

Caracterización por Fatiga Alternante de un Acero SAE 5160H Sometido a Granallado  
Bajo Tensión

Julian David Colmenares Diaz

Universidad Industrial de Santander  
Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas  
Escuela de Ingeniería Mecánica  
Bucaramanga

2024

Caracterización por Fatiga Alternante de un Acero SAE 5160H Sometido a Granallado  
Bajo Tensión

Julian David Colmenares Diaz

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Mecánico

Director

Ing. Oscar Rodolfo Bohórquez Becerra

PhD. Ingeniería de Materiales

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Bucaramanga

2024

**Dedicatoria**

*A mi hermano Eider Camilo y a su esposa Erika , que me apoyaron de todas las formas posibles durante el transcurso de mi carrera*

*A mi hermana Sara, a la que le deseo muchos éxitos en todo lo que se proponga hacer.*

*A mis tías y tíos, así como a todos los miembros de mi familia que en algún momento me dieron un empujón durante estos años de carrera*

*A mis amigos con los que compartí mi tiempo en la universidad, Carlos Eduardo, María Ximena, Jhon Wilmar, Jhon Fredy, Carlos Alberto, Jeison Alfonso, Jhonatan Fabian, Jeison Serrano, por las alegrías, la ayuda que dieron y por los mejores años de mi vida.*

*Al profesor Jorge Guillermo Diaz, quien fuese la persona que me presentó este proyecto y tuvo infinita paciencia durante todo el tiempo de realización del trabajo*

*A mi director de tesis Oscar Bohórquez, por sus correcciones y sus valiosas enseñanzas durante este proceso, también a Juliana y Sebastián, quienes me brindaron de su conocimiento y apoyo para sacar adelante este proyecto.*

*A mi nona Sara, por su amor, sabiduría y enseñanzas, que donde quiera que esté sepa que todo lo bueno que tengo y todo el esfuerzo que puedo dar es gracias a los años que compartí con ella, que está siempre en mi corazón y en cada paso hacia adelante que doy.*

JULIAN DAVID COLMENARES DIAZ

### **Agradecimientos**

A Jorge Guillermo Diaz, por su apoyo y su ayuda constante, a mi director de tesis Oscar Bohórquez, por su constante revisión y supervisión a este proyecto, a la escuela de ingeniería mecánica, en cuyas instalaciones se realizaron casi todos los experimentos, a SIMA, el semillero que me acogió y me mostro tantas cosas, al Director de la escuela de Ingeniería Mecánica el profesor Julián Ernesto Jaramillo Ibarra, al profesor Diego Fernando Villegas, encargado del laboratorio donde se realizaron la mayor parte de las pruebas para este proyecto, a la Escuela de Ingeniería Metalúrgica, por prestar sus instalaciones para la toma de imágenes de las muestras y a Cesar Ramos Oviedo, quien me facilitó el uso de estas.

**Tabla de contenido**

Introducción .....	12
1. Objetivos .....	14
1.1 Objetivo general .....	14
1.2 Objetivos específicos.....	14
2. Marco teórico .....	15
2.1 AISI SAE 5160H.....	15
2.2 Granallado .....	15
2.3 Fatiga.....	17
2.3.1 Fatiga Alternante a cuatro puntos .....	17
2.3.2 Modelo de Basquin.....	18
2.4 Ensayo de Dureza.....	19
2.5 Tratamientos térmicos .....	22
2.5.1 Temple y Revenido.....	23
2.5.2 Microestructura .....	24
2.5.3 Martensita.....	25
2.6 Electroerosión.....	26
3. Metodología experimental.....	27
3.1 Obtención de probetas .....	28

3.2 Caracterizacion del material.....	31
3.2.1 Caracterizacion por ensayo de dureza.....	31
3.2.2 Caracterizacion por microscopia óptica.....	35
3.2.3 Ensayos de fatiga.....	38
4. Resultados y Análisis .....	42
4.1 Análisis de la microestructura .....	42
4.2 Resultados de microdureza Vickers .....	45
4.3 Resultados pruebas de fatiga.....	46
4.3.1 Revisión fractográfica .....	48
5. Conclusiones .....	53
Bibliografía.....	55

### Tabla de Figuras

Figura 1. <i>Prueba esquemática de granallado</i> .....	16
Figura 2. <i>Esquema flexión a cuatro puntos.</i> .....	18
Figura 3. <i>Diagrama S-N ilustrativo.</i> .....	19
Figura 4. <i>Indentador sobre muestra.</i> .....	21
Figura 5. <i>Medidas referentes a indentador</i> .....	22
Figura 6. <i>Temperatura contra tiempo.</i> .....	23
Figura 7. <i>Vista de martensita desde el microscopio.</i> .....	25
Figura 8. <i>Corte por Wire Electrical Discharge Machining.</i> .....	27
Figura 9. <i>Mapa conceptual de la Metodología experimental.</i> .....	28
Figura 10. <i>Vista cercana a la cara granallada de la probeta.</i> .....	29
Figura 11. <i>Esquemático de aplicación de granallado sobre la lámina de acero SAE 5160H.</i> .....	30
Figura 12. <i>Medidas de probetas para ensayos de fatiga.</i> .....	30
Figura 13. <i>Muestras listas para ensayar.</i> .....	31
Figura 14. <i>Muestra destinada a prueba de dureza.</i> .....	32
Figura 15. <i>Pulidora del laboratorio 312 de I.M.</i> .....	33
Figura 16. <i>Máquina para microdureza Falcon 400 G2.</i> .....	33
Figura 17. <i>Distribución de las indentaciones sobre el perfil de la muestra.</i> .....	34
Figura 18. <i>Visor y panel de control de maquina Falcon 400 G2.</i> .....	35
Figura 19. <i>Ubicación de las indentaciones.</i> .....	35
Figura 20. <i>Nital al 3% en su contenedor.</i> .....	36
Figura 21. <i>Extractor de gases y humos del laboratorio 312 de I.M.</i> .....	37
Figura 22. <i>Microscopio Óptico GX71</i> .....	38

Figura 23. <i>Máquina de Ensayos Mecánicos MTS Bionix.</i> .....	39
Figura 24. <i>Apoyos para fatiga alternante a cuatro puntos.</i> .....	39
Figura 25. <i>Separación de las mordazas superiores.</i> .....	40
Figura 26. <i>Probeta fracturada por ensayo de fatiga.</i> .....	42
Figura 27. <i>Microestructura de SAE 5160H.</i> .....	43
Figura 28. <i>a) Microestructura cercana a la cara sin granallar. b)Microestructura cercana a la cara granallada.</i> .....	44
Figura 29. <i>Comparación datos por fila de Microdureza Vickers.</i> .....	46
Figura 30. <i>Grafica S-N fatiga a cuatro puntos.</i> .....	47
Figura 31. <i>Análisis fractográfico.</i> .....	49
Figura 32. <i>Probetas con rotura total a) Nivel de carga 2.2 b) Nivel de carga 2 c) Nivel de carga 1.8</i> .....	50
Figura 33. <i>Probetas con rotura parcial a) Nivel de carga 2.2 b) Nivel de carga 2 c) Nivel de carga 1.8</i> .....	51

**Lista de Tablas**

Tabla 1. *Composición química del SAE 5160H*.....15

Tabla 2. *Valores por línea de toma de datos de microdureza*. ....45

## Resumen

**Título:** Caracterización por fatiga alternante de un acero SAE 5160h sometido a granallado bajo tensión.\*

**Autor:** Julian David Colmenares Díaz.\*\*

**Palabras clave:** Shot peening, stress shot peening, fatiga, SAE 5160H, fatiga alternante, microestructura, materiales.

**Descripción:** El acero SAE 5160H, principalmente usado en la fabricación de resortes, posee ventajas ligadas a su composición tales como alta resistencia a la fatiga y resistencia al desgaste, así como particularmente una gran capacidad de ser tratado superficialmente. La industria exige mejoras constantes en los distintos procesos que existen, así como en los materiales usados, y en busca de mejorar las capacidades iniciales de este acero se propuso una caracterización del SAE 5160H bajo el tratamiento superficial de granallado bajo tensión. El estudio evaluó la microdureza del material mediante ensayos Vickers, siguiendo las normas ASTM E3 y ASTM E384. Estos ensayos permitieron comparar la microdureza en las zonas tratadas por el granallado y las que no lo estaban, confirmando la influencia del proceso en esta propiedad mecánica. Además, se reveló la microestructura martensítica del acero, derivada de austenita, debido al tratamiento de temple y revenido, permitiendo visualizar una estructura fina y acicular, con precipitados de carburos, mejora a temple la dureza del material, luego con el revenido, mejora la ductilidad y reduce la fragilidad. El proceso de granallado bajo tensión hizo disminuir la resistencia a la fatiga. Finalmente, los ensayos de fatiga alternante y fractografía mostraron que las fallas inician en la superficie sometida a los esfuerzos, y bajo cargas mayores, la zona plástica aumenta mientras que la zona de clivaje disminuye.

\* Trabajo de Grado

\*\*Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Oscar Rodolfo Bohórquez Becerra. PhD. Ingeniería de Materiales

### Abstract

**Title:** Alternating fatigue characterization of an SAE 5160h steel subjected to shot peening under tension.\*

**Author:** Julian David Colmenares Diaz.\*\*

**Key Words:** Shot peening, stress shot peening, fatigue, SAE 5160H, alternating fatigue, microstructure, materials.

**Description:** SAE 5160H steel, primarily used in spring manufacturing, has advantages related to its composition, such as high fatigue resistance and wear resistance, as well as a significant ability to undergo surface treatments. The industry constantly demands improvements in existing processes, as well as in the materials used. To enhance the initial properties of this steel, a characterization of SAE 5160H was proposed under stress shot peening surface treatment. The study evaluated the material's microhardness using Vickers tests, following ASTM E3 and ASTM E384 standards. These tests allowed comparison of the microhardness in shot-peened areas and non-peened areas, confirming the process's influence on this mechanical property. Additionally, the martensitic microstructure of the steel, derived from austenite due to quenching and tempering treatments, was revealed, showing a fine, acicular structure with carbide precipitates. Quenching improves the material's hardness, and tempering improves ductility while reducing brittleness. The stress shot peening process reduced fatigue resistance. Finally, alternating fatigue tests and fractography showed that failures initiate at the surface subjected to stress, and under higher loads, the plastic zone increases while the cleavage zone decreases.

\* Degree Work

\*\* Faculty of Physical Mechanic. School of Mechanical Engineering. Director: Oscar Rodolfo Bohorquez Becerra. PhD. Materials Engineering

## **Introducción**

Los aceros son unas de las piedras angulares en el mundo industrial, son incontables los usos en los que se han empleado las diferentes aleaciones de este material desde su descubrimiento. Su uso tan variado, así como las distintas propiedades mecánicas que ofrece ayuda a que día a día se avance en la búsqueda de la combinación ideal entre material y actividades a desarrollar por este.

Enlazado a lo anterior se encuentran los tratamientos superficiales, que modifican parcialmente las características de los diferentes materiales en los que se efectúan estos procedimientos, dando como resultado variaciones en las propiedades de los aceros, en específico para este trabajo, para ampliar y mejorar sus usos respecto a las tareas que se puedan presentar.

La industria automotriz usa durante toda su cadena de producción aceros, ya sea como herramientas o como partes del producto final. Una de estas partes son los resortes de ballesta, y hablando específicamente de esta pieza. La revista electrónica de Colinnovación en Desarrollo Tecnológico e Innovación Empresarial (2018) dice que los materiales más usados en su fabricación se reducen a ciertas variantes de acero tales como el SAE 9254 o SAE 6150, que son los más abundantes en el mercado para este propósito, y junto a estos entran a la discusión el SAE 5160 o 5160H, un acero de resistencia medio-alta, pero de más destacada calidad, también muy usado en la producción de los mencionados resortes.

Los resortes de ballesta, o ballestas como también son llamados, son suspensiones que funcionan de forma elástica, esto a partir de láminas de acero curvadas que se flexionan sobre una pieza de resistencia uniforme, brindando eficiencia en la distribución del peso de la carga que se le ejerce.

La calidad presente en la variante SAE 5160H, se muestra como una opción a los aceros mayormente usados en la fabricación de los resortes, dando pie a la realización de estudios con el fin de hallar formas de mejorar las características base que brinda esta aleación de cara a sus usos posibles, principalmente en la ya mencionada industria automotriz.

Entonces, este proyecto apuntó a responder la pregunta, ¿El proceso de granallado bajo tensión mejora la resistencia a la fatiga de un acero SAE 5160H? Para lograr esto se preparó el material y se procedió a realizar ensayos de dureza, fatiga alternante y caracterización de microestructura. Una vez conseguidos estos resultados, se obtuvieron datos con el fin de establecer una relación entre el granallado bajo tensión y la vida a la fatiga del material.

## 1. Objetivos

### 1.1 Objetivo general

Obtener una caracterización del comportamiento a fatiga alternante de un acero SAE 5160H con granallado bajo tensión.

### 1.2 Objetivos específicos

- Caracterizar las propiedades mecánicas estáticas del acero SAE 5160H por medio de ensayo de dureza.
- Construir curvas de fatiga alternante a cuatro puntos para el acero SAE 5160H con granallado bajo tensión con el fin de establecer los parámetros del modelo de Basquin.
- Analizar la microestructura del acero SAE 5160H con el fin de establecer los cambios en la zona sometida a granallado bajo tensión por medio de microscopía óptica.
- Caracterizar microscópicamente las superficies de fractura con el fin de identificar los mecanismos de falla por medio de microscopía óptica.

## 2. Marco teórico

Para la realización del trabajo se tuvieron en cuenta conocimientos previos, en este apartado se presentan los conceptos clave de los que se hizo uso a lo largo del proyecto, siendo estos esenciales para la comprensión y elaboración de lo establecido en este.

### 2.1 AISI SAE 5160H

Según The World Material (2024), el acero SAE 5160H se caracteriza por una excelente tenacidad, ductilidad y resistencia a la fatiga. Es comúnmente usado en aplicaciones en el sector industrial, teniendo gran relevancia en el área automotriz en diversas aplicaciones de resortes de servicio pesado, especialmente ballestas o aplicaciones que requieren durabilidad a largo plazo bajo estrés repetido. A continuación, se puede ver en la Tabla 1 la composición química del material:

**Tabla 1.**

*Composición química del SAE 5160H*

C	Mn	Cr	P	Si	S	Fe
0.56 - 0.64	0.75 - 1	0.7 - 0.9	≤0.035	0.15 - 0.30	≤0.04	Bal

Nota: Los valores que se muestran en la anterior tabla son los rangos porcentuales de cada elemento aleante presente en un acero SAE 5160H. Datos tomados de “*Quantification of shot peening coverage,*” (D. Kirk, 2014).

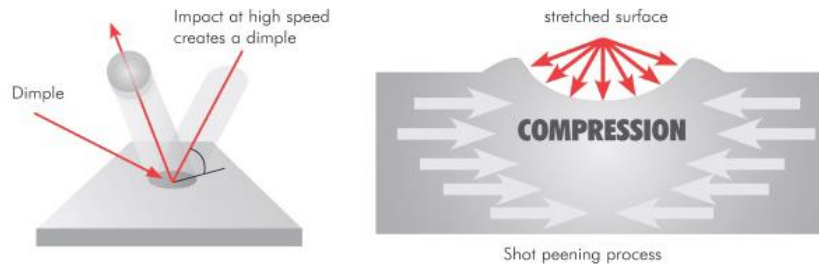
### 2.2 Granallado

El granallado, o también conocido por su nombre en inglés shot peening, es un proceso por el cual se inducen deformaciones plásticas a una capa superficial de un material como se ve en el lado izquierdo de la Figura 1, que muestra de una forma esquemática el proceso y efecto esperado

sobre el material al realizarle granallado, para así producir una compresión residual, como se ve en el lado derecho de la Figura 1, que impida o reduzca la apertura de microgrietas.

### Figura 1.

#### *Prueba esquemática de granallado*



Nota: Tomado de la web de *Curtiss-Wright Surface technologies*. (s.f.). *SHOT PEENING*. *Curtiss-Wright Products & Services*. <https://cwst.com/our-services/shot-peening>

El proceso de granallado se realiza en frío y endurece la superficie del material bombardeándola con partículas a alta velocidad, esta velocidad varía de 20 a 120 m/s (Hernández et al., 2004), esto genera deformaciones de tipo plásticas superficiales que afectan una capa del componente atacado, el espesor de esta capa afectada se encuentra entre 0.1 y 0.5 mm (Vantori & Zanicheli, 2020). Para las piezas de automóviles, como las ballestas, que están sujetas a tensiones de flexión normales, las áreas de tensión positiva tienen un efecto positivo (O'Hara, 1990). Este tratamiento generalmente se aplica a los componentes de ingeniería que tienen geometrías complejas (Jaramillo, 2013), o están sujetos a tensiones variables muy localizadas, también llamadas atascamientos (Jaramillo, 2019).

## 2.3 Fatiga

Se entiende como fatiga al daño o fallo dado en un material o pieza que sufre de una carga repetida variable temporalmente. En su manifestación primordial presenta una deformación plástica denominada deformación microplástica (ZwickRoell, 2022).

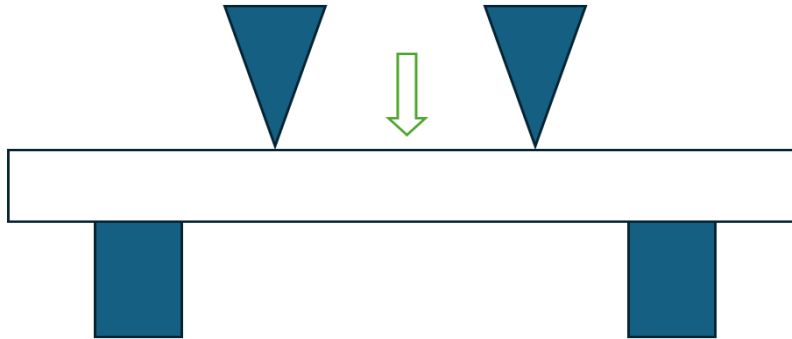
La fatiga del material es uno de los principales problemas que afectan a la industria, ya que las piezas están constantemente bajo estrés fluctuante, lo que provoca la formación y propagación de microfisuras que aún con el paso del tiempo no se han podido erradicar (Castro, Meggiolaro, 2016). Existen tres métodos para revisar el comportamiento de una pieza sometida a falla por fatiga. Stress life [S-N], que se encarga de predecir el número de ciclos por encima de 10.000, vida de deformación [ $\epsilon$ -N] o fatiga hasta 10.000, y el método da/dN, basado en patrones de fractura y propósito de servicio de predicción de vida antes de agrietarse (Vormwald, Hos, Freire, Gonzales, Diaz, 2018). Se puede decir que una gran cantidad de componentes se han preparado utilizando el método S-N. Una hoja de una ballesta, por ejemplo, está diseñada para una vida útil de hasta 200.000 ciclos (Hernández, Vilorio, Arango, Jiménez, Mendoza, Cadena, 2004), aunque según otra referencia denota una duración de 147.000 en muelles sin granallado a 448.000 ciclos a los que se les aplicó granalla. (Solano G, Soto R, 1996) Esto considerando variables propias de cada una de las investigaciones.

### 2.3.1 Fatiga Alternante a cuatro puntos

La fatiga a cuatro puntos es una de las formas en las cuales se puede probar un espécimen a la hora de realizar ensayos de fatiga. Se caracteriza por el posicionamiento de la probeta sobre dos apoyos y el sometimiento de esta a carga en el centro con dos puntos de presión como se ve en la Figura 2. Según ZwickRoell (2022), Dependiendo del ensayo los apoyos paralelos del soporte encargado de efectuar el ensayo pueden ser de montaje fijo, giratorio o basculante.

**Figura 2.**

*Esquema flexión a cuatro puntos.*



Nota: Ilustración esquemática de la posición de una probeta en un dispositivo que proporciona un agarre a cuatro puntos para un ensayo de fatiga.

**2.3.2 Modelo de Basquin**

El modelo de Basquin forma una función de falla representada por las curvas S-N. (Sofía Elizaga Rus, 2019). Se afirma que el número de ciclos hasta la falla  $N$ , de esfuerzos  $S$ , satisface la ecuación (1):

$$S = \sigma_f'(N)^b \quad (1)$$

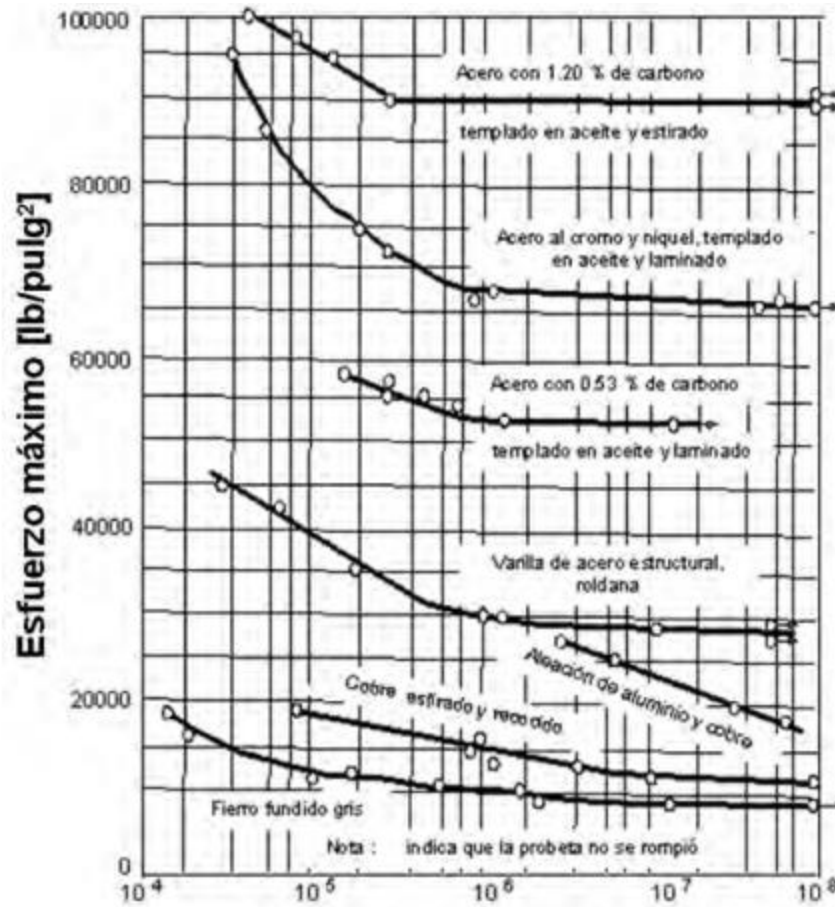
donde  $\sigma_f'$  es el coeficiente de resistencia a la fatiga y  $b$  el exponente de resistencia a la fatiga ambos constantes del material. (Sofía Elizaga Rus, 2019).

Este es un procedimiento que da una noción del comportamiento de los materiales cuando enfrentan situaciones con requerimientos cíclicos, aun así, se trata de una aproximación, la variabilidad estadística es un problema presente siempre que se trabaja un análisis de fatiga.

En la Figura 3 se muestra un ejemplo de construcción de curvas S-N, determinando el límite de duración de los metales sometidos a esfuerzos mediante flexión invertida.

**Figura 3.**

*Diagrama S-N ilustrativo.*



Nota: Tomada de *El Shot Peening y la Vida a la Fatiga de Elementos de Máquinas*, 2013 por Héctor Enrique Jaramillo Suárez.

### 2.4 Ensayo de Dureza

Los ensayos de dureza se usan para determinar la resistencia a la penetración de los materiales. En el caso de este proyecto fue empleado el ensayo de dureza Vickers, gracias a que

posee una de las escalas más amplias en los ensayos de dureza y que además se puede efectuar sobre todos los metales.

Este ensayo se define como la relación de la carga al área de la superficie de la huella. Es un método óptico, que mide el tamaño de la indentación o las diagonales que deja la respectiva herramienta de penetración en el ensayo de dureza, cuanto más grande sea la marca presente en la probeta más blando será el material ensayado (Dieter, 1961).

Para realizar este ensayo se emplea como indentador una pirámide de base cuadrada de diamante cuyas caras opuestas forman un ángulo de 136°. Para representar la dureza Vickers se emplean las iniciales VHN o HV, siendo esta última la más empleada en el habla hispana, también siendo la que se usó en este proyecto.

Entonces, el cálculo de la dureza Vickers viene dado por la siguiente ecuación (2):

$$HV = \frac{2P \sin(\theta/2)}{L^2} = \frac{1,854P}{L^2} \quad (2)$$

En la que P es la carga aplicada en kilogramos, L la medida media de la longitud de las dos diagonales en milímetros y  $\theta$  es el ángulo formado por las caras opuestas del indentador, es decir 136° (Dieter, 1961).

Según las normas ISO 6507 y ASTM E384 se presiona el indentador contra la muestra con una carga definida no menor a 1gf. Otra forma de expresar la fórmula para el cálculo de la dureza Vickers se muestra a continuación en la ecuación 3, donde F es la carga aplicada en Newtons:

$$HV = 0,102 \times \frac{2F \sin(136/2)}{d^2} = 0,1891 \times \frac{F}{d^2} \quad (3)$$

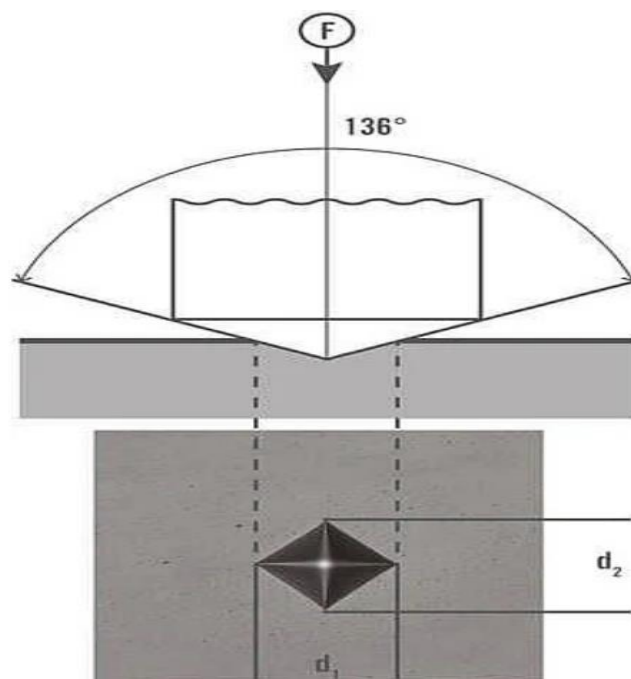
Donde:

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (4)$$

En la Figura 4 se puede observar de forma esquemática el ángulo de caída del indentador sobre el material, así como referenciadas las diagonales que la herramienta de penetración deja sobre el material y que corresponden también a las usadas en el cálculo de la dureza como se plantea en las ecuaciones 3 y 4.

**Figura 4.**

*Indentador sobre muestra.*

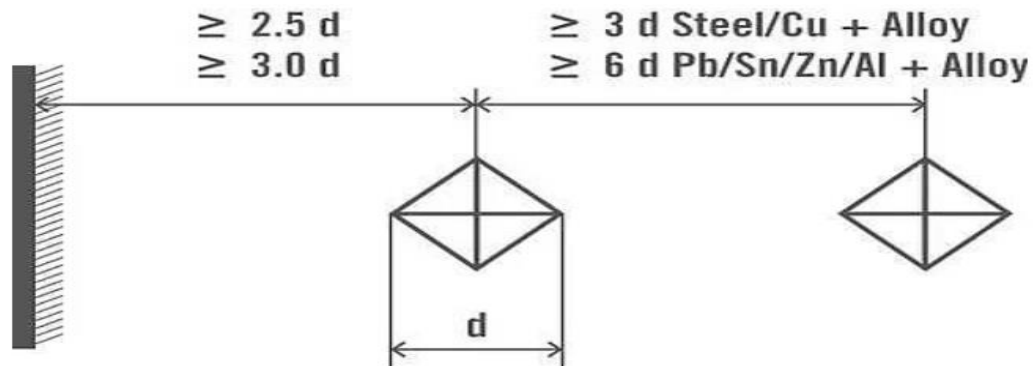


Nota: Tomado de ZwickRoell. (s.f.). *Ensayo de dureza Vickers según ISO 6507 / ASTM E384.* ZwickRoell. <https://www.zwickroell.com/es/sectores/metales/normas-para-metales/ensayo-de-dureza-vickers-iso-6507/#top>

En la Figura 5 se puede apreciar la distancia a tomar desde el borde y la separación entre perforaciones durante el ensayo de dureza, esto datos ligados al factor  $d$  presente por el indentador.

**Figura 5.**

*Medidas referentes a indentador*



Nota: Tomado de ZwickRoell. (s.f.). *Ensayo de dureza Vickers según ISO 6507 / ASTM E384*. ZwickRoell. <https://www.zwickroell.com/es/sectores/metales/normas-para-metales/ensayo-de-dureza-vickers-iso-6507/#top>

Cabe aclarar que el factor  $d$  presente en las ecuaciones 3 y 4 no es el mismo que el valor  $d$  en la Figura 5, el primero hace referencia un valor dado por las diagonales de la huella dejada por el indentador en la muestra, mientras el segundo es la medida de horizontal de este.

## 2.5 Tratamientos térmicos

Los tratamientos térmicos son un conjunto de procesos a los que se someten los metales, o aleaciones de estos, en busca de modificar alguna de sus propiedades, ya sea física o química (Air Liquide, 2023), en este último caso se suelen conocer como tratamientos termoquímicos. En su mayoría, consisten en exponer al material a condiciones de alta temperatura y posterior enfriamiento de forma repentina, esto sucede en una atmósfera controlada a elección, y que se

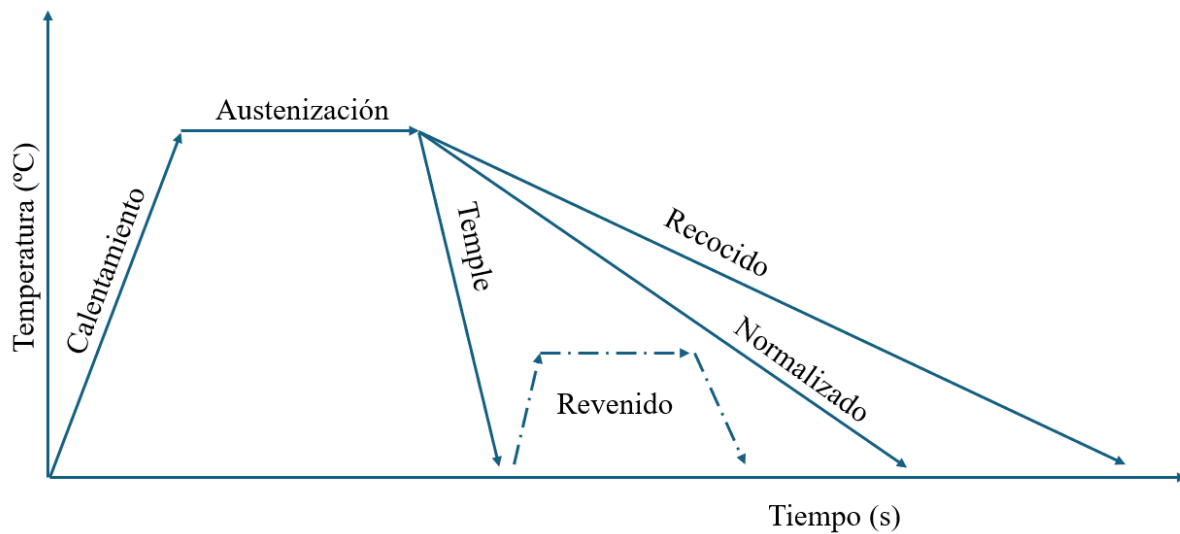
determina en función de la propiedad a modificar. Al finalizar el ciclo de tratamiento térmico se espera obtener un cambio o mejora respecto a la pieza inicial.

Los tratamientos térmicos pueden ser aplicados a elementos tanto semiacabados, en casos como el recocido cuyo fin es aumentar la ductilidad de todo el material, así como tratar de eliminar las tensiones internas, como a piezas finalizadas en las que usualmente se busca cambiar sus cualidades superficiales y sus propiedades mecánicas tales como dureza, resistencia a la corrosión o desgaste, algunos ejemplos de estos tratamientos son el temple, el revenido o el normalizado.

En la Figura 6 se ilustra de forma esquemática el ciclo de los tratamientos térmicos a función de temperatura contra tiempo, así como una comparación entre algunos de ellos.

**Figura 6.**

*Temperatura contra tiempo.*



### **2.5.1 Temple y Revenido**

Los tratamientos térmicos aumentan en cuanto a relevancia a medida que la sociedad crece y avanza, debido a que las constantes mejoras en las diferentes industrias requieren de innovaciones

en las aplicaciones de los metales y en las propiedades que estos puedan ofrecer. Tanto el temple como el revenido son dos de los principales y más usados tratamientos térmicos, hacen parte de los procesos de la mayoría de las industrias que se puedan mencionar.

El temple es un proceso en el cual se calienta el material a una temperatura crítica, en el caso del SAE 5160H ronda los 830°C (Davis J. R.,1996), para posteriormente enfriarlo de forma más o menos rápida en un medio como agua, aceite, etcétera, para que así se produzca el aumento en la dureza a la profundidad deseada, esto se debe generalmente a la formación de martensita en el caso de los aceros (Askeland, 2013). Además de la temperatura, también influyen en la formación de martensita, el tiempo de mantenimiento bajo esta temperatura y la forma de enfriamiento.

Del revenido se puede afirmar que es un tratamiento complementario al del temple, dado que solo se les aplica a aceros previamente templados, esto suele suceder cuando se requiere disminuir ligeramente los efectos producidos por el temple, conservando una fracción de la dureza y aumentando la tenacidad. El revenido permite reducir la dureza y la resistencia de los aceros que han sido templados, eliminando las tensiones generadas durante el proceso de temple y mejorando la tenacidad del material, lo que resulta en un acero con la dureza o resistencia requerida. La principal diferencia con el temple radica en la temperatura máxima alcanzada y en la velocidad de enfriamiento (Askeland, 2013).

### ***2.5.2 Microestructura***

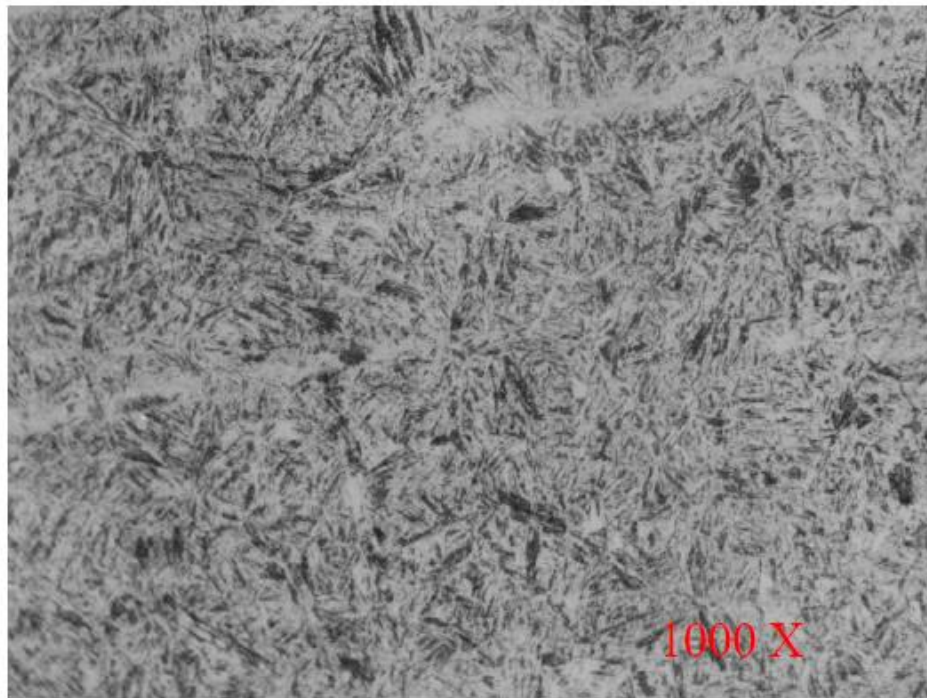
La microestructura de un metal corresponde a la disposición cristalina y granular que presenta a nivel microscópico. Esta estructura está condicionada por diversos factores, tales como la composición química del metal, la temperatura y la velocidad de enfriamiento empleadas durante su fabricación. La microestructura ejerce una influencia directa sobre las propiedades mecánicas del material, tales como la dureza, resistencia y ductilidad (Metalografía.es, 2023).

### 2.5.3 Martensita

La martensita se define como una solución sólida sobresaturada de carbono en hierro alfa, que se genera durante el enfriamiento rápido del acero, esto luego de elevar su temperatura lo suficiente, usualmente se inicia la aparición de martensita entre los 200°C y los 400°C (Davis J. R.,1996). Se visualiza en forma de agujas como se ve en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y su estructura cristalina es tetragonal, en contraste con la cúbica centrada en el cuerpo que posee el hierro alfa en su estado ordinario, debido a la distorsión provocada por la presencia de átomos de carbono. Este material es extremadamente duro, y su dureza se incrementa con el aumento del contenido de carbono, siendo luego de la cementita el constituyente más duro de los aceros, aunque presenta una fragilidad notable (Dopico A., 2017).

#### Figura 7.

*Vista de martensita desde el microscopio.*



Nota: Tomado de *Viloria-Estrada, A., Mantilla-Nova, D., García-Salinas, D. A., Barbosa, W., Palacio-Espinosa, C. C., Romero-Toledo, F. A., Peña-Ballesteros, D. Y., & Díaz-Rodríguez, J. G. (2024). Evaluación del perfil de microdureza y tensiones residuales en un acero granallado SAE 5160H. Revista UIS Ingenierías, 23(1), 103–114.*

En cuanto a su proporción de carbono, no es constante, puede variar hasta un 0.89%, con esto también aumenta su dureza y resistencia mecánica hasta 68 Rockwell-C y 250 kg/mm<sup>2</sup> respectivamente (Askeland, 2013), así mismo, también hace mayor su fragilidad. La martensita se produce de la austenita, y la transformación ocurre de forma prácticamente instantánea.

Al someter la martensita a un calentamiento, el carbono se libera y la estructura se transforma, lo que resulta en una disminución de la dureza, pero a su vez en un aumento de la resistencia mecánica y de la ductilidad, los aleantes estabilizan en cierta medida la dureza y resistencia de la martensita. Lo anterior sucede cuando se somete la martensita a un revenido, volviéndola así martensita revenida. La martensita revenida suele presentar contracciones de volumen en comparación a su estado anterior de martensita sin revenir (Dopico A., 2017).

## **2.6 Electroerosión**

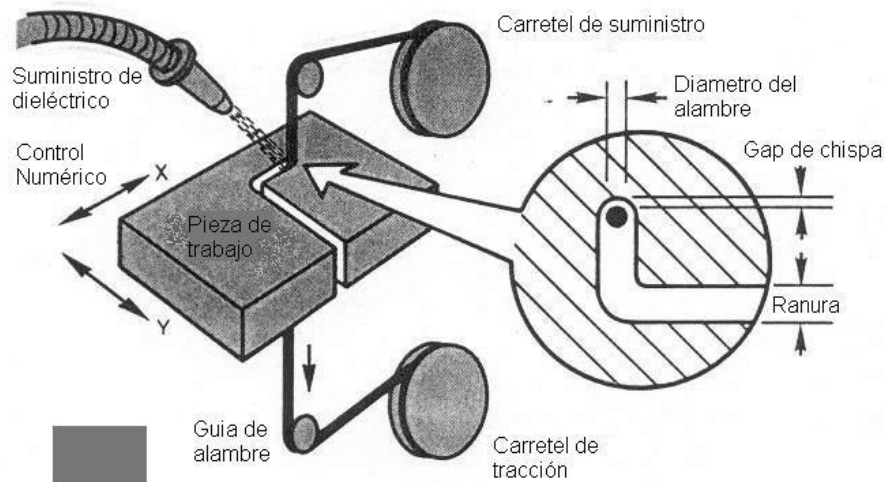
El mecanizado por electroerosión, también conocido como EDM por ser su acrónimo en inglés (Electro Discharge Machining) es un proceso de corte no convencional, en otras palabras, no corta la pieza por métodos mecánicos, sino a través del efecto de erosión termoeléctrica, básicamente la eliminación de material se da por pulsos eléctricos generados miles de veces por segundo a partir de una fuente hasta un electrodo, formando así chispas y una temperatura elevada.

Cuando la máquina de electroerosión realiza un corte de electroerosión por hilo (WEDM) como se ve en la Figura 8, el electrodo se compone de un hilo de latón, latón-zinc o molibdeno. Las máquinas que utilizan latón tienen generadores más potentes y servomotores más precisos que

las de molibdeno, lo que permite aplicar más potencia al hilo. El latón se desgasta con cada pulso y se reemplaza inmediatamente, manteniendo un diámetro constante para mejorar la precisión y la calidad superficial. En contraste, el hilo de molibdeno es reutilizado, lo que reduce su diámetro en un 10% después de aproximadamente diez horas de corte. (Marín C., Electroerosionadoras, Metal actual).

### Figura 8.

*Corte por Wire Electrical Discharge Machining.*



Nota: Tomado de *Machining Data Handbook, Metcut, pág. 12-49*

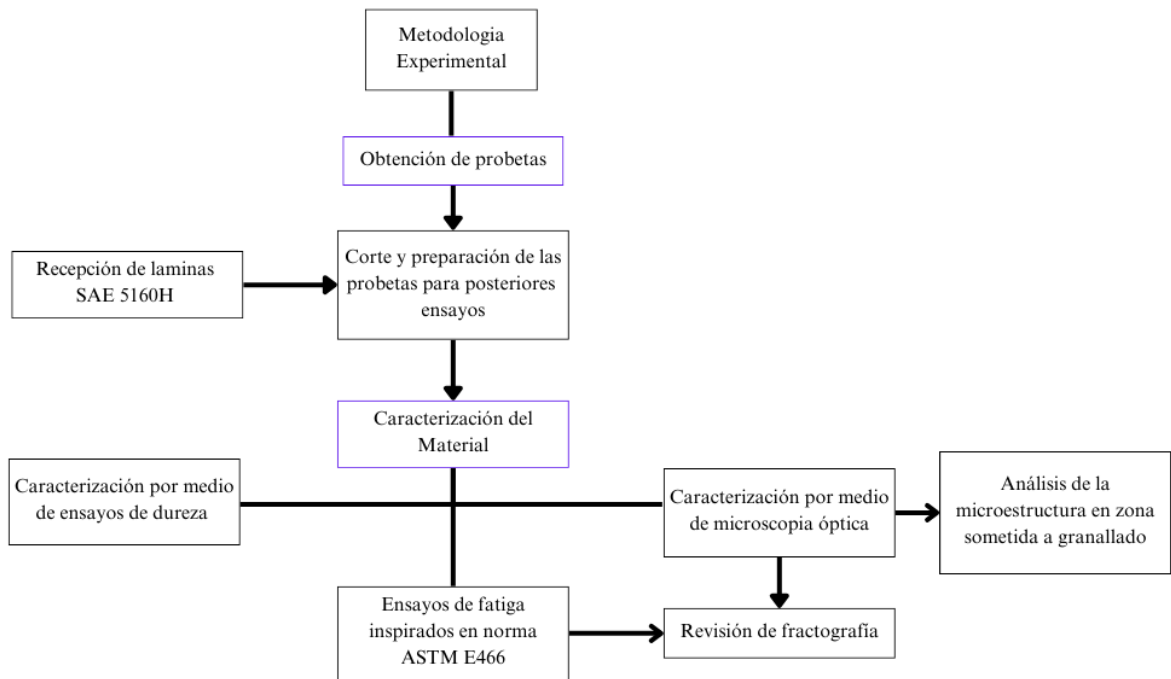
### 3. Metodología experimental

Fue necesario para la realización exitosa del trabajo fijar unas pautas a seguir, estableciendo un orden lógico que brindó facilidades y ayudó en consecuencia a la elaboración del proyecto, con esto en mente se planteó una metodología experimental con un total de dos etapas generales; obtención de probetas y caracterización del material, las cuales abarcan la totalidad de la obtención

de datos que luego fueron usados en el análisis del experimento, a continuación, se muestra en la Figura 9 las guías principales a seguir durante cada etapa:

**Figura 9.**

*Mapa conceptual de la Metodología experimental.*



### 3.1 Obtención de probetas

Para la etapa de obtención de probetas se incluyeron las labores de selección de materiales, es decir las láminas de acero SAE 5160H, el corte de las probetas y la preparación de estas para el ensayo. En cuanto a las láminas de acero, se obtuvieron un total de quince, esperando cortar de cada uno de los perfiles un total de tres muestras. El material cuenta con un tratamiento térmico de temple y revenido en aceite a 460 °C, esto junto al stress shot peening dieron las condiciones iniciales para la caracterización y los ensayos de fatiga.

Después de preparar debidamente el material se realiza el proceso de granallado, la cobertura o alcance de este procedimiento fue de 100% a una cara como se ve en la Figura 10, es decir que las probetas que se usaron en la prueba de fatiga contaban con una cara totalmente atacada por el granallado, específicamente la cara que presenta tensión.

**Figura 10.**

*Vista cercana a la cara granallada de la probeta.*

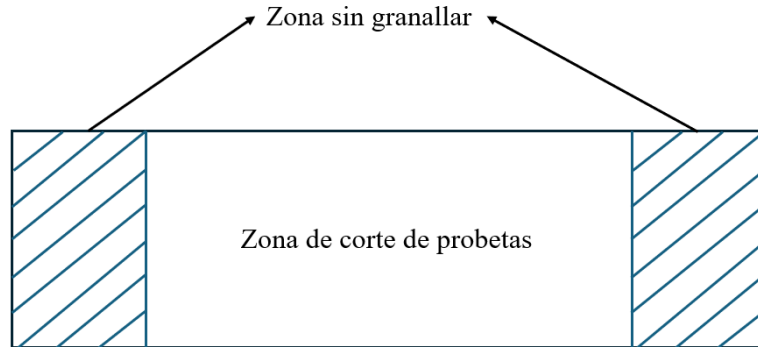


Nota: La imagen está tomada directamente de una de las muestras usadas en los ensayos de fatiga realizados durante este proyecto.

El granallado, así como el resto de tratamientos aplicados, se hizo de la misma forma en cada una de las láminas, esto quiere decir que también se puede trasladar la homogeneidad descrita a las probetas, cabe señalar que el shot peening no se le aplicó a la totalidad de cada lámina, esto hizo que se vieran unas franjas sin el tratamiento superficial en los extremos de todas las láminas tal como muestra la Figura 11.

**Figura 11.**

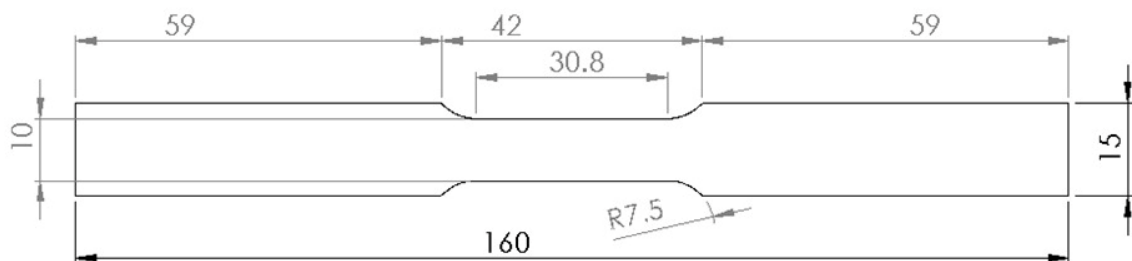
*Esquemático de aplicación de granallado sobre la lámina de acero SAE 5160H.*



Luego de aplicado el granallado se procede a realizar el corte de las probetas, el procedimiento se realizó por medio de corte con hilo caliente, también conocido como electro discharge machining (EDM) o electroerosión, todo basado en la normativa UNE 15601:2004. Las medidas que tuvieron las probetas fueron basadas en la norma ASTM E466 y tal como se muestra en la Figura 12 son 160 mm x 15 mm x 1/4", donde la zona reducida pasaba a ser de 30.8 mm x 10 mm x 1/4".

**Figura 12.**

*Medidas de probetas para ensayos de fatiga.*



Nota: El grosor permanece constante en toda la probeta, de 1/4" o 6.35 mm. Tomado de *J. G Díaz, A. Pertuz, A Vilorio, 2021. Comportamiento a fatiga en flexión a cuatro puntos de un acero SAE 5160H Con y sin granallado, Informe final de la convocatoria 891 de minciencias.*

La cantidad de especímenes a disposición de la prueba de fatiga fueron de doce muestras, debido que se buscaba evaluar fatiga en tres diferentes niveles de carga al esfuerzo último. La muestra a la cual se le tomaron imágenes para hacer la caracterización de microestructura por microscopía óptica y posteriormente se le hizo ensayo de dureza Vickers fue tomada de una de las partes sobrantes de material destinado al ensayo de fatiga. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** que se ve a continuación se puede observar algunas de las probetas aún por trabajar.

### **Figura 13.**

*Muestras listas para ensayar.*



## **3.2 Caracterización del material**

Durante la caracterización del material se desarrollaron tres pruebas que contemplan lo necesario para el culmen de este apartado; la caracterización por ensayo de dureza, los ensayos de fatiga alternante a cuatro puntos y la caracterización por microscopía óptica. A excepción de la revisión fractográfica, que necesita de las muestras luego de aplicado el ensayo de fatiga para poder revisarlas en el microscopio, las tres etapas se pudieron realizar simultáneamente debido a que el accionar de ninguna condiciona a la otra.

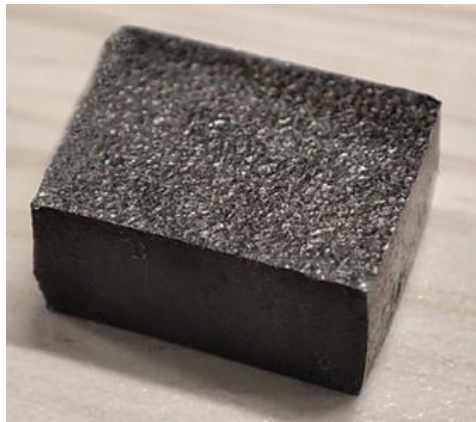
### **3.2.1 Caracterización por ensayo de dureza**

La realización de la prueba de dureza inicia con la muestra vista en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** de unas medidas de aproximadamente 15 mm x 10 mm x 6.35 mm debido a que se usó parte del material de las láminas de las que se cortaron las probetas para el ensayo de fatiga, dejando el ancho y grosor de 10 mm y 6.35 mm respectivamente, el largo se ajustó para que cumpliera con los requerimientos del perfil necesario para hacer sobre este las pruebas de dureza Vickers.

La probeta tiene las características del acero SAE 5160H usado en los ensayos de fatiga alternante a cuatro puntos, es decir tiene un granallado sobre la totalidad de la cara que presenta tensión posterior a la aplicación del stress shot peening sobre las láminas.

**Figura 14.**

*Muestra destinada a prueba de dureza.*



Luego de tener la probeta se procedió a lijarla, esto para alcanzar un acabado de tipo espejo que permitió tener una superficie lo suficientemente regular durante las indentaciones de la prueba. Para lograr esta superficie esperada se hizo uso como referencia al proceso descrito en la norma ASTM E3, en específico lo descrito en los incisos 10.2 y 10.4 de la misma. Se empezó por pulir la muestra con abrasivos de diferentes tamaños de grano, luego de terminar se aplicó paño y abrasivo de alúmina de 1  $\mu\text{m}$  para obtener así el mejor acabado posible.

En cuanto al lijado, este se hizo de 2 formar diferentes, primero con la pulidora disponible para el uso de los estudiantes en la escuela de ingeniería mecánica que se muestra en la Figura 19, en esta se pulió la probeta con las lijas de grano más grueso, es decir las de menor número, y también se usó a la hora de aplicar paño, para las lijas de grano más delgado, partiendo desde la 600 hasta la 1500, se optó por realizar la pulida de forma manual.

**Figura 15.**

*Pulidora del laboratorio 312 de I.M.*



Ya alcanzada la superficie deseada, se procedió con el ensayo de dureza Vickers, esto con la ayuda de la maquina Falcon 400 G2 que se ve en la Figura 16, durómetro de la marca INNOVATEST disponible en la escuela de ingeniería mecánica, el procedimiento se hizo bajo la norma ASTM E384 que establece los procedimientos para realizar pruebas de dureza de microindentación, así como su alcance, equipos, etcétera.

**Figura 16.**

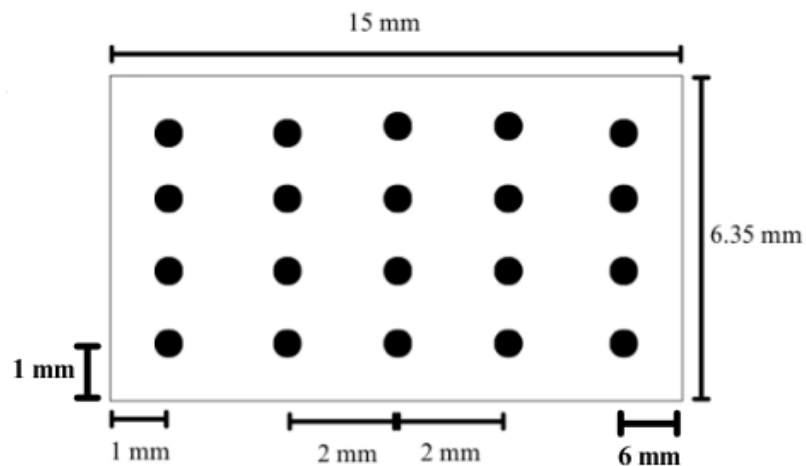
*Máquina para microdureza Falcon 400 G2.*



La toma de las muestras, así como la pulida anteriormente establecida, se realizó sobre una de las caras que tienen como medida 15 mm x 6.35 mm, y la distribución de los puntos fue tal que se conservó 1 mm de margen realizando microindentaciones sobre cuatro líneas distribuidas equidistantemente entre todas ellas sobre el perfil seleccionado como se ve en la Figura 17, luego, como se puede apreciar en la Figura 18 los resultados se muestran en la pantalla adjunta a la máquina para ensayos de microdureza.

**Figura 17.**

*Distribución de las indentaciones sobre el perfil de la muestra.*



Nota: Se inició la toma de datos desde el punto situado en el extremo inferior izquierdo de la imagen, siguiendo hacia la derecha de forma horizontal, el distanciamiento viene dado por las directrices de la norma ASTM E384, siendo el factor  $d$ , que se muestra en la Figura 5, aproximadamente de 0.35 mm, se tuvo en cuenta un margen de error aproximado de 0.1 mm a la hora de moverse entre las indentaciones. Teniendo en cuenta la disposición propuesta en la Figura 17, la cara granallada de la muestra estaría sobre el borde superior de la imagen, siendo la última hilera de indentaciones la más cercana a esta.

### Figura 18.

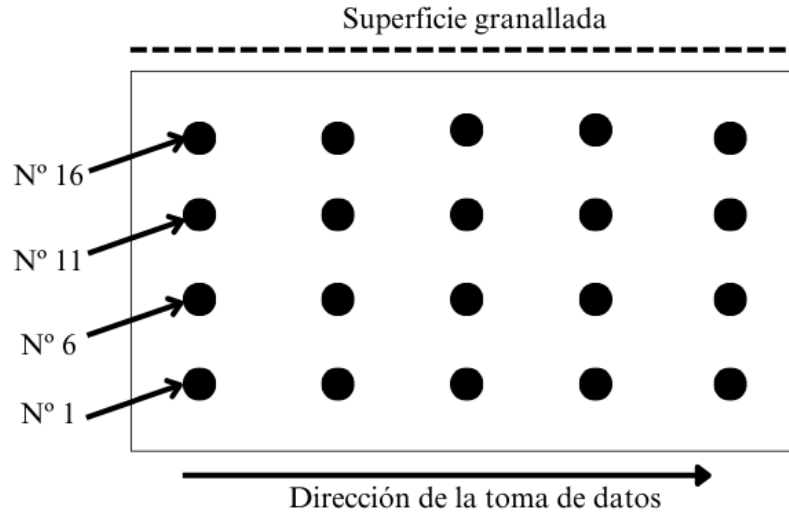
*Visor y panel de control de maquina Falcon 400 G2.*



En la Figura 19 se puede visualizar de forma gráfica la ubicación de cada una de las indentaciones.

### Figura 19.

*Ubicación de las indentaciones.*



### 3.2.2 Caracterización por microscopía óptica

Para la caracterización por microscopía óptica se siguieron las mismas indicaciones en cuanto al trato dado a la probeta anteriormente expuesta, la pieza a examinar estuvo bajo las mismas condiciones que la muestra usada para los ensayos de microdureza mostrada en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, es decir, las pautas establecidas por la norma ASTM E3, que establece la importancia de estas preparaciones a la hora de revelar las características de los metales y sus aleaciones bajo microscopio.

A partir del pulido con paño, el curso de la caracterización se bifurca, el siguiente paso para realizar la microscopía óptica fue realizar un ataque químico a la muestra con el fin de exponer la microestructura del SAE 5160H, este ataque se realizó de acuerdo a la norma ASTM E407, la cual aborda los procedimientos de cómo realizar ataques químicos a metales y aleaciones para luego observar bajo microscopio. Para realizar un ataque químico al SAE 5160H es necesaria una solución de alcohol y ácido nítrico conocida como nital que se muestra en la Figura 20.

#### Figura 20.

*Nital al 3% en su contenedor.*



El nital, según ASTM E407, se identifica con el número 74 y se compone por 1 a 5 mL de  $HNO_3$  y 100 mL de etanol (95%) o metanol (95%). Mientras más  $HNO_3$  haya más se incrementa la velocidad del ataque.

En este caso se usó nital al 3% para realizar el ataque, con la ayuda de unas pinzas se sumergió la cara de la probeta previamente trabajada a espejo en la solución durante aproximadamente 1.5 segundos para luego limpiarse con abundante agua y alcohol, como medida de seguridad el ataque químico se efectuó dentro del extractor de gases y humos que se ve en la Figura 21, también disponible en el laboratorio 312 de la escuela de ingeniería mecánica. Luego de retirar el exceso de nital, se procedió a secar la muestra con una secadora de aire caliente.

**Figura 21.**

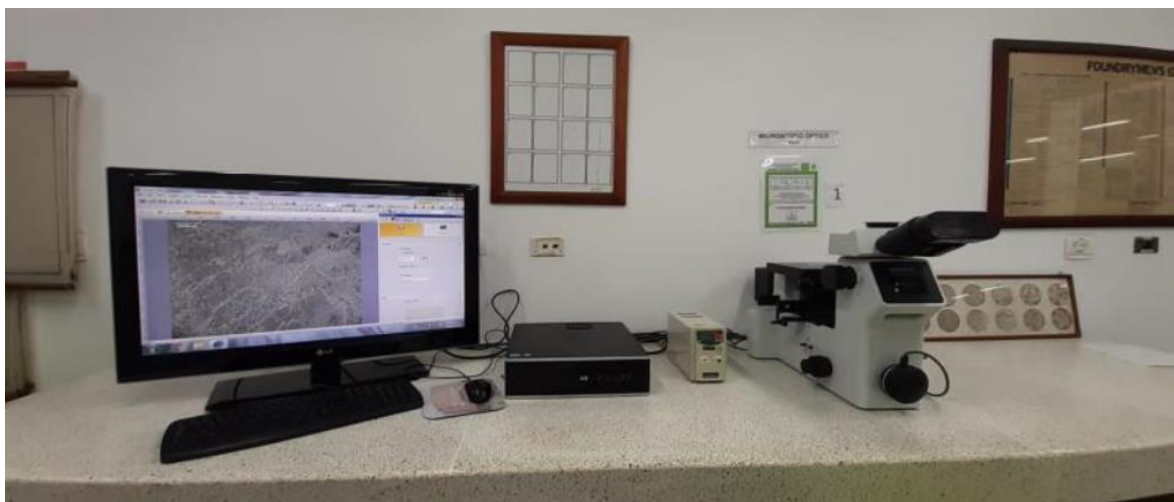
*Extractor de gases y humos del laboratorio 312 de I.M.*



Para poder visualizar la microestructura se usó el microscopio óptico GX71 de marca Olympus de la Figura 22, de la escuela de Ingeniería Metalúrgica, por lo que se hizo un traslado de la probeta a esta escuela para continuar con la toma de imágenes.

**Figura 22.**

*Microscopio Óptico GX71*



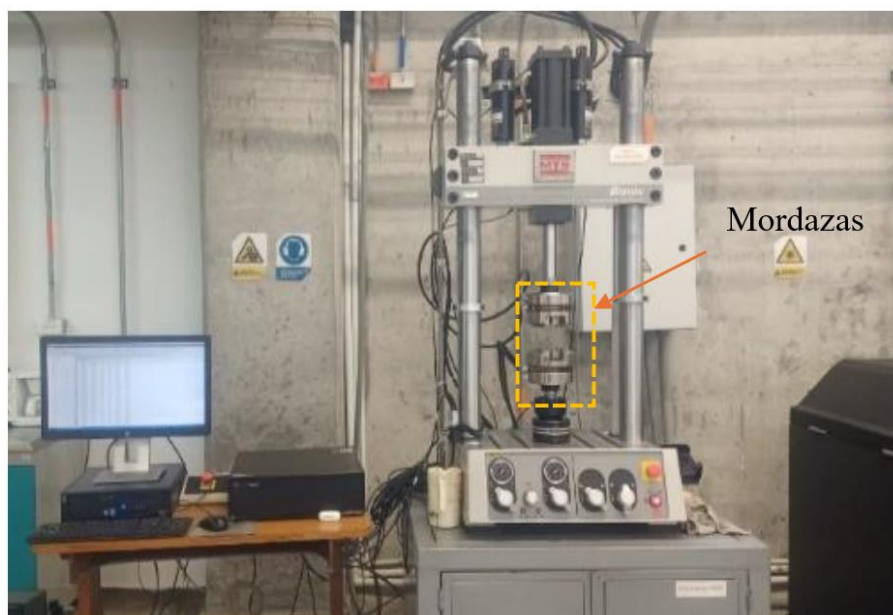
### ***3.2.3 Ensayos de fatiga***

Para los ensayos de fatiga se inició teniendo las probetas de acero SAE 5160H según lo que se estipuló en el apartado de obtención de probetas, con las medidas mostradas en la Figura 12, cumplido esto, se procedió a preparar la máquina para la ejecución de los ensayos.

En este caso se usó la máquina para ensayos mecánicos MTS Bionix que se ve en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se encuentra en el laboratorio 007 de la escuela de ingeniería mecánica y además de realizar los ensayos de fatiga alternante a cuatro puntos también se encargó de entregar los datos necesarios para el análisis posterior, esto gracias al software MULTIPURPOSE con el que está enlazado. Ahora, cabe señalar que debido al diseño de la máquina, que está propuesta para múltiples tipos de ensayos, se debe adecuar dependiendo del ensayo que se desee realizar, que en el caso de este proyecto sería el ya mencionado ensayo de fatiga alternante a cuatro puntos, y la adecuación que fue necesaria en la máquina corrió por parte de las mordazas, cambiando los soportes que se aprecian en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** a los mostrados a continuación en la Figura 24.

### Figura 23.

*Máquina de Ensayos Mecánicos MTS Bionix.*



**Figura 24.**

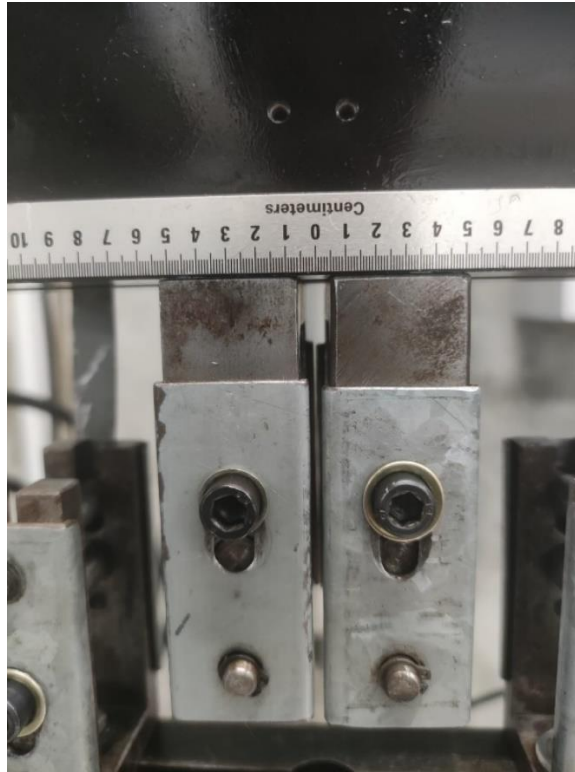
*Apoyos para fatiga alternante a cuatro puntos.*



Previo a la instalación de las mordazas en la MTS, fue necesario ajustar sus medidas ya que en el caso de ambas, tanto la superior como inferior, cuentan con un riel adaptable a distintas medidas de probetas, para el soporte superior fue necesaria una separación entre puntos de presión de cada mordaza de 30 mm, teniendo como objetivo que sea la mínima distancia posible de ajustar sin que las mordazas se toquen, o visto desde la herramienta de medición instalada directamente sobre este soporte, debe coincidir el borde externo de la mordaza con la medida de 55 mm como se ve en la Figura 25, con un margen de 2 mm debido a que la manipulación y ajuste es manual, además de que es posible que durante el cambio de probetas o durante la prueba de fatiga en sí haya cierto movimiento. Para el soporte inferior se midió una distancia de 120 mm, esto desde la mitad de cada una de las mordazas.

**Figura 25.**

*Separación de las mordazas superiores.*



Después de comprobados todos los pasos anteriormente mencionados, se montan los soportes con las mordazas a la MTS, luego de ajustar con esta la altura se introdujeron las probetas, una a la vez, y se pudo proceder con el ensayo de fatiga alternante. La cara granallada de cada probeta debía estar dirigida hacia arriba, ya que así será esta la que reciba directamente la fuerza producida por la máquina.

Los datos iniciales introducidos al software son tres, de los cuales dos fueron constantes en todas las pruebas y otro varió de acuerdo con lo propuesto en el proyecto.

Como primer dato constante se encuentra la frecuencia que fue establecida en 10 Hz durante todas las pruebas, este valor indica que se realizaron 10 ciclos por segundo. El segundo valor constante es el valor R, definido como la relación de inversión de carga, hace alusión al tipo de carga que se usó, en este caso fue establecido como  $R = 0.1$ , indicando que el elemento en cuestión estuvo sometido a dos cargas cíclicas repetidas, esto continuamente hasta el fallo.

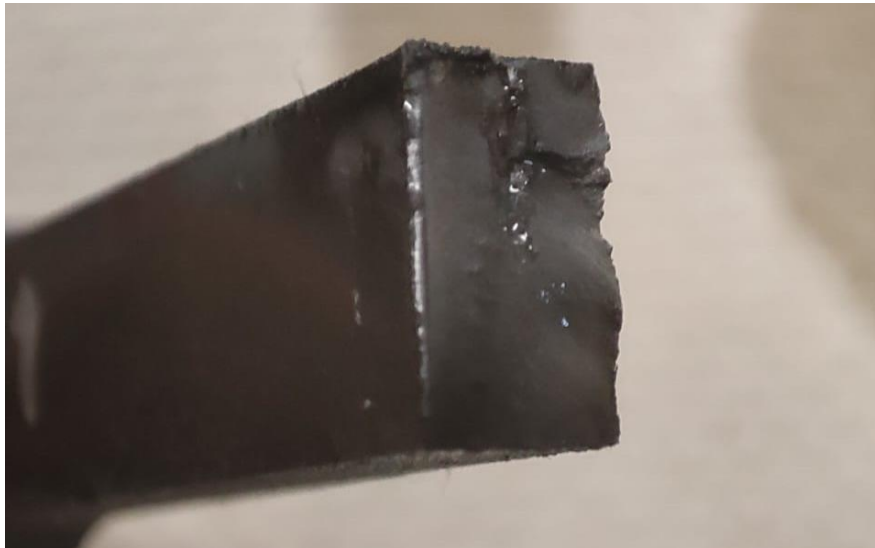
Para finalizar con los datos, como tercero antes del inicio del ensayo, y el único que varió entre pruebas, se introdujeron los niveles de desplazamiento 1.8 mm, 2 mm y 2.2 mm. Estos valores permitieron el control del ensayo, se profundizará más al respecto en la sección 4.3.

Con lo anterior establecido se dio inicio a los ensayos de fatiga, cabe añadir que los datos ingresados en el software se pueden guardar en una configuración establecida para así usarse posteriormente sin necesidad de volver a ingresar los datos constantes, esto es importante ya que para realizar todos los ensayos se requirieron varias sesiones, debido a la larga duración de estos.

Concluyendo con esta sección, se obtuvieron un total de doce muestras fracturadas, al no ser necesaria la fractura total ya que se estudia el material al fallo, algunas probetas rompieron como se ve en la Figura 26 y otras no fracturaron totalmente, todos los datos fueron usados en el análisis fractográfico.

**Figura 26.**

*Probeta fracturada por ensayo de fatiga.*



#### **4. Resultados y Análisis**

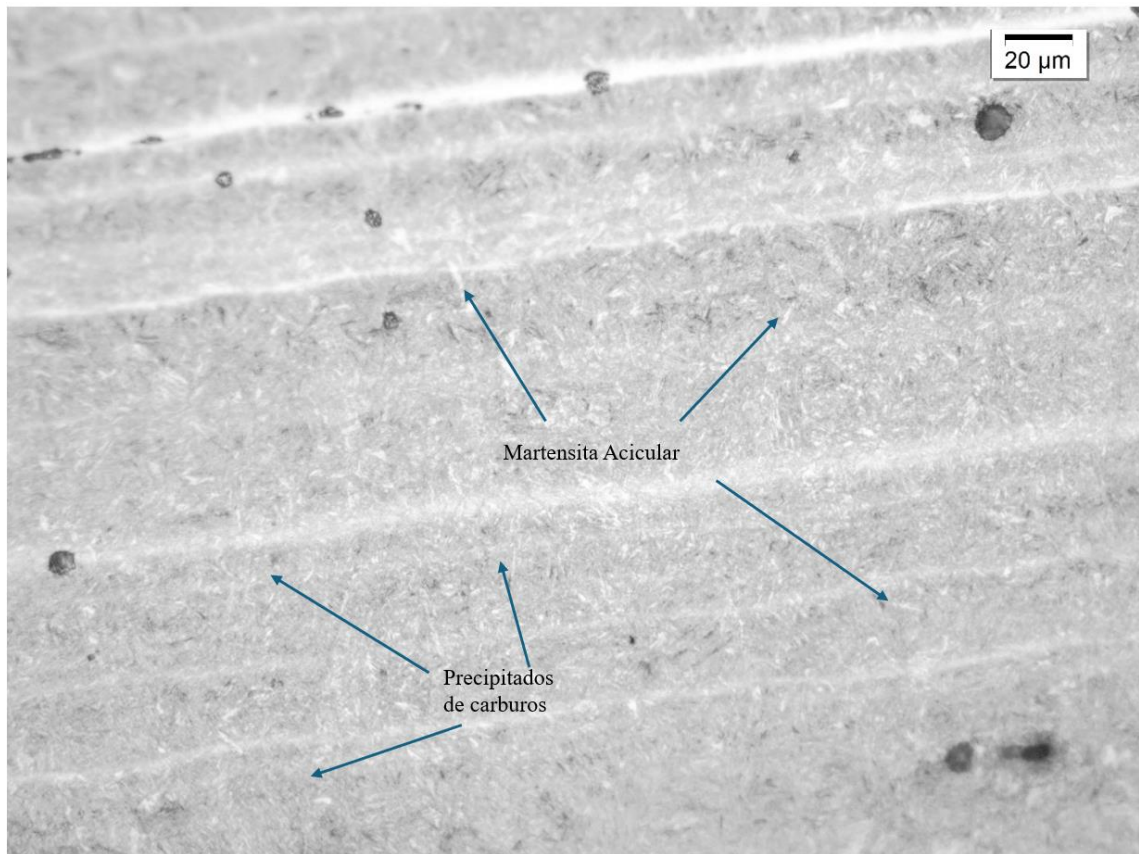
En esta sección se presentan todos los resultados obtenidos a lo largo de las diferentes pruebas a las que se sometieron las muestras, así como una interpretación de estos, esperando desembocar en conclusiones notables de los temas tratados.

##### **4.1 Análisis de la microestructura**

Para el análisis microestructural de SAE 5160H se tomaron imágenes que muestran las fases del acero bajo microscopio, en la Figura 27 se ve una microestructura martensítica acicular, es decir en forma de aguja, y bastante fina, se esperaba este arreglo ya que se sometió el material a temple, así como un volumen no tan pronunciado debido al revenido en aceite a 460 °C, esta composición muestra que luego del proceso de fragilización por temple la dureza del material presentó una disminución dada por el revenido, por su parte los precipitados de carburo, señalados en las zonas un poco más oscuras, se formaron por la separación de algunos aleantes tales como el cromo, mientras el acero cruzaba los procesos de enfriamiento y solidificación. Los carburos suelen mejorar la resistencia a la abrasión y favorecen el fortalecimiento del acero.

##### **Figura 27.**

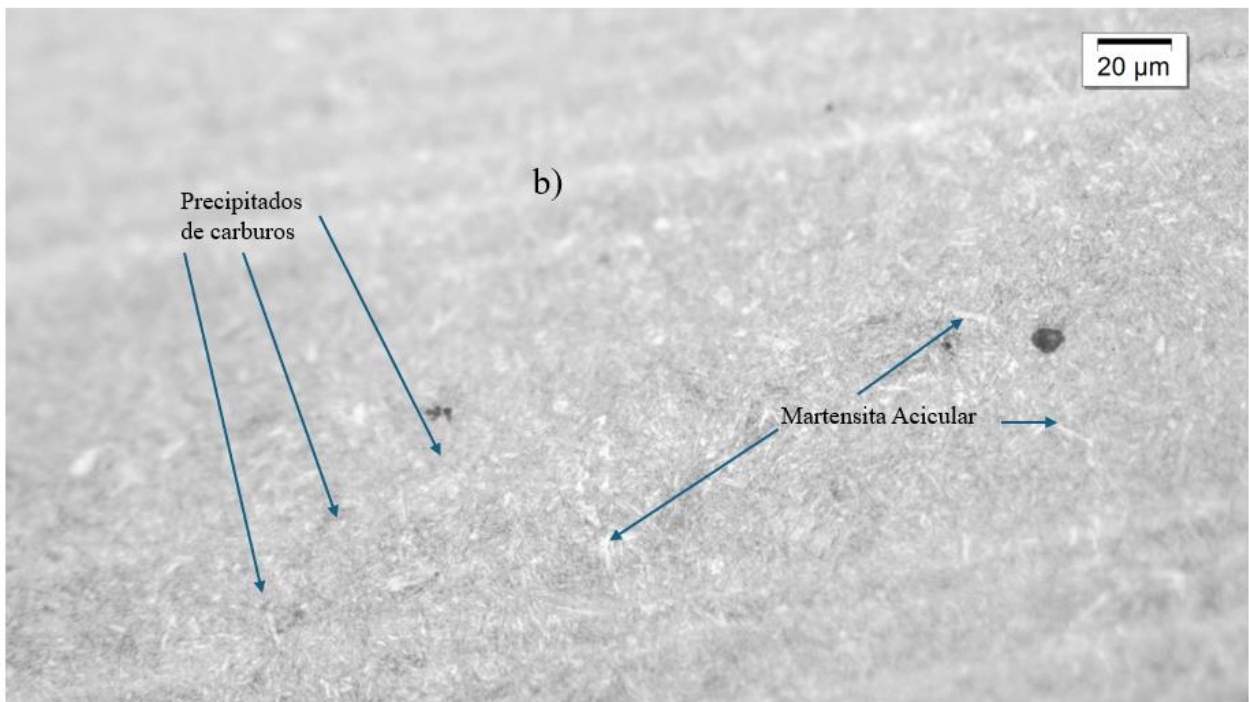
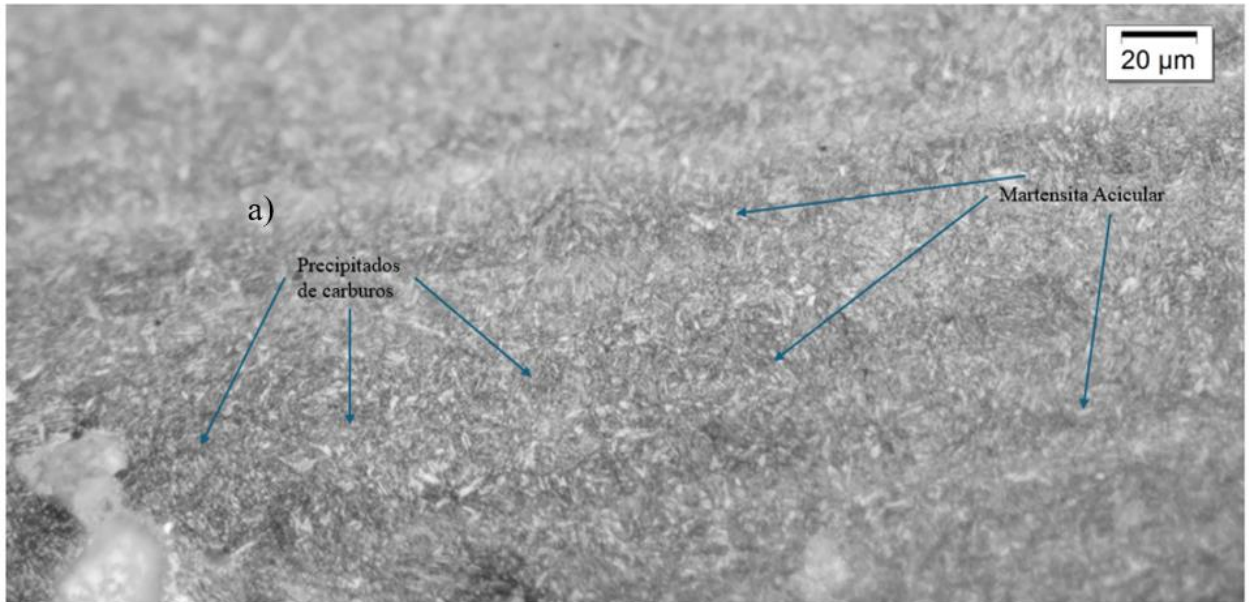
*Microestructura de SAE 5160H.*



En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** a) se puede ver otro ejemplo en otra zona del arreglo martensítico mencionado, la zona seleccionada en este caso está más cerca al borde sin granallar de la muestra, mientras que la mostrada en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** b) está justo en el borde contrario, es decir sobre el granallado.

**Figura 28.**

*a) Microestructura cercana a la cara sin granallar. b) Microestructura cercana a la cara granallada.*



En todas las imágenes se ve claramente la microestructura martensítica derivada de los tratamientos térmicos que se le aplicó al material, solo presenta cierto refinamiento superficial y un poco de distorsión en los granos de la imagen tomada cerca al granallado. Era de esperar que se viera en las distintas imágenes de esta forma, en concordancia con lo expuesto por Juan Gonzales

(2020), el shot peening puede hacer que, dependiendo de lo profundo de su afectación, afine los granos, lo cual generalmente resulta en mayor resistencia y dureza del material.

La martensita revenida evidencia que el material recibió, a raíz de tratamientos térmicos, cambios en sus propiedades mecánicas, y al observar la Figura 28 b) se ve una variación en las fases de grano, que muestra una afectación provocada por el tratamiento de granallado.

**4.2 Resultados de microdureza Vickers**

A continuación, se enlistaron los valores promedio de cada línea, así como su respectiva desviación estándar, esto en la Tabla 2 y gráficamente en la Figura 29.

Los cálculos de la dureza en cada toma son hechos automáticamente por la máquina Falcon 400 G2 luego de registrar las medidas de las diagonales en la marca dejada por el indentador, D1 y D2 en la Figura 18. El valor del promedio total de la dureza presentado fue de 445.745 HV, con una desviación estándar de 8.2732.

**Tabla 2.**

*Valores por línea de toma de datos de microdureza.*

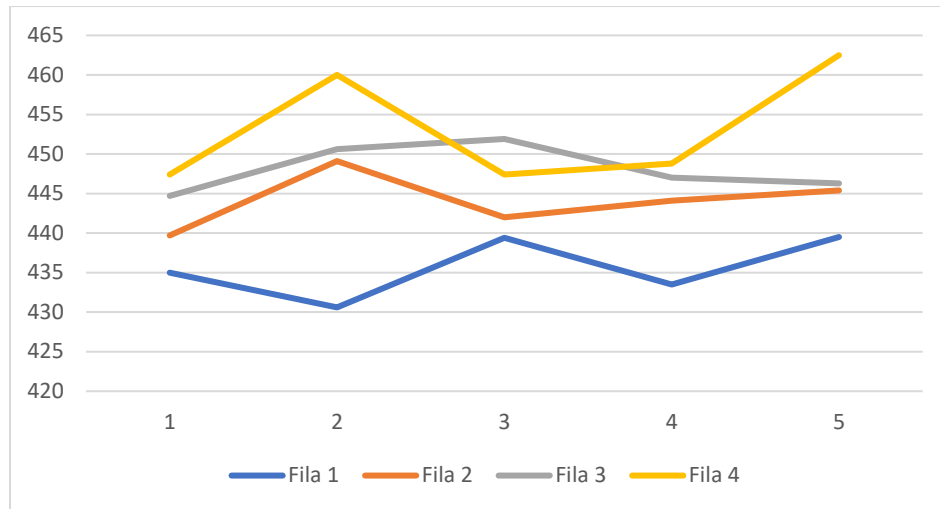
N.º de Línea	Dureza Promedio (HV)	Desviación Estándar
1	435.60	3.85
2	446.06	7.60
3	448.10	3.02
4	453.22	7.20

El posicionamiento de los datos, como la ubicación de cada fila respecto a al perfil de la toma de datos de microdureza, están explicados en la Figura 19.

*Ubicación de las indentaciones.*

**Figura 29.**

*Comparación datos por fila de Microdureza Vickers.*



La dureza promedio de la línea cercana al granallado fue de 453.22 HV, mientras la de la línea más alejada a la cara granallada fue de 435.6 HV, mostrando un cambio en la dureza del material, esto posiblemente sea resultado de los esfuerzos de compresión generados por el stress shot peening, siendo también apreciable que, si se toman en cuenta que los valores de dureza aumentan mientras más se acercan a la cara granallada como se ve en la Figura 19, estos aumentos demuestran la profundidad de los esfuerzos de compresión a los que se sometió el material.

Teniendo en cuenta lo expuesto se puede concluir que la capa de material afectada de manera más directa por el stress shot peening presenta una mayor dureza a la capa del material que se encuentra sin este proceso.

### 4.3 Resultados pruebas de fatiga

El software MULTIPURPOSE, luego de completadas todas las pruebas de fatiga alternante a cuatro puntos, dio como producto los registros necesarios para entrar a analizar el comportamiento del acero SAE 5160H bajo el tratamiento superficial de stress shot peening.

Específicamente, los datos que se buscaba obtener eran los distintos valores de fuerza a los que la MTS sometió los especímenes durante la fatiga, con el fin de calcular el esfuerzo, y la cantidad de ciclos que soportó cada una de las probetas bajo esta fuerza.

El esfuerzo, valor necesario para construir la gráfica S-N, viene dado por la ecuación (5):

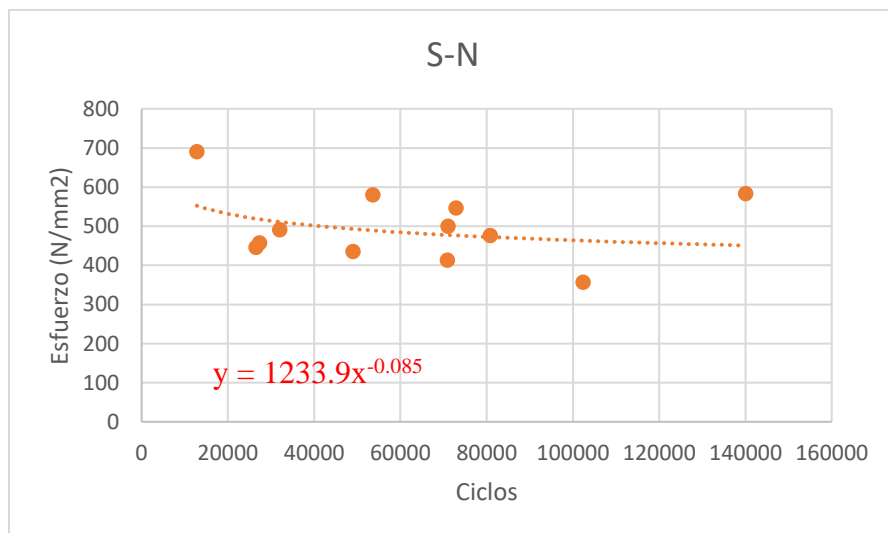
$$\sigma = \frac{F/2 \times L \times t/2}{b \times t^3/12} \quad [N/mm^2] \quad (5)$$

Donde F es la fuerza resultante del ensayo en Newtons, L es la distancia que separa los puntos de presión de las mordazas sobre la probeta, cuyo valor constante es de 30 mm, b es el ancho de la zona reducida de la probeta y t el espesor de la misma, estos datos se pueden consultar en la Figura 12.

A continuación, en la Figura 30, se ven los resultados para cada una de las muestras trabajadas en una gráfica S-N construida a partir de estos, siendo S el esfuerzo resultante que se obtiene gracias a la ecuación 5 y N el número de ciclos en el ensayo de fatiga antes de la rotura.

**Figura 30.**

*Grafica S-N fatiga a cuatro puntos.*



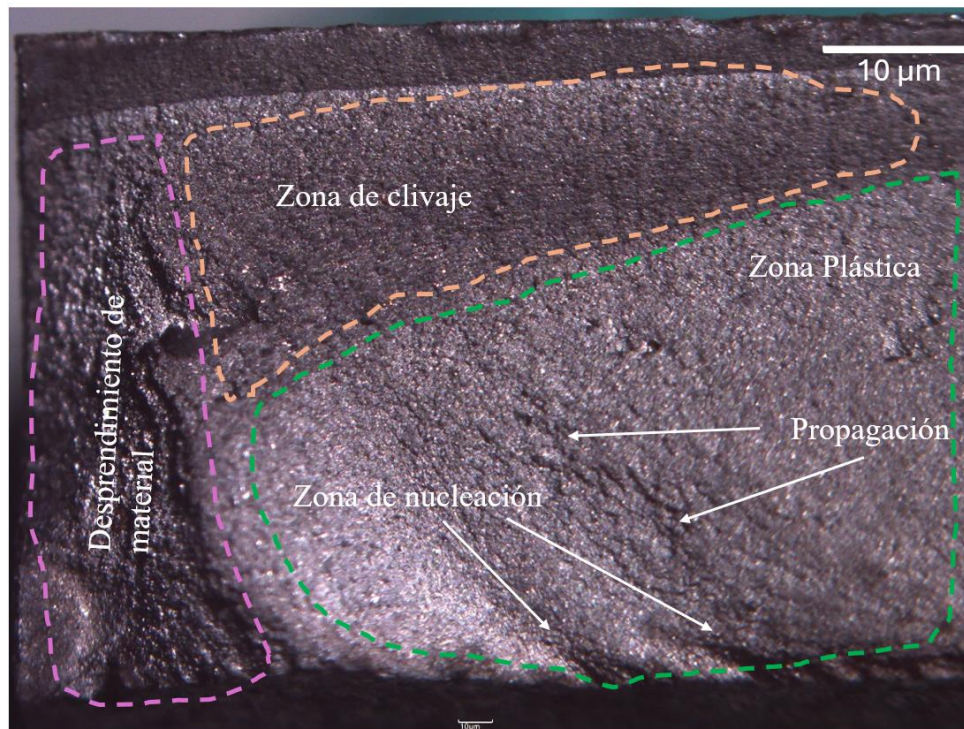
El comportamiento mostrado en la Figura 30 se puede interpretar usando el modelo de Basquin representado por la ecuación 1, si llamamos a el coeficiente de resistencia a la fatiga  $A$  y se continua con la denominación de  $b$  para el exponente de resistencia a la fatiga, se tiene que en el caso de muestras de acero SAE 5160H con stress shot peening  $A = 1233.9$  mientras  $b = -0.085$ . En contraste, los datos obtenidos para un acero 5160H sin el tratamiento superficial de granallado son de un  $A = 30297$  y un  $b = -0.363$  (G Díaz, A. Pertuz, A Vilorio, 2021).

Teniendo en cuenta los datos expuestos para las constantes presentes en la ecuación 1, se puede concluir que el esfuerzo requerido para llevar al fallo a un material trabajado con granallado bajo tensión es inferior al del material base, en este caso el acero SAE 5160H, esto bajo una misma cantidad de ciclos.

#### ***4.3.1 Revisión fractográfica***

Para la fractografía se tomaron imágenes a las probetas luego de la iniciación de grieta, algunas de las muestras no presentan rotura total pero en el ámbito del análisis de fallo lo importante radica en la iniciación de la rotura, así como en su propagación.

En la Figura 31, se puede observar el inicio de la falla, sus respectivas líneas de propagación así como el área conocida como zona plástica, esta es importante al momento de enlazar lo sucedido durante la fatiga, ya que a medida que se desarrolla el ensayo y la probeta recibe cargas cíclicas, se va generando una deformación plástica. También se puede ver marcada la zona de clivaje que hace referencia a la zona que presentó una fractura de tipo frágil, esto demuestra una baja ductilidad en momentos de alta tensión, contrasta con la zona plástica y como se ve presenta una superficie más rugosa.

**Figura 31.***Análisis fractográfico.*

Nota: Probeta usada en los ensayos de fatiga de este trabajo con un desplazamiento controlado de 2.2 mm, un esfuerzo resultante de 580.3 N y con una duración de ensayo de 53.600 ciclos. Tomada a 670x

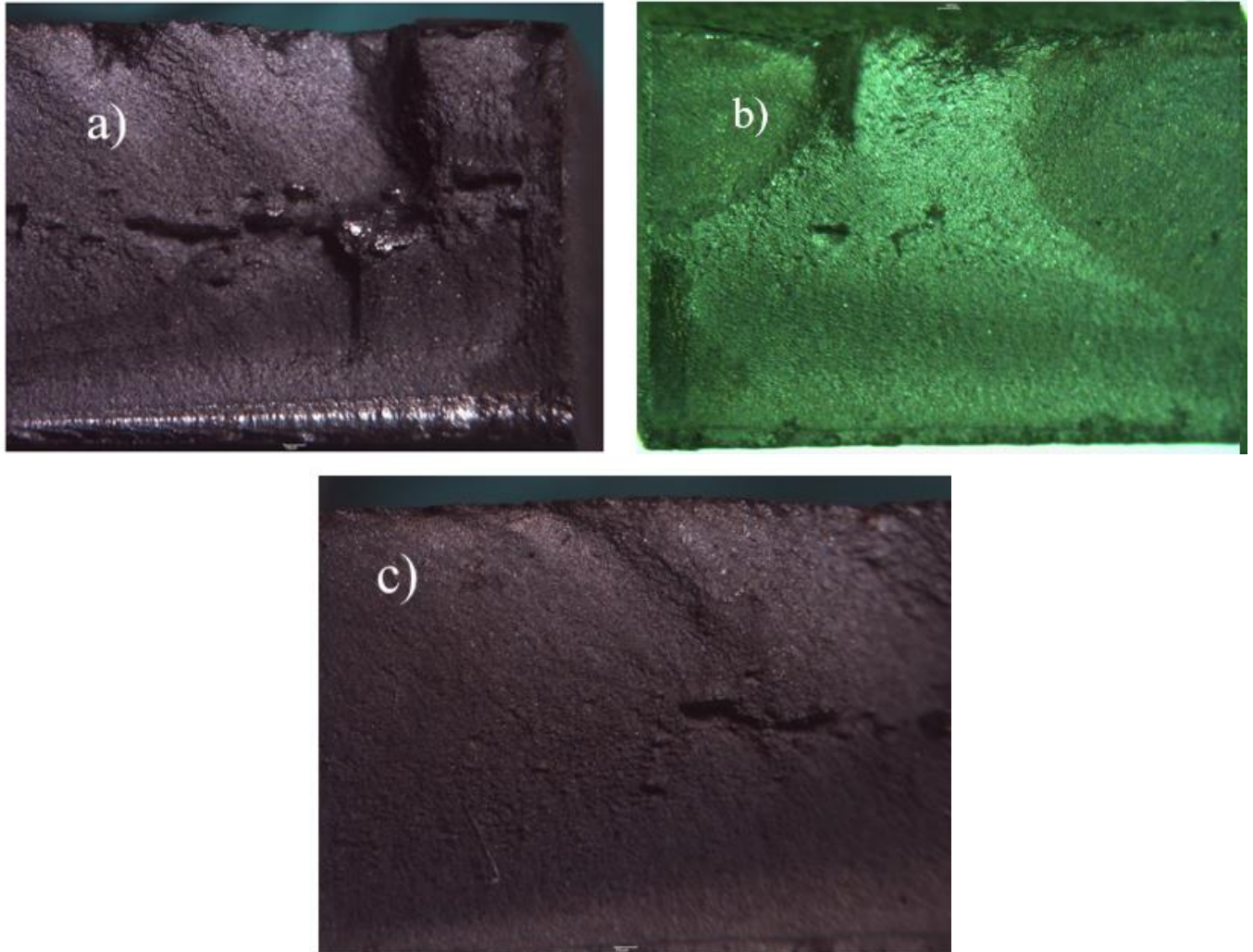
El arranque de la grieta en la mayoría de las muestras se generó sobre la cara granallada, esto era de esperarse debido a que era la cara que no solo presentaba el cumulo de tensiones del stress shot peening sino también la que recibía la carga dada por el ensayo de fatiga de forma directa, provocando una fragilidad superior a cuando no se trata superficialmente con granallado bajo tensión.

En las figuras correspondientes a la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** a), la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** b) y la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** c), se pueden observar casos de rotura completa, luego en las imágenes

presentes en la Figura 33 a), la Figura 33 b), y la Figura 33 c), se aprecian probetas que fallaron antes de culminar la propagación de la grieta y presentar una división total.

**Figura 32.**

*Probetas con rotura total a) Nivel de carga 2.2 b) Nivel de carga 2 c) Nivel de carga 1.8*

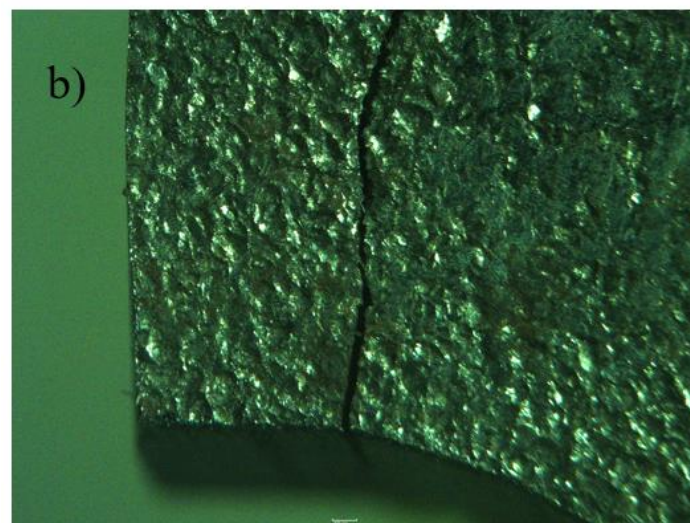
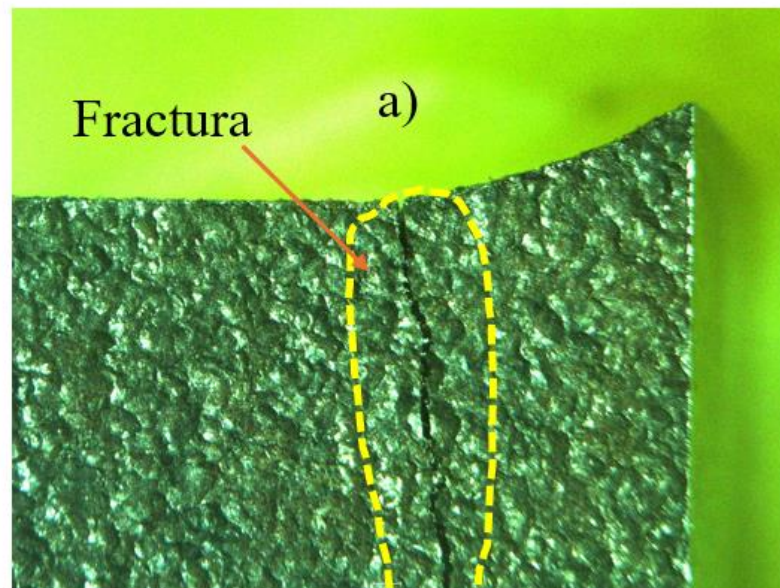


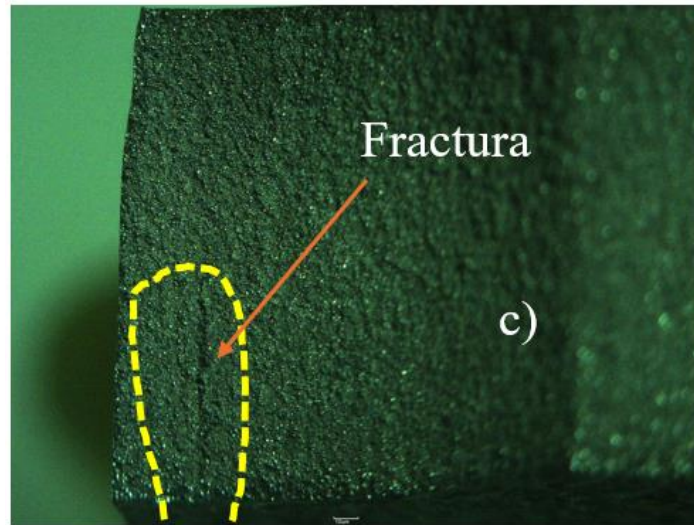
Nota: Imágenes tomadas a 670x.

**Figura 33.**

*Probetas con rotura parcial a) Nivel de carga 2.2 b) Nivel de carga 2 c) Nivel de carga*

*1.8*





Nota: Imágenes tomadas a 670x.

En los tres casos expuestos en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se ven los rasgos que se describen en la Figura 31, confirmando un patrón en los diferentes ensayos de fatiga alternante, el tamaño de la zona plástica varía entre niveles de carga al esfuerzo último, siendo un poco mayor en el nivel de mayor tensión, disminuyendo a medida que se reduce la carga.

Se puede deducir, gracias a los inicios de grieta, que en todos los casos, tanto en los que la rotura fue parcial como se ve en la Figura 33 y para los de rotura total como los expuestos en Figura 32, que la grieta inicia sobre la cara del granallado, es decir sobre la cara que soporta la tensión del ensayo de fatiga alternante a cuatro puntos, siendo esta su vez la cara que presenta una mayor fragilidad debido al tratamiento de granallado bajo tensión.

## 5. Conclusiones

Los ensayos de microdureza Vickers se realizaron de acuerdo con las normas ASTM E3, para la preparación previa al ensayo, y la ASTM E384, estos ensayos permitieron caracterizar la microdureza del acero SAE 5160H tanto en la zona afectada por el granallado como en la que no, mostrando un aumento de la dureza de en promedio un 4% en la zona más cercana al granallado. Para este proceso fueron bastante importantes los distanciamientos planteados en la norma ASTM E384 ya que según tomas de datos realizadas sin la separación adecuada, la variación entre líneas no supera el 0.2% de dureza, luego el promedio entre durezas tomadas con la separación apropiada es de cinco a diez veces más, gracias a esto se pudo realizar las indentaciones necesarias para tener una comprensión plena de la dureza sobre todo el perfil de estudio, comprobando así mediante las comparaciones de los valores resultantes la influencia del granallado sobre esta propiedad mecánica del acero.

Teniendo en cuenta las directrices dadas por la norma ASTM E407, así como la ya mencionada ASTM E3, se pudo revelar bajo microscopio la microestructura del acero SAE 5160H, mostrando así una composición martensítica derivada de austenita, esto gracias al tratamiento de temple aplicado sobre el acero, brindado una alta dureza y resistencia, al que luego se le aplicó un revenido en aceite a 460°C, evidenciando un arreglo acicular fino, esta composición en específico refleja una disminución en la fragilidad y aumento en la ductilidad respecto al mismo material pero solo con el tratamiento superficial de temple. Sumado a lo anterior se aplicó un proceso de stress shot peening, que al añadir tensiones sobre una capa del material, que generó fragilidad en una de las caras del material.

De los ensayos de fatiga alternante a cuatro puntos y la revisión fractográfica posterior que se le realizó a cada probeta, se puede concluir que, según las distintas imágenes, las probetas en su

zona de rotura muestran un tamaño en la zona de clivaje que disminuye a medida que se somete el material a esfuerzos de carga superiores, en contraparte la zona plástica, así como las líneas de propagación, se mostraron mayores bajo estas condiciones. También se puede concluir que el tratamiento de stress shot peening hace que el material reduzca la cantidad de esfuerzo máxima que puede soportar el SAE 5160H, esto en comparación con el material en estado base, es decir, solo con los tratamientos de temple y revenido.

Este trabajo forma parte de un de un proyecto mayor por parte del doctor Jorge Guillermo Diaz, por este motivo todos los datos obtenidos son referentes a los presentes en el trabajo titulado *Comportamiento a fatiga en flexión a cuatro puntos de un acero SAE 5160H Con y sin granallado*, presente en la convocatoria 891 de minciencias, debido a esto algunos de los datos referenciales aún no han sido publicados, del mismo modo, algunas de las conclusiones presentes en este proyecto fueron expuestas en el marco de la *Conferencia Internacional de Ciencia, Tecnología e Innovación CONICIETI* celebrada en Tegucigalpa, Honduras para el presente año.

### Bibliografía

- Almen, J. O. (1943). Peened Surfaces Improve Endurance of Machine Parts. *Metal Progress*, 43, 209–215.
- Askeland, D. R., Fulay, P. P., & Wright, W. J. (2013). *Ciencia e Ingeniería de Materiales* (6ta ed.). Cengage Learning.
- ASTM International. (2007). *ASTM E407-07: Standard Practice for Microetching Metals and Alloys*. ASTM International. <https://www.astm.org/e0407-07.html>
- ASTM International. (2012). *ASTM E2860: Standard Test Method for Residual Stress Measurement by X-Ray Diffraction for Bearing Steels*. ASTM International.
- ASTM International. (2012). *ASTM E837: Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method*. ASTM International.
- ASTM International. (2017). *ASTM E3-11(2017): Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/E0003-11>
- ASTM International. (2017). *ASTM E384-17: Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials*. ASTM International. <https://www.astm.org/e0384-17.html>
- ASTM International. (2023). *ASTM E466-15(2023): Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/E0466-15R23>
- Azar, V., Hashemi, B., & Rezaee Yazdi, M. (2010). The effect of shot peening on fatigue and corrosion behavior of 316L stainless steel in Ringer's solution. *Surface & Coatings Technology*, 204, 3546–3551. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2010.04.015>
- Castro, J. T. P., & Meggiolaro, M. A. (2016). *Fatigue Design Techniques* (3rd ed.). CreateSpace.
- Davis, J. R. (Ed.). (1996). *ASM specialty handbook: Carbon and alloy steels*. ASM International.

- Díaz, J. G., Pertuz, A., & Viloría, A. (2021). *Comportamiento a fatiga en flexión a cuatro puntos de un acero SAE 5160H con y sin granallado*. Informe final de la convocatoria 891 de Minciencias.
- Elizaga Rus, S. (2019). *Diseño e implementación de un módulo para la estimación de vida a fatiga en modelos de elementos finitos* (Tesis de pregrado). Universidad Politécnica de Madrid.
- González Suárez, J. (2020). *Transformación de la microestructura y mejora de las propiedades mecánicas en aleaciones metálicas mediante tratamientos de Shot Peening convencionales y severos* [Tesis doctoral]. Universidad de Oviedo.  
<https://digibuo.uniovi.es/dspace/handle/10651/57131>
- Hernández, H., Viloría, A., Arango, Y., Jimenez, A., Mendoza, H., & Cadena, J. (2004). Mejoramiento del proceso de granallado para resortes de ballesta utilizando medición de esfuerzos residuales por difracción de rayos X. *Revista Ingeniería e Investigación*, 33–40.
- Jaramillo, S. H. E. (2013). *El Shot Peening y la vida a la fatiga de elementos de máquinas* (1st ed.). Universidad Autónoma de Occidente.
- Jaramillo, S. H. E., de Sánchez, N. A., & Avila, D. J. A. (2019). Effect of the shot peening process on the fatigue strength of SAE 5160 steel. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 233, 4328–4335.  
<https://doi.org/10.1177/0954406218816349>
- LaFoy, G., Bergon, J., Aouati, K., Kling, R., & Palin-Luc, T. (2020). Scaling laser shock peening process towards high repetition rates: A demonstration on industrial grade Al2024-T351. In S. Kaierle & S. W. Heinemann (Eds.), *High-Power Laser Materials Processing: Applications, Diagnostics, and Systems IX* (Vol. 1127305, p. 5). SPIE.  
<https://doi.org/10.1117/12.2545760>

- Lee, H., Kim, D., Jung, J., Pyoun, Y., & Shin, K. (2009). Influence of peening on the corrosion properties of AISI 304 stainless steel. *Corrosion Science*, 51, 2826–2830. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2009.08.008>
- Luz, G. (2020). *SAE 5160 Propiedades (Mecánicas, Químicas y Clasificación)*. Blog de Materiales. <https://www.materiales.gelsonluz.com/2020/12/sae-5160-propiedades-mecanicas-quimicas.html>
- MatWeb. (n.d.). *AISI 5160H Steel, oil quenched from 830°C (1525°F), 540°C (1000°F) temper, 25 mm (1 in.) round*. MatWeb - Material Property Data. <https://www.matweb.com/search/datasheettext.aspx?matid=8170>
- Metalografía. (2023, mayo 23). *Microestructura y propiedades mecánicas de los metales: Cómo la temperatura y la velocidad de enfriamiento afectan la dureza del metal*. Metalografía. <https://metalografia.es/?p=267>
- O'Hara, P. (1990). Controlled Shot Peening to Prevent Fatigue and Stress Corrosion Cracking. *Transactions of the IMF*, 68, 87–91. <https://doi.org/10.1080/00202967.1990.11870873>
- Peltz, J. da S., Beltrami, L. V. R., Kunst, S. R., Brandolt, C., & Malfatti, C. de F. (2015). Effect of the Shot Peening Process on the Corrosion and Oxidation Resistance of AISI430 Stainless Steel. *Materials Research*, 18, 538–545. <https://doi.org/10.1590/1516-1439.316514>
- Romero, F., Pertuz, A., & Diaz, J. G. (2021). Fatigue study on AISI/SAE 1015 steel with shot peening under corrosive environments. *Journal of Physics: Conference Series*, 1938(1), 012005. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1938/1/012005>
- SAE. (2013). *SAE J442: Test Strip, Holder, and Gage for Shot Peening*. SAE International. [https://doi.org/10.4271/J442\\_201302](https://doi.org/10.4271/J442_201302)
- SAE. (2018). *SAE J443: Procedures for Using Standard Shot Peening Test Strip*. SAE International. [https://doi.org/10.4271/J443\\_198401](https://doi.org/10.4271/J443_198401)

- Solano Aguilar, G., & Soto, R. (1996). Factores de servicio que generan falla en los resortes o muelles de ballesta.
- Vantadori, S., & Zanichelli, A. (2020). Fretting-fatigue analysis of shot-peened aluminium and titanium test specimens. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. <https://doi.org/10.1111/ffe.13367>
- Viloria-Estrada, A., Mantilla-Nova, D., García-Salinas, D. A., Barbosa, W., Palacio-Espinosa, C. C., Romero-Toledo, F. A., Peña-Ballesteros, D. Y., & Díaz-Rodríguez, J. G. (2024). Evaluación del perfil de microdureza y tensiones residuales en un acero granallado SAE 5160H. *Revista UIS Ingenierías*, 23(1), 103-114. <https://doi.org/10.18273/revuin.v23n1-2024009>
- Vormwald, M., Hos, Y., Freire, J. L. F., Gonzáles, G. L. G., & Díaz, J. G. (2018). Crack tip displacement fields measured by digital image correlation for evaluating variable mode-mixity during fatigue crack growth. *International Journal of Fatigue*, 115, 53–66. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2018.04.030>
- Virola Estrada, A., Mantilla, D., García Salinas, D. A., Barbosa, W., Pertuz Comas, A. D., Palacio Espinoza, C. C., & Romero, F. A. (2022). Evaluación del perfil de tensiones residuales por granallado en un acero SAE 5160H usando microdureza y difracción de rayos X. *XV Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica*, Madrid.