

**ANÁLISIS MICROESTRUCTURAL Y ULTRASÓNICO DE UN ACERO AISI/SAE  
1020, TRATADO TÉRMICAMENTE POR MEDIO DE UN TEMPLE A 800°C,  
900°C Y 1000°C.**

**Presentado por.  
DIEGO ALEJANDRO MARTÍNEZ ALARCÓN  
065082059**

**UNIVERSIDAD LIBRE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BOGOTÁ D.C  
2015**

**ANÁLISIS MICROESTRUCTURAL Y ULTRASÓNICO DE UN ACERO AISI/SAE  
1020, TRATADO TÉRMICAMENTE POR MEDIO DE UN TEMPLE A 800°C,  
900°C Y 1000°C.**

**Presentado por.  
DIEGO ALEJANDRO MARTÍNEZ ALARCÓN**

**Proyecto de grado para optar al título de ingeniero mecánico**

**Director,  
Jaime Andrés Pérez Cepeda  
Ingeniero Mecánico**

**UNIVERSIDAD LIBRE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BOGOTÁ D.C  
2015**

Notas de aceptación:

---

---

---

---

---

---

---

Firma del director

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

Bogotá D.C 05 DE MAYO DE 2015

## Agradecimientos

A Dios, por bendecirme constantemente y permitir culminar una importante etapa de mi vida.

A mi Madre, que siempre ha confiado en mí y me ha apoyado en cada uno de los momentos de mi vida.

Al ingeniero Héctor Fernando Rojas Molano, por su dedicación y por generar grandes aportes en la construcción de mi trabajo de grado.

A mis amigos, compañeros y todas aquellas personas que siempre han estado presentes en los momentos duros y mostrándome en todo momento el lado positivo de las cosas.

## TABLA DE CONTENIDO

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	11
2. INTRODUCCIÓN	12
3. JUSTIFICACIÓN	13
4. OBJETIVOS	14
4.1 OBJETIVO GENERAL	14
4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
5. ANTECEDENTES	15
6. MARCO REFERENCIAL	22
6.1 MARCO TEÓRICO	22
6.1.1 Acero AISI/SAE 1020	22
6.1.2 Tratamientos térmicos	23
6.1.3 Tratamiento de temple	24
6.1.4 Metalografía	24
6.1.5 Ensayos No Destructivos (END)	24
6.1.6 Ensayo Ultrasónico	25
6.2 MARCO CONCEPTUAL	27
6.3 MARCO METODOLÓGICO	28
6.4 MARCO NORMATIVO Y LEGAL	29
7. DISEÑO EXPERIMENTAL	30
8. DESARROLLO EXPERIMENTAL	34
8.1 MATERIAL	34
8.2 PRUEBA PILOTO	35
8.3 TRATAMIENTO TÉRMICO	36
8.4 METALOGRAFÍA	38
8.5 ULTRASONIDO	40
8.6 MICRODUREZA	41
9. RESULTADOS	43

9.1 ULTRASONIDO	43
9.1.1 Velocidad ultrasónica	43
9.1.2 Espectro ultrasónico	53
9.1.3 Atenuación ultrasónica	58
9.2 METALOGRAFÍAS	60
9.2.1 Probeta patrón	60
9.2.2 Probeta tratada térmicamente a 800°C – 1	61
9.2.3 Probeta tratada térmicamente a 800°C – 2 horas	62
9.2.4 Probeta tratada térmicamente a 800°C – 3 horas	62
9.2.5 Probeta tratada térmicamente a 900°C – 1 hora	63
9.2.6 Probeta tratada térmicamente a 900°C – 2 horas	63
9.2.7 Probeta tratada térmicamente a 900°C – 3	64
9.2.8 Probeta tratada térmicamente a 1000°C – 1 hora	64
9.2.9 Probeta tratada térmicamente a 1000°C – 2 horas	65
9.2.10 Probeta tratada térmicamente a 1000°C – 3 horas	65
9.3 MICRODUREZAS	66
9.3.1 Probeta patrón	66
9.3.2 Probeta tratada térmicamente a 800°C	66
9.3.3 Probeta tratada térmicamente a 900°C	67
9.3.4 Probeta tratada térmicamente a 1000°C	68
10. ANÁLISIS DE RESULTADOS	70
CONCLUSIONES	78
RECOMENDACIONES	79
BIBLIOGRAFÍA	80
ANEXOS	82

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. ESPECTROS ULTRASÓNICOS DE LA PROBETA PATRÓN Y LA PROBETA TRATADA TÉRMICAMENTE A 1000°C Y 2 HORAS DE PERMANENCIA, A UNA FRECUENCIA DE 2,25 MHZ.....	15
FIGURA 2. COMPARACIÓN ENTRE EL RUIDO MAGNETICO (RMB) Y LA DUREZA VICKERS (HV).....	16
FIGURA 3. CURVA DE VELOCIDAD.....	17
FIGURA 4. VARIACIÓN DE LA VELOCIDAD ULTRASÓNICA EN FUNCIÓN DEL TIEMPO EN EL HORNO, PALPADOR DE 2,25 MHZ.....	18
FIGURA 5. VALORES DE POTENCIA MÁXIMA Y POTENCIA TOTAL EN CADA UNO DE LOS ESPECTROS DEL TIPO DE DEFECTO EN LAS PROBETAS DE ALUMINIO 6063T5.....	19
FIGURA 6. VALORES DE POTENCIA TOTAL EN CADA UNO DE LOS DEFECTOS GENERADOS EN LAS PROBETAS DE ACERO AISI 304.....	20
FIGURA 7. VALORES DEL COEFICIENTE DE ATENUACIÓN (DB/M) DE UN ACERO INOXIDABLE Y UN ACERO AL CARBÓN EN RELACIÓN CON SU IMPEDANCIA ACÚSTICA.....	21
FIGURA 8. ETAPAS DE UN TRATAMIENTO TÉRMICO.....	23
FIGURA 9. ESPECTRO ACÚSTICO.....	25
FIGURA 10. ESQUEMA DE LA TÉCNICA DE ULTRASONIDO.....	26
FIGURA 11. CURVA CARACTERÍSTICA DE OPERACIÓN.....	31
FIGURA 12. PROBETA DE ACERO AISI/SAE 1020 SOMETIDA A ESPECTROMETRÍA DE EMISIÓN ÓPTICA.....	35
FIGURA 13. HORNO TIPO MUFLA M10.....	36
FIGURA 14. TERMÓMETRO INFRARROJO OMEGA.....	36
FIGURA 15. TRATAMIENTO TÉRMICO DE TEMPLE.....	38
FIGURA 16. PULIDORA METALOGRAFICA.....	39
FIGURA 17. ANALIZADOR DE IMAGEN MICROSCOPIO - OLYMPUS.....	39
FIGURA 18. EQUIPO DE ULTRASONIDO OLYMPUS - EPOCH XT.....	40
FIGURA 19. PALPADOR DE FRECUENCIA DE 5 MHZ – TIPO DUAL.....	40
FIGURA 20. PALPADOR DE FRECUENCIA DE 2.25 MHZ – TIPO PULSO-ECO.....	41
FIGURA 21. PATRÓN DE CALIBRACIÓN - ASTM 1018.....	41
FIGURA 22. MICRODURÓMETRO – EQ - M. AM, 03.....	42
FIGURA 23. VARIACIÓN DE LA VELOCIDAD ULTRASÓNICA DE LA PROBETA TRATADA A 800°C CON TRANSDUCTORES DE 2.25 MHZ Y 5MHZ EN FUNCIÓN DEL TIEMPO DE PERMANECÍA EN EL HORNO.....	46

FIGURA 24. VARIACIÓN DE LA VELOCIDAD ULTRASÓNICA DE LA PROBETA TRATADA A 900°C CON TRANSDUCTORES DE 2.25 MHZ Y 5MHZ EN FUNCIÓN DEL TIEMPO DE PERMANECÍA EN EL HORNO.....	48
FIGURA 25. VARIACIÓN DE LA VELOCIDAD ULTRASÓNICA DE LA PROBETA TRATADA A 1000°C CON TRANSDUCTORES DE 2.25 MHZ Y 5MHZ EN FUNCIÓN DEL TIEMPO DE PERMANECÍA EN EL HORNO.....	50
FIGURA 26. VARIACIÓN DE LA VELOCIDAD ULTRASÓNICA CON TRANSDUCTORES DE 2.25 MHZ Y 5MHZ DE PROBETAS TRATADAS A 1 HORA DE PERMANENCIA EN EL HORNO.....	51
FIGURA 27. VARIACIÓN DE LA VELOCIDAD ULTRASÓNICA CON TRANSDUCTORES DE 2.25 MHZ Y 5MHZ DE PROBETAS TRATADAS A 2 HORAS DE PERMANENCIA EN EL HORNO. ....	52
FIGURA 28. VARIACIÓN DE LA VELOCIDAD ULTRASÓNICA CON TRANSDUCTORES DE 2.25 MHZ Y 5MHZ DE PROBETAS TRATADAS A 3 HORAS DE PERMANENCIA EN EL HORNO. ....	53
FIGURA 29. ESPECTRO ULTRASÓNICO PROBETA PATRÓN.....	54
FIGURA 30. ESPECTRO ULTRASÓNICO PROBETA TRATADA A 800°C – 1 HORA. ....	54
FIGURA 31. ESPECTRO ULTRASÓNICO PROBETA TRATADA A 800°C – 2 HORAS.....	55
FIGURA 32. ESPECTRO ULTRASÓNICO PROBETA TRATADA A 800°C – 3 HORAS.....	55
FIGURA 33. ESPECTRO ULTRASÓNICO PROBETA TRATADA A 900°C – 1 HORA. ....	56
FIGURA 34. ESPECTRO ULTRASÓNICO PROBETA TRATADA A 900°C – 2 HORAS.....	56
FIGURA 35. ESPECTRO ULTRASÓNICO PROBETA TRATADA A 900°C – 3 HORAS.....	57
FIGURA 36. ESPECTRO ULTRASÓNICO PROBETA TRATADA A 1000°C – 1 HORA. ....	57
FIGURA 37. ESPECTRO ULTRASÓNICO PROBETA TRATADA A 1000°C – 2 HORAS.....	58
FIGURA 38. ESPECTRO ULTRASÓNICO PROBETA TRATADA A 1000°C – 3 HORAS.....	58
FIGURA 39. COEFICIENTES DE ATENUACIÓN A 5 MHZ. ....	59
FIGURA 40. COEFICIENTES DE ATENUACIÓN A 2.25 MHZ.....	60
FIGURA 41. METALOGRAFÍA PROBETA PATRÓN - ATAQUE NITAL AL 3% - AUMENTO 500X.....	61

FIGURA 42. METALOGRAFÍA PROBETA TRATADA A 800°C 1 HORA - ATAQUE NITAL AL 3% - AUMENTO 200X.....	61
FIGURA 43. METALOGRAFÍA PROBETA TRATADA A 800°C 2 HORAS - ATAQUE NITAL AL 3% - AUMENTO 500X.....	62
FIGURA 44. METALOGRAFÍA PROBETA TRATADA A 800°C 3 HORAS - ATAQUE NITAL AL 3% - AUMENTO 200X.....	62
FIGURA 45. METALOGRAFÍA PROBETA TRATADA A 900°C 1 HORA - ATAQUE NITAL AL 3% - AUMENTO 200X.....	63
FIGURA 46. METALOGRAFÍA PROBETA TRATADA A 900°C 2 HORAS - ATAQUE NITAL AL 3% - AUMENTO 500X.....	63
FIGURA 47. METALOGRAFÍA PROBETA TRATADA A 900°C 3 HORAS - ATAQUE NITAL AL 3% - AUMENTO 200X.....	64
FIGURA 48. METALOGRAFÍA PROBETA TRATADA A 1000°C 1 HORA - ATAQUE NITAL AL 3% - AUMENTO 1000X.....	64
FIGURA 49. METALOGRAFÍA PROBETA TRATADA A 1000°C 2 HORAS - ATAQUE NITAL AL 3% - AUMENTO 1000X.....	65
FIGURA 50. METALOGRAFÍA PROBETA TRATADA A 1000°C 3 HORAS - ATAQUE NITAL AL 3% - AUMENTO 1000X.....	65
FIGURA 51. MICRODUREZA.....	69
FIGURA 52. METALOGRAFÍA PROBETA PATRÓN - ATAQUE NITAL AL 3% - AUMENTO 500X.....	70
FIGURA 53. ESQUEMA ESTRUCTURAS FORMADAS Y MICRODUREZA. ....	72
FIGURA 54. ESQUEMA ESTRUCTURAS PROBETAS TRATADAS TÉRMICAMENTE Y VELOCIDAD ULTRASÓNICA A 800°C. ....	74
FIGURA 55. ESQUEMA ESTRUCTURAS PROBETAS TRATADAS TÉRMICAMENTE Y VELOCIDAD ULTRASÓNICA A 900°C. ....	75
FIGURA 56. ESQUEMA ESTRUCTURAS PROBETAS TRATADAS TÉRMICAMENTE Y VELOCIDAD ULTRASÓNICA A 1000°C. ....	76
FIGURA 57. COEFICIENTES DE ATENUACIÓN DE LAS PROBETAS TRATADAS TÉRMICAMENTE A 800°C, 900°C Y 1000°C; CON PALPADORES DE 5 MHZ Y 2.25 MHZ. ....	77

## LISTA DE TABLAS

TABLA 1. COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL ACERO AISI/SAE 1020 .....	22
TABLA 2. PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ACERO AISI/SAE 1020 – TEMPLADO .....	23
TABLA 3. VARIABLES Y NIVELES PARA EL TRATAMIENTO TÉRMICO. ....	30
TABLA 4. PARÁMETROS DE OPERACIÓN DE LA CURVA CARACTERÍSTICA. APÉNDICE V [23] .....	31
TABLA 5. NUMERO DE REPLICAS .....	32
TABLA 6. COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS PROBETAS DE ACERO AISI/SAE 1020, POR MEDIO DE UN ESPECTRÓMETRO DE VACÍO TERMO JARREL ASH .....	34
TABLA 7. TEMPERATURAS, TIEMPO Y NÚMERO DE PROBETAS DEL TRATAMIENTO TÉRMICO DE TEMPLE .....	37
TABLA 8. VELOCIDAD LONGITUDINAL ULTRASÓNICA PROBETA PATRÓN ..	44
TABLA 9. VELOCIDAD LONGITUDINAL ULTRASÓNICA 800°C .....	45
TABLA 10. VELOCIDAD LONGITUDINAL ULTRASÓNICA 900°C .....	47
TABLA 11. VELOCIDAD LONGITUDINAL ULTRASÓNICA 1000°C .....	49
TABLA 12. MICRODUREZA PROBETA PATRÓN. ....	66
TABLA 13. MICRODUREZA PROBETA TRATADA TÉRMICAMENTE 800°C.....	67
TABLA 14. MICRODUREZA PROBETA TRATADA TÉRMICAMENTE 900°C.....	68
TABLA 15. MICRODUREZA PROBETA TRATADA TÉRMICAMENTE 1000°C....	69
TABLA 16. METALOGRAFÍAS PROBETAS DE ACERO AISI/SAE 1020 TRATADAS TÉRMICAMENTE .....	71
TABLA 17. VELOCIDAD ULTRASÓNICA PROMEDIO PROBETA PATRÓN. ....	73
TABLA 18. VELOCIDAD ULTRASÓNICA (M/S) PROMEDIO PROBETAS TRATADAS TÉRMICAMENTE .....	73

## LISTA DE ECUACIONES

ECUACIÓN 1. PARÁMETRO DE NO CENTRALIDAD .....	30
ECUACIÓN 2. NÚMERO DE PROBETAS .....	33
ECUACIÓN 3. PUNTO CRÍTICO AC3 .....	37
ECUACIÓN 4. TIEMPO DE ESCALONAMIENTO .....	38

## 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los materiales ferrosos, específicamente los aceros AISI SAE 1020 son aceros de bajo contenido de carbono, utilizados para la fabricación de piezas estructurales o de maquinaria con una resistencia mediana; este acero es templado comúnmente para aumentar sus propiedades mecánicas de dureza y resistencia al desgaste.

Debido a su característica de templabilidad, el material sufre cambios microestructurales generando estructuras tipo martensíticas dependiendo de la temperatura crítica superior y del medio de enfriamiento<sup>1</sup>.

A nivel de la utilización de las técnicas no destructivas como el ultrasonido, no se conoce los patrones de esas señales ultrasónicas evidenciadas en los espectros, a nivel de un material en estado de entrega y de un material tratado térmicamente.

Las experimentaciones con la técnica de ultrasonido para determinar dichos cambios, como procedimiento de caracterización de materiales, no son muy utilizadas en la industria Colombiana que hace uso de esta técnica.

Por tal motivo, la información de las señales ultrasónicas no es suficiente, por lo que se requiere una correlación entre dichas señales, con ensayos metalográficos y de ser posible con perfiles de dureza.

---

<sup>1</sup> CARRANZA, Alberto. Tratamientos térmicos del acero. Unidad II, 2011.

## 2. INTRODUCCIÓN

Los aceros son una aleación de hierro carbono-manganeso que contienen otros aleantes o impurezas, estos a la vez originan las características principales para su aplicación. El acero AISI/SAE 1020 constituye una proporción importante de los aceros producidos en las plantas siderúrgicas de Colombia, dentro de las cuales encontramos Acerías Paz del Río, Siderúrgica de Caldas S.A, Siderúrgica de Occidente, Diaco S.A, entre otras.<sup>2</sup>

Debido a que son aceros altamente utilizados en nuestro país, la investigación pretende someter al acero grado ingeniería AISI/SAE 1020 a un tratamiento térmico de temple a temperaturas de 800°C, 900°C Y 1000°C bajo condiciones controladas y correlacionar las onda ultrasónicas, la microestructura y la dureza del material luego del tratamiento térmico.

Tomando como referencia proyectos de investigación que muestran un análisis y una caracterización de materiales por medio de la técnica de ultrasonido, se evidencia una serie de resultados que permiten determinar cómo cambia la señal ultrasónica de un material a medida que es sometido a algún tratamiento térmico, como es el caso de la investigación realizada por estudiantes de la facultad de ingeniería de la Universidad Libre.

---

<sup>2</sup> CÍA. GENERAL DE ACEROS S.A. SAE 1020 Y SAE 1045. Aceros ingeniería al carbono.

### 3. JUSTIFICACIÓN

Esta investigación pretende someter al acero grado ingeniería AISI/SAE 1020 a un estudio ultrasónico, el cual relacione las ondas ultrasónicas con las metalografías obtenidas luego de realizado el tratamiento térmico de temple.

Se pretende generar un mayor conocimiento en el campo del ultrasonido, en función del comportamiento de las señales ultrasónicas y su correlación a nivel microestructural por el sometimiento a diferentes temperaturas tales como 800°C, 900°C y 1000°C, donde se garantiza las transformaciones de las fases del material en estado entrega.

## 4. OBJETIVOS

### 4.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar la influencia de la temperatura en la microestructura del acero AISI/SAE 1020 y determinar los cambios ultrasónicos antes y después de aplicado el tratamiento térmico.

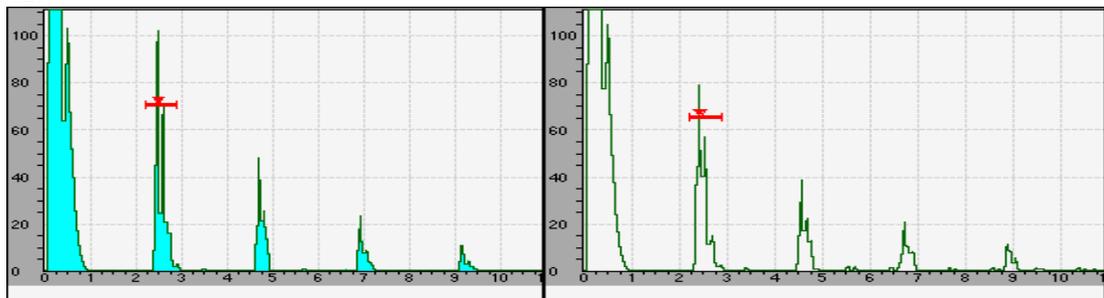
### 4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Examinar la relación existente entre la velocidad ultrasónica del acero en estado de entrega y a temperaturas de temple de 800°C, 900°C y 1000°C.
  
- Analizar la relación existente entre las señales ultrasónicas con la microestructura obtenida a través del estudio metalográfico.
  
- Analizar la relación existente entre la microestructura del material y los perfiles de microdureza.

## 5. ANTECEDENTES

La técnica de ultrasonido es una de las más comunes y útiles en los Ensayos no Destructivos aplicada a la defectología, medición de espesores, o para realizar una inspección. Por este motivo en 2013 se realizó una investigación por parte de (DIAZ, María y HERNANDEZ, Hernan) titulado “*Análisis microestructural y ultrasónico del acero ASTM a 131 DH32 para aplicaciones navales, tratado térmicamente por medio de temple a 900°C, 950°C y a 1000°C*”, en el cual se tomó un acero de aplicaciones navales se calentó a diferentes temperaturas de temple y se varió su tiempo de permanecía en dicho calentamiento, luego se tomaron señales ultrasónicas, donde se llegó a la conclusión que la velocidad ultrasónica longitudinal fue inicialmente mayor en las probetas tratadas a comparación con la probeta patrón, sin embargo a medida que el tiempo de sostenimiento del tratamiento se iba haciendo mayor, estas tendieron a quedar igual o incluso a estar por debajo de la velocidad de la probeta patrón como lo muestra la figura 1, esto debido a que el grano de mayor tamaño influencia directamente la onda, creándose un espacio entre límites de grano mayores a los tratamientos más cortos.<sup>3</sup>

Figura 1. Espectros ultrasónicos de la probeta patrón y la probeta tratada térmicamente a 1000°C y 2 horas de permanencia, a una Frecuencia de 2,25 MHz.



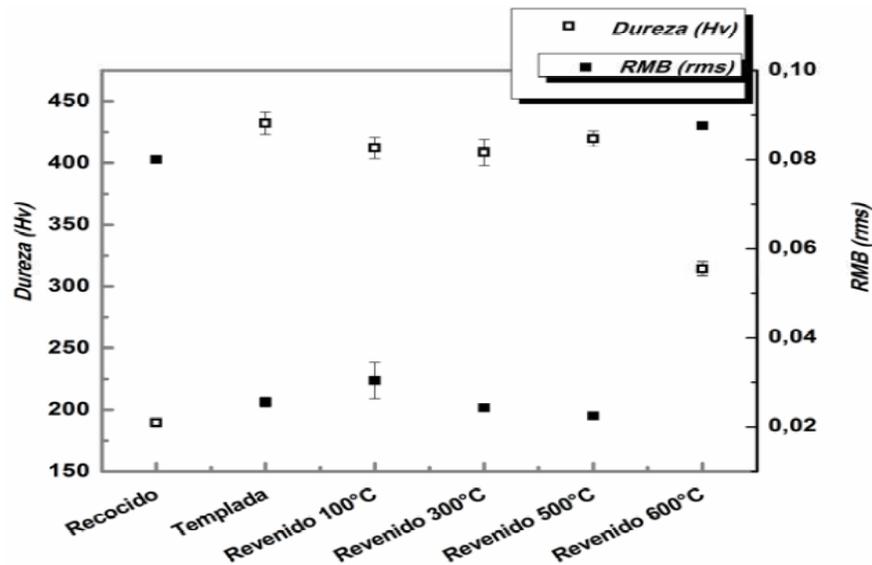
Fuente. DIAZ, María y HERNANDEZ, Hernán. Análisis microestructural y ultrasónico del acero ASTM A 131 DH32 para aplicaciones navales, tratado térmicamente por medio de temple a 900°C, 950°C. Tesis de Pregrado. Bogotá D.C.: Universidad Libre. Facultad de Ingeniería, 2013.

Luego de los tratamientos termicos, en muchos casos se hace necesario un analisis microestructural del material. Para ello se formulo una investigación en 2010 desarrollada por (MEDINA,R y SERNA,C.), titulado “*Evaluación*

<sup>3</sup> DIAZ, María y HERNANDEZ, Hernán. Análisis microestructural y ultrasónico del acero ASTM A 131 DH32 para aplicaciones navales, tratado térmicamente por medio de temple a 900°C, 950°C. Tesis de Pregrado. Bogotá D.C.: Universidad Libre. Facultad de Ingeniería, 2013.

*microestructural del acero inoxidable martensítico AISI-SAE 420 sometido a tratamientos térmicos*”, este estudio evaluó la respuesta del acero inoxidable martensítico AISI-SAE 420 a diferentes tratamientos térmicos de temple utilizando dos temperaturas de austenización 1020°C y 1050°C, dos medios de enfriamiento aire y aceite y manteniendo el tiempo de permanencia a cada temperatura constante por 30 minutos para todos los ensayos, también se estudió la respuesta de los diferentes temple sometidos a un mismo tratamiento de revenido de 200°C, con tiempo de sostenimiento constante de dos horas. Luego del estudio experimental concluyeron que para el acero inoxidable martensítico AISI-SAE 420 es mayor el efecto sobre la microestructura y la dureza, ocasionado por la temperatura de austenización que por el medio de enfriamiento y que los revenidos a 200°C sobre los diferentes temple del acero AISI-SAE 420 causan una disminución de la dureza, ver figura 2.<sup>4</sup>

Figura 2. Comparación entre el ruido magnético (RMB) y la dureza Vickers (Hv).



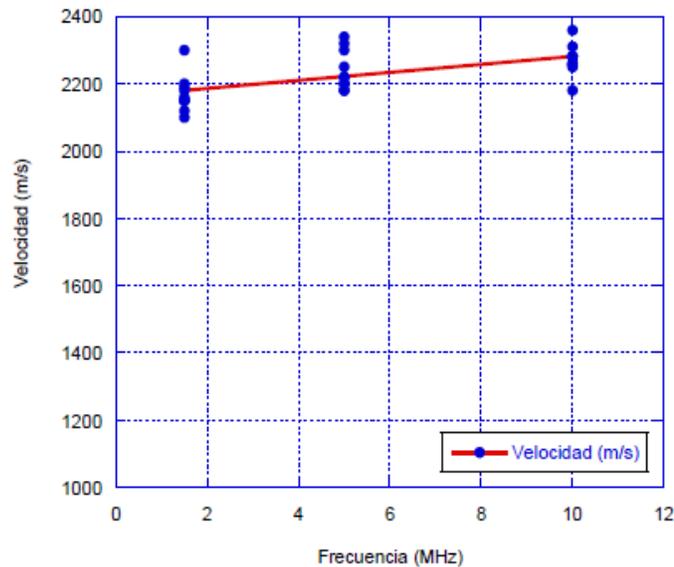
Fuente. MEDINA, R. y SERNA, C. Evaluación microestructural del acero inoxidable martensítico ANSI 420 sometido a tratamientos térmicos. 2010.

El análisis ultrasónico es usado generalmente en la industria para controles de calidad e integridad de materiales. En 2009 se desarrolló una investigación por (VALENCIA, Jorge) titulada “*Caracterización mediante técnicas de ultrasonido de un laminado de fibra de vidrio*”, en el cual se sometió un vidrio de matriz de poliéster y se determinó la velocidad de propagación de las ondas ultrasónicas en el espesor del material. Donde concluyeron que la inspección ultrasónica resulta

<sup>4</sup> MEDINA, R. y SERNA, C. Evaluación microestructural del acero inoxidable martensítico ANSI 420 sometido a tratamientos térmicos. 2010.

más sencilla para inspeccionar materiales teóricamente homogéneos o isotrópicos que para inspeccionar materiales compuestos, ya que estos poseen una estructura anisótropa que produce reflexiones que se confunden con las reflexiones características del ensayo, también que en estos materiales al aumentarle su frecuencia a la onda aumenta la velocidad de propagación así como lo muestra la figura 3.<sup>5</sup>

Figura 3. Curva de velocidad.



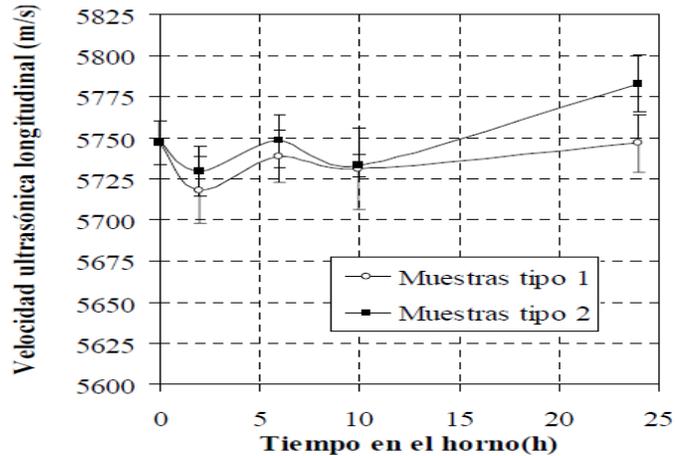
Fuente. VALENCIA, Jorge. Caracterización mediante técnicas de ultrasonido de un laminado de fibra de vidrio. 2009.

Las técnicas de tratamientos térmicos ofrecen una mejora en algunas propiedades mecánicas y la alteración de otras. En 2009 desarrollaron (ZAMBRANO, J; RODRIGUEZ, E y PEREIRA, J.) Una investigación titulada “*Caracterización de muestras planas de acero inoxidable austenítico 316L mediante espectroscopia ultrasónica*”, para lo cual trataron térmicamente las placas y a través de microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido obtuvieron señales de ultrasónicas que fueron procesadas mediante el matlab 7.2. Las cuales arrojaron que debido al crecimiento del grano a raíz del tratamiento térmico y el tiempo de permanencia las velocidades ultrasónicas longitudinales tenían resultados

<sup>5</sup> VALENCIA, Jorge. Caracterización mediante técnicas de ultrasonido de un laminado de fibra de vidrio. 2009.

dispersos y con gran atenuación así como lo muestra la figura 4, para lo cual se establecieron frecuencias recomendadas.<sup>6</sup>

Figura 4. Variación de la velocidad ultrasónica en función del tiempo en el horno, palpador de 2,25 MHz.



Fuente. Zambrano, J.; RODRIGUEZ, E. y PEREIRA, J. Caracterización de muestras planas de acero inoxidable austenítico 316 L mediante espectroscopia ultrasónica. 2009.

Las ondas ultrasónicas de los materiales son diferentes una de otra. Para lo cual en 2007 se desarrolló una investigación por (SANCHEZ, Hugo; SANCHEZ, Edmundo y SARAHI, Raquel) titulada “*Detección de materiales mediante ultrasonido*”, donde diseñaron un método que consiste en enviar una señal ultrasónica desde un transductor ultrasónico hacia el material y procesar la señal de eco en frecuencia mediante la transformada discreta de Fourier (DFT). Este análisis del espectro en frecuencia proporciona las características propias del material e identificó plenamente materiales como vidrio, madera, lámina de cobre, acrílico y plástico.<sup>7</sup>

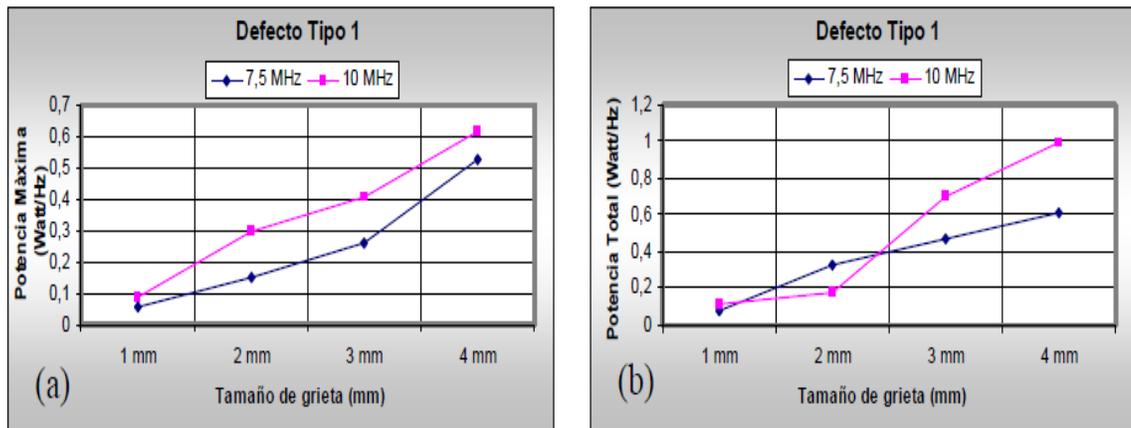
Por otro lado en 2007 se realizó una investigación por parte de (RODRÍGUEZ, Edda y MARTIN, Alvaro.), titulada “*Evaluación de defectos inducidos en probetas de aluminio a través de métodos convencionales y no convencionales de inspección ultrasónica*”, en este caso se tomaron probetas de aluminio, se evaluó lo susceptible de estas a mecanismos de fallas por grietas formadas a consecuencia de esfuerzos, con el fin de generar patrones de referencia que

<sup>6</sup> Zambrano, J.; RODRIGUEZ, E. y PEREIRA, J. Caracterización de muestras planas de acero inoxidable austenítico 316 L mediante espectroscopia ultrasónica. 2009.

<sup>7</sup> SANCHEZ, Hugo; SANCHEZ, Edmundo y SARAHI, Raquel. Detección de materiales mediante ultrasonido. 2007.

podrán ser utilizados en la evaluación de este tipo de piezas por técnicas ultrasónicas, para lo cual se fabricaron probetas de aluminio 6063T5 con entallas de diversos tamaños obtenidos a través de procesos de mecanizado, que actuaron como reflectores de referencia. Como conclusión se determinó que los espectros de potencia muestran comportamientos muy particulares en este tipo de material y que varían de acuerdo a la frecuencia del palpador utilizado como lo muestra la figura 5, lo que permite establecer las frecuencias recomendadas en la detección y ubicación de cada tipo de defecto en cada una de las probetas evaluadas además se pudo observar en los espectros de potencia, que la potencia máxima de los mismos aumenta a medida que aumenta el tamaño del reflector. Por otro lado, se aprecia un aumento en la potencia total a medida que aumenta el tamaño del reflector.<sup>8</sup>

Figura 5. Valores de potencia máxima y potencia total en cada uno de los espectros del tipo de defecto en las probetas de aluminio 6063T5.



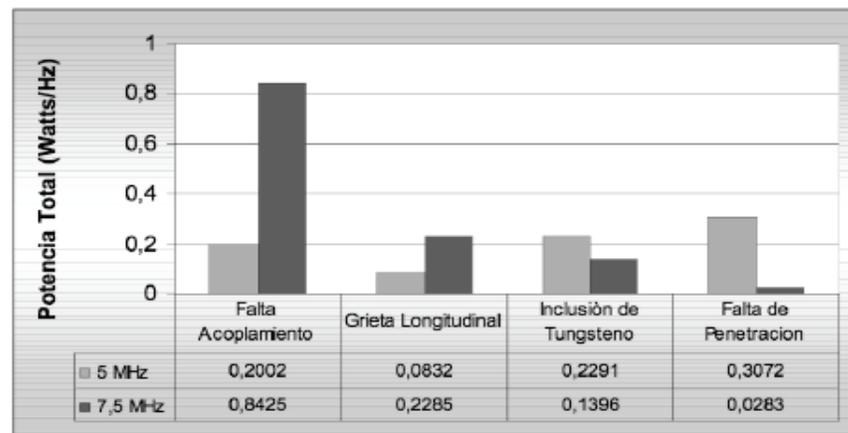
Fuente. RODRIGUEZ, Edda y MARTIN, Álvaro. Evaluación de defectos inducidos en probetas de aluminio a través de métodos convencionales y no convencionales de inspección ultrasónica. 20007.

Los patrones ultrasónicos de los materiales son indispensables para correlacionar los defectos de dicho patrón con los defectos encontrados en la pieza que se va a caracterizar. En 2006 se hizo una evaluación por parte de (RODRIGUEZ, Edda), el cual nombró "Evaluación de defectos inducidos en probetas de acero ANSI 304 a través de métodos convencionales y no convencionales de inspección ultrasónica", en esta investigación se tomaron probetas soldadas del acero y por medio de inspección ultrasónica se observaron los defectos característicos del proceso de soldadura TIG, se llevaron los resultados a Matlab 6.5, en este

<sup>8</sup> RODRIGUEZ, Edda y MARTIN, Alvaro. Evaluación de defectos inducidos en probetas de aluminio a través de métodos convencionales y no convencionales de inspección ultrasónica. 20007.

programa se procesaron los datos, los datos procesados generaron espectros de amplitud, de densidad de potencia espectral, potencia total y ancho de banda. Determinando los espectros de amplitud y potencia que muestran comportamientos muy particulares en estos materiales y que varían de acuerdo a la frecuencia el palpador utilizado como lo indica la figura 6, lo que permite establecer las frecuencias recomendadas en la detección y ubicación de cada tipo de defecto en cada una de las probetas evaluadas.<sup>9</sup>

Figura 6. Valores de potencia total en cada uno de los defectos generados en las probetas de acero AISI 304.



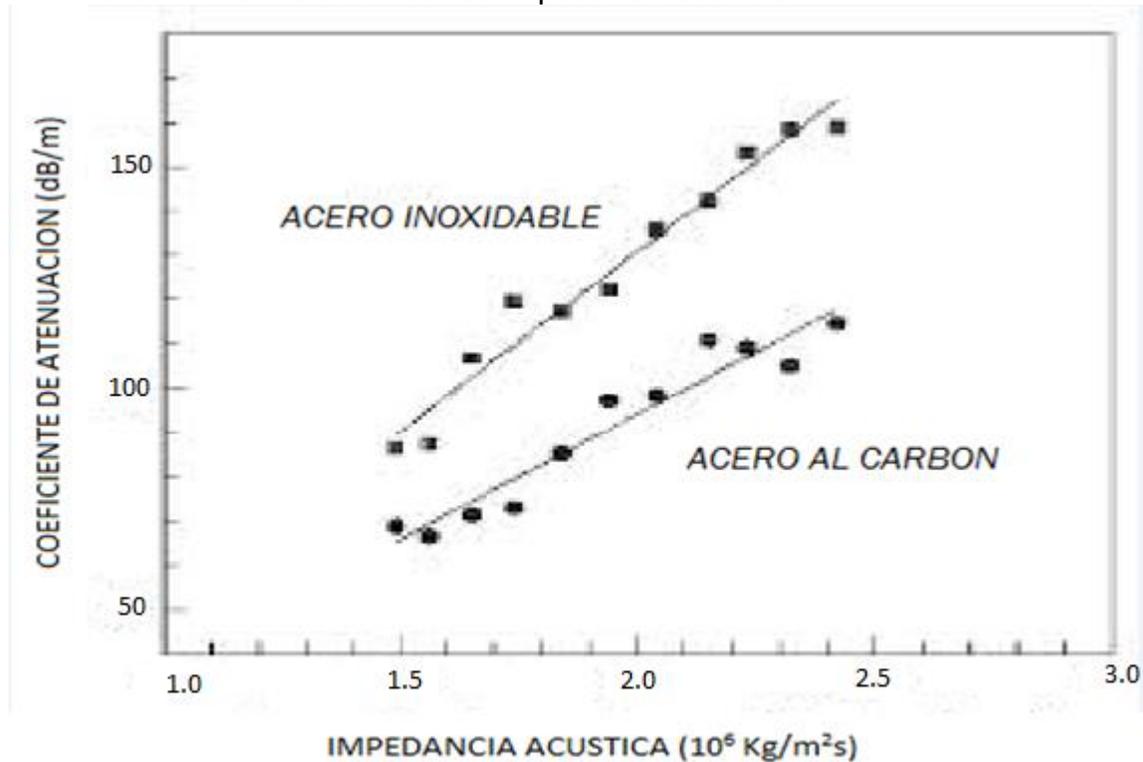
Fuente. RODRIGUEZ, Edda. Evaluación de defectos inducidos en probetas de acero ANSI 304 a través de métodos convencionales y no convencionales de inspección ultrasónica. 2006.

La inspección y evaluación de materiales mediante el método no destructivo ultrasónico se ha convertido en una herramienta muy útil y sensible para determinar las propiedades acústicas de los mismos. Por tal razón se llevó a cabo un proyecto en 2004 a cargo de (BUI TRAGO, Brenda; IRAUSQUÍN, Ignasion y MENDOZA, Johnny), titulada “*Ultrasonic velocity and attenuation in carbon steel specimens*”, donde se tomó medición de la velocidad ultrasónica longitudinal y la estimación de atenuación ultrasónica para tres muestras de acero al carbono. Esta caracterización ultrasónica se hizo mediante la técnica pulso-eco de contacto directo utilizando transductores de 0,375” (9,525 mm) de diámetro con frecuencias centrales de 1,5; 2,25; 5; 7,5 y 10 MHz, además de glicerina como medio acoplante. Como resultado se llegó a que las muestras de acero SAE 1020, SAE 1030 y SAE 1040, presentaron valores promedios de velocidad de  $5892,2 \pm 1,9$  m/s,  $5933,6 \pm 4,2$  m/s y  $5975,8 \pm 4,4$  m/s, respectivamente, el valor de la velocidad

<sup>9</sup> RODRIGUEZ, Edda. Evaluación de defectos inducidos en probetas de acero ANSI 304 a través de métodos convencionales y no convencionales de inspección ultrasónica. 2006.

es proporcional al porcentaje de carbono en la aleación y el coeficiente de atenuación aumenta en la medida en que se incrementa el porcentaje de carbono en la aleación como se muestra en la figura 7. En todos los casos el coeficiente de atenuación se incrementó de manera proporcional a la frecuencia central del transductor.<sup>10</sup>

Figura 7. Valores del coeficiente de atenuación (dB/m) de un acero inoxidable y un acero al carbón en relación con su impedancia acústica.



Fuente. BUITRAGO, Brenda; IRAUSQUÍN, Ignasion y MENDOZA, Johnny. Ultrasonic velocity and attenuation in carbón steel specimens. 2004.

<sup>10</sup> BUITRAGO, Brenda; IRAUSQUÍN, Ignasion y MENDOZA, Johnny. Ultrasonic velocity and attenuation in carbón steel specimens. 2004.

## 6. MARCO REFERENCIAL

### 6.1 MARCO TEÓRICO

6.1.1 Acero AISI/SAE 1020 Es un acero de bajo carbono que puede utilizarse en estados de templado, cementado, revenido o en estado de calibrado. Debido a su contenido de carbono estos aceros se utilizan en la fabricación de piezas estructurales o de maquinaria de una resistencia mediana con gran tenacidad. Tiene un alto índice de soldabilidad.<sup>11</sup>

Usos: Se usa principalmente para partes que no estén sometidas a grandes esfuerzos mecánicos como ejes, cadenas, remaches, tornillos, pernos, sujetadores, engranajes, piñones, piezas de maquinaria, pasadores de baja resistencia, prensas y levas.

La tabla 1. Muestra la composición química del acero AISI/SAE 1020, según sus fabricantes.

Tabla 1. Composición química del acero AISI/SAE 1020

<b>Composición Química (%)</b>	
<b>C</b>	0,18 - 0,23
<b>Mn</b>	0,30 - 0,60
<b>Si (máx.)</b>	0,15 - 0,35
<b>P (máx.)</b>	0,04
<b>S (máx.)</b>	0,05

Fuente. BRINGAS, John E. Handbook of comparative world steel standards. USA: ASTM DS67B3. Ed 3.

La tabla 2. Muestra las propiedades mecánicas del acero AISI/SAE 1020, en estado de suministro (templado)

---

<sup>11</sup> CÍA. GENERAL DE ACEROS S.A. SAE 1020 Y SAE 1045. Aceros ingeniería al carbono.

Tabla 2. Propiedades mecánicas del acero AISI/SAE 1020 – Templado

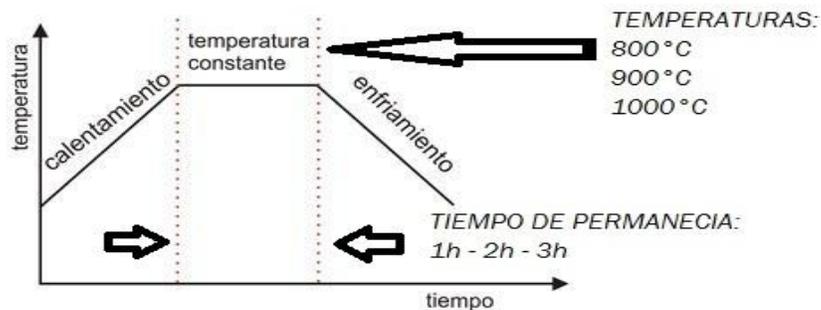
<b>PROPIEDADES MECÁNICAS</b>	
<b>TEMPLADO</b>	
Resistencia a la tracción	686 – 833 MPa
Límite de fluencia	441 MPa
Alargamiento	15%
Reducción de Área	45%
Maquinabilidad	55%
Dureza (HB)	-

Fuente. BRINGAS, John E. Handbook of comparative world steel standards. USA: ASTM DS67B3. Ed 3.

6.1.2 Tratamientos térmicos Los tratamientos térmicos son un proceso mediante el cual un material se somete a calentamientos y enfriamientos que afectan de manera permanente o parcial su estructura, este cambio estructural modifica las propiedades mecánicas. El tratamiento térmico no modifica la composición química de los materiales sometidos, pero si afecta los constituyentes estructurales y la granulometría.

Dentro de sus finalidades está la mejora en la resistencia y la dureza; aliviar los efectos del endurecimiento por deformación y ablandar el metal para formarlo con mayor facilidad. Los tipos de tratamientos más comunes son el recocido, temple y revenido. En un tratamiento térmico normalmente se tienen tres etapas que se observan en la figura 8.

Figura 8. Etapas de un tratamiento térmico.



Fuente. Autor del proyecto.

Calentamiento hasta una temperatura fijada  
Permanencia en la temperatura fijada  
Enfriamiento

6.1.3 Tratamiento de temple Es un tratamiento térmico que tiene como propósito aumentar la resistencia y la dureza mecánica de un material, transformando la totalidad de su constituyente en austenita con el aumento de la temperatura y posteriormente por medio de un enfriamiento convertir esa Austenita en Martensita, que es finalmente el componente típico de un material templado.<sup>12</sup>

En un temple tanto el calentamiento como el enfriamiento deben ser óptimos y controlados, para obtener Martensita y los valores de resistencia y dureza requeridos. La templabilidad (capacidad de un acero a ser templado) de un material depende fundamentalmente de su diámetro o espesor y de su calidad (composición química).

6.1.4 Metalografía Es una disciplina de la ciencia que tiene como fin examinar y determinar los constituyentes de un material, haciendo uso de variaciones de magnificación que pueden estar en un rango de 20x a 1.000.000x. El estudio metalográfico comprende en gran medida la observación de granos, su dirección, su tamaño y los constituyentes de los mismos. El estudio metalográfico puede dividirse en dos grandes ramas: Análisis Macroscópicos y Análisis Microscópicos.<sup>13</sup>

Para la evaluación de las muestras se hace necesario preparar la superficie a evaluar por medio de un pulido metalográfico, posteriormente atacar químicamente con el fin de hacer visibles las características del material para finalmente realizar una inspección visual por medio de un microscopio metalográfico que permita observar la formación del grano y su microestructura cristalina presente dentro de ellos.

6.1.5 Ensayos No Destructivos (END) Son disciplinas tecnológicas basadas en campos de energía para ensayos de materiales, sin afectar la forma original del elemento sometido al ensayo; tienen como propósito fundamental detectar

---

<sup>12</sup> Tratamientos térmicos: protocolo. Escuela Colombiana de ingeniería Julio Garavito. [en línea]. <<http://copernico.escuelaing.edu.co/lpinilla/www/protocols/MATE/TRATAMIENTO%20TERMICO%20rev1.pdf>> [citado en 2008].

<sup>13</sup> Metalografía: protocolo. Escuela Colombiana de ingeniería Julio Garavito. [en línea]. <[http://www.escuelaing.edu.co/uploads/laboratorios/7643\\_metalografia.pdf](http://www.escuelaing.edu.co/uploads/laboratorios/7643_metalografia.pdf)> [citado en 2011].

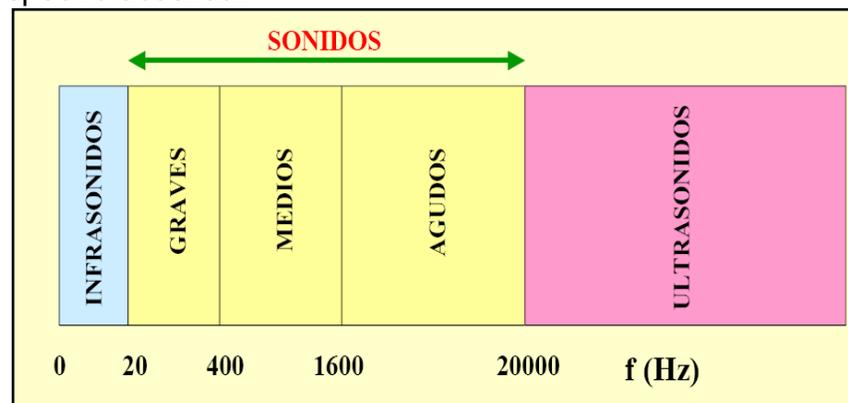
discontinuidades superficiales e internas que estén presentes en materiales, soldaduras, componentes y partes fabricadas.<sup>14</sup>

Los ensayos no destructivos se realizan mediante procedimientos escritos, con el fin de atender los requerimientos que los códigos y normas (ASME, ASTM, API y AWS entre otras) sugieren para su validez.

Los END más comunes utilizados por la industria, se clasifican según su alcance en la detección de fallas, como primer parámetro se encuentran los ensayos de discontinuidades superficiales (ensayos de líquidos penetrantes, ensayos de partículas magnéticas, entre otros), como segundo parámetro están los ensayos de discontinuidades internas (ensayo radiográfico, ensayo ultrasónico, entre otros).

6.1.6 Ensayo Ultrasónico Se conoce por ultrasonido aquellas ondas mecánicas que oscilan en frecuencias por encima de la gama audible (superior a 20.000 Hz) ver figura 9. Los equipos utilizados para la ejecución de estas técnicas debe ser capaz de generar, emitir y captar haces de ondas muy bien definidas, sujetas a las leyes de reflexión mientras se propagan.

Figura 9. Espectro acústico.



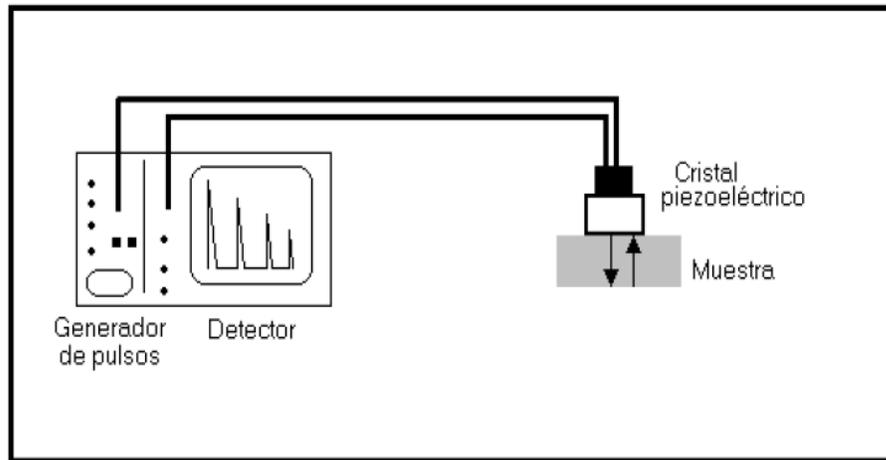
Fuente. Espectro Audible. [Fotografía]. [en línea].  
<<http://humanifestation.blogspot.com/2010/09/documentacaodiarioparte03.html>>  
[citado el 18 de septiembre de 2010].

Los ensayos mediante técnicas de ultrasonido emiten un haz sónico de alta frecuencia (125 KHz a 20 MHz) el cual es introducido en el material a inspeccionar con el objetivo de detectar discontinuidades internas y superficiales. El sonido que recorre el material es reflejado por las interfaces y es detectado para determinar

<sup>14</sup> ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS (END) - Nondestructive Testing (NDT). [en línea].  
<[http://www.thermoequipos.com.ve/mostrar\\_tips.php?IdT=8](http://www.thermoequipos.com.ve/mostrar_tips.php?IdT=8)> [citado en febrero de 2006].

en donde se localiza la discontinuidad gracias a su principio basado en ondas mecánicas vibratorias que requieren que las partículas del medio ya sea líquido, aire o solido oscilen alrededor de sus posiciones de equilibrio. En la detección de discontinuidades la principal herramienta de la técnica ultrasónica es el palpador o sonda tal como se muestra en la figura 10.<sup>15</sup>

Figura 10. Esquema de la técnica de ultrasonido.



Fuente. Esquema de la técnica de ultrasonido. [Fotografía]. VALENCIA, Jorge. Caracterización mediante técnicas de ultrasonido de un laminado de fibra de vidrio. 2009.

6.1.6.1 Tipos de ondas ultrasónicas Los materiales con propiedades elásticas son utilizados en la propagación de ondas sónicas y ultrasónicas, debido a que estos materiales utilizan las fuerzas elásticas para retraer las partículas a una posición inicial (reposo). En objetos que poseen una estructura cristalina (metales solidos) las partículas que están en la red cristalina pueden ser desplazadas de sus posiciones de equilibrio oscilando con trayectorias diversas, dependiendo de la energía mecánica originada, presentando distintos tipos de ondas ultrasónicas:

- Ondas transversales
- Ondas longitudinales
- Ondas Lamb
- Ondas superficiales

Ondas transversales: Una onda transversal tiene un movimiento de oscilación y una dirección de propagación con una diferencia de fase de  $90^\circ$  (Perpendicular),

<sup>15</sup> NONDESTRUCTIVE TESTING HANDBOOK. Ultrasonic testing. 2 Ed. USA: ASM Metals HandBook Volumen 7. ASM INTERNATIONAL, 1991.

esta onda cuando se junta el nodo con la cresta crea la vibración, esto se puede constatar en los materiales sólidos cuando el haz ultrasónico irrumpe en el material con un ángulo ( $0^\circ < \phi < 90^\circ$ ) respecto de la superficie manteniendo una dirección que si se compara con la magnitud del desplazamiento en instantes sucesivos se aprecia el avance de la onda. Transcurrido un tiempo X, la persistencia de la traza muestra como todos los puntos pasan por todos los estados de vibración.

Ondas longitudinales: Se tienen ondas longitudinales cuando la dirección en que oscilan las partículas es paralela con la dirección de propagación del haz de onda. Hay medios donde solo es posible la propagación de estas ondas (líquidos y gases) si la onda ultrasónica incide paralelamente a la superficie, la propagación del haz dentro del material provocará la oscilación de las partículas alrededor de su posición de equilibrio pero en la misma dirección de propagación.

Ondas Lamb: Las ondas de Lamb se propagan en sentido paralelo al de la superficie del material y en la dirección del impulso recibido, estas ondas se obtienen en láminas delgadas y también en tubos cuyos espesores son aproximadamente del orden de la longitud de onda y en materiales con espesores comprendidos entre 0,1 y 30 mm, en los cuales intervienen en la propagación del haz ultrasónico.

Ondas superficiales: Estas ondas se presentan cuando la propagación del haz toma la superficie del material en su desplazamiento siguiendo la forma del cuerpo, con la dificultad que si el cuerpo tiene cambios en su perfil muy bruscos no continúa con su propagación. Las ondas superficiales son ondas bidimensionales, es decir, se propagan en dos direcciones. Su nombre, onda superficial, se debe a que pueden propagarse en cualquiera de las dos direcciones de una superficie.

## 6.2 MARCO CONCEPTUAL

Acero: Aleación hierro- carbono, con un contenido de carbono variable.

Amplitud de la oscilación: Desplazamiento máximo de una partícula desde su posición cero o de equilibrio.

Ataque Químico: Consiste en hacer visibles las características estructurales del material a tratar.

Austenita: Forma de ordenamiento distinta de los átomos de hierro y carbono.

Diagrama TTT (temperatura-tiempo-transformación): Este tipo de diagrama muestra cómo la velocidad de enfriamiento afecta la transformación de Austenita en varias fases posibles.

Discontinuidad: Región de un cuerpo no acorde a su forma original.

Dureza: Oposición que ofrecen los materiales a ser penetrado.

Durómetro: Instrumento desarrollado para determinar la dureza de materiales.

Frecuencia: Número de oscilaciones por segundo de una partícula dada, dentro de una misma onda.

Granulometría: Medición y graduación que se lleva a cabo de los granos de una formación sedimentaria, de los materiales sedimentarios para analizarlos.

Horno Eléctrico: Dispositivo que se calienta por electricidad, empleado en la industria para fundir metales y cerámicas.

Impedancia acústica: Resistencia del medio a la vibración acústica de las partículas.

Longitud de onda: Distancia entre dos puntos en los que las partículas se encuentran en el mismo estado de movimiento.

Maquinado: Uso de herramientas con filos de diferentes formas, ejemplo torneado y fresado.

Martensita: Es el nombre que recibe la fase cristalina BCT, en aleaciones ferrosas.

Microscopio metalográfico: Instrumento para la realización de un examen metalográfico.

Onda sónica: frecuencia entre 16 y 20000 ciclos por segundos.

Onda ultrasónica: frecuencias mucho mayores de 20000 ciclos por segundos.

Presión acústica: Se conoce como amplitud de la presión acústica y está íntimamente ligada con la amplitud de la oscilación.

Pulido Metalográfico: Consiste en llevar la superficie de un material a un brillo espejo.

Pulidora: Elemento utilizado para dar el acabado final a la superficie objeto de estudio, haciendo uso de lijas y paños especializados.

Rectificado: Arreglo de partículas abrasivas fijas que actúan como herramientas de corte.

Reflexión: Cambio de dirección de una onda magnética, que al estar en contacto con la superficie de separación entre dos medios cambiantes, de tal forma que regresa al medio inicial.

Velocidad acústica: Velocidad de propagación de la onda para una condición dada. Esta velocidad es una característica del material.<sup>16</sup>

### 6.3 MARCO METODOLÓGICO

Para alcanzar los objetivos propuestos en el proyecto se hace necesario:

Recopilación Bibliográfica: Se hace necesario iniciar con una investigación que tomará en principio los campos de interés en los que está enfocado el proyecto con el fin de adquirir un conocimiento muy detallado del tema de la investigación, en esta etapa se tendrá en cuenta los antecedentes, los métodos y el presupuesto necesario para el proyecto; así como también la justificación de la necesidad de la investigación.

Diseño Experimental: Consiste en definir las variables a tener en cuenta en el proyecto y la cantidad de probetas necesarias.

---

<sup>16</sup> REAL ACADEMIA ESPAÑOLA. [en línea]. < <http://rae.es/recursos/diccionarios/drae>>.

Adquisición y Alistamiento del Material: La compra y obtención de la ficha técnica por parte del fabricante del material, arreglos geométricos y alistamiento de las probetas a utilizar.

Composición Química: Esta actividad permitirá comparar la ficha técnica del fabricante y la ficha según la literatura.

Calibración y Verificación de los Equipos: Para las actividades que se desarrollan en la investigación se requiere los siguientes equipos el horno, la empastilladora, microscopio metalográfico, equipo de análisis de la microestructura, durómetro y micro durómetro, equipo ultrasónico y palpadores.

Tratamiento Térmico: El tratamiento térmico debe estar sujeto a las variables que en el diseño factorial se escogiese, luego se someterán las probetas tratadas térmicamente y las que no fueron tratadas a pruebas a un análisis con el fin de comparar las velocidades y espectros ultrasónicos.

Metalográficas: Observar la estructura obtenida antes y después del tratamiento térmico.

Ensayos de Microdureza y Dureza: Analizar qué tan satisfactorio fue el tratamiento térmico.

Ensayo de Ultrasonido: (velocidades y espectros)

Análisis de datos: Recopilar los datos obtenidos, analizar, caracterizar, concluir y proponer recomendaciones.

#### 6.4 MARCO NORMATIVO Y LEGAL

ASME (Sección V – Artículo 4): Este código es el compendio de los requerimientos generales y las características para que un ensayo de ultrasonido sea válido y con estándares QC/QA.

ASTM E114: Practica estándar para la técnica de ultrasonido Pulso-ECO de Contacto.

ASTM E311: Esta norma es la guía para la preparación de muestras metalográficas.

ASTM E407: Describe el método de ataque químico de una muestra de metal para revelar su microestructura.

ASTM E384: Describe el método de la prueba estándar para las pruebas de dureza de los materiales para Knoop y Vickers.

Norma NTC 1486: Esta norma rige la presentación de trabajos de grado, tesis y otros trabajos de investigación, de la cual se tomara para la presentación y planeación de las etapas del proyecto de grado, al igual que la NORMA NTC 5613.

## 7. DISEÑO EXPERIMENTAL

Para el desarrollo del proyecto se utilizará un diseño factorial  $3^k$  partiendo de la tabla 3, donde se muestra las variables y los niveles a que será sometido el acero AISI/SAE 1020.

Tabla 3. Variables y niveles para el tratamiento térmico.

ACERO AISI/SAE 1020		VARIABLE: TIEMPO		
		Tiempo 1 h (B)	Tiempo 2 h (B')	Tiempo 3 h (B'')
VARIABLE: TEMPERATURA (A)	Temperatura 800°C (A)	AB	AB'	AB''
	Temperatura 900°C (A')	A'B	A'B'	A'B''
	Temperatura 1000°C (A'')	A''B	A''B'	A''B''

Fuente: Autor del proyecto.

Las probetas de acero AISI/SAE 1020 estarán sometidas a tres temperaturas y a tres tiempos de permanencia, teniendo dos factores y cada factor con 3 niveles. Para determinar el número de réplicas en un diseño experimental factorial se puede emplear las curvas de operación característica, encontrando un parámetro de no centralidad en función del número de repeticiones por medio de la diferencia especificada entre medias. Ver ecuación 1.<sup>17</sup>

Ecuación 1. Parámetro de no centralidad

$$\phi^2 = \frac{nbD^2}{2a\sigma^2}$$

Dónde:

- $\phi$ : Cantidad relacionada con el parámetro de no centralidad.
- $\sigma$ : Desviación estándar.
- D: Diferencia en las medias.
- a: Grados de libertad numerador
- b: Grados de libertad denominador

<sup>17</sup> MONTGOMERY, Douglas C. Diseño Y Análisis De Experimentos. 2 ed. Mexico D.F.: EDITORIAL LIMUSA S.A, 2004. ISBN 968-18-6156-6

- n: Número de repeticiones.

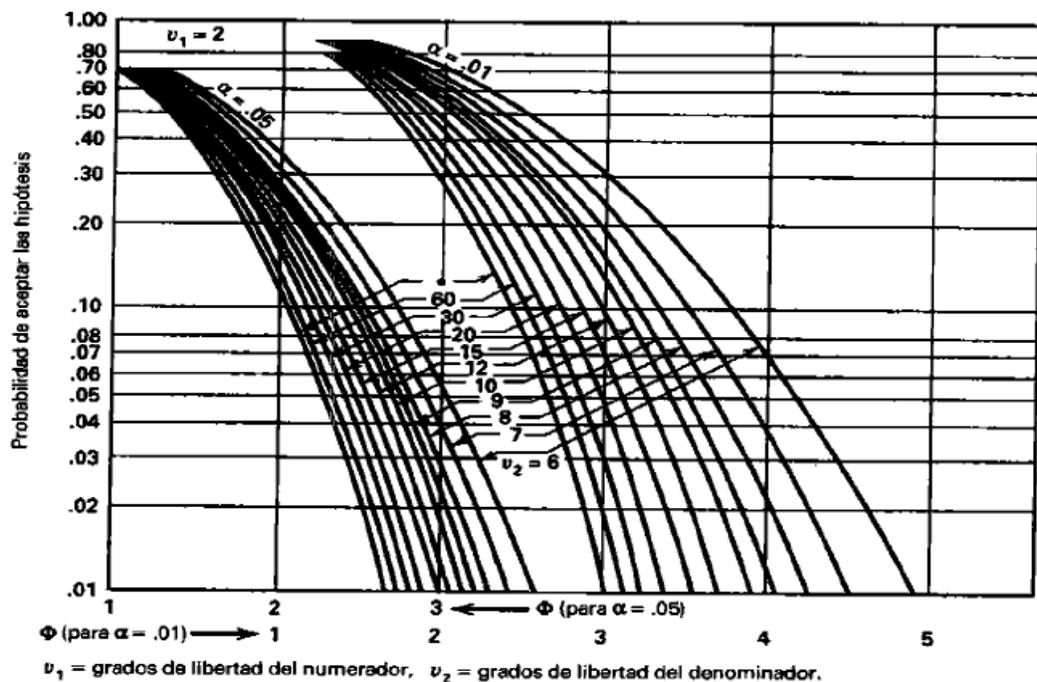
La tabla 4. Determina los parámetros de operación de la curva característica en donde encontramos los grados de libertad del numerador y los grados de libertad del denominador para determinar la probabilidad de aceptación de la hipótesis en la figura 11.

Tabla 4. Parámetros de operación de la curva característica. Apéndice V [23]

FACTOR	V1: Grados De Libertad Del Numerador	V2: Grados De Libertad Del Denominador
A	a -1	ab(n-1)
B	b -1	ab(n-1)

Fuente: MONTGOMERY, Douglas C. Diseño Y Análisis De Experimentos. 2 ed. Mexico D.F.: EDITORIAL LIMUSA S.A, 2004. ISBN 968-18-6156-6.

Figura 11. Curva característica de operación.



Fuente. MONTGOMERY, Douglas C. Diseño Y Análisis De Experimentos. 2 ed. Mexico D.F.: EDITORIAL LIMUSA S.A, 2004. ISBN 968-18-6156-6.

Tomando como referencia la investigación de (DIAZ, Maria y HERNANDEZ, Hernan) titulado "Análisis microestructural y ultrasónico del acero ASTM a 131 DH32 para aplicaciones navales, tratado térmicamente por medio de temple a 900°C, 950°C y a 1000°C", se tomó como referencia la velocidad ultrasónica

promedio a 2.25 Mhz de Frecuencia y la desviación estándar correspondientes a las temperaturas de 950 °C Y 1000 °C, con un tiempo de permanencia de 3 horas, arrojando los siguiente datos:

- Diferencia entre medias de la velocidad longitudinal ultrasónica  
 $D = 129.8 \text{ m/s}$
- Desviación estándar  
 $\sigma = 90.85$
- $a = 3(\text{grados de libertad}) - 1 = 2$
- $b = 3(\text{grados de libertad}) - 1 = 2$

Ecuación 1. Parámetro de no centralidad

$$\phi^2 = \frac{nbD^2}{2a\sigma^2}$$

$$\phi^2 = \frac{n * 2 * 129.8^2}{2 * 2 * 90.85^2}$$

$$\phi^2 = 1.02063n$$

Tabla 5. Numero de Replicas

n	$\phi^2$	$\phi$	V1:grados de libertad del numerador	V2: grados de libertad del denominador	B
2	2.04126	1.4287	2	9	0.70
3	3.06189	1.7518	2	18	0.40
4	4.08252	2.0205	2	27	0.15
5	5.10315	2.2586	2	36	0.055

Fuente: Autor del proyecto.

Para una probabilidad de rechazar la hipótesis nula del 94.5 % y teniendo la probabilidad de aceptar la hipótesis nula  $\beta = 5.5 \%$  se determina que con 5 repeticiones (tabla 5) será satisfactorio los resultados de la investigación. Con las variables involucradas en el desarrollo del proyecto definidas ahora se involucra el diseño factorial  $3^k$  determinado con el número de repeticiones para determinar el número de probetas necesarias.

## Ecuación 2. Número de Probetas

$$\text{Número de Probetas} = 3^k * n \quad \text{Ecuación N}^\circ 1$$

Donde

- *k*: Número de Variables
- *n*: Número de repeticiones

$$\text{Número de pruebas} = 3^2 * 5 = 45$$

## 8. DESARROLLO EXPERIMENTAL

### 8.1 MATERIAL

Se empleó un acero AISI/SAE 1020, con un arreglo geométrico para cada una de las probetas de 2" x 2" x ½", el cual fue sometido a un análisis químico bajo la técnica de espectrometría de emisión óptica en el centro de materiales y ensayos del SENA, con el fin de comparar la composición química del acero respecto a la composición química determinada en la literatura ver tabla 6 y figura 12, confirmando que el material corresponde a un acero AISI/SAE 1020 debido a que los valores se encuentran en el rango de composición química estándar.

Tabla 6. Composición química de las probetas de acero AISI/SAE 1020, por medio de un espectrómetro de vacío Termo Jarrel Ash

<b>Composición Química (%)</b>	
C	0,1800
Mn	0,6868
Si (máx.)	0,1588
P (máx.)	<0.0010
S (máx.)	<0.0045
Cr	0.0299
Mo	0.0331
Ni	0.1012
Cu	0.1688
V	0.0109
Nb	0.0010

Fuente. Autor del proyecto.

Figura 12. Probeta de acero AISI/SAE 1020 sometida a espectrometría de emisión óptica.



Fuente. Autor del proyecto.

## 8.2 PRUEBA PILOTO

Se realizó la prueba piloto para verificar la calibración del horno para el calentamiento de las probetas para lo cual se calentó una probeta a 1000°C con un tiempo de permanencia de 1 hora, en escalonamientos de 300°C y 25 minutos de permanencia para alcanzar un calentamiento homogéneo en la estructura y subir hasta la temperatura de 1000°C, en el horno tipo mufla de referencia M10 de marca ELEKTRO con controles y medidores digitales modelo 1968, de Termocupla tipo K, con temperatura máxima de 1250°C y un voltaje de 120 W (figura 13); posterior a esto con la probeta previamente calentada se tomó la temperatura siendo esta de 955°C, tomando una emisividad del 30% para el acero en particular con un termómetro infrarrojo de Referencia OMEGA (figura 14), dando un desfase del horno a utilizar de 45°C; teniendo en cuenta el valor de desfase de los hornos se realizaron los tratamientos de temple a 800°C, 900°C y 1000°C con una tolerancia positiva de 50°C con una permanencia de 1 hora, 2 horas y 3 horas respectivamente con un enfriamiento agresivo de salmuera con hielo con el fin de capturar la mayor parte de martensita luego del tratamiento.

Figura 13. Horno tipo mufla M10.



Fuente. Autor del proyecto con permiso del laboratorio de análisis de materiales – Facultad de Ingeniería - U. Libre.

Figura 14. Termómetro infrarrojo OMEGA.



Fuente. Autor del proyecto con permiso del laboratorio de análisis de materiales – Facultad de Ingeniería - U. Libre.

### 8.3 TRATAMIENTO TÉRMICO

Las temperaturas de austenización usadas en el tratamiento térmico de temple, se determinaron por medio el punto crítico  $A_{c3}$  representada en la Ecuación 3, con el fin de calentar el material a una temperatura superior de este punto crítico.<sup>18</sup>

---

<sup>18</sup> A, Gorni. Steel forming and heat treating handbook. Brazil.

Ecuación 3. Punto crítico Ac3

$$A_{C3} = 912 - 370 - 27.4Mn + 27.3Si - 6.35Cr + 95.2V + 64.5Nb + 276 + 16.2C M + 32.3 C Si + 15.4C Cr + 4.32 Si Cr - 17.3 Si Mo + 40.5 Mn V + 174C^2 + 2.46Mn^2 - 6.86Si^2 + 0.322Cr^2 + 9.90Mo^2 - 60.2V^2$$

De la tabla 6, se remplazaron los valores obtenidos en la composición química del material en la Ecuación 3.

Ecuación 3. Punto crítico Ac3

$$A_{C3} = 538.70 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Los tratamientos térmicos de temple que se realizaron a las 45 probetas de Acero AISI/SAE 1020 fueron a 800°C, 900°C Y 1000°C, con tiempos de permanencia de 1Hora, 2 Horas y 3 Horas como se observa en tabla 7.

Tabla 7. Temperaturas, tiempo y número de probetas del tratamiento térmico de temple

ACERO AISI/SAE 1020		TIEMPO DE PERMANENCIA		
		1 HORA	2 HORAS	3 HORAS
TEMPERATURA	Temperatura 800°C	5 Probetas	5 Probetas	5 Probetas
	Temperatura 900°C	5 Probetas	5 Probetas	5 Probetas
	Temperatura 1000°C	5 Probetas	5 Probetas	5 Probetas

Fuente. Autor del proyecto.

Se realizaron escalonamientos para garantizar un calentamiento homogéneo en la microestructura de las probetas, tomando intervalos de 300°C, con un tiempo de permanencia en los escalonamientos según la ecuación 4 y la figura 15.<sup>19</sup>

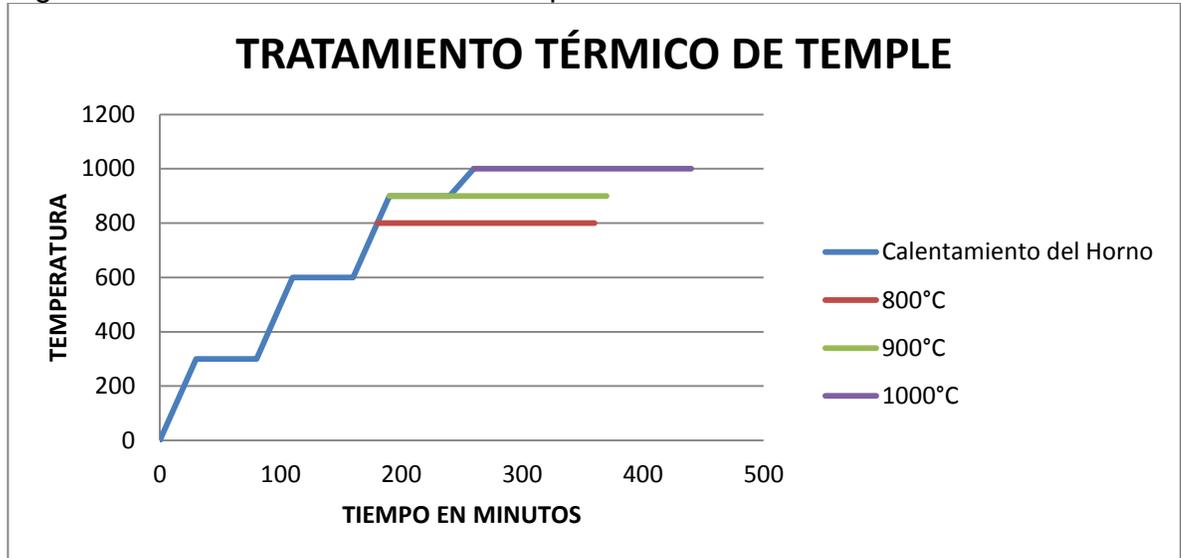
<sup>19</sup> K, Wank y K, Sharam. Temple del acero. Barcelona.: Aguilar S.A. 1972. Pag 115.

Ecuación 4. Tiempo de escalonamiento

$$t = 20 \text{ min} + \frac{D \text{ (mm)}}{2}$$

$t = 50 \text{ min}$

Figura 15. Tratamiento térmico de temple.



Fuente. Autor del proyecto

Posterior al calentamiento se sometieron las muestras a un enfriamiento que permitió la transformación microestructural, manejando como medio de enfriamiento salmuera con hielo.

#### 8.4 METALOGRAFÍA

Para la caracterización microestructural por microscopía óptica, se seleccionó una probeta sin tratar térmicamente y una probeta por cada uno de los tratamientos térmicos con sus respectivos tiempos de permanencia, estas probetas fueron expuesta a un desbaste grueso con lijas número 60 y 100, un desbaste fino con lijas número 240, 340, 400 y 600, posterior a ello para el pulido final se tomó una lija número 1000, 1200 y 1500, para el obtener brillo espejo se le aplicó una abrasivo en polvo conocido como alúmina ( $Al_2O_3$ ) en un paño el cual se montó en una pulidora metalográfica de referencia Metkon de voltaje 120v (figura 16), al momento de obtener un acabado tipo espejo, se atacó la probeta con una solución de Nital al 3% con una duración de ataque no mayor a 20 segundos, seguido de un enjuague de agua y se secó por medio de un secador, para proceder con el

análisis metalográfico. La observación microestructural se ejecutó en un analizador de imagen Microscopio marca Olympus, modelo PME 3, con capacidad de 50x, 100x, 200x, 500x y 1000x, que posee una cámara de 5MPX que trasmite a una pantalla LCD para su visualización ver figura 17.

Figura 16. Pulidora metalográfica.



Fuente. Autor del proyecto con permiso del laboratorio de análisis de materiales – Facultad de Ingeniería - U. Libre.

Figura 17. Analizador de imagen Microscopio - Olympus.



Fuente. Autor del proyecto con permiso del laboratorio de análisis de materiales – Facultad de Ingeniería - U. Libre.

## 8.5 ULTRASONIDO

La velocidad longitudinal ultrasónica se midió por medio de un equipo ultrasónico marca Olympus modelo EPOCH XT de frecuencia de 10 Hz a 1 kHz, que cuenta con una pantalla LCD (ver figura 18), se tomó un palpador de frecuencia de 5 MHz tipo dual marca Olympus (figura 19) y un palpador de frecuencia de 2.25 MHz de pulso-Eco de referencia Aerotech 0015 SK (figura 20), para su calibración se utilizó el patrón de calibración que viene con el equipo de referencia ASTM 1018 (figura 21), utilizando un transductor de modo dual de 5 MHz y un transductor de modo pulso-eco de 2.25 MHz gracias a su sensibilidad y su poder resolutivo a grandes distancias. El modo de propagación de ondas que se utilizó fue el de ondas longitudinales o compresión, debido al tamaño de las probetas. Luego de calibrado el equipo se realizó las tomas de velocidades ultrasónicas y espectros ultrasónicos para las probetas tratadas térmicamente y para la probeta patrón (no tratada térmicamente).

Figura 18. Equipo de ultrasonido Olympus - EPOCH XT.



Fuente. Autor del Proyecto con permiso del laboratorio de análisis de materiales – Facultad de Ingeniería - U. Libre.

Figura 19. Palpador de frecuencia de 5 MHz – Tipo dual.



Fuente. Autor del Proyecto con permiso del laboratorio de análisis de materiales – Facultad de Ingeniería - U. Libre.

Figura 20. Palpador de frecuencia de 2.25 MHz – Tipo pulso-Eco.



Fuente. Autor del Proyecto con permiso del laboratorio de análisis de materiales – Facultad de Ingeniería - U. Libre.

Figura 21. Patrón de calibración - ASTM 1018.



Fuente. Autor del Proyecto con permiso del laboratorio de análisis de materiales – Facultad de Ingeniería - U. Libre.

## 8.6 MICRODUREZA

Para determinar los perfiles de Microdureza del material se realizaron con un Microdurometro Shimadzu, modelo microhardness con un indentador Vickers como se muestra en la figura 22, sobre la sección de la superficie de cada una de las probetas por la cual se había tomado las imágenes metalográficas para cada uno de los tratamientos térmicos de temple y también para la probeta patrón con cargas variadas para poder determinar la carga que tenía una menor variación en mediciones, la carga con la cual se obtuvo una menor variación en la toma de mediciones fue la de 500 gf con un tiempo de indentación de 30 segundos con el fin de que tener una huella bien definida y que ésta no presentara algún agrietamiento a la probeta. Se tomaron 10 mediciones de microdureza en Vickers (HV) a cada una de las probetas tratadas y la probeta patrón para poder realizar una comparación confiable de las mediciones.

Figura 22. Microdurómetro – EQ - M. AM, 03.



Fuente. Autor del Proyecto con permiso del laboratorio de análisis de materiales – Facultad de Ingeniería - U. Libre.

## 9. RESULTADOS

### 9.1 ULTRASONIDO

9.1.1 Velocidad ultrasónica La velocidad longitudinal ultrasónica fue medida con el equipo de ultrasonido Olympus - EXPOCH XT, manejando un transductor de 5 MHz modo dual y un transductor de 2,25MHz modo pulso eco de contacto, para lo cual se calibró el equipo de ultrasonido con la ayuda del patrón de calibración, midiendo su espesor y su altura con un calibrador pie de rey, conociendo dichas medidas, estas son almacenadas en el equipo de ultrasonido en los espacios de espesor mínimo y espesor máximo, el equipo procesa estos datos, cabe aclarar que se deben tener otros parámetros con valores predeterminados según el manual del equipo para que dicho procesamiento sea válido y arroje un valor preciso de velocidad ultrasónica; posterior a calibrar el equipo se procedió a tomar los valores de velocidades ultrasónicas de la probeta patrón y de la probetas tratadas térmicamente para lo cual se tomó la medida de espesor de las probetas y ancho o largo, las probetas se cortaron de 2" x 2" para su ancho y largo y un espesor de  $\frac{1}{2}$ ", estos valores fueron almacenados en el equipo de ultrasonido junto con los parámetros predeterminados por el equipo y de esta manera se obtuvo el valor de velocidad ultrasónica de cada una de las probetas, haciendo 10 repeticiones siguiendo el mismo procedimiento con cada uno de los transductores para determinar las velocidades ultrasónicas para cada una de las probetas tratadas térmicamente y la probeta patrón, los palpadores se colocaron para las mediciones en el borde del ancho y del largo de la misma ya que en estos puntos se percibe una mayor transformación microestructural de las probetas luego del tratamiento.

9.1.1.1 Velocidad ultrasónica probeta patrón En la tabla 8, se observa las señales de velocidades ultrasónicas determinadas a la probeta patrón (sin tratamiento térmico), donde luego de 10 mediciones se calculó un promedio de 5883.2 m/s con una desviación estándar de 9.36 lo cual determina una confiabilidad de 99.84% para el transductor de 2.25 MHz y un promedio de 5854.4 m/s con una desviación estándar de 9.24 lo cual determina una confiabilidad de 99.84% para el transductor de 5 MHz.

Tabla 8. Velocidad longitudinal ultrasónica probeta patrón

<b>Velocidad Longitudinal Ultrasónica (m/s)</b>		
<b>Medición</b>	<b>2,25 MHz</b>	<b>5 MHz</b>
1	5886	5868
2	5882	5844
3	5876	5865
4	5870	5841
5	5889	5851
6	5893	5864
7	5898	5857
8	5885	5855
9	5884	5853
10	5869	5846
<b>PROMEDIO</b>	<b>5883,2</b>	<b>5854,4</b>

Fuente. Autor del proyecto.

9.1.1.2 Velocidad ultrasónica probetas tratadas térmicamente (800°C) En la tabla 9, se observa las señales de velocidades ultrasónicas determinadas a la probeta tratada térmicamente a 800°C y a la probeta patrón, donde luego de 10 mediciones se determinaron valores promedio, desviación estándar y confiabilidad de medición.

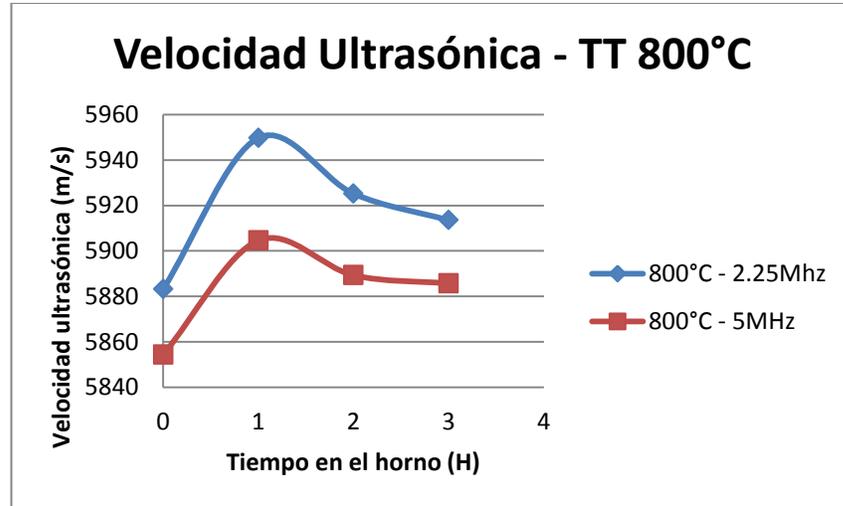
Tabla 9. Velocidad longitudinal ultrasónica 800°C

Velocidad Longitudinal Ultrasónica (m/s)								
Medición	Probeta Patrón		800°C - 1 HORA		800°C - 2 HORAS		800°C - 3 HORAS	
	2,25 MHz	5 MHz	2,25 MHz	5 MHz	2,25 MHz	5 MHz	2,25 MHz	5 MHz
1	5886	5868	5915	5918	5920	5889	5920	5889
2	5882	5844	5951	5912	5933	5884	5919	5889
3	5876	5865	5945	5899	5931	5891	5912	5875
4	5870	5841	5947	5900	5920	5891	5912	5878
5	5889	5851	5954	5894	5919	5889	5913	5891
6	5893	5864	5958	5905	5925	5887	5911	5896
7	5898	5857	5949	5900	5929	5893	5915	5883
8	5885	5855	5964	5907	5928	5889	5913	5896
9	5884	5853	5967	5906	5921	5894	5906	5882
10	5869	5846	5947	5905	5926	5886	5914	5878
<b>PROMEDIO</b>	<b>5883,2</b>	<b>5854,4</b>	<b>5949,7</b>	<b>5904,6</b>	<b>5925,2</b>	<b>5889,3</b>	<b>5913,5</b>	<b>5885,7</b>
<b>D. ESTANDAR</b>	<b>9,367</b>	<b>9,240</b>	<b>14,275</b>	<b>6,899</b>	<b>5,029</b>	<b>3,093</b>	<b>3,979</b>	<b>7,573</b>
<b>CONFIABILIDAD</b>	<b>99,84%</b>	<b>99,84%</b>	<b>99,76%</b>	<b>99,88%</b>	<b>99,92%</b>	<b>99,95%</b>	<b>99,93%</b>	<b>99,87%</b>

Fuente. Autor del proyecto

En la figura 23, se observa el comportamiento de las señales de velocidad ultrasónica longitudinal obtenidos de la probeta patrón y de las probetas tratadas térmicamente a 800°C y con tiempo de permanencia en el horno de 1, 2 y 3 horas, las mediciones se determinaron con los transductores de 2.25 MHz y de 5Mhz.

Figura 23. Variación de la velocidad ultrasónica de la probeta tratada a 800°C con transductores de 2.25 MHz y 5MHz en función del tiempo de permanecía en el horno.



Fuente. Autor del proyecto.

#### 9.1.1.3 Velocidad ultrasónica probetas tratadas térmicamente (900°C)

En la tabla 10, se observa las señales de velocidades ultrasónicas determinadas a la probeta tratada térmicamente a 900°C y a la probeta patrón, donde luego de 10 mediciones se determinaron valores promedio, desviación estándar y confiabilidad de medición.

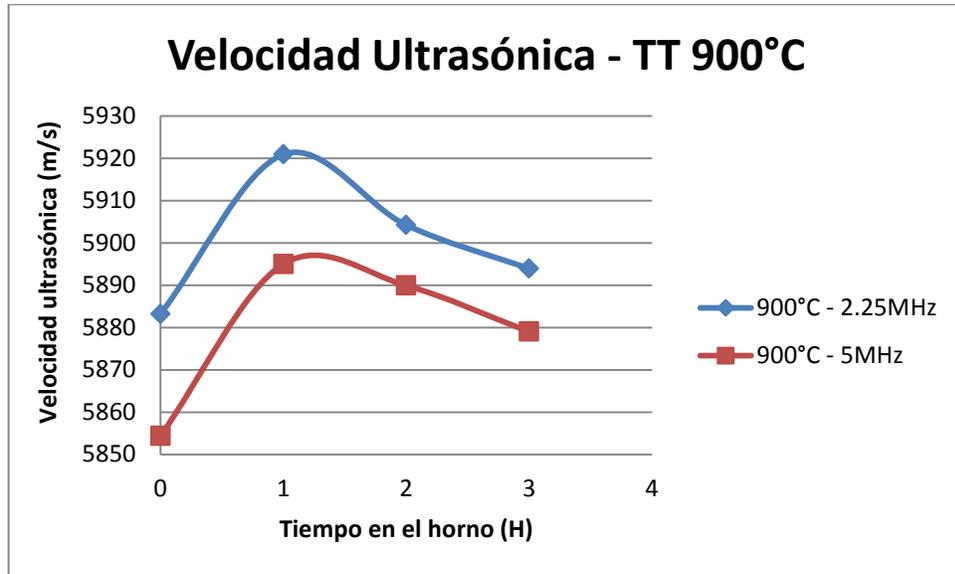
Tabla 10. Velocidad longitudinal ultrasónica 900°C

<b>Velocidad Longitudinal Ultrasónica (m/s)</b>								
<b>Medición</b>	<b>Probeta Patrón</b>		<b>900°C - 1 HORA</b>		<b>900°C - 2 HORAS</b>		<b>900°C - 3 HORAS</b>	
	<b>2,25 MHz</b>	<b>5 MHz</b>	<b>2,25 MHz</b>	<b>5 MHz</b>	<b>2,25 MHz</b>	<b>5 MHz</b>	<b>2,25 MHz</b>	<b>5 MHz</b>
1	5886	5868	5901	5901	5904	5911	5903	5865
2	5882	5844	6059	5908	5908	5910	5896	5883
3	5876	5865	5904	5913	5902	5868	5908	5875
4	5870	5841	5906	5898	5897	5908	5889	5876
5	5889	5851	5905	5903	5912	5911	5887	5883
6	5893	5864	5910	5897	5901	5862	5893	5879
7	5898	5857	5902	5898	5905	5855	5896	5887
8	5885	5855	5895	5899	5910	5857	5889	5885
9	5884	5853	5912	5813	5897	5905	5893	5878
10	5869	5846	5915	5920	5906	5912	5885	5879
<b>PROMEDIO</b>	<b>5883,2</b>	<b>5854,4</b>	<b>5920,9</b>	<b>5895</b>	<b>5904,2</b>	<b>5889,9</b>	<b>5893,9</b>	<b>5879</b>
<b>D. ESTANDAR</b>	<b>9,367</b>	<b>9,240</b>	<b>48,864</b>	<b>29,777</b>	<b>5,073</b>	<b>25,597</b>	<b>7,203</b>	<b>6,272</b>
<b>CONFIABILIDAD</b>	<b>99,84%</b>	<b>99,84%</b>	<b>99,17%</b>	<b>99,49%</b>	<b>99,91%</b>	<b>99,57%</b>	<b>99,88%</b>	<b>99,89%</b>

Fuente. Autor del proyecto.

En la figura 24, se observa el comportamiento de las señales de velocidad ultrasónica longitudinal obtenidos de la probeta patrón y de las probetas tratadas térmicamente a 900°C y con tiempo de permanencia en el horno de 1, 2 y 3 horas, las mediciones se determinaron con los transductores de 2.25 MHz y de 5Mhz.

Figura 24. Variación de la velocidad ultrasónica de la probeta tratada a 900°C con transductores de 2.25 MHz y 5MHz en función del tiempo de permanecía en el horno.



Fuente. Autor del proyecto.

9.1.1.4 Velocidad ultrasónica probetas tratadas térmicamente (1000°C) En la tabla 11, se observa las señales de velocidades ultrasónicas determinadas a la probeta tratada térmicamente a 1000°C y a la probeta patrón, donde luego de 10 mediciones se determinaron valores promedio, desviación estándar y confiabilidad de medición.

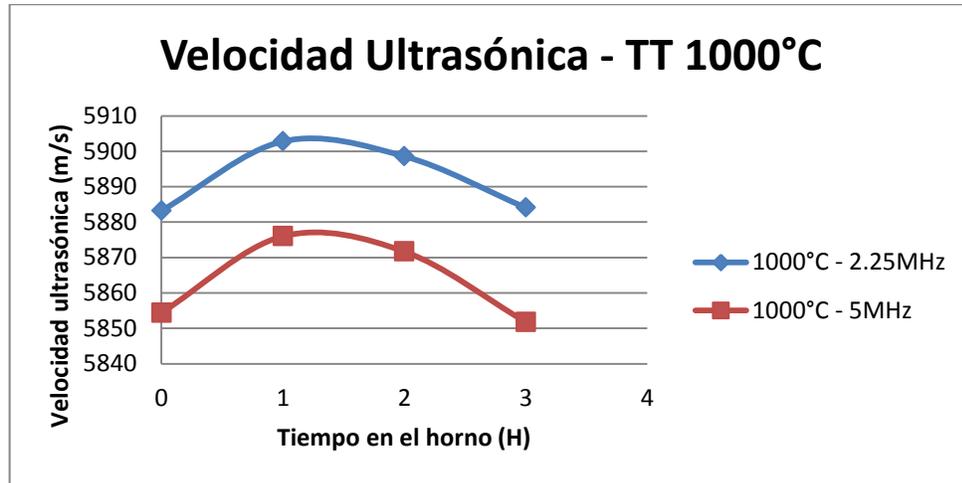
Tabla 11. Velocidad longitudinal ultrasónica 1000°C

Velocidad Longitudinal Ultrasónica (m/s)								
Medición	Probeta Patrón		1000°C - 1 HORA		1000°C - 2 HORAS		1000°C - 3 HORAS	
	2,25 MHz	5 MHz	2,25 MHz	5 MHz	2,25 MHz	5 MHz	2,25 MHz	5 MHz
1	5886	5868	5901	5887	5891	5876	5887	5841
2	5882	5844	5906	5878	5901	5879	5891	5845
3	5876	5865	5910	5878	5889	5874	5869	5860
4	5870	5841	5898	5872	5897	5881	5878	5866
5	5889	5851	5899	5877	5897	5869	5874	5863
6	5893	5864	5903	5875	5900	5866	5882	5865
7	5898	5857	5906	5877	5906	5870	5879	5843
8	5885	5855	5912	5868	5904	5869	5886	5853
9	5884	5853	5900	5878	5900	5868	5896	5833
10	5869	5846	5893	5870	5901	5865	5899	5849
<b>PROMEDIO</b>	<b>5883,2</b>	<b>5854,4</b>	<b>5902,8</b>	<b>5876</b>	<b>5898,6</b>	<b>5871,7</b>	<b>5884,1</b>	<b>5851,8</b>
<b>D. ESTANDAR</b>	<b>9,367</b>	<b>9,240</b>	<b>5,789</b>	<b>5,292</b>	<b>5,317</b>	<b>5,498</b>	<b>9,550</b>	<b>11,410</b>
<b>CONFIABILIDAD</b>	<b>99,84%</b>	<b>99,84%</b>	<b>99,90%</b>	<b>99,91%</b>	<b>99,91%</b>	<b>99,91%</b>	<b>99,84%</b>	<b>99,81%</b>

Fuente. Autor del proyecto.

En la figura 25, se observa el comportamiento de las señales de velocidad ultrasónica longitudinal obtenidos de la probeta patrón y de las probetas tratadas térmicamente a 1000°C y con tiempo de permanencia en el horno de 1, 2 y 3 horas, las mediciones se determinaron con los transductores de 2.25 MHz y de 5Mhz

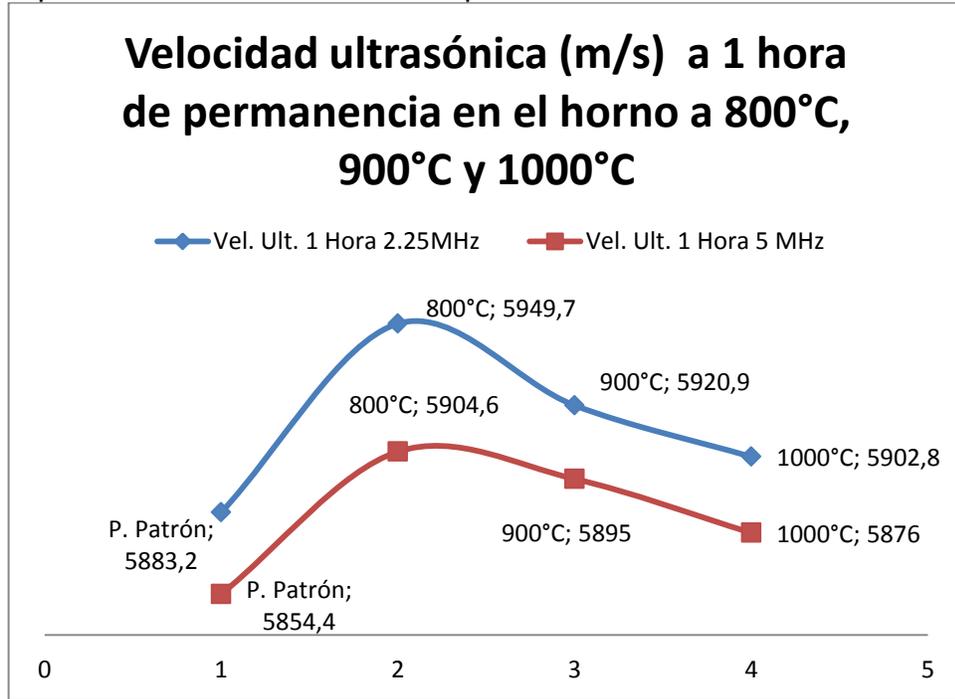
Figura 25. Variación de la velocidad ultrasónica de la probeta tratada a 1000°C con transductores de 2.25 MHz y 5MHz en función del tiempo de permanecía en el horno.



Fuente. Autor del proyecto.

9.1.1.5 Velocidad ultrasónica de probeta patrón y probetas tratadas térmicamente  
En la figura 26 se puede observar los valores de velocidad ultrasónica determinados con los transductores de 2.25MHz y 5MHz a la probeta patrón y a las probetas tratadas térmicamente a 800°C, 900°C y 1000°C con 1 hora de permanencia en el horno.

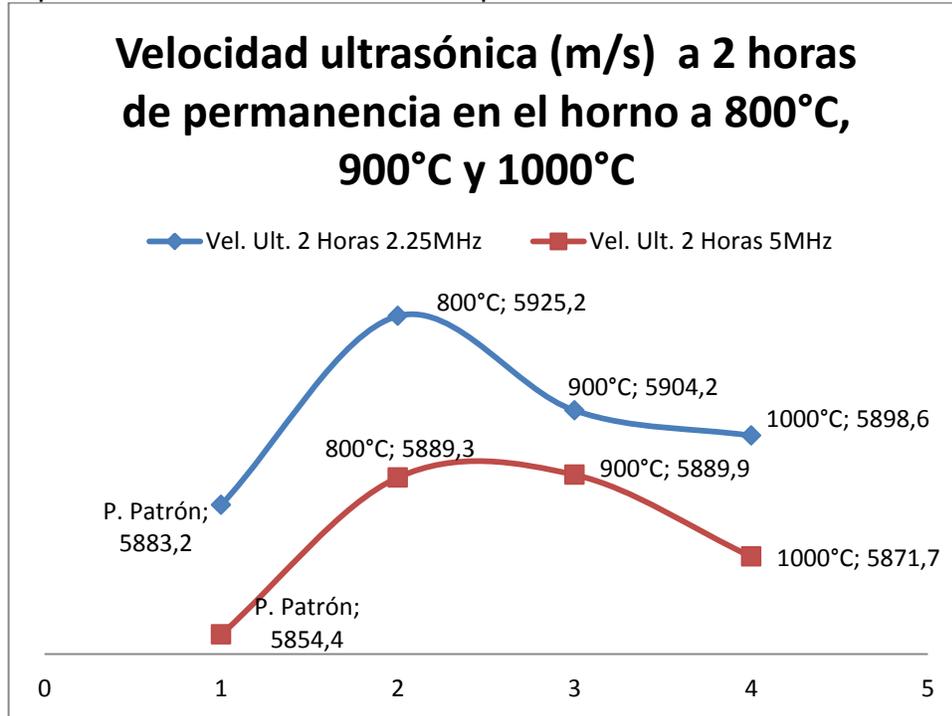
Figura 26. Variación de la velocidad ultrasónica con transductores de 2.25 MHz y 5MHz de probetas tratadas a 1 hora de permanencia en el horno.



Fuente. Autor del proyecto.

En la figura 27 se puede observar los valores de velocidad ultrasónica determinados con los transductores de 2.25MHz y 5MHz a la probeta patrón y a las probetas tratadas térmicamente a 800°C, 900°C y 1000°C con 2 horas de permanencia en el horno.

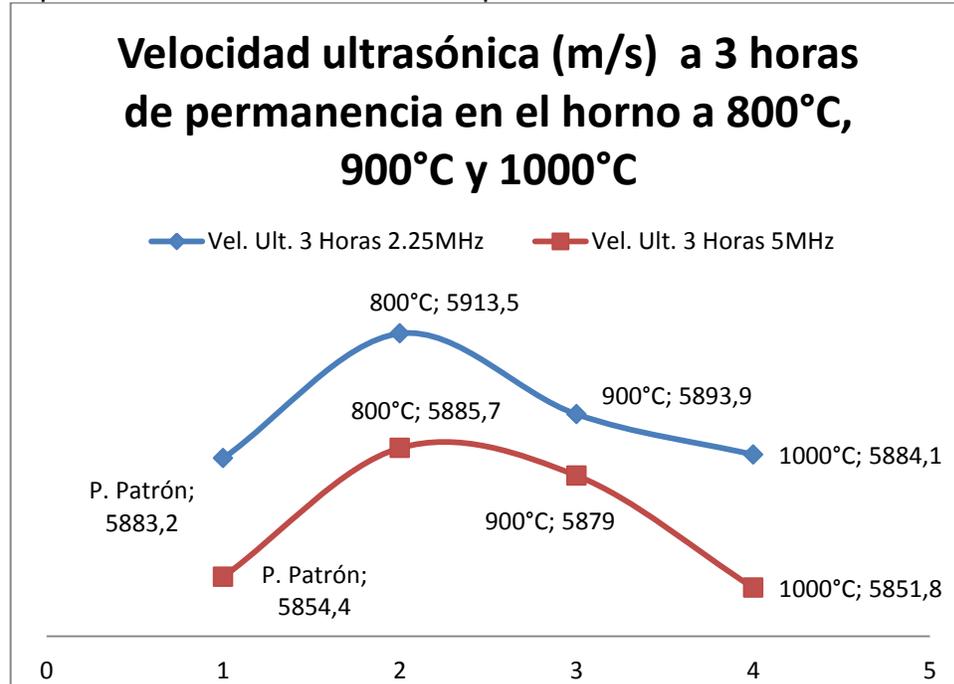
Figura 27. Variación de la velocidad ultrasónica con transductores de 2.25 MHz y 5MHz de probetas tratadas a 2 horas de permanencia en el horno.



Fuente. Autor del proyecto.

En la figura 28 se puede observar los valores de velocidad ultrasónica determinados con los transductores de 2.25MHz y 5MHz a la probeta patrón y a las probetas tratadas térmicamente a 800°C, 900°C y 1000°C con 3 horas de permanencia en el horno.

Figura 28. Variación de la velocidad ultrasónica con transductores de 2.25 MHz y 5MHz de probetas tratadas a 3 horas de permanencia en el horno.



Fuente. Autor del proyecto.

9.1.2 Espectro ultrasónico Los espectros ultrasónicos fueron definidos gracias al equipo de ultrasonido Olympus - EXPOCH XT a través de su programa Gage view program que permite capturar imágenes de la pantalla LCD del equipo y exportarlas a un dispositivo de almacenamiento, los transductores utilizados fueron de frecuencias de 2.25MHz y 5MHz.

Los espectros se tomaron de la muestra que más se acercaba al promedio de la velocidad longitudinal, para la probeta patrón y las probetas tratadas térmicamente, con el fin de determinar los ecos de fondo<sup>1</sup> y 2 o amplitudes 1 y 2 y las ganancia vertical de la señal, ya que estas lecturas se pueden relacionar con la atenuación en el material y por consiguiente con base en ellas determinar el coeficiente de atenuación.<sup>20</sup>

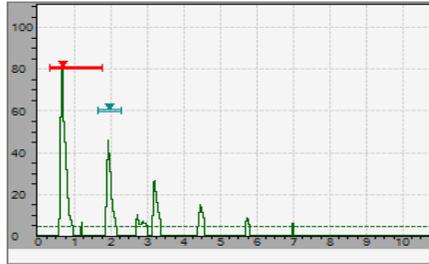
9.1.2.1 Espectro ultrasónico probeta patrón Para hallar el espectro ultrasónico de la probeta patrón se determinaron para cada una de las frecuencias parámetros fijos de ganancia y rango para observar la amplitud del pico 1 y la amplitud del pico 2 en el equipo de ultrasonido, ver figura 29.

<sup>20</sup> SEF, DGZfP, AEND, COFREND y BINDT. Ultrasonidos. Manual de estudio nivel 3. 2007. 201 p.

Figura 29. Espectro ultrasónico probeta patrón.

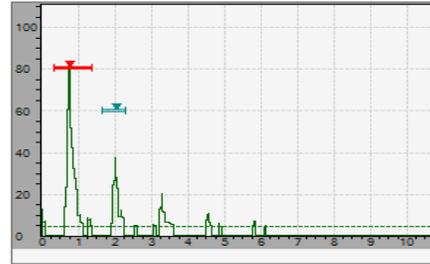
**Parámetros probeta patrón**

Frecuencia: 5.00 MHz  
 Modo: Dual  
 Ganancia: 52.1 dB  
 Rango: 105.06 mm  
 Amplitud 1: 85.25%  
 Amplitud 2: 45.75%



**Parámetros probeta patrón**

Frecuencia: 2.25 MHz  
 Modo: P/E  
 Ganancia: 40.1 dB  
 Rango: 104.77 mm  
 Amplitud 1: 82.25%  
 Amplitud 2: 37.75%



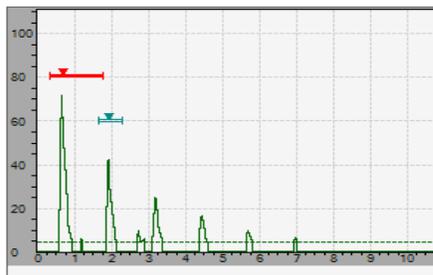
Fuente. Autor del proyecto.

9.1.2.2 Espectro ultrasónico probeta tratada térmicamente (800°C) Para hallar el espectro ultrasónico de la probeta tratada térmicamente a 800°C se determinaron para cada una de las frecuencias parámetros fijos de ganancia y rango para observar la amplitud del pico 1 y la amplitud del pico 2 en el equipo de ultrasonido, ver figuras 30, 31 y 32.

Figura 30. Espectro ultrasónico probeta tratada a 800°C – 1 Hora.

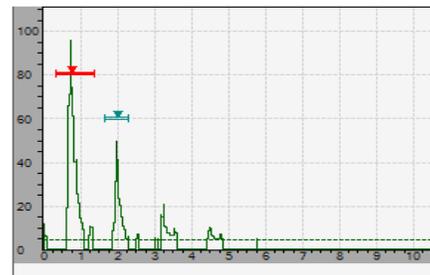
**Parámetros probeta tratada térmicamente a 800°C – 1H**

Frecuencia: 5.00 MHz  
 Modo: Dual  
 Ganancia: 52.1 dB  
 Rango: 105.06 mm  
 Amplitud 1: 71.25%  
 Amplitud 2: 42.25%



**Parámetros probeta tratada térmicamente a 800°C – 1H**

Frecuencia: 2.25 MHz  
 Modo: P/E  
 Ganancia: 40.1 dB  
 Rango: 104.77 mm  
 Amplitud 1: 94.5%  
 Amplitud 2: 51.42%

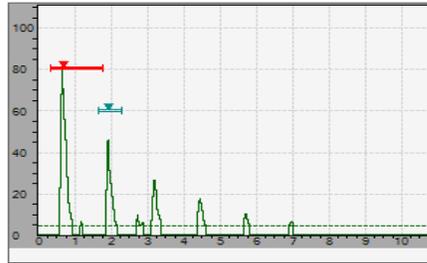


Fuente. Autor del proyecto.

Figura 31. Espectro ultrasónico probeta tratada a 800°C – 2 Horas

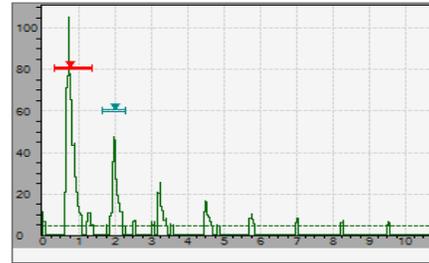
**Parámetros probeta tratada térmicamente a 800°C – 2H**

Frecuencia: 5.00 MHz  
Modo: Dual  
Ganancia: 52.1 dB  
Rango: 105.06 mm  
Amplitud 1: 81.05%  
Amplitud 2: 45.75%



**Parámetros probeta tratada térmicamente a 800°C – 2H**

Frecuencia: 2.25 MHz  
Modo: P/E  
Ganancia: 40.1 dB  
Rango: 104.77 mm  
Amplitud 1: 103.5%  
Amplitud 2: 47.25%

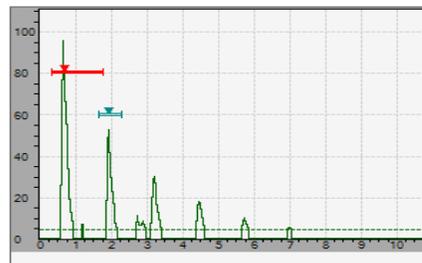


Fuente. Autor del proyecto.

Figura 32. Espectro ultrasónico probeta tratada a 800°C – 3 Horas.

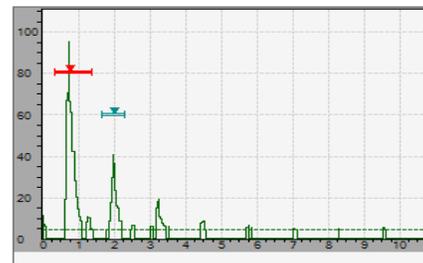
**Parámetros probeta tratada térmicamente a 800°C – 3H**

Frecuencia: 5.00 MHz  
Modo: Dual  
Ganancia: 52.1 dB  
Rango: 105.06 mm  
Amplitud 1: 94.05%  
Amplitud 2: 52.5%



**Parámetros probeta tratada térmicamente a 800°C – 3H**

Frecuencia: 2.25 MHz  
Modo: P/E  
Ganancia: 40.1 dB  
Rango: 104.77 mm  
Amplitud 1: 94%  
Amplitud 2: 40.5%



Fuente. Autor del proyecto.

9.1.2.3 Espectro ultrasónico probeta tratada térmicamente (900°C) Para hallar el espectro ultrasónico de la probeta tratada térmicamente a 900°C se determinaron para cada una de las frecuencias parámetros fijos de ganancia y rango para observar la amplitud del pico 1 y la amplitud del pico 2 en el equipo de ultrasonido, ver figuras 33, 34 y 35.

Figura 33. Espectro ultrasónico probeta tratada a 900°C – 1 Hora.

**Parámetros probeta tratada térmicamente a 900°C – 1H**

Frecuencia: 5.00 MHz

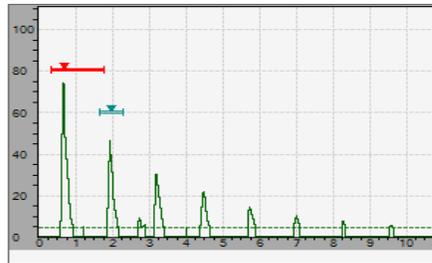
Modo: Dual

Ganancia: 52.1 dB

Rango: 105.06 mm

Amplitud 1: 73.5%

Amplitud 2: 46%



**Parámetros probeta tratada térmicamente a 900°C – 1H**

Frecuencia: 2.25 MHz

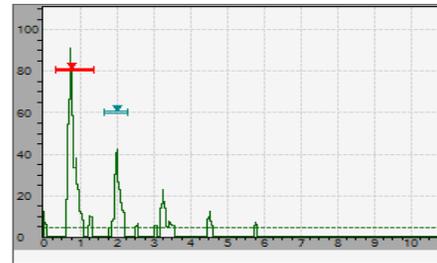
Modo: P/E

Ganancia: 40.1 dB

Rango: 104.77 mm

Amplitud 1: 90.25%

Amplitud 2: 42%



Fuente. Autor del proyecto.

Figura 34. Espectro ultrasónico probeta tratada a 900°C – 2 Horas.

**Parámetros probeta tratada térmicamente a 900°C – 2H**

Frecuencia: 5.00 MHz

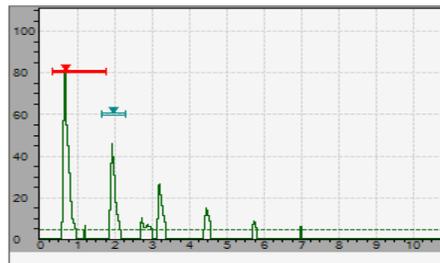
Modo: Dual

Ganancia: 52.1 dB

Rango: 105.06 mm

Amplitud 1: 82.75%

Amplitud 2: 45.5%



**Parámetros probeta tratada térmicamente a 900°C – 2H**

Frecuencia: 2.25 MHz

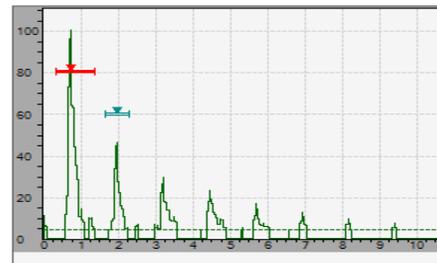
Modo: P/E

Ganancia: 40.1 dB

Rango: 104.77 mm

Amplitud 1: 100%

Amplitud 2: 45.5%

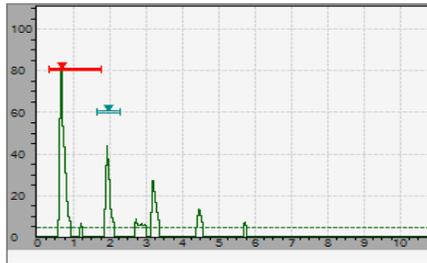


Fuente. Autor del proyecto.

Figura 35. Espectro ultrasónico probeta tratada a 900°C – 3 Horas.

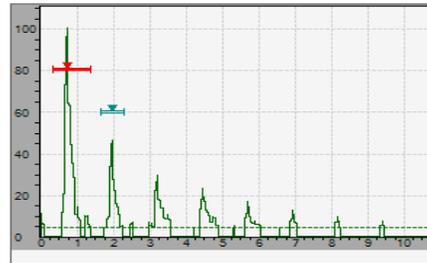
**Parámetros probeta tratada térmicamente a 900°C – 3H**

Frecuencia: 5.00 MHz  
 Modo: Dual  
 Ganancia: 52.1 dB  
 Rango: 105.06 mm  
 Amplitud 1: 82.75%  
 Amplitud 2: 43.75%



**Parámetros probeta tratada térmicamente a 900°C – 3H**

Frecuencia: 2.25 MHz  
 Modo: P/E  
 Ganancia: 40.1 dB  
 Rango: 104.77 mm  
 Amplitud 1: 98.25%  
 Amplitud 2: 43%



Fuente. Autor del proyecto.

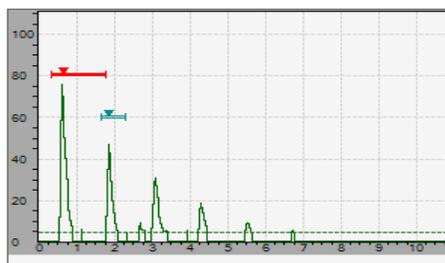
#### 9.1.2.4 Espectro ultrasónico probeta tratada térmicamente (1000°C)

Para hallar el espectro ultrasónico de la probeta tratada térmicamente a 1000°C se determinaron para cada una de las frecuencias parámetros fijos de ganancia y rango para observar la amplitud del pico 1 y la amplitud del pico 2 en el equipo de ultrasonido, ver figuras 36, 37 y 38.

Figura 36. Espectro ultrasónico probeta tratada a 1000°C – 1 Hora.

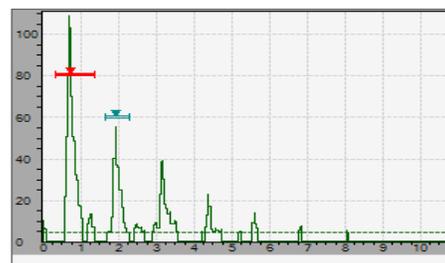
**Parámetros probeta tratada térmicamente a 1000°C – 1H**

Frecuencia: 5.00 MHz  
 Modo: Dual  
 Ganancia: 52.1 dB  
 Rango: 105.06 mm  
 Amplitud 1: 75.25%  
 Amplitud 2: 46.75%



**Parámetros probeta tratada térmicamente a 1000°C – 1H**

Frecuencia: 2.25 MHz  
 Modo: P/E  
 Ganancia: 40.1 dB  
 Rango: 104.77 mm  
 Amplitud 1: 107.75%  
 Amplitud 2: 55.25%

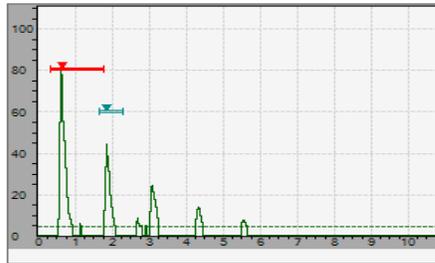


Fuente. Autor del proyecto.

Figura 37. Espectro ultrasónico probeta tratada a 1000°C – 2 Horas.

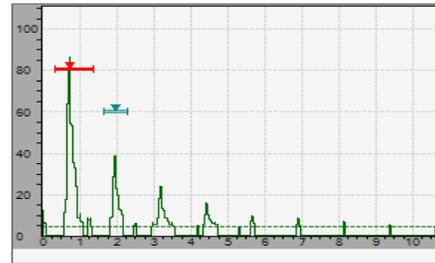
**Parámetros probeta tratada térmicamente a 1000°C – 2H**

Frecuencia: 5.00 MHz  
 Modo: Dual  
 Ganancia: 52.1 dB  
 Rango: 105.06 mm  
 Amplitud 1: 78.5%  
 Amplitud 2: 44.25%



**Parámetros probeta tratada térmicamente a 1000°C – 2H**

Frecuencia: 2.25 MHz  
 Modo: P/E  
 Ganancia: 40.1 dB  
 Rango: 104.77 mm  
 Amplitud 1: 85.5%  
 Amplitud 2: 38.75%

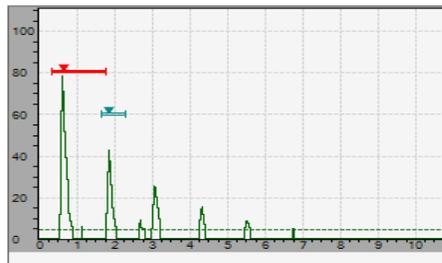


Fuente: Autor del proyecto.

Figura 38. Espectro ultrasónico probeta tratada a 1000°C – 3 Horas.

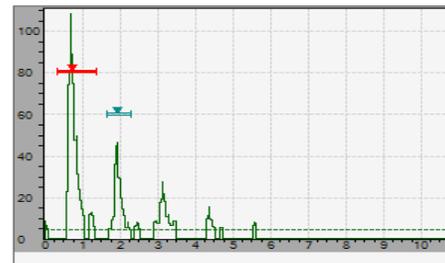
**Parámetros probeta tratada térmicamente a 1000°C – 3H**

Frecuencia: 5.00 MHz  
 Modo: Dual  
 Ganancia: 52.1 dB  
 Rango: 105.06 mm  
 Amplitud 1: 77.75%  
 Amplitud 2: 42.75%



**Parámetros probeta tratada térmicamente a 1000°C – 3H**

Frecuencia: 2.25 MHz  
 Modo: P/E  
 Ganancia: 40.1 dB  
 Rango: 104.77 mm  
 Amplitud 1: 107.25%  
 Amplitud 2: 46.25%

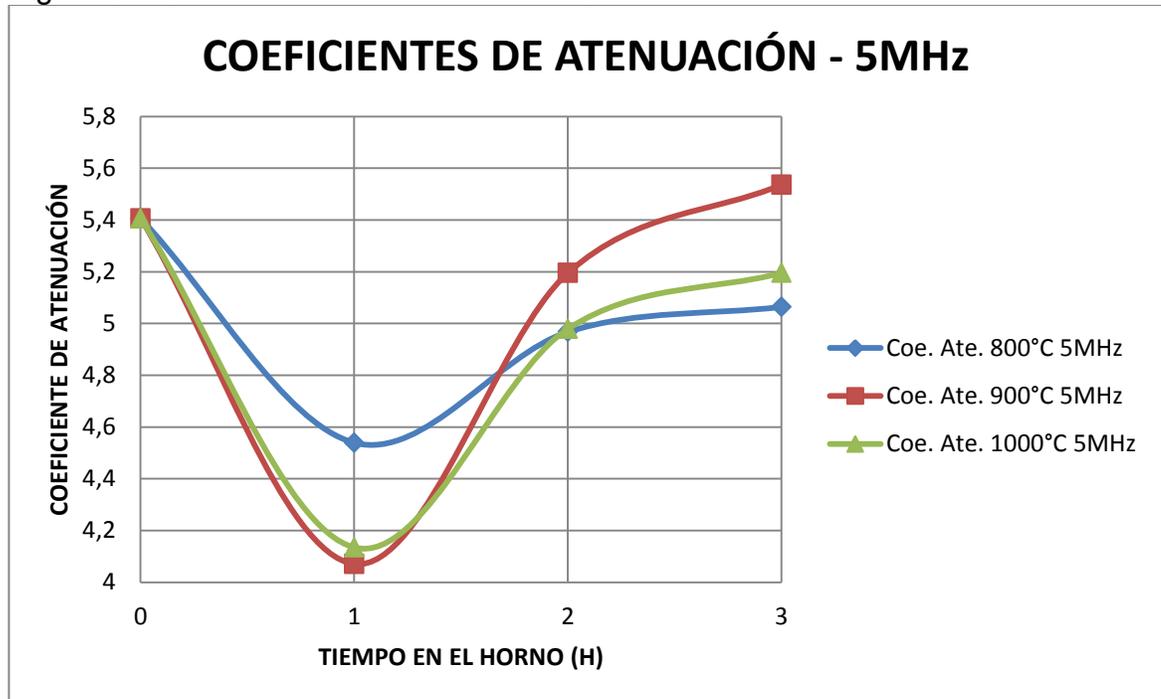


Fuente. Autor del proyecto.

9.1.3 Atenuación ultrasónica Se calcularon los coeficientes de atenuación para determinar que tanto la energía sónica se perderá al superar la fricción interna dentro del material y cómo influyen los granos del material dispersando la señal; esto debido a que mientras el sonido viaja a través de un medio, su energía se reduce por la interacción con el material, estos efectos se observaron por la reducción en la longitud de los ecos de fondo o amplitudes con la distancia, para lo cual se tomó la fórmula que relaciona la diferencia entre la amplitud del eco de fondo 1 con la amplitud del eco de fondo 2 menos un factor de corrección o

perdida, y la cifra resultante se divide por dos veces el espesor del material; así gracias a los parámetros determinados de amplitud en cada uno de los espectros ultrasónicos determinados para cada una de las probetas tratadas térmicamente y para la probeta patrón tanto para el palpador de frecuencia de 2.25 MHz y 5 MHz, se calcularon los coeficientes de atenuación y los resultados se graficaron como se muestra en las figuras 39 y 40.<sup>21</sup>

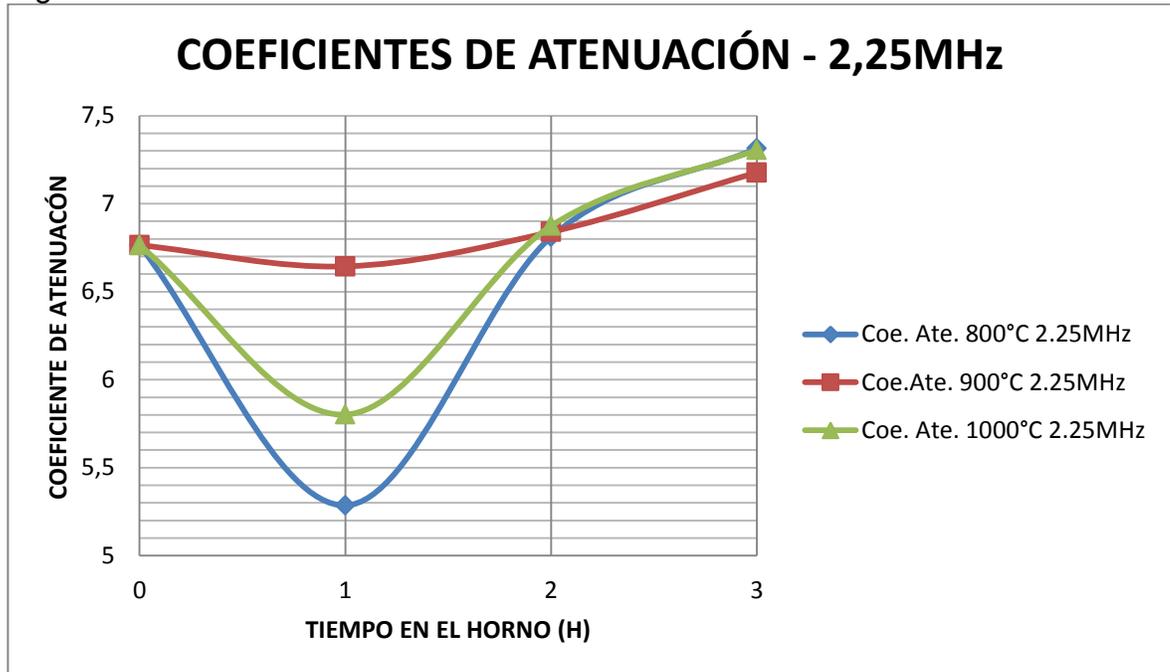
Figura 39. Coeficientes de atenuación a 5 MHz.



Fuente. Autor del proyecto.

<sup>21</sup> SEF, DGZfP, AEND, COFREND y BINDT. Ultrasonidos. Manual de estudio nivel 3. 2007. 201 p.

Figura 40. Coeficientes de atenuación a 2.25 MHz.



Fuente. Autor del proyecto.

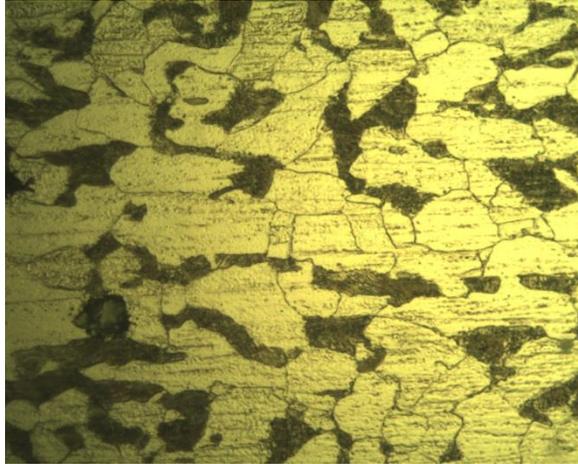
## 9.2 METALOGRAFÍAS

A continuación se muestran las diferentes metalografías obtenidas de la probeta patrón y de las probetas tratadas térmicamente por temple a 800°C, 900°C y 1000°C con enfriamiento agresivo el salmuera con hielo, las cuales fueron tomadas en el microscopio marca Olympus - PME, con aumentos de 50X, 100X, 200X, 500X y 1000X.

Para analizar la microestructura presente en cada una de las probetas luego de tener brillo tipo espejo se atacó químicamente con Nital al 3%, con un tiempo no superior a 20 segundos en la reacción.

9.2.1 Probeta patrón En la figura 41, se observa la microestructura de la probeta de acero AISI/SAE 1020 atacada con Nital al 3% a un aumento de 500x, se aprecia una estructura Ferrito – Perlitica.

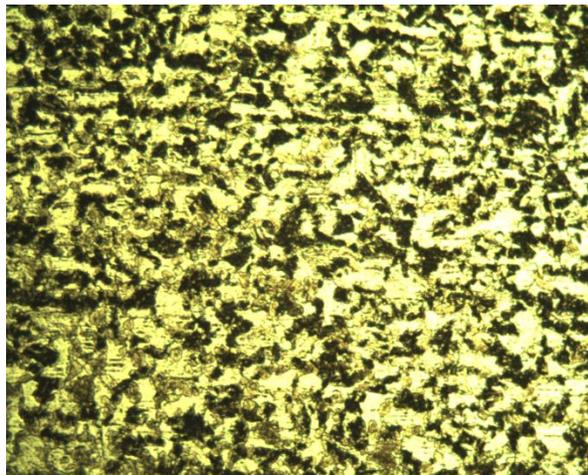
Figura 41. Metalografía probeta patrón - Ataque Nital al 3% - Aumento 500x.



Fuente. Autor del proyecto.

9.2.2 Probeta tratada térmicamente a 800°C – 1 hora En la figura 42, se observa la microestructura de la probeta de acero AISI/SAE 1020 atacada con Nital al 3% a un aumento de 200x, se aprecia una estructura Ferrito – Perlitica.

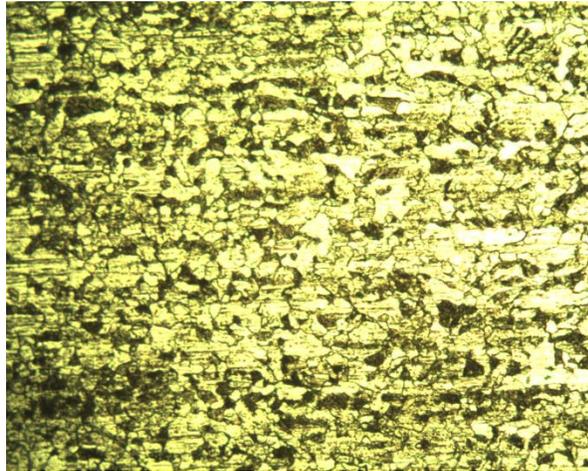
Figura 42. Metalografía probeta tratada a 800°C 1 hora - Ataque Nital al 3% - Aumento 200x.



Fuente. Autor del proyecto.

9.2.3 Probeta tratada térmicamente a 800°C – 2 horas En la figura 43, se observa la microestructura de la probeta de acero AISI/SAE 1020 atacada con Nital al 3% a un aumento de 500x, se aprecia una estructura Ferrito – Perlítica.

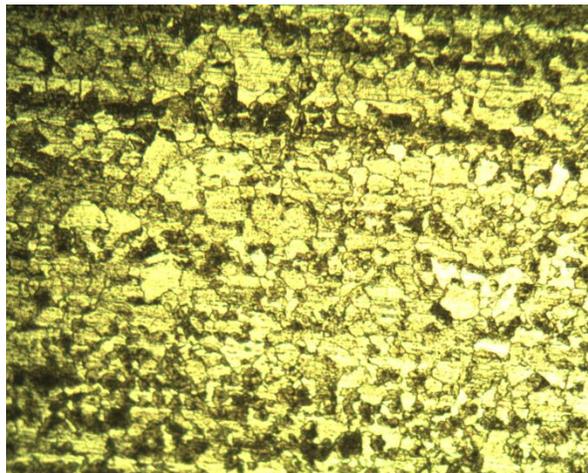
Figura 43. Metalografía probeta tratada a 800°C 2 horas - Ataque Nital al 3% - Aumento 500x.



Fuente. Autor del proyecto.

9.2.4 Probeta tratada térmicamente a 800°C – 3 horas En la figura 44, se observa la microestructura de la probeta de acero AISI/SAE 1020 atacada con Nital al 3% a un aumento de 200x, se aprecia una estructura Ferrito – Perlítica.

Figura 44. Metalografía probeta tratada a 800°C 3 horas - Ataque Nital al 3% - Aumento 200x.



Fuente: Autor del Proyecto.

9.2.5 Probeta tratada térmicamente a 900°C – 1 hora En la figura 45, se observa la microestructura de la probeta de acero AISI/SAE 1020 atacada con Nital al 3% a un aumento de 200x, se aprecia una estructura de martensita y austenita retenida.

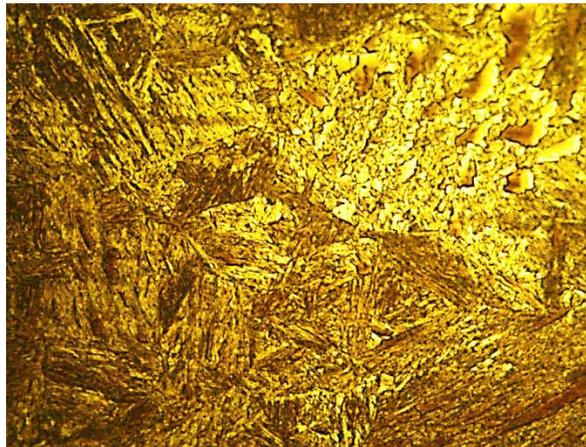
Figura 45. Metalografía probeta tratada a 900°C 1 hora - Ataque Nital al 3% - Aumento 200x.



Fuente. Autor del proyecto.

9.2.6 Probeta tratada térmicamente a 900°C – 2 horas En la figura 46, se observa la microestructura de la probeta de acero AISI/SAE 1020 atacada con Nital al 3% a un aumento de 500x, se aprecia una estructura martensítica (agujas en zig-zag en una matriz austenítica).

Figura 46. Metalografía probeta tratada a 900°C 2 horas - Ataque Nital al 3% - Aumento 500x.



Fuente. Autor del proyecto.

9.2.7 Probeta tratada térmicamente a 900°C – 3 horas En la figura 47, se observa la microestructura de la probeta de acero AISI/SAE 1020 atacada con Nital al 3% a un aumento de 200x, se aprecia una estructura martensítica y austenita retenida.

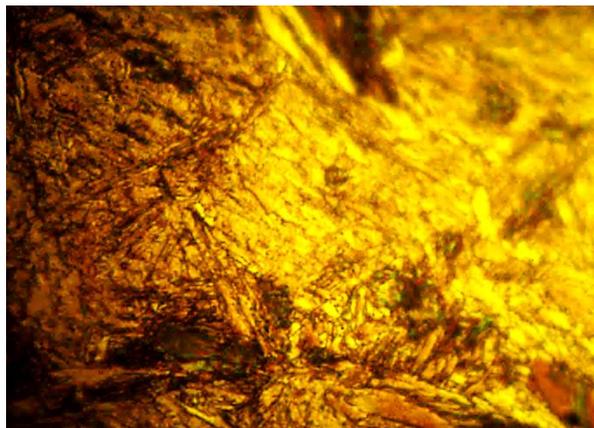
Figura 47. Metalografía probeta tratada a 900°C 3 horas - Ataque Nital al 3% - Aumento 200x.



Fuente. Autor del proyecto.

9.2.8 Probeta tratada térmicamente a 1000°C – 1 hora En la figura 48, se observa la microestructura de la probeta de acero AISI/SAE 1020 atacada con Nital al 3% a un aumento de 1000x, se aprecia una estructura bainítica en una matriz martensítica.

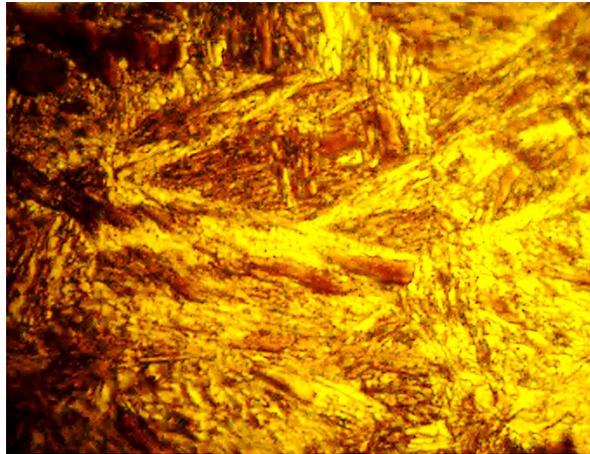
Figura 48. Metalografía probeta tratada a 1000°C 1 hora - Ataque Nital al 3% - Aumento 1000x.



Fuente. Autor del proyecto.

9.2.9 Probeta tratada térmicamente a 1000°C – 2 horas En la figura 49, se observa la microestructura de la probeta de acero AISI/SAE 1020 atacada con Nital al 3% a un aumento de 1000x, se aprecia una estructura bainítica en una matriz martensítica.

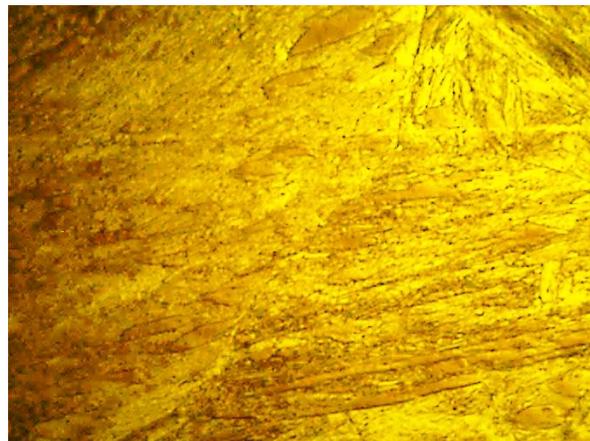
Figura 49. Metalografía probeta tratada a 1000°C 2 horas - Ataque Nital al 3% - Aumento 1000x.



Fuente. Autor del Proyecto.

9.2.10 Probeta tratada térmicamente a 1000°C – 3 horas En la figura 50, se observa la microestructura de la probeta de acero AISI/SAE 1020 atacada con Nital al 3% a un aumento de 1000x, se aprecia una estructura bainítica en una matriz martensítica.

Figura 50. Metalografía probeta tratada a 1000°C 3 horas - Ataque Nital al 3% - Aumento 1000x.



Fuente. Autor del proyecto

### 9.3 MICRODUREZAS

Se realizaron 10 tomas de microdureza a cada una de las probetas tratadas térmicamente y a la probeta patrón con una carga de 500 gf y 30 segundos de permanencia, en el microdurómetro Shimadzu con un indentador Vickers, este ensayo se realizó en los laboratorios de la Universidad Libre de Colombia.

9.3.1 Probeta patrón En la tabla 12 se observan las mediciones obtenidas del ensayo de microdureza de la probeta patrón, donde en promedio se obtuvo un valor de microdureza de 194.7 HV con una desviación estándar de 4.61 lo cual determina una confiabilidad en los datos del 97.63%.

Tabla 12. Microdureza probeta patrón.

<b>PROBETA PATRÓN</b>		
<b>MEDICIÓN</b>	<b>DIAGONAL</b>	<b>HV</b>
1	70	189,2
2	69	194,7
3	68	200,5
4	69	194,7
5	69	194,7
6	68	200,5
7	70	189,2
8	68	200,5
9	70	189,2
10	69	194,7
<b>PROMEDIO</b>	<b>69</b>	<b>194,79</b>
<b>DESVIACIÓN ESTÁNDAR</b>		<b>4,61</b>

Fuente. Autor del proyecto.

9.3.2 Probeta tratada térmicamente a 800°C En la tabla 13 se observan las mediciones obtenidas del ensayo de microdureza de la probeta tratada térmicamente a 800°C y la probeta patrón, en donde se observan valores promedios de microdureza vickers (HV), desviación estándar y confiabilidad de los datos obtenidos.

Tabla 13. Microdureza probeta tratada térmicamente 800°C.

MICRODUREZAS VICKERS (HV)								
MEDICIÓN	PROBETA PATRÓN		800°C - 1 HORA		800°C - 2 HORAS		800°C - 3 HORAS	
	DIAGONAL	HV	DIAGONAL	HV	DIAGONAL	HV	DIAGONAL	HV
1	70	189,2	65,7	214,8	64,3	224,3	63	233,6
2	69	194,7	65,5	216,1	64	226,4	62,7	235,9
3	68	200,5	65,7	214,8	63,9	227,1	63,5	229,9
4	69	194,7	65	219,5	64	226,4	62	241,2
5	69	194,7	65,2	219,1	64	226,4	62	241,2
6	68	200,5	65,1	218,8	64,2	225	62,8	235,1
7	70	189,2	65,5	216,1	64,5	222,9	62,5	237,4
8	68	200,5	65	219,5	63,9	227,1	63	233,6
9	70	189,2	66	212,9	64,8	220,8	63,3	231,4
10	69	194,7	65,1	218,8	64,5	222,9	62,9	234,4
<b>PROMEDIO</b>	<b>69</b>	<b>194,79</b>	<b>65,38</b>	<b>217,04</b>	<b>64,21</b>	<b>224,93</b>	<b>62,77</b>	<b>235,37</b>
<b>D. ESTANDAR</b>		<b>4,614</b>		<b>2,3917</b>		<b>2,15</b>		<b>3,7319</b>
<b>CONFIABILIDAD</b>		<b>97,63%</b>		<b>98,90%</b>		<b>99,04%</b>		<b>98,41%</b>

Fuente. Autor del proyecto.

9.3.3 Probeta tratada térmicamente a 900°C En la tabla 14 se observan las mediciones obtenidas del ensayo de microdureza de la probeta tratada térmicamente a 900°C y la probeta patrón, en donde se observan valores promedios de microdureza vickers (HV), desviación estándar y confiabilidad de los datos obtenidos.

Tabla 14. Microdureza probeta tratada térmicamente 900°C.

MICRODUREZAS VICKERS (HV)								
MEDICIÓN	PROBETA PATRÓN		900°C - 1 HORA		900°C - 2 HORAS		900°C - 3 HORAS	
	DIAGONAL	HV	DIAGONAL	HV	DIAGONAL	HV	DIAGONAL	HV
1	70	189,2	61,3	246,7	60	257,6	58	275,6
2	69	194,7	60,5	253,3	59,5	261,9	55,2	304,3
3	68	200,5	61	249,2	60,2	255,8	57	285,4
4	69	194,7	61,2	247,6	60	257,6	58	275,6
5	69	194,7	60,9	250	59	266,4	58	275,6
6	68	200,5	61	249,2	60	257,6	57,5	280,4
7	70	189,2	61	249,2	60,3	255	56	295,7
8	68	200,5	61,5	245,1	60	257,6	55	306,5
9	70	189,2	61,4	245,9	59,5	261,9	58	275,6
10	69	194,7	62	241,2	59	266,4	57,5	280,4
<b>PROMEDIO</b>	<b>69</b>	<b>194,79</b>	<b>61,18</b>	<b>247,74</b>	<b>59,75</b>	<b>259,78</b>	<b>57,02</b>	<b>285,51</b>
<b>D. ESTANDAR</b>		<b>4,614</b>		<b>3,2769</b>		<b>4,1411</b>		<b>12,214</b>
<b>CONFIABILIDAD</b>		<b>97,63%</b>		<b>98,68%</b>		<b>98,41%</b>		<b>95,72%</b>

Fuente. Autor del proyecto.

9.3.4 Probeta tratada térmicamente a 1000°C En la tabla 15 se observan las mediciones obtenidas del ensayo de microdureza de la probeta tratada térmicamente a 1000°C y la probeta patrón, en donde se observan valores promedios de microdureza vickers (HV), desviación estándar y confiabilidad de los datos obtenidos.

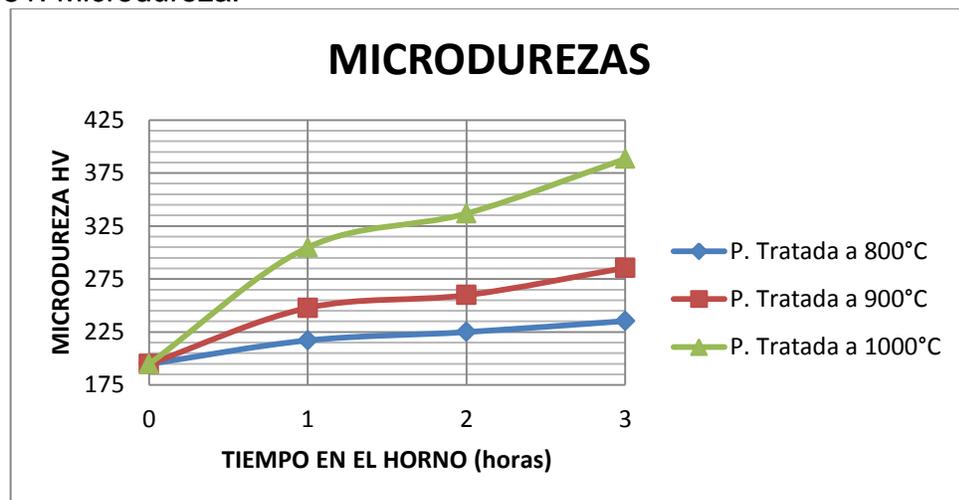
Tabla 15. Microdureza probeta tratada térmicamente 1000°C.

MICRODUREZAS VICKERS (HV)								
MEDICIÓN	PROBETA PATRÓN		1000°C - 1 HORA		1000°C - 2 HORAS		1000°C - 3 HORAS	
	DIAGONAL	HV	DIAGONAL	HV	DIAGONAL	HV	DIAGONAL	HV
1	70	189,2	55	306,5	52	342,9	49,9	372,4
2	69	194,7	55,3	303,2	52,5	336,4	48,5	394,2
3	68	200,5	55	306,5	52	342,9	49	386,2
4	69	194,7	55,3	303,2	52	342,9	49,2	383
5	69	194,7	55,5	301	53	330,1	48,6	392,6
6	68	200,5	55,1	305,4	52	342,9	48,7	390,9
7	70	189,2	55	306,5	53	330,1	48	402,4
8	68	200,5	55,4	302,1	52,5	336,4	49	386,2
9	70	189,2	55	306,5	52,8	332,6	49	386,2
10	69	194,7	55	306,5	52,9	331,3	48,8	389,3
<b>PROMEDIO</b>	<b>69</b>	<b>194,79</b>	<b>55,16</b>	<b>304,74</b>	<b>52,47</b>	<b>336,85</b>	<b>48,87</b>	<b>388,34</b>
<b>D. ESTANDAR</b>		<b>4,614</b>		<b>2,1506</b>		<b>5,6451</b>		<b>7,8456</b>
<b>CONFIABILIDAD</b>		<b>97,63%</b>		<b>99,29%</b>		<b>98,32%</b>		<b>97,98%</b>

Fuente. Autor del proyecto.

En la figura 51 se pueden observar los resultados promedio de las mediciones de microdureza para cada una de las probetas tratadas térmicamente con sus respectivos tiempos de permanencia en el horno, partiendo cada serie del valor de microdureza obtenido por la probeta patrón cuyo resultado se determinó en 194.79 HV según su promedio luego de 10 mediciones.

Figura 51. Microdureza.

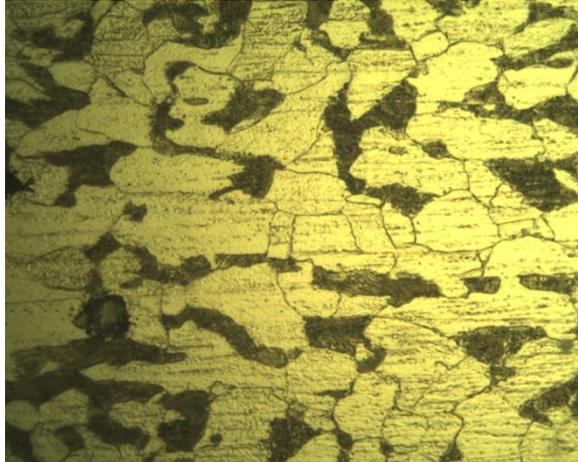


Fuente. Autor del proyecto.

## 10. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El análisis microestructural del acero AISI/SAE 1020 sin tratar térmicamente (estado de entrega), reveló una estructura ferrítico-perlítica, en la cual se ven granos equiaxiales de ferrita que aparecen mezclados entre la perlita, áreas oscuras de perlita y áreas claras de ferrita, ver figura 52.

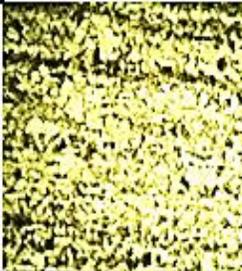
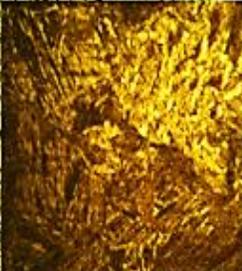
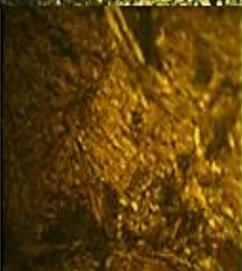
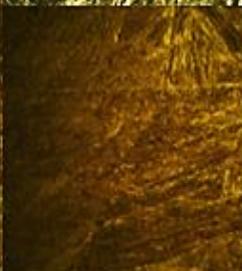
Figura 52. Metalografía probeta patrón - Ataque Nital al 3% - Aumento 500x.



Fuente. Autor del proyecto.

Para la temperatura de 800°C se observó una microestructura ferrítico-perlítica, evidenciando que a mayor tiempo de permanecía en el horno había una mayor transformación en su microestructura, para la temperatura de 900°C, las metalografías revelaron una estructura martensítica definida (agujas) resultado de la solución sólida sobresaturada de C en hierro  $\alpha$ , con austenita retenida, finalmente para las probetas a temperaturas de 1000°C se apreció una microestructura bainítica un constituyente intermedio entre la austenita y la martensita como se muestra en la tabla 16, así mismo después del proceso de temple la formación de martensita da lugar a considerables tensiones en el acero, dándole fragilidad al mismo. Las probetas que fueron tratadas térmicamente que presentaron una mayor transformación en su estructura fueron las tratadas térmicamente a 900°C y 1000°C en comparación con la estructura presentada por la probeta tratada a 800°C debido a que a esta temperatura no se sobrepasó la temperatura crítica superior del acero generando precipitados que dan origen a la existencia de puntos blancos y microdurezas menores.

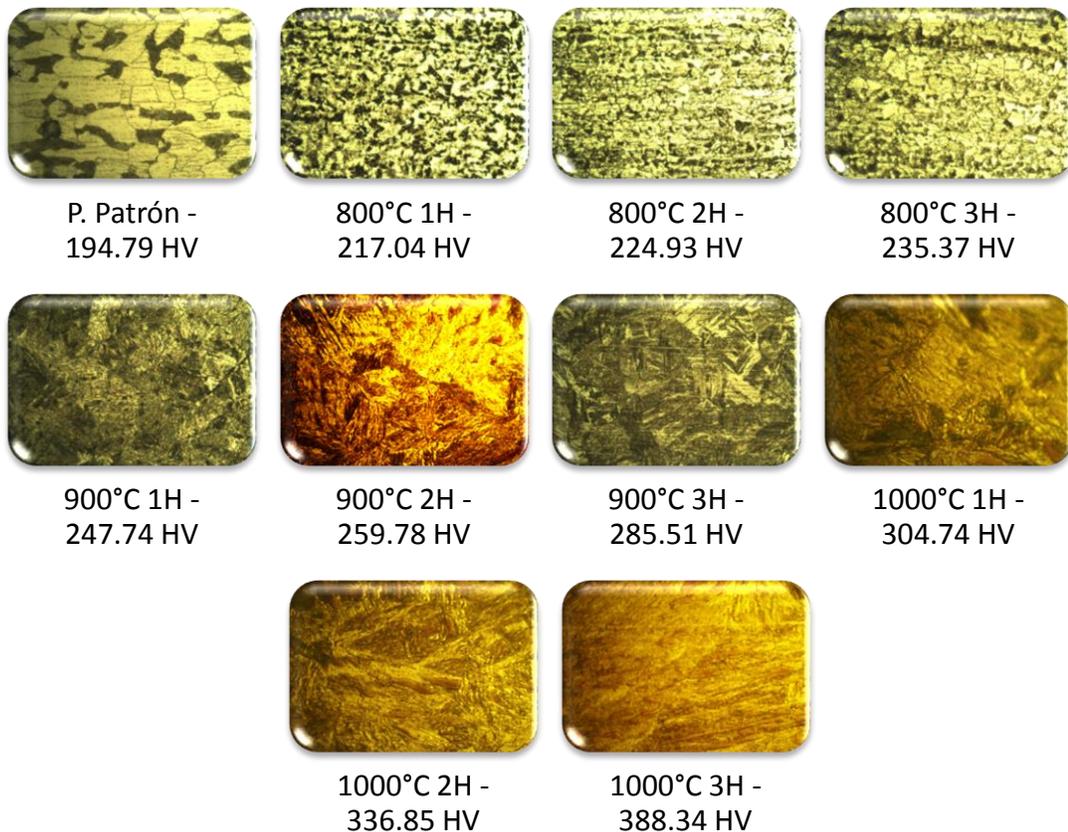
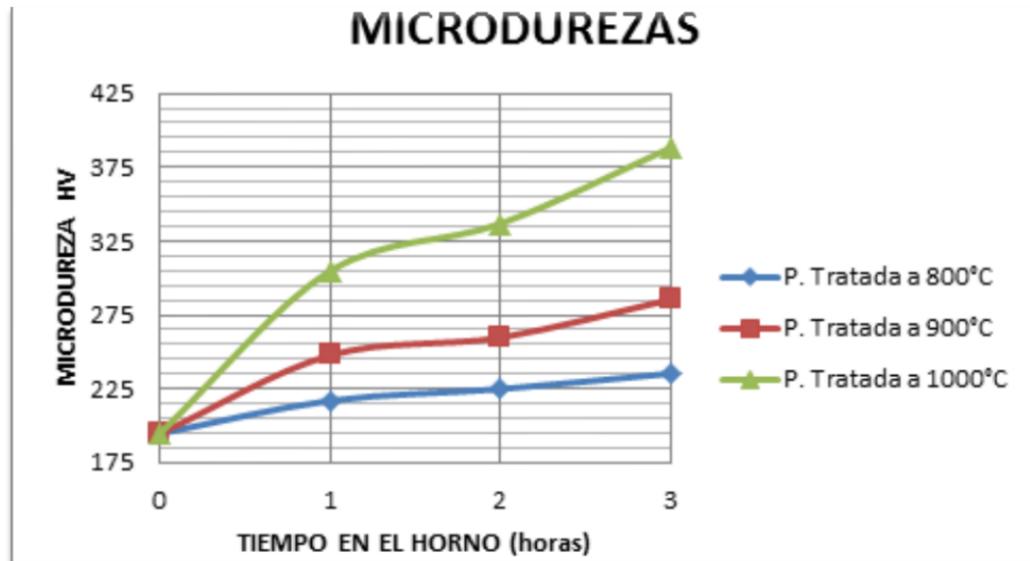
Tabla 16. Metalografías probetas de acero AISI/SAE 1020 tratadas térmicamente

Temperatura	Tiempo	1 Hora	2 Horas	3 Horas
800°C				
				
				

Fuente. Autor del proyecto.

A mayor tiempo de permanencia en el horno y al aumento en la temperatura la dureza aumenta esto debido al cambio microestructural de ferrita y perlita a martensita, reflejando una relación directa entre las estructuras formadas y las mediciones de dureza, es así como para la probeta patrón se obtuvo como promedio una microdureza vickers (HV) promedio de 194.79, luego de ser tratada a 800°C se elevó la microdureza a un rango de 217.04 HV y 235.37 HV evidenciando que la transformación microestructural aumento la dureza del material, para las probetas tratadas a 900°C y 1000°C se constató un aumento superior en la dureza debido a su transformación martensítica definida, alcanzando en estas temperaturas rangos de microdureza de 247.74 HV hasta 388.34 HV, constatando que los tratamientos de temple realizados al material fueron óptimos y lograron su objetivo de generar un aumento en la dureza del material, ver figura 53.

Figura 53. Esquema estructuras formadas y microdureza.



Fuente. Autor del proyecto.

La velocidad longitudinal ultrasónica promedio de la probeta patrón siempre estuvo por debajo de las velocidades ultrasónicas de las probetas tratadas térmicamente, cuando el material fue templado a 800°C la velocidad ultrasónica obtuvo valores altos en comparación con las velocidades tomadas a 900°C que arrojaron valores medios de velocidad y a 1000°C que arrojó señales ultrasónicas bajas de similar valor a las velocidades ultrasónicas de la probeta patrón, ver tablas 17 y 18.

Tabla 17. Velocidad ultrasónica promedio probeta patrón.

<b>PROBETA PATRÓN</b>	
<b>PROMEDIO VELOCIDAD ULTRASONICA (m/s)</b>	
<b>2,25MHz</b>	<b>5MHz</b>
5883,2	5854,4

Fuente. Autor del proyecto.

Tabla 18. Velocidad ultrasónica (m/s) promedio probetas tratadas térmicamente

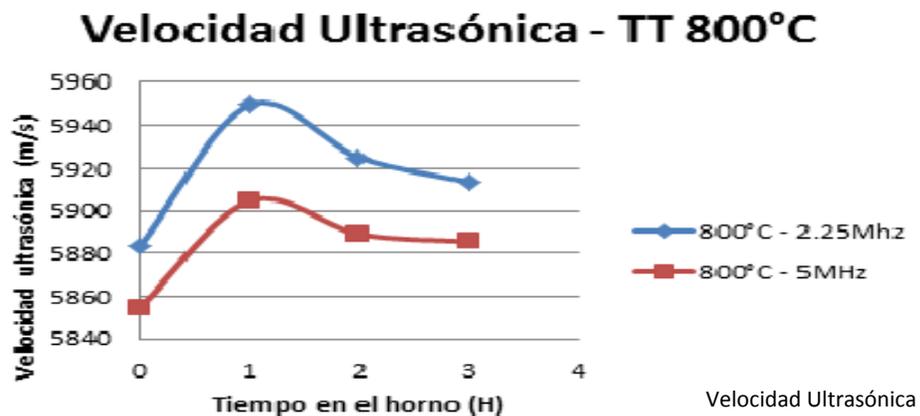
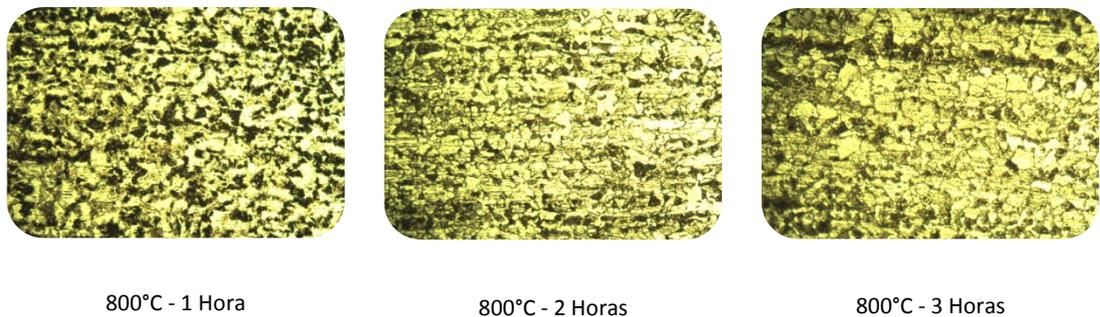
2,25 MHz		TIEMPO EN EL HORNO			5 MHz		TIEMPO EN EL HORNO		
		1 HORA	2 HORAS	3 HORAS			1 HORA	2 HORAS	3 HORAS
TEMPERATURA	800°C	5949,7	5925,2	5913,5	TEMPERATURA	800°C	5904,6	<b>5889,3</b>	5885,7
	900°C	5920,9	5904,2	5893,9		900°C	5895	5889,9	5879
	1000°C	5902,8	5898,6	5884,1		1000°C	5876	5871,7	5851,8

Fuente. Autor del proyecto.

Las velocidades ultrasónicas tomaban valores descendentes a medida que el tiempo de permanencia en el horno para el tratamiento de temple era mayor, con lo que se puede inferir que con el cambio microestructural por el tiempo de sostenimiento en el horno la velocidad disminuye proporcionalmente esto debido a que las señales ultrasónicas toman un camino más largo en granos grandes para recorrer el espesor del material en comparación con granos pequeños. Las señales ultrasónicas captadas con el palpador de 2.25MHz en comparación con el palpador de 5MHz fueron de valores superiores en cada uno de los casos.

En las figura 54 se observa el comportamiento de la velocidad ultrasónica de las probetas tratadas a 800°C, con tiempos de permanencia en el horno de 1, 2 y 3 horas, mostrando que la velocidad ultrasónica de la probeta tratada aumenta respecto a la velocidad de la probeta patrón considerablemente, debido al crecimiento del tamaño de grano y el cambio microestructural la velocidad ultrasónica disminuye en relación con el tiempo de permanecía en el horno, teniendo la tendencia decreciente pero con una menor variación en los tiempos comprendidos entre 2 y 3 horas en el horno, arrojando siempre resultados de velocidad ultrasónicas superiores a los valores de la probeta patrón.

Figura 54. Esquema estructuras probetas tratadas térmicamente y velocidad ultrasónica a 800°C.

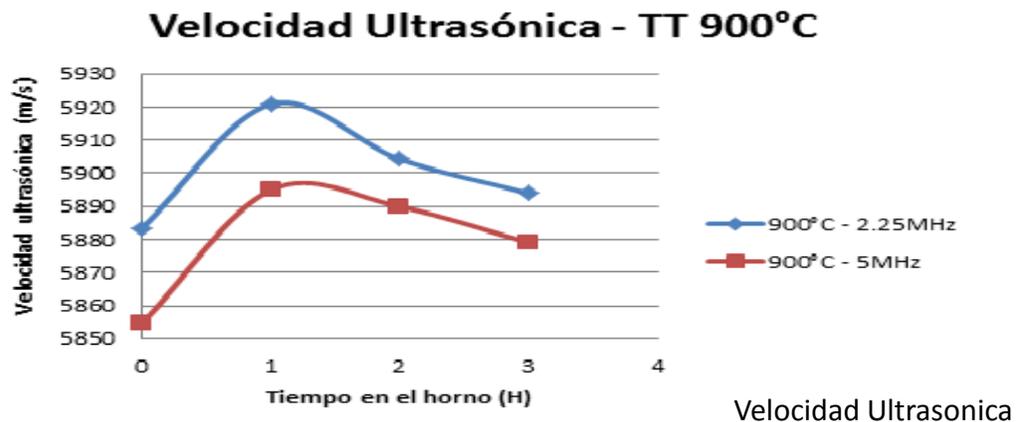
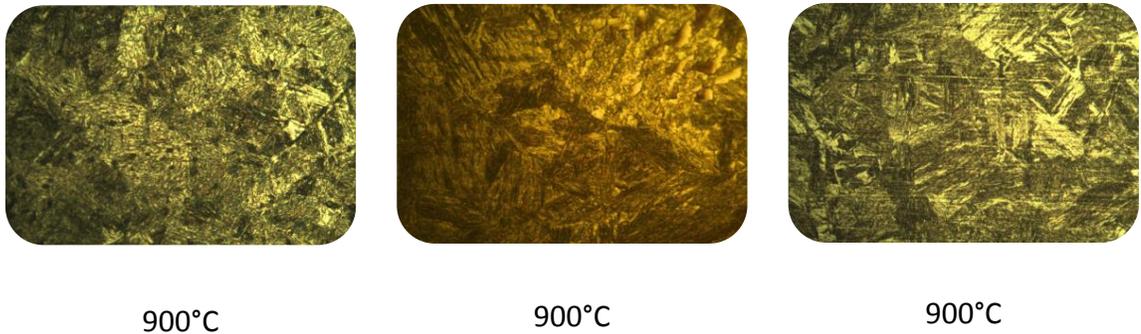


Fuente. Autor del proyecto.

En las figura 55 se observa la velocidad ultrasónica de las probetas tratadas a 900°C, con tiempos de permanencia en el horno de 1, 2 y 3 horas, mostrando que la velocidad ultrasónica de la probeta tratada aumenta respecto a la velocidad de la probeta patrón considerablemente, debido al crecimiento del tamaño de grano y a la transformación de la austenita retenida a martensita la velocidad ultrasónica disminuye en relación con el tiempo de permanecía en el horno, teniendo la

tendencia decreciente, arrojando siempre resultados de velocidad ultrasónicas superiores a los valores de la probeta patrón; los valores de la velocidad ultrasónica de la probeta tratada a 900°C son considerablemente más bajos que los valores de la velocidad ultrasónica de las probetas tratadas a 800°C.

Figura 55. Esquema estructuras probetas tratadas térmicamente y velocidad ultrasónica a 900°C.



Fuente. Autor del proyecto.

En las figura 56 se observa la velocidad ultrasónica de las probetas tratadas a 1000°C, con tiempos de permanencia en el horno de 1, 2 y 3 horas, mostrando que la velocidad ultrasónica de la probeta tratada aumenta respecto a la velocidad de la probeta patrón considerablemente, debido al crecimiento del tamaño de grano y a la transformación bainítica en matriz martensítica la velocidad ultrasónica disminuye en relación con el tiempo de permanecía en el horno, teniendo la tendencia decreciente, arrojando resultados de velocidades ultrasónicas superiores a los de la probeta patrón para los tiempos de permanencia de 1 y 2

horas, para el tiempo de permanencia de 3 horas la velocidad ultrasónica tuvo un valor muy similar al valor de la probeta patrón; los valores de la velocidad ultrasónica de la probeta tratada a 1000°C son considerablemente más bajos que los valores de la velocidad ultrasónica de las probetas tratadas a 900°C.

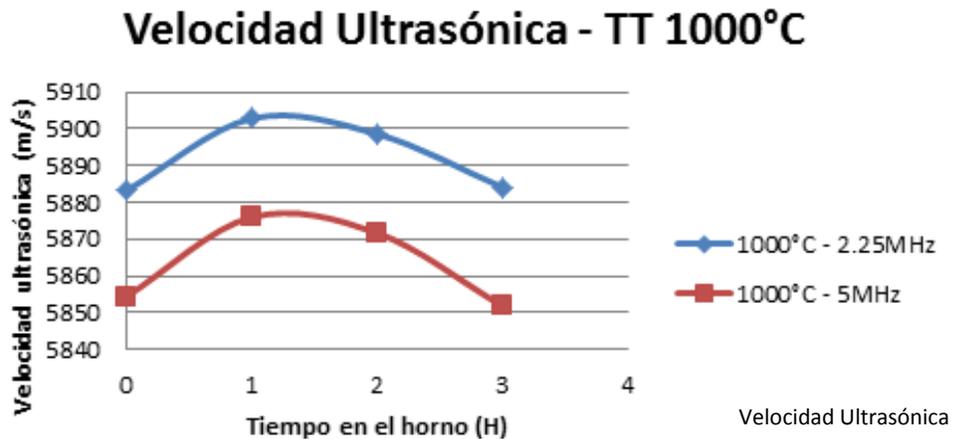
Figura 56. Esquema estructuras probetas tratadas térmicamente y velocidad ultrasónica a 1000°C.



1000°C - 1 Hora

1000°C - 2 Horas

1000°C - 3 Horas

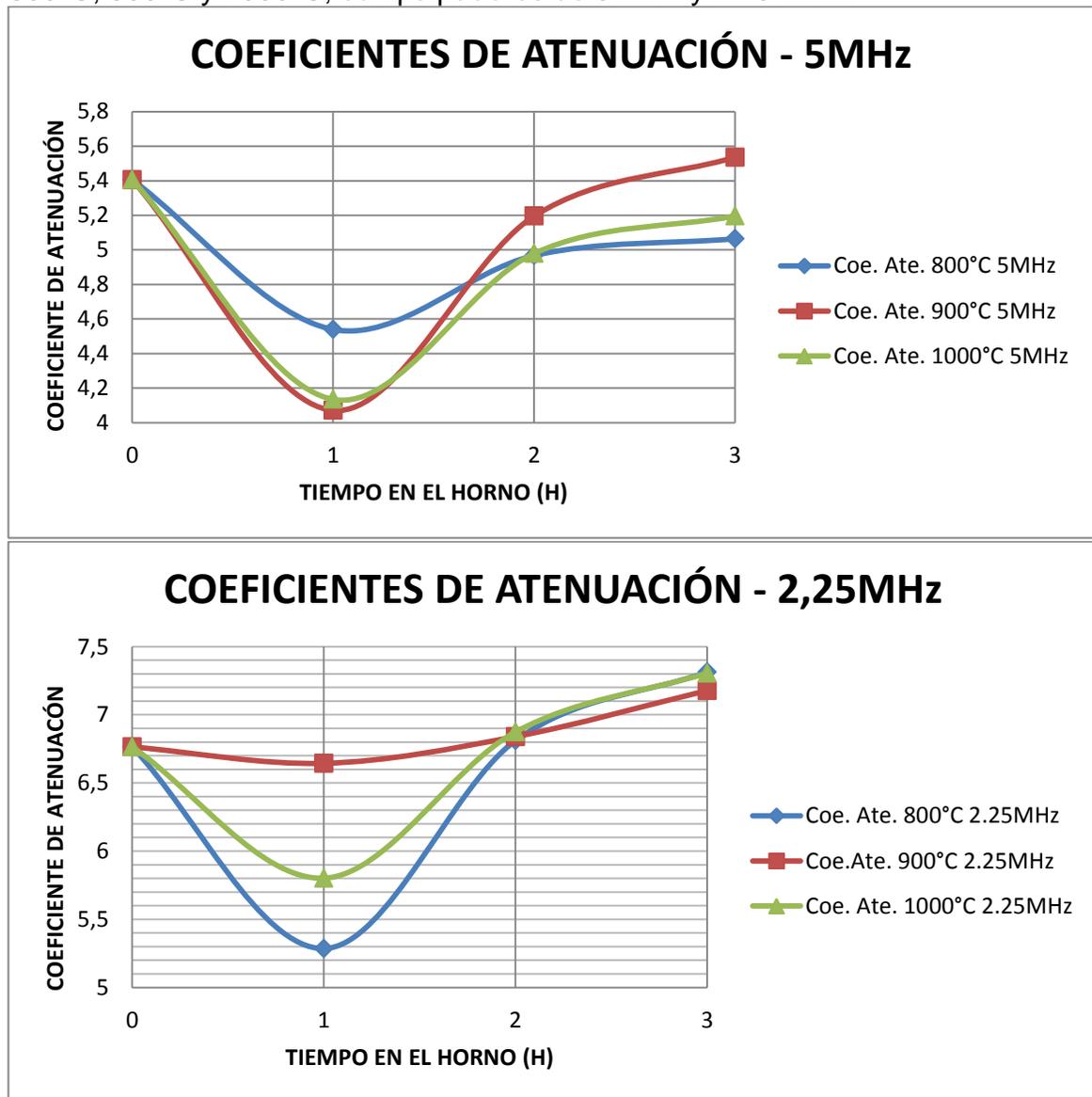


Fuente. Autor del proyecto.

Un gran coeficiente de atenuación significa que el haz es rápidamente "atenuado" a medida que pasa a través del medio, y un pequeño coeficiente de atenuación significa que el medio es relativamente transparente. Los coeficientes de atenuación de la probeta patrón arrojaron tanto para el palpador de 2.25 MHz y 5 MHz valores de opacidad cercanos a 6.7 y 5.4 respectivamente, con el tratamiento térmico arrojaron valores del coeficientes de atenuación relativamente más transparentes a 1 hora de permanecía en el horno, para las temperaturas de 1000°C y 900°C con el palpador de 5MHz se tuvo un coeficiente de atenuación más bajo con una permanencia en el horno de 1 hora en comparación con la probeta a 800°C, con el aumento del tiempo de permanencia mayor los

coeficientes de atenuación aumentaron tomando el valor más alto la probeta tratada a 900°C – 3 horas; con el palpador de 2.25 MHz los coeficientes de atenuación a 1 hora arrojaron valores bajos en 800°C Y 1000°C en comparación con la probeta tratada a 900°C, con el aumento en el tiempo de permanencia los valores de los coeficientes fueron elevados. Esto debido a que los límites de grano crecen y toman una superficie plana y esto conlleva a impedir el avance de la señal, los datos arrojaron valores dispersos debido a que no se contaba con un palpador puntual, ver figura 57.

Figura 57. Coeficientes de atenuación de las probetas tratadas térmicamente a 800°C, 900°C y 1000°C; con palpadores de 5 MHz y 2.25 MHz.



Fuente. Autor del proyecto.

## CONCLUSIONES

La velocidad ultrasónica longitudinal obtuvo valores elevados de entre 5949.7 y 5902.8 m/s para palpador de 2.25 MHz y 5904.6 y 5876 m/s para palpador de 5 MHz en las probetas tratadas térmicamente a 800°C, 900°C y 1000°C con permanencia en el horno de 1 hora en comparación con el valor de velocidad ultrasónica de la probeta patrón que obtuvo valores de 5883.2 m/s con el palpador de 2.25 MHz y 5854.4 m/s con el palpador de 5 MHz; a medida que el tiempo de permanencia en el horno aumentaba a 2 horas y 3 horas, la velocidad ultrasónica disminuía su valor siempre encima del valor de velocidad de la probeta patrón; esto a causa que el aumento del tamaño de grano y el cambio microestructural influye directamente en el comportamiento de la señal ultrasónica en el acero por el tratamiento de temple. Adicional a esto para el tratamiento a temperatura de 1000°C y 3 horas de permanencia el valor de la velocidad ultrasónica fue cercano al valor de la velocidad ultrasónica de la probeta patrón a causa de que la transformación presente en este punto fue de una matriz intermedia entre austenita retenida y martensita; teniendo en cuenta este comportamiento se puede inferir que con el aumento de la temperatura superior a los 1000°C y la ampliación del tiempo de permanencia en el horno los valores de la velocidad de ultrasonido pueden estar por debajo del valor de la probeta patrón.

Los coeficientes de atenuación disminuyeron luego de realizado el tratamiento térmico para el tiempo de permanencia de 1 hora para las probetas; cuando el tiempo de permanencia en el horno fue de 1 hora al material el haz de luz se propaga con una mayor facilidad por el material en comparación con el material que no fue tratado térmicamente, pero que a medida que el tiempo de permanencia de las probetas en el horno aumenta el haz de luz es atenuado nuevamente dándole un grado de opacidad similar al de la probeta patrón, esto debido a que los límites de grano crecen y toman una superficie plana y esto conlleva a impedir el avance de la señal.

El cambio de la dureza luego de realizados los tratamientos térmicos arrojó un aumento en la misma a medida que se aumenta la temperatura de temple como el tiempo de permanencia de la probeta en el horno en comparación con la probeta patrón, evidenciando que el tratamiento de temple fue efectivo y realizó un cambio microestructural en el material, el temple a temperatura de 800°C no obtuvo la transformación esperada esto gracias a que esta temperatura no se sobrepasó la temperatura crítica superior del acero generando precipitados, por lo cual se recomienda elevar para una próxima investigación la temperatura.

## RECOMENDACIONES

Se recomienda utilizar palpadores de 2.25 MHz en futuras investigaciones ya que estos palpadores reducirán la cantidad de difusión de la señales ultrasónicas y es la principal fuente de atenuación en los materiales de ingeniería y es un factor importante para determinar si el material puede ser ensayado ultrasónicamente. Un palpador puntual genera una recepción de datos más reales por como trasciende la onda en el material.

## BIBLIOGRAFÍA

A, Gorni. Steel forming and heat treating handbook. Brazil.

BUITRAGO, Brenda; IRAUSQUÍN, Ignasion y MENDOZA, Johnny. Ultrasonic velocity and attenuation in carbón steel specimens. 2004.

CARRANZA, Alberto. Tratamientos térmicos del acero. Unidad II, 2011.

CÍA. GENERAL DE ACEROS S.A. SAE 1020 Y SAE 1045. Aceros ingeniería al carbono.

DIAZ, María y HERNANDEZ, Hernán. Análisis microestructural y ultrasónico del acero ASTM A 131 DH32 para aplicaciones navales, tratado térmicamente por medio de temple a 900°C, 950°C. Tesis de Pregrado. Bogotá D.C.: Universidad Libre. Facultad de Ingeniería, 2013.

ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS (END) - Nondestructive Testing (NDT). [en línea]. <[http://www.thermoequipos.com.ve/mostrar\\_tips.php?IdT=8](http://www.thermoequipos.com.ve/mostrar_tips.php?IdT=8)> [citado en febrero de 2006].

K, Wank y K, Sharam. Temple del acero. Barcelona.: Aguilar S.A. 1972. Pag 115.

MEDINA, R. y SERNA, C. Evaluación microestructural del acero inoxidable martensítico ANSI 420 sometido a tratamientos térmicos. 2010.

Metalografía: protocolo. Escuela Colombiana de ingeniería Julio Garavito. [en línea]. <[http://www.escuelaing.edu.co/uploads/laboratorios/7643\\_metalografia.pdf](http://www.escuelaing.edu.co/uploads/laboratorios/7643_metalografia.pdf)> [citado en 2011].

MONTGOMERY, Duglas C. Diseño Y Análisis De Experimentos. 2 ed. Mexico D.F.: EDITORIAL LIMUSA S.A, 2004. ISBN 968-18-6156-6.

NONDESTRUCTIVE TESTING HANDBOOK. Ultrasonic testing. 2 Ed. USA: ASM Metals HandBook Volumen 7. ASM INTERNATIONAL, 1991.

REAL ACADEMIA ESPAÑOLA. [en línea]. <  
<http://rae.es/recursos/diccionarios/drae>>.

RODRIGUEZ, Edda y MARTIN, Alvaro. Evaluación de defectos inducidos en probetas de aluminio a través de métodos convencionales y no convencionales de inspección ultrasónica. 2007.

RODRIGUEZ, Edda. Evaluación de defectos inducidos en probetas de acero ANSI 304 a través de métodos convencionales y no convencionales de inspección ultrasónica. 2006.

SANCHEZ, Hugo; SANCHEZ, Edmundo y SARAHI, Raquel. Detección de materiales mediante ultrasonido. 2007.

SEF, DGZfP, AEND, COFREND y BINDT. Ultrasonidos. Manual de estudio nivel 3. 2007. 201 p.

Tratamientos térmicos: protocolo. Escuela Colombiana de ingeniería Julio Garavito. [en línea].  
<<http://copernico.escuelaing.edu.co/lpinilla/www/protocols/MATE/TRATAMIENTO%20TERMICO%20rev1.pdf>> [citado en 2008].

VALENCIA, Jorge. Caracterización mediante técnicas de ultrasonido de un laminado de fibra de vidrio. 2009.

Zambrano, J.; RODRIGUEZ, E. y PEREIRA, J. Caracterización de muestras planas de acero inoxidable austenítico 316 L mediante espectroscopia ultrasónica. 2009.

ANEXOS

**Anexo A (Análisis químico del acero AISI/SAE 1020)**

<p><b>INFORME DE RESULTADOS DE ENSAYO</b>                  Versión N° 3                  Proceso: Ejecución de Servicios Complementarios                  Procedimiento: Ejecución y Supervisión del Ensayo.</p>	
<p align="center"><b>INFORME DE ENSAYO</b>                  SENA - Centro de Materiales y Ensayos - Laboratorio de Espectrometría                  Carrera 30 No. 17 B - 25 Sur. Tel: 5960050 Ext. 14924</p>	
<p>NOMBRE DEL CLIENTE: DANIEL BERMUDEZ</p>	<p>SOLICITUD DE SERVICIO: Q14-280</p>
<p>DIRECCIÓN: CARRERA 73 A No. 860* - 31</p>	<p>TELÉFONO: 3123846001</p>
<p>FECHA DE RECEPCIÓN DE LA MUESTRA: 2014-04-09</p>	
<p>FECHA DE EJECUCIÓN DEL ENSAYO: 2014-04-21</p>	
<p><b>MÉTODO DE ANÁLISIS:</b> Espectrometría de Emisión Óptica realizada en Espectrómetro de Vacío Termo Jarrel Ash.</p>	
<p><b>RESULTADOS DEL ENSAYO (DATOS REPORTADOS POR EL EQUIPO):</b></p>	
<pre> Sample Report          04/21/14 09:34:22 PM      Page 1 Method: FTALDOR      Sample Name: DANIEL BERMUDEZ      Operator: CMC Run Time: 04/21/14 07:28:05 Comment: MUESTRA ACERO - RECTANGULAR - Ø 1020 * Model: CMC      Corr. Factors: 1  Elem  C      Si      Mn      P      S      Cr      Ni Avg   .1800   .1588   .0866   4.2000   .0045   .0299   .0321  Elem  Cu      V      Sb Avg   .0010   .0000   .0000   4.0000                 </pre>	
<p><b>OBSERVACIONES:</b></p>	
<p align="center">                  REALIZADO POR EL LABORATORISTA</p>	<p align="center">                  REVISADO Y APROBADO POR EL JEFE DE LABORATORIO</p>
<p><i>NOTA: Los resultados obtenidos en el presente informe se refieren a la muestra ensayada. Este informe no se debe reproducir sin autorización escrita por parte del laboratorio.</i></p>	
<p>Pag. 1 de 1</p>	<p align="right">FIN DEL INFORME</p>