Diseño de un banco de pruebas de fatiga en flexión rotativa para evaluar el comportamiento a cargas cíclicas

Design of a fatigue test bench in rotary flexion to evaluate the behavior to cyclical loads

Oscar Araque delos Rios[1], Santiago Quintana[2]
Facultad de Ingeniería, Universidad de Ibagué, Colombia
oscar.araque@unibague.edu.co

***Resumen*— El desarrollo de este artículo muestra el proceso de diseño, construcción y puesta en marcha de una máquina de fatiga en flexión rotativa. La fatiga es un tema de bastante relevancia, y requiere de equipos adecuados para su estudio, por lo tanto se busca aportar al crecimiento educativo e investigativo por medio del desarrollo de una máquina de fatiga funcional y en donde se puedan estudiar variedad de materiales. Como principales resultados se logró desarrollar un equipo que puede llegar a ejercer un esfuerzo totalmente invertido de 977 Mpa, por lo tanto se puede llegar a estudiar aceros de alta resistencia. Esta máquina sigue los estándares de la normativa ASTM E-466 en cuanto a las dimensiones de la probeta de ensayo. El diseño de la máquina se divide en 3 sistemas, sistema mecánico, sistema eléctrico y sistema electrónico. Al unir estos sistemas se obtuvo una máquina funcional y autónoma donde se pueden realizar investigaciones serias y confiables.**

***Palabras clave*— Fatiga, flexión rotativa, diseño mecánico, norma ASTM E-466.**

***Abstract*— The development of this article shows the process of design, construction and start-up of a fatigue machine in rotary flexion. Fatigue is a subject of considerable relevance and requires adequate equipment for its study, therefore it is sought to contribute to educational and research growth through the development of a functional fatigue machine and where a variety of materials can be studied. The main results were the development of a machine that can carry out a totally inverted stress of 977 Mpa, therefore it can arrive to study steels of high resistance. This machine follows the standards of the normative ASTM E-466 regarding the dimensions of the test specimen.**
The design of the machine is divided into 3 systems, mechanical system, electrical system and electronic system. When joining these systems obtained a functional and autonomous machine where can make serious and reliable investigations.

***Key Word* — Fatigue, rotary flexion, mechanical design, Ibagué, norm ASTM E-466.**

I. INTRODUCCIÓN

Existen diversas propiedades a analizar en los materiales de ingeniería, además como características deseables que deben cumplir en dependencia de la labor que estos vayan a cumplir, por ejemplo la resistencia a la fluencia, dureza superficial o la resistencia a la fatiga. La fatiga de los materiales es un tema de especial importancia en el campo de la mecánica de la fractura, su estudio es esencial para entender el comportamiento de los materiales sometidos a condiciones de trabajo a cargas cíclicas. Es necesario establecer el comportamiento de la curva esfuerzo – número de ciclos S-N, para realizar comparaciones entre los datos teóricos y la información obtenida por experimentación directa [1, 2, 5, 6]. Actualmente el estudio sobre el fenómeno de fatiga en los materiales, en componentes como elementos de máquinas se realiza de una manera teórica, por tal motivo es necesario desarrollar un equipo que pueda ser utilizado por la comunidad educativa para elaborar prácticas de laboratorio, con el fin de demostrar de una manera experimental este fenómeno.

Desde la perspectiva investigativa, el desarrollo de un equipo que permita establecer el comportamiento de los materiales sometidos a fatiga por flexión rotativa y la construcción de la curva S-N, es un insumo importante para predecir el comportamiento en servicio de los diversos componentes de maquina.

El presente documento presenta un modelo de diseño y desarrollo de un equipo experimental para análisis de fatiga en flexión rotativa, en probetas bajo la norma (*American Society for Testing and Materials*) ASTM E-466, esto constituye una herramienta de apoyo para investigadores que deseen realizar experimentación en el campo de la predicción de vida en materiales y mecánica de la fractura.

Fecha de Recepción: 25 de octubre de 2017
Fecha de Aceptación: 12 de septiembre de 2018

II. FATIGA DE LOS MATERIALES

La aplicación de cargas cíclicas variables en el tiempo produce la fractura del material, a este fenómeno se le denomina fatiga, estas cargas son inferiores a los valores de resistencia ultima del material y muchas veces también a su límite de fluencia, la falla por fatiga se da por la formación y propagación de grietas en las zonas donde el esfuerzo es mayor. La normativa ASTM [2], usa una definición más completa de este fenómeno "proceso de cambio estructural permanente, progresivo y localizado que ocurre en un punto del material sujeto a tensiones y deformaciones de amplitudes variables y que produce grietas que conducen a una fractura total tras un número de ciclos".

Para llevar a cabo este análisis existen diversas formas de ensayo por ejemplo la fatiga por carga axial, la fatiga a flexión simple o la fatiga a flexión rotativa inicialmente desarrollada por RR. Moore. Este ensayo de fatiga es simple, consiste en someter la probeta de estudio a un estado de flexión pura, el esfuerzo de flexión se da por la aplicación de una carga en los rodamientos libres de la máquina, esta carga produce reacciones en los rodamientos fijos y estudiando el sistema estáticamente, se comprueba que en la zona de la probeta se concentra el momento de flexión máximo, circunstancia que llevara al fallo de esta. Al hacer girar la probeta mediante el motor, una fibra que inicialmente estará en estado de compresión pasara a un estado de tensión por cada revolución del eje y originara un estado de esfuerzos completamente invertidos, la aplicación de estos esfuerzos alternantes y las revoluciones del motor traducidas en ciclos de esfuerzo, originan que la probeta falle por fatiga.

III. CONSIDERACIONES DE LA PROBETA DE ENSAYO

La máquina de fatiga emplea probetas estandarizadas según la norma ASTM E-466, esta probeta es simétrica y debe ser elaborada por medio del proceso de torneado, en el mecanizado se pueden producir rayas en la probeta, estas rayas resultan perjudiciales para el ensayo de fatiga, pues alteran drásticamente la vida del material ya que representan un punto inicial para que las grietas crezcan y se produzca el fallo por fatiga. Por lo tanto es conveniente que la superficie de la probeta este adecuadamente pulida y homogénea. En la figura 1 se presentan las dimensiones en mm de la probeta para el ensayo siguiendo las especificaciones de la normativa ASTM E-466.

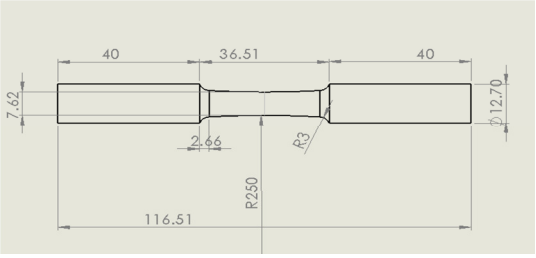

Figura1. Dimensiones de la probeta de ensayo

IV. DESARROLLO DEL SISTEMA MECANICO

A. Capacidad nominal de la maquina

Antes de realizar los cálculos de diseño de los componentes de la máquina de fatiga por flexión rotatoria de alta velocidad, se debe iniciar por plantear cual será la carga máxima que se aplicara en la probeta para originar el fallo. Partiendo de que la máquina tendrá como fin futuro estudiar el comportamiento a la fatiga del acero AISI SAE 1020, se realizara el análisis teniendo en cuenta las características de este material, para poder calcular la carga teórica por la cual el material fallara por fatiga. En la figura 2 se aprecia el sistema de sujeción de la probeta, como también los componentes como ejes y rodamientos, la carga "Q" se aplicara sobre los rodamientos libres de los puntos C y B, produciendo reacciones en los rodamientos de los puntos D Y A. el sistema trabajara a flexión pura y no existirá torsión

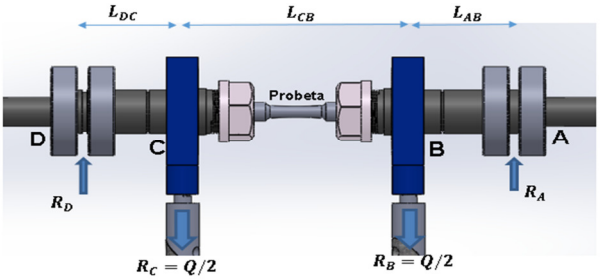

Figura 2. Sistema de sujeción y aplicación de carga

En la figura 3 se aprecia el diagrama de fuerzas y momentos del sistema. Se aprecia que el momento flector máximo lo soportara la probeta, esto es conveniente para conseguir el fallo de la misma.

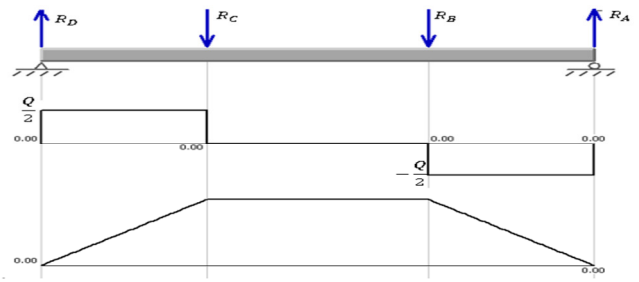

Figura 3. Diagrama de fuerza cortante y momento flector del sistema

Del análisis estático del sistema se obtiene la siguiente expresión la cual permite calcular el esfuerzo máximo o esfuerzo completamente invertido aplicado en la prueba de fatiga.

$$\sigma_{max} = \frac{m_{max} * C}{I} = \frac{16 * \mathrm{L_{DC}} * Q}{\pi \left(d_{probeta}\right)^3} \qquad (1)$$

La ecuación anterior servirá para conocer el esfuerzo que se debe aplicar a la probeta para generar su fallo por fatiga, pero para cumplir esta condición, el esfuerzo aplicado debe ser igual a la resistencia a la fatiga del material. En este caso acero AISI SAE 1020, Por lo tanto.

$$\sigma_{max} = S_f \qquad (2)$$

Dónde: S_f Es la resistencia a la fatiga del material

$$S_f = aN^b \qquad :$$

$$\frac{16 * \mathrm{L_{DC}} * Q}{\pi \left(d_{probeta}\right)^3} = aN^b \qquad (3)$$

La ecuación que determina la carga a aplicar queda definida a continuación:

$$Q = \frac{aN^b * \pi \left(d_{probeta}\right)^3}{16 * \mathrm{L_{DC}}} \qquad (4)$$

Por lo tanto se procederá a realizar los cálculos pertinentes, teniendo en cuenta las características del material AISI-SAE 1020, en la Tabla 1 se aprecian las propiedades mecánicas y características del acero dadas por el fabricante [3].

Estado de suministro	Resistencia a la racción MPa	Limite Elastico MPA	Alargamiento %	Reducción de Area %	Dureza Brinell aprox.
Laminado en caliente	441	196	25	45	140/180

Tabla 1.Propiedades mecánicas del acero AISI SAE-1020

El estado de entrega del acero es laminado en caliente, por lo tanto.

$$S_{ut} = 441 \text{ MPa} \qquad (5)$$

Se sabe que el límite de resistencia a la fatiga está relacionado con la resistencia a la tensión.

$$0.504 S_{ut} \quad \text{para } S_{ut} \leq 200\ kpsi (1400\ MPa) \qquad (6)$$

Por lo tanto

$S'_e = 0.504(441$ MPa) = 222.26 Mpa, los factores a y b dependen del límite de resistencia a la fatiga y realizando el análisis se obtiene:

a = 708.76 Mpa, b= -0.08

$$\mathrm{L_{DC}} = 44.20 \text{ mm}, \quad d_{probeta} = 0.3 \text{ in} = 7.62 \text{ mm} \qquad (7)$$

Se sabe que las cargas y esfuerzos más altos se encuentran en la zona de vida finita de bajo ciclaje del material, por lo tanto utilizando la ecuación (4), se supone un número de ciclos teóricos de 100 ciclos

N = 100 ciclos

$$Q = \frac{(708.76 \text{ MPa})(100)^{-0.08} * \pi \left(7.62 \text{ mm}\right)^3}{16 * 44.20 \text{ mm}}$$

$$Q = 964\ N \qquad (8)$$

Esta será la carga necesaria para fallar el acero AISI-SAE 1020 en 100 ciclos y es necesaria para diseñar y seleccionar los demás componentes de la máquina.

Puesto que se busca que la máquina falle materiales más resistentes que el acero AISI-SAE 1020 se sobreestima este valor y se aplica un factor de 2, por lo tanto la carga nominal de la máquina de fatiga a construir será:

$$Q_{nominal} = 964\ N * 2 = 1922\ N \qquad (9)$$

Con base en la carga nominal de 1922 N se diseñaran los demás componentes de la máquina de fatiga.

Para determinar la capacidad de la máquina, se calcula el esfuerzo generado por esta carga usando la ecuación (1) de esfuerzo máximo, se tendría un esfuerzo de flexión de 977.86 Mpa, esto evidencia que la maquina de fatiga esta en capacidad de realizar ensayos con diferentes aceros y diferentes capacidades de carga, cabe aclarar que este esfuerzo es calculado con la geometría de la probeta normalizada y cambiaria si esta cambia.

Con la capacidad nominal de la máquina calculada anteriormente se diseñan los ejes de la máquina y se seleccionan los rodamientos.

B. Diseño de componentes mecánicos

Ejes de la maquina

En la figura 4 se aprecia el prediseño del eje usando herramientas CAD, sobre el eje se ubicaran el rodamiento libre y dos rodamientos fijos, tiene una superficie roscada que sirve para fijar la boquilla por medio de tuercas, el eje posee un agujero cónico donde se inserta la boquilla.

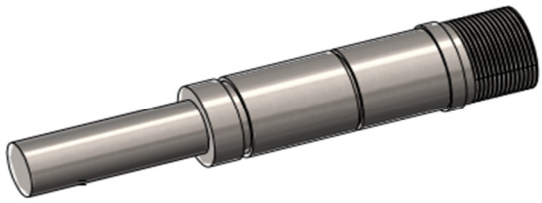

Figura 4. Diseño del eje usando herramientas CAD

Material del eje: el eje se fabricara en acero AISI-SAE 4140, este es un acero de alta resistencia y buena tenacidad, conveniente en la fabricación de ejes y conveniente para la máquina de fatiga por su buena resistencia a la fatiga.

El eje tiene un diámetro externo de 30 mm en el diseño se obtuvieron buenos factores de seguridad, 30 por resistencia mecánica y 7.55 por análisis de fatiga. Se tienen factores de seguridad muy altos, esto se debe al modo como se sujetara la probeta y la geometría de la boquilla que hace que el diámetro del eje no pueda ser menor a 25 mm y también a la alta resistencia del acero usado (AISIS-SAE 4140).

El eje es maquinado en el torno, donde se realizaron operaciones como:

Cilindrado: para las superficies donde van los rodamientos y la superficie donde se acopla la junta cardanica.

Roscado Exterior: se realizó una rosca externa en la parte donde se introduce la boquilla, en esta rosca se ubicara una tuerca de 1 1/2 de pulgada, la cual tendrá como objetivo apretar la boquilla que sujeta la probeta.

También se realizó una superficie cónica al interior del eje, esta superficie es la encargada de alojar la boquilla, el ángulo de esta superficie coincide con el ángulo de la boquilla. Sobre cada eje se disponen tres rodamientos, un rodamiento libre y una caja de rodamientos fijos compuesta de dos rodamientos. En la figura siguiente se aprecian la disposición de los ejes en la máquina de fatiga.

Rodamientos y bases de rodamientos

El sistema de rodamientos de la máquina de fatiga estará compuesto por un total de 6 rodamientos, 2 rodamientos libres en donde se aplicara la carga y 2 cajas de rodamientos fijos compuestas por 2 rodamientos cada una, esta caja de rodamientos será la encargada de soportar los ejes de la máquina de fatiga, en la figura 5 y 6 se aprecia la disposición de los rodamientos en la máquina de fatiga,

Para los rodamientos se construyeron 2 bases para su ubicación y fijación en la máquina de fatiga. Los rodamientos seleccionados para la máquina son SKF 6206.

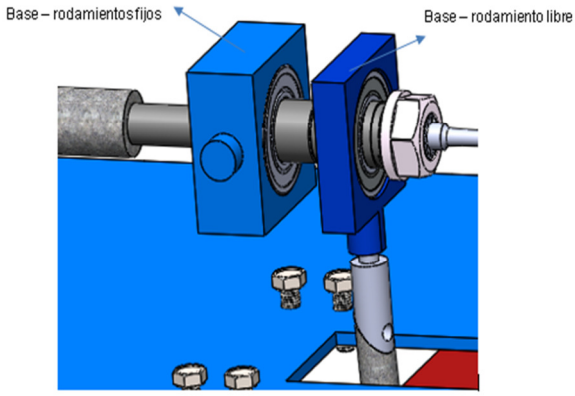

Figura 5. Disposición de los rodamientos y bases de rodamientos

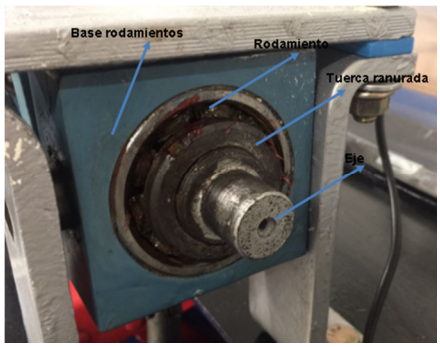

Figura 6. Conjunto eje-rodamiento-base

Estructura de apoyo de las bases de rodamientos

La estructura de apoyo será la encargada de fijar los componentes de la máquina como ejes, bases, rodamientos y boquillas a la estructura de la máquina de fatiga, dicha estructura se compondrá de 3 piezas, que estarán atornilladas a la lámina de la estructura de la máquina.

Estas estructuras se encargaran de soportar la base de los rodamientos fijos, para ello la estructura cuenta con un agujero en cada uno de sus lados, estos agujeros coinciden con las pestañas cilíndricas de la base del rodamiento fijo, como se muestra en la figura 7.

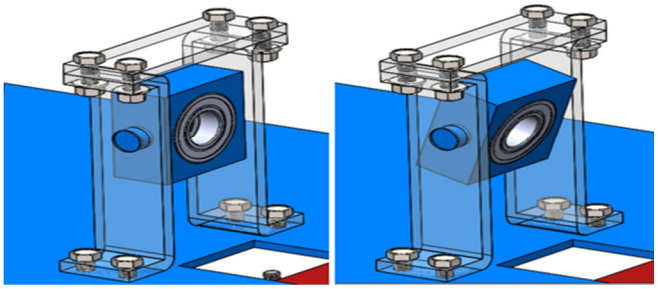

Figura 7. Estructura de apoyo y base de rodamiento fijo

Este sistema hace que la base del rodamiento pueda girar con respecto a la estructura, este movimiento es de vital importancia para el funcionamiento de la máquina, pues garantizara que se presente el momento flector en la probeta. Esta estructura se realizó en lámina de acero ASTM A36, se doblaron las esquinas correspondientes a la fijación con la estructura de la máquina, también se realizaron agujeros de 1 cm para los tornillos usando el taladro

Junta cardanica

El sistema que se utilizo para acoplar el eje del motor al eje de la maquina fue una junta cardanica o junta universal, esta junta ademas de servir como acople sirve tambien para comunicar ejes no colineales, por lo tanto con esta junta se corrijen los problemas de alineacion que se puedan tener con el eje del motor, tambien es un elemento importante para el movimiento de pivote que se presenta cuando la probeta falla. Recordando que lo que mantiene completamente horizontal los 2 ejes de la maquina es la probeta de ensayo, por lo tanto cuando esta falla el sitema cae por el peso aplicado.

En la figura 8 y 9 se aprecia la junta cardanica de la máquina de fatiga. Esta junta está conformada por 3 eslabones y 2 dados, por lo tanto se puede considerar una junta homocinética o una doble junta cardanica, los dados y los eslabones están conectados mediante pasadores puestos a presión. La junta cardanica se fija al eje del motor mediante el uso de un tornillo prisionero, se cuenta con 2 chavetas para conectar tanto el eje del motor como el eje de la máquina. La junta está construida en su totalidad en acero AISI-SAE 4140.

Figura 8. Junta cardanica construida

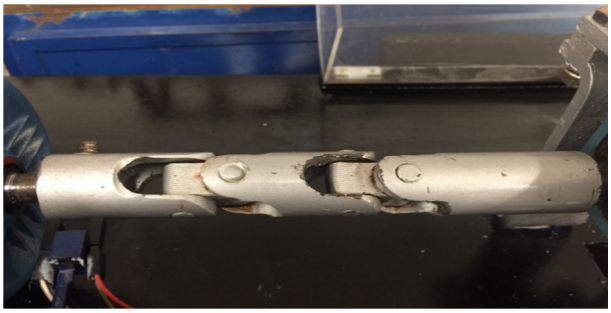

Figura 9. Junta cardanica en la máquina de fatiga

Los dados cuentan con un agujero interno encargado de transportar el lubricante para las partes de la junta que están rozando, esto con el fin de reducir el ruido de la junta al funcionar y alargar su vida útil.

Boquilla y sujeción de la probeta

Para la sujeción de la probeta de ensayo se usaron dos boquillas para fresadora ER-25 de 13 mm, estas boquillas brindan una buena sujeción y son usadas para sujetar la herramienta de corte en las fresadoras, el sistema de sujeción es similar al usado en la fresadora y se basa en apretar la boquilla mediante la acción de una tuerca que se va roscando al eje de la máquina, la geometría de la boquilla permite disminuir su diámetro interno al momento de presionarla con la tuerca en su superficie.

La boquilla debe encajar perfectamente con el agujero cónico del eje como se indica en la figura 10, este Angulo es de 8°. Al momento de roscar la tuerca esta actúa sobre la boquilla reduciendo su diámetro interno, el diámetro interno de la boquilla puede variar entre 12 y 13 mm. Conociendo el diámetro máximo de la probeta de ½ in o 12,7 mm, se concluye que la boquilla está en el rango para sujetar la probeta de forma óptima.

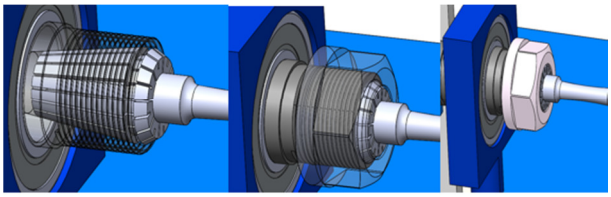

Figura 10. Ubicación de la boquilla en la máquina de fatiga

Las tuercas para este sistema se diseñaron y construyeron en acero AISI-SAE 4140, la tuerca es de 1 ½ in. En la figura 11 se observan las tuercas y boquillas antes de ser montadas en la máquina de fatiga.

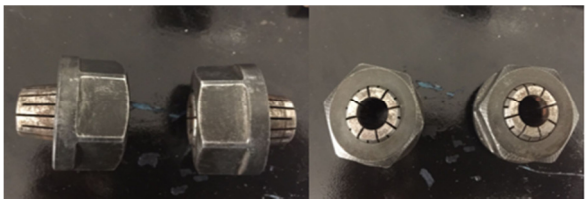

Figura 11.Tuercas y boquillas de la máquina de fatiga

Sistema de aplicación de carga.

Para la transmisión de la carga a los rodamientos libres, se usaron barras articuladas, como se muestra en la figura 12, estas barras están roscadas a la base del rodamiento libre, transmitiendo la fuerza aplicada en la placa.

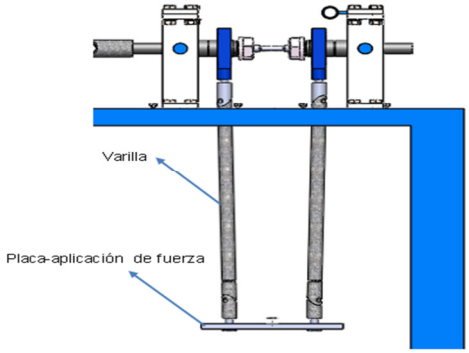

Figura 12. Barras de aplicación de carga

Cada una de las barras se compone de 5 eslabones que permiten a la barra movilidad en sus extremos, esta movilidad ayuda al movimiento de pivote que se da cuando la probeta falla, ya que si las barras fueran rígidas, este movimiento se anula. El primer eslabon posee una rosca externa la cual se conecta a la base del rodamiento libre, el segundo eslabon se conecta con el primero por una pasador donde las geometrias permiten un movimiento articulado y a su vez posee una rosca interna, el tercer eslabon es el mas largo y posee roscas externas para conectarse a los otros eslabones, el cuarto eslabon se conecta al tercero por medio de la rosca y el quinto eslabon se conecta al cuarto por un pasador, permitiendo tambien un movimiento articulado en el extremo inferior, el ultimo eslabon tambien posee una rosca interna donde se conecta un tornillo que sirve para fijar la placa donde se aplica la fuerza.Los eslabones estan fabricados en acero AISI-SAE 4140.

Figura 13. Barras de carga y funcionamiento de las articulaciones

En la parte superior de la figura 13 se aprecian las barras correctamente posicionadas, las articulaciones deben estar en la posición que asegure el movimiento de pivote, en la parte inferior se aprecian las barras posicionadas de una forma errónea, esto con el fin de mostrar la importancia de las articulaciones, pues como se observa en la figura el sistema no realiza el movimiento de pivote.

Método de aplicación de carga

Para la aplicación de la carga en la máquina de fatiga se analizó el método más efectivo, funcional y práctico para realizar dicha labor, pues las pesas calibradas representan una opción, pero resultan de poca utilidad si se quieren valores de fuerza variados y además ocupan mucho espacio. Para resolver este inconveniente se usó un gato mecánico de tornillo el cual esta fijo a la lámina de la estructura de la máquina por medio de tornillos.

El gato actúa sobre la placa de fuerza ejerciendo la carga que inducirá al fallo de la probeta, su funcionamiento consiste en un husillo que a medida que se acciona sus eslabones se comportan como una palanca, haciendo que el gato varié su altura.

Con el gato se pueden conseguir gran variedad de datos de fuerza, claro que se debe contar con un sensor capaz de medir la fuerza ejercida a la placa por el gato, pero este método resulta útil para realizar el ensayo con múltiples valores de carga, resulta cómodo para la persona que lo acciona y no ocupa mucho espacio en la máquina de fatiga, además que es una herramienta barata y fácil de conseguir.

El gato usado para la máquina de fatiga tiene una capacidad de 1.5 toneladas, por lo tanto puede ser usado sin ningún problema para la aplicación de carga en la máquina. En la figura 14 se aprecia el gato de la máquina de fatiga y las barras de transmisión de carga.

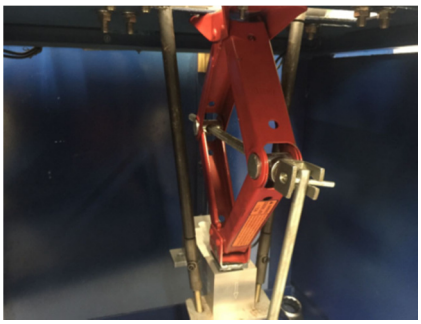

Figura 14. Gato utilizado para la máquina y su ubicación final

Diseño estructural

En la figura 15 se aprecia el diseño CAD de la estructura de la máquina de fatiga. La estructura está compuesta por una placa de soporte encargada de soportar todos los componentes de la máquina de fatiga y un bastidor compuesto por dos marcos

rígidos unidos por vigas longitudinales, además cuenta con 2 cajones metálicos con puerta.

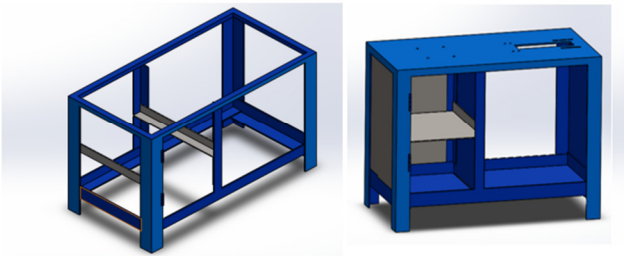

Figura 15. Diseño CAD de la estructura de la maquina

El bastidor se construye en ángulo estructural de 2 ½ in con calibre de 1/4 in, para los marcos rígidos y las vigas longitudinales inferiores, para los cajones se usó ángulo de 2 in, en la parte superior se usó tubo cuadrado de 1 ¼ in para servir como soporte para la placa. Los componentes se soldaron mediante el proceso SMAW usando electrodo E-6013.

La estructura está cubierta en lámina de 3/16 in, también se usó esta lámina para los cajones y la puerta,

En la figura 16 se aprecia la estructura y la placa soporte terminada para la máquina de fatiga.

Figura 16. Estructura de la máquina de fatiga terminada

Cubierta en acrílico

Como medida de protección adicional se diseñó una cubierta en acrílico de 5 mm de espesor, la cual protege a la persona que realiza el ensayo de los elementos móviles de la máquina, esencialmente de la probeta de ensayo. Existe la posibilidad de que la probeta o la tuerca no se apreté de manera correcta y debido a las altas revoluciones que se pueden presentar pueden generar un peligro para la integridad del estudiante o investigador. También aísla los componentes móviles para que no exista contacto directo entre ellos y la persona que realiza la práctica de fatiga.

En la figura 17 se aprecia el diseño de la cubierta, está cubierta estará fija en la placa soporte y se podrá abrir y cerrar.

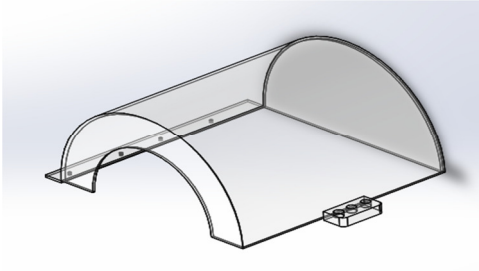

Figura 17. Diseño de la cubierta de protección

La cubierta se mandó a construir en un sitio especializado, donde se dobló en forma de medio círculo, en la figura 18 se muestra la cubierta montada en la máquina de fatiga. En la parte de trasera de la estructura de la máquina se construyó una especie de soporte con el fin de que la cubierta descanse sobre el soporte cuando esta se abre.

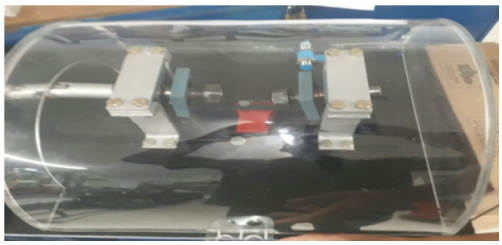

Figura 18. Cubierta terminada

La máquina de fatiga tiene componentes eléctricos que sirven para su funcionamiento y el control mismo de la máquina. En la figura 19 se aprecian los componentes eléctricos como: motor, interruptor, variador de frecuencia y arrancador y el esquema de conexión de los componentes eléctricos de la máquina. El arrancador se conecta una red trifásica de 220 v, el arrancador activa el variador de frecuencia que a su vez controla las revoluciones del motor.

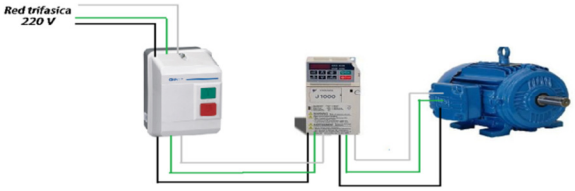

Figura 19. Esquema de conexión de los componentes

Motor electrico

El motor de la máquina de fatiga será el encargado de proporcionar los ciclos de esfuerzo en la probeta, generalmente estas pruebas no necesitan grandes potencias, pues solo se necesita vencer la fuerza de rozamiento en los rodamientos. Por lo tanto se escoge una potencia de 1 hp.

Las revoluciones del motor afectan directamente la duración del ensayo de fatiga, pues al tener más revoluciones se tendrán

más ciclos de esfuerzo por minuto, lo que desgastara el material más rápido, por lo tanto es conveniente manejar altas revoluciones con el fin de acortar los tiempos de ensayo.

Para la máquina se seleccionó un motor trifásico marca WEG de 1hp y 3450 RPM , el cual se muestra en la figura 20.

Figura 20. Motor de la máquina de fatiga

Arrancador

Se usó un arrancador directo marca chint [4]. Este arrancador será encargado de energizar al variador de frecuencia que a su vez será el encargado de controlar el motor. El arrancador cuenta con un relé térmico que protege el motor de sobrecargas.

Variador de frecuencia

Para tener un mejor control en la realización del ensayo en cuanto al valor de los ciclos de esfuerzo por minuto, se usó un variador de frecuencia marca YASKAWA de referencia J100, este variador será el encargado de cambiar las revoluciones por minuto del motor. Esto es útil porque al poder controlar las revoluciones del ensayo, se controla el ruido y vibración que puede producir la máquina de fatiga. En la figura 21 se aprecia el variador de la máquina de fatiga.

Figura 21. Variador de frecuencia de la maquina

También se cuenta con un arrancador de protección y una parada de emergencia. Y un sistema electrónico encargado de medir las variables importantes para el ensayo de fatiga, se compone de un microcontrolador, sensores de fuerza y de ciclos y componentes para el apagado automático de la máquina de fatiga.

V. RESULTADOS

A. Máquina de fatiga terminada

En la figura 22 se aprecia la máquina de fatiga en flexión rotativa de alta velocidad de la universidad de Ibagué completamente terminada. Esta máquina puede ser usada con fines educativos e investigativos.

Figura 22.máquina de fatiga terminada

Para poner a prueba la operatividad de la máquina, su seguridad y el correcto funcionamiento de todos los componentes mecánicos, eléctricos y electrónicos se realizaron ensayos de fatiga a probetas de acero AISI-SAE 1020.

B. Pruebas en probetas de acero AISI-SAE 1020

Se usó acero AISI-SAE 1020 para la realización de las pruebas de funcionamiento de la máquina, esta máquina hace parte de un macro proyectó que busca caracterizar el comportamiento a la fatiga de este acero cuando está unido con proceso de soldadura SMAW, por lo tanto se consideró conveniente realizar los ensayos en dicho material.

En la figura 23 se muestra la construcción de la probeta de ensayo para las pruebas de funcionamiento de la máquina. Esta probeta se construyó deacuerdo a la normativa y dimensiones establecidas.

Figura 23. Proceso de construcción de la probeta de ensayo

Cabe aclarar que estas pruebas no tienen como fin caracterizar el comportamiento a la fatiga del acero AISI-SAE 1020, sino evaluar el comportamiento de la máquina y su funcionamiento.

Se realizaron 5 pruebas exitosas en la máquina, las cuales se aprecian en la tabla 2, estas pruebas tenían como fin evaluar el comportamiento de la máquina según la carga aplicada y el

tiempo de duración del ensayo. Cabe aclarar que estas probetas no tenían el acabado superficial necesario para este ensayo, pues no se buscaba caracterizar el material [7].

Probeta #	Fuerza(N)	Esfuerzo(Mpa)
1	88.96	43.214
2	118	57.47
3	247.28	120
4	350	170.12
5	378.04	183.63

N- Ciclos	Revoluciones (Rpm)	Frecuencia (HZ)	T duración (min)
2704579	2000	35	1352.22
633880	1160	20	546.44
21306	560	10	48.76
1346	260	5	5.17
732	260	5	2.81

Tabla 2. Pruebas realizadas en la máquina de fatiga

Comportamiento de los componentes mecánicos

El comportamiento de los elementos mecánicos fue satisfactorio en la realización de las pruebas de funcionamiento. La junta cardanica, ejes, rodamientos y estructuras respondieron bien a los niveles de carga aplicados. En la primera prueba realizada se buscó generar un esfuerzo bajo, esto con el fin de tener una duración larga del ensayo. Este ensayo duro algo más de 22 horas donde la máquina funciono casi ininterrumpidamente, con esto se buscó evaluar el comportamiento de la máquina en largos tiempos de funcionamiento.

Se presentó un inconveniente al realizar ensayos de larga duración en las tuercas de las estructuras de las bases de los rodamientos, las cuales están en contacto con la placa soporte, estas se desajustaban y caían por la misma vibración de la máquina, para corregir esto se cambiaron estas tuercas por tuercas de seguridad, las cuales no se desajustan por la vibración. La máquina respondió de manera satisfactoria a las pruebas de altos niveles de esfuerzo, donde no se presentó inconveniente alguno. En la figura 24 se muestra el momento exacto cuando falla una probeta de ensayo.

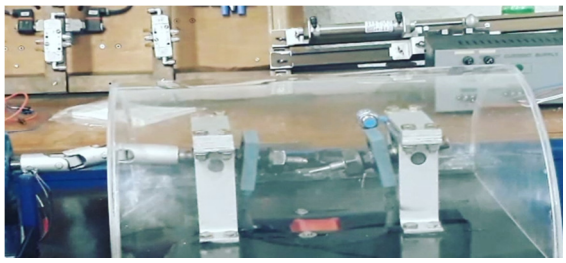

Figura 24. Prueba realizada en la máquina de fatiga

Conforme a los resultados de las pruebas realizadas y para evitar altas vibraciones y altos niveles de ruido, se aconseja manejar las revoluciones de la tabla 3 según la carga aplicada.

Carga (N)	RPM Recomendadas
≤ 100	2400
100-200	2000
200-300	1500
300-400	1000
400-500	500
≥500	260

Tabla 3. Rpm de funcionamiento recomendadas

Comportamiento de los componentes eléctricos

El motor respondió satisfactoriamente a las pruebas con altos y bajos niveles de esfuerzo, el motor no se calentó ni presentó ningún inconveniente. En cuanto al variador de frecuencia su funcionamiento fue bueno y con él se manejaron variedad de revoluciones en el ensayo. En la tabla 4 se aprecia algunas revoluciones según la frecuencia del variador de la máquina.

Frecuencia (HZ)	Revoluciones($\frac{\text{Rev}}{\text{min}}$)
2	100
4	220
7	400
10	560
13	740
15	860
18	1040
20	1160
25	1440
28	1620
30	1720
35	2100
40	2400
45	2700

Tabla 4. Datos de frecuencia y revoluciones en la maquina

Comportamiento de los componentes electrónicos

El sensor fotointerruptor que tiene como función medir las revoluciones del eje y los ciclos de esfuerzo, funciono satisfactoriamente, esto se comprobó usando un tacómetro de la universidad y comparando los datos del tacómetro y los datos del sensor, se comprobó que eran los mismos y se concluye que el sensor funciona de manera correcta.

Una vez calibrada la celda de carga funciona correctamente, un problema que se presento es que en las pruebas realizadas

de larga duración la celda se descalibra, esto puede deberse a que la celda está sujeta por tornillos que debido a la vibración de la máquina se desajustan, por lo tanto antes de cada prueba se debe verificar si la celda de carga esta calibrada, de lo contrario calibrarla. El sistema de apagado del motor funciono correctamente, en la figura 25 se aprecia el momento cuando la probeta falla y el sensor inductivo no detecta la base del rodamiento libre, desactivando el relé, el cual apagara el sistema eléctrico.

Figura 25. Sensor inductivo al no detectar la base del rodamiento.

La pantalla LCD, el arduino y demás componentes no presentaron ningún problema.

VI. CONCLUSIONES

- El principal resultado de este proyecto es el diseño y construcción de una máquina de fatiga funcional, con la cual la universidad de Ibagué y el programa de ingeniería mecánica pueden realizar estudios e investigaciones del comportamiento de distintos materiales sometidos a cargas cíclicas. esta máquina de fatiga en flexión rotativa tiene capacidad de someter la probeta de estudio a un esfuerzo de 977 Mpa, por lo tanto se puede llegar a estudiar aceros de alta resistencia.

- El diseño desarrollado corresponde a la gometria de probeta enunciada en la normativa ASTM E-466, por tal otivo es posible caracterizar el comportamiento de la curva S-N para diversos aceros.

- En los ensayos realizados en la máquina de fatiga se comprobó como las rayas producidas por el proceso de torneado alteran gravemente la vida del material, por lo tanto las probetas del ensayo deben tener un buen acabado superficial.

- El sistema de apagado de la máquina, una vez la probeta falle, funciono correctamente, esto es importante porque da autonomía a la máquina y no es necesario que el realizador del ensayo se encuentre presente mientras este se realiza, siendo esto muy conveniente en los ensayos de larga duración.

- El sistema de aplicación de carga usando un gato mecánico de tornillo resulto ser una buena elección, pues se pueden obtener variedad de niveles de carga de manera rápida y práctica.

- El uso de un variador de frecuencia para controlar las revoluciones en las cuales se realiza el ensayo resulta ser conveniente, pues con esto se evitan niveles elevados de ruido y vibración. Reduciendo el desgaste de los elementos de la máquina y mejorando la seguridad del ensayo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradezco a la Dirección de Investigaciones de la Universidad de Ibagué y al programa de Ingeniería Mecánica, por el apoyo suministrado para el desarrollo de esta investigación.

REFERENCIAS

[1]. E. M. Esteban, "Metodología para el análisis de fatiga mediante el codigo proengineer, " Universidad Carlos III de Madrid , madrid, 2010.
[2]. ASTM, " E466 – 15 Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials." ASTM, 2015
[3]. G. d. aceros, "Cía. General de aceros, " [En línea]. Available: http://www.cga.com.co/. [Último acceso: 20 03 2017].
[4]. Chint, "chint.net," [En línea]. Available: http://www.chint.net/uploads/files/2011060216082124.pdf. [Último acceso: 10 07 2017].
[5]. López Aenlle, "Predicción de vida a fatiga en materiales compuestos de fibra de carbono bajo carga de amplitud variable. " Análes de la Mecánica de la Fractura, 18: p. 375-383, 2001.
[6]. O. Araque, N. Arzola, "Predicción de la vida a fatiga de una unión soldada de filete transversal y analisis de la influencia de la excentricidad de la grieta en la falla. " Dyna rev.fac.nac.minas, Medellín , v. 80, n. 182, p. 95-104, Dec. 2013
[7]. J. Coronado, "Efecto de la preparación superficial y aplicación de recubrimientos en la resistencia a la fatiga del acero SAE 1045. " Scientia et Technica Año XIII, No 34, Mayo de 2006.