intrínseca en la resolución. Otro enfoque, que no utiliza ventanas, son las distribuciones de alta resolución de energía o de clase Cohen [1-22] [1-23]. La ecuación general de las distribuciones tiempo-frecuencia $F(t, \omega)$ para una dada función temporal $f(t)$ continua es:

$$F_{Cohen}(t, \omega) = \frac{1}{2\pi} \iiint e^{-i\theta\tau - i\tau\omega - i\theta\omega} \phi(\theta, \tau) f^*\left(u - \frac{\tau}{2}\right) f\left(u + \frac{\tau}{2}\right) du d\tau d\theta$$

en donde $\phi(\theta, \tau)$ es una función arbitraria, conocida como el núcleo de la transformación, que da las características a la distribución, $f(u)$ es la señal temporal, f^* es el complejo conjugado de $f(u)$, τ es la variable de desplazamiento temporal, θ la de desplazamiento frecuencial y las integrales se evalúan entre $\pm \infty$.

El cálculo de estas distribuciones es complejo debido a que están involucradas autocorrelaciones, convoluciones y transformadas de Fourier.

En la elección del núcleo residen las propiedades de la distribución; en el caso particular en que el núcleo sea una constante igual a uno, la distribución se conoce con el nombre de Wigner-Ville.

Estas distribuciones en general presentan mejor resolución tanto en tiempo como en frecuencia, pero son muy sensibles a las componentes de ruidos en las señales, generando componentes espúreas. Es deseable conocer cualitativamente el tipo de distribución antes de aplicar estos métodos para poder distinguir entre fenómenos reales de la señal y fenómenos de interferencia creados durante el cálculo.

2 EXPERIMENTAL

En este capítulo se describen las características de los ensayos realizados y la caracterización de las probetas utilizadas. También se detallan las especificaciones de los equipos y elementos utilizados durante todos los ensayos.

2.1 DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS

El trabajo experimental se dividió en dos etapas que se analizan independientemente, a los efectos de lograr mayor claridad en la exposición. Se distinguirán de aquí en adelante los ensayos como "**tubos**" y "**herraduras**" por las características geométricas de cada tipo de probeta. Existe un caso particular intermedio entre ambos que se considera dentro del grupo de herraduras y se lo denominará como ensayo tipo "**aro**".

2.1.1 Probetas tipo Tubo

El objetivo de los ensayos en tubos fue estudiar y analizar las características generales de la propagación de ondas elásticas utilizando como herramienta la información en un espacio tridimensional tiempo-frecuencia-energía [2-1] y las curvas de dispersión calculadas en forma teórica para esta geometría (ver Anexo A).

La emisión acústica fue simulada con una fuente tipo Hsu-Nielsen (ver 2.2 Equipamiento) ubicada en posiciones definidas previamente, sobre la superficie exterior de los tubos. Los sensores piezoeléctricos también se ubicaron sobre la superficie exterior en posiciones prefijadas. De esta forma, fue posible conocer la distancia entre fuente y sensor.

La señal de salida de los sensores luego de una etapa de amplificación fue digitalizada para su posterior análisis. El esquema para este tipo de ensayos se presenta en la figura 2.1.



Figura 2.1 – Esquema de los ensayos con tubos.

Se ensayaron en total cinco tubos diferentes cuyas características se definen en la Tabla 2.1 y en la figura 2.2 se muestra un corte transversal en escala de los mismos.

En particular para los ensayos del tubo II se incluyó el efecto de la temperatura a través de un elemento calefactor como se describe en el inciso 2.2.7.

TUBO	I	II	III	IV	V
Diam. Ext. [mm]	140	142	245	365	63.5
Diam. Int. [mm]	108	132	229	315	57.5
Espesor [mm]	16	5	8	25	3
Longitud [mm]	380	790	810	640	3550
Radio/espesor	4.4	14.2	15.3	7.3	10.6
Frec. _{min} [kHz]	109	89	52	37	201
Características	Acero sin costura. Oxidación en pared interior. Recubrimiento pared externa (ver análisis EDAX).	Acero sin costura. Marcas de laminado.	Acero sin costura. Cilindro de GNC sin extremos. Pintado en el diámetro exterior. Óxido en el interior.	Acero sin costura, con óxido en ambas superficies.	Acero inoxidable con costura longitudinal de 8 mm.

Tabla 2.1 – Descripción de los tubos utilizados en los ensayos.

La entrada de la tabla correspondiente a la frecuencia mínima ($f_{\text{rec}_{\text{min}}}$) identifica la frecuencia mínima a partir de la cual las curvas de dispersión de placas se pueden aproximar a las curvas de dispersión de tubos, como se explicará en el inciso 3.1.2.

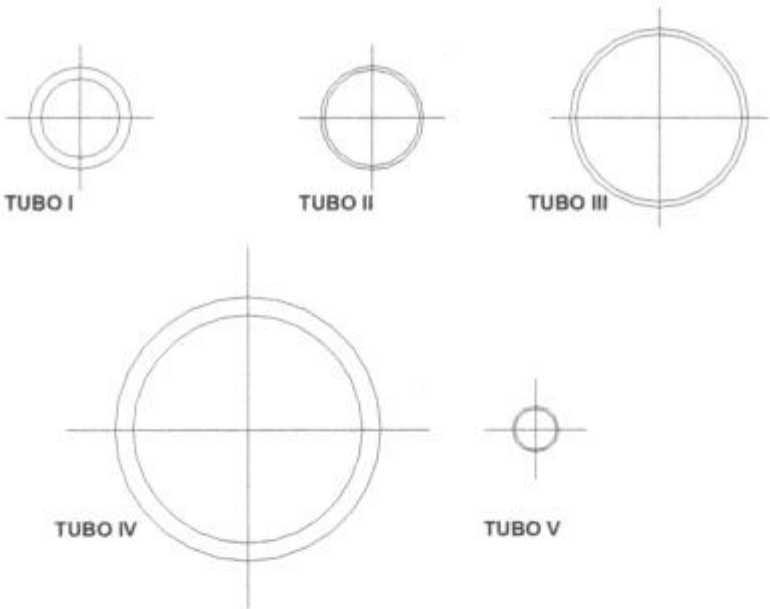


Figura 2.2 – Corte transversal de los tubos.

Los detalles de las mediciones para cada ensayo con tubos están tabuladas en el Anexo B, dónde se indica el tipo de tubo, la posición de la fuente, la posición del sensor, la frecuencia de muestreo y la amplificación utilizada. Cada uno de los ensayos que aparecen descriptos fueron digitalizados y posteriormente analizados (Ver sección 3.1).

2.1.2 Probetas tipo Herradura

Los ensayos fueron realizados para distinguir las características entre la emisión generada por la rotura de un recubrimiento superficial y la emisión generada en el volumen del material, cuando se somete a la probeta a una deformación mecánica.

Se construyeron 10 probetas a partir de un tubo de acero sin costura, con las dimensiones que se muestran en la figura 2.3. A 5 de ellas se les quitó el recubrimiento superficial mediante un pulido mecánico y a las 5 restantes se las dejó en el estado original.

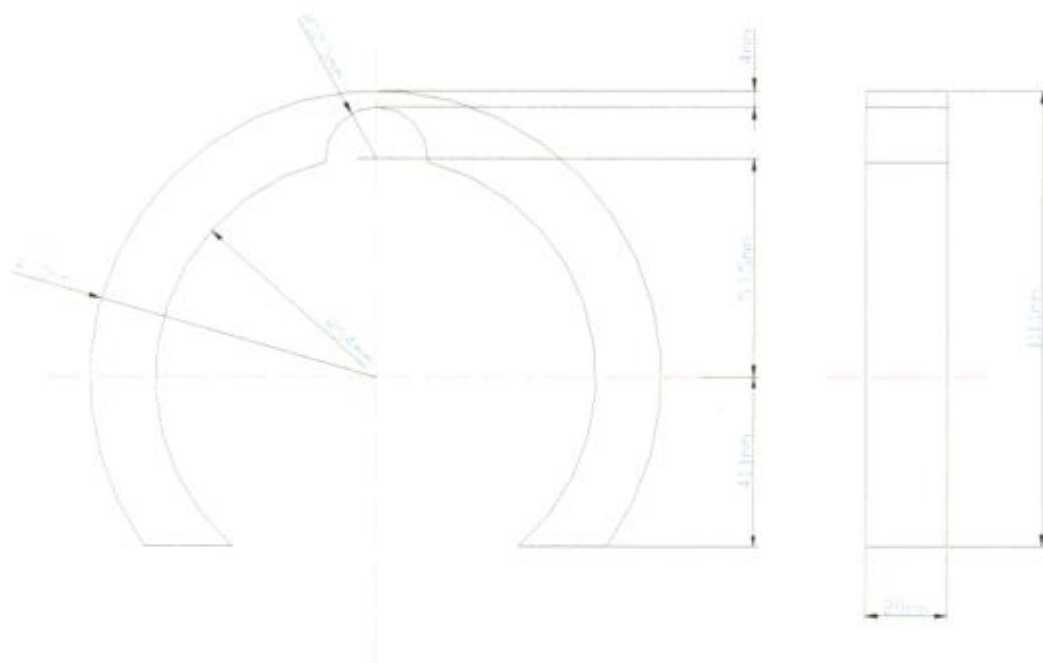


Figura 2.3 – Esquema de una probeta tipo herradura.

Todas las probetas fueron sometidas a ensayos de deformación triaxial sin llegar a la rotura. La aplicación del esfuerzo se realizó en una dirección perpendicular al eje de simetría, mediante un dispositivo específicamente diseñado (ver 2.2 Equipamiento). En la figura 2.4, se presenta un diagrama del sistema empleado para este tipo de ensayos.

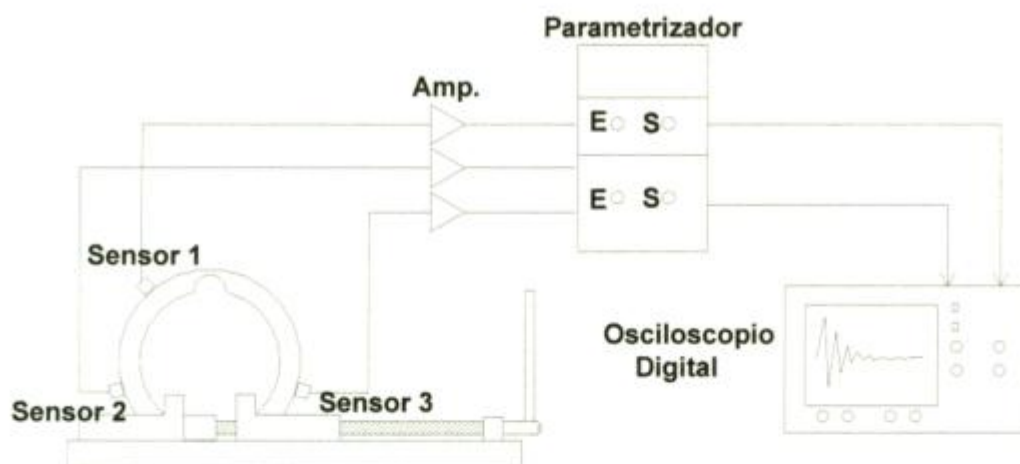
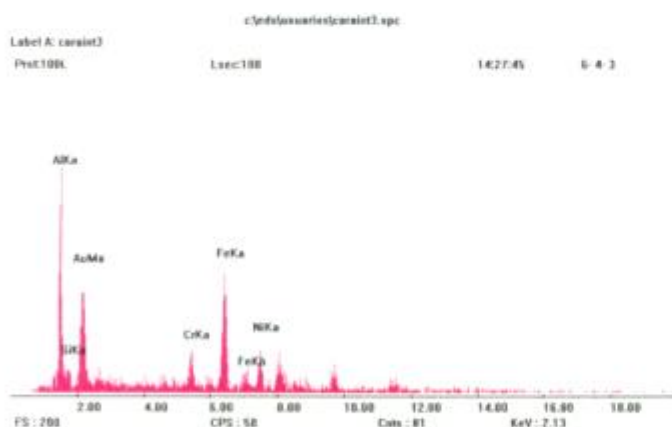


Figura 2.4 – Esquema de un ensayo con probeta tipo herradura.

La velocidad de aplicación del esfuerzo se mantuvo constante para evitar introducir nuevas variables en las fuentes de emisión. El valor promedio de apertura fue de aproximadamente 0,5 mm/s.

El recubrimiento utilizado fue el original que tenían los tubos. Para caracterizar el recubrimiento se realizó un análisis semi-cuantitativo por rayos X en un microscopio de barrido electrónico, cuyo resultado demostró principalmente la presencia de aluminio en la capa superficial del recubrimiento de un espesor promedio de 10 μm . En la figura 2.5, se muestra una micrografía obtenida por el microscopio y el análisis por rayos X correspondiente.



Análisis por EDAX



MEB - Aumento x200

Figura 2.5 – Superficie Externa del Tubo

Debido al propósito de los ensayos, no se realizó una mejor caracterización del material ni del recubrimiento, ya que la única variable en todos los ensayos fue la presencia o ausencia de la capa externa de recubrimiento sin variar ninguno de los otros parámetros.

El otro tipo de probeta utilizado es la denominada tipo aro por sus características geométricas. En la figura 2.6 se muestra un esquema de dicha probeta con sus dimensiones.

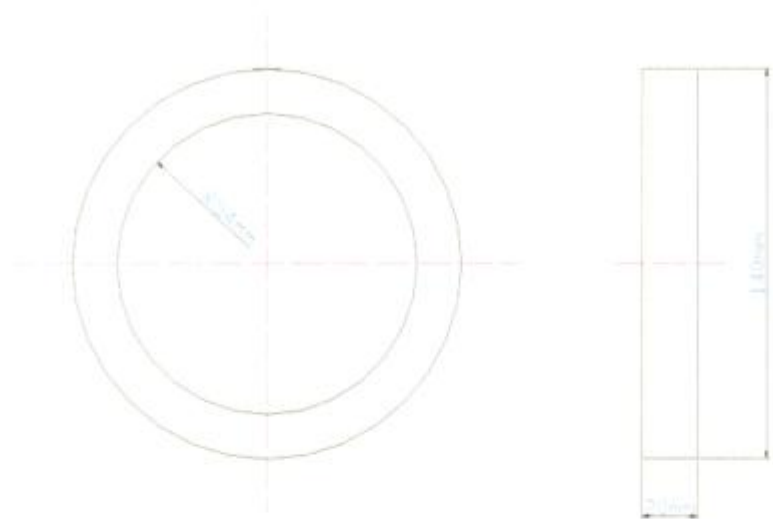


Figura 2.6 – Esquema de una probeta tipo Aro.

Estas probetas se utilizaron como paso intermedio entre las probetas tipo tubos y las probetas tipo herraduras para el análisis de los diagramas TFE con las señales obtenidas de los ensayos. Sobre este tipo de probetas, aros, se realizaron tres experimentos con una fuente de emisión simulada Hsu-Nielsen sobre la superficie. En la figura 2.7 se indica esquemáticamente la ubicación de la fuente y del sensor para cada una de estos ensayos. Las señales fueron digitalizadas y posteriormente analizadas.

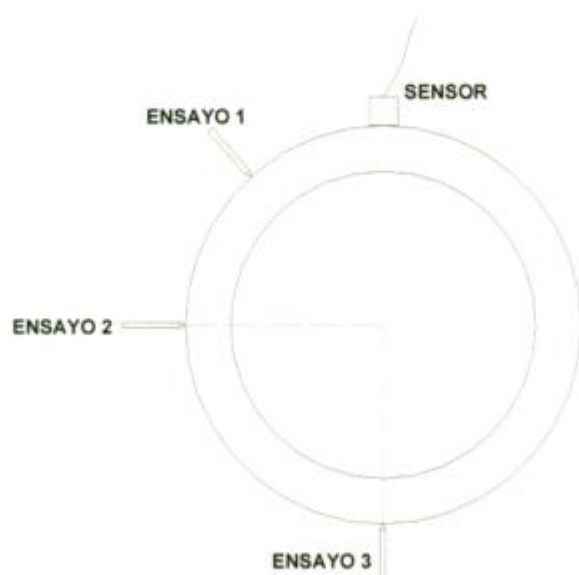


Figura 2.7 – Esquema de los ensayos sobre una probeta tipo Aro.

2.2 EQUIPAMIENTO

En este inciso se describen las características técnicas de los equipos y herramientas utilizadas para el conjunto de los ensayos.

2.2.1 Osciloscopio Digital

El osciloscopio fue utilizado principalmente para digitalizar las señales y estudiar los niveles de ruido de los amplificadores, para ajustar las ganancias y los umbrales de detección.

- Modelo: LeCroy 9360.
- Velocidad máxima de muestro: 5 GigaMuestras/segundo.
- Ancho de Banda: 300 MHz.
- Resolución vertical: 11 bits.
- Conversor AD: 8 bit, uno por canal.
- Memorias : 25K puntos por canal
- Conexión externa: RS232-C, IEEE-488

2.2.2 Equipo Paramétrico de EA

Fue el principal equipamiento utilizado para los ensayos de deformación de las probetas tipo herradura. El equipo extrae parámetros tales como: tiempo de inicio, tiempo del pico, duración y amplitud de las señales.

El equipo presenta, integrados dentro de un gabinete, los siguientes módulos: alimentación, amplificación, parametrización de las señales y entradas externas. Los parámetros del equipo se ajustan desde una computadora (conexión serie) mediante un programa diseñado con ese propósito. La salida del programa es una tabla en formato ASCII con los datos adquiridos por el equipo. En detalle:

- **Fuente Alimentación CNEA T340/341**
- **Amplificadores, CNEA K390**
 - Cantidad: 2
 - Ganancia variable: hasta 55 dB
 - Tensión umbral variable: 2,5 V en pasos de 50 mV
- **Módulo de Procesamiento de Señal CNEA T881**
 - Controlado por el programa *Emisión Acústica (EA)*
 - Medición de parámetros de la señal:
 - Tiempo de Inicio, referido al inicio de la medición
 - Tiempo de Pico, referido al Tiempo de Inicio (Rise Time)
 - Tiempo de Fin, referido al Tiempo de Inicio (Duración)
 - Amplitud de Pico (Amplitud)

• Programa

Desde el programa **EA** [2-2] se controlan las variables del equipo y se toman las mediciones. Los parámetros que se pueden modificar son los que se muestran en la figura 2.8 :

- **Tiempo de Protección (TP):** es el tiempo que el equipo permanece sin monitorear la señal de entrada luego de detectar la finalización de un evento.
- **Tiempo de Protección del Pico (TPP):** ocurrido un pico, es el tiempo que debe transcurrir sin la ocurrencia de otro, para que el equipo lo defina al primero como el pico de la señal.
- **Tiempo de Protección de la duración (TPD):** es el tiempo que debe permanecer la señal por debajo del umbral elegido en el amplificador para definir el fin del evento.

Emisión Acústica - Versión 2

Medición

Lectura de Datos

Borrar Memoria

Estado del Equipo

Conexión: COM2

Nº de Eventos en memoria: 0/90090

Tiempos Característicos

Tiempo de Protección [ms]: 200.0000

Tiempo de Protección de la Duración [ms]: 0.3000

Tiempo de Protección del Pico [ms]: 0.1000

Configurar Recargar

Figura 2.8 – Parámetros introducidos al equipo de EA.

Además se puede fijar el tiempo de muestreo para las señales externas; cabe aclarar que durante la adquisición de estas señales, el módulo de parametrización no analiza eventos de EA. Por lo tanto, una alta tasa de adquisición de parámetros externos puede perjudicar el desempeño del parametrizador.

Los datos de salida se ordenan según una tabla cuyo encabezado es como el que se muestra en la figura 2.9; los valores de tiempo están expresados en milisegundos, la amplitud en Volts y la presencia de eventos en el canal 2 con un “1” o “0” según corresponda a detección o no detección respectivamente. Los datos representados son a modo de ejemplo, no pertenecen a ningún ensayo en particular.

# Evento	T. Inicio[ms]	T. Pico[ms]	T. Fin[ms]	Cuentas de Canal 1	Vpico[V]	...
...	...	...	...	...	...	...
28	27851.7	0.008	0.2413	16	1.09	
29	28078.2	0.008	0.06	2	0.8	
...	...	...	...	...	...	...

...	Hubo antes de Tinicio	Hubo antes de Tpico	Hubo antes del Tfin	Largo	Decretó Tfin	Overflow
...	...	...	...	...	...	...
	0	1	0	0	0	0

	0	0	0	0	1	0
...	...	...	...	...	...	...

Figura 2.9 – Formato de Salida de datos del equipo parametrizador. Los puntos suspensivos indican la continuidad de las tablas.

La salida para los parámetros externos es más simple, solamente se indica el tiempo de adquisición y el valor en Volts después de la conversión analógica/digital.

2.2.3 Dispositivo de apertura de probetas tipo herradura

Para la deformación de las probetas se utilizó un dispositivo previamente diseñado para ese propósito [2-3]. En la figura 2.10, se muestra un esquema del dispositivo y la ubicación de la probeta montada para ensayar.

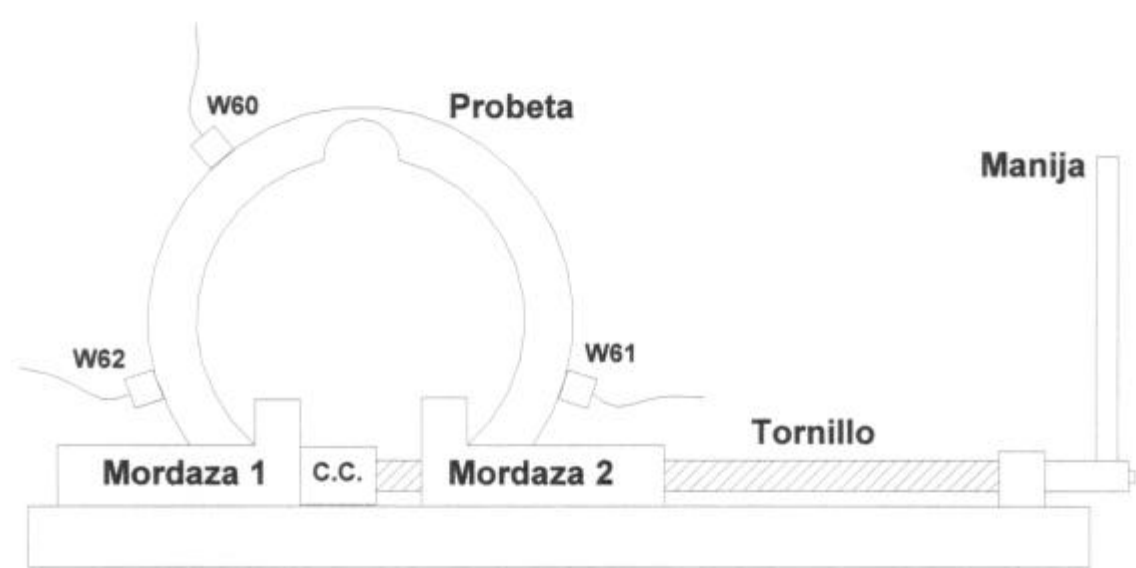


Figura 2.10 – Esquema del dispositivo de apertura de herraduras. C.C.: celda de carga.

Básicamente, el dispositivo está formado por dos mordazas, que soportan los extremos de las probetas, una de las cuales puede desplazarse sobre una corredera a tornillo cuyo movimiento se imprime desde un extremo a través de una manija. La velocidad de apertura se controla manualmente, lo que introduce un factor de error que debe ser considerado

Durante los ensayos midió la fuerza aplicada con una celda de carga ubicada en el dispositivo de apertura de probetas; en la figura 2.10 se indica como CC. Sus elementos sensores (“strain gauges”) se encuentran en un cilindro de acero unido al dispositivo de apertura tal como fue construido originalmente[2-3]

Las celdas de carga se disponen formando un puente de Wheatstone para disminuir las variaciones ante factores externos como temperatura y humedad. La calibración de la celda fue realizada en una máquina de tracción en un rango entre 0 y 200 kgf

(kilogramo fuerza). La constante resultante que relaciona la tensión eléctrica medida sobre la celda y la fuerza aplicada es:

$$K = 0,14 \frac{kgf}{mV}$$

El valor de tensión relativo a la fuerza aplicada en los ensayos fue utilizada como parámetro externo en el equipo de parametrización.

2.2.4 Sensores

Se utilizaron tres sensores piezoeléctricos de banda ancha (100 – 1000 kHz) ubicados sobre la probeta según la indica en la figura 2.4. El sensor principal, PAC AE W60, se ubicó a 5 cm de la zona de máxima deformación hacia el lado opuesto a la manija. Los sensores PAC AE W61 y AE W62 se utilizaron en función de “guardas” para eliminar eventos espúreos. En la figura 2.10, se indica la ubicación física de todos los sensores sobre una probeta tipo herradura. En el ANEXO C, se muestran las curvas de atenuación en función de la frecuencia para los tres sensores utilizados.

El acoplamiento acústico entre los sensores y la superficie del material se hizo con vaselina sólida.

2.2.5 Pre-amplificadores

A la salida de los sensores de EA, se ubicaron los preamplificadores Energy Saver PA 01, con una ganancia fija de 40 dB (100x). La alimentación de 24 Vcc (tensión continua) fue provista por los módulos de amplificación del equipo de parametrización.

La señal ingresa desde el lado del sensor por un conector diferencial polarizado y la salida es amplificada por un conector BNC estándar. El ancho de banda de los amplificadores es de 50-1000 kHz aproximadamente.

2.2.6 Fuente Hsu-Nielsen

En los ensayos en que se requiere una fuente simulada de EA se utiliza comúnmente la denominada fuente de Hsu-Nielsen. Es simplemente un lápiz con una mina de 0,3 mm de diámetro y un aro cercano a la punta. La rotura de la mina genera ondas elásticas que simulan fuentes reales de EA. La repetibilidad de los ensayos con este tipo de fuente tiene grandes limitaciones pero la facilidad de aplicación y su bajo costo han hecho que esté ampliamente difundida. La figura 2.11 muestra el esquema normalizado de esta fuente [2-4].

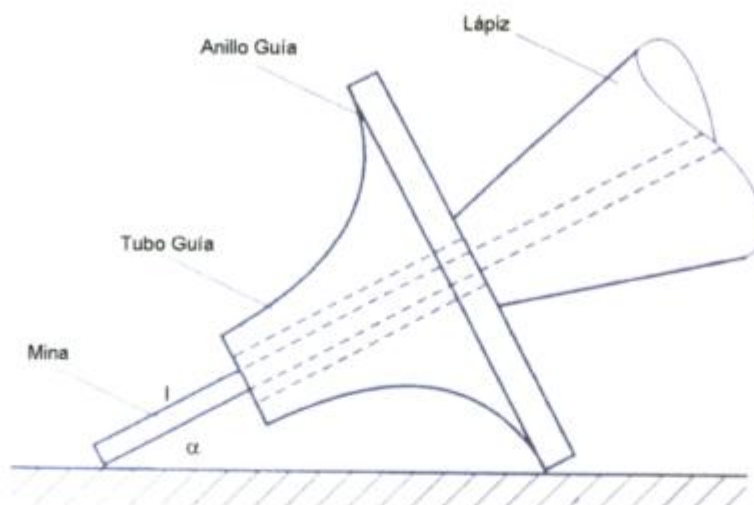


Figura 2.11 -
Fuente Hsu-Nielsen
IRAM 779:2003.
Mina: 2H, Diámetro:
0,3 o 0,5 mm, Largo
(l) = 3 mm $\pm$ 0,5
mm, $\alpha = 30^\circ$

2.2.7 Calefactor y Termocupla

Para los ensayos relacionados con los efectos termoelásticos se utilizó como elemento calefactor un soplete con mezcla gas natural y aire. La aplicación de la llama se hizo en forma localizada en una diámetro de aproximadamente 10 mm alcanzándose localmente temperaturas de hasta 250 °C.

Para la medición de la temperatura se utilizó una termocupla de contacto Hioki 9180 - K(CA) con un rango de medición entre -50 , 800 °C.

2.2.8 Programas de computadora (software)

Se utilizaron durante todo el trabajo varios paquetes dependiendo de la aplicación. En la lista que sigue se indica el nombre del programa y el uso dado:

- **AGU-VALLEN WAVELET** [2-5] (libre): utilizado para generar los coeficientes de la transformada Wavelet de las señales. El algoritmo utilizado está basado en un trabajo de Susuki et. Al.[1-20]. En él se utiliza como función madre la denominada función de Gabor (gaussiana) para generar el resto de las funciones ("wavelets").
- **VALLEN DISPERSION** [2-5] (libre): utilizado para generar las curvas de dispersión de placas en función del espesor y del material. El resultado se expresa como una relación entre la velocidad de fase o de grupo con la frecuencia; el espesor se incluye en el eje de la frecuencia.
- **MATLAB 5.2.1** [2-6] (comercial): utilizado para todo el análisis de las señales digitalizadas y para la superposición de las curvas teóricas de dispersión sobre los diagramas tiempo-frecuencia-energía. Se generaron varios algoritmos específicos para distintas aplicaciones.
- **PCDisp** [2-7] (libre): rutinas de Matlab para generar curvas de dispersión en geometrías cilíndricas macizas y huecas.
- **STATISTICA** [2-8](comercial): utilizado para el tratamiento estadísticos de los datos, específicamente para el ajuste de los datos a distribuciones de probabilidad.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se detallan los resultados obtenidos experimentalmente para los dos tipos de ensayos (probetas tipo herradura y probetas tipo tubo), en conjunto con las discusiones y consideraciones hechas para el análisis de los datos.

3.1 ENSAYOS CON TUBOS

Los experimentos llevados a cabo con los tubos tienen como objetivo estudiar la propagación de ondas elásticas en este tipo de geometrías mediante una técnica avanzada de análisis de señales. El proceso consiste en la superposición de curvas de dispersión teóricas sobre diagramas Tiempo-Frecuencia-Energía (TFE), calculados con la transformada "Wavelet" a partir de señales generadas experimentalmente (fuente Hsu-Nielsen).

Para el proceso de superposición se propone un modelo sencillo de las trayectorias seguidas durante la propagación de las ondas y se analiza el ajuste sobre los diagramas TFE. Como variables se consideran distintas localizaciones para la fuente y el sensor, distintas características de tubos y la presencia de defectos introducidos artificialmente

Este tipo de enfoque para el estudio de propagación de ondas es muy reciente y se encuentra en su mayor parte dirigido a geometrías planas [3-1] [3-2]. Existen muy pocas referencias a experimentos hechos con tubos de manera sistemática [3-3]. Por este motivo resulta de interés el estudio experimental en geometrías cilíndricas, cuya descripción matemática ya ha sido suficientemente explicada en la literatura [3-4] [3-5]. Otros trabajos utilizan el mismo formalismo para la propagación de ondas en geometrías cilíndricas pero en un dominio temporal, considerando las reflexiones y los cambios de modos que puedan ocurrir [3-6] [3-7] [3-8] [3-9] [3-10].

Como puntos importantes de esta metodología de estudio se destacan: la localización de fuentes de EA mediante un único sensor, la identificación de las características de la fuente y la posibilidad de inspecciones en grandes distancias y/o lugares inaccesibles para otros métodos. A continuación se presentan los pasos y las consideraciones necesarias para lograr la superposición de las curvas de dispersión teóricas sobre los diagramas TFE de las señales experimentales.

3.1.1 Superposición de Curvas de Dispersión sobre Diagramas TFE

Como se describe en el anexo A, las soluciones para la propagación de ondas en un medio cilíndrico hueco, isótropo, homogéneo e infinito se presentan comúnmente como una relación dispersiva entre la velocidad de grupo y el producto frecuencia - espesor del cilindro. Cabe recordar que la velocidad de grupo es con la que se propaga la energía de las ondas, parámetro que resulta de gran importancia para el presente estudio.

Por otro lado, a partir de una señal real, se calcula el diagrama TFE utilizando la transformada Wavelet (ver capítulo 1, análisis de señales). El diagrama TFE, presenta la energía de la señal en función del tiempo y la frecuencia. Una

representación de esta transformada se muestra en la figura 3.1, donde la energía (intensidad) corresponde al eje z ; aunque es común presentar estos diagramas en dos dimensiones (tiempo-frecuencia) e indicando a la energía con un código de colores como se muestra en la parte inferior de la misma figura.

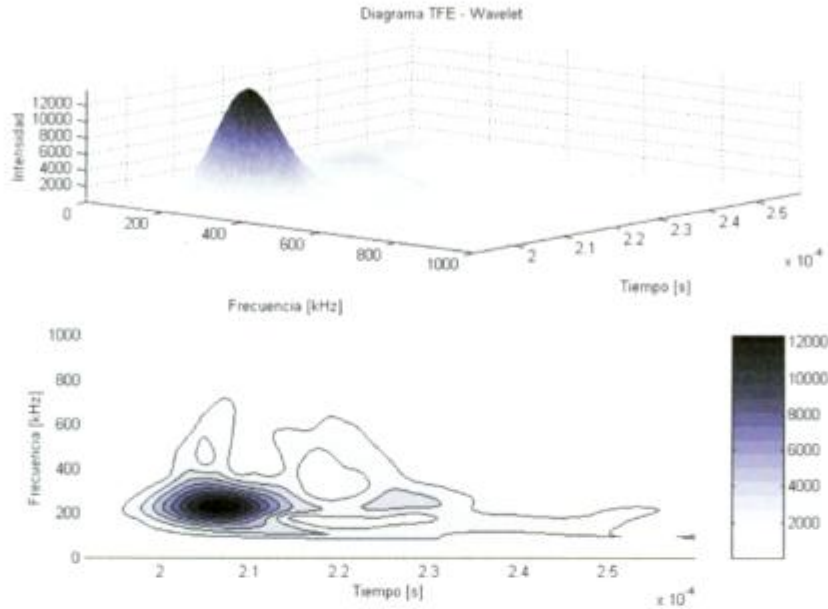


Figura 3.1 - Representación de diagramas TFE . Vista 3D (superior). Vista 2D con energía indicada por una escala de grises (inferior).

En las curvas de dispersión teóricas las dos variables que se presentan son velocidad de grupo y el producto frecuencia-espesor. Por otro lado, en los diagramas 2D TFE, las variables son tiempo y frecuencia. Para lograr una superposición de ambos diagramas se hace una modificación en la representación de las curvas de dispersión. Se cambia el eje de la velocidad de grupo por los correspondientes valores de tiempo de propagación.

La justificación de dicho procedimiento se basa en el conocimiento de la distancia que separa a la fuente de emisión del sensor. Además, suponiendo una propagación lineal entre fuente y sensor (ver más adelante) se calcula el tiempo de arribo con la ecuación siguiente:

$$v = e / t \tag{3.1}$$

donde v es la velocidad de propagación, e la distancia entre fuente y sensor y t el tiempo de propagación. Entonces, conociendo la velocidad de propagación v , dada por las curvas teóricas, y la distancia e que separa la fuente del sensor, se calcula el tiempo en que llegará la onda al sensor. Finalmente, el cambio de variables se realiza de acuerdo a la ecuación 3.1 como:

$$t = e / v \tag{3.2}$$

Como las curvas son dispersivas, existirá un rango de tiempos de arribos que variará con la distancia. En la figura 3.2 se muestra el proceso de cambio de variable en las curvas de dispersión para una distancia fuente sensor conocida (100 mm). La parte

"a" y "b" de la figura son idénticas, excepto una rotación de los ejes; en la parte c se muestra la forma de la curva en los ejes modificados (tiempo - frecuencia).

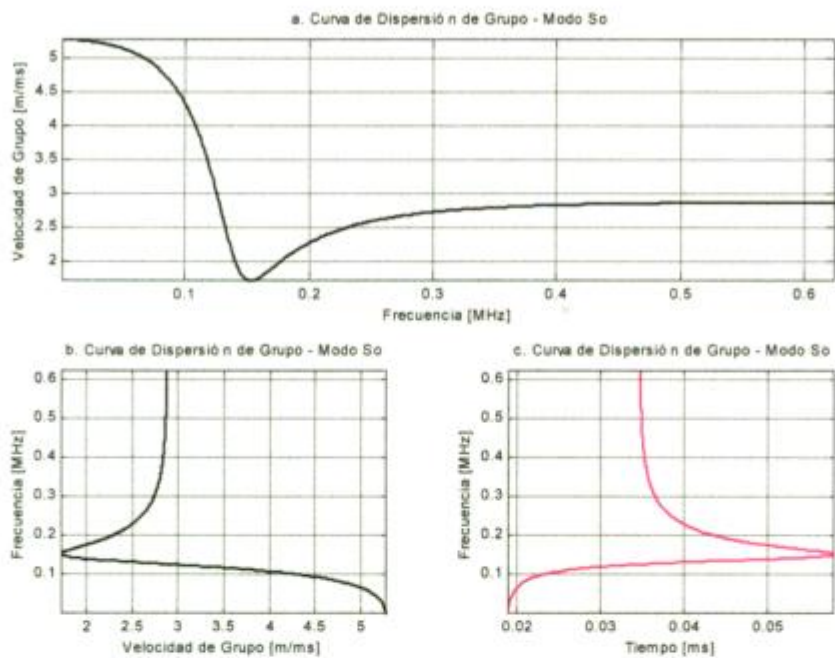


Figura 3.2 - Proceso de cambio de variables de los ejes. **a.**Curva de dispersión del modo S₀ en función de la velocidad de grupo y el producto frecuencia-espesor. **b.** Misma curva que en a. con los ejes ubicados en otra posición. **c.** Curva de dispersión del modo S₀ en función de las nuevas variables tiempo-frecuencia.

En la figura 3.3, se muestran para los modos S₀ y A₀ las curvas de dispersión para distintas distancias fuente-sensor. El mismo procedimiento se emplea para los otros modos. Nótese que a mayores distancias los efectos de la dispersión son más claros. Las distancias entre fuente y sensor utilizadas en el cálculo de esta figura corresponden a 1 m (negro), 3 m (azul) y 5 m (rojo) respectivamente.

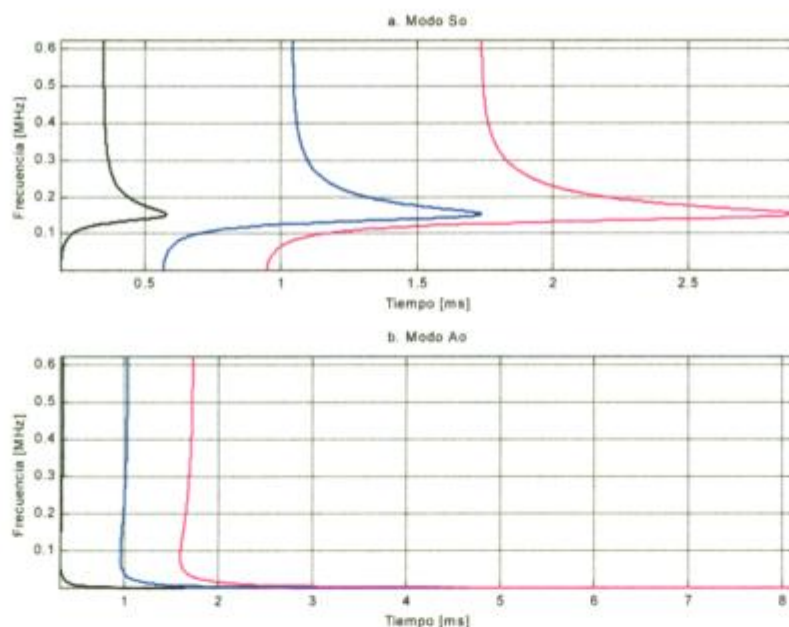


Figura 3.3 - a. Curvas de dispersión del modo S_0 para tres longitudes de caminos: 1m (negro), 3m (azul) y 5m (rojo). b. Curvas de dispersión del modo A_0 para las mismas longitudes que el modo S_0 .

Con el fin de presentar la metodología seguida en el resto del trabajo se expone un ejemplo de superposición de las curvas teóricas sobre el diagrama TFE para el caso del tubo I. La ubicación de la fuente y del sensor se muestran en la parte "a" de la figura 3.4, la fuente se indica con un símbolo '+' de color azul y el sensor con un símbolo 'o' de color rojo, la localización espacial se indica con tres coordenadas cartesianas (x,y,z). En el anexo B están las tablas que describen cada uno de los ensayos, este caso corresponde al ensayo N° 0 del Tubo I.

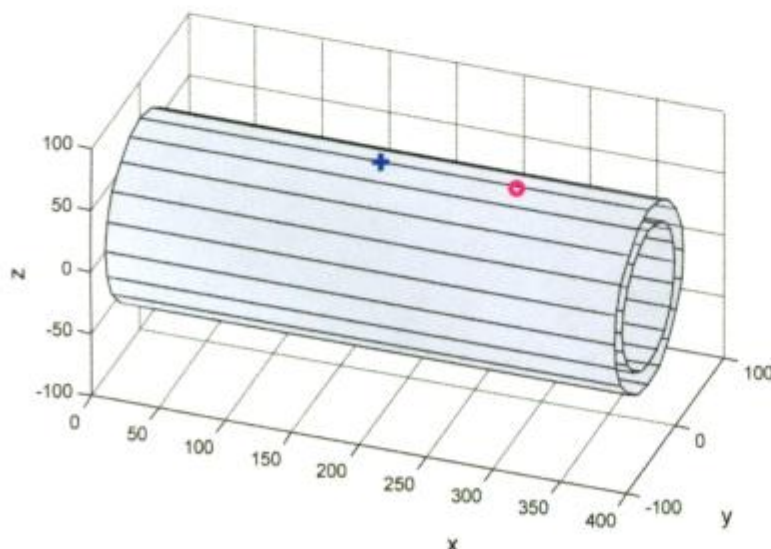


Figura 3.4 - Ubicación geométrica de la fuente (F +) y del sensor (S o) para el ensayo 1 del Tubo I.

Fuente (+) = (180, 0 , 70)

Sensor (o) = (280, 0 , 70)

Una vez definidas las ubicaciones de la fuente y del sensor, se simula la emisión acústica con una fuente Hsu-Nielsen sobre la superficie exterior del tubo. La señal sensada como se muestra en la figura 3.5.a se digitaliza con un retardo ("delay")

para poder definir claramente el inicio de la parte útil. A continuación, como en la figura 3.5.b, se determina el punto de inicio de la onda que corresponde efectivamente a la emisión acústica (círculo abierto color rojo). En este punto se podría calcular el diagrama TFE, pero no sería útil para la superposición de las curvas de dispersión porque se ignora el "tiempo de vuelo" de la onda desde la fuente al sensor.

Para considerar el tiempo de vuelo se utiliza la ecuación 3.2; tomando la velocidad del modo más rápido. Para este ejemplo, la velocidad corresponde al modo S_0 con un valor $v = 5275$ m/s, la distancia $e = 0,1$ m; por lo tanto el tiempo de vuelo es de $t = 19$ μ s. Este tiempo se resta del punto inicial de la señal ($\circ$ punto rojo) y se tiene un nuevo inicio marcado con una cruz azul '+' en la figura 3.5.b.

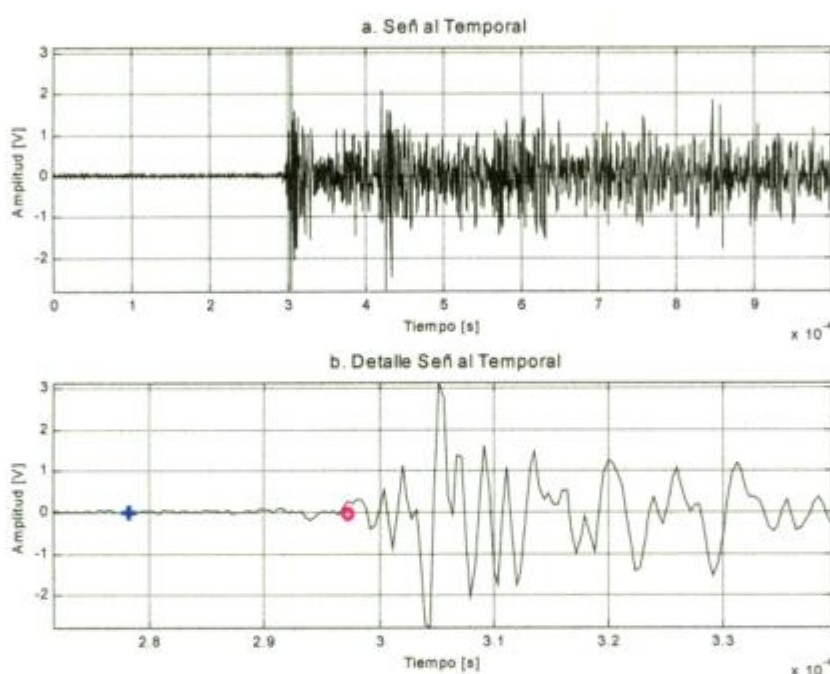


Figura 3.5 - a. Señal temporal digitalizada con un retardo de 10% del total. b. Detalle de la misma señal. $\circ$ inicio de la señal útil, + inicio con tiempo de vuelo

A la señal así definida se le calcula la transformada Wavelet y se obtiene el diagrama TFE como se muestra en la figura 3.6.a. En este diagrama se observa una gran cantidad de "manchas". La complejidad que muestra el diagrama en esta etapa se debe al alto grado de detalle con que se presenta la información. Para simplificar el "aspecto" y enfocarse en las partes de mayor energía; se aplica un umbral de intensidad para eliminar aquellos coeficientes de menor energía. La parte "b" de la figura 3.6 muestra el mismo diagrama que en la parte "a" pero con la aplicación de un umbral de intensidad de 25%.

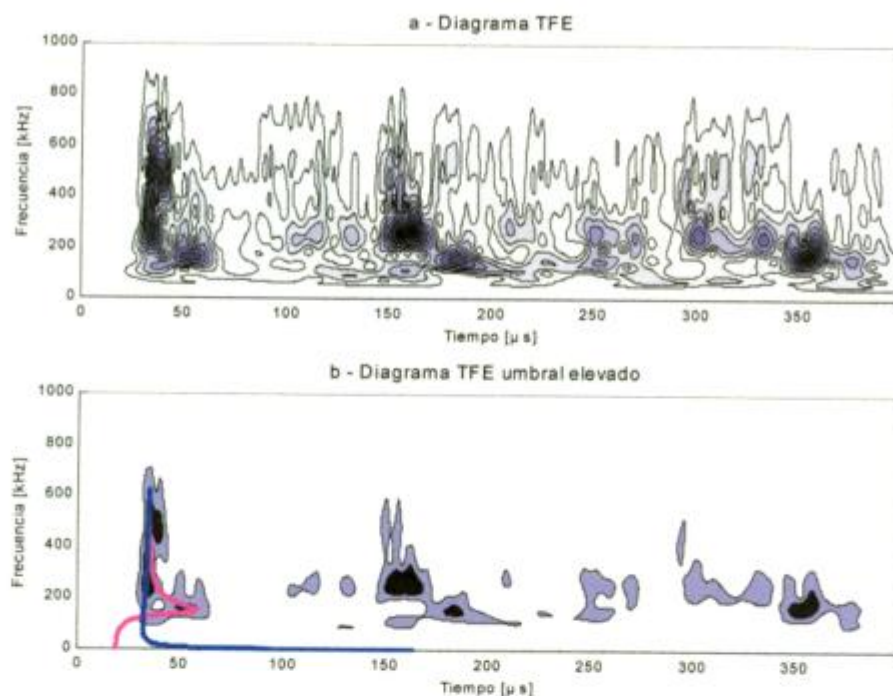


Figura 3.6 - a. Diagrama TFE calculado de partir de la señal 3.5.a **b.** Diagrama TFE calculado de partir de la señal 3.5.a con umbral de intensidad de 25 %. Superposición de dos modos para el primer arribo de la señal.

El último paso del proceso es la superposición de las curvas teóricas de dispersión sobre el diagrama TFE. Para este ejemplo, se muestra en la figura 3.6.b la superposición de dos curvas que corresponden a una distancia fuente-sensor de $e = 0,1$ m. Obsérvese que por debajo de los 100 kHz no existen coeficientes en el diagrama TFE, esto se debe a que el sensor (ver ANEXO C) debajo de esta frecuencia atenúa fuertemente las señales.

Hasta aquí se han utilizado los modos S_0 , A_0 , que corresponden a un cálculo para geometría plana, como si fueran análogos a los modos correspondientes a una geometría cilíndrica que es el caso en estudio. Los motivos y los alcances de esta aproximación se explican a continuación.

3.1.2 Aproximación de curvas de dispersión de placas a tubos

Las ecuaciones para el cálculo de las curvas de dispersión tanto para geometrías planas como cilíndricas están abundantemente detalladas en la literatura [1-6]. Las soluciones de dichas ecuaciones (trascendentales), se logran mediante métodos numéricos de iteración. En general se presentan dificultades para la convergencia, haciendo que el cálculo de las curvas no sea una cuestión trivial.

Está demostrado también, que las curvas para el caso plano se derivan como un caso particular de la geometría cilíndrica, cuando el radio es lo suficientemente grande (poca curvatura), siempre considerando el mismo espesor de pared.

Las mayores discrepancias entre las curvas para cilindros y placas se registran a bajas frecuencias, donde la longitud de onda es relativamente grande. En cambio, a

altas frecuencias, con longitudes de onda corta, el efecto de la curvatura se vuelve menos significativo dado que la onda "ve" una zona más reducida. Una regla práctica [3-11], establece una relación para la frecuencia mínima a la cual se pueden considerar equivalentes las curvas calculadas para placas como si fueran cilindros, esto es:

$$f_{\min} = \frac{v_l}{r_{\text{int}}} \quad (3.3)$$

dónde $f_{\min}$ es la frecuencia mínima antes mencionada expresada en MHz, v_l la velocidad de una onda longitudinal en el material expresada en mm/ μ s y r_{int} el radio interno del cilindro expresado en mm. En la tabla 2.1 se calculan las frecuencias mínimas según la ecuación 3.3 para los tubos ensayados en este trabajo.

En la figura 3.7 se muestra, la superposición de las curvas calculadas para placas sobre las correspondientes a tubos del mismo espesor. Los datos son los que corresponden al tubo I (ver tabla 2.1).

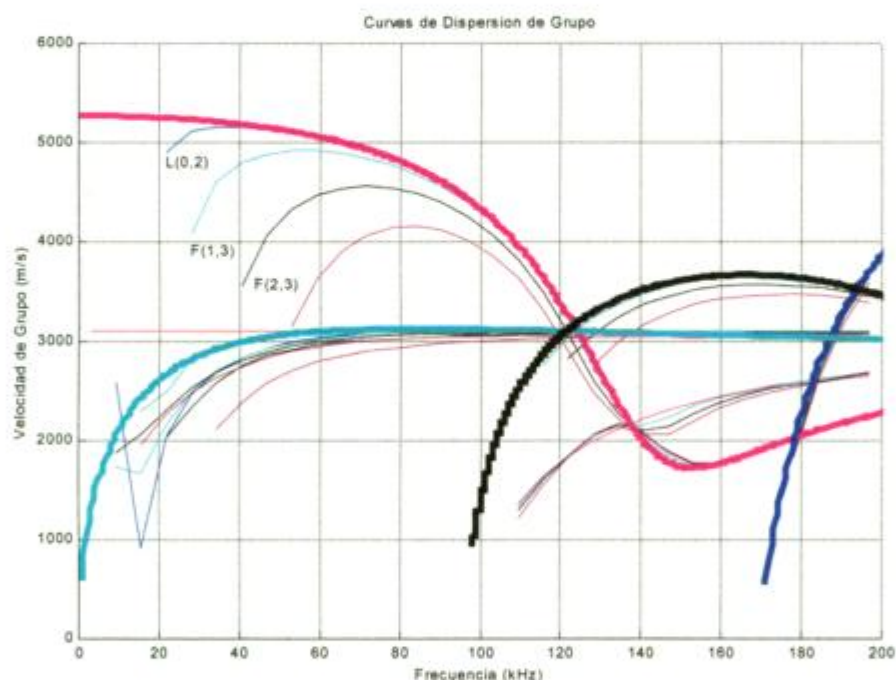


Figura 3.7 - Superposición de las curvas para placas sobre las curvas para tubos del mismo espesor. Las curvas de placas están graficadas con un mayor espesor.

La línea roja en la figura 3.7 indica la frecuencia calculada según la ecuación 3.3, a partir de donde se puede considerar válida la aproximación de las curvas de placas a tubos. Es importante destacar, que cada modo de placa se superpone sobre un conjunto de modos de tubos. Es decir, por cada modo correspondiente a una placa, quedan incluidos varios modos longitudinales, flexurales y torsoniales de los tubos (Ver Anexo A). Por consiguiente, la interpretación física de las curvas debe hacerse cuidadosamente ya que la representación por medio de las curvas para geometrías planas es una simplificación.

De la figura 3.7 se desprende también que el buen ajuste entre las curvas a frecuencias inferiores a la mínima (línea roja 110 kHz), ocurre solamente para los modos longitudinales, es decir para aquellos que se propagan a lo largo del eje del cilindro. En cambio, para los modos flexurales, que no se propagan en sentido axial, el efecto de la curvatura influye más fuertemente y es lo que se manifiesta en la discrepancia entre las curvas.

En la superposición de las curvas de dispersión se utilizan los modos de menor orden, los que quedan contenidos en el A_0 y el S_0 , por ser los que transportan la mayor parte de la energía de la onda como se verá más adelante.

3.1.3 Trayectorias de Propagación

Para la correcta superposición de las curvas de dispersión en los diagramas TFE es necesario conocer con precisión cuál o cuáles fueron las trayectorias que siguió una onda hasta arribar a la posición del sensor.

En primer lugar, se hacen algunas suposiciones y simplificaciones para los procesos de propagación. Se supone que la fuente es puntual y que emite en todas las direcciones con la misma intensidad, considerando que el material es isótropo y homogéneo. Se consideran además, a las condiciones de contorno de los tubos como lugares donde las ondas pueden reflejarse de acuerdo a lo explicado en el Capítulo 1 respecto a la propagación de ondas. En estas interacciones de las ondas no se consideran cambios en los modos de propagación.

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores y la geometría cilíndrica involucrada en los ensayos, se proponen trayectorias rectas y helicoidales para los caminos de propagación, como se muestra en la figura 3.8. Esta distinción entre rectas y hélices es arbitraria, ya que en última instancia son todas trayectorias rectas. Basta considerar al tubo desdoblado en forma de placa para observar que la trayectoria helicoidal es una trayectoria recta entre los puntos considerados.

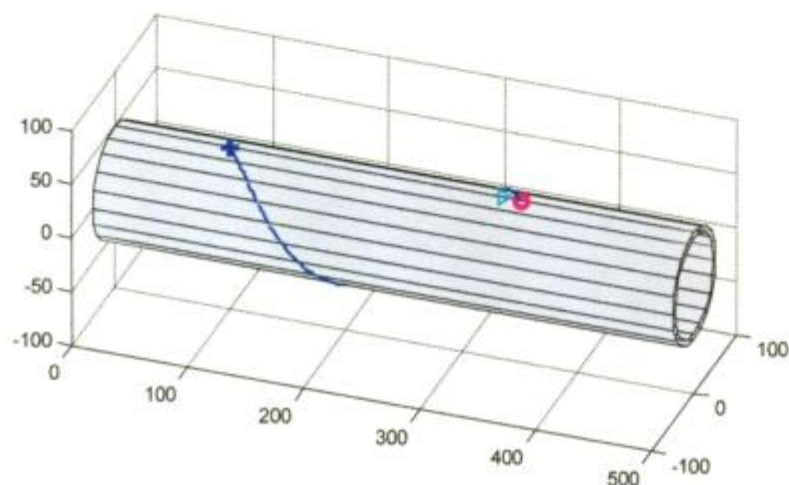


Figura 3.8 -
Trayectorias según
un camino recto
(verde) y uno
helicoidal de un
paso (azul).

Fuente (+)
Sensor (O)

Un ejemplo de un tubo desdoblado mostrando este efecto está en la figura 3.9. La distinción entre rectas y hélices se mantendrá a los efectos de claridad y nomenclatura en los ensayos. Se utilizarán las trayectorias rectas en aquellos casos en que la fuente y el sensor se encuentren sobre una misma línea axial. En cambio, cuando exista un ángulo entre ellos se las denominará trayectorias helicoidales.

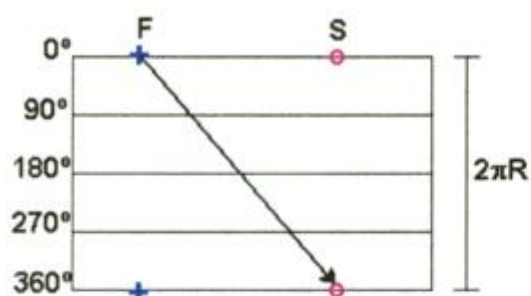


Figura 3.9 – Esquema de un tubo desdoblado, mostrando la forma de una trayectoria helicoidal de un solo paso. F: Fuente. S: Sensor.

Dentro de las denominadas trayectorias helicoidales, se hace una distinción según el paso de la hélice. La figura 3.10 muestra hélices de 1, 2 y 3 pasos respectivamente. En el caso particular en donde el paso es nulo, la hélice se transforma en una circunferencia.



Hélice 1 Paso



Hélice de 2 Pasos



Hélice de 3 Pasos

Figura 3.10 – Trayectorias helicoidales con diferentes número de pasos

Otro aspecto a considerar es el caso en que no existe simetría angular en la longitud de los caminos entre la fuente y el sensor. En este caso existen hélices que viajan en sentidos opuestos con diferentes caminos recorridos. Se denominará a cada sentido arbitrariamente como positivo (camino más corto) y negativo (camino más largo) , esto se ejemplifica en la figura 3.11.



Figura 3.11 - Trayectorias helicoidales en dos sentidos opuestos. Arbitrariamente el camino más corto se lo define como positivo (color rojo); la trayectoria más larga es la negativa (color azul)

Fuente (+) : [200,-50,0]

Sensor (O) : [400,0,50]

Tubo: 500 mm longitud
50 mm diámetro
5 mm espesor

Cuando una onda llega a un borde o interactúa con alguna discontinuidad, como un cordón de soldadura, ocurren reflexiones. Las trayectoria final se calcula sumando el recorrido total hasta llegar al sensor, incluyendo las posibles reflexiones ocurridas.

El cálculo de las trayectorias se realiza mediante un algoritmo que tiene en cuenta la geometría del tubo y las posiciones fuente-sensor. De acuerdo con estos datos, se calcula la longitud de las trayectorias posibles y se tabulan los resultados para ordenar la información. En la Tabla 3.1 se listan las trayectorias que corresponden a la disposición de ensayo mostrada en la figura 3.11.

Helicoidales

	+			-		
	1	2	3	1	2	3
Directo	215	441	735	309	585	887
Pared 1	408	561	812	464	680	952
Pared 2	605	717	927	645	814	1052

Tabla 3.1 - Cálculo de las longitudes en mm para las trayectorias del ejemplo de la Figura 3.11.

En la tabla se indica por "Directo" a un camino que no incluye reflexiones, es decir, trayectorias helicoidales de un paso o más, pero sin considerar reflexiones. El número de pasos se indica en la parte superior de la tabla (1,2,3 ...). Por "Pared 1" y "Pared 2" se indican las trayectorias que incluyen reflexiones en dichas paredes; por convención se define a la pared 1 como la más alejada del origen de coordenadas.

3.1.4 Efectos del Tipo de Fuente

Como se demuestra con las curvas de dispersión para placas planas o tubos, la geometría define los modos de propagación posibles. Sin embargo, la posibilidad de su existencia, no garantiza que efectivamente estén presentes. Además, en el caso de existir, tampoco está garantizada una distribución homogénea de la energía en todas las frecuencias. Las características de la fuente, en condiciones ideales, determina los modos y las frecuencias a las que la energía es transportada. Es decir, que la fuente tanto como la geometría definen a cada ensayo.

Existen trabajos previos [3-12] que muestran las características de distintas fuentes en un plano tiempo-frecuencia mediante la superposición de curvas de dispersión. En la figura 3.12 se muestran las características de diferentes fuentes y los correspondientes diagramas TFE. Las señales temporales son simulaciones numéricas para una placa de aluminio de 4,7 mm según se explica en Hamstad [3-12].

En la figura se observa que dependiendo del tipo de fuente varían los modos teóricos que se ajustan en el diagrama. A su vez, para cada modo, la energía es transportada en diferentes regiones de frecuencia y no necesariamente se reparte en forma uniforme sobre la curva.

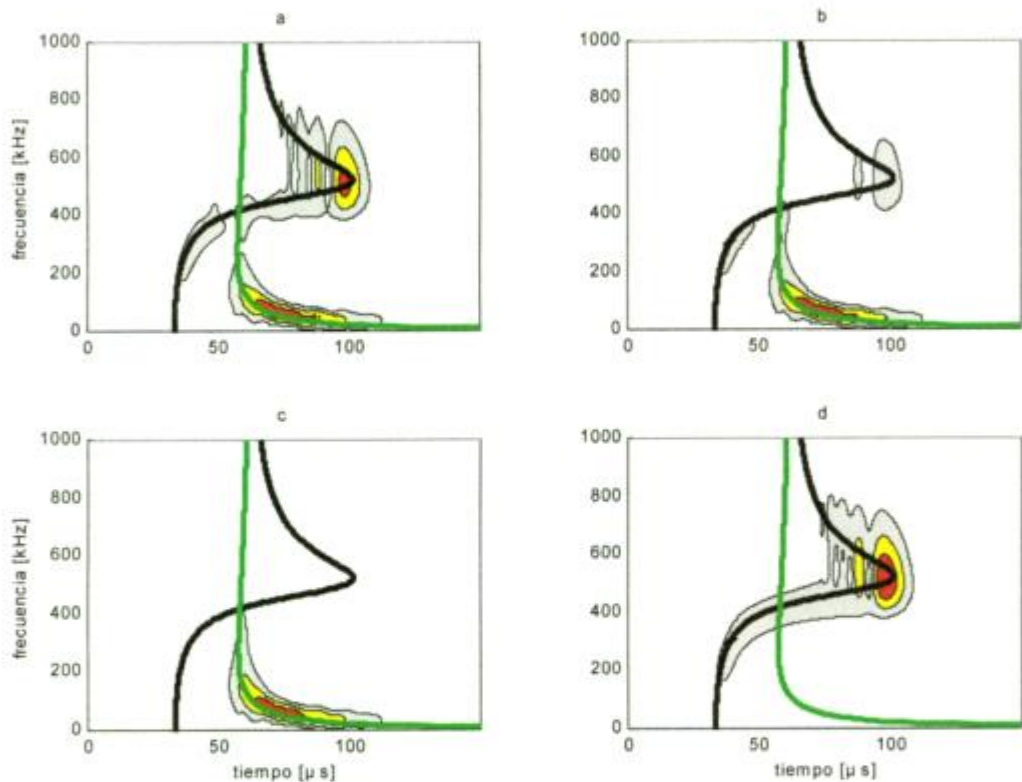


Figura 3.12 - Superposición de Modos A_0 (verde) y S_0 (negro) para una distancia fuente-sensor de 180 mm en una placa de aluminio de 4,7 mm de espesor. **a.** Fuente ubicada en un plano. **b.** Microfisura. **c.** Fuente dipolo ubicada 10% debajo de la superficie. **d.** Fuente dipolo ubicada 50% debajo de la superficie. Todas las señales fueron tomadas del paquete Agu-Vallen Wavelet [3-3]

La figura 3.13 muestra los diagramas TFE con señales correspondientes a este trabajo, utilizando como fuentes una mina de lápiz en la parte "a" y en la parte "b" una varilla de baquelita (ensayo por impacto) para un mismo tipo de ensayo. En esta figura se verifica que la morfología de los diagramas depende fuertemente de la fuente.

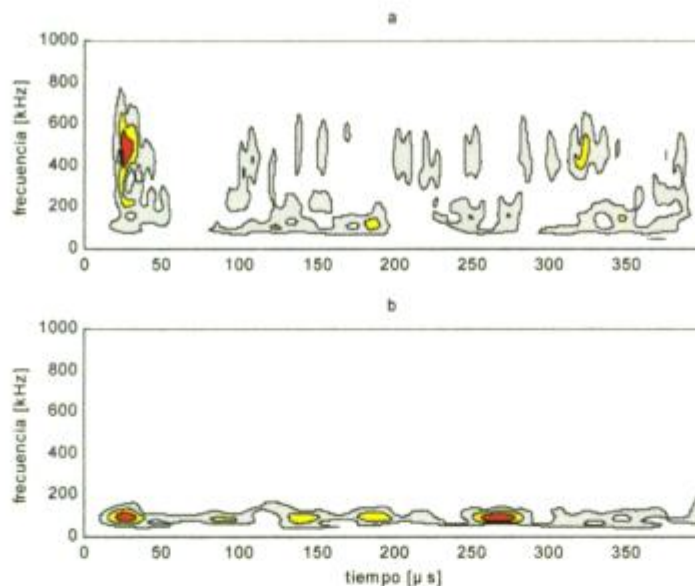


Figura 3.13 - Diagramas TFE para el mismo ensayo con fuentes distintas. **a.** Fuente Hsu-Nielsen **b.** Fuente Varilla de Baquelita (ensayo por impacto). Las escalas de colores son independientes para cada diagrama.

En este trabajo se utiliza la fuente tipo Hsu-Nielsen por las ventajas ya mencionadas (ver capítulo 2, instrumentación). Sin embargo, presenta un punto negativo importante y es la poca repetibilidad en la intensidad de la emisión. La energía que se inyecta al sistema depende fuertemente de la habilidad del operador, no como en otros casos donde la señal es controlada electrónicamente. Estos efectos resultan en una amplia distribución de intensidades. En algunas situaciones esto no es importante pero se pierde información cuantitativa sobre el ensayo. Un cálculo de la variabilidad de la fuente para un ensayo particular se muestra en el Ensayo 5 del Tubo II. (Ver 3.1.13)

3.1.5 Efectos del Sensor

Es ampliamente conocido que la presencia del sensor introduce una importante fuente de distorsión en la onda que registra. Además, al ser un dispositivo físico real, posee dimensiones finitas donde la energía es promediada en toda el área y puede que ocurran interferencias; modificando la situación ideal de localización puntual.

Otro efecto conocido de distorsión son las resonancias que ocurren dentro del volumen del sensor. Este efecto se disminuye con la utilización de sensores de banda ancha que tienen una respuesta plana en frecuencias en el rango de trabajo. No obstante, la respuesta real no es perfectamente plana y ocurren zonas de resonancias relativas.

3.1.6 Tubo I - Ensayo 1

Esta configuración de ensayo corresponde a los datos listados en la tabla TI del anexo B para el tubo I, en la entrada 0 de dicha tabla. La ubicación de la fuente y del sensor sobre la superficie del tubo se muestra en forma esquemática en la figura 3.12. La fuente se representa con un símbolo '+' y el sensor con un símbolo 'o'.

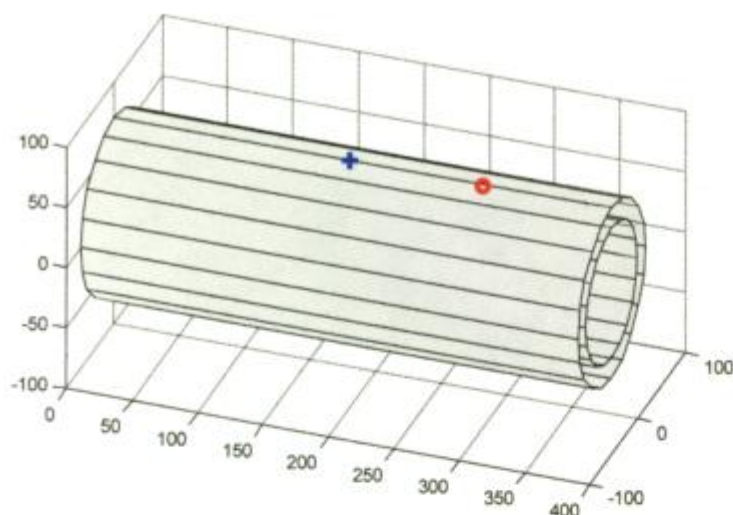


Figura 3.12 – Esquema del Ensayo 1 del Tubo I

Posición de Fuente + [mm]
 $(x,y,z) = (180,0,70)$

Posición del Sensor o [mm]
 $(x,y,z) = (280,0,70)$

De acuerdo al criterio establecido para los posibles caminos de propagación se listan en la tabla 3.2 las longitudes calculadas teóricamente que se usaran en la superposición de las curvas de dispersión.

Helicoidales

	+			-		
	1	2	3	1	2	3
Directo	451	885	1323	451	885	1323
Pared 1	532	929	1353	532	929	1353
Pared 2	636	993	1397	636	993	1397

Rectas

100	300	460	660	860	1060
-----	-----	-----	-----	-----	------

Tabla 3.2 – Trayectorias calculadas para el Ensayo 1 del Tubo I, expresadas en mm

El diagrama TFE de este ensayo se muestra en la figura 3.13. Para el cálculo se utilizaron los primeros 2000 puntos de las muestras temporales que equivalen a 800 μ s. Considerando la máxima velocidad de propagación de las curvas de dispersión para este espesor (5275 m/s), el diagrama es equivalente también, a 4,2 m de longitud de propagación. Como ya se explicó, la longitud de propagación puede incluir reflexiones en los extremos del tubo.

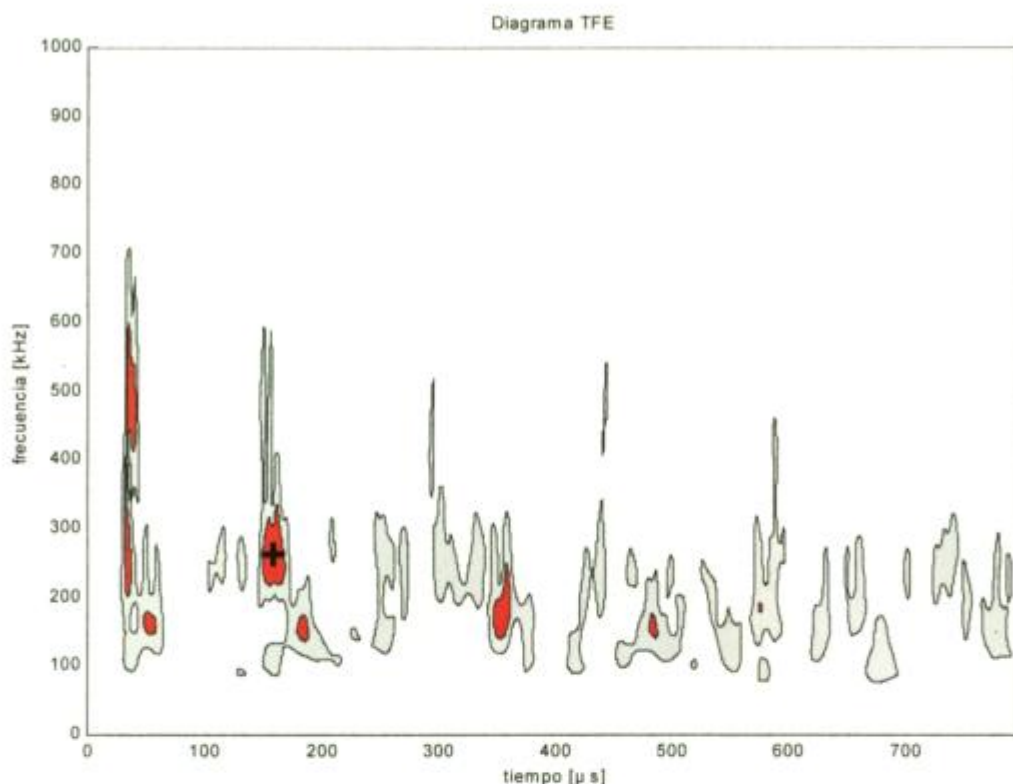


Figura 3.13 - Diagrama TFE del Ensayo 1 del Tubo I - 800 μ s

La inspección general del diagrama revela una atenuación en intensidad y en componentes de alta frecuencia a medida que el tiempo de propagación se incrementa. La máxima intensidad se registra en un tiempo diferente del primer arribo de la señal; este punto se indica en el diagrama de la figura 3.13 con un símbolo '+'. Como se verá, esto se debe a una superposición de varios caminos que convergen en ese tiempo.

Debe tenerse en cuenta que el tubo es comparativamente más corto que las trayectorias estudiadas, lo que asegura la existencia de varias reflexiones en los extremos.

En primer lugar, se superponen las curvas de dispersión para aquellos caminos que no incluyen reflexiones, esto se muestra en la figura 3.14. Los modos se denominarán S_0 (negro) y A_0 (verde), en analogía a las curvas de dispersión de placas, pero recordando que no representan el mismo comportamiento físico (ver inciso 3.1.2).

De las longitudes de las trayectorias de propagación listadas en la tabla 3.2, se utilizan en este caso: 100 mm (trayectoria recta) y 451 mm, 885 mm y 1323 mm (trayectorias helicoidales). Las mismas longitudes se repiten para los dos sentidos de propagación dada la configuración simétrica del ensayo.

Sobre las curvas superpuestas se indican con el símbolo '+' aquellos lugares que forman un patrón repetido en el tiempo, son zonas del diagrama donde se presenta alta intensidad. La mayor coincidencia entre las curvas y el diagrama se obtiene para

los primeros arribos de las ondas, debido a que todavía no existe interferencia entre las trayectorias. A medida que se analizan tiempos mayores de propagación, las coincidencias entre las curvas teóricas y el diagrama son más difíciles de evaluar tanto por la atenuación de las intensidades como por la superposición de varios modos. Este es un punto importante en la determinación de las características de la fuente emisora, en el primer arribo se asegura que la energía proviene estrictamente de la fuente sin los efectos antes mencionados de superposición e interferencia.

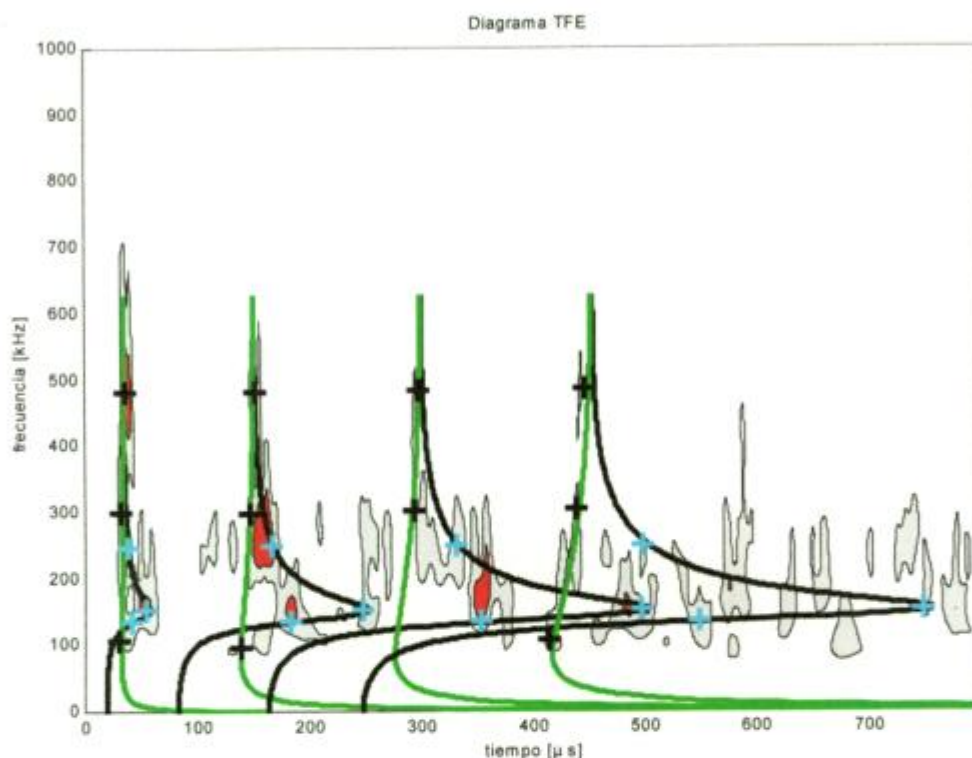


Figura 3.14 - Diagrama TFE del Ensayo 1 del Tubo I - Caminos Helicoidales

Las trayectorias con reflexiones en los extremos del tubo son utilizadas en las figuras 3.15 y 3.16. En la figura 3.15 se muestran aquellas trayectorias formadas por reflexiones de caminos rectos (300, 460, 660 y 860 mm); y en la figura 3.16 las reflexiones debidas a trayectorias helicoidales (532, 636, 929, 993 mm). Allí se muestra la coincidencia de la superposición en áreas del diagrama que con los otros caminos no podían ser explicadas. Se destaca que el contenido de energía de estos modos reflejados es mucho menor que los que se propagan sin reflexión. También se muestra la superposición en zonas de alta intensidad donde ya existían otros modos, siendo esta suma de modos el origen de la ubicación del máximo del diagrama.

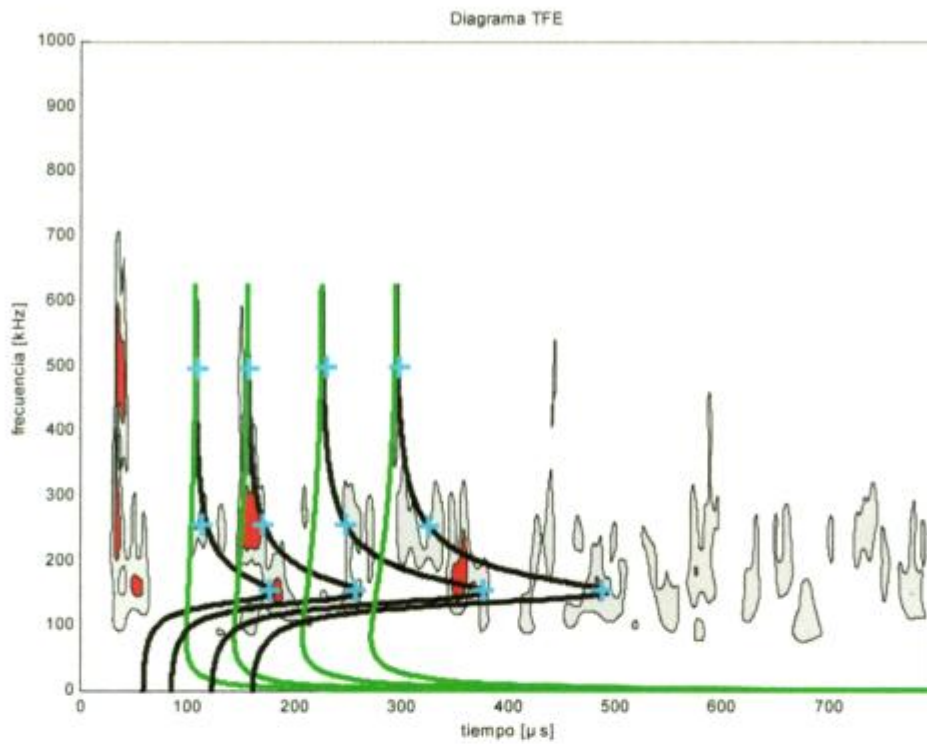


Figura 3.15 – Diagrama TFE del Ensayo 1 del Tubo I - Caminos rectos con reflexiones

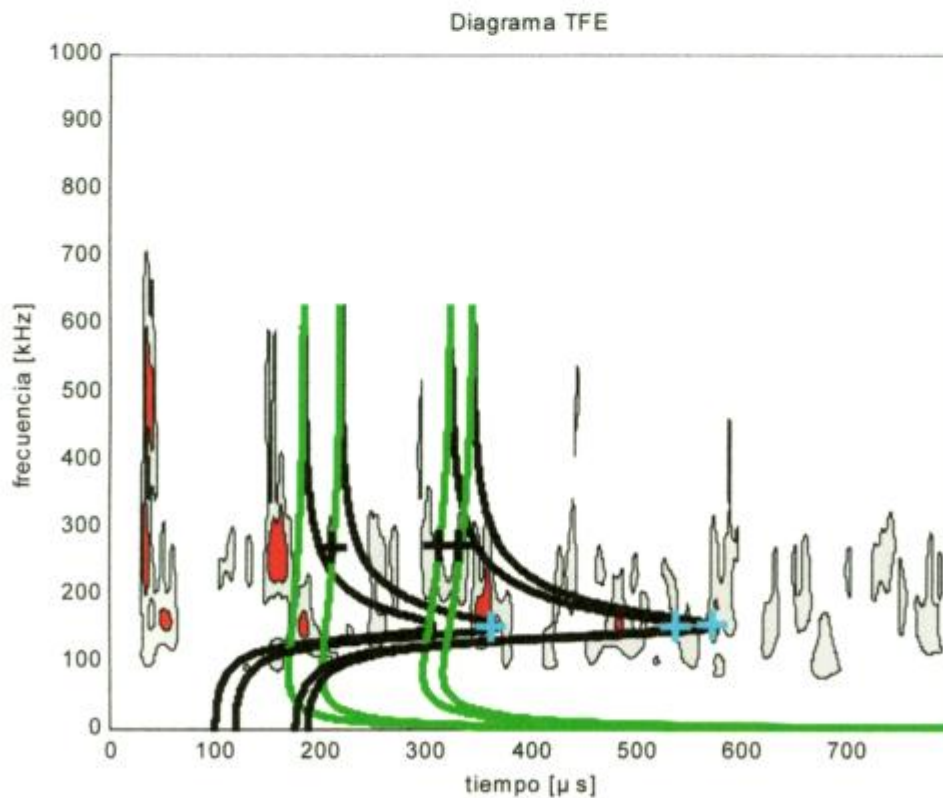


Figura 3.16 - Diagrama TFE del Ensayo 1 del Tubo I - Caminos helicoidales con reflexiones

Otro aspecto importante para la interpretación de los diagramas es recordar las características de resolución de la transformada Wavelet. Para altas frecuencias, la localización temporal, que implica en este caso localización espacial de la fuente, es mucho más precisa que a bajas frecuencias. En estos ensayos, la resolución para el arribo de los primeros modos a baja frecuencia (100 kHz) es de aproximadamente 20 μ s. Considerando la máxima velocidad de propagación (5275 m/s), la mínima diferencia de caminos que debería haber para poder distinguir dos eventos sería de aproximadamente 10 cm. En cambio, si se considera la resolución a alta frecuencia (800 kHz), se obtiene un valor de resolución temporal entre 1 y 2 μ s, que traducidos a diferencia de caminos es de aproximadamente 1 cm. Entonces, según la ubicación del sensor y las fuentes, es posible localizar fuentes desde lugares alejados con una resolución espacial de 1cm con la ventaja adicional de poder caracterizar el tipo de fuente emisora.

3.1.7 Tubo I - Ensayo 2

En este caso, los datos corresponden a la entrada 4 de la tabla TI del anexo B. La disposición geométrica sobre el tubo es como se muestra en la figura 3.17, tanto la fuente como el sensor están ubicados sobre una misma circunferencia del tubo.

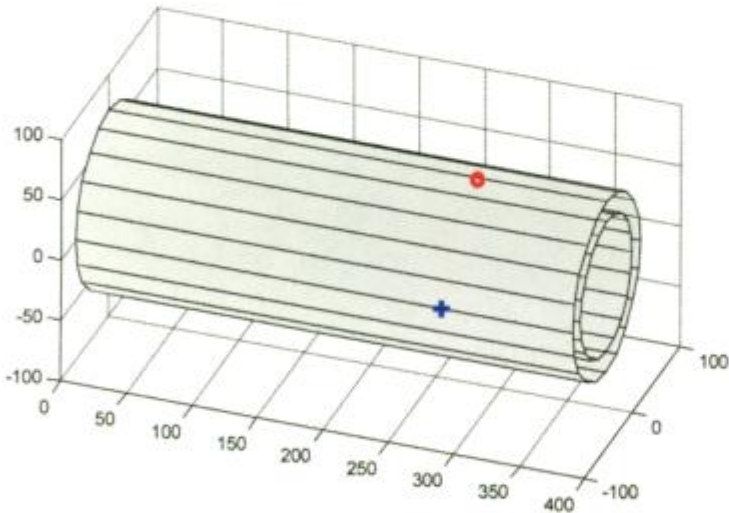


Figura 3.17 - Esquema del Ensayo 2 del Tubo I

Posición de Fuente + [mm]
(x,y,z) = (280,-70,0)

Posición del Sensor o [mm]
(x,y,z) = (280,0,70)

Los caminos calculados se resumen en la tabla 3.3, donde solo se listan las trayectorias helicoidales, dado que en este caso no es necesaria la distinción entre trayectorias rectas y las helicoidales.

Helicoidales

	+			-		
	1	2	3	1	2	3
Directo	110	550	990	330	770	1210
Pared 1	228	585	1010	386	795	1226
Pared 2	571	785	1137	650	952	1333

Tabla 3.3 - Trayectorias calculadas para el Ensayo 2 del Tubo I, expresadas en mm

El diagrama TFE se calculó con 1000 puntos de la señal temporal, correspondiendo a 400 μ s en la escala del gráfico mostrado en la figura 3.18.

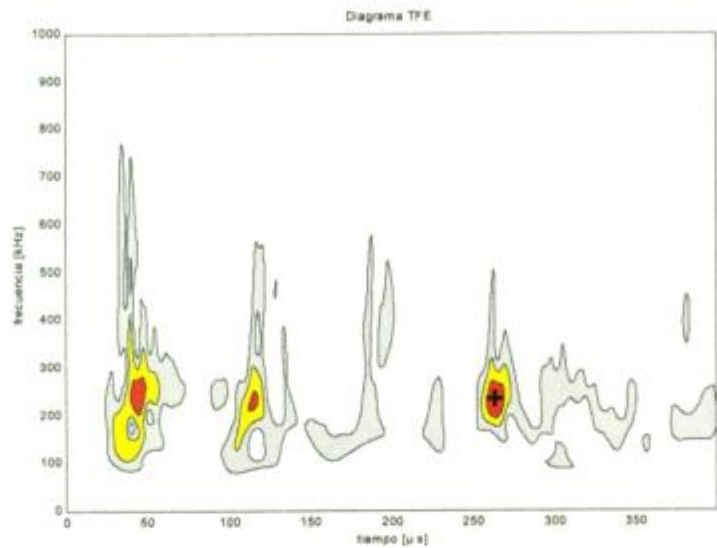


Figura 3.18 - Diagrama TFE del Ensayo 2 del Tubo I - 400 μ s

El aspecto general del diagrama es similar al del Ensayo 1; tanto la intensidad como las componentes de alta frecuencia decrecen con el tiempo. También, la localización del máximo de toda la señal se registra a un tiempo en el que coinciden varias trayectorias. El punto máximo está indicado en el diagrama con el símbolo '+'.

Para lograr mayor claridad, se superponen en este caso los distintos modos en diagramas separados. En la figura 3.19 se muestra la superposición de las curvas correspondientes a las trayectorias helicoidales solamente (110, 330, 550 y 770 mm). Estas trayectorias corresponden a propagaciones en el sentido circunferencial del tubo. Dada la ubicación fuente-sensor, los caminos corresponden a 1/4 del perímetro, 3/4 del perímetro y así sucesivamente. Se observa un alto grado de concordancia en la superposición, aunque quedan zonas del diagrama que no pueden ser explicadas completamente con estas trayectorias .

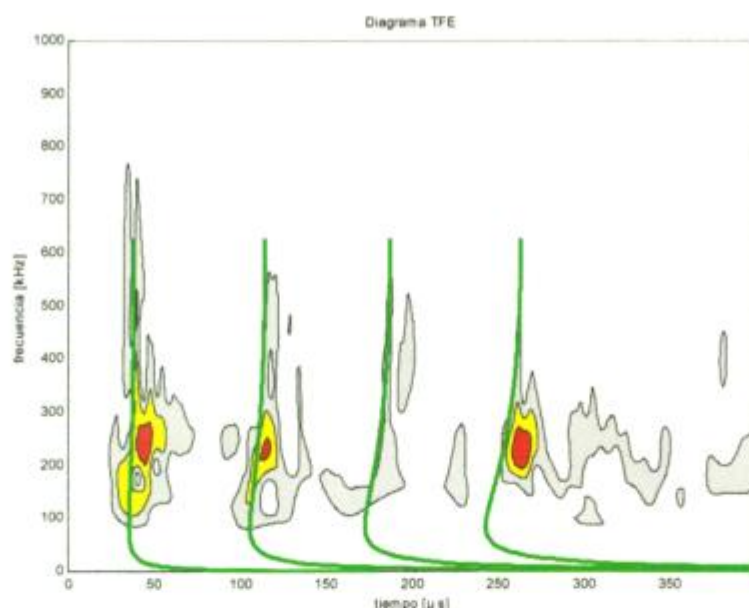


Figura 3.19 - Diagrama TFE del Ensayo 2 del Tubo I - Modo A_0 trayectorias helicoidales

Considerando las trayectorias que incluyen reflexiones en los extremos como muestra la figura 3.20, se explican las zonas restantes del diagrama. Las nuevas trayectorias se ubican en el diagrama (color azul) junto a las curvas antes superpuestas. Se verifica que en la zona de mayor intensidad del diagrama coinciden varias trayectorias como ocurría en el Ensayo 1.

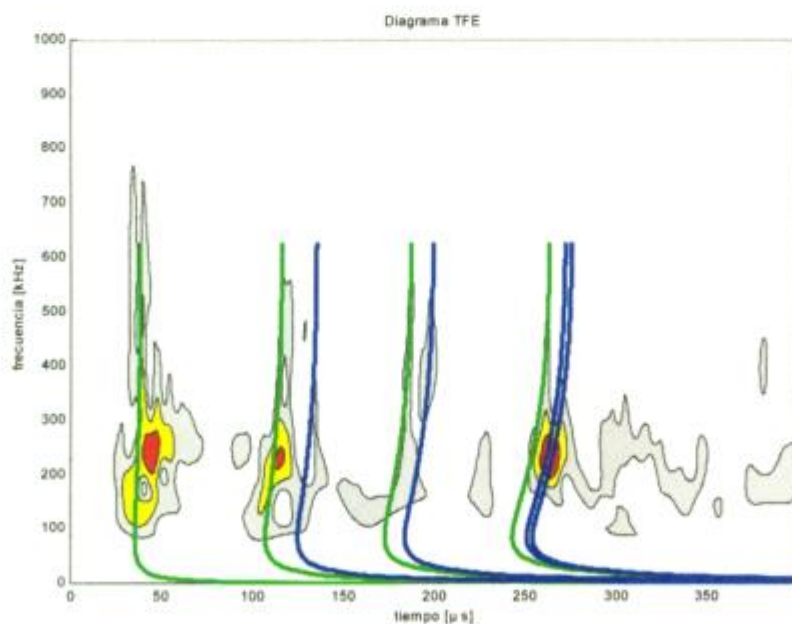


Figura 3.20 - Diagrama TFE del Ensayo 2 del Tubo I - Modo A_0 trayectorias con reflexiones (azul)

La superposición del otro modo (S_0), se presenta en la figura 3.21 para las trayectorias helicoidales y en la figura 3.22 para las trayectorias que incluyen reflexiones. Las zonas de coincidencia para cada tipo de trayectorias son complementarias y en conjunto permiten explicar toda la estructura TFE.

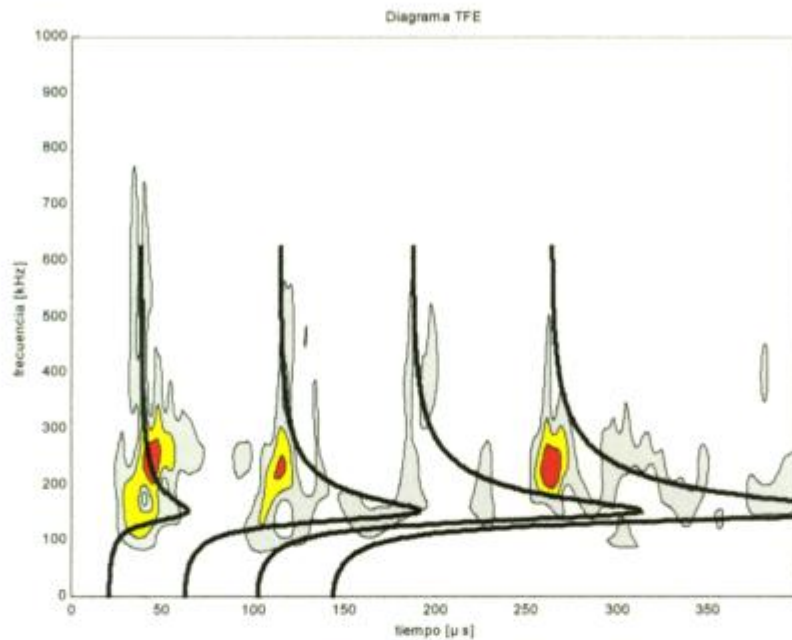


Figura 3.21 - Diagrama TFE del Ensayo 2 del Tubo I - Modo S_0 trayectorias helicoidales

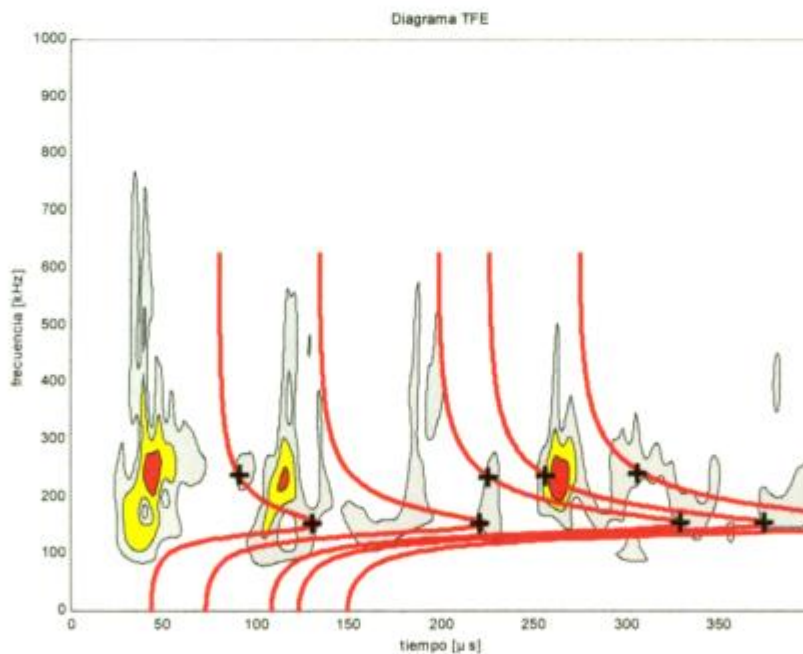


Figura 3.22 - Diagrama TFE del Ensayo 2 del Tubo I - Modo S_0 trayectorias con reflexiones

3.1.8 Tubo I - Ensayo 3

La disposición geométrica del ensayo se muestra en la figura 3.23 y los datos corresponden a la entrada 6 de la tabla TI del anexo B. Las trayectorias de propagación se listan en la tabla 3.4.

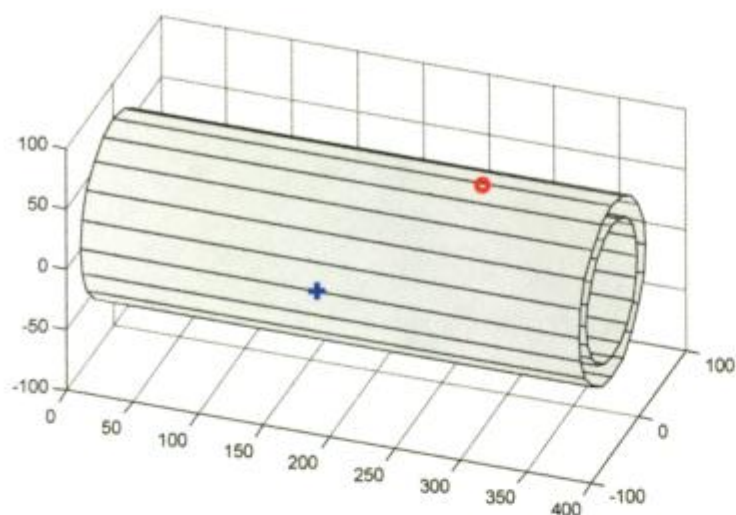


Figura 3.23 - Esquema del Ensayo 3 del Tubo I

Posición de Fuente + [mm]
(x,y,z) = (180,-70,0)

Posición del Sensor o [mm]
(x,y,z) = (280,0,70)

Helicoidales

	+			-		
	1	2	3	1	2	3
Directo	149	559	995	345	776	1214
Pared 1	320	626	1034	446	826	1246
Pared 2	473	717	1091	566	897	1294

Tabla 3.4 - Trayectorias calculadas para el Ensayo 3 del Tubo I, expresadas en mm

El diagrama TFE de este ensayo se muestra en la figura 3.24 y corresponde a los primeros 1000 puntos de la señal temporal. La máxima intensidad del diagrama se indica en la figura con el símbolo (+).

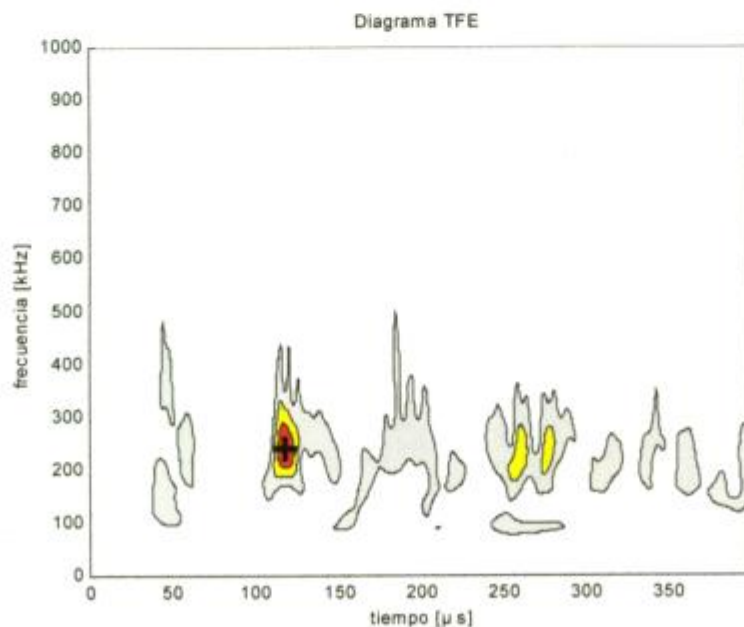


Figura 3.24 - Diagrama TFE del Ensayo 3 del Tubo I

También en este ensayo, el máximo del diagrama ocurre en una posición diferente al primer tiempo de arribo, y la energía de los modos está distribuida en un rango de frecuencias acotado. La superposición de los modos A_0 y S_0 para las trayectorias helicoidales únicamente son mostradas en la figura 3.25. Resulta claro del diagrama el buen ajuste logrado utilizando las trayectorias teóricas calculadas, especialmente a menores tiempos, donde los efectos de la dispersión no son tan notorios.

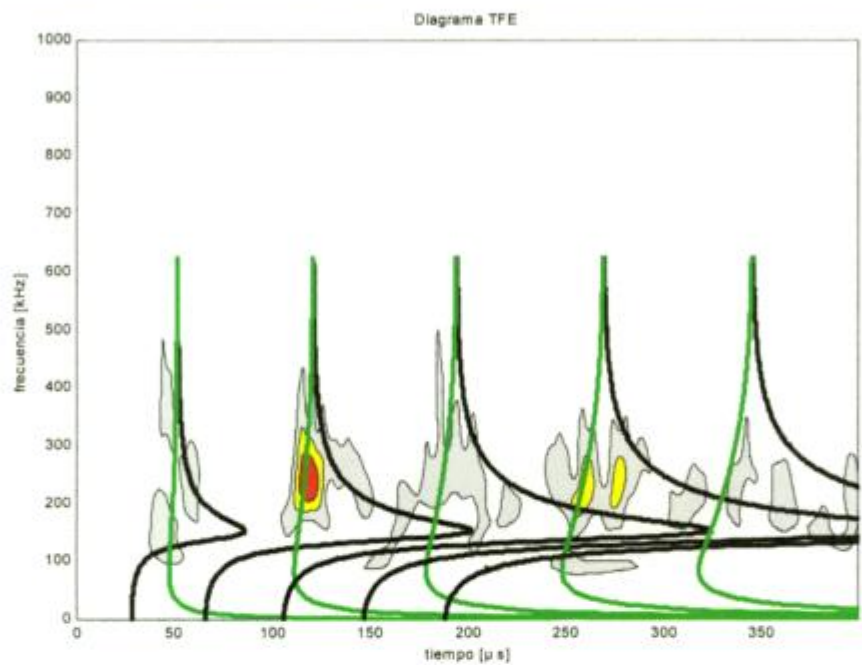


Figura 3.25 - Diagrama TFE del Ensayo 3 del Tubo I - Trayectorias Helicoidales
149, 345, 559, 776, 995 mm

Las otras zonas del diagrama que no responden a la superposición de alguna de las trayectorias helicoidales, se analizan considerando trayectorias con reflexiones. Estas se muestran en la figura 3.26, en forma complementaria al diagrama anterior. Para mostrar en la figura se eligieron aquellos caminos que aportaran mayor claridad, aunque la totalidad de los caminos calculados presentan un buen ajuste.

El máximo de intensidad resulta como en los casos anteriores de la concurrencia de los modos por distintos caminos a un intervalo de tiempo muy próximo. En el caso de las trayectorias helicoidales el camino es de 345 mm y en el caso con reflexiones es de 320 mm.

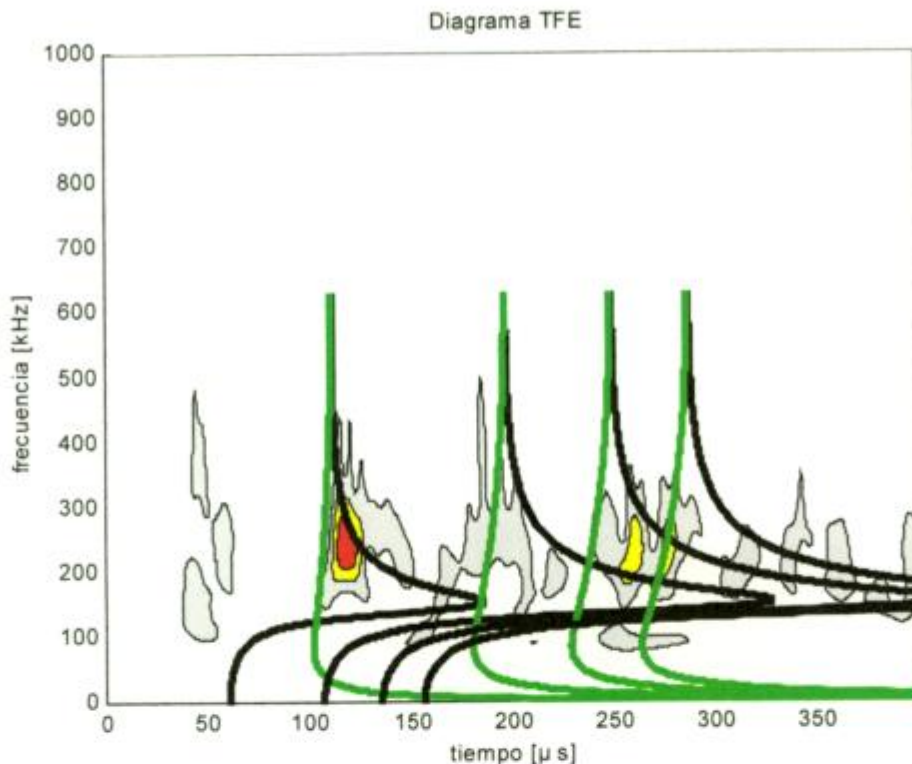


Figura 3.26 - Diagrama TFE del Ensayo 3 del Tubo I - Trayectorias con reflexiones 320, 566, 717, 826 mm

En resumen: se observó para el tubo I, un buen ajuste entre las curvas teóricas de dispersión sobre los diagramas TFE, especialmente en el arribo de los primeros modos. Los máximos de los diagramas se registran en aquellas zonas donde concurren en tiempos muy próximos las ondas con diferentes trayectorias de propagación. Según la posición entre fuente y sensor cambia la morfología del diagrama TFE, que corresponde a las diferentes trayectorias de propagación que llegan al sensor. Se calculó que a altas frecuencias la localización espacial de las fuentes puede hacerse con una resolución de aproximadamente 1cm. Para el ensayo 1 se consideran trayectorias con reflexiones en los extremos del tubo que permiten explicar algunas zonas del diagrama que con el resto de los caminos no se podría. En el ensayo 2 se verifica una propagación en el perímetro del tubo con más de una vuelta, y el ensayo 3 es una combinación de los anteriores.

3.1.9 Tubo II - Ensayo 1

Este es un tubo de acero sin costura con una fina capa de óxido en la superficie interior con las dimensiones que se listan en la tabla 2.1. En la superficie exterior se observan marcas longitudinales, apenas perceptibles al tacto, que se deben a los rodillos de laminado del último proceso de fabricación [3-13].

Se realizaron numerosos ensayos, variando la posición entre fuente y sensor, cambiando la temperatura en zonas localizadas e introduciendo entallas maquinadas al tubo. A continuación se detallan aquellos ensayos que aportan nueva información o que permiten reforzar los hallazgos de experimentos anteriores.

Los datos utilizados son los de la entrada 0 de la tabla Tubo II-A listados en el Anexo B. La disposición geométrica del ensayo se muestra en la figura 3.27.

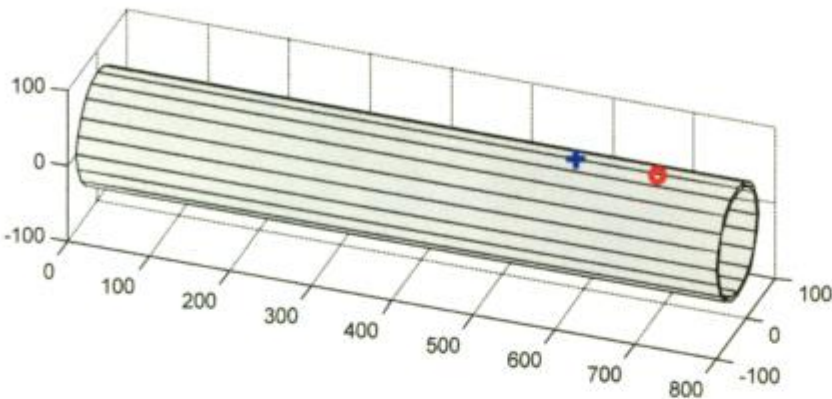


Figura 3.27 -
Ubicación de la
fuente y del sensor
para el Ensayo 1 -
Tubo II

F = (590,0,71) (+)
S = (690,0,71) (o)

Como la distancia fuente-sensor es igual que en el Ensayo 1 - Tubo I, y además los radios de los cilindros están muy próximos (Tubo I = 70 mm y Tubo II = 71 mm) este ensayo es útil para comparar cuales son los efectos del espesor sobre los modos de propagación (Tubo I = 16 mm y Tubo II = 5 mm). El material de ambos tubos también es semejante, por lo tanto se utilizaron los mismos parámetros para el cálculo teórico de las curvas de dispersión.

De acuerdo a los criterios antes establecidos para las trayectorias, en la tabla 3.5 se listan los valores calculados para este ensayo.

Helicoidales

	+			-		
	1	2	3	1	2	3
Directo	457	898	1342	457	898	1342
Pared 1	538	941	1372	538	941	1372
Pared 2	1356	1560	1852	1356	1560	1852

Rectas

100	300	1280	1480	1680	1880
-----	-----	------	------	------	------

Tabla 3.5 - Trayectorias calculadas para el Ensayo 1 del Tubo II, expresadas en mm

El diagrama TFE calculado para 1000 muestras por la Transformada Wavelet se representa en la figura 3.28. El máximo de intensidad está indicado con un símbolo ' + '.

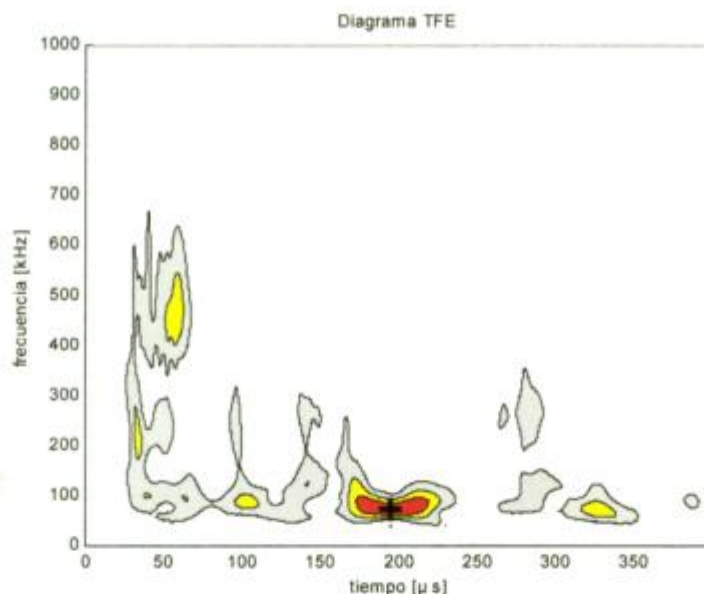


Figura 3.28 - Diagrama TFE del Ensayo 1 del Tubo II

La simple observación de este diagrama TFE revela algunas diferencias con respecto al correspondiente diagrama del Tubo I, que serán adecuadamente interpretadas con la superposición de las curvas dispersivas. Para el modo A_0 , se representan en la figura 3.29 las trayectorias helicoidales y rectas sin reflexión, indicadas con color verde, y las trayectorias con reflexiones indicadas con color azul.

Las curvas del modo A_0 muestran un muy buen ajuste con los datos experimentales excepto en algunas zonas de alta frecuencia que corresponden al modo S_0 como lo refleja la figura 3.30. Las curvas correspondientes al modo S_0 de trayectorias helicoidales están dibujadas con color negro, mientras que las trayectorias que incluyen reflexiones están dibujadas con color rojo.

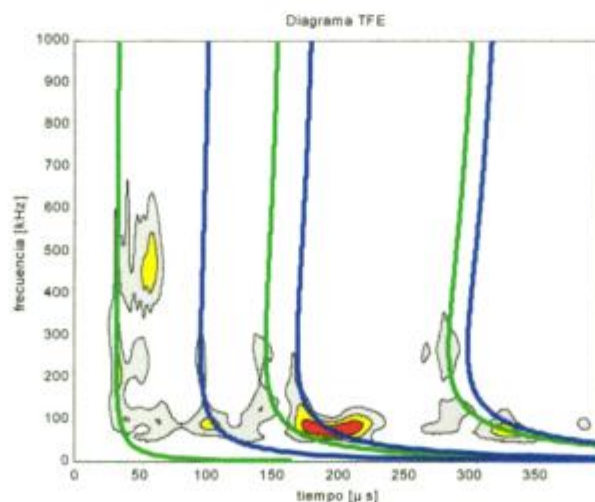


Figura 3.29 - Modo A_0 - Trayectorias Helicoidales (Verde) 100, 457, 898 mm. Trayectorias con Reflexiones (Azul) 300, 538, 941 mm

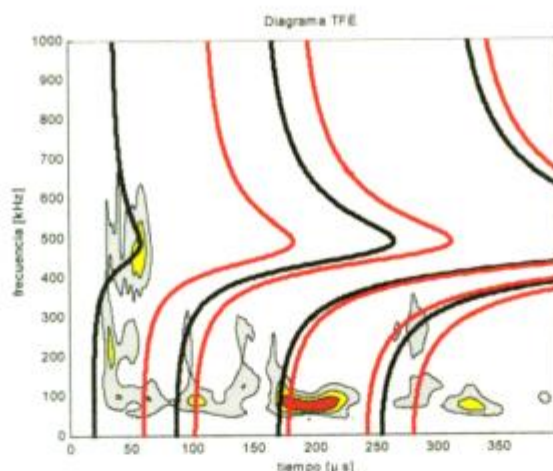


Figura 3.30 - Modo S_0 - Trayectorias Helicoidales (Negro) 100, 457, 898, 1342 mm. Trayectorias con Reflexiones (Rojo) 300, 538, 941, 1280, 1480 mm

La separación tan nítida lograda para las regiones correspondientes al modo S_0 con respecto al modo A_0 , es función de los rangos en que se distribuye la energía en cada modo. Como se ha comprobado en los diagramas, el modo S_0 , concentra la energía en la zona de máxima velocidad, en "la nariz de la curva". En este caso es posible distinguir este comportamiento porque el espesor del tubo "separa" la zonas de frecuencias donde cada modo concentra mayormente la energía de las ondas. En otro caso, si la nariz de la curva coincidiera con la zona en que el modo A_0 concentra su energía la separación entre modos no resultaría posible.

Al igual que en el Tubo I, los primeros eventos en arribar son los que contienen mayor cantidad de información respecto a las características de la fuente; dado que con la propagación y las sucesivas reflexiones se introducen modificaciones o se pierde esa información.

3.1.10 Tubo II - Ensayo 2

Los datos utilizados son los que corresponden a la entrada 2 de la tabla del Tubo II-C del Anexo B. En la figura 3.31 se muestra la ubicación geométrica de la fuente y del sensor. El cálculo de las longitudes de las trayectorias se resume en la tabla 3.6 haciendo la distinción arbitraria entre caminos helicoidales y caminos rectos.

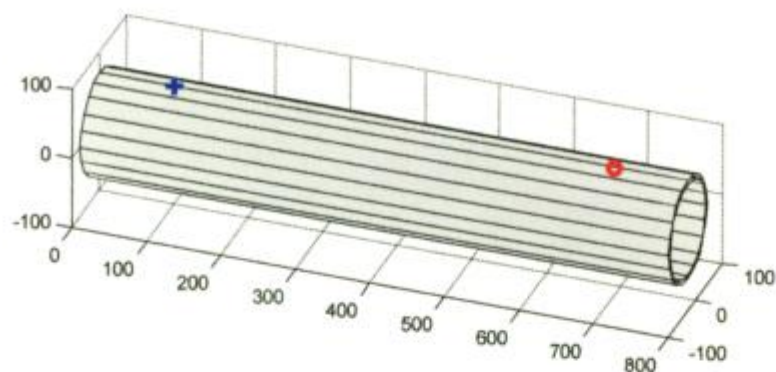


Figura 3.31 -
Ubicación de fuente
y sensor para el
Ensayo 2 - Tubo II

$F = (100,0,71) (+)$
 $S = (690,0,71) (o)$

Helicoidales

	+ / -				
	1	2	3	4	5
Directo	740	1070	1463	1879	2307
Pared 1	907	1192	1554	1955	2366
Pared 2	907	1192	1554	1955	2366

Rectas

590	790	990
2170	2370	2570

Tabla 3.6 - Trayectorias calculadas en mm para el Ensayo 2 - Tubo II

El diagrama TFE de este ensayo calculado para 1500 muestras de la señal temporal se muestra en la figura 3.32.

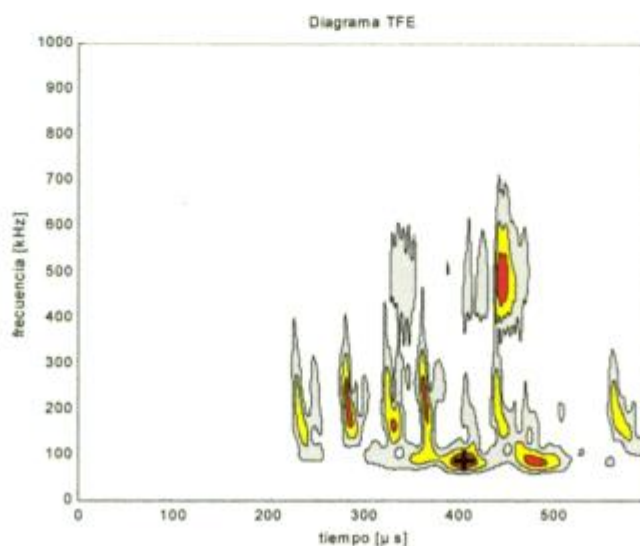


Figura 3.32 - Diagrama TFE del Ensayo 2 del tubo II - 1500 puntos - 600 μs

La superposición del modo A_0 se muestra en la figura 3.33. Con color verde se indican aquellas curvas que responden a caminos helicoidales o rectos sin reflexiones, y con color azul las curvas que representan trayectorias con reflexiones.

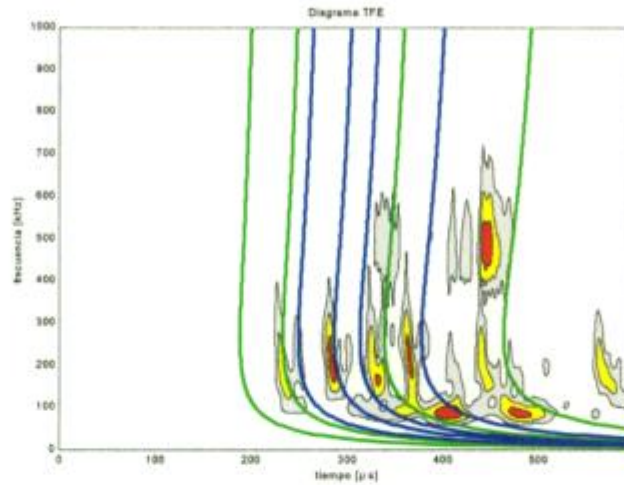


Figura 3.33 - Modo A_0 - Trayectorias Helicoidales (Verde) 590, 740, 1070, 1463 mm. Trayectorias con Reflexiones (Azul) 790, 907, 990, 1192 mm

La superposición del modo S_0 se muestra en color negro para las trayectorias helicoidales y en color rojo para las trayectorias con reflexiones en la figura 3.34. Se verifica la conclusión anterior respecto a las zonas de alta frecuencia que corresponden a este modo y se explican las zonas de mayor intensidad.

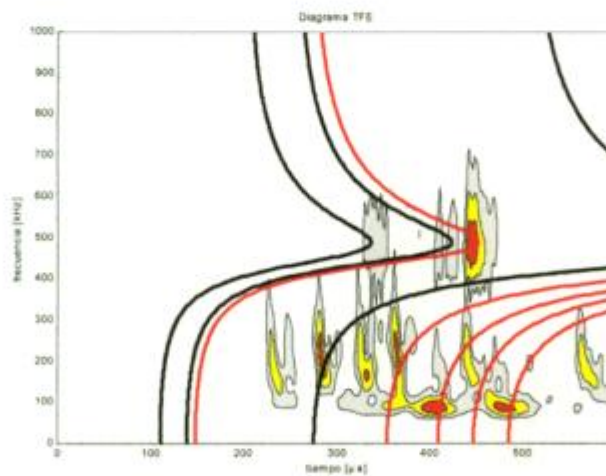


Figura 3.34 – Modo S_0 - Trayectorias Helicoidales (Negro) 590, 740, 1463 mm- Trayectorias con Reflexiones (Rojo) 790, 1879, 2170, 2370, 2570 mm

Nuevamente se verifica que el modo S_0 transporta la energía en un rango de frecuencias que corresponde a las máximas velocidades del modo, en la "nariz" de la curva de dispersión.

3.1.11 Tubo II - Ensayo 3

Se utilizan la entrada 0 de la tabla para el Tubo II-G del Anexo B. La disposición de la fuente y el sensor es idéntica a la del ensayo 2 como se muestra en la figura 3.35.

Se construyó sobre la superficie exterior del tubo una entalla en el sentido circunferencial. Las dimensiones de la entalla son: 30 mm de longitud, 1 mm de profundidad y 0,5 mm de ancho; que representa aproximadamente un 20% del espesor del tubo y un 7% de la circunferencia.

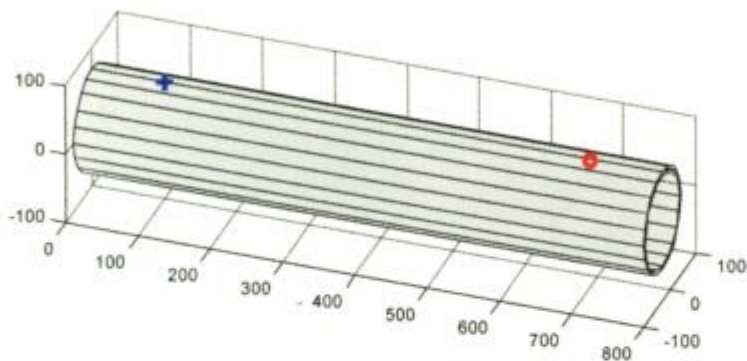


Figura 3.35 - Geometría del ensayo 3 - Tubo II

F = (100,0,71) (+)
S = (690,0,71) (o)

Fisura (590,0,71) (-)
Longitud = 30 mm
Profundidad = 1 mm
Ancho = 0,5 mm

El diagrama TFE para este ensayo es análogo al de las figuras 3.33 y 3.34 (ensayo 2 – Tubo II), donde se observa que las máximas intensidades se registran para el Modo A₀ en 250 kHz y para el Modo S₀ en 550 kHz. Suponiendo un modelo simplificado de propagación armónica, se calculan las longitudes de onda asociadas para la velocidad de cada modo, según la ecuación 3.4.

$$\lambda = \frac{v}{f} \tag{3.4}$$

donde *v* indica la velocidad y *f* la frecuencia de la onda. Los valores de velocidad son para el Modo A₀ de 3125 m/s y para el Modo S₀ de 1723 m/s. El cálculo se resume en la tabla 3.7.

Modo	Velocidad	Frecuencia	Longitud de Onda
A ₀	3125 m/s	250 kHz	12,5 mm
S ₀	1723 m/s	500 kHz	3,5 mm

Tabla 3.7 – Cálculo de Longitudes de Onda

Según la disposición de este ensayo, una onda propagada desde la fuente, encontraría a la entalla en un sentido transversal a su vector de propagación como lo muestra el esquema de la figura 3.36a. La posibilidad de interacción con el defecto aumenta cuanto más cercanas sean la dimensión de la longitud de onda y la dimensión de la entalla. Entonces, con los valores calculados, la mayor probabilidad de encontrar algún efecto de interacción debería observarse a una frecuencia de 500 kHz para el modo S_0 , donde la entalla equivale a un 14% de la longitud de onda en comparación con el 4% que representa para el modo A_0 .

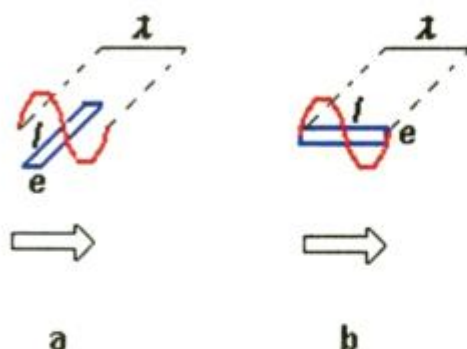
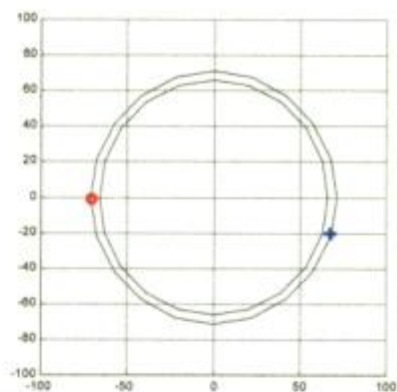
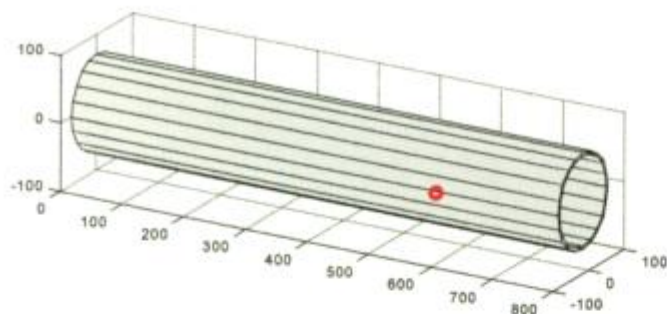


Figura 3.36 – Esquema de la interacción entre onda y la entalla. **a.** Interacción de la onda con la fisura según la mínima longitud. **b.** Interacción de la onda con la entalla según la máxima longitud. Dimensión de la entalla: largo (l), espesor (e). Longitud de la onda (λ).

El estudio comparativo de los diagramas TFE, calculados para el caso con entalla con respecto al caso sin entalla, no indicó ninguna diferencia apreciable. Además de una débil interacción entre la onda y la fisura transversal, la ausencia de algún efecto notable puede deberse a la amplia variación de intensidades de la fuente simulada (ver ensayo 5 del tubo II).

3.1.12 Tubo II - Ensayo 4

Los datos corresponden a la entrada 12 de la tabla para el Tubo II-G del anexo B. Este ensayo es el complemento del Ensayo 3. En él se ubica la fuente, la entalla y el sensor en una misma circunferencia del tubo como se indica en la figura 3.37. La disposición no es simétrica para evitar la superposición de trayectorias que enmascaren los posibles efectos.



Vista transversal del Tubo

Figura 3.37 - Geometría del Ensayo 4 - Tubo II

F = (590,68,-20) (+)
S= (590,-71,0) (o)
Fisura (590,0,71) (-)

Se analizan solamente las trayectorias de las ondas en la misma circunferencia donde se ubican la fuente, la fisura y el sensor. Según esta disposición, llegará primero al sensor aquella información que no interactúa con la entalla; y posteriormente la que si interactuó con la entalla. Los valores de las trayectorias calculadas se listan en la tabla 3.8.

Helicoidales

	+			-		
	1	2	3	1	2	3
Directo	203	650	1095	243	690	1135

Tabla 3.8 - Trayectorias calculadas en mm para el Ensayo 4 - Tubo II

Los diagramas TFE calculados para 1000 puntos se muestran en la figura 3.38. En la parte superior se muestra el diagrama correspondiente al ensayo sin la entalla, y en la parte inferior el diagrama correspondiente al ensayo con la entalla maquinada. Es importante destacar que las escalas de intensidad no son iguales.

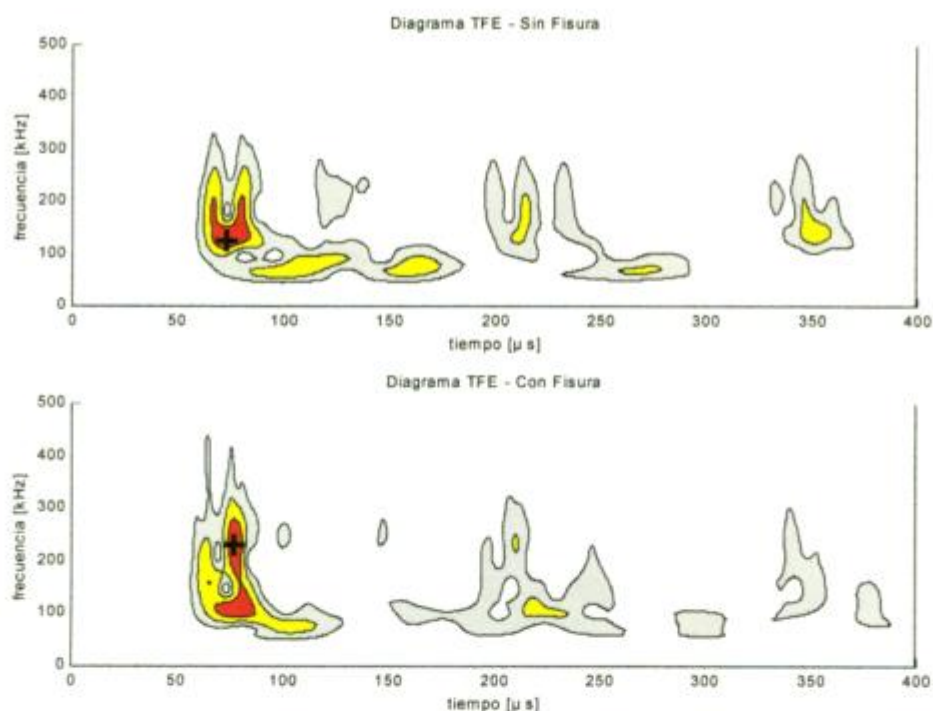


Figura 3.38 - Diagrama TFE del Ensayo 4 del tubo II - 1000 puntos - 400 μ s. Parte superior: tubo sin fisura. Parte inferior: tubo con fisura.

Es muy clara la diferencia cualitativa de ambos diagramas por simple observación, tanto en la morfología como en la ubicación de las máximas intensidades. La ubicación del máximo para el caso sin entalla es aproximadamente de 130 kHz y para el caso con entalla de 250 kHz. Siguiendo el procedimiento del Ensayo 3, se calculan las longitudes onda a estas frecuencias para el Modo A_0 en la tabla 3.9.

Modo	Velocidad	Frecuencia	Longitud de Onda
A_0	2995 m/s	130 kHz	23 mm
A_0	3125 m/s	250 kHz	12,5 mm

Tabla 3.9 - Cálculo de Longitudes de Onda

La dirección del vector de propagación de la onda, en este caso, coincide con la longitud máxima de la entalla, ver figura 3.36b. La dimensión de la entalla es comparable con la longitud de la onda. En toda la longitud de la entalla "entra" más de una vez la longitud de la onda, lo que implica una fuerte interacción entre la onda y el defecto. Para el caso de más baja frecuencia (130 kHz), la entalla es 1,3 veces la longitud de la onda y para el caso de 250 KHz la entalla es equivalente a 2,4 longitudes de onda.

Un análisis más detallado de la forma de los diagramas se muestra en las figuras 3.39 y 3.40. En la primera de ellas se muestra el caso sin entalla, donde se observa una excelente superposición de las curvas teóricas del modo A_0 . Debe destacarse la simetría que presenta el diagrama para estas trayectorias, tanto en la forma como en el contenido de energía.

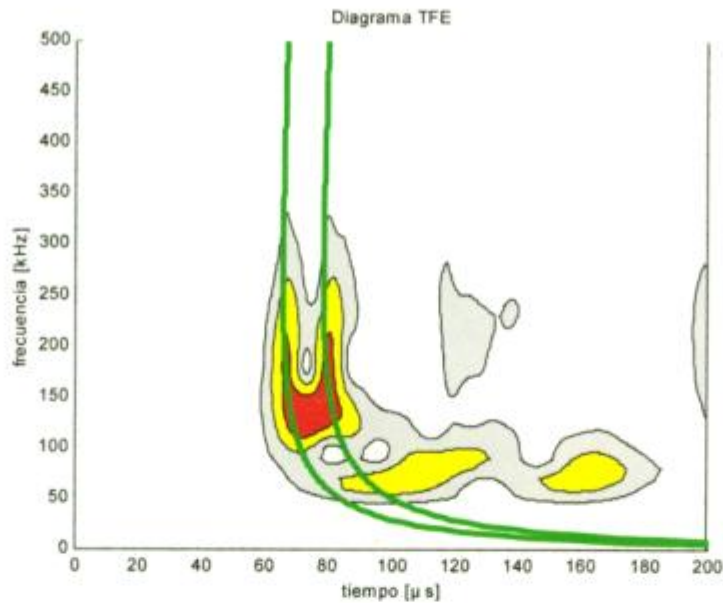


Figura 3.39 - Detalle Modo A_0 sin entalla - 203 y 243 mm

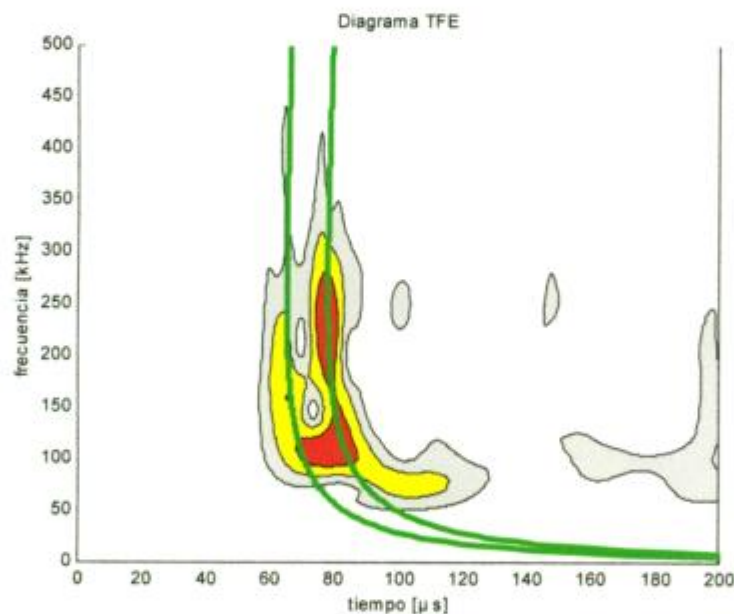


Figura 3.40 - Detalle Modo A_0 con entalla - 203 y 243 mm

Por el contrario en la figura 3.40 (diagrama con entalla), la simetría en cuanto a la forma y la energía deja de mantenerse debido a la interacción de la onda con la entalla. El principal efecto de la entalla es acentuar las componentes de mayor frecuencia, ya sea por efecto directo del cambio de la frecuencia de propagación o por atenuación de las componentes de más baja frecuencia.

Debido a que toda la energía es suministrada por la fuente, la entalla puede atenuar o dispersar, pero nunca aportar más energía. Las trayectorias, tanto la que no pasa por la entalla como la que sí lo hace, deberían tener energías equivalentes como se vio en la figura 3.39. Sería de esperar entonces, que la trayectoria que pasa por la entalla tuviera menos energía por las atenuaciones y dispersiones. Sin embargo en

el diagrama de la figura 3.40 se observa lo contrario. La explicación de este efecto está relacionado con las características de atenuación del sensor. En la interacción con la entalla, se incrementan en forma relativa las componentes de alta frecuencia. Estos valores de frecuencias coinciden con la zona donde el sensor utilizado presenta menor atenuación (ver Anexo C, sensor AE 60). Este efecto combinado es lo que hace que se intensifiquen relativamente las frecuencias más altas como lo muestra el diagrama.

3.1.13 Tubo II - Ensayo 5

Los datos de este ensayo corresponden a las tablas Tubo II-C hasta Tubo II-F descritas en el Anexo B. Se agrega en este caso una fuente de calor localizada (T) sobre la superficie del tubo. La disposición de los elementos de los ensayos se muestra en la figura 3.41.

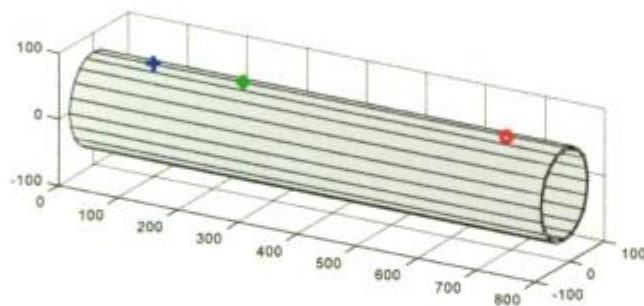


Figura 3.41 -
Geometría del ensayo
5 - Tubo II

F = (100,0,71) (+)
S = (690,0,71) (o)
T = (250,0,71) (*)

Se analizaron los efectos de la temperatura aplicada localmente en distintos rangos, desde temperatura ambiente hasta 250 °C aproximadamente; este valor de temperatura no afecta las características metalúrgicas del material. La dificultad inherente en este tipo de ensayos es la velocidad de aplicación del calor, debido a la rápida conducción del calor en los metales.

Según se expuso en el Capítulo 1, de la teoría de la Termoelasticidad surge la posibilidad de una interacción entre las ondas elásticas y las ondas térmicas. De las conclusiones allí obtenidas, se podrían esperar efectos de dispersión y de atenuación sobre los diagramas TFE, cuando se ensaya con la aplicación de calor en forma localizada.

El diagrama TFE para el caso de mayor temperatura (aprox. 250 °C) se lo compara con el diagrama equivalente calculado a temperatura ambiente, mostrados en la figura 3.42. En la parte superior se muestra el caso de temperatura ambiente y en la parte inferior el caso de alta temperatura.

Aunque las escalas de intensidad de ambos diagramas no son coincidentes, se aprecia una diferencia cualitativa en cuanto a las relaciones que guardan los

distintos modos. En el diagrama que corresponde al ensayo con calor agregado se infiere una distribución más homogénea de la energía en todo el diagrama, lo que se observa como mayor número de zonas que superan el umbral.

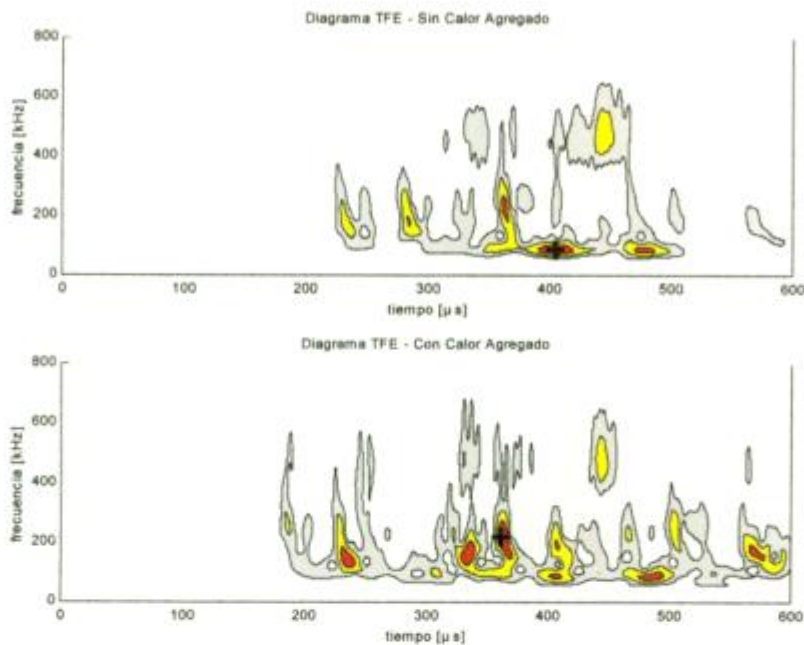


Figura 3.42 - Diagrama TFE del Ensayo 5 del tubo II - 1500 puntos - 600 μ s. Parte superior: ensayo a temperatura ambiente. Parte inferior: ensayo con alta temperatura localizada.

La descripción de los modos superpuestos para el caso de temperatura ambiente es el que se realizó en las figuras 3.33 y 3.34. Para el caso con temperatura elevada, en la figura 3.43 se muestra un detalle de los primeros modos en arribar al sensor.

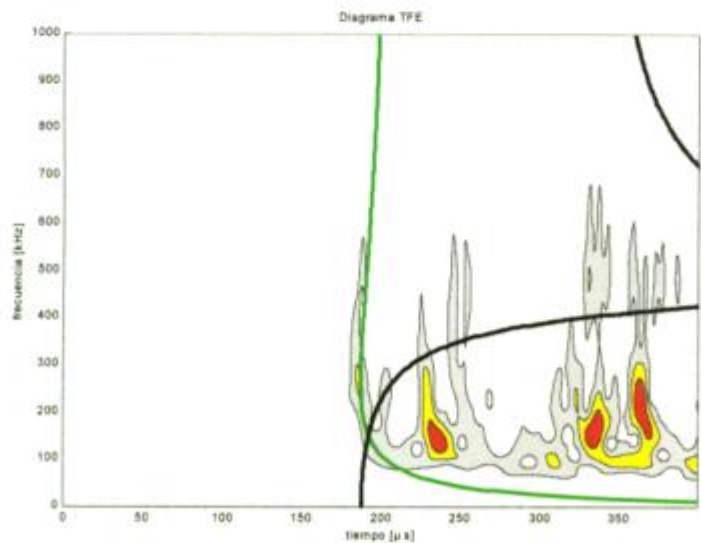


Figura 3.43 - Efecto de la Temperatura (250 °C) . Modo A₀ (590 mm) Modo S₀ (990 mm)

Se destaca la presencia de energía que supera el umbral, correspondiente al camino más corto. En el caso sin temperatura, aunque existía esta componente, la distribución de intensidades dejaban por debajo del umbral a esta trayectoria. Esto refuerza la idea de una distribución más homogénea de la energía aunque no es un argumento válido para confirmar una atenuación global.

De la comparación de los diagramas no se observan efectos de dispersión debidos a una interacción termoelástica; esto debería observarse como un corrimiento en el tiempo entre los diagramas. La existencia de este fenómeno puede quedar enmascarado por factores experimentales como se verá para el caso de la intensidad.

En la tabla 3.10, se lista para todos los ensayos con esta disposición de fuente, temperatura y sensor, la energía contenida en cada diagrama (coeficientes del diagrama TFE al cuadrado) en función de la temperatura de cada ensayo. El objetivo es comparar las energías totales, para distinguir el efecto de atenuación con la temperatura. Estos mismos resultados están graficados y se muestran en la figura 3.44.

T [°C]	Energía [u.a]	T [°C]	Energía [u.a]
15	1.38E+08	50	1.18E+08
15	1.83E+08	50	1.54E+08
15	1.37E+08	100	1.31E+08
15	1.36E+08	100	1.12E+08
15	1.63E+08	150	1.40E+08
15	1.12E+08	150	1.59E+08
15	1.42E+08	200	1.55E+08
15	1.66E+08	200	1.54E+08

Tabla 3.10 - Valores de Energía contenidos en el diagrama en función de la Temperatura expresado en unidades arbitrarias. Posiciones: F(100,0,71) S(690,0,71)

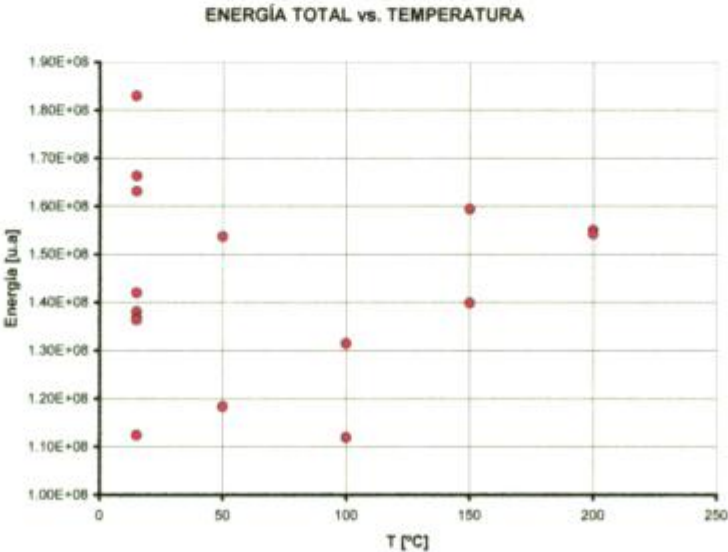


Figura 3.44 - Energía Total de cada diagrama vs. Temperatura del Ensayo. Datos de la tabla 3.10.

Los resultados mostrados en el gráfico indican una amplia distribución para las energías en función de la temperatura. La causa de este amplio rango de energías presente en los ensayos, se debe fundamentalmente a alta variabilidad en la rotura de la mina del lápiz utilizada como fuente.

En resumen: para los ensayos realizados con este tubo, se destacan la clara separación lograda para los distintos modos debido al espesor del tubo. Para el modo S_0 se registra que el máximo contenido de energía se encuentra en la zona de mayor velocidad, en la "nariz" de la curva de dispersión.

La interacción de las ondas con la entalla depende de la orientación relativa fuente-entalla. Cuando la dirección de propagación de la onda es perpendicular a la entalla, como se esquematiza en la figura 3.36a, no se registraron modificaciones al diagrama con respecto al mismo diagrama realizado cuando no existía entalla. Por el contrario, cuando la dirección de propagación de la onda elástica es paralela a la entalla, como en la figura 3.36b, se registra un cambio importante en la morfología del diagrama TFE.

Con respecto a los ensayos con calor aplicado localmente, no se detectaron los efectos de dispersión y atenuación por el acoplamiento termoelástico; aunque se demostró una gran variabilidad en los parámetros de los ensayos que podrían enmascarar estos resultados. Sin embargo, se encontró que las distribuciones de energía relativas a un mismo diagrama son diferentes cuando se cambia la temperatura localmente.

3.1.14 Tubo III - Ensayo 1

Los datos utilizados son los del Anexo B para el Tubo III, en particular para la entrada cero de la tabla. Solamente se muestran los resultados de este único ensayo porque no hay nuevos aportes a la comprensión de la propagación de las ondas con respecto a los ensayos de tubos anteriores. En la figura 3.45 se muestra la posición de la fuente y del sensor sobre el tubo. Las trayectorias para este caso se listan en la tabla 3.11.

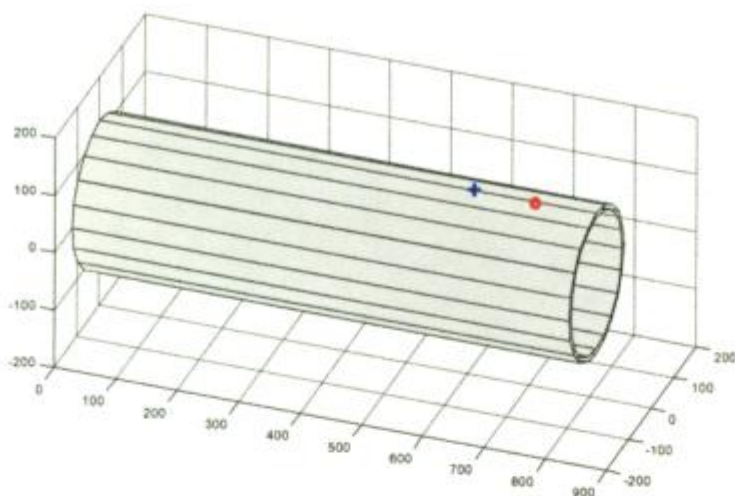


Figura 3.45 -
Ubicación de la fuente
y del sensor para el
Ensayo 1 - Tubo III

F = (610,0,122.5) (+)
S = (710,0,122.5) (o)

Helicoidales

	+		
	1	2	3
Directo	776	1543	2311
Pared 1	826	1568	2328
Pared 2	1528	2027	2660

Rectas

100	300	1320
-----	-----	------

Tabla 3.11 – Cálculo de las trayectorias para la disposición de la figura 3.45, expresadas en mm

La superposición de las trayectorias calculadas sobre el diagrama TFE se muestran en la figura 3.46, para las primeras 1000 muestras de la señal. La descripción de estas curvas es similar a las anteriores, sólo se muestran para darle continuidad a la presentación.

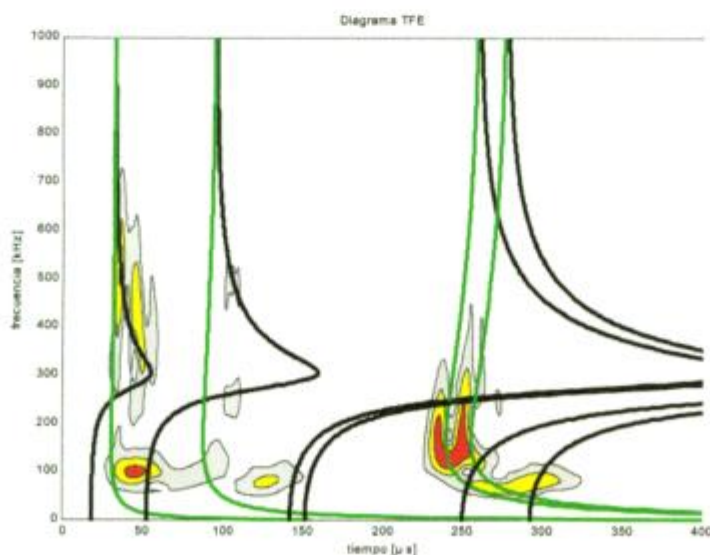


Figura 3.46 – Diagrama TFE del Ensayo 1 del tubo III – 100, 300, 776, 826, 1543 mm. Modo A_0 representado en verde. Modo S_0 representado en negro.

Se observa que aquellas ondas que han sufrido reflexiones presentan diferente distribución de energía a lo largo del modo. Así, por ejemplo, para el modo S_0 se observa un cambio relativo en la distribución de energía entre las trayectorias de 100 y 300 mm. Algo similar ocurre con el modo A_0 .

3.1.15 Tubo IV - Ensayo 1

Los resultados mostrados aquí, al igual que para los del Tubo III, resultan redundantes con los ya encontrados en ensayos anteriores. Por esta razón, solamente se muestra un diagrama típico sin detallar el análisis.

Las señales utilizadas en este caso son las que corresponden a la entrada cero de la tabla del Tubo IV del Anexo B. La ubicación de la fuente y el sensor son mostradas en la figura 3.47, y en la tabla 3.12 los valores de las trayectorias calculadas .

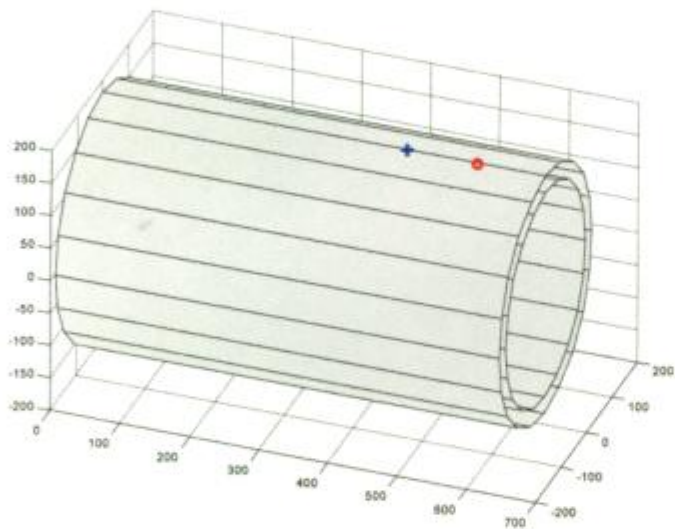


Figura 3.47 - Ubicación de fuente y sensor para el Ensayo 1 – Tubo IV

$F = (440,0,182.5) \text{ (+)}$
 $S = (540,0,182.5) \text{ (o)}$

	+/-		
	1	2	3
Directo	1151	2296	3442
Pared 1	1185	2313	3453
Pared 2	1508	2494	3577

Rectas

100	300	990
1190	1380	1580

Tabla 3.12 - Cálculo de las trayectorias para la disposición de la figura 3.47, expresadas en mm

El diagrama TFE correspondiente a este ensayo es el que se muestra en la figura 3.48 calculado para las primeras 1000 muestras de la señal. Las curvas

superpuestas son las que corresponden al camino recto y a los caminos helicoidales principales que describen muy bien la mayoría de las zonas del diagrama.

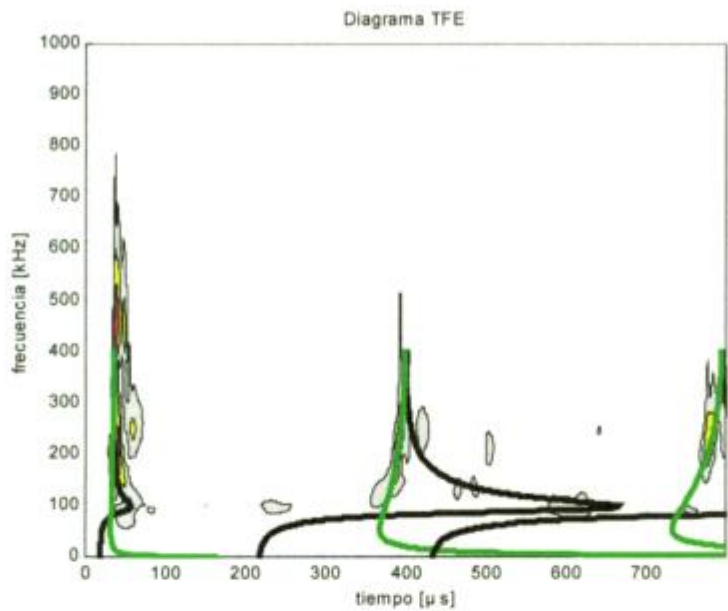


Figura 3.48 - Diagrama TFE del Ensayo 1 del tubo IV - 100, 1151, 2296 mm. Modo A_0 representado en verde. Modo S_0 representado en negro.

3.1.16 Tubo IV - Ensayo 2

Los datos corresponden a al entrada siete de la tabla del Tubo IV mostrada en el Anexo B. La configuración geométrica del ensayo se muestra en la figura 3.49 y las longitudes de las trayectorias de propagación se listan en la tabla 3.13.

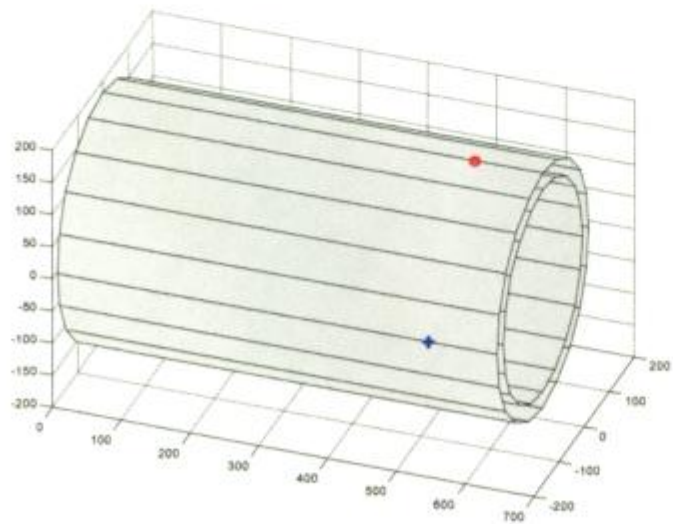


Figura 3.49 Ubicación de fuente y sensor para el Ensayo 2 - Tubo IV

$F = (540, -182.5, 0) \text{ (+)}$
 $S = (540, 0, 182.5) \text{ (o)}$

Helicoidales

	+			-		
	1	2	3	1	2	3
Directo	287	1433	2580	860	2007	3153
Pared 1	350	1447	2588	883	2017	3160
Pared 2	1117	1795	2797	1381	2279	3333

Tabla 3.13 - Cálculo de las trayectorias para la disposición de la Figura 3.49, expresadas en mm

El diagrama TFE calculado por la Transformada Wavelet para 1000 muestras de la señal temporal se muestra en la figura 3.50. Se superponen los caminos circunferenciales (hélices de paso nulo) que presentan una distribución de energía en más altas frecuencias en comparación con aquellos caminos que sufren reflexión en los bordes del tubo.

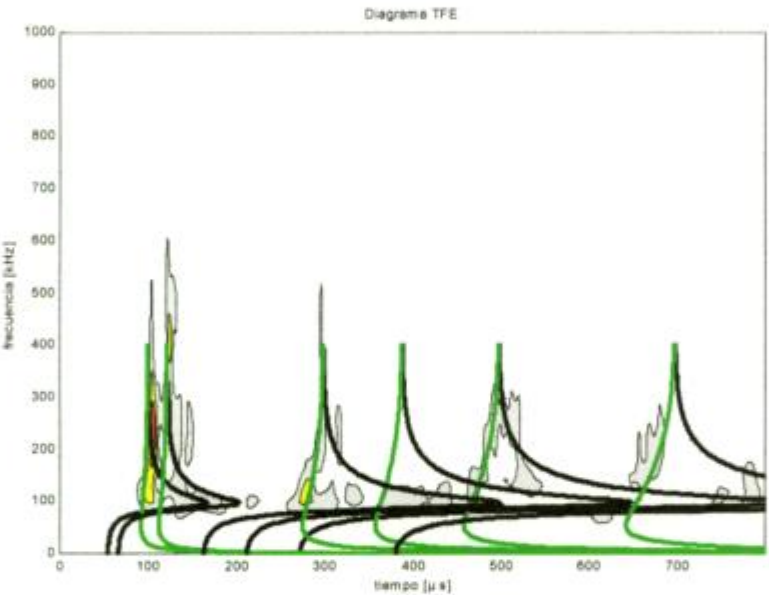


Figura 3.50 - Diagrama TFE del Ensayo 2 del tubo IV. Trayectorias: 287, 350, 860, 1117, 1433, 2007 mm. Modo A_0 representado en verde. Modo S_0 representado en negro.

3.1.17 Tubo V - Ensayo 1

Se utilizan los datos de la entrada cero de la tabla para el Tubo V del Anexo B. La forma del ensayo es como se muestra en la figura 3.51, y las longitudes calculadas para las trayectorias están dadas en la tabla 3.14. En este ensayo hay nuevas variantes con respecto a los anteriores. El material del tubo es ahora acero inoxidable, el diámetro es comparativamente menor que en el resto de los tubos, la longitud es mayor y posee un cordón de soldadura longitudinal.

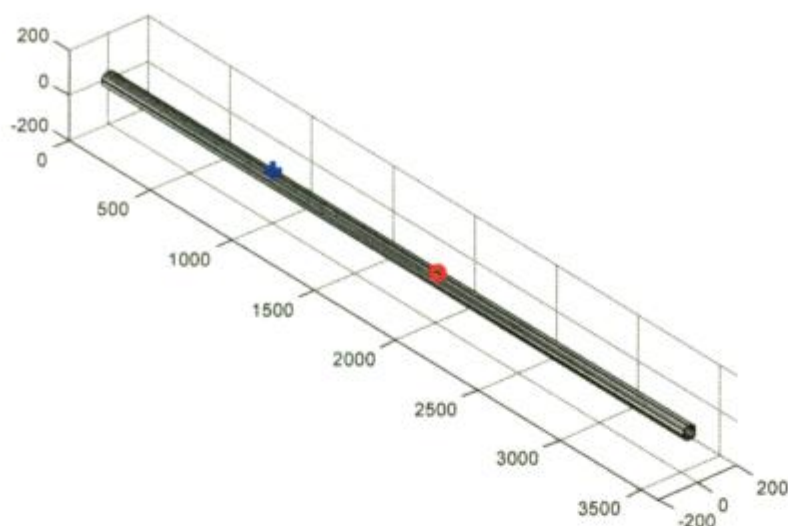


Figura 3.51 - Ubicación de la fuente y del sensor para el Ensayo 1 - Tubo V. Dibujo en escala.

F = (1000,0,31.75) (+)

S = (2000,0,31.75) (o)

Cordón de soldadura ubicado a 180° de la posición de la fuente y del sensor.

Helicoidales

	+/-				
	1	2	3	4	5
Directo	1020	1077	1165	1279	1412
Pared 1	4105	4119	4143	4177	4220
Pared 2	3007	3026	3059	3104	3162

	6	7	8	9	10
Directo	1560	1718	1883	2055	2232
Pared 1	4271	4331	4400	4476	4560
Pared 2	3230	3309	3398	3496	3603

Rectas

1000	3000	4100
6100	8100	10100

Tabla 3.14 – Trayectorias para el Ensayo 1 del Tubo V expresadas en mm.

El diámetro reducido, junto con la longitud de este tubo permite verificar la existencia de caminos helicoidales de pasos mayores que los vistos hasta ahora. El diagrama TFE de este ensayo para las primeras 5000 muestras de la señal temporal esta mostrado en la figura 3.52. Como era de esperar por la cantidad de trayectorias posibles, sobre el diagrama existen grandes zonas cubiertas. Como aspecto relevante se aprecia "cierta" periodicidad en la distribución, alternando zonas de alta intensidad que se van atenuando en el tiempo.

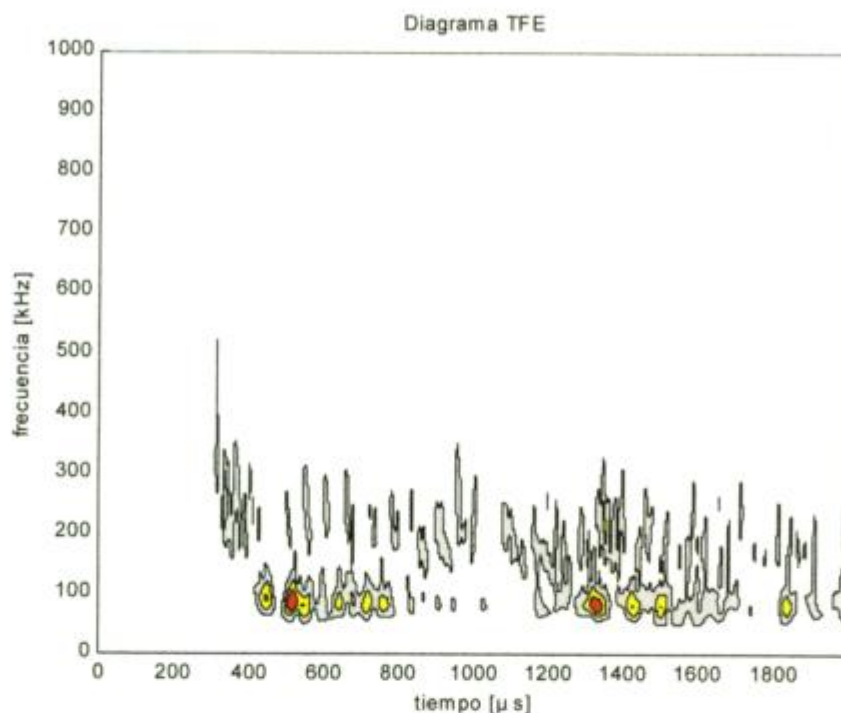


Figura 3.52 - Diagrama TFE para el Ensayo 1 del Tubo V para los 5000 primeros puntos de la señal.

A los efectos de simplificar el análisis del diagrama se toman zonas características en tiempos más reducidos. Así, en la figura 3.53 se muestran los 2000 primeros puntos con las curvas de dispersión del modo A_0 superpuestas. Se superponen únicamente los caminos helicoidales sin considerar reflexiones, aunque dada la simetría del ensayo si existieran reflexiones en el cordón de soldadura los caminos tendrían prácticamente las mismas longitudes. El ajuste logrado es bueno, aunque se observa un corrimiento hacia la derecha de las curvas con respecto a las zonas cubiertas del diagrama. Esto puede deberse a una imprecisión en la localización del inicio de la señal temporal que modifica la ubicación del diagrama TFE.

Considerando nuevamente toda la extensión de la señal en la figura 3.54, se superponen las curvas que corresponden a trayectorias rectas con reflexiones en los extremos. Se observa que la energía se distribuye en zonas de mayor frecuencia a lo largo del modo.

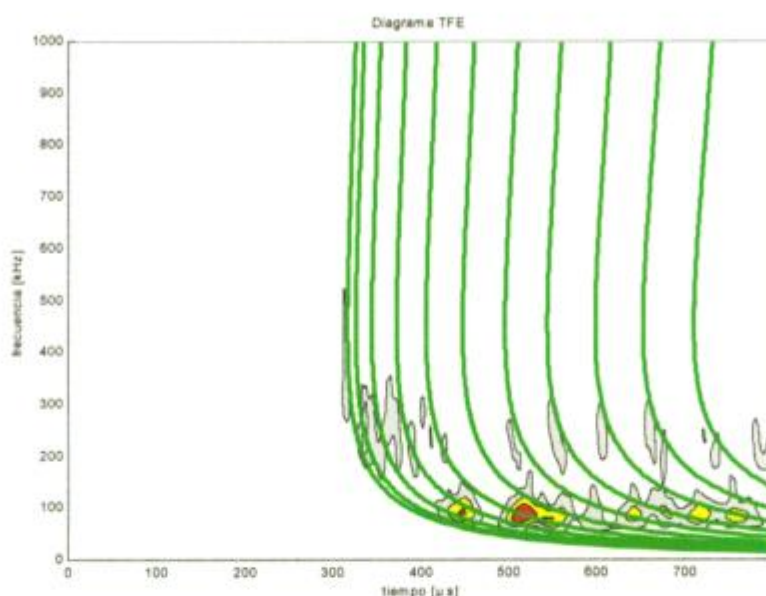


Tabla 3.53 - Trayectorias helicoidales para el Modo A_0 para los 2000 primeros puntos de la señal, expresadas en mm. Longitudes 1000, 1020, 1077, 1165, 1279, 1412, 1560, 1718, 1883, 2055 y 2232 mm

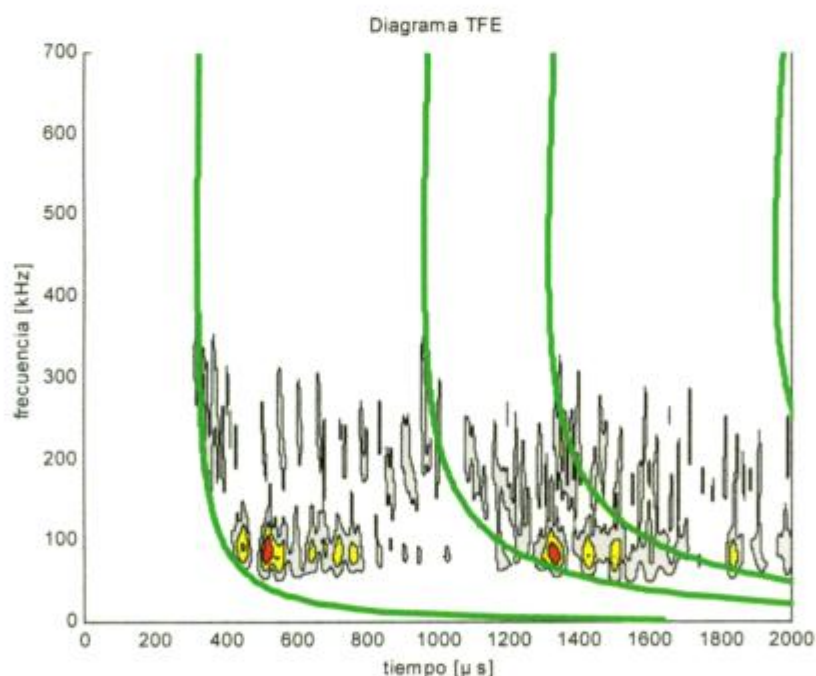


Tabla 3.54 - Trayectorias rectas con reflexiones para el Modo A_0 para los 5000 primeros puntos de la señal, expresadas en mm. Longitudes 1000, 3000, 4100 y 6100 mm

En la figura 3.55, se muestra la superposición de los modos S_0 para aquellas trayectorias que la escala de intensidades del diagrama permite mostrar. Sin embargo, este modo existe para longitudes de camino menores, lo mismo que para el modo A_0 . Para distinguir mejor las zonas donde cada modo transporta energía, es útil analizar el primer tiempo de arribo, donde los efectos se pueden separar más fácilmente.

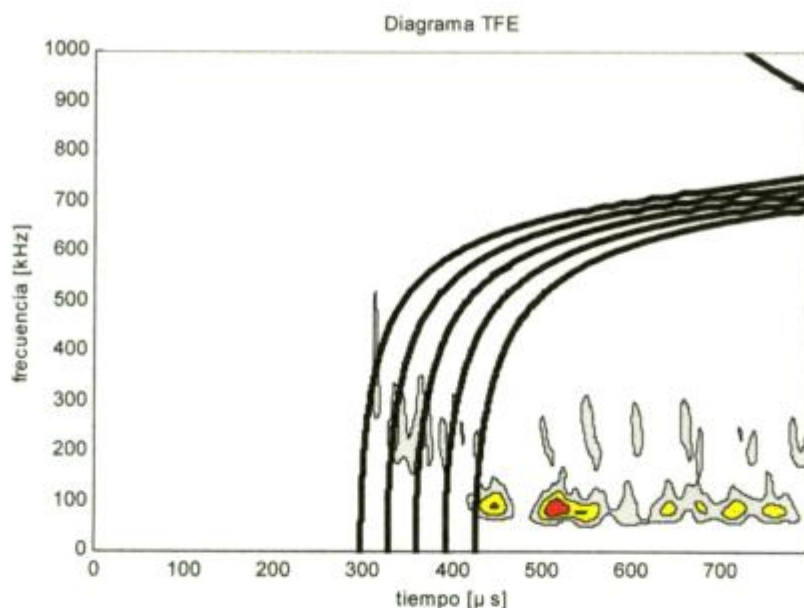


Tabla 3.55 – Trayectorias helicoidales para el Modo S_0 para los 2000 primeros puntos de la señal, expresadas en mm. Longitudes 1560, 1718, 1883, 2055 y 2232 mm

La figura 3.56 muestra en detalle el modo S_0 para los primeros 300 puntos de la señal. En este rango de tiempos, el modo S_0 es el único que existe, y como su amplitud con respecto al modo A_0 es inferior quedaba por debajo del umbral de 25% en los diagramas anteriores. Se observa una contribución de energía para este modo en un rango de aproximadamente 200 a 700 kHz, similar al que se registra para el modo A_0 .

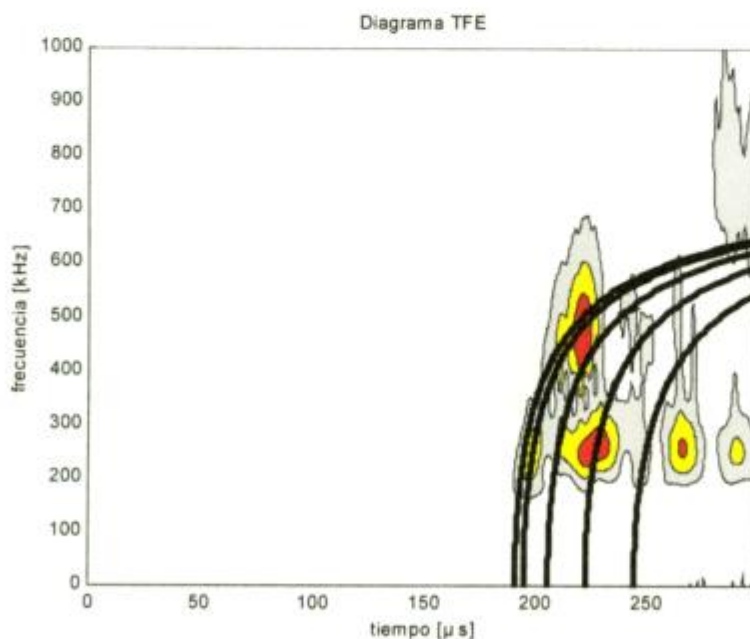


Figura 3.56 - Detalle de trayectorias helicoidales para el Modo S_0 para los 300 primeros puntos de la señal, expresadas en mm. Longitudes 1000, 1020, 1077, 1165 y 1279 mm

3.1.18 Tubo V - Ensayo 2

Los datos corresponden a la entrada tres de la tabla del Tubo V detallada en el Anexo B. La descripción espacial del ensayo es tal como muestra la figura 3.57; y las longitudes de las trayectorias seguidas por los modos de propagación están expuestas en la tabla 3.15.

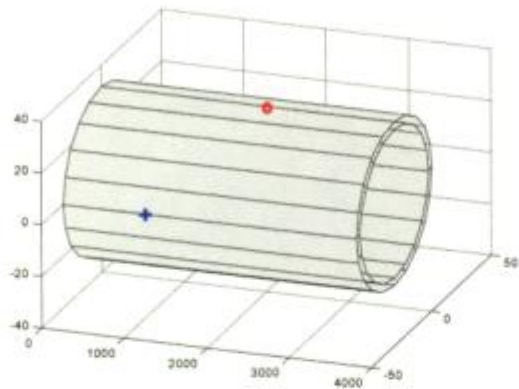


Figura 3.57 - Ubicación de fuente y sensor para el Ensayo 2 - Tubo V

$F = (1000,-31.75,0)$ (+)
 $S = (2000,0,31.75)$ (o)

Cordón Soldadura
Longitudinal (línea negra)

(Los ejes no están en la misma escala, Ver Fig. 3.51)

Helicoidales

	+				
	1	2	3	4	5
Directo	1001	1031	1096	1192	1311
Pared 1	4100	4108	4125	4151	4187
Pared 2	3000	3010	3033	3069	3118

	-				
	1	2	3	4	5
Directo	1011.1	1059	1141	1249	1378
Pared 1	4102.7	4115	4137	4168	4208
Pared 2	3003.7	3020	3050	3092	3146

Tabla 3.15 - Trayectorias para el Ensayo 2 del Tubo V expresadas en mm

El diagrama TFE presenta características similares a los del Ensayo 1, por tal motivo sólo se muestra el caso para la superposición del modo A₀ en la figura 3.58.

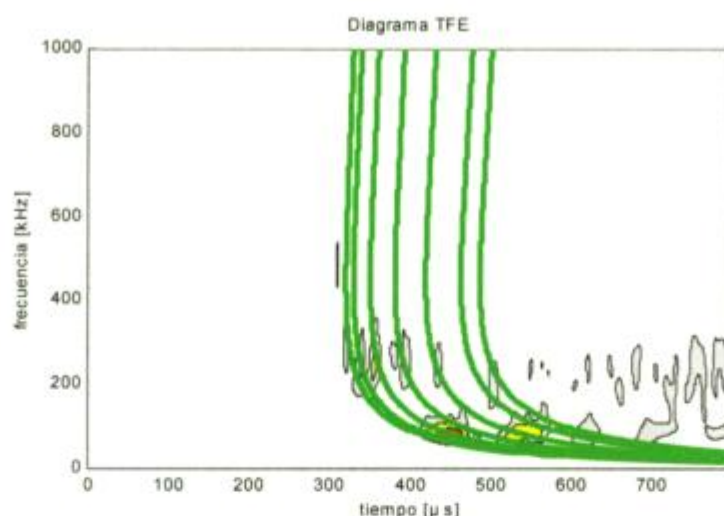


Figura 3.58 – Trayectorias helicoidales para el Modo A_0 para los 2000 primeros puntos de la señal, expresadas en mm.

3.1.19 Tubo V - Ensayo 3

Se usan los datos de la entrada cinco de la tabla del Tubo V presentados en el Anexo B. El ensayo se realizó de acuerdo a la descripción que muestra la figura 3.59, con las longitudes que se presentan en la tabla 3.16.

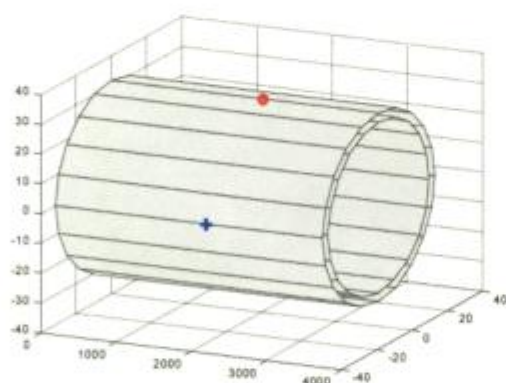


Figura 3.59 - Ubicación de la fuente y del sensor para el Ensayo 3 – Tubo V

$$F = (2000, -31.75, 0) \text{ (+)}$$

$$S = (2000, 0, 31.75) \text{ (o)}$$

Cordón Soldadura
Longitudinal (línea negra)

(Los ejes no están en la misma escala, Ver Fig. 3.51)

Helicoidales

	+			-		
	1	2	3	1	2	3
Directo	50	249	449	150	349	549
Pared 1	3100	3110	3132	3104	3120	3148
Pared 2	4000	4008	4025	4003	4015	4037

Tabla 3.16 - Trayectorias para el Ensayo 3 del Tubo V expresadas en mm

El diagrama TFE completo se muestra en la figura 3.60 para los primeros 1000 puntos de la señal. Para tiempos mayores a los graficados no se registran zonas con energía sobre el umbral. En caso de utilizar un umbral menor para la energía, se registrarían otras zonas como se hizo en el Ensayo 1 del Tubo V para el modo S_0 .

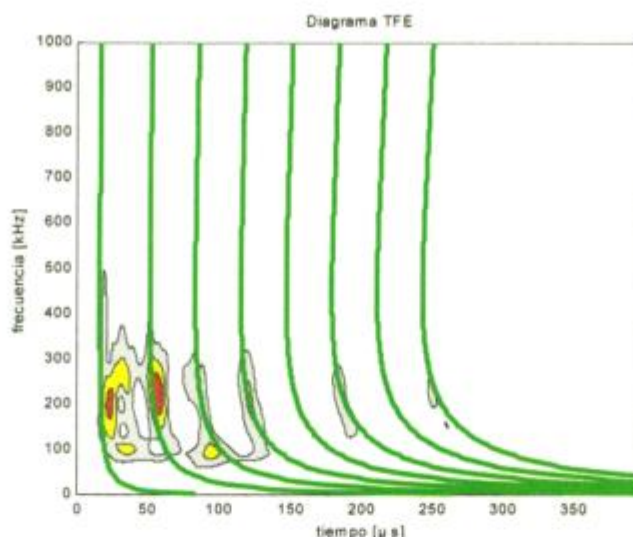


Figura 3.60 - Trayectorias circunferenciales para el Modo A_0 para los 1000 primeros puntos de la señal, expresadas en mm. Longitudes 50, 150, 249, 349, 449, 549, 749 y 949 mm

La superposición del modo A_0 se muestra para las trayectorias circunferenciales únicamente, que en este caso particular son todas las registradas. Debido a la ubicación simétrica de la fuente, el sensor y el cordón de soldadura, las posibles reflexiones por el cordón presentan las mismas longitudes que las trayectorias helicoidales. Esto resulta en una imposibilidad de determinar cuál es el efecto que introduce en el diagrama la presencia del cordón. En el ensayo 4 se salva este problema generando una distribución asimétrica de la fuente, el sensor y el cordón de soldadura. (ver 3.1.20).

Un efecto notable ocurre para las trayectorias de 349 y 749 mm que corresponden a $9/4$ y $13/4$ del perímetro. Para estas longitudes se registra un mínimo de la energía, posiblemente debido a una interferencia destructiva con un camino análogo debido a las reflexiones en el cordón. Este efecto de zonas con mínimos de energía ha sido reportado en la literatura con ensayos en tubos a través de la medición del campo acústico.[3-14].

La superposición para el modo S_0 se muestra en la figura 3.61 para las mismas longitudes que el modo A_0 . Al igual que en el ensayo 1 del tubo V, la amplitud del modo S_0 es mucho menor que la correspondiente al modo A_0 , por consiguiente en la escala de energía utilizada en los diagramas no se pueden apreciar. Para este caso el modo S_0 presenta componentes de energía en un rango de 400 a 800 kHz que no se observan en la figura.

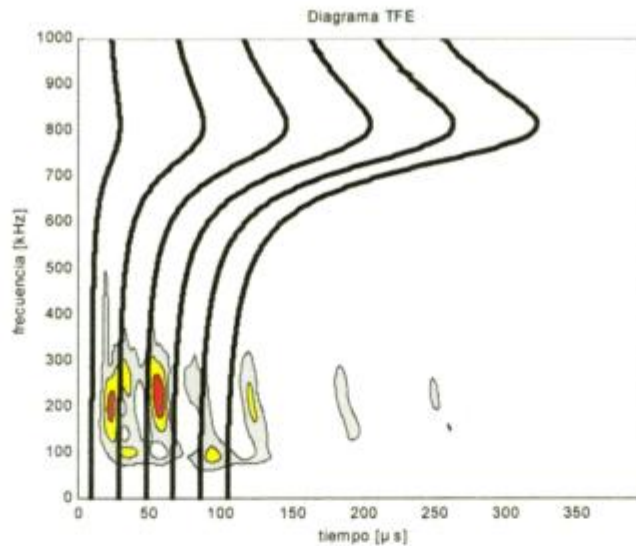


Figura 3.61 – Trayectorias circunferenciales para el Modo S_0 para los 1000 primeros puntos de la señal, expresadas en mm. Longitudes 50, 150, 249, 349, 449 y 549 mm

3.1.20 Tubo V - Ensayo 4

Se usan los datos de la entrada 10 de la tabla del Tubo V presentados en el Anexo B. El ensayo se realizó de acuerdo a la descripción que muestra la figura 3.62; la fuente equidista del sensor y del cordón de soldadura en un valor igual a un cuarto del perímetro.

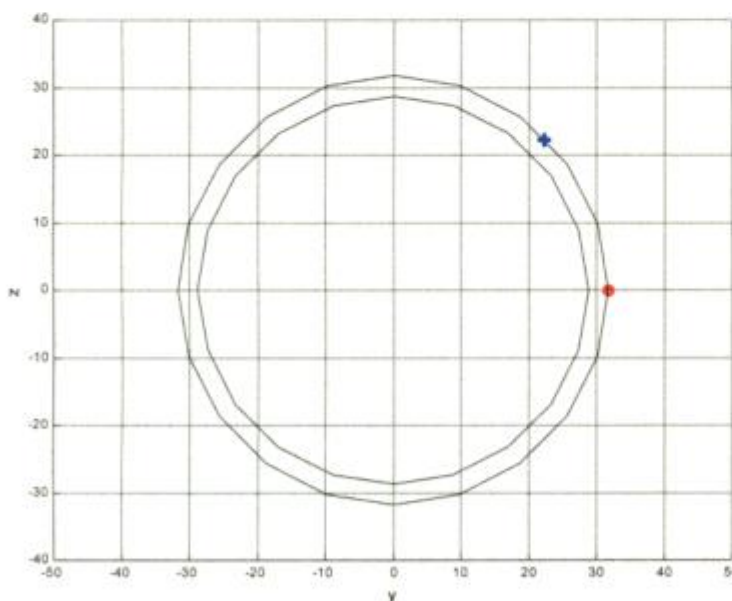


Figura 3.62 – Ubicación de la fuente, el sensor y el cordón de soldadura para el Ensayo 4 – Tubo V

$F = (1000, 22.2, 22.2)$ (+)
 $S = (1000, 31.75, 0)$ (o)

Cordón de Soldadura Longitudinal (punto negro).

Las longitudes de las trayectorias consideradas no se listan en este caso, pues sólo se pretende estudiar el efecto inmediato del cordón de soldadura sobre la reflexión de las ondas. La distancia entre la fuente y el sensor en forma directa es de 25 mm y la distancia recorrida por la onda reflejada en el cordón de soldadura es de 75 mm. El resto de las trayectorias se consideran por suma de caminos circunferenciales.

En la figura 3.63 se muestra el diagrama TFE para los 1000 primeros puntos de la señal temporal, donde se concentra toda la energía del diagrama de acuerdo al umbral utilizado en estos ensayos (25% del máximo).

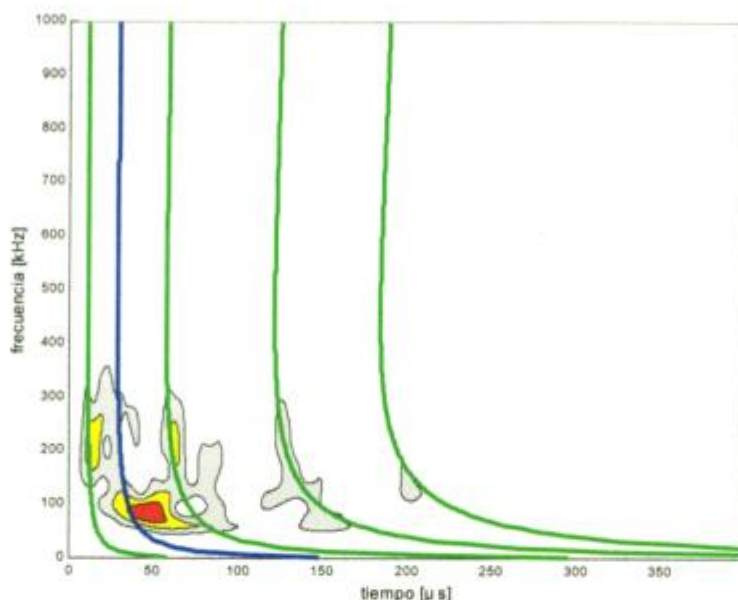


Figura 3.63 – Trayectorias circunferenciales para el Modo A_0 para los 1000 primeros puntos de la señal, expresadas en mm. Longitudes 25, 75, 175, 375, 575 mm. En azul se muestra la reflexión directa en el cordón de soldadura.

Se superponen las curvas de dispersión para el modo A_0 y se verifica que hay una reflexión en el cordón de soldadura (línea azul en fig. 3.63). En el caso sin cordón, deberían existir de acuerdo al modelo propuesto para las trayectorias, sólo dos zonas de energía para trayectorias de 25 mm y 175 mm que corresponden a dos trayectorias circunferenciales en sentido positivo (camino más corto) y en sentido negativo (camino más largo) respectivamente según las definiciones dadas. Sin embargo en la trayectoria del camino más largo está el cordón de soldadura; lo que introduce una reflexión a las ondas que llegan al sensor en un tiempo intermedio, correspondiente a un camino de 75 mm. De esta forma se verifica que la soldadura actúa como lo hacen los extremos del tubo reflejando a las ondas.

En Resumen : Por las características geométricas del tubo V, se pudo verificar la existencia de caminos helicoidales con pasos mayores que los vistos previamente, lo que valida el modelo propuesto de trayectorias de propagación. El otro punto importante de los ensayos con este tubo es la presencia del cordón de soldadura y su interacción con la propagación de las ondas. Se encontró que el cordón de soldadura refleja a las ondas, pudiéndose utilizar esta longitud de camino para ajustar las curvas de dispersión sobre el diagrama TFE generado en este ensayo.

3.2 ENSAYOS TIPO HERRADURA

El desplazamiento mecánico de la superficie del material es el resultado final de un complejo conjunto de fenómenos que tienen lugar dentro del volumen. Desde la emisión por la fuente, que puede responder a varios mecanismos, las ondas

elásticas generadas se propagan por el material según las condiciones de contorno que tengan impuestas. La gran cantidad de variables involucradas en todo el proceso, implica una complicación intrínseca de los fenómenos, haciendo muy difícil contar con un modelo acabado de todo el ensayo para este tipo de probetas en particular. En su lugar, se adoptan enfoques alternativos, con herramientas indirectas, como lo son la estadística y la teoría de fractales.

Para este tipo de ensayo, se comienza con un estudio general del comportamiento estadístico de los parámetros de EA; y posteriormente se enfoca la atención sobre aquellos parámetros de importancia física. Por último se estudian a las señales con un enfoque similar al hecho para las probetas tipo tubos, mediante la superposición de curvas de dispersión teóricas sobre diagramas tiempo-frecuencia-energía.

3.2.1 Estudio general de los Parámetros

Con los parámetros obtenidos durante los ensayos de las señales de EA, Amplitud (**A**), Duración (**D**), Tiempo de subida o Rise Time (**R**) y Número de Cuentas (**N**), se realizan distintos análisis para discriminar entre los dos tipos de probetas, con y sin recubrimiento superficial.

En la Tabla 3.17, se resume toda la información de los 12 ensayos realizados en cuanto a la cantidad de señales o eventos registrados. Se debe entender en cada caso:

- eventos **válidos**: aquellos que provienen de la zona de máxima concentración de tensiones y que no saturan en amplitud.
- eventos **anómalos**: aquellos en que la señal toma un único valor debido a ruido electrónico introducido por el equipo, resultando un tiempo de pico igual a cero.
- eventos que **saturan**: señales cuya amplitud se recorta por saturación en los amplificadores. La ganancia de los amplificadores se elige como una solución de compromiso para lograr que eventos de muy poca amplitud sean observados sin que saturen una gran cantidad de señales de mayor amplitud.
- Eventos **descartados**: aquellos que provienen de zonas externas a la de máxima concentración de tensiones; son las que detectan en primer lugar los sensores "guarda".

Además, para cada tipo de ensayo (5 con recubrimiento y 5 sin recubrimiento) , se calculan los valores promedios y los porcentajes que representan sobre el total de los eventos. A modo de ejemplo, se observa en la columna de los eventos que saturan para las probetas con recubrimiento superficial, que el porcentaje de estos eventos es mucho mayor que en el caso de probetas sin recubrimiento. Esto tiene que ver con las diferencias en amplitudes que se generan en uno y otro tipo de ensayo como se verá más adelante.

Para el ensayo cero (E0), no se registraron eventos por un problema ocurrido durante la adquisición de las señales.

ENSAYOS DE CALIBRACIÓN

Ensayo	Nº Eventos	Válidos	Anómalos	Saturan	Descartados
E0	-	-	-	-	-
E1	557	22	27	6	502

ENSAYOS CON RECUBRIMIENTO

Ensayo	Nº Eventos	Válidos	Anómalos	Saturan	Descartados
E2	524	176	177	99	72
E3	184	45	82	6	51
E4	386	135	126	50	75
E5	352	114	86	61	91
E6	376	118	172	13	73
Prom.	364.4	117.6	128.6	45.8	72.4
%	100	32.3	35.3	12.6	19.9

ENSAYOS SIN RECUBRIMIENTO

Ensayo	Nº Eventos	Válidos	Anómalos	Saturan	Descartados
E7	97	19	53	0	25
E8	287	95	114	13	65
E9	158	49	71	6	32
E10	220	34	108	6	72
E11	270	72	145	6	47
Prom.	206.4	53.8	98.2	6.2	48.2
%	100	26.1	47.6	3.0	23.4

Tabla 3.17 - Lista de todos los ensayos con la discriminación según el tipo de señales.

Para los eventos clasificados como válidos, en la Tabla 3.18, se listan los promedios de los parámetros principales de la señal: Amplitud (A), Duración (D), Rise Time (R) y Número de cuentas por evento (N).

Una inspección rápida de estos datos, calculando el promedio de los promedios, revela que para el caso de las probetas con recubrimiento superficial tanto el valor de la amplitud como la cantidad de cuentas es superior al caso de las probetas sin recubrimiento; en cambio la duración de las señales no muestra variaciones importantes.

Para representar en forma compacta y con mayor claridad al conjunto de datos de la Tabla 3.18, se disponen en un espacio tridimensional, los puntos correspondientes a tres de los parámetros de la tabla. De esta manera, se puede analizar de manera sencilla si existen diferencias entre los ensayos y cuales son los parámetros más importantes.

La elección de los parámetros óptimos para la representación surge de observar aquellos que presentan la máxima variación en el promedio. Se verifica que de los cuatro parámetros posibles, el que presenta menor variación porcentual entre los ensayos es la duración (D) de los eventos. Por lo tanto, se utilizan los tres restantes: la Amplitud (A), el Rise Time (R) y el número de Cuentas (N). En la Figura 3.64.a, se muestra la ubicación tridimensional de los parámetros para los dos tipo de ensayos, los que tienen recubrimiento superficial se representan con un símbolo (+), y los ensayos sin recubrimiento con un símbolo (∇). Además, se calcula el centroide para cada ensayo y se lo representa con color rojo.

ENSAYOS CON RECUBRIMIENTO

Ensayo	Duración [ms]	Cuentas	Amplitud [V]	Riste Time [ms]
E2	0.36	25.18	2.25	0.017
E3	0.31	20.56	1.95	0.011
E4	0.39	31.25	2.04	0.008
E5	0.35	32.41	1.95	0.015
E6	0.36	35.59	1.71	0.009
Promedio	0.35	29.00	1.98	0.012
Dispersión	0.03	6.04	0.20	0.004

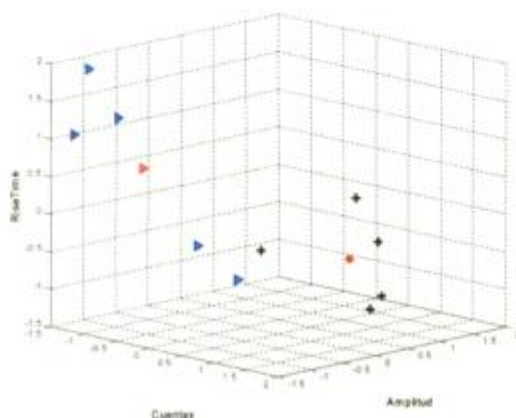
ENSAYOS SIN RECUBRIMIENTO

Ensayo	Duración [ms]	Cuentas	Amplitud [V]	Riste Time [ms]
E7	0.32	24.21	1.59	0.010
E8	0.37	18.59	1.20	0.029
E9	0.32	15.80	1.19	0.034
E10	0.32	16.32	1.07	0.027
E11	0.31	22.33	1.46	0.014
Promedio	0.33	19.45	1.30	0.023
Dispersión	0.02	3.70	0.21	0.010

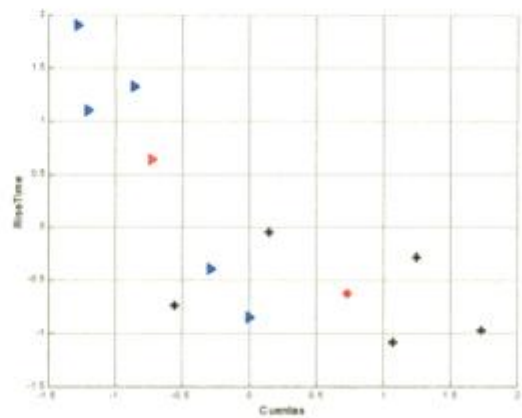
Tabla 3.18 – Promedio de los parámetros por ensayo.

La disposición tomada por los puntos en el espacio, revela que los ensayos se separan en diferentes conjuntos. Es importante recordar que cada punto corresponde al promedio de todos los eventos de un ensayo, hecho que demuestra la potencia de estos parámetros para la caracterización de cada ensayo.

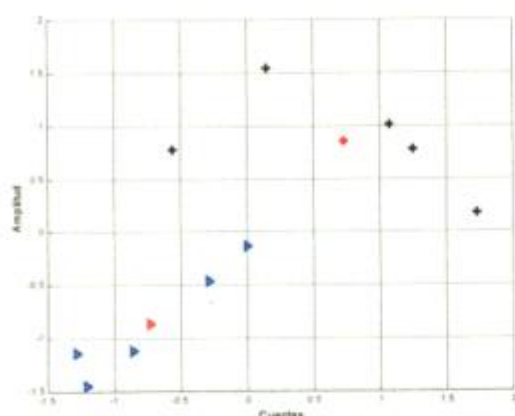
El análisis de los parámetros por pares, como en la Figura 3.64.b,c,d, indica que la amplitud es el parámetro que mejor separa a los ensayos. Para el caso de la cantidad de cuentas y para el Rise Time, no resulta tan clara la diferencia en algunas zonas. Sin embargo, la utilidad de esta representación se logra utilizando la conjunción de los tres parámetros.



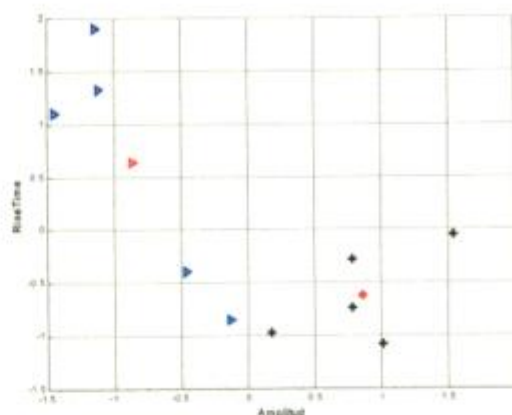
a. Vista en tres dimensiones



b. Rise Time vs. Cuentas



c. Amplitud vs. Cuentas



d. Rise Time vs. Amplitud

Figura 3.64 - Distintas vistas de los parámetros de los ensayos tipo herradura. Los símbolos 'V' en color azul representan a los ensayos sin recubrimiento superficial y los símbolos en color negro '+' a los ensayos con recubrimiento superficial. Los correspondientes símbolos del "centro de masa" de cada subconjunto se muestran en rojo. Los datos están estandarizados ya que sus unidades originales son diferentes; se toma la diferencia con el valor medio y se lo divide por la desviación estándar a cada parámetro.

Un enfoque levemente diferente, que aporta claridad a la representación tridimensional anterior, se logra construyendo esferas con un radio tomado desde el centroide de cada subconjunto hasta el punto más alejado de cada tipo de ensayo considerando además una dispersión del 20% para los datos. Esta nueva representación de los datos se muestra en la Figura 3.65; donde lógicamente, el rango de valores posibles de un ensayo no incluye todo el volumen de la esfera.

Se observa una menor variabilidad (menor radio) en los parámetros para los ensayos con recubrimiento superficial, indicando la diferencia intrínseca del tipo de fuente emisora. Así, la rotura del recubrimiento genera ondas directamente en la superficie en forma frágil y "explosiva" originando altos valores de amplitud por la menor atenuación, menores tiempo de pico (Rise Time) por la menor dispersión de las ondas y un mayor número de cuentas que implica una mayor frecuencia de la onda.

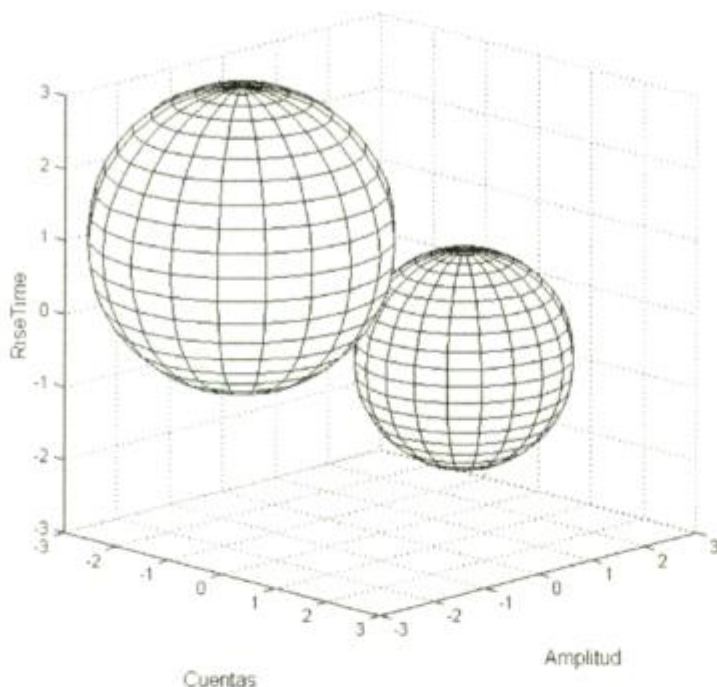


Figura 3.65 - Representación de los máximos volúmenes para cada tipo de ensayo. Las variables están estandarizadas y se considera una dispersión del 20% para cada tipo de ensayo. La esfera de radio menor representa el espacio de los ensayos con recubrimiento superficial, y la esfera mayor a los ensayos sin recubrimiento.

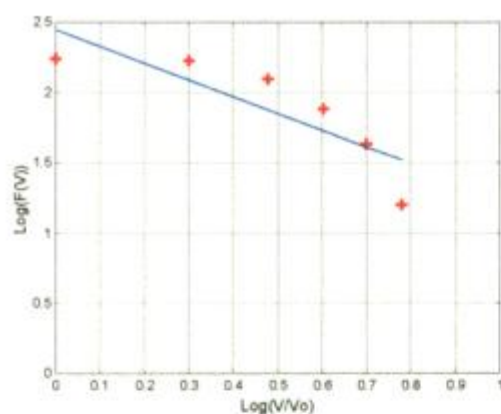
3.2.1 Distribución de la Amplitud

Como ya se mencionó, la amplitud es uno de los parámetros más importantes de las señales debido a su estrecha relación con la energía involucrada en el proceso de propagación de las ondas elásticas. En el capítulo 2, en el inciso de análisis de señales, se mostraron algunas distribuciones estadísticas para el ajuste de los datos experimentales. La elección de una de ellas, dependerá de la bondad en el ajuste obtenido. Se considera primero una distribución sencilla, que en muchos casos es suficiente para caracterizar ensayos de EA. Posteriormente, se avanza hacia otra distribución más compleja pero con mayor flexibilidad para el ajuste.

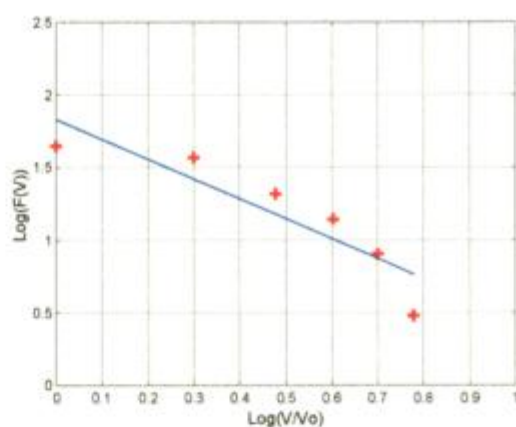
LEY POTENCIAL

Esta distribución, como se vio en el capítulo 1, caracteriza a los ensayos por una recta de pendiente negativa, cuyo valor depende del mecanismo que origine la emisión. Según el caso, se puede registrar más de un valor para dicha pendiente, lo que responde a la presencia de más de un mecanismo. Aquellos procesos que presenten bajos valores de amplitud, tendrán una pendiente mayor en relación con los ensayos que poseen altas amplitudes. Por lo visto hasta el momento, los ensayos con recubrimiento, presentan distribuciones de eventos con altos valores de amplitud, por lo que deberían tener un valor de pendiente menor en comparación con los ensayos sin recubrimiento.

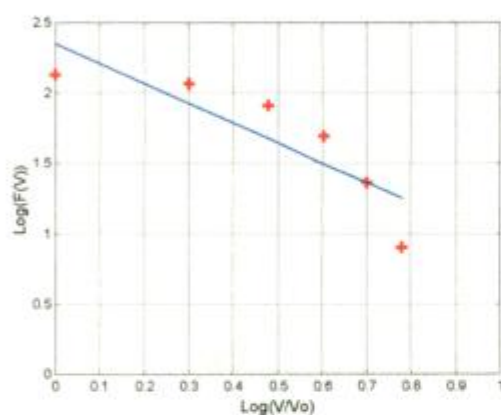
En la figura 3.66, para los ensayos con recubrimiento, se muestra la distribución de la amplitud y el ajuste de los datos según el criterio de los mínimos cuadrados.



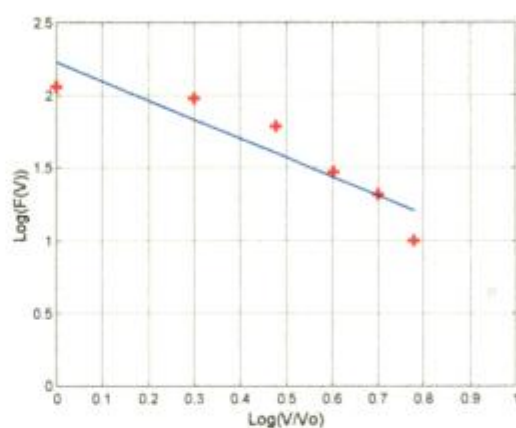
a. Ensayo E2



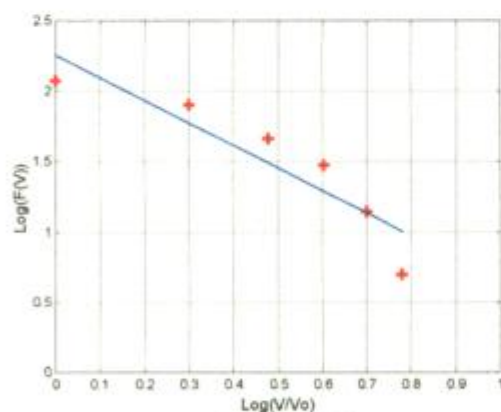
b. Ensayo E3



c. Ensayo E4



d. Ensayo E5



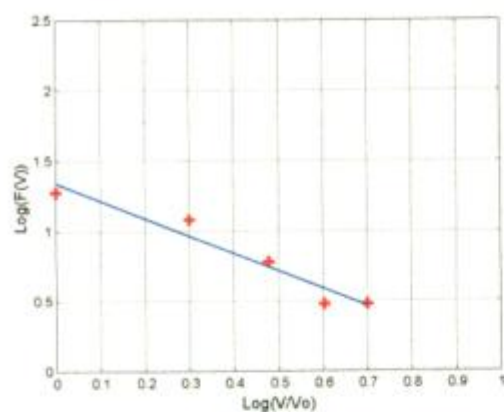
e. Ensayo E6

Ensayo	b	D
E2	-1.19	2.48
E3	-1.38	2.48
E4	-1.41	2.48
E5	-1.31	2.48
E6	-1.61	2.48
Promedio	-1.38	2.48

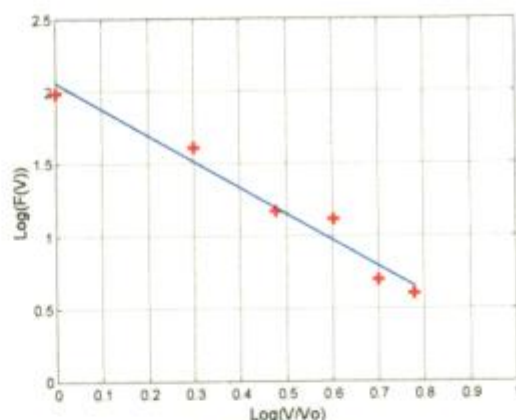
f. Tabla de valores de la pendiente b

Figura 3.66 - Distribución de Amplitudes para ensayos con recubrimiento superficial según la Ley de Distribución Potencial.

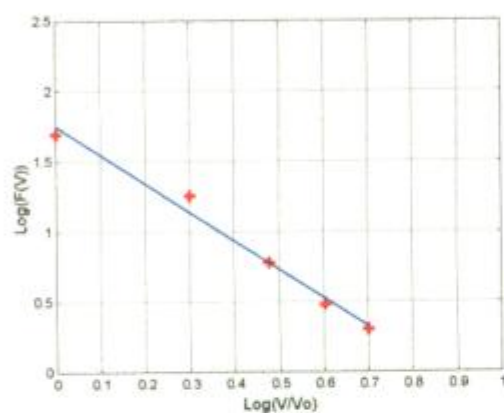
De manera análoga, para los ensayos sin recubrimiento, en la figura 3.67, se representa la distribución de la amplitud y el ajuste de una recta según mínimos cuadrados.



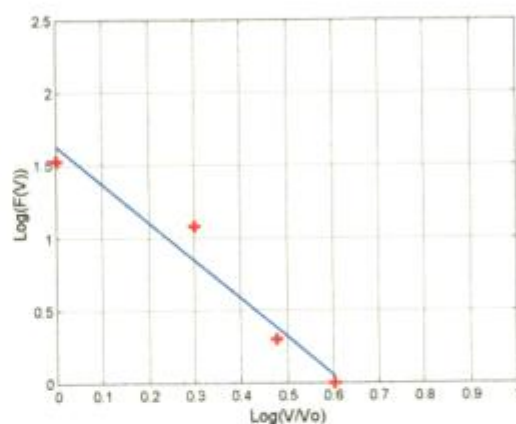
g. Ensayo E7



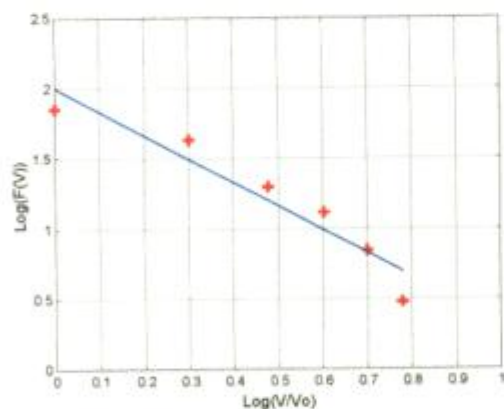
h. Ensayo E8



i. Ensayo E9



j. Ensayo E10



k. Ensayo E11

Ensayo	b	D
E7	-1.26	1.52
E8	-1.81	2.48
E9	-2.05	1.52
E10	-2.62	0.81
E11	-1.67	2.48
Promedio	-1.88	1.76

l. Tabla de valores de la pendiente b

Figura 3.67 - Distribución de Amplitudes para ensayos sin recubrimiento superficial según la Ley de Distribución Potencial.

Como se observa en los valores de las desviaciones de la recta de mínimos cuadrados, el ajuste según una ley de distribución potencial no es satisfactorio en el sentido de encontrar una tendencia lineal como describe el modelo. En los datos correspondientes a los ensayos con recubrimiento podría aproximarse a la curva por dos rectas como se muestra en la figura 3.68. Esto indicaría la presencia de más de un origen para las señales generadas, que concuerda con las características de este

ensayo, donde existe emisión por fuentes de volumen y emisión por la rotura superficial del recubrimiento. Sin embargo se elige la representación de una única recta para poder comparar el valor de la pendiente con los ensayos sin recubrimiento.

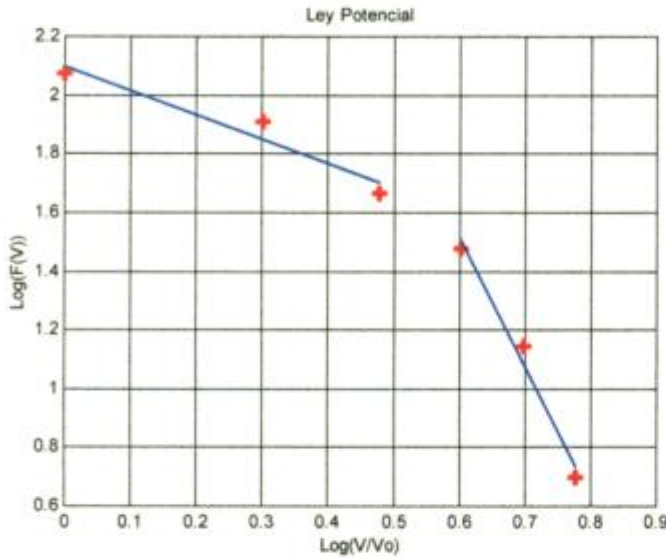


Figura 3.68 - Distribución de Amplitudes para Ensayos Con Recubrimiento Superficial (E6) según una Ley de Distribución Potencial. Ajuste según mínimos cuadrados para dos rectas. La primera $b = -0,82$ $D = 0,35$ y la segunda $b = -4,38$ $D = 0,05$.

Las curvas de los ensayos sin recubrimiento presentan un decaimiento monótono similar a una recta. Este resultado es producto de la emisión exclusivamente en el volumen del material. Esta diferencia cualitativa, tiene su correlación cuantitativa en los valores de las pendientes obtenidas, las cuales se muestran resumidas en las figuras 3.66.g y 3.67.i. Dicho resultado, era el esperado del análisis previo sobre las distribuciones de amplitudes según el tipo de ensayo considerado, los ensayos con recubrimiento tienen menor pendiente debido a los mayores niveles de amplitud.

LEY LOG-NORMAL

Ante la evidencia del pobre ajuste logrado por la Ley Potencial para los datos experimentales se buscan otros modelos. La distribución Log-Normal, ha sido ampliamente estudiada y probada en muchos experimentos de emisión acústica, en particular para ensayos similares a los aquí realizados.

En este caso, existen una gran cantidad de variables y efectos que no se conocen, aunque es posible hacer algunas hipótesis razonables. En principio, los defectos del material, que están estrechamente relacionados con los fenómenos de deformación y fractura microscópicos, se comportan en número, tamaño y ubicación de manera aleatoria. Estas propiedades, junto con las definidas en el inciso 1.7.2 (efecto multiplicativo de causas subyacentes, causas independientes y una gran cantidad de causas), permiten una descripción estadística de estos fenómenos físicos aplicable a estos ensayos.

En la figura 3.69, se muestra a modo de ejemplo, el ajuste de esta distribución a dos ensayos; uno de cada tipo. No se abunda en los detalles porque ya han sido estudiados previamente [2-3], solamente se presentan a modo de comprobación.

Para la medición de la bondad de ajuste se utilizaron los métodos de Kolmogorov-Smirnov y el método Chi-cuadrado [2-8].

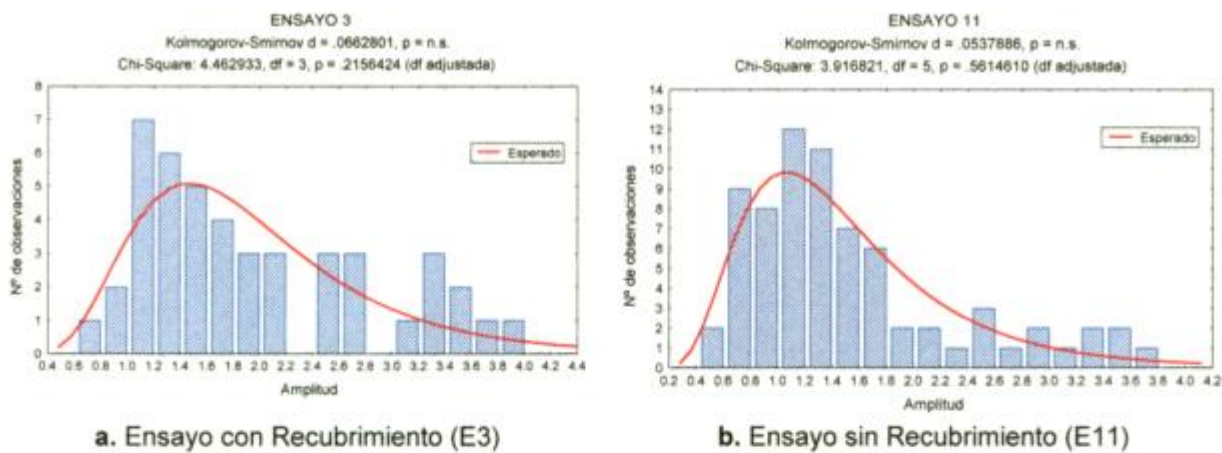


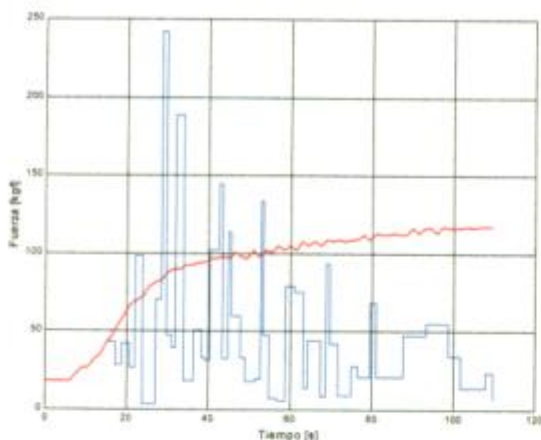
Figura 3.69 - Distribución de Amplitudes para dos ensayos representativos según distribución Log-Normal.

3.2.2 Parámetros Externos, Velocidad y Eventos Acumulados

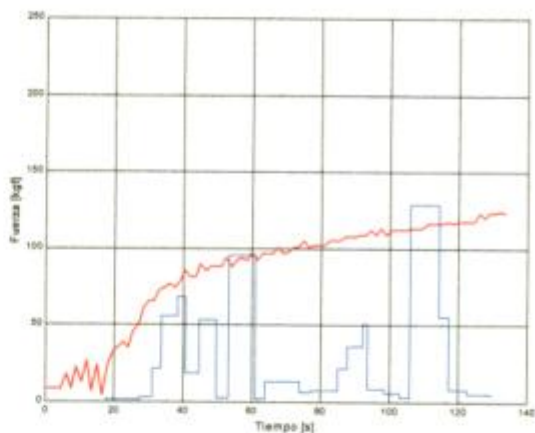
Al mismo tiempo que se parametrizan las señales de emisión acústica, se registran datos externos, como la fuerza realizada para la apertura de las probetas en función del tiempo. El estudio de esta magnitud, permite correlacionar la evolución de la carga mecánica con los parámetros originados por EA. Existen en la literatura ensayos que muestran diferentes comportamientos de la emisión en función de la carga aplicada. En muchos casos, se registra la máxima amplitud de emisión en el comienzo de la zona de fluencia del material. Sin embargo, estos datos originados por ensayos de tracción uniaxial no son comparables con los aquí realizados.

En la figura 3.70, se muestran dos ensayos representativos con la curva de fuerza-tiempo, y superpuesta la velocidad con que se producen los eventos de EA. En la parte a, se representa un ensayo con recubrimiento superficial y en la parte b, un ensayo sin recubrimiento.

En este caso, el comportamiento de la carga aplicada en función del tiempo es análoga para los dos tipos de ensayos. Se registran dos zonas marcadas por diferentes pendientes. La mayor cantidad de eventos se registra en la zona de deformación plástica a partir del punto de inflexión de las rectas antedichas.



a. Ensayo con recubrimiento (E4)



b. Ensayo sin recubrimiento (E11)

Figura 3.70 - Evolución de la fuerza aplicada en función del tiempo (rojo), superpuesta la velocidad de los eventos de emisión acústica originados (azul).

La presencia del recubrimiento, origina una alta actividad de emisión en la primera parte de la deformación plástica. La duración de la emisión está limitada por la cantidad de recubrimiento disponible para la rotura, cuando todo el recubrimiento ha sido roto, la contribución a la emisión es únicamente proveniente del volumen del material.

Para el ensayo sin recubrimiento, la emisión también comienza en la zona de deformación plástica, pero con una menor cantidad de eventos por unidad de tiempo y distribuidos en forma más homogénea a lo largo del ensayo.

Otro estudio típico utilizado en la EA, es la distribución de los eventos acumulados en función del tiempo. Una muestra para dos casos representativos se expone en la figura 3.71. La curva que registra mayor número de eventos corresponde a un ensayo con recubrimiento superficial.

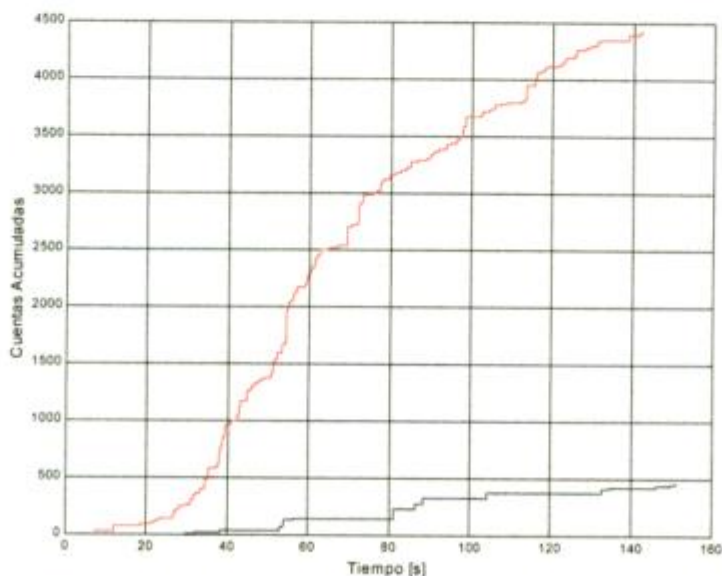


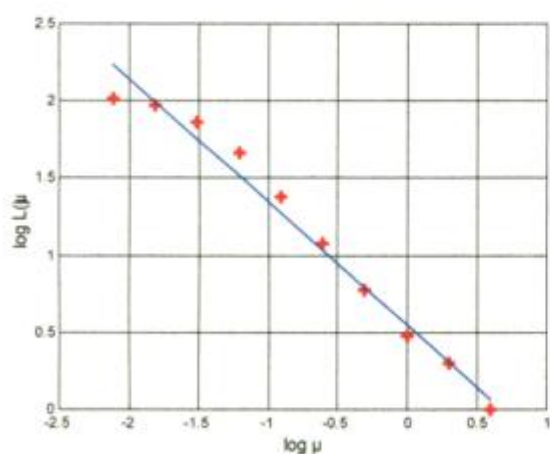
Figura 3.71 - Eventos Acumulados de EA en función del tiempo del ensayo. La curva superior corresponde a un ensayo con recubrimiento (E2) y la curva inferior a un ensayo sin recubrimiento (E7).

Ambos tipos de curvas de distribución acumulada muestran el mismo comportamiento general; en el comienzo, se registra un aumento de la velocidad de emisión hasta que se alcanza un punto de inflexión a partir del cual se registra un aceleración negativa. El punto más significativo está en la intensidad de la velocidad de cambio de las pendientes, que corresponden a los diferentes mecanismos que originaron la emisión. Los ensayos con recubrimiento registran una alta actividad en las primeras etapas de la deformación, lo que explica la alta pendiente de la curva, disminuyendo luego, cuando sólo existe emisión del volumen. En el otro caso, la emisión muestra un comportamiento más monótono, creciendo a un ritmo menor a lo largo de todo el ensayo.

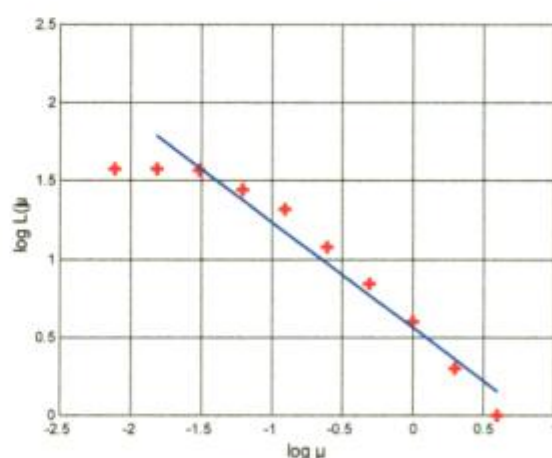
3.2.3 Dimensión Fractal

Lo mismo que para la ley potencial, el parámetro seleccionado para aplicar esta técnica, es la amplitud de las señales. Recordando que en el análisis de la dimensión fractal se utilizarán fenómenos puntuales, los valores de amplitud, representan puntos sobre una recta desde el umbral de detección hasta la máxima amplitud posible de 4 V (μ_2). El paso mínimo μ_1 se determinó en 0,01 V que es la máxima resolución en amplitud del equipo.

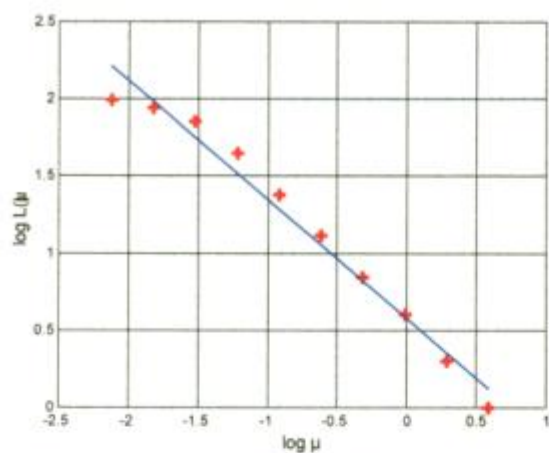
Para los dos tipos de ensayos se realizó el cálculo de la dimensión fractal lo que se muestra en la figuras 3.72 y 3.73. El cálculo determina dos valores diferentes de pendientes, que distinguen a los ensayos con recubrimiento de los ensayos sin recubrimiento. En las figuras se representa el logaritmo de la suma de los eventos registrados para una dada longitud de intervalo μ , versus el logaritmo de dicha longitud de medición μ ; es decir $\log(L(\mu))$ vs. $\log(\mu)$.



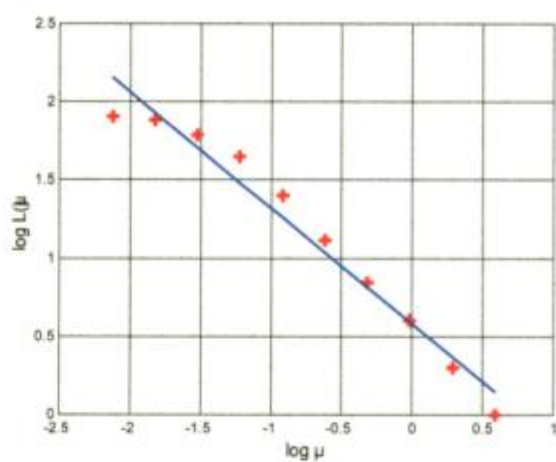
a. Ensayo E2



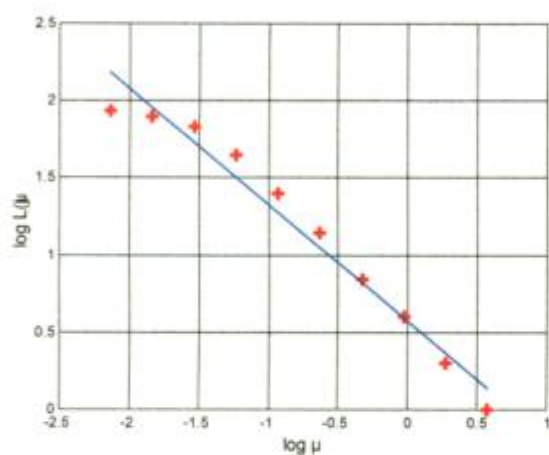
b. Ensayo E3



c. Ensayo E4



d. Ensayo E5

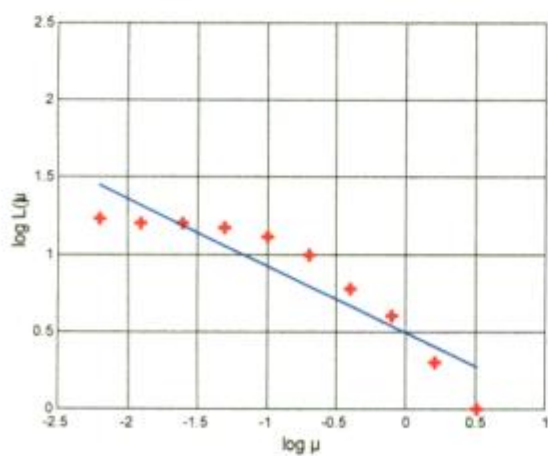


e. Ensayo E6

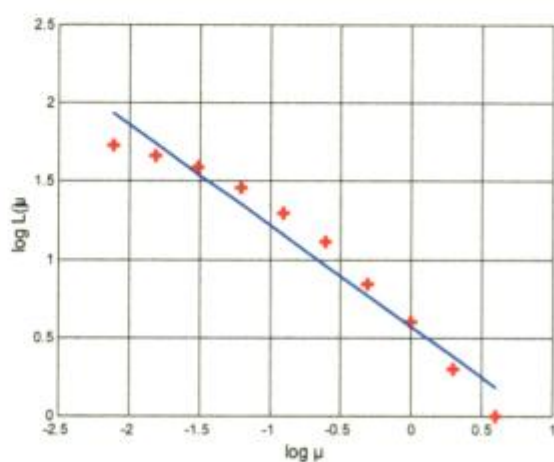
Ensayo	b
E2	-0.80
E3	-0.68
E4	-0.77
E5	-0.74
E6	-0.75
Promedio	-0.75

f. Tabla de valores de la pendiente b

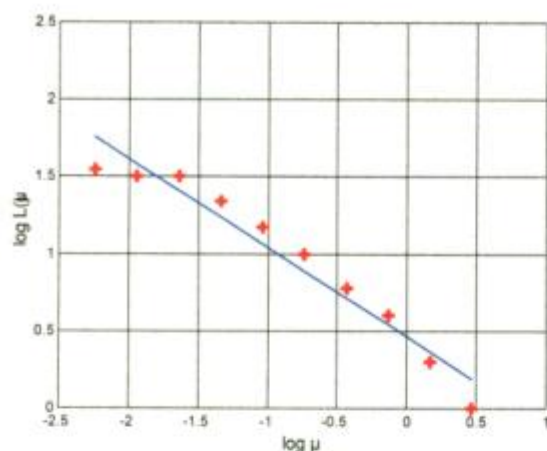
Figura 3.72 - Cálculo de la Dimensión Fractal de la amplitud para probetas con recubrimiento superficial. Figuras a. b. c. d. e. f.



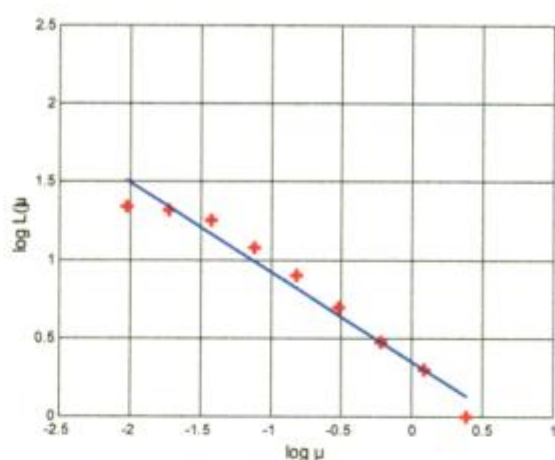
g. Ensayo E7



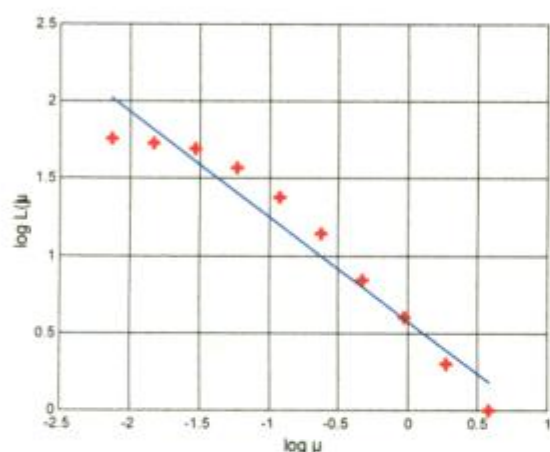
h. Ensayo E8



i. Ensayo E9



j. Ensayo E10



k. Ensayo E11

Ensayo	b
E7	-0.44
E8	-0.65
E9	-0.58
E10	-0.57
E11	-0.68
Promedio	-0.58

l. Tabla de valores de la pendiente b

Figura 3.73 - Cálculo de la Dimensión Fractal de la amplitud para probetas sin recubrimiento superficial. Figuras g. h. i. j. k. l.

En el cálculo de la pendiente de la recta por mínimos cuadrados se omite la referencia a la dispersión de los resultados por ser muy similares los valores registrados para los dos tipos de ensayos.

Resulta difícil extraer conclusiones definitivas del valor obtenido para la dimensión fractal de uno y otro tipo de ensayos por la proximidad entre sus valores. Aunque existe una tendencia hacia una mayor "aleatoriedad" en los ensayos que presentan recubrimiento, mostrado por la mayor proximidad a "1" de la dimensión fractal calculada. Esto indica que la rotura del recubrimiento es un fenómeno que depende más débilmente de la historia del ensayo, tiene menos "memoria". En cambio, para los ensayos donde no existe recubrimiento, las causas que originan la emisión están más íntimamente ligadas. Sin embargo, todavía debe estudiarse con mayor profundidad estos efectos para tener conclusiones más sólidas.

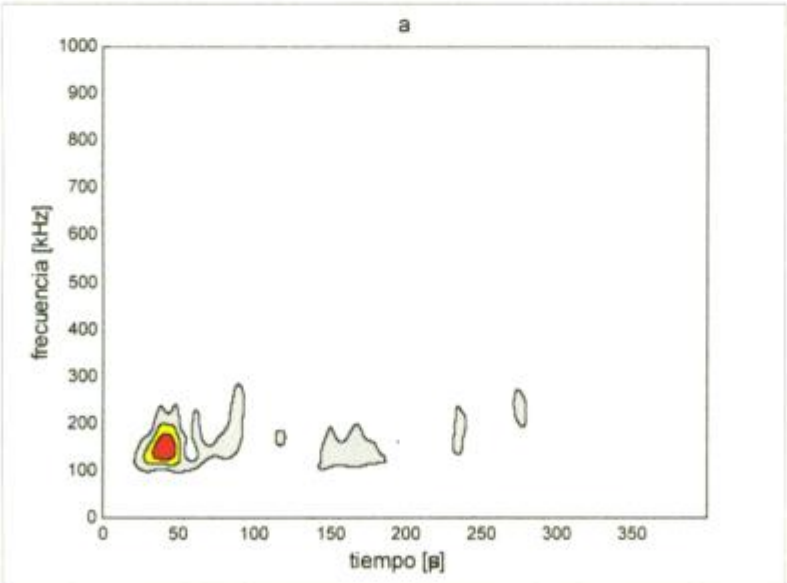
3.2.4 Diagramas TFE

Otro enfoque para el análisis de los ensayos con probetas tipo herradura es el estudio de los diagramas TFE, calculados a partir de la transformada Wavelet. Con esta herramienta se puede estudiar el comportamiento en tiempo y en frecuencia de las señales originadas durante los ensayos. Según lo visto en el inciso 3.2.1 para el estudio general de los parámetros, cada tipo de ensayo presenta diferencias de amplitud, número de cuentas y tiempo del pico. Como estos parámetros son parte de la señal total generada por EA, se espera que a partir de la señal completa pueda extraerse más información sobre el tipo de ensayo.

Durante los ensayos de deformación se digitalizaron algunas señales de los eventos de EA generados. El total de señales digitalizadas por ensayo fue mucho menor que la cantidad de eventos parametrizados, debido a la baja velocidad de transferencia hacia el medio de almacenamiento.

Se obtuvieron entre dos y cuatro señales por ensayo; lo que no permite un estudio completo y detallado. Sin embargo, se manifiestan diferencias en los diagramas correspondientes a los ensayos con recubrimiento superficial de aquellos que no lo poseen. A estas señales digitalizadas se les calculó la transformada Wavelet para los primeros 1000 puntos.

En la figura 3.74 se muestran dos tipos de diagramas TFE característicos, que representan las morfologías típicas encontradas en los ensayos. En la parte "a" de la figura se muestra un diagrama TFE correspondiente a una señal generada durante los ensayos de deformación de probetas sin recubrimiento; aunque también se registra este tipo de señales en los ensayos de probetas con recubrimiento. En cambio, en la parte "b" de la figura 3.74 se muestra un diagrama TFE encontrado en las señales provenientes de los ensayos con recubrimiento superficial.



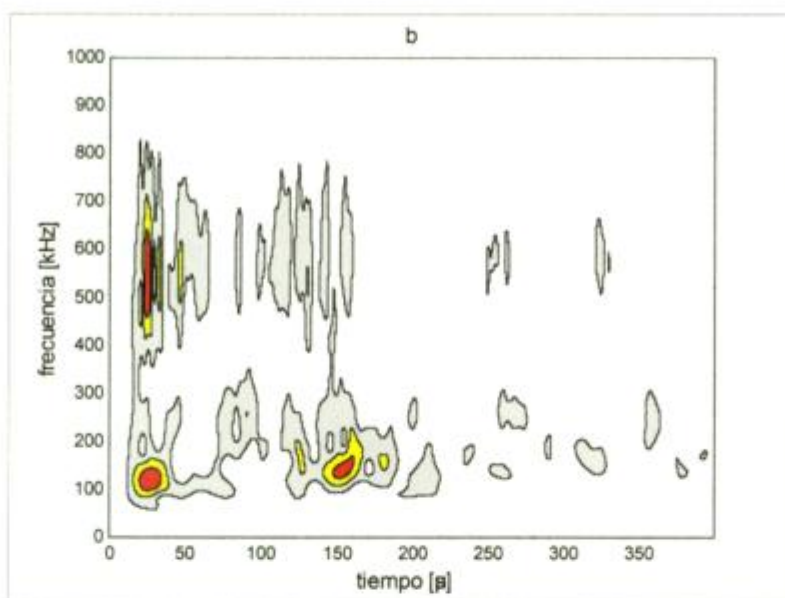


Figura 3.74 – Diagramas TFE a partir de las señales generadas durante la deformación de probetas tipo herradura. **a.** Diagrama obtenido en los dos tipos de ensayo **b.** Diagrama obtenido en los ensayos con recubrimiento superficial.

Esta distinción entre los diagramas obtenidos según el tipo de ensayo, permite conjeturar que el diagrama de la parte "b" de la figura 3.74 corresponde a una señal generada por la rotura de la capa de recubrimiento superficial. Otro argumento a favor de esta conclusión está en la observación del mayor contenido de frecuencias en el diagrama de la señal de la parte "b" con respecto a la de la parte "a". Esto concuerda con los resultados obtenidos para los parámetros de la señal en el inciso 3.2.2, donde las señales provenientes de los ensayos con recubrimiento poseen mayor número de cuentas para la misma duración del evento, lo que implica una mayor frecuencia de la señal.

Hasta aquí es importante lo que sucede en la primera parte de los diagramas. Es allí donde se definen las características de las fuentes. El resto de las "manchas" presentes en los diagramas corresponden a las trayectorias y reflexiones sufridas por las ondas en la geometría particular de estas probetas. A los efectos de entender estas reflexiones y caminos de propagación, se estudia en primer lugar la propagación de ondas en una geometría tipo anillo de las mismas características que las probetas tipo herradura. El análisis se hace mediante la superposición de las curvas de dispersión teóricas, calculadas para una placa del mismo espesor, sobre el diagrama TFE correspondiente a la señal generada. La emisión fue simulada en la superficie, mediante una fuente tipo Hsu-Nielsen. En el capítulo 2 se muestra en la figura 2.7 la ubicación de la fuente y del sensor sobre la superficie de la probeta tipo anillo.

Para una probeta tipo anillo se deberían utilizar estrictamente las curvas de dispersión correspondientes a esta geometría [3-15] [3-16]. Sin embargo se utilizan las curvas de dispersión calculadas para una placa y se analiza la factibilidad de dicha aproximación. En la figura 3.75, se muestran tres diagramas correspondientes a una distancia fuente-sensor de 50 mm en la parte "a"; de un cuarto del perímetro, 110 mm, en la parte "b"; y de la mitad del perímetro en la parte "c". Además sobre la figura se superponen los modos principales para las trayectorias calculadas según una propagación en el sentido circunferencial.

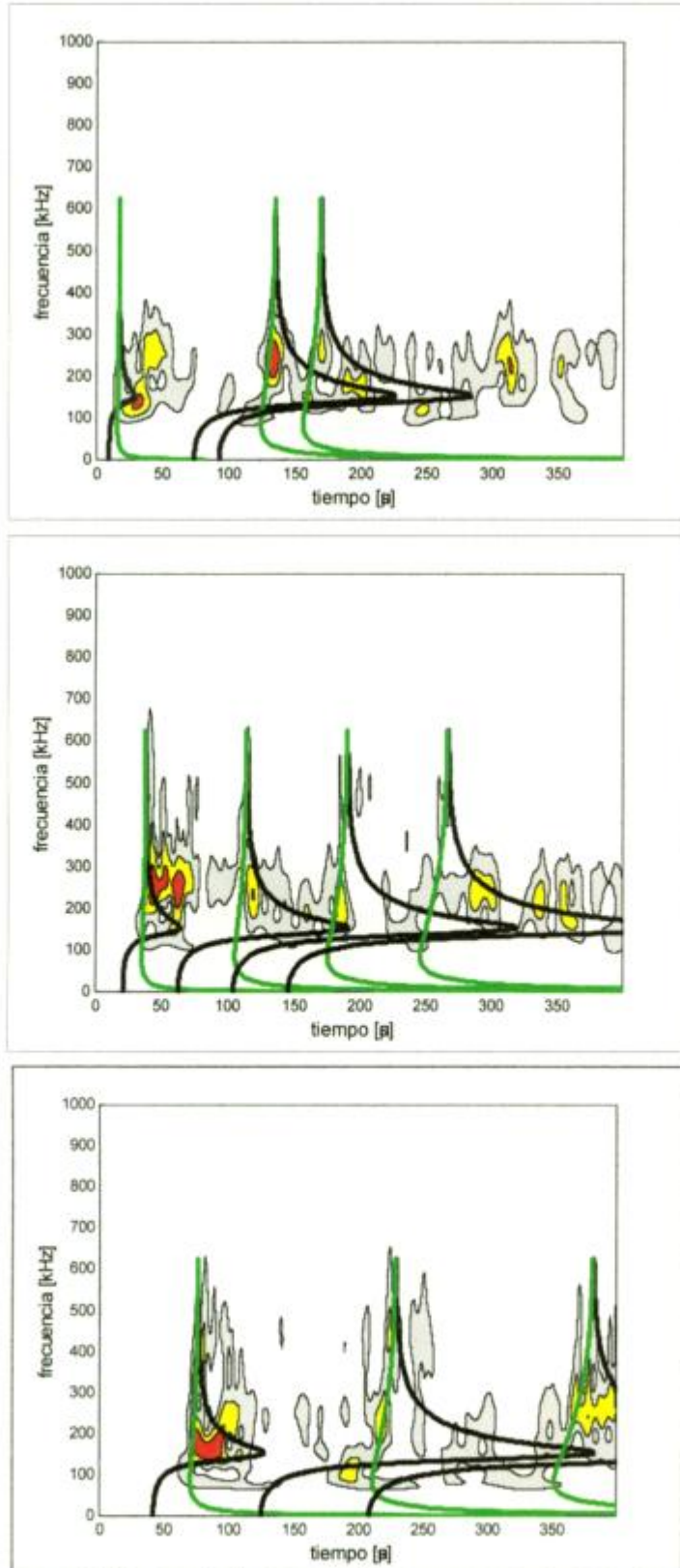


Figura 3.75 – Diagramas TFE a partir de las señales generadas por una fuente simulada sobre la superficie de las probetas tipo anillo (espesor 16 mm, ancho 20 mm, diámetro 140 mm). **a.** Distancia Fuente-Sensor 50 mm. Longitudes de Trayectorias: 50, 390, 490 mm. **b.** Distancia Fuente-Sensor 110 mm. Longitudes de Trayectorias: 110, 330, 550, 770 mm. **c.** Distancia Fuente-Sensor 220 mm. Longitudes de Trayectorias: 220, 660, 1100 mm

Se observa que la superposición de las curvas de dispersión sobre el diagrama TFE ajusta una buena parte de la distribución de energía, aunque quedan grandes zonas donde no es posible asignar ningún camino de propagación de los previstos según esta aproximación. A modo de comparación, en el inciso 3.17 correspondiente al ensayo 2 para el tubo I, se presenta la misma distancia fuente-sensor con la única diferencia en la longitud de la probeta.

De lo anterior se concluye, que con esta aproximación es posible asignar a las principales zonas de un diagrama TFE los caminos de propagación seguidos por las ondas. La deficiencia en el poder de ajuste para todo el diagrama se debe a las diferencias que introduce una longitud de probeta del mismo orden de magnitud que su espesor; condiciones alejadas del modelo previsto para un tubo infinito.

El siguiente paso es analizar el diagrama TFE para una señal proveniente de una probeta tipo herradura generada durante un ensayo de deformación triaxial. En este caso existen nuevas condiciones de contorno para la propagación, como extremos libres y cambios de espesor. En la figura 3.76 se muestra el diagrama TFE de una señal generada durante un ensayo de deformación de una probeta tipo herradura en la zona de máxima deformación. La distancia entre fuente y sensor es de aproximadamente 50 mm. Sobre la figura se superponen dos longitudes de propagación correspondientes a 50 mm y a 276 mm que corresponden respectivamente a un camino directo y a un camino con reflexión en el extremo libre de la probeta soportado por la mordaza 1, el lado más alejado de la manija de apertura (ver figura 2.10).

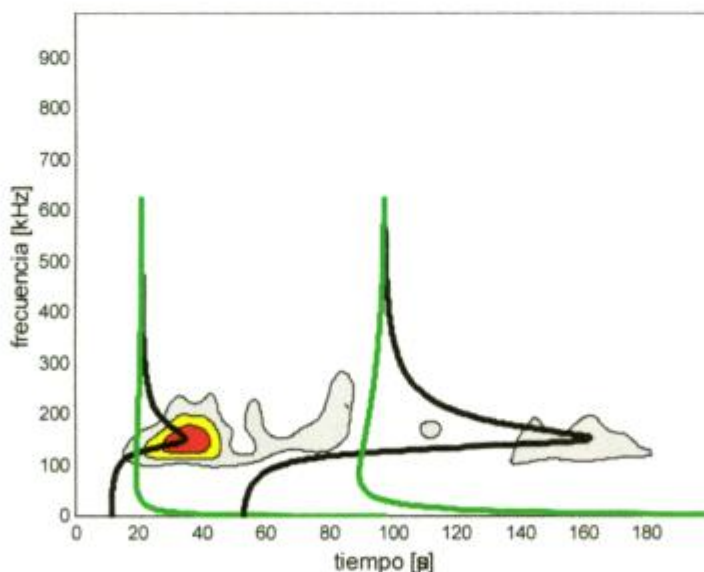


Figura 3.76 – Diagramas TFE a partir de las señales generadas durante la deformación de probetas tipo herradura. Camino directo: 50 mm. Camino con reflexión en un extremo: 276 mm. Modo A_0 en verde. Modo S_0 en negro.

El resultado de la superposición muestra que para el modo S_0 se localizan zonas del diagrama que corresponden a los caminos previstos según la aproximación para tubos. Como se dijo, la geometría de las probetas tipo herraduras se aparta considerablemente de la idealización hecha para los tubos; sin embargo es posible seguir utilizando esta aproximación en la identificación de algunas zonas de los diagramas TFE [3-17].

4 CONCLUSIONES

Este trabajo se dividió en dos etapas. La primera fue un estudio de la propagación de ondas elásticas en materiales isótropos con geometría cilíndrica hueca, a través de una técnica novedosa, que combina el análisis de las señales experimentales con las soluciones teóricas de propagación de ondas. La segunda etapa consistió en la caracterización y distinción entre dos tipos de ensayos de deformación en probetas de acero con distintas características superficiales; probetas con un recubrimiento delgado en la superficie y otras sin dicho recubrimiento.

Se presentan las conclusiones según el tipo de experimento con el fin de lograr mayor claridad en la exposición. Se designan como probetas tipo "tubo" y probetas tipo "herradura".

Probetas tipo Tubo:

En estos ensayos se aplicó exitosamente una nueva técnica para el estudio de la propagación de ondas elásticas basada en la superposición de las curvas teóricas de dispersión sobre diagramas Tiempo-Frecuencia-Energía (TFE) calculados por la transformada Wavelet a partir de señales experimentales.

Se realizaron de manera sistemática, cinco estudios experimentales sobre diferentes geometrías cilíndricas huecas aplicando la técnica de superposición de curvas de dispersión sobre los diagramas TFE.

Se propuso y verificó un modelo sencillo para la propagación de ondas en un medio isótropo con simetría cilíndrica que incluye la posibilidad de reflexiones en los extremos o discontinuidades de los tubos.

Dentro del modelo, se establece la propagación de las ondas de acuerdo a caminos rectos y helicoidales con distintos pasos; aunque todos los caminos se pueden considerar "rectos".

Las curvas de dispersión teóricas calculadas para una geometría cilíndrica se compararon con las curvas de dispersión calculadas para una placa del mismo espesor, lográndose un muy buen ajuste a partir de un valor de frecuencia mínimo. La utilidad de esta aproximación radica en la sencillez relativa del cálculo para una geometría plana en comparación con el cálculo para una geometría cilíndrica.

Sobre los diagramas experimentales se superpusieron los dos primeros modos de propagación de las curvas de dispersión de placas. Estos dos modos fueron suficientes para describir la morfología de la totalidad de los diagramas TFE de acuerdo a las trayectorias calculadas por el modelo.

Se verificó que la energía de las ondas no se distribuye en forma homogénea en todo el rango de frecuencias que abarcan los modos, y que los distintos modos concentran la energía en diferentes regiones características. Esto permite en

algunos casos identificar fácilmente las componentes de energía que corresponden a uno u otro modo, de gran utilidad para la caracterización de las fuentes de emisión.

La superposición y coincidencia de trayectorias de propagación para las ondas, introduce efectos de interferencia que se registran en los diagramas como zonas de mayor intensidad (interferencia constructiva) o zonas de muy baja intensidad (interferencia destructiva). Solamente en la zona del primer arribo de la onda no se registran este tipo de fenómenos.

Se encontró que dependiendo de las condiciones de contorno de los tubos se introducen efectos nuevos sobre los modos de propagación. La presencia de una entalla en la trayectoria de propagación o un cordón de soldadura modifican la distribución de energía y las trayectorias de propagación.

En los ensayos donde se utilizó una fuente localizada de calor no se detectaron los efectos predichos por la teoría de la termoelasticidad, sin embargo se comprobó que los resultados podrían estar ocultos por la gran variabilidad en la fuente simulada de EA.

Probetas tipo Herradura:

Estos ensayos introducen nuevos enfoques de análisis que complementan los ya realizados en trabajos anteriores [2-3].

Según un análisis estadístico de los parámetros típicos de las señales de EA se lograron diferenciar en un espacio definido por la Amplitud (A), el Rise Time (R) y el Ring Down (N) los dos tipos de ensayos en regiones claramente separadas. En este trabajo se introdujo el parámetro del "Ring Down" por la estrecha relación que guarda con la frecuencia de la señal. Para las señales provenientes de los ensayos de probetas con recubrimiento superficial, se observó un mayor valor de amplitud, un menor tiempo de pico y un mayor número de cuentas por evento (Ring Down) en comparación con los ensayos de probetas sin recubrimiento. Estas características reflejan el comportamiento frágil y "explosivo" de la rotura del recubrimiento en la superficie del material.

Para el parámetro Amplitud de la señal se estudió una distribución estadística simple denominada Ley Potencial. De esta distribución se obtuvo el valor de la pendiente de una recta que describe al proceso. Se obtuvieron valores de pendientes claramente diferentes para los dos tipos de ensayos que permitió separarlos según este valor. En el caso de los ensayos con recubrimiento superficial se observó que los datos se ajustan mejor según dos rectas con pendientes diferentes; esto indica más de un proceso de emisión como es el caso de la emisión originada en el volumen y la emisión por la rotura del recubrimiento superficial. Se verificó también, en acuerdo con trabajos previos, que el modelo de una distribución Log-Normal se ajusta a los datos de estos ensayos.

Se realizó el cálculo de la dimensión fractal para las amplitudes de ambos ensayos obteniendo tendencias diferentes. Para el caso de las probetas con recubrimiento superficial se obtuvo un valor de la dimensión fractal tendiente a "1" lo que indica un

comportamiento más aleatorio en la evolución de la rotura, las etapas que gobiernan la fractura del recubrimiento están poco correlacionadas. En cambio para las probetas sin recubrimiento se obtuvo un menor valor para la dimensión fractal, indicando que los eventos que se producen en el volumen tienen algún tipo de "memoria".

Finalmente, se aplicó a las señales obtenidas experimentalmente la transformada Wavelet. En los diagramas TFE obtenidos se observó que los resultados concuerdan con los obtenidos para los parámetros individuales de la señal. Además se utilizó la aproximación de las curvas de dispersión calculadas para placas aplicadas a la geometría de estas probetas. Mediante esta aproximación se logró explicar la estructura de los diagramas TFE como un evento principal y sucesivos eventos reflejados en los extremos de la probeta.

Propuestas Para El Futuro

Para las probetas tipo herraduras se propone:

- Utilizar superficies oxidadas o corroídas similares a las que se encuentran en ambientes industriales con distintas características (espesor, morfología, etc).
- Continuar los análisis estadísticos con herramientas más potentes para la identificación de los eventos. Por ejemplo el método de las componentes principales (en proceso).

Para las probetas tipo tubos se propone:

- Utilizar distintos tipos de fuentes en la simulación de los eventos, incluyendo una fuente controlada.
- Analizar los efectos de otras discontinuidades de manera sistemática.
- Evaluar la factibilidad de utilizar la técnica para la localización de eventos con menor número de sensores.
- Profundizar el estudio de la transformada Wavelet.

BIBLIOGRAFÍA

CAPÍTULO I

- [1-1] Nondestructive Testing Handbook – Volume 5 - "Acoustic Emission Testing" – R. Miller Editor - Second Edition.
- [1-2] HEIPLE, CARPENTER – "Acoustic Emission Produced by Deformation of Metals and Alloys-A review: Part I" – Journal of Acoustic Emission – Vol. 6 – Nº 3 – pp. 177-204.
- [1-3] HEIPLE, CARPENTER – "Acoustic Emission Produced by Deformation of Metals and Alloys-A review: Part II" – Journal of Acoustic Emission – Vol. 6 – Nº 4 – pp. 215-237.
- [1-4] SCRUBY, C. B. – "An Introduction to acoustic emission" – J. Physics E – Vol. 20 - 1987 – pp. 943-953.
- [1-5] KEN ICHI – KATSUMI – "Microscopic Aspects of Fracture and Acoustic Emission" – Kawasaki Steel Corp. – Reserch Laboratories .
- [1-6] ACHENBACH, J. D. – "Wave propagation in elastic solids" – North Holland – 1973 – New York – 425 pp.
- [1-7] HARKER A. H. – "Elastic waves in solids (with applications to nondestructive testing of pipelines)" – British Gas – 1988 – Bristol – 230 pp.
- [1-8] LORD H. W., SHULMAN Y. – "A generalized theory of thermoelasticity" – Journal Mech. Phys. Solids – 1967 – Vol. 15 – 299-309 pp.
- [1-9] HETNARSKI, R. B. – IGNACZK, J. – "Nonclassical dynamical thermoelasticity" - Int. Journal of Solids and Structures – Vol. 37 – 2000 – 215-224 pp.
- [1-10] WANG, X. – "Thermal Shock in a Hollow cylinder caused by rapid arbitrary Heating" – Journal of Sound and vibration – Vol. 183 – N 5 – 1995 – 889-906 pp.
- [1-11] SCOTT, IAN G. – "Basic acoustic emission" – Gordon & Breach – 1991 – 246 pp.
- [1-12] POLLOCK, Adrian A. – "Acoustic Emission Amplitude Distribution" – Dunegan/Endevco – 215-239 pp.
- [1-13] POLLOCK, Adrian A. – "Acoustic Emission – 2" – Non Destructive Testing – Oct. 1973 – 264-269 pp.
- [1-14] BURY, KARL. V. – "Statistical Models in Applied Science" - John Wiley & Sons – 1975 - 625 pp.
- [1-15] TURCOTTE, DONALD L. – "Fractal and Chaos in geology and geophysics" – Cambridge Univ. Press. – 1992 – 221 pp.
- [1-16] BARAT, P. – "Fractal characterization of Ultrasonic Signals from Polycrystalline Materials" – Chaos, Solitons & Fractals – Vol. 9 – No. 11 – 1998 - pp. 1827-1834.
- [1-17] STACH, S. – CYBO, J. – "Multifractal description of fracture morphology: theoretical basis" – Materials Characterization – No. 51 – 2003 – pp. 79-86.
- [1-18] GREGORY, GIOVANNI P. – PAPARO, GABRIELE – " Acoustic Emission – A diagnostic tool for enviromental sciences and for non-destructive tests (with a potential application to

gravitational antennas) – Meteorological and Geophysical fluid dynamics – Wilfried Schröder (ed.) – Bremen – 2004 .

- [1-19] SERRANO, EDUARDO P. – "Introducción a la Transformada Wavelet y sus aplicaciones al procesamiento de señales de emisión acústica" – Escuela de Ciencia y Tecnología – Universidad Nacional de General San Martín – Argentina.
- [1-20] SUZUKI, KINJO, HAYASHI, TAKEMOTO, ONO – Wavelet Transform of Acoustic Emission Signals" – Journal of Acoustic Emission – Vol. 14 – Nº 2 – 69-84 pp.
- [1-21] DRAI, KHELIL, BENCHALA – "Time frequency and wavelet transform applied to selected problems in ultrasonics NDE" – NDT&E International – Vol. 35 – 2002 – 567-572 pp.
- [1-22] COHEN, LEON – "Time-Frequency Distributions, a review" - Proc. of IEEE – Vol. 77 – NO. 7 – July 1989 – 941-981 pp.
- [1-23] MARCHANT, B. P. – "Time-Frequency Analysis for Biosystems Engineering" – Biosystems Engineering – Vol. 85 – Nº 3 – 2003 – pp. 261-281.

CAPÍTULO II

- [2-1] PROSSER, W. H.- SCALE, M. D. – "Time-Frequency analysis of the dispersion of Lamb modes" – Journal of Acoustic Society of America – Vol. 105 (5) – 1999 – pp. 2669-2676.
- [2-2] COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA – Documento Técnico CNEA.C.RCN.MUS.0XX – UA. Reactores y Centrales Nucleares – 2002 – Argentina.
- [2-3] LÓPEZ PUMAREGA, MARÍA ISABEL – "Estudio de la emisión acústica generada por deformación en tubos, sus fuentes y características" – Tesis de Doctorado – Universidad de Buenos Aires – Argentina – Mayo de 1999.
- [2-4] IRAM 779 Norma Argentina – "Ensayo por emisión acústica" – Terminología - 2003
- [2-5] www.vallen.de
- [2-6] www.mathworks.com
- [2-7] www.iai.csic.es/users/fseco/pcdisp.htm
- [2-8] www.statsoftinc.com

CAPÍTULO III

- [3-1] PROSSER, W. H. – SEALE, M. D – "Time-frequency analysis of the dispersion of Lamb modes" – Journal of Acoustical Society of America – Vol. 105 – N 5 – May 1999 – 2669-2676 pp.
- [3-2] NIETHAMMER-JACOBS-QU-JARZYNSKI – "Time-frequency representation of Lamb waves using reassigned spectrogram" – Acoustic Research Letters Online – March 2000 – 19-24pp.
- [3-3] VALLEN, H. – VALLEN, J. – "Free of cost software tools generate dispersion curves, perform wavelet transform and help to correlate both kinds of information" – Vallen Systeme - Germany
- [3-4] GAZIS, Denos A. – "Three-Dimensional Investigation of the Propagation of Waves in Hollow Circular Cylinders" – Parte I y II - Journal of Acoustical Society of America – Vol. 31 – Número 5 - Mayo, 1959 – 568-578 pp.

- [3-5] HERRMANN, G. y MIRSKY, I. – "Three Dimensional and Shell-Theory Analysis of Axially Symetric Motions of Cylinders" – Journal of Applied Mechanics – Diciembre, 1956 – 563-568 pp.
- [3-6] ROSE, DITRI, PILARSKI, RAJANA y CARR - "A Guided Wave Inspection Technique for Nuclear Tubing" - NDT&E International - Vol. 27 - Número 6 - 1994 - 307-310pp.
- [3-7] ROSE, KRISHNA, RAJANA y CARR - "Ultrasonic Guided Wave Inspection Concepts for Steam Generator Tubing" - Materials Evaluation - Febrero 1994 - 307-311pp.
- [3-8] ROSE, JOSEPH L. - "A Baseline and Vision of Ultrasonic Guided Wave Inspection Potential" - Journal of Pressure Vessel Technology - Vol.124 - Agosto 2002 - 273-282pp.
- [3-9] ALLEYNE y CAWLEY - "The Excitation of Lamb Waves in Pipes Using Dry-Coupled Piezoelectric Transducers" - Journal of Nondestructive Evaluation - Vol. 15 - Número 1 - 1996 - 11-20 pp.
- [3-10] ALLEYNE, PAVLAKOVIC, LOWE y CAWLEY - "Rapid Long Range Inspection of Chemical Plant Pipework Using Guided Waves" - NDT-net
- [3-11] PAVLAKOVIC, BRIAN N. – "Leaky guided Ultrasonic Waves in NDT" – Doctoral Thesis – University of London - Imperial College of Science – 1998.
- [3-12] HAMSTAD, M. A. – "An Illustrated Overview of the use and value of Wavelet Transform to Acoustic Emission Technology" – University of Denver – NIST.
- [3-13] HEY, A. - Comunicación personal – Centro Atómico Constituyentes – CNEA – Argentina – Noviembre de 2003
- [3-14] SHIN y ROSE - "Guided Wave Tuning Principles for Defect Detection in Tubing" - Journal of Nondestructive Evaluation - Vol. 17 - Número 1 - 1998 - 27-36 pp.
- [3-15] LIU y QU - "Guided Circumferential Waves in Circular Annulus" - Journal of Applied Mechanics -Vol. 65 - Junio 1999 -424-430 pp.
- [3-16] VALLE, QU y JACOBS - "Guided Circumferential Waves in Layered Cylinders" - Int. Journal of Eng. Science -Vol. 37 - 1999 -1369-1387 pp.
- [3-17] PIOTRKOWSKI, LÓPEZ PUMAREGA, ARMEITE, MIEZA, RUZZANTE – "Análisis de los ecos de señales de emisión acústica"– III Pan-American Conferente for NDT (PANNDT) - (Code: PANNDT 027) - Río de Janeiro – Brasil – Junio de 2003.

ANEXO A

- [A-1] GAZIS, Denos A. – "Three-Dimensional Investigation of the Propagation of Waves in Hollow Circular Cylinders" – Parte I y II - Journal of Acoustical Society of America – Vol. 31 – Número 5 - Mayo, 1959 – 568-578 pp.
- [A-2] ver [3-11].
- [A-3] SHIN y ROSE - "Guideded Waves by Axisymetric and Non- Axisymetric Surface Loading on Hollow Cylinders" - Ultrasonics - 37 - 1999 - 355-363pp.

ANEXO A – PROPAGACIÓN DE ONDAS ELÁSTICAS EN TUBOS

Ecuación de Ondas en un Medio Infinito

Siguiendo el trabajo de Gazis [A-1] se describen las soluciones de la ecuación de ondas para un medio elástico, isótropo, infinito, con geometría cilíndrica hueca.

La ecuación que describe el movimiento de las partículas en un medio elástico isótropo infinito, es según (1.3):

$$(\lambda + \mu)\nabla\nabla \cdot \vec{u} + \mu\nabla^2 \vec{u} = \rho\ddot{\vec{u}} \quad (\text{A.1})$$

donde λ y μ son las constantes elásticas de Lamé, ρ es la densidad del material, $\vec{u}$ es el vector desplazamiento y ∇^2 es el laplaciano en tres dimensiones.

De acuerdo al teorema de Helmholtz, se expresa al vector desplazamiento como la suma de dos potenciales, uno escalar ϕ (compresional o dilatacional) y otro vectorial $\vec{H}$ (equivoluminal) como:

$$\vec{u} = \nabla\phi + \nabla \times \vec{H}$$

$$\nabla \cdot \vec{H} = F(\vec{r}, t) = 0$$

La función $F(\vec{r}, t)$ puede ser arbitrariamente elegida, lo que significa que la relación entre los campos y los potenciales no es única. El valor nulo para la divergencia del potencial vectorial implica que el campo es solenoidal, es decir que no existen fuentes ni sumideros de energía en la región

Reemplazado el vector desplazamiento, representado mediante los potenciales, en la ecuación general, se obtiene:

$$\nabla[(\lambda + 2\mu)\nabla^2\phi] + \nabla \times (\mu\nabla^2\vec{H}) = \nabla\left(\rho\frac{\partial^2\phi}{\partial t^2}\right) + \nabla \times \left(\rho\frac{\partial^2\vec{H}}{\partial t^2}\right)$$

y como los potenciales son independientes, se llega a las siguientes ecuaciones de onda:

$$\nabla^2\phi = \frac{1}{c_d^2} \frac{\partial^2\phi}{\partial t^2} \quad \text{Ondas dilatacionales (compresionales)} \quad (\text{A.2})$$

$$\nabla^2\vec{H} = \frac{1}{c_s^2} \frac{\partial^2\vec{H}}{\partial t^2} \quad \text{Ondas equivoluminales (corte)} \quad (\text{A.3})$$

donde las constantes son:

$$c_d = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad \text{velocidad de ondas longitudinales}$$

$$c_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad \text{velocidad de ondas transversales}$$

Modelo de Geometría Cilíndrica Hueca

El modelo de Gazis, contempla una geometría cilíndrica hueca infinita, axialmente simétrica y sin cambios en sus dimensiones. Al material se lo considera perfectamente elástico y homogéneo; además, no se consideran comportamientos transitorios de las soluciones y solamente se considera una propagación armónica en el sentido axial.

- Condiciones de Contorno: (interfaz sólido-vacío)

Los desplazamientos y las tensiones son continuos en la interfaz. En el caso de una interfaz sólido-vacío los desplazamientos no están restringidos y las tensiones no encuentran medio que las sostenga. Por lo tanto, para un radio interno del cilindro $r = a$ y un radio externo $r = b$ se debe cumplir:

$$\sigma_{rr} \Big|_{r=a,b} = 0$$

$$\sigma_{r\theta} \Big|_{r=a,b} = 0$$

$$\sigma_{rz} \Big|_{r=a,b} = 0$$

donde los σ representan a las tensiones según tres direcciones ortogonales de un sistema de coordenadas cilíndricas.

- Solución

Para los potenciales se proponen funciones del siguiente tipo:

$$\phi, H = F_1(r)F_2(\theta)F_3(z)e^{i(\bar{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t)}$$

en donde existen tres funciones que son dependientes de una de las coordenadas, un término de variación armónica con frecuencia angular ω y vector número de onda $\bar{k}$, con sus componentes en las tres direcciones ortogonales:

$$\bar{k} = (k_r, k_\theta, k_z) = (k_r, n, \xi)$$

Cada una de las componentes del vector número de onda $\vec{k}$, es la composición de una parte real y una imaginaria; la parte real tiene en cuenta la propagación armónica y la parte imaginaria la atenuación en el material.

Considerando que no existe propagación radial y que no se producen desplazamientos en la dirección axial (z) ni en la angular (θ), excepto la perturbación armónica. La expresión para los potenciales se simplifica, quedando:

$$\phi, H = F_1(r) e^{i(n\theta + \xi z - \omega t)}$$

En esta solución, el símbolo "n", representa el número de onda para la componente angular, que es un número entero para asegurar la unicidad de la solución, y " ξ ", es el número de onda real en la dirección de propagación axial.

Desarrollando la expresión para los potenciales:

$$\begin{aligned}\phi &= f(r) \cos(n\theta) \cos(\omega t + \xi z) \\ H_r &= g_r(r) \sin(n\theta) \sin(\omega t + \xi z) \\ H_\theta &= g_\theta(r) \cos(n\theta) \sin(\omega t + \xi z) \\ H_z &= g_z(r) \sin(n\theta) \cos(\omega t + \xi z)\end{aligned}$$

y reemplazando el potencial ϕ en la ecuación de onda A.2, se obtiene:

$$\frac{d^2 f}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{df}{dr} - \left(\frac{n^2}{r^2} - \left(\frac{\omega^2}{c_1^2} - \xi^2 \right) \right) f = 0$$

que es una ecuación diferencial cuya solución son funciones de Bessel. El operador de Bessel se define como:

$$B_{n,r} = \left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} - \left(\frac{n^2}{r^2} - 1 \right) \right)$$

En forma análoga, para el potencial H , reemplazando en la ecuación A.3, se obtiene una ecuación similar a la anterior cuya solución son también funciones de Bessel. Resolviendo el sistema de ecuaciones se encuentran tres funciones potenciales independientes. Estas funciones se componen de combinaciones de funciones de Bessel apropiadas.

Entre las funciones posibles, están las funciones de Bessel de primera (J_n) y segunda (Y_n) especie, también las funciones de Bessel modificadas (I_n) y (K_n) y las funciones de Hankel de primera y segunda especie ($H_n^{(1)}$) y ($H_n^{(2)}$). La elección varía con la frecuencia según la convergencia de las soluciones; un detalle de estos criterios puede verse en [A2]

Finalmente, la solución del sistema de ecuaciones resulta una función implícita trascendental de los parámetros frecuencia (ω) y número de onda en la dirección

axial (ξ). El procedimiento de búsqueda de raíces se basa en fijar uno de los parámetros y buscar cuál es valor del otro que satisface la ecuación. Estas relaciones son las que determinan las curvas de dispersión, análogas a las encontradas para geometrías tipo placas u ondas de Lamb. La figura A.1 muestra una proyección de las curvas de dispersión de la velocidad de grupo para Inconel de 3 mm de espesor [A-3].

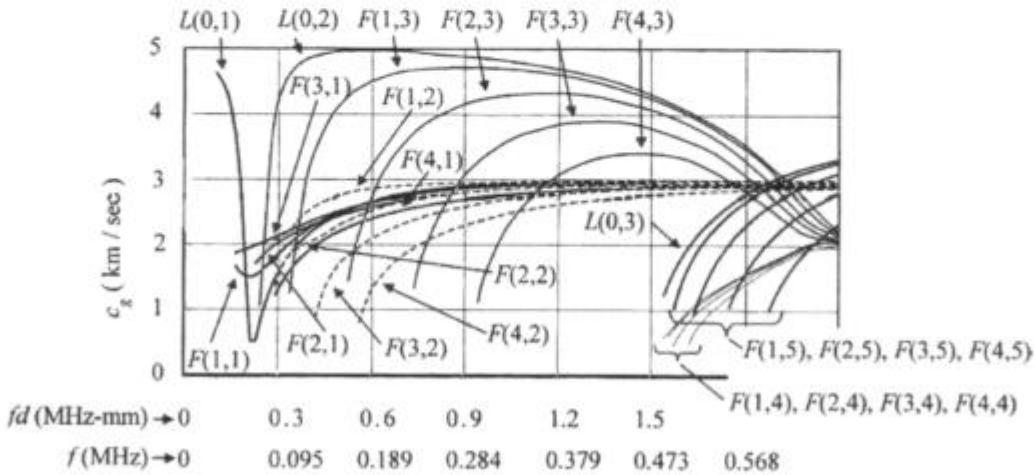


Figura A.1 – Curvas de dispersión de Grupo para Inconel de 3 mm de espesor.

Obtenidas las funciones potenciales, se calculan los desplazamientos que en coordenadas cilíndricas son:

$$\begin{aligned}
 u_r &= \frac{\partial \phi}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial H_z}{\partial \theta} - \frac{\partial H_\theta}{\partial z} \\
 u_\theta &= \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial \theta} + \frac{\partial H_r}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial r} \\
 u_z &= \frac{\partial \phi}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial (r H_\theta)}{\partial r} - \frac{1}{r} \frac{\partial H_r}{\partial \theta}
 \end{aligned}$$

Dependiendo de la frecuencia y el modo considerado, los perfiles de los desplazamientos van cambiando. El conocimiento de las características para cada modo y cada frecuencia es de gran importancia para la selección y aplicación de técnicas de monitoreo. Así, por ejemplo, aquellos modos que concentren la energía en regiones cercanas a la superficie, serán los más indicados para el estudio de pérdidas o adherencia con otra superficie; en cambio aquellos modos que concentren su variación en el interior del espesor permitirán un estudio de parte del volumen del material. En la figura A.2 se muestran para el modo L(0,1), dos perfiles de desplazamientos a largo del espesor de la pared para dos frecuencias diferentes.

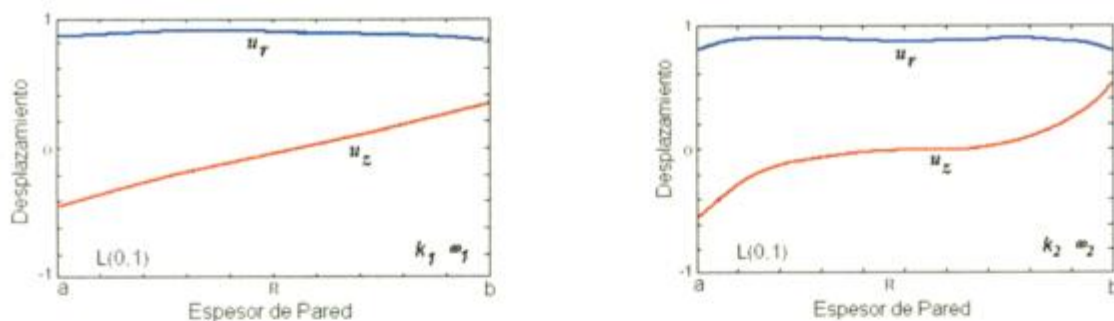


Figura A.2 – Desplazamientos en el sentido axial u_z y en el sentido radial u_r para dos valores de frecuencia diferentes $\omega_1 < \omega_2$ para el primer modo longitudinal $L(0,1)$.

A partir de las expresiones para los desplazamientos, con las relaciones básicas de la elasticidad para un sólido isótropo, se calculan las deformaciones ϵ y las tensiones σ .

Detalle de los Modos de Propagación

Existen infinitas soluciones de la ecuación característica, que representan a diferentes modos de propagación en el espesor. Se distinguen tres tipos de modos para la geometría cilíndrica, propagándose en la dirección axial, de cada uno de estos existen a su vez infinitos ordenes.

Cada modo representa la forma que toman los desplazamientos de las partículas. Se utiliza una notación de dos índices (m,n) , el primero da el orden circunferencial, el cual describe el número entero de longitudes de onda en la circunferencia del cilindro. El segundo se utiliza para diferenciar los ordenes superiores para un mismo modo.

Los tres modos existentes se detallan a continuación:

- **Longitudinales $L(0,n)$** : simétricos axialmente. El modo longitudinal fundamental es puramente extensional, es decir que los desplazamientos son en la dirección axial. La figura A.3 muestra el desplazamiento para el modo fundamental.

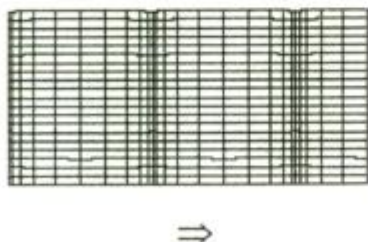


Figura A.3 – Movimiento de las partículas para el modo fundamental longitudinal.

- **Flexurales $F(m,n)$** : asimétricos axialmente. El modo flexural fundamental es puramente transversal. En la figura A.4, se muestra una representación del movimiento de las partículas para el modo fundamental.

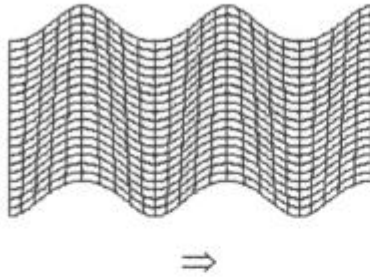


Figura A.4 – Movimiento de las partículas para el modo fundamental flexural.

- **Torsionales $T(0,n)$** : simétricos axialmente. Los desplazamientos son en la dirección angular. El modo fundamental no presenta dispersión, la velocidad de fase corresponde con la velocidad transversal del material.

Aún, para un tipo de modo particular, a diferentes frecuencias se presentan diferentes comportamientos debido a que existen variables acopladas como la polarización y la amplitud de las partículas.

ANEXO B – TABLAS DE ENSAYOS DE PROBETAS TIPO TUBO

En todos los casos las señales fueron generadas por una fuente simulada Hsu-Nielsen. En aquellos ensayos que incluyen la aplicación de calor localizado se indica la temperatura medida con un color distintivo en la tabla.

TUBO I (Fuente Hsu-Nielsen)

Ensayo	Ubicación: Fuente (F) Sensor (S) [mm]	Muestreo	Base Tiempo,Escala	Amplificación
0	F = [180,0,70], S = [280,0,70]	2,5 Ms/s	1 ms - 1 V	15 dB
1	F = [180,0,70], S = [280,0,70]	2,5 Ms/s	1 ms - 1 V	15 dB
2	F = [80,0,70], S = [280,0,70]	2,5 Ms/s	1 ms - 1 V	15 dB
3	F = [80,0,70], S = [280,0,70]	2,5 Ms/s	1 ms - 1 V	15 dB
4	F = [280,-70,0], S = [280,0,70]	2,5 Ms/s	1 ms - 1 V	15 dB
5	F = [280,-70,0], S = [280,0,70]	2,5 Ms/s	1 ms - 1 V	15 dB
6	F = [180,-70,0], S = [280,0,70]	2,5 Ms/s	1 ms - 1 V	15 dB
7	F = [180,-70,0], S = [280,0,70]	2,5 Ms/s	1 ms - 1 V	15 dB
8	F = [380,0,70] espesor, S = [280,0,70]	2,5 Ms/s	1 ms - 1 V	15 dB
9	F = [380,0,70] espesor, S = [280,0,70]	2,5 Ms/s	1 ms - 1 V	15 dB
10	F = [380,0,70] espesor, S = [180,0,70]	2,5 Ms/s	1 ms - 1 V	15 dB
11	F = [380,0,70] espesor, S = [180,0,70]	2,5 Ms/s	1 ms - 1 V	15 dB

TUBO II - A (Fuente Hsu-Nielsen)

Ensayo	Fuente (F) Sensor (S) [mm]	Muestreo	Base Tiempo,Escala	Amplificación
0	F = [590,0,71], S = [690,0,71]	5 Ms/s	0.5 ms - 1 V	15 dB
1	F = [590,0,71], S = [690,0,71]	5 Ms/s	0.5 ms - 1 V	15 dB
2	F = [490,0,71], S = [690,0,71]	5 Ms/s	0.5 ms - 1 V	15 dB
3	F = [490,0,71], S = [690,0,71]	5 Ms/s	0.5 ms - 1 V	15 dB
4	F = [390,0,71], S = [690,0,71]	5 Ms/s	0.5 ms - 1 V	15 dB
5	F = [390,0,71], S = [690,0,71]	5 Ms/s	0.5 ms - 1 V	15 dB
6	F = [290,0,71], S = [690,0,71]	5 Ms/s	0.5 ms - 1 V	15 dB
7	F = [290,0,71], S = [690,0,71]	5 Ms/s	0.5 ms - 1 V	15 dB
8	F = [690,-71,0], S = [690,0,71]	5 Ms/s	0.5 ms - 1 V	15 dB
9	F = [690,-71,0], S = [690,0,71]	5 Ms/s	0.5 ms - 1 V	15 dB
10	F = [590,-71,0], S = [690,0,71]	5 Ms/s	0.5 ms - 1 V	15 dB
11	F = [590,-71,0], S = [690,0,71]	5 Ms/s	0.5 ms - 1 V	15 dB
12	F = [590,0,71], S = [690,0,71]	5 Ms/s	0.5 ms - 1 V	15 dB
13	F = [590,0,71], S = [690,0,71]	5 Ms/s	0.5 ms - 1 V	15 dB
14	F = [590,0,71], S = [690,0,71]	5 Ms/s	0.5 ms - 1 V	15 dB

TUBO II - B
TEMPERATURA

Ensayo	Ubicación: Fuente (F) Sensor (S) [mm]	Muestreo	Base Tiempo,Escala	Amplificación
0	F = [100,0,71], S = [690,0,71] Sin Temperatura	2.5 Ms/s	1 ms - 1 V	15 dB
1	F = [100,0,71], S = [690,0,71] Sin Temperatura	2.5 Ms/s	1 ms - 1 V	15 dB
2	F = [100,-71,0], S = [690,0,71] Sin Temperatura	2.5 Ms/s	1 ms - 1 V	15 dB
3	F = [100,-71,0], S = [690,0,71] Sin Temperatura	2.5 Ms/s	1 ms - 1 V	15 dB
4	F = [400,0,71], S = [690,0,71] Sin Temperatura	2.5 Ms/s	1 ms - 1 V	15 dB
5	F = [400,0,71], S = [690,0,71] Sin Temperatura	2.5 Ms/s	1 ms - 1 V	15 dB
6	F = [100,0,71], S = [690,0,71] Con Temperatura (250 mm)	2.5 Ms/s	1 ms - 1 V	15 dB
7	F = [100,0,71], S = [690,0,71] Con Temperatura (250 mm)	2.5 Ms/s	1 ms - 1 V	15 dB
8	F = [100,-71,0], S = [690,0,71] Con Temperatura (250 mm)	2.5 Ms/s	1 ms - 1 V	15 dB
9	F = [100,-71,0], S = [690,0,71] Con Temperatura (250 mm)	2.5 Ms/s	1 ms - 1 V	15 dB

TUBO II - C

TEMPERATURA MEDIDA

Ensayo	Ubicación: Fuente (F) Sensor (S) [mm]	Muestreo	Base Tiempo,Escala	Amplificación
0	F = [100,-71,0], S = [690,0,71] T = Tamb. 18 °C	2.5 Ms/s	1 ms - 1 V	15 dB
1	F = [100,-71,0], S = [690,0,71] T = Tamb. 18 °C	2.5 Ms/s	1 ms - 1 V	15 dB
2	F = [100,0,71], S = [690,0,71] T = Tamb. 18 °C	2.5 Ms/s	1 ms - 1 V	15 dB
3	F = [100,0,71], S = [690,0,71] T = Tamb. 18 °C	2.5 Ms/s	1 ms - 1 V	15 dB
4	F = [400,0,71], S = [690,0,71] T = Tamb. 18 °C	2.5 Ms/s	1 ms - 1 V	15 dB
5	F = [400,0,71], S = [690,0,71] T = Tamb. 18 °C	2.5 Ms/s	1 ms - 1 V	15 dB
6	F = [100,0,71], S = [690,0,71] T = 50 °C	2.5 Ms/s	1 ms - 1 V	15 dB
7	F = [100,0,71], S = [690,0,71] T = 50 °C	2.5 Ms/s	1 ms - 1 V	15 dB
8	F = [400,0,71], S = [690,0,71] T = 50 °C	2.5 Ms/s	1 ms - 1 V	15 dB
9	F = [400,0,71], S = [690,0,71] T = 50 °C	2.5 Ms/s	1 ms - 1 V	15 dB
10	F = [100,0,71], S = [690,0,71] T = 100 °C	2.5 Ms/s	1 ms - 1 V	15 dB
11	F = [100,0,71], S = [690,0,71] T = 100 °C	2.5 Ms/s	1 ms - 1 V	15 dB
12	F = [400,0,71], S = [690,0,71] T = 100 °C	2.5 Ms/s	1 ms - 1 V	15 dB
13	F = [400,0,71], S = [690,0,71] T = 100 °C	2.5 Ms/s	1 ms - 1 V	15 dB
14	F = [100,0,71], S = [690,0,71] T = 150 °C	2.5 Ms/s	2 ms - 1 V	15 dB
15	F = [100,0,71], S = [690,0,71] T = 150 °C	2.5 Ms/s	3 ms - 1 V	15 dB
16	F = [400,0,71], S = [690,0,71] T = 150 °C	2.5 Ms/s	4 ms - 1 V	15 dB
17	F = [400,0,71], S = [690,0,71] T = 150 °C	2.5 Ms/s	5 ms - 1 V	15 dB
18	F = [100,0,71], S = [690,0,71] T = 200 °C	2.5 Ms/s	6 ms - 1 V	15 dB
19	F = [100,0,71], S = [690,0,71] T = 200 °C	2.5 Ms/s	7 ms - 1 V	15 dB
20	F = [400,0,71], S = [690,0,71] T = 200 °C	2.5 Ms/s	8 ms - 1 V	15 dB
21	F = [400,0,71], S = [690,0,71] T = 200 °C	2.5 Ms/s	9 ms - 1 V	15 dB
22	F = [100,-71,0], S = [690,0,71] T = 200 °C	2.5 Ms/s	10 ms - 1 V	15 dB
23	F = [100,-71,0], S = [690,0,71] T = 200 °C	2.5 Ms/s	11 ms - 1 V	15 dB

TUBO II - D
TEMPERATURA MEDIDA - 100 °C

Ensayo	Ubicación: Fuente (F) Sensor (S) [mm]	Muestreo	Base Tiempo,Escala	Amplificación
0	F = [100,-71,0], S = [690,0,71] T = Tamb. 18 °C	2.5 Ms/s	1 ms - 1 V	15 dB
1	F = [100,-71,0], S = [690,0,71] T = Tamb. 18 °C	2.5 Ms/s	1 ms - 1 V	15 dB
2	F = [100,0,71], S = [690,0,71] T = Tamb. 18 °C	2.5 Ms/s	1 ms - 1 V	15 dB
3	F = [100,0,71], S = [690,0,71] T = Tamb. 18 °C	2.5 Ms/s	1 ms - 1 V	15 dB
4	F = [400,0,71], S = [690,0,71] T = Tamb. 18 °C	2.5 Ms/s	1 ms - 1 V	15 dB
5	F = [400,0,71], S = [690,0,71] T = Tamb. 18 °C	2.5 Ms/s	1 ms - 1 V	15 dB
6	F = [100,0,71], S = [690,0,71] T = 100 °C	2.5 Ms/s	1 ms - 1 V	15 dB
7	F = [100,0,71], S = [690,0,71] T = 100 °C	2.5 Ms/s	1 ms - 1 V	15 dB
8	F = [400,0,71], S = [690,0,71] T = 100 °C	2.5 Ms/s	1 ms - 1 V	15 dB
9	F = [400,0,71], S = [690,0,71] T = 100 °C	2.5 Ms/s	1 ms - 1 V	15 dB
10	F = [100,-71,0], S = [690,0,71] T = 100 °C	2.5 Ms/s	1 ms - 1 V	15 dB
11	F = [100,-71,0], S = [690,0,71] T = 100 °C	2.5 Ms/s	1 ms - 1 V	15 dB

TUBO II - E
TEMPERATURA MEDIDA - 150 °C

Ensayo	Ubicación: Fuente (F) Sensor (S) [mm]	Muestreo	Base Tiempo,Escala	Amplificación
0	F = [100,0,71], S = [690,0,71] T = 150 °C	2.5 Ms/s	1 ms - 1 V	15 dB
1	F = [100,0,71], S = [690,0,71] T = 150 °C	2.5 Ms/s	1 ms - 1 V	15 dB
2	F = [400,0,71], S = [690,0,71] T = 150 °C	2.5 Ms/s	1 ms - 1 V	15 dB
3	F = [400,0,71], S = [690,0,71] T = 150 °C	2.5 Ms/s	1 ms - 1 V	15 dB
4	F = [100,-71,0], S = [690,0,71] T = 150 °C	2.5 Ms/s	1 ms - 1 V	15 dB
5	F = [100,-71,0], S = [690,0,71] T = 150 °C	2.5 Ms/s	1 ms - 1 V	15 dB

TUBO II - F
TEMPERATURA MEDIDA - 200 °C

Ensayo	Ubicación: Fuente (F) Sensor (S) [mm]	Muestreo	Base Tiempo,Escala	Amplificación
0	F = [100,0,71], S = [690,0,71] T = amb	2.5 Ms/s	1 ms - 1 V	15 dB
1	F = [100,0,71], S = [690,0,71] T = amb	2.5 Ms/s	1 ms - 1 V	15 dB
2	F = [100,0,71], S = [690,0,71] T = amb	2.5 Ms/s	1 ms - 1 V	15 dB
3	F = [100,0,71], S = [690,0,71] T = amb	2.5 Ms/s	1 ms - 1 V	15 dB
4	F = [100,0,71], S = [690,0,71] T = 200 °C	2.5 Ms/s	1 ms - 1 V	15 dB
5	F = [100,0,71], S = [690,0,71] T = 200 °C	2.5 Ms/s	1 ms - 1 V	15 dB

Tubo II - G
ENTALLA longitud 3,5 cm - profundidad 1 mm - ancho 1 mm

Ensayo	Descripción	Muestreo	Base Tiempo,Escala	Amplificación
0	Fuente (100,0,71) Sensor (690,0,71) Fisura (590,0,71)	2.5 Ms/s	1 ms - 1 V	15 dB
1	Fuente (100,0,71) Sensor (690,0,71) Fisura (590,0,71)	2.5 Ms/s	1 ms - 1 V	15 dB
2	Fuente (100,0,71) Sensor (690,0,71) Fisura (590,0,71)	2.5 Ms/s	1 ms - 1 V	15 dB
3	Fuente (100,0,71) Sensor (690,0,71) Fisura (590,0,71)	2.5 Ms/s	1 ms - 1 V	15 dB
4	Fuente (100,0,71) Sensor (400,0,71) Fisura (590,0,71)	2.5 Ms/s	1 ms - 1 V	15 dB
5	Fuente (100,0,71) Sensor (400,0,71) Fisura (590,0,71)	2.5 Ms/s	1 ms - 1 V	15 dB
6	Fuente (100,0,71) Sensor (400,0,71) Fisura (590,0,71)	2.5 Ms/s	1 ms - 1 V	15 dB
7	Fuente (100,0,71) Sensor (400,0,71) Fisura (590,0,71)	2.5 Ms/s	1 ms - 1 V	15 dB
8	Fuente (400,0,71) Sensor (400,0,71) Sin Fisura	2.5 Ms/s	1 ms - 1 V	15 dB
9	Fuente (400,0,71) Sensor (400,0,71) Sin Fisura	2.5 Ms/s	1 ms - 1 V	15 dB
10	Fuente (590,0,71) Sensor (590,0,71) Fisura (590,0,71)	2.5 Ms/s	1 ms - 1 V	15 dB
11	Fuente (590,0,71) Sensor (590,0,71) Fisura (590,0,71)	2.5 Ms/s	1 ms - 1 V	15 dB
12	Fuente (590,0,71) Sensor (590,0,71) Fisura (590,0,71)	2.5 Ms/s	1 ms - 1 V	15 dB
13	Fuente (590,0,71) Sensor (590,0,71) Fisura (590,0,71)	2.5 Ms/s	1 ms - 1 V	15 dB
14	Fuente (640,0,71) Sensor (640,0,71) Sin Fisura	2.5 Ms/s	1 ms - 1 V	15 dB
15	Fuente (640,0,71) Sensor (640,0,71) Sin Fisura	2.5 Ms/s	1 ms - 1 V	15 dB
16	Fuente (300,0,71) Sensor (300,0,71) Sin Fisura	2.5 Ms/s	1 ms - 1 V	15 dB
17	Fuente (300,0,71) Sensor (300,0,71) Sin Fisura	2.5 Ms/s	1 ms - 1 V	15 dB
18	Fuente (300,0,71) Sensor (300,0,71) Sin Fisura	2.5 Ms/s	1 ms - 1 V	15 dB

Tubo III

Ensayo	Ubicación: Fuente (F) Sensor (S) [mm]	Muestreo	Base Tiempo,Escala	Amplificación
0	F = [710,0,122,5], S = [810,0,122,5]	2,5 Ms/s	1 V /div	15 dB
1	F = [710,0,122,5], S = [810,0,122,5]	2,5 Ms/s	1 V /div	15 dB
2	F = [710,0,122,5], S = [810,0,122,5]	2,5 Ms/s	1 V /div	15 dB
3	F = [710,0,122,5], S = [810,0,122,5]	2,5 Ms/s	1 V /div	15 dB
4	F = [710,0,122,5], S = [810,0,122,5]	2,5 Ms/s	1 V /div	15 dB
5	F = [510,0,122,5], S = [810,0,122,5]	2,5 Ms/s	1 V /div	15 dB
6	F = [510,0,122,5], S = [810,0,122,5]	2,5 Ms/s	1 V /div	15 dB
7	F = [510,0,122,5], S = [810,0,122,5]	2,5 Ms/s	1 V /div	15 dB
8	F = [810,-122,5,0], S = [810,0,122,5]	2,5 Ms/s	1 V /div	15 dB
9	F = [810,-122,5,0], S = [810,0,122,5]	2,5 Ms/s	1 V /div	15 dB
10	F = [710,-122,5,0], S = [810,0,122,5]	2,5 Ms/s	1 V /div	15 dB
11	F = [710,-122,5,0], S = [810,0,122,5]	2,5 Ms/s	1 V /div	15 dB

Tubo IV

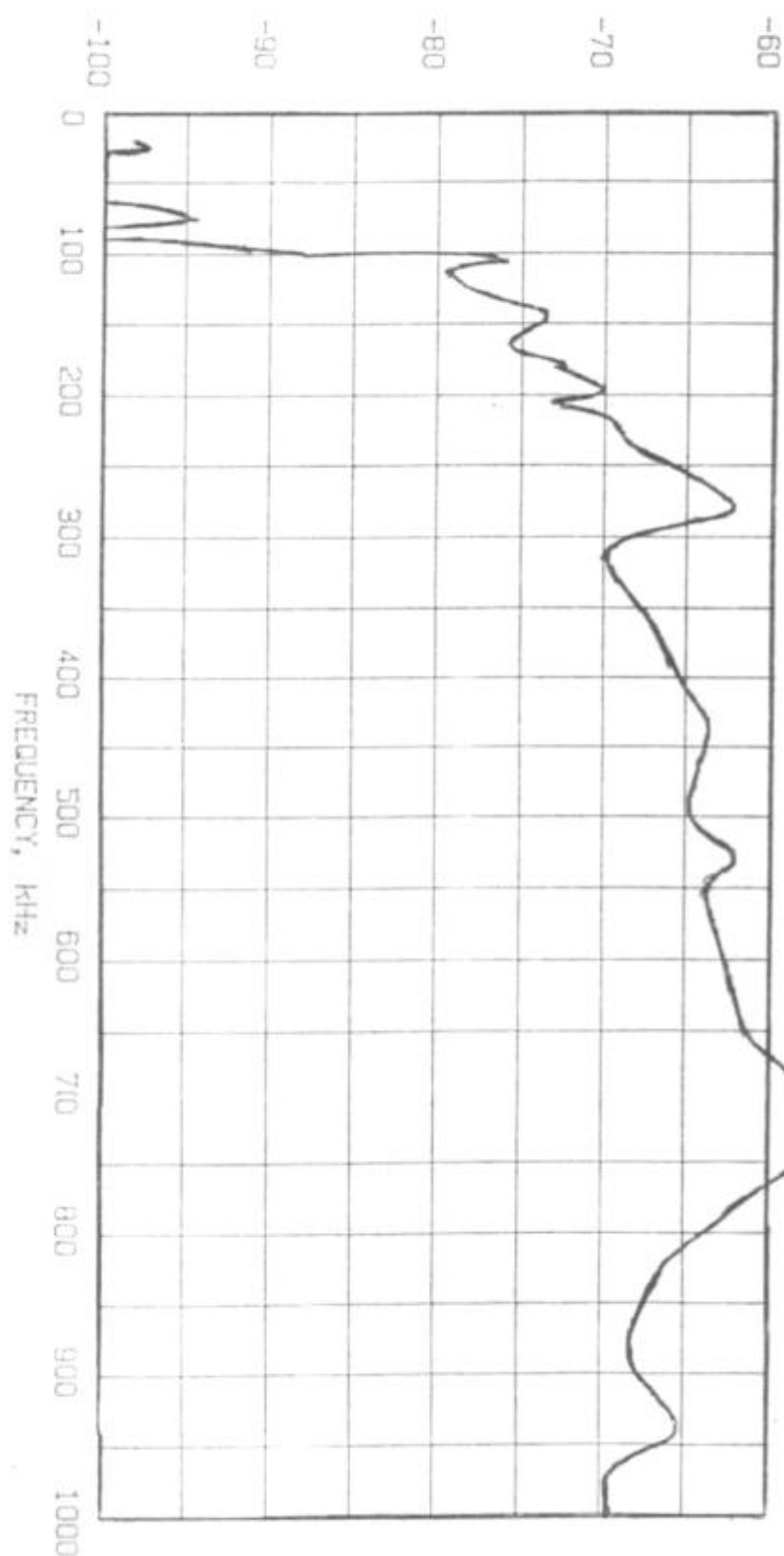
Ensayo	Ubicación: Fuente (F) Sensor (S) [mm]	Muestreo	Base Tiempo,Escala	Amplificación
0	F = [440,0,182,5], S = [540,0,182,5]	2,5 Ms/s	1 ms - 1 V	15 dB
1	F = [440,0,182,5], S = [540,0,182,5]	2,5 Ms/s	1 ms - 1 V	15 dB
2	F = [340,0,182,5], S = [540,0,182,5]	2,5 Ms/s	1 ms - 1 V	15 dB
3	F = [340,0,182,5], S = [540,0,182,5]	2,5 Ms/s	1 ms - 1 V	15 dB
4	F = [240,0,182,5], S = [540,0,182,5]	2,5 Ms/s	1 ms - 1 V	15 dB
5	F = [240,0,182,5], S = [540,0,182,5]	2,5 Ms/s	1 ms - 1 V	15 dB
6	F = [540,-182,5,0], S = [540,0,182,5]	2,5 Ms/s	1 ms - 1 V	15 dB
7	F = [540,-182,5,0], S = [540,0,182,5]	2,5 Ms/s	1 ms - 1 V	15 dB
8	F = [440,-182,5,0], S = [540,0,182,5]	2,5 Ms/s	1 ms - 1 V	15 dB
9	F = [440,-182,5,0], S = [540,0,182,5]	2,5 Ms/s	1 ms - 1 V	15 dB

Tubo V (Fuente Hsu-Nielsen)

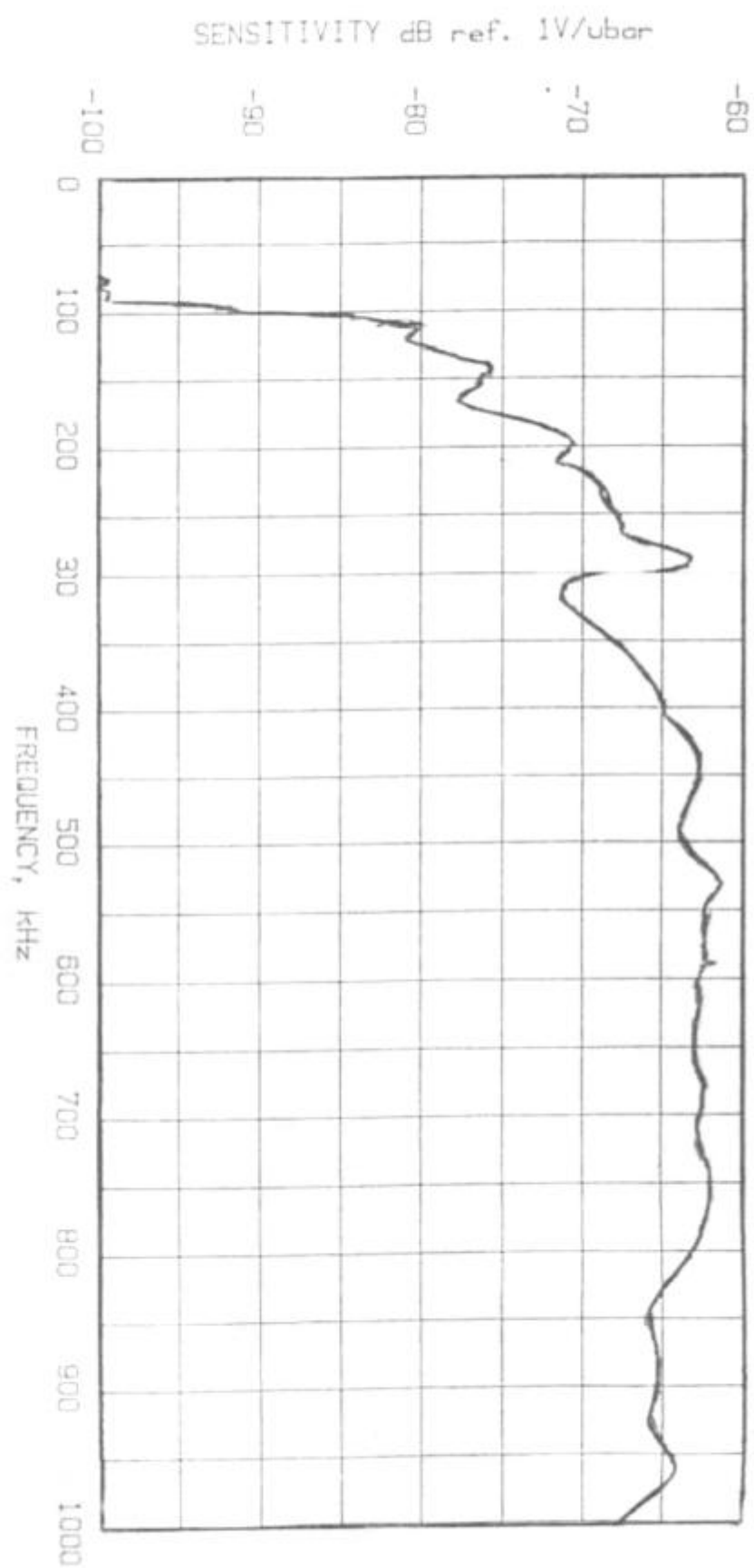
Ensayo	Ubicación: Fuente (F) Sensor (S) [mm]	Muestreo	Base tiempo-Amplificación
0	F = [1000,0,31,75], S1 = [2000,0,31,75], S2 = [2000,0,31,75] 180° de soldadura	2,5 Ms/s	1 V/div - 20 dB
1	F = [1000,0,31,75], S1 = [2000,0,31,75], S2 = [2000,0,31,75] 180° de soldadura	2,5 Ms/s	1 V/div - 20 dB
2	F = [1000,0,31,75], S1 = [2000,0,31,75], S2 = [2000,0,31,75] 180° de soldadura	2,5 Ms/s	1 V/div - 20 dB
3	F = [1000,0,31,75], S1 = [2000,0,31,75], S2 = [2000,0,31,75] 90° de soldadura	2,5 Ms/s	1 V/div - 20 dB
4	F = [1000,0,31,75], S1 = [2000,0,31,75], S2 = [2000,0,31,75] 90° de soldadura	2,5 Ms/s	1 V/div - 20 dB
5	F = [2000,-31,75,0], S1 = [2000,0,31,75], S2 = [2000,0,31,75] 90° de soldadura	2,5 Ms/s	1 V/div - 10 dB
6	F = [2000,-31,75,0], S1 = [2000,0,31,75], S2 = [2000,0,31,75] 90° de soldadura	2,5 Ms/s	1 V/div - 10 dB
7	F = [1000,0,31,75], S1 = [2000,0,31,75], S2 = [2000,0,31,75] 0° de soldadura , sobre la soldadura	2,5 Ms/s	1 V/div - 20 dB
8	F = [1000,0,31,75], S1 = [2000,0,31,75], S2 = [2000,0,31,75] 0° de soldadura , sobre la soldadura	2,5 Ms/s	1 V/div - 20 dB
9	F = [1000,0,31,75], S1 = [2000,0,31,75], S2 = [2000,0,31,75] 0° de soldadura , sobre la soldadura	2,5 Ms/s	1 V/div - 20 dB
10	F = [1000,22,2,22,2], S = [1000,31,75,0], C = [1000,0,31,75] C : cordón soldadura	2,5 Ms/s	1 V/div - 20 dB
11	F = [1000,22,2,22,2], S = [1000,31,75,0], C = [1000,0,31,75] C : cordón soldadura	2,5 Ms/s	1 V/div - 20 dB

ANEXO C – CURVAS DE CALIBRACIÓN DE SENSORES

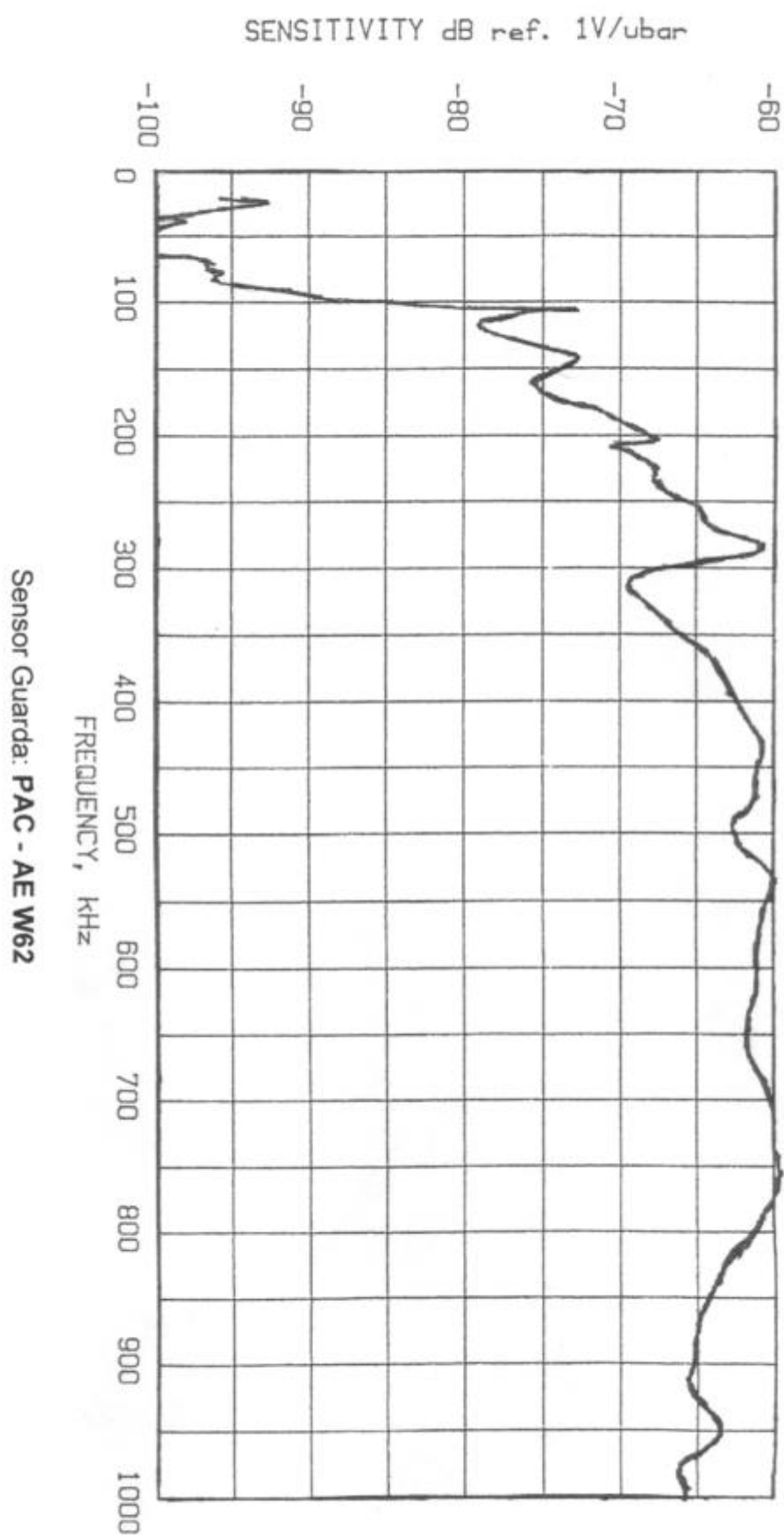
SENSITIVITY dB ref. 1V/ubar



Sensor Principal: PAC - AE W60



Sensor Guarda: PAC - AE W61



AGRADECIMIENTOS

A mi familia y amigos que me apoyaron y "soportaron" durante este tiempo.

A mis directores, la Dra. Isabel López Pumarega y al Dr. José Ruzzante por su continuo incentivo, apoyo e interés sobre mi trabajo.

A la Dra. Rosa Piotrkowski especialmente, a quien considero mi tercera directora por el permanente apoyo y sus muy buenos consejos.

A todos los integrantes del Grupo Ondas Elásticas: la Sra. María Armeite, la Lic. María Elisa Oliveto, el Lic. Dino Filipussi, el Lic. Martín Gómez y el Ing. Adrián Ruiz por conformar un excelente grupo humano donde me sentí muy cómodo trabajando.

Al Sr. Caggiano y sus colaboradores de taller quienes fabricaron las probetas en tiempo y forma.

A la Srta. Gloria Ríos y al Ing. Claudio Verrastro por explicarme y asesorarme sobre el uso de los equipos por ellos construidos.

A la Prof. Mariana Gwenz por su ayuda con el inglés y el incentivo en la elección del trabajo.

A los visitantes ocasionales al laboratorio con quienes mantuve interesantes discusiones y de los cuales aprendí mucho.

Al personal del Centro Atómico que han colaborado en diversas etapas del trabajo.

A los directores, profesores y administrativos de la maestría que me han permitido llegar a este punto.

J. Ignacio Mieza
Junio de 2004

FIN

"Allí donde mueren las palabras, nace la música"
H. Heine

COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA
CENTRO DE INFORMACIÓN C A C