

Validación del comportamiento del acero AISI SAE 1045 sometido a fatiga por flexión rotativa a bajas temperaturas bajo la norma ASTM E606.

*Gerson Clavijo Rivera Código: 23552017366
José Jorge Macana Castillo Código: 23552018238*

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica.

*Programa de Tecnología en Mantenimiento Electromecánico Industrial.
Universidad Antonio Nariño
Bucaramanga*

Gerson Clavijo Rivera
e-mail: gclavijo33@uan.edu.co

José Jorge Macana Castillo
e-mail: jomacana@uan.edu.co

Director

Juan Manuel Murcia Pacheco
e-mail: juamurcia@uan.edu.co

RESUMEN:

El desarrollo de este proyecto de investigación está enmarcado en el estudio de validación del comportamiento mecánico del acero AISI SAE 1045 cuando se somete a cargas dinámicas por flexión rotativa para evaluar la fatiga en temperaturas de 0, -3 y -5 grados Celsius, temperaturas que puedan afectar la estructura del acero y por lo tanto variar su ductilidad.

El método utilizado para la determinación de las propiedades de la fatiga controlada en esta investigación se basó en la norma internacional ASTM E606, donde se simula una carga cíclica hasta el fallo evaluando los cambios entre las cargas terminas y mecánicas.

PALABRAS CLAVE: *Bajas temperaturas, fatiga, flexión rotativa, mecánica de materiales, vida útil.*

INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

El presente trabajo de grado tiene como propósito mostrar y validar el comportamiento del acero AISI SAE 1045 cuando es puesto bajo fatiga por flexión rotativa en bajas temperaturas; con el fin de determinar las curvas de resistencia a la fatiga frente al número de ciclos y poder generar inferencias sobre la evaluación del comportamiento mecánico de materiales a cargas dinámicas, especialmente de materiales utilizados en elementos electromecánicos. El desarrollo de esta investigación permitirá ampliar los conocimientos de los estudiantes de Tecnología en Mantenimiento Electromecánico Industrial de la Universidad Antonio Nariño de Bucaramanga relacionados con metodologías para aplicación de ensayos mecánicos y la apropiación de la norma técnica ASTM E606 para la ejecución de estos ensayos.

El proyecto se regirá mediante la metodología de marco lógico la cual incluye en su prospectiva un árbol de problemas, por medio de los cuales

obtenemos un árbol de objetivos y sucesivamente una matriz de marco lógico.

Es preciso mencionar que, en los últimos años en el Laboratorio de Materiales de la Universidad Antonio Nariño de Bucaramanga, se han desarrollado diversos trabajos de grado de sus estudiantes en áreas de diseño, construcción y puesta a punto de equipos. Por lo tanto, se dispone de un equipo de fatiga por flexión rotativa adaptado a la realización de ensayos a bajas temperaturas. De esta manera se tiene la posibilidad de realizar los ensayos en el banco de fatiga por flexión rotativa de modo tal que se puede alcanzar temperaturas por debajo de los cero grados Celsius, permitiéndonos de esta manera, establecer el alcance de este proyecto en dar la validación del comportamiento del acero AISI SAE 1045 bajo las temperaturas planteadas.

Por otro lado, la presente investigación permitirá realizar nuevas investigaciones en el área de fatiga y fractura de materiales, específicamente acero 1045, bajo condiciones de baja temperatura, lo que sin duda corresponderá a una buena e interesante investigación y será de gran utilidad en la caracterización del comportamiento de materiales a estas condiciones de operación.

De acuerdo con el tiempo estimado de ejecución de 16 semanas, será desarrollada la validación del comportamiento del acero AISI SAE 1045 teniendo como entregable un procedimiento de análisis de fatiga de una probeta de material AISI 1045 a través de una metodología establecida por la norma ASTM E606.

Según (Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 2011) la vida de un material que es expuesto a la fatiga se puede entender como el "fallo debido a cargas repetitivas... que incluye la iniciación y propagación de una grieta o conjunto de grietas hasta el fallo final por fractura". El análisis de fatiga en estructura se utiliza para evaluar que tanta confiabilidad presenta un diseño, que durabilidad posee, entre otras características bajo condiciones de carga de servicio.

En la Industria se puede observar que, en muchas ocasiones un elemento está bajo la influencia de esfuerzos cíclicos o repetidos los cuales suelen ser inferiores al esfuerzo de cedencia del material.

Como ejemplo de componentes tenemos: herramientas, resortes, engranajes, artefactos automotores y componentes de las turbinas de aviones, entre otros. Se tiene certeza de que aproximadamente el 90% de las fallas de elementos industriales es debido a causas mecánicas, lo que hace imprescindible el uso de ensayos mecánicos. Muchas de las fallas por fatiga en materiales, parten desde la superficie, progresando inicialmente de forma lenta; después de que se ha establecido una minúscula fisura y ha crecido considerablemente por la tensión, rotación o flexión, la fractura ocurre de repente (Askeland, 1988).

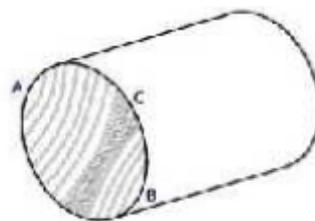
El esfuerzo por variaciones de carga cíclica puede ocurrir debido a la rotación, flexión o tensión y se debe tener en cuenta que aun cuando el esfuerzo esté por debajo del límite elástico de un material, este puede fallar después de numerosas aplicaciones.

La fatiga de materiales se puede explicar como una pérdida de la capacidad de carga de un elemento y por ende la ruptura lenta mismo, lo cual es consecuencia del avance prácticamente infinitesimal de las fisuras que van formando en su interior.

Este crecimiento de las fisuras se da para cada cambio en las tensiones o cargas. Las tensiones variables, ya sean cíclicas o no, hacen que, en algunos puntos, aparezcan deformaciones plásticas que también serán variables con el tiempo. Este tipo de deformaciones llevan el material a un desgaste progresivo, lo que origina grietas que crecen hasta alcanzar tamaños críticos, lo que es más que suficiente para la obtener finalmente una ruptura, la cual es violenta, presentando características macroscópicas de una fractura frágil (CASTRO LEGUIZAMO & UMAÑA, 2018).

Figura 1

Una barra sometida al esfuerzo de flexión.



Nota: Las líneas concentradas evidencian la fatiga del material. Imagen tomada de (Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 2011).

Según la literatura se puede concluir que específicamente estas fallas se fueron observadas primeramente en el siglo XIX, en los ejes de los carros de los ferrocarriles cuando comenzaron a fallar después no llevar mucho en funcionamiento. Aun después de construirse con acero dúctil, se observó que aparecía una falla súbita de tipo frágil.

En 1870, después de muchos años de investigación acerca de las fallas por fatiga, el Ingeniero Alemán August Wohler hizo públicos los resultados de su estudio, en el cual mostraba que el causante de la falla por fatiga en los materiales, era el número de ciclos de esfuerzo. Al realizar estudios y análisis sobre las partes rotas de los ejes que habían fallado por fatiga, observó que el material tenía la misma resistencia y ductilidad bajo carga de tensión que el material original; es decir, se pudo justificar que los materiales no se había "cansado" ni fragilizado como se especulaba (Clemente, 2015).

Implementación de equipos de fatiga y ensayos en acero AISI 1045 en distintos ambientes, realizados en diversas Universidades de Latinoamérica.

En la Universidad de Carabobo de Valencia/Venezuela se realizó un estudio del comportamiento de aceros de medio y bajo carbono (AISI 1020, AISI 1030 y AISI 1045) sometidos a fatiga. Estos ensayos se realizaron en condiciones de flexión rotativa. Se usaron probetas de acuerdo a la normativa ASTM E-606 y se determinaron propiedades mecánicas del material tales como resistencia a la tracción (S_{max}) y el esfuerzo de fluencia (S_y). A partir de las curvas S-N se determinó el límite de fatiga y la resistencia a la fatiga para cada material. Además, se realizó la caracterización de las microestructuras y se evaluaron las superficies de fractura de las probetas rotas provenientes del ensayo utilizando la técnica de microscopía electrónica de barrido. Al evaluar el comportamiento mecánico de los aceros AISI 1020, 1030 y 1045, a través de ensayos de fatiga, se definió que tanto la resistencia a fatiga como el límite de fatiga incrementa a medida que aumenta el porcentaje de carbono. (Este & Saenz P, 2004).

En la Universidad Tecnológica de Pereira de Colombia se realizó un estudio referente a la sinergia de la fatiga en flexión rotatoria y la corrosión por jugo de caña para un acero AISI (SAE) 1045, usando probetas normalizadas de fatiga según normativa ASTM E606. Para la realización de estos ensayos se usó jugo de caña degradado con pH 4, el cual se aplicó continuamente durante la rotación de las probetas. Se realizaron comparaciones entre los ensayos normalizados en seco y los que fueron inducidos a un ambiente corrosivo. Las que estuvieron en un ambiente corrosivo presentaron una disminución del 11 % en el límite de resistencia a fatiga. Las pruebas señalaron una relación entre la disminución de la vida a fatiga de un material y la presencia de fluidos corrosivos en su medio ambiente de funcionamiento (GÓMEZ, JAIME ANDRÉS GÓMEZ, ADOLFO LEÓN CORONADO, 2005).

Nuevamente, en la Universidad de Carabobo de Valencia/Venezuela se realizó un estudio para determinar las curvas S-N-P (esfuerzo, número de ciclos, probabilidad de falla) a través del método Maennig, realizando ensayos de fatiga en el acero AISI 1045 normalizado. Las probetas utilizadas se realizaron según la norma ASTM E-606 las cuales se sometieron a ensayos de flexión rotativa y se determinaron las curvas S-N-P. Además, se determinó tanto el intervalo de transición como el de vida finita, calculándose en cada caso las probabilidades de fractura de 1 %, 50 % y 99 %. Adicionalmente, caracterizo microestructuralmente el material y se evaluaron las superficies de fractura de las probetas por fatiga. Las muestras del acero AISI 1045 para la condición de normalizado presentaron fractura de tipo dúctil para las probetas de alto ciclaje y de tipo mixta para las de bajo ciclaje (Marin O. et al., 2014).

En las Unidades Tecnológicas de Santander se realizó un proyecto de actualización electromecánicamente de un equipo de fatiga por flexión rotativa, con el propósito de elevar la posibilidad de conocimiento para los estudiantes de la Tecnología en Operación y Mantenimiento Electromecánico y la Ingeniería Electromecánica en la práctica y toma de datos de los laboratorios de resistencia de materiales. Con el equipo de ensayo y siguiendo los lineamientos de la norma ASTM E-606, se pudo determinar la falla en aceros de bajo carbono tales como 1020, 1045 y 4140 al ser sometidos a flexión rotativa bajo el fenómeno de la

fatiga que permite realizar ensayos en probetas estandarizadas a temperatura ambiente. La metodología aplicada permitió ajustar el ensayo para que arrojara resultados sencillos con fines académicos. En el estudio de la fatiga con cargas, el método esfuerzo-vida (Curva de Wöhler) es el más adecuado por su: simplicidad, precisión y fácil comprensión. Además, la dispersión de los datos experimentales aumento conforme se disminuyó el nivel de esfuerzo aplicado, en comparación con los datos experimentales obtenidos para altos niveles de esfuerzo. Cabe resaltar que entre más probetas se utilizaron en el ensayo, más exacta fue la curva que obtuvieron (CASTRO LEGUIZAMO & UMAÑA, 2018).

I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El monitoreo de los equipos industriales ha presentado grandes retos en las últimas décadas, ya que cada vez se hace más difícil el predecir cómo, cuándo y porque va a suceder una falla. Los esquemas de mantenimiento usados a lo largo de los años consisten en paradas periódicas de las plantas de producción y el reemplazo de los componentes, que cumplido cierto tiempo de operación se asumen defectuosos. La interrupción muchas veces injustificada de las máquinas y de una planta de producción genera pérdidas de dinero e inconvenientes para las empresas.

De las fallas ocurridas por fractura en la industria, se podría decir que un aproximado del 90% suceden por problemas de fatiga en los materiales, siendo esta es la principal causa de fractura de elementos de máquinas empleadas en los sectores automotriz y metalmeccánico, de allí la importancia de tenerla en cuenta y saber cómo prevenirla (Sanchez, 2016).

La selección inadecuada de materiales, errores de diseño, fabricación y sobrecarga de la maquinaria son los principales responsables de la fatiga. Toda la pieza de una máquina o equipo que esté sometida a esfuerzos cíclicos o cargas repetitivas, pueden presentar problemas de fatiga en cualquier momento, es por esto que resulta importante conocer la forma de disminuir y/o combatir los efectos de este tipo de falla, determinando la

resistencia de los materiales y los esfuerzos o cargas máximas permitidas para cada material. Así mismo, todas las condiciones anteriormente mencionadas, dependen también de la temperatura a que estén sometidos los materiales ya que este factor también es decisivo en el análisis de las fallas de los materiales.

Por lo expuesto previamente surge la siguiente pregunta de investigación ¿Cuál es la relación que existe entre la resistencia a la fatiga y la temperatura de un material y que podemos analizar y concluir con esto?

II. JUSTIFICACIÓN

La fatiga es un fenómeno que ha sido estudiado durante mucho tiempo. Sin embargo, su importancia tanto en la investigación como en la docencia se confirma al observar las fallas cotidianas de componentes y estructuras utilizadas en ingeniería. En la actualidad, la Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica cuenta con un equipo de evaluación de fatiga capaz de identificar, analizar y caracterizar las propiedades mecánicas de los componentes mecánicos en tales condiciones.

Con este equipo de ensayo además de servir como una herramienta de apoyo para los docentes del área de mecánica de materiales y diseño de máquinas del programa académico de Tecnología en mantenimiento electromecánico industrial de la universidad Antonio Nariño, se pretende facilitar y apoyar la investigación que lleva a cabo dicho programa en el campo de los ensayos de fatiga por flexión rotativa a bajas temperaturas, específicamente en el análisis de fallas estructurales sometidos a cargas dinámicas, convirtiendo estas prácticas en un complemento para el aprendizaje que le permite al estudiante comprender de una manera más fácil y profunda el fenómeno de fatiga bajo determinadas condiciones de carga y su importancia en la industria, tal como nos es mencionado en los artículos de la Real Academia Española (Dominguez Abascal, 2018).

III. OBJETIVOS

A. OBJETIVO GENERAL

Validar el comportamiento del acero AISI 1045, sometido a esfuerzos de fatiga por flexión rotativa a baja temperatura, controlando la temperatura entre 0°C y -5°C, bajo la norma ASTM E606 con el fin de establecer la veracidad de la teoría.

B. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Establecer la metodología para el desarrollo de las pruebas de laboratorio de forma segura, con base en la norma ASTM E606.
- Desarrollar las pruebas con probetas de la serie SAE AISI 1045 mediante el uso de la máquina de flexión rotativa del laboratorio de materiales de la universidad Antonio Nariño fatiga a temperaturas entre 0° y -5° Celsius.
- Construir las curvas de esfuerzo numérico vs número de ciclos por nivel de temperatura, para hacer una comparación entre ellas.

IV. MARCO TEORICO

Generalidades de la fatiga.

Normalmente un material o elemento está sujeto a cargas cíclicas variables que son inferiores a las que puede soportar el material. Este esfuerzo cíclico ocurre como resultado de rotación, flexión o vibración. Aun cuando el esfuerzo de un material no alcance el límite elástico, este puede fallar después de que se aplique dicho esfuerzo en repetidas ocasiones. Este tipo de fenómeno se le conoce como fatiga (Askeland, 1988).

Así mismo, apoyando la definición anterior, tenemos que según (Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 2011) la vida de un

material por fatiga es definida como el fallo de este debido a la aplicación de cargas repetitivas, la cual comienza la iniciación y propagación de una grieta o conjunto de grietas hasta el fallo final por fractura.

Para el estudio de los materiales utilizados en distintos diseños de máquinas u equipos, ya sea en sus componentes o estructuras, debe tenerse en cuenta que los esfuerzos principales a los que comúnmente están sometidos, no resultan ser esfuerzos estáticos ni cuasi-estáticos, por el contrario, en muchos de los casos son afectados por los cambios de cargas, ya sean de tracción, compresión, flexión o torsión, que se repiten cíclicamente y que producen la rotura del material para valores de esfuerzos mucho más bajos que los calculados en ensayos estáticos (Clemente, 2015).

En la vida cotidiana se puede apreciar que repetidos ciclos de carga y descarga fragilizan los elementos a lo largo del tiempo, incluso cuando las cargas aplicadas están muy por debajo de la tensión de rotura estática e incluso del límite elástico del material. Cada ciclo de cambio de las cargas o las tensiones deteriora o daña las piezas poco a poco. Tras un número de ciclos determinado, los elementos están tan fragilizados que se comienza a generar fisuras en su superficie, las cuales después de cierto tiempo, fracturan el material definitivamente (Clemente, 2015).

Generalmente gran parte de las fallas por fatiga, empiezan en la superficie del material progresando lentamente; luego de que la muesca o fisura ha crecido considerablemente por la tensión, rotación o flexión, la fractura ocurre de repente.

Etapas de las fallas por fatiga.

Teniendo en cuenta lo descrito por distintos autores como (Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 2011), (Clemente, 2015) y (Askeland, 1988) con respecto a las etapas de las fallas ocurridas en los materiales por fatiga tenemos que estas se dan en tres etapas:

- **Etapas de las fallas por fatiga:**

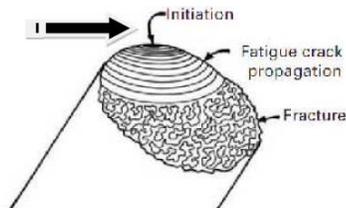
- **Etapas de las fallas por fatiga:**
 - **Etapas de las fallas por fatiga:**

Es aquí donde inicia la fisura y su propagación a lo largo del material, se inicia una o más grietas en la superficie del mismo las cuales se extienden hacia el interior de la estructura formando un ángulo de

aproximadamente 45° respecto del esfuerzo axial. Estas grietas pueden aparecer en cualquier parte del material, pero normalmente ocurren donde se encuentra concentrada la fuerza o el esfuerzo y en la superficie exterior donde las fluctuaciones de tensión son más elevadas. Las grietas originadas aparecen por muchas razones: imperfecciones en la estructura microscópica del material, muescas y abolladuras causadas por las herramientas de fabricación o manipulación humana, etc. En los materiales frágiles el inicio de grieta puede producirse por defectos del material o por errores en la geometría.

Figura 3

Primera Etapa: Iniciación de la fatiga.



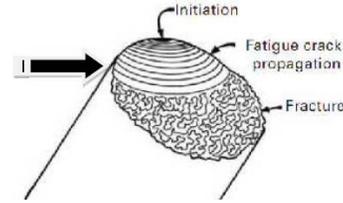
Nota. Imagen tomada de aceros Levinson, Monterrey/México (Aceros Levinson, 2023).

- **Etapa II: Crecimiento y propagación de la fisura.**

En esta etapa hay un cambio en el crecimiento de las fisuras. La superficie de la fractura durante su crecimiento en la presente etapa se caracteriza por la presencia de estriaciones y marcas que se relacionan, en su densidad y ancho, con el nivel del esfuerzo que se le fue aplicado. La grieta es propagada por efecto de las cargas. Además, las grietas frecuentemente son finas y difíciles de detectar, aun cuando se encuentren próximas a producir la rotura de la pieza.

Figura 4

Segunda Etapa: Propagación de la fisura.



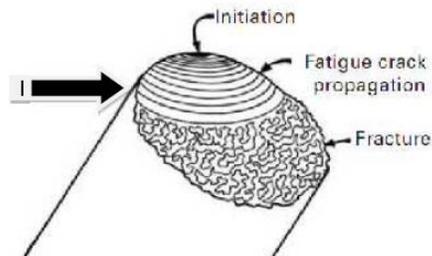
Nota. Imagen tomada de aceros Levinson, Monterrey/México (Aceros Levinson, 2023).

- **Etapa III: Fractura del componente.**

Esta última etapa se establece durante el último ciclo de esfuerzo donde la sección transversal del material no puede soportar la carga aplicada. La fractura final, la cual es la consecuencia de una sobrecarga, puede ser frágil, dúctil, o una combinación de ambas, dependiendo de la composición del material. La duración para cada etapa descrita anteriormente puede variar en función del tipo de material, carga aplicada, geometría, temperatura e irregularidades. Casi siempre resulta difícil distinguir las etapas antes mencionadas.

Figura 5

Tercera Etapa: Fractura del componente.



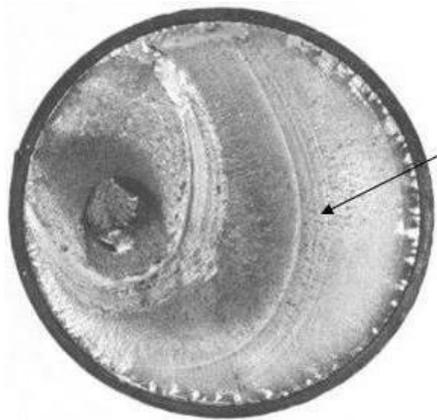
Nota. Imagen tomada de aceros Levinson, Monterrey/México (Aceros Levinson, 2023).

La característica que más resalta que y generalmente se encuentra en las superficies de los materiales fracturados por fatiga son las marcas de playa (figura 4), las cuales se centran alrededor de un punto común que corresponde al origen de la grieta por fatiga. Estas marcas resultan de las cargas variables.

La superficie resultante de una fractura por fatiga es frecuentemente fibrosa, pareciéndose a la superficie de fractura de los ensayos de impacto o de tenacidad del mismo material. El tamaño y la forma de la zona de fractura final dependen de la magnitud, dirección y modo de carga.

Figura 6

Pieza metálica que fallo debido a la flexión por fatiga rotativa.



Nota. Imagen se puede apreciar las 3 etapas mencionadas antes de fallar el material. Ilustración tomada de aceros Levinson, Monterrey/México (Aceros Levinson, 2023).

Ensayos de Fatiga.

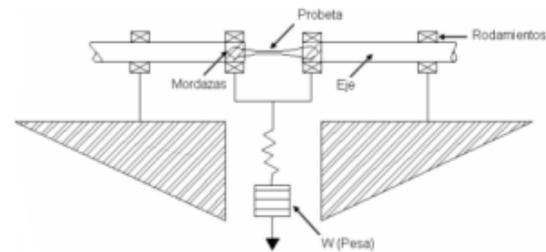
Como ya hemos visto, las fallas por fatiga estas divididas en tres pasos: en primer lugar, aparece una grieta muy pequeña sobre la superficie tiempo después de haberse aplicado la carga. Después, la grieta se propaga poco a poco, conforme la carga avanza. Por último, cuando la sección transversal restante del material resulta demasiado pequeña para soportar la carga aplicada, ocurre una fractura inmediata del material (Askeland, 1988).

El ensayo con probetas en flexión rotativa realizado con la máquina de Moore es la prueba más conocida; con ella, se supervisa el crecimiento de la grieta por fatiga. Aquí, un motor eléctrico hace girar una probeta cilíndrica, generalmente a

1800 RPM o superior, mientras un contador simple registra el número de ciclos; las cargas son aplicadas en el centro de la probeta, con un sistema de rotación. Además, posee un interruptor que detiene la prueba en el momento que se causa la fractura. Las cargas aplicadas producen un momento que causa la flexión del espécimen en su centro. (Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 2011).

Figura 10

Mecanismo para prueba de fatiga de Moore.

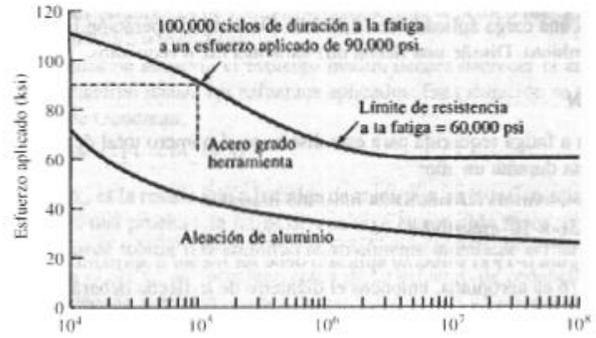


Nota. Imagen tomada de (Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 2011).

Otro de los métodos más utilizados para medir la resistencia a la fatiga de un elemento o material es el ensayo de la viga en voladizo rotatoria que se muestra en la figura 11. En un extremo de la probeta cilíndrica se realiza una sujeción al eje de un motor. En el otro extremo se suspende una carga. En el inicio la probeta tiene una fuerza de tensión actuando sobre la superficie superior, mientras la superficie interior está sometida a compresión. Cuando la probeta gira 90° , los puntos que en un principio estaban bajo tensión y compresión no están sujetos a esfuerzo alguno. Al dar media revolución, es decir, un giro de 180° , el material que se encontraba bajo tensión esta ahora bajo compresión. Así vemos que el esfuerzo en cualquier punto pasa a través de un ciclo senoidal completo desde un esfuerzo máximo a tensión, hasta un esfuerzo máximo a compresión. El esfuerzo máximo que actúa en este tipo de probeta es dado por:

$$\sigma = \frac{10.18lF}{d^3}$$

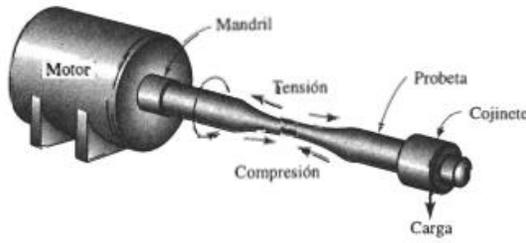
Donde l es la longitud de la barra, F la carga y d el diámetro.



Nota. Imagen tomada de (Askeland, 1988).

Figura 11

Ensayo de fatiga de viga en voladizo rotatorio.



Nota. Imagen tomada de (Askeland, 1988).

Después de suficientes ciclos la probeta puede fallar. Comúnmente los ensayos se realizan en distintas probetas con cargas alternadas. En base a estos ensayos de fatiga se estudian varias muestras con diferentes esfuerzos inducidos. Los resultados se grafican utilizando el esfuerzo causante de la rotura en función del número de ciclos, tomando el nombre de curva S-N: Estas curvas definen los valores de tensiones alternas vs. el número de ciclos requeridos para causar el fallo a un determinado grado de esfuerzo inducido (Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 2011).

Figura 12

Curva esfuerzo-número de ciclos para la falla de un acero grado herramienta y una aleación de aluminio.

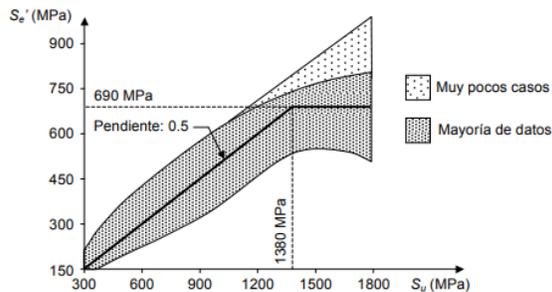
Límites y Resistencia a la Fatiga para aceros.

La figura 15 ilustra la relación entre el límite de fatiga y el esfuerzo último para diferentes aceros. La zona de sombreado oscuro corresponde a la tendencia que sigue la mayoría de los aceros, de acuerdo con los datos experimentales; se observa que, para valores de esfuerzo último menores de aproximadamente 1380 MPa, entre mayor es el S_u del acero, mayor es su límite de fatiga. Sin embargo, para valores de esfuerzo último por encima de 1380 MPa, el límite de fatiga parece ser independiente de S_u . Incluso, para aceros con S_u muy por encima de este valor, la resistencia a la fatiga puede ser inferior a la de un acero con $S_u = 1380$ MPa. Esto nos indica que, si de resistencia a la fatiga se trata, no parece ser conveniente utilizar un acero con S_u mayor de 1380 MPa (Vanegas Useche, 2018).

La tendencia de los datos se aproxima a las dos líneas rectas mostradas en la figura 13. Una línea tiene una pendiente de 0.5 y, al extrapolar, partiría desde el origen del diagrama; esto indica que el límite de fatiga es la mitad del esfuerzo último. La otra línea es horizontal y parte desde el punto (1380, 690) MPa; se asume, entonces, que para los aceros con $S_u > 1380$ MPa, el límite de fatiga es aproximadamente 690 MPa (Vanegas Useche, 2018).

Figura 15

Relación entre el límite de fatiga y el esfuerzo último de los aceros.



Nota. Imagen tomada de (Vanegas Useche, 2018).

Podemos concluir que para la mayoría de los aceros (de bajo carbono, aleados, inoxidables):

$$S_e' \approx 0.5S_u'$$

$$\text{Si } S_u < 1380 \text{ MPa} (200 \text{ Ksi}).$$

$$S_e' \approx 690 \text{ MPa} = 100 \text{ Ksi}$$

$$\text{Si } S_u \geq 1380 \text{ MPa} (200 \text{ Ksi}).$$

Una gráfica similar a la de la figura 13 se obtiene para la relación entre la dureza de un acero y el límite de fatiga. La diferencia principal e importante es que la curva no permanece horizontal para valores grandes de dureza, sino que tiende a caer. Al aumentar la dureza de un acero, no necesariamente aumenta el límite de fatiga; para valores altos de dureza, un aumento de ésta puede implicar una reducción del límite de fatiga.

La siguiente expresión es una relación aproximada entre el límite de fatiga, en MPa, y la dureza, en grados Brinell (HB), para los aceros:

$$S_e' (\text{MPa}) \approx (1.72) (\text{Dureza HB})$$

$$\text{Si } \text{Dureza} < 400 \text{ HB}$$

Los datos experimentales muestran que la relación entre el límite de fatiga y el esfuerzo último de los aceros depende de la microestructura:

Figura 16

Esfuerzo de algunos aceros.

Aceros al carbono	$S_e' \approx 0.6S_u$ (ferrita),
	$S_e' \approx 0.4S_u$ (perlita),
	$S_e' \approx 0.25S_u$ (martensita).
Aceros aleados	$S_e' \approx 0.35S_u$ (martensita).

Nota. Imagen tomada de (Vanegas Useche, 2018).

Norma ASTM E606/E606M – 21: Método de prueba estándar para Prueba de fatiga controlada por deformación. (ANEXO 1).

Según lo establece (Standard Test Method for Strain-Controlled Fatigue Testing, 2021), la fatiga controlada por deformación es un fenómeno en el que influyen las mismas variables que influyen en la fatiga controlada por fuerza. La naturaleza de la fatiga controlada por deformación impone requisitos distintivos en los métodos de ensayo de fatiga. En particular, debe medirse la deformación total cíclica y debe determinarse la deformación plástica cíclica. Además, cualquiera de estas cepas normalmente se usa para establecer límites cíclicos; la tensión total generalmente se controla a lo largo del ciclo. La singularidad de este método de prueba y los resultados que arroja son la determinación de tensiones y deformaciones cíclicas en cualquier momento durante las pruebas. Las diferencias en las historias de deformación que no sean de amplitud constante alteran la vida útil a la fatiga en comparación con los resultados de amplitud constante (por ejemplo, sobreesfuerzos periódicos e historias de bloque o espectro).

Del mismo modo, la presencia de deformaciones medias distintas de cero y las condiciones ambientales variables pueden alterar la vida útil a la fatiga en comparación con las pruebas de fatiga totalmente invertida de amplitud constante. Se debe tener cuidado al analizar e interpretar los datos para tales casos.

La fatiga controlada por deformación puede ser una consideración importante en el diseño de productos industriales. Es importante para situaciones en las que los componentes o partes de los componentes sufren deformaciones plásticas cíclicas inducidas mecánica o térmicamente que causan fallas en relativamente pocos (es decir, aproximadamente 10^5 ciclos). La información obtenida de las pruebas de fatiga controlada por deformación puede ser un elemento importante en el establecimiento de criterios de diseño para proteger contra la falla de los componentes por fatiga.

Los resultados de las pruebas de fatiga controlada por deformación son útiles en las áreas de diseño mecánico, así como en investigación y desarrollo de materiales, control de proceso y calidad, rendimiento del producto y análisis de fallas. Estos pueden utilizarse en la formulación de relaciones empíricas entre las variables cíclicas de tensión, deformación total, deformación plástica y vida a la fatiga. Se utilizan comúnmente en correlaciones de datos como curvas de tensión cíclica o deformación frente a la vida útil y tensión cíclica frente a la deformación plástica cíclica obtenidas de bucles de histéresis en alguna fracción (a menudo la mitad) de la vida útil del material. El examen de la curva tensión-deformación cíclica y su comparación con las curvas tensión-deformación monótonas proporciona información útil sobre la estabilidad cíclica de un material, por ejemplo, si los valores de dureza, límite elástico, resistencia última, exponente de endurecimiento por deformación y resistencia El coeficiente aumentará, disminuirá o permanecerá sin cambios (es decir, si un material se endurecerá, ablandará o será estable) porque la presencia de deformaciones inelásticas dependientes del tiempo durante las pruebas a temperatura elevada brinda la oportunidad de estudiar los efectos de estas deformaciones sobre la fatiga de deformación plástica cíclica (Standard Test Method for Strain-Controlled Fatigue Testing, 2021).

Probetas de Ensayo.

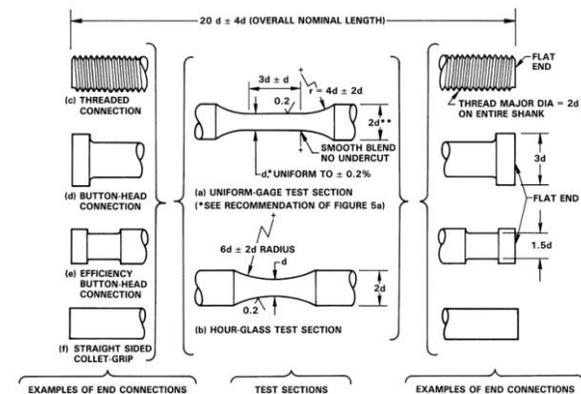
Las prácticas de laboratorio efectuadas con probetas standard generan resultados trasladables a piezas reales si se utilizan conjuntos adecuados de coeficientes de corrección que permitan valorar la resistencia a la fatiga en función de cambios de

temperatura, acabado superficial, entalladuras etc. Las probetas utilizadas en ensayos de flexión rotativa deben tener un diámetro mínimo de 0.25 in (6.35 mm), construidas por torneado y de superficie altamente pulida, para evitar que el material falle en una zona que no es de interés y el ensayo se considere válido por fatiga.

A continuación, se muestra el esquemático de medidas estándar para las probetas de ensayo:

Figura 17

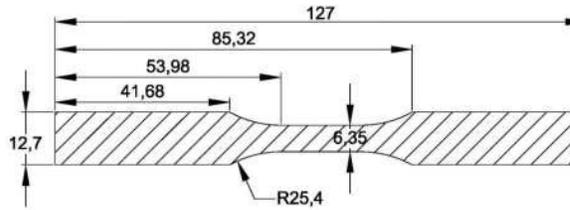
Especificaciones para probetas estándar aplicadas a ensayos de fatiga por flexión rotativa.



Nota. Imagen tomada de (Standard Test Method for Strain-Controlled Fatigue Testing, 2021).

Figura 18

Medidas en mm para probetas estándar aplicadas a ensayos de fatiga por flexión rotativa.



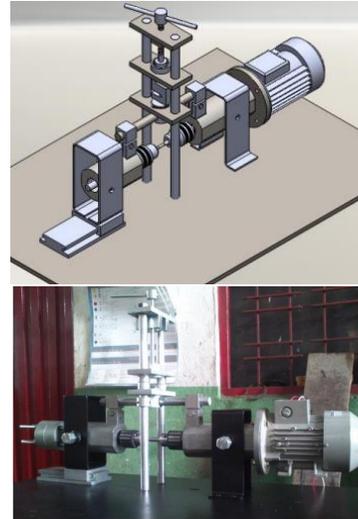
Nota. Imagen basada en las estipulaciones de las normas ASTM E606 (Standard Test Method for Strain-Controlled Fatigue Testing, 2021).

Equipo de Fatiga de la Universidad Antonio Nariño de Bucaramanga.

Inicialmente (BASTO PEDRAZA & GUARÍN DEVIA, 2015) diseñaron un equipo de fatiga basado en el dispositivo más empleado para realizar los ensayos de fatiga el cual es la máquina de viga rotatoria de alta velocidad de R.R. Moore. Esta cumplió con las expectativas de los ensayos de fatiga por flexión rotativa, ya que permitió la aplicación de un momento(fuerza) constante aplicado en la probeta. Este equipo somete a la probeta a esfuerzos de flexión alternada (flexión pura) por medio de pesas. El procedimiento para realizar el ensayo es sencillo y consiste en someter una probeta de sección circular a una carga específica y por acción de la carga, la parte central de la probeta queda sometida a un momento flexionante puro. Al hacer girar la probeta mediante el motor, una sección de la misma que inicialmente estuviera en la parte superior y por lo tanto comprimida, pasa a la parte inferior y queda sometida a tensión, de nuevo a compresión y así sucesivamente, de manera que en cada vuelta se produce una inversión completa de esfuerzos.

Figura 19

Diseño original Equipo de Ensayo de Fatiga por Flexión Rotativa de la universidad Antonio Nariño de Bucaramanga.

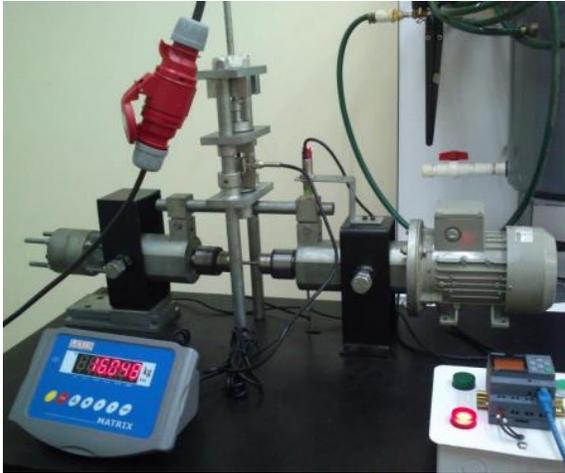


Nota. Imagen tomada de (BASTO PEDRAZA & GUARÍN DEVIA, 2015).

Luego de esto, se trabajó en una optimización del equipo con la finalidad de recolectar los datos de la prueba de una manera eficiente, por lo cual se integró sensores al sistema para el control de la máquina de fatiga por flexión rotativa y de esta manera el equipo funcionara de una manera más adecuada y optimizada. Con esto se logró un comportamiento satisfactorio en el conteo de ciclos y en la detección de la falla de la probeta, validando su óptimo funcionamiento con una prueba rápida de acero 1020 (SOLANO CÁCERES & RAMÍREZ GIL, 2015).

Figura 20

Equipo de Ensayo de Fatiga por Flexión Rotativa Optimizado de la universidad Antonio Nariño de Bucaramanga.

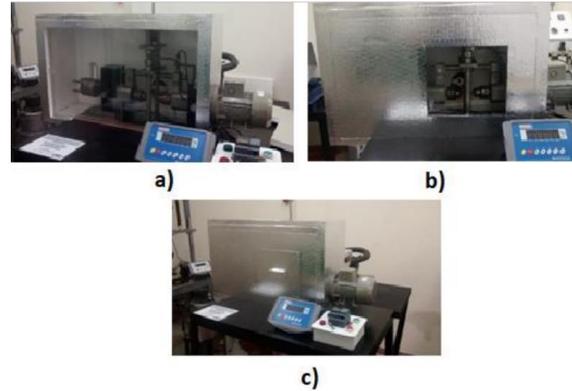


Nota. Imagen tomada de (SOLANO CÁCERES & RAMÍREZ GIL, 2015).

Finalmente (COLMENARES RINCÓN & DÍAZ MELO, 2017) trabajaron en la adecuación de un sistema de refrigeración para poder realizar ensayos en el equipo de fatiga a temperaturas inferiores a cero grados Celsius de modo que fue posible alcanzar temperaturas de hasta 5.2 °C bajo cero.

Figura 21

Equipo de Ensayo de Fatiga por Flexión Rotativa con sistema de refrigeración de la universidad Antonio Nariño de Bucaramanga.



Nota. Imagen tomada de (COLMENARES RINCÓN & DÍAZ MELO, 2017).

V. METODOLOGIA

Generalidades.

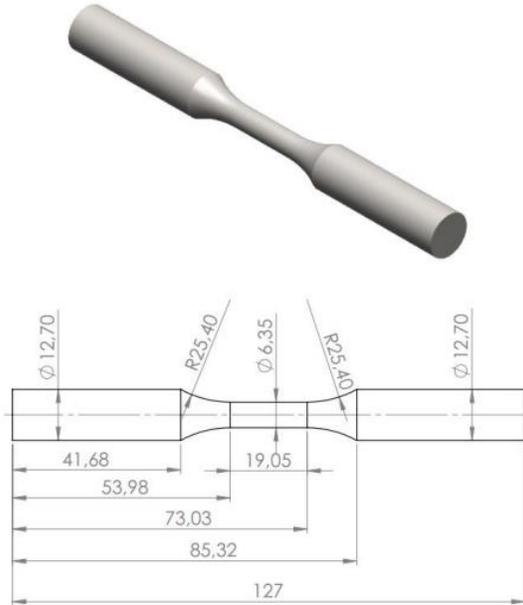
Las prácticas de laboratorio efectuadas con probetas estándar generan resultados trasladables a piezas reales si se utilizan conjuntos adecuados de coeficientes de corrección que permitan valorar la resistencia a la fatiga en función de cambios de temperatura, acabado superficial, entalladuras etc. (Standard Test Method for Strain-Controlled Fatigue Testing, 2021).

Selección de la Probeta.

Como se mencionó anteriormente las probetas utilizadas en ensayos de flexión rotativa deben tener un diámetro de 0.25 in (6.35 mm) de acuerdo a la norma ASTM E 606, tal como se pudo mostrar en la Figura 17 y 18, las cuales deben ser construidas por torneado y de superficie altamente pulida, para evitar que el material falle en una zona que no es de interés y el ensayo se considere válido por fatiga. Sin embargo, a continuación, se muestra el diseño en CAD, validando las medidas anteriormente establecidas:

Figura 22

Diseño CAD con base en las medidas estándar para probeta de Ensayo de Fatiga por Flexión Rotativa.



Nota. Fuente - Los Autores.

Selección de Material para Probeta de Ensayo (Acero AISI 1045).

SAE 1045 es un acero de grado de ingeniería de aplicación general que proporciona niveles moderados de resistencia mecánica y tenacidad a bajo costo en comparación con los aceros de baja aleación. El acero está disponible tal como se suministra: laminado en caliente o tratado térmicamente (templado y revenido en aceite; o templado y revenido en agua). Además, es un acero de bajo endurecimiento que se puede endurecer completamente hasta espesores delgados mediante enfriamiento con agua. En secciones más gruesas se puede obtener un endurecimiento localizado de la sección de la pieza y el aumento de la resistencia eléctrica será proporcional a la capa o espesor endurecido. Cuando se deforma en frío, aumentan la dureza y la resistencia mecánica (Cia. General de Aceros S.A, 2023).

Figura 23

Propiedades físicas y químicas de Acero AISI 1045.

COMPOSICIÓN QUÍMICA					
	C %	Mn %	P máx. %	S máx. %	Si máx. %
Análisis típico en %	0.43 0.50	0.6 0.9	0.04	0.05	0.2 0.4

Estado de suministro: Recocido
Dureza de suministro: 180 - 200 Brinell

PROPIEDADES FÍSICAS

Estos valores son obtenidos a partir de probetas bajo condiciones específicas de laboratorio y deben ser usados como referencia.

- Densidad → 7.85 gr/cm³.
- Módulo de elasticidad → 2 x 10¹¹ Pa (24 x 10⁶ PSI).
- Conductividad térmica → 52 W/(m·°C).
- Calor específico J/(Kg·K) → 460
- Coefficiente de Poisson → 0.3
- Resistividad eléctrica (microhm-cm):
a 32°F = 16.2
a 212°F = 22.3
- Coefficiente de dilatación térmica / °C
(20 - 100°C) 12.9 x 10⁻⁶
(20 - 200°C) 12.7 x 10⁻⁶
(20 - 400°C) 13.7 x 10⁻⁶

Nota. Imagen tomada de (Cia. General de Aceros S.A, 2023).

Figura 24

Propiedades Mecánicas de Acero AISI 1045.

PROPIEDADES TÍPICAS A TEMPERATURA AMBIENTE SIN ENDURECIMIENTO			
Diámetro de la barra: 12 a 38 mm			
Propiedad	Laminado en caliente	Normalizado	Recocido
Resistencia a la tracción MPa	655	655	620
Punto de fluencia MPa	413	413	379
% de elongación	23	23	26
% de reducción de área	44	45	53
Dureza brinell (3000 kg.)	190	190	180

Nota. Imagen tomada de (Cia. General de Aceros S.A, 2023).

Cálculo de la carga máxima.

Para determinar la carga máxima se usa como criterio que la máquina genere un momento flexionante igual al esfuerzo último del material (S_{ut}) con lo cual se lograra trabajar en la zona de fatiga de bajo ciclaje (BASTO PEDRAZA & GUARÍN DEVIA, 2015).

Tomando en cuenta los datos mecánicos del Acero SAE 1045 tenemos que el Esfuerzo Ultimo $S_{ut} = 655 \text{ MPa}$ dato con el cual se procede a realizar los cálculos correspondientes:

$$S_{ut} = \sigma$$

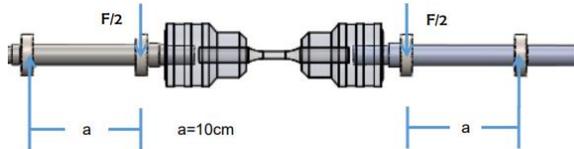
$$S_{ut} = \frac{32M}{\pi d^3} \rightarrow M = \frac{S_{ut} * \pi * d^3}{32}$$

$$M = \frac{655 * 10^6 * \pi * (6.35 * 10^{-3})^3}{32}$$

$$M = 16.46 \text{ N} * \text{m}$$

Figura 25

Esquema de la aplicación de la carga.



Nota. Fuente - Los Autores.

Como se aprecia en la Figura 25 y en la Figura 26, para realizar este momento el tornillo debe ejercer una fuerza total de:

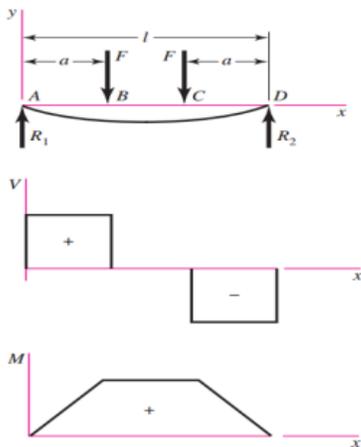
$$F = 2 * \frac{M}{a}$$

$$F = 2 * \frac{16.46 \text{ N} * \text{m}}{0.1 \text{ m}}$$

$$F = 164.6 \text{ N}$$

Figura 26

Diagrama estático de la aplicación de la carga.



Nota. Fuente - Los Autores.

Método para la realización del ensayo por flexión rotativa de la Universidad Antonio Nariño.

El equipo de Ensayo de Fatiga por Flexión Rotativa de la Universidad Antonio Nariño de Bucaramanga está equipado con diversos sensores que permiten al estudiante recolectar los datos necesarios para la realización del análisis de resultados acerca del acero AISI 1045 y su comportamiento a la fatiga bajo distintas cargas a temperaturas por debajo de los 0°C.

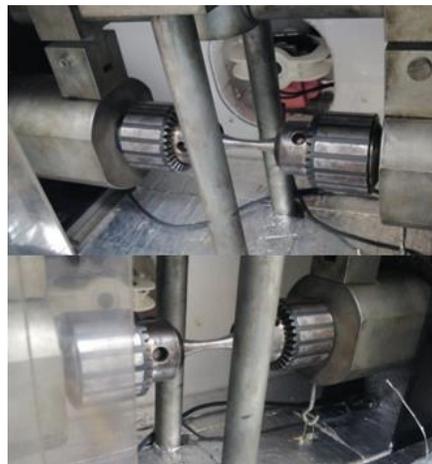
Para la realización del ensayo se deberán seguir los siguientes pasos:

a. Montaje y aseguramiento de probeta para ensayo.

Con el equipo apagado y su respectiva protección eléctrica abajo y ya habiendo elegido el tipo de material para la realización de la prueba, se debe proceder a montar la probeta en las mordazas de sujeción del equipo. Es de vital importancia cerciorarse de que las mordazas queden muy bien apretadas para evitar que se suelte la probeta en medio de la prueba ya que, de ser así, inmediatamente la prueba debe detenerse y la probeta debe ser desechada.

Figura 27

Montaje de la probeta en las mordazas de sujeción.



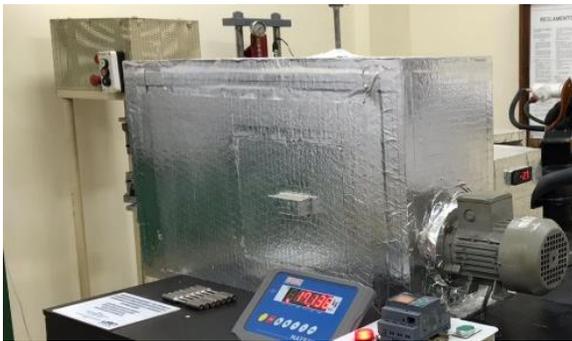
Nota. Fuente - Los Autores.

b. Elección de Temperatura y climatización de ambiente de prueba.

Teniendo ya asegurada la probeta con las mordazas, se debe proceder a cerrar y sellar la puerta del equipo para poder alcanzar la temperatura deseada lo más rápido posible, además de que de esta manera se garantizara que el equipo pueda mantener la temperatura durante toda la prueba constante.

Figura 28

Cierre hermético del equipo.



Nota. Fuente - Los Autores.

Luego se debe proceder a encender el sistema de refrigeración y configurar el set point del controlador a la temperatura de trabajo que se quiere alcanzar. Teniendo esto ya definido, se deberá esperar hasta que en la pantalla del controlador se muestre que la temperatura de trabajo ya ha sido alcanzada.

Figura 29

Puesta en marcha del equipo de refrigeración.



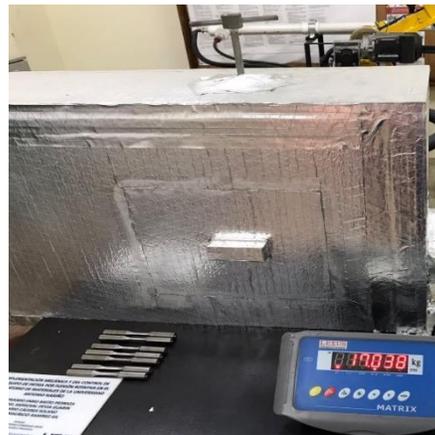
Nota. Fuente - Los Autores.

c. Aplicación de la carga, encendido de potencia y puesta en marcha de la prueba.

Una vez alcanzada la temperatura condicionada para el ensayo, se procede a aplicar la carga con la cual se va a realizar la prueba. Esta carga se verá reflejada en la pantalla de adquisición de datos matriz en Kilogramos.

Figura 30

Elección y aplicación de carga de prueba.



Nota. Fuente - Los Autores.

Finalmente, después de aplicar la carga, se puede proceder a subir la protección eléctrica del equipo y a dar inicio al sistema de control y potencia. Al dar inicio a la prueba, inmediatamente en la pantalla del PLC se verá el registro de los parámetros de funcionamiento como lo son los ciclos, el tiempo de la prueba y las rpm de trabajo.

Cuando la probeta se fatiga, el sistema automáticamente detecta la fractura y detiene el conteo de ciclos, evitando en gran medida el porcentaje error a la hora de analizar los ciclos de vida del material.

Figura 31

Puesta en marcha de la prueba.



Nota. Fuente - Los Autores.

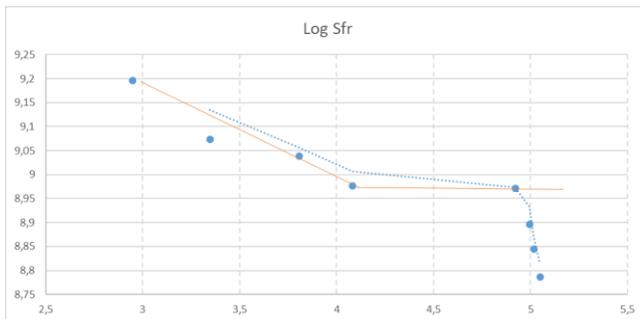
d. Análisis de Datos.

En el análisis de datos se tomarán para estas pruebas según requerimiento del director de proyecto, mínimo 5 especímenes (probetas) para su respectiva toma de datos y de esta manera poder ser tabulados para obtener la gráfica de esfuerzo vs ciclos de vida del material.

Teniendo los datos y las gráficas, podemos analizar el desempeño del material y sacar conclusiones.

Figura 32

Curva S/N acero AISI 1045.



Nota. Fuente - Los Autores.

Pruebas para Validación de Acero AISI 1045.

Para la realización de los Ensayos de Fatiga Por Flexión Rotativas se disponen de 15 especímenes realizados según norma ASTM E606, los cuales serán distribuidos en 3 grupos distintos.

Figura 33

Especímenes para ensayo de fatiga por flexión rotativa.



Nota. Fuente - Los Autores.

Los ensayos serán realizados bajo 3 temperaturas definidas, las cuales son -5°C , -3°C y 0°C . Para cada una de estas temperaturas, se asignarán 5 probetas las cuales serán ensayadas bajo cargas distintas tal cual lo muestra el ejemplo de la siguiente tabla.

Tabla 1

Disposición de especímenes para Ensayo de Fatiga por Flexión Rotativa.

# DE ESPECIMEN	TEMPERATURA DE ENSAYO	CARGA APLICADA EN KG
1	10°C	23
2	10°C	21

3	10°C	19
4	10°C	17
5	10°C	15

Nota. Fuente - Los Autores.

- Ensayos a -5°C.

Tabla 2

Disposición de especímenes para Ensayo de Fatiga por Flexión Rotativa a -5°C.

# DE ESPECIMEN	TEMPERATURA DE ENSAYO	CARGA APLICADA EN KG
1	-5°C	23
2	-5°C	21
3	-5°C	19
4	-5°C	17
5	-5°C	15

Nota. Fuente - Los Autores.

Figura 34

Parámetros de operación Aplicados para P1.



Nota. La ilustración pertenece al ESPÉCIMEN 1.
Fuente - Los Autores.

Figura 35

Datos experimentales obtenidos de P1.



Nota. La ilustración pertenece al ESPÉCIMEN 1.
Fuente - Los Autores.

Figura 36

Parámetros de operación Aplicados para P2.



Nota. La ilustración pertenece al ESPÉCIMEN 2.
Fuente - Los Autores.

Figura 37

Datos experimentales obtenidos de P2.



Nota. La ilustración pertenece al ESPÉCIMEN 2.
Fuente - Los Autores.

Figura 38

Parámetros de operación Aplicados para P3.



Nota. La ilustración pertenece al ESPÉCIMEN 3.
Fuente - Los Autores.

Nota. La ilustración pertenece al ESPÉCIMEN 4.
Fuente - Los Autores.

Figura 39

Datos experimentales obtenidos de P3.



Nota. La ilustración pertenece al ESPÉCIMEN 3.
Fuente - Los Autores.

Figura 40

Parámetros de operación Aplicados para P4.



Nota. La ilustración pertenece al ESPÉCIMEN 4.
Fuente - Los Autores.

Figura 41

Datos experimentales obtenidos de P4.



Figura 42

Parámetros de operación Aplicados para P5.



Nota. La ilustración pertenece al ESPÉCIMEN 5.
Fuente - Los Autores.

Figura 43

Datos experimentales obtenidos de P5.



Nota. La ilustración pertenece al ESPÉCIMEN 5.
Fuente - Los Autores.

- Ensayos a -3°C.

Tabla 3

Disposición de especímenes para Ensayo de Fatiga por Flexión Rotativa a -3°C.

# DE ESPECIMEN	TEMPERATURA DE ENSAYO	CARGA APLICADA EN KG
6	-3°C	23
7	-3°C	21
8	-3°C	19

9	-3°C	17
10	-3°C	15

Nota. Fuente - Los Autores.

Figura 44

Parámetros de operación Aplicados para P6.



Nota. La ilustración pertenece al ESPÉCIMEN 6.
Fuente - Los Autores.

Figura 45

Datos experimentales obtenidos de P6.



Nota. La ilustración pertenece al ESPÉCIMEN 6.
Fuente - Los Autores.

Figura 46

Parámetros de operación Aplicados para P7.



Nota. La ilustración pertenece al ESPÉCIMEN 7.
Fuente - Los Autores.

Figura 47

Datos experimentales obtenidos de P7.



Nota. La ilustración pertenece al ESPÉCIMEN 7.
Fuente - Los Autores.

Figura 48

Parámetros de operación Aplicados para P8.



Nota. La ilustración pertenece al ESPÉCIMEN 8.
Fuente - Los Autores.

Figura 49

Datos experimentales obtenidos de P8.



Nota. La ilustración pertenece al ESPÉCIMEN 8.
Fuente - Los Autores.

Nota. La ilustración pertenece al ESPÉCIMEN 10. Fuente - Los Autores.

Figura 50

Parámetros de operación Aplicados para P9.



Nota. La ilustración pertenece al ESPÉCIMEN 9. Fuente - Los Autores.

Figura 53

Datos experimentales obtenidos de P10.



Nota. La ilustración pertenece al ESPÉCIMEN 10. Fuente - Los Autores.

Figura 51

Datos experimentales obtenidos de P9.



Nota. La ilustración pertenece al ESPÉCIMEN 9. Fuente - Los Autores.

- Ensayos a 0°C.

Tabla 4

Disposición de especímenes para Ensayo de Fatiga por Flexión Rotativa a 0°C.

# DE ESPECIMEN	TEMPERATURA DE ENSAYO	CARGA APLICADA EN KG
11	0°C	23
12	0°C	21
13	0°C	19
14	0°C	17
15	0°C	15

Nota. Fuente - Los Autores.

Figura 52

Parámetros de operación Aplicados para P10.



Figura 54

Parámetros de operación Aplicados para P11.



Nota. La ilustración pertenece al ESPÉCIMEN 11.
Fuente - Los Autores.

Figura 55

Datos experimentales obtenidos de P11.



Nota. La ilustración pertenece al ESPÉCIMEN 11.
Fuente - Los Autores.

Figura 56

Parámetros de operación Aplicados para P12.



Nota. La ilustración pertenece al ESPÉCIMEN 12.
Fuente - Los Autores.

Figura 57

Datos experimentales obtenidos de P12.



Nota. La ilustración pertenece al ESPÉCIMEN 12.
Fuente - Los Autores.

Figura 58

Parámetros de operación Aplicados para P13.



Nota. La ilustración pertenece al ESPÉCIMEN 13.
Fuente - Los Autores.

Figura 59

Datos experimentales obtenidos de P13.



Nota. La ilustración pertenece al ESPÉCIMEN 13.
Fuente - Los Autores.

Figura 60

Parámetros de operación Aplicados para P14.



Nota. La ilustración pertenece al ESPÉCIMEN 14.
Fuente - Los Autores.

Figura 61

Datos experimentales obtenidos de P14.



Nota. La ilustración pertenece al ESPÉCIMEN 14.
Fuente - Los Autores.

Figura 62

Parámetros de operación Aplicados para P15.



Nota. La ilustración pertenece al ESPÉCIMEN 15.
Fuente - Los Autores.

Figura 63

Datos experimentales obtenidos de P15.



Nota. La ilustración pertenece al ESPÉCIMEN 15.
Fuente - Los Autores.

Figura 64

Evidencia de probetas utilizadas en el ensayo.



Nota. La ilustración pertenece a todos los ESPÉCIMENES. Fuente - Los Autores.

VI. RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS.

Para un correcto análisis de datos se debe tener en cuenta la base constructiva del equipo y verificar que las medidas de diseño de este sean las mismas que se encuentran en el banco físicamente, de esta manera la confiabilidad de los datos será la mayor posible.

Tabla 5

Datos necesarios para el Análisis de resultados.

Distancia	55	mm	0,055	m
Diámetro de la probeta	6,4	mm	0,0064	m
Distancia más lejana desde el eje neutro	3,2	mm	0,0032	m
Momento polar de inercia	164,7099329	mm ⁴	1,6471E-10	m ⁴

Nota. Estos datos fueron tomados a partir de las distancias dadas en el equipo, por lo tanto, están implícitos en la construcción del mismo, tal y como se muestra en la construcción del cuadro de cargas estático mostrado en esta investigación. Fuente - Los Autores.

Se Debe tener en cuenta que el **Esfuerzo** para una sección transversal maciza está dada por:

$$\sigma = \frac{32M}{\pi d^3}$$

• Análisis de Resultados a -5°C.

Tabla 6

Datos obtenidos de especímenes de Ensayo de Fatiga por Flexión Rotativa a -5°C.

# ESPECIMEN	FUERZA (KG)	CICLOS	TIEMPO (s)	RPM
1	23.210	13020	437	1794
2	21.010	25280	848	1794
3	19.278	54882	1842	1788
4	17.078	81210	2719	1800
5	15.500	115562	3876	1794

Nota. Fuente - Los Autores.

Tabla 7

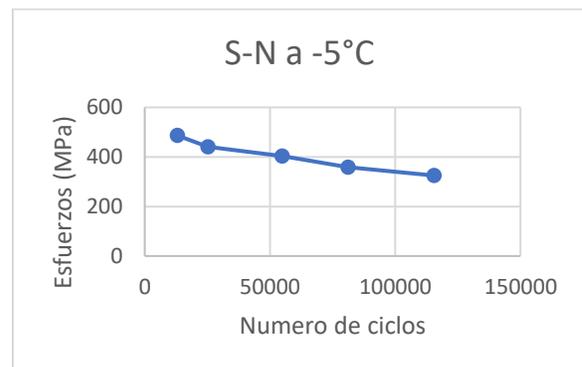
Cálculos experimentales obtenidos a partir de la TABLA 6 para ensayos a -5°C.

# ESPECIMEN	FUERZA (KG)	FUERZA (N)	MOMENTO (N.m)	CICLOS	TIEMPO (s)	RPM	σ (MPa)	Log Ciclos	Log σ
1	23,210	228	13	13020	437	1794	486,5943042	4,114610984	2,687167021
2	21,010	206	11	25280	848	1794	440,4716213	4,40277707	2,643917933
3	19,278	189	10	54882	1842	1788	404,160491	4,739429929	2,606553856
4	17,078	168	9	81210	2719	1800	358,0378081	4,90960951	2,55392889
5	15,500	152	8	115562	3876	1794	324,9552656	5,062815049	2,511823579

Nota. Fuente - Los Autores.

Figura 65

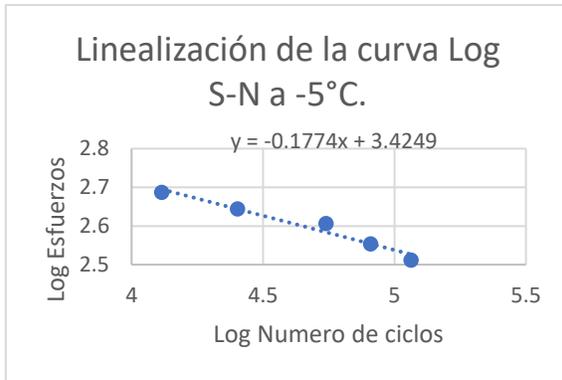
Curva S-N para datos obtenidos a -5°C.



Nota. Fuente - Los Autores.

Figura 66

Linealización de la curva Log S-N a -5°C.



Nota. Fuente - Los Autores.

El valor de resistencia a la fatiga experimental evaluado a ciclos se presenta considerando:

$$y = -0,1774x + 12,425$$

Entonces:

$$\text{Log}(Y) = m(\text{log}x) + b$$

$$\text{Log}(\sigma) = m(\text{log}N) + b$$

$$\text{Log}(\sigma) = -0.1774(\text{log}10^6) + 3.4249$$

Con los resultados obtenidos de graficar el logaritmo en base diez del esfuerzo aplicado (S) versus el logaritmo en base diez de los ciclos de falla (N), al linealizarla se obtiene la ecuación de la recta mostrada, con esta ecuación se puede extrapolar para determinar la resistencia a 10^6 ciclos.

Por lo tanto:

$$y = 10^{17.85}$$

Donde y = esfuerzo.

Entonces tenemos que la resistencia a la fatiga a -5°C será de 150,8342611 MPa.

- **Análisis de Resultados a -3°C.**

Tabla 8

Datos obtenidos de especímenes de Ensayo de Fatiga por Flexión Rotativa a -3°C.

# ESPECIMEN	FUERZA (KG)	CICLOS	TIEMPO (s)	RPM
6	23.148	23879	800	1788
7	21.179	26527	892	1788
8	19.278	43388	1455	1794
9	17.154	78543	2637	1794
10	15.122	151047	5064	1788

Nota. Fuente - Los Autores.

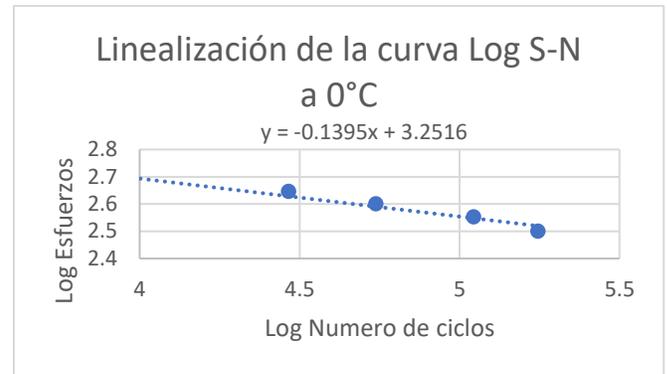
Tabla 9

Cálculos experimentales obtenidos a partir de la TABLA 8 para ensayos a -3°C.

# ESPECIMEN	FUE RZA (KG)	FUE RZA (N)	MOM ENTO (N.m)	CIC LOS	TIE MPO (s)	R P M	σ (N/m ²)	Log Ciclos	Log σ
6	23,148	227	12	23879	800	1788	485,2944831	4,378016136	2,686005354
7	21,179	208	11	26527	892	1788	444,014682	4,423688137	2,647397331
8	19,278	189	10	43388	1455	1794	404,160491	4,637369631	2,606553856
9	17,154	168	9	78543	2637	1794	359,6311372	4,895107485	2,555857286
10	15,122	148	8	151047	5064	1788	317,0305501	5,179112104	2,501101114

11	23,0 43	226	12	893 0	302	16 80	483,093 1733	3,95085 1459	2,68403 09
12	21,1 56	208	11	292 35	984	17 88	443,532 4903	4,46590 3098	2,64692 5439
13	19,0 48	187	10	547 88	1834	17 94	399,338 5742	4,73868 5447	2,60134 1263
14	17,0 46	167	9	110 678	3705	18 00	357,366 9328	5,04406 1303	2,55311 4365
15	15,1 22	148	8	175 962	5893	17 94	317,030 5501	5,24541 889	2,50110 1114

Nota. Fuente - Los Autores.



Nota. Fuente - Los Autores.

El valor de resistencia a la fatiga experimental evaluado a ciclos se presenta considerando:

$$y = -0,1395x + 3,2516$$

Entonces:

$$\text{Log}(Y) = m(\text{log}x) + b$$

$$\text{Log}(\sigma) = m(\text{log}N) + b$$

$$\text{Log}(\sigma) = -0.1395(\text{log}10^6) + 3,2516$$

Con los resultados obtenidos de graficar el logaritmo en base diez del esfuerzo aplicado (S) versus el logaritmo en base diez de los ciclos de falla (N), al linealizarla se obtiene la ecuación de la recta mostrada, con esta ecuación se puede extrapolar para determinar la resistencia a 10^6 ciclos.

Por lo tanto:

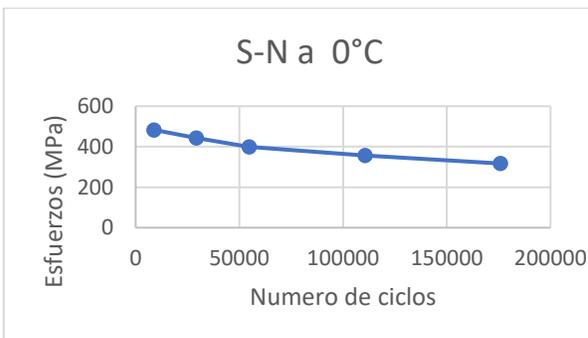
$$y = 10^{2.4146}$$

Donde **y = esfuerzo**.

Entonces tenemos que la resistencia a la fatiga a 0°C será de 259,776583 MPa.

Figura 69

Curva S-N para datos obtenidos a 0°C .



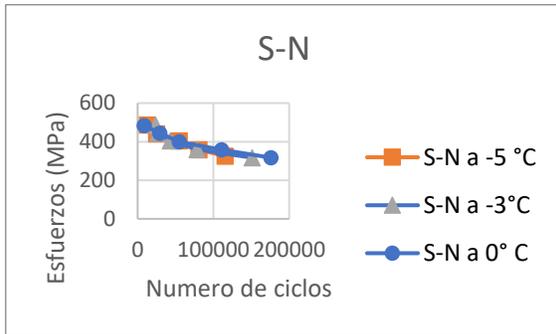
Nota. Fuente - Los Autores.

Figura 70

Linealización de la curva Log S-N a -0°C .

Figura 71

Traslado de Linealización de las curvas Log S-N a -5°C, -3°C y 0°C.



Nota. Fuente - Los Autores.

V. CONCLUSIONES

En conformidad con el objetivo principal, se realizaron los ensayos de fatiga por flexión rotativa en el equipo ya existente de la UAN, con el fin de validar el comportamiento del acero AISI 1045 mediante ensayos en probetas estandarizadas a temperaturas de -5°C, -3°C y 0°C.

Gracias a la metodología propuesta para realizar el ensayo de fatiga es posible configurar el ensayo para que arroje resultados sencillos con fines académicos, ya que el equipo está equipado con los sensores necesarios para la toma de datos requeridos. Además, se pudo evidenciar que, en el estudio de la fatiga con cargas, el método esfuerzo-vida (Curva de Wöhler) es un método muy adecuado por su: simplicidad, precisión y fácil comprensión.

De acuerdo a los análisis se observa un comportamiento proporcional entre la temperatura y la resistencia, a medida que disminuye la temperatura disminuye la resistencia del material a la fatiga.

Para establecer una curva por fatiga completa se deben someter las probetas a largos periodos de pruebas que pueden durar varias horas, además de aplicar la prueba en varias probetas a distintas cargas.

Es válido recalcar que entre más probetas se utilicen en el ensayo, más exacta será la curva que

obtendremos. Por consiguiente, se debe contar con más número de probetas para demostrar la misma metodología mostrada con el acero 1045, de esta manera podremos establecer una curva con más datos, que nos permita visualizar mejor la construcción de su curva característica.

Se puede apreciar que, en el módulo de carga, al empezar a fatigar el material, este registra un cambio casi lineal en la fuerza aplicada, disminuyendo consecutivamente hasta llegar al punto del colapso total.

La vida a fatiga aumenta conforme el nivel de esfuerzo aplicado disminuye, es decir hay una relación inversamente proporcional entre la resistencia a la fatiga (S_f) y el número de ciclos hasta la rotura (N).

VI. RECOMENDACIONES

Es recomendable hacer mantenimiento periódico al equipo de ensayos para evitar el desajuste que pueda poseer por el paso del tiempo.

El diseño del aislamiento puesto para la realización de ensayos a bajas temperaturas no es el idóneo ya que presenta muchas pérdidas por entradas de calor del ambiente externo las cuales debieron ser taponadas con cinta térmica. Se recomienda el estudio de un diseño distinto y más confiable.

El tamaño del compresor no es el indicado para llevar rápidamente la temperatura a escalas bajo cero. Es recomendable ajustar el sistema ya que se tarda hasta 8 horas en poder bajar la temperatura a la deseada para la prueba cuando se trata de temperaturas bajas.

La forma de ajuste de las mordazas no es la idónea ya que es muy incómodo a la hora de aplicar el par de apriete a las mismas, causando que la llave se pele y parta, además de causar lesiones en la mano. Se recomienda ajustar ese método de ajuste de las mordazas.

El equipo puede realizar ensayos de flexión rotativa para diferentes materiales metálicos o plásticos. Se recomienda realizar ensayos con otro tipo de materiales para validar el comportamiento de los mismos, así como la confiabilidad del equipo y de esta manera realizar más estudios que

permitan análisis de las propiedades de fatiga de dichos materiales a través de la construcción de la curva fatiga esfuerzo vida.

No utilizar probetas precargadas o mal dimensionadas para que las pruebas de fatiga se consideren como válidas.

Incentivar a los estudiantes al desarrollo de proyectos de este tipo, con el fin de dotar el laboratorio de resistencia de materiales u otros de la institución.

Promover un proyecto de grado para la optimización de este equipo.

VII. BIBLIOGRAFIA

- Aceros Levinson. (2023). *Fracturas por Fatiga*. Aceros Levinson. <https://www.aceroslevinson.com/2017/03/fracturas-por-fatiga/>
- Askeland, D. R. (1988). *Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. (I. T. Editores (ed.); Tercera Ed). <https://chirinosilvaroger.files.wordpress.com/2012/05/ciencia-e-ingenieria-de-los-materiales-askeland-3-edicion.pdf>
- Standard Test Method for Strain-Controlled Fatigue Testing, Pub. L. No. Copyright © ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959. United States (2021).
- BASTO PEDRAZA, L. F., & GUARÍN DEVIA, R. A. (2015). *IMPLEMENTACIÓN MECÁNICA DE UN EQUIPO DE FATIGA POR FLEXIÓN ROTATIVA EN EL LABORATORIO DE MATERIALES DE LA UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO*. Universidad Antonio Nariño.
- CASTRO LEGUIZAMO, D. A., & UMAÑA, I. A. (2018). *ACTUALIZACIÓN ELECTROMECAÁNICA DE EQUIPO DE FATIGA POR FLEXIÓN ROTATIVA DEL LABORATORIO DE RESISTENCIA DE MATERIALES DE LAS UNIDADES TECNOLÓGICAS DE SANTANDER*. [DANILO AZDRUBAL]. <http://repositorio.uts.edu.co:8080/xmlui/>
- Cia. General de Aceros S.A. (2023). *SAE 1020 Y SAE 1045 Aceros ingeniería al carbono*. Catalogo de Aceros Para Ingeniería. <https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/7826/VasquezTorresEdwinLibardo2013Anexos.pdf>
- Clemente, L. J. (2015). *FATIGA DE MATERIALES METALICOS: CONTAJE DE CICLOS* [UNIVERSIDAD NACIONAL DE GENERAL SAN MARTIN]. <https://www.cnea.gob.ar/nuclea/handle/10665/1789>
- COLMENARES RINCÓN, A., & DÍAZ MELO, P. D. (2017). *ADECUACIÓN DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN PARA OBTENER TEMPERATURAS DE PROBETA EN EL EQUIPO DE FATIGA INFERIORES A CERO GRADOS CELSIUS*. UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO.
- Dominguez Abascal, J. (2018). *La fatiga de los materiales y su tolerancia al daño*. El Mundo. <https://www.elmundo.es/economia/2018/01/16>
- Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. (2011). *FATIGA PROTOCOLO Curso de Materiales*. https://escuelaing.s3.amazonaws.com/production/documents/2542_fatiga.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAWFY3NGTDF5OU3IGB&Signature=v5rGol5DOiEl3iCA45roxYedFII%3D&Expires=1684706445
- Este, P., & Saenz P, L. (2004). Evaluación de la resistencia a fatiga y límite de fatiga de aceros de medio y bajo carbono. *Universidad de Carabobo Venezuela*. <https://www.redalyc.org/pdf/707/70711110.pdf>

GÓMEZ, JAIME ANDRÉS GÓMEZ, ADOLFO LEÓN CORONADO, J. J. (2005). ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO A FATIGA DE UN ACERO AISI 1045 EN UN AMBIENTE DE JUGO DE CAÑA DE AZÚCAR. *Scientia et Technica Año XI*, 81. <https://www.redalyc.org/pdf/849/84911698016.pdf>

Marin O., M., Porrello, A., Alfonso, C., & Cabello-Sequera, S. (2014). Determinación de la curva S-N-P a través del método Maennig para el acero AISI 1045 sometido a un tratamiento térmico de normalizado. *Revista Ingeniería UC*. <https://www.redalyc.org/pdf/707/70732643006.pdf>

Sanchez, C. J. A. (2016). *Diseño y construcción de una máquina de ensayos de fatiga por flexión alternativa y flexión rotativa para la escuela de ingeniería mecánica*. Universidad Industrial de Santander.

SOLANO CÁCERES, M., & RAMÍREZ GIL, Y. M. (2015). *IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROL Y DEL SISTEMA SENSOR DE UN EQUIPO DE FATIGA POR FLEXIÓN ROTATIVA PARA LA UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO*. UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO.

Vanegas Useche, L. V. (2018). *Diseño de Elementos de Máquinas* (E. U. T. de Pereira (ed.); Primera Ed). Editorial Universidad Tecnológica de Pereira. <https://core.ac.uk/download/pdf/158348444.pdf>