

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

DETECCIÓN Y EVALUACIÓN DEL DAÑO POR HIDRÓGENO EN UN ACERO API 5L X52 MEDIANTE TÉCNICAS ULTRASÓNICAS BASADAS EN CAMBIO DE VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por el Br. Zarifeh H., Usama
Para optar al Título
de Ingeniero Mecánico

Caracas, 2007

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

DETECCIÓN Y EVALUACIÓN DEL DAÑO POR HIDRÓGENO EN UN ACERO API 5L X52 MEDIANTE TÉCNICAS ULTRASÓNICAS BASADAS EN CAMBIO DE VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN

TUTOR ACADÉMICO:

Prof. Démian Pereira.

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por el Br. Zarifeh H., Usama
Para optar al Título
de Ingeniero Mecánico

Caracas, 2007

ACTA

Los abajo firmantes, Miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el Bachiller USAMA ZARIFEH, y que lleva por título:

**“DETECCIÓN Y EVALUACIÓN DEL DAÑO POR
HIDRÓGENO EN UN ACERO API 5L X52
MEDIANTE TÉCNICAS ULTRASÓNICAS
BASADAS EN CAMBIO DE VELOCIDAD DE
PROPAGACIÓN”**

Consideran que el referido Trabajo, cumple con los requisitos exigidos por el Plan de Estudios conducente al Título de Ingeniero Mecánico.

Acta que se firma en conformidad, en la Ciudad de Caracas, a los cuatro días del mes de julio del año dos mil siete.


Prof. Jorge Perdigón
Jurado




Prof. Freddy Fraudita
Jurado


Prof. Demian Pereira
Tutor-Coordinador

Zarifeh Humeidan, Usama

***DETECCIÓN Y EVALUACIÓN DEL DAÑO POR HIDRÓGENO EN UN
ACERO API 5L X52 MEDIANTE TÉCNICAS ULTRASÓNICAS BASADAS EN
CAMBIO DE VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN***

**Profesor Guía: Démian Pereira. Trabajo Especial de Grado. Caracas, U.C.V.
Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica. 2007. 129 pág.**

Palabra Clave: Daño por Hidrógeno, Ultrasonido, Ensayo No Destructivo, Procesamiento de Señales, Correlación de Señales, Tratamiento Térmico.

En este trabajo, se realizaron determinación de cociente de velocidades de ondas ultrasónicas (ondas longitudinales entre ondas transversales), mediante la aplicación de procesamiento de señales y la técnica de correlación, con la finalidad de determinar el efecto que sobre ello tiene el grado de daño por hidrógeno, inducidas en muestras de acero API 5L X52 en condición de entrega y tratado térmicamente a diferentes tiempo de exposición al medio hidrogenado.

Los resultados obtenidos revelan efectivamente que el daño por hidrógeno comienza desde su primera etapa de exposición al medio hidrogenado, teniendo un efecto importante en el cociente de velocidades de ondas ultrasónicas. Confirmándose los resultados obtenidos por otros autores como Birring, en la cual describe que a medida que transcurre el tiempo de exposición al medio hidrogenado, aumenta el valor de dicho cociente de velocidades.

Los resultados obtenidos por este investigador, determina que los valores oscilan alrededor de 0,54 para muestras que no fueron sometidas al “Ataque por Hidrógeno”, y valores de 0,55 o mayor, para muestras que fueron sometidas al “Ataque por Hidrógeno”, siendo este fenómeno más agresivo que el “Daño por Hidrógeno”, y afectando las propiedades mecánicas del material sin presenciar pérdida de material.

DEDICATORIA

- Se lo dedico en primera parte a *Dios*, por darme salud, animo, fuerzas y todo lo necesario para la culminación de este trabajo.

- A mis *PADRES*, en especial a mi padre por haberme dado ánimo, que gracias a sus concejos, he podido superar momentos difíciles en mis estudios y en mi vida.

- A mi princesita bella, la luz de mis ojos: “*Dianita*”, este trabajo es dedicado en parte para ti bebé. Que dios te bendiga Hija!... Te Amo Mucho.

- A mi familia y a todas las personas que creyeron depositaron toda su confianza en mí.

- Al *Dr. Luis E. Amorer*, a mí amiga, la *Ing. Carmen Peláez*, y al *Profesor Démian Pereira*, que gracias a sus espíritus de trabajo, me ha dado todas las herramientas básicas y necesarias para crecer como persona y profesional.

Usama Zarifeh H.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar a Dios por darme la vida y llenarme de bendiciones cada día.

A mi familia: a mi Padre, por ser el mejor ejemplo de constancia y esfuerzo, por ser mi mejor amigo y consejero, por apoyarme incluso cuando he errado, por todo el amor y la paciencia, no sería nadie sin ti.

A la “Casa que vence la sombra...”, *La Universidad Central de Venezuela*, que me ha hecho crecer como ser humano y profesional. A la Escuela de Ingeniería Mecánica y a los profesores de ésta, por brindarme sus conocimientos.

A la profesora *Sonia Camero*, por haberme dado la oportunidad de trabajar a su lado, por brindarme todo su cariño, apoyo y colaboración para la elaboración de este trabajo.

Al *Dr. Luís E. Amorer* y a la *Ing. Carmen Peláez*, mi agradecimiento eterno por su ayuda y amistad incondicional, por ambos haberme brindado su confianza, y la oportunidad de pertenecer a su grupo de trabajo en el laboratorio de Técnicas Avanzadas en Ultrasonido (TAUS). Quiero que sepan que los considero mis segundos Padres. Muchas Gracias!...

Al Profesor *Elías Cuartín*, por su colaboración y contribución en la elaboración de este trabajo.

A los Ingenieros *J. Chitty* y *J. Perdigón*, por su gran colaboración y ayuda incondicional para la elaboración de este trabajo de investigación.

A mi tutor, el Profesor *Démian Pereira*, por permitirme realizar este trabajo bajo su tutoría, por brindarme sus conocimientos y permitirme aprender más sobre esta área de investigación. Muchas Gracias Profesor!... Estaré eternamente agradecido.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTOS	vi
ÍNDICE GENERAL	vii
ÍNDICE DE TABLAS	xi
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
INTRODUCCIÓN	xiv
OBJETIVOS Y ALCANCES	xvii
CAPÍTULO I – FUNDAMENTO TEÓRICO	19
1.1. TRATAMIENTO TÉRMICO	20
1.1.1. TRATAMIENTOS TÉRMICOS.....	20
1.1.2. TIPOS DE TRATAMIENTOS TÉRMICOS.....	21
1.1.2.1. Temple.....	21
1.1.2.2. Revenido.....	22
1.1.2.3. Recocado.....	23
1.1.2.4. Normalizado.....	24
1.2. DAÑO POR HIDRÓGENO	25
1.2.1. DAÑO POR HIDRÓGENO.....	26
1.2.2. CLASIFICACIÓN DEL DAÑO POR HIDRÓGENO.....	27
1.2.3. TEORÍA DEL DAÑO POR HIDRÓGENO.....	30
1.2.4. MECANISMOS DEL AGRIETAMIENTO POR HIDRÓGENO.....	33
1.2.5. FACTORES EXTERNOS E INTERNOS QUE INFLUYEN EN LA SUCEPTIBILIDAD DEL DAÑO POR HIDRÓGENO.....	36
1.2.6. CARACTERÍSTICAS DEL DAÑO INDUCIDO POR HIDRÓGENO.....	39

1.3. ULTRASÓNIDO	43
1.3. ULTRASONIDO	44
1.3.1. <i>PARÁMETROS DE UN SISTEMA ULTRASÓNICO</i>	45
1.3.2. <i>CLASIFICACIÓN Y TIPOS DE ONDAS</i>	46
1.3.2.1. <i>Ondas Longitudinales</i>	47
1.3.2.2. <i>Ondas Transversales</i>	48
1.3.2.3. <i>Ondas de Superficie</i>	48
1.3.2.4. <i>Ondas de Lamb</i>	49
1.3.3. <i>CARACTERÍSTICAS DEL CAMPO ULTRASÓNICO DE UN OSCILADOR</i>	50
1.3.3.1. <i>Zona Muerta</i>	50
1.3.3.2. <i>Campo Próximo o Campo Cercano</i>	51
1.3.3.3. <i>Campo Lejano</i>	53
1.3.3.4. <i>Divergencia del Haz</i>	54
1.3.4. <i>PALPADORES</i>	55
1.3.4.1. <i>Características de un Palpador Ultrasonico</i>	55
1.3.4.2. <i>Clasificación o tipos de Palpadores</i>	56
1.3.4.2.1. <i>Palpador de Contacto</i>	56
1.3.4.2.2. <i>Palpadores de Inmersión</i>	57
1.3.4.2.3. <i>Palpadores de Doble Cristal</i>	57
1.3.4.2.4. <i>Palpadores Angulares</i>	58
1.3.4.2.5. <i>Palpadores Especiales</i>	59
1.3.5. <i>MEDIO DE ACOPLAMIENTO</i>	59
1.3.5.1. <i>Tipos de Acoplantes</i>	59
1.3.6. <i>MÉTODOS DE INSPECCIÓN</i>	60
1.3.6.1. <i>Método de Transmisión</i>	60
1.3.6.2. <i>Método Pulso-Eco</i>	61
1.3.6.3. <i>Método de Resonancia</i>	62
1.3.6.4. <i>Método de Inmersión</i>	63

1.3.7. APLICACIÓN DE LOS ULTRASONIDOS.....	63
1.3.8. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL ENSAYO POR ULTRASONIDO.....	66
1.3.8.1. Ventajas.....	66
1.3.8.2. Desventajas.....	66
1.3.9. DETECCIÓN DEL DAÑO POR HIDRÓGENO MEDIANTE LA TÉCNICA DE ULTRASONIDO.....	67
1.4. PROCESAMIENTO DE SEÑALES	69
1.4. PROCESAMIENTO DE SEÑALES.....	70
1.4.1. Definición.....	70
1.4.2. Características básicas de Procesador Digital de Señales (DSP).....	71
1.4.3. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS DSP.....	73
1.4.4. SEÑALES Y SISTEMAS.....	75
1.4.4.1. Señal.....	75
1.4.4.2. Sistemas.....	75
1.4.4.3. Sistema Digitales.....	75
1.4.4.4. Sistemas Analógicos.....	75
1.4.5. FILTROS.....	76
1.4.5.1. Definición.....	76
1.4.5.2. Tipos de Filtros.....	77
1.4.6. TRANSFORMADAS.....	79
1.4.7. CORRELACIÓN DE SEÑALES.....	80
CAPÍTULO II – PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....	81
2.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	82
2.2. DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL DE ENTREGA (ME) Y TRATADO TÉRMICAMENTE (MAH).....	83
2.2.1. Proceso de Fabricación.....	84

2.2.2. Tratamiento Térmico del Material.....	85
2.2.3. Antecedente de las muestras de acero API 5L X52 en condición de Entrega y Tratado Térmicamente.....	86
2.3. DESCRIPCIÓN DE EQUIPOS.....	86
2.4. METODOLOGÍA EMPLEADA.....	89
2.5. TRATAMIENTOS PREVIOS A LAS SEÑALES.....	94
2.5.1. Filtros.....	94
 CAPÍTULO III – ANÁLISIS DE RESULTADOS	89
3.1. RESULTADOS DE VELOCIDADES DE ONDAS LONGITUDINALES Y ONDAS TRANSVERSALES.....	96
3.2. RESULTADOS DE LAS RELACIONES DE VELOCIDADES (R).....	101
 CAPÍTULO IV – CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	104
4.1. CONCLUSIONES.....	105
4.2. RECOMENDACIONES.....	107
 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	108
5.1. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	109
 ANEXOS	114
 APÉNDICE	123

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Parámetros que actúan sobre C_H y C_K .^(PS) (pag. 37)

Tabla 2: Parámetros que actúan sobre el comportamiento al agrietamiento inducido por hidrógeno.^(PS) (pag. 38)

Tabla 3: Resumen de las fórmulas de análisis y síntesis. (pag. 79)

Tabla 4: Clasificación de las probetas (Material de Entrega), descripción y dimensiones. (pag. 91)

Tabla 5: Clasificación de las probetas (Material Tratada Térmicamente), descripción y dimensiones. (pag. 92)

ANEXO 2: Tablas de Resultados de las velocidades Longitudinales, Transversales y Relación de Velocidades (R) para diferentes frecuencias de Palpador. (pag. 119)

ÍNDICE DE FIGURAS

- Fig. 1: Ilustración esquemática del efecto del hidrógeno en el inicio de una grieta.
(pag. 35)
- Fig. 2: Morfología de las grietas en un ambiente de H₂S acuoso. (pag. 39)
- Fig. 3: Esquema del proceso de escalonamiento de las grietas. (pag. 41)
- Fig. 4: Propagación de una grieta a partir de una inclusión sin esfuerzo externo.
Interacción entre dos grietas. (pag. 42)
- Fig. 5: Espectro de Acústico. (pag. 45)
- Fig. 6: Ondas Longitudinales. (pag. 47)
- Fig. 7: Ondas Transversales. (pag. 48)
- Fig. 8: Onda de Superficie. (pag. 49)
- Fig. 9: Ondas de Lamb. (pag. 49)
- Fig. 10: Distribución de las zonas en el Campo Sónico de un palpador. (pag. 50)
- Fig. 11: Geometría del haz para un palpador con un ángulo de divergencia de 15⁰.
(pag. 51)
- Fig. 12: Distribución de la presión acústica a lo largo del recorrido del haz. (pag. 53)
- Fig. 13: Corte de un palpador normal. (pag. 56)
- Fig. 14: Corte de un palpador utilizado para ensayo con el método de inmersión.
(pag. 57)
- Fig. 15: Corte de un palpador "E-R".(pag. 58)
- Fig. 16: Corte de un palpador Angular. (pag. 58)
- Fig. 17: Sistema pulso-eco. (pag. 61)
- Fig. 18: Esquema de inspección por el Método de Inmersión. (pag. 63)
- Fig. 19: Sistema basado en un Procesador Digital de Señales (DSP). (pag.72)
- Fig. 20: Proceso de fabricación de la tubería de acero API 5L X52. (pag. 84)

Fig. 21: Horno eléctrico con sistema de atmósfera controlada utilizado para el tratamientos térmicos del acero API 5L X52. (pag. 85)

Fig. 22: Arreglo Experimental. (pag. 88)

Fig. 23: a) Palpadores Longitudinales y Transversales, b) Bloque de Referencia I.I.W. V-1, c) Probetas previamente caracterizadas, d) Tornillo Micrométrico NKS, e) Calibrador SOMET. (pag. 88)

Fig. 24: Curva de Velocidad Longitudinal a diferentes frecuencias de palpador contra el tiempo de exposición al medio hidrogenado: a) Material en Condición de Entrega (ME), b) Material Tratada Térmicamente (MAH). (pag. 97)

Fig. 25: Curva de Velocidad Transversal a diferentes frecuencias de palpador contra el tiempo de exposición al medio hidrogenado: a) Material en Condición de Entrega (ME), b) Material Tratada Térmicamente (MAH). (pag. 100)

Fig. 26: Curva de Relación de Velocidades (R) a diferentes frecuencias de palpador contra el tiempo de exposición al medio hidrogenado: a) Material en Condición de Entrega (ME), b) Material Tratada Térmicamente (MAH). (pag. 102)

ANEXO 3: Resumen de Gráficas con los valores de Velocidad Longitudinal, Transversal y Relación de Velocidades (R) a diferentes frecuencias de Palpador. (pag. 120)

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

En la actualidad unos de los principales problemas que sufren los aceros utilizados en las industrias petroleras y petroquímicas es el conocido Daño por Hidrógeno, el cual se puede manifestar como: ampollamiento, agrietamiento, fragilización o pérdida de ductilidad.^(8, 9) Este puede además tener como efecto principal el colapso del componente afectado debido a la alteración de las propiedades mecánicas del material. El daño por hidrógeno ocurre debido a que en los pozos de petroleros y en los fluidos que son transportados en tuberías de línea poseen contaminantes altamente corrosivos.⁽¹⁾ Por lo tanto los componentes sometidos a estos ambientes agresivos deben poseer las características necesarias para soportar medios corrosivos y poseer propiedades mecánicas adecuadas, garantizando el buen servicio del componente.^(8, 9)

El daño por hidrógeno es un tema de creciente interés tecnológico debido a que es un fenómeno complejo que ha concentrado el interés de muchos investigadores en el afán de prevenir y reducir los problemas que este genera, tratando de seleccionar materiales que además de cumplir con los requerimientos mecánicos, ofrezcan una alta resistencia a la corrosión.

La inspección y evaluación de materiales expuestos a medios agrios mediante métodos no destructivos se ha convertido en una herramienta muy útil y sensible para determinar las propiedades de estos materiales,⁽⁸⁻¹⁰⁾ y en este sentido, la técnica de Ultrasonido ha sido muy útil, ya que proporciona información importante sobre las propiedades de dicho material y de los cambios que este pudo haber sufrido al estar expuestos a medios agresivos durante su funcionamiento. Esta técnica es utilizada como un ensayo no destructivo de los materiales. Esta técnica se basa en la propagación de una onda acústica a través del material, la cual proporciona información sobre las propiedades mecánicas o físicas del medio ensayado. Las ondas

que se propagan en el interior del componente, permite definir así la forma, tamaño, orientación de las discontinuidades presentes, en respuesta a la señal que emite el defecto. Al conocer la propagación de las ondas sonoras, se determina su velocidad, lo cual está relacionado con las propiedades mecánicas de los materiales.⁽⁸⁻¹⁰⁾

El objetivo de este estudio es desarrollar una metodología, mediante la aplicación de la técnica de Ultrasonido, para la evaluación del daño por hidrógeno en muestras de acero API 5L X52 en condición de entrega y tratada térmicamente (Recocido), las cuales fueron expuestas a diferentes tiempos de exposición al medio hidrogenado.

Las muestras suministradas corresponden a un acero de fabricación nacional designado como API 5L X52, utilizado en la industria petrolera y petroquímica nacional. La tubería original utilizada en este estudio tiene un diámetro externo $\approx 16,83$ cm, diámetro interno $\approx 15,41$ cm, espesor $\approx 7,10$ mm, y con una longitud $\approx 1,20$ 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.⁽⁸⁾

Las muestras sometidas a este estudio fueron previamente caracterizadas mediante Microscopía Óptica, Microscopía Electrónica de barrido y Espectroscopía de Rayos X por Dispersión en la Energía, evaluando el daño generado por hidrógeno sobre las muestras ensayadas electroquímicamente utilizando las mismas técnicas de análisis. 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 cocientes de velocidades ultrasónicas (velocidad de ondas longitudinales y la velocidad de ondas transversales) para cada una de las muestras variables, que pueden ser correlacionados con el daño por hidrógeno presentes en ellas, a través de la evaluación de los cambios de velocidad.

OBJETIVOS Y ALCANCESGeneral:

Desarrollar una metodología, para la evaluación del daño por hidrógeno en muestras de acero API 5L X52 en condición de entrega y tratada térmicamente, a diferentes tiempo de exposición al medio hidrogenado, mediante la aplicación de la técnica de ultrasonido.

Específicos:

- Implementar una técnica de evaluación de Daño por Hidrógeno mediante la determinación de relación de velocidades aplicada a las muestras patrón con diferente grado de daño ya inducido (por la técnica de Ultrasonido), siendo la expresión:

$$R = \frac{V_T}{V_L}$$

Donde:

- V_T = Velocidad de ondas transversales
- V_L = Velocidad de ondas longitudinales
- Desarrollar un programa computacional para el cálculo de la velocidad de propagación de ondas ultrasónicas.
- Evaluar los cambios en la relación de velocidades y correlación con porcentaje de daño en probetas previamente caracterizadas, en condición de entrega y tratada térmicamente.

Recursos Disponibles

- Probetas previamente caracterizadas mecánica y microestructuralmente
- Probetas con daño inducido por hidrógeno
- Equipos para medición de Ultrasonido
- Palpadores
- Sistema de registro y procesamiento de Datos
- Computadora

Todos estos recursos disponibles se encuentran en el Laboratorio de Soporte Instrumental (LABSI), ubicado el edificio de Física Aplicada de la Facultad de Ingeniería de la U.C.V.

Alcances

- Evaluar el daño por hidrógeno en un acero API 5L X52 utilizado en la Industria Petrolera, mediante la técnica de Ultrasonido, basado en medición de velocidades ultrasónicas.

CAPÍTULO I.- FUNDAMENTO TEÓRICO

TRATAMIENTOS

TÉRMICOS

1.1. TRATAMIENTOS TÉRMICOS

1.1.1. TRATAMIENTOS TÉRMICOS

Los tratamientos térmicos son operaciones de calentamiento y enfriamiento a temperaturas y en condiciones determinadas a que se someten los aceros para conseguir las propiedades y características más adecuadas a su empleo o transformación. Estas no modifican la composición química pero sí otros factores tales como los constituyentes estructurales y como consecuencia las propiedades mecánicas.^(1, 2)

El tratamiento térmico en el material es uno de los pasos fundamentales para que se pueda alcanzar las propiedades mecánicas que se desea y para las cuales esta creado.^(1, 2) La clave de los tratamientos térmicos consiste en las reacciones que se producen en el material, tanto en los aceros como en las aleaciones no férricas, y ocurren durante el proceso de calentamiento y enfriamiento de las piezas, con unas pautas o tiempos establecido.^(1, 2)

Los tratamientos térmicos son operaciones de calentamiento seguido de enfriamiento que tiene por objeto dar a una pieza metálica las propiedades más convenientes para su empleo o su manufactura.^(1, 2) Permiten mejorar en gran medida las características mecánicas de un acero de composición determinada, siendo los fines principalmente buscados el cambio de la resistencia, dureza, ductilidad, y otras propiedades de los metales.^(1, 2)

1.1.2. TIPOS DE TRATAMIENTOS TÉRMICOS

Existen diversos tipos de tratamientos térmicos, la cual cada uno de ellos realiza o logra una propiedad determinada. Estos tipos de tratamientos térmicos son los siguientes:⁽¹⁻⁷⁾

1.1.2.1. Temple

Es un proceso de calentamiento seguido de un enfriamiento, generalmente rápido con una velocidad mínima llamada "crítica". Esta tiene como finalidad aumentar la dureza y la resistencia del acero.

El temple es una condición que se produce en el metal o aleación por efecto del tratamiento mecánico o térmico impartándole estructuras y propiedades mecánicas características. Los procedimientos térmicos que aumentan la resistencia a estas aleaciones son el tratamiento térmico en solución y el envejecimiento.

El tratamiento térmico en solución requiere que se caliente la aleación hasta una temperatura por debajo del punto de fusión por un periodo de tiempo específico, seguido de disminución rápida de dicha temperatura.

El envejecimiento es un tratamiento térmico a relativa baja temperatura que produce endurecimiento adicional al material tratado en solución.

Los factores que influyen en la práctica del temple son:⁽⁵⁻⁷⁾

- El tamaño de la pieza: cuanto más espesor tenga la pieza más hay que aumentar el ciclo de duración del proceso de calentamiento y de enfriamiento.
- La composición química del acero: en general los elementos de aleación facilitan el temple.

- El tamaño del grano: influye principalmente en la velocidad crítica del temple, tiene mayor templabilidad el de grano grueso.
- El medio de enfriamiento: el más adecuado para temprar un acero es aquel que consiga una velocidad de temple ligeramente superior a la crítica. Los medios más utilizados son: aire, aceite, agua, baño de Plomo, baño de Mercurio, baño de sales fundidas y polímeros hidrosolubles.

1.1.2.2. Revenido

Es un tratamiento complementario del temple, que generalmente sigue a éste. Al conjunto de los dos tratamientos también se le denomina *Bonificado*.⁽⁵⁻⁷⁾ Este tiene el trabajo de disminuir ligeramente los efectos del temple, conservando parte de la dureza y aumentar la tenacidad.⁽⁵⁻⁷⁾

El tratamiento de revenido consiste en calentar al acero después de normalizado o templado, a una temperatura inferior al punto crítico, seguido de un enfriamiento controlado que puede ser rápido cuando se pretenden resultados altos en tenacidad, o lento, para reducir al máximo las tensiones que pueden generar deformaciones.⁽⁵⁻⁷⁾ Los fines que se consiguen con este tratamiento son los siguientes:⁽⁵⁻⁷⁾

- Mejorar los efectos del temple, llevando al acero a un estado de mínima fragilidad.
- Disminuir las tensiones internas de transformación, que se originan en el temple.
- Modificar las características mecánicas, en las piezas templadas produciendo los siguientes efectos:
 - Disminuir la resistencia a la rotura por tracción, el límite elástico y la dureza.

- Aumentar las características de ductilidad; alargamiento estiración y las de tenacidad; resiliencia.

Los factores que influyen en el revenido son los siguientes:⁽⁵⁻⁷⁾ la temperatura de revenido sobre las características mecánicas, el tiempo de revenido (a partir de un cierto tiempo límite la variación es tan lenta que se hace antieconómica su prolongación, siendo preferible un ligero aumento de temperatura de revenido), la velocidad de enfriamiento (es prudente que el enfriamiento no se haga rápido) y las dimensiones de la pieza (la duración de un revenido es función fundamental del tamaño de la pieza recomendándose de 1 a 2 horas por cada 25 mm de espesor o diámetro).

El acero templado se vuelve frágil, siendo inútil en estas condiciones, aplicar el proceso de revenido. Esta operación que viene es para que las tensiones generadas en el acero no tengan tiempo de actuar provocando deformaciones o grietas. Este proceso hace más tenaz y menos quebradizo el acero aunque pierde algo de dureza.⁽⁷⁾

1.1.2.3. Recocido

Con este nombre se conocen varios tratamientos cuyo objetivo principal es ablandar o eliminar la dureza del acero para facilitar su mecanizado posterior. También es utilizado para regenerar el grano o eliminar las tensiones internas.⁽⁷⁾

Se debe tener en cuenta que los recocidos no proporcionan generalmente las características más adecuadas para la utilización del acero y casi siempre el material sufre un tratamiento posterior con vistas a obtener las características óptimas del mismo. Cuando esto sucede el recocido se llama también "tratamiento térmico preliminar" y al tratamiento final como "tratamiento térmico de calidad".⁽⁵⁻⁷⁾

1.1.2.4. Normalizado

Este tiene por objeto dejar un material en estado normal, es decir, ausencia de tensiones internas y con una distribución uniforme del carbono. Se suele emplear como tratamiento previo al temple y al revenido.⁽⁷⁾ Un tratamiento térmico en el cual las aleaciones porosas se calientan hasta aproximadamente 100 °F sobre el rango crítico, sosteniendo esa temperatura por el tiempo requerido, y enfriándola a la temperatura del medio ambiente.⁽⁷⁾

Se realiza calentando el acero a una temperatura unos 50 °C superior a la crítica y una vez austenizado se deja enfriar al aire tranquilo. La velocidad de enfriamiento es más lenta que en el temple y más rápida que en recocido. Con este tratamiento se consigue afinar y homogeneizar la estructura.^(6, 7)

CAPÍTULO I.- FUNDAMENTO TEÓRICO

DAÑO POR
HIDRÓGENO

1.2. DAÑO PORHIDRÓGENO

1.2.1. DAÑO PORHIDRÓGENO

El daño por hidrogeno se define como una falla asistida por un ambiente, el cual resulta de la acción combinada del hidrógeno y los esfuerzos residuales ó esfuerzos tensiles aplicados, ocurriendo a temperatura ambiente.^(8, 9) Esta resulta de la absorción del hidrógeno atómico ó iónico por el material en sitios colectores potenciales que pueden causar varios tipos de daños principales como: agrietamiento, ampollamiento, pérdidas de las propiedades mecánicas del acero, entre otros.^(8,10-24) El hidrógeno puede migrar desde la superficie, penetrando en el material y dirigiéndose hacia las inclusiones interiores o poros, donde se nuclea y genera aumento de presión lo que da lugar a deformaciones y rupturas. 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 H₂S con valores de pH bajos, de tal manera que se crean condiciones agrias ó ácidas.^(8,10-24)

Los aceros que trabajan en medios que promuevan el ingreso de hidrógeno, sufren a menudo de dos tipos de fenómenos. Estos son el Daño por Hidrógeno y la Fragilización por Hidrógeno.⁽⁹⁾ El Daño por Hidrógeno se produce cuando parte del hidrógeno generado en la superficie del material, como consecuencia de una reacción de corrosión, penetra y precipita en el interior, alojándose principalmente en interfaces entre matriz e inclusiones, iniciando fisuras que se propagan en aceros de baja resistencia mecánica.⁽⁹⁾

La Fragilización por Hidrógeno provoca, en la mayoría de los casos, una alteración de las propiedades mecánicas, tales como pérdida de ductilidad, resistencia mecánica, entre otros, sin necesidad que se presente una pérdida de espesor de pared

en el componente, pudiendo conducir, en algunos casos, a roturas catastróficas.⁽⁹⁾ El daño por hidrógeno, puede además generarse con la presencia de tensiones.⁽⁹⁾ Este tipo de daño es el que predomina en diversos componentes (por ejemplo: tubos, láminas de acero, entre otros) utilizados en las industrias petroquímicas y petroleras, ya que estos están sometidos a la acción conjunta de sollicitaciones mecánicas, como así también a la acción agresiva del medio (presencia de H₂S).⁽⁹⁾

La superficie de una tubería de acero al carbono y de baja aleación, expuesta a un medio acuoso que contenga H₂S y/o CO₂ crea condiciones agría ó ácida, que pueden conducir a un proceso de corrosión. Éste se puede manifestar con una pérdida de peso causado por una disolución local o uniforme del metal, a temperaturas que exceden los 60 °C, y mediante daños ocasionados por hidrógeno, a temperatura ambiente, los cuales pueden conducir a fallas catastróficas por ruptura del componente.⁽⁸⁾

1.2.2. CLASIFICACIÓN DEL DAÑO POR HIDRÓGENO

Los tipos específicos de daño ocasionados por el hidrógeno han sido categorizados con la finalidad de ampliar la comprensión de los factores que afectan el comportamiento en aleaciones y proporcionar de esta manera una base para el desarrollo y análisis de las numerosas teorías que sustentan los diferentes mecanismos involucrados en el daño.⁽³⁰⁾ Los principales tipos de daño generado por hidrógeno presente en las probetas se pueden clasificar como:^(8, 31)

- a) 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.

- b) *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.
- 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 inoxidables, 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) *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.

-
- e) 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 (400F).
- f) Grietas seccionadas, hojuelas y ojos de pez:** son características comunes del daño por hidrógeno en materiales forjados, soldados y 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 si 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 al creep 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. 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.

1.2.3. TEORÍA DEL DAÑO POR HIDRÓGENO

Existen muchos mecanismos o teorías que tratan de explicar las variadas formas del daño ó degradación a las que puede inducir el hidrógeno. Estas preeminentes teorías están basadas en la presión, adsorción en la superficie, decohesión, fluencia plástica extendida, ataque por hidrógeno y la formación de hidruros. Es importante señalar que de la gran variedad de mecanismos que sustentan otras teorías, la mayoría constituyen variaciones de estos modelos básicos.^(8, 31) Los mecanismos y/o teorías existentes son:⁽⁸⁾

a) Teoría de la presión

Esta teoría 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.

b) Teoría de la energía de superficie

Este modelo fue propuesto por Petch y Stables⁽⁸⁾ y sugiere que el hidrógeno adsorbido sobre las superficies libres creadas 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 reducción en el trabajo a la fractura por lo tanto incrementaría la propagación de la grieta a niveles de esfuerzo por debajo de aquellos experimentados típicamente por una aleación en un ambiente no agresivo.

c) Teoría de decohesión

Esta teoría describe el efecto del hidrógeno sobre la fuerza cohesiva entre los átomos de la matriz de la aleación.⁽⁸⁾ 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.

d) *Teoría del aumento de la fluencia plástica*

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.

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.

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.⁽⁸⁾ 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) y descarburización interna desde 200°C (400 °F) en adelante.

g) Teoría del atrapamiento de hidrógeno

A pesar de la existencia de numerosos modelos para comprender esta teoría, ninguno explica el comportamiento exhibido por aleaciones en diferentes sistemas hidrogenados. Uno de los principales factores que determina la susceptibilidad al daño por hidrógeno en aleaciones ferrosas es el fenómeno referido como atrapamiento.

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.⁽⁸⁾

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.⁽⁸⁾

1.2.4. MECANISMOS DEL AGRETAMIENTO POR HIDRÓGENO

L. Coudreuse y J. Charles^(8, 24) 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 1, ^(8, 22) Para el caso, por ejemplo, de una inclusión elongada de sulfuro de manganeso (MnS), se tiene:⁽⁸⁾

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

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

Donde:

- σ_T^0 = esfuerzo total de hidrógeno presente
- σ_a^0 = esfuerzo aplicado sin hidrógeno presente
- σ_r^0 = esfuerzo residual sin hidrógeno presente
- σ_c^0 = esfuerzo cohesivo sin hidrógeno presente

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

- Recombinación del H₂ 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.
- Interacción hidrógeno/dislocaciones en el extremo del defecto en la zona plástica, conduciendo a una pérdida de ductilidad en esa zona.
- Disminución de los esfuerzos cohesivos.

Por lo tanto, en el defecto el esfuerzo aplicado total puede aumentar debido a la presión de hidrógeno, tal que si:

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

y se puede iniciar la grieta.

Donde:

- σ_T^H =esfuerzo total con hidrógeno presente
- σ_a^H =esfuerzo aplicado con hidrógeno presente
- σ_r^H = esfuerzo residual con hidrógeno presente
- σ_c^H = esfuerzo cohesivo con hidrógeno presente.

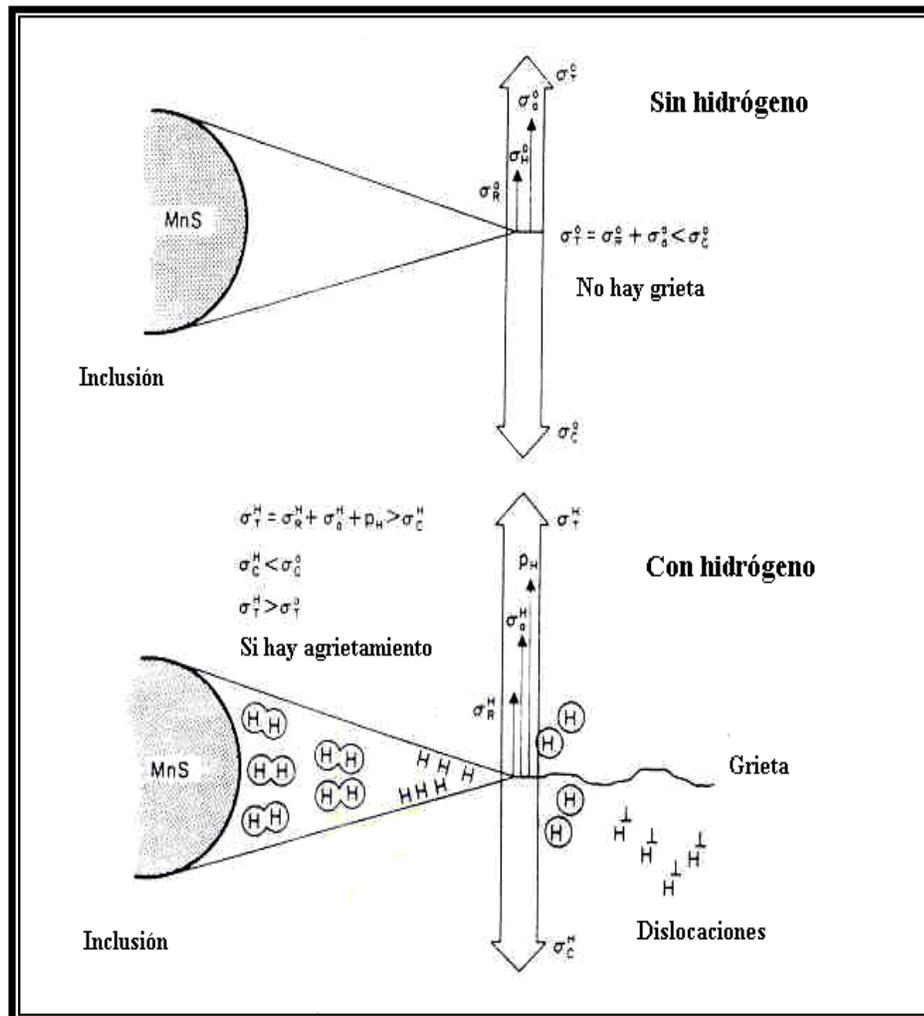


Fig. 1: Ilustración esquemática del efecto del hidrógeno en el inicio de una grieta.⁽⁸⁾

1.2.5. FACTORES EXTERNOS E INTERNOS QUE INFLUYEN EN LA SUCEPTIBILIDAD AL DAÑO POR HIDRÓGENO

Todos los fenómenos ya descritos anteriormente pueden conducir a fallas catastróficas 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 H₂S, pH del medio, tiempo de exposición, temperatura y presión, esfuerzos aplicados.⁽⁸⁾

Los factores metalúrgicos actúan sobre la concentración crítica (C_k), a parte de la temperatura y el esfuerzo. Todos los parámetros metalúrgicos pueden tener influencia sobre la concentración (C_H), 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.⁽⁸⁾ En la tabla 1⁽⁸⁾ se resumen estos factores y su influencia en C_H y C_k.

En realidad, el agrietamiento ocurre en un defecto cuando localmente la cantidad de hidrógeno (C_H) es mayor que una concentración crítica para el agrietamiento:⁽⁸⁾

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

	Parámetros	Influencia sobre
Parámetros externos ó ambientales	<ul style="list-style-type: none"> • Composición • Contenido H₂S • pH • Actividad externa del hidrógeno • Tiempo • Temperatura • Esfuerzo 	<p style="text-align: center;">C_H</p> <p style="text-align: center;">C_H, C_k</p> <p style="text-align: center;">C_H, C_k</p>
Parámetro metalúrgicos (características de las trampas)	<ul style="list-style-type: none"> • Composición química • Microestructura • Inclusión • Defecto • Segregación • Esfuerzos internos 	<p style="text-align: center;">C_H, C_k</p>
Otros	<ul style="list-style-type: none"> • Efectos de superficie • Modo del transporte del hidrógeno • Tratamientos termomecánicos 	<p style="text-align: center;">C_H</p> <p style="text-align: center;">C_H</p> <p style="text-align: center;">C_H, C_k</p>

Tabla 1: Parámetros que actúan sobre C_H y C_k.⁽⁸⁾

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.⁽⁸⁾

<i>Parámetros Externos</i>	<i>Parámetros Metalúrgicos</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Naturaleza de la solución • Concentración de H₂S • pH • Reacciones electroquímicas • Temperatura • Tiempo • Estos parámetros actúan sobre la actividad del hidrógeno y la cinética de absorción. 	<ul style="list-style-type: none"> • Composición química (Cu, Ni, P, S, etc.) • Microestructura • Inclusión (número, forma y distribución) • Segregación • Defectos (carburos, dislocaciones, bordes de grano) • Esfuerzos internos

Tabla 2: Parámetros que actúan sobre el comportamiento al agrietamiento inducido por hidrógeno.⁽⁸⁾

Todos los parámetros metalúrgicos pueden ejercer una influencia sobre la concentración de hidrógeno, ya que cada uno de estos tiene influencias en las características de las trampas. Considerando la tabla 2,⁽⁸⁾ se puede asumir que el concepto de concentración crítica se adapta muy bien para describir el fenómeno de HIC.

Szklarska y colaboradores^(8,32) 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^(8,33) 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.

1.2.6. CARACTERÍSTICAS DEL DAÑO INDUCIDO POR HIDRÓGENO

El daño por hidrógeno se manifiesta en aleaciones ferrosas y no ferrosas de muchas maneras, tales como: agrietamiento, ampollamiento, formación de hidruros, pérdida de la ductilidad, entre otros.⁽⁸⁾

El daño inducido por hidrógeno en aceros que han sido expuestos a un ambiente agrio (H_2S) acuoso, se puede presentar principalmente como ampollas, agrietamiento recto o continuo y agrietamiento escalonado. En la figura 2,⁽⁸⁾ se muestran los ejemplos típicos de estos tipos de daño comunes en aceros, los cuales se originan sin la aplicación de esfuerzos externos.

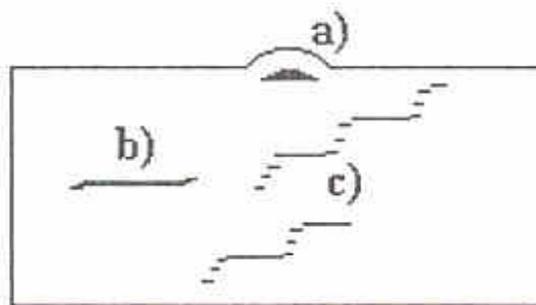


Fig. 2: Morfología de las grietas en un ambiente de H_2S acuoso.⁽⁸⁾

- 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.^(28, 29)

La detección del daño por hidrógeno es difícil, ya que este fenómeno puede afectar a las propiedades mecánicas del metal sin presentar reducción de espesor de pared, sin embargo, si genera daño como ampollamientos y agrietamientos y esto combinada con las altas presiones, causan graves fracturas. Por lo cual se quiere cuantificar el daño por hidrógeno ocasionado en el componente evaluado, ya que este impediría que el componente continuara prestando servicio.⁽¹⁰⁾

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:⁽⁸⁾

- Actividad del hidrógeno en el material
- 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.⁽⁸⁾

Frecuentemente 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 3.⁽⁸⁾

- 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.

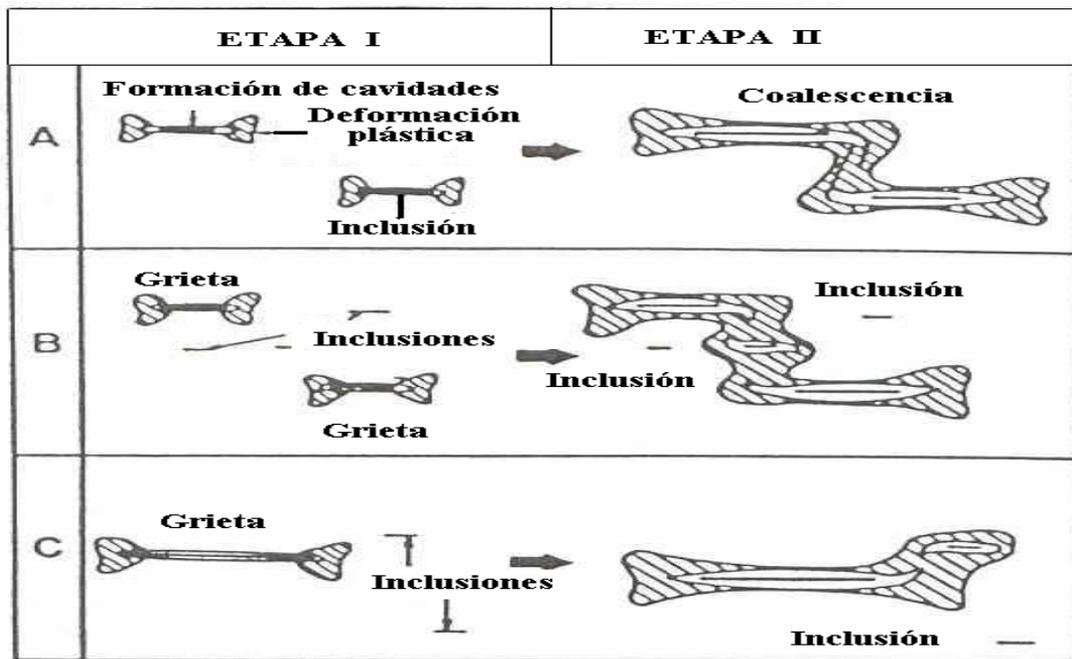


Fig. 3: Esquema del proceso de escalonamiento de las grietas.⁽⁸⁾

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).⁽⁸⁾ 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 coplanares 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 4.⁽⁸⁾

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.⁽⁸⁾

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.⁽⁸⁾

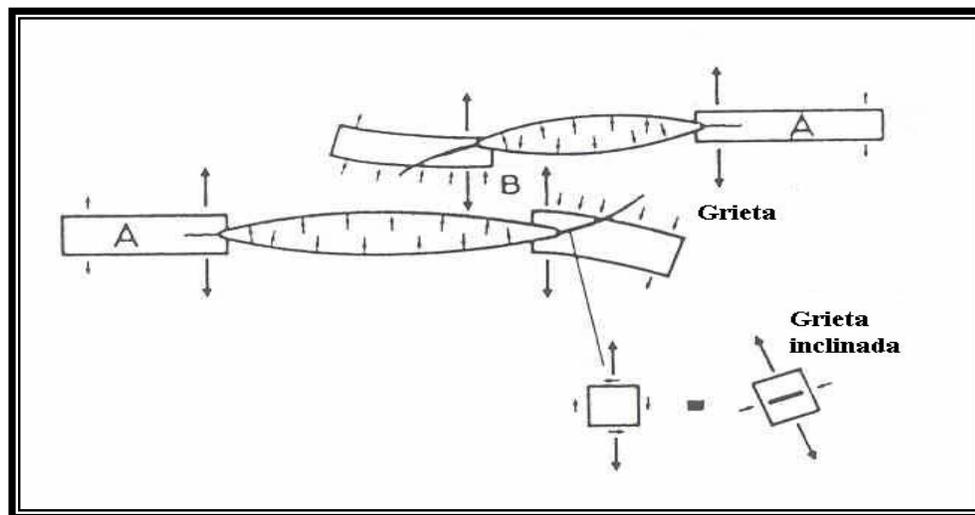


Fig. 4: Propagación de una grieta a partir de una inclusión sin esfuerzo externo.

Interacción entre dos grietas.⁽⁸⁾

CAPÍTULO I.- FUNDAMENTO TEÓRICO

ULTRASONIDO

1.3. ULTRASONIDO

Los Ultrasonidos son ondas acústicas de idéntica naturaleza (mecánica o elástica) que las ondas sónicas, diferenciándose de ésta en que su campo de frecuencia se encuentra por encima de la zona audible.^(34, 35)

Los Ultrasonidos se pueden describir en tres bandas diferente de acuerdo a sus rangos de frecuencias en:⁽³⁴⁻³⁶⁾

- Infrasónicas: Se extiende por debajo de 20 Hz. No tiene aplicación en control de materiales estructurales.
- Sónicas: Es el rango de frecuencia en que el oído humano es capaz de percibir sonido. Se considera que abarca desde 20 Hz para los sonidos graves hasta 20 KHz para los más agudos.
- Ultrasonías: Cuando la frecuencia es superior a 20 KHz. Dentro de esta banda se pueden diferenciar, a su vez, tres zonas diferentes. Estas son:
 - La del ultrasonido próximo, con frecuencias entre 20 y 100 KHz, que es la zona en que operan las técnicas que utilizan elevados niveles de energía. Un ejemplo son los sistemas de limpiezas, agitación y, en general, cavitación trabajan en esta banda.
 - La banda utilizada en control de calidad de los materiales, que se extiende entre 0.25 y 25 MHz, aunque la gran mayoría de los ensayos se hacen entre 2 y 5 MHz.
 - Las frecuencias por encima de 100 MHz se consideran dentro del campo de la microscopía acústica, técnica en la que se llegan a aplicar frecuencias de hasta 1 GHz.

La técnica de ultrasonido es utilizado para el ensayo no destructivo de los materiales, se aplica para conocer el interior de un material al procesar la trayectoria de la propagación de las ondas en el interior de la pieza. Dependiendo de las

discontinuidades presentes en el material examinado, es posible evaluar discontinuidades según su forma, tamaño y orientación, ya que estas oponen resistencia conocida como impedancia acústica. Al conocer la propagación de las ondas sonoras, se determina su velocidad con ello las propiedades de los materiales.^(35, 37)

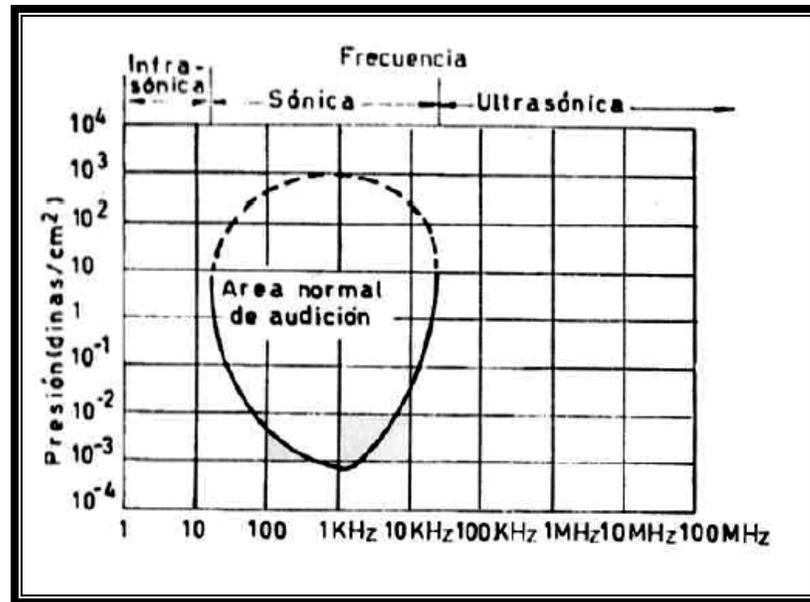


Fig. 5: Espectro de Acústico.⁽³⁷⁾

1.3.1. PARÁMETROS DE UN SISTEMA ULTRASÓNICO

Los principales parámetros que deben ser controlados en un sistema ultrasónico son:^(34,35, 38)

- ★ *Frecuencia de la Onda (f)*: Es el número de oscilaciones de una partícula por segundo.
- ★ *Longitud de Onda (λ)*: Es la distancia entre dos planos en los que las partículas se encuentra en el mismo estado de movimiento. Esta es inversamente proporcional al tiempo.

-
- ★ *Velocidad Acústica (c)*: Es la velocidad de propagación de la onda para una condición dada. Esta velocidad es una característica del material, y en general, es constante para un material determinado, para cualquier frecuencia y longitud de onda.

 - ★ *Amplitud de Oscilación (A)*: Se define como el desplazamiento máximo de una partícula de su posición cero.

 - ★ *Velocidad Instantánea de Vibración (v)*: Es la velocidad propia de la partícula en su movimiento oscilatorio.

 - ★ *Presión Acústica (P)*: Se define como la presión alterna de un material dado, sean gases, líquidos y sólidos. Donde en los puntos de gran densidad de partículas, la presión es también mayor que la presión nominal, mientras que en la zona dilatada es menor.

 - ★ *Atenuación del haz*: Es la pérdida de energía de una onda ultrasónica al desplazarse a través de un material. Las causas principales son la dispersión y la absorción, la cual se expresa en decibeles (dB) por unidad de longitud.

1.3.2. CLASIFICACIÓN Y TIPOS DE ONDAS

Dependiendo del medio de propagación de las ondas, ellas pueden ser clasificadas en *mecánicas* y *no mecánicas*.

Las ondas mecánicas son las que se propagan en medios deformables o elásticos. Son originadas por una perturbación o disturbio en una región de un medio elástico.⁽³⁵⁾ Teniendo el medio propiedades elásticas, el disturbio es transmitido sucesivamente de un punto a otro. Las partículas del medio vibran solamente

alrededor de sus posiciones de equilibrio, si no se desarticulan juntamente como un todo, como la cuerda.⁽³⁵⁾

Las ondas no mecánicas, como las electromagnéticas, no necesitan de un medio material para su propagación.⁽³⁵⁾

En cuando a la relación entre la dirección de perturbación y de la propagación, las ondas pueden ser clasificadas en varios tipos:^(34, 35)

1.3.2.1. Ondas Longitudinales

La onda longitudinal es una onda de compresión en donde el movimiento de las partículas se da en la misma dirección que la propagación de la onda, es decir, ocurre en dirección longitudinal. Este tipo de onda se transmite a través de cuerpos sólidos, líquidos y gases. Las ondas longitudinales se pueden clasificar como onda mecánica.⁽³⁵⁾

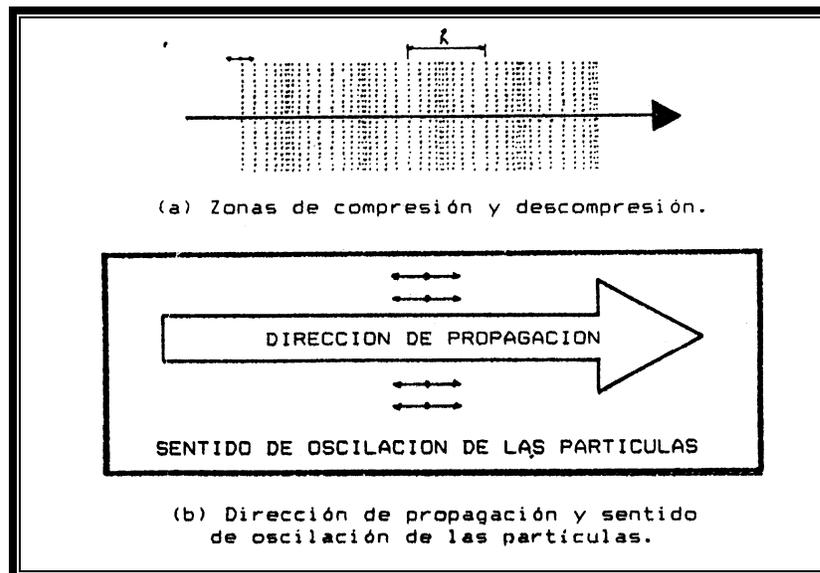


Fig. 6: Características de las Ondas Longitudinales.⁽³⁵⁾

1.3.2.2. Ondas Transversales

Este tipo de onda en donde el movimiento de las partículas es perpendicular a la dirección de propagación, es decir, ocurre en dirección transversal, y no oscilan según la dirección de propagación sino en ángulo recto. Este tipo de onda solo se transmite en cuerpos sólidos y su velocidad aproximada del 55% de la velocidad de una onda longitudinal. Las ondas transversales se pueden clasificar como onda mecánica.⁽³⁵⁾

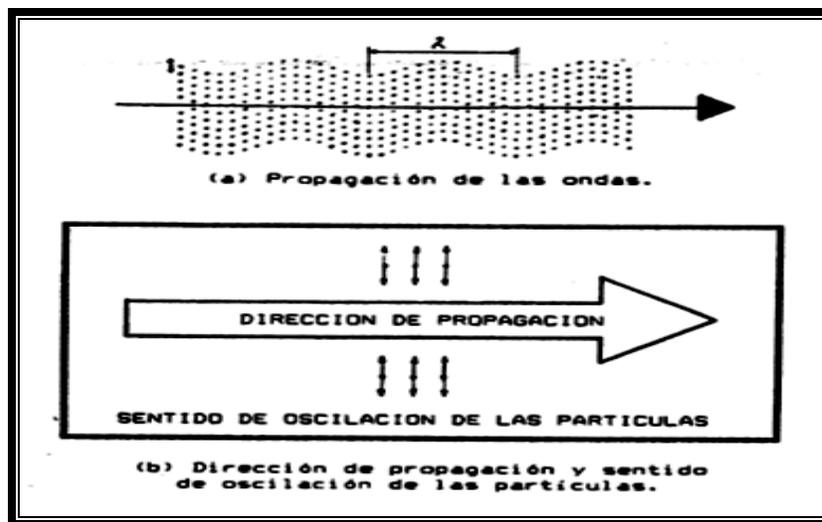


Fig. 7: Características de las Ondas Transversales.⁽³⁵⁾

1.3.2.3. Ondas de Superficie

La onda de superficie o de *Rayleigh* se propaga solamente en la periferia plana o curva de un sólido, siguiendo las irregularidades o contornos del mismo. Se puede considerar como un tipo especial de onda, siendo una combinación de ondas longitudinales y ondas transversales transversal. Estas muestran un movimiento longitudinal y transversal (ver Figura 8), donde cada molécula ejecuta una elipse conforme la onda pasa. La longitud de onda de estas ondas es muy corta comparada al espesor del material por el cual ésta viaja. Las ondas de superficie viajan a una velocidad aproximada del 90 a 95 % de la velocidad de

una onda transversal, en el mismo material. Solamente fracturas o defectos en la superficie o muy cerca de ella pueden ser detectados. Las ondas de superficie se pueden clasificar como onda mecánica.^(35, 37)

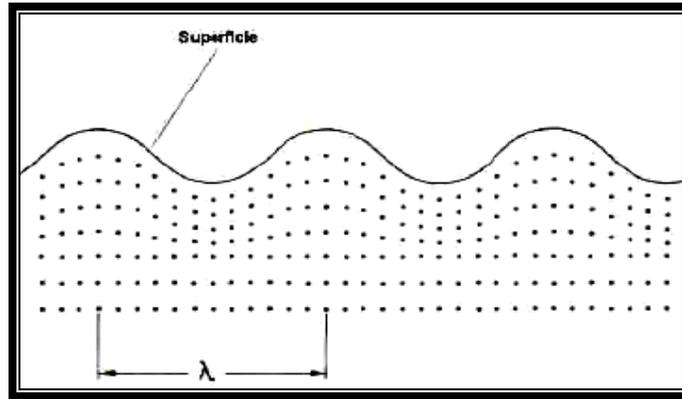


Fig. 8: Características de las Onda de Superficie.⁽³⁷⁾

1.3.2.4. Ondas de Lamb

La onda de Lamb, también conocida como ondas aplanadas, es un tipo de onda que se propaga dentro del espesor de una lámina delgada y que únicamente puede generarse en determinados ángulos de incidencia, frecuencia y espesor de lámina. La velocidad de la onda depende de su forma y del producto del espesor de la lámina y de su frecuencia. Las ondas de lamb se pueden clasificar como onda mecánica.^(35, 37)

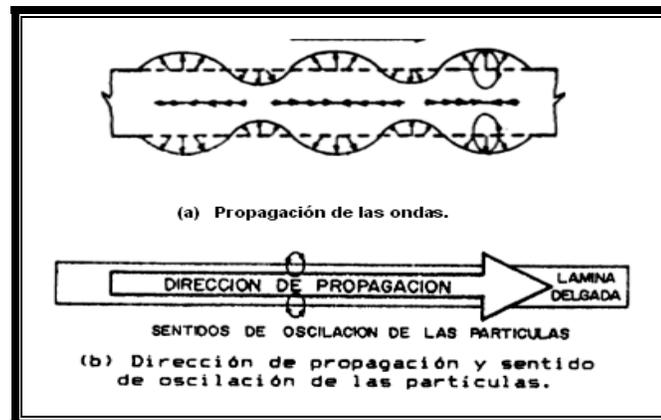


Fig. 9: Características de las ondas Lamb simétricas.⁽³⁵⁾

1.3.3. CARACTERÍSTICAS DEL CAMPO ULTRASÓNICO DE UN OSCILADOR

El área influenciada por las vibraciones transmitidas por el palpador se conoce como Campo Sónico. Esto es muy importante para la detección y evaluación del tamaño de los defectos; por ello, es necesario definir y describir algunos términos especiales que conciernen al campo sónico y al comportamiento de la presión acústica en el. El palpador contiene un cristal, el cual transmite las ondas ultrasónicas únicamente en sentido perpendicular a las superficies a las que se aplican cargas eléctricas. Esto ocurre, aproximadamente, en forma de un haz paralelo, con una sección transversal correspondiente al diámetro del palpador para la primera parte de propagación de las ondas. Luego, a una cierta distancia del oscilador, el haz se abre en forma de cono. Esta característica se muestra en la figura 10.^(34, 35)

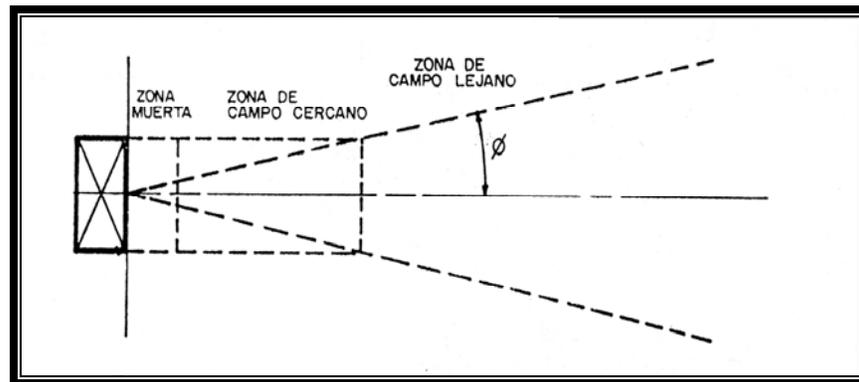


Fig. 10: Diagrama del haz ultrasónico mostrando las diferentes zonas de intensidad.⁽³⁵⁾

1.3.3.1. Zona Muerta

Se conoce como zona muerta la interfaz del palpador con el material base, conocida también como la pieza de estudio o de inspección, y es la distancia desde la superficie de ensayo hasta la profundidad de inspección en la cual no es posible detectar discontinuidades, debido a la interferencia producida por las vibraciones del cristal y su presencia en el haz. Y esta zona está determinada por

el tiempo de oscilación, es decir, el tiempo requerido por el cristal para generar el pulso de vibración y la cual está determinada por la longitud de la onda. ^(34, 35)

1.3.3.2. Campo Próximo o Campo Cercano

Se conoce como campo cercano (*también conocida como zona de Fresnel*) la región más cercana al transductor. En esta zona es difícil la detección de alguna discontinuidad catalogada como defecto. ^(34,39) La energía es irradiada en todas las direcciones, a partir del punto de origen, y la presión acústica varía presentándose con máximos y mínimos. ⁽³⁵⁾ 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 11). ⁽³⁵⁾

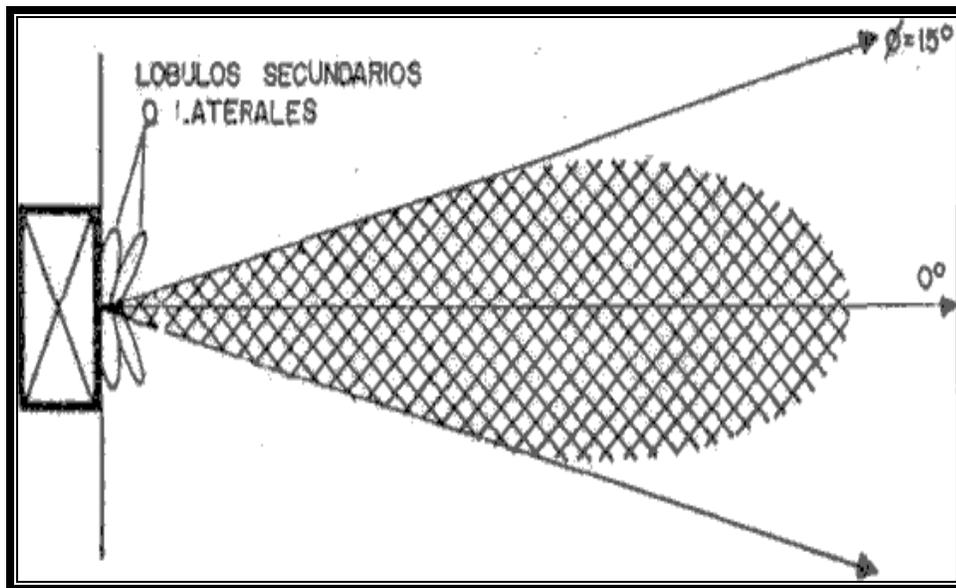


Fig. 11: Geometría del haz para un palpador con un ángulo de divergencia de 15° . ⁽³⁵⁾

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 diámetro y viene dada por la ecuación: ⁽³⁵⁾

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

Donde:

- D_{ef} : Diámetro efectivo
- N : Longitud de campo cercano

Para efectos prácticos, el diámetro efectivo del cristal se considera como: ⁽³⁵⁾

$$D_{ef} = 0,97 D \quad (5)$$

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: ⁽³⁵⁾

$$N = \frac{D_{ef}^2}{4\lambda} = \frac{0,94D^2 f}{4V} \quad (6)$$

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.⁽³⁵⁾

1.3.3.3. Campo Lejano

Se conoce como campo lejano (*zona de Fraunhofer*) a la región más alejada (alejada al último máximo axial) en la que, el haz diverge en ángulos alrededor del eje central, logrando detectar las discontinuidades presentes en ella.^(34, 39) En ésta zona la intensidad o la presión sonora se estabiliza, teniendo mayor magnitud alrededor del eje imaginario del haz (como se ilustró en la Figura 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 12. Uno de estos factores se denomina: divergencia del haz.⁽³⁵⁾

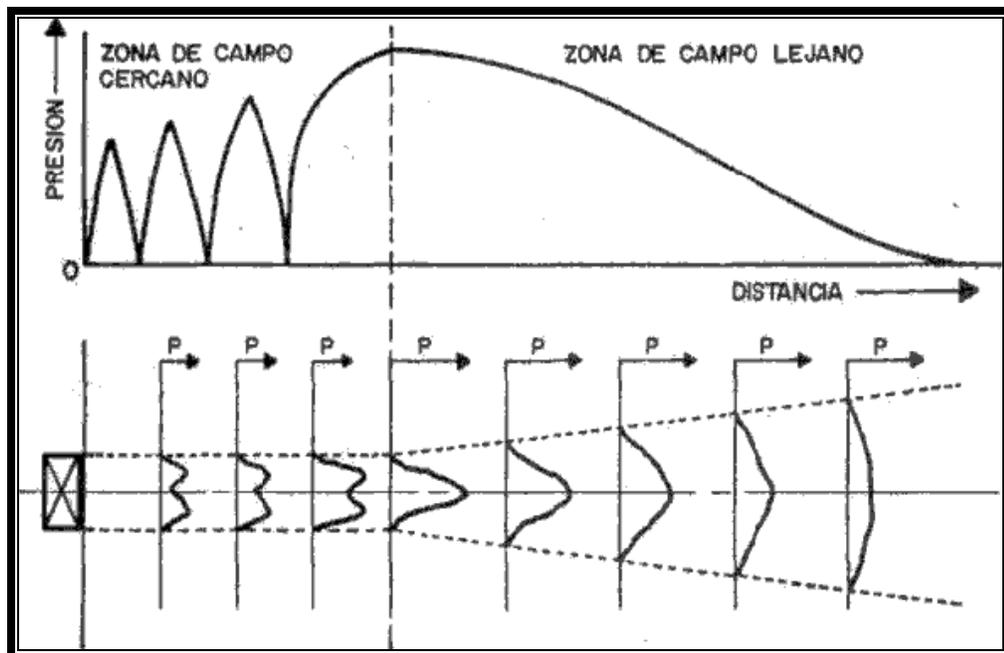


Fig. 12: Distribución de la presión acústica a lo largo del recorrido del haz.⁽³⁵⁾

1.3.3.4. Divergencia del Haz

Es el ensanchamiento del haz ultrasónico producida a medida que la onda acústica viaja a través de un medio.^(34, 35) Esta 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:⁽³⁵⁾

$$\text{sen}(\theta) = 1,22 \frac{\lambda}{D} \quad (7)$$

$$\text{sen}(\theta) = 1,22 \frac{V}{D f} \quad (8)$$

Donde:

- θ = La mitad del ángulo de divergencia

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.⁽³⁵⁾ 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:
(curso UT)

$$P = 2P_0 \cdot 2 \text{sen} \left[\frac{\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{D^2}{\lambda} + S^2} - S \right] \quad (9)$$

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:⁽³⁵⁾

$$P = P_0 \pi \frac{N}{S} \quad (10)$$

$$P = P_0 \frac{S}{\pi \lambda} \quad (11)$$

Donde:

- S: Superficie del cristal

1.3.4. PALPADORES

El palpador o transductor forma parte importante e indispensable del sistema ensayo y muchos de los resultados más significativos del mismo dependen de la combinación equipo-palpador. El palpador es un dispositivo que contiene un cristal, el cual al ser activado mecánicamente convierte energía acústica en energía eléctrica y viceversa.⁽³⁴⁾

1.3.4.1. Características de un Palpador Ultrasónico

En el diseño de palpadores ultrasónicos, deben ser contempladas dos características básicas muy importantes estas son la resolución y la sensibilidad.^(34, 39)

- ★ *Sensibilidad:* Es la capacidad de un transductor para detectar discontinuidades pequeñas.
- ★ *Resolución:* Es la capacidad para separar dos señales cercanas en tiempo o profundidad.

Estas dos características, están referidas directamente a otros parámetros, que son:^(34, 35)

- ★ *Ancho de Banda:* Un palpador no emite únicamente impulsos de frecuencia igual a la nominal, sino dentro de un rango que se conoce como *ancho de banda*. Cuando más corto es el impulso mayor es el ancho de banda.
- ★ *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 del material.
- ★ *Frecuencia de inspección:* Es la frecuencia efectiva de la onda ultrasónica del sistema utilizado para examinar el material.

1.3.4.2. Clasificación o tipos de Palpadores

1.3.4.2.1. Palpadores de Contacto

Estos palpadores se aplican directamente a la superficie de la muestra, con una cierta presión, e intercalando, en la mayor parte de los casos, un medio de acoplamiento líquido o semilíquido.⁽³⁵⁾

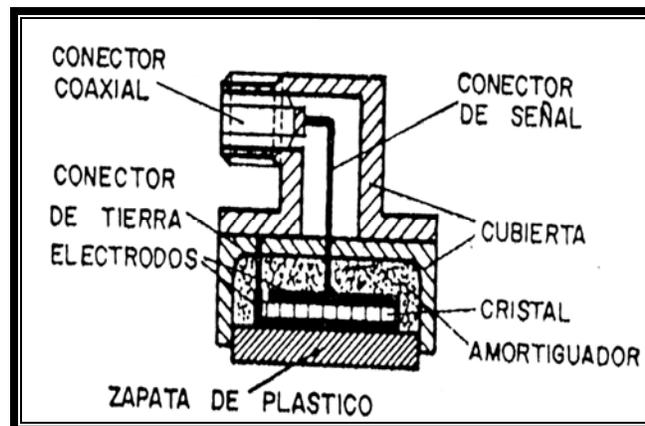


Fig. 13: Corte de un palpador normal.⁽³⁵⁾

1.3.4.2.2. Palpadores de Inmersión

El diseño de un palpador de inmersión es similar al de un palpador de contacto de incidencia normal (ver Figura 14). En el ensayo por inmersión, se sumerge bien sea la muestra en un tanque o mediante el empleo de técnicas de inmersión local, se transmite ultrasonido entre el palpador y la muestra se efectúa a través de una columna de líquido, es decir, sin contacto directo, presión ni rozamiento entre el palpador y la muestra, eliminando los riesgos de desgastes del palpador, permite la modificación sencilla y de forma continua el ángulo de incidencia del haz, y permite aumentar la velocidad de ensayo manteniendo constante las condiciones de acoplamiento.⁽³⁴⁾

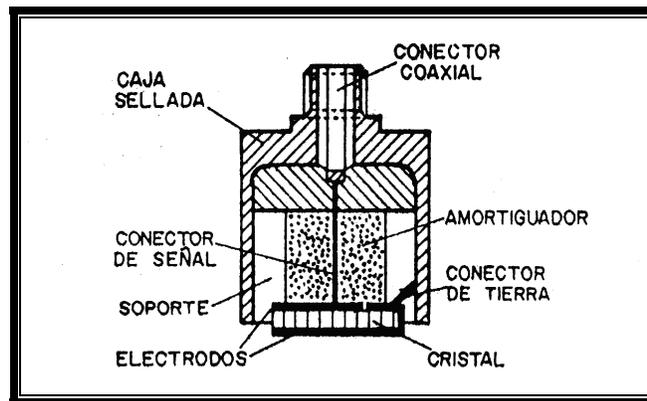


Fig. 14: Corte de un palpador utilizado para ensayo con el método de inmersión.⁽³⁵⁾

1.3.4.2.3. Palpadores de doble Cristal

Es un palpador que posee dos cristales, uno que funciona como transmisor de la señal y el otro que funciona como receptor (ver Figura 15). En este tipo de palpador, el transductor de emisión y el transductor de recepción están ubicados dentro de una misma carcasa, la cual se montan aislados eléctrica y acústicamente. También posee la característica esencial

de que no posee problemas debidos a la *zona muerta* y al *poder de resolución* en la superficie de entrada.⁽³⁴⁾ Este tipo de palpador se utiliza para equipos pulso-eco y resonancia.

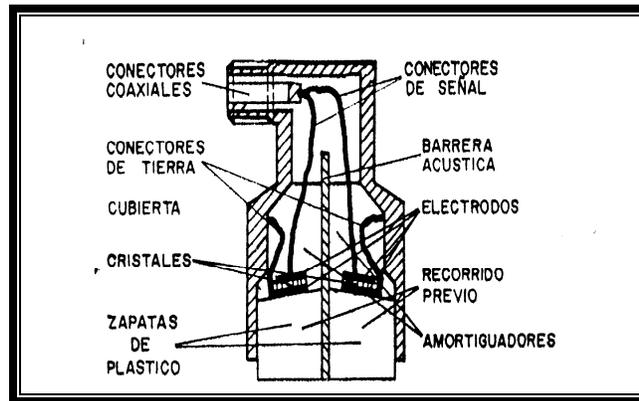


Fig. 15: Corte de un palpador "E-R".⁽³⁵⁾

1.3.4.2.4. Palpadores Angulares

Es un palpador de ondas longitudinales que se coloca sobre una cuña de metacrilato con el ángulo adecuado, la cuales son utilizadas para generar y detectar ondas transversales.^(34, 35) Este tipo de palpador se utiliza para equipos pulso-eco y transmisión.

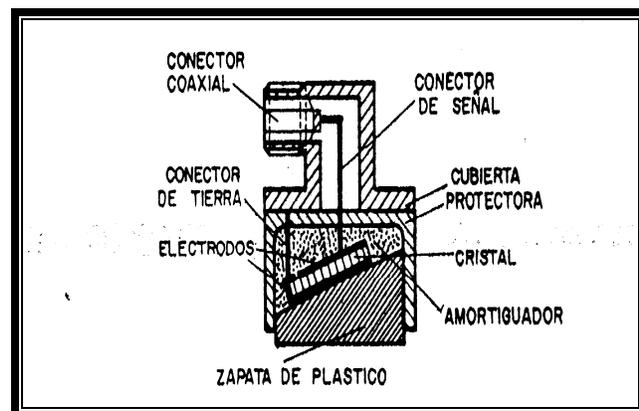


Fig. 16: Corte de un palpador Angular.⁽³⁵⁾

1.3.4.2.5. Palpadores Especiales

- Palpadores para técnicas de altas y bajas temperaturas
- Palpadores para Técnicas de Inmersión
- Palpadores de alta y baja frecuencia (150MHz y 100 KHz)
- Palpadores para ser usado por la Industria Nuclear
- Palpadores focalizadores
- Palpadores que emiten ondas superficiales
- Palpadores magnéticos
- Palpadores para ensayos de materiales compuesto
- Palpadores de ángulos variables

1.3.5. MEDIO DE ACOPLAMIENTO

El acoplante es una sustancia utilizada entre el palpador y la superficie de ensayo para permitir o mejorar la transmisión de la energía ultrasónica.^(34, 35)

El propósito del 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. Esto debido a que el aire es un mal transmisor de la energía ultrasónica. 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.^(34, 35)

1.3.5.1. Tipos de Acoplantes

Algunos materiales acoplantes utilizados para la técnica de ultrasonido son: agua, multicelulosa, algunos tipos de aceites, glicerina, grasas en base a petróleo,

grasas en base a silicona, pulpa de papel, mercurio, plastilina, aceites minerales de diversos grados de viscosidad, y muchas otras pastas. También las gomas suaves pueden transmitir el sonido y son denominadas acoplantes secos. 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:^(34, 35)

- La Condición superficial
- Temperatura superficial
- Inclinación de la superficie

1.3.6. MÉTODOS DE INSPECCIÓN

Los sistemas de ensayo ultrasónicos son:⁽³⁵⁾

1.3.6.1. Método de Transmisión

En el sistema de ensayo por transmisión, se requiere la utilización de dos palpadores o dos cristales, donde un cristal actúa solamente como emisor y el otro como receptor, Tanto la emisión, como la recepción pueden ser continuas; así como pueden ser usados, al igual que en el sistema de pulso-eco, pulsos ultrasónicos de corta duración, Los palpadores deben ser alineados de forma tal, que la emisión ultrasónica se transmita a través del material y sea entonces detectada por el palpador receptor.

Estos métodos están basados en el efecto de sombra que un obstáculo, discontinuidad en el seno de una muestra, produce al ser interpuesto por un haz ultrasónico.

En principio, los equipos diseñados para operar según los métodos de transparencia o de sombra, realizan sólo la medida de la intensidad acústica, si bien aquellos que miden conjuntamente la intensidad acústica y el tiempo de recorrido son perfectamente adaptables a éste fin.

1.3.6.2. Método de Pulso-Eco

Es un método de inspección en el cual la presencia y posición de un reflector son indicadas por la presencia de una señal y su posición sobre la línea base de tiempo.^(34, 35)

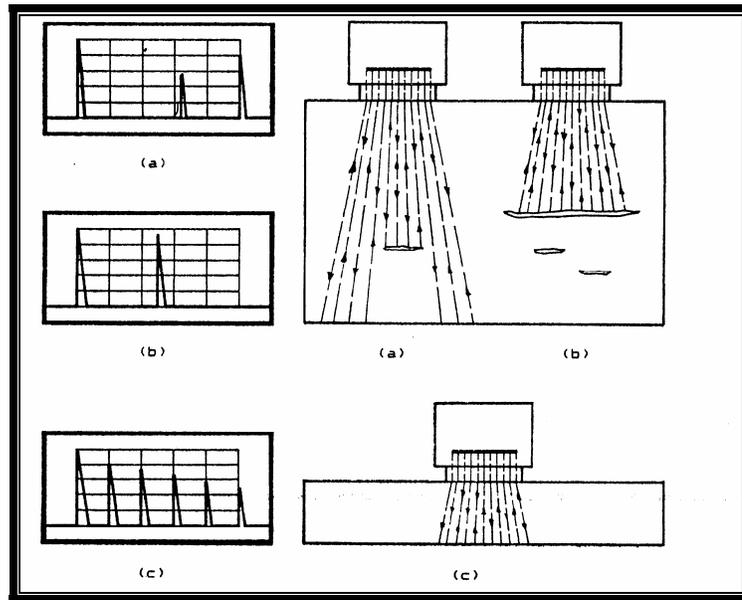


Fig. 17: Sistema pulso-eco.⁽³⁵⁾

En la Figura 17 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 17-a y 17-b.⁽³⁴⁻³⁶⁾

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 17-a). 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 17-b).⁽³⁵⁾

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 rango 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 17-c.⁽³⁵⁾

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.⁽³⁵⁾

1.3.6.3. Método de Resonancia

Es un método de inspección en el cual variando la frecuencia de la onda transmitida a un material, se puede obtener múltiplo de medias longitudinales de ondas que igualan a un determinado espesor de material.^(34, 35)

1.3.6.4. Método de Inmersión

Es un método donde el objeto a ser inspeccionado ultrasónicamente, es sumergido en un líquido y a través del mismo se transmiten y se reciben ondas ultrasónicas (ver Figura 18).^(37, 34, 35)

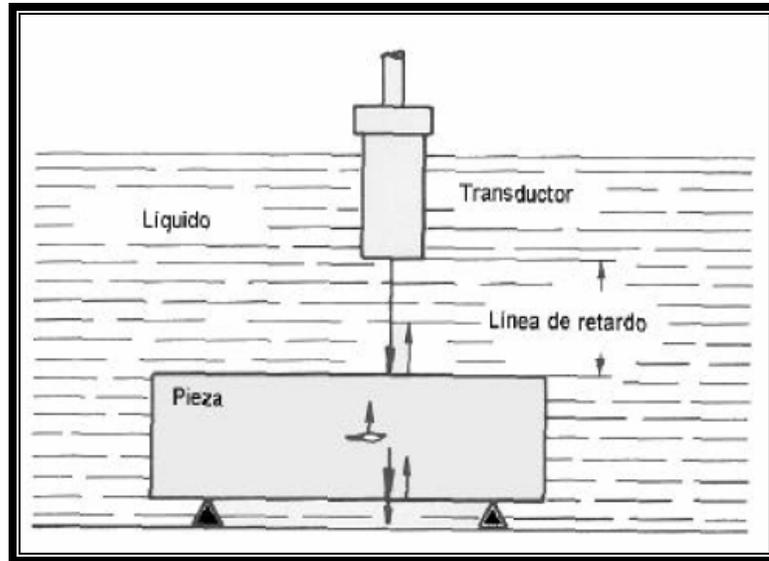


Fig. 18: Esquema de inspección por el Método de Inmersión.⁽³⁷⁾

1.3.7. APLICACIONES DE LOS ULTRASONIDOS

Las aplicaciones son muy amplias y abarcan la industria metalúrgica, construcciones navales, aeronáuticas, y otras industrias en general, algunos ejemplos de aplicación son:⁽³⁴⁻³⁵⁾

- Módulo de elasticidad: El módulo de elasticidad (Young), módulo de cizallamiento, son calculados en función de la longitudinal y la velocidad de onda. Con el uso de técnicas especiales del método de ultrasonido las propiedades referidas de los materiales se pueden medir también a altas temperaturas.

-
- Nodularidad de la fundición: Se cuantifica la concentración de grafito en hierro colado y su forma mediante la medición de la velocidad de la onda acústica.
 - Tasa de curado epoxi-concreto armado: La razón de curado con epóxico y el hormigón se determina por cambio de velocidad de sonido cuando estos materiales se endurecen.
 - Concentración de líquidos: La proporción de una mezcla de dos líquidos a una temperatura dada puede estar correlacionada con la velocidad del sonido por ser disímiles según solución.
 - Proporción de mezclas: La proporción y la densidad de una mezcla líquido-sólido a una determinada temperatura se pueden correlacionar con la velocidad del sonido y/o atenuación.
 - Densidad de cerámicos: La densidad de la cerámica puede ser verificada midiendo la velocidad del sonido.
 - Productos alimenticios: La aplicación del ultrasonido por su condición de ser poco contaminante, se utiliza por ejemplo en la determinación de las edades de huevos y papas, madurez de frutas, contenido de grasa en carne roja, porcentaje de sólidos en la leche entre otros.
 - Polimerización en plásticos: En plásticos y otros polímeros, las variaciones en la estructura molecular como la longitud o la orientación de cadenas del polímero, a menudo están acompañadas de los cambios en la velocidad del sonido y/o atenuación.
 - Dimensión y distribución de las partículas y porosidades: Los cambios en el tamaño o la distribución de partículas o la porosidad en un medio sólido o líquido influyen en la amplitud y la frecuencia de ultrasonido.

- Anisotropía en sólidos: Las variaciones de velocidad en el interior de las piezas, la dispersión, y/o la atenuación de ondas a través de diferentes ejes de un sólido pueden usarse para identificar y cuantificar la anisotropía de un material.
- Profundidad de cementación en acero: Las técnicas del ultrasonido especialmente de onda transversal y de alta frecuencia pueden usarse para medir la profundidad de cementación.
- Medida de temperatura: La termometría ultrasónica se usa para medir temperaturas muy altas (por ejemplo a 3000 grados Celsius) monitoreando cambios en la velocidad del sonido.
- Medición de espesores: Detección en zonas de corrosión
- Detección de discontinuidades en piezas que han sido fundidas, forjadas, laminadas o soldadas.
- En aplicaciones de nuevos materiales como son los metalcerámicos y metales compuestos.
- En el control de Calidad de materiales, bien en el estudio de discontinuidades superficiales, subsuperficiales e internas.
- Medición de dureza.
- Determinación del nivel de líquidos.

1.3.8. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL ENSAYO POR ULTRASONIDO

1.3.8.1. Ventajas

- Alto poder de penetración.
- Alta sensibilidad (Detecta discontinuidades muy pequeñas).
- Mayor exactitud en localización de discontinuidades y evaluación de su tamaño.
- Requiere acceso a una sola cara de la pieza a inspeccionar.
- La mayor parte del equipo es electrónica.
- Da indicaciones inmediatas. Permite inspeccionar grandes volúmenes del material.
- Es inofensivo para el operador y es automatizable.
- Sus aplicaciones están reguladas por Código y Normas.
- Puede alcanzar grandes profundidades (10 metros).
- Se puede aplicar sin necesidad de detener el funcionamiento de una instalación.

1.3.8.2. Desventajas

- Su operación es básicamente manual.
- Se necesita un elevado nivel de conocimientos.
- La irregularidad superficial, la geometría de la pieza, los espesores pequeños la afectan.
- Se necesitan medios acoplantes.
- Se necesitan estándares de comparación.
- Se necesita estar Calificado y Certificado.

1.3.9. DETECCIÓN DEL DAÑO POR HIDRÓGENO MEDIANTE LA TÉCNICA DE ULTRASONIDO

Una alternativa para evaluar el daño por hidrógeno en materiales expuestos a medios agrios, es mediante la aplicación de técnicas de Ensayos No Destructivos.⁽⁸⁾ Estas son capaces de proporcionar la información que permita evaluar un componente. En tal sentido la técnica de Ultrasonido, ha demostrado ser una de las mejores maneras para detectar y evaluar la susceptibilidad al daño por hidrógeno. Su principio físico consiste en enviar un haz ultrasónico sobre una de las superficies de la muestra, este sonido al viajar a través del material sufre una pérdida de energía conocida como Atenuación y cambios en su velocidad de propagación. El agrietamiento, puede ser evaluado a través de la detección de los cambios en velocidad y atenuación de las ondas ultrasónicas.

El Daño y ataque por hidrógeno es producido en aceros expuestos a medios hidrogenados a altas presiones y altas temperaturas para el caso del ataque por hidrógeno. Bajo tales condiciones, en las industrias petroleras y petroquímicas, el hidrógeno esta presente en los fluidos transportados a través de las tuberías de línea, pudiendo generar grandes fallas a estos componentes, las cuáles pueden manifestarse como: ampollamiento, grietas y pérdida de la ductilidad sin que existan reducciones de espesores en el componente.

Algunos estudios realizados^(10, 11) mediante los métodos de ultrasonido han revelado resultados interesantes, basados en la relación con la medición de las velocidades de propagación de las ondas longitudinales (v_L) y las ondas transversales (v_T). Esta técnica consiste en la medición del cociente de velocidades de propagación de ambas ondas ya descritas, mediante la siguiente expresión:^(10, 11)

$$R = v_T/v_L \quad (12)$$

Esta relación ha indicado un efecto de reducción en la velocidad de ambas ondas, la longitudinal y la transversal. Estos relativos cambios de velocidades son causados por los cambios en las propiedades mecánicas producidas por los daños ocasionados por este fenómeno, como por ejemplo: microgrietas, ampollamientos, etc. Estudios realizados^(10, 11) han revelado que en el acero el valor de este cociente de velocidades v_T/v_L obtiene un de 0,54 para muestras sin presencia de daño y valores de 0,55 o mayores para muestras atacadas por daño o ataque por hidrógeno. Normalmente se obtienen un valor de 0,54.^(10, 11)

El presente trabajo de investigación, tiene como finalidad implementar una metodología para calcular el coeficiente de velocidades en un acero *API 5L X52* de fabricación nacional. Esta metodología consiste, en que mediante la técnica de ultrasonido y con un software determinado, realizar un programa computacional para obtener los valores de velocidad de propagación de las ondas y sus respectivos cocientes de velocidades en dicho material, y así, relacionarlos con un estudio previo realizado por *S. Camero*,⁽⁸⁾ a las muestras en estudio.

Para la elaboración de dicho programa, se utilizó como herramienta fundamental el procesamiento de señales, esto debido a que a las señales obtenidas se le aplicó un tratamiento previo, colocando un filtro determinado para poder corregir la señal y atenuar el ruido existente en la misma.

CAPÍTULO I.- FUNDAMENTO TEÓRICO

PROCESAMIENTOS

DE SEÑALES

1.4. PROCESAMIENTO DE SEÑALES

El procesamiento digital de señales es un área de la ciencia y la ingeniería que se ha desarrollado en los últimos años.⁽³⁷⁾ Esta es el resultado de los avances tecnológicos tanto de ordenadores digitales como en la fabricación de circuitos integrados.⁽³⁷⁾ Los potentes circuitos digitales y relativamente rápido han hecho posible construir sistemas digitales altamente sofisticados, capaces de realizar funciones y tareas de procesamiento de señal digital que normalmente eran demasiado difíciles mediante la aplicación de computadoras analógicas.^(37, 38)

1.4.1. DEFINICIÓN

El *Procesamiento Digital de Señales (DSP)* es una técnica que convierte señales de fuentes reales (usualmente en forma analógica), en datos digitales que luego pueden ser analizados.^(X) Este análisis es realizado en forma digital pues una vez que una señal ha sido reducida a valores numéricos discretos, sus componentes pueden ser aislados, analizados y reordenados más fácilmente que en su primitiva forma analógica. La intención de digitalizar una señal tiene sus razones, estas son.^(X)

- Facilidad en procesar una señal digital.
- Las señales son convertidas a formato discreto (digital) para facilitar su transmisión o almacenamiento.
- Es posible realizar mediante procesamiento digital acciones imposibles de obtener mediante el procesamiento analógico (por ejemplo, filtros con respuesta de frecuencia arbitraria).
- El procesamiento se hace en forma digital porque éste es usualmente más simple de realizar y más barato de implementar que en el procesamiento analógico. Además las señales digitales requieren usualmente menos ancho de

banda y pueden ser comprimidas. Sin embargo, hay una pérdida inherente de información al convertir la información continua en discreta.

1.4.2. CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DE PROCESADOR DIGITAL DE SEÑALES (DSP)

Un **DSP** es un sistema basado en un procesador o microprocesador que posee un juego de instrucciones, un hardware y un software optimizados para aplicaciones que requieran operaciones numéricas a muy alta velocidad.^(X, internet) Debido a esto es especialmente útil para el procesamiento y representación de señales analógicas en tiempo real: en un sistema que trabaje de esta forma (tiempo real) se reciben muestras de la señal, normalmente provenientes de un convertidor analógico/digital (ADC), el sistema debe hacer todas las operaciones con la muestra recibida antes de que llegue el siguiente.^(X, Internet) Como se ha dicho que se puede trabajar con señales analógicas, pero es un sistema digital, se necesitará unos convertidores analógicos/digitales a sus entradas y salidas.^(X, Internet) Como todo sistema basado en procesador programable, se necesitará una memoria donde almacenar los datos con los que trabajará y el programa que ejecutará.^(X, Internet)

Si se combina que un **DSP** puede trabajar con varios datos en paralelo y un diseño e instrucciones específicas para el procesamiento digital, se puede dar una idea de su enorme potencia para este tipo de aplicaciones. Estas características constituyen la principal diferencia de un **DSP** y otros tipos de procesadores.^(X, Internet)

En la Figura 19, se propone un posible sistema basado en un **DSP**, mostrando los diversos tipos de conversores de señales (Análogo-Digital (A/D) y Digital-Análogo (D/A)), así como los filtros y el Procesador Digital de Señales (DSP).

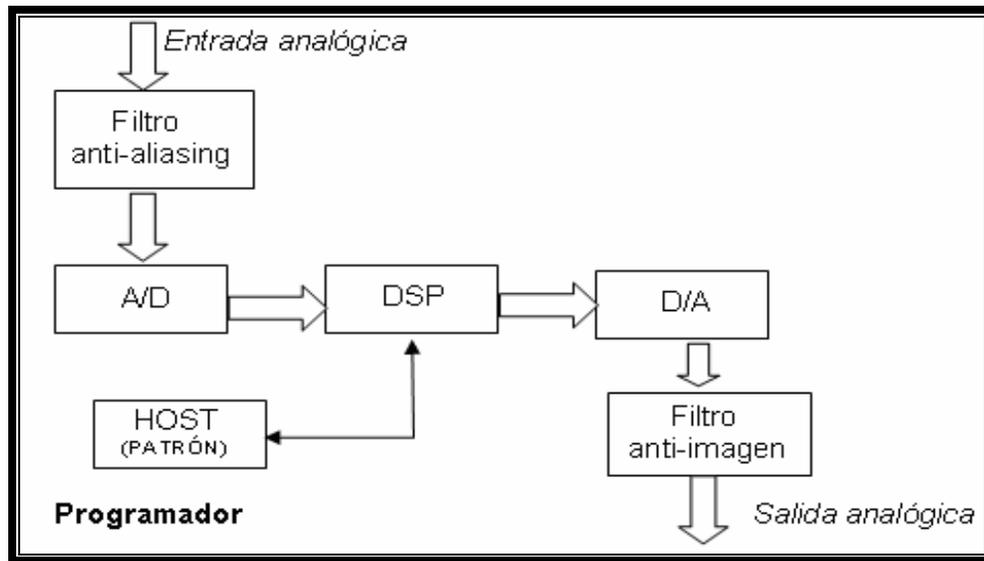


Fig.19: Sistema basado en un Procesador Digital de Señales (DSP).⁽³⁷⁾

Por otro lado, los microcontroladores se utilizan sobre todo en aplicaciones donde existen acontecimientos externos los que requieren de la detección y el control. El ambiente externo es detectado por cualquiera de los dispositivos periféricos; puertos digitales I/O, pines dedicados de interrupción, o las entradas análogas (de analógico a digital). La fuente de las señales a estos pines viene de los interruptores, sensores análogos y/o digitales, y de las señales de estado de otros sistemas. Cada entrada representa un parte de información sobre el estado de un cierto acontecimiento exterior. Las salidas se envían a actuadores, relays, motores o a otros dispositivos que controlen acontecimientos. Entre la detección y actuación está el microcontrolador, analizando las entradas y el estado actual del sistema, determinando cuándo y qué activar y/o desactivar. El software es el que hace todo esto, toma las decisiones, generalmente trabaja de una manera condicional; es decir, realiza saltos sólo bajo ciertas condiciones y realiza manipulaciones a nivel de “bits”. Las interrupciones son consideradas como condiciones externas que alteran el flujo principal del programa.^(37,38)

1.4.3. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS DSP

Existen diversas ventajas para trabajar con los *DSP*, estas son:^(37, 38)

- Posee la posibilidad de diseñar sistemas con la capacidad para ejecutar procesamiento en tiempo real de muchas de las señales de interés para aplicaciones en comunicaciones, control, procesamiento de imagen, multimedia, etc.
- Los sistemas digitales son más confiables que los correspondientes sistemas análogos.
- Los sistemas digitales ofrecen una mayor flexibilidad ante las aplicaciones que los correspondientes sistemas análogos.
- Mayor precisión y mayor exactitud pueden ser obtenidas con sistemas digitales, comparado con los correspondientes sistemas análogos.
- Un sistema programable permite flexibilidad en la reconfiguración de aplicaciones *DSP*.
- La tolerancia de los componentes en un sistema análogo hacen que esto sea una dificultad para el diseñador al controlar la exactitud de la señal de salida análoga. Por otro lado, la exactitud de la señal de salida para un sistema digital es predecible y controlable por el tipo de aritmética usada y el número de bits usado en los cálculos.
- Las señales digitales pueden ser almacenadas en un disco flexible, Disco Duro o CD-ROM, sin la pérdida de fidelidad más allá que el introducido por el conversor Análogo Digital (*ADC*). Éste no es el caso para las señales análogas.

A pesar de ellas existen algunos inconvenientes que deberán ser tomados en cuenta al momento de escoger una plataforma para el procesamiento de señales analógicas por medios digitales, estas son:^(37, 38)

- La conversión de una señal analógica en digital, obtenida monitoreando y cuantificando la señal, produce una distorsión que impide la exacta reconstrucción de la señal analógica original a partir de señales cuantificadas.
- Existen efectos debidos a la precisión finita que deben ser considerados en el procesado digital de los valores de las señales cuantificadas.
- Para muchas señales de gran ancho de banda, se requiere procesado en tiempo real. Para tales señales, el procesado analógico, o incluso óptico, son las únicas soluciones válidas. Sin embargo, cuando los circuitos digitales existen y son de suficiente velocidad se hacen preferibles.

1.4.4. SEÑALES Y SISTEMAS

1.4.4.1. Señal

Es definida como cualquier cantidad física que varía en el tiempo, el espacio o cualquier otra variable o variables independientes y que lleva información, generalmente acerca del estado o comportamiento de un sistema, como por ejemplo: radar, música, voz, sonar, etc.^(37, 38)

1.4.4.2. Sistema

Un sistema se puede definir como un dispositivo físico que realiza una operación sobre una señal.^(37, 38)

1.4.4.3. Sistema Digital

Un *sistema digital* se puede definir como cualquier dispositivo destinado a la generación, transmisión, procesamiento o almacenamiento de señales digitales.^(37, 38)

1.4.4.4. Sistema Analógico

Un *sistema analógico* es aquel que tiene la capacidad de generar, transmitir, procesar o almacenar señales analógicas.^(37, 38)

1.4.5. FILTROS

1.4.5.1. Definición

Un *filtro* es un sistema que, dependiendo de algunos parámetros, realiza un proceso de discriminación de una señal de entrada obteniendo variaciones en su salida. Los filtros digitales tienen como entrada una señal analógica o digital y a su salida tienen otra señal analógica o digital, pudiendo haber cambiado en amplitud, frecuencia o fase dependiendo de las características del filtro.^(37, 38)

El filtrado digital es parte del procesamiento de señal digital. Se le da la denominación de digital más por su funcionamiento interno que por su dependencia del tipo de señal a filtrar, así podríamos llamar filtro digital tanto a un filtro que realiza el procesamiento de señales digitales como a otro que lo haga de señales analógicas.^(37, 38)

El filtrado digital consiste en la realización interna de un procesamiento de datos de entrada.^(37, 38) El valor de la señal de la entrada actual y algunos valores ó medidas anteriores (que previamente habían sido almacenadas) son multiplicados por unos coeficientes definidos. También podría tomar valores de la salida en instantes pasados y multiplicarlos por otros coeficientes. Finalmente todos los resultados de todas estas multiplicaciones son sumados, dando una salida para el instante actual. Esto implica que internamente tanto la salida como la entrada del filtro serán digitales, por lo que puede ser necesaria una conversión analógico-digital o digital-analógica para uso de filtros digitales en señales analógicas.^(37, 38)

1.4.5.2. Tipos de Filtros

Atendiendo a sus componentes constitutivos, naturaleza de las señales que tratan, respuesta en frecuencia y método de diseño, los filtros se clasifican en los distintos grupos que a continuación se indica.^(37, 38)

- *Según respuesta frecuencia:*
 - Filtro paso bajo: Es aquel que permite el paso de frecuencias bajas, desde frecuencia 0 o continua hasta una determinada. Presentan ceros a alta frecuencia y polos a bajas frecuencia.
 - Filtro paso alto: Es el que permite el paso de frecuencias desde una frecuencia de corte determinada hacia arriba, sin que exista un límite superior especificado. Presentan ceros a bajas frecuencias y polos a altas frecuencias.
 - Filtro paso banda: Son aquellos que permiten el paso de componentes frecuenciales contenidos en un determinado rango de frecuencias, comprendido entre una frecuencia de corte superior y otra inferior.
 - Filtro elimina banda: Es el que dificulta el paso de componentes frecuenciales contenidos en un determinado rango de frecuencias, comprendido entre una frecuencia de corte superior y otra inferior.
 - Filtro multibanda: Es que presenta varios rangos de frecuencias en los cuales hay un comportamiento diferente.
 - Filtro variable: Es aquel que puede cambiar sus márgenes de frecuencia.

- *Filtros activos y pasivos:*
 - Filtro pasivo: Es el constituido únicamente por componentes pasivos como condensadores, bobinas y resistencias.
 - Filtro activo: Es aquel que puede presentar ganancia en toda o parte de la señal de salida respecto a la de entrada. En su implementación se combinan elementos activos y pasivos. Siendo frecuente el uso de amplificadores operacionales, que permite obtener resonancia y un elevado *factor Q* sin el empleo de bobinas. El factor *Q*, también denominado factor de calidad o factor de mérito, es un parámetro usado en electrónica para comparar la calidad de un sistema resonante.

- *Filtros analógicos o digitales:*

Atendiendo a la naturaleza de las señales tratadas los filtros pueden ser:^(37, 38)

- Filtro analógico: Diseñado para el tratamiento de señales analógicas.
 - Filtro digital: Diseñado para el tratamiento de señales digitales. Entre ellos, cabe citar el Filtro Adaptado cuya función principal es maximizar la relación señal a ruido en el receptor.
- *Otros filtros:*
 - Filtro piezoeléctrico: Es aquel que aprovecha las propiedades resonantes de determinados materiales como el cuarzo.
 - Otro tipo de filtro puede ser la ferrita que hay en muchos cables, por ejemplo en el de las pantallas de ordenador, que tiene la propiedad de presentar distinta impedancia a alta y baja frecuencia.

1.4.6. TRANSFORMADAS

Uno de los beneficios principales del DSP es que las transformaciones de señales son más sencillas de realizar. Una de las más importantes transformadas es la Transformada de Fourier discreta (TFD).^(37, 38) Esta transformada convierte la señal del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia. La TFD permite un análisis más sencillo y eficaz sobre la frecuencia, sobre todo en aplicaciones de eliminación de ruido y en otros tipos de filtrado.^(37, 38)

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*.⁽³⁷⁾

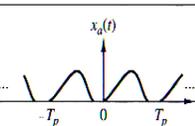
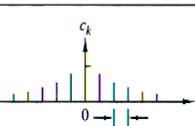
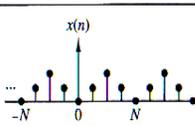
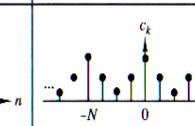
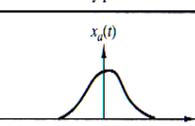
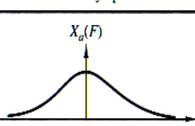
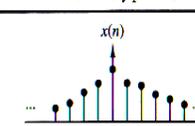
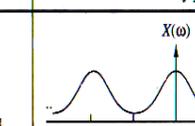
		Señales en tiempo continuo		Señales en tiempo discreto	
		Dominio del tiempo	Dominio de la frecuencia	Dominio del tiempo	Dominio de la frecuencia
Señales periódicas	Series de Fourier	 $c_k = \frac{1}{T_p} \int_{T_p} x_a(t) e^{-j2\pi k F t} dt$ $F_0 = \frac{1}{T_p}$ $x_a(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty}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

Tabla 3: Resumen de las fórmulas de análisis y síntesis.⁽³⁷⁾

Otra de las transformadas importantes es la Transformada de Coseno Discreta la cual es similar a la anterior en cuanto a los cálculos requeridos para obtenerla, pero esta convierte a la señales en componentes del coseno trigonométrico.^(37, 38)

1.4.7. CORRELACIÓN DE SEÑALES

Las correlaciones de señales juegan un papel muy importante en el procesado de señales, especialmente en aplicaciones en aplicaciones que están relacionadas con las distintas áreas de la ingeniería y la ciencia como radar, sonar, comunicaciones digitales, geología, etc.⁽³⁷⁾

La correlación de señales en una operación matemática entre dos secuencias, con el objetivo de medir el parecido que existe entre dos señales y así extraer información que dependerá de la aplicación concreta considerada.⁽³⁷⁾ Esta operación matemática entre dos secuencias definida anteriormente, producen otra secuencia denominada *correlación cruzada* cuando las dos señales son diferentes, y *autocorrelación* cuando las dos señales son iguales.⁽³⁷⁾

*CAPÍTULO II.- PROCEDIMIENTO
EXPERIMENTAL*

PROCEDIMIENTO
EXPERIMENTAL

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

2.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Debido a la problemática que tienen la industria petrolera y petroquímica en Venezuela con este fenómeno, se necesita desarrollar una metodología no destructiva que permita determinar si el componente bajo servicio, presenta Daño por Hidrógeno. 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 $\approx 16,83$ cm, diámetro interno $\approx 15,41$ cm, espesor $\approx 7,10$ mm, y con una longitud $\approx 1,20$ m, a partir de las cuales se lograron obtener probetas rectangulares con superficies planas de dimensiones promedio de: 4,5 cm de largo, 2 cm de ancho y 4,7 mm de espesor, para ser expuesta a un medio hidrogenado.⁽⁸⁾ Las muestras rectangulares fueron sometidas a un tratamiento térmico que consistió en calentar las muestras a la temperatura de austenización de 910 °C durante 30 minutos para luego enfriarlas en el horno y de esta manera obtener un tratamiento térmico de recocido respectivamente.⁽⁸⁾ 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 cocientes de velocidades ultrasónicas (velocidad de ondas longitudinales y la velocidad de ondas transversales) para cada una 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 cuantificar el daño por hidrógeno presente en las muestras evaluadas y compararlo con la evaluación del daño con otras técnicas utilizadas como microscopía óptica y microscopía electrónica.

2.2. DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL DE ENTREGA (ME) Y TRATADO TÉRMICAMENTE (MAH)

El material ensayado obtenido proviene 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.⁽⁸⁾ La tubería con costura o soldada tiene un diámetro externo $\approx 16,83$ cm, diámetro interno $\approx 15,41$ cm, espesor $\approx 7,10$ mm, y con una longitud $\approx 1,20$ m, a partir de las cuales se lograron obtener probetas rectangulares con superficies planas de dimensiones promedios de 4,5 cm de largo y 2 cm de ancho y espesor de 4,7 mm, para ser expuesta a un medio hidrogenado. Parte de las muestras rectangulares fueron sometidas a un tratamiento térmico que consistió en calentar las muestras a la temperatura de austenización de 910 °C durante 30 minutos (más 10 minutos de absorción) para luego enfriarlas en el horno, obteniendo de esta manera un tratamiento térmico de recocido respectivamente.⁽⁸⁾

2.2.1. Proceso de Fabricación

La figura 20-a representa un diagrama del proceso de fabricación de la tubería a partir de la cual se obtuvieron las muestras utilizadas en este estudio, donde se indica cada una de las etapas involucradas en el proceso.⁽⁸⁾ En la figura 20-b se presenta un detalle del proceso de soldadura por resistencia eléctrica (ERW-electric resistance welding), 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.⁽⁸⁾

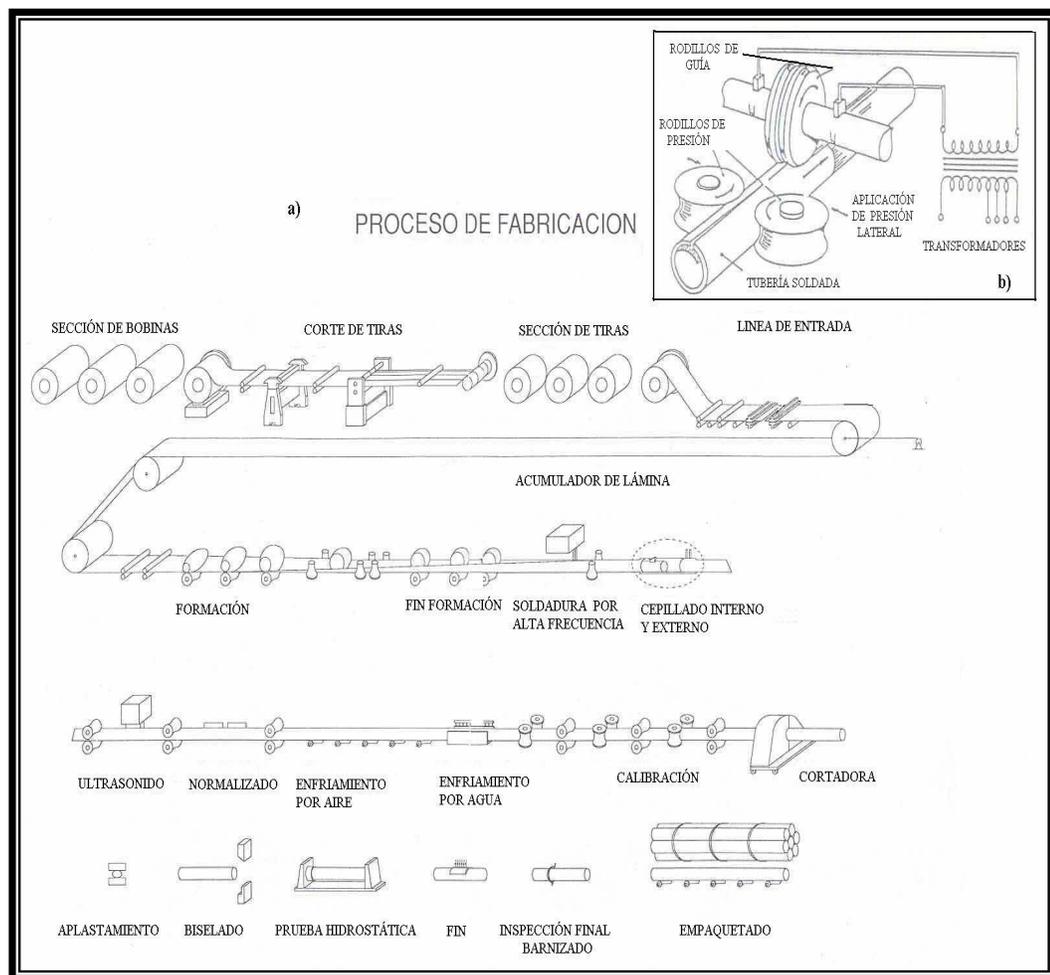


Fig. 20: Proceso de fabricación de la tubería de acero API 5L X52.⁽⁸⁾

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

2.2.2. Tratamiento Térmico del Material

Las muestras rectangulares (4,5 cm largo, 2 cm ancho y 5 mm de espesor) provenientes de la sección longitudinal de la tubería, fueron sometidas a un tratamiento térmico por S. Camero⁽⁸⁾ para su investigación, en un horno eléctrico horizontal, marca “thermolyne” con un sistema para controlar la atmósfera de gas acoplado en cada uno de sus extremos, como se muestra en la figura 21. El tratamiento térmico consistió en calentar las muestras a la temperatura de austenización de 910 °C durante 30 minutos (más 10 minutos de absorción) para luego enfriarlas en el horno obteniendo de esta manera un tratamiento térmico de recocido respectivamente. La austenización y el enfriamiento en el horno se realizaron con una atmósfera controlada de Argón de manera de evitar la oxidación de las muestras, siendo la velocidad de enfriamiento en el horno de aproximadamente 10 °C/min y 4 °C/min, en un intervalo de temperatura de 900 °C a 500 °C y 500 a 25 °C, respectivamente.

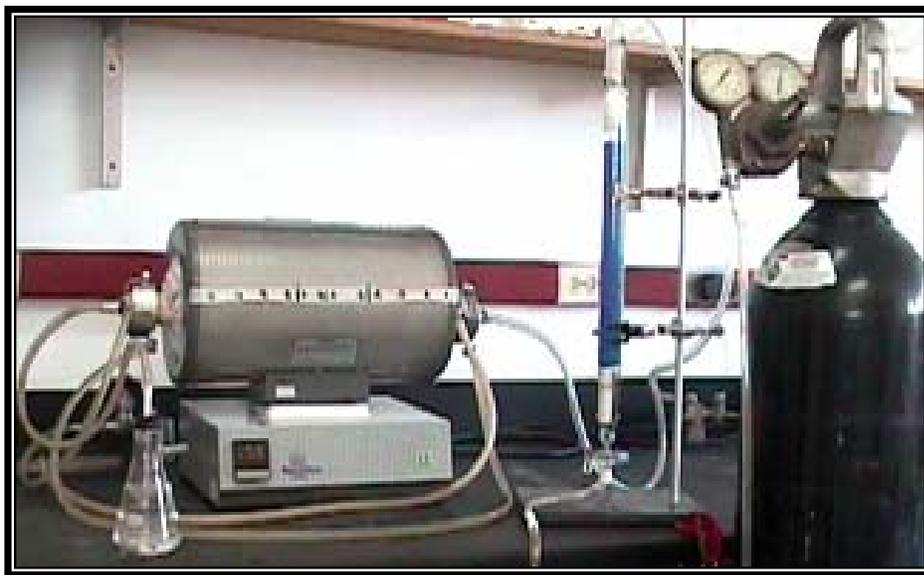


Fig. 21: Horno eléctrico con sistema de atmósfera controlada utilizado para el tratamientos térmicos del acero API 5L X52.⁽⁸⁾

2.2.3. *Antecedentes de las muestras de acero API 5L X52 en Condición de Entrega y Tratado Térmicamente*

Estudios realizado por S. Camero⁽⁸⁾ revela la caracterización del daño en el acero en condición de entrega y tratado térmicamente, evidenciando que a partir del análisis de que a 1 hora de carga todas las muestras presentaron daño en la superficie, acentuándose a mayores de tiempo de exposición al medio hidrogenado. El daño caracterizado consistió de ampollas de diferentes tamaños incrementando su densidad con el tiempo de carga, siendo más significativo en el acero en condición de entrega y recocido, he indicando que generalmente el daño se encuentra a un nivel sub-superficial.

S. Camero⁽⁸⁾ también expone que las intercaras matriz/inclusión resultaron ser los sitios preferenciales para la acumulación de hidrógeno molecular y posterior formación de ampollas, mientras que los bordes de grano y las intercaras de la martensita constituyen los sitios de nucleación de las grietas intergranulares para las muestras de recocido.

A continuación, se describirán los métodos y equipos utilizados para la elaboración de este trabajo. En la misma se describirá el arreglo experimental utilizado, así como las variables obtenidas directa e indirectamente y las variables utilizadas provenientes de otras fuentes.

2.3. **DESCRIPCIÓN DE EQUIPOS**

El arreglo utilizado esta conformado por los siguientes equipos:

1. Equipo de Ultrasonido marca *KRAUTKRAMER BRANSON*, modelo *USN 50*.

2. Osciloscopio Digital marca *TEKTRONIX*, modelo *TS210*, con una apreciación de $\pm 0,01$ %.
3. Computador.
4. Palpadores de incidencia normal de Ondas Longitudinales y de Ondas Transversales de diferentes frecuencias (frecuencias de 2.25 y 5 MHz.).
5. Probetas previamente Caracterizadas.⁽⁸⁾
6. Bloque de Referencia I.I.W. V-1.
7. Tornillo Micrométrico marca *NSK*, con un rango de 0 a 25 mm. y con una apreciación de $\pm 0,01$ mm.
8. Vernier marca *SOMET* con un rango de 0 a 150 mm. y con una apreciación de $\pm 0,05$ mm.

En la Figura 22, se muestra el arreglo empleado para la adquisición de las señales ultrasónicas a fin de obtener los espectros de frecuencia. Se utilizó palpadores o transductores de ondas longitudinales y de ondas transversales del tipo emisor-receptor (Figura 23-a), el cual se acopló al equipo de ultrasonido *KRAUTKRAMER BRANSON*, modelo *USN 50*, éste se conectó en paralelo a un osciloscopio digital *TEKTRONIX* modelo *TSD 210*. El osciloscopio se conectó al computador a través de un puerto serial, este último utiliza el programa *WaveStar 2.8.1*, de *TEKTRONIX Inc.*, para la adquisición de los datos de la señal.

Una vez obtenida la data correspondiente se realizó el procesamiento matemático utilizando el “software” de aplicaciones matemáticas, *MATLAB*[®] 7, (ver Anexo N° 1), el cual permite bajo una programación obtener los espectros de frecuencia de cada una de las señales.

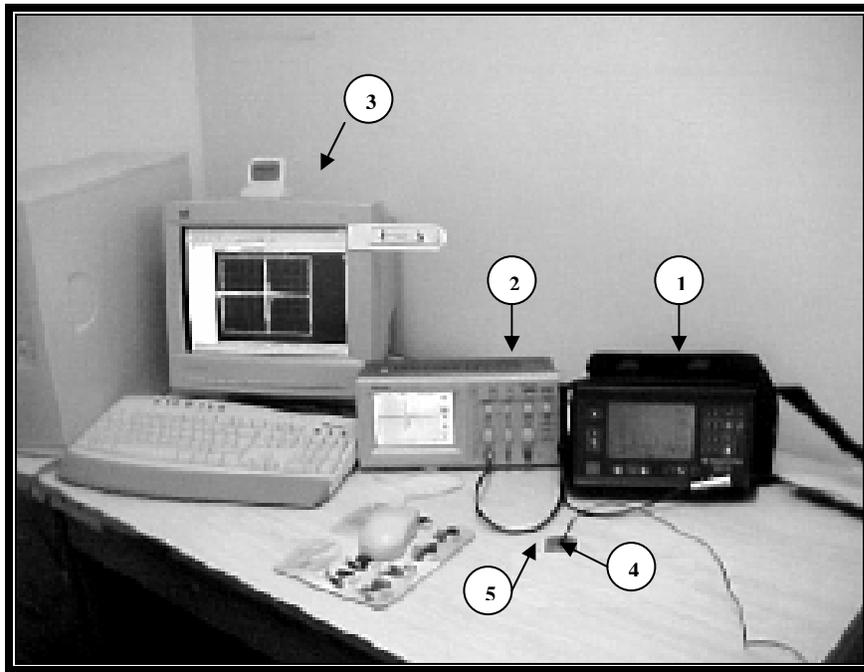


Fig.22: Arreglo Experimental



Fig. 23: a) Palpadores Longitudinales y Transversales
 b) Bloque de Referencia I.I.W. V-1.
 c) Probetas previamente caracterizadas
 d) Tornillo Micrométrico NKS
 e) Calibrador SOMET

2.4. METODOLOGÍA EMPLEADA

Armado el sistema o arreglo experimental, se procedió a seguir el siguiente procedimiento:

1. Calibrar el equipo de ultrasonido bajo las normas ASME (American Society for Mechanical Engineer) y utilizando el bloque de referencia I.I.W. V-1 (Figura 23-b), el cual es un bloque de calibración por excelencia utilizado para el ajuste en distancia y sensibilidad de palpadores según el código de Soldadura Estructural para Aceros de la A.W.S. (American Welding Society).
2. Luego de verificar la calibración del sistema Ultrasónico, se procedió a clasificar según su tipo de tratamiento, ya sea en condición de entrega o tratada térmicamente, y por su tiempo de exposición al medio hidrogenado de un grupo de probetas previamente caracterizadas (Figura 23-c), proveniente de una tubería de acero API 5L X52. A continuación se describe la nomenclatura realizada y en las tablas 5 y 6 se describe la clasificación final con las dimensiones respectivas de cada una de las muestras existentes:

- $ME_i h_j$
- $MAH_i h_j$

Donde: **i** es el tiempo de exposición en horas (**h**) al medio hidrogenado, **j** indica a cual probeta fue aplicada el estudio en dicho grupo, y las iniciales ME representa al material de entrega y MAH al material con tratamiento térmico.

3. Al tener clasificadas las probetas, se realizaron 15 mediciones de espesores a cada una de ellas, utilizando para ello un tornillo micrométrico (Figura 23-d), siendo esta una variable que se mide de forma directa y así obtener de forma indirecta un valor promedio del espesor de la probeta a la cual se le esta

realizando dichas mediciones. Los valores de estas medidas se encuentran representadas en las tablas 4 y 5. Las unidades de estas medidas se encuentran representadas en milímetros (mm).

4. Obtenidos los valores promedios de cada una de las probetas existentes, se capturaron las señales por medio del computador y el programa WaveStar 2.8.1 descrito anteriormente, estas se almacenaron en una base de datos añadiéndoles al final de la nomenclatura ya existente los símbolos $kL225$, $kT225$, $kL5$ y $kT5$, que describen la posición de la captura y el tipo de palpador utilizado con su respectiva frecuencia. Donde k representa dicha posición variado de 1 al 6, L representa al palpador longitudinal y T representa al palpado transversal.

Ejemplo:

- ME0h**4****1****L225**: Material de Entrega no expuesta al medio hidrogenado, probeta **4**, captura N° **1** de la señal con palpador longitudinal de frecuencia **2.25** MHz.
- ME6h**2****6****T5**: Material de Entrega expuesta seis (6) horas al medio hidrogenado, probeta **2**, captura N° **6** de la señal con palpador transversal de frecuencia **5** MHz.
- MAH1h**1****3****L5**: Material tratada térmicamente expuesta una (1) hora al medio hidrogenado, probeta **1**, captura N° **3** de la señal con palpador longitudinal de frecuencia **5** MHz.
- MAH3h**1****2****T225**: Material tratada térmicamente expuesta tres horas (3) al medio hidrogenado, probeta **1**, captura N° **2** de la señal con palpador transversal de frecuencia **2.25** MHz.

Tabla N° 4: Clasificación de las probetas (Material de Entrega), descripción y dimensiones.

Clasificación	Descripción	Dimensiones (mm)		
		Largo	Ancho	Espesor
ME0h1	Material de Entrega NO expuesta al medio hidrogenado, probeta 1 . Condición Superficial: Pulida y Cóncava.	40,10 ± 0,05	19,90 ± 0,05	4,45 ± 0,01
ME0h2	Material de Entrega NO expuesta al medio hidrogenado, probeta 2 . Condición Superficial: Pulida y Cóncava.	40,10 ± 0,05	19,70 ± 0,05	4,28 ± 0,01
ME0h3	Material de Entrega NO expuesta al medio hidrogenado, probeta 3 . Condición Superficial: NO Pulida y Plana.	40,30 ± 0,05	19,80 ± 0,05	4,90 ± 0,01
ME0h4	Material de Entrega NO expuesta al medio hidrogenado, probeta 4 . Condición Superficial: Pulida y Plana.	40,30 ± 0,05	19,75 ± 0,05	4,89 ± 0,01
ME1h1	Material de Entrega expuesta una (1) hora al medio hidrogenado, probeta 1 . Condición Superficial: Pulida y Cóncava.	39,50 ± 0,05	19,90 ± 0,05	4,72 ± 0,01
ME1h2	Material de Entrega expuesta una (1) hora al medio hidrogenado, probeta 2 . Condición Superficial: Pulida y Cóncava.	38,10 ± 0,05	19,40 ± 0,05	4,87 ± 0,01
ME3h1	Material de Entrega expuesta tres (3) hora al medio hidrogenado, probeta 1 . Condición Superficial: Pulida y Plana.	38,90 ± 0,05	19,80 ± 0,05	4,94 ± 0,01
ME3h2	Material de Entrega expuesta tres (3) hora al medio hidrogenado, probeta 2 . Condición Superficial: Pulida y Cóncava.	39,40 ± 0,05	19,70 ± 0,05	4,71 ± 0,01
ME6h1	Material de Entrega expuesta seis (6) hora al medio hidrogenado, probeta 1 . Condición Superficial: Pulida y Cóncava.	38,70 ± 0,05	19,90 ± 0,05	4,90 ± 0,01

Tabla N° 5: Clasificación de las probetas (Material Tratada Térmicamente), descripción y dimensiones.

Clasificación	Descripción	Dimensiones (mm)		
		Largo	Ancho	Espesor
MAH0h1	Material tratada térmicamente NO expuesta al medio hidrogenado, probeta 1 . Condición Superficial: Pulida y Cóncava.	40,10 ± 0,05	19,75 ± 0,05	4,73 ± 0,01
MAH0h2	Material tratada térmicamente NO expuesta al medio hidrogenado, probeta 2 . Condición Superficial: Pulida y Plana.	40,10 ± 0,05	19,75 ± 0,05	4,54 ± 0,01
MAH1h1	Material tratada térmicamente expuesta una (1) al medio hidrogenado, probeta 1 . Condición Superficial: Pulida y Cóncava.	38,90 ± 0,05	19,70 ± 0,05	4,51 ± 0,01
MAH3h1	Material tratada térmicamente expuesta tres (3) al medio hidrogenado, probeta 1 . Condición Superficial: Pulida y Cóncava.	39,85 ± 0,05	19,30 ± 0,05	4,83 ± 0,01
MAH6h1	Material tratada térmicamente expuesta tres (3) al medio hidrogenado, probeta 1 . Condición Superficial: Pulida y Cóncava.	39,50 ± 0,05	19,75 ± 0,05	4,60 ± 0,01

- Luego de obtener la data correspondiente, se procedió por medio del software MATLAB[®] 7, a elaborar un programa computacional para el cálculo de las velocidades de propagación y la relación de velocidades (**R**) (ver Anexo N° 1). obteniéndose estas variables de forma indirecta, y calculando también de la misma forma los valores promedio de dichas variables. El programa consiste en recopilar la data almacenada para luego graficar las mismas y aplicarle un filtro del tipo pasa-alto, la cual tiene como finalidad atenuar el ruido de las señales obtenidas. Luego, al tener la señal filtrada se procede a tomar los

valores máximos o mínimos (dependiendo del caso) de los ecos de fondo reflejados en las gráficas, para proceder a calcular el tiempo de vuelo de la señal, mediante la diferencia de las posiciones de los valores seleccionados en los ecos de fondo que se tomaron, multiplicado por la diferencia del tiempo de muestreo de la señal y dividido entre dos ($t_v = (\Delta D * \Delta T) / 2$). Esta variable obtenida de forma indirecta representa dicho tiempo de vuelo (t_v) y su unidad se expresa en segundos (s). Este paso se repite para cada una de las señales capturada y para los diversos palpadores utilizados, para luego calcular su respectivo valor promedio. Para obtener los valores de las velocidades de las ondas respectivas, se toma el cociente del valor promedio del espesor de la probeta de estudio entre el valor promedio del tiempo de vuelo de dicha probeta y para un palpador definido ($V = \text{espesor} / t_v$). Este valor obtenido de la forma indirecta se conoce como la velocidad de propagación promedio de la onda, ya sea del tipo longitudinal o transversal (según el palpador utilizado), se expresa en metros sobre segundos (m/s). El procedimiento se aplica para cada una de las señales y para cada tipo de palpador.

6. Teniéndose los valores promedios de las velocidades de propagación para cada tipo de onda y para cada muestra caracterizada, se realizó un cálculo del error porcentual para verificar la precisión de este programa. Este cálculo de error consistió en la comparación de los valores promedios de las velocidades de propagación obtenida de forma indirecta en el Bloque de Referencia I.I.W. V-1, con los valores nominales de las velocidades de propagación de las ondas en un acero estructural tomadas en tablas. Estos valores nominales recopilada por tablas de las velocidades de propagación de un acero estructural son las siguientes:

- $V_T = 3250 \text{ m/s}$
- $V_L = 5940 \text{ m/s}$

7. Teniendo el error porcentual del programa elaborado, se procedió a calcular otra variable indirecta, conocida como la relación de velocidades. Esta variable se produce mediante el cociente de la velocidad de la onda transversal entre la velocidad de la onda longitudinal ($R=V_T/V_L$), siendo este un valor adimensional. Se aplicó el mismo procedimiento para cada una de las muestras caracterizadas y clasificadas, y así luego obtener el valor promedio de dicha variable.
8. Finalmente y por medio del software utilizado y el programa realizado se procedió a graficar los valores de relación de velocidades obtenidos en cada probeta en función al tiempo de exposición al medio hidrogenado (R vs. t). Estos resultados se compararon con el estudio previamente realizado de caracterización en cada muestra, sea en condición de entrega o tratada térmicamente y a diferentes tiempos de exposición.

2.5. TRATAMIENTOS PREVIO A LAS SEÑALES

2.5.1. Filtros

En la elaboración del programa de cálculo de velocidades de propagación de ondas ultrasónicas y relación de velocidades (R), fue necesario aplicar un filtro del tipo Butter pasa alto con la finalidad de atenuar el ruido presente en la señal, ya sea, debido al ruido electrónico presente en el equipo de medición, o por alguna interferencia presente en la señal. El filtro pasa alto aplicado en el programa elaborado se expresó de la siguiente manera:

$$\text{Butter}(N, \omega_n, \text{'high'})$$

En donde este diseña un filtro paso alto Butterworth de orden N y frecuencia de corte de 3 dB en ω_n .

CAPÍTULO III.- ANÁLISIS DE RESULTADOS

ANÁLISIS DE
RESULTADOS

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

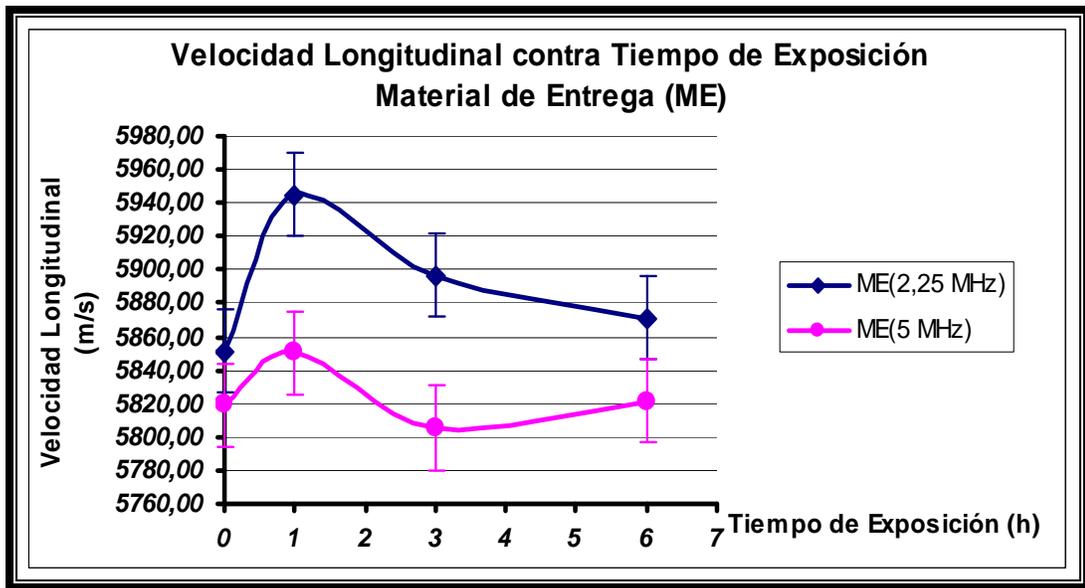
3.1. RESULTADOS DE VELOCIDADES DE ONDAS LONGITUDINALES Y ONDAS TRANSVERSALES

Se determinaron las velocidades tanto longitudinales como transversales en las muestras de acero API 5L X52 en condición de entrega (ME) y tratado térmicamente (MAH) mediante el programa elaborado (ver Anexo 1). Los resultados obtenidos se encuentran representados en el Anexo 2, en las Tablas de Resultados de las velocidades Longitudinales, Transversales y Relación de Velocidades (R) para diferentes frecuencias de Palpador.

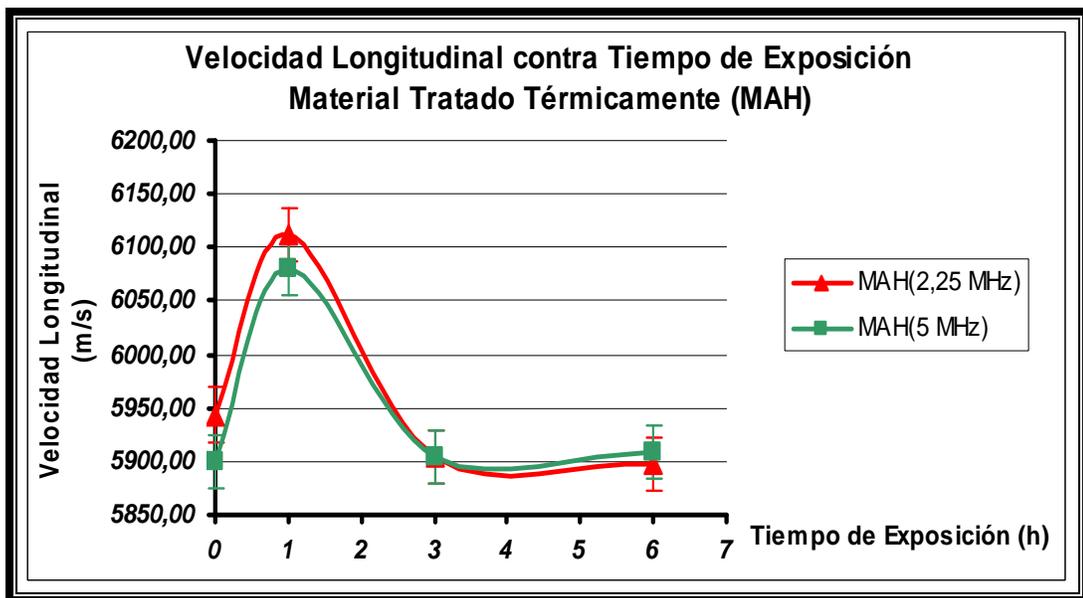
Estos valores representan el promedio de seis (6) medidas realizadas a cada una de las muestras existentes.

En las Figuras 24 y 25 se presentan las curvas obtenidas para la velocidad longitudinal y velocidad transversal para diferente tiempo de exposición al medio hidrogenado, diferentes materiales y diferentes frecuencias del palpador (2,25 y 5MHz).

Se puede observar que las curvas de las velocidades longitudinales correspondiente a las muestras de acero API 5L X52 en condición de entrega (ME) y tratada térmicamente (MAH) (figuras 24-a y 24-b), que para las muestras que no fueron expuestas al medio hidrogenado poseen un valor de velocidad longitudinal de 5851,01 m/s para el palpador de 2,25 MHz y en condición de entrega, alcanzando un máximo en una hora de exposición para luego presentar una disminución de la velocidad hasta llegar a 3 horas de exposición, para finalmente observar un posible periodo de estabilización de la velocidad con una tendencia definida. Cabe destacar que ocurre el mismo fenómeno para el palpador de frecuencia de 5 MHz, pero con la



(a)



(b)

Fig. 24: Curva de Velocidad Longitudinal a diferentes frecuencias de palpador contra el tiempo de exposición al medio hidrogenado:

- a) Material en Condición de Entrega (ME)
- b) Material Tratada Térmicamente (MAH)

diferencia de que la respuesta de este último palpador, presenta valores más sensibles que el palpador de 2,25 MHz, esto debido a que posee un valor de frecuencia mayor.

Cabe destacar también, que el mismo fenómeno ocurre con las muestras de acero que fueron sometidas al tratamiento térmico, a diferencia de que se obtuvieron valores de velocidades mayores que las muestras en condición de entrega.

Este fenómeno que ocurre en común para ambas frecuencias de palpador, y para las diferentes muestras presentes, se debe a que las velocidades longitudinales son funciones de varios parámetros establecidos, como lo son el modulo de Young, el coeficiente de Poisson y la densidad del material. Esta relación de velocidad se establece de la siguiente manera:

$$V_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1-\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad (13)$$

Donde:

- V_L : Velocidad acústica de las ondas longitudinales.
- E: Módulo de elasticidad o modulo de Young (E).
- μ : Coeficiente de Poisson.
- ρ : Densidad del material.

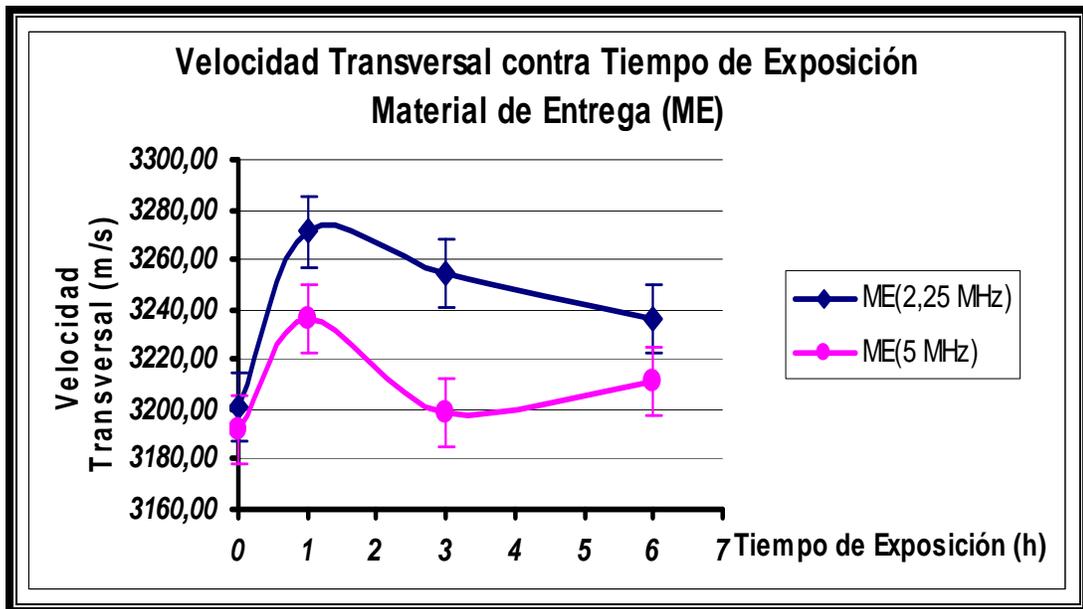
De esta manera, se puede decir, que en la primera etapa, todos los parámetros presentes, poseen un comportamiento sin cambios significativos, asumiéndolos de esta forma como constantes. El incremento en la velocidad en la primera hora de exposición al medio hidrogenado, se debe en mayor proporción a la pérdida de la densidad presente en las muestras generadas por la formación inicial de ampollas, siendo esta el parámetro que se cree que disminuye, y sin presentar cambios significativo en el modulo de elasticidad y el coeficiente de poisson el la primera hora.

Para la etapa de 1 a 3 horas, se observa una disminución en la velocidad longitudinal. Este fenómeno ocurre, debido a que en ese momento, posiblemente empiezan a tener cambios significativos todos los parámetros presente para esta velocidad, y presentando un efecto de retardo, en donde en la primera hora, la densidad es el parámetro que solo presenta cambios significativos en el material, para luego de ese periodo de tiempo, presentar posiblemente cambios en todos los parámetros existentes en la velocidad, y representar esta disminución significativa en la velocidad de propagación de la onda en el material, ya sea con el incremento del coeficiente de poisson (μ) o la disminución del modulo de elasticidad (E), siendo estos los cambios más dominante en comparación a la disminución significativa de la densidad del material, ya que esta disminuye a medida que se incrementa con el número de ampollas presentes en las muestras, debido al mayor tiempo de exposición al medio hidrogenado, para luego observar en la curva de velocidad una posible tendencia a la estabilización de la misma.

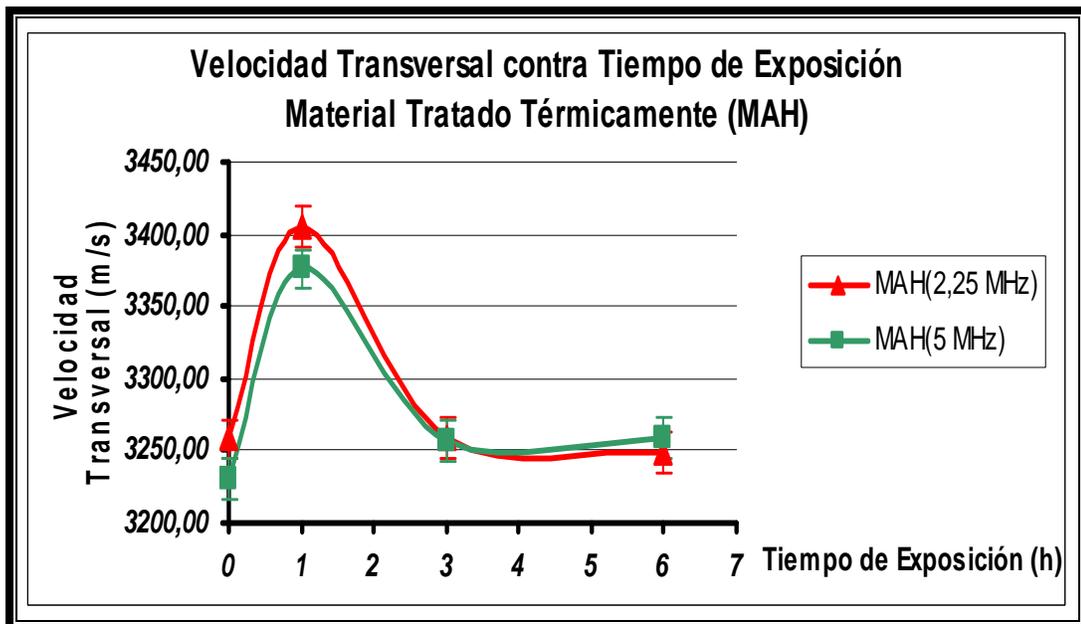
Para el caso de los resultados obtenidos en la curva de velocidad transversal en las muestras de acero en condición de entrega y en las muestras tratada térmicamente (Figuras 25-a y 25-b), se observa que presenta la misma tendencia o comportamiento. Presentando un valor máximo de velocidad en el tiempo de 1 hora de exposición al medio hidrogenado para luego sufrir una disminución en la velocidad hasta alcanzar el valor de 3 horas para finalmente presentar una posible estabilización de la velocidad hasta alcanzar el tiempo de 6 horas de exposición al medio hidrogenado.

La velocidad de propagación de las ondas de corte, también puede ser calculada. Para tal fin, se aplica la siguiente ecuación:

$$V_T = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1+\mu)}} \quad (14)$$



(a)



(b)

Fig. 25: Curva de Velocidad Transversal a diferentes frecuencias de palpador contra el tiempo de exposición al medio hidrogenado:

- c) Material en Condición de Entrega (ME)
- d) Material Tratada Térmicamente (MAH)

Observando, que para estos valores de la velocidad transversal, dependen de los mismos parámetros descritos para la onda longitudinal, y coincidiendo con las misma justificación que para las ondas longitudinales, en donde, en la primera hora existe una disminución significativa de la densidad para así alcanzar un valor máximo en la primera hora, y luego, un aumento posible del coeficiente de poisson o disminución posible del modulo de elasticidad, en conjunto con la disminución de la densidad del material hasta finalmente observar una posible tendencia a la estabilización de los valores de velocidad.

Cabe destacar, que para ambas velocidades, los mayores valores obtenidos corresponden a la de las muestras tratadas térmicamente

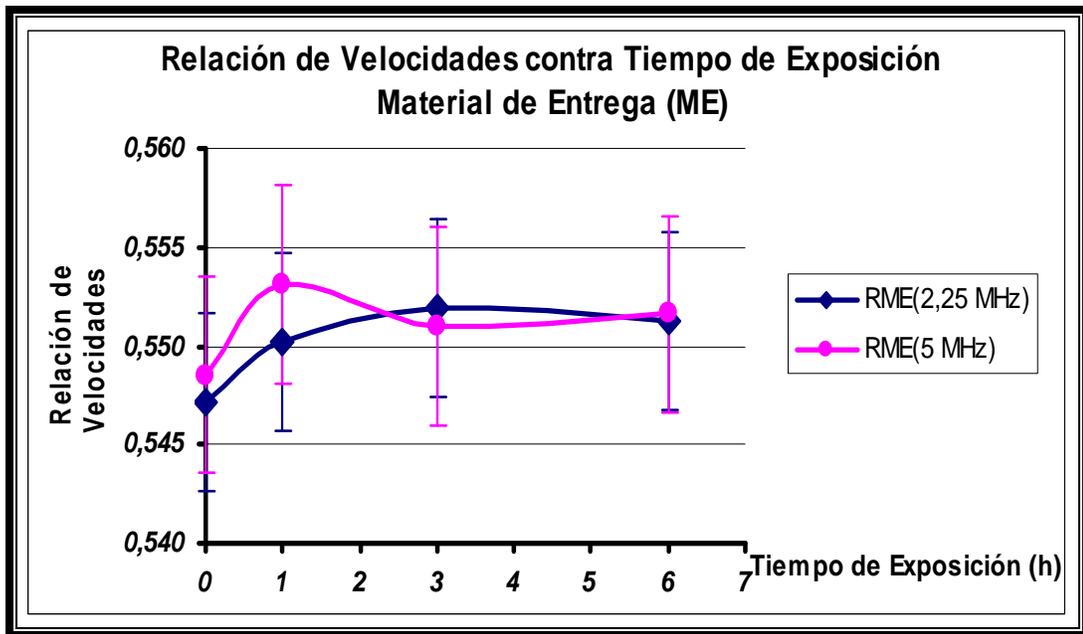
3.2. RESULTADOS DE LA RELACIONES DE VELOCIDADES (R)

Se determino la relación de velocidades de las ondas ultrasónicas (R), como el cociente de velocidades de la onda transversal entre la onda longitudinal, en muestras de acero API 5L X52 en condición de entrega (ME) y tratado térmicamente (MAH).

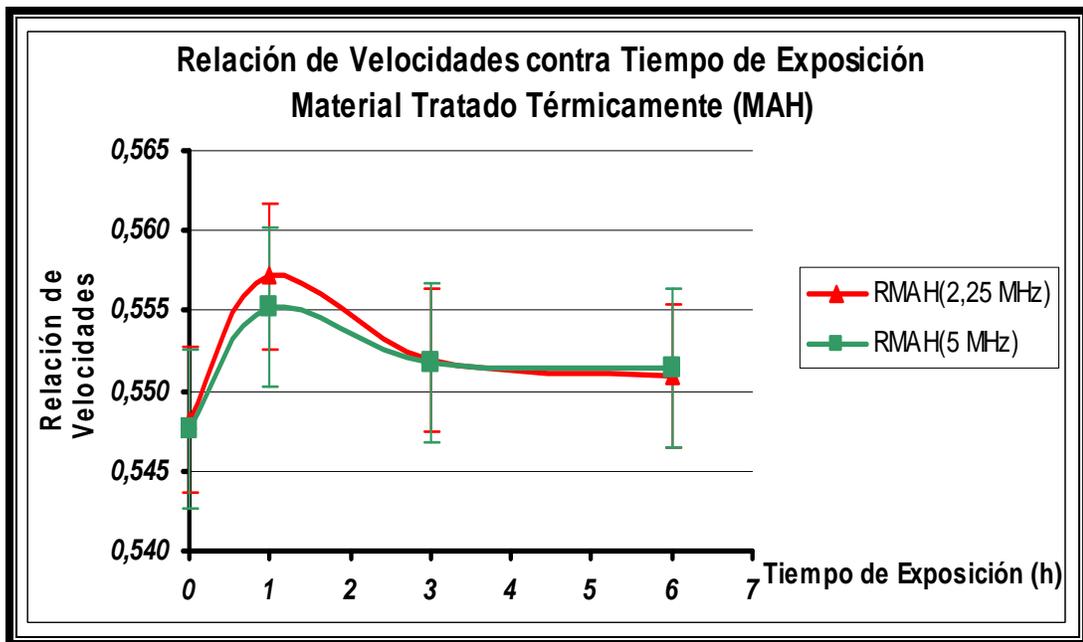
Estos valores representan de igual forma el promedio de seis (6) mediciones realizadas a cada una de las muestras existentes.

En las Figura 26, se presentan las curvas obtenidas para la relación de velocidades (R), para diferente tiempo de exposición al medio hidrogenado, diferentes materiales y diferentes frecuencias del palpador (2.25 y 5 MHz).

Para estos resultados se puede observar las mismas tendencias que al de las curvas de velocidades, en donde presentan un valor máximo en la primera hora y luego una disminución de la relación en la tercera hora para luego observar



(a)



(b)

Fig. 26: Curva de Relación de Velocidades (R) a diferentes frecuencias de palpador contra el tiempo de exposición al medio hidrogenado:

- e) Material en Condición de Entrega (ME)
- f) Material Tratada Térmicamente (MAH)

finalmente una posible tendencia a la estabilización a medida que transcurre el tiempo de exposición en las muestras existentes. Esto debido a los valores obtenidos anteriormente de las velocidades, siendo proporcional al aumento o disminución tanto de las velocidades de ondas longitudinales como las velocidades de las ondas transversales. Cabe destacar, que para ambos materiales se observan valores inferiores a 0.55 para materiales que no fueron expuestos al medio hidrogenado, y valores por encima de 0.55 para materiales que fueron expuestas al medio hidrogenado a diferentes tiempos de exposición.

Estudios realizados por Birring⁽¹⁰⁾, indica que ensayos realizados a probetas con “ataque por hidrogeno”, se observaron valores iguales o por encima de 0.55 y valores alrededor de 0.54 a probetas que no fueron sometidas a dicho ataque, siendo más significativo a medida que transcurre el tiempo de exposición de las muestras al medio hidrogenado.

Corroborando la teoría establecida por diversos investigadores y comparándolas con los resultados obtenidos en este trabajo, se puede observar la presencia de daño por hidrógeno a partir de la primera hora de exposición.

Cabe destacar de igual forma la diferencia de “*ATAQUE POR HIDRÓGENO*” con “*DAÑO POR HIDRÓGENO*”, siendo la primera, más agresiva debido a que ocurre a presiones elevadas y altas temperatura, en cuanto al daño por hidrógeno ocurre a temperatura ambiente.

*CAPÍTULO IV.- CONCLUSIONES Y
RECOMENDACIONES*

CONCLUSIONES

CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**4.1. CONCLUSIONES**

1. Se observó en la gráfica de las curvas de velocidades, tanto para las ondas longitudinales como transversales, para diferentes frecuencias de palpador y para las muestras en condición de entrega como el tratado térmicamente, que presentan un incremento en la velocidad, atribuyéndose posiblemente a la disminución en la densidad del material, por la presencia inicial de ampollas, asumiendo que no existen cambios significativos en el módulo de elasticidad como en el coeficiente de poisson.
2. Al pasar la primera hora se observó una disminución en las velocidades de propagación de las ondas, presentando un fenómeno de retardo en los parámetros que intervienen en la velocidad, atribuyéndose a que a partir de este momento, empiezan posiblemente a tener cambios significativos los valores de las propiedades mecánicas como lo son el módulo de elasticidad y coeficiente de poisson.
3. Las curvas obtenidas, tanto de velocidades como de cociente de velocidades presentan una posible tendencia a estabilizarse a medida que transcurre el tiempo de exposición al medio hidrogenado.
4. Los valores obtenidos de la relaciones de velocidades, concuerdan con estudios previos realizados, indicando que para muestras que fueron sometidas a daño por hidrogeno, se obtuvieron valores por encima de 0.55, en materiales que no fueron sometidas al daño, se obtuvieron valores cercanos a 0.54.

5. Las muestras que fueron sometidas a tratamiento térmico, obtuvieron valores mayores, tanto en las velocidades como en la relación de las mismas, indicando que posiblemente, esta muestra presentó mayor daño en comparación al material en condición de entrega. Estudios previos arrojan que efectivamente el material tratado térmicamente presentó mayor daño que las muestras en condición de entrega.
6. A medida que transcurre el tiempo de exposición al medio hidrogenado, mayor resulta ser el daño presente en las muestras.
7. A mayor frecuencia del palpador, mayor será la sensibilidad para detectar el daño por hidrógeno presente en las muestras expuestas al medio hidrogenado.
8. La técnica de relación de velocidades, no sólo resultó ser sensible al ataque por hidrógeno, sino que también logró ser sensible al daño por hidrógeno, siendo el “Ataque por Hidrógeno” más agresivo que el “Daño por Hidrogeno”.

*CAPÍTULO V.- CONCLUSIONES Y
RECOMENDACIONES*

RECOMENDACIONES

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.2. RECOMENDACIONES

1. Realizar probetas de mayor espesor para la evaluación del daño por hidrógeno, para de esa manera obtener resultados con mayor precisión.
2. Realizar ensayo de absorción de hidrógeno con mayores tiempos de exposición al medio hidrogenado, para evaluar su efecto en las propiedades mecánicas de manera más confiables.
3. Utilizar Palpadores de mayor frecuencia para los ensayos de absorción de hidrógeno, ya que la técnica se torna más sensible a medida que se aumenta la frecuencia del palpador.
4. Realizar probetas con buenos acabados superficiales y buen paralelismo en las caras de las muestras, con la finalidad de evitar disminución de la transmisión de la presión acústica, aumento de la anchura de la zona muerta, cambio en la dirección del haz ultrasónico, así como la generación de ondas parásitas superficiales



REFERENCIAS
BIBLIOGRÁFICAS

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. **Chaussin, C., Hilly, G.** “*Metalurgia*”. 1975. 1ra Edición, Aleaciones Metálicas, Ediciones URMO, España.
2. **Ernitiz, A.** “*Manual de Hierros y Aceros*”. 1967. 2da. Edición, Librería Editorial Alsina, Argentina.
3. **Doyle, L. E. at al.,** “*Materiales y Proceso de Manufactura para Ingenieros*”. 3ra Edición, Prentice-Hall, México.
4. **Avallone, E., Baumeister, T.** “*Marks Manual del Ingeniero Mecánico*”. 9na. Edición, McGraw Hill, México.
5. Disponible: http://www.solomantenimiento.com/m_termicos-acero.htm, Consulta: [24/09/2006].
6. Disponible: <http://sifunpro.tripod.com/termos.htm>, Consulta: [24/09/2006].
7. Disponible: http://es.wikipedia.org/wiki/Tratamiento_t%C3%A9rmico, Consulta: [24/09/2006].
8. **Camero, S.** “*Estudio de la relación entre la microestructura y daños por hidrógeno en un acero API 5L X52 utilizado en la industria petrolera*”. 2005. Tesis Doctoral, Facultad de Ingeniería, Escuela de Metalurgia y Ciencia de los Materiales, Universidad Central de Venezuela, Caracas-Venezuela.

-
9. **Ziobrowski, C., y otros.**, “*Influencia de los Óxidos en el Daño por de un Acero Microaleado*”. 2001. Comisión Natural de Energía Atómica, Buenos Aires.
 10. **Birring, A. S., at al.**, *Ultrasonic detection hydrogen damage*”. 1989. The American Society for Non Destructive Testing.
 11. **Kawano, K., Birring, A. S.** “*Ultrasonic detection of Hydrogen attack in steel*”. 1989. National Association of Corrosion Engineers.
 12. **Baethmann, H. J., at al.**, “*Metallurgical influences and testing on HIC-resistance of big inch line pipe*”. 1984. Corrosion, No. 203, 202-230.
 13. **Newski, M. J., Barrios, y otros.** “*Desarrollo de la metodología experimental para la evaluación de condiciones críticas que generan agrietamiento inducido por hidrógeno en presencia de H₂S*”. 1988. III Jornadas de Corrosión. Caracas.
 14. **Smialowski, M.** “*Hydrogen blistering and surface microcracks*”. 1973. Stress Corrosion Cracking and Hydrogen Embrittlement of Iron Base, 405-422.
 15. **Louthan, M. R. JR.** “*The effect of hydrogen on metals*”. 1975. Process Industries Corrosion, NACE, USA, 126-133.
 16. **Scully, J. C.** “*Fractographic aspects of stress corrosion cracking and hydrogen embrittlement in iron base alloys*”. 1977. Stress corrosion cracking and hydrogen embrittlement of iron base alloys, NACE, Houston, 496-508.
 17. **Nakai, H. Kurahashi, Emi, T., Haida, O.** “*Development of steels resistant to Hydrogen induced cracking in wet hydrogen sulfide environment*”. 1979. Transactions ISIJ, 401-410.

-
18. **Herbsleb, R. Pöpperling, Schwenk, W.** “*Occurrence and prevention of hydrogen-induced stepwise cracking and stress corrosion cracking of low-alloy pipeline steels*”. 1980. Corrosion, No. 9, 1-16.
 19. **Hill, R. T., Iino, M.** “*Correlation between hydrogen-induced blister cracking of stressed and unstressed specimens*”. 1982. Proc. of I Inter. Conf. “Current solutions to hydrogen problems in steels”, AIME. Interrante and Pressoure eds. Washington DC, 1-5, 196-199.
 20. **Biefer, G. J.** “*The stepwise cracking of line-pipe steels in sour environments*”. 1982. Materials Performance, (19-34).
 21. **Turn, C., JR., Wilde, B. E., Troianos, C. A.** “*On the sulfide stress cracking of line pipe steels*”. Corrosion Vol. 30, No.9, Septiembre (1983), 384-370.
 22. **Gelder, V., at al.,** “*Cracking of materials in aqueous H₂S-containing environments*”. Corrosion, No. 71, (1988), 1-10.
 23. **Xie, S. X., Hirth, J. P.** “*Permeation of hydrogen, trapping, and damage in spheroidized AISI 1090 steel*”. Corrosion, NACE, Vol. 38, No. 9, Septiembre (1982), 486-493.
 24. **Coudreuse, L., Charles, J.** “*The used of permeation technique to predict critical concentration of H₂ for cracking*”. Corrosion Science, Vol. 27, No. 10/11, (1987), 1169-1181.
 25. **Lukito, H., Szklarska-Smialowska, Z.** “*Susceptibility of medium-strength steel to hydrogen-induced cracking*”. Corrosion Science, Vol. 39, No. 12, (1997), 2151-2169.

-
26. **Rydre, D., Grundy, T.** “*The effect of the microstructure of steel on susceptibility to hydrogen embrittlement*”. The American Society for Metals. (1982), 272-274.
 27. **Kowaka, M.** “*Metal corrosion damage and protection technology*”, Allertob press, Inc., USA, (1990), 230-235.
 28. **Ikedo, Y. Morita, at al.** “*On the hydrogen induced cracking of line pipe steel under wet hydrogen sulfide environment*”. Second. Intern. Congr. Hydrogen in Metals, Paris, Junio, (1977), 6-11.
 29. **Iino, M.** “*The extension of hydrogen blister-crack-array in linepipe steels*”. Metallurg. Trans. Vol. 9A, (1978), 1581-90.
 30. **Hirth, J. P., Hohnson, H. H.** “*Hydrogen problems in energy related technology*”. Corrosion, Vol 32, (1976), 3-26.
 31. **Craig, B., Metallurgical Consultants, Inc.** “*Environmentally induced cracking*”. ASM Handbook, Formerly ninth edition, Metals Handbook. Volumen 13, Corrosión, (1997), 146-189
 32. **Szklarska, Z., Xia, Z.** “*Hydrogen trapping by cold-worked X-52 steel*”. Corrosion Science, Vol. 39, N° 12, (1997). 2171-2180.
 33. **Amarnath, G. A. N., Namboodhiri, T. K. G.** “*Effect of heat treatments on the hydrogen embrittlement susceptibility of API X-65 grade line-pipe steel*”. Bull. Mater. Sci., Vol. 26, N° 4, June (2003). 435-439. Indian Academy of Science.
 34. **Ramírez, F., at al.** “*Métodos de Ensayos No Destructivos*”. Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA), 4ta Edición, Madrid, (345-483).

-
35. **Amorer, L., at al.**, “*Curso de Ultrasonido Industrial nivel 2*”. 2005. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería.
 36. **Echevarria, R.** “*Ultrasonido*”. 2002. Universidad Nacional del Comahue. Facultad de Ingeniería. Laboratorio de Ensayo No Destructivos.
 37. **Proakis, J., Manolakis, D.** “*Tratamiento digital de Señales*”. 1998. 3ra. Edición, Prentice-Hall, España.
 38. Disponible: http://es.wikipedia.org/wiki/Filtro_electr%C3%B3nico, Consulta: [26/09/2006].
 39. **Mikaty, M., Padrón M., Figuera J.** “*Instructivo para la presentación de Tesis de Pregrado, Postgrado, Doctorado y Trabajos de Ascenso*”. 2005. Comisión de Bibliotecas. Subcomisión para la normalización de la presentación de Tesis de Pregrado, Postgrado, Doctorado y Trabajos de Ascenso. Universidad Central de Venezuela. Caracas.



ANEXOS

ANEXO 1: Programa Elaborado para obtener las velocidades Longitudinales, Transversales y Relación de Velocidades (R).Ejemplo realizado al bloque de calibración V1

```

a=xlsread('VIT5');
b=xlsread('VIL5');
format long

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

a=a(:,2);
b=b(:,2);

A=xlsread('VIT5');
tiempoT = A(:,1);%Crea la matriz a partir del archivo utilizado(Vector primera
columna)
amplitudT = A(:,2);%Crea la matriz a partir del archivo utilizado(Vector segunda
columna)
deltatiempoT = tiempoT(2)-tiempoT(1) %Diferencia entre los 2 primeros valores del
tiempo para obtener el tiempo de muestreo del equipo
freqMuesT = 1/deltatiempoT %Frecuencia de muestreo de la señal

figure (1);
Subplot(2,2,1);
plot(tiempoT,amplitudT);
title('Data Original VIT5 Tranv. 5 MHz');
xlabel('Tiempo (s)'); %(Unidades en seg.)
ylabel('Amplitud (dB)');
axis([.000023 .000033 -.2 .6])

Subplot(2,2,2);
plot(a);
title('Data Original VIT5 Tranv. 5 MHz');
xlabel('N° de Puntos');
ylabel('Amplitud (dB)');
axis([0 2500 -.2 .6])

[B,A]=butter(2,0.05,'high'); % Filtro del tipo Pasa Alto
Afiltrada=filter(B,A,a);
Subplot(2,2,3);
plot(Afiltrada);
title('Data Filtrada Original VIT5 Tranv. 5 MH');

```

```

xlabel('Tiempo');
ylabel('Amplitud (dB)');
axis([0 2500 -.2 .2])

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

hold on

T1 = 500;%Rango de Valores para obtener el máximo
[C1,I1] = max(Afiltrada(T1:1100));%Máximo de un vector con la posición
dT1 = [C1,I1]
pT1=I1+T1-1
plot(pT1,C1,'r.');?>Gráfica del valor máximo calculado

T2 = 1100;
[C2,I2] = max(Afiltrada(T2:1600));
dT2 = [C2,I2]
pT2=I2+T2-1
plot(pT2,C2,'r.')}

T3 = 1600;
[C3,I3] = max(Afiltrada(T3:2200));
dT3 = [C3,I3]
pT3=I3+T3-1
plot(pT3,C3,'r.')}

tvT = ((pT2)-(pT1))*deltatiempoT/2 %Tiempo de vuelo (DIVIDIDO ENTRE 2)

hold off

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

B=xlsread('VIL5');
tiempoL = B(:,1);%Crea la matriz a partir del archivo utilizado(Vector primera
columna)
amplitudL = B(:,2);%Crea la matriz a partir del archivo utilizado(Vector segunda
columna)
deltatiempoL = tiempoL(2)-tiempoL(1) %Diferencia entre los 2 primeros valores del
tiempo para obtener el tiempo de muestreo del equipo
freqMuesL = 1/deltatiempoL %Frecuencia de muestreo de la señal

figure (2);
Subplot(2,2,1);
plot(tiempoL,amplitudL);

```

```

title('Data Original VIL5 Long. 5 MHz');
xlabel('Tiempo (s)'); %(Unidades en seg.)
ylabel('Amplitud (dB)');
axis([.000012 .000016 0 20])

```

```

Subplot(2,2,2);
plot(b);
title('Data Original VIL5 Long. 5 MHz');
xlabel('N° de Puntos');
ylabel('Amplitud (dB)');
axis([0 2500 0 20])

```

```

[B,A]=butter(2,0.05,'high');
Bfiltrada=filter(B,A,b);
Subplot(2,2,3);
plot(Bfiltrada);
title('Data Filtrada Original VIL5 Long. 5 MHz');
xlabel('Tiempo');
ylabel('Amplitud (dB)');
axis([0 2500 -1 1])

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

hold on

```

```

L1 = 100;%Rango de Valores para obtener el máximo
[K1,S1] = max(Bfiltrada(L1:700));%Máximo de un vector con la posición
dL1 = [K1,S1]
pL1=S1+L1-1
plot(pL1,K1,'r.');
```

```

L2 = 1000;
[K2,S2] = max(Bfiltrada(L2:1600));
dL2 = [K2,S2]
pL2=S2+L2-1
plot(pL2,K2,'r.')
```

```

L3 = 1600;
[K3,S3] = max(Bfiltrada(L3:2200));
dL3 = [K3,S3]
pL3=S3+L3-1
plot(pL3,K3,'r.')
```

```

tvL = ((pL2)-(pL1))*deltatiempoL/2 %Tiempo de vuelo (dividido entre 2)

```

hold off

%%%

espesor = 0.0254; %(Unidades en mm)

Vt= (espesor/tvT) %(Unidades en m/s)

Vl= (espesor/tvL) %(Unidades en m/s)

desviacionVt= abs(3250-Vt) %diferencia entre el valor de la velocidad nominal y la velocidad obtenida (Onda Transversal)

desviacionVL= abs(5940-Vl) %diferencia entre el valor de la velocidad nominal y la velocidad obtenida (Onda Longitudinal)

*errorT= desviacionVt*100/3250 %(Unidades en %)*

*errorL= desviacionVL*100/5940 %(Unidades en %)*

%%%

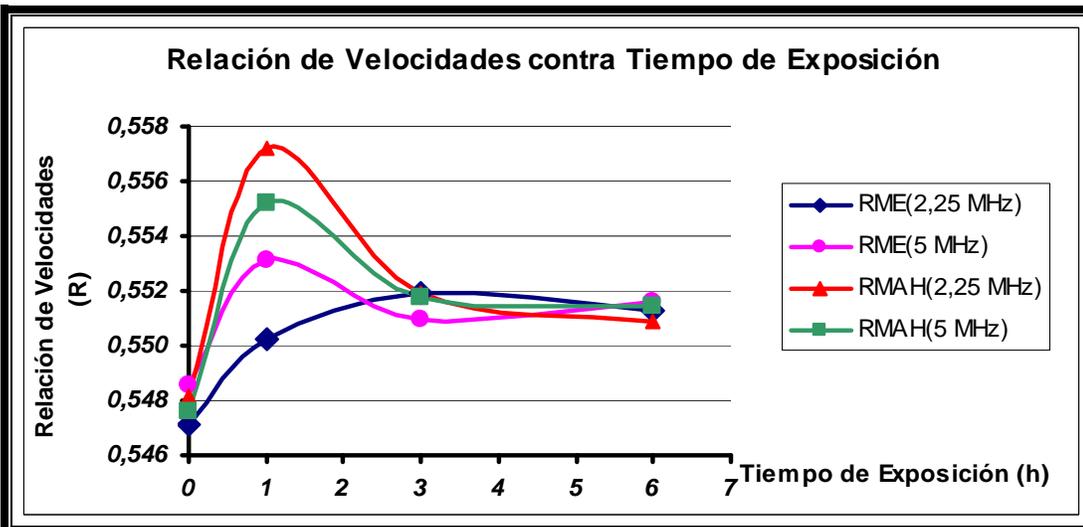
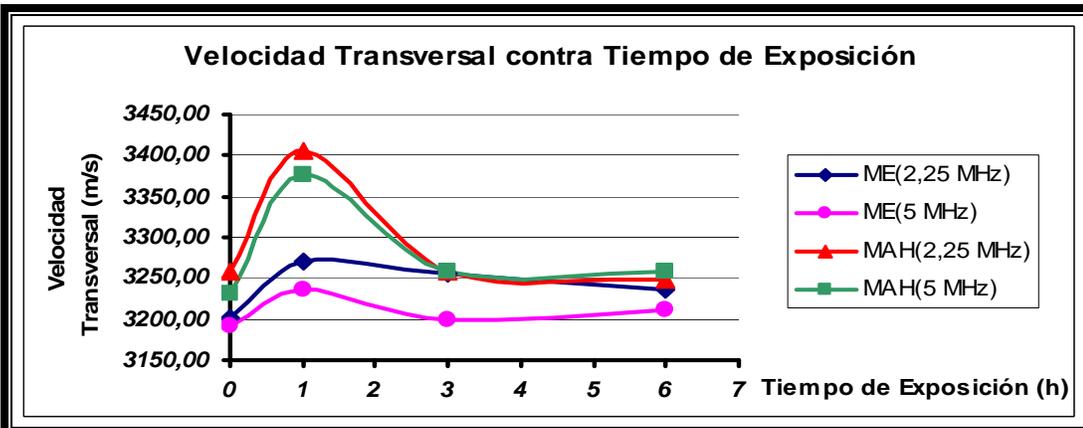
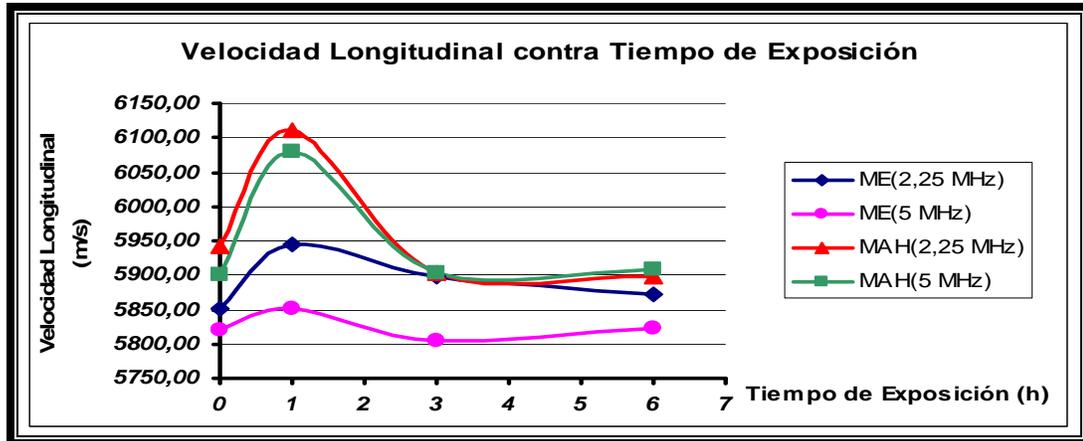
R=Vt/Vl

ANEXO 2: Tablas de Resultados de las velocidades Longitudinales, Transversales y Relación de Velocidades (R) para diferentes frecuencias de Palpador.

Palpador de 2,25 MHz									
Horas	Probeta	Espesor (m)	$\pm \Delta e$ (m)	V_T (m/s)	$\pm \Delta V_T$ (m/s)	V_L (m/s)	$\pm \Delta V_L$ (m/s)	R	$\pm \Delta R$
0	ME0h1	4,45E-03	1,00E-05	3201,15	14,45	5851,01	26,410	0,547	0,005
1	ME1h1	4,72E-03		3271,00	13,92	5945,03	25,292	0,550	0,005
3	ME3h1	4,94E-03		3254,73	13,45	5896,96	23,989	0,552	0,004
6	ME6h1	4,29E-03		3236,47	13,00	5871,07	24,031	0,551	0,004
0	MAH0h1	4,73E-03	1,00E-05	3258,06	13,91	5943,43	25,26	0,548	0,005
1	MAH1h1	4,51E-03		3405,21	14,54	6111,69	26,10	0,557	0,005
3	MAH3h1	4,83E-03		3258,54	13,55	5903,87	24,56	0,552	0,005
6	MAH6h1	4,60E-03		3249,07	14,12	5897,69	25,80	0,551	0,005

Palpador de 5 MHz									
Horas	Probeta	Espesor (m)	$\pm \Delta e$ (m)	V_T (m/s)	$\pm \Delta V_T$ (m/s)	V_L (m/s)	$\pm \Delta V_L$ (m/s)	R	$\pm \Delta R$
0	ME0h1	4,45E-03	1,00E-05	3191,97	14,41	5819,14	26,27	0,549	0,005
1	ME1h1	4,72E-03		3235,90	13,77	5850,21	24,93	0,553	0,005
3	ME3h1	4,94E-03		3198,90	12,97	5805,72	23,62	0,551	0,004
6	ME6h1	4,29E-03		3211,30	13,01	5821,68	23,67	0,552	0,004
0	MAH0h1	4,73E-03	1,00E-05	3230,91	13,82	5900,11	24,88	0,548	0,005
1	MAH1h1	4,51E-03		3375,90	14,42	6080,10	25,96	0,555	0,005
3	MAH3h1	4,83E-03		3257,66	13,44	5903,87	24,56	0,552	0,005
6	MAH6h1	4,60E-03		3258,74	14,14	5909,28	25,79	0,551	0,005

ANEXO 3: Resumen de Gráficas con los valores de Velocidad Longitudinal, Transversal y Relación de Velocidades (R) a diferentes frecuencias de Palpador.



ANEXO 4: Fórmulas Utilizadas para el Cálculo de Incertidumbre para cada uno de los parámetros obtenidos.

Incertidumbre de los Instrumentos utilizado

Δe : Incertidumbre del instrumento de medición con la cual fueron medidas los espesores de las probetas (Tornillo Micrométrico).

Δtv : Incertidumbre del instrumento con la cual se obtuvieron los valores del tiempo de vuelo (Osciloscopio).

Cálculo de las Velocidades de propagación de las Ondas Ultrasónicas y su respectiva incertidumbre

$$V = \frac{d}{t} = \frac{e}{\left(\frac{tv}{2}\right)} = \frac{2.e}{tv} \quad (15)$$

$$\Delta V_{T,L} = \left| \frac{\partial V}{\partial e} \right|_{T,L} \cdot (\Delta e) + \left| \frac{\partial V}{\partial tv} \right|_{T,L} \cdot (\Delta tv) \quad (16)$$

Cálculo de las Relaciones de Velocidades de propagación de las Ondas Ultrasónicas con su respectiva incertidumbre

$$R = \frac{V_T}{V_L} \quad (17)$$

$$\Delta R = \left| \frac{\partial R}{\partial V_T} \right| \cdot (\Delta V_T) + \left| \frac{\partial R}{\partial V_L} \right| \cdot (\Delta V_L) \quad (18)$$

APÉNDICE

A.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. *(Curso nivel I UT)*

- ❖ **Oscilación:** es el cambio periódico de condición o comportamiento de un cuerpo.
- ❖ **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.
- ❖ **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:

$$1 \text{ Hertz} = 1 \text{ Hz} = 1 \text{ Ciclo por segundo.}$$

$$1.000 \text{ Hertz} = 1 \text{ kHz} = 1.000 \text{ Ciclos por segundo.}$$

$$1,000.000 \text{ Hertz} = 1 \text{ MHz} = 1.000.000 \text{ Ciclos por segundo.}$$

El período y la frecuencia están relacionados por la relación:

$$f = \frac{1}{T} \quad (19)$$

Donde:

- T: Período
- f: Frecuencia

-
- ❖ **Amplitud:** es la máxima desviación del cuerpo oscilante desde la posición de equilibrio.

 - ❖ **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.

 - ❖ **Amortiguación:** es el decremento en el tiempo de la amplitud de una oscilación.

 - ❖ **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.

 - ❖ **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 versus una distancia en lugar del tiempo.

 - ❖ **Longitud de Onda:** La longitud de onda, λ 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:

$$\lambda = \frac{V}{f} \quad (20)$$

Donde

- λ : Longitud de onda
- V : Velocidad acústica
- f : Frecuencia

- ❖ **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.
- ❖ **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.
- ❖ **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.
- ❖ **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.⁽¹⁶⁾

A.2. Generación de Ultrasonido

Un palpador es un instrumento fundamental en un equipo de ultrasonido el cual convierte energía de una forma a otra,^(34, 35) por ejemplo: la energía eléctrica puede ser convertida en energía mecánica y la energía mecánica puede ser convertida en energía eléctrica. La conversión de energía se realiza en ultrasonido, partiendo de dos fenómenos físicos:^(34, 35)

- Efecto Piezoeléctrico.
- Efecto Magnetostrictivo.

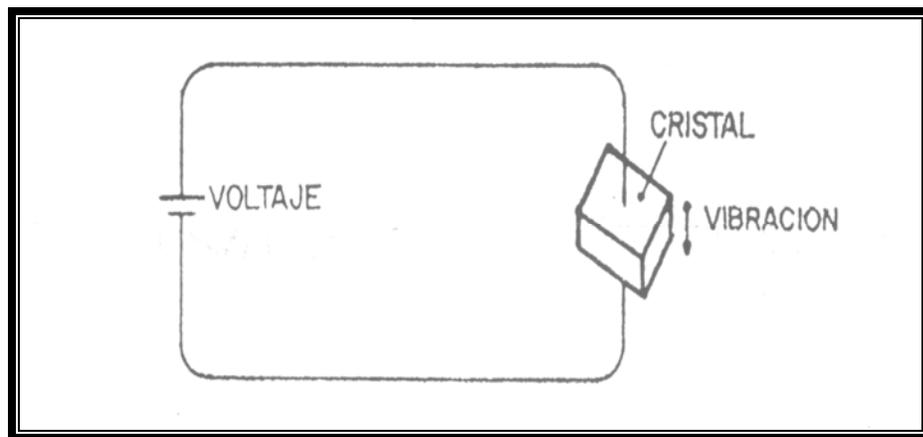


Fig. 31: Principio básico del Funcionamiento de los palpadores ultrasónicos.⁽³⁵⁾

• Efecto Piezoeléctrico: El tipo de cristal mas comúnmente usado en ensayos no destructivos, se denomina cristal piezoeléctrico. Un material piezoeléctrico, convierte deformaciones mecánicas causadas por efecto de presión externa, en cargas eléctricas.

La función de un palpador de cristal, es convertir en señales eléctricas las deformaciones aplicadas y viceversa. La combinación de estos dos efectos hace posible los sistemas ultrasónicos.

Las propiedades físicas de un cristal de cuarzo natural varían de acuerdo con las direcciones en las cuales sea cortado. Se desenvolverá mecánica, óptica o eléctricamente favorable, según su dirección de corte principal. Cada cristal tiene tres ejes imaginarios, según y como sea cortado, serán su comportamiento y características físicas.

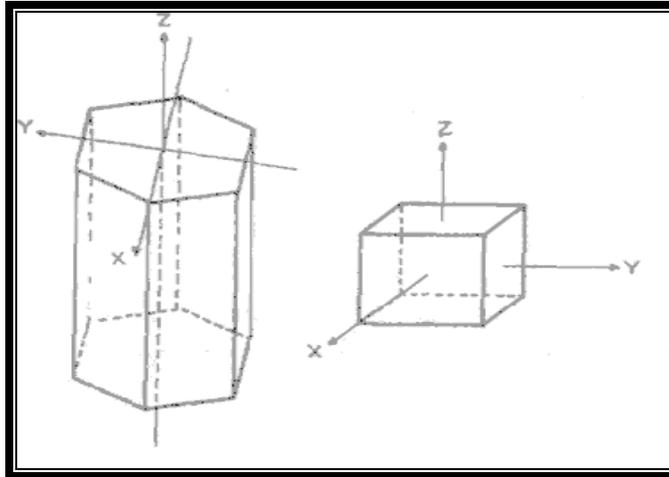


Fig. 32: Orientación típica de los ejes en un cristal de cuarzo natural.⁽³⁵⁾

En la Figura 32 se observa la dirección de corte de un cristal de cuarzo más conveniente para las aplicaciones ultrasónicas. Al aplicar presión mecánica perpendicularmente al eje de las señales eléctricas y si por el contrario se aplica campo eléctrico a las caras perpendiculares al eje X del cristal, se producirán variaciones de espesor. Si se aplica al cristal un campo impulsivo, (corta duración y gran intensidad) el cristal vibrará a una frecuencia definida que depende de su espesor y de la velocidad del sonido en el cristal.

- Efecto Magnetoestrictivo: Por definición, los materiales magnetoestrictivos se deforman mecánicamente cuando se les aplica voltaje. Los materiales que exhiben ésta facultad se denominan ferroeléctricos; y están compuestos por un gran número de moléculas que para cumplir con el efecto magnetoestrictivo, deben ser polarizadas como se muestra en la Figura 33. Cuando no existe un gradiente eléctrico

en el material ferroeléctrico, las moléculas estarán orientadas al azar (a). Al aplicar voltaje, las moléculas tienden a alinearse en la dirección del campo; en éste momento se produce un aumento del espesor como el voltaje se aplica de forma alterna (b). Al bajar a cero volverá a su espesor normal (a), aumentará el espesor polarizándose las moléculas de forma opuesta (c), volverá a cero, y así sucesivamente se producirán las vibraciones.

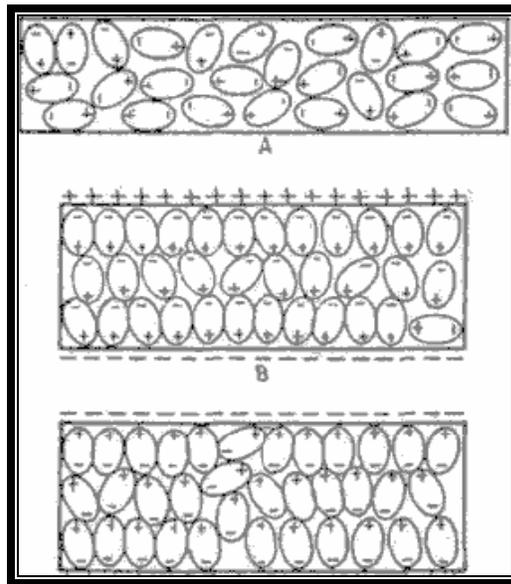


Fig. 33: Orientación de las moléculas en un material magnetostrictivo.⁽³⁵⁾

Los materiales ferroeléctricos, debido a sus propiedades, no pueden producir altas frecuencias, es por esto que con cierta metodología, es posible cambiar su comportamiento hacia la piezoelectricidad. El método es el siguiente; el material es calentado por encima de su punto de Curie (la temperatura por encima de la cual una estructura pierde sus propiedades ferroeléctricas), a la vez que se le aplica voltaje lateralmente (aproximadamente 1.000 voltios por milímetro de espesor), el cual será mantenido hasta el enfriamiento. El material ha sido polarizado, por lo que exhibirá propiedades piezoeléctricas.