



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE MECÁNICA**  
**CARRERA MANTENIMIENTO INDUSTRIAL**

**“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO TERMOGRÁFICO Y  
VIBRACIONAL EN EJES DE ACERO DE BAJO CONTENIDO DE  
CARBONO Y DE BAJA ALEACIÓN SOMETIDOS A ESFUERZOS  
DE FATIGA.”**

**Trabajo de titulación**

**Tipo:** Propuesta Tecnológica

Presentado para optar al grado académico de:

**INGENIERO DE MANTENIMIENTO**

**AUTORES**

**CARLOS DAVID BENÍTEZ ABRIL**

**ANDRÉS JOSUÉ ESTUPIÑÁN FONSECA**

Riobamba – Ecuador

2021



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE MECÁNICA**  
**CARRERA MANTENIMIENTO INDUSTRIAL**

**“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO TERMOGRÁFICO Y  
VIBRACIONAL EN EJES DE ACERO DE BAJO CONTENIDO DE  
CARBONO Y DE BAJA ALEACIÓN SOMETIDOS A ESFUERZOS  
DE FATIGA.”**

**Trabajo de titulación**

**Tipo:** Propuesta Tecnológica

Presentado para optar al grado académico de:

**INGENIERO DE MANTENIMIENTO**

**AUTORES:** CARLOS DAVID BENÍTEZ ABRIL

ANDRÉS JOSUÉ ESTUPIÑÁN FONSECA

**DIRECTOR:** Ing. EDISSON FERNANDO CALDERÓN FREIRE Msc.

Riobamba – Ecuador

2021

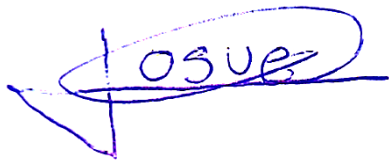
**©2021, Carlos David Benítez Abril & Andrés Josué Estupiñán Fonseca.**

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca los Derechos de Autor.

Nosotros, CARLOS DAVID BENÍTEZ ABRIL y ANDRÉS JOSUÉ ESTUPIÑÁN FONSECA declaramos que el presente Trabajo de Titulación es de nuestra autoría y que los resultados de este son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

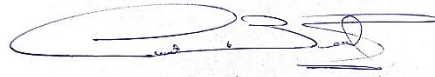
Como autores asumimos la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de integración curricular; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 07 de julio de 2021



---

**Andrés Josué Estupiñán Fonseca**  
**C.I. 180457415-8**



---

**Carlos David Benítez Abril**  
**C.I. 180516644-2**

# ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

## FACULTAD DE MECÁNICA

### CARRERA MANTENIMIENTO INDUSTRIAL

El Tribunal del Trabajo de integración curricular certifica que: El trabajo de integración curricular; tipo: Propuesta Tecnológica “**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO TERMOGRÁFICO EN EJES DE ACERO DE BAJO CONTENIDO DE CARBONO Y DE BAJA ALEACIÓN SOMETIDOS A ESFUERZOS DE FATIGA.**”, realizados por el señor **CARLOS DAVID BENÍTEZ ABRIL**, y el señor **ANDRÉS JOSUÉ ESTUPIÑÁN FONSECA**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Trabajo de integración curricular, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	<b>FIRMA</b>	<b>FECHA</b>
Dr. Antonio José Granizo <b>PRESIDENTE DEL TRIBUNAL</b>	 Firmado electrónicamente por: <b>JOSE ANTONIO</b>	2021-07-07
Ing. Edison Fernando Calderón Freire Msc <b>DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACION</b>	 Firmado electrónicamente por: <b>EDISSON FERNANDO CALDERON FREIRE</b>	2021-07-07
Ing. Eduardo Segundo Hernández Msc <b>MIEMBRO DE TRIBUNAL</b>	 Firmado electrónicamente por: <b>EDUARDO SEGUNDO HERNANDEZ DAVILA</b>	2021-07-07

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo a mis padres, Carlos Benítez, Alicia Abril, quienes con su trabajo, sacrificio, amor, paciencia y esfuerzo me han permitido llegar a cumplir hoy una meta más. Toda mi gratitud, respeto y amor a ustedes por estar incondicionalmente, además por guiarme en el camino del bien y temor a Dios.

A mis hermanos, Javier Benítez, Jenny Benitez, por estar siempre presentes, ser mi inspiración y apoyo moral a lo largo de mi vida y carrera universitaria.

**CARLOS DAVID BENÍTEZ ABRIL**

Este trabajo está dedicado a mi abuelo, Jorge Fonseca, gracias a él a su apoyo incondicional pude lograr todos y cada uno de mis objetivos; ha sabido guiarme, aconsejarme y ser el sustento que siempre he necesitado.

A mis padres que durante la formación de mi carrera profesional han sabido esperarme, reprenderme y guiarme toda mi gratitud a ellos por sus enseñanzas. A mi esposa y a mis hijos por estar siempre presentes, brindando el apoyo moral y ser la base de mi vida para salir siempre adelante.

**ANDRÉS JOSUÉ ESTUPIÑÁN FONSECA**

## **AGRADECIMIENTO**

A la Carrera de Ingeniería de Mantenimiento y a toda su planta docente que con sus conocimientos, experiencia, paciencia y motivación han logrado que pueda concluir mi formación profesional con éxito, a nuestro tutor Ing. Edison Calderón y asesor Ing. Eduardo Hernández por guiarme y formar parte de otro objetivo alcanzado.

**CARLOS DAVID BENÍTEZ ABRIL**

A la Carrera de Ingeniería de Mantenimiento y a toda su planta docente que con sus conocimientos, experiencia, paciencia y motivación han logrado que pueda concluir mi formación profesional con éxito, a nuestro tutor Ing. Edison Calderón y asesor Ing. Eduardo Hernández por guiarme y formar parte de otro objetivo alcanzado.

**ANDRÉS JOSUÉ ESTUPIÑÁN FONSECA**

## TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xii
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	xiv
ÍNDICE DE ANEXOS .....	xv
RESUMEN .....	xvi
SUMMARY .....	xvii
INTRODUCCIÓN .....	1

### CAPÍTULO I

<b>1</b>	<b>DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA .....</b>	<b>2</b>
<b>1.1</b>	<b>Planteamiento del problema .....</b>	<b>2</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos .....</b>	<b>3</b>
<i>1.2.1</i>	<i>Objetivo general .....</i>	<i>3</i>
<i>1.2.2</i>	<i>Objetivos específicos .....</i>	<i>3</i>

### CAPÍTULO II

<b>2</b>	<b>FUNDAMENTOS TEORICOS .....</b>	<b>4</b>
<b>2.1</b>	<b>Estructura atómica de los materiales y propiedades .....</b>	<b>4</b>
<i>2.1.1</i>	<i>Estructura de los sólidos .....</i>	<i>4</i>
<i>2.1.2</i>	<i>Tipos de enlace y tipos de sólidos.....</i>	<i>5</i>
<i>2.1.3</i>	<i>Redes cristalinas de los metales .....</i>	<i>5</i>
<b>2.2</b>	<b>Propiedades de los materiales: mecánicas .....</b>	<b>7</b>
<i>2.2.1</i>	<i>Resistencia a la fatiga .....</i>	<i>7</i>
<i>2.2.1.1</i>	<i>Ensayos de Fatiga.....</i>	<i>7</i>
<i>2.2.1.2</i>	<i>Ensayo de Compresión .....</i>	<i>7</i>
<i>2.2.1.3</i>	<i>Ensayo de Tracción .....</i>	<i>8</i>



2.2.2	<i>Nucleación</i> .....	9
2.2.3	<i>Propagación</i> .....	10
2.2.4	<i>Rotura</i> .....	10
1.1.1.	<i>Tenacidad</i> .....	10
2.2.5	<i>Dureza</i> .....	11
2.2.6	<i>Elasticidad</i> .....	12
2.2.7	<i>Plasticidad</i> .....	12
2.2.8	<i>Ductilidad</i> .....	12
2.2.9	<i>Reflexión</i> .....	13
2.2.10	<i>Maleabilidad</i> .....	13
2.2.11	<i>Transmisión</i> .....	14
2.3	<b>Análisis termográfico</b> .....	14
2.3.1	<i>Consideraciones técnicas para realizar una correcta termografía</i> .....	14
2.3.1.1	<i>Emisividad</i> .....	14
2.3.1.2	<i>Distancia de la medición</i> .....	15
2.3.1.3	<i>Errores de medición</i> .....	16
2.4	<b>Análisis vibracional</b> .....	16
2.4.1	<i>Vibraciones</i> .....	17
2.4.2	<i>Resonancia mecánica</i> .....	18
2.4.3	<i>Métodos de análisis vibracional</i> .....	18
2.4.4	<i>Efecto raman</i> .....	18

### **CAPÍTULO III**

3	<b>METODOLOGÍA</b> .....	20
3.1	<b>Norma ISO 1143:2010 metallic material- rotating bar bending fatigue testing</b> ...20	
3.2	<b>Selección de materiales</b> .....	22
3.3	<b>Diseño y construcción de la máquina</b> .....	23
3.3.1	<i>Selección y elaboración de elementos de la máquina</i> .....	23
3.3.2	<i>Selección del motor</i> .....	23
3.3.3	<i>Selección del eje del motor</i> .....	23
3.3.4	<i>Selección de chumaceras según catalogo SKF</i> .....	25
3.3.5	<i>Rodamientos</i> .....	25
3.3.6	<i>Selección de acople</i> .....	26

3.3.6.1	<i>Selección del acople según catalogo LoveJoy.....</i>	26
<b>3.3.7</b>	<b><i>Selección del sistema de aplicación de carga .....</i></b>	<b>27</b>
3.3.7.1	<i>Vigas guías .....</i>	27
3.3.7.2	<i>Base desmontable con rodamientos de aplicación de carga .....</i>	28
3.3.7.3	<i>Rodamientos De La Base Del Sistema de Aplicación de Carga.....</i>	28
3.3.7.4	<i>Tornillo de aplicación de carga.....</i>	29
3.3.7.5	<i>Sistema de aplicación de carga.....</i>	29
3.3.7.6	<i>Conexión del módulo para celda de carga HX711 .....</i>	30
<b>3.3.8</b>	<b><i>Mandril de autoapretado.....</i></b>	<b>30</b>
<b>3.4</b>	<b><i>Análisis termográfico .....</i></b>	<b>31</b>
3.4.1	<i>Calibración del equipo .....</i>	31
3.4.2	<i>Comprobación del censado de la cámara termográfica .....</i>	31
3.4.3	<i>Software FLUKE IR SmartView .....</i>	32
<b>3.5</b>	<b><i>Análisis Vibracional .....</i></b>	<b>33</b>
3.5.1	<i>MAINTraq.....</i>	33
3.5.2	<i>Características.....</i>	33
<b>3.6</b>	<b><i>Intervalo P-F.....</i></b>	<b>34</b>
<b>3.7</b>	<b><i>Pruebas y ensayos.....</i></b>	<b>34</b>
3.7.1	<i>Análisis termográfico .....</i>	34
3.7.2	<i>Análisis vibracional .....</i>	43
3.7.3	<i>Acero 1110 .....</i>	43
3.7.3.1	<i>Variable de Aceleración .....</i>	43
3.7.3.2	<i>Variable de Velocidad.....</i>	45
3.7.4	<b><i>Bronce .....</i></b>	<b>46</b>
3.7.4.1	<i>Variable de Aceleración .....</i>	46
3.7.4.2	<i>Variable de velocidad .....</i>	47
3.7.5	<b><i>Aluminio.....</i></b>	<b>48</b>
3.7.5.1	<i>Variable aceleración.....</i>	48
<b>3.8</b>	<b><i>Intervalo P-F .....</i></b>	<b>49</b>
3.8.1	<b><i>Intervalo P-F acero, bronce, aluminio .....</i></b>	<b>50</b>
3.8.1.1	<i>Variable velocidad.....</i>	51

## **CAPÍTULO IV**

<b>4</b>	<b>GESTIÓN DEL PROYECTO .....</b>	<b>52</b>
<b>4.1</b>	<b>Cronograma de trabajo .....</b>	<b>52</b>
<b>4.2</b>	<b>Costos .....</b>	<b>53</b>
	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>54</b>
	<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>55</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	
	<b>ANEXOS</b>	

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1-2:</b> Valores de resistencia a la cedencia y a la tracción entre el acero y el aluminio .....	9
<b>Tabla 2-2:</b> Escala de dureza rockwel.....	12
<b>Tabla 3-2:</b> Valores de ductilidad para distintos aceros .....	13
<b>Tabla 4-2:</b> Valores de emisividad de distintos materiales.....	15
<b>Tabla 1-3:</b> Simbología y designación.....	21
<b>Tabla 2-3:</b> Características de la cámara.....	31
<b>Tabla 3-3:</b> Pruebas y resultados (acero) .....	34
<b>Tabla 4-3:</b> Pruebas y resultados (aluminio).....	37
<b>Tabla 5-3:</b> Pruebas y resultados (bronce) .....	39
<b>Tabla 6-3:</b> RMS totales .....	49
<b>Tabla 7-3:</b> Características de las probetas .....	50
<b>Tabla 1-4:</b> Cronograma del proyecto.....	52
<b>Tabla 2-4:</b> Costos .....	53

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1-2:</b> Tipo de red cristalina de metales red cubica centrada en el cuerpo, caras y hexagonal .....	6
<b>Figura 2-2:</b> Tipos de metales isomorfos y estructura cristalina típica .....	6
<b>Figura 3-2:</b> Morfología de probeta para el ensayo de tracción a) dimensiones originales, b) dimensiones durante el ensayo, c) dimensiones finales (morfología para aleaciones metálicas) .....	8
<b>Figura 4-2:</b> a) Diagrama de máquina de un acero de bajo carbono (0,18 % b) diagrama convencional del mismo acero .....	9
<b>Figura 5-2:</b> Vista esquemática de las grietas que se forman al aplicar carga con un indentador vickers en un material.....	11
<b>Figura 6-2:</b> Métodos de ensayo de dureza.....	11
<b>Figura 7-2:</b> Distribución de las consideraciones a tener en cuenta para realizar la termografía	16
<b>Figura 1-3:</b> Probeta tipo reloj para el ensayo de fatiga. ....	21
<b>Figura 2-3:</b> Ejemplo de diagrama de Ashby.....	22
<b>Figura 3-3:</b> Placa característica del motor .....	23
<b>Figura 4-3:</b> Acople utilizado .....	27
<b>Figura 5-3:</b> Sistema de aplicación de carga.....	27
<b>Figura 6-3:</b> Vigas de soporte para sistema de aplicación de carga .....	28
<b>Figura 7-3:</b> Base desmontable para aplicación de carga.....	28
<b>Figura 8-3:</b> Tornillo de aplicación de carga .....	29
<b>Figura 9-3:</b> Esquema de conexión de sensor de carga .....	30
<b>Figura 10-3:</b> Módulo de celda HX711 .....	30
<b>Figura 11-3:</b> Mandril auto apretado .....	30
<b>Figura 12-3:</b> Equipo usado para la calibración.....	32
<b>Figura 13-3:</b> Software de análisis vibracional (MAINTraq Analyzer 3.1) .....	33
<b>Figura 14-3:</b> Software de análisis termográfico .....	37
<b>Figura 15-3:</b> Máquina con el equipo de vibraciones .....	43
<b>Figura 16-3:</b> MAINTraq Analyzer 3.1 (forma de onda-forma de frecuencia natural, vertical, aceleración) .....	44
<b>Figura 17-3:</b> MAINTraq Analyzer 3.1 (espectro-frecuencia natural, vertical, aceleración) .....	44
<b>Figura 18-3:</b> MAINTraq Analyzer 3.1 (forma de onda-forma de frecuencia natural, vertical, aceleración) .....	45
<b>Figura 19-3:</b> MAINTraq Analyzer 3.1 (espectro-frecuencia natural, vertical, aceleración) .....	45

<b>Figura 20-3:</b> MAINTraq Analyzer 3.1 (forma de onda-forma de frecuencia natural, vertical, aceleración) .....	46
<b>Figura 21-3:</b> MAINTraq Analyzer 3.1 (espectro-frecuencia natural, vertical, aceleración) .....	46
<b>Figura 22-3:</b> MAINTraq Analyzer 3.1 (forma de onda-forma de frecuencia natural, vertical, aceleración) .....	47
<b>Figura 23-3:</b> MAINTraq Analyzer 3.1 (Espectro-Frecuencia Natural, Vertical, Aceleración) ..	47
<b>Figura 24-3:</b> MAINTraq Analyzer 3.1 (forma de onda-forma de frecuencia natural, vertical, aceleración) .....	48
<b>Figura 25-3:</b> MAINTraq Analyzer 3.1 (espectro-frecuencia natural, vertical, aceleración) .....	48
<b>Figura 26-3:</b> Grafica del intervalo P-F .....	49
<b>Figura 27-3:</b> MAINTraq Analyzer 3.1 (forma de onda-forma de frecuencia natural, vertical, aceleración) .....	51
<b>Figura 28-3:</b> MAINTraq Analyzer 3.1 (espectro-frecuencia natural, vertical, aceleración) .....	51

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 1-3:</b> Temperatura del Acero .....	42
<b>Gráfico 2-3:</b> Temperatura del aluminio.....	42
<b>Gráfico 3-3:</b> Temperatura del bronce .....	42
<b>Gráfico 4-3:</b> Grafica del Intervalo P-F; donde serie 1 es acero, serie 2 es bronce, serie 3 es aluminio .....	50

## **ÍNDICE DE ANEXOS**

**ANEXO A: SELECCIÓN DE CHUMACERAS**

**ANEXO B: SELECCIÓN DE RODAMIENTOS**

**ANEXO C: MANUAL DE USUARIO DEL EQUIPO**



## RESUMEN

En la presente investigación se elaboró una máquina de flexión rotativa para ensayos de fatiga de materiales, además del análisis termográfico y vibracional, el objetivo fue apoyar a los estudiantes de la carrera a realizar trabajos de manera práctica respecto a fatiga y los respectivos análisis. Se redujo el estudio de materiales a elementos de acero de bajo contenido de carbono y de baja aleación, teniendo en cuenta que son los principales materiales usados para la elaboración de elementos rotatorios dentro de la industria. En base a la normativa, se eligió la máquina de flexión rotativa con doblado de un solo punto, pues posee la carga directa para aplicar en el material que se analiza. Dicha norma, sirvió para determinar la forma y las dimensiones de las probetas que se emplearon; del mismo modo se seleccionó la probeta tipo reloj de arena, puesto que, en la sección más fina facilitó la medición termográfica por la variación de espesor y temperatura. De la misma manera, los materiales a utilizar se seleccionaron en base a un estudio mediante el diagrama de Ashby y su curva de relación entre Módulo de Young y Densidad. Este proceso de medición se basa en el tiempo, la carga y la temperatura; de esa manera se obtuvo la tabulación pertinente de cada material. Se determinó que la implementación de la maquina permitió la aplicación de varias tecnologías de mantenimiento; además, la temperatura obtuvo un incremento gradual al paso del tiempo. Se recomienda el uso de diferentes materiales de construcción y de esta manera acceder a un análisis más amplio de los materiales adecuados para cada trabajo, además del control de la velocidad con la aplicación de un tacómetro.

Palabras Clave: <MÁQUINA DE FLEXIÓN ROTATIVA> <ANÁLISIS TERMOGRÁFICO>  
<ANÁLISIS VIBRACIONAL> <FATIGA DE MATERIALES> <ALEACIÓN DE CARBONO>.



Firmado digitalmente por:  
HOLGER GERMAN  
RAMOS UVIDIA

0076-DBRA-UPT-2022

2022-01-19

## SUMMARY

In this research work, a rotary bending machine was developed for material fatigue tests, in addition to thermographic and vibrational analysis. The objective was to support the students of the career to carry out work in a practical way regarding fatigue and the respective analyzes. The study of materials was reduced to low-carbon and low-alloy steel elements, considering that they are the main materials used for the manufacture of rotating elements within the industry. Based on the regulations, the rotary bending machine with single point bending was chosen, since it has the direct load to apply to the material being analyzed. This standard served to determine the shape and dimensions of the test tubes that were used; In the same way, the hourglass test tube was selected, since, in the thinnest section, it facilitated the thermographic measurement due to the variation in thickness and temperature. In the same way, the materials to be used were selected based on a study using the Ashby diagram and its relationship curve between Young's Module and Density. This measurement process is based on time, load, and temperature; in this way the pertinent tabulation of each material was obtained. It was determined that the implementation of the machine allowed the application of several maintenance technologies; In addition, the temperature obtained a gradual increase over time. The use of different construction materials is recommended and, in this way, access a broader analysis of the appropriate materials for each job, furthermore to speed control with the application of a tachometer.

Keywords: <ROTARY BENDING MACHINE> <THERMOGRAPHIC ANALYSIS>  
<VIBRATIONAL ANALYSIS> <MATERIALS FATIGUE> <CARBON ALLOY>

SANDRA  
PAULINA  
PORRAS  
PUMALEMA

Firmado  
digitalmente por  
SANDRA PAULINA  
PORRAS  
PUMALEMA  
Fecha: 2022.01.26  
17:57:21 -05'00'

## INTRODUCCIÓN

El estudio de los materiales se rige en un conjunto de principios, entre estos, el que las propiedades de un material están ligadas a su estructura, la cual puede alterarse de una forma específica y predecible a través de algún método de procesamiento, también los materiales a través del tiempo por razones relacionadas con el uso y el efecto asociado a la exposición de las condiciones ambientales pueden cambiar sus propiedades. En tal sentido es importante realizar las pruebas necesarias y específicas que permitan predecir y asegurar que el material utilizado para un fin dado se mantendrá idóneo por el tiempo de vida útil del producto en el que será empleado (« Ciencia de Materiales – James Newell – PDFLibros Ayuda, n.d.)

El presente proyecto está destinado a generar soluciones para la elección y corrección de errores respecto a la fatiga de materiales usados en ejes. Se pretende usar dos de los principales métodos de mantenimiento basado en la condición; como lo son termografía y análisis vibracional. Por ejemplo, para uniones soldadas se tienen que conocer las cargas cíclicas a las que está sometido cada elemento; motivo por el que se implementara la medición de fuerza a los que está sometido el elemento; se tiene una base de estudio en el que se ha considerado el acero AISI 1015, y los ensayos se realizan en base a la normativa.

Con los antecedentes que se obtienen tanto de fallas en elementos rotativos, como de ausencia de equipos para su diagnóstico, se plantea la implementación de dicha máquina para el estudio específico de ejes de acero de bajo contenido.

Los beneficiarios directos serán los alumnos de la carrera pues tendrán un apoyo didáctico más para poder realizar ensayos y prepararse para la vida profesional. Dichos ensayos van a ser un aporte amplio en el laboratorio de diagnóstico técnico ya que además de estar a punto para cualquier ensayo, se puede realizar bajo cualquier concepto de material como de carga.

# CAPÍTULO I

## 1 DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA

### 1.1 Planteamiento del problema

El análisis de las fallas en ejes, en los últimos años, ha demostrado que la mayoría de ellas son debido a la fatiga, *“en los años de 1860 Wohler un ingeniero de ferrocarriles bávaro, dio un impulso trascendental al conocimiento del fenómeno de fatiga, después de realizar numerosos ensayos bajo diversas condiciones de carga para determinar la causa de la rotura prematura de los ejes ferroviarios. Fruto de sus estudios eran las caracterizaciones sobre comportamiento a fatiga en términos de amplitud de tensión y número de ciclos de vida”*. (Oller & Suero, 1999).

La falla por fatiga se caracteriza por tener cargas variables en el tiempo, cuando los elementos están sometidos a este tipo de cargas se comportan de manera distinta que cuando están sometidos a cargas estáticas. Uno de los principales problemas que se encuentran en el análisis de ejes es que los mismos deben soportar las cargas, pero a la vez ser lo suficientemente ligero para no sacrificar el esfuerzo mecánico.(SPARC (Organization) & Universidad Tecnológica de Pereira., 1995).

Cuando se habla de ejes se debe recalcar que estos pueden experimentar una amplia gama de condiciones de carga. En la mayoría de los casos se ve que pueden soportar cargas de compresión, flexión, torsión, además de una combinación de estas. Se conoce que la falla más común en el desgaste de los ejes es lo referente a la fatiga, un concentrador dinámico de esfuerzos. (Bejarano Restrepo et al., n.d.).

Se busca analizar la variación de temperatura causada en los apoyos sometidos a fatiga y el tiempo en el que se producirá la fractura después de aplicar cierta carga.

## **1.2 Objetivos**

### ***1.2.1 Objetivo general***

Analizar el comportamiento termográfico y vibracional en ejes de acero de bajo contenido de carbono y de baja aleación sometidos a esfuerzos de fatiga

### ***1.2.2 Objetivos específicos***

Implementar el módulo para el análisis de fatiga en elementos rotatorios.

Analizar la variación de temperatura y el espectro vibracional con diferentes materiales sometidos a esfuerzos de fatiga.

Analizar la variación de tiempo de fractura entre cada material, al variar la carga a la que están sometidos.

## CAPÍTULO II

### 2 FUNDAMENTOS TEORICOS

El estudio de los materiales, es una disciplina donde se entiende las propiedades de los materiales y sus distintas descripciones; además, hace más fácil el entender cómo influyen las características dentro de cada material.

En tal sentido Newell afirma que: *“el científico o ingeniero de materiales debe entender la diversidad de materiales y las propiedades asociadas, comprender las razones de la existencia de dichas propiedades y como pueden modificarse o alterarse de manera que el material se adapte para una aplicación específica. También debe estar en la capacidad de medir las principales propiedades de los materiales y como estas inciden en el desempeño a corto, mediano y largo plazo.”* (» Ciencia de Materiales – James Newell – PDFLibros Ayuda, n.d.)

#### 2.1 Estructura atómica de los materiales y propiedades

Los átomos representan la unidad estructural básica de los materiales, es importante comprender el vínculo que existe entre, la estructura atómica y las propiedades que pueda presentar un determinado material. Las propiedades de los materiales van a depender de las características que existan en su composición, el tipo de enlace y la naturaleza del enlace. (» Ciencia de Materiales – James Newell – PDFLibros Ayuda, n.d.).

##### 2.1.1 Estructura de los sólidos

La explicación de las propiedades mecánicas de un sólido puede darse por el modo en que se empaquetan los átomos y moléculas para conformarlo, este empaquetamiento puede ser largo o corto, pero como común característica se destaca el orden presente en tal estructura. Existe un orden de corto alcance cuando las moléculas más o menos complejas se unen de forma aleatoria entre sí, las moléculas en este caso se caracterizan por presentar un alto orden interno. Se dice en este caso que el sólido tiene estructura molecular y puede adoptar distintas configuraciones (Barroso, Gíl, & Camacho (2010))

En cuanto al orden de largo alcance, este se presenta al igual que en caso anterior por la presencia de un orden interno de los átomos que conforman las moléculas, pero con la variante de que dichas moléculas se organizan dando lugar a configuraciones repetitivas en el espacio. Uno de las particularidades de materiales sólidos con orden de largo alcance es que su energía es minimizada por esta configuración. Lo anterior es típico de los metales, así como de materiales cerámicos y poliméricos. (Barroso, Gíl, & Camacho (2010))

### **2.1.2 Tipos de enlace y tipos de sólidos**

Los sólidos pueden clasificarse según el tipo de enlace presente en sus moléculas, en la bibliografía utilizada se los caracteriza como moléculas de estado sólido covalentes, además, se indica que estos son los que se encuentran afectados directamente por un efecto atómico; dicho efecto se caracteriza cuando uno o más electrones son compartidos por los átomos, de esta manera los átomos quedan ligados entre ellos por varios enlaces direccionales.

Gamón, indica que: *“los sólidos con este tipo de enlace, disponen de una alta pureza, son difíciles de deformar, presentan un punto de fusión alto, son por lo general transparente y no son buenos conductores de calor ni de electricidad.”*

En relación a los sólidos iónicos, son malos conductores de calor y electricidad; lo cual destaca como característica principal además son duros, pero al mismo tiempo frágiles y disponen de un punto de fusión alto. En este caso los enlaces se dan por la transferencia de un electrón de un átomo a otro, dando lugar a un enlace mutuo entre el ion positivo y el negativo, dicha unión se da por fuerzas de Coulomb (Gammon, 2010).

Los sólidos metálicos, por su parte consiste de núcleos de átomos que presenta carga positiva unidos entre sí a través de un cúmulo de electrones que los rodea, a este tipo de enlace se le llama metálico. Los enlaces presentes en estos tipos de sólidos se caracterizan porque los electrones deslocalizados están alrededor de los núcleos atómicos con carga positiva. Dentro de este grupo se pueden citar como ejemplo el hierro, la plata y el cobre (Gammon, 2010).

### **2.1.3 Redes cristalinas de los metales**

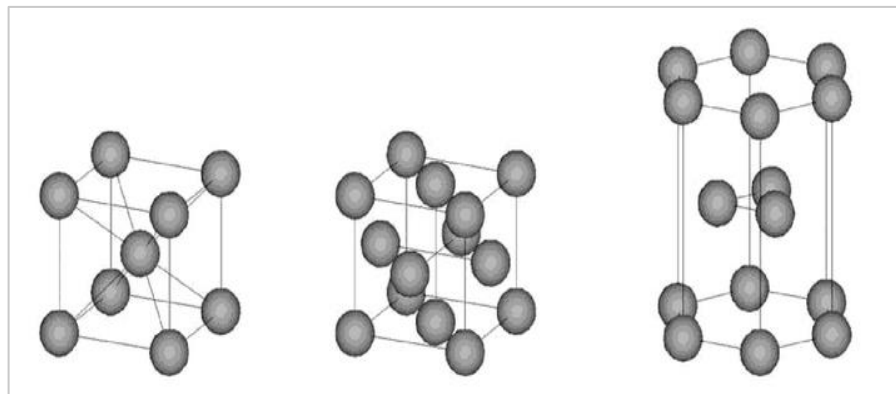
Los materiales metálicos se caracterizan por ser sólidos cristalinos (desde la concepción molecular), el enlace atómico de estos es del tipo metálico y no direccional. En el caso de los metales los tipos de redes cristalinas comunes son la red cúbica centrada en el cuerpo, la red cubica centrada en las caras y la hexagonal compacta (Callister & Rethwisch, 2011)

La estructura cristalina cúbica centrada en las caras, es característico de metales como el cobre, el aluminio la plata y el oro. En este tipo de estructura los metales tienen una celdilla de unidad

cubica, para este caso los átomos se encuentran posicionados en los vértices y en los centros de las caras del cubo (Callister & Rethwisch, 2011)

Por su parte las estructuras centradas en el cuerpo presentan un átomo en cada vértice (ocho vértices) y uno en el centro del cubo. La mayoría de los metales de interés industrial cristalizan según este tipo de estructura. (Barroso, Gíl, & Camacho (2010))

La estructura cristalina hexagonal o también conocida como estructura cristalina hexagonal compacta, en este tipo de estructura “la base superior e inferior consisten en hexágono regulares con sus átomos en los vértices y uno en el centro (Callister & Rethwisch, 2011)



**Figura 1-2:** Tipo de red cristalina de metales red cubica centrada en el cuerpo, caras y hexagonal

Fuente: Barroso, Gíl, & Camacho (2010)

Existen metales que se consideran isomorfos dado a que presentan la misma estructura cristalina, ejemplo de estos son el cobre, el aluminio, el níquel y la plata que cristalizan de forma común en una red cúbica centrada en caras, caso contrario sucede con metales (Barroso, Gíl, & Camacho (2010))

<b>Metales Isomorfos</b>	
Cobre	
Aluminio	
Níquel	
Plata	

**Figura 2-2:** Tipos de metales isomorfos y estructura cristalina típica

Fuente: Barroso, Gíl, & Camacho. 2010



## **2.2 Propiedades de los materiales: mecánicas**

Los materiales al estar sometidos a esfuerzos o fuerzas aplicadas presentan un determinado comportamiento, esta postura mecánica del material refleja la relación entre la fuerza aplicada y la respuesta que este adopta ante esta. La determinación de las propiedades mecánicas de los materiales se efectúa a través de ensayos de laboratorio, los cuales reproducen las condiciones a las que estaría sometido el material, en estas pruebas se consideran factores como duración de la carga y tipo de carga aplicada, condiciones del medio (Callister & Rethwisch, 2011)

### **2.2.1 Resistencia a la fatiga**

Es la capacidad de los metales a resistir la fatiga. Los fenómenos de fatiga aparecen siempre al pasar el límite de la resistencia de la fatiga. La resistencia a la fatiga es la cantidad máxima que puede soportar un material cuando se habla de tensión; para determinar los valores de resistencia según la normativa las probetas de acero son probadas a 5'000.000 ciclos, por otro lado, las aleaciones no ferrosas fueron testeadas en base de 20'000.000 ciclos. (*Ensayo de Fatiga - EcuRed*, n.d.)

Para el estudio de esta propiedad es necesario citar los principales tipos de ensayos que se pueden realizar para la determinación de las propiedades mecánicas de los materiales.

#### **2.2.1.1 Ensayos de Fatiga**

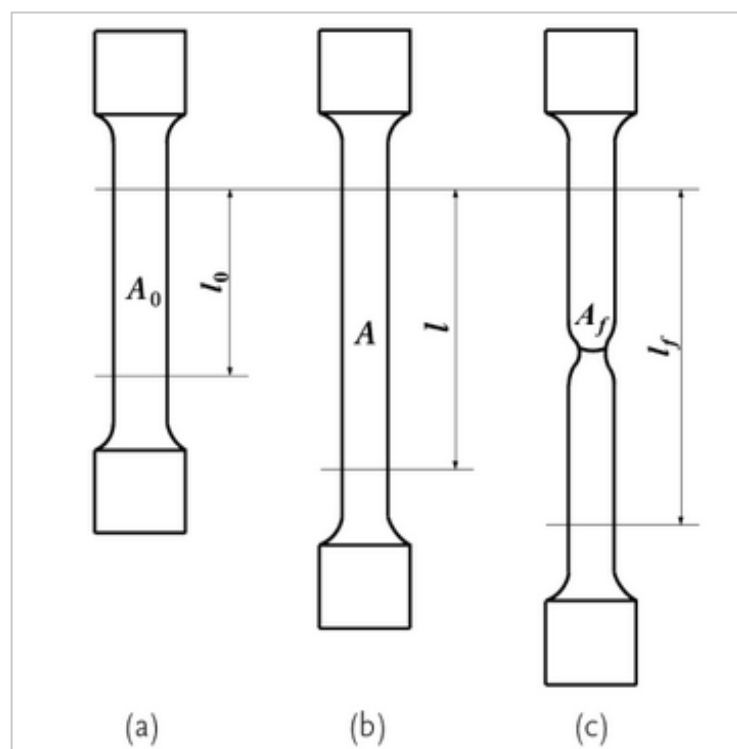
Método para determinar el comportamiento de los materiales bajo cargas fluctuantes. Se aplican a una probeta una carga media especificada (que puede ser cero) y una carga alternativa y se registra el número de ciclos requeridos para producir un fallo (vida a la fatiga). Por lo general, el ensayo se repite con idénticas probetas y varias cargas fluctuantes. Dependiendo de la amplitud de la carga media y cíclica, el esfuerzo neto de la probeta puede estar en una dirección a través del ciclo de carga o puede invertir la dirección.

#### **2.2.1.2 Ensayo de Compresión**

Según Nuñez, Roca, & Jorba (2013), este tipo de ensayo permite conocer o analizar las propiedades de un material como la resistencia mecánica, la rigidez, la maleabilidad y tenacidad. Este tipo de ensayo por lo general es complementario al de tracción y la información que suministra es casi tan amplia como la de este. No obstante, en el caso específico del módulo de Young es frecuentemente determinado por el ensayo de tracción, mientras que la tenacidad obtenida por el ensayo de compresión presenta limitada aplicabilidad. En tal sentido de manera más precisa en este ensayo se consigue son la resistencia mecánica y capacidad de deformación plástica. (De Barcelona U B et al., n.d.)

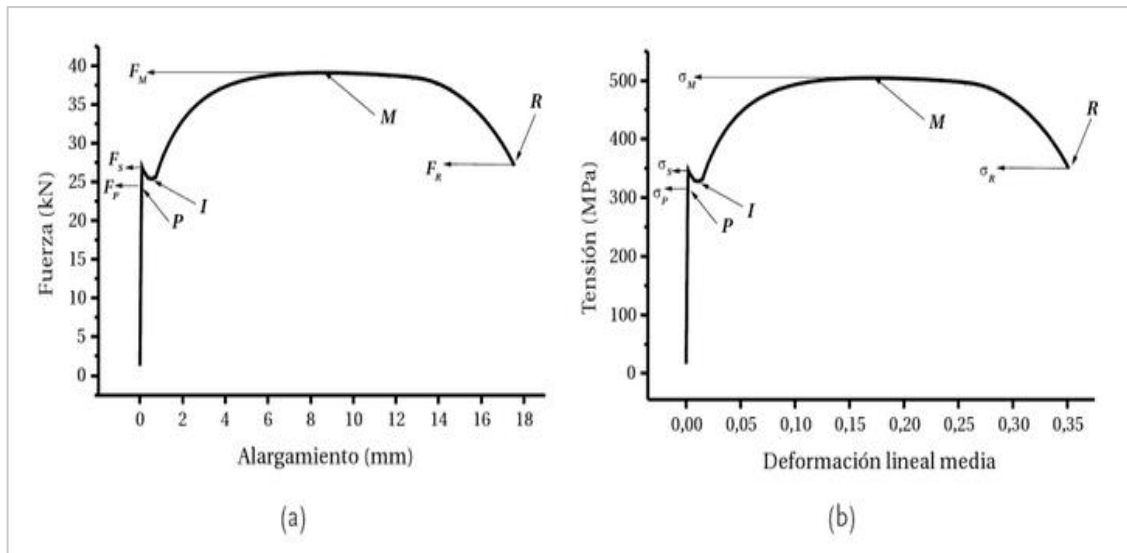
### 2.2.1.3 Ensayo de Tracción

Es uno de los estudios más significativos de las propiedades mecánicas de un material o el ensayo mecánico más importante, a través de este se pueden obtener propiedades como resistencia mecánica, rigidez, ductilidad, tenacidad y el módulo de resiliencia. Este análisis permite comprender la conducta mecánica de un material sometido a una fuerza de tensión uniaxial. En este mismo ensayo se puede determinar el coeficiente de Poisson y con este y con el uso de modelos matemáticos se consigue el módulo de rigidez (G) y de compresibilidad (K) en materiales isótropos, para ello es necesario contar con dispositivos apropiados para medir deformaciones longitudinales y transversales (De Barcelona U B et al., n.d.)



**Figura 3-2:** Morfología de probeta para el ensayo de tracción  
a) dimensiones originales, b) dimensiones durante el ensayo,  
c) dimensiones finales (morfología para aleaciones metálicas)

**Fuente:** Núñez, Roca, & Jorba. 2013



**Figura 4-2:** a) Diagrama de máquina de un acero de bajo carbono (0,18 %) b) diagrama convencional del mismo acero

Fuente: Núñez, Roca, & Jorba. 2013

**Tabla 1-2:** Valores de resistencia a la cedencia y a la tracción entre el acero y el aluminio

Material	Resistencia a la cedencia (MPa)	Material	Resistencia a la cedencia (MPa)
acero 0,15% C laminado caliente	315	aluminio 99,5% recocido	28
acero 0,15% C recocido	285	aluminio-cinc (7075) recocido	105
acero 0,40% C laminado caliente	415	aluminio-cinc (7075) madurado artificialmente	500
cero 0,40% C recocido	350	titanio 99%	170
acero 0,40% C templado/revenido 200 °C	590	Ti-6Al-4V recocido	830
acero 0,40% C templado/revenido 650 °C	430	acero 51CrV4 templado revenido	> 900

Realizado por: Estupiñán, A.; Benítez, C. 2021

Fuente: Núñez, Roca, & Jorba. 2013

### 2.2.2 Nucleación

Se produce en los metales cuando el nivel de esfuerzo aplicado es menor que el límite elástico. En esta fase aparece una deformación masiva generalizada, hasta que el metal se endurece lo suficiente como para resistir la tensión aplicada en un punto determinado denominado Punto de

Nucleación, y suele estar situado en la superficie exterior, que es donde las fluctuaciones de tensión son más elevadas o bien en zonas de concentración de tensiones como: entallas, cantos vivos, rayas superficiales o bien en inclusiones y poros.

### **2.2.3 Propagación**

Algunos materiales más resistentes y de mayor dureza se caracterizan por propagar las fisuras más rápido y fácilmente que otros. Mientras que materiales menos resistentes, pero más “tenaces” originan fisuras que se propagan lo suficientemente lento, que frecuentemente pueden ser detectadas a tiempo y remediadas antes que lleguen a ser suficientemente grandes como para ocasionar fallas.

### **2.2.4 Rotura**

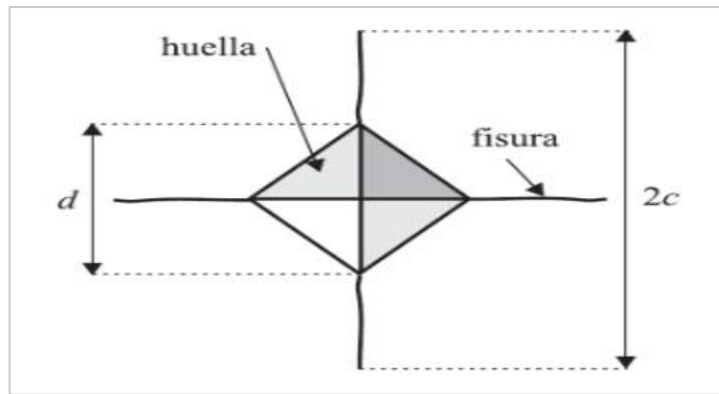
En esta fase la pieza continúa deteriorándose por el crecimiento de las fisuras, quedando tan reducida la sección remanente de la pieza, que es incapaz de resistir la carga aplicada, produciéndose así la falla por fatiga de forma inesperada.

#### **1.1.1. Tenacidad**

La tenacidad como propiedad física de los materiales está representada por la capacidad de absorber o acumular energía previa a la fractura o rompimiento ante condiciones de impacto, por tal motivo la tenacidad está asociado a la resistencia (Callister & Rethwisch, 2011).

La tenacidad es una propiedad que está muy marcada por la estructura molecular del material, en tal sentido en los metales depende de manera crítica la composición de estos y de cómo ha sido conformado en frío, calentado o templado (Ashby & Jones, 2009).

La evaluación de la tenacidad, puede realizarse por varios métodos, una de estos es a través de probetas con entallas chevron (ensayo de Baker), y en el caso de materiales frágiles se usa el ensayo Vicker, el cual emplea un indentador piramidal, permite exponer la fragilidad del material en base a las grietas que aparecen en la dirección de las diagonales de la huella, la tenacidad en este caso es obtenida con base en la medida de la longitud de las fisuras (Anglada, 2002).



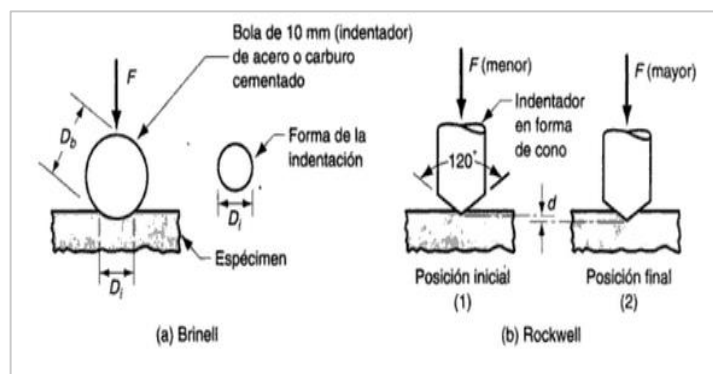
**Figura 5-2:** Vista esquemática de las grietas que se forman al aplicar carga con un indente vickers en un material

Fuente: Anglada, E. 2002

### 2.2.5 Dureza

Es la resistencia que un determinado material a ser rayado o atravesado por otro o la resistencia del material a la indentación permanente. Esta propiedad ha sido tabulada a manera de categorizar los materiales según esta propiedad. Un material con alta dureza se traduce en elevada resistencia al rayado y el desgaste (Groover, 1997).

Existen diferentes ensayos para determinar la dureza de los materiales entre los más comunes se menciona el ensayo de dureza Brinell, el cual es usado para medir esta propiedad en metales y no metales de dureza ubicada entre baja y media. El ensayo de dureza Rockwell el cual es adaptable a una variedad de materiales, este último, parte de la acción de un indente en forma de cono o esfera, para el caso de las esferas estas oscilan entre 1/16 o 1/8 pulgadas de diámetro). Este indente es asentado en el material con el empleo de una carga o fuerza menor de 10 Kg y posteriormente se emplean otros niveles de carga para que dicho indente penetre en el material una cierta distancia diferente a la de la posición inicial. Esta distancia es convertida por la maquina ensayadora en una lectura de Rockwell de dureza. (Groover, 1997)



**Figura 6-2:** Métodos de ensayo de dureza

Fuente: Groover, 1997

**Tabla 2-2:** Escala de dureza rockwel

<b>Símbolo de la Escala</b>	<b>Penetrador</b>	<b>Carga Mayor (Kg)</b>
<b>A</b>	Diamante	60
<b>B</b>	Bola de 1/16 pulg	100
<b>C</b>	Diamante	150
<b>D</b>	Diamante	100
<b>E</b>	Bola de 1/8 pulg.	100
<b>F</b>	Bola de 1/16 pulg	60
<b>G</b>	Bola de 1/16 pulg	150
<b>H</b>	Bola de 1/8 pulg.	60
<b>K</b>	Bola de 1/8 pulg.	150

**Realizado por:** Estupiñan, A.; Benítez, C. 2020

*Fuente:* Callister, 2007

### **2.2.6 Elasticidad**

Es la capacidad de algunos materiales de recuperar su forma y dimensiones iniciales una vez dejado de actuar la fuerza que originó tal deformación. La elasticidad es un enfoque parcial o de estudio de ciencias más amplias como la mecánica de sólidos deformables, en esta se percibe la elasticidad como la propiedad en la que el sólido recupera su forma inicial al dejar de aplicarse el esfuerzo exterior (Rodríguez, Llardent, González, & García, 2011).

Esta propiedad es estudiada por áreas de la mecánica del medio continuo y se sustenta en una teoría simple conocida como “teoría de elasticidad lineal”, esta facilita de una forma simple analizar la elasticidad de sólidos deformables, tanto en condiciones estáticas como isotérmicas. (Ayneto, 2012).

### **2.2.7 Plasticidad**

La plasticidad de un material es una condición opuesta a la elasticidad, en este caso el material mantiene la forma que adquiere por acción de una fuerza deformante y es conservada aun cuando esta fuerza deja de actuar. En este caso se ha superado el límite elástico de dicho material. Barroso, Gil, & Camacho (2010) la definen como “*la amplitud que presentan ciertos materiales para deformarse plásticamente bajo la acción de fuerzas externas si alcanzar la rotura*”.

### **2.2.8 Ductilidad**

Propiedad de un grupo de materiales de deformarse permanentemente ante la acción de un esfuerzo, dicha deformación es caracterizada por un estirado si sufrir rotura. Por lo general de una

forma análoga se ejemplifica esta propiedad por la acción de un alambre de determinado material de pasar de grueso a fino ante la acción de una fuerza de estiramiento.

Esta propiedad es indicio de blandura mas no debe ser indicativo de debilidad. Por lo general en el caso de metales se considera el alargamiento y la estricción como indicativo de la ductilidad que este posee, todo ello con búsqueda de predecir cuanto puede deformarse un metal al ser trabajado en frio sin llegar a la rotura o predecir cuanto puede deformarse una pieza elaborada de un material antes de romperse (Morral, Jimeno, & Molera, 2004).

**Tabla 3-2:** Valores de ductilidad para distintos aceros

<b>Materiales</b>	<b>A%</b>	<b>Z%</b>
*acero C <sub>1</sub> 8E <sup>12</sup> laminado caliente	33	66
*acero C <sub>1</sub> 8E <sup>13</sup> trefilado 19% TF	12	55
*acero C <sub>1</sub> 8E <sup>14</sup> trefilado 22% TF	10	38
*acero C <sub>45</sub> E <sup>15</sup> laminado caliente	26	49
*acero C <sub>45</sub> E templado/revenido a 205 °C	16	45
*acero C <sub>45</sub> E templado/revenido a 425 °C	21	57
*acero C <sub>45</sub> E templado/revenido a 540 °C	23	61
*acero C <sub>45</sub> E templado/revenido a 650 °C	28	68

%TF es el porcentaje de trabajo en frio efectuado por trefilado  
 \*/<sub>o</sub> = 50,0 mm  
 \*\*/<sub>o</sub> = 50,8 mm

**Realizado por:** Estupiñan, A.; Benítez, C. 2020

**Fuente:** Nuñez, Roca, & Jorba, 2013

### 2.2.9 Reflexión

Esta es una propiedad que también debe ser tomada en cuenta en lo que a termografía respecta, la reflexión es la medida del cuerpo de reflejar la radiación infrarroja que este posee. La reflexión depende directamente de las propiedades de la superficie del material, así como la temperatura y el tipo de material del que esté compuesto. (*Termografía Guía de Bolsillo*, n.d.).

### 2.2.10 Maleabilidad

Esta propiedad se caracteriza porque los materiales pueden transformarse en láminas delgadas, bajo los efectos de una fuerza de compresión que produce la deformación plástica, a mayor maleabilidad del material más delgadas y fáciles de generar serán las láminas (Salán, 2005). No hay un parámetro adecuado que permita medir con precisión esta propiedad, pero se considera el porcentaje de reducción o acortamiento de la dimensión axial (Nuñez, Roca, & Jorba, 2013).

### **2.2.11 Transmisión**

Esta capacidad es la que permite a la radiación infrarroja atravesar o no el material; está ligada al espesor, así como al tipo del material. En la práctica de la termografía la transmisión es un factor apreciable por lo que se la puede omitir en las fórmulas. (*Termografía Guía de Bolsillo*, n.d.).

## **2.3 Análisis termográfico**

El análisis termográfico está basado en la propiedad que tienen los materiales de irradiar calor, para este análisis se usa una cámara termográfica. En este análisis está presente la influencia de factores propios relacionados con el material que se evalúa, entre estos se menciona el factor de emisividad o agentes externos como por ejemplo el efecto de los rayos del sol sobre la superficie del material que se analiza (Arlandis, 2015).

El análisis termográfico forma parte de los ensayos no destructivos, es decir el material inspeccionado o evaluado no experimenta cambios o alteraciones durante la prueba ni posterior a ella. Se habla también de termografía infrarroja, la cual puede definirse como el método de obtención de imágenes de la distribución de calor sobre la superficie del objeto que se estudia.

El análisis termográfico emplea la transmisión de calor por radiación como una variable que está relacionada con la temperatura, esto permite realizar los estudios sin necesidad de entrar en contacto con el material o requerir la estabilización de la temperatura de este (Soriano & Royo, 2016).

No obstante, existen algunos agentes que pueden incidir en las mediciones y que es necesario considerar, Soriano & Royo (2016) mencionan los siguientes: emisividad, distancia, humedad relativa, la temperatura atmosférica y la del ambiente.

En la actualidad existen avances que mezclan principios de las ciencias de los materiales y tecnología moderna, tal es el caso de las cámaras termográficas radiométricas provistas de software que facilitan la captura y procesamiento de una mayor cantidad de puntos que componen una imagen térmica, además de la ejecución de análisis efectuando cambios en las variables emisividad o el rango de temperatura, ya sea en campo, en la misma cámara o en la oficina con el software para PC (COASIN, 2019).

### **2.3.1 Consideraciones técnicas para realizar una correcta termografía**

#### **2.3.1.1 Emisividad**

Independientemente de cualquier tipo de cámara con la que se esté trabajando, hay que tener en cuenta que se va a crear una señal directamente proporcional a la energía radioactiva recibida por



el cuerpo. Esta señal, además va a estar ligada directamente con diferentes factores como son: longitud de onda, temperatura, incluso la dirección desde la cual se enfoca el cuerpo; en este preciso momento es cuando aparece la emisividad, la misma que va a variar entre cuerpo y cuerpo puesto que existen cuerpos grises y cuerpos negros caracterizados así según su capacidad reflectiva. (Balageas, 2014).

La emisividad dentro de la termografía es considerada como la capacidad de un cuerpo o material para propagar radiación infrarroja. Como ya se mencionó la emisividad varía con relación a cada cuerpo que se analiza; cuando se trata de cuerpos negros la emisividad ideal es de valor uno ( $\epsilon = 1$ ), aunque nunca se encuentra este valor en realidad, los cuerpos reales que incluso transmiten radiación son de emisividad menor que uno ( $\epsilon < 1$ ). (Termografía Guía de Bolsillo, n.d.).

**Tabla 4-2:** Valores de emisividad de distintos materiales.

<b>Material</b>	<b>Emisividad</b>	<b>Material</b>	<b>Emisividad</b>
<b>Madera</b>	0.85	Placa de Cobre	0.06
<b>Agua</b>	0.96	Aluminio negro	0.95
<b>Ladrillo</b>	0.75	Piel Humana	0.98
<b>Acero Inoxidable</b>	0.14	Asfalto	0.96
<b>Cinta</b>	0.96	PVC	0.93
<b>Placa de Aluminio</b>	0.09	Papel Negro	0.86
<b>Policarbonato</b>	0.8	Pintura	0.9
<b>Hormigón</b>	0.97	Goma	0.95
<b>Oxido de Cobre</b>	0.78	Hierro Fundido	0.81

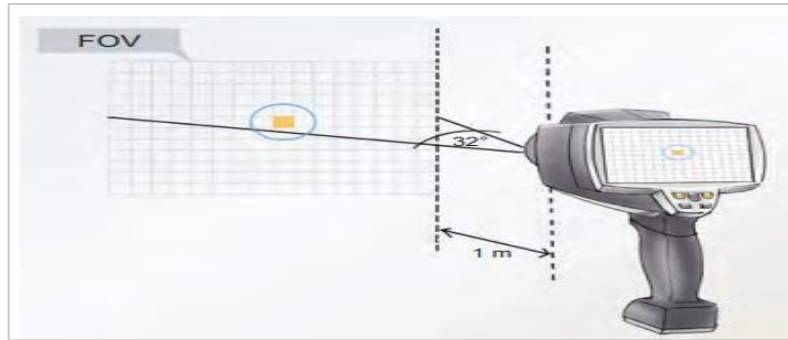
**Realizado por:** Estupiñan, A.; Benítez, C. 2020

**Fuente:** (Emisividad En Cámaras Termográficas Portátiles – Visiotech, n.d.).

### 2.3.1.2 Distancia de la medición

Para tener en cuenta la distancia apropiada, así como el tamaño del objeto que se puede medir, se considera 3 variables:

- Objeto visible más pequeño.
- Angulo de visión.
- Objeto para medir.



**Figura 7-2:** Distribución de las consideraciones a tener en cuenta para realizar la termografía

**Fuente:** (*Termografía Guía de Bolsillo*, n.d.)

### 2.3.1.3 Errores de medición

Estos errores se evidencian una vez que el equipo totalmente esté listo para tomar el termograma, estos surgen principalmente debido a una mala posición de la cámara y por las características de medición tanto ambientales como físicas del lugar; además existen varios errores que son muy frecuentes en la realización del análisis termográfico:

- El ángulo de visión es muy poco profundo entre el objeto y la cámara.
- Factores atmosféricos, aunque no dependan directamente de la persona que realiza la termografía afectan en gran proporción el resultado, estos se dan con el paso del tiempo como es la temperatura ambiental y la humedad.

Los errores en la termografía van a afectar el análisis posterior, en algunos casos se va a encontrar puntos calientes que son solo objeto de una reflexión negativa dentro del termograma; además la distancia en la que se puedan tomar los termogramas deben estar dentro de un rango propio para las características de la cámara a utilizar.

## 2.4 Análisis vibracional

Vibración es el movimiento de una manera oscilante hecho por una partícula alrededor de un punto fijo; la manera más normal en la que se realizan las vibraciones es con movimiento aleatorio, por otro lado, dicho movimiento podría ser regular en dirección, frecuencia, e intensidad. (“Procedimiento de Evaluación de Riesgos Ergonómicos y Psicosociales” / Antonio D. Aguila Soto).

En definitiva, las vibraciones son el resultado de varias fuerzas dinámicas en las maquinas, siempre que estás tengan partes en movimiento y estén sometidas a acciones variables. Las distintas partes y elementos de la maquina van a vibrar de una manera distinta ya sea en su frecuencia como en su amplitud. La vibración es la causa de una “muerte prematura” en la

máquina y en consecuencia de esta se produce el ruido que es simplemente parte de la energía de la vibración. El número de veces que tiene lugar el movimiento cíclico completo en un segundo se conoce como frecuencia, y se mide en hertzios (Hz). La frecuencia es igual a la inversa del período. Multiplicando la frecuencia por  $2\pi$ , se obtiene la frecuencia angular, que es proporcional a la raíz cuadrada de la rigidez  $k$  dividida entre la masa  $m$ . Un aumento de la masa en un sistema que se encuentra vibrando produce un aumento del período, es decir, una disminución de la frecuencia. La amplitud de la vibración es la característica que describe la intensidad de la misma. (“Análisis modal operacional: teoría y práctica”).

Cuando se trata de mantenimiento el análisis de vibraciones es una de las técnicas de mantenimiento predictivo más utilizadas, y por los estudios realizados es la que los mejores resultados puede brindar a la hora de supervisar los problemas en lo que a máquinas rotatorias se trata. Todo esto debido a que dicha técnica nos permite diagnosticar el estado de las máquinas mientras se encuentran en el proceso de producción y por ser el único método capaz de darnos la oportunidad de hacer análisis de causa raíz y de esta forma determinar el fallo. (*Análisis de Vibración - Mantenimiento Predictivo*, n.d.-a)

Todas las máquinas vibran, debido en primera instancia a las fuerzas externas, y en segundo lugar por todas aquellas que se generan por efecto de la propia rotación de sus componentes y afectada por las tolerancias inherentes a cada uno de sus elementos constructivos. La suma de todas estas condiciones estructurales y de operación proporciona a una máquina, aunque esté recién construida, una vibración característica básica con la que se puede comparar futuras vibraciones para su correcta evaluación. Máquinas similares, funcionando en buenas condiciones, poseen similares características de vibraciones y un cambio en su vibración básica, funcionando en condiciones normales, será indicativo de que se está generando un defecto en alguno de sus elementos. (*Análisis de Vibración - Mantenimiento Predictivo*, n.d.-b)

#### **2.4.1 Vibraciones**

Los átomos no se encuentran estáticos, sino que están en movimiento uno con respecto al otro, estos vibran entorno a enlaces que los unen a frecuencias constante. Existe la fuerza de interacción, que son de tipo de atracción y otras de repulsión. En los materiales sólidos cada átomo vibra alrededor de su posición dentro de la estructura cristalina (estructura atómica), por lo general no todos los átomos vibran a la misma frecuencia o amplitud, ni con la misma energía. Esta energía no es constante, sino que varía con el tiempo. La manifestación vibracional atómica está asociada a las propiedades que manifiestan muchos sólidos. Procesos como la fusión se originan por movimientos atómicos vigorosos que rompen los enlaces (Callister, 2007).

#### **2.4.2 Resonancia mecánica**

La resonancia presenta un fenómeno específico el cual está definido por la fuerza constante cuando es aplicada a un determinado procedimiento, y este coincide con la pulsación de resonancia; es decir cuando un cuerpo con capacidad de vibrar es sometido a fuerzas periódicas, lo cual constituye una particularidad de cada sistema o procedimiento oscilante, y genera que la extensión del sistema oscilante alcance su mayor punto si las dos magnitudes coinciden. Es importante destacar que la resonancia es capaz de causar daños en algunos materiales rígidos dado que los niveles de vibración resultantes son muy altos lo que originaría daños significativos causando el colapso de la estructura (Martinez, 1986).

#### **2.4.3 Métodos de análisis vibracional**

El análisis de vibración es una práctica utilizada con el objeto de identificar y pronosticar posibles fallas mecánicas, resultado que se obtiene mediante la medición de la vibración e identificando las frecuencias existentes. El acelerómetro es capaz de registrar la vibración mediante el cual los datos derivados son procesados por un analizador de espectro. La aplicación de esta técnica en el mantenimiento predictivo mejora la eficiencia y fiabilidad en el sistema de maquinaria industrial, mediante el análisis de vibraciones es posible identificar todas las anomalías que pueda presentar una maquina o al menos permite sospechar si existe alguna, exceptuando casos en los que se requerirán de otros métodos adicionales para confirmar un diagnóstico.

Según Mosquera (2000), el análisis vibracional permite la identificación preventiva de las fallas sin necesidad de detener las maquinas o equipos, además hace posible realizar seguimiento continuo del problema o falla hasta su punto crítico, también permite efectuar las reparaciones pertinentes proporcionando tiempo de organización, reduce el tiempo de reparación debido a que ya se tiene identificadas anomalías existentes.

#### **2.4.4 Efecto raman**

Está representado por el cambio de frecuencia de la luz, y se debe según Albella, Cintas, Miranda, & Serratos (1993), a la interacción del material con los fotones de la luz incidente originando vibraciones moleculares o eliminando las presentes. La luz de una determinada frecuencia solo es absorbida cuando existe una correspondencia entre esta y la frecuencia de vibración interna del material. Este efecto es empleado para estudiar los materiales e incluso identificarlos, dado a que dependiendo de su configuración interna o estructura atómica o molecular este absorberá luz de una determinada característica.

La espectroscopia Raman, es un ensayo que facilita el estudio de los materiales en cuanto a aspectos como grado de cristalinidad, la tensión mecánica, y la temperatura, al mismo tiempo permite caracterizar la estructura del material. De manera específica en los metales se usa en la caracterización de recubrimientos y depósitos sobre la superficie metálica de corrosión (Vázquez & De Damborenea, 2000).

Actualmente se han dado avances en la automatización y desarrollo de tecnología de análisis de materiales fundamentado en el efecto Raman. La gran variedad de materiales, no solo de forma natural, sino los provenientes de aleaciones como el acero, en el cual existen más de 100.000 variantes (según su composición química y propiedades mecánicas), amerita de estudios más detallados y precisos, por los que trabajos como los de Contreras, Meneses, Torres, Robles, & Barbosa (2012), quienes desarrollaron un método capaz de identificar y clasificar aceros a través de la determinación de su composición química son muy valederos y se basan en un análisis espectroscópico atómico aplicando la técnica LIBS (Laser Induced Breakdown Spectroscopy) y análisis multivariado de los espectros de emisión.

## **CAPÍTULO III**

### **3 METODOLOGÍA**

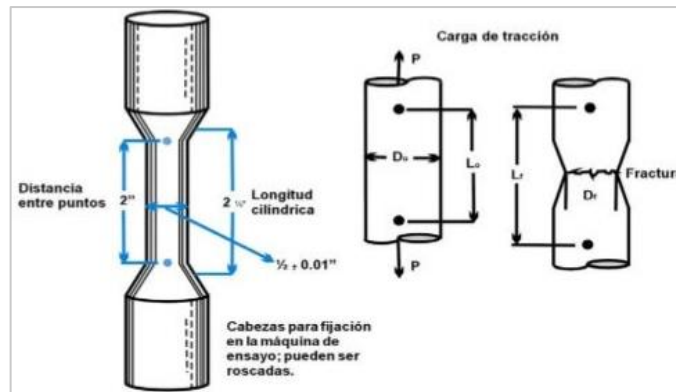
El desarrollo de este trabajo de titulación tiene un carácter cuantitativo y aplicativo a la vez, todos los datos obtenidos mediante las mediciones realizadas son comparables y procesables mediante tablas de tabulación para cada material que se va a utilizar.

Este trabajo consta de tres fases, las cuales están dispuestas de tal manera que son consecutivas una de la anterior. La primera fase contempla la elaboración de la máquina, donde se realizan las pruebas; la segunda etapa del proyecto se lleva a cabo mediante las mediciones de tiempos, carga aplicada, y de temperaturas de los distintos materiales a utilizar; finalmente, las tablas de tabulación y contraste de datos se realizan para tener un respaldo de las distintas pruebas.

#### **3.1 Norma ISO 1143:2010 metallic material- rotating bar bending fatigue testing.**

Esta norma es la que detalla todo el proceso de trabajo en lo que concierne a pruebas de fatiga por flexión de barra giratoria. El proceso radica en la elaboración de probetas exactamente idénticas, pero de materiales distintos, cada una de dichas probetas va a girar dentro de la máquina y en el extremo de la mordaza, mediante la palanca de fuerza, se aplica una carga de manera que la probeta es sometida a un momento flector, no así el elemento con el que se aplica la carga.

Para la forma y dimensión de la probeta, por la facilidad en la toma de termogramas se selecciona las probetas tipo reloj de arena; además por la naturaleza de la máquina, de ser de carga de un solo punto, la norma establece que sean de esta manera.



**Figura 1-3:** Probeta tipo reloj para el ensayo de fatiga.

El tipo de probeta muestra que se cumple una de las recomendaciones presentes en la norma, la misma que dice: “es deseable una relación de al menos 3:1 entre las áreas de la sección transversal de la porción de prueba y las regiones de agarre de la muestra”. (ISO 1143:2010(En), *Metallic Materials — Rotating Bar Bending Fatigue Testing*, n.d.)

Al revisar las probetas analizadas al momento de aplicar la carga y someterlas a esfuerzo, la temperatura varía, además, el presente proyecto busca complementar el ensayo de fatiga con el análisis termográfico y vibracional de los materiales, por lo que es prudente evitar una variación de temperatura alejada a la realidad; motivo por el cual la probeta presenta una reducción significativa en la mitad de su estructura.

Todas estas aseveraciones se basan en estudios previos en los que se demuestra que la combinación de alta tensión y gran velocidad ocasiona calentamiento excesivo en la muestra, este problema encuentra su solución al reducir el volumen de la probeta. (ISO 1143:2010(En), *Metallic Materials — Rotating Bar Bending Fatigue Testing*, n.d.).

Las probetas que se emplean son cilíndricas, en este caso la norma dice: “en probetas cilíndricas sujetas a un punto de carga, la sección de ensayo paralela debe ser paralela dentro de 0.025mm. Para probetas tipo reloj de arena, la sección formada por el radio continuo debe tener un radio no menor a  $5re$ ”. (ISO 1143:2010(En), *Metallic Materials — Rotating Bar Bending Fatigue Testing*, n.d.).

**Tabla 1-3:** Simbología y designación

Símbolo	Designación	Unidad
<b>re</b>	Diámetro del extremo agarrado de la muestra	mm
<b>norteF</b>	Falla	ciclo
<b>r</b>	Radio en los extremos de la sección de prueba que comienza la transición del diámetro de prueba	mm
<b>n</b>	Revoluciones por minuto	rpm

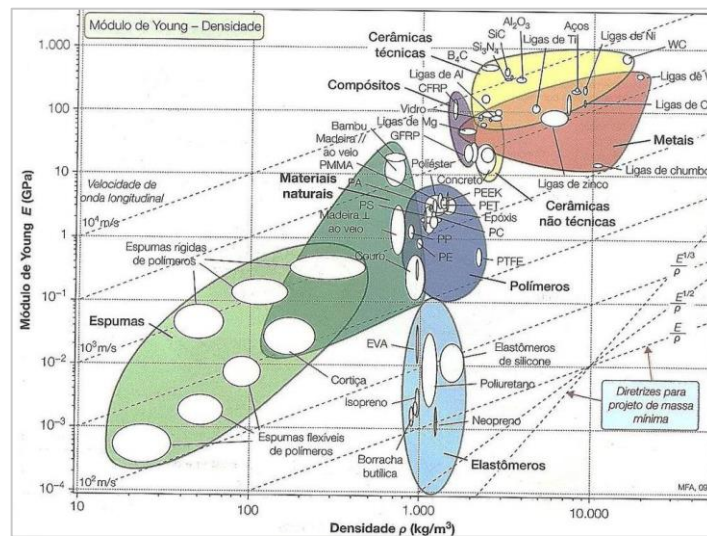
**Realizado por:** Estupiñan, A.; Benítez, C. 2020

**Fuente:** ((ISO 1143:2010(En), *Metallic Materials — Rotating Bar Bending Fatigue Testing*, n.d.).

### 3.2 Selección de materiales.

Es conocido, de forma más genérica, como mapa de propiedades de materiales, o diagramas de selección de materiales, estos son gráficas o cartas que relacionan propiedades de los materiales como la densidad, la resistencia mecánica, el módulo de elasticidad, la tenacidad, la conductividad térmica, costes entre otros. En estos diagramas se aprecia de manera general que las propiedades de diferentes materiales varía en amplios intervalos, formando grupos que se ubican en áreas cerradas o regiones dentro del diagrama (González, 2004).

Newell (2016), indica que los diagramas de Ashby no proporcionan datos específicos de la razón por la que un material supera a otro en un área específica del mapa, da una guía de como seleccionar un material entre un rango para una determinada categoría, más si destaca su utilidad, pero resaltando que en todo momento debe prevalecer el juicio del especialista en materiales.



**Figura 2-3:** Ejemplo de diagrama de Ashby.

Fuente: Prieto (2015)

Para el uso del diagrama de Ashby, se tiene en cuenta que un mismo material puede presentar variaciones en sus propiedades en amplios intervalos según el estado en que se encuentren, en el caso de la Figura N°10 se observa que el material como puede presentar densidades entre 700 y 1500 kg/m<sup>3</sup> determinada por la región azul, mientras que metales pueden presentar valores entre 1500 y 20000 kg/m<sup>3</sup> identificada por la región naranja.

De esta manera se puede seleccionar un determinado material, con base a una variable conocida (ejemplo densidad) y una variable requerida, ubicando un diagrama que considere la combinación de propiedades consideradas en la selección (ejemplo Densidad Vs Modulo de Young) se entraría en un campo de familia de materiales, por lo que posteriormente se puede preseleccionar un



determinado material o grupo para luego ir descartando según otros criterios como costos y durabilidad (Álvaro & Mesa, 2004).

### 3.3 Diseño y construcción de la máquina

#### 3.3.1 Selección y elaboración de elementos de la máquina.

En esta sección se proporciona la guía de selección de los componentes mecánicos, eléctricos y sistema de carga electrónica aplicados en la máquina de flexión rotativa.

Ciertas partes del prototipo son seleccionadas aplicando la estructura de la norma ISO (Internacional Organization for standardization 1143: Metallic material- Rotating bar bending fatigue testing.)

#### 3.3.2 Selección del motor

En base a la norma ISO 1143, la cual indica que para realizar ensayos de fatiga en ejes la característica del motor debe cumplir con una frecuencia entre 15 y 200 Hz o 900 y 12000 rpm. Se selecciona el motor trifásico de marca WEG como se muestra en la figura 11 con características relevantes, proporciona una potencia de 1 Hp, una velocidad de 3600rpm, y una frecuencia de 60 Hz, cumpliendo con los lineamientos necesarios para la implementación del prototipo.



**Figura 3-3:** Placa característica del motor

**Fuente:** Estupiñan, A.; Benítez, C. 2021

#### 3.3.3 Selección del eje del motor

Con las características operacionales del motor mostradas en la figura 11, se aplica las variables de potencia y frecuencia en la fórmula (1) para determinar el par torsor.

$$P = \frac{T}{2\pi f}$$

$$T = P 2 \pi f \quad (1)$$

Donde:

T = Torsor

P= potencia del motor (watt)

f= frecuencia (hz)

$$T = (746)(2\pi)(60)$$

$$T = 281235$$

Mediante el esfuerzo cortante del acero, mostrada en la formula (2), se encuentra la variable del diámetro y con las anteriores variables aplicadas se determina el valor del diámetro del eje.

$$\sigma = 200$$

$$\sigma = \frac{16 T}{\pi d^3} \quad (2)$$

Donde:

$\sigma$  = esfuerzo de flexión (GPa)

d= diámetro del eje (mm)

$$d^3 = \frac{16 T}{\pi \sigma}$$

$$d = \sqrt[3]{\frac{16 (281235)}{\pi(200)}}$$

$$d = 19.27mm$$

Según los cálculos de la selección del diámetro de eje, se observa que es una medida no comercial por lo que se selecciona un diámetro en pulgadas según catalogo comercial.

$$d = 25.4mm$$

El reajuste en la selección del eje cumple con los valores requeridos.

### 3.3.4 Selección de chumaceras según catalogo SKF

En base a los siguientes aspectos de la carga aplicada, velocidad de rotación, horas de trabajo y el tipo de movimiento, proporciona la guía de las chumaceras según la figura geométrica de los medios rodantes.

### 3.3.5 Rodamientos

En esta sección se requiere rodamientos de bola que proporcionen un movimiento axial y radial. En la tabla del Anexo 1 se usa el diámetro de catálogo comercial para seleccionar un tipo de rodamiento que cumpla con características de designación.

Se identifica en el Anexo 1, el diámetro del eje calculado y según el catálogo se indica un rodamiento "YARAG 205". El catálogo SKF denomina a este tipo de rodamientos como rodamientos de inserción o rodamiento Y, debido a que su figura geométrica, además en el interior son de bola sellados, poseen la perforación para prisioneros que brinda mayor sujeción entre eje y rodamiento para evitar que se produzca la fricción entre estos dos componentes mecánicos. (Skf, 2019).

Para obtener la vida nominal básica se reemplaza en la fórmula 3 las revoluciones por minuto, el valor constante de C y la carga.

$$L_{10h} = \left( \frac{10^6}{60n} \right) \left( \frac{C}{P} \right)^3 \quad (3)$$

Donde:

n= revoluciones por minuto (rpm)

C= dimensión en tabla

P= carga

$$L_{10h} = \left( \frac{10^6}{60 * 3600} \right) \left( \frac{15}{0.24517} \right)^3$$

$$L_{10h} = 1.060.273.83$$

Es similar a 1.000.000 horas requeridas para la vida de trabajo de los rodamientos.

Según el catálogo SKF se analiza que el rodamiento **YARAG 205** y chumacera 205 son los indicados para el prototipo, debido a la disponibilidad de rodamientos en el mercado según catálogos, se utiliza rodamientos en la marca NTN UC205-100 como se muestra en la figura 13 y su respectiva chumacera que en características son idénticas.

### 3.3.6 Selección de acople

En la transmisión de movimiento entre el eje y motor existe un elemento fundamental que es el acople mecánico, en base a la potencia del motor y la variable de la velocidad angular se remplaza en la fórmula 4 para conocer el par nominal que transfiere el motor al eje.

$$T = \frac{746(P)}{W} \quad (4)$$

Donde:

T= Par nominal (N.m)

P= Potencia del motor (1HP)

W= Velocidad angular = 376.99 rad/seg

$$T = \frac{746(1)}{376.99}$$

$$T = 1.97N.m$$

#### 3.3.6.1 Selección del acople según catalogo LoveJoy

Según el ANEXO 2, que indica el catálogo, los acoples LoveJoy tipo L se compone de dos mangones de acero y un elemento elástico de forma estrellada de material más blando. Considerando el diámetro del eje de 2.54 cm, y el par nominal calculado, se selecciona: un elemento elástico tipo estrella E-A, cuya composición es de caucho nitrilico (NBR), y un acople L.090 que brinda un par nominal de hasta 16.3 N.m con diámetro de 10 mm a 28mm. Gracias al cálculo del par nominal, la aplicación de carga sobre el sistema y la disponibilidad de componentes en el mercado, se selecciona un acople LW MS075 1/4 de pulgada como se muestra en la figura 12 que cumple con los parámetros requeridos.



**Figura 4-3:** Acople utilizado

Fuente: Estupiñan, A.; Benítez, C. 2021

### 3.3.7 Selección del sistema de aplicación de carga

El sistema de aplicación de carga es la más importante, como se muestra en la figura 13 está compuesta por vigas guías, base desmontable con rodamientos de aplicación de carga y tornillo de aplicación de carga.



**Figura 5-3:** Sistema de aplicación de carga

Fuente: Estupiñan, A.; Benítez, C. 2021

#### 3.3.7.1 Vigas guías

La figura 14 muestra una varilla AISI 4140 de 2.54 pulgadas, la misma que después de un proceso de maquinado a los extremos, posee una rosca de 11 hilos por pulgada que son acoplados en la base de acero y en la parte superior del tornillo de presión.



**Figura 6-3:** Vigas de soporte para sistema de aplicación de carga

**Fuente:** Estupiñan, A.; Benítez, C. 2021

### 3.3.7.2 Base desmontable con rodamientos de aplicación de carga

En este apartado se maquino una parte rígida de acero muy robusto como se muestra en la figura 15 que es fundamental del prototipo ya que está compuesta de 2 rodamientos y un eje que se acoplara a un mandril.



**Figura 7-3:** Base desmontable para aplicación de carga

**Fuente:** Estupiñan, A.; Benítez, C. 2021

### 3.3.7.3 Rodamientos De La Base Del Sistema de Aplicación de Carga

Según el catálogo SKF, en esta sección se requiere un movimiento radial y axial. Por lo tanto, se considera seleccionar rodamientos de bolas.

Según el catálogo y el eje que se va a emplear, se indica un rodamiento 61805 llamado rodamientos rígidos de bolas, ya que en su interior la figura geométrica son pistas de dimensiones idénticas a la dimensión de las bolas y en su mayoría son auto lubricados, además son de uso común y fáciles de encontrar en el mercado.

Para obtener la vida nominal básica se reemplaza en la fórmula 5 las revoluciones por minuto, el valor constante de C y la carga.

$$L_{10h} = \left( \frac{10^6}{60 * 3600} \right) \left( \frac{4.36}{0.24517} \right)^3 \quad (5)$$

$$L_{10h} = 1.060.273.83$$

Según el catálogo SKF se obtiene que el rodamiento 61805 es el indicado para el prototipo, este rodamiento tiene una disponibilidad muy amplia en el mercado.

#### 3.3.7.4 Tornillo de aplicación de carga.

Debido a la variación de la carga, que debe ser lo más precisa, una rosca de 19 hilos por pulgada es lo ideal para este proceso, la rosca es maquinada en una varilla AISI 4140 de ¾ de pulgada como se muestra en la figura 16 ya que este tipo de rosca son usados en equipos que necesitan precisión como los instrumentos de medida y sistemas métricos.

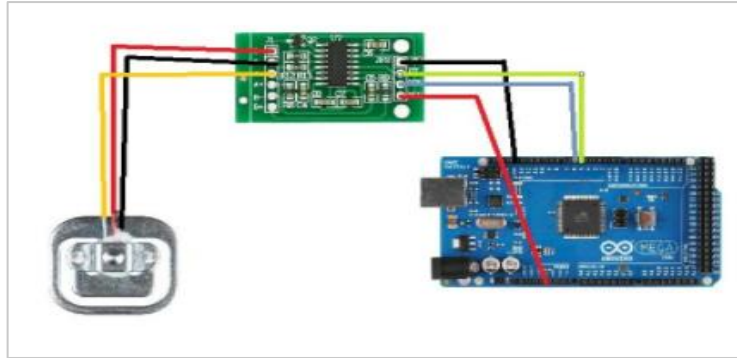


**Figura 8-3:** Tornillo de aplicación de carga

Fuente: Estupiñán, A.; Benítez, C. 2021

#### 3.3.7.5 Sistema de aplicación de carga

El módulo de carga permite interactuar de una forma rápida entre el integrado HX711 y la celda de carga, funciona con un voltaje de 5 voltios con una funcionalidad a Arduino para su programación, gracias a todo esto permite lecturas de carga eficaces. Debido a sus características es un sistema que se utiliza en aplicaciones industriales, sistemas de detección de presencia de carga y basculas.



**Figura 9-3:** Esquema de conexión de sensor de carga

Fuente: Estupiñán, A.; Benítez, C. 2021

### 3.3.7.6 Conexión del módulo para celda de carga HX711

La interpretación del módulo es bastante sencilla, existe la guía en el esquema para su conexión y para la visualización de datos se coloca un display LCD 16\*2 en color azul para Arduino.



**Figura 10-3:** Módulo de celda HX711

Fuente: Estupiñán, A.; Benítez, C. 2021

### 3.3.8 Mandril de autoapretado

En la figura 17 se indica mandriles de autoapretado que son de estructura metálica muy resistente y de fácil apriete de forma manual. En la máquina de flexión que se usa en este proyecto la probeta está sujeta por medio de un mandril de autoapretado de 13mm (B16), con 3 muelas que ejercen mayor presión sobre la probeta a ensayar.



**Figura 11-3:** Mandril auto apretado

Fuente: Estupiñán, A.; Benítez, C. 2021



### 3.4 Análisis termográfico

El análisis termográfico va de la mano entre una correcta toma de termogramas, tecnología utilizada, y el tipo de análisis que pueda brindar la persona que realiza el trabajo. En este caso se han consolidado las tres características para la medición de termografía.

#### 3.4.1 Calibración del equipo

Mediante el catálogo del fabricante y conocimientos adquiridos, se considera calibrar al equipo como se indica en la tabla 6 con los valores detallados a continuación:

**Tabla 2-3:** Características de la cámara

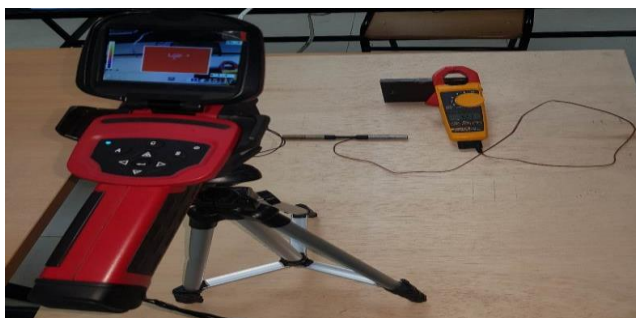
<b>Datos de cámara</b>	
Temperatura ambiente	20 °C
Humedad	50%
Emisividad	0,95
Resolución	384*288
Modelo	SATIR HOTFIND S
Distancia	1 m

Realizado por: Estupiñán, A.; Benítez, C. 2021

#### 3.4.2 Comprobación del censado de la cámara termográfica

Al realizar ensayos de termografía se debe considerar aspectos que puedan afectar en la toma de un termograma. Debido a las formas de transferencia de calor, conducción, convección y radiación, a más de la emisividad de un material, el análisis se puede ver afectado de una manera directa.

Con un calentador eléctrico la probeta, se somete a un proceso de incremento de temperatura por inducción, elevando su temperatura a unos 90 °C aproximadamente. Con la ayuda de un multímetro con termopar tipo k marca FLUKE 324 y una cámara termográfica marca SATIR HOTFIND S la temperatura es censada y se realiza un contraste de temperaturas entre los dos equipos. Si los valores son semejantes, la conclusión que se obtiene es que la cámara termográfica esta calibrada correctamente.



**Figura 12-3:** Equipo usado para la calibración

**Fuente:** Estupiñán, A.; Benítez, C. 2021

### 3.4.3 *Software FLUKE IR SmartView*

La selección del software radica en el tipo de cámara que se emplea para realizar las inspecciones termográficas pertinentes al proyecto desarrollado. El software aplicado es el óptimo y propio de la cámara utilizada, de esta manera se visualiza, optimiza, y analiza las imágenes infrarrojas de las distintas probetas usadas.

En relación al software, se considera varias características, para realizar termografía de manera óptima:

- Análisis de imágenes térmicas y comparación con múltiples ventanas.
- Visualización de video, imágenes térmicas y digitales.
- Descripción de Imágenes Térmicas
- Análisis Isoterma para las imágenes o áreas.
- Añadir herramientas de análisis termográficos (punto, línea, círculo, rectángulo, polígono, línea Delta T).
- Imagen térmica o fusión de áreas.
- Substracción de imágenes térmicas.
- Rotación de imágenes térmicas.
- Exportación analítica de datos.
- Exportar informes para enviarlos fácilmente por correo electrónico o imprimirlos.
- Distribución energética en línea o área seleccionada.
- Generación de distribución energética en barras porcentuales, de todo el termograma, áreas de análisis, líneas, polilíneas.

### 3.5 Análisis Vibracional

Los espectros vibracionales son medidos mediante un software específico y propio del equipo utilizado, el análisis vibracional dentro del presente proyecto es una ayuda para saber la afectación directa de la carga dentro del eje.

#### 3.5.1 MAINTraq

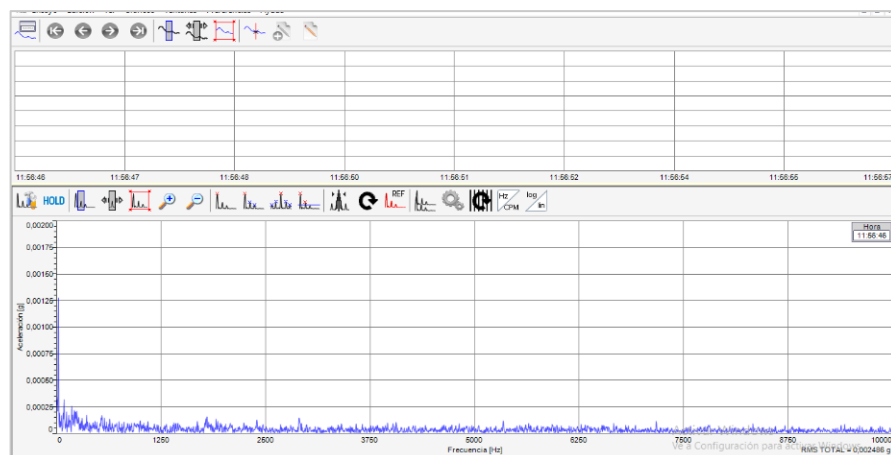
El equipo vibracional incluye el software conocido como MAINTraq Analyzer, dicho programa es una herramienta digital que permite analizar completamente las vibraciones, ondas, y las señales dinámicas que se generan durante el proceso de pruebas en la máquina, gracias a este software se pueden alcanzar resultados bien definidos en lo que respecta a diagnóstico de fallas.

MAINTraq Analyzer se complementa en un software aliado conocido como MAINTraq Viewer, este último logra realizar las mediciones con detalles en tiempo real mientras se sigue grabando toda la formación de ondas de la prueba realizada. (*SOFTWARE PARA ANÁLISIS DE VIBRACIONES*, n.d.)

#### 3.5.2 Características

Dentro de las características del software utilizado se detalla:

- Utiliza un medidor de dos canales (ADQ), posee un monitor de elementos y maquinas Vibraspec, además; un analizador de vibraciones portátil Vibracheck.
- Graba los espectros vibracionales durante horas, con la principal característica que no se pierde la información.
- Es un software y un equipo ideal para cualquier tipo de maquinaria.
- Los valores, tendencias, ondas, espectros, orbitas y vectores se detallan en tiempo real.



**Figura 13-3:** Software de análisis vibracional (MAINTraq Analyzer 3.1)

**Fuente:** Estupiñán, A.; Benítez, C. 2021

### 3.6 Intervalo P-F

Dentro del mantenimiento se necesita un diagnóstico especializado para poder realizar un plan de mantenimiento, hay que tener en cuenta que dos equipos iguales no necesariamente tienen los mismos trabajos de mantenimiento y mucho menos su frecuencia.

El intervalo P-F (falla potencial-falla funcional); no es nada más, que un intervalo dentro del rango de tiempo en el cual se detecta la falla potencial y se lo analiza hasta que dicha falla desenlaza en una falla funcional.

Para cada paso de mantenimiento que se va a realizar se debe localizar el intervalo P-F mas adecuado para poder diseñar la frecuencia de mantenimiento de un equipo; esto va a permitir realizar el trabajo de mantenimiento antes de caer en una falla funcional y así se evita paros por trabajos de mantenimiento.

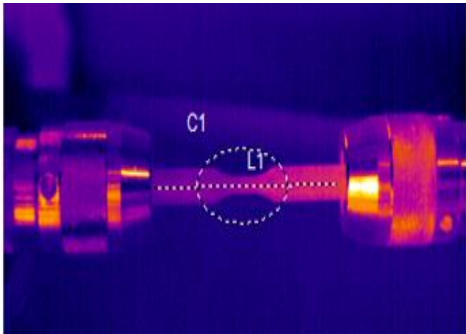
### 3.7 Pruebas y ensayos

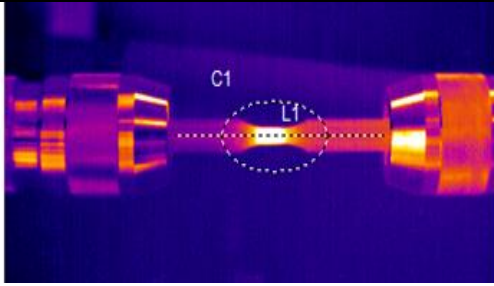
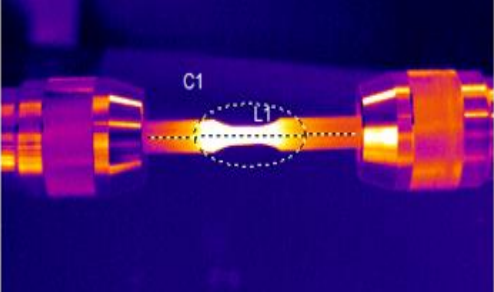
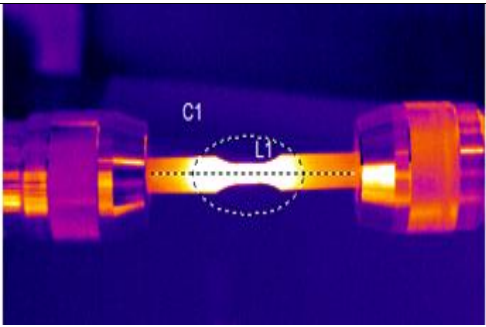
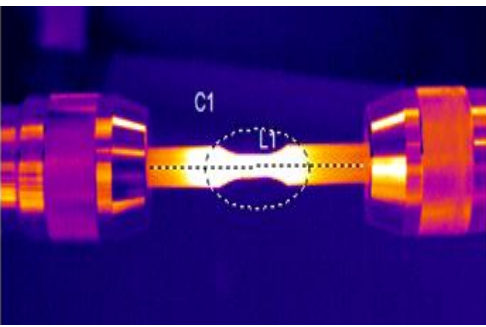
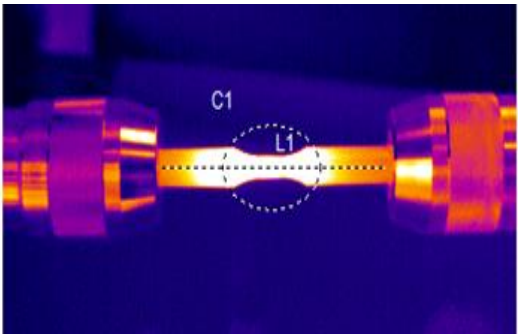
#### 3.7.1 Análisis termográfico

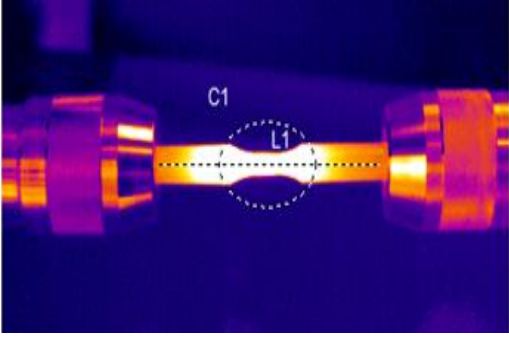
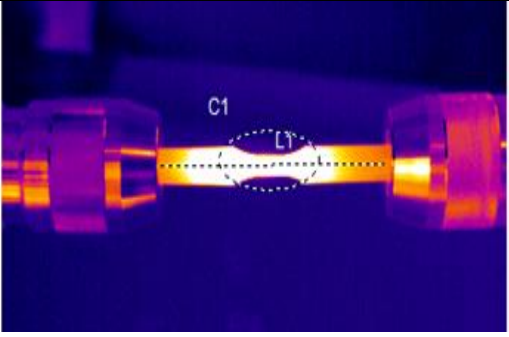
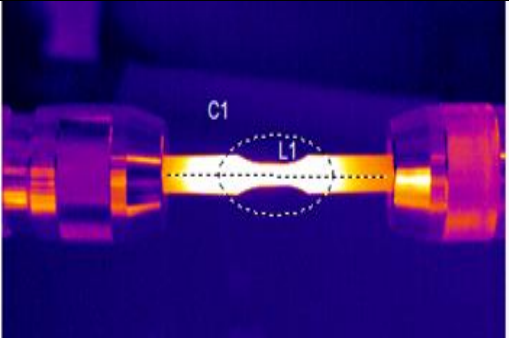
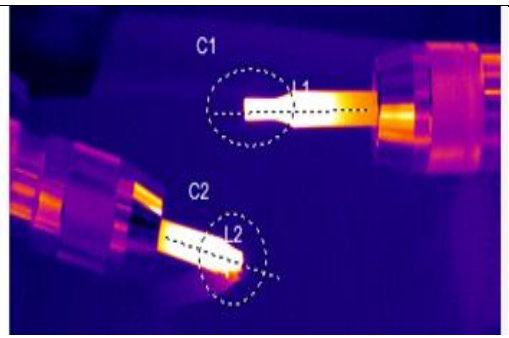
En la tabla 7, termograma 0, el equipo está trabajando en vacío, esto quiere decir que la probeta no está sometida a ningún tipo de esfuerzo. Se marca la probeta con un C1 para identificar la temperatura inicial de la probeta que corresponde a 25 °C que es la temperatura ambiente en ese momento.

A continuación, se indica el progreso del análisis en los diferentes termogramas aplicando la variación de carga y variación del tiempo:

**Tabla 3-3:** Pruebas y resultados (acero)

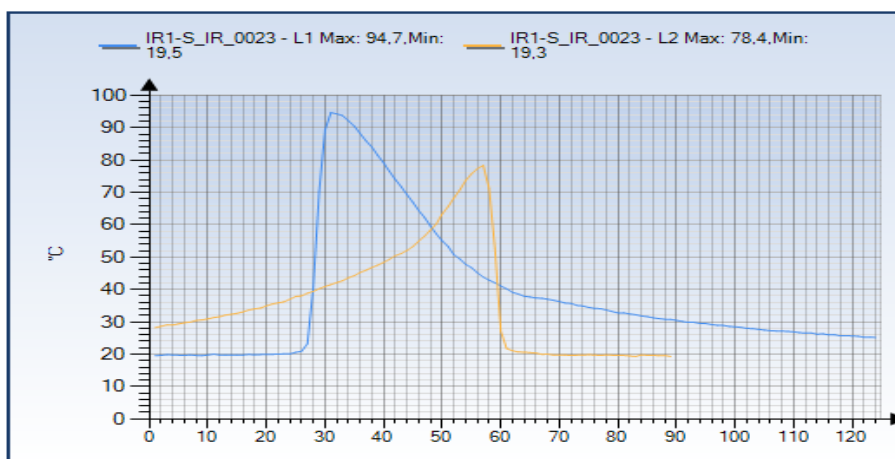
Numero	Termograma	Datos	
0		Carga	0 kg
		Tiempo	0 seg
		Temperatura	25
1		Carga	11 kg

		Tiempo	20 seg
		Temperatura	31,8
2		Carga	13
		Tiempo	40 seg
		Temperatura	42,3
3		Carga	15
		Tiempo	60 seg
		Temperatura	46,2
4		Carga	17
		Tiempo	80 seg
		Temperatura	53
5		Carga	19
		Tiempo	100 seg
		Temperatura	58,5
6		Carga	21

		Tiempo	120 seg
		Temperatura	65,1
7		Carga	23
		Tiempo	140 seg
		Temperatura	70,5
8		Carga	25
		Tiempo	140 seg
		Temperatura	75,4
9		Carga	27
		Tiempo	160 seg
		Temperatura	81,4

**Realizado por:** Estupiñán, A.; Benítez, C. 2021

Mediante dos líneas L1 y L2 y se encuentra el punto más alto de temperatura después de la fractura de la probeta como se indica en la gráfica 265. Debido a que las secciones de la probeta después de la fractura no son los mismos, la temperatura de L1 es la ideal para el análisis.

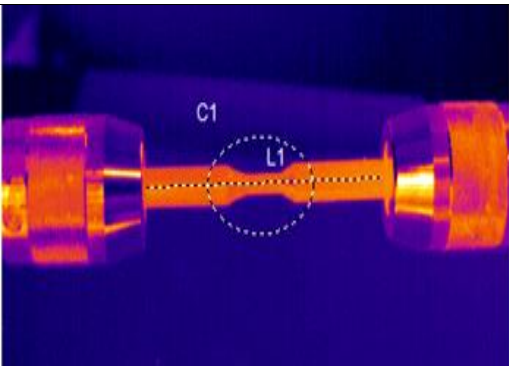
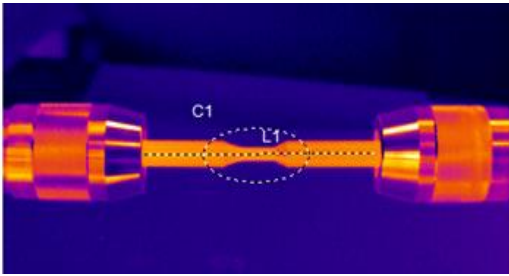


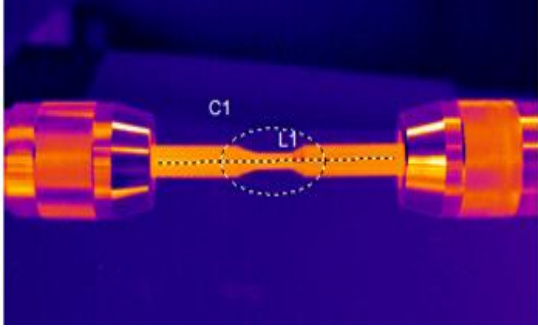
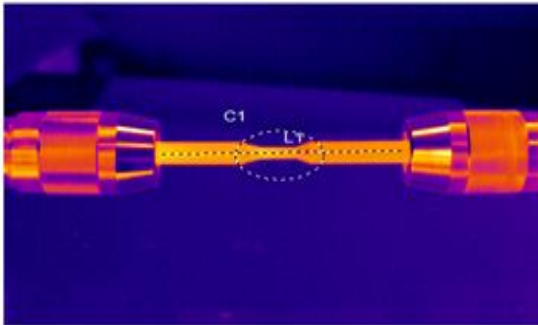
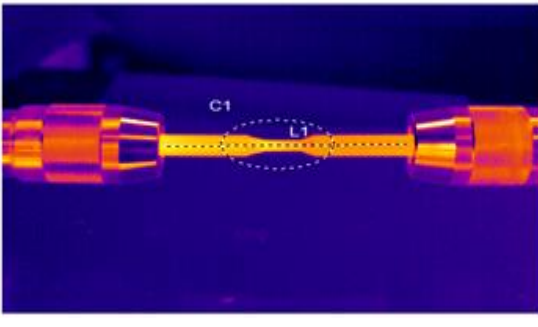
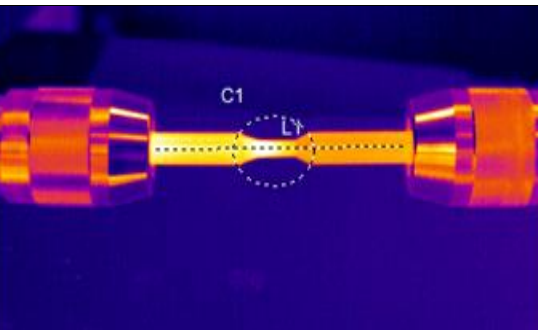
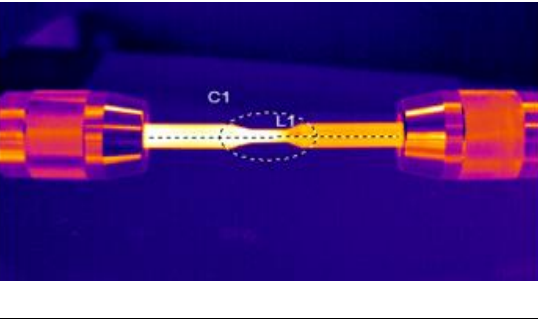
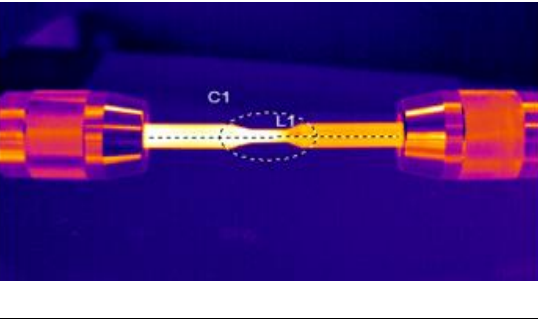
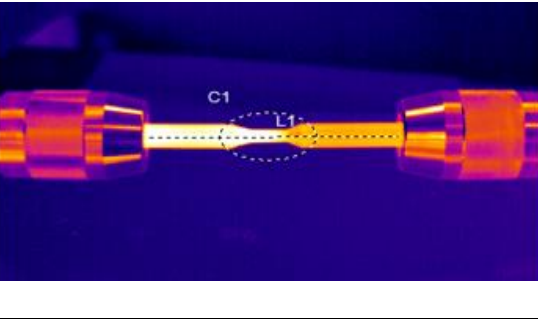
**Figura 14-3:** Software de análisis termográfico

Fuente: Estupiñán, A.; Benítez, C. 2021

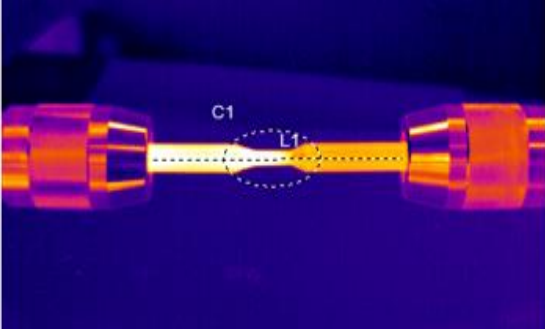
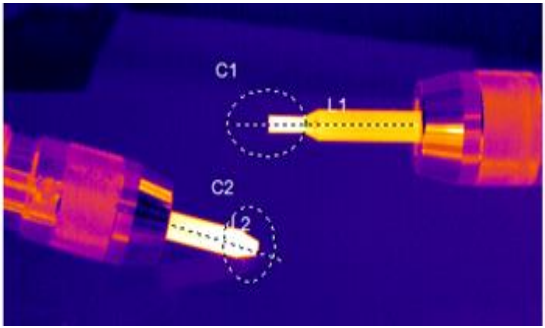
En el análisis de la probeta de acero AISI 1015 se observa el cambio de color en la probeta debido a la emisividad del material y su comportamiento sometido a diferentes variaciones de tiempo y carga como se muestra en la tabla 7. Además, los datos relevantes en este análisis se encuentran más definidos a una temperatura máxima de 94.7°C, la carga máxima de 27 kilogramos y un tiempo de 160 segundos justo al momento de su fractura.

**Tabla 4-3:** Pruebas y resultados (aluminio)

Termograma	Datos	
	Carga	0 kg
	Tiempo	0 seg
	Temperatura	25
	Carga	11 kg
	Tiempo	20 seg
	Temperatura	30,9
	Carga	13

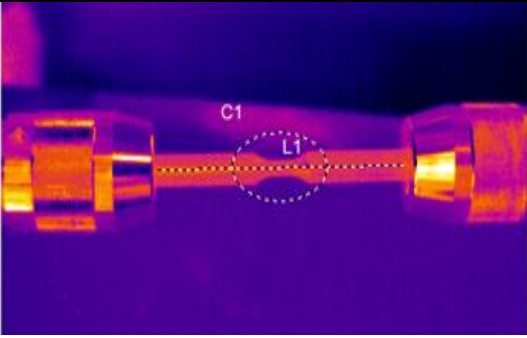
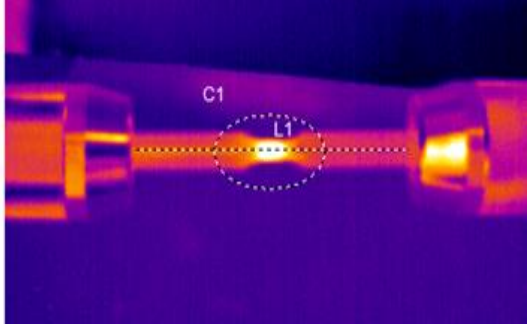
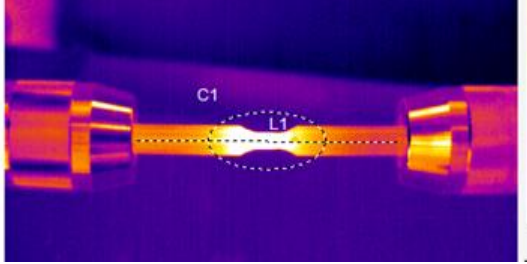
	Tiempo	40 seg
	Temperatura	31,8
	Carga	15
	Tiempo	60 seg
	Temperatura	32,2
	Carga	17
	Tiempo	80 seg
	Temperatura	32,5
	Carga	19
	Tiempo	100 seg
	Temperatura	32,6
	Carga	21
	Tiempo	120 seg
	Temperatura	65,1
	Carga	23

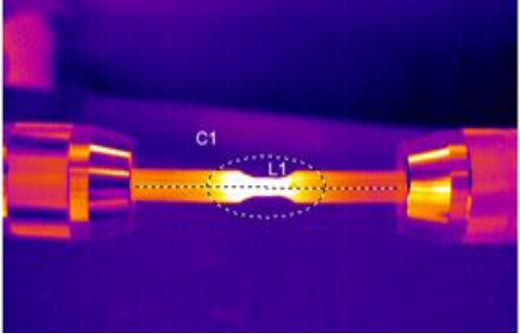
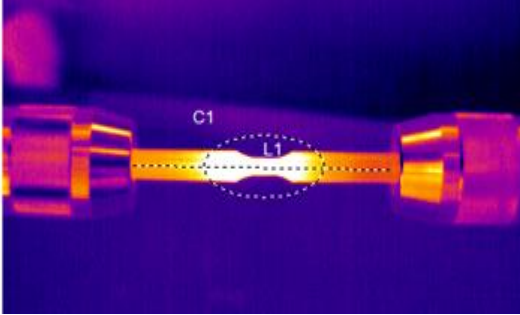
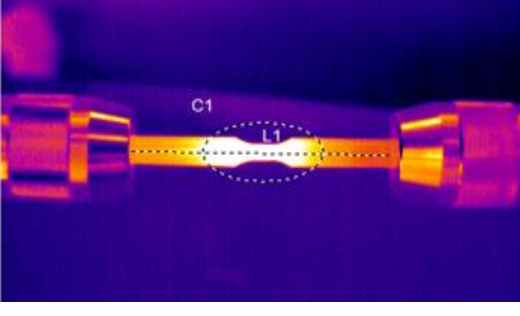
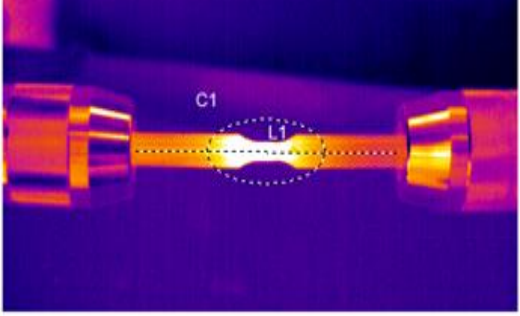
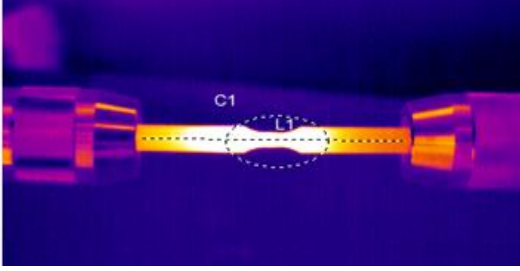


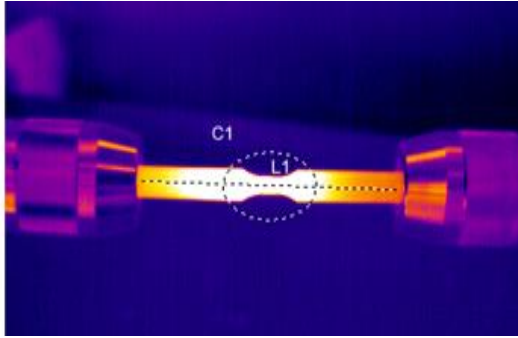
	Tiempo	140 seg
	Temperatura	33,3
	Carga	25
	Tiempo	160
	Temperatura	33,6

Realizado por: Estupiñán, A.; Benítez, C. 2021

**Tabla 5-3:** Pruebas y resultados (bronce)

Termograma	Datos	
	Carga	0 kg
	Tiempo	0 seg
	Temperatura	25
	Carga	11 kg
	Tiempo	20 seg
	Temperatura	31,8
	Carga	13 kg
	Tiempo	40 seg
	Temperatura	42,3

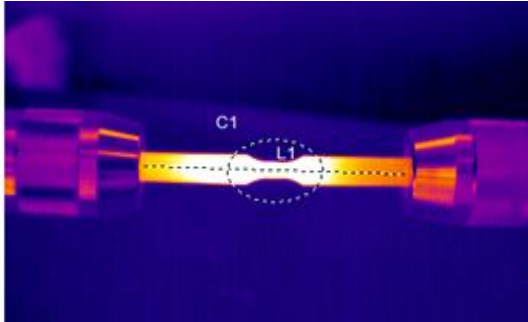
	Carga	15 kg
	Tiempo	60 seg
	Temperatura	46,2
	Carga	17 kg
	Tiempo	120 seg
	Temperatura	53
	Carga	19 kg
	Tiempo	140 seg
	Temperatura	58,5
	Carga	21 kg
	Tiempo	160 seg
	Temperatura	65,1
	Carga	23 kg
	Tiempo	220 seg
	Temperatura	70,5
	Carga	25 kg



Tiempo 240 seg  
Temperatura 75,4

---

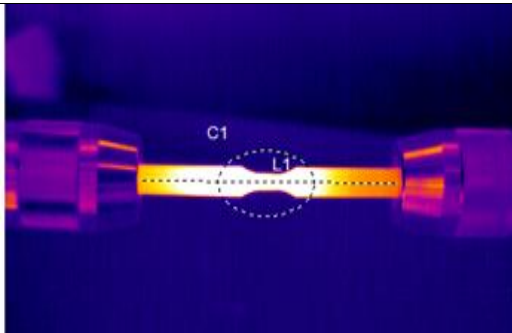
Carga 27 kg



Tiempo 260 seg  
Temperatura 81,4

---

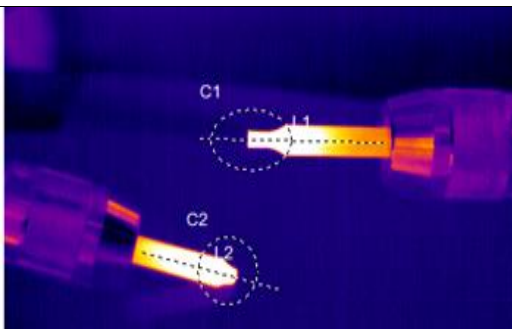
Carga 29 kg



Tiempo 320 seg  
Temperatura 81,4

---

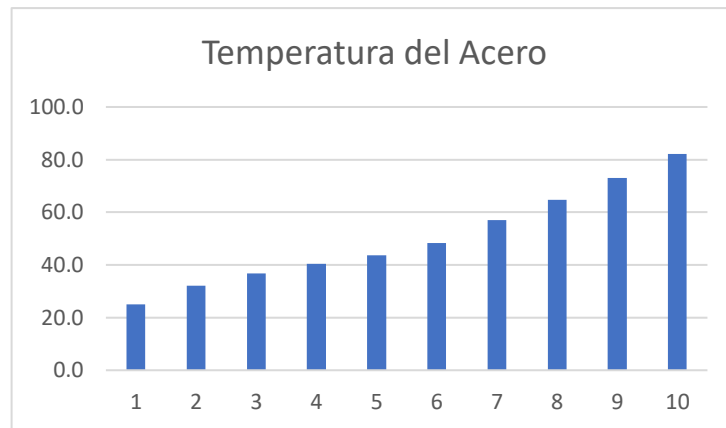
Carga 31 kg



Tiempo 340 seg  
Temperatura 81,4

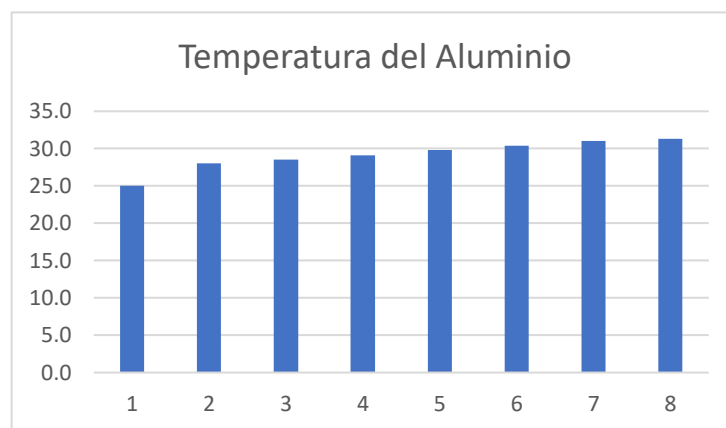
---

Realizado por: Estupiñán, A.; Benítez, C. 2020



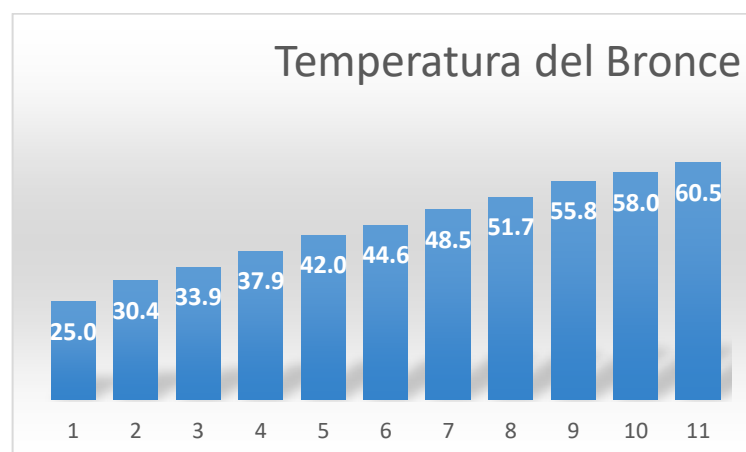
**Gráfico 1-3:** Temperatura del Acero

Realizado por: Estupiñán, A.; Benítez, C. 2021



**Gráfico 2-3:** Temperatura del aluminio

Realizado por: Estupiñán, A.; Benítez, C. 2021



**Gráfico 3-3:** Temperatura del bronce

Realizado por: Estupiñán, A.; Benítez, C. 2021

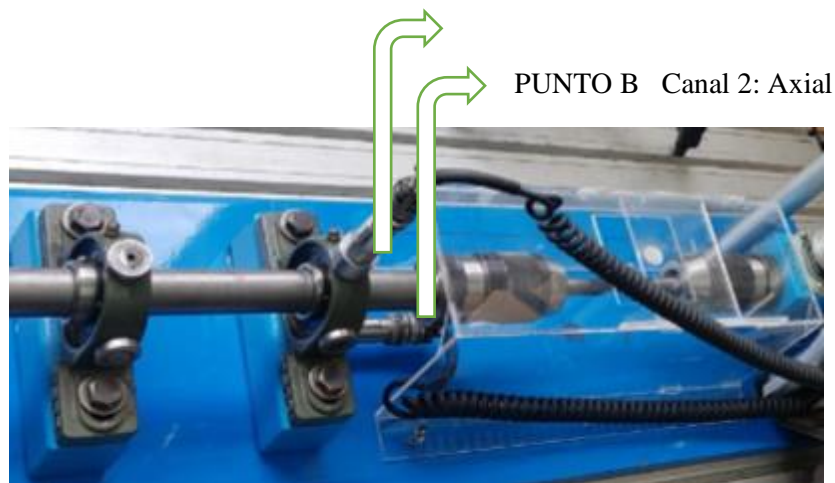
En base a las Gráficas 1, 2, 3, en las que se detalla las temperaturas promedio de los distintos materiales, se determina que la temperatura es mayor en el acero, mientras que, en el bronce, aun cuando la dureza es mayor, la temperatura no va a presentar mayor incremento. Por otro lado, en

el aluminio, se evidencia que la temperatura es casi constante por ser un material con contenido de carbono casi nulo.

### 3.7.2 *Análisis vibracional*

En este apartado el análisis vibracional es un método utilizado para el monitoreo y análisis del comportamiento de las diferentes probetas de bajo contenido de carbono sometidos a esfuerzos de fatiga.

Se colocan los 2 acelerómetros en los puntos A y B como se muestra en la Imagen 1, hay que asegurarse que se encuentren bien sujetos en sus puntos de apoyo. Debido al análisis que se va a realizar, se ubican los acelerómetros en la chumacera más cercana al mandril que sujeta a la probeta.



**Figura 15-3:** Máquina con el equipo de vibraciones

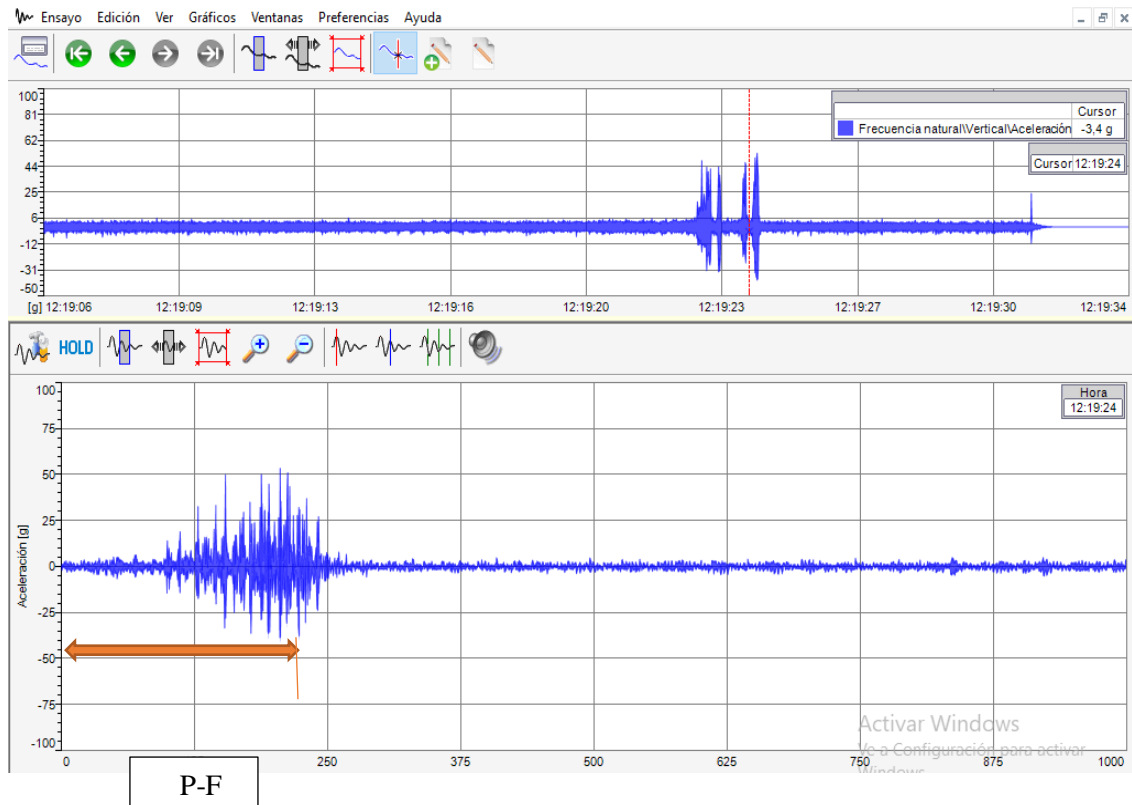
Fuente: Estupiñan, A.; Benítez, C. 2020

El análisis se realizará en las diferentes probetas que permitirá conocer espectros, formas de onda y RMS totales del proceso de fractura de la probeta.

### 3.7.3 *Acero 1110*

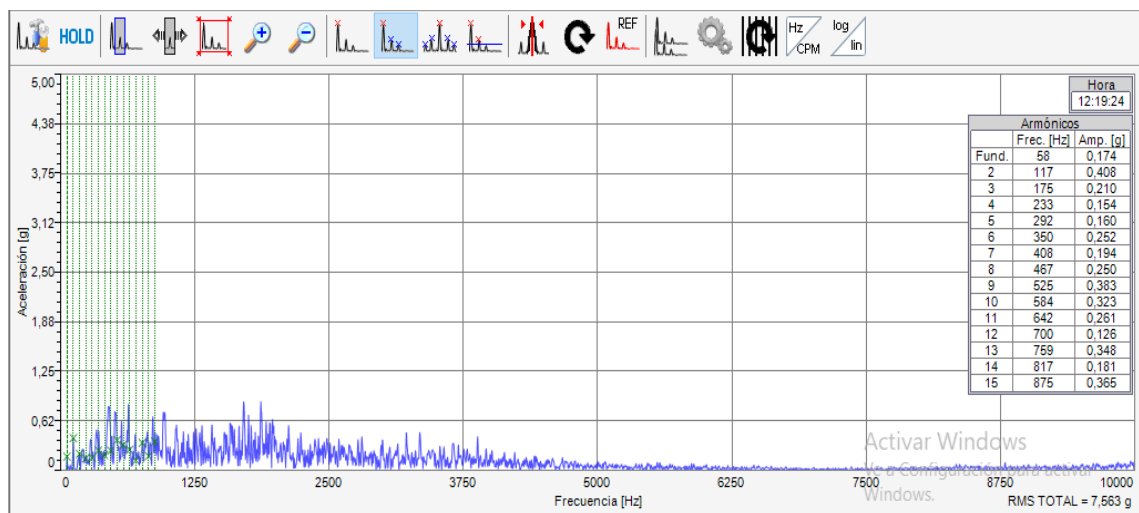
#### 3.7.3.1 *Variable de Aceleración*

En la figura 24 se observa un duplicado de la forma de onda, debido a que en el momento de fractura de la probeta presenta una superficie irregular en la parte fracturada, esta no cae en la mesa conjuntamente con el mandril. Debido a esta observación en el análisis se tomó en cuenta hasta la primera forma de onda como se indica en la figura.



**Figura 16-3:** MAINTraq Analyzer 3.1 (forma de onda-forma de frecuencia natural, vertical, aceleración)

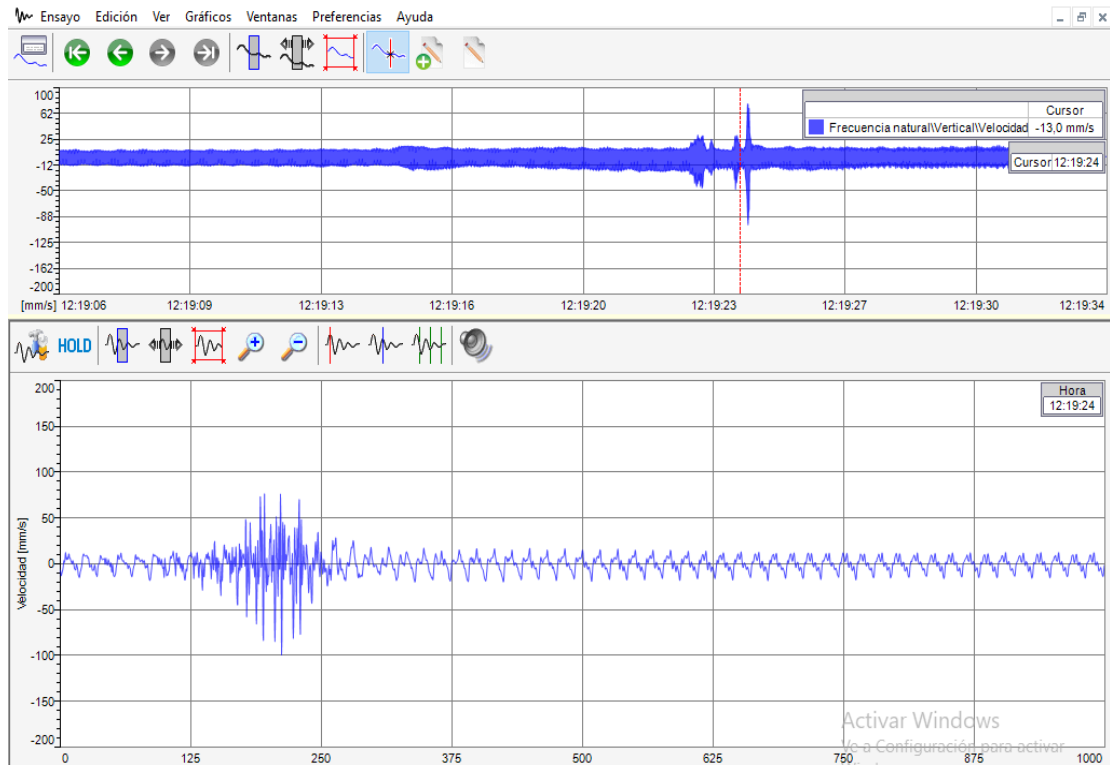
**Fuente:** Estupiñán, A.; Benítez, C. 2021



**Figura 17-3:** MAINTraq Analyzer 3.1 (espectro-frecuencia natural, vertical, aceleración)

**Fuente:** Estupiñán, A.; Benítez, C. 2021

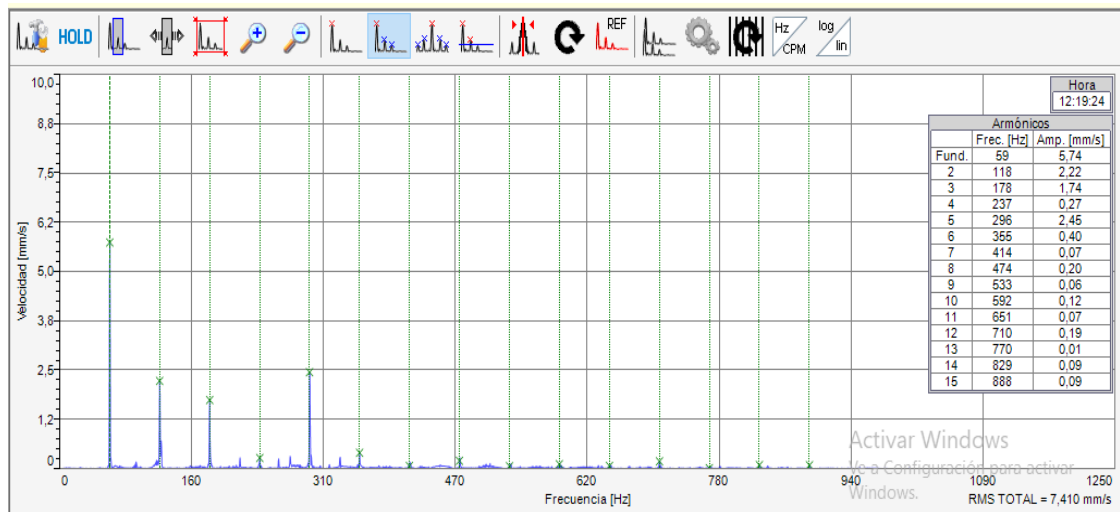
### 3.7.3.2 Variable de Velocidad



**Figura 18-3:** MAINTraq Analyzer 3.1 (forma de onda-frecuencia natural, vertical, aceleración)

Fuente: Estupiñán, A.; Benítez, C. 2021

En la figura se muestra la paleta de cursos de armónicos y se puede identificar que el armónico que prevalece en el momento de la fractura es el 1X. Esto indica un eje doblado.

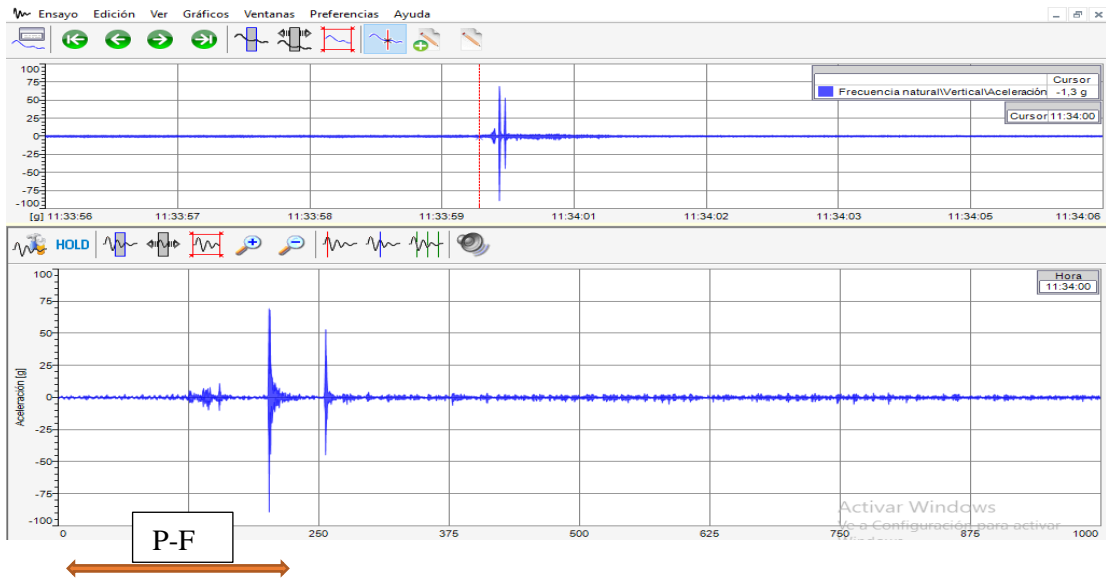


**Figura 19-3:** MAINTraq Analyzer 3.1 (espectro-frecuencia natural, vertical, aceleración)

Fuente: Estupiñán, A.; Benítez, C. 2021

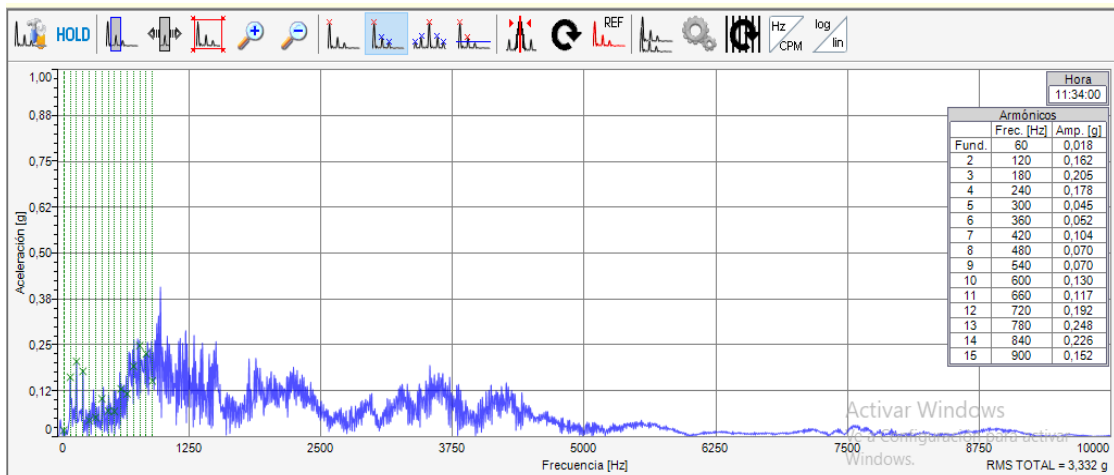
### 3.7.4 Bronce

#### 3.7.4.1 Variable de Aceleración



**Figura 20-3:** MAINTraq Analyzer 3.1 (forma de onda-forma de frecuencia natural, vertical, aceleración)

Fuente: Estupiñán, A.; Benítez, C. 2021

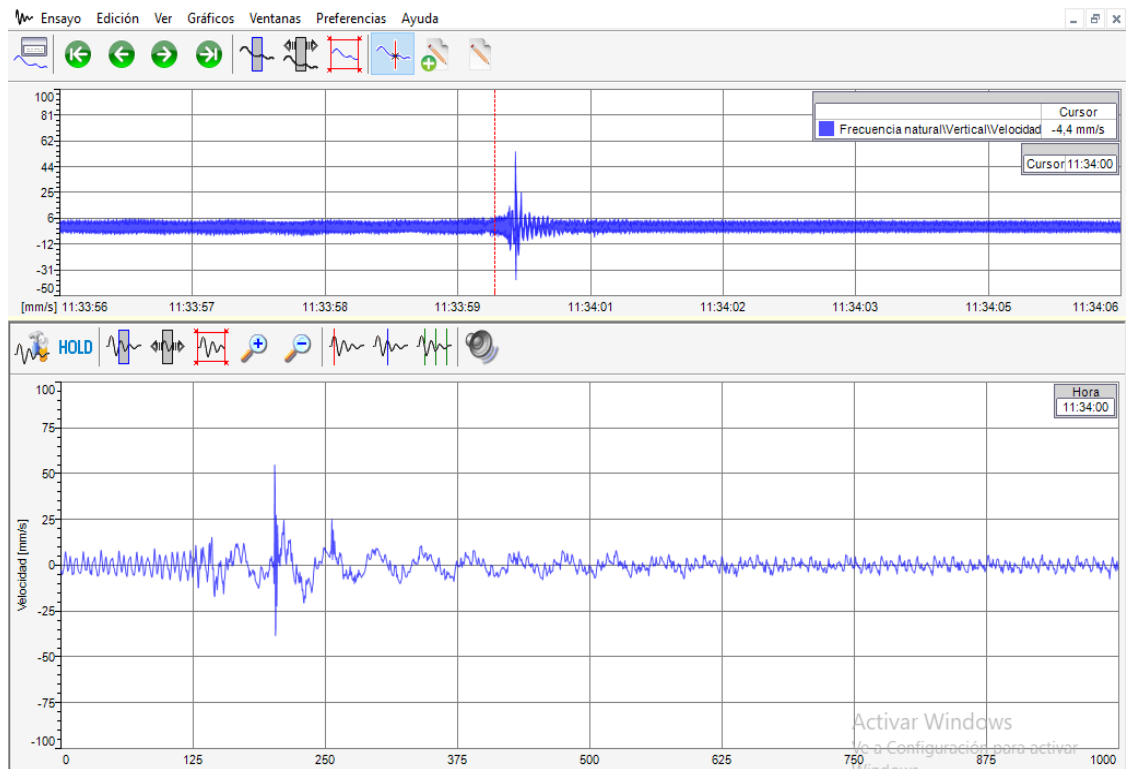


**Figura 21-3:** MAINTraq Analyzer 3.1 (espectro-frecuencia natural, vertical, aceleración)

Fuente: Estupiñán, A.; Benítez, C. 2021



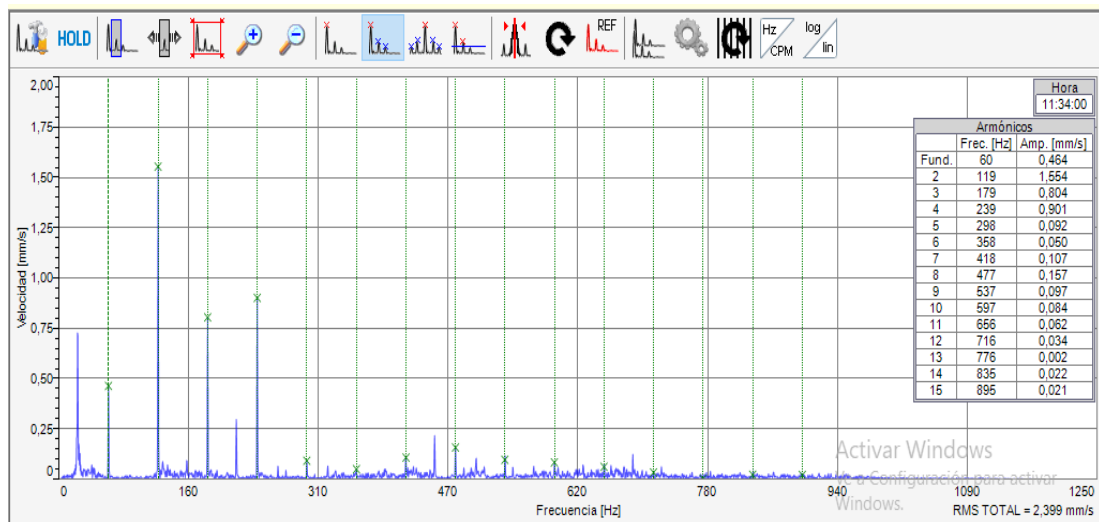
### 3.7.4.2 Variable de velocidad



**Figura 22-3:** MAINTraq Analyzer 3.1 (forma de onda-forma de frecuencia natural, vertical, aceleración)

**Fuente:** Estupiñán, A.; Benítez, C. 2021

En la figura se muestra la paleta de cursos de armónicos y además se identifica que el armónico que prevalece en el momento de la fractura es el 2X. Esto indica una soltura mecánica.

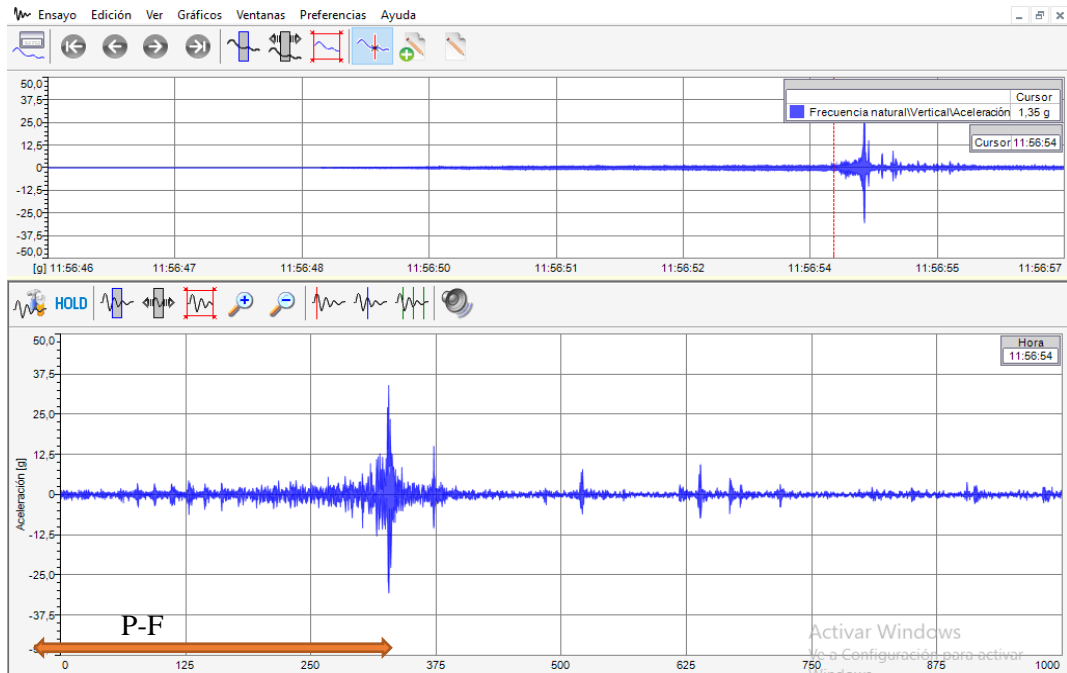


**Figura 23-3:** MAINTraq Analyzer 3.1 (Espectro-Frecuencia Natural, Vertical, Aceleración)

**Fuente:** Estupiñán, A.; Benítez, C. 2021

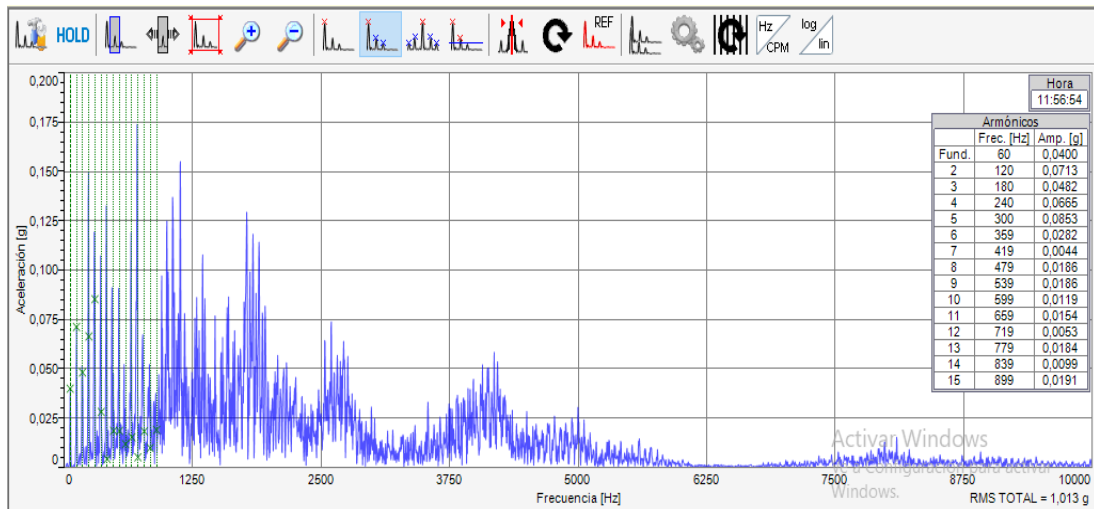
### 3.7.5 Aluminio

#### 3.7.5.1 Variable aceleración



**Figura 24-3:** MAINTraq Analyzer 3.1 (forma de onda-forma de frecuencia natural, vertical, aceleración)

**Fuente:** Estupiñán, A.; Benítez, C. 2021



**Figura 25-3:** MAINTraq Analyzer 3.1 (espectro-frecuencia natural, vertical, aceleración)

**Fuente:** Estupiñán, A.; Benítez, C. 2021

En los espectros analizados se observa que, antes de la fractura se incrementa la amplitud de la onda y de armónicos, durante este intervalo de fractura aparece armónicos de piso de ruido.

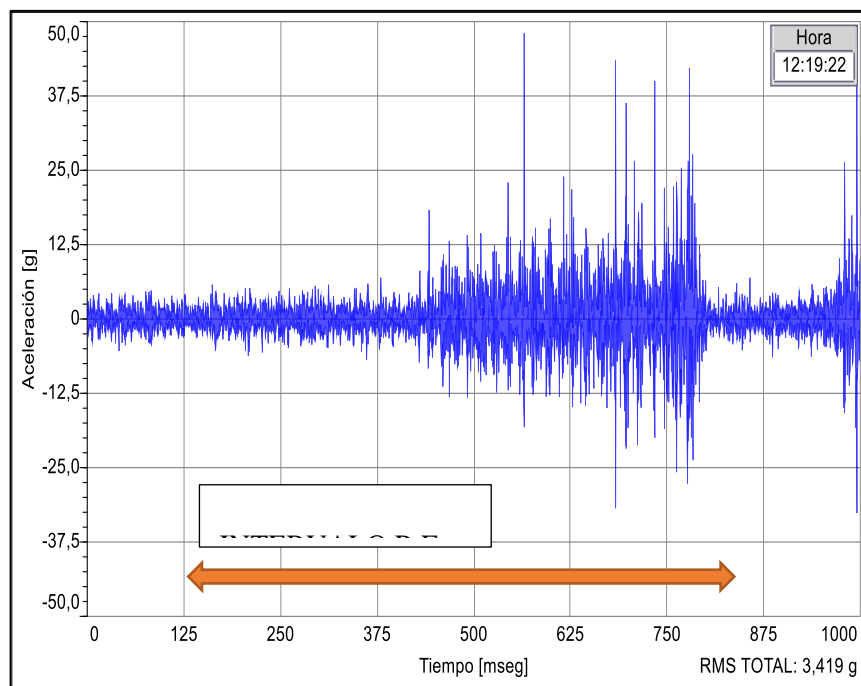
En la tabla 10. se muestra la recolección de datos de los RMS totales, son los que evalúan el contenido total de armónicos.

**Tabla 6-3: RMS totales**

PROBETA	CARGA (Kg)	ACELERACION (g)	VELOCIDAD (mm/s)
ACERO	27	7,663	7,41
BRONCE	31	3,332	2,399
ALUMINIO	23	1,013	4,71

Realizado por: Estupiñán, A.; Benítez, C. 2021

En la figura 33 se hace énfasis en el número de ciclos o el tiempo que, transcurrido, se conoce como el intervalo P-F, ya que es un intervalo entre la falla potencial y la falla funcional.



**Figura 26-3: Grafica del intervalo P-F**

Fuente: Estupiñán, A.; Benítez, C. 2021

### 3.8 Intervalo P-F

Debido al rpm de placa de motor y los tiempos en mseg del intervalo P-F se muestra en la tabla 34 el número de ciclos que se completan, desde el momento que inicia el incremento de vibración del proceso, hasta su etapa final de fractura.

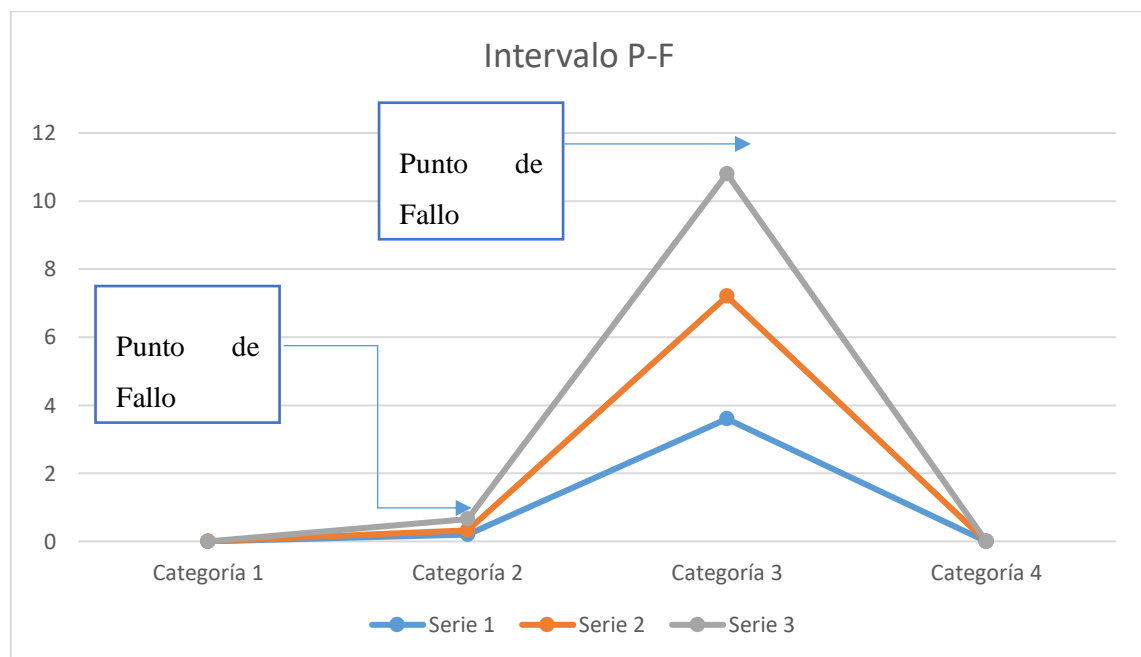
### 3.8.1 Intervalo P-F acero, bronce, aluminio

Para poder realizar el intervalo P-F, en base a cada probeta se utiliza el número de ciclos por minutos con el que trabaja la máquina, 3600 ciclos/minuto, además de eso se considera el tiempo en el que se realiza cada ciclo que viene a ser de 3.6 mseg.

**Tabla 7-3:** Características de las probetas

Materiales	Falla Potencial	Falla Funcional
Acero	0.200	3.6 mseg
Bronce	0.125	3.6 mseg
Aluminio	0.325	3.6 mseg

Realizado por: Estupiñán, A.; Benítez, C. 2021

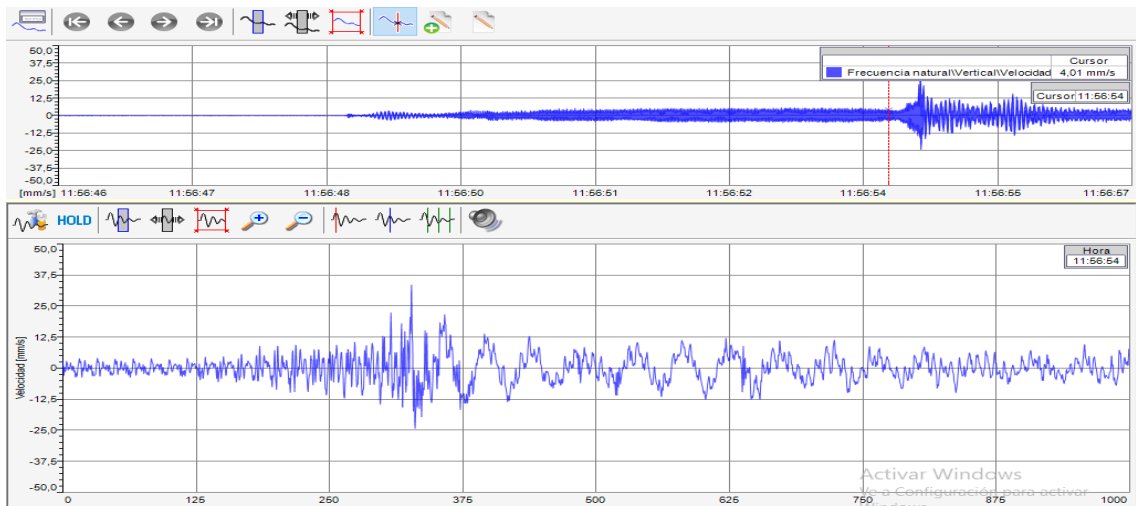


**Gráfico 4-3:** Grafica del Intervalo P-F; donde serie 1 es acero, serie 2 es bronce, serie 3 es aluminio

Realizado por: Estupiñán, A.; Benítez, C. 2021

Se hace notorio en el gráfico que después del análisis realizado prevalece el intervalo P-F del aluminio debido a sus propiedades de composición y mecanizado del material se obtiene un valor de 0.325 mseg.

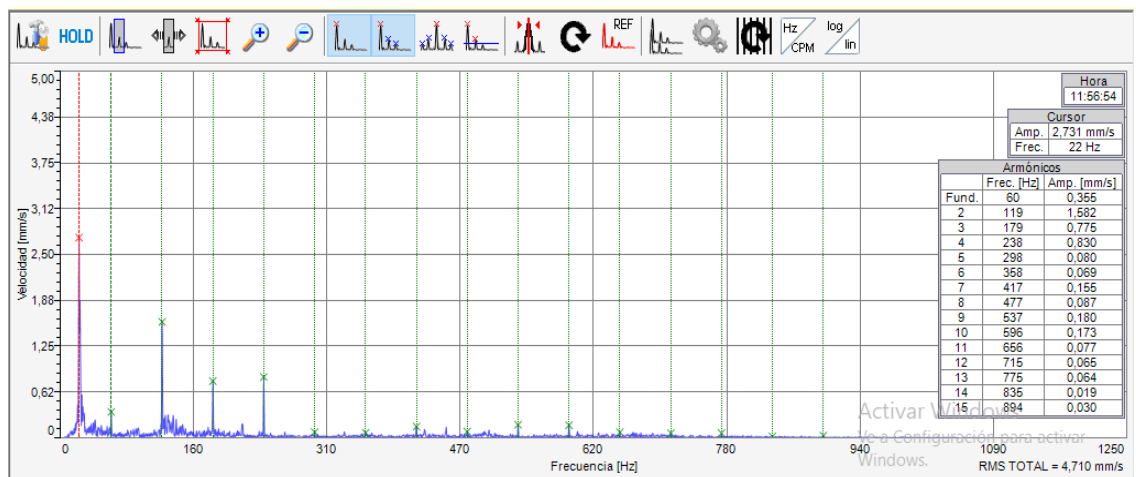
### 3.8.1.1 Variable velocidad



**Figura 27-3:** MAINTraq Analyzer 3.1 (forma de onda-forma de frecuencia natural, vertical, aceleración)

**Fuente:** Estupiñán, A.; Benítez, C. 2020

En la figura se analiza la paleta de cursos de armónicos y se puede identificar que el armónico que prevalece en el momento de la fractura es el 2X. Esto indica una soldadura mecánica.



**Figura 28-3:** MAINTraq Analyzer 3.1 (espectro-frecuencia natural, vertical, aceleración)

**Fuente:** Estupiñán, A.; Benítez, C. 2021

## CAPÍTULO IV

### 4 GESTIÓN DEL PROYECTO

#### 4.1 Cronograma de trabajo

**Tabla 1-4:** Cronograma del proyecto

Nº	Tarea	Fecha Inicio	Fecha Fin	Horas
1	Selección de modulo en base a la norma ISO 1143:2010 (Metallic material- Rotating bar bending fatigue testing.)	8/10/2019	10/11/2019	60 horas
2	Adquisición de componentes en base a selección y cálculos.	20/11/2019	18/12/2019	45 horas
3	Montaje y maquinado de los componentes del módulo.	5/1/2020	10/3/2020	200 horas
4	Acabado superficial del módulo.	11/3/2020	15/3/2020	12 horas
	Pruebas de alineación y ensayos iniciales.	16/3/2020	18/3/2020	10 horas
5	Avance en desarrollo de Marco Teórico.	25/3/2020	20/10/2020	600 horas
8	Ensayos para termografía y recolección de datos en todos los materiales	8/11/2020	10/11/2020	10 horas
9	Ensayos para vibraciones y recolección de datos en todos los materiales	15/11/2020	17/11/2020	10 horas
10	Análisis de resultados en software (SATIR y MainTRAQ Viewer)	3/12/2020	10/3/2021	200 horas
11	Desarrollo y finalización del trabajo escrito	20/3/2021	3/7/2021	220 horas

Realizado por: Estupiñán, A.; Benítez, C. 2021

## 4.2 Costos

Los costos de elaboración del módulo engloban diferentes tipos de costos, entre ellos tenemos, costos directos que detallan los valores de compra de materiales y equipos; e indirectos donde se incluye la documentación y transporte.

Dentro de la inversión total del módulo se encuentra el costo real y total necesario para alcanzar el módulo con las características deseadas y planteadas.

**Tabla 2-4:** Costos

	Ítems	Características	Cantidad	Costo
	Motor Eléctrico	220 v Trifasico WEG	1	\$ 130,00
	Acople Love Joy	L.070	1	\$50,00
	Acero de Transmisión 1"	SAE 1018	2 m	\$ 18,00
	Chumaceras	NTN UC205-100	2	\$ 40,00
	Varilla de Bronce 3/4"		5m	\$ 80,00
	Varilla de Acero 3/4"	SAE 4340	5 m	\$ 30,00
<b>Costos</b>	Varilla de Aluminio 3/4"		5 m	\$ 40,00
<b>Directos</b>	Plancha Oxicorte 12mm		1	\$ 45,00
	Mandril de Autoapriete	B 16 de 1-13 mm	2	\$ 84,00
	Rodamientos SKF	Tipo 61805	2	\$ 20,00
	Sistema de sensor de carga	Integrado HX711	1	\$ 50,00
	Pantalla LCD	Color Azul 16*2	1	\$ 10,00
	Acrílico de Protección	Acrilico Transparente	1	\$ 20,00
	Pintura	Esmalte azul varios tonos	1	\$ 50,00
	Elementos de sujeción	Pernos y prisioneros	20	\$ 20,00
	Sistema electrico	Cable, botonera y enchufe	1	\$ 30,00
<b>Costos</b>	Impresiones		1	\$ 70,00
<b>Indirectos</b>	Transporte		1	\$ 70,00
	Internet		1	\$ 35,00
	Gastos varios		1	\$ 200,00
<b>Costo Total</b>				<b>\$ 1.092,00</b>

Realizado por: Estupiñán, A.; Benítez, C. 2021

## CONCLUSIONES

Se implementa el presente módulo de tipo ensayo de flexión rotativa con aplicación de peso en un solo punto, para permitir el uso de las tecnologías de mantenimiento predictivo que dispone el taller como lo son: Análisis termográfico y Vibracional, de la misma manera se busca permitir al estudiante el realizar ensayos con ejes de diferente contenido de carbono siempre y cuando las probetas sean las adecuadas para el módulo.

Al analizar la variación de temperatura de los materiales se determina que la temperatura incrementa gradualmente con respecto a la carga, así como al tiempo; la temperatura más alta presente se evidenció en el proceso de ensayo del material de tipo acero la temperatura es mayor, incluso cuando el bronce presenta mayor dureza en su composición la temperatura no exige mayor incremento, por otro lado cuando se trata de aluminio por ser un materia con concentración de carbono casi nula se evidencia una temperatura sin variación.

Durante el análisis realizado con los diferentes materiales se evidencia que la fractura de las probetas es directamente proporcional al tiempo, mientras que la carga ayuda a que dicho tiempo aumente o disminuya según la aplicación de la misma carga; además se evidencia que con la carga y el paso del tiempo las vibraciones van aumentando por la flexión que se realiza en la probeta hasta llegar a la fractura, además un instante antes de dicha fractura se encuentra el armónico de piso de ruido que determina el incremento de las vibraciones por la acción de la carga, la velocidad y el tiempo.

Se implementó el módulo en base a la norma 1143:2010, se tiene en cuenta las características de la maquina en un solo punto de apoyo y de las probetas de tipo reloj, mismas características que establecen, la sección de la probeta reducida en la mitad y el modelo de aplicación de carga de la maquina; además conjuntamente con estas características se ayuda en la realización de ensayos tanto de termografía como de vibraciones.



## RECOMENDACIONES

Implementar el uso de un variador de frecuencia para poder contrastar los ensayos realizados en diferentes frecuencias y así tener un mayor rango de termogramas y espectros vibracionales, para de esta manera poder realizar un estudio con mayor profundidad en un diagrama P-F; así como ayudar en la selección de elementos más resistentes para la industria.

Utilizar nuevos materiales para los ensayos; se recomienda realizar probetas con materiales de diferentes aleaciones, con el uso de estos materiales se puede determinar la influencia exclusiva del carbono dentro de los materiales y cómo influye en los procesos de mecanizado y resistencia de materiales en efectos adversos como la fatiga.

Implementar el uso de un tacómetro para poder determinar la velocidad y el número de ciclos con los que trabaja el módulo, esto va a ayudar a realizar un análisis más a profundidad de la fractura de cada material pues permitir contabilizar los ciclos transcurridos desde el arranque hasta la fractura.

Realizar ensayos utilizando carga fija, teniendo en cuenta que las características del módulo son las adecuadas para realizar esto; el ensayo con carga fija permite obtener nuevos modelos de estudio y compararlos con los ya existentes en base a un contraste de tiempo.

## BIBLIOGRAFÍA

**ALBELLA, J, y otros.** *Introducción a la Ciencia de Materiales.* [En línea] Madrid. Editorial CSIC, 1993.

**ANGLADA, Marc.** *Fractura de Materiales.* [En línea] Barcelona Editorial Universidad Politecnica de Cataluña, 2002.

**ASHBY, Michael y JONES, David.** *Materiales para Ingeniería.* [En línea] Barcelona. Editorial Reverté, 2009. Vol. 2.

**AYNETO, Xavier.** *Mecánica del Medio Continuo en la Ingeniería.* [En línea] Barcelona. Editorial UPC GRAU, 2012.

**BARROSO, Segundo, GÍL, José y CAMACHO, Ana.** *Introducción al conocimiento de los materiales y sus aplicaciones.* [En línea] Madrid. Editorial UNED, 2010.

**CALLISTER, William.** *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales.* [En línea] Barcelona. Editorial Reverté S.A, 2007.

**PRIETO, Edwin.** *Diseño y construcción de un móvil-cortador de desplazamiento omnidireccional que segmenta y calcula la trayectoria de corte para una imagen-modelo.* [En línea] 2015, Research Gate, págs. 1-23.

**GONZÁLEZ, Jorge.** *Mecánica de Fractura.* [En línea] Ciudad de México. Editorial Limusa, 2004.

**GROOVER, Mikell.** *Fundamentos de Manufactura Moderna, materiales, procesos y sistemas.* [En línea] Naucalpan de Juárez. Editorial Prentice Hall, 1997.

**HERNÁNDEZ, Héctor y Espejo, Edgar.** *Mecánica de Fracturas y Análisis de Fallas.* [En línea] Bogotá. Editorial Universidad Nacional de Colombia, 2002.

**CONTRERAS, U, y otros.** *Identificación de Aceros por Espectroscopia de Rompimiento Inducido por Laser.* [En línea] Vol. 58 (2012) Revista Mexicana de Física, Vol. 1, págs. 184-190.

**ÁLVARO, Héctor y MESA, Dario.** *La importancia del método en la selección de materiales.* [En línea] Vol. 10 (2004) Scientia et Technica, , págs. 175-180.

**MARTINEZ, José.** *Aplicacion de métodos por ultrasonidos en los ensayos de materiales mecánicos.* [En línea] Madrid. Editorial CSIC, 1986.

**MORRAL, F, JIMENO, E y MOLERA, P.** *Metalurgia General.* [En línea] Barcelona. Editorial Reverté S.A, 2004.

**MOSQUERA, Alejandro.** *Las vibraciones mecánicas y su aplicacion al mantenimiento predictivo.* [En línea] La Habana. 2000 CDCH UCV,.

**NEWELL, James.** *Ciencia de materiales, aplicaciones en ingeniería.* [En línea] Ciudad de México, Alfaomega, 2016.

**NÚÑEZ, Carlos, ROCA, Antoni y JORBA, Jordi. 2013.** *Comportamiento Mecánico de los Materiales.* [En línea] Barcelona. Editorial Universitat de Barcelona, 2013. Vol. 2.

**RODRÍGUEZ, Mariano, y otros.** *Funadamento de Resistencia de Materiales.* [En línea] Madrid Editorial UNED, 2011.

**SALÁN, María.** *Tecnología del Proceso de Transformación de Materiales.* [En línea] Barcelona. Editorial UPC Ediciones, 2005.

**VÁZQUEZ, Alfonzo y DE DAMBORENEA, Juan.** *Ciencia e Ingeniería de la superficie de los materiales metálicos.* [En línea] Madrid Editorial CSIC, 2000.

# **ANEXOS**

## ANEXO A: SELECCIÓN DE CHUMACERAS

Dimensiones							Capacidad de carga básica		Carga límite de fatiga	Velocidad límite	Masa	Designación
d	D	B	C	d <sub>1</sub> =	s <sub>1</sub>	r <sub>1,2</sub> min.	C	C <sub>0</sub>	P <sub>0</sub>	con tolerancia de eje h6	kg	
mm							kN		kN	r. p. m.		-
<b>12</b>	40	27,4	12	24,2	15,9	0,3	9,56	4,75	0,2	9 500	0,12	▶ YAR 203/12-2F
<b>15</b>	40	27,4	12	24,2	15,9	0,3	9,56	4,75	0,2	9 500	0,11	▶ YAR 203/15-2F
<b>17</b>	40	22,1	12	24,2	15,9	0,3	9,56	4,75	0,2	9 500	0,08	▶ YAT 203
	40	27,4	12	24,2	15,9	0,3	9,56	4,75	0,2	9 500	0,1	▶ YAR 203-2F
<b>20</b>	47	25,5	14	28,2	18,3	0,6	12,7	6,55	0,28	8 500	0,13	▶ YAT 204
	47	31	14	28,2	18,3	0,6	10,8	6,55	0,28	5 000	0,15	▶ YAR 204-2RF/HV
	47	31	14	28,2	18,3	0,6	10,8	6,55	0,28	5 000	0,15	▶ YAR 204-2RFGR/HV
	47	31	14	28,2	18,3	0,6	12,7	6,55	0,28	1 800	0,15	▶ YARAG 204
	47	31	14	28,2	18,3	0,6	12,7	6,55	0,28	5 000	0,15	▶ YAR 204-2RF
	47	31	14	28,2	18,3	0,6	12,7	6,55	0,28	5 000	0,15	▶ YAR 204-2RF/VE495
	47	31	14	28,2	18,3	0,6	12,7	6,55	0,28	8 500	0,15	▶ YAR 204-2F
<b>25</b>	52	27,2	15	33,7	19,8	0,6	14	7,8	0,335	7 000	0,16	▶ YAT 205
	52	34,1	15	33,7	19,8	0,6	11,9	7,8	0,335	4 300	0,19	▶ YAR 205-2RF/HV
	52	34,1	15	33,7	19,8	0,6	11,9	7,8	0,335	4 300	0,19	▶ YAR 205-2RFGR/HV
	52	34,1	15	33,7	19,8	0,6	14	7,8	0,335	1 500	0,19	▶ YARAG 205
	52	34,1	15	33,7	19,8	0,6	14	7,8	0,335	4 300	0,19	▶ YAR 205-2RF
	52	34,1	15	33,7	19,8	0,6	14	7,8	0,335	4 300	0,19	▶ YAR 205-2RF/VE495

## ANEXO B: SELECCIÓN DE RODAMIENTOS

Dimensiones principales			Capacidad de carga básica		Carga límite de fatiga	Velocidades nominales		Masa	Designaciones	
d	D	B	dinámica C	estática C <sub>0</sub>	P <sub>u</sub>	Velocidad de referencia	Velocidad límite <sup>1)</sup>		Rodamiento abierto o tapado en ambos lados	tapado en un lado <sup>1)</sup>
mm			kN		kN	r. p. m.		kg	-	
25	37	7	4,36	2,6	0,125	-	11 000	0,022	▶ 61805-2RS1	-
	37	7	4,36	2,6	0,125	38 000	19 000	0,022	▶ 61805-2RZ	-
	37	7	4,36	2,6	0,125	38 000	24 000	0,022	▶ 61805	-
	42	9	7,02	4,3	0,193	-	10 000	0,045	▶ 61905-2RS1	-
	42	9	7,02	4,3	0,193	36 000	18 000	0,045	▶ 61905-2RZ	-
	42	9	7,02	4,3	0,193	36 000	22 000	0,045	▶ 61905	-
	47	8	8,06	4,75	0,212	32 000	20 000	0,055	▶ 16005	-
	47	12	11,9	6,55	0,275	32 000	20 000	0,078	▶ 6005	-
	47	12	11,9	6,55	0,275	-	9 500	0,081	▶ 6005-2RSH	6005-RSH
	47	12	11,9	6,55	0,275	32 000	16 000	0,08	▶ 6005-2RSL	6005-RSL
	47	12	11,9	6,55	0,275	32 000	16 000	0,083	▶ 6005-2Z	6005-Z
	47	16	11,2	6,55	0,275	-	9 500	0,11	▶ 63005-2RS1	-

ANEXO C: MANUAL DE USUARIO DEL EQUIPO

# Manual de Operaciones

## Máquina de Flexión Rotativa

### Proyecto de Tipo Tecnológico

Autores:

Carlos Benítez

Andrés Estupiñán

## CONTENIDO

<b>Capítulo 1. Seguridad .....</b>	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
1.1. Generalidades .....	¡Error! Marcador no definido.
1.2. Seguridad Básica .....	¡Error! Marcador no definido.
<b>Capítulo 2. Datos Técnicos.....</b>	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
2.1. Conexión Eléctrica. ....	¡Error! Marcador no definido.
2.2. Condiciones Ambientales .....	¡Error! Marcador no definido.
2.3. Emisiones .....	<b>4</b>
<b>Capítulo 3. Montaje.....</b>	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
3.1. Montaje de probetas .....	¡Error! Marcador no definido.
3.2. Toma de datos .....	¡Error! Marcador no definido.



## Capítulo 1. Seguridad

### 1.1. Generalidades

El uso de este equipo debe estar bajo estricta autorización del encargado del taller, además, se debe proceder acorde a las instrucciones y recomendaciones que están realizadas en el presente manual. Las personas que no actúen dentro de los límites de seguridad y recomendaciones establecidas representan un riesgo en el desarrollo de los ensayos.

### 1.1. Seguridad Básica

- ✓ Consultar códigos y normativa que rige dentro del taller antes de realizar ensayos en el equipo.
- ✓ El encargado del taller es el responsable de asegurar la seguridad antes de realizar los ensayos.
- ✓ Se debe utilizar protección personal: mandil, gafas, guantes.
- ✓ Los equipos de protección antes mencionados deben ser utilizados por cada estudiante de manera individual para realizar los ensayos.
- ✓ Esta máquina es controlada de manera manual debido a eso se debe tener en cuenta que nadie manipule los botones de arranque y paro sin previo aviso y autorización.
- ✓ Por un mal uso de la maquina se puede provocar lesiones severas.
- ✓ La alimentación del equipo en el ámbito eléctrico debe ser la adecuada para asegurar un correcto funcionamiento.
- ✓ No se debe manipular por ninguna razón el panel eléctrico del banco de trabajo.
- ✓ La alimentación para el display de carga es distinta a la de la máquina, se debe tener en cuenta el lugar de la conexión.
- ✓ No se debe realizar trabajos de limpieza o mantenimiento cuando la maquina está conectada a la fuente de luz.
- ✓ El arranque de la maquina se debe realizar, siempre y cuando, las protecciones se encuentren instaladas.
- ✓ Para realizar el arranque de la maquina se debe asegurar la sujeción de la pieza dentro de los mandriles.
- ✓ No se debe manipular la frecuencia dentro del panel de control del banco de trabajo, un exceso en la velocidad puede provocar un desprendimiento de las piezas.
- ✓ Las piezas no deben superar la dimensión estandarizada por la norma vigente de la máquina.

- ✓ No es recomendable ni seguro utilizar piezas más grandes o de mayor dimensión.

## Capítulo 2. Datos Técnicos

### 2.1. Conexión Eléctrica.

TIPO DE CONEXIÓN	VALORES NOMINALES		
	Voltaje	Amperaje	Potencia
TRIANGULO-ESTRELLA	440 V	1,54 Amp	1 HP
ESTRELLA-ESTRELLA	220 V	3,07 Amp	1 HP

### 2.2. Condiciones Ambientales

CONDICIONES AMBIENTALES	
CARACTERISTICAS	VALOR
TEMPERATURA	25 °C
HUMEDAD	28%

### 2.3. Emisiones

Las emisiones de gases o productos contaminantes de la máquina son nulas.

Las emisiones de ruido son inferiores a los 80 dB, dicho valor está contemplado en la normativa de seguridad.

## Capítulo 3. Montaje

### 3.1. Montaje de probetas

- ✓ Se afloja los mandriles autoroscantes, mediante la llave exclusiva de los mismos.
- ✓ Se debe quitar el mandril izquierdo, mismo en el que se apoya los pernos de presión.
- ✓ Se debe utilizar una llave de boca de la medida de media pulgada (1/2")
- ✓ Con la llave mencionada se quita los pernos con los que se encuentra anclado el mandril mencionado para colocar la probeta.
- ✓ La probeta que se vaya a colocar debe estar centrada, para que se pueda morder en ambos lados de los mandriles.
- ✓ Una vez centrada la pieza se procede a ajustar los mandriles autoroscantes y de esta manera la probeta se va a encontrar fija.
- ✓ Se debe colocar los pernos del mandril con el que se aplica la fuerza de flexión.

- ✓ Finalmente se coloca la protección del operador, la caja de acrílico transparente, para así evitar la salida de cualquier partícula en el instante de la ruptura.

### **3.2. Toma de datos**

- ✓ Para la prueba de termografía se debe instalar la cámara, después de realizar el enfoque, mediante el trípode del equipo para que se quede fijo en el sitio del disparo.
- ✓ Se debe controlar los tiempos entre disparos para poder llevar el correcto listado de datos.
- ✓ Es importante tener en cuenta que la cámara no debe ser manipulada desde el lente pues se pierde el enfoque.
- ✓ Para las pruebas de vibraciones, se debe utilizar la configuración de dos acelerómetros.
- ✓ Colocamos el primer acelerómetro en el eje radial, en los puntos de medición colocados en la máquina, el segundo acelerómetro será en medida axial.
- ✓ Es importante que nada se encuentre encima del banco de trabajo puesto que eso afecta a la medición.