

**TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

**DETECCIÓN Y EVALUACIÓN MEDIANTE TÉCNICAS  
ULTRASÓNICAS DEL DAÑO POR HIDROGENO EN LA  
SOLDADURA DE UN ACERO API 5L X52**

**Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
Para optar por el Título de  
Ingeniero Mecánico  
Por el Bachiller  
Trujillo S., Miguel A.**

**Caracas, 2007**

**TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

**DETECCIÓN Y EVALUACIÓN MEDIANTE TÉCNICAS  
ULTRASÓNICAS DEL DAÑO POR HIDROGENO EN LA  
SOLDADURA DE UN ACERO API 5L X52**

**Tutor Académico:  
Prof. Jorge Perdigón**

**Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
Para optar por el Título de  
Ingeniero Mecánico  
Por el Bachiller  
Trujillo S., Miguel A.**

**Caracas, 2007**

## **DEDICATORIA**

A Dios y a su hijo, Jesús Cristo, quien se mostró ejemplo de justicia, amor y humanidad entre nosotros.

A mi madre quien ha sido primer punto de equilibrio y comunicación en mi vida.

A mi padre que ha sido siempre ejemplo de rectitud y responsabilidad.

A mis hermanos, Yeniffer y Luís Teófilo, quienes le dan sentido a mi vida.

A mi tía María mi segunda madre.

A Dayanna Gabriela, quien ha sido mi otro punto de equilibrio y apoyo incondicional.

**Miguel**

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad Central de Venezuela “la casa que vence las sombras”, por permitirme estudiar y crecer como ser humano.

A la Profesora Sonia por su desinteresada orientación y apoyo a la investigación. Gracias por su gran apoyo.

A Jorge Perdigón por su incansable empeño en lograr el desarrollo y culminación del presente trabajo. Gracias amigo.

Al laboratorio LABSI, Profesores Demian, Elias, Chiti, Ing. Carmen, Ing. Rogelio, por prestar sus espacios, equipos y ayuda para el desarrollo del presente trabajo.

A mi padre y hermano Luís Teófilo, por su preocupación y valiosas correcciones.

A mis amigos y hermanos, Usama Zarifeh, Cesar Cárdenas, Celso Fortoul y Martin Goldin, por darme siempre la mano en los malos y buenos momentos.

A todas aquellas personas que me motivaron para la culminación de este trabajo.

**Trujillo S., Miguel A.**

**DETECCIÓN Y EVALUACIÓN MEDIANTE TÉCNICAS ULTRASÓNICAS  
DEL DAÑO POR HIDROGENO EN LA SOLDADURA DE UN ACERO API  
5L X52**

**Tutor Académico: Prof. Jorge Perdigón  
Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería.  
Escuela de Mecánica. Año 2007. 97 páginas.**

*Palabras claves:* Acero API 5L X52, soldadura por resistencia eléctrica, daño por hidrógeno, técnica ultrasónica, procesamiento de señales, relación de velocidades.

En el presente trabajo, se desarrolló una metodología para detectar y evaluar el daño por hidrógeno en un acero API 5L X52 soldado por resistencia eléctrica. Para ello se utilizó la técnica de ultrasonido y posteriormente a través del registro y procesamiento de las señales, se evaluó el comportamiento. El material utilizado en este estudio corresponde a muestras de un acero API 5L X52 sometidas a un ensayo de absorción de hidrógeno, a un potencial fijo y diferentes tiempos de carga (1,3,6 horas), seguidos de ensayos de desorción. Se desarrolló un procedimiento para calcular las velocidades de ondas longitudinales y transversales, y luego ser evaluada la relación de velocidad longitudinal entre transversal (R). La técnica de procesamiento de señales detectó el daño por hidrógeno contenido en metal base y material soldado aún y cuando el nivel de susceptibilidad del fenómeno es menor al de ataque por hidrógeno. Los valores que se obtuvieron de R en el presente trabajo oscilan para las probetas dañadas entre 0,5483 y 0,56; mientras que las muestras sin daño entre 0,539 a 0,5466. Los resultados de otros investigadores arrojan valores de R para el ataque por hidrógeno de 0,55 cuando hay daño o mayores, en algunos casos hasta 0,59. Mientras que para un material sin daño la relación toma el valor comúnmente de 0,54.

## ÍNDICE

	<b>Pág.</b>
<b>CAPÍTULO I.</b>	
<b>INTRODUCCIÓN</b>	1
<b>PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b>	3
<b>OBJETIVOS</b>	4
<b>CAPÍTULO II. FUNDAMENTO TEÓRICO</b>	<b>5</b>
2.1. <b>GENERALIDADES DEL ACERO API 5L X52 PARA TUBERÍAS DE TRANSPORTE DE CRUDO Y SU SOLDADURA</b>	5
2.1.1. <b>Proceso de fabricación de la tubería API 5L X52</b>	6
2.1.2. <b>Soldadura por resistencia eléctrica (ERW)</b>	8
2.1.2.1. <b>Principio de la ERW</b>	8
2.2. <b>DAÑO POR HIDRÓGENO</b>	8
2.2.1. <b>Definición</b>	8
2.2.2. <b>Clasificación del daño por hidrógeno</b>	9
2.2.3. <b>Teorías del daño por hidrógeno</b>	13
2.2.4. <b>Mecanismos del agrietamiento por hidrógeno</b>	17
2.2.5. <b>Factores externos e internos que influyen en la susceptibilidad al daño por hidrógeno</b>	19
2.2.6. <b>Características del daño inducido por hidrógeno</b>	26
2.2.7. <b>Agrietamiento siguiendo el criterio de la mecánica de fractura</b>	31
2.3. <b>ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS. TÉCNICA DE ULTRASONIDO</b>	34
2.3.1. <b>Ensayos no destructivos (END)</b>	34
2.3.2. <b>Discontinuidades, definición y clasificación</b>	34
2.3.3. <b>Técnica de ultrasonido</b>	35
2.3.3.1. <b>Principios fundamentales de la acústica</b>	35
2.3.3.2. <b>Generación de ondas</b>	40
2.3.3.3. <b>Instrumental básico</b>	48
2.3.3.4. <b>Sistema Pulso-Eco</b>	49
2.3.3.5. <b>Tiempo de Recorrido</b>	49
2.3.3.6. <b>Intensidad Acústica y Tiempo de Recorrido</b>	50
2.3.3.7. <b>Presentación de resultados de los ensayos</b>	53
2.3.3.8. <b>Factores que influyen en la transmisión del ultrasonido a través de la superficie de ensayo</b>	56
2.4. <b>PROCESAMIENTO DE SEÑALES DIGITALES</b>	58

2.4.1.	Clasificación de las señales	59
2.4.2.	Señales en tiempo discreto y sistemas en tiempo discreto	61
2.4.3.	Filtros	61
2.4.4.	Análisis frecuencial de señales. Transformada de Fourier	63
2.5.	ESTUDIOS RELACIONADOS A LA DETECCIÓN DE DAÑO POR HIDRÓGENO APLICANDO LA TÉCNICA DE ULTRASONIDO	64
<b>CAPÍTULO III PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL</b>		<b>67</b>
3.1.	DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL	68
3.2.	EQUIPOS E INSTRUMENTOS UTILIZADOS	70
3.3.	REGISTRO DE LAS SEÑALES	71
3.4.	REGISTRO DE LOS ESPESORES	72
3.5.	PROCESAMIENTO DE LAS SEÑALES	73
3.5.1	Pretratamiento de las señales	75
3.5.2	Tratamiento de las señales	76
3.5.3	Diseño y corrida del programa	77
<b>CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>		<b>78</b>
	DISEÑO DE LA RUTINA DE PROGRAMACIÓN	78
	RESULTADOS DE VELOCIDADES Y RELACION (V <sub>transv</sub> / V <sub>long</sub> )	79
<b>CAPÍTULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>		<b>85</b>
5.1.	CONCLUSIONES	85
5.2.	RECOMENDACIONES	86
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>		
<b>ANEXOS</b>		

## ÍNDICE DE TABLAS

- 2.1. **Composición química del acero API 5L X52**
- 2.2. **Propiedades mecánicas del acero API 5L X52**
- 2.3. **Parámetros que actúan sobre  $C_H$  y  $C_K$**
- 2.4. **Parámetros que actúan sobre el comportamiento al agrietamiento inducido por hidrógeno**
- 2.5. **Resumen de las fórmulas de análisis y síntesis del procesamiento de señales**
- 3.1. **Dimensiones de las probetas**
- 3.2. **Datos de los espesores de las probetas medidas con el tornillo micrométrico**
- 3.3. **Muestra de una parte de la data de una señal tomada con el osciloscopio en formato de hoja de cálculo**
- 7.2.1. **Resultados de velocidades longitudinales, material soldado y metal base**
- 7.2.2. **Resultados de velocidades transversales, material soldado y metal base**
- 7.2.3. **Resultados de la relación de velocidades longitudinal y transversal, material soldado y metal base**

## ÍNDICE DE FIGURAS

- 2.1. **Proceso de fabricación de la tubería de acero API 5L X52**
- 2.2. **Ilustración esquemática del efecto del hidrógeno en el inicio de una grieta**
- 2.3. **Agrietamiento inducido por hidrógeno dependiendo de la producción del acero**
- 2.4. **Morfología de las grietas en un ambiente de H<sub>2</sub>S acuoso**
- 2.5. **Esquema del proceso de escalonamiento de las grietas**
- 2.6. **Criterio de mecánica de fractura**
- 2.7. **Propagación de una grieta a partir de una inclusión sin esfuerzo externo. Interacción entre dos grietas**
- 2.8. **Movimientos de las partículas cuando se emiten ondas longitudinales y transversales**
- 2.9. **Poder de resolución**
- 2.10. **Diagrama del haz ultrasónico mostrando las diferentes zonas de intensidad**
- 2.11. **Geometría del haz para un palpador con un ángulo de divergencia de 15°**
- 2.12. **Distribución de la presión acústica a lo largo del recorrido del haz**
- 2.13. **Equipo de ultrasonido y transductor angular**
- 2.14. **Sistema pulso-eco**
- 2.15. **Pieza de ensayo**
- 2.16. **Presentación de A-Scan**
- 2.17. **Presentación de B-Scan**
- 2.18. **Presentación de C-Scan**
- 3.1. **Esquema representativo del procedimiento experimental**
- 3.2. **Probetas de material soldado**
- 3.3. **Montaje de equipos para la toma de mediciones**

- 3.4. Procesamiento de las señales**
- 3.5. (a) Señal con tendencia a una curva logarítmica  
(b) Señal con un filtro de tendencia**
- 4.2.1. Curvas de velocidad longitudinal vs. tiempo de exposición del acero API 5L X52 en el medio hidrogenado**
- 4.2.2. Curvas de velocidad transversal vs. tiempo de exposición del acero API 5L X52 en el medio hidrogenado**
- 4.2.3. Curvas de relación de velocidades vs. tiempo de exposición del acero API 5L X52 en el medio hidrogenado**

# CAPITULO I

## INTRODUCCIÓN

En el mundo el consumo energético se hace la característica principal de la actividad humana. El mayor porcentaje de energía consumido proviene del uso del petróleo, como combustible para generar electricidad, locomoción, y otros. La actividad petrolera carga con gran compromiso en el desarrollo y continuidad del ritmo actual que lleva el ser humano.

La exploración, explotación, y refinación son las actividades que a grosso modo se desarrollan en la industria petrolera. En la explotación y refinación es necesario el transporte de crudo y consigo el mantenimiento de los miles de kilómetros de tubería que se someten a condiciones de deterioro en el tiempo. Estas tuberías son expuestas a ambientes agrios que provienen del contenido del crudo. El uso de tuberías de línea de aceros al carbono y baja aleación, constituye la manera más eficiente de transportar crudo y gas a grandes distancias. Sin embargo estos aceros pueden fallar prematuramente a temperatura ambiente cuando se exponen a una fase acuosa que contiene  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{S}$ , ya que se crean condiciones ácidas en la superficie interna de la tubería.

A la perturbación de la microestructura metalográfica desde el interior de la tubería por causa de la migración del hidrógeno desprendido del  $\text{H}_2\text{S}$  se denomina daño por hidrógeno y se refiere a la pérdida de las propiedades mecánicas debido a la presencia o interacción con hidrógeno. Este fenómeno puede manifestarse en presencia de esfuerzos aplicados o residuales. Un ejemplo comúnmente inspeccionado es el daño que pueda tener las zonas soldadas del acero API 5L X52. El daño por hidrógeno

puede tener como efecto principal el colapso del componente por la presencia de ampollas, grietas ó pérdida en las propiedades mecánicas.

Existen estudios del daño por hidrógeno en uniones soldadas del acero API 5L X52, mediante microscopia y otros ensayos destructivos que caracterizan de manera precisa las muestras. Sin embargo, la posibilidad que dicho estudio pueda ser de forma no destructiva permitiría la evaluación en servicio de las tuberías. Una metodología con gran potencial para la evaluación del daño por hidrogeno en el acero API 5L X52 se puede fundamentar en la inspección por ultrasonido. Siendo está de fácil aplicación en el campo y de menos costo. En tal sentido, se pretende realizar el estudio mediante la técnica de ensayo no destructivo, del daño por hidrógeno en muestras provenientes de una tubería soldada por resistencia eléctrica de un acero API 5L X52.

## 1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Debido a la problemática que tienen la industria petrolera y petroquímica en Venezuela con el daño por hidrógeno, se necesita desarrollar una metodología no destructiva que permita determinar si el componente bajo servicio, presenta Daño por Hidrógeno, específicamente en muestras de tubería soldada. Para esto, se usará muestras de una tubería de línea de un acero de fabricación nacional, designado por el Instituto Americano del Petróleo (American Petroleum Institute) como un acero API 5L X52. La tubería tiene un diámetro externo = 16,83 cm, diámetro interno = 15,41 cm, espesor = 7,10 mm, y con una longitud = 1,20 m, a partir de las cuales se lograron obtener probetas rectangulares con superficies planas de dimensiones: 4,5 cm de largo, 2 cm de ancho y 5 mm de espesor, para ser expuesta a un medio hidrogenado. Sobre dichas muestras se aplicarán ondas ultrasónicas producidas tanto longitudinales como transversales, con la finalidad de medir sus velocidades de propagación empleando para ello técnicas de análisis y procesamiento de señales. Se persigue obtener por medio de relaciones de velocidades ultrasónicas (velocidad de ondas longitudinales y la velocidad de ondas transversales) para cada una de las muestras, datos de las propiedades de las muestras, que pueden ser correlacionados con el daño por hidrógeno presentes en ellas, a través de la evaluación de los cambios de velocidad. El objetivo es evaluar el daño por hidrógeno presente en las muestras proporcionadas y compararlo con la evaluación del daño con otras técnicas utilizadas como microscopía óptica y microscopía electrónica. <sup>(1)</sup>

## **1.2. OBJETIVOS**

### **1.2.1 Objetivo general**

Desarrollar una metodología fundamentada en la técnica de Ultrasonido, para la evaluación del daño por hidrógeno, en muestras de acero API 5L X52, recibidas en condición de entrega y soldadas, expuestas al medio hidrogenado a diferentes intervalos de tiempo.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- Implementar una técnica de evaluación de Daño por Hidrógeno en muestras de acero API 5L X52, recibidas en condición de entrega y soldada, mediante la determinación de relación de velocidades, velocidad de ondas transversales y velocidad de ondas longitudinales.
- Interpretar con herramienta computacional las señales recibidas de la propagación de ondas ultrasónicas transversales y longitudinales.
- Evaluar los cambios en la relación de velocidades y su correlación con el daño en probetas ya caracterizadas, recibidas en condición de entrega y soldada.

## CAPÍTULO II

### FUNDAMENTO TEÓRICO

#### 2.1. GENERALIDADES DEL ACERO API 5L X52 PARA TUBERÍAS DE TRANSPORTE DE CRUDO Y SU SOLDADURA

La industria petrolera nacional usa una variedad de aceros para el diseño e instalación de las plantas y sistemas de producción de petróleo, transporte y refinación. Dentro de esta gama de aceros uno de los más comunes es el API-5L X52 que cuenta con propiedades mecánicas que cumplen las requeridas en sus aplicaciones.

El material ensayado en este estudio corresponde a muestras provenientes de una tubería de línea de un acero de fabricación nacional, designado por el Instituto Americano del Petróleo (American Petroleum Institute) como un acero API-5L X52 con costura o soldado. La tubería tiene un diámetro externo  $\approx 16,83$  cm y espesor  $\approx 7,10$  mm.<sup>(1)</sup>

En la tabla 2.1 se presenta la composición química expresada (% en peso) de un acero API 5L X52.

**Tabla 2.1.** Composición química del acero API 5L X52.<sup>(2,3)</sup>

%C	%Mn	%P	%S
0,30	1,35	0,04	0,05

En la tabla 2.2 se muestran las propiedades mecánicas para el acero en estudio.

**Tabla 2.2.** Propiedades mecánicas del acero API 5L X52.<sup>(2,3)</sup>

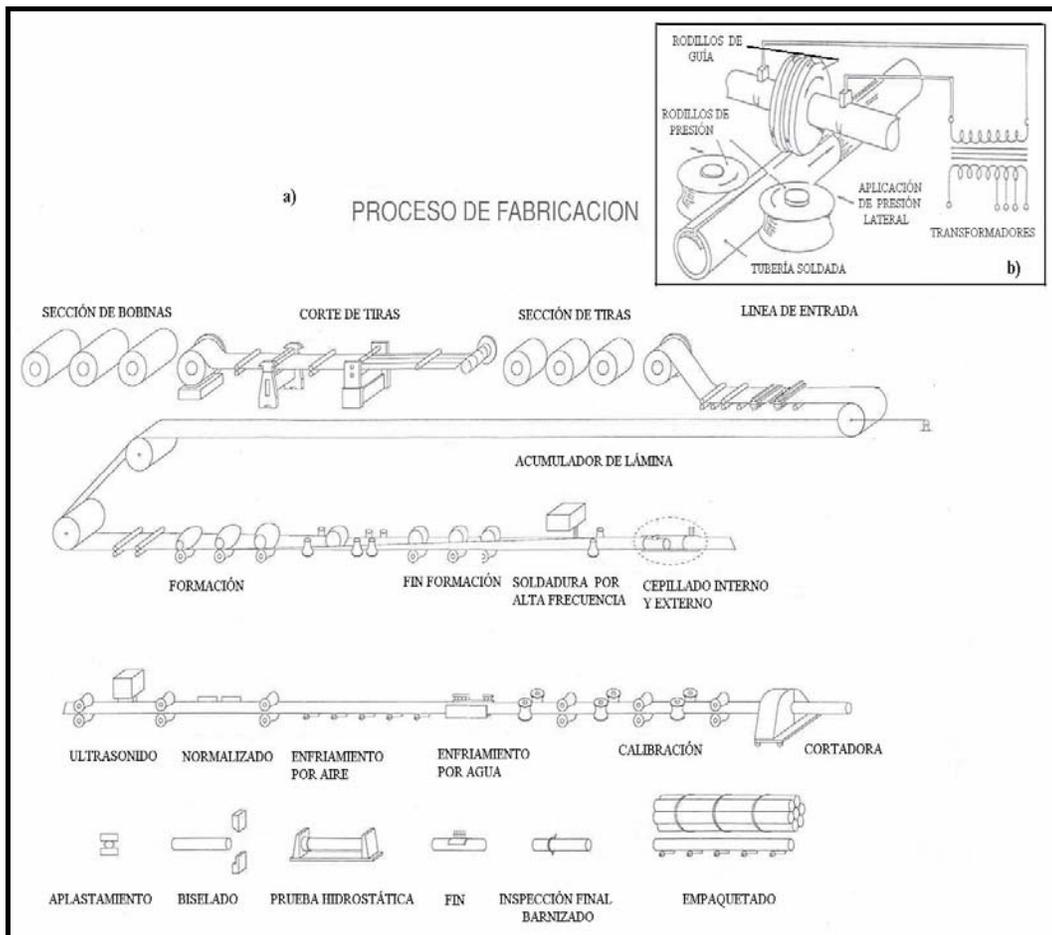
Esfuerzo de fluencia (min)	Esfuerzo de tracción (min)
358 MPa ~ 52.000 psi	455 MPa ~ 66.000 psi

### 2.1.1. Proceso de fabricación de la tubería API 5L X52

La materia prima requerida para la fabricación nacional de estas tuberías proviene de un proceso de laminación en caliente de planchones obtenidos por colada continua, produciendo aceros con propiedades mecánicas, microestructura y espesor, conforme a la especificación API. Las láminas son fabricadas en varias etapas mediante una serie de rodillos y soldadas por resistencia eléctrica (ERW).<sup>(4)</sup>

La figura 2.1a<sup>(3)</sup> representa un diagrama del proceso de fabricación de la tubería a partir del cual se obtuvieron las muestras utilizadas en este estudio, donde se indica cada una de las etapas involucradas en el proceso. En la figura 2.1b<sup>(5)</sup> se presenta un detalle del proceso de soldadura por resistencia eléctrica (del inglés electric resistance welding-ERW), a la cual es sometida la lámina para conformarla a tubería. La materia prima requerida para la fabricación nacional de estas tuberías proviene de un proceso de laminación de planchones de colada continua, los cuales luego de ser recalentados son laminados con el fin de obtener bandas de acero con propiedades mecánicas, microestructura y espesor, de acuerdo al tipo de tubería requerida. Las bandas son conformadas en varias etapas mediante una serie de rodillos y soldadas por resistencia eléctrica (ERW). Este proceso de soldadura consiste en generar un arco eléctrico entre los dos extremos laterales de la lámina, una vez calentados son presionados por dos rodillos completándose así el proceso. Este tipo de soldadura se caracteriza por no utilizar material de aporte, por lo que la zona de fusión y la zona afectada por el calor son pequeñas, aproximadamente de 2 mm y 1 mm de extensión,

respectivamente. Posteriormente, las tuberías se someten a un tratamiento térmico de alivio de tensiones en el cordón, de manera de eliminar esfuerzos residuales y cualquier microestructura no favorable a las propiedades del tubo. Por último, los tubos son cortados, enderezados e inspeccionados para ser enviados al almacén.<sup>(3)</sup>



**Figura 2.1.** Proceso de fabricación de la tubería de acero API 5L X52:<sup>(3)</sup>

- a) Diagrama del proceso.
- b) Detalle del proceso de soldadura por resistencia eléctrica (ERW).

## **2.1.2. Soldadura por resistencia eléctrica (ERW)**

### **2.1.2.1. Principio de la ERW**

El calor necesario para lograr la fusión se produce mediante el contacto en ambas partes del material e induciendo una corriente, de forma que encuentre resistencia para su paso, esto provoca el calentamiento y posteriormente la fusión. Adicionalmente al calor generado, se aplican fuerzas de compresión dirigidas hacia las zonas a soldar.<sup>(4)</sup>

Existen diversos procedimientos de soldadura por resistencia eléctrica, sin embargo, el proceso que se aplica en la fabricación de las tuberías de transporte de crudo y gas es de resistencia eléctrica por alta frecuencia.

El proceso de soldadura mencionado utiliza una corriente eléctrica de frecuencia comprendida entre 10.000 y 500.000 Hz. Este solo calienta al material base por efecto Joule en las superficies de la unión a soldar, debido a lo cual se genera en el interior del material una fuerza electromotriz que se opone a la circulación de la corriente de soldadura impidiendo que esta penetre en el material y obligándola, por tanto, a circular superficialmente. Esta fuerza electromotriz produce el efecto de elevar la resistencia eléctrica del material de base, aumento que se acentúa a medida que se incrementa la frecuencia.<sup>(6)</sup>

## **2.2. DAÑO POR HIDRÓGENO**

### **2.2.1. Definición**

El daño por hidrógeno es una forma de falla asistida por un ambiente, el cual resulta principalmente de la acción combinada del hidrógeno y los esfuerzos residuales ó

esfuerzos tensiles aplicados. El daño por hidrógeno se manifiesta en aleaciones ferrosas y no ferrosas de muchas maneras, tales como: agrietamiento, ampollamiento, formación de hidruros y pérdida de la ductilidad. Por muchos años, estas fallas han sido denominadas en general “agrietamiento por hidrógeno” y aunque aún persista es impropio usar este término para describir los diferentes modos de falla. Estas que involucran al hidrógeno no demuestran las características clásicas de falla, esto es, capacidad reducida de soportar la carga ó fractura por debajo de la resistencia a la fluencia.<sup>(7)</sup>

El daño inducido por hidrogeno es también considerado como el daño mecánico ocasionado por la interacción del hidrógeno con el metal cuando éste es expuesto a un medio acuoso que contenga H<sub>2</sub>S con valores de pH bajos, de tal manera que se crean condiciones agrias ó ácidas. Este daño en los aceros, resulta de la absorción del hidrógeno atómico ó iónico por el material en sitios colectores potenciales que pueden causar tres tipos principales de daños: agrietamiento, ampollamiento y fragilización del acero.<sup>(1,8)</sup>

Para desarrollar el estudio del daño por hidrógeno es necesario conocer lo relacionado con las reacciones de evolución de hidrógeno, mecanismos de absorción, difusión y solubilidad del hidrógeno en el metal, acompañado de la interacción que guarda con la microestructura y defectos estructurales.

### **2.2.2. Clasificación del daño por hidrógeno**

Se ha resumido los tipos de daños por hidrógeno con el objetivo de facilitar la comprensión de los factores que afectan el comportamiento de aleaciones. Los principales tipos de daño generado por hidrógeno se pueden clasificar como:<sup>(7)</sup>

**a) Fragilización por ambiente de hidrógeno:** ocurre durante la deformación plástica de la aleación en contacto con gases cargado de hidrógeno o una reacción de corrosión y es por lo tanto dependiente de la velocidad de deformación. La degradación de las propiedades mecánicas de muchas aleaciones es mayor cuando la velocidad de deformación es baja y la presión y pureza del hidrógeno son altas.

**b) Agrietamiento bajo esfuerzo inducido por hidrógeno:** frecuentemente referido como agrietamiento inducido por hidrógeno ó fatiga estática, se caracteriza por una fractura frágil de una aleación normalmente dúctil sometido a carga en presencia de hidrógeno. Frecuentemente ocurre cuando la carga es mantenida por debajo de la resistencia a la fluencia. Este mecanismo de agrietamiento depende de la fugacidad de hidrógeno, nivel de resistencia mecánica del material, tratamiento térmico/microestructura, esfuerzo aplicado y temperatura. Para muchos aceros existe un esfuerzo crítico por debajo del cual el agrietamiento bajo esfuerzo inducido por hidrógeno no ocurre. Este esfuerzo es una función del nivel de resistencia mecánica del acero y específico del ambiente cargado por hidrógeno. Por lo tanto el esfuerzo crítico ó intensidad de esfuerzo para el agrietamiento bajo esfuerzo inducido por hidrógeno no es considerado una propiedad del material. Generalmente el esfuerzo crítico disminuye a medida que la resistencia a la fluencia de la aleación aumenta. El agrietamiento bajo esfuerzo inducido por hidrógeno está asociado con la absorción del hidrógeno y el tiempo de retardo para fallar (tiempo de incubación) durante el cual el hidrógeno difunde a regiones de altos esfuerzos triaxiales. Este tipo de daño puede promover un modo de fractura en una aleación que no es normalmente observado en un ambiente benigno. Por lo tanto, todos los modos de agrietamiento han sido observados en la mayoría de los sistemas de aleaciones comerciales, sin embargo, el agrietamiento bajo esfuerzo inducido por hidrógeno usualmente produce grietas agudas aisladas en contraste con las grietas ramificadas observadas por agrietamiento inducido por hidrógeno por corrosión bajo tensión.

**c) Pérdida de ductilidad:** constituye una de las primeras formas reconocidas del daño por hidrógeno. Se ha observado una disminución significativa en la elongación y reducción de área en aceros, aceros inoxidable, aleaciones a base de níquel, aleaciones de aluminio, y aleaciones de titanio, expuesta a hidrógeno. Este modo de falla es frecuentemente observado en aleaciones de menor resistencia mecánica y la extensión de la pérdida de la ductilidad es una función del contenido de hidrógeno en el material. La pérdida en la ductilidad es sensible a la velocidad de deformación y se hace más pronunciado a medida que la velocidad de deformación disminuye.

**d) Ataque por hidrógeno:** es un daño por hidrógeno que se genera a temperaturas altas, y ocurre en aceros al carbono y aceros de baja aleación expuestos a una presión de hidrógeno alta y temperaturas altas, por tiempo prolongado. El hidrógeno entra al acero y reacciona con el carbono, ya sea en solución ó como carburo, para formar gas metano. Este daño puede generar grietas y fisuras o puede simplemente descarburizar el acero, resultando en una pérdida de resistencia de la aleación. Este modo de daño es dependiente de la temperatura, con una temperatura crítica de aproximadamente 200 °C (400 °F).

**e) Ampollamiento:** ocurre predominantemente en aleaciones de baja resistencia cuando el hidrógeno atómico difunde a defectos internos, tales como laminaciones ó inclusiones metálicas, y luego precipita como hidrógeno molecular ( $H_2$ ). La presión del hidrógeno molecular puede alcanzar valores tan altos que puede ocurrir una deformación plástica localizada, formando una ampolla que frecuentemente sufre ruptura. Las ampollas son generalmente encontradas en aceros de bajo carbono que han sido expuestos a ambientes corrosivos agresivos (tales como  $H_2S$ ) o limpiado por decapado electroquímico.

**f) Grietas seccionadas, hojuelas y ojos de pez:** son características comunes del daño por hidrógeno en materiales forjados, soldados y también aleaciones coladas. Estos defectos son atribuidos al hidrógeno atrapado durante las operaciones de fundición, donde el baño fundido tiene una mayor solubilidad al hidrógeno que en la aleación sólida. Durante el enfriamiento desde el metal fundido, el hidrógeno difunde y precipita en cavidades y discontinuidades, produciendo una disminución de la solubilidad del hidrógeno en el metal sólido. En muchos aspectos, estas características son comparables al ampollamiento y este pudiera ser considerado un caso especial de esta clase de daño.

**g) Microperforación:** ocurre por presiones de hidrógeno extremadamente altas cerca de la temperatura ambiente. Este defecto es frecuente en aceros y se manifiesta en sí como una red de pequeñas fisuras que permiten la permeación de la aleación por gases y líquidos.

**h) Degradación en propiedades de fluencia:** ocurre en ambientes hidrogenados, han sido encontrados a temperatura ambiente en el hierro y acero, y a elevadas temperaturas en algunos sistemas de aleaciones. Se ha observado que la velocidad de termofluencia en estado estacionario bajo carga constante incrementa en presencia de hidrógeno en algunas aleaciones a base de níquel.

**i) Formación de hidruros:** produce fragilización en magnesio, tántalo, niobio, vanadio, uranio, torio, zirconio, titanio y sus aleaciones, así como también en muchos otros metales y aleaciones menos comunes. La degradación de las propiedades mecánicas y agrietamiento de estos metales y sus aleaciones son atribuidos a la precipitación de fases de hidruros metales. El hidrógeno atrapado frecuentemente proviene de la soldadura, tratamiento térmico, cargado desde el proceso de corrosión o durante la fundición de la aleación. La formación de hidruros es incrementada en algunos sistemas metal-hidrógeno por la aplicación de esfuerzos, conocido como

formación de hidruros inducidos por esfuerzo. Los sistemas de aleación que forman hidruros son generalmente dúctiles a temperaturas altas ( $>300$  K) y bajas ( $< 100$  K), en las cuales estas se fracturan por ruptura dúctil. Esta dependencia con la temperatura es comparable a la observada por fragilización por hidrógeno de aleaciones ferrosas de aleaciones de níquel. Algunas de estas aleaciones son además susceptibles a falla en hidrógeno por otros mecanismos que la formación de hidruros. Existen algunas evidencias que las aleaciones de níquel y de aluminio pueden además formar un hidruro altamente inestable que pudiera contribuir al daño por hidrógeno de estas aleaciones; sin embargo, esta posibilidad no ha sido confirmada.

### **2.2.3. Teorías del daño por hidrógeno**

Son muchas las teorías que tratan de explicar las variadas formas del daño que puede inducir el hidrógeno. Estas teorías están basadas en la presión, adsorción en la superficie, decohesión, fluencia plástica extendida, ataque por hidrógeno y la formación de hidruros. Se debe señalar que de la gran variedad de mecanismos que sustentan otras teorías, la mayoría constituyen variaciones de estos modelos básicos.<sup>(1,7,9)</sup>

#### **a) Teoría de la presión**

En la teoría de la presión se atribuye la fragilización por hidrógeno a la difusión de átomos de hidrógeno dentro del metal y su eventual acumulación en cavidades u otras superficies internas en la aleación. A medida que la concentración de hidrógeno aumenta en estas discontinuidades microestructurales, se crea una presión interna alta, de tal manera que favorece el crecimiento de la cavidad o inicio del agrietamiento. Este modelo aunque parece ser razonable para explicar la formación de las ampollas y algunos aspectos de la pérdida en la ductilidad tensil, no explica mucho de los factores observados para clases de fallas como las que genera el

agrietamiento por esfuerzo inducido por hidrógeno. Sin embargo, es un fenómeno bien reconocido que en aceros o aleaciones de níquel a alta fugacidad, cargados con hidrógeno, ya sea con una alta presión de gas o bajo una carga electroquímica extrema, se puede crear una densidad significativa de cavidades y daño irreversible a aleaciones consistente con un modelo dependiente de la presión.<sup>(1,7)</sup>

### **b) Teoría de la energía de superficie**

Este modelo fue propuesto por Petch y Stables<sup>(10,11)</sup> y sugiere que el hidrógeno adsorbido sobre las superficies libres adyacentes al extremo de una grieta, disminuye la energía libre de superficie y por lo tanto el trabajo necesario para que ocurra la fractura. La propagación de la grieta aumenta debido a la reducción en el trabajo a la fractura, dicho aumento es mayor que los niveles de esfuerzos experimentados típicamente con una aleación en un ambiente no agresivo.

Existen muchos argumentos en contra de este modelo, principalmente se ha señalado que éste subestima el trabajo de fractura y no toma en cuenta el crecimiento de la grieta discontinua que ha sido observada por el agrietamiento por hidrógeno.<sup>(7)</sup>

### **c) Teoría de decohesión**

Esta teoría describe el efecto del hidrógeno sobre la fuerza cohesiva entre los átomos de la matriz de la aleación. Se asume que concentraciones de hidrógeno suficientemente altas que se acumulen en el extremo de una grieta, reducen más la fuerza cohesiva entre los átomos de metal que el esfuerzo tensil máximo local perpendicular al plano de la grieta, por lo tanto se hace equivalente o mayor que la fuerza cohesiva, generando una fractura.<sup>(1)</sup>

### **d) Teoría del aumento de la fluencia plástica**

La teoría está asociada a la interacción del hidrógeno con las dislocaciones y se basa principalmente en observaciones fractográficas.<sup>(1)</sup> Esta propone que el hidrógeno

atómico incrementa el movimiento de las dislocaciones, generalmente las dislocaciones de hélice, y la creación de dislocaciones en la superficie y/o los extremos de las grietas, conduciendo a un ablandamiento del material a una escala localizada. Aunque este comportamiento ha sido observado en ciertos aceros, se ha encontrado además el endurecimiento por hidrógeno. Estudios mediante microscopía electrónica de alta resolución<sup>(7)</sup> en superficies de fracturas con clivaje o fractura intergranular, han revelado evidencia de plasticidad en el extremo de la grieta soportando este mecanismo.

#### **e) Teoría de la formación de hidruros**

Es la degradación de elementos metálicos tales como Niobio, Vanadio, Tántalo, Zirconio, Titanio Magnesio, en ambientes hidrogenados, por la formación de un hidruro metálico frágil en el extremo de la grieta, el cual precipita cuando se dispone de hidrógeno suficiente en la aleación. El agrietamiento del hidruro ocurre, seguido por la detención de la grieta en la matriz más dúctil o crecimiento continuo de la grieta entre hidruros por ruptura dúctil. Puesto que la formación del hidruro es incrementada por la aplicación de un esfuerzo, el campo de esfuerzos en el extremo de la grieta puede inducir a la precipitación de hidruro adicional, generando clivaje. Por lo tanto en algunas aleaciones la propagación de la grieta frágil ocurre por precipitación repetida de hidruros en el extremo de la grieta, el clivaje de estos hidruros y la precipitación de hidruros nuevos sucesivamente hasta que la fractura es completa.<sup>(1)</sup>

#### **f) Teoría del ataque por hidrógeno**

Es uno de los mecanismos más entendido del daño por hidrógeno, pero es específico a una clase única de daño por hidrógeno a altas temperaturas. Este puede tomar dos formas de daño: descarburización en la superficie o descarburización interna. Sin embargo el mecanismo es el mismo para ambas formas. A temperaturas elevadas, el hidrógeno difunde hacia el metal o reacciona en la superficie con el carbono en

solución sólida o el que se disocia a partir de un carburo para formar hidrocarburo-típicamente metano. Esta reacción química es fácilmente descrita termodinámicamente, la cual establece esta forma de daño aparte para formas más complejas del daño por hidrógeno. El daño es dependiente de la temperatura y la presión parcial de hidrógeno. Descarburización de las superficies ocurre por encima de 540 °C (1000 °F) y descarburización interna desde 200°C (400 °F) en adelante.<sup>(1,7)</sup>

### **g) Teoría del atrapamiento de hidrógeno**

Estudios sobre la difusión del hierro y aceros han mostrado un retraso inicial en la velocidad de difusión ó tiempo de retardo para la difusión de hidrógeno a través de estas aleaciones, antes de alcanzar la difusividad en el estado estacionario compatible con el esperado teóricamente.<sup>(7)</sup>

El tiempo de retardo (time lag) se considera generalmente relacionado con el llenado de las trampas por el hidrógeno. En realidad, la difusividad aparente del hidrógeno en los aceros muestra una disminución precipitada con el incremento en la concentración de partículas.<sup>(7)</sup>

Como ya ha sido descrito anteriormente, el atrapamiento puede ser considerado el enlace de átomos de hidrógeno a impurezas, defectos estructurales o constituyentes microestructurales en la aleación. Este enlace puede ser atribuido a campos eléctricos y campos de esfuerzos locales, gradientes de temperatura, gradientes de potencial químico o atrapamiento físico. Estas trampas de hidrógeno pueden ser móviles (dislocaciones, fallas de apilamiento) o estacionarias (bordes de grano, partículas de carburo, átomos de soluto individuales); pueden ser reversibles o irreversibles. Como ya se ha descrito cuando el atrapamiento ocurre a tiempos de duración cortos, es decir el tiempo de residencia del hidrógeno en la trampa es limitado, se define como trampas reversibles. Mientras que cuando el tiempo de residencia del hidrógeno en la trampa es grande y se caracteriza por una energía de enlace alta es denominada

irreversible. El concepto e investigación del atrapamiento ha sido principalmente desarrollado en aceros, sin embargo, este no está restringido a este sistema. Aleaciones cúbica centrada en la cara muestran un comportamiento de atrapamiento similar, a pasar de una eficiencia reducida para el atrapamiento comparado con el acero.<sup>(7)</sup>

#### 2.2.4. Mecanismos del agrietamiento por hidrógeno

**L. Coudreuse y J. Charles<sup>(12)</sup>** señalan que no existe un mecanismo universal válido para explicar el daño por hidrógeno, por lo tanto es razonable sugerir que todos estos puede ocurrir por separado o combinados, como se muestra esquemáticamente en la figura 2.<sup>(1)</sup> Para el caso de una inclusión elongada de sulfuro de manganeso (MnS), se tiene :

**a) En ausencia de hidrógeno:** no se iniciaría grieta en el extremo del sulfuro, debido a que el esfuerzo total, la suma de los esfuerzos aplicados ( $\sigma_a^0$ ) y/o los esfuerzos residuales ( $\sigma_r^0$ ), es menor que el de los esfuerzos cohesivos ( $\sigma_c^0$ ), es decir :

$$\sigma_T^0 = \sigma_a^0 + \sigma_r^0 < \sigma_c^0 \quad (1)$$

Donde:

$\sigma_T^0$  = esfuerzo total de hidrógeno presente.

$\sigma_a^0$  = esfuerzo aplicado sin hidrógeno presente.

$\sigma_r^0$  = esfuerzo residual sin hidrógeno presente.

$\sigma_c^0$  = esfuerzo cohesivo sin hidrógeno presente.

**b) En presencia de hidrógeno:** varios fenómenos pueden ocurrir simultáneamente o consecutivamente:

- Recombinación del H<sub>2</sub> gaseoso en la interfase defecto/matriz generando una presión elevada de hidrógeno.
- Disminución de la energía superficial del extremo de la grieta debido a la adsorción del hidrógeno.
- Disminución de los esfuerzos cohesivos.
- Interacción hidrógeno/dislocaciones en el extremo del defecto en la zona plástica, conduciendo a una pérdida de ductilidad en esa zona.

Por lo tanto, en el defecto el esfuerzo aplicado total puede aumentar debido a la presión de hidrógeno, tal que si se cumple la siguiente relación se puede iniciar la grieta:

$$\sigma_T^H = \sigma_a^H + \sigma_r^H > \sigma_c^H \quad (2)$$

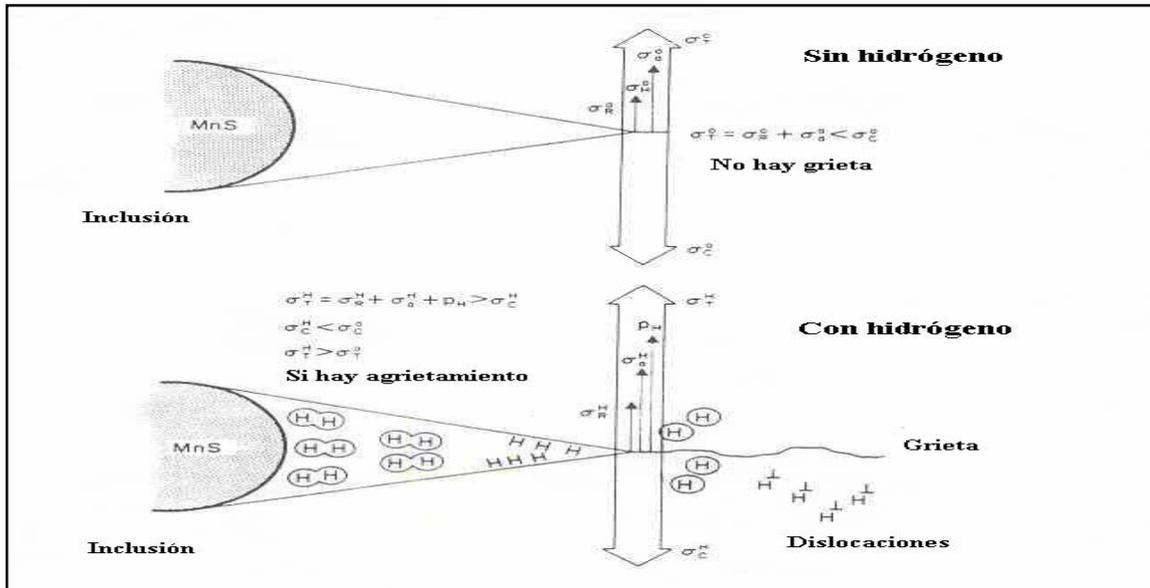
Donde:

$\sigma_T^H$  = esfuerzo total con hidrógeno presente.

$\sigma_a^H$  = esfuerzo aplicado con hidrógeno presente.

$\sigma_r^H$  = esfuerzo residual con hidrógeno presente.

$\sigma_c^H$  = esfuerzo cohesivo con hidrógeno presente.



**Figura 2.2.** Ilustración esquemática del efecto del hidrógeno en el inicio de una grieta.<sup>(1)</sup>

### 2.2.5. Factores externos e internos que influyen en la susceptibilidad al daño por hidrógeno

Los fenómenos descritos anteriormente pueden provocar fallas en los materiales expuestos a ambientes agrios en la industria petrolera. Ha sido bien reconocido que la severidad y tipo de daño por hidrógeno depende de factores metalúrgicos tales, como: composición química, heterogeneidad de estructura (segregaciones), tipo de microestructura, dureza, inclusiones no metálicas (naturaleza, nivel, forma y distribución), defectos estructurales (dislocaciones, bordes de grano), tratamiento térmico, esfuerzos internos y factores ambientales tales como naturaleza de la solución, concentración de H<sub>2</sub>S, pH del medio, tiempo de exposición, temperatura y presión, esfuerzos aplicados.<sup>(1,12)</sup>

Los factores metalúrgicos actúan sobre la concentración crítica (C<sub>k</sub>), a parte de la temperatura y el esfuerzo. Todos los parámetros metalúrgicos pueden tener influencia sobre la concentración (C<sub>H</sub>), ya que tienen influencia sobre las características de las

trampas. Los factores ambientales actúan sobre la actividad del hidrógeno y la cinética de absorción. Estos factores juegan un rol importante en la inducción de este fenómeno y han sido responsable de numerosas fallas en tuberías de acero expuestas a medios agrios.<sup>(1,12)</sup> En la tabla 2.3<sup>(1,12)</sup> se resumen estos factores y su influencia en  $C_H$  y  $C_K$ .

Cuando en un defecto la cantidad de hidrógeno ( $C_H$ ) es mayor que una concentración crítica  $C_k$  ocurre el agrietamiento:

$$C_H > C_K \quad (3)$$

**Tabla 2.3.** Parámetros que actúan sobre  $C_H$  y  $C_K$ .<sup>(1,12)</sup>

	<b>Parámetros</b>	<b>Influencia sobre</b>
Parámetros externos ó ambientales	Composición Contenido H <sub>2</sub> S pH Actividad externa del hidrógeno Tiempo Temperatura Esfuerzo	$C_H$ $C_H$ $C_H$ $C_H$ $C_H$ $C_H, C_k$ $C_H, C_k$
Parámetro metalúrgicos (características de las trampas)	Composición química Microestructura Inclusión Defecto Segregación Esfuerzos internos	$C_H, C_k$ $C_H, C_k$ $C_H, C_k$ $C_H, C_k$ $C_H, C_k$ $C_H, C_k$
Otros	Efectos de superficie Modo del transporte del hidrógeno Tratamientos termomecánicos	$C_H$ $C_H$ $C_H, C_k$

Estos parámetros son los mismos que actúan sobre el agrietamiento por hidrógeno para una actividad externa dada del hidrógeno, los cuales se resumen en la tabla 2.4.<sup>(12)</sup>

**Tabla 2.4.** Parámetros que actúan sobre el comportamiento al agrietamiento inducido por hidrógeno.<sup>(12)</sup>

<b>Parámetros externos</b>	<b>Parámetros metalúrgicos</b>
Naturaleza de la solución	Composición química (Cu, Ni, P, S etc)
Concentración de H <sub>2</sub> S	Microestructura
pH	Inclusión (número, forma y distribución)
Reacciones electroquímicas	Segregación
Temperatura	Defectos (carburos, dislocaciones, bordes de grano)
Tiempo	Esfuerzos internos
Estos parámetros actúan sobre la actividad del hidrógeno y la cinética de absorción.	

Considerando la tabla 2.4,<sup>(12)</sup> se puede asumir que el concepto de concentración crítica se adapta muy bien para describir el fenómeno de HIC.

El pH del medio está fuertemente relacionado con la cantidad de hidrógeno absorbido por el material, en un medio con un intervalo de pH entre 1 y 6, el daño por hidrógeno, específicamente el agrietamiento escalonado en aceros tiende a incrementar con la disminución del pH. Los aceros susceptibles no necesariamente presentan diferencias significativas en el agrietamiento escalonado en función del pH, sin embargo algunos aceros resistentes solamente muestran este daño, si los ensayos realizados a un pH son suficientemente bajo.<sup>(10)</sup>

En relación a la temperatura se ha evaluado la susceptibilidad al daño por hidrógeno en muestras de acero sometidas al daño por inmersión, en un intervalo de temperatura entre 5 °C y 80 °C.<sup>(1)</sup> Se encontró que en un intervalo de temperatura entre 15 °C y 35 °C el daño es máximo, a una temperatura de 25°C corresponde a la temperatura más

adecuada, mientras que por encima de 35 °C. Se determinó una aguda reducción del daño, lo cual se atribuye a la reducción de la concentración de H<sub>2</sub>S en las soluciones saturadas utilizadas en los ensayos por inmersión. De esta manera, a mayores temperaturas, aumenta la velocidad de difusión del hidrógeno en el material, lo cual acelera la concentración de hidrógeno en sitios susceptibles a la formación de hidrógeno molecular, pero al mismo tiempo una mayor cantidad de hidrógeno puede escapar del metal. A temperaturas menores que la del ambiente, la difusión del hidrogeno disminuye y por lo tanto el fenómeno de HIC se presenta reducido.

Se ha revelado que el H<sub>2</sub>S es más efectivo para generar el daño por hidrógeno a concentraciones mayores. Se ha reportado un límite inferior en la concentración de H<sub>2</sub>S para inducir al daño, la cual puede exceder la presión parcial de 0,35 KPa (0,05 psi), usado por la NACE para definir un gas agrio. También investigadores observaron ampollamiento en hierro a una presión de 0,28 kPa (0,04 psi) de H<sub>2</sub>S, pero no a 0,14 kPa (0,02 psi). Después de 213 días de haber expuesto muestras de acero 1036 laminado en frío, reportaron ampollamiento a una presión de 0,035 kPa (0,005 psi) de H<sub>2</sub>S pero no a 0,0035 kPa (0,0005 psi) de H<sub>2</sub>S.<sup>(1)</sup>

La composición química del acero juega un rol importante en la susceptibilidad al daño por hidrógeno. Destaca el efecto del cobre como aleante, el cual disminuye la velocidad de permeación del hidrógeno marcadamente a menos de la mitad de su valor inicial con contenidos de 0,2 % de cobre o más. Se relaciona este efecto con la inhibición de la reacción de corrosión, disminuyendo la entrada de hidrógeno desde el ambiente a la matriz de acero.<sup>(1)</sup>

El silicio, aluminio y azufre, afectan la susceptibilidad del material al daño mediante la formación de inclusiones no metálicas. La intercara matriz-inclusión, actúa como trampa o colector de hidrógeno, aumentando notablemente la susceptibilidad.<sup>(1)</sup>

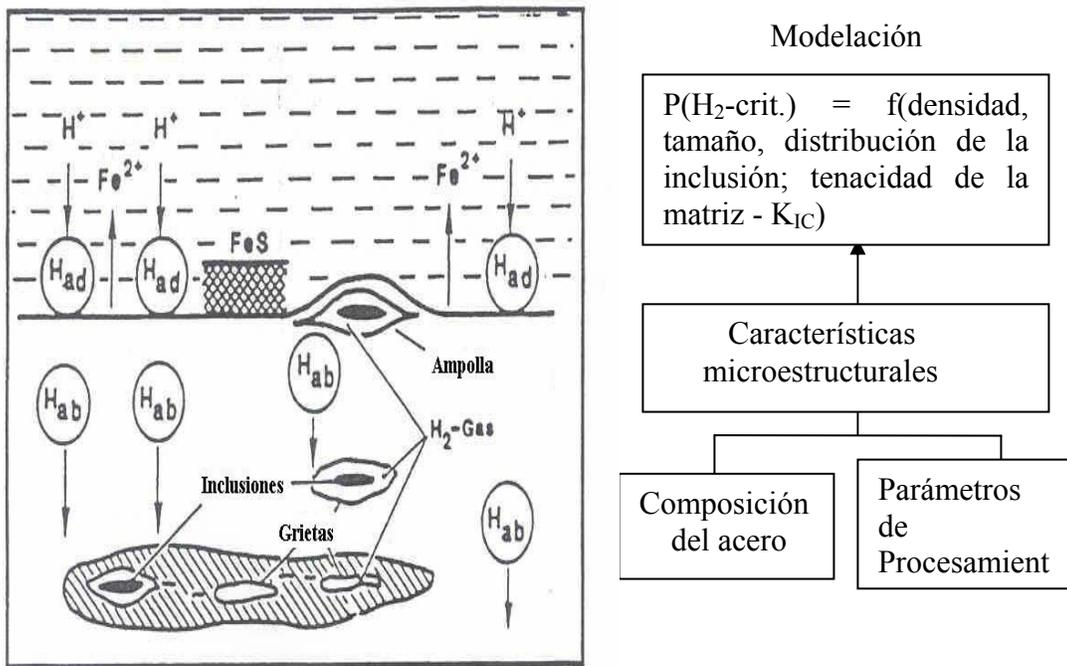
Un estudio del efecto de las inclusiones no metálicas: silicatos, óxidos de aluminio y sulfuros, indican que los sulfuros, comparados con otras inclusiones, son más dañinos, disminuyendo notablemente la resistencia del material al daño. Las inclusiones de sulfuro de manganeso (MnS) se deforman plásticamente durante el proceso de deformación en caliente, adquiriendo una forma alargada en la dirección longitudinal, que aumentaría la intercara inclusión–matriz, aumentando la susceptibilidad.<sup>(1)</sup>

La densidad de las inclusiones de sulfuros estará controlada principalmente por el contenido de azufre en el acero, el cual debe ser tan bajo como sea posible ( $S < 0,002\%$  y mejor  $< 0,001\%$ ). Por lo tanto, al añadir elementos con una fuerte afinidad por el azufre, tales como el calcio, se limita la formación de estas inclusiones. Sin embargo, existen proporciones efectivas de calcio de acuerdo al contenido de azufre (mayor  $0,002\%$ ), pues un exceso de calcio puede inducir a la formación de inclusiones de óxidos alargadas, que aumentarían la susceptibilidad. Se ha indicado una relación efectiva Ca/S en el baño (relación atómica  $\geq 1,5$ ), la cual promueve la formación de sulfuros de calcio (CaS) globulares. El oxígeno por otra parte debe ser mantenido tan bajo como sea posible ( $O \leq 0,002\%$ ) de manera de reducir los óxidos, los cuales son sitios potenciales para el agrietamiento.<sup>(1)</sup>

Las segregaciones de elementos tales como C, Mn deben ser mantenidas tan bajas como sea posible, pues éstas son áreas duras que se convierten en sitios preferenciales para la propagación de grietas en los aceros.<sup>(1)</sup>

El efecto de la microestructura sobre la susceptibilidad al daño por hidrógeno en aceros ha sido investigado ampliamente. Se encontrado que la resistencia al HIC en aceros de baja aleación y señalan que su comportamiento está fuertemente correlacionado con sus características microestructurales, y dependen de tres procesos de producción (procesos termomecánicos, normalizados y temple más revenido).

Ellos resumen que la resistencia al HIC en estos aceros en un intervalo de aplicación en condiciones de servicio en ambientes agrios, está asociado a la microestructura en términos de minimizar el contenido de inclusiones y constituyentes microestructurales duros. En cualquier caso, su tamaño, forma y distribución deben ser controladas cuidadosamente a través de todo el proceso de producción, como lo ilustra en la figura 3. La ocurrencia del daño por agrietamiento inducido por hidrógeno puede ser descrito por modelación considerando la actividad del hidrógeno en la superficie de la tubería, fracción y morfología de las imperfecciones, tenacidad a la fractura del material y las características geométricas de los sitios de agrietamiento potencial.<sup>(1)</sup>



**Figura 2.3.** Agrietamiento inducido por hidrógeno dependiendo de la producción del acero.<sup>(1)</sup>

La presencia de zonas heterogéneas en la microestructura de un acero, donde se presentan fases como por ejemplo bainita y martensita, generalmente aumenta la susceptibilidad al daño. Estas zonas presentan una alta dureza (20 HRC) y pueden promover la propagación de la grieta. Investigadores señalan que a pesar que ha sido una práctica aceptada que en los aceros con durezas menores que 22 HRC exhiben un comportamiento aceptable en ambientes agrios, ellos consideran a partir de los resultados obtenidos de su investigación que se debe tener la precaución sobre la aplicación de este criterio, puesto que las fallas parecen ser principalmente asociadas a la severidad del ambiente y esfuerzos aplicados y no a las propiedades tensiles (o dureza), en aceros utilizados en tubería de línea.<sup>(1)</sup>

Se conoce que la resistencia al daño por hidrógeno en aceros incrementa según el siguiente orden: <sup>(1)</sup>

Martensita revenida > bainita no revenida > Estructuras normalizadas > Martensita y bainita revenida > estructuras esferoidales.

Investigaciones realizadas sobre el efecto del trabajo en frío en la susceptibilidad al daño por hidrógeno en aceros, han indicado que éste disminuye la difusividad, siendo el aumento de las dislocaciones, generadas por el trabajo en frío las responsables de este hecho. Se ha observado además un incremento en la absorción del hidrógeno en estos aceros, asociado al incremento en la adsorción del hidrógeno que cubre la superficie y al atrapamiento como un resultado del trabajo en frío.<sup>(1)</sup>

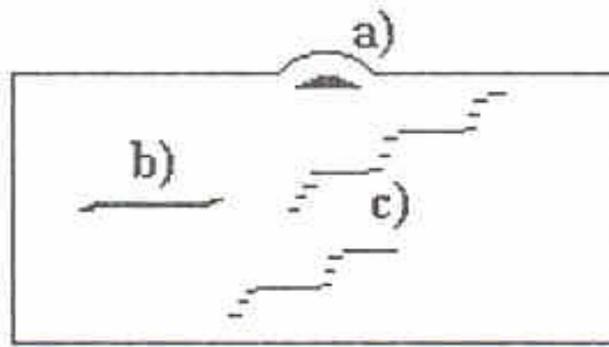
**Szklarska** y colaboradores<sup>(13)</sup> estudiaron el fenómeno de atrapamiento de hidrógeno en un acero X-52 laminado en frío usando la técnica de permeación (potenciostática de impulso) para la evaluación del coeficiente de difusión aparente y el de la red, y encontraron que la susceptibilidad al agrietamiento por hidrógeno del acero trabajado en frío resultó mayor que el acero sin trabajar en frío.

**Amarnath** y colaboradores<sup>(14)</sup> investigaron el efecto del trabajo en frío sobre el retardo de la falla inducida por hidrógeno, en tuberías de acero API X-52 y señalan que el trabajo en frío aumenta la susceptibilidad con la reducción en la resistencia tensil al entalle, el período de incubación y el límite de fatiga estática, a medida que incrementaron el trabajo en frío. Aceros trabajados en frío altamente (30% o más) resultaron menos susceptibles a la fragilización por hidrógeno, probablemente por la disminución en la cantidad de hidrógeno difusible disponible en el material. La fractura inducida por hidrógeno ocurrió por un mecanismo que involucró la nucleación de cavidades en inclusiones no metálicas, su crecimiento probablemente asistido por la presión de hidrógeno y una fractura final de manera escalonada.

Todos estos factores ambientales y metalúrgicos indican la importancia de un control en el proceso de manufactura del acero, desde la producción del acero líquido y durante el proceso de desoxidación y desulfuración del mismo hasta las etapas finales del proceso de conformado del tubo, que afectan su microestructura final.

#### **2.2.6. Características del daño inducido por hidrógeno**

En aceros que han sido expuestos a un ambiente agrio ( $H_2S$ ) acuoso el daño inducido por hidrógeno se puede presentar principalmente como ampollas, agrietamiento recto o continuo y agrietamiento escalonado. En la figura 2.4<sup>(1)</sup> se muestran los ejemplos típicos de estos daños comunes en aceros, los cuales se originan sin la aplicación de esfuerzos externos.



**Figura 2.4.** Morfología de las grietas en un ambiente de  $H_2S$  acuoso:<sup>(1)</sup>  
a) Ampollamiento.  
b) Agrietamiento continuo inducido por hidrógeno.  
c) Agrietamiento escalonado inducido por hidrógeno continuo.

Las ampollas y las grietas se forman como un resultado de la combinación de hidrógeno atómico absorbido por el material a hidrógeno molecular en sitios de defectos. Las inclusiones no metálicas pueden especialmente formar tales sitios de defectos. Debido a la formación de presiones altas de hidrógeno molecular, que son alcanzadas en estos defectos, se produce agrietamiento y generación de esfuerzos cizallantes en el extremo de la grieta.<sup>(1)</sup>

Si las presiones son bajas se producirán grietas cercanas a la superficie, y a medida que sean mayores a lo interno del material. Las grietas cercanas a la superficie no crecen simplemente paralelas a la superficie y sus longitudes están limitadas por las grietas que yacen inclinadas a la superficie. Las grietas cercanas a la superficie se observan como ampollas. La ocurrencia de estas grietas está restringida a una zona estrecha cercana a la superficie del material. En la mayoría de los casos no existe relación entre estas grietas y las inclusiones no metálicas que pueden ser reveladas por microscopía de luz. Éstas pueden estar presentes en materiales puros, los cuales contienen solamente pequeñas cantidades de inclusiones no metálicas. Por otro lado, las grietas a una distancia más de 1 mm de la superficie en materiales susceptibles al agrietamiento inducido por hidrógeno, están siempre asociadas con las inclusiones no

metálicas. Éstas pueden formar grietas discretas ó un arreglo de grietas las cuales yacen paralelas unas de otras y son conectadas por grietas entre ellas. En este caso son llamadas grietas escalonadas. Las grietas que se conectan a las grietas principales y conducen al agrietamiento escalonado son causadas por los esfuerzos cizallantes entre las grietas principales.<sup>(102,103)</sup>

Las ampollas en la superficie y las grietas internas se encuentran en ausencia de esfuerzos externos cuando hay un ingreso de hidrógeno en el material. Los factores que influyen el número y tamaño de estas grietas son: <sup>(1)</sup>

- Actividad del hidrógeno en el material y
- Tamaño, forma y número de inclusiones no metálicas, especialmente en combinación con microestructuras susceptibles como bainita y martensita no revenida.

Cuando el agrietamiento ocurre en inclusiones no metálicas en ausencia de esfuerzos externos es referido como agrietamiento inducido por hidrógeno.

#### **a) Ampollamiento inducido por hidrogeno**

Se han realizado investigaciones con la finalidad de calcular la presión que se alcanza dentro de la muestra de acero por la precipitación de hidrógeno. Los valores reportados han sido entre  $10^3$  y  $10^7$  atm, mientras que termodinámicamente, presiones (ó fugacidades) de más  $10^{10}$  atm pueden ser obtenidas. Valores mayores se han observados experimentalmente en cátodos huecos oscilando entre 200 y 300 atm. La resistencia del material representa un límite natural, que no puede ser excedido, pero suficiente información falta aún sobre datos básicos, la cual debería ser considerada por aceros cargado por hidrógeno.

Se ha señalado que se puede formular tentativamente conclusiones generales sobre los mecanismos del ampollamiento por hidrógeno y la formación de microgrietas en el hierro y los aceros, bajo la acción de carga electroquímica a temperaturas bajas y medias:<sup>(1)</sup>

- En aceros ferríticos dúctiles y aceros ferríticos-perlíticos, las ampollas por hidrógeno nuclean en inclusiones no metálicas; estas ocurren particularmente cuando las inclusiones no metálicas son distribuidas en capas o fibras arregladas perpendicularmente al flujo del hidrógeno que difunde.
- En ausencia de esfuerzos, las intercaras ferrita-carburo, los bordes de grano y el apilamiento de las dislocaciones no parecen ser sitios capaces para la nucleación de ampollas de hidrógeno.
- La inmunidad total o parcial del ampollamiento puede ser observada ya sea en hierro de alta pureza o en aceros comunes, cuando el hidrógeno difunde a lo largo de las capas ó fibras de las inclusiones no metálicas.
- La nucleación y crecimiento de las ampollas en un sitio dado del metal depende de la concentración local (o más precisamente del potencial químico) de la permeación de hidrógeno. Esto se convierte en una función de la concentración (potencial químico) de la permeación de hidrógeno justo debajo de la superficie del cátodo.
- Las ampollas se desarrollan estrictamente a una distancia crítica determinada en la parte interna de la superficie del cátodo. Por debajo de esta distancia, las ampollas no pueden resistir la presión desarrollada en ellas durante la carga, y se convierten en grietas abiertas, mientras que a distancias mayores al valor crítico, el potencial químico de la permeación de hidrógeno no es suficientemente alto como para nuclear una ampolla. La distancia crítica depende de las propiedades elásticas y plásticas del material bajo

consideración. En general, la distancia disminuye con el incremento de la resistencia del metal.

- El hidrógeno gaseoso acumulado en las ampollas de muestras de hierro Armco después de ser sometidas a cargas catódicas prolongadas, en soluciones ácidas con arsénico a 65 °C , se desarrollan a una presión estimada de aproximadamente a  $10^4$  atm, con una fugacidad asociada del orden de  $10^7$  atm.
- En un intervalo de temperatura de 10°C a 80°C, el volumen de hidrógeno en las ampollas disminuye con la temperatura de carga.
- No parece existir una correlación entre el sobrepotencial de hidrógeno en el cátodo y el potencial de permeación de hidrógeno.

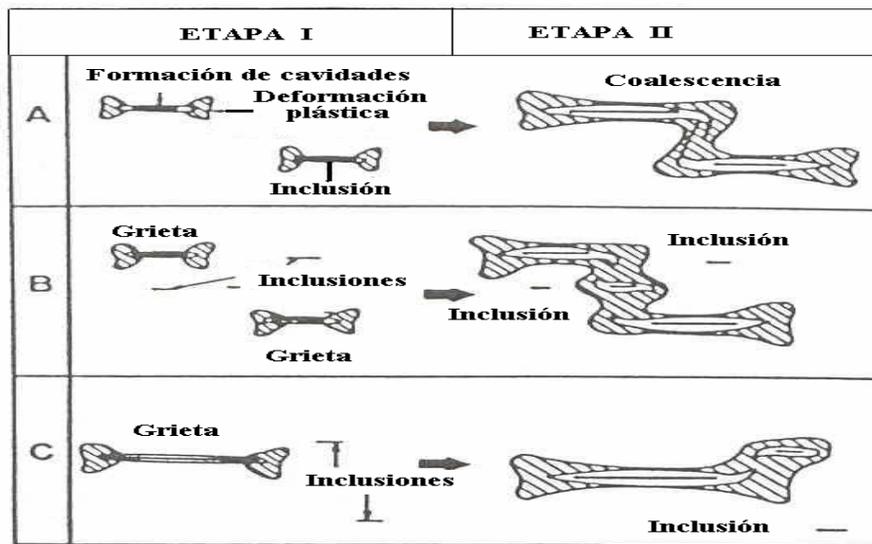
#### **b) Agrietamiento inducido por hidrógeno**

A menudo se observan grietas continuas acompañadas de escalonadas. Estas grietas individuales tienen la apariencia de una cavidad y coalescen unas con otras a lo largo de los planos locales de cizallamiento. Estas dos tipos de grietas, pueden estar acompañadas de ampollas, las cuales ocurren por las altas concentraciones y presiones parciales de  $H_2S$ . En esta condición existe una gran cantidad de hidrógeno atómico capaz de recombinarse para formar hidrógeno molecular y de esta manera generar cavidades, apreciables incluso a simple vista.<sup>(1)</sup>

Con frecuencia una grieta se desarrolla en forma escalonada. Ésta puede ser causada por la coalescencia de dos o más grietas, las cuales pueden tener diferentes procesos de desarrollo como se ilustra en la figura 2.6.<sup>(1)</sup>

**A.** Unión directa, la cual puede ocurrir entre inclusiones que se encuentran a corta distancia.

- B. Creación de una pequeña grieta debido a la interacción de dos grietas principales que pueden estar a gran distancia. La unión entre la grieta principal y la grieta pequeña se realiza como en el caso de la unión directa.
- C. Generación de una pequeña grieta delante de otra principal. El escalonamiento se puede llevar a cabo repitiendo este procedimiento.



**Figura 2.5.** Esquema del proceso de escalonamiento de las grietas.<sup>(1)</sup>

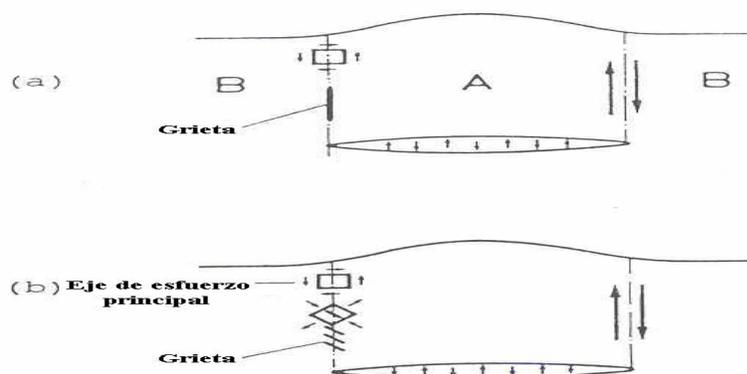
En el proceso de propagación de las grietas, no solo participan las inclusiones no metálicas, sino también componentes microestructurales como la perlita laminar, micro inclusiones y penetraciones de ferrita, pueden constituir puntos de inicio y propagación para el HIC.<sup>(1)</sup>

### 2.2.7. Agrietamiento siguiendo el criterio de la mecánica de fractura

Cuando se consideran materiales plásticos, la deformación ocurre por deslizamiento y un criterio de fractura a una escala microscópica puede ser del tipo “esfuerzo cizallante crítico”. Para materiales frágiles la fractura ocurre por

separaciones de planos atómicos, en el caso de clivaje por ejemplo. Para la fragilización por hidrógeno, algunas observaciones conducen a pensar que el criterio es del tipo “esfuerzo normal crítico”:<sup>(1)</sup>

- Superficies de fractura en nitrógeno líquido después de ser cargadas con  $H_2$  mostraron áreas con un aspecto de cuasi-clivaje, revelando una pequeña ductilidad.
- Por otro lado, mientras una ampolla se forma en la superficie, causada por una subyacente, paralela a la superficie de la ampolla, grietas secundarias ocurren a  $45^\circ$  de la superficie de la lámina. En la hipótesis simplificada que el área A (figura 2.6a) está expuesta a una traslación con respecto al área B, el criterio de un esfuerzo cizallante crítico conduce al agrietamiento vertical, mientras que cuando el criterio es un esfuerzo normal crítico, éste conduce a una grieta a  $45^\circ$  (figura 2.6b), orientación que ha sido encontrada en la realidad.<sup>(1)</sup>



**Figura 2.6.** Criterio de mecánica de fractura:<sup>(1)</sup>

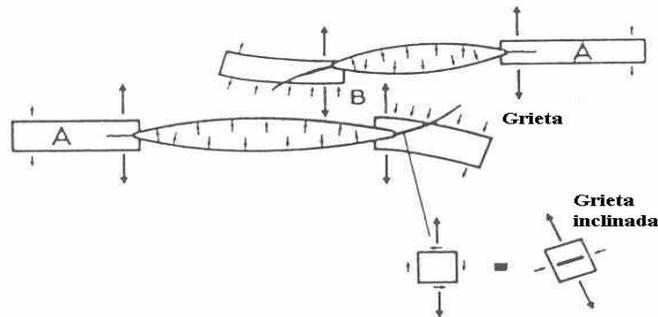
a) esfuerzo cizallante crítico.

b) esfuerzo normal crítico.

Investigadores señalan que el agrietamiento se inicia en inclusiones elongadas ó esféricas (en este caso, éstas son probablemente encontradas con microgrietas formadas durante la laminación en caliente). El defecto inicial es paralelo a la superficie de la lámina. Cualquiera que sea el análisis mecánico utilizado, elástico, elastoplástico, esfuerzo plano o deformación plana, el esfuerzo tensil máximo en el extremo de la grieta es perpendicular al defecto, y la grieta por lo tanto se propagaría en su plano, frecuentemente localizado en una banda segregada. Una grieta aislada no tiene razón para dejar este plano. Cuando dos grietas paralelas pero no co-planares permanecen cerca una de otra, los campos de esfuerzos que éstas inducen en la matriz interactúan. Si se considera un análisis mecánico estricto esto no es posible, sin embargo mediante una simplificación en el extremo de la grieta, se puede representar la evolución de los esfuerzos como se indica en la figura 2.7.<sup>(1)</sup>

En el extremo de la grieta, además del estado de esfuerzo usual (área A), el efecto de la presión interna de la grieta vecina producirá un momento de doblado (área B), el cual provoca una rotación de los ejes principales y de la dirección del esfuerzo máximo. La grieta perpendicular a esta dirección continuará doblándose hasta aproximarse a la otra grieta, tal y como se ha observado experimentalmente.<sup>(1)</sup>

Se ha hecho énfasis en el carácter puramente cualitativo de este análisis, esto sin embargo permite explicar las características y apariencia sistemática del proceso de coalescencia de las grietas, la morfología de los macro-defectos, y la superficie de fractura escalonada, sin la intervención de esfuerzos cizallantes. Tal proceso de agrietamiento requiere suficiente tiempo de carga para que la presión del hidrógeno molecular tenga tiempo para formarse.<sup>(1)</sup>



**Figura 2.7.** Propagación de una grieta a partir de una inclusión sin esfuerzo externo. Interacción entre dos grietas.<sup>(1)</sup>

## 2.3. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS. TÉCNICA DE ULTRASONIDO

### 2.3.1. Ensayos no destructivos (END)

Los END corresponden a una serie de métodos que permiten obtener una información sobre propiedades, estructuras y condiciones de un material o componente, sin modificar su comportamiento para el servicio.<sup>(15)</sup>

Entre los principales objetivos de los END se encuentran:

- Detectar discontinuidades en materiales y estructuras sin destrucción de los mismos (Detección).
- Determinar la ubicación, orientación, forma, tamaño y tipo de discontinuidad (Evaluación).
- Establecer la calidad del material, basándose en el estudio de los resultados y en la severidad de las discontinuidades y/o defectos conforme a las normas de calidad y los objetivos del diseño (Calificación).

### **2.3.2. Discontinuidades, definición y clasificación**

La discontinuidad de un material se define como la interrupción en su estructura normal.

Defecto, es una discontinuidad que no es aceptable por norma o especificación de diseño. Las discontinuidades se pueden clasificar:

Según su forma:

- Esféricas o volumétricas.
- Planares.
- Aglomerados micro o macroscópicos.

Según su ubicación:

- Superficiales: grietas, porosidades abiertas, rechupes, cortaduras, solapamientos, desgarraduras por solidificación, metal frío, etc.
- Internos: Solapaduras, cavidades gaseosas, porosidades, escoria, inclusiones, segregaciones, rechupes internos, laminaciones, capas de inclusiones, grietas, roturas por temperaturas inadecuadas, falta de unión, discontinuidades típicas de la soldadura (falta de fusión, falta de penetración, socavamientos, inclusiones de escoria).

Según su proceso de producción:

- Natos o inherentes: generados durante la constitución de los materiales.
- De procesamiento: generados durante el procesamiento de los materiales para obtener productos semi terminados o acabados.
- De servicios: son generados durante el tiempo de operación, por ejemplo grietas de fatiga, picaduras y reducción de espesor debido a la corrosión, ampollamientos y grietas por daños por hidrógeno, etc.

Los END de uso común son: visual, líquidos penetrantes, radiografía industrial, ultrasonido, corrientes inducidas, partículas magnéticas, ensayos de fuga, emisión acústica, vibraciones y termografía.<sup>(15)</sup>

### 2.3.3. Técnica de ultrasonido

#### 2.3.3.1. Principios fundamentales de la acústica

Para entender los fenómenos que ocurren cuando se aplica la técnica de ultrasonido es necesario considerar algunos conceptos básicos de la acústica. Se deben considerar conceptos elementales como oscilación, ondas y otros. A continuación se recogen algunos de los más importantes.

**Oscilación:** es el cambio periódico de condición o comportamiento de un cuerpo.<sup>(16)</sup>

**Periodo:** es el tiempo necesario para llevar a cabo una oscilación, por ejemplo el tiempo en que un cuerpo se mueve un ciclo completo relacionado al momento de estados idénticos.<sup>(16)</sup>

**Frecuencia:** es el número de oscilaciones de una partícula por segundo. Dentro de una misma onda, la frecuencia es la misma para todas las partículas, y es idéntica a la frecuencia del generador. La unidad Internacional de frecuencia es el Hertzio, donde:<sup>(16)</sup>

El período y la frecuencia están relacionados por la relación:

$$f = \frac{1}{T} \quad (4)$$

Donde:

T: Período

f: Frecuencia

**Amplitud:** es la máxima desviación del cuerpo oscilante desde la posición de equilibrio.<sup>(16)</sup>

**Fase:** es la condición instantánea en una oscilación. Este concepto se aplica principalmente cuando se comparan dos oscilaciones. También es llamado diferencia o desplazamientos de fase.<sup>(16)</sup>

**Amortiguación:** es el decremento en el tiempo de la amplitud de una oscilación.<sup>(16)</sup>

**El sonido** se define como la vibración mecánica de partículas en un medio. Cuando una onda sonora se transmite a través de un medio; las partículas vibran alrededor de un punto fijo, a la misma frecuencia que la onda sonora. Las partículas no se trasladan con la onda, sólo reaccionan ante la energía de la misma; esto implica que la energía de la onda es la que se transmite a través del material, por medio de sus partículas.

Ultrasonido, es el nombre dado al estudio y aplicación de ondas sonoras con frecuencias superiores a las percibidas por el humano. Las ondas sonoras pueden ser divididas en tres grandes grupos: *Infrasónica*, donde el intervalo de frecuencias es menor a 16 ciclos por segundo ( $f < 16$  Hz), *Sónica*, donde las frecuencias se encuentran entre 16 y 20.000 ciclos por segundo ( $16 \text{ Hz} < f < 20 \text{ KHz}$ ) y *Ultrasónica*, donde las frecuencias son mayores a 20,000 ciclos por segundo ( $f > 20 \text{ KHz}$ ). Sin embargo, la frecuencia más alta lograda hasta el presente, es del orden de 1,000.000.000 ciclos por segundo (1.000 MHz). El intervalo de frecuencias usado en

ultrasonido abarca desde los 200.000 hasta los 25.000.000 ciclos por segundo (200 KHz hasta 25 MHz).<sup>(17)</sup>

**Onda:** es la propagación de una oscilación y sucede cuando una partícula oscila transmitiendo su vibración a la adyacente. La partícula adyacente tiene una diferencia de fase constante. El gráfico de una onda es similar al de una oscilación, pero contra una distancia en lugar del tiempo.

**Longitud de Onda:** La longitud de onda,  $\lambda$  es la distancia entre dos planos en los que las partículas se encuentran en el mismo estado de movimiento. La longitud de onda es inversamente proporcional a la frecuencia. El período y la longitud de onda están relacionados, pues el período es el tiempo que toma una partícula en recorrer una longitud de onda. Para todos los tipos de onda se cumple la siguiente relación:

$$\lambda = \frac{V}{f} \quad (5)$$

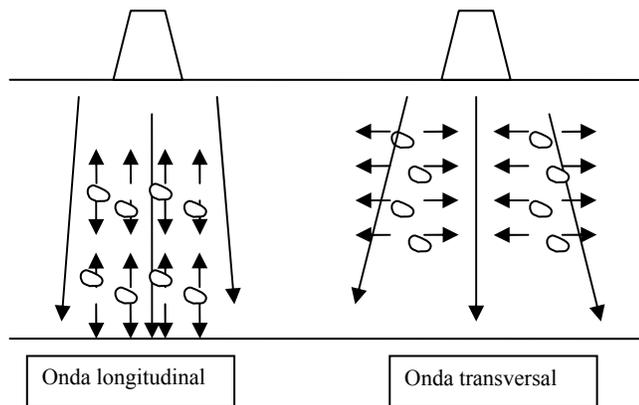
Donde:

$\lambda$  : Longitud de onda

$V$ : velocidad acústica

$f$  : Frecuencia

**Onda longitudinal y onda transversal:** La onda longitudinal es aquella que provoca oscilaciones en la dirección de la propagación mientras que la onda transversal es aquella cuyas oscilaciones se realizan en dirección transversal al haz de propagación, tal como se ilustra en la figura 2.8.



**Figura 2.8.** Movimiento de las partículas cuando se emiten ondas longitudinales y transversales.

**Velocidad acústica:** La velocidad acústica, es la distancia recorrida por las ondas en un medio en una unidad de tiempo; en otras palabras, es la velocidad de propagación del sonido en el medio.

La velocidad acústica es una propiedad del material y, en general, es constante para cada material dado, para cualquier frecuencia y cualquier longitud de onda. Sin embargo, esto no es rigurosamente exacto, pues dicha velocidad depende, especialmente en los gases y líquidos, presión, temperatura y de otros parámetros. En muchos materiales sólidos, tales como los metales, esta influencia se puede despreciar. Por ello, se puede tomar esta velocidad, aproximadamente, como una constante del material, condición muy útil en los ensayos por ultrasonido.<sup>(16)</sup>

Existen dos velocidades comúnmente evaluadas en la técnica ultrasónica, Velocidad Longitudinal y Velocidad Transversal. Estas se asocian a las propiedades mecánicas de la siguiente forma:

$$V_t = \sqrt{\frac{E \cdot (1 - \mu)}{\rho \cdot (1 + \mu) \cdot (1 - 2\mu)}}$$

(6) y (7)

$$V_t = \sqrt{\frac{E}{\rho \cdot 2 \cdot (1 + \mu)}}$$

Donde  $E$  es el módulo de Young,  $\mu$  es la relación de Poisson y  $\rho$  es la densidad del material.

**Dispersión:** Es el fenómeno que ocurre cuando el tamaño del obstáculo es del mismo orden de magnitud que el de la longitud de onda. El proceso de propagación, como un todo, es débilmente interferido, aunque algo de energía es absorbida. Esta energía se extiende como una nueva onda esférica en todas direcciones, con el obstáculo como punto central.<sup>(16)</sup>

**Difracción:** Cuando el obstáculo es más grande que la longitud de onda, este posee una impedancia acústica diferente de los alrededores, se producirá una reflexión de la onda en el mismo.<sup>(16)</sup>

**Interferencia:** Es el efecto que se presenta cuando la nueva onda reflejada se superpone con la original tal que, dependiendo de las fases de ellas, se puede producir un refuerzo, un debilitamiento, o una completa anulación.<sup>(16)</sup>

**Disminución de la presión sónica:** A medida que la onda sónica se aleja del transductor la presión sónica disminuye. Esta disminución tiene como causas, la divergencia del haz y la atenuación del sonido.<sup>(16)</sup>

### 2.3.3.2. Generación de ondas.

En el campo de los ensayos no destructivos las ondas sonoras de ultrasonido se les conoce como ondas de presión. Esto debido a la interacción que tienen las moléculas adyacentes cuando oscilan, produciendo mayores presiones entre ellas.

Para la generación de las ondas de presión se utiliza un dispositivo que sirve, al mismo tiempo, como generador y receptor. El elemento que cumple las dos condiciones es un material piezoeléctrico que tiene la propiedad de deformarse al recibir una presión mecánica externa, produciendo una diferencia de potencial eléctrico entre sus caras y a la inversa, al aplicar a sus caras un potencial eléctrico, el material cambia de tamaño produciendo una onda de presión.

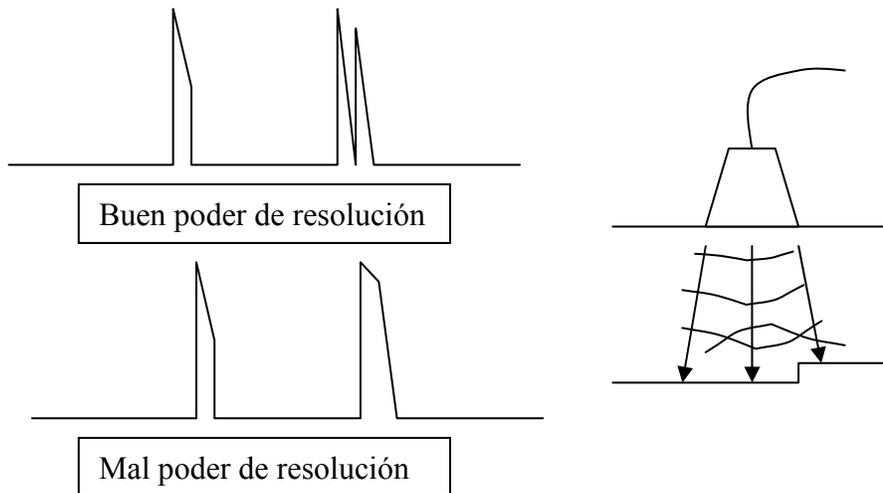
- Efecto magneto estrictivo.
- Efecto piezoeléctrico.

**Palpadores o transductores:** Son dispositivos construidos a base de materiales piezoeléctricos, siendo conectados a un equipo de ultrasonido, capaces de generar y recibir ondas ultrasónicas para la inspección de un material.

**Características de los palpadores:** Los cristales que se utilizan normalmente suelen ser: titanato de bario, metaborato de plomo, sulfato de litio y cuarzo, entre los más importantes.

El palpador tiene como características principales la sensibilidad y el poder resolutivo. La sensibilidad podría compararse al rendimiento del mismo. A medida que este convierta mayor energía eléctrica en energía sonora entonces mayor será su sensibilidad. A la hora de efectuar el ensayo se traduce en una mayor posibilidad de detectar discontinuidades de pequeño tamaño. Mientras que el poder resolutivo se

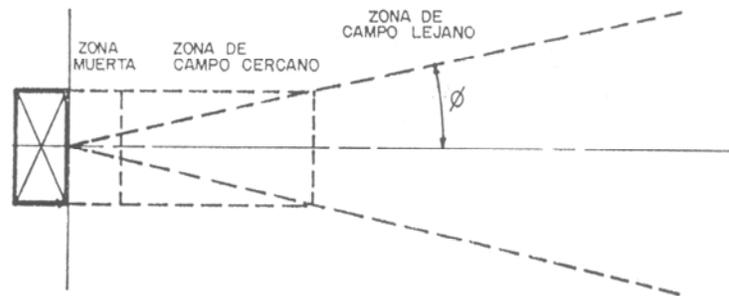
puede definir como la capacidad del palpador para separar ecos del fondo de dos espesores que estén a continuación del otro.<sup>(16)</sup>



**Figura 2.9.** Poder de resolución.

Cuando el palpador posee un buen poder resolutivo, los ecos de fondo aparecen en la pantalla del equipo perfectamente separados entre sí. La figura 2.9 ilustra una imagen de la onda ultrasónica con relación al poder resolutivo.

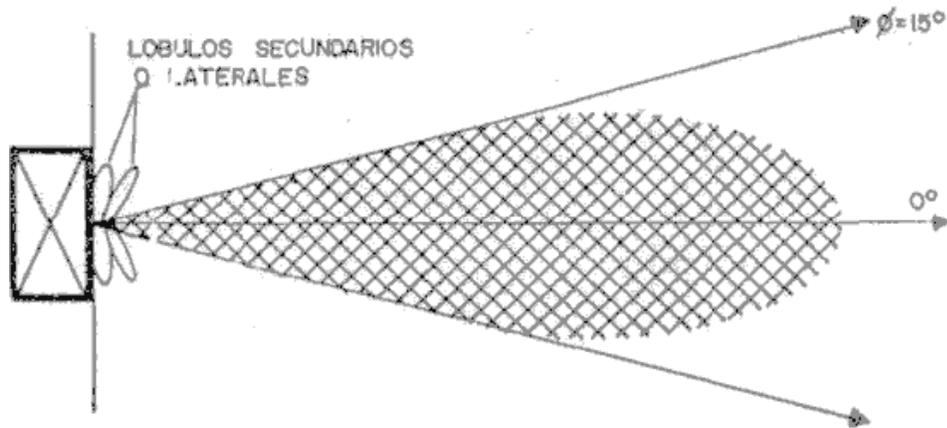
**El haz ultrasónico:** Una característica del haz de ultrasonido es que se proyecta de forma cónica. Si se mide la intensidad del haz sonoro a varias distancias del palpador, se aprecia que es posible distinguir tres zonas diferentes, tal y como se muestra en la Figura 2.10. Estas zonas son conocidas como: Zona Muerta, Zona de Campo Cercano o Zona de Fresnel, y Zona de Campo Lejano o Zona de Fraunhofer.



**Figura 2.10.** Diagrama del haz ultrasónico mostrando las diferentes zonas de intensidad.

**Zona Muerta:** Esta zona se debe a la interferencia producida por las vibraciones del cristal y su presencia en el haz. Está determinada por el tiempo de oscilación, es decir, el tiempo requerido por el cristal para generar el pulso de vibración.<sup>(16)</sup>

**Zona de Campo Cercano:** El efecto producido por la zona de campo cercano es algunas veces ignorado o desconocido, aunque tiene una gran importancia para la validez de los resultados. La energía es irradiada en todas las direcciones, a partir del punto de origen, y la presión acústica varía presentándose con máximos y mínimos. Sin embargo, el haz tendría una forma totalmente esferoidal, de no ser por la existencia de los lóbulos laterales o secundarios, que no son más que zonas de fluctuación de la intensidad, producidas por efecto de los bordes del cristal, según el principio de Huygens (ver Figura 2.11).



**Figura 2.11.** Geometría del haz para un palpador con un ángulo de divergencia de  $15^\circ$ .

La presencia de los lóbulos laterales causa que, para efecto de cálculos, el diámetro del cristal se vea reducido. La reducción se relaciona directamente con el diámetro y viene dada por la ecuación:

$$D_{ef} = \sqrt{\frac{4NV}{f}} \quad (8)$$

Donde:

$D_{ef}$  : Diámetro efectivo

$N$ : Longitud de campo cercano

$f$  : Frecuencia

Para efectos prácticos, el diámetro efectivo del cristal se considera como:

$$D_{ef} = 0,97 D \quad (9)$$

Donde:

$D_{ef}$  : Diámetro efectivo del cristal

$D$ : Diámetro nominal del cristal

La longitud de la Zona de Fresnel, varía de acuerdo con la longitud de onda y las dimensiones del cristal. Para palpadores con cristales circulares, la longitud de campo cercano viene dada por la siguiente ecuación:

$$N = \frac{D_{ef}^2}{4\lambda} = \frac{0,94D^2 f}{4V} \quad (10)$$

Por efecto de las fluctuaciones de la intensidad, en la zona de campo cercano, es sumamente difícil lograr la detección de discontinuidades. Esto ocasiona que se produzcan indicaciones múltiples, y la amplitud de las mismas tendrá grandes variaciones de acuerdo a la distancia desde la superficie reflectora, a la cara del palpador.

**Zona de Campo Lejano:** Luego de la zona de campo cercano comienza la zona de campo lejano, o Zona de Fraunhofer. En esta zona la intensidad o la presión sonora se estabiliza, teniendo mayor magnitud alrededor del eje imaginario del haz, tal como se ilustra en la figura 2.10, y va disminuyendo hacia los límites del mismo. A medida que se aleja del límite entre las zonas de campo cercano y lejano, la presión disminuirá exponencialmente por efecto de varios factores productores de pérdidas, tal como se ilustra en la figura 2.12. Uno de estos factores se denomina: divergencia del haz.

La divergencia del haz, se produce por el "Factor de Difracción de Fraunhofer". Esto es, el área cubierta por el haz sonoro, en la zona de campo lejano, aumentará con la distancia, lo que se traducirá como dispersión de la presión acústica. La divergencia del haz, se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\text{sen}(\theta) = 1,22 \frac{\lambda}{D} \quad (11)$$

$$\text{sen}(\theta) = 1,22 \frac{V}{Df} \quad (12)$$

Donde:

$\theta$  : La mitad del ángulo de divergencia

$D$  : Diámetro nominal del cristal

$f$  : Frecuencia

$V$  : Velocidad

El ángulo de divergencia del haz depende del diámetro del palpador y de la longitud de onda o del diámetro y la frecuencia del palpador, y de la velocidad acústica del medio transmisor.

En la zona de campo lejano, la presión acústica sufre disminuciones continuas a lo largo del recorrido del haz ultrasónico, estas disminuciones pueden ser expresadas de la siguiente manera:

$$P = 2P_0 \cdot 2 \text{sen} \left[ \frac{\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{D^2}{\lambda} + S^2} - S \right] \quad (13)$$

Donde:

$P$  : Presión acústica inicial

$P_0$  : Presión acústica atenuada

$D$  : Diámetro del cristal

$S$ : Camino sónico

La expresión generalizada para todo tipo de palpadores se puede considerar de la siguiente forma:

$$P = P_0 \pi \frac{N}{S} \quad (14)$$

$$P = P_0 \frac{S}{\pi \lambda} \quad (15)$$

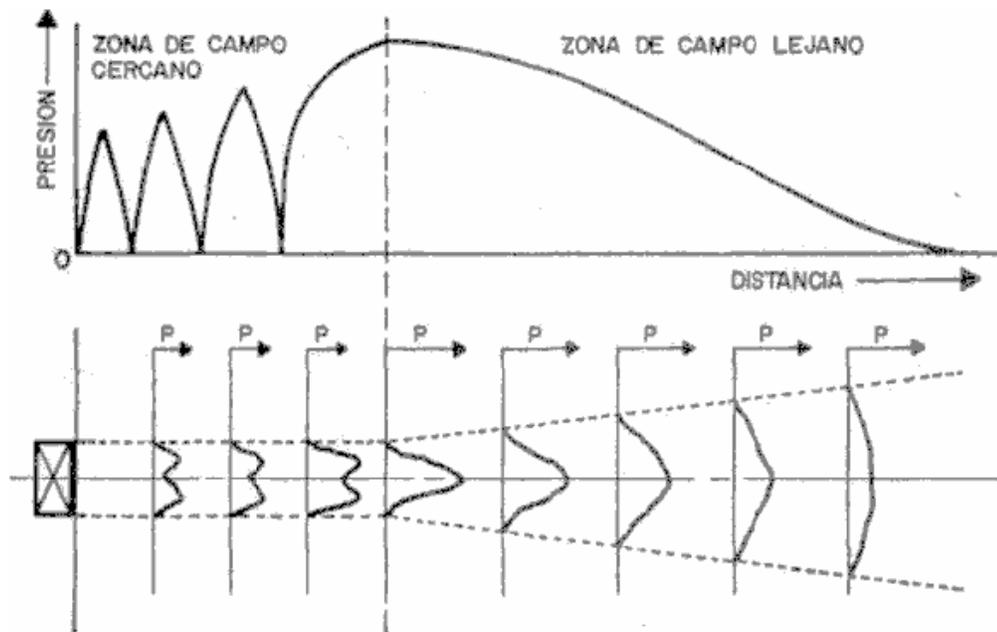
Donde:

S: Superficie del cristal

P : Presión acústica inicial

Po : Presión acústica atenuada

$\lambda$  : Longitud de onda



**Figura 2.12.** Distribución de la presión acústica a lo largo del recorrido del haz.

**Atenuación:** Las consideraciones realizadas hasta ahora han sido para un material ideal en el que la presión acústica se atenúa sólo en virtud de la divergencia de la onda. Según esto, en una onda plana, la presión acústica no se atenúa a lo largo de su propagación. Mientras que en una onda esférica, o también en el campo lejano del haz ultrasónico de un palpador, disminuye inversamente con la distancia a la fuente. Dicho de otra manera, en los equipos de presentación con pantalla osciloscópica, las variaciones de la presión acústica causadas por efecto de factores de atenuación pueden ser medidas directamente de la pantalla mediante la altura de los ecos de indicación, de la siguiente manera:

$$\alpha S = 20 \text{ Log} \left| \frac{P_0}{P} \right| \quad (16)$$

$$\alpha S = 20 \text{ Log} \left| \frac{H_n}{H_{n+1}} \right| \quad (17)$$

Donde:

$\alpha$ : Coeficiente de atenuación

$H_N$ : Altura de eco

$H_{N+1}$ : Altura del eco siguiente

Sin embargo, los materiales sólidos dan lugar a un efecto más o menos pronunciado de atenuación que se traduce en una debilitación del haz ultrasónico. Esto debido a dos causas: la absorción y la dispersión.

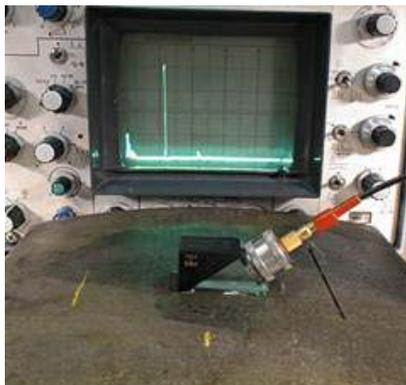
Para el examen de materiales, cuya estructura metalográfica sea calificada como grano fino, se ha encontrado que las frecuencias de ensayo más apropiadas son las comprendidas entre 2 y 5 MHz, teniendo una razonable sensibilidad, junto con un buen poder resolutivo a grandes distancias. Para el acero, las longitudes de onda van de 1 a 3 milímetros, por lo que en condiciones favorables (teóricamente), se pueden

detectar discontinuidades de 0,9 mm y mayores, tamaños que generalmente empiezan a ser tratados como defectos.

Otro de los factores perturbadores a la hora de recoger los ecos en un material ensayado es el efecto de dispersión. En el método de pulso-eco no sólo reduce la amplitud del eco de la discontinuidad y la del eco de fondo, sino que además, produce numerosos ecos parásitos con diferentes recorridos llamados *ruido de la señal*. Esto puede traer como consecuencia que ecos verdaderos queden cubiertos. Estas indicaciones falsas no se pueden contrarrestar aumentando la amplificación, ya que el efecto se incrementaría simultáneamente.

### 2.3.3.3. Instrumental básico

Los equipos utilizados en la práctica de un ensayo de ultrasonido son: el equipo generador-transmisor-receptor de pulsos, el cristal o transductor, bloque patrón, zapatas o buffer y medio acoplante. Adicionalmente se suma al ensayo un equipo osciloscopio que permite una mejor representación de los ecos en una base de tiempo horizontal. En la figura 2.13 se ilustra un equipo básico de ultrasonido.



**Figura 2.13.** Equipo de ultrasonido y transductor angular.

Los equipos ultrasónicos en general operan en base a amplitud contra tiempo, es decir, la amplitud de la señal contra el tiempo que toma en ser detectada. La amplitud de la señal puede ser controlada o ajustada mediante artificios electrónicos. El tiempo puede ser traducido a distancia mediante cálculos utilizando para cada material, las velocidades de propagación de las ondas.

Algunos sistemas de ensayo ultrasónicos son: Resonancia, Transmisión, y Pulso-Eco. Los sistemas de resonancia y pulso-eco operan por reflexión del haz ultrasónico, mientras que el sistema de transmisión opera bajo el principio de transparencia o sombra. Por esta razón, las magnitudes características a medir mediante la aplicación de estos sistemas son:

- Frecuencia de resonancia,
- Intensidad acústica,
- Tiempo de recorrido del ultrasonido.

#### **2.3.3.4. Sistema Pulso-Eco**

Los sistemas de ensayo por pulso-eco son la emisión de pulsos ultrasónicos de corta duración con una frecuencia definida. Están basados en el efecto del eco que un reflector produce al ser encontrado por un haz ultrasónico. El oscilador receptor, separado o formando una unidad con el emisor, recoge el eco del reflector transformándolo en la indicación correspondiente, por lo que opera siempre por reflexión.

### **2.3.3.5. Tiempo de Recorrido**

Los equipos diseñados solamente para medir el tiempo que tarda el impulso acústico en recorrer un espesor dado de material, resultan de la simplificación de los que miden la intensidad y el tiempo de recorrido. En aquel caso, se omite la medida de la intensidad acústica y la indicación del tiempo de recorrido se suele representar, traducida directamente a espesor de material, por un indicador de sistema digital. Algunos equipos, en lugar de medir el espesor, determinan la velocidad acústica aunque son menos utilizados.

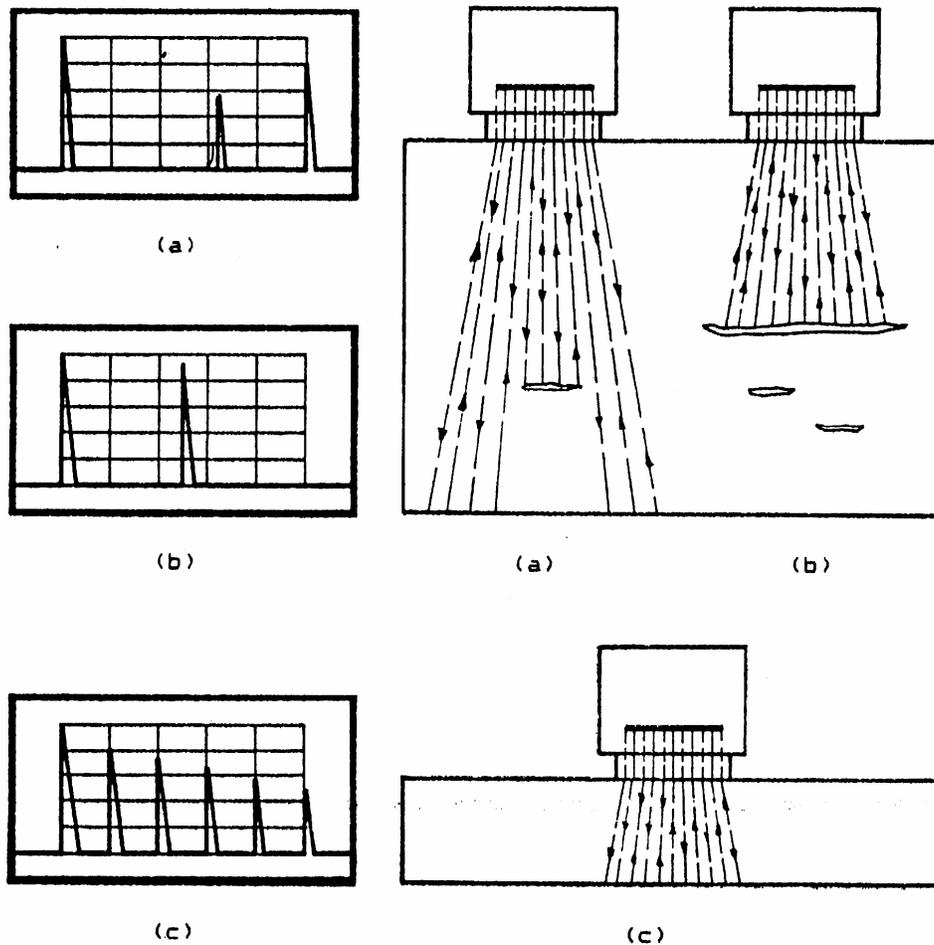
Los equipos para medición de espesores por ultrasonido han adquirido un gran desarrollo en la actualidad, y su aplicación se ha extendido a numerosas industrias, especialmente a aquellas que, debido a problemas de corrosión, requieren un control de mantenimiento periódico de sus instalaciones en cuanto a posibles mermas de espesor en tuberías, recipientes, etc. En la actualidad, se dispone de equipos prácticamente de bolsillo, cuyo manejo es elemental y que permiten medir espesores desde 0,05 hasta 300 mm.

Estos equipos disponen de un amplificador de ganancia automática que controla el nivel de señal para evitar problemas de pérdida de la indicación por efecto de mal acoplamiento, o excesiva atenuación del material. El desarrollo de este tipo de amplificadores ha permitido impulsar la utilización de éstos equipos. Las señales que no alcanzan un determinado nivel, no se amplifican y el equipo no proporciona indicación. De igual modo, toda señal que rebasa el umbral mínimo se amplifica hasta alcanzar un valor prefijado y constante, por lo que los errores posibles por altura de señal quedan muy reducidos. Los palpadores utilizados son de doble cristal, uno emisor y el otro receptor.

### **2.3.3.6. Intensidad Acústica y Tiempo de Recorrido**

Los equipos de pulso-eco de medida de la intensidad acústica y el tiempo de recorrido, emiten impulsos acústicos cortos, a intervalos constantes, de manera que se obtiene una respuesta periódica función del tiempo de recorrido del impulso acústico desde el oscilador emisor al cristal piezoeléctrico receptor. El impulso acústico recibido, procedente de su reflexión en una discontinuidad o en una superficie límite de la muestra, se transforma en una señal o impulso eléctrico, que se visualiza según una indicación en la pantalla cuya altura es proporcional a la presión acústica del eco.

En la Figura 2.14 se reproducen los oscilogramas que se obtienen para los diversos ejemplos mostrados de detección de discontinuidades. Se comprueba como, además de detectar pequeñas discontinuidades, se puede determinar su posición, lo cual representa un avance decisivo para la mayoría de las aplicaciones.



**Figura 2.14.** Sistema pulso-eco.

En la Figura 2.14 se presentan los oscilogramas correspondientes a las posiciones presentadas de los palpadores. En primer lugar, el equipo debe encontrarse calibrado para la distancia presentada en las Figura 2.14a y 2.14b.

Si las discontinuidades presentes en la pieza de ensayo son pequeñas comparadas con la sección del haz ultrasónico, se obtiene simultáneamente con la indicación de su eco, la del eco de fondo de la muestra (Figura 2.14a). Esta se puede apreciar a una distancia del origen en la base de tiempo proporcional a la distancia real, si la base de tiempo es lineal, tal como ocurre en la mayoría de los equipos. Si la discontinuidad

presenta una superficie capaz de interceptar todo el haz, no se obtendrá indicación de eco de fondo ni de otras discontinuidades mas alejadas, que se encuentren ocultas detrás de ésta (Figura 2.14b).

La desaparición de la indicación del eco de fondo proporciona una información adicional acerca del tamaño del reflector. Si la muestra tiene sus superficies paralelas, pueden aparecer en la pantalla varias indicaciones de los sucesivos ecos de fondo, siempre que el intervalo de espesor que puede abarcar la pantalla sea lo suficientemente grande como para que cubra la distancia correspondiente a varias veces el espesor. En este caso se obtiene un oscilograma de ecos múltiples, como el de la Figura 2.14c. La sucesión de indicaciones de los ecos de fondo, se produce como consecuencia de las reflexiones sucesivas del impulso acústico en las superficies paralelas de la muestra, perdiendo en cada recorrido de ida y vuelta, una parte de su energía por atenuación y otra parte por reflexión de los ecos de indicación. Esto hace que cada indicación de los sucesivos ecos de fondo pierda altura en relación con la que le precede. La pendiente de la curva que forman los picos de las indicaciones de los sucesivos ecos de fondo, permite la medida del coeficiente de atenuación del material, considerando una base de tiempo lineal.

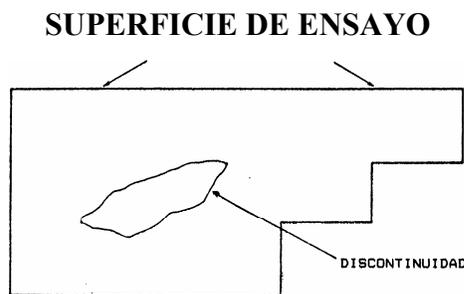
### **2.3.3.7. Presentación de resultados de los ensayos**

En las técnicas básicas de ultrasonido se utilizan tres formas de presentación visual de resultados para un ensayo de ultrasonido. Estos tipos de presentación son conocidos como:

- Presentación A-scan,
- Presentación B-scan,
- Presentación C-scan.

El tipo de presentación más común se conoce como A-scan. Los equipos ultrasónicos utilizados en aplicaciones médicas utilizan la presentación B-scan. Mientras que gran parte de los equipos que operan bajo la técnica de inmersión utilizan la presentación C-scan.

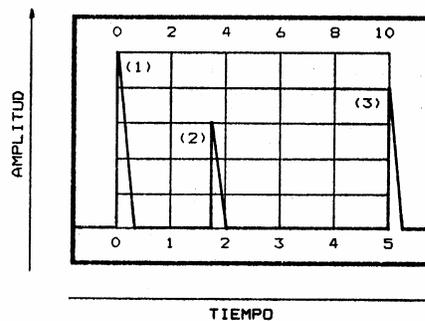
Sin embargo, para conocer mejor estos tres tipos de presentación de resultados se muestran las presentaciones en pantalla de ensayos ultrasónicos efectuados en la pieza mostrada a continuación en la Figura 2.15.



**Figura 2.15.** Pieza de ensayo.

**Presentación A-Scan:** En la presentación A-Scan la altura de los ecos de indicación o "picos" representa la intensidad del haz ultrasónico reflejado. Igualmente, la línea base de tiempo proporciona el tiempo que tarda el haz ultrasónico en ser reflejado, por lo que para un valor de velocidad conocido es posible calibrar la pantalla en términos de distancia o profundidad de penetración. En otras palabras, la línea base horizontal indica el tiempo o la distancia de recorrido, mientras que verticalmente se observa la amplitud de la señal (Figura 2.16).

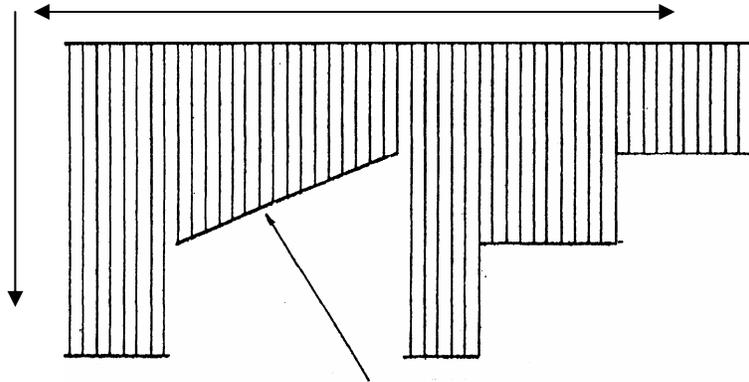
En el ejemplo mostrado en la Figura 2.16, se observan tres picos o ecos de indicación que corresponden: el número (1) al eco inicial, el número (2) al eco de discontinuidad y el número (3) al eco de pared posterior, de la pieza mostrada en la misma.



**Figura 2.16.** Presentación A-Scan.

Mediante la presentación A-Scan se puede determinar las dimensiones de discontinuidad, la profundidad o la distancia desde la superficie, la divergencia del haz ultrasónico y otros factores. Las indicaciones de los ecos que se producen por un voltaje alterno se representan rectificadas, es decir, con deflexión de la base de tiempo en un sólo sentido. Sin embargo, hay equipos que permiten visualizar también las formas de la indicación del eco sin rectificar.

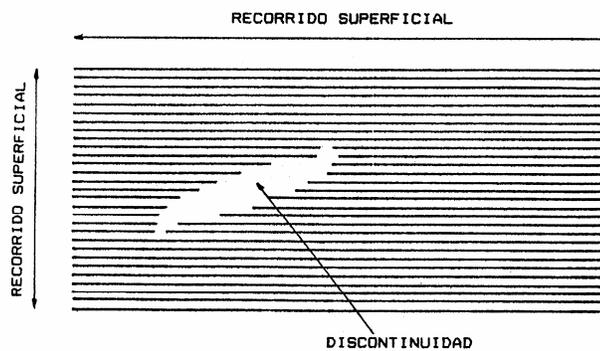
**Presentación B-Scan:** En la presentación B-Scan se observa el recorrido superficial en la pieza de ensayo, contra el tiempo o la profundidad de reflexión del haz ultrasónico, donde el brillo de la señal es proporcional a su amplitud (Figura 2.17).



**Figura 2.17.** Presentación B-Scan.

Se obtiene una vista del objeto perpendicular a la superficie de la pieza de ensayo y de forma tal que cualquier discontinuidad presente en el material creará una indicación de superficie límite.

**Presentación C-Scan:** En la presentación C-Scan se obtiene una imagen superficial del objeto de manera que cualquier discontinuidad presente en la zona de interés ocasionará una indicación, o la ausencia de ésta, como se observa en la Figura 2.18.



**Figura 2.18.** Presentación C-Scan.

La presentación de resultados de los equipos C-scan se realiza por un graficados en papel, e indica la ubicación superficial de la discontinuidad, sin proporcionar información acerca de su forma, orientación y profundidad. En otras palabras, un registro de resultados C-scan es similar a una película radiográfica, pues proyecta a un plano las discontinuidades internas.

#### **2.3.3.8. Factores que influyen en la transmisión del ultrasonido a través de la superficie de ensayo**

Entre los factores que influyen en la transmisión del ultrasonido, a través de la superficie de exploración, se pueden mencionar los siguientes:

- Medio de acoplamiento,
- Condición de la superficie y acabado superficial,
- Curvatura superficial,
- Frecuencia y diámetro del cristal.

**Efecto del medio de acoplamiento:** El propósito de la utilización de acoplantes en ultrasonido, es el de proveer una trayectoria con baja existencia a la transmisión del sonido, entre el palpador y la pieza de ensayo. El aire es un mal transmisor de la energía ultrasónica (altas frecuencias). Adicionalmente, su impedancia acústica es muy diferente a la de los materiales sólidos. Tan sólo una pequeña capa de un material acústicamente transmisor, es suficiente para proporcionar una buena transmisión de la onda.

**Tipos de acoplantes:** Algunos materiales acoplantes, son agua, multigel, algunos tipos de aceites, glicerina, grasas en base a petróleo, grasas en base a silicona, pulpa de papel, mercurio, plastilina y muchas otras pastas. Las gomas suaves pueden transmitir el sonido y son denominadas acoplantes secos. Otros métodos de acople, tales como la unión por presión de dos materiales sólidos dan excelentes

resultados. Si se aplica presión hasta 1.000 psi (libras por pulgada cuadrada), se puede lograr una excelente transmisión de la onda.

**Acoplantes para contacto directo:** Adicionalmente, para ensayos por el método de contacto directo la elección del agente acoplante depende de otras características de la pieza de ensayo, que son:

- Condición superficial
- Temperatura superficial
- Inclinación de la superficie

Los medios de acoplamiento acústicamente conductores, generalmente empleados son: las grasas y los aceites minerales de diversos grados de viscosidad. Cuanto mayor es la rugosidad superficial, mayor debe ser la viscosidad del aceite. Aun así, debe prestarse cuidado a la aparición de señales parásitas, debidas a la generación de ondas superficiales. Su viscosidad varía drásticamente con la temperatura, y algunos son inflamables. La atenuación producida por las grasas, especialmente las fabricadas en base a silicona es muy alta, por lo que pierden efectividad como acoplantes.

La glicerina es acústicamente muy conductora, pero presenta el inconveniente de no mojar bien la superficie de las muestras. Pese a ello, se aplica con mucha frecuencia, especialmente en superficies de acabado fino. Es el acoplante de más fácil remoción, pero su viscosidad varía rápidamente con la temperatura. La pulpa de papel y las pastas, en general, presentan propiedades deseables. Estas pueden ser mezcladas con casi todo el resto de los acoplantes y mantendrán una textura seca, son fáciles de remover, pero tienden a endurecer muy rápidamente.

El mercurio y las amalgamas son los mejores medios de transmisión acústica para su aplicación en muestras metálicas, pero son caros, peligrosos y de aplicación engorrosa, por lo que raramente se emplean. Como la adherencia no es buena en superficies rugosas, al explorar paredes verticales y bóvedas, se recurre al empleo de una mezcla gelatinosa de grasa y petróleo o de una pasta de metilcelulosa y agua con la adición de glicerina, para evitar que se seque, y de fosfato trisódico, para reducir la acción corrosiva.

La plastilina impregnada en aceite es el acoplante con mejores características de adherencia, presentando además la ventaja de que, en superficies rugosas, elimina en gran parte las señales parásitas. Para ensayos en caliente se pueden emplear aceites de alto punto de ebullición, superior a 300 °C, o silicona, si bien ésta es cara. También, se puede realizar la exploración en caliente, acoplando al palpador, un adaptador de material plástico resistente a altas temperaturas y emplear agentes de contacto tales como grasas y siliconas especiales, con lo cual se puede realizar ensayos de muy corta duración hasta temperaturas de 550 °C, teniendo la precaución de enfriar el palpador y el adaptador entre dos aplicaciones consecutivas.

#### **2.4. PROCESAMIENTO DE SEÑALES DIGITALES**

En el campo del procesamiento de señales digitales, la ciencia y la ingeniería encuentran un grupo de herramientas para descifrar información contenida en los fenómenos físicos. Se inicia una dinámica desde la obtención de una señal la cual es tratada hasta convertirla en una entrada adecuada para ser interpretada, es entonces que comienza el procesamiento de señales. Esta área se ha desarrollado rápidamente durante los últimos treinta años (30) debido a los avances tecnológicos tanto en los ordenadores digitales como en la fabricación de circuitos integrados.<sup>(17)</sup>

Un estudio completo de tratamiento digital de señales implica la dedicación de numerosas horas en el tema. De manera introductoria se recogen algunos conceptos fundamentales que permiten el entendimiento del procesado de señales digitales utilizado en el trabajo.

**Señal:** Se define como una cantidad física que varía con el tiempo, espacio o cualquier otra variable o variables independientes.<sup>(17)</sup>

Ejemplos:

a)  $S_1(t) = 5t$

b)  $S_2(t) = 20t^2$

c)  $S_3$  :



**Ruido:** Es cualquier señal indeseable que tiende a interferir con la recepción normal de la señal deseada, de origen eléctrico, o debido a agentes reflectores de material.

**Sistema:** Se puede definir como un dispositivo físico que realiza una operación sobre una señal. Ejemplo: un filtro que se usa para reducir el ruido en una señal.

**Fuente de señal:** Es el medio físico que origina a través de un estímulo una señal.

**Procesado de señal:** Son todas las operaciones que implican la separación de la señal deseada del ruido y la interferencia. Por ejemplo: una conversión de señal analógica a digital ó viceversa.

#### 2.4.1. Clasificación de las señales

Las señales se pueden clasificar en señales analógicas y señales digitales. El valor de una señal, en tiempo continuo o discreto, puede ser continuo o discreto. Si una señal toma todos los valores posibles en un intervalo tanto finito como infinito, se dice

que es continuo, por el contrario, si toma valores de un conjunto finito de valores se dice que es discreta. Las señales que toman valores de un intervalo infinito en tiempo continuo se denominan *señales analógicas*. Una señal de tiempo discreto que toma valores en un conjunto discreto se denomina *señal digital*. Haciendo una combinación resultan:<sup>(17)</sup>

- Señales discretas de tiempo discreto (Señal digital)
- Señales discretas de tiempo continuo
- Señales continua de tiempo discreto
- Señales continuas de tiempo continuo (Señal analógica).

En algunas aplicaciones, las señales son generadas por múltiples frentes o sensores. Un ejemplo a citar, es los tres componentes de una señal vectorial que representa la aceleración en la superficie terrestre de un terremoto. Esta aceleración es el resultado de tres clases elementales de ondas elásticas, ondas primarias (p), ondas secundarias (s) y ondas superficiales (k). Se define al vector de señales como una *señal multicanal*. Si se presta atención a las variables independientes de una función que representa una señal, resulta una nueva clasificación. Si la función es de una única variable la señal se denomina unidimensional. Por el contrario una señal se denomina multidimensional si es función de (n) variables independientes. Como ejemplo se tiene la imagen de una foto, como una *señal bidimensional*  $I(x,y)$  dado que la intensidad o brillo en cada punto es función de dos variables independientes x y y. Por otra parte, la imagen de una TV en blanco y negro puede representarse con  $I(x,y,t)$ , dado que el brillo es función del tiempo. Por tanto, la imagen de una TV a color, se puede describir mediante las tres siguientes funciones de intensidad,  $I_r(x,y,t)$ ,  $I_g(x,y,t)$ ,  $I_b(x,y,t)$ , correspondientes al brillo de los tres colores principales como función del tiempo. De aquí que la imagen de una televisión a color sea una *señal tridimensional multicanal*.<sup>(17)</sup>

### 2.4.2. Señales en tiempo discreto y sistemas en tiempo discreto

Una señal en tiempo discreto  $X(n)$  es una función de una variable independiente entera.

<b>N</b>	...-2	-1	0	1	2	...
<b>X (n)</b>	... 0	0	1	0	4	...

En muchas aplicaciones del procesado de señal digital es necesario diseñar dispositivos o algoritmos que realicen operaciones sobre señales en tiempo discreto. Tales dispositivos se denominan sistemas en tiempo discreto. En concreto, un sistema discreto es un dispositivo que opera sobre una excitación o señal de entrada en tiempo discreto según una regla preestablecida para generar otra señal denominada salida o respuesta del sistema.<sup>(17)</sup>

$$\mathbf{X(n)} \rightarrow \tau [ ] \rightarrow \mathbf{y(n)}$$

Señal de Entrada → Sistemas Discretos → Señal de Salida

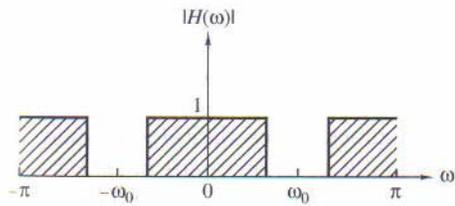
De particular importancia es la clase de los *Sistemas Lineales Invariantes* en el tiempo (LTI) ampliamente usados en la práctica para el diseño e implementación de sistemas de procesado digital.

### 2.4.3. Filtros

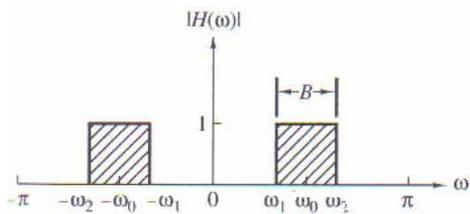
Los filtros son dispositivos que sirven para discriminar según algún atributo de los objetos que se aplican a su entrada, aquello que pasa a su través. Se emplean para describir el sistema lineal e invariante en el tiempo utilizado para realizar operaciones



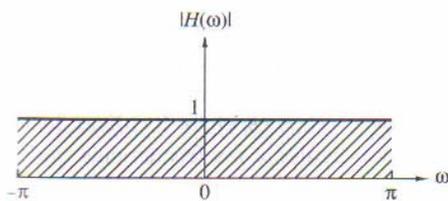
### Banda eliminada



### Paso banda



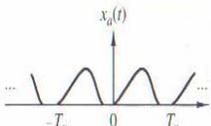
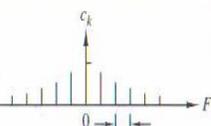
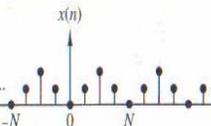
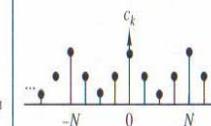
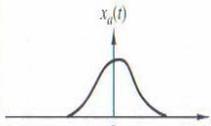
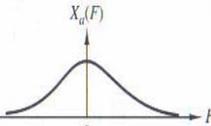
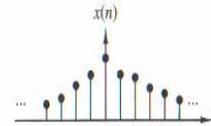
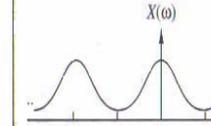
### Paso todo



## 2.4.4. Análisis frecuencial de señales. Transformada de Fourier

La transformada de Fourier es una de las diferentes herramientas útiles en el análisis y diseño de sistemas LTI. Otra son las series de Fourier. Estas representaciones de señales implican básicamente la descomposición de las mismas en términos de componente sinusoidales (o exponenciales complejas). Con esta descomposición se dice que una señal está representada en el dominio de la frecuencia.

La mayor parte de las señales de interés práctico se pueden descomponer en la suma de componentes sinusoidales. Para la clase de señales periódicas, esta descomposición se denomina una *Serie de Fourier*. Para la clase de señales de energía finita, la descomposición se denomina *Transformada de Fourier*.<sup>(17)</sup>

		Señales en tiempo continuo		Señales en tiempo discreto	
		Dominio del tiempo	Dominio de la frecuencia	Dominio del tiempo	Dominio de la frecuencia
Señales periódicas	Series de Fourier	 $c_k = \frac{1}{T_p} \int_{T_p} x_a(t) e^{-j2\pi k F t} dt$	 $F_0 = \frac{1}{T_p}$ $x_a(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k e^{j2\pi k F t}$	 $c_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j(2\pi/N)kn}$	 $x(n) = \sum_{k=0}^{N-1} c_k e^{j(2\pi/N)kn}$
		Continuas y periódicas	Discretas y aperiódicas	Discretas y periódicas	Discretas y periódicas
Señales aperiódicas	Transformadas de Fourier	 $X_a(F) = \int_{-\infty}^{\infty} x_a(t) e^{-j2\pi F t} dt$	 $x_a(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X_a(F) e^{j2\pi F t} dF$	 $X(\omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n) e^{-j\omega n}$	 $x(n) = \frac{1}{2\pi} \int_{2\pi} X(\omega) e^{j\omega n} d\omega$
		Continuas y aperiódicas	Continuas y aperiódicas	Discretas y aperiódicas	Continuas y periódicas

**Tabla 2.5.** Resumen de las fórmulas de análisis y síntesis del procesamiento de las señales.

## 2.5. ESTUDIOS RELACIONADOS A LA DETECCIÓN DE DAÑO POR HIDRÓGENO APLICANDO LA TÉCNICA DE ULTRASONIDO

En toda investigación se hace necesario considerar los antecedentes del tema en cuestión. Por ello, los trabajos publicados en revistas científicas han sido tomados como un punto de referencia para el entendimiento y dominio del estudio. En tal sentido, se hizo una revisión bibliográfica encontrando lo siguiente:

**Krüger et al<sup>(18)</sup>**, realizaron ensayos de ultrasonido por eco de fondo y backscattered (ondas retrodispersadas) en muestras planas de acero de dimensiones 20x36x100 mm atacadas con hidrógeno a altas y bajas temperaturas, encontrando que las muestras atacadas a bajas temperaturas son más susceptibles al ataque. Se evidenciaron pequeñas grietas relacionadas con las inclusiones de MnS. Observaron una disminución de la amplitud del eco de fondo a altas frecuencias en las regiones en donde se encontraban las grietas. También reconocieron que el análisis realizado por “backscattered” identifica las muestras atacadas pero no la localización de las grietas, caso contrario al análisis por eco de fondo.

**Birring et al<sup>(19)</sup>**, emplearon tres métodos para el estudio del daño por hidrógeno sobre tuberías de calderas que transportan crudos, estos son: relación de velocidades  $V_{\theta}/V_L$ , donde  $V_{\theta}$  representa la velocidad de onda transversal y  $V_L$  la velocidad de onda longitudinal, atenuación y backscatter. Observaron que existe un incremento en la atenuación cuando la muestra es atacada por hidrógeno. Sin embargo, no pudieron aplicar la técnica de atenuación debido al fuerte deterioro por el ataque del hidrógeno en el área interna de la tubería. Encontraron los siguientes resultados: la velocidad de la onda longitudinal disminuye en un 10%, la atenuación aumenta 4,2 dB/cm, la amplitud backscatter aumenta a 21 dB. Recomiendan emplear una configuración especial de los transductores, según sea el caso a analizar.

**O'Connell et al<sup>(19)</sup>**, mostraron que las microgrietas de un material pueden reducir la velocidad de las ondas. Sin embargo, también predicen que existe una disminución de la velocidad de las ondas longitudinales con respecto a las transversales, y que el ataque por hidrógeno puede incrementar el valor de  $V_{\theta}/V_L$ .

**Watanabe et al<sup>(20)</sup>**, concluyeron que un acero se encontraba atacado por hidrógeno si la relación de velocidad  $V_{\theta}/V_L$  es mayor a 0,55. Normalmente, el valor de la relación es de 0,54.

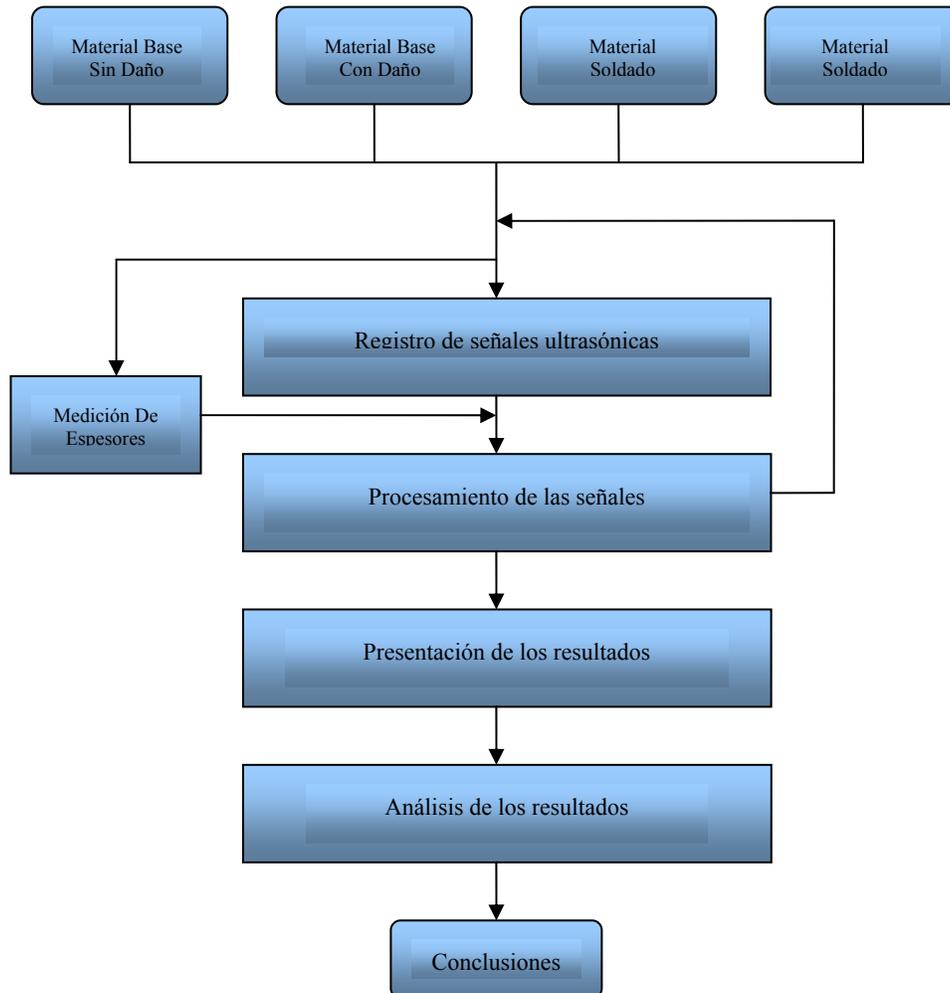
**Latimer et al<sup>(19)</sup>**, encontraron que un incremento en la atenuación por más de 3 dB a través del espesor de tubería de calderas, se encontraba atacada por hidrógeno.

**Birring et al<sup>(21)</sup>**, predicen que para determinar con confianza la condición interna de la tubería, es decir, el daño por hidrógeno, se deben tomar mediciones con el método de "backscatter" o retrodispersión y relación de velocidades.

### CAPÍTULO III

## PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

A través de la técnica de ultrasonido se estudió una serie de probetas de acero API 5L X52 del material base y soldado en condición de entrega y con daño por hidrógeno, previamente caracterizadas por Microscopía Óptica y Microscopía Electrónica.<sup>(1)</sup> La figura 3.1 esquematiza la descripción del procedimiento experimental llevado a cabo para el desarrollo del presente trabajo de investigación.



**Figura 3.1** Esquema representativo del procedimiento experimental.

### 3.1. DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL

Las probetas estudiadas tienen una geometría rectangular de dimensiones aproximadas a 4.5 cm de largo y 2 cm de ancho, con espesores que varían de 4.1 a 4.9 mm. Las condiciones superficiales son diferentes como se puede apreciar en la tabla 3.1. La composición química se describe en la tabla 2.1 y las propiedades mecánicas en la tabla 2.2 de la sección anterior.

Las probetas se agruparon de la siguiente manera:

**Material Base.** Sección no soldada de la tubería.

MBsD: material base en condición de entrega, es decir, sin daño por hidrógeno. 3 probetas.

MB-1h: material base expuesto a daño por hidrógeno durante 1 hora. 2 probetas.

MB-3h: material base expuesto a daño por hidrógeno durante 3 horas. 2 probetas.

MB-6h: material base expuesto a daño por hidrógeno durante 6 horas. 1 probeta.

**Material Soldado.** Sección soldada de la tubería.

MSsD: material soldado en condición de entrega, es decir, sin daño por hidrógeno. 1 probeta.

MS-1h: material soldado expuesto a daño por hidrógeno durante 1 hora. 3 probetas.

MS-3h: material soldado expuesto a daño por hidrógeno durante 3 horas. 2 probetas.

MS-6h: material soldado expuesto a daño por hidrógeno durante 6 horas. 3 probetas.

En la figura 3.2 se puede apreciar las probetas de material soldado.

Se ha diseñado una nomenclatura para identificar a cada probeta, la cual se ilustra en la tabla 3.1:

**Tabla 3.1.** Dimensiones de las probetas.

	Probeta	Dimensiones (mm)			Condición Superficial
		Largo*	Ancho*	Espesor**	
MB sD	Prob1-MB-sD	40,1	19,9	4,295	Pulida-Cóncava
	Prob2-MB-sD	40,1	19,7	4,195	Pulida-Cóncava
	Prob3-MB-sD	40,3	19,8	4,855	No Pulida-Plana
MB 1h, 3h, 6h	Prob1-MB-1h	39,5	19,9	4,750	Pulida-Cóncava
	Prob2-MB-1h	38,1	19,4	4,900	Pulida-Cóncava
	Prob1-MB-3h	38,9	19,8	4,950	Pulida-Plana
	Prob2-MB-3h	39,4	19,7	4,700	Pulida-Cóncava
	Prob1-MB-6h	38,7	19,9	4,950	Pulida-Cóncava
MS sD	Prob1-MS-sD	45,5	23,5	4,555	Pulida-Plana
MS 1h,3h,6h,	Prob1-MS-1h	43,5	18,7	4,126	Pulida-Cóncava
	Prob2-MS-1h	43,1	17,1	4,495	Pulida-Cóncava
	Prob3-MS-1h	44,6	20,6	4,188	Pulida-Plana
	Prob1-MS-3h	46,0	20,0	4,635	Pulida-Cóncava
	Prob2-MS-3h	45,6	20,0	4,484	Pulida-Cóncava
	Prob1-MS-6h	45,0	23,0	4,350	Pulida-Plana
	Prob2-MS-6h	42,0	18,5	4,455	Pulida-Cóncava
	Prob3-MS-6h	44,5	23,0	4,518	Pulida-Cóncava

\* Dimensiones medidas con un vernier.

\*\* Dimensiones medidas con un micrómetro.



**Figura 3.2** Probetas de material soldado

### **3.2. EQUIPOS E INSTRUMENTOS UTILIZADOS**

- Vernier (apreciación 0,05mm)
- Tornillo micrómetro (apreciación  $\pm 0,005$ mm)
- Computador con los software instalados: OpenChoice PC Communication Software TDS 210 Tektronix, Hoja de cálculo, MATLAB V7.0
- Equipo de ultrasonido: USN50
- Osciloscopio digital: Tektronix TDS210
- Cable BNC del TDS 210.
- Transductor de ondas longitudinales de frecuencia 2.25 Mhz
- Transductor de ondas longitudinales de frecuencia 5 Mhz
- Transductor de ondas transversales de frecuencia 2.25 Mhz
- Transductor de ondas longitudinales de frecuencia 5 Mhz
- Equipo de ultrasonido para medir espesores: EPOCH LT
- Transductor Panametric Dual para medición de espesores.

### **3.3. REGISTRO DE LAS SEÑALES**

El procedimiento seguido para el registro de las señales ultrasónicas se resume de la siguiente manera:

- Se realizó el montaje de banco de prueba y registro de las señales. La configuración consistió en la conexión del equipo de ultrasonido USN 50 con los 4 palpadores al osciloscopio digital TDS 210. Seguido se conectó el osciloscopio a un computador con el software instalado del osciloscopio para el registro de señales.
- Para iniciar el registro de señales, se calibró el equipo de ultrasonido usando el bloque patrón v1, con una aparición en pantalla de 10 ecos.
- Una vez calibrado el USN 50 se manipuló, con el osciloscopio, las señales ultrasónicas de cada grupo de probetas para los diferentes transductores. Se graduó el rango horizontal y vertical con el fin de apreciar más de tres ecos con buena resolución y amplitud.
- Se registró 5 señales por probeta con un mismo palpador. Cada señal paralizada en la pantalla digital del osciloscopio, se captura con el software del TDS 210 instalado en el PC. Este crea un archivo de datos en hoja de cálculo. El conjunto de señales originales se recopilaron en formato digital.



**Figura 3.3** Montaje de equipos para la toma de mediciones.

### **3.4. MEDICIÓN DE LOS ESPESORES**

A continuación se describe la obtención de medida de espesores:

- Se utilizó un tornillo micrométrico para la toma de 5 medidas de espesores de cada probeta. Estas medidas se tomaron en las zonas donde se asentaron los palpadores para la creación de las señales. Ver tabla 3.2
- Se realizó un procedimiento de medición de espesores por ultrasonido con doble eco, con el propósito de corroborar las mediciones del tornillo micrómetro.

**Tabla 3.2** Datos de espesores de las probetas medidas con el tornillo micrométrico.

	Medidas de espesores en mm					Promedio
Prob1-MB-sD	4,305	4,255	4,222	4,303	4,390	<b>4,295</b>
Prob2-MB-sD	4,199	4,187	4,195	4,150	4,244	<b>4,195</b>
Prob3-MB-sD	4,853	4,850	4,894	4,853	4,825	<b>4,855</b>
Prob1-MB-1h	4,752	4,732	4,758	4,758	4,750	<b>4,75</b>
Prob2-MB-1h	4,915	4,899	4,898	4,895	4,898	<b>4,9</b>
Prob1-MB-3h	4,951	4,956	4,946	4,956	4,941	<b>4,95</b>
Prob2-MB-3h	4,701	4,709	4,711	4,694	4,690	<b>4,7</b>
Prob1-MB-6h	4,955	4,962	4,940	4,945	4,948	<b>4,95</b>
Prob1-MS-sD	4,552	4,572	4,549	4,548	4,554	<b>4,555</b>
Prob1-MS-1h	4,130	4,124	4,123	4,124	4,129	<b>4,126</b>
Prob2-MS-1h	4,493	4,493	4,499	4,499	4,491	<b>4,495</b>
Prob3-MS-1h	4,188	4,182	4,191	4,195	4,184	<b>4,188</b>
Prob1-MS-3h	4,637	4,632	4,636	4,631	4,639	<b>4,635</b>
Prob2-MS-3h	4,488	4,489	4,475	4,485	4,483	<b>4,484</b>
Prob1-MS-6h	4,358	4,352	4,348	4,347	4,345	<b>4,35</b>
Prob2-MS-6h	4,453	4,458	4,455	4,453	4,456	<b>4,455</b>
Prob3-MS-6h	4,512	4,522	4,521	4,519	4,516	<b>4,518</b>

### 3.5. PROCESAMIENTO DE LAS SEÑALES

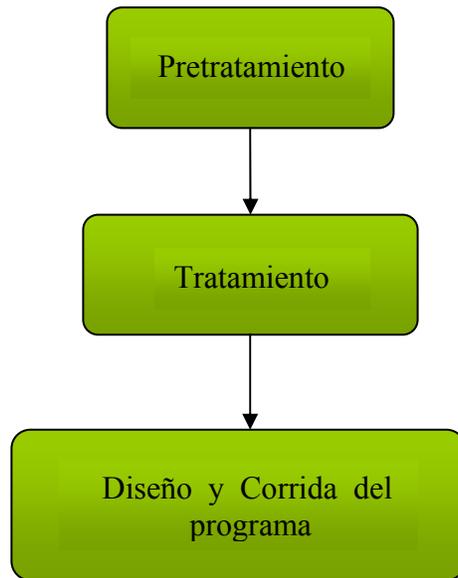
Se ha desarrollado una metodología basada en el cálculo de las velocidades de ondas ultrasónicas emitidas en las probetas estudiadas. De cada señal capturada se obtuvo, a través de una rutina de programación, un valor de velocidad transversal y uno de velocidad longitudinal y posteriormente la razón entre ellas. Luego de correr la rutina a todas las señales se obtuvo resultados que permiten interpretar el daño por hidrógeno apoyado en el valor de la razón velocidad transversal-longitudinal que reportan investigadores.

Para realizar un correcto procesamiento, las señales tuvieron que ser tratadas en varios niveles. El formato archivo original que contiene cada señal trajo consigo una serie de puntos (.) y comas (,) que adornaban la data y dificultan el tratamiento directo así como la corrida en una rutina de programación sencilla. Un ejemplo de cómo se presentan inicialmente la data en un archivo original se puede apreciar en la tabla 3.3.

**Tabla 3.3** Muestra de una parte de la data de una señal tomada con el osciloscopio en formato de hoja de cálculo.

Record Length,2500,Points,23.40000E-6,-208.00000E-3,			
Sample Interval,4.00000E-9,s,23.40400E-6,-200.00000E-3,			
Trigger Point,-5.85000E3,Samples,23.40800E-6,-192.00000E-3,			
,,,23.41200E-6,-188.00001E-3,			
,,,23.41600E-6,-184.00002E-3,			
,,,23.42000E-6,-180.00001E-3,			
Source,CH1,,23.42400E-6,-180.00001E-3,			
Vertical Units,Volts,,23.42800E-6,-180.00001E-3,			
Vertical Scale,100.0000E-3,,23.43200E-6,-176.00001E-3,			
Vertical Offset,,,23.43600E-6,-176.00001E-3,			
Horizontal Units,s,,23.44000E-6,-176.00001E-3,			
Horizontal Scale,1.000E-6,,23.44400E-6,-180.00001E-3,			
Pt Fmt,Y,,23.44800E-6,-184.00002E-3,			
Yzero,,,23.45200E-6,-184.00002E-3,			
Probe Atten,10.0000,,23.45600E-6,-188.00001E-3,			
,,,23.46000E-6,-192.00000E-3,			
Note,TDS 210 - 06:13:09 p.m. 14/12/2006,,23.46400E-6,-200.00000E-3,			
,,,23.46800E-6,-208.00000E-3,			
,,,23.47200E-6,-212.00001E-3,			
,,,23.47600E-6,-220.00001E-3,			
,,,23.48000E-6,-228.00002E-3,			
,,,23.48400E-6,-236.00002E-3,			
,,,23.48800E-6,-248.00001E-3,			
,,,23.49200E-6,-256.00001E-3,			
,,,23.49600E-6,-268.00001E-3,			
,,,23.50000E-6,-280.00000E-3,			
,,,23.50400E-6,-292.00003E-3,			
,,,23.50800E-6,-304.00002E-3,			
,,,23.51200E-6,-316.00001E-3,			
,,,23.51600E-6,-328.00001E-3,			
,,,23.52000E-6,-344.00001E-3,			
,,,23.52400E-6,-356.00001E-3,			
,,,23.52800E-6,-368.00003E-3,			
,,,23.53200E-6,-380.00003E-3,			

El procesamiento de las señales llevado desarrollado se divide en tres etapas como puede apreciarse en el esquema a continuación:



**Figura 3.4** Procesamiento de las señales.

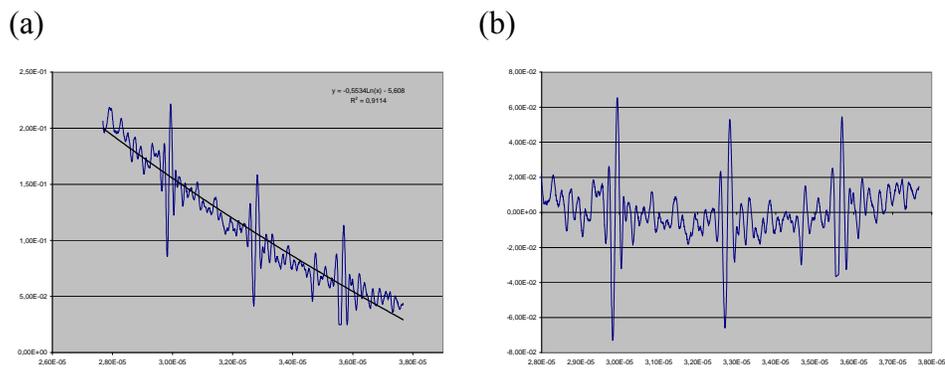
### **3.5.1 Pretratamiento de las señales**

Fue necesario desarrollar un procedimiento de limpieza y ordenamiento de la data contenida en el formato original. Una vez que se verificó con un primer ensayo que los datos eran fieles a la señal captada con el osciloscopio, se aplicó la metodología a todas las señales capturadas. Este procedimiento se llevó a cabo bajo ambiente de hoja de cálculo, como se indica a continuación:

- i. Separación de la data en dos columnas, columna de X y columna de Y.
- ii. Eliminación de los parámetros y textos.
- iii. Eliminación de las comas adicionales o sobrantes.
- iv. Creación de un nuevo archivo de hoja de cálculo que contiene 2500 filas y dos columnas.

### 3.5.2 Tratamiento de las señales

Las señales son una sucesión de 2500 puntos. Para desarrollar el estudio de las mismas se hizo necesaria una visualización. Este proceso se desarrolló bajo ambiente de hoja de cálculo con la finalidad de tener la data junto a una imagen. Es necesario destacar que la imagen de algunas señales resultó con cierta tendencia que en algunos casos era similar a una rama de parábola y en otros a una curva logarítmica. Ejemplo en la figura 3.3



**Figura 3.5** (a) Señal con tendencia a una curva logarítmica. (b) Señal con un filtro de tendencia.

En esta etapa del procesamiento de señales se desarrolló la siguiente metodología:

- i. Se graficó la data contenida en dos columnas, la primera columna que representa la escala de tiempo de la señal y la segunda columna que representa la energía o amplitud de la señal.
- ii. Se aplicó un filtro para eliminar la tendencia de la señal.
- iii. Se seleccionó para cada señal un intervalo de trabajo que sectoriza un ciclo, es decir, si la señal contiene tres o cuatros ecos de fondo, se seleccionó al conjunto de puntos que mejor representa dos ecos consecutivos de la señal.

- iv. Una vez seleccionado el conjunto de puntos, se creó un archivo en formato de texto. Este se guardó con un nombre coincidente al de la matriz que es cargada desde la rutina de programación, como se presenta en la siguiente etapa del procesamiento de señales.

En resumen, se crearon cinco archivos de texto por probeta para ondas longitudinales (m1.txt, m2.txt, m2.txt, m3.txt, m4.txt, m5.txt), y cinco archivos de texto por probeta para ondas transversales (m6.txt, m7.txt, m8.txt, m9.txt, m10.tx). Este procedimiento se realizó para todos los grupos, conformando así los archivos para ser corridos por la rutina de programación.

### **3.5.3 Diseño y corrida del programa.**

Con la finalidad de interpretar las señales de propagación de las ondas ultrasónicas, a través del cálculo de las velocidades transversal y longitudinal, y la razón entre ellas, se diseñó una rutina en el programa MATLAB V7.

El procedimiento del programa se describe mediante los siguientes pasos:

- i. Cargar las cinco matrices de la señal de onda longitudinal y las cinco de onda transversal.
- ii. Leer las constantes
- iii. Graficar una señal de la onda transversal y una de la onda longitudinal.
- iv. Calcular los máximos o los mínimos de los ecos de cada señal.
- v. Obtener a través de un contador el correspondiente valor de tiempo para cada máximo o mínimo.
- vi. Calcular la diferencia tiempo.
- vii. Calcular las velocidades y su promedio.
- viii. Obtener la relación de  $R = \text{Velocidad transversal} / \text{Velocidad longitudinal}$ .

## **CAPITULO IV**

### **RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSIÓN**

#### **4.1 DISEÑO DE LA RUTINA DE PROGRAMACIÓN**

La rutina de programación diseñada se muestra en el apéndice 7.1. Está conformada por 132 líneas de programación. Inicialmente carga 10 matrices correspondientes a las señales de una probeta. Las cinco primeras matrices son las mediciones de un palpador de ondas longitudinales y las cinco siguientes de ondas transversales. Luego se cargan los valores de las constantes para el cálculo, tales como espesor de probeta (espesor), intervalo de tiempo mínimo de la señal de onda longitudinal (Ilong) como la transversal (Itrans). Estos valores deben ser ajustados para cada grupo de mediciones, es decir por probeta.

El programa inicia un ciclo de selección y evaluación de cada matriz encontrando los máximos o mínimos de los llamados ecos de fondo con el objeto de ubicar el valor de tiempo, variable horizontal, asociado a cada máximo o mínimo de la amplitud, variable vertical. De esta manera se identifica la abcisa o variable de tiempo a la que pertenecen cada máximo o mínimo y permiten calcular la diferencia de tiempo de dos ecos consecutivos por señal. Esta diferencia de tiempo sirve para el cálculo de velocidades y posterior razón. El valor de velocidades que arroja el cálculo es el promedio de las cinco mediciones por probeta.

El criterio de selección de los máximos o mínimo correspondientes a ecos de fondo se justifica en el hecho de tratarse de puntos con mayor facilidad de detección visual y lógica para cada señal. Sin embargo, es necesario destacar que no con todas las señales ocurre así, lo cual se convierte en la principal limitación del método.

Adicionalmente el programa muestra una gráfica representativa de la señal con una onda transversal y una longitudinal.

#### **4.2 RESULTADOS DE VELOCIDADES Y RELACIÓN ( $V_{transv} / V_{long}$ )**

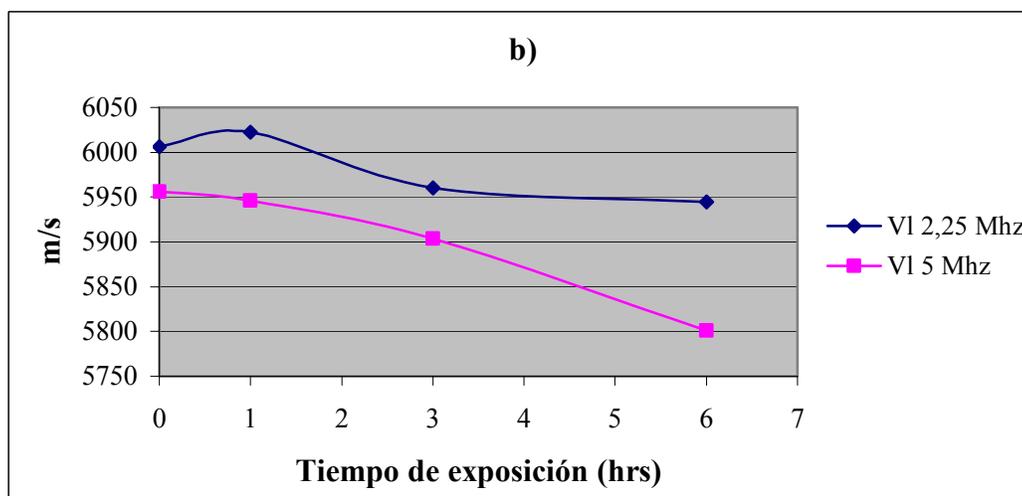
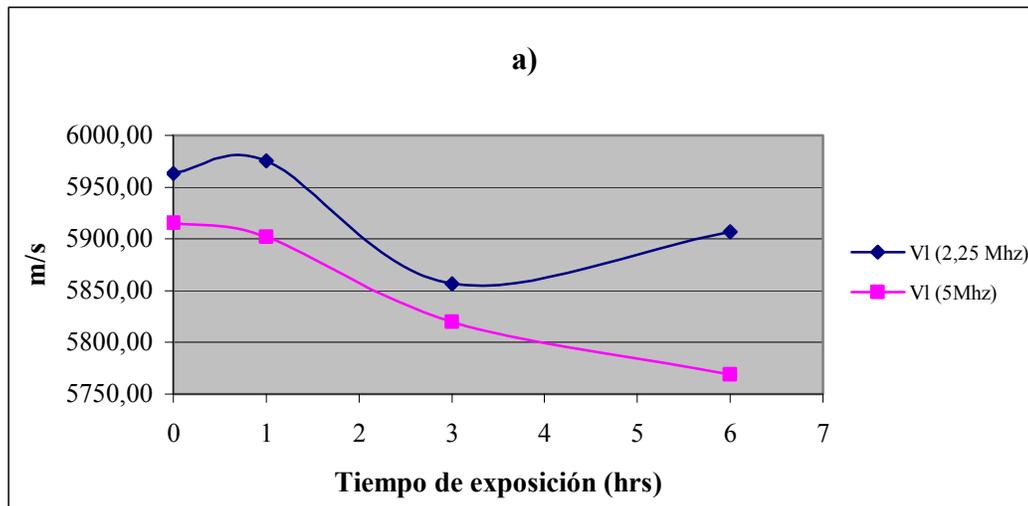
Se determinaron las velocidades de ondas longitudinales y ondas transversales en las muestras de acero API 5L X52, para Metal Base (MB) y Material Soldado (MS). Estos valores representan el promedio de cinco mediciones y se resumen en las tablas 7.2.1, 7.2.2 y 7.2.3 (ver Apéndice). En las figuras 4.2.1 y 4.2.2 se presentan las curvas obtenidas como resultado del cálculo de velocidades.

A partir de la figura 4.2.1.a) y b) se puede apreciar una etapa de transición marcada desde 1 hora de daño hasta 3 horas. Esta se caracteriza por un aumento de la velocidad y posteriormente una disminución para el caso de la frecuencia de 2,25 MHz, mientras para la frecuencia de 5MHz comienza un suave descenso a medida que aumenta el daño. Dicha transición se pudiera justificar si se considera que la velocidad longitudinal depende de las propiedades mecánicas del material,  $\rho$ ,  $E$  y  $\mu$ , tal como se expresa en la ecuación (6) de los fundamentos teóricos. Por lo tanto, inicialmente pudiera expresarse que el cambio de densidad tiene un efecto predominante en el comportamiento del daño por hidrógeno del material. Al disminuir la densidad, aumenta la velocidad longitudinal en la primera etapa del daño. Se puede asociar esta disminución de la densidad, al daño inducido por hidrógeno a la primera hora de exposición sobre el acero, específicamente a la presencia de ampollas y cavidades generadas por la disolución de las inclusiones de Aluminio.

Como proceso en fase inicial, con pocas apariciones de ampollas los valores,  $E$  y  $\mu$ , tienden a permanecer constantes. Esto justifica el hecho que la velocidad disminuya suavemente para 2,25MHz y aumente para 5MHz para un daño de 1 hora.

Considerando el comportamiento de la curva para 3 horas del daño, se evidencia una tendencia a disminuir la velocidad tanto para el MB como para el MS, exceptuando el valor de 6 horas de exposición de la curva de 2,25MHz en la figura 4.2.1.a. Este aumento de velocidad, permite inferir que siendo esta última una probeta con un nivel de daño superficial mayor, la frecuencia de 2,25MHz muestra su baja susceptibilidad debido al mayor tamaño de onda. En la figura 4.2.1.b la curva 2,25MHz muestra en 6 horas de exposición un cambio de velocidad menor a la curva de 5MHz. Lo cual corrobora la confiabilidad por susceptibilidad al daño que tiene una mayor frecuencia para ondas longitudinales.

En resumen, la curva que mejor muestra una tendencia de los resultados de velocidad es la curva de 5 MHz. Sin embargo, sería conveniente disponer de probetas con mayor tiempo de exposición para el estudio, y poder establecer una tendencia definitiva en los resultados de velocidades longitudinales para un acero API 5L X52 y la soldadura por resistencia eléctrica con daño por hidrógeno.

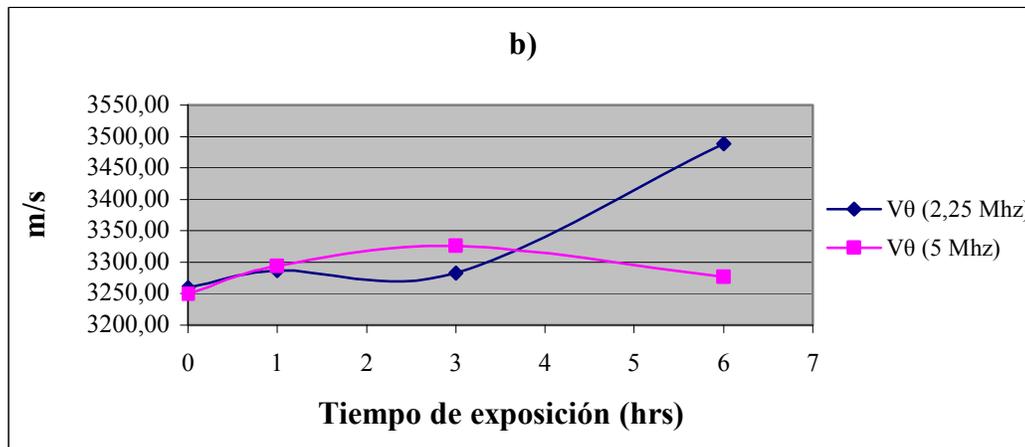
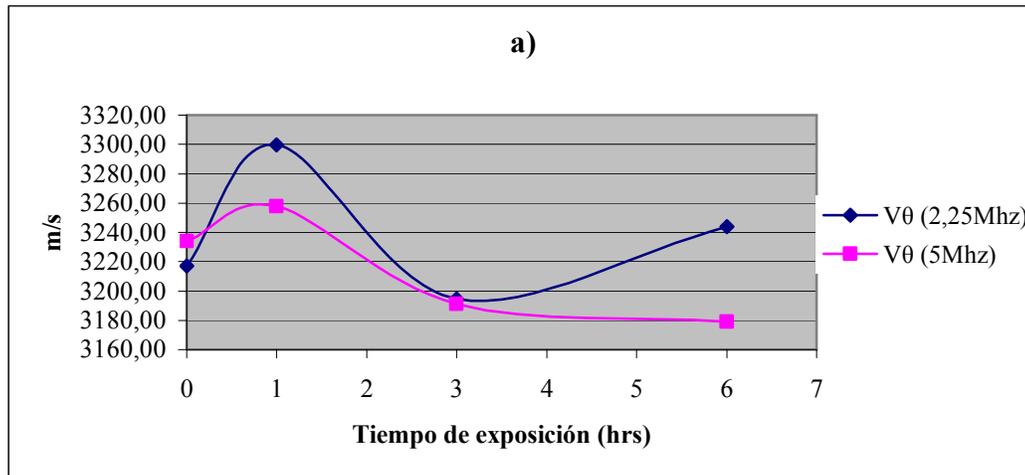


**Figura 4.2.1.** Curvas de Velocidad Longitudinal versus Tiempo de exposición del acero API 5L X52 en el medio hidrogenado:

- a) Metal Base
- b) Material Soldado

De la figura 4.2.2.a se puede notar nuevamente la etapa inicial transitoria, donde las velocidades transversales aumentan sobre las muestras expuestas a una hora en medio hidrogenado y luego disminuyen al llegar a las tres horas de daño para MB. Una

forma de explicar lo que ocurre en esta oportunidad es a través de la ecuación (7) de los fundamentos teóricos.



**Figura 4.2.2.** Curvas de Velocidad Transversal versus Tiempo de exposición del acero API 5L X52 en el medio hidrogenado:

- a) Metal Base
- b) Material Soldado

Esta transición puede justificarse de la misma manera que las velocidades longitudinales. La densidad del material experimenta un cambio importante que

prevalece sobre los cambios de las demás propiedades,  $E$  y  $\mu$ . La razón por la cual inicialmente el módulo de Young y el de Poisson no influyen significativamente en el aumento de la velocidad de las muestras es porque la matriz del acero con un daño de 1 hora no posee suficientes ampollas y homogeneidad del daño.

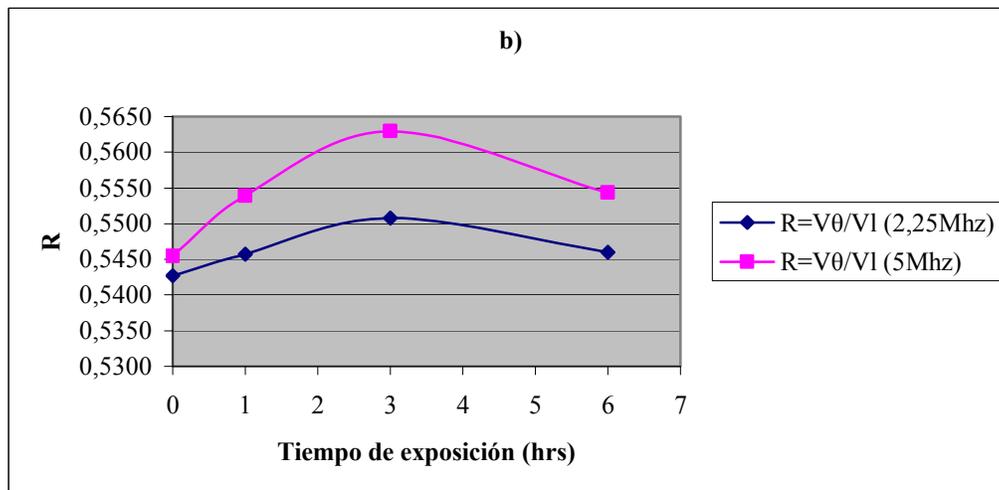
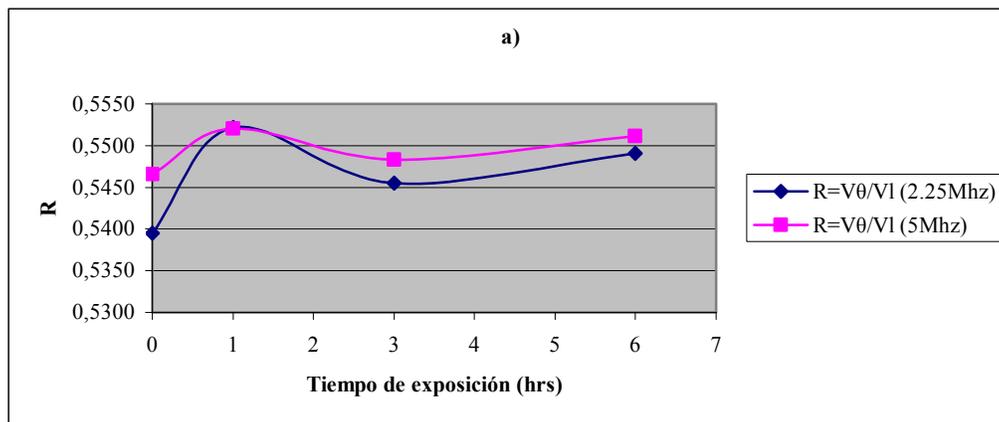
De manera general, las probetas de acero no poseen homogeneidad en la distribución de ampollas y los cambios de densidades, lo que hace que las velocidades de ondas longitudinales y transversales no revelen una tendencia establecida en toda fase inicial del daño. Si se contara con probetas de mayor tiempo de exposición al daño, es decir, mayor a los tiempos evaluados en este estudio, como por ejemplo 8 h, 9 h, 10 h, entonces sería posible evaluar una tendencia en los valores de velocidades.

En todo caso, para un material ideal que se somete a daño por hidrógeno, se espera una reducción de la velocidad longitudinal a medida que aumenta el daño. Pero el efecto del daño en las probetas ensayadas, solo es apreciable en una capa delgada de la superficie, es decir, que entonces se estarían obteniendo la suma de dos efectos, uno superficial, daño creado por S. Camero<sup>(1)</sup>, y otro volumétrico intrínseco a la constitución del material.

Para completar el análisis de lo ocurrido, es necesario continuar con la relación de velocidades. En las figuras 4.2.3 a) y b) se presentan las curvas obtenidas como resultado del cálculo de la relación de velocidad transversal y velocidad longitudinal.

La etapa de transición es reflejada de igual forma en la relación de velocidades para un daño de 1 hora. Es importante resaltar que la probeta ensayada sin daño para MB resultó con un valor máximo de  $R = 0,5466$  para la curva de 5MHz y mínimo de 0,5395 para la curva de 2,25MHz. Los siguientes valores de  $R$  en las respectivas curvas para un aumento del daño fueron mayores, encontrándose por encima de 0,55. De esta forma se puede considerar satisfactorios los resultados, puesto que coinciden

con las referencias consultadas, en la que investigadores aún en condiciones de ataque por hidrógeno revelaron la existencia del daño cuando el R es igual o mayor 0,55. Adicionalmente es posible una tendencia de aumento en la relación a medida que aumenta el daño para MB tal como se observa en la figura 4.2.3.a.



**Figura 4.2.3.** Curvas de Relación de Velocidades versus Tiempo de exposición del acero API 5L X52 en el medio hidrogenado:  
a) Metal Base  
b) Material Soldado

En la figura 4.2.3.b, se puede apreciar un aumento de la relación de velocidades hasta 3 horas, producto de la etapa de transición mencionada anteriormente y luego una disminución en 6 horas. Esta gráfica no revela una tendencia a medida que aumenta el daño, sin embargo los valores de la curva de 5MHz se mantienen por encima de 0,55. En la curva de 2,25MHz puede apreciarse que aunque un solo valor, daño 3 horas, estuvo por encima de 0,55, todos los valores de daño superan a la R de la probeta sin daño. Siendo estos resultados satisfactorios puesto que coinciden con la consulta científica realizada.

S. Camero y R., Réquiz<sup>(23)</sup>, mencionan que la susceptibilidad al daño por hidrógeno fue similar tanto en el metal base como en el cordón de soldadura, para el estudio con microscopía electrónica de barrido (MEB) y microscopía electrónica de transmisión (MET). Tal similitud se debió a que el cordón de soldadura tenía dimensiones muy pequeñas, donde la zona de fusión y la afectada por el calor poseen espesores de 5mm y 1mm respectivamente. Es así como la zona afectada por el calor no puede ejercer un efecto predominante en el daño.

Los resultados sobre la evaluación del daño, utilizando la relación de velocidades, mediante la técnica de ultrasonido, demuestran la coherencia con los resultados obtenidos por las técnicas de Microscopía Óptica y Microscopía Electrónica, en las muestras expuestas a los diferentes tiempos (1, 3 y 6 hrs.). Sin embargo, se aprecia una mayor susceptibilidad del método cuando se registran las señales con el palpador de mayor frecuencia. Investigadores desarrollaron métodos con la técnica de ultrasonido para ataque por hidrógeno con frecuencias de 5, 7 y 10 MHz, dejando en evidencia que a mayor frecuencia se logra una mayor susceptibilidad de las ondas en la detección del daño ocurrido en la microestructura.

## CAPITULO V

### CONCLUSIONES

- Se evidencia una etapa de transición en la primera fase de daño por hidrógeno (1hora), para material soldado y metal base, en la que los cambios de densidad pueden justificar el aumento de las velocidades.
- Los valores de R asociados al daño por hidrógeno tanto del metal base como de material soldado de muestras dañadas oscilan con centro en 0,55 y para muestras sin daño alrededor de 0,54.
- Los valores obtenidos para R coinciden con los presentados en estudios de ataque por hidrógeno. La técnica desarrollada, fundamentada en la relación de velocidades, es susceptible al daño por hidrógeno en el metal base y la soldadura de un acero API 5L X52.
- Los cálculos de velocidades longitudinales y transversales, aplicados a las señales de 5MHz, arrojaron curvas con comportamientos consistentes con el fenómeno descrito, mientras que las curvas de menor frecuencia se mostraron menos susceptibles. La frecuencia que mejor detecta el daño por hidrógeno en el presente estudio fue 5 MHz.
- La metodología empleada corroboró que tanto el metal base como el material soldado presentan un daño por hidrógeno similar. Este fenómeno se debe principalmente a las características del proceso de soldadura. El cordón de soldadura que resulta de tal proceso y su zona afecta por el calor es muy pequeño, dimensiones de 5mm y 1mm respectivamente.

## RECOMENDACIONES

- Se recomienda trabajar con palpadores de ondas longitudinales y transversales con frecuencia mayor a 5MHz, de manera de aumentar la susceptibilidad del método. En la teoría de ultrasonido la ecuación (5) establece que a mayor frecuencia, menor es la longitud de onda para una velocidad determinada. La onda será reflectada a medida que su longitud sea más pequeña que las discontinuidades.
- Para establecer una tendencia en los resultados de velocidades y relación R de forma acertada es recomendable realizar el estudio con muestras de mayor tiempo de exposición al medio hidrogenado.
- Los ensayos realizados por diversos investigadores se efectuaron sobre probetas de espesores comprendidos entre 8mm y 20mm. Con espesores de trabajo mayores es posible reducir los márgenes de errores, para el registro de las señales, incluso para el cálculo de las velocidades.
- Se recomienda especial cuidado con el registro de señales usando el palpador de ondas transversales. Dicho palpador, por su naturaleza de transmisión debe presentar contacto, sin acoplante, con la mayor área posible sobre la probeta. En casos de tener probetas con superficies irregulares, se debe considerar una modificación a fin de procurar mayor transmisión y recepción de la señal. En caso de no modificar la superficie se recomienda hacer presión entre el palpador y la probeta. Esta recomendación está fundamentada en la experiencia del ensayo.
- El procesado de señales que se llevó a cabo constituye una de las variadas formas de atacar el problema, tales como lo son análisis de transformada de Fourier, estudio de las atenuaciones entre otros métodos que se recomiendan.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Camero, S. “Estudio De La Relación Entre La Microestructura Y Daños Por Hidrógeno En Un Acero API 5L X52 Utilizado En La Industria Petrolera” Tesis Doctoral, U.C.V, Facultad de Ingeniería, Escuela de Metalurgia y Ciencia de los Materiales. Diciembre 2005.
2. American Petroleum Institute. API Specification for high test line pipe. API Spec. 5LX, 13 th Edition, Dallas, USA, March (1978).
3. CONDUVEN. “Tubos de acero para la industria petrolera”. Editado por C. A.. Venezuela (1995)1-22.
4. Aristizábal, V. “Estudio del daño por hidrógeno en uniones soldadas de un acero API 5L X52” Trabajo especial de grado, Universidad Simón Bolívar. Facultad de Ingeniería, Escuela de Ciencia de los Materiales. Octubre 2004.
5. Metals Handbook. Welding, brazin and soldering. American Society for Metals. Vol. 6.(1993)252-253.
6. Reina, M. “Soldadura de los aceros. Aplicaciones”, Gráficas Lormo, Madrid, 1988.
7. Craig, B. Metallurgical Consultants, Inc.. Environmentally induced craking. ASME Handbook, Formerly ninth edition, Metals Handbook. Volumen 13, Corrosión (1997)146-189.
8. Newski, M. Barrios, J. Dávila, A. Vera, J. Iglesias, J. “Desarrollo de la metodología experimental para la evaluación de condiciones críticas que generan agrietamiento inducido por hidrógeno en presencia deH<sub>2</sub>S”. III Jornadas de Corrosión. Caracas, 19-21 Octubre (1988)1-23.
9. Troiano. “Hydrogen embrittlement and stress corrosion cracking”. Editado por Gibala, R. y Hehemann, R. Cleveland, Ohio. ASM (1984).
10. Hirth, J. P. “Theories of Hydrogen induced cracking of steels, en Troiano. Hydrogen embrittlement and stress corrosion cracking”. Editado por R. Gibala y R.F. Hehemann. Cleveland, Ohio. ASM (1984)29-41.
11. Petch, N. Stables, P. Nature ,Vol. 169(1952)842. Referida por 82.

12. Coudreuse, L. Charles, J. "The used of permeation technique to predict critical concentration of H<sub>2</sub> for cracking". Corrosion Science, Vol. 27, No. 10/11, (1987) 1169-1181.
13. Szllarska-Smialowska, Z. Xia, Z. "Hydrogen trapping by cold-worked X-52 steel". Corrosion Science, Vol. 39, No. 12, (1997) 2171-2180.
14. Amarnath, T. K. G. Namboodhiri. "Effect of cold rolling on the hydrogen induced delayed failure of API X-52 line-pipe steel". Transactions Indian Institute Metallurgical. Vol. 55, No. 1-2, February-April (2002) 25-30.
15. Ramírez, F. et al. "Metodos de ensayos no destructivos" Tomo I. INTA. Madrid cuarta edición.
16. Echevarria, R. "Ultrasonido". Laboratorio de ensayos no destructivos. F.I. Universidad Nacional de Comahue. 2002
17. Proakis, J. Manolakis, D. "Tratamiento Digital de Señales". 3ª Edición. 1998 Madrid, España. Pag. 976.
18. Krüger, S. E., Rebello, J. M. A., de Camargo, P. C. "Hydrogen damage detection by ultrasonic spectral analysis". NDT & E Internacional. Elsevier Science, Vol. 32, July 1999, pp. 275-281.
19. Birring, A. S., Alcazar, D. G., Hanley, J. J., Gehl s. "Ultrasonic Detection of Hydrogen Damage". The American Society for Nondestructive Testing, 1989, pp. 345-350.
20. Watanabe, T. "Ultrasonic velocity ratio method for detecting and evaluating hydrogen attack in steels". American society for Testing and Materials (ASTM) STP 908, Philadelphia, Pennsylvania. Pp. 153-164. Agosto 1986.
21. Birring, A. S., Bartlett, M. L., Kawano, K. "Ultrasonic detection of hydrogen attack in steels". Corrosion Engineering, Vol. 45, 1989, pp. 259-262.
22. Birring, A. S., "Detection of hidrogen attack in base metal and weld haz". ASME Pressure Vessel and Piping conference, 1995.

## APÉNDICE

### 7.1. RUTINA DE PROGRAMACIÓN

```
load m1.txt;
load m2.txt;
load m3.txt;
load m4.txt;
load m5.txt;
load m6.txt;
load m7.txt;
load m8.txt;
load m9.txt;
load m10.txt;
%Constantes
espesor=4.456E-3;
llong=4E-9; %se debe cambiar el intervalo para cada calibración
Itrans=10E-9; %se debe cambiar el intervalo para cada calibración
%Módulo selector de matrices
for i=1:5
    if i==1
        m=m1;
    end
    if i==2
        m=m2;
    end
    if i==3
        m=m3;
    end
    if i==4
        m=m4;
    end
    if i==5
        m=m5;
    end
    %modulo para calcular el máximo y la diferencia de tiempo, la velocidad de
    %cada matriz y la guarda en vectores de 5 elementos
    n=length(m);%tamaño de la matriz (filas columnas)
    z1=n;
    z2=n;
    for t=1:z1
        z3=z2-2;
```

```

z2=z3;
    if z3==1
        n=n+1;
    end
end
C1=max(m(1:1:n/2,2));%máximo de la segunda columna de la matriz
for p=1:n/2% contador, b es el valor que da el orden descendente en el que se
encuentra el máximo
    if m(p,2)==C1
        b1=p;
    end
end

n=length(m);%tamaño de la matriz
z1=n;
z2=n;
for t=1:z1
z3=z2-2;
z2=z3;
    if z3==1
        n=n+1;
    end
end
C2=max(m(n/2:1:n-1,2));%máximo de la segunda columna de la matriz
for p=n/2:(n-1)% contador, b es el valor que da el orden descendente en el que se
encuentra el máximo
    if m(p,2)==C2
        b2=p;
    end
end
delta=(b2-b1)*llong;
V(i)=2*espesor/delta;%para cada probeta se debe rectificar el valor del espesor
end
%Módulo para graficar
x=m(:,1);
y=m(:,2);
subplot(2,1,1)
plot(x,y)
xlabel('Tiempo');
ylabel('Energía');
title('Señal ultrasónica longitudinal');
%V(i)
%modulo que promedia la velocidad

```

Vlong=(V(1)+V(2)+V(3)+V(4)+V(5))/5

```
for i=6:10
    if i==6
        m=m6;
    end
    if i==7
        m=m7;
    end
    if i==8
        m=m8;
    end
    if i==9
        m=m9;
    end
    if i==10
        m=m10;
    end
end
```

%modulo para calcular el máximo y la diferencia de tiempo, la velocidad de  
%cada matriz y la guarda en vectores de 5 elementos

n=length(m);%tamaño de la matriz (filas columnas)

z1=n;

z2=n;

```
for t=1:z1
```

z3=z2-2;

z2=z3;

```
    if z3==1
```

n=n+1;

```
    end
```

```
end
```

C3=min(m(1:1:n/2,2));%máximo de la segunda columna de la matriz

for p=1:n/2% contador, b es el valor que da el orden descendente en el que se  
encuentra el máximo

```
    if m(p,2)==C3
```

b1=p;

```
    end
```

```
end
```

n=length(m);%tamaño de la matriz

z1=n;

z2=n;

```
for t=1:z1
```

z3=z2-2;

```

z2=z3;
  if z3==1
    n=n+1;
  end
end
C4=min(m(n/2:1:n-1,2));%máximo de la segunda columna de la matriz
for p=n/2:(n-1)% contador, b es el valor que da el orden descendente en el que se
encuentra el máximo
  if m(p,2)==C4
    b2=p;
  end
end
delta=(b2-b1)*Itrans;
V(i)=2*espesor/delta;%para cada probeta se debe rectificar el valor del espesor
end
%Módulo para graficar
x=m(:,1);
y=m(:,2);
subplot(2,1,2)
plot(x,y)
xlabel('Tiempo');
ylabel('Energía');
title('Señal ultrasónica transversal');
%V(i)
%modulo que promedia la velocidad
Vtrans=(V(6)+V(7)+V(8)+V(9)+V(10))/5
R=Vtrans/Vlong

```

## 7.2. TABLAS DE RESULTADOS

**Tabla 7.2.1.** Resultados de velocidades longitudinales, material soldado y metal base.

Tiempo de Exposición	Probetas	2,25 MHz		5 MHz	
		VL	±Δ VL	VL	±Δ VL
0	Prob1-MS-sD	6.006,20	22,43	5.955,90	22,11
1	Prob2-MS-1h	6.022,50	22,84	5.945,80	22,34
3	Prob2-MS-3h	5.960,19	22,49	5.903,30	22,13
6	Prob1-MS-6h	5.944,60	23,08	5.800,90	22,14
0	Prob3-MB-sD	5.963,10	13,47	5.915,74	13,30
1	Prob1-MB-1h	5.975,30	13,81	5.902,10	13,55
3	Prob2-MB-3h	5.856,47	13,53	5.819,80	13,40
6	Prob1-MB-6h	5.906,93	13,18	5.768,83	12,55

**Tabla 7.2.2.** Resultados de velocidades transversales, material soldado y metal base.

Tiempo de Exposición	Probetas	2,25 MHz		5 MHz	
		V <sub>0</sub>	±ΔV <sub>0</sub>	V	±ΔV <sub>0</sub>
0	Prob1-MS-sD	3.259,42	15,24	3.249,20	8,24
1	Prob2-MS-1h	3.286,40	15,67	3.293,70	8,49
3	Prob2-MS-3h	3.282,91	15,68	3.326,30	8,64
6	Prob3-MS-6h	3.488,80	17,33	3.277,00	8,38
0	Prob3-MB-sD	3.217,00	7,58	3.233,94	7,64
1	Prob1-MB-1h	3.299,80	8,06	3.257,90	7,90
3	Prob2-MB-3h	3.194,76	7,74	3.191,21	7,73
6	Prob1-MB-6h	3.243,77	7,51	3.178,93	7,29

**Tabla 7.2.3.** Resultados de relación de velocidades longitudinal y transversal, material soldado y metal base.

Tiempo de Exposición	Probetas	2,25 MHz		5 MHz	
		R	$\pm\Delta R$	R	$\pm\Delta R$
0	Prob1-MS-sD	0,5427	0,0046	0,5455	0,0034
1	Prob2-MS-1h	0,5457	0,0047	0,5539	0,0035
3	Prob2-MS-3h	0,5508	0,0047	0,5630	0,0036
6	Prob1-MS-6h	0,5460	0,0048	0,5543	0,0036
0	Prob3-MB-sD	0,5395	0,0025	0,5466	0,0025
1	Prob1-MB-1h	0,5522	0,0026	0,5520	0,0026
3	Prob2-MB-3h	0,5455	0,0026	0,5483	0,0026
6	Prob1-MB-6h	0,5491	0,0025	0,5511	0,0025